

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İKİ EKSENLİ GÜNEŞ TAKİP PLATFORMLARINDA EĞİK EKSENLİ
TASARIM UYGULAMASI VE EKSEN MOTORLARININ ENERJİ
TÜKETİMİNİN İNCELENMESİ**

İLKAY KUNDUZ

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İKİ EKSENLİ GÜNEŞ TAKİP PLATFORMLARINDA EĞİK
EKSENLİ TASARIM UYGULAMASI VE EKSEN
MOTORLARININ ENERJİ TÜKETİMİNİN İNCELENMESİ

İLKAY KUNDUZ

Doç. Dr. Nuran YÖRÜKEREN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi M. Kenan DÖŞOĞLU
Jüri Üyesi, Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Hasbi İSMAİLOĞLU
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi


.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 26.11.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüzde enerji talebi hızla artmaktadır. Petrol ve organik tabanlı diğer enerji türleri aşırı tüketim sonucunda giderek azalmakta ve yakın gelecekte bir gün tükenme tehlikesiyle karşılaşılma kaçınılmaz olacaktır. Bunun alternatiflerinden birisi de yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisidir. Bu çalışma ile fotovoltaik panelden elektrik enerjisi üretmede kullanılan iki eksenli güneş takip platformlarının farklı bir tasarımı yapıp daha verimli çalışma biçimi incelenmiştir.

Eğik eksenli güneş takip platformunun tasarımının geliştirilmesi ve prototip çalışmanın hayata geçirilmesinde bana tüm desteğini veren değerli hocam Nuran Yörükeren'e teşekkür ederim. Bu prototip platformun parça imali ve kurulması noktasında işletmenin tüm imkanlarını bize sunan Amcor Flexibles İstanbul Ambalaj San. ve Tic. A.Ş. firmasına teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu projenin bütün aşamalarında benden desteğini esirgemeyen sevgili eşime ve çocuklarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kasım-2018

İlkay KUNDUZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
TABLolar DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	2
1.1. Tez Çalışmasının Amacı	2
1.2. Önceki Çalışmalar	2
1.3. Tez Çalışmasının Katkısı	5
2. GÜNEŞ ENERJİSİ KAVRAMLARI	6
2.1. Güneş Enerjisi Kullanımı	7
2.1.1. Düşük ısı teknolojiler	7
2.1.2. Yüksek ısı teknolojiler	8
2.1.3. Fotovoltaik teknolojiler	9
2.2. Türkiye'nin Potansiyeli	9
2.3. Güneş Radyasyonu	10
2.4. Fotovoltaik Modüller	11
2.4.1. Yarı-iletken fotovoltaik hücreler	11
2.4.2. Silikon kristal fotovoltaik hücreler	13
2.4.3. İnce film teknolojileri	15
2.4.3.1. Amorf silikon hücreler	16
2.4.3.2. Kadmiyum tellür hücreler	17
2.4.3.3. Bakır indiyum galyum selenür	17
2.4.4. Gelişen fotovoltaik hücre teknolojileri	18
2.5. Fotovoltaik Konvertörler	20
2.5.1. DC-DC Konvertörler	21
2.5.1.1. Maksimum güç noktası takibi	21
2.5.2. DC-AC Konvertörler (Eviriciler)	24
2.5.2.1. Merkezi eviriciler	24
2.5.2.2. Modül entegre eviriciler	25
2.5.2.3. Dizi eviriciler	25
2.5.2.4. Çoklu dizi eviriciler	26
2.5.3. Adalanma	26
2.6. Güneş Takip Platformları	27
2.6.1 Tek eksenli takip platformları	27
2.6.2. İki eksenli takip platformları	28
2.7. FV Sistem Konfigürasyonları	29
2.7.1. Direkt yük bağlantılı sistemler	29
2.7.2. Şebeke bağlantısız sistemler	29
2.7.3. Şebeke bağlantılı sistemler	30

2.8. FV Sistemlerde Depolama	30
2.8.1. Akülü depolama sistemleri	30
2.8.1.1. Kurşun-asit aküler	31
2.8.1.2. Nikel-kadmiyum aküler	31
2.8.1.3. Lityum-iyon aküler	32
2.8.2. Hidrojen depolama sistemleri	32
2.8.3. Pompalı su depolama sistemleri	32
2.8.4. Basınçlı gaz depolama sistemleri	33
3. EĞİK EKSENLİ TASARIM UYGULAMASI	34
3.1. Prototip Çizim ve Tasarımın Temel Öğeleri	34
3.2. Kullanılan Malzemelerin Tanıtımı	36
3.3. Kullanılan Yöntemin Anlatımı	39
3.4. Tasarımın Matematiksel Modellemesi	41
3.4.1. Güneş takip algoritmaları	42
3.4.2. Güneş vektörü hesabı	42
3.4.3. Güneş pozisyonu algoritması (SPA)	43
3.4.4. Eğik düzlem transformasyonu	45
3.5. Alınan Ölçümler ve Grafikler	50
3.5.1. Test günündeki güneşlenme değerleri	50
3.5.2. Tek eksenli çalışma motor tüketimi	52
3.5.3. İki eksen çalışma motor tüketimleri	54
3.5.4. Tek eksenli sistem hata analizi	56
3.5.5. FV panelin eksen açısı hatasına bağlı verim kaybı hesabı	63
3.5.6. Eğik eksenli sistemin hata optimizasyonlu yazılım ile testi	64
3.5.7. Eğik eksenli tasarımın farklı zaman aralıkları ile performansı	66
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	67
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR	70
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	74
ÖZGEÇMİŞ	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Türkiye güneşlenme atlası	10
Şekil 2.2. Konvansiyonel güneş hücresi	12
Şekil 2.3. Mono-kristal güneş hücresi	13
Şekil 2.4. Poli-kristal güneş hücresi.....	14
Şekil 2.5. İnce film fotovoltaik hücre	15
Şekil 2.6. Fotovoltaik modül akım-gerilim çalışma eğrisi	22
Şekil 2.7. Fotovoltaik evirici tipleri	24
Şekil 2.8. Güneş takip platformu tipleri	28
Şekil 3.1. Eğik eksenli tasarım prototip çizimi	34
Şekil 3.2. Güneşin yaz ve kış dönemlerinde gökyüzündeki rotası	35
Şekil 3.3. Platform iskele fotoğrafı	37
Şekil 3.4. Eğik eksen motor ve redüktör fotoğrafı	37
Şekil 3.5. Kontrol panosu	38
Şekil 3.6. Sistemde kullanılan güneş radyasyon sensörü.....	40
Şekil 3.7. Sayaç	40
Şekil 3.8. Prototipi geliştirilen tasarımın işletmedeki fotoğrafı	41
Şekil 3.9. Azimut ve yükseklik açıları	41
Şekil 3.10. Güneş vektörü ve onu tanımlayan açılar.....	44
Şekil 3.11. Eğik eksenli tasarıma ait eğik koordinat sistemi açıları.....	45
Şekil 3.12. Takip algoritması akış diyagramı.....	48
Şekil 3.13. 1 Haziran tarihindeki güneşlenme grafiği.....	50
Şekil 3.14. 3 Haziran tarihindeki güneşlenme grafiği.....	51
Şekil 3.15. 4 Haziran tarihindeki güneşlenme grafiği.....	51
Şekil 3.16. Kutupsal eksen motoru akım grafiği- 1 haziran sabah.....	52
Şekil 3.17. Kutupsal eksen motoru akım grafiği- 1 haziran öğlen.....	52
Şekil 3.18. Kutupsal eksen motoru akım grafiği- 1 haziran akşam.....	52
Şekil 3.19. Motor akımları ölçüm devresi.....	53
Şekil 3.20. Kutupsal eksen 3 haziran çalışma grafiği – sabah	54
Şekil 3.21. Kutupsal eksen 3 haziran çalışma grafiği – öğlen.....	54
Şekil 3.22. Kutupsal eksen 3 haziran çalışma grafiği – akşam	54
Şekil 3.23. Yardımcı eksen 3 haziran çalışma grafiği.....	55
Şekil 3.24. Tek eksen 1 haziran çalışması yükseliş açısı hatası.....	57
Şekil 3.25. Tek eksen 4 temmuz çalışması yükseliş ve azimut açısı hataları	58
Şekil 3.26. 4 Temmuz günü güneşlenme grafiği.....	59
Şekil 3.27. 5 Temmuz tek eksen yükseliş ve azimut açısı hataları grafiği.....	60
Şekil 3.28. 5 Temmuz günü güneşlenme grafiği	61
Şekil 3.29. 7 Temmuz tek eksen yükseliş ve azimut açısı hataları grafiği.....	62
Şekil 3.30. 7 Temmuz günü güneşlenme grafiği.....	63
Şekil 3.31. 17 Eylül günü güneşlenme grafiği	64
Şekil 3.32. 20 Eylül günü güneşlenme grafiği	65
Şekil 3.33. 24 Eylül günü güneşlenme grafiği	65

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Üç farklı günde alınan sistemin test değerleri	56
Tablo 3.2. Tek eksenli sistemin yükseklik hatası analizi	56
Tablo 3.3. Tek eksenli sistemin 4 Temmuz'da 15° ile sınırlandırılmış yükseklik hata analizi	58
Tablo 3.4. Tek eksenli sistemin 5 Temmuz'da 10° ile sınırlandırılmış azimut ve yükseklik hata analizi	60
Tablo 3.5. Tek eksenli sistemin 7 Temmuz'da $\Delta\alpha=\Delta\gamma$ algoritması ile sınırlandırılmış azimut ve yükseklik hata analizi	62
Tablo 3.6. FV panel veriminin eksen açısı hatasına bağlı düşüşü	64
Tablo 3.7. Takip zaman aralığının değişiminin verime etkisi	66
Tablo 3.8. Hata optimizasyonlu ölçüm tablosu	68

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Akım birimi, (Amper)
V	: Gerilim birimi, (Volt)
W	: Güç birimi, (Watt)
Wh	: Enerji birimi, (Watt-saat)
α	: Yükseklik açısı, (Derece)
γ	: Azimut açısı, (Derece)

Kısaltmalar

AADAT	: Azimuth Altitude Double Axis Tracker (Azimut-Yükseklik Tipi İki Eksenli Takipçi)
AC	: Alternating Current (Alternatif Akım)
CAES	: Compressed Air Energy Storage (Basınçlı Gaz Depolama Sistemi)
CdTe	: Cadmium Telluride (Kadmiyum Tellür)
CIGS	: Copper Indium Gallium Selenide (Bakır İndiyum Galyum Selenür)
CPV	: Concentrated Photovoltaics (Konsantre Fotovoltaik)
CSP	: Concentrated Solar Power (Konsantre Güneş Sistemi)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
DSSC	: Dye Sensitized Solar Cell (Boya Duyarlı Güneş Hücreleri)
EİE	: Elektrik İşleri Etüd İdaresi
FV	: Fotovoltaik
GEPA	: Güneş Enerji Potansiyeli Atlası
GPS	: Global Positioning System (Küresel Konumlama Sistemi)
HSAT	: Horizontal Single Axis Tracker (Yatay Tek Eksenli Takipçi)
IEA	: International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor (Kapısı İzole İki kutuplu Transistör)
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör)
MPP	: Maximum Power Point (Maksimum Güç Noktası)
MPPT	: Maximum Power Point Tracking (Maksimum Güç Noktası Takip)
NREL	: National Renewable Energy Laboratory (Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı)
OGH	: Organik Güneş Hücresi
PHS	: Pumped Hydro Storage (Pompalı Su Depolama Sistemi)
PLC	: Programmable Logic Controller (Programlanabilir Mantık Denetleyici)
SPA	: Solar Positioning Algorithm (Güneş Pozisyon Algoritması)
TSAT	: Tilted Single Axis Tracker (Eğik Tek Eksenli Takipçi)
TTDAT	: Tip-tilt Double Axis Tracker (Uçtan Eğilebilir İki Eksenli Takipçi)
VSAT	: Vertical Single Axis Tracker (Dikey Tek Eksenli Takipçi)
YAG	: Yttrium Aluminium Garnet (Yitriyum Alüminyum Garnet)

İKİ EKSENLİ GÜNEŞ TAKİP PLATFORMLARINDA EĞİK EKSENLİ TASARIM UYGULAMASI VE EKSEN MOTORLARININ ENERJİ TÜKETİMİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Enerji talebinin sürekli arttığı günümüzde, yenilenebilir enerji kaynağı olarak fotovoltaik panellerin kullanımı giderek artmaktadır. Daha önce yapılan bir çok akademik çalışmada, fotovoltaik sistemlerinin sabit montaj durumu ile hareketli platform üzerindeki uygulamaları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Uygulamaların yapıldığı coğrafik koşullara bağlı olarak sayısal değer değişmekle beraber iki eksenli hareketli fotovoltaik sistemlerinin verimlerinin daha yüksek olduğu doğrulanmıştır. Bu çalışmada ise hareketli platformların fotovoltaik panel enerji üretimini artırırken beraberinde getirdiği enerji tüketimini minimum düzeye indireyecek, eğik kutupsal eksenli bir tasarım geliştirilmiştir. Eksen hareketleri için piyasada kolay bulunan düşük maliyetli doğru akım motorları seçilmiştir. Programlanabilir mantık kontrolör (PLC) kullanılan sistem, güneş takibini sensör kullanmadan matematiksel hesaplama ile yapmaktadır. Tasarlanan sistemde mikroevirici kullanılarak üretilen enerji şebekeye verilmekte ve böylece depolama sistemine ihtiyaç duyulmamaktadır. Tasarımın en önemli yeniliği günlük bazda tek eksen çalışarak çift eksen çalışan takip platformlarına yakın bir verim elde etmesidir. 260Wp gücünde bir prototipi yapılan sistem, İstanbul ili Tuzla ilçesi şartlarında iki eksen, tek eksen ve sabit olarak çalıştırılmıştır. Sistemin alternatif akım, gerilim ve enerji değerleri elektronik sayaç ile takip edilmektedir. Bu çalışma sonucunda iki eksenli sistem verim artışı 22,1% çıkarken, tasarımın önerilen tek eksenli çalışma şekli ile verim artışı 20,8% çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Eğik Eksenli Takip Platformu, Gerçek Zaman Tabanlı Takip, Mikroevirici Kullanımı, PLC Kontrolü, Şebeke Bağlantılı FV Sistem.

INCLINED AXIS DESIGN APPLICATION ON TWO AXIS SUN TRACKING PLATFORMS AND EXAMINATION OF ENERGY CONSUMPTION OF AXIS MOTORS

ABSTRACT

Energy demand is constantly increasing nowadays, the use of photovoltaic panels as a source of renewable energy steadily increases. The photovoltaic system applications on movable platform and fixed installation situation have been examined comparatively in many academic studies previously made. It has been verified that the efficiency of two-axis movable photovoltaic systems are higher than others, although the numerical values changed depending on the geographical conditions in which applications are made. In this study, an inclined polar axis design is developed to reduce energy consumption to minimum level while moving platforms are increasing the energy production of photovoltaic panels. Low cost DC motors that are easily found in the market were chosen for axis movements. PLC controlled system performs solar tracking by mathematical calculation without using any sensor. In the designed system, the produced energy supplies the grid by using the microinverter and so that the storage system is not needed. The most important innovation of the design is that it works in single axis mode on a daily basis and achieves an efficiency close to double axis working tracking platforms. A prototype system with 260Wp power has been operated in two-axis mode, single-axis mode and fixed mode under conditions of Tuzla district of Istanbul province. Alternative current, voltage and energy values of the system are monitored by electronic meter. As a result of this study, proposed single axis working style of the design appeared 20,8% while the two-axis system efficiency increase was 22,1%.

Keywords: Inclined Axis Tracking Platform, Real-time Based Tracking, Microinverter Usage, PLC Controlled, Grid Connected PV System.

GİRİŞ

Güneşten gelen enerjiyi, elektrik enerjisine maksimum düzeyde çevirmek için panel yüzeyine güneş ışınlarının sürekli dik gelmesini sağlayan güneş takip platformları günümüzde oldukça yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bu tez çalışmasında bu güne kadar kullanılan yöntemlerden farklı olarak eğik eksenli bir tasarım geliştirilmiştir.

Bölüm 1'de tezin amacı ve daha önce yapılan çalışmalar yer verilmiştir. Verilen örneklerin neredeyse tamamında sadece sistemin ürettiği enerji yönünden kıyaslamalar yapılmıştır. Bu çalışmada ise üretilen enerjinin yanında takip sistemine hareket veren motorların enerji tüketimi de incelenmiştir.

Bölüm 2'de ise güneş ile ilgili temel kavramlar üzerinde durulmuştur. Isıl teknolojiler ve FV modül teknolojileri hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Ayrıca DC-DC ve DC-AC konvertörlerden, takip platformlarından ve FV sistem konfigürasyonlarından bahsedilmiştir.

Bölüm 3'de tezin konusu olan eğik eksenli tasarımın detayları verilmiştir. Bu tasarımın üretim aşamaları ve kullanılan malzemelerin seçim stratejilerinden bahsedilmiştir. Güneş takibi için seçilen SPA algoritmasının ve eğik eksen düzleminin matematiksel modellenmesi yapılmıştır. İstanbul Tuzla bölgesine kurulan takip platform, tek eksen, iki eksen ve sabit olarak çalıştırılıp sistemin enerji üretim ve tüketim değerleri incelenmiştir. Bu nokta da ilk testleri haziran ayında yapılan takip platformu tasarımının, bu tezde önerilen tek eksenli olarak çalışmasındaki takip açısı hataları analiz edilmiştir. Bu açı hatasını minimize edecek bir algoritma geliştirilip saha deneyleri ile doğrulanmıştır.

Bölüm 4'te ise geliştirilen tasarımın, İstanbul Tuzla şartlarındaki verileri ve bu verilerin iyileştirilmesi için yapılan çalışmalar yorumlanmıştır.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Tez Çalışmasının Amacı

Bu çalışmada geliştirilen tasarım tarih-zaman tabanlı olup güneş takibi için herhangi bir sensöre ihtiyaç duymamaktadır. Parçalı bulutlu havalarda dahi güneşe yönelmektedir. Motor tahrikli olduğu için aktif bir sistemdir. Motor pozisyonlarından herhangi bir geribesleme sinyali almadığından açık döngü bir sistemdir. Serbestlik derecesine göre iki eksenli bir sistemdir.

Tasarımın getirdiği fark günün başında, sabah sadece 1 defa ikinci eksenini çalıştırıp gün boyu eksen çalışarak güneşi belirli bir hata açısı ile takip ederek çift eksen çalışan takip platformlarına yakın bir verim elde etmesidir. Ayrıca eksen motorları enerji tüketimi de tek eksenli, iki eksene göre ortalama 6 kat daha az gerçekleşmektedir.

1.2. Önceki Çalışmalar

İki eksenli güneş takip sistemlerinin sabit fotovoltaik sistem ile karşılaştırılması birçok farklı akademik çalışmada yer almıştır. Bunlar kronolojik sıra ile aşağıda belirtilmiştir.

-Rustom Mamlook ve Salah Abdullah tarafından Ürdün Umman'da yapılan çalışmada Siemens LOGO akıllı röle kullanılmıştır. Sistem iki buçuk saat ara ile coğrafi konumuna göre hesaplanmış olup, iki eksenli açılarını değiştirerek güneşi takip edip sabit sisteme göre yüzde 40 fazla enerji topladığı görülmüştür[1].

- Tiberiu Tudorache ve Liviu Kreindler tarafından yapılan çalışmada tek eksenli sistem tasarlanmıştır. İki fotodiyot vasıtasıyla güneşin doğu-batı hareketi bir servo dc motor ile gerçek zamanlı takip edilmiştir[2].

- Cemil Sungur tarafından yapılan iki eksenli tasarımda Siemens S7-200 PLC kullanılmıştır. Yılın hergünü için Güneşin yükseliş açısı ve yatayda kuzey ile yaptığı açı hesaplanarak aktüatör motorları ile takip sağlanmıştır. Sabit sisteme göre yüzde 42,6'lık bir ekstra enerji toplanmıştır[3].

- WiepingLuo tarafından yapılan çalışmada Omron PLC kullanılmıştır. Fotosensörler vasıtasıyla iki eksenle yükseliş açısı ve yatay doğrultu açısı değiştirilerek gerçek zamanlı takip gerçekleştirilmiştir[4].
- Mehmet Fatih Beyoğlu tarafından Balıkesir Üniversitesinde yapılan yüksek lisans tezinde çift eksenli güneş takip sistemi ile sabit sistem eş zamanlı çalışma ile karşılaştırılmış ve çift eksenli güneş takip sisteminin yüzde 39 daha yüksek verimle çalıştığı görülmüştür[5].
- Ahmet Şenpınar ve Mehmet Cebeci tarafından Fırat Üniversitesinde yapılan iki eksenli sistemde DC ve AC motorlar ve sürücü kullanılmıştır. Sabit fotovoltaik panele kıyasla yüzde 13,25'lik bir avantaj hesaplanmıştır[6].
- Murat Orhun tarafından yapılan çalışmada, PLC kullanarak yapılan adaptif takip sistemi üzerinde mono, poli ve incefilm tipi fotovoltaik panellerin performansları karşılaştırılmıştır[7].
- Tsung-ShengZhan ve Whei-Min Lin tarafından yapılan çalışmada yine PLC kullanarak yükseliş ve yatay doğrultu açısını değiştiren iki eksenli sistem incelenmiş, sabit sisteme göre yüzde 25'e varan avantaj gözlemlenmiştir[8].
- ChiemekaOnyekaOkoye ve Serkan Abbasoğlu tarafından Kıbrıs Üniversitesinde yapılan çalışmada iki eksenli sistem ile sabit sistem karşılaştırılmıştır. Hareketli sistem yüzde 40 daha avantajlı çıkmıştır[9].
- Michael Assaf tarafından yapılan çalışmada Siemens LOGO ve fotosensörler kullanarak, DC servo motorlar ile iki eksen kontrolü yapılarak Suriye Şam bölgesindeki veriler incelenmiştir[10].
- G. Madhan ve S.Muruganad tarafından yapılan çalışmada Crouzet PLC kullanılarak şebekeye bağlı fotovoltaik sistem incelenmiştir. Hindistan'ın elektrik olmayan köyleri için düşünülen sistemde PLC güç durumuna göre yük seçiminde kullanılmıştır[11].
- Ali Öztürk ve Selman Alkan tarafından yapılan çalışmada iki eksenli sistemin Düzce bölgesi koşullarında sabit fotovoltaik sistem ile deneysel olarak mukayese edilmiştir. 2kW gücündeki sistemlerde maliyet analizi yapılarak yatırımın geri dönüş zamanı hesaplanmıştır[12].

- Oleksandr Veligorskyi ve Roman Kosenko tarafından yapılan çalışmada fotosensör verilerine göre iki eksenin dikey ve yataydaki hareketleri 15 dakikalık zaman aralıklarıyla yapılmıştır[13].
- Yingxue Yao ve Yeguang Hu tarafından yapılan çalışmada kuzey-güney ve doğu-batı doğrultusunda dönebilen iki eksenli sistemde takip fotosensör vasıtasıyla yapılmıştır. Panel eğim açısının 0, 55 ve 90 derece değerleri için sabit sistemle karşılaştırma yapılmıştır[14].
- Enver Er ve Rüştü Eke tarafından yapılan çalışmada Siemens LOGO kullanılarak güneşin astronomik koordinatlarına göre izleme gerçekleştirilerek sabit sistem ile Muğla şartlarında karşılaştırma yapılmıştır[15].
- Ceyda Aksoy Tırmıkçı ve Cenk Yavuz tarafından yapılan çalışmada iki eksenin hareketi sensörsüz biçimde güneş koordinatları mikrokontrolör tarafından hesaplanarak gerçekleştirilmiştir. DC aktüatör ve mikrokontrolör kullanımı ile düşük maliyet incelenmiştir[16].
- Mehmet Ali Köprü tarafından yapılan çalışmada fotovoltaik sistemlerde kablo kayıpları incelenmiştir[17].
- Betha Karthik Sri Vastav ve Sativa Nema tarafından Hindistan da yapılan çalışmada Delta PLC kullanılmış ve fotosensörler vasıtasıyla kapalı çevrim takip incelenmiştir[18].
- Dhivya Lakshmi ve S. Harine tarafından yapılan çalışmada PLC tabanlı sistem gerçek zaman saati ile kendisini dünyanın dönüşü ile senkronize ederek güneşe yönelmektedir. Adım motoru kullanılan sistem ayrıca bir mikrokontrolör ile PLC arızasına karşı yedekli tasarlanmıştır[19].
- A.A. Smirnov ve S.A. Malugin tarafından yapılan çalışmada Rusya' da 55. paraleldeki bir şehir şartlarına göre fotosensör vasıtasıyla güneşi takip eden tek eksenli ve iki eksenli sistemlerin sabit sisteme göre enerji kazancı incelenmiştir[20].
- Naman Madharia ve Tanuja Kashyap tarafından yapılan çalışmada sistem PLC tabanlı ve 3 eksenli olarak tasarlanmıştır. Tilt açısı optimizasyon metodu kullanarak iki eksenli sisteme göre daha fazla verim elde edilmiştir[21].

- Tansu Filik ve Ümmühan Filik tarafından yapılan çalışmada, 3kW sabit sistem ile 3kW hareketli sistemin Eskişehir bölgesi koşullarında karşılaştırması yapılmış hareketli sistem yüzde 33 daha elektrik enerjisi üretmiştir[22].

- İsmail Arslan tarafından yapılan çalışmada, Tekirdağ koşullarında polikristal ve monokristal tip güneş panellerinin verimlilik karşılaştırılması yapılmıştır. Monokristalpanel verimi yüzde 15, polikristal panel verimi yüzde 14,9 çıkmıştır[23].

1.3. Tez Çalışmasının Katkısı

Bu tez çalışması ile güneş takip platformlarında yeni bir iki eksen çalışma modeli literatüre kazandırılmış olacaktır. Bu modeli uygularken kullanılan en ucuz ekipmanların seçimi konusunda farkındalığı arttıracaktır. Yüksek maliyetli ekipmanlar ile hassas takip yerine minimum maliyet ile minimum tüketim sağlayan tasarımın yaptığı takip hatasının yazılım ile optimize edilmesi literatüre kazandırılacaktır. İki eksenli takip sistemlerinin tek eksenli sistemlerle veya sabit montajlı sistemlerle karşılaştırılması yerine kendi aralarında kıyaslamamanın öne çıkaracağı noktalara dikkat çekecektir. Ayrıca sistemleri kıyaslarken panel verimliliğinin yanında eksen motor tüketimlerinin sistem verimine etkilerini inceleyerek bu konuda farklı bir bakış açısı getirmiştir.

2. GÜNEŞ ENERJİSİ TEMEL KAVRAMLAR

Yeryüzündeki bütün enerji türleri doğrudan veya dolaylı olarak güneş enerjisine bağlı olarak meydana gelmiştir. Güneş enerjisi bilinen en eski birincil enerji kaynağı olup, temiz ve yenilenebilir özelliktedir. 1973-1974 yılları arasında dünyada meydana gelen enerji krizinin ardından, dünyada güneş enerjisinin dolaylı veya direkt olarak kullanılması daha yaygın hale gelmiştir. Güneş enerjisi hâlihazırda dünyanın ihtiyacı olan enerji ihtiyacının binlerce katı olan potansiyeli ve çevreye dost olan bir enerji şekli ile alternatif enerji kaynakları arasında önemli bir kaynaktır. Yeryüzünün 45° kuzey ve 45° güney eylemleri arasında kalan sahalarda güneş enerjisinden ekonomik olarak yararlanma olanağına sahiptir. Dünyanın güneşten aldığı enerji toplamı bir yılda 1,5katrilyon ($1,5 \times 10^{15}$) MWh'tir. Bu enerji miktarı, dünyada insanların 1 yılda tükettiği enerjinin tam 28 000 katına eşdeğerdir[24].

Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre, yeryüzüne 90 dakikada vuran güneş ışığı, tüm dünyanın bir yıllık enerji ihtiyacını karşılayacak miktardadır. IEA, 2050 yılında küresel elektrik enerjisi üretiminin %11 gibi büyük bir oranının güneş enerjisinden sağlanacağını öngörmektedir ve 2030 yılına kadar, yenilenebilir enerji kaynaklarının yıllık %7,6 büyüme ile en hızlı büyüme oranına sahip enerji kaynakları olacağını bildirmektedir[25].

Türkiye coğrafi olarak kuzey yarımkürede yer alır ve 36-42° kuzey enlemleri ile 26-45° doğu boylamları arasında bulunur. Ülkemizin bu coğrafi konumu sayesinde sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli, Türkiye'nin birçok ülkeye göre çok daha avantajlı konumda olmasını sağlar. Ülkemiz, İspanya ile birlikte Avrupa'daki en çok güneşlenmeye sahip ülkedir. Türkiye'nin GEPA'ya göre, yıllık toplam güneşlenme süresi 2737 saat (günlük toplamı 7,5 saattir), yıllık toplam gelen güneş enerjisi ise 1527 kWh/m².yıl, yani günlük olarak toplam 4,18 kWh/m² değerinde belirlenmiştir. 2017 yılı sonu itibarıyla, işletmede bulunan 3421 MW'lık kurulu güce sahip 3616 adet Güneş Enerji Santrali Türkiye toplam kurulu gücün yaklaşık %4'üne karşılık

gelmektedir. Güneş enerjisinden elektrik üretimi 2017 yılında 2684 GWh olarak gerçekleşmiş olup elektrik üretimimizin %0,91'i güneşten elde edilmiştir[26].

Güneş enerjisi teknolojileri yöntem, malzeme ve teknolojik düzey açısından çok çeşitlilik göstermekle birlikte iki ana gruba ayrılabilir. Bunlar, ısı güneş teknolojileri ve fotovoltaik güneş teknolojisidir. Fotovoltaik hücreler denen yarı-iletken malzemeler güneş ışığını doğrudan elektriğe çevirirler. Güneş enerjisi, güneş hücresinin yapısına bağlı olarak % 5 ile % 30 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir. Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş hücresi birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir. Bu yapıya güneş hücresi modülü ya da fotovoltaik modül adı verilir. Güç talebine bağlı olarak modüller birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak bir kaç watt seviyesinden mega watt seviyesine kadar sistem oluşturulur[27].

2.1. Güneş Enerjisinin Kullanımı

Güneş enerjisinden günümüzde birçok alanda faydalanılmaktadır. Konutların ısıtılmasından, soğutulması ve aydınlatılmasına, yemek pişirmeden sıcak su teminine, havuzların ısıtılması ve tarım teknolojilerinde, seraların ısıtılmasında ve tarım ürünlerinin kurutulmasında kullanılmaktadır. Sanayide, deniz suyundan tuz ve tatlı su üretilmesine, güneş pompaları, güneş havuzları, ısı borusu uygulamalarında; ulaşım ve iletişim araçlarında, sinyalizasyon ve otomasyonda, havacılık ve uzay sanayisinde ve daha birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır[28].

2.1.1. Düşük ısı teknolojiler

Düzlemsel Güneş Kollektörleri: Güneş enerjisini toplayan ve bir akışkana ısı olarak aktaran çeşitli tür ve biçimlerdeki aygıtlardır. En çok evlerde sıcak su ısıtma amacıyla kullanılmaktadır. Ulaştıkları sıcaklık 70°C civarındadır. Düzlemsel güneş kollektörleri, üstten alta doğru, camdan yapılan üst örtü, cam ile absorban plaka arasında yeterince boşluk, metal veya plastik absorban plaka, arka ve yan yalıtım ve bu bölümleri içine alan bir kasadan oluşmuştur[29].

Vakumlu Güneş Kollektörleri: Bu sistemlerde, vakumlu cam borular ve gerekirse absorban yüzeyine gelen enerjiyi artırmak için metal ya da cam yansıtıcılar kullanılır.

Bunların çıkışları daha yüksek sıcaklıkta olduğu için (100-120°C), düzlemsel kollektörlerin kullanıldığı yerlerde ve ayrıca yiyecek dondurma, bina soğutma gibi daha geniş bir yelpazede kullanılabilirler[29].

2.1.2. Yüksek ısı teknolojiler

Parabolik Oluk Kollektörler: Doğrusal yoğunlaştırıcı termal sistemlerin en yaygınıdır. Kollektörler, kesiti parabolik olan yoğunlaştırıcı dizilerden oluşur. Kollektörün iç kısmındaki yansıtıcı yüzeyler, güneş enerjisini, kollektörün odağında yer alan ve boydan boya uzanan siyah bir absorban boruya odaklarlar. Kollektörler genellikle, güneşin doğudan batıya hareketini izleyen tek eksenli bir izleme sistemi üzerine yerleştirilirler. Enerjiyi toplamak için absorban boruda sentetik yağ dolaştırılır. Toplanan ısı, elektrik üretimi için enerji santraline gönderilir. Bu sistemler yoğunlaştırma yaptıkları için daha yüksek sıcaklığa ulaşabilirler[30].

Fresnel Güneş Güç sistemleri: Güneş enerjisini düz aynalar vasıtasıyla yansıtıp yoğunlaştırarak, absorblayıcı içerisindeki akışkanın yüksek sıcaklıklara çıkarılması temeliyle çalışmaktadır. Elde edilen kızgın buhar istenirse elde edildiği gibi ısı enerji olarak, istenirse bir türbin vasıtasıyla elektrik enerjisi elde edilmek suretiyle kullanılabilir. Diğer güneş güç sistemlerine oranla daha düşük kurulum ve işletme maliyeti, daha kolay imalat gibi avantajlara sahiptir[30].

Parabolik Çanak Sistemler: İki eksenle güneşi takip ederek, sürekli olarak güneşi odaklama bölgesine yoğunlaştırırlar. Termal enerji, odaklama bölgesinden uygun bir çalışma sıvısı ile alınarak, termodinamik bir dolaşıma gönderilebilir ya da odak bölgesine monte edilen bir Stirling makine yardımı ile elektrik enerjisine çevrilebilir. Bu tasarım ısı transfer sıvısını ve soğutma suyuna ihtiyacı ortadan kaldırır[30].

Merkezi Alıcı Sistemler: Tek tek odaklama yapan ve heliostat adı verilen aynalardan oluşan bir alan, güneş enerjisini, alıcı denilen bir kule üzerine monte edilmiş ısı eşanjörüne yansıtır ve yoğunlaştırır. Alıcıda bulunan ve içinden akışkan geçen boru yumağı, güneş enerjisini üç boyutta hacimsel olarak absorbe eder. Bu sıvı bir ısı transfer ekipmanına pompalanır. Orada ikinci bir döngüde suyu ısıtarak elde edilen buhar türbin-jeneratör çiftine gönderilerek elektrik üretilir. Bu sistemlerde ısı aktarım akışkanı olarak hava da kullanılabilir, bu durumda sıcaklık 800°C'ye çıkar. Heliostatlar

bilgisayar tarafından sürekli kontrol edilerek, alıcının sürekli güneş alması sağlanır[30].

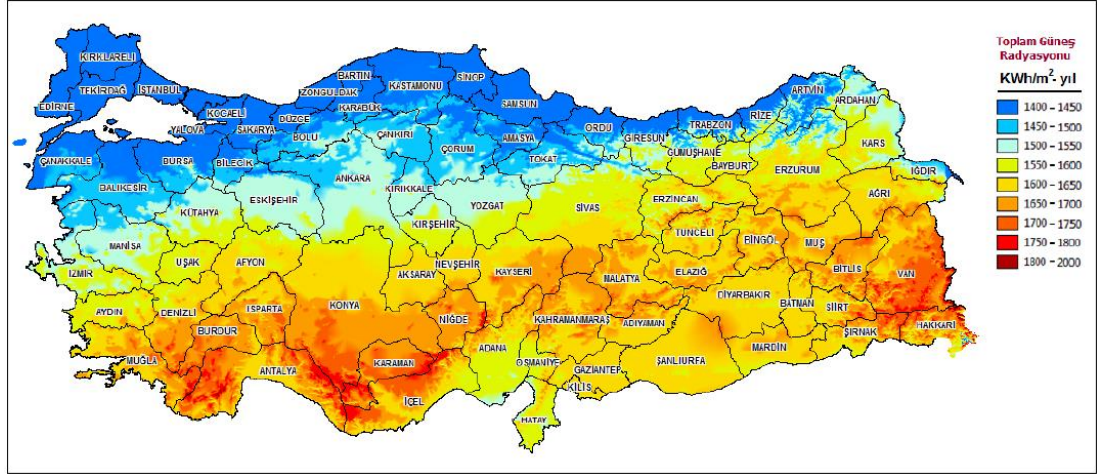
2.1.3. Fotovoltaik teknolojiler

Güneş hücreleri (fotovoltaik hücreler), yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken maddelerdir. Alanları genellikle 100 cm² civarında, kalınlıkları ise 0,2- 0,4 mm arasında olan güneş hücrelerinin yüzeyleri kare, dikdörtgen ve daire şeklinde biçimlendirilir. Güneş hücreleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar, yani üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Yüzeye düşen güneş enerjisi sonucu hücre elektrik enerjisi üretir. Güneşten gelen ışınlar güneş hücresine temas ettiğinde hücrenin dış yüzeyindeki geçirgen tabakadan geçerek yarı iletken madde tarafından emilir. Işığın emilmesiyle serbest kalan elektronlar elektrik akımını oluştururlar. Genel olarak normal ve konsantre fotovoltaik sistemler olarak iki ana grupta incelenebilir. Bu sistemler detaylı olarak önümüzdeki bölümde ele alınacaktır[31].

2.2. Türkiye'nin Güneş Potansiyeli

EİE den alınan verilere göre Türkiye'nin yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ışınım şiddeti 1311 kWh/m²/yıl (günlük toplam 3,6 kWh/ m² olduğu tespit edilmiştir. Güneş enerjisi potansiyeli 380 milyar kWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Aşağıda verilen Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası ve CSP teknolojisi ile de bu rakamda enerji üretebileceği hesaplanmıştır. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyel atlası Şekil (2.1)'de gösterilmiştir.

Hem enlem değeri büyük hem de rutubetli olmasından dolayı en az ışınım alan bölge Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesidir. Atmosferdeki fazla su buharı, ışınımın perdelenmesi ne neden olmaktadır. Marmara ve Kuzey Ege Bölgesi, Karadeniz'e göre biraz daha iyi durumdadır. Güney Ege, Batı Akdeniz ve Orta Anadolu Bölgeleri orta derecede ışınım almaktadır. Doğu Akdeniz ve Doğu Anadolu Bölgeleri ışınım değerleri iyi olan bölgelerimizdir. Güney Doğu Bölgesinin, güneydoğu ucu ise ışınım değerleri en iyi olan bölgemizdir. Sert ve soğuk iklime sahip bu yer kışın en fazla ışınım alan yerdir. Rakım yüksektir. Havadaki su buharı, yağmur ve kar şeklinde yoğunlaşmakta ve atmosfer daha berrak olup ışınımın engellenmesi en az seviyededir.



Şekil 2.1. Türkiye Güneşlenme Atlası

2.3. Güneş Radyasyonu

Güneş milyarlarca yıldır içerisinde nükleer füzyon gerçekleştirerek hidrojen atomlarını helyum atomlarına dönüştürmektedir. Bunun sonucunda ortaya çıkan enerji güneş ışınları vasıtasıyla her yöne gitmektedir. Bu ışımaya güneş radyasyonu denir ve bu radyasyonun çok az bir kısmı dünyaya ulaşmaktadır. Yeryüzüne ulaşan enerji birçok faktör tarafından etkilenmektedir.

Atmosfere gelen güneş radyasyonunun yaklaşık %17,5'i atmosfer tarafından soğurulur. %35'i bulutlardan ve yerden yansıtılarak tekrar uzaya dönmektedir. Geriye kalan %47,5 değerindeki miktar ise yeryüzüne düşmektedir ve ısıya dönüşmektedir. Güneş radyasyonunun birim alan üzerine düşen güç miktarının anlık değerine solar radyasyon gücü denir. Genel olarak W/m^2 veya kW/m^2 birimleriyle ölçülür. Solar radyasyon gücü güneş enerji sistemlerinin verilen herhangi bir zaman için çıkış performansını hesaplamak için referans durum olarak kullanılır. Güneşin bu değeri uzaklığın karesi ile ters orantılı olarak değişir. Solar radyasyon enerjisi ise birim alana düşen solar radyasyon gücünün zamana bağlı grafiğinin altındaki alandır.

Dünya dışı güneş radyasyonu gücü ise dünya atmosferinin hemen dışarısında ölçülen değerdir. Uzayda bu radyasyonu yansıtacak ve absorbe edecek herhangi birşey olmadığından bu değer aynı kalır. Sayısal karşılığı $1366 W/m^2$ 'dir. Buna karşılık yeryüzüne ulaşan miktar atmosferden dolayı sadece $0-1100 W/m^2$ değerleri arasındadır.

Güneşten alınan enerjinin neredeyse tamamı elektromanyetik dalga formundadır. Bu dalgaların boyları enerji seviyelerine ve kaynağa bağlı olarak değişir. Dalgaboyu bu radyasyonun özelliklerini belirler. Çok kısa dalgaboyları radyasyonu yüksek enerjili gama ışınları formunda yapar. Çok uzun dalgaboyları ise bu radyasyonu iletişimde kullandığımız radyo dalgaları formuna sokar. Ultraviyole ışınlar, görünür ışık ve kızılötesi ışınlar ise aradaki diğer dalga boylarına ait radyasyon formlarıdır.

Güneş radyasyonu atmosferin ozon, karbondioksit, su buharı gibi kısımları tarafından soğurulur, saçılır ve yansıtılır. Yeryüzüne ulaşan bu radyasyonu direkt radyasyon ve dağılmış radyasyon olarak iki ana tipte adlandırabiliriz. Toplam global radyasyon bu iki tipteki değerlerin toplamıdır. Direkt radyasyon güneşten dünya yüzeyine herhangi bir saçılmaya uğramadan gelen, dağılmış radyasyon ise atmosfer ve bulutlar tarafından saçılmaya uğrayıp tekrar yeryüzüne dönen radyasyondur. Dağılmış radyasyon toplam global radyasyonun açık havalarda %10-%20 sini oluştururken, kapalı havalarda %100 e kadar kısmını oluşturabilir. Bu radyasyonun ne kadar soğurulup ne kadar saçılacağına, güneş ışınlarının dünya yüzeyine ulaşana kadar katettiği atmosfer kalınlığı belirler. Güneş tepedeyken güneş ışınlarının katettiği yol minimumdur. Güneş ufukta batmaya başladığı zaman ise bu yol maksimumdur. Bu mesafe teknik olarak hava kütlesi olarak adlandırılır.

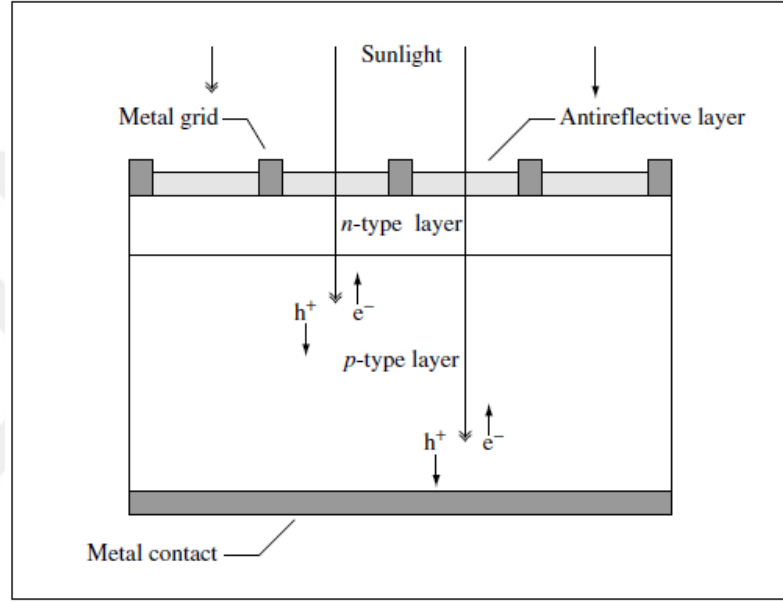
Diğer bir terim ise güneşlenmedir. Bir gündeki birim alana düşen güneş radyasyon enerjisinin toplamıdır. kWh/m²/gün olarak ifade edilir. Güneş radyasyonunun gücü genelde piranometre ile ölçülür. Piranometre yarı küresel bir görüş ile toplam global radyasyonu ölçer. Bu sensörler FV modüllerin yanında yere paralel olarak monte edilir ve yeryüzüne düşen direkt ve dağılmış radyasyon değerlerinin toplamını kaydederler. Pireliometre cihazı ise direkt güneş radyasyonunu ölçer. Bunun için tek mercekli bir dürbünü andıran cihaz sürekli güneşi takip ederek ölçüm toplar. Bu sensör genelde konsantre toplayıcı güneş sistemlerinde kullanılır.

2.4. Fotovoltaik Modüller

2.4.1. Yarı-iletken fotovoltaik hücreleri

Yarı-iletken güneş hücreleri temel olarak basit cihazlardır. Ticari olarak fotovoltaik modüller piyasada monokristal, polikristal ve ince-film silikon şeklinde

bulunmaktadır. Yarı iletkenler, ışığı absorbe etme ve emilen fotonların enerjisinin bir kısmını elektrik akımı taşıyıcılarına iletme kapasitesine sahiptir. Basit bir geleneksel güneş pili yapısı Şekil 2.2'de tasvir edilmiştir. Güneş ışığı, güneş hücresinin önündeki tepeden gelir. Metalik bir kafes formu, diyotun elektrik kontaklarından birini oluşturur ve kafes hatları arasındaki yarı iletken üzerinde ışığın düşmesine izin verir ve böylece absorbe edilir ve elektrik enerjisine dönüştürülür. Kılavuz çizgileri arasındaki yansıma önleyici bir tabaka, yarı iletkene iletilen ışık miktarını artırır.

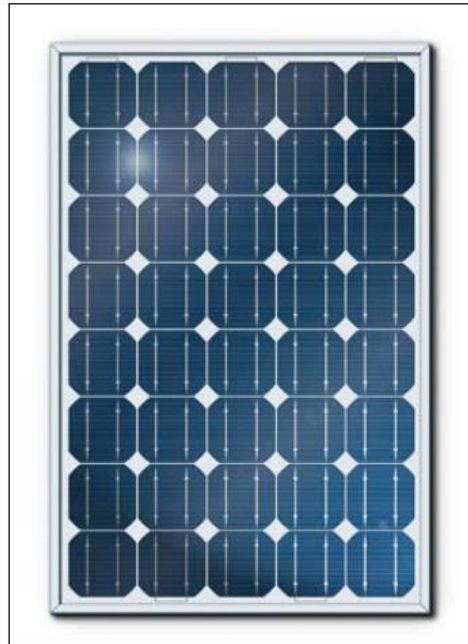


Şekil 2.2. Konvansiyonel güneş hücresi

Silikon kristal fotovoltaik hücrelerin 25 °C sıcaklıkta açık devre gerilimleri 0,55V ile 0,72V arasında değişir. 4 inç ten 8 inç boyutuna kadar değişen kare şeklindeki hücrelerin alanları ile orantılı olarak 3 A den 15 A e kadar kısa devre akımları vardır. Daha yüksek gerilim ve akım değerleri için bu hücreler seri ve paralel kombinasyonlarda bağlanarak istenilen güce çıkılır ve FV modül adını alır. Daha kullanışlı olması açısından fotovoltaik modüller 32 hücreden 72 hücreye kadar seri bağlanıp tek bir kapalı yapı içine alınıp piyasaya sürülürler. Böylece hem çevre şartlarından korunup uzun ömürlü olurlar hem de modüllerin açık devre gerilimleri 30V- 40V seviyelerine çıkmış olur. Bu modüllerin ömürleri maruz kaldıkları şartlara bağlı olarak 10 yıldan 26 yıla kadar değişebilir[31].

2.4.2. Silikon kristal fotovoltaik hücreler

Dünya çapında kurulu FV kapasitesinin% 80'den fazlasını temsil eden kristal silikon FV hücreleri bugüne kadar sektörde öncü olmuştur. Bu tip bir hücre en yaygın olarak kullanılmaktadır ve daha verimli ve uygun maliyetli bir FV teknolojisi geliştirilinceye kadar lider kalmaya devam edecektir. Esas olarak kristalli Si p-n bağlantılarını kullanır. Elektronik dereceli yarı iletkenler çok saf kristalli malzemelerdir. Kristal yapıları, atomlarının düzenli bir periyodik dizide hizalandığı anlamına gelir. Bu periyodiklik, bileşen elemanların atomik özellikleriyle birleştiğinde, yarı iletkenlere çok kullanışlı elektronik özellikler kazandırır. Kristalin silikon modülleri, birbirine bağlı şeffaf bir ön (genellikle cam) ve bir destek malzemesi (genellikle plastik veya cam) arasında kapsüllenmiş FV hücrelerinden (tipik olarak 12,5 cm² ile 20 cm²) oluşur. Mono-kristalli levhalar, nispeten pahalı bir işlemde büyük bir tek kristal külçeden dilimlenir. Daha ucuz, çok kristalli levhalar çeşitli tekniklerle yapılabilir. Teknolojilerden diğeri ise, levhalar içine dilimlenmiş olan, erimiş poli-silisyumun hassas dökümünü kapsamaktadır. Bunlar monokristalli levhalardan çok daha büyük olabilirler. Bu şekilde üretilen poli kristal hücreler şu anda daha ucuzdur, ancak son gelinen noktada poli kristal ürün genellikle tek kristalli teknoloji kadar verimli değildir [32].



Şekil 2.3. Mono-kristal panel

Mono-kristal silikon hücreden oluşan paneller, yüksek saflıkta silikon kristalinden yapılmıştır. Mono-kristal silikon külçe silindirik formu, inert gazın varlığında bir pota içinde polikristal silikonun eritilmesiyle hazırlanır. Bir gergi çubuğuna bağlı bir kristal çekirdeğin erimiş silindire batırılmasından sonra, çubuğun sürekli dönüşü ile kaynaşmış silikondan, 13-20 cm çapında ve 200 cm uzunluğunda bir filiform kristalin büyümesiyle elde edilir. Bu işleme Czochralski metodu denir. Maksimum çizim hızı yaklaşık 30 cm/s'dir. Daha sonra bu silindir 200-250 µm kalınlıktaki gofretlere dilimlenir ve üst yüzey, yansımayı en aza indirmeyi amaçlayan mikro pürüzler elde etmek için işlenir. Bu hücrelerin ana avantajı, performans özelliklerinin yüksek zamana karşı daha yavaş düşmesi ve verimliliğidir (% 14 ila 17). Bu modülün maliyeti daha yüksektir ve bu teknoloji ile üretilen paneller genellikle homojen koyu mavi renk ile karakterizedir[33,34].



Şekil 2.4. Poli-kristal panel

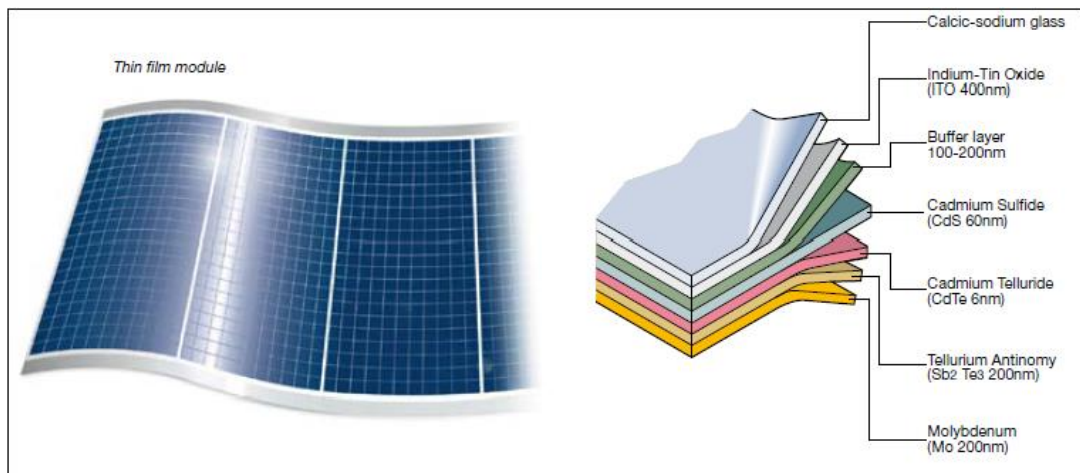
Poli-kristal silikon hücreleri oluşturan kristaller farklı şekillerde ve yönlerde toplanmıştır. Aslında, polikristalin silikon hücrelerin tipik yanardönerleri, kristallerin farklı yönlerinden ve sonuç olarak ışığa göre farklı davranışlardan kaynaklanır. Silikon üretimi için temel malzeme, kuvars kumu veya büyük kuvars kristalleri biçiminde doğada bol miktarda meydana gelen ve odun kömürü kullanılarak elektrikli fırınlarda indirgenen silikon dioksittir (SiO_2) ve yaklaşık % 98 saflıkta metalürjik silikon elde

edilir. Poli-kristal silikon külçe, silisyumun paralel bir şekilli kalıp içine eritilmesi ve dökülmesiyle elde edilir. Bu şekilde elde edilen gofretler kare şeklindedir ve 180-300 mikron kalınlığında tipik çizgilere sahiptir. Verim, tek kristalli silikon (% 12 ila 14) ile karşılaştırıldığında daha düşüktür. Performansları 20 yılda ilk verimliliklerinin % 85'ne düşer. Böyle bir teknoloji ile üretilen hücreler, kristal tanelerinin oldukça görünür olduğu yüzeyden dolayı tanınabilirler[33,34].

2.4.3. İnce film teknolojileri

İnce film hücreleri, genellikle karışımlar için fiziksel tutarlılık veren cam, polimerler, alüminyum gibi desteklerde, genellikle gaz karışımları olarak biriktirilmiş yarı iletken malzemelerden oluşur. Bu yapı Şekil 2.5'te detaylı olarak görülebilir. Yarı iletken film tabakası, yüzlerce μm olan kristalin silikon hücrelerine göre birkaç mikron kalınlığındadır. FV hücre üretimi için uygun olan yarı iletkenlerin çoğunda, tam absorpsiyon için sadece 0,5 ila 5 μm kalınlığında bir film gereklidir. Bu, bu tür ince filmlerde güneş pili işlevselliği için ihtiyaç duyulan yarı iletken özellikler ortaya çıkarsa, malzeme ve dolayısıyla enerji maliyetlerini büyük ölçüde azaltır.

Tüm ince film teknolojileri FV modül imalatında yüksek kapasite, hız ve düşük imalat fiyatı potansiyeline sahiptir. İnce film hücrelerini oluşturan aktif yarı-iletken tabaka kalınlıkları 2-8 μm arasında değişmektedir. Bu üç teknolojinin ortak yanları, cam veya esnek taşıyıcılar üzerine inşa edilmeleri, hücre yapımında saydam iletken oksit ve metal tabakalar kullanmaları ve büyük alanlı modül üretiminde hücrelerin YAG



Şekil 2.5. İnce film fotovoltaik hücre

lazer ile hızla kesilip seri olarak bağlanarak yüksek gerilim verebilmeleridir. Bu teknolojilerin üretim donanımları ise c-Si teknolojisinin aksine düşük sıcaklık ve az malzeme kullanımı ilkesi üzerine tasarlanmış olup otomasyona uygundur. İnce film modül üretiminde kullanılan süreç adımları, c-Si teknolojisine göre daha azdır. Düşük sıcaklık, az malzeme ve seri üretim özellikleri ince film hücrelerinin enerji geri ödeme sürelerini kısaltmaktadır[34,35].

Sonuç olarak, malzemenin tasarrufu dikkat çekicidir ve esnek bir film desteğinin olması, ince film hücrelerinin uygulama alanını arttırır. Günümüzde GaAs teknolojisi, elde edilen verim açısından bakıldığında % 25 ila 30'un üzerinde olduğu düşünüldüğünde en ilginç olanıdır. Ancak bu tür hücrelerin üretimi, yüksek maliyetler ve malzemenin kıtlığı ile sınırlıdır, “yüksek hızlı yarı iletkenler” ve optoelektronik endüstrisinde kullanılır. Aslında, GaAs teknolojisi çoğunlukla, ağırlıkların ve azaltılmış boyutların önemli bir rol oynadığı uzay uygulamaları için kullanılmaktadır [33].

İnce film güneş pillerinin üretimi için uygun olan yarı iletkenler arasında amorf silikon (a-Si), CdTe, CuInSe₂ (CIS), Cu (In, Ga) Se₂ (CIGS), CuInS₂, CdS / Cu₂S ve GaA'lar bulunmaktadır.

2.4.3.1. Amorf silikon hücreler

Amorf silikon teknolojilerinde, kristalli silisyumun uzun menzil sırası mevcut değildir ve atomlar sürekli bir şekil oluşturur. Amorf silikon, kristalin silikondan daha etkili bir ışık emdiğinden, hücreler çok daha ince olabilir. Amorf silikon (a-Si), hem sert hem de esnek düşük maliyetli alt tabakalar kullanılarak geniş bir ürün yelpazesinde oluştururlar.

A-Si'nin düşük maliyetli olması, düşük maliyetin yüksek verimden daha önemli olduğu birçok uygulama için onu avantajlı hale getirir. Şu anda, amorf silikon FV modülü verimliliği %4 ila %8 arasındadır. Amorf silikon güneş pillerinin ana dezavantajı, güneşin performanslarını azalttığı için zaman içinde güç çıkışında önemli bir azalma (%15 ila %35) çekmesidir. Amorf silikon güneş pillerinin önemli bir çeşidi, alttabaka üzerine uygulanan-Si ve mikro-kristalin silisyum (μ c-Si) ek katmanlarına sahip bir Si hücresinden oluşan çok-bağlamalı ince film silikon (a-Si / μ c-Si) 'dir. -C-

Si tabakasının avantajı, ışık spektrumunun kırmızı ve yakın kızıl ötesi kısmından daha fazla ışık emmesi ve dolayısıyla verimliliği %10'a kadar arttırmasıdır. -C-Si tabakasının kalınlığı 3 mikron mertebesinde ve hücreleri daha kalın ve daha kararlı hale getirir.

2.4.3.2. Kadmiyum tellür

İki ana hammadde kadmiyum ve tellürdür. Kadmiyum, çinko madenciliğinin bir yan ürünüdür ve tellür, bakır işleminin bir yan ürünüdür. Hücre, şeffaf iletken oksit kaplı cam üzerine yerleştirilmiş bir yarı iletken film istiften oluşur. Geniş alan alttabakalarını kullanan sürekli bir üretim prosesi ile üretilir. CdTe'ye dayanan modüller, iyi düşük ışık tepkisi ve sıcaklık tepkisi katsayıları ile çok çeşitli iklim koşullarında yüksek bir enerji çıkışı üretirler[32].

Kadmiyum Tellür ince film PV güneş hücreleri, diğer ince film teknolojilerinden daha düşük üretim maliyetlerine ve % 16,7'ye kadar varan daha yüksek hücre verimlerine sahiptirler. Bu kombinasyon CdTe ince filmleri, şu anda mevcut olan en ekonomik ince film teknolojisiyle yapılmaktadırlar.

Potansiyel bir problem, tellurumun kadmiyumdan çok daha düşük miktarlarda üretilmesi ve uzun vadede elverişliliğin, bakır endüstrisinin ekstraksiyonu, rafine edilmesini ve geri kazanım verimini optimize edip etmediğine bağlı olmasıdır. Kadmiyumun ayrıca kullanımını sınırlandırabilecek toksisitesiyle ilgili sorunları vardır[36].

2.4.3.3. Bakır indiyum galyum selenür

CIGS, bakır, indiyum, galyum ve selenyumdan oluşan bir bileşikten oluşan bir yarı iletkenidir. CIGS, ışığı kristalin silikondan daha verimli emer, ancak bu yarı iletkene dayalı modüller, a-Si FV modüllerinden biraz daha kalın filmler gerektirir. İndiyum, nispeten pahalı bir yarı iletken malzemedir, ancak gerekli miktarlar, levha bazlı teknolojilere kıyasla oldukça küçüktür. CIGS modüllerinin ticari üretimi, gelişimin ilk aşamalarındadır. Bununla birlikte, tüm ince film FV modül teknolojilerinin en yüksek dönüşüm verimliliğini sunma potansiyeline sahiptirler. İnce film CdTe PV hücreleri, c-Si muadillerine kıyasla hızlı ve nispeten ucuz bir şekilde üretilebilmeleri nedeniyle

özel bir yıkıcı potansiyel göstermektedirler. CdTe için araştırmaları ayakta tutan, Arizona merkezli First Solar tarafından elde edilen % 21,5 hücre verimliliğidir[32,36].

CIGS üretimi 2007'den bu yana katlanarak artmıştır. CIGS'in c-Si verimlilik seviyelerine ulaşma potansiyeli göz önüne alındığında, CIGS üreticilerinin pazar liderliği için geleceğe umutla bakmaktadır. CIGS'nin, bir plastik veya esnek metal destek alt tabakası kullanıldığında, yüksek bir fiziksel esneklik ile sağlaması c-Si'ye göre bir başka avantajdır[37].

2.4.4. Gelişen FV hücre teknolojileri

Konsantre FV (CPV) sistemlerinde, doğrudan güneş radyasyonunu yarı iletken bir malzemeden yapılmış çok küçük, yüksek verimli çok-kuşaklı güneş hücreleri üzerine yoğunlaştırabilmek için lensler veya aynalar gibi optik cihazları kullanmaktadır. Güneş ışığı konsantrasyonu faktörü 2 ila 100 misliden (düşük ila orta konsantrasyon) 1000 misline kadar (yüksek konsantrasyon) değişir. Etkili olması için, objektiflerin, sırasıyla düşük ve yüksek konsantrasyonlar için tek veya çift eksenli bir izleme sistemi kullanılarak, sürekli olarak güneşe doğru yönlendirilmesi gerekir. Bazı yoğun FV tasarımları için soğutma sistemleri (aktif veya pasif) gereklidir. Düşük ila orta yoğunluklu sistemler (güneşin 100 misline kadar) silikon güneş hücreleri kullanabilirler, ancak daha yüksek sıcaklıklar verimlerini düşürmektedir. Yüksek konsantrasyonlu sistemler (güneşin 500 misli ötesinde) genellikle yarı iletken tarafından en yüksek FV dönüşüm verimliliğini sunan ve periyodik tablo grup III ve V bileşiklerinden (örn., galyum arsenid) üretilen çoklu bağlantı güneş hücrelerini kullanmaktadır. Çoklu bağlantı ('tandem' veya 'üçlü' jonksiyon) güneş pilleri, her biri farklı bir grup yarı iletkeninden yapılmış, farklı bant aralığı ve güneş enerjisini mümkün olduğunca absorbe etmek için spektral absorpsiyona sahip olan katmanlı p-n bağlantılarının bir yığından oluşurlar. Silikon bazlı hücreli ticari CPV modülleri, %20 ila %25 aralığında verimliliğe sahiptirler. III-V yarı iletkenler kullanılarak elde edilen çoklu bağlantı güneş pilleri bazlı CPV'ler, %40'ın üzerinde laboratuvar verimliliğine ulaşmıştır[36].

Organik güneş hücreleri organik veya polimer malzemelerden (organik polimerler veya küçük organik moleküller gibi) oluşmaktadır. Hücre yapımında p-tipi ve verici n-tipi materyal olarak eşlenik (conjugated) organik polimerleri kullanmaktadır. Aktif

tabaka kalınlıklarının ~ 100 nm gibi ince film yapısında olabildiği, mevcut polimer çeşitlilikleri, hafif, esnek ve ucuz hücre yapılabilmesi özellikleri ile OGH teknolojisi gelecekteki FV hücre üretiminde önemli bir potansiyele sahip olacaktır. Bir nişteknoloji olarak ortaya çıkmışlardır, ucuz ama düşük verimli bir yapıdır. Organik FV modülü verimliliği, 2009 yılı itibariyle ticari sistemler için %4 ila %5 ve laboratuvarında %6 ila %8 arasına yükselmiştir. Düşük verime ek olarak, organik güneş pilleri için büyük bir sorun, zaman içindeki kararsızlıklarıdır. Organik hücre üretimi, yüksek hızlı ve düşük sıcaklıkta roll-to-roll üretim süreçlerini ve standart baskı teknolojilerini kullanmaktadır. Organik hücreler, plastik tabakalara, baskı ve kaplama endüstrilerine benzer bir şekilde uygulanabilirler ,ayrıca organik güneş pilleri hafif ve esnektir, bu özellikleri onları mobil uygulamalar ve çeşitli düzensiz yüzeylere uydurmak için avantajlı hale getirmektedir. Potansiyel kullanımlar arasında, cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, radyolar, el fenerleri, oyuncaklar ve batarya kullanan neredeyse tüm el cihazları yer almaktadır. Modüller hemen hemen her yere sabitlenebilir veya bir cihazın mahfazasına eklenebilir. Kullanılmadıkları zaman depolama için de sarılabilir veya katlanabilirler. Diğer bir avantaj, teknolojinin bol, toksik olmayan malzemeler kullanması ve yüksek üretkenliğe sahip çok ölçeklenebilir bir üretim sürecine dayanmasıdır[35,36].

Boya duyarlı güneş hücreleri, bir foto-duyarlılaştırılmış anot ve bir elektrolit arasında oluşan yarı iletken yapılara dayanan foto-elektrokimyasal bir yapı kullanmaktadır. Tipik bir DSSC'de, yarı iletken nanokristaller güneş ışığını (fotonları) toplayan ve boya molekülünün yük ayırmasından (foto akıntı) sorumlu olan anten olarak hizmet eder. Doğal fotosentezi taklit etmesi bakımından eşsizdir. Bu hücreler caziptir çünkü düşük maliyetli malzemeler kullanılır ve üretimi kolaydır. Bununla birlikte, performansları UV ışığına maruz kalma ile zamanla bozulabilir ve bir donma riski olduğunda sıvı elektrolit kullanımı sorun yaratabilir. Yeni geniş bantlı boyalar ve elektrolitlerin geliştirilmesine bağlı olarak yaklaşık %12'lik laboratuvar verimliliği elde edilmiştir, ancak ticari verim düşüktür - tipik olarak %4 ila %5 arasındadır. DSSC'nin verimliliğinin düşük olmasının temel nedeni, geniş bir spektral aralığı absorbe edebilen çok az boya bulunmasıdır[36].

Esas olarak kurşun-halojenür esaslı olan perovskit hücreler, adlarını "perovskite yapı" olarak bilinen, kalsiyum titanat ile aynı tipte kristal yapıya sahip bileşikler sınıfına

verirler. 2000'li yıllarda çok erken bir gelişim aşamasında olan bu yüksek egzotik malzeme, 2009 yılına kadar sadece % 3,8 civarında bir verimlilik seviyesine ulaşıyordu. Bu performans, ticari c-Si ortalaması ile karşılaştırıldığında bile % 15,0 civarındadır. Bununla birlikte, son gelişmeler de performansta önemli adım adım ilerlemeler elde edilmiştir, böylece laboratuardaki en iyi kayıtlı verimlilik %20,1'dir. Şekil 2'deki NREL verimlilik grafiğinde görülebileceği gibi, bu sonuç ortaya çıkan diğer FV teknolojilerinden daha hızlı bir verimlilik oranı artışıdır. Perovskite, verimlilik kayıtları tablosunda hızlı yükselişini sürdürürse, materyal gerçekten devrim niteliğinde olabilir. Ticari canlılık için %25,0 civarında verimlilik seviyelerine ulaşmanın önemi göz önünde bulundurulduğunda, bu devam eden ivme, başarı için temel bir faktördür. Perovskit için önemli bir meydan okuma istikrarsızlıktır. Neme olan yüksek hassasiyeti nedeniyle çabuk bozulduğundan, su geçirmez bir conta içine alınmalıdır. Bu şekilde imal edilen bazı hücreler, 1000 saatten daha uzun bir süre boyunca stabil bir şekilde kalmıştır. Deneysel sonuçlar, perovskit hücrelerinin, tam güneş ışığı altında 2000 saatten fazla bir süre boyunca kararlı bir güç üretebildiğini göstermiştir. Bu istikrarsızlığa karşı etkili ve ucuz bir nem bariyeri bulunmasının, perovskit FV ticari canlılığı için çok önemli olduğu açıktır[37].

2.5. Fotovoltaik Konvertörler

FV sistemleri ile ilişkili bir çekirdek teknoloji, güç elektronik dönüştürücüsüdür. İdeal bir FV dönüştürücü, FV panelinden maksimum gücü çekmeli ve yük tarafına sağlamalıdır. Şebekeye bağlı sistemlerde bu, akımda minimum harmonik içerik ve 1'e yakın bir güç faktörü ile yapılmalıdır. Bağımsız sistemler için çıkış voltajı da istenen değere ayarlanmalıdır. Bu bölümde, genellikle FV sistemleri ile ilişkili farklı topolojilerin kısa bir değerlendirmesi verilmektedir. Evirici terimi genellikle iki farklı şey için kullanılır: İlk olarak, DC-AC dönüşümünü gerçekleştiren elektronik yapı bloğu olan gerçek evirici için kullanılır. İkincisi, evirici terimi, üreticilerin ürettiği toplam ünite için de kullanılmaktadır, günümüzde genellikle bir MPP izleyici, bir DC-DC dönüştürücü, bir DC-AC dönüştürücü ve muhtemelen bir bataryanın bir şarj kontrolörü de bulunmaktadır[38].

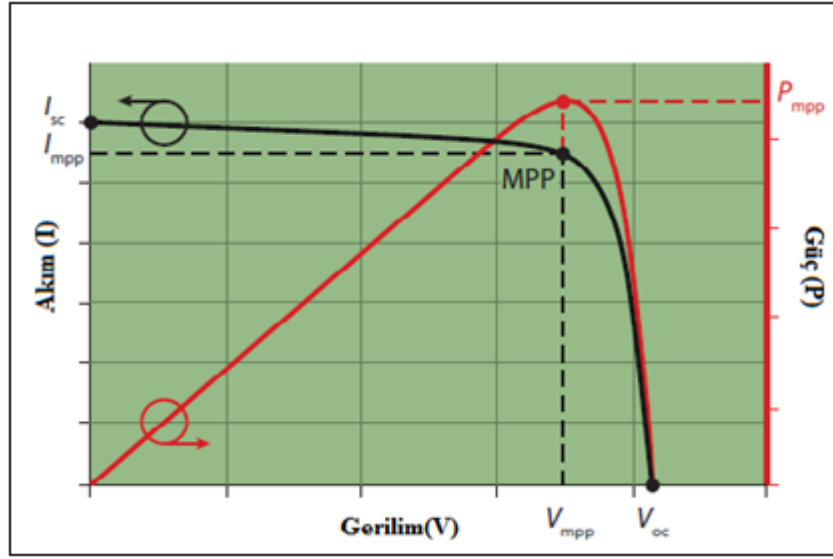
2.5.1. DC-DC konvertörler

DC-DC dönüştürücüler çoklu amaçları yerine getirir. Bir eviricide, DC güç AC gücüne dönüştürülür. Eviricinin DC giriş gerilimi, genellikle sabittir fakat MPP'deki modüllerin çıkış voltajı sabit değildir. Bu nedenle DC-DC dönüştürücü, panellerdeki değişken gerilimin DC-AC evirici tarafından kullanılan sabit gerilime dönüştürülmesinde kullanılır. Ek olarak, MPP İzleyiciler modüllerin çalışma noktasını kontrol eder, ancak bunu ayarlayamaz. Bu işlemde DC-DC konvertör tarafından yapılır. Ayrıca, bağımsız bir sistemde modüllerin MPP gerilimi, pil ve yük tarafından istenenlerden farklı olabilir. Ayrıca burada bir DC-DC dönüştürücü yararlıdır. DC-DC dönüştürücüler için üç topoloji kullanılır: buck, boost ve buck-boost dönüştürücüler. Bunlar aşağıda açıklanmıştır[38].

2.5.1.1. Maksimum güç noktası takibi

Bu kavram, FV Sistemleri alanına çok özgüdür ve bu nedenle fotovoltaik alanına çok özel bir güç elektroniği uygulaması getirmektedir. MPPT genellikle FV modülü / dizi düzeyinde kullanılmasına rağmen, bu bölümde ele alınan kavramlar eşit olarak hücreler, modüller ve diziler için geçerlidir. Daha önce tartışıldığı gibi, aydınlatılmış bir güneş hücresinin davranışı bir akım-gerilim (I-V) eğrisi ile karakterize edilebilir. Seri veya paralel olarak birkaç güneş hücresinin birbirine bağlanması, sadece toplam gerilimi veya akımı artırır, ancak I-V eğrisinin şeklini değiştirmez. Bu nedenle, MPPT kavramını anlamak için, bir güneş pilinin I-V eğrisini dikkate almak yeterlidir. I-V eğrisi, ışınımdaki modül sıcaklığına bağlıdır. Örneğin, artan bir ışınlanma, artırılmış bir akıma ve biraz daha yüksek bir gerilime yol açar. Aynı şekil, artan sıcaklığın gerilim üzerinde zararlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Çalışma noktası (I, V), Şekil 2.6 'da gösterilen güç-gerilim (P-V) eğrisindeki bir noktaya karşılık gelir. Belirli bir ışınlanma ve sıcaklıkta en yüksek güç çıkışını üretmek için, çalışma noktası, maksimum güç noktası (MPP) olarak adlandırılan (P-V) eğrisine karşılık gelmelidir[38].



Şekil 2.6. Fotovoltaik modül akım-gerilim çalışma eğrisi

Bir FV modülü (veya dizisi) doğrudan bir elektrik yüküne bağlıysa, çalışma noktası bu yük tarafından belirlenir. Modülün maksimum gücünü elde etmek için, modülü maksimum güç noktasında çalışacak şekilde zorlamak gereklidir. Modülü MPP'de çalıştırmaya zorlamanın en basit yolu, ya FV modülünün gerilimini MPP'de (V_{mpp} olarak adlandırılır) veya MPP'nin (I_{mpp} olarak adlandırılan) akımını düzenleyecek şekilde zorlamaktır.

Bununla birlikte, maksimum güç noktasının eğrideki yeri ortam koşullarına bağlıdır. Işınlama veya sıcaklık değişirse, I-V ve P-V özellikleri de değişecektir ve dolayısıyla MPP'nin konumu değişecektir. Bu nedenle, I-V eğrisindeki değişiklikler, çalışma koşullarının, ortam koşullarındaki değişikliklerden sonra MPP'de olacak şekilde ayarlanabilmesi için sürekli olarak takip edilmelidir. Bu işlem Maksimum Güç Noktası İzleme veya MPPT olarak adlandırılır. Bu işlemi gerçekleştiren cihazlara MPP izleyici adı verilir. MPP izleme metodlarını iki alt kategoride inceleme yapabiliriz. MPPT için çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. Sabit gerilim metodu ve oransal açık devre gerilim metodu endirek takip algoritmalarına örnek olarak verilebilir. Saptır ve gözle metodu ve artımsal iletkenlik metodu ise direk takip algoritmalarına örnek verilebilir[38].

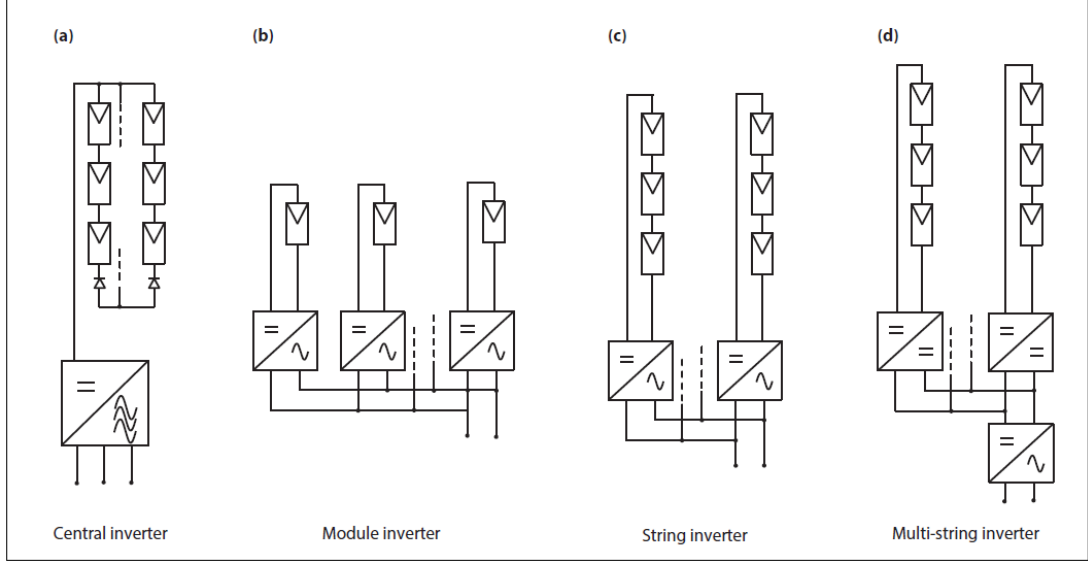
2.5.2. DC-AC konvertörler(eviriciler)

Bu bölümde, daha önce FV sistemlerinde güç dönüşümü için kullanılan farklı mimariler ele alınmıştır. Dahası, FV modüllerinden gelen değişken çıkışı sabit bir gerilim seviyesine getirmek için ağırlıklı olarak MPPT'lerle birlikte kullanılan DC-DC dönüştürücüler incelenmiştir. Günümüzde çoğu cihaz standart AC şebekeler için tasarlandığından, çoğu FV sistemi için bir DC-AC dönüştürücü gereklidir. Daha önce de belirtildiği gibi, inverter terimi hem DC-AC dönüştürücü hem de gerçek güç dönüştürücüyü oluşturan tüm bileşenlerin kombinasyonu için kullanılmaktadır.

FV evirici, şebekeye bağlı FV güç sistemlerinin temel elemanıdır. Ana işlev, FV panelleri tarafından üretilen DC gücünü şebeke senkronize AC gücüne dönüştürmektir. Tarihsel olarak, şebekeye bağlı ilk FV tesisleri, 1980'lerde tristör temelli merkezi invertörler olarak tanıtılmıştır. İlk seri üretilen transistör tabanlı FV evirici, 1990 yılında SMA tarafından PV-WR idi. 1990'ların ortalarından beri, IGBT ve MOSFET teknolojisi, MOSFET teknolojisinin baskın olduğu modüle entegre olanlar hariç, tüm FV inverterleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. Güneş enerjisi maliyetinin yüksek olmasından dolayı, FV invertör teknolojisi öncelikli olarak verimliliğe dayanmaktadır. Güneş enerjisi maliyetinin yüksek olması, FV evirici teknolojisinin kullanılmasını sağlar. Böylece piyasada FV evirici yapıların çok büyük bir çeşitliliği görülebilmektedir. Motor sürücü invertörlerine kıyasla, FV eviricileri hem donanım hem de işlevsellik açısından daha karmaşıktır. Böylece, giriş gerilimini, şebeke bağlantı filtresini, şebeke ayırma rölesini ve DC anahtarını artırma ihtiyacı, artan donanım karmaşıklığından sorumlu olan en önemli unsurlardır. Maksimum güç noktası takibi, adalanmada izolasyon, şebeke senkronizasyonu ve veri kaydedici, FV eviricileri için gerekli olan tipik fonksiyonlardır[39].

Aslında, 20 yıldan daha eski ve tam köprü topolojisinin dünya çapında kabul gördüğü maliyete dayanan elektrikli tahrik endüstrisinin aksine, FV invertörleri için verimliliği arttırmak ve üretim maliyetini azaltmak amacıyla yeni yenilikçi topolojiler geliştirilmiştir. FV panellerin ömrü tipik olarak 20 yıldan uzun olduğu için, FV eviricilerin ömrünü uzatma çabaları da devam etmektedir. Bugün, birkaç üretici 20 yıldır genişletilmiş servis sunmaktadır[39].

Verimliliği arttırmak için kullanılan ilk yöntem, genellikle DC-DC boost konvertöründeki yüksek frekanslı transformatörler tarafından sağlanan galvanik izolasyonu veya çıktındaki düşük frekanslı bir transformatörün ortadan kaldırılmasıdır. Böylece %1-2'lik tipik bir verimlilik artışı elde edilebilir[39].



Şekil 2.7. Fotovoltaik evirici tipleri; a) merkezi evirici b) modül evirici c) dizi evirici d) çoklu-dizi evirici

FV paneller tipik olarak, topraklanmış bir metalik çerçeve ile çerçevelenmiş cam, silikon yarı iletken ve arka panel içeren kademeli bir yapıda oluşturulduğundan, toprağa göre bir kapasitans ortaya çıkar ve kaçak akım için bir yol oluşturur. Bu, özellikle konut uygulamalarında, arızaların bir göstergesi olarak kaçak akımı izleyen bir sisteme dayanan kişisel güvenliği tehlikeye atabilir. Bu nedenle, transformatörsüz yapı, güvenlik sorunlarına uymak için sızıntı akımını ve DC akım enjeksiyonunu kontrol altında tutmak için tipik olarak yeni topolojilere yol açan daha karmaşık çözümler gerektirir. Eviriciler Şekil 2.7'de gösterildiği gibi 4 gruba ayrılabilir. Bunlar aşağıda detaylı verilmiştir[38].

2.5.2.1. Merkezi eviriciler

Bu, FV sistemlerinde kullanılan en basit mimaridir. Burada, FV modülleri artan sistem gerilimine yol açan dizelere bağlanmıştır. Birçok dizgi daha sonra bir merkezi eviriciye bağlı bir FV dizisi oluşturacak şekilde paralel olarak bağlanır. Evirici, üç

fazlı bir eviricinin tasvir edildiği Şekil 2.7 (a) 'da gösterildiği gibi maksimum güç noktası izleme ve güç dönüşümü gerçekleştirir.

Bu konfigürasyon çoğunlukla çok büyük ölçekli FV üretiminde tercih edilmektedir. Merkezi eviriciler genellikle 100–1000kW güç aralığında ve üç fazlı DC'dir. Üç fazlı evirici olarak birçok farklı evirici topolojisi kullanılmaktadır. Bazen üç fazlı birime tek bir DC olarak düzenlenirler, ancak bazen her biri 120 derecelik bir faz deplasmanı ile çalışan üç ayrı DC-AC tek fazlı ünite şeklinde de yapılabilirler. Böyle bir merkezi konfigürasyonda tek bir dizide bağlı olan tüm FV modlarına sahip olmak, en düşük spesifik maliyeti ortaya çıkartmaktadır. Merkezi eviriciler sadece birkaç bileşen kullandıkları için, büyük ölçekli FV enerji santrallerinde tercih edilmektedirler[38].

2.5.2.2. Modül entegre eviriciler

Çok farklı bir mimari, Şekil 2.7 (b) 'de gösterildiği gibi, modülün entegre invertörleridir. Bu invertörler doğrudan bir veya birkaç FV modülünde çalışır ve tipik olarak 50-400 W aralığındagüç değerlerine sahiptirler. FV modülünün düşük gerilim derecesi nedeniyle, bu eviriciler genellikle iki kademeli bir güç dönüşümü gerektirmektedirler.

Birinci aşamada, DC gerilimi ikinci aşamada AC'ye çevrilirken gerekli olan değere yükseltilir. Çoğunlukla, sistem esnekliğini daha da artıran tam galvanik izolasyon sağlayan yüksek frekanslı bir trafo dahil edilir. Adından da anlaşılacağı gibi, bu invertörler genellikle FV paneli ile (“AC FV panelleri” olarak adlandırılır) entegre edilmiştir.

Bu şekilde, sistemin en yüksek esnekliği ve genişletilebilirliği elde edilir. Bu sistemin en ayırt edici özelliklerinden biri, düşük yatırım maliyetiyle eksiksiz (ve kolayca genişletilebilir) bir FV sistemi oluşturulmasına olanak sağlayan “tak ve çalıştır” karakteristiğidir[38].

2.5.2.3. Dizi eviriciler

Şekil 2.7 (c) 'de gösterildiği gibi dizi evirici, merkezi ve modül entegre evirici kavramlarının avantajlarını küçük kayıplarla birleştirmektedir. Seri olarak bağlanan bir dizi FV modülü, 5 kWp'ye kadar güç değerine ve 1 kV'a kadar açık devre voltajına

sahip bir FV dizisi oluşturmaktadır. FV sistemini şebekeye bağlamak için bir dizi 0,4–2 kW aralığında küçük invertör kullanılabilir. Topolojinin bir dezavantajı, yüksek DC geriliminin, merkezi inverter mimarisi için olduğu gibi, özel olarak dikkate alınması gerektiği gerçeğidir. Burada, bu sorun daha da önemlidir, çünkü dizi eviricileri, özel destek yapısı veya arttırılmış güvenlik gereklilikleri olmaksızın genellikle hanelerde veya ofis binalarında kurulmaktadır[38].

Genelde, modüller ve evirici arasındaki ara bağlantıları gerçekleştirmek için yetkili bir elektrikçi gerekir. Sistemin korunması ayrıca uygun DC kablolarına önem verilerek özel bir değerlendirme yapılmalıdır. Dizenin kısmi gölgelenmesi sistemin genel verimliliğini etkilese de, her bir dizi bağımsız olarak MPP'sinde çalıştırılabilir.

Ayrıca, hiçbir dizinin paralel bağlanmadığı için, birçok paralel diziyeye sahip FV dizilerinde olduğu gibi seri diyotlara ihtiyaç yoktur. Dolayısıyla, bu diyotlarla ilişkili kayıpları azaltır.

2.5.2.4. Çoklu dizi eviriciler

Şekil. 2.7 (d) 'de görüntülenen çoklu dizi evirici konsepti, bir eviricinin daha yüksek enerji veriminin avantajını bir merkezi eviricinin daha düşük maliyetleriyle birleştirmek için geliştirilmiştir. Daha düşük güçteki DC-DC dönüştürücüler, her bir FV dizisinden enerji çıkışını bağımsız olarak optimize eden kendi MPP izlemesine sahip olan ayrı FV dizilerine bağlanırlar. Sistemi belirli bir güç aralığında genişletmek için sadece DC-DC dönüştürücüye sahip yeni bir dizinin eklenmesi gerekir. Tüm DC-DC dönüştürücüler, bir DC veri yolu üzerinden bir merkezi inverter aracılığıyla şebekeye bağlanırlar ve tipik olarak 1,5 ila 6 kW güç aralığında çalışmaktadırlar[38].

2.5.3. Adalanma

Şebekeye bağlı sistemlerin potansiyel tehlikesi adalanmadır. Elektrik kablolarında bakım çalışmaları yapmak için elektrik şebekesinin kapatıldığı bir sokakta potansiyel bir FV sisteminin kurulduğunu düşünelim. Güneşli bir günde ise, FV sistemi güç üretecek ve - koruma olmadan - gücü şebekeye iletacaktır ve dolayısıyla burada çalışan elektrik işçisi tehlikede olabilir. Bu fenomene adalanma denir ve tehlikesi nedeniyle önlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle evirici elektrik şebekesi kapatıldığında algılayabilmeli ve şebekeye güç iletmeyi de durdurmalıdır[38].

2.6. Güneş Takip Platformları

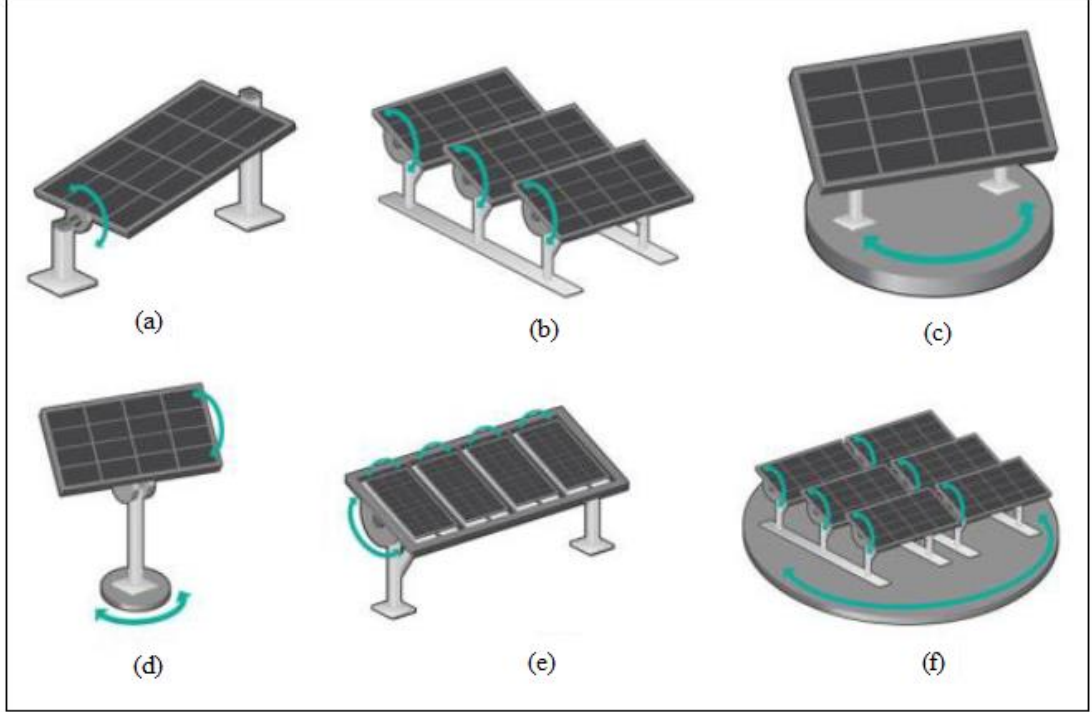
Güneş takip sistemlerinde hareket, aktif veya pasif yollarla üretilir. Aktif izleme, modülü otomatik olarak güneşe yönlendirmek için elektrik motorları ve redüktörleri kullanan bir sistemdir. Aktif izleme sistemleri, bir veya iki eksenle takip yapabilirler. Takip yönü, güneşi arayan sensörlerle veya güneşin konumunu hesaplayan bir bilgisayar tarafından belirlenir. Pasif bir izleme sistemi, modülü otomatik olarak güneşe yönlendirmek için elektriksiz araçlar kullanır. Soğutucu akışkanlar platformu hareket ettirmek için kullanılabilir, çünkü bu akışkanlar güneş tarafından ısıtıldığında buharlaşır ve genişler. Genişleyen akışkanın ağırlığı izleyicinin bir tarafından diğerine kayar ve izleyicinin güneşe doğru dönmesine neden olur. Alternatif bir tasarım ise bir hidrolik silindir ve bağlantı düzeneğini çalıştırmak için soğutucu akışkanı kullanılmakta, her iki tasarımda da takip yönünün kontrolü için güneş şemsiyeleri gerekmektedir. Bunlar güneş ışınlarının sadece bir yönden gelişini sıvının ısıtılmasını düzenlemek için onun üzerine yansıtır ve diğer yönden gelen ışınları gölgeler. Böylece platform her iki tarafından da güneşi eşit görecektir. Pasif izleme platformları genellikle yalnızca bir eksenle kontrol eder. Büyük ölçekli sistemlerde ise modül çıktısını en üst düzeye çıkarmak için takip sistemlerini kullanılmaktadır. Takip, özellikle yüksek enlemlerde, günlerin uzun olduğu yaz aylarında en yüksek enerji artışına neden olur. Takip platformları, gün ve ışınların katettiği mesafenin kısa olduğu kış aylarında daha az faydalıdır.

Takip platformları birçok kategoriye göre sınıflandırılabilir. Kontrol stratejisine göre açık döngü veya kapalı döngü olabilir. Tahrik sistemine göre aktif veya pasif olabilir. Serbestlik derecesine göre tek eksen veya çift eksenli olabilir. Takip stratejisine göre tarih-zaman tabanlı veya sensör tabanlı olabilir.

2.6.1. Tek eksenli platformlar

Bu sistemlerin, panel yüzeyini radyasyon yönüne dik olarak hizalamak için sadece bir dönüş eksenidir. Tek eksenli takipçiler, güneş panellerinin güneşin konumuna göre doğu-batı yönleri arasında dönmelerini sağlamaktadır. Tek eksenli takipçiler esneklik, basitlik ve performans arasında makul düzeyde iyi bir denge oluşturmaktadır. Tek

eksenli takipçiler, dönen eksenin zemine göre pozisyonuna bakarak adlandırılabilir[40].



Şekil 2.8. Güneş takip platform tipleri; a) TSAT b) HSAT c) VSAT d) TTDAT e) HDAT f) AADAT

Şekil 2.8. (a): TSAT- Yatay ve dikey arasında hizalanmış eksenli takipçi, eğimli tek eksenli takipçi olarak adlandırılır.

Şekil 2.8. (b): HSAT - Hareket eksenini hareketi zemine yataydır. Kuzey güney doğrultusundaki hizalamanın en iyi sonucunu vermektedir.. Yatay tek eksenli takipçi olarak adlandırılır.

Şekil 2.8. (c): VSAT - Hareket eksenini hareketi zemine dikeydir. Paneli hafif eğimli hizalama en iyi sonucu vermektedir. Dikey tek eksenli takipçi olarak adlandırılır.

2.6.2. İki eksenli platformlar

Çift eksenli takipçi, hareket özgürlüğünün iki ayrı yöne genişletildiği tek eksenli takipçinin bir üst versiyonu olarak düşünülebilir. Diğer montaj tiplerine kıyasla, çift eksenli takipçiler güneş panellerinin hareketine en geniş oranda izin vermektedirler.

Bu nedenle, FV güneş paneli gün ışığı süresince daha uzun bir süre daha yüksek bir verimlilikte çalışabilir[40].

Şekil 2.8. (d): TTDAT- Ucu eğmeli çift eksenli izleyici - Bu düzenekte panel dizisi, sabit dikey azimut ekseni ile kutbun üstüne monte edilir. Toplanan toplam gücü maksimize etmek yararlıdır.

Şekil 2.8. (e): HDAT- Yatay çift eksen takipçi - Bu düzenekte hem kuzey-güney doğrultusunda hem de doğu-batı doğrultusunda birbirine dik olarak hareket eden iki eksen mevcuttur. Genellikle ekvatorial bölgelerde kullanımı yaygındır.

Şekil 2.8. (f): AADAT- Azimuth-yükseliş tipi çift eksenli takipçi - Bu tür bir takipçide iki eksen vardır, burada birincil eksen zemine dikey olarak hizalanır, azimut ekseni olarak adlandırılır ve diğeri, birincil eksene dik hizalanmış olan yükseklik eksenidir[41].

2.7. FV Sistem Konfigürasyonları

2.7.1. Direkt yük bağlantılı sistem

Bunlar güneş panelleri ve yükün en az bileşenleri olan en basit güneş FV sistemleridir. Pilleri olmadığı için ve şebekeye bağlı olmadıkları için, sadece güneş parladığında yükleri çalıştırıyorlar. Su pompalama veya çatı havalandırma fanı gibi birkaç uygulama için uygundur.

2.7.2 Şebeke bağlantısız sistemler

Bağımsız sistemler sadece güneş enerjisine dayanır. Bu sistemler, FV modülleri ve sadece bir yükten oluşabilir veya enerji depolama için piller içerebilir. Piller kullanıldığında, piller tam olarak şarj edildiğinde FV modüllerini kapatan şarj regülatörleri dahildir ve pillerin belirli bir sınırın altında boşalmasını önlemek için yükü kapatabilir.

Piller, gece ve gündüz kötü hava koşullarında kullanılmak üzere üretilen enerjiyi depolamak için yeterli kapasiteye sahip olmalıdır. Şekil 15.1, bağımsız sistemlerin şematik örneklerini göstermektedir; (a) bataryası olmayan basit bir DC FV sistemi ve (b) hem DC hem de AC yükleri olan büyük bir FV sistemi[38].

2.7.3. Şebeke bağlantılı sistemler

Şebekeye bağlı FV sistemleri, entegre uygulamalar oluşturmak için giderek daha popüler hale gelmiştir. Bu sistemler, DC enerjisini AC elektriğe çeviren invertörler vasıtasıyla şebekeye bağlanırlar.

Konut sistemlerinde kurulu oldukları gibi küçük sistemlerde evirici, FV kaynaklı gücün elektrik şebekesine veya evdeki AC cihazlarına aktarıldığı dağıtım panosuna bağlanır. Bu sistemler pil gerektirmezler, çünkü şebekeye bağlı olduklarından, FV'nin aşırı elektrik beslemesi yapıldığında tampon görevi görürken, şebeke aynı zamanda FV güç üretiminin yetersiz olduğu zamanlarda şebekeye elektrik sağlamaktadırlar[38].

2.8. FV Sistemlerde Depolama

Güneş ışığının temel karakteristiği gün içinde ve mevsimsel olarak ışık şiddetinin değişken olmasıdır. Bu da bir FV sistemin elektrik üretim çıktısının değişken olmasına neden olur. Oysa her cihaz etiketindeki nominal güç değerinde sabit olarak akım çeker. FV sistemin çıktısının düştüğü koşullarda elektriksiz yük ile eksik panel elektrik üretimini dengelemek için bir enerji depolama sistemine ihtiyaç duyulur. Ayrıca depolanan enerji geceleri ve bulutlu havalarda sisteme bağlı cihazları çalışmak için kullanılır. FV sistem eğer bir depolama sistemi yoksa ve o anki bağlı cihazlar FV sistemin ürettiğinden daha fazla güç talep ediyorsa cihazlara istenen gerilim uygulanamayacak ve cihazlar zarar görme riski ile karşı karşıya kalacaktır. Aşağıda FV sistemlerde en çok kullanılan depolama sistemlerine yer verilmiştir [42].

2.8.1. Akülü depolama sistemleri

Şarj edilebilir aküler günlük hayatta en çok kullanılan enerji depolama sistemleridir.

Akülü depolama sistemleri birbirine seri veya paralel olarak bağlanmış birçok elektrokimyasal akü hücresinden oluşur. Her hücre iki adet elektrod ve hücre içindeki elektrolit adı verilen sıvıdan oluşur. Çift yönlü olarak elektrik enerjisi ve kimyasal enerji arasında dönüşüm yapar. En çok kullanılan üç akü tipine aşağıda yer verilmiştir[43].

2.8.1.1.Kurşun-asit aküler

Kurşun asit aküler 150 yıldan fazla bir süredir kullanılan ve pazarı domine etmiş bir akü çeşididir. Bunun nedeni diğer tiplere göre düşük maliyeti, uzun ve güvenilir servis ömrüdür. Uygulamaya göre birçok şekilde ve boyutta tasarlanırlar. Genellikle tekli hücre veya altı hücreli 12V akü formunda satılırlar. Ufak FV sistemler nominal kapasitesi 120 Ah'e kadar olan otomobil ve kamyon akülerinin modifiye edilmiş tiplerini kullanırlar[42].

Akünün çalışma sıcaklığı, deşarj hızı ve şarj hızı akünün performansını etkiler. Şarj sırasında akım yolu üzerindeki omik dirençten dolayı bir miktar elektrik enerjisi ısı enerjisine dönüşür. Deşarj sırasında ise akünün iç direncinden dolayı yine bir miktar enerji ısıya dönüşür. Şarj ve deşarj prosesleri kurşun asit akülerde sonrasında toplam verim %90 civarında çıkar. Akünün iç direncinden dolayı oluşan kayıp akımın karesi ile orantılı olduğu için yüksek akımlı şarj ve deşarjlar akünün performansını düşürür[44].

2.8.1.2. Nikel kadmiyum aküler

Nikel-kadmiyum aküler kurşun-asit akülere göre daha kararlıdır. Düşük ve yüksek sıcaklıklara dayanabilirler, tamamen deşarj edilebilirler ve aşırı şarjdan daha az etkilenirler. Ni-Cd akülerin iç dirençleri çok küçüktür. Şarj edildikten sonra kullanılmadan 6 ay bekletilse bile yüzde 80 dolulukta kalabilir. Doluluk kayıpları ortam sıcaklığı ile orantılıdır. -20 derece sıcaklıkta neredeyse hiç kaybı yoktur. Ömürleri kullanım şekline bağlı olarak 8 ila 25 yıl arasında değişir. Kurşun-asit akülere kıyasla ömrü deşarj derinliğine daha az bağlıdır. Bu tip aküler sabit akım ile, sabit gerilim ile veya akım-gerilim eğrisinde bu iki noktanın arasında bir noktada şarj edilebilirler. Bu da onları özellikle FV panel uygulamalarında çok kullanışlı kılar. Çünkü FV parçalı paneller bulutlu havalarda sabit akım kaynağı gibi davranırlar. Bir çevrimdeki şarj-deşarjda toplam verim yüzde 85'e kadar çıkmaktadır. Bu tip aküler açık tip, kapalı tip ve yarı kapalı tip ambalajlarda üretilirler. Maalesef kapalı tip ambalajda üretilenlerde hafıza etkisi görülmektedir. Bu tipler tamamen boşalmadan doldurulmamalıdır[44].

2.8.1.3. Lityum iyon aküler

Lityum aküler düşük yoğunluk ve büyük elektrod potansiyeli sayesinde hafif ve yüksek çalışma gerilimine sahiptirler. Hafıza etkisi yoktur. Bu yüzden tam boşalmadan her doluluk seviyesinde şarj edilebilir. Böylelikle aralıklı olarak güç sağlayan yenilenebilir enerji kaynaklarında kullanımı giderek artmaktadır.

Bu sistemler yenilenebilir enerji kaynaklarında kısa süreli güç dengeleme için idealdir. Fakat uzun süreli enerji depolama için diğer sistemlere göre hala çok pahalı kalmaktadır[45].

Lityum-iyon aküler 300-400kwh/m³ enerji yoğunluğuna, 150-315 kw/kg güç yoğunluğuna sahip olabilirler. 20 milisaniye gibi çok kısa tepki süreleri vardır. Yüzde 85-95 aralığında şarj-deşarj verimleri vardır. Ömürleri 10-15 yıla değişir. 2000-3000 defa şarj-deşarj döngüsüne girebilirler. Yüzde 80deşarj derinliğine kadar boşaltılabilirler[46].

2.8.2. Hidrojen depolama sistemleri

FV sistemler tarafından üretilen enerjiyi depolamada akü sistemlerinin yanında hidrojen de bir depolama seçeneği olabilir. Hidrojen kullanmanın avantajı depolanan enerji kullanılacağı zaman oksijen ile yanması sonucunda herhangi bir karbon bazlı atık veya toksik atık ortaya çıkmayıdır. Bu reaksiyon sonucunda oluşan buhar istenirse bir türbini çevirerek elektrik üretiminde ya da ısıtma amaçlı başka bir proseste kullanılabilir[44].

Hidrojen elektroliz vasıtasıyla sudan elde edilir. FV sistemin çıkışı dc gerilim olduğu için elektroliz olayı için gerekli olan gerilim tipi ile uyum sağlamaktadır[44].

2.8.3. Pompalı su depolama sistemleri (PHS)

Pompalı su depolama sistemleri 120GW üzerindeki kurulu gücü ile dünya üzerindeki enerji depolama sistemlerinin yüzde 99'unu oluşturur. Konvansiyonel sistemlerde farklı yüksekliklerde iki ayrı su rezervuarı bulunmaktadır. Talebin az olduğu zamanlarda alt rezervuardan pompa vasıtasıyla su üst rezervuara gönderilmektedir.

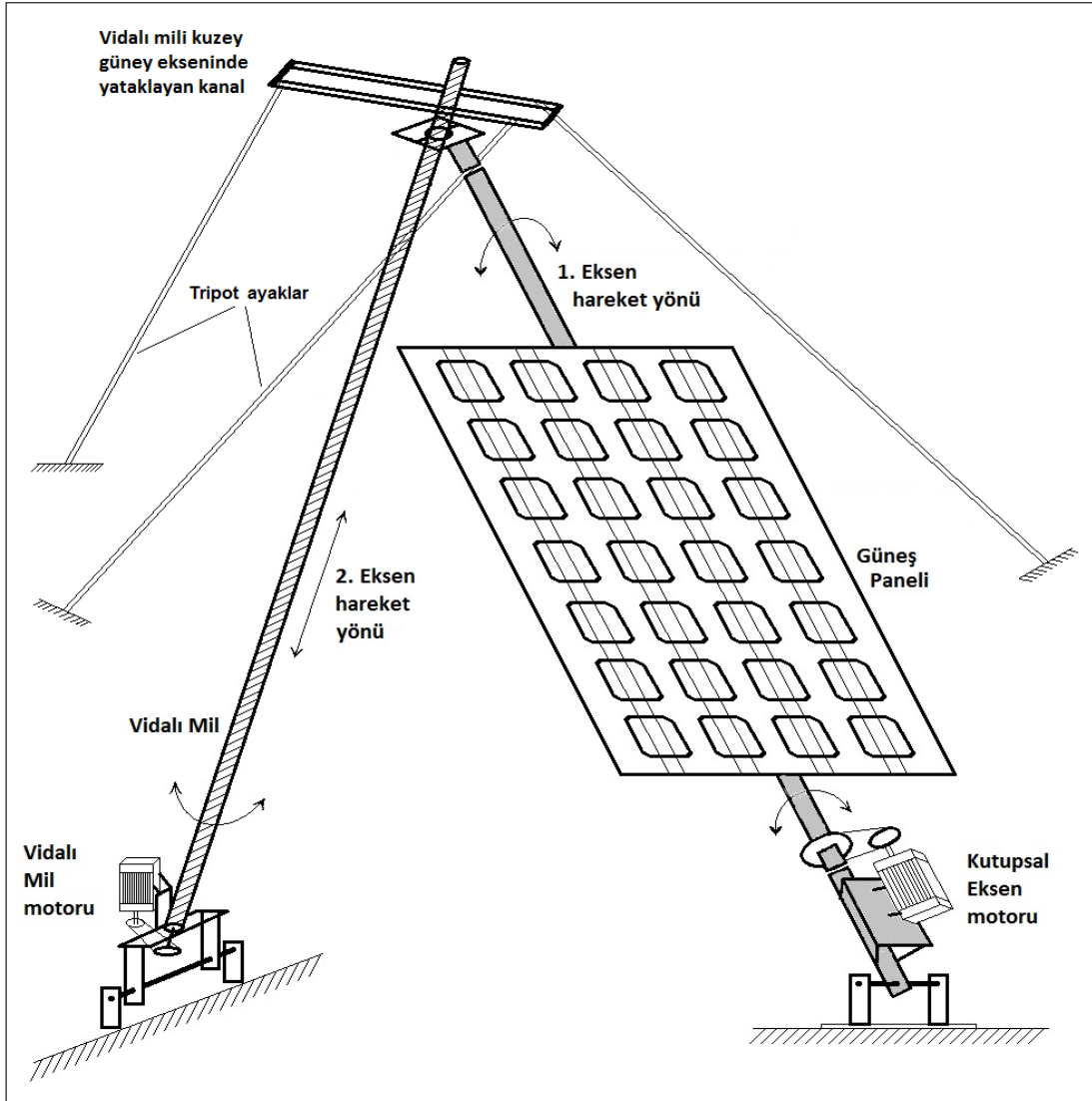
İhtiyaç olduğunda ise üst rezervuardaki su yerçekiminin etkisi ile alt rezervuara gönderilirken türbinleri çevirerek elektrik üretir. Alt ve üst rezervuar için iki şekilde uygulaması vardır. Ya tepelere baraj kurmak vasıtasıyla üst rezervuar ve zemindeki göl vs. şeklinde olur. Ya da göl vb. üst rezervuar olarak kullanılıp terk edilmiş maden ocaklarının yeraltı galerileri alt rezervuar olarak kullanılır. İlk pompalı su depolama sistemi 1890 yılında İtalya-İsviçre sınırında kurulmuştur. 1933 yılından beri iki yönlü çalışabilen pompa-türbin ve motor-jeneratör çiftleri piyasada bulunmaktadır. Tipik depolama süreleri birkaç saatten birkaç güne kadar çıkmaktadır. Toplam çevrim verimleri yüzde 70 ila 85 arasındadır. En büyük dezavantajı çok yer kaplaması ve coğrafik koşullara bağlı olmasıdır[47].

2.8.4. Basınçlı gaz depolama sistemleri (CAES)

Bir başka enerji depolama seçeneğinde basınçlı gaz depolama sistemidir. Enerji talebinin düşük olduğu saatlerde kompresör gruplarını çalıştırarak hava yeraltı mağaralarına veya yerüstü tanklarına basınçlı gaz olarak depolanır. herhangi bir ihtiyaç durumunda basınçlı gaz ısıtılarak türbinlere gönderilir ve jeneratör vasıtasıyla elektrik üretilir. İlk tesis 290MW gücünde, 1978 yılında Almanya'da kurulmuştur. Toplam çevrim verimleri yüzde 54'e kadar çıkmıştır. Birkaç saatten bir güne kadar nominal gücünde enerji sağlayabilecek şekilde depolama yapabilir. En büyük dezavantajı büyük hacimde hava depolama alanına ihtiyaç duydukları için sadece boş tuz mağaraları gibi coğrafik koşulların uygun olduğu yerlerde yapılabilirler[43].

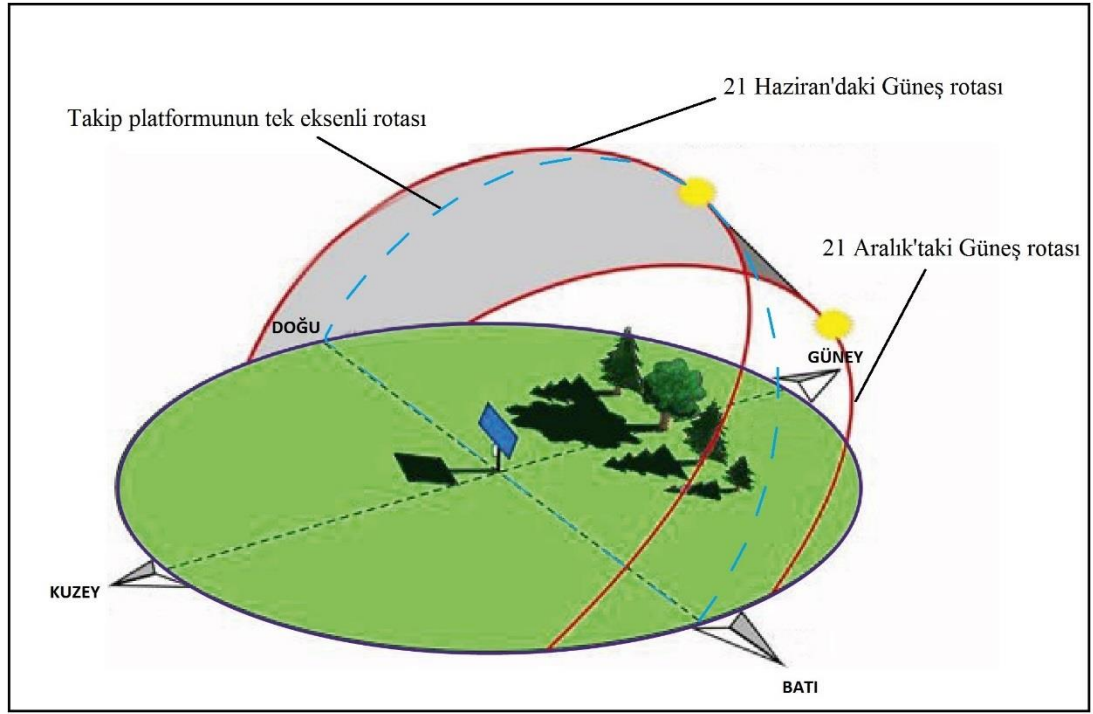
3. EĞİK EKSENLİ TASARIM UYGULAMASI

3.1. Prototip Çizim ve Tasarımın Temel Öğeleri



Şekil 3.1. Eğik eksenli tasarım prototip çizimi

Bu tez çalışmasında Şekil 3.1’de gösterilen tasarımda, güneşin gökyüzündeki rotasına yakın bir eğik düzlemde takip amaçlanmıştır. Bu hareketi gerçekleştirmek için eğik bir eksen etrafında kutupsal olarak dönebilen bir platform tasarlanmıştır. Aynı zamanda bu kutupsal eksenin eğikliğini her gün için değiştirebilecek ikinci bir eksen tasarıma dahil edilmiştir.



Şekil 3.2. Güneşin yaz ve kış dönemlerinde gökyüzündeki rotası

Bu çalışmada, motor enerji tüketimlerini asgari seviyede tutmak için mekanik tasarım olarak, döndürme momentlerini minimuma indirecek şekilde hareket amaçlanmıştır.

Geleneksel azimut-yükseliş tipi tasarımlar kuzey-güney yönündeki hareketi paneli merkezden döndürerek gerçekleştirirler. Bu da kullanılan motorların yüksek torklu seçilmesini gerektirir. Bu ekstra güç ve maliyet demektir. Bu tezde geliştirilen tasarım ile, güneş panelini bir ucundan yataklayıp diğer ucundan minimum kuvvet ile maksimum momenti sağlamak hedeflenmiştir.

Tasarımın doğu-batı hareketi ise geleneksel sistemlerden farklı olarak yere paralel olmayıp, Şekil 3.2'de kesik mavi çizgiler ile gösterilen eğik bir eksen etrafında dönmektedir. Bu şekilde eksenin bileşenleri hem doğu-batı hareketini hem de kuzey-güney hareketini içermektedir. Gerçekleştirilen tasarımda, sadece tek eksen çalıştırılarak güneş paneli normal vektörü hem doğudan batıya dönerken hemde gökyüzüne doğru yükselmektedir. Tam güney doğrultusunu geçtikten sonra da batıya dönerken gökyüzünden yere doğru alçalmaktadır.

Bu eğik kutupsal eksen sistemimizin ana eksenidir. Dönüş hareketi için 90 derece redüktör kullanıldığından eksen dönüşü olmadığında sabit tutmak için herhangi

bir fren tertibatına yada motorun enerjili olmasına gerek kalmamaktadır. Ana eksenin eğimini ayarlayan yardımcı eksen de vidalı mil tasarımı kullanılarak yükseliş için döndürme kuvveti minimuma indirilmiştir. Yine vidalı mil tasarımının doğası gereği ikinci eksen de fren veya motor enerjisi kullanılmadan çalışmadığında sabit durabilmektedir.

Platform her gün sabah güneş doğuş vaktinde doğuya dönerek konum almaktadır. Kutupsal eksen sıfır derece konumunu ikinci eksen ise o günkü maksimum yükseliş açısına göre konum almaktadır. Bu içerisine yazılan program vasıtasıyla PLC ünitesi tarafından sağlanmaktadır. Gün içerisinde hesaplanan açı değerlerine göre belirli zaman aralıkları ile akşam güneş batana kadar sadece kutupsal eksenini döndürerek güneşi takip etmektedir.

3.2. Kullanılan Malzemelerin Tanıtımı

Güneş panelinin üzerine monte edileceği şasi öncelikle hafif olması için alüminyum düşünülmüş fakat malzeme ve işçilik maliyetinin yüksekliğinden dolayı demir profilden imal edilmiştir. Minimum test maliyeti için kutupsal eksenin yataklamasında rulman kullanılmamıştır. İkinci eksene ait vidalı mil için de bilyalı yatak yerine ucuz maliyetli pirinç malzemeden bir somun kullanılmıştır.

Tahrik sisteminde hassas fakat pahalı olan adım motoru veya servo motor kullanılmaktan kaçınılmış, Şekil 3.4'te görüldüğü gibi piyasada rahat bulunabilen 24V doğru akım motorları tercih edilmiştir. Bu sayede hem ekstra maliyet hemde ekstra verim kaybına yol açan motor sürücüsüne gerek kalmamıştır. Her iki eksen motoruna da redüktör ilave edilerek hassasiyet için gerekli düşük hız ve düşük enerji tüketimi için yüksek tork elde edilmiştir. Bu redüktör çıkışları kutupsal eksen dişlisine ve vidalı mil dişlisine triger kayış ile bağlanmıştır. Böylelikle motor dişli arasındaki dönüş hareketlerinin pozisyon kaybı ortadan kaldırılmıştır. Motor dönüşlerini saymak çok hassas fakat pahalı çözüm olan enkoder yerine ucuz çözüm olan endüktif yakınlık anahtarı kullanılmıştır. Motor mili yerine kaplini algılayacak şekilde bağlanan sensör çeyrek tur hassasiyetle motor dönüşlerini sayabilmektedir.



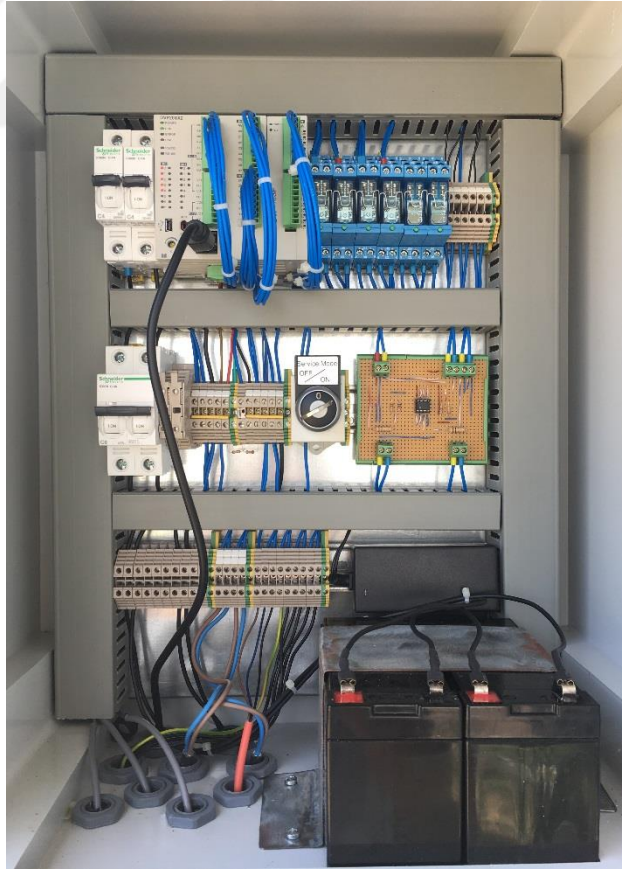
Şekil 3.3. Platform iskelesi fotoğrafı



Şekil 3.4. Eğik eksen motor ve redüktörü

Mekanik parçaların yapım süreci ve montaj kolaylığı açısından İstanbul Tuzla bölgesindeki bir işletme seçilmiş ve nihai tasarım burada devreye alınmıştır. Takip platformunu test alanındaki bina gölgelerinden etkilenmesini en aza indirmek için Şekil 3.3'te görülen yerden 3 metre yüksekliğinde bir 6 metrekare alana sahip bir iskele zemin hazırlanmıştır. Prototip tasarım üretilince iskele zemin üzerine kuzey-güney ekseninde konulmuştur. Vidalı milin rüzgarda kuzey-güney ekseninden sağa veya sola kaymaması için bir profil kanal iskele üzerine monte edilmiştir.

Sistem şebeke bağlantılı olarak tasarlanmış böylece akü ihtiyacı olmadığından sistem maliyeti düşürülmüştür. Şebekeye bağlanmak için maksimum güç noktası takip özelliği olan mikroevirici kullanılmıştır. Bu sayede sisteme, güneş ışınlarının enerjisini maksimum düzeyde elektrik enerjisine kabiliyeti kazandırılmıştır. Mikroeviricilerin bir diğer özelliği de panel bazında küçük güçlerde üretilmeleri ve çıkışlarının paralel bağlanarak senkron bir şekilde büyük güçlü bir evirici gibi davranabilmeleridir.



Şekil 3.5. Kontrol panosu

Sistemin kontrolü için endüstriyel olarak üretilen piyasada rahat bulabileceğimiz Şekil 3.5'te görülen PLC kullanılmıştır. PLC içerisinde gerçek zaman saati mevcut olup güneşin konumu hesaplamak için bu veriyi kullanmaktadır. PLC' ye güneş takip platformunun kurulduğu yerin enlemi, boylamı ve rakımı girilmektedir. Program SPA algoritmasını kullanarak güneşin pozisyonunu azimut ve zenit açıları cinsinden vermektedir. Daha sonra bu açı bilgilerinin eğik eksendeki karşılıkları trigonometrik fonksiyonların dönüşüm denklemleri kullanılarak hesaplanmaktadır[48].

Bu tez çalışmasında, geliştirilen takip platformunun hedeflenen düşük tüketim ve yüksek verimi ne ölçüde gerçekleştireceğini görmek için 520W tepe gücünde bir FV sistemini taşıyıp hareket ettirecek bir mekanik tasarım yapılmıştır. Minimum test maliyeti için elektriksel olarak sadece 260W gücünde 1 polikristal FV panel ve 1 mikroevirici kullanılmıştır. Ana eksen için 60W gücünde 24Vdc, yardımcı eksen içinde 30W gücünde 24Vdc motor seçilmiştir.

3.3. Kullanılan Yöntemin Anlatımı

Bu çalışmada, tasarlanan takip platformunun iki eksen, tek eksen ve sabit açılı durumlarındaki enerji verimlerini incelemek amaçlanmıştır. Üç farklı sistemde kurmak çok maliyetli olacağından iki eksenli tasarlanan sistemi yukarıdaki üç modda çalıştıran bir yöntem seçilmiştir. Test yapılacak her gün sistem sadece bir modda çalıştırılacaktır. Sabahtan akşama kadar elektrik enerji üretimi ve motor tüketimleri toplanacaktır. Elektrik enerjisi üretimini ölçmek için Şekil 3.7'de görülen tek fazlı sayaç mikroevirici çıkışı ile şebeke arasına bağlanmıştır. Motor tüketimleri için akım ve gerilim ölçme devreleri tasarlanıp PLC panosuna ilave edilmiştir. Test verileri farklı günlerde toplanacağı için bu günlerdeki farklı güneş ışınım değerlerinden farklı enerji üretimi olacaktır. Bu üretim miktarlarını verim açısından incelemek için birbiriyle denk kılmak gerekir. Bunun için Şekil 3.6.da görülen bir güneşlenme sensörü temin edilerek herbir günün güneşten gelen enerji miktarı kaydedilmiştir.

Bu değerlerden bir bilgisayar vasıtasıyla güç-zaman grafiği çizilerek altındaki alan hesaplanmıştır. Bu alan bize ölçüm yapılan gündeki toplanan güneş enerjisi miktarını verir. Her gün bazında mikroevirici çıkışında üretilen elektrik enerjisini o günkü

toplanan güneş enerjisine bölerek bir verim hesabı yapılırsa, farklı günlerdeki verim değerleri birbiri ile denk bir şekilde kıyaslanabilir.



Şekil 3.6. Sistemde kullanılan güneş radyasyon sensörü



Şekil 3.7. Sayaç

Bu yöntemde mikroeviricinin ürettiği elektrik enerjisinin miktarı, anlık gerilim ve akım değerleri bir elektronik sayaç üzerinden RS-485 haberleşme ile PLC'ye kaydedilmiştir. Ayrıca motor akımları, motor çalışma süreleri ve takip hata açısı verisi de PLC hafızasında tutulmaktadır. PLC ünitesinin beslemesi, sadece 2 adet 12V-7Ah'lik akü grubu sayesinde gece dahi kesilmemekte ve veri kaybı olmamaktadır. Akü grubunun şarj gereksinimi gece sistem çalışmaz iken

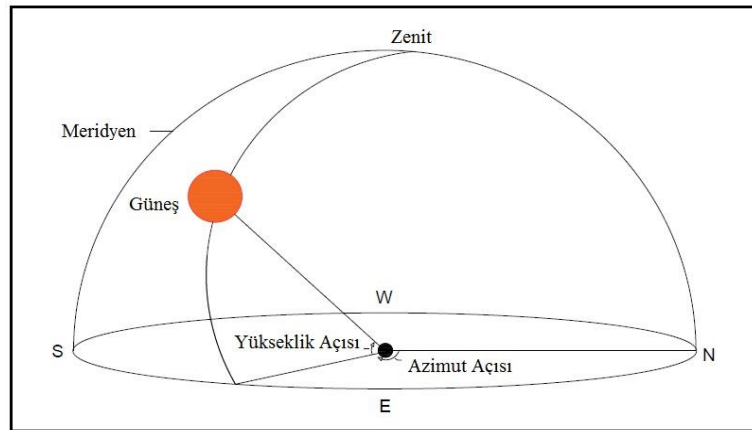
yapılmaktadır. Böylece ölçüm alınırken şarj işleminin gerilim ve akım değerlerini değiştirmesi engellenmiş olur.



Şekil 3.8. Protipi geliştirilen tasarımın işletmedeki fotoğrafı

3.4. Tasarımın Matematiksel Modellemesi

Gökyüzündeki güneş pozisyonunun günden güne ve saatten bir saate değiştiği ortak bir bilgidir. Bu nedenle, gökyüzündeki güneşin tam yeri iki açıdan belirlenir; Şekil 3.9'daki yükseklik açısı ve azimut açısı.



Şekil 3.9. Azimut ve yükseklik açıları

Yükseklik açısı, gözlemcinin ufkundan güneşe, yatay düzleme dik olan açı olarak tanımlanır. Değer, sırasıyla gün doğumu ve gün batımı sırasında 0 derece ve 180

derecedir. Oysa Azimut açısı, gerçek kuzeyden, güneşin hemen altında ufuktaki noktaya kadar saat yönünde ölçülür[49].

3.4.1. Güneş takip algoritmaları

Cebirsel bir astronomik taban kullanılarak güneşin konumunun hesaplanması için en doğru algoritmalarından biri, Andreas tarafından ABD'nin Enerjinin Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) sözleşmesi kapsamında 2008 yılında geliştirilmiştir. Bu algoritma NREL Solar Position Algorithm (SPA) olarak bilinir ve güneşin konumunu büyük bir kesinlik ile hesaplar. SPA ile, gökyüzündeki güneşin konumu, güneşin azimut açısı ve yükseklik açısı olarak ifade edilen güneş vektörleri olarak gösterilmektedir. Böyle bir SPA algoritması, tarihin ve zamanın yanı sıra konumun GPS koordinatlarını giriş olarak almak ve söz konusu coğrafi konum için çıktı olarak güneş irtifa açısı ve azimut açısını hesaplamak üzere formüle edilmektedir[48].

Genel olarak, kapalı çevrim güneş takip sistemleri, sensör gölgelendirildiğinde veya güneş bulutlarla engellendiğinde, geri besleme sinyalini ve sonrasında güneş pozisyonunu kaybedeceklerdir. Açık döngü güneş izleme mimarileri, açık döngü sensörleri veya geri bildirim olarak herhangi bir güneş görüntüsü gerektirmeyen algoritmalar kullanmak için uygulamaya konulmuştur. Enkoder gibi açık döngü sensörü, güneş kollektörünün, özel bir formül veya algoritmadan elde edilen hesaplanmış güneş açılarında konumlanmasını sağlar.

3.4.2. Güneş vektörü hesabı

Güneş-vektörü veya güneş pozisyonu, güneş'in görünür azimut ve yükseklik açıları açısından, yer yüzeyinin belirli bir coğrafi konumu (Q) üzerindeki gözlemciye göre, yerel saat ve mevsimin bir fonksiyonu olarak tarif edilmektedir.

Daha önce, NREL'in güneş-vektörünü astronomik bir yaklaşımla hesaplamak için en doğru algoritmalarından birini geliştirdiği belirtilmiştir. Bu algoritma, NREL Güneş Pozisyon Algoritması (SPA) olarak bilinir ve Güneş'in konumunu, 2000 yılından 6000 yılına kadar kozmik değişimleri (ikinci saniye de dahil olmak üzere) telafi ederek, tepe noktasında $\pm 0,0003$, derece belirsizliği ile hesaplar.

3.4.3. Güneş pozisyonu algoritması - SPA

Şekil 3.10, bir güneş yoğunlaştırıcının, SPA algoritması ile bağlantılı olarak herhangi bir dijital elektronik Siemens PLC donanımını kullanarak güneşi izlediğinde göz önüne alınması gereken bir güneş-vektörünün ve güneş-açılarının tipik bir örneğini göstermektedir.

Bir güneş pozisyonu algoritması (SPA) uygulaması, belirli bir konum için herhangi bir zamanda güneşin konumunu belirler. Burada sunulan hesaplamalar, Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'nın (NREL) SPA'sına dayanmaktadır ve yüksek doğruluk derecesi nedeniyle astronomik bir algoritma olarak sınıflandırılmıştır. Aşağıda açıklanan dünya açıları, güneşin konumunu belirli bir yönelime sahip bir düzleme göre belirlemek için gerekli olan açılardır[42].

Aşağıdaki parametre listesi, Şekil 3.10'da verilen güneş-vektörünün hesaplanmasında kullanılan terimlerle ilgilidir:

Enlem (ϕ): PV sistemin bulunduğu yerden dünyanın merkezine çizilen doğrunun ekvator düzlemi ile yaptığı açıdır. 0-90 derece arasında değişir.

Boylam (ζ): PV sistemin bulunduğu yerden dünyanın merkezine çizilen doğrunun ekvator düzlemine izdüşümü ile Greenwich'ten dünyanın merkezine çizilen doğrunun ekvator düzlemine izdüşümü arasındaki açıdır. 0-360 derece arasında değişir.

Deklinasyon (δ_s): Dünya-Güneş doğrultusunun yerkürenin ekvator düzlemi ile yaptığı açıdır. Yıl boyunca sinüsoidal bir şekilde -23,5 ila +23,5 derece arasında değişir.

Yüzey azimutaçısı (γ): Yüzeyin dikeyinin, yerel boylama göre sapmasını gösteren açıdır.

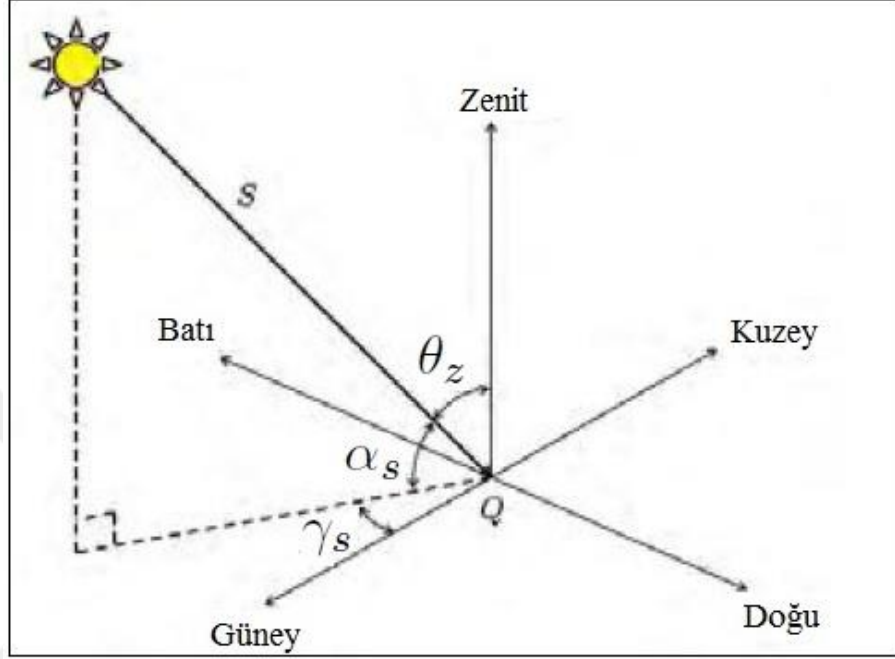
Güneş azimut açısı (γ_s): Güneş ışınlarının kuzeye göre, saat dönüş yönünde sapmasını gösteren açıdır.

Yükseklik açısı (α_s): Güneş ışınımı ile yatay yüzey arasındaki açıdır.

Zenith açısı (θ_z): Yatay yüzeyin dikeyi ile güneş ışınları arasında oluşan açıdır.

İnsidans ve yansıma açısı (θ): Yüzeyin dikeyi ile güneş ışınları arasındaki açıdır.

Güneş zamanına göre saat açısı (ω): Güneş saatinin 24 saat = 360° olacak şekilde bir açıya dönüştürülmesi.



Şekil 3.10. Güneş vektörü ve onu tanımlayan açılar

Güneş vektörü kuzey doğrultusunu başlangıç olarak alan saat yönündeki güneşin açısını ve yeryüzündeki belirli bir küresel konumlandırma sistemi (GPS) yönelimi perspektifinden yüksekliği temsil eder. Güneş konsantratörü montaj sahasının yeryüzünde yer alan boylam (ζ) ve enlem (ϕ) pozisyonuna bağlı olarak, PLC, güneş vektörü SQ'larını (γ_s , θ_s) astronomik prensiplerle hesaplamak için denklem 3.1'den, 3.6'ya kadar olan denklemler kullanılır;

$$\text{Solartime} = \text{Standartime} + 4 \times (\zeta_{st} - \zeta_{loc}) + E \quad (3.1)$$

$$E = 229,2 (0,000075 + 0,001868 \times \cos B - 0,04089 \times \sin 2B) \quad (3.2)$$

$$B = (360 / 365) \times (n - 1) \quad (3.3)$$

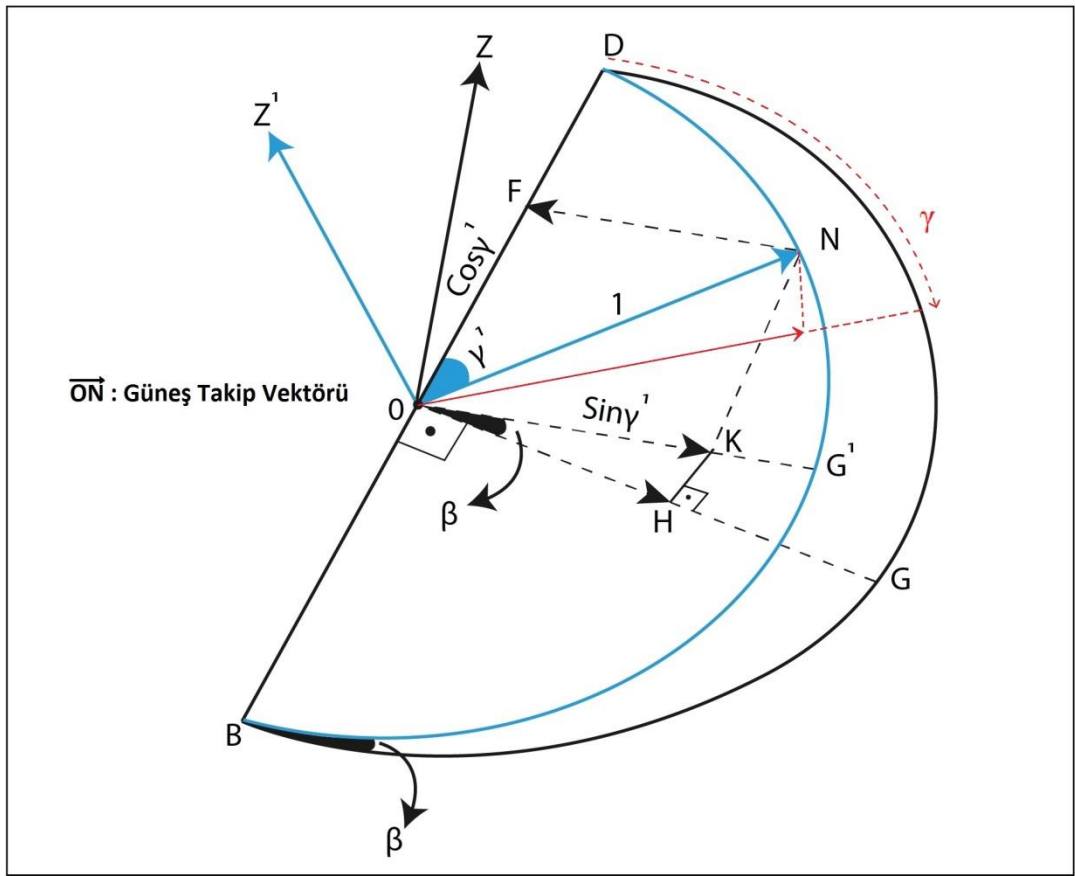
$$\delta = 23,35 \times \sin ((360/365) \times (284+n)) \quad (3.4)$$

$$\cos \theta_z = (\cos \phi \times \cos \delta_s \times \cos \omega) + (\sin \phi \times \sin \delta_s) \quad (3.5)$$

$$\gamma_s = \text{sign} (\omega) \times | \arccos ((\cos \theta_z \times \sin \phi \times - \sin \delta_s) / (\sin \theta_z) \times \cos \phi) | \quad (3.6)$$

3.4.4. Eğik düzlem transformasyonu

SPA yöntemi , PLC güneş vektörünü yatay koordinat sistemine göre azimut açısı ve yükseliş açısı cinsinden hesaplamaktadır. Fakat tasarlanan eğik eksenli sistemde güneş vektörü azimut üssü ve beta açısı belirlenir. Bunun için trigonometrik denklıklar vasıtasıyla yatay koordinat sistemi ile eğik tasarıma ait koordinat sistemi arasında bir dönüşüm yapılması gerekir.Şekil 3.11'de iki koordinat sistemine de ait açı ve güneş vektörleri gösterilmiştir. Mavi renk ile düzlem belirtilen eğik eksenli tasarımda güneş vektörünü zemin düzlem olarak kabul eden eğik koordinat sistemine aittir.



Şekil 3.11. Eğik eksenli tasarıma ait eğik koordinat sistemi açıları

Bu şekildeki ON vektörünü güneş takip vektörü olarak tanımlarsak bu vektörün BDG düzlemi ile yaptığı açı, yükseliş açısı α olur. Yine bu vektörün BDG' düzleminde OD eksenini ile yaptığı açıyı eğik düzlemin azimut açısı γ' olarak tanımlayalım. BDG' eğik düzleminin BDG düzlemi ile yaptığı açıyı da eğim açısı β olarak tanımlayalım.

ON vektörünün O merkezi etrafında BDG' düzleminde dönmesi ile oluşan çemberi birim çember kabul edersek aşağıdaki trigonometrik denklıkları çıkarabiliriz.

$$|OF| = \cos \gamma' \quad (3.7)$$

$$|OK| = \sin \gamma' \quad (3.8)$$

$$|OH| = \sin \gamma' \times \cos \beta \quad (3.9)$$

$$|HK| = \sin \gamma' \times \sin \beta \quad (3.10)$$

ON vektörünün uzunluğunun yükseliş açısı α ile bağıntısı aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\sin \alpha = |HK| / |ON| = \sin \gamma' \times \sin \beta \quad (3.11)$$

ON vektörünün BDG düzlemindeki izdüşümünün OD eksenini ile yaptığı açı, literatürde güneş vektörünün azimut açısı γ olarak adlandırılır. Azimut açısının tanjant değerini (3.7) ve (3.9) denklemlerinden yazabiliriz:

$$\tan \gamma = |OH| / |OF| = (\sin \gamma' \cos \beta) / \cos \gamma' = \tan \gamma' \cos \beta \quad (3.12)$$

(3.11) ve (3.12) denklemleri azimut(γ) ve yükseliş(α) açılarının, eğik düzlem azimut açısı (γ') ve eğik düzlem eğim açısı (β) cinsinden nasıl hesaplanacağını gösterir.

Fakat SPA yöntemi hesaplamaları zaten çıktı olarak α ve γ açıları bize verir. Oysa bize eğik düzlemdeki eksen hareketlerini kontrol edebilmek için β ve γ' açıları gereklidir. Yukarıdaki denklemler kullanılarak bu açı değerlerine ulaşacağımız denklemleri çıkartabiliriz.

$\sin \alpha = A$ ve $\tan \gamma = B$ şeklinde iki geçici simge tanımlayalım. O zaman (3.11) ve (3.12) denklemleri aşağıdaki gibi olur.

$$A = \sin \gamma' \times \sin \beta \quad (3.13)$$

$$B = \tan \gamma' \times \cos \beta \quad (3.14)$$

Bu ifadeleri birbirine oranlarsak aşağıdaki denklik karşımıza çıkar.

$$A/B = (\sin \gamma' \sin \beta) / (\tan \gamma' \cos \beta) = \sqrt{1 - (\sin \gamma')^2} \times \tan \beta \quad (3.15)$$

Burada $\sin \gamma' = A / \sin \beta$ dönüşümü yaparsak denklem aşağıda şekilde evrilir.

$$A / B = \sqrt{1 - (A/\sin \beta)^2} \quad (3.16)$$

Her iki tarafın karesini alırsak;

$A^2 / B^2 = (\tan \beta)^2 - (A^2 / (\cos \beta)^2)$ haline gelir. Burada $\tan \beta$ ifadesini açarsak;

$A^2 / B^2 (\cos \beta)^2 = (\sin \beta)^2 - A^2$ şeklini alır. Burada $(\sin \beta)^2 = 1 - (\cos \beta)^2$ dönüşümü yaparsak ve β ifadesini bir tarafta toplarsak aşağıdaki şekli alır.

$$\cos \beta = \sqrt{[(B^2 \times (1 - A^2)) / (A^2 + B^2)]} \quad (3.17)$$

Aynı şekilde (3.14) denkleminde $\sin \beta = (A / \sin \gamma')$ dönüşümü yapılırsa aşağıdaki hali alır.

$$B = \sqrt{[1 - (A / \sin \gamma')^2] \times \tan \gamma'} \quad (3.18)$$

Her iki tarafın karesini alırsak;

$B^2 = (\tan \gamma')^2 - (A^2 / (\cos \gamma')^2)$ şeklini alır. Burada $\tan \gamma'$ ifadesini açarsak ve $(\sin \gamma')^2 = 1 - (\cos \gamma')^2$ dönüşümü yaparsak γ' ifadesi çektiğimiz denklem aşağıdaki gibi olur.

$$\cos \gamma' = \sqrt{[(1 - A^2) / (1 + B^2)]} \quad (3.19)$$

(3.17) ve (3.19) denklemlerindeki A ve B değişkenlerini en başta tanımladığımız gibi α ve γ cinsinden ifadelerle geri dönersek β ve γ' hesabı ifadeleri aşağıdaki gibi olur.

$$\cos \beta = \sqrt{[(\tan \gamma)^2 \times (1 - (\sin \alpha)^2)) / ((\sin \alpha)^2 + (\tan \gamma)^2)]} \quad (3.20)$$

$$\cos \gamma' = \sqrt{[(1 - (\sin \alpha)^2) / (1 + (\tan \gamma)^2)]} \quad (3.21)$$

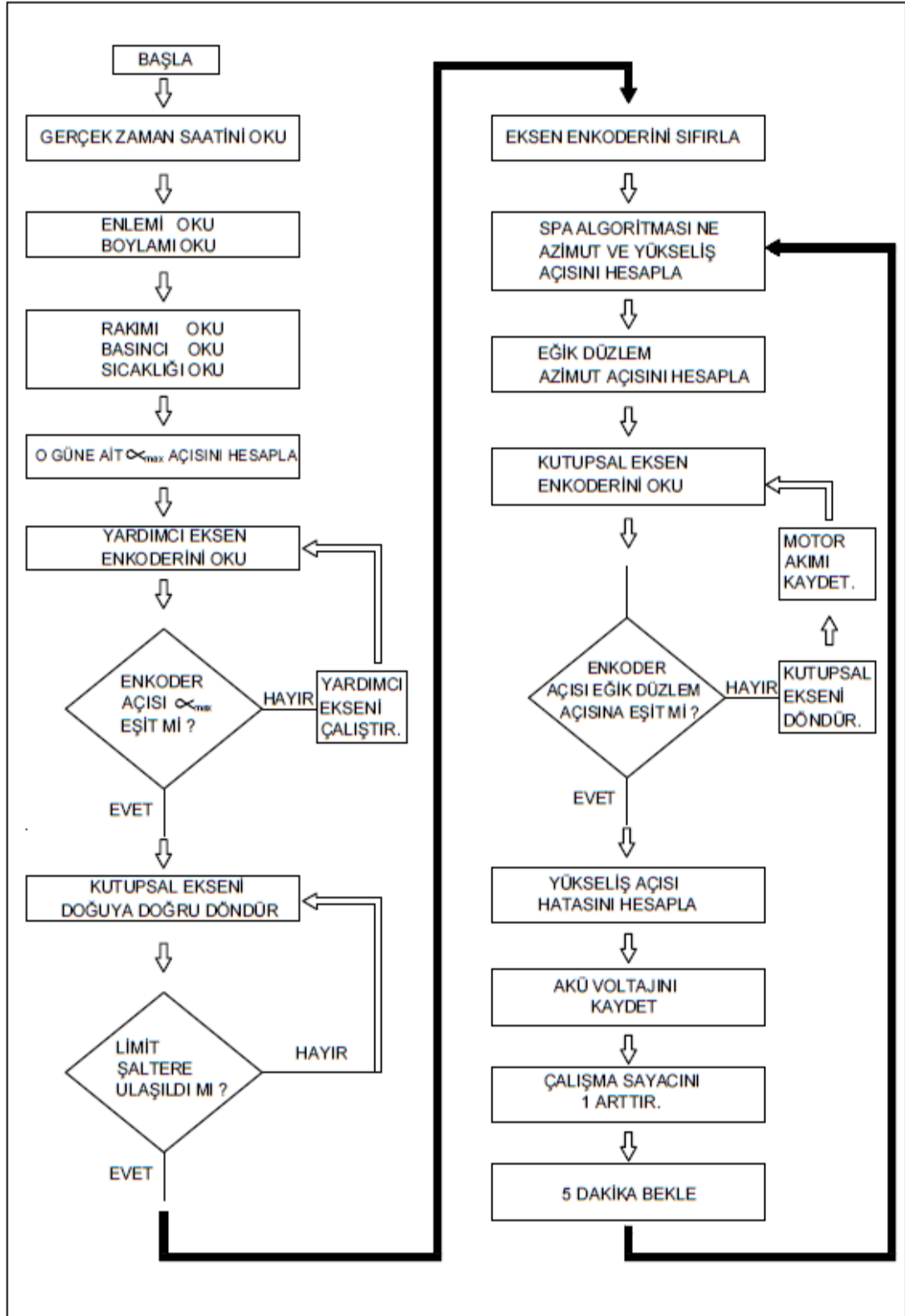
SPA yöntemi ile bulduğumuz yükseliş ve azimut açıları (3.20) ve (3.21) denklemlerinde yerine koyarak Şekil 3.11'deki eğik düzlem açıları olan β ve γ' açıları hesaplarız. Bu açılar tasarlanan eğik eksenli platformun güneş takibi için sistemi kontrol ettiği açılardır.

Şekil 3.12'de yukarıdaki SPA algoritması ve trigonometrik transformasyonu kullanarak eğik eksenli takip sistemi yazılımının akış diyagramı verilmiştir. PLC içerisindeki program merdiven diyagramı ve STL programlama dili kullanılarak akış diyagramındaki adımlara göre yazılmıştır.

Program öncelikle her döngünün başında gerçek zaman saatini okur. Daha sonra enlem ve boylam değerlerini okur. Daha sonra girilen rakım, basınç ve sıcaklık değerlerini okur. O güne ait α açısının maksimum değerini hesaplar. Daha sonra yardımcı eksenin enkoder değerini okur. Bu değer daha önce hesapladığı α_{maks} ile karşılaştırır ve değer farklı ise yardımcı eksenini çalıştırarak açı değerini ayarlar. Bir sonraki aşamada kutupsal eksenini doğuya doğru döndürür ve limit şaltere ulaşıncaya kadar durur. Kutupsal eksen enkoderini sıfırlar. Bu konum sistemin başlangıç konumudur.

Başlangıç konumunu alan sistemde program önceki bölümde verilen SPA algoritması ile güneşin azimut ve yükseklik açısını hesaplar. Daha sonra eğik düzlem transformasyonu gerçekleştirilerek eğik düzleme ait azimut açısını hesaplar. Kutupsal eksen enkoderini okur ve değer hesapladığı değerden farklı ise eksenini batı yönünde döndürür. Bu döndürme işlemi sırasında eksen motorunun akım değerlerini hafızaya kaydeder. Kutupsal eksen istenen eğik eksen azimut açısı değerini alınca program bu sefer o pozisyondaki yükseklik açısını hesaplar. Daha önce hesapladığı güneşin gerçek pozisyonundaki yükseklik açısı ile fark varsa hata değerini hafızaya kaydeder. Güç ve enerji tüketimlerini hesaplayabilmek için akü devresinin gerilimini de hafızaya kaydeder. Her bir değeri farklı hafıza noktasına kaydetmek için kullandığı sayacı 1 arttırır. Daha sonra programda belirlenen süre kadar güneşin batıya doğru hareketini bekler. Bu süre sonunda tekrar kutupsal eksenini okuyarak sürekli eksen pozisyonunu günceller. Bu durumda aralıklarla güneşi takip etmiş olur.

Akşam güneşin batışıyla beraber sistem maksimum dönüş konumuna gelir. Gece boyunca sistem hareket etmez ve gündüz kullanımı için akülerini şarj eder. Gündüz vaktinde sistem sadece aküden çalışır. Ertesi sabah ile beraber yukarıdaki adımları aynen tekrarlar.

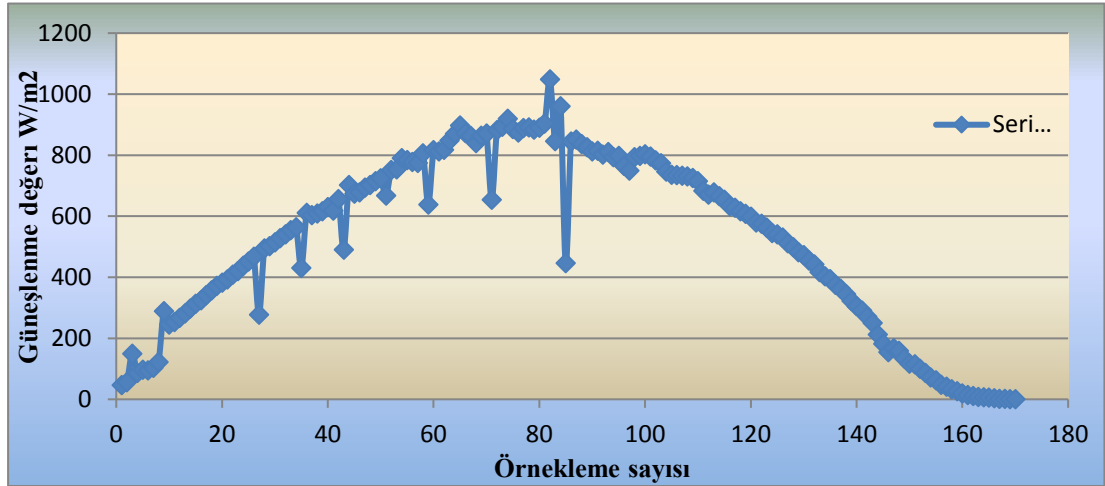


Şekil 3.12 Takip algoritması akış diyagramı

3.5. Alınan Ölçümler ve Grafikler

Şekil 3.8. de görülen eğik eksenli güneş takip platformu 2018 Mayıs sonunda açılı kalibrasyonları yapılarak devreye alınmıştır. Sistem 1 Haziran 2018 tarihinde sadece kutupsal eksen ile tek eksenli olarak çalıştırılmıştır. 3 Haziran 2018 tarihinde çift eksenli ve 4 Haziran 2018 tarihinde 25 derece sabit açılı olarak çalıştırılmıştır. Farklı günlerdeki yapılan testlerin 3 gün sonunda denk bir şekilde karşılaştırılabilmesi için her günün güneşlenme değeri sabah güneşin doğuşundan akşam batışına kadar bir güneşlenme sensörü tarafından ölçülmüştür. Daha sonra bu değerler bir excel dosyasına alınarak zamana bağlı grafik çizdirilmiştir. Güneşlenme sensörü W/m^2 cinsinden değer ölçtüğü için eğriyi altındaki alan metrekare başına gün boyunca toplanan enerjiyi ifade eder. Daha sonra bu değerleri panelin yüzey alanı ile oranlanarak panele düşen enerji miktarı hesaplanmıştır. Sisteme entegre edilen elektrik sayacından da mikroevirici çıkışında sistemin ürettiği enerji miktarı verisi alınmıştır. Toplam verimi bulmak için sistemin tek eksen ve iki eksenli çalışma durumlarında ürettiği enerjiden motorlarının tükettiği enerji çıkarılarak hesaplama yapılmıştır.

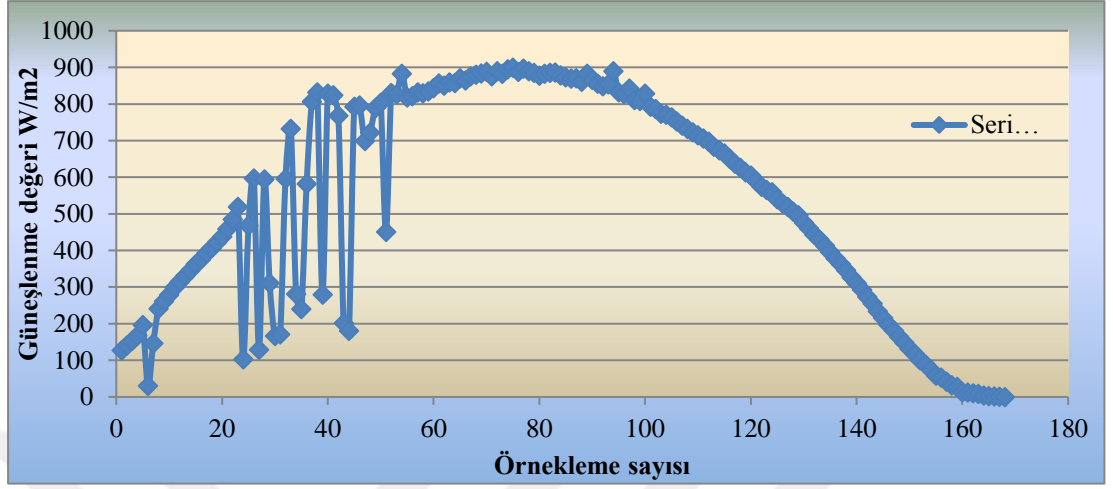
3.5.1. Test günlerindeki güneşlenme değerleri



Şekil 3.13. 1 Haziran 2018 tarihindeki güneşlenme grafiği

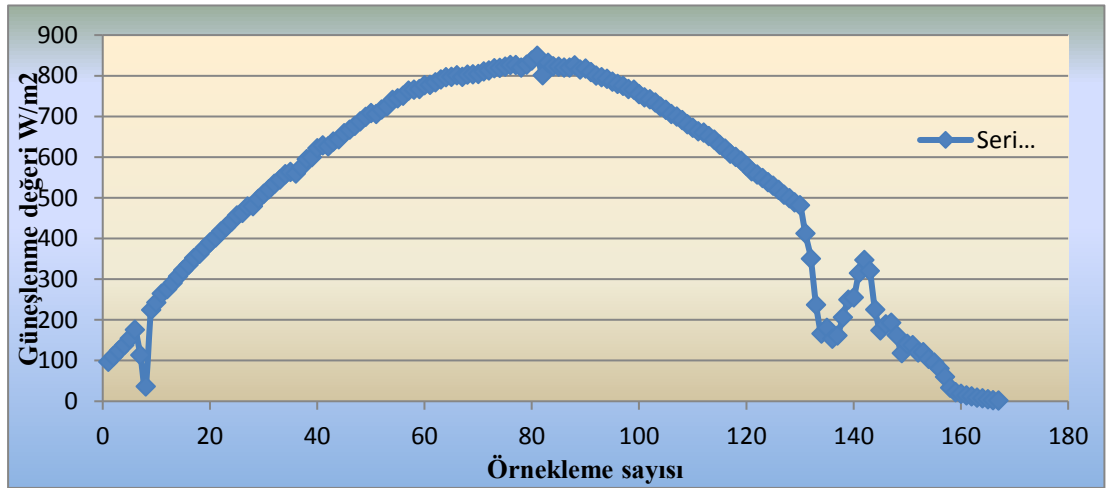
1 Haziran günü sabahdan akşama kadar 5dk ara ile 169 adet veri kaydedilmiştir. Bu güne ait ortalama güneşlenme değeri $542,27 W/m^2$ çıkmıştır. Bu grafiğin altındaki alan hesaplandığında metrekare başına gün boyunca $7320,7 Wh$ 'lik bir enerji toplanmıştır.

Panel yüzeyi 1,6 m² olduğundan panele düşen enerji 11713,12 Wh'tir. Tek eksenli sistemde gün boyu üretilen enerji 1614 Wh olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.14. 3 Haziran 2018 tarihindeki güneşlenme grafiği

3 Haziran günü sabahdan akşama kadar 5dk ara ile 167 adet veri kaydedilmiştir. Bu güne ait ortalama güneşlenme değeri 554,76 W/m² çıkmıştır. Bu grafiğin altındaki alan hesaplandığında metrekare başına günboyunca 7489,28 Wh'lik bir enerji toplanmıştır. Panel yüzeyi 1,6 m² olduğundan panele düşen enerji 11982,88 Wh'tir. İki eksenli sistemde günboyu üretilen enerji 1672 Wh olarak kaydedilmiştir.

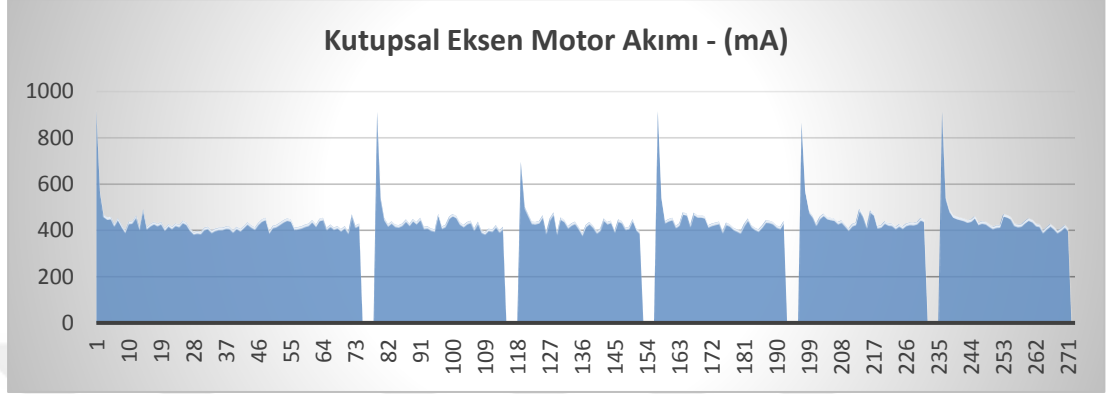


Şekil 3.15. 4 Haziran 2018 tarihindeki güneşlenme grafiği

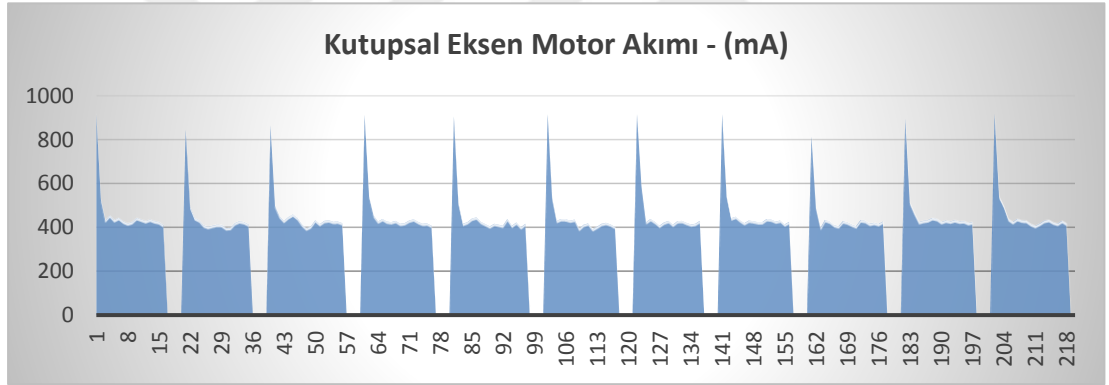
4 Haziran günü sabahdan akşama kadar 5dk ara ile 167 adet veri kaydedilmiştir. Bu güne ait ortalama güneşlenme değeri 526,2 W/m² çıkmıştır. Bu grafiğin altındaki alan hesaplandığında metrekare başına günboyunca 7103,7 Wh'lik bir enerji toplanmıştır.

Panel yüzeyi 1,6 m² olduğundan panele düşen enerji 11365,92 Wh'tir. Sabit açılı sistemde ise gün boyu üretilen enerji ise 1,247 Wh olarak kaydedilmiştir.

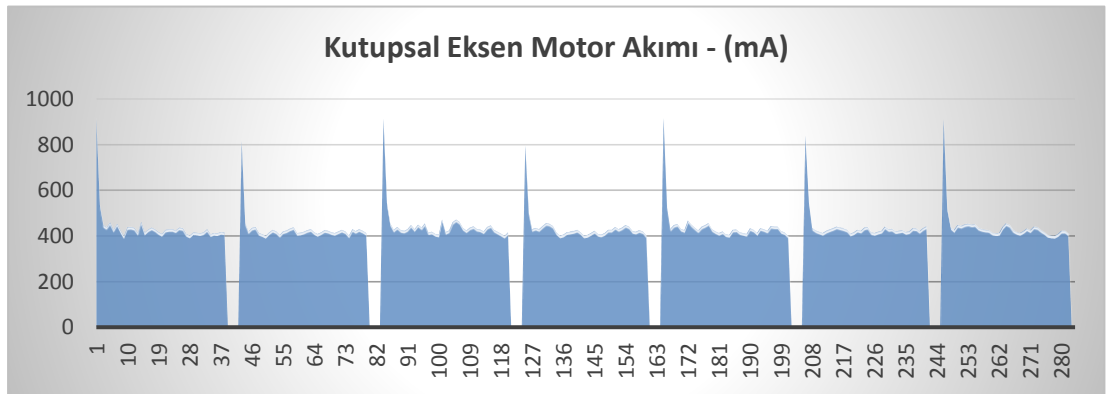
3.5.2 Tek eksenli çalışma motor tüketimi



Şekil 3.16. Kutupsal eksen motor akım grafiği - 01 Haziran Sabah

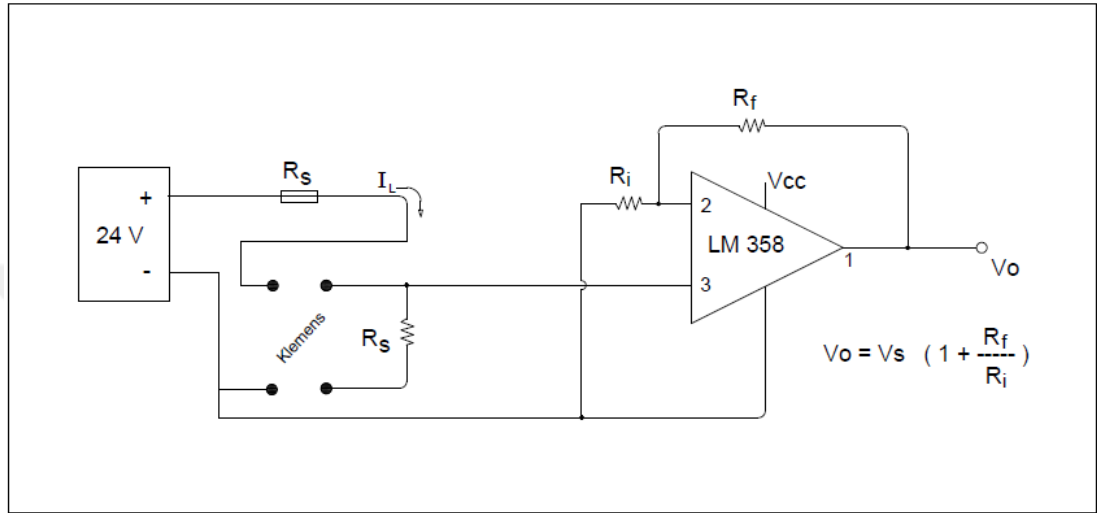


Şekil 3.17. Kutupsal eksen motor akım grafiği - 01 Haziran Öğlen



Şekil 3.18. Kutupsal eksen motor akım grafiği - 01 Haziran Akşam

Eksen motor tüketimlerini ölçmek Şekil 3.19'deki motor akımı ölçüm devresi tasarlanmış motor akımı ile orantılı gerilim değerleri ölçülmüştür. Burada Şekildeki entegre çıkış geriliminin (V_o) ölçüm direnci geriliminin bağıntısını (3.22) formülü tanımlamaktadır. Bu oran ve ikinci bir kalibrasyon sabiti kullanılarak PLC motor akım değerini mA cinsinden 100ms zaman aralığı ile kaydetmiştir.



Şekil 3.19. Motor akımları ölçüm devresi

1 Haziran 2018 günü 5 dk ara ile güneş pozisyonunu güncelleyen sistemde kutupsal eksen güneşin tam doğu istikametinde olduğu sabah saat 08:56' dan, güneşin tam batı istikametinde olduğu akşam 17:06' ya kadar 98 defa çalışmıştır. PLC tarafından kaydedilen motor akımlarının ortalama değeri 445mA çıkmıştır. Ortalama motor çalışma süresi 3,60 sn olarak alınmıştır. Akü gerilimi sabah panelin ilk hareketinden önce 25,20V akşam son hareketinden sonra da 23,90V olarak PLC'ye kaydedilmiştir. Hesaplamalar için ortalama akü gerilimi 24,55V olarak alınabilir. Toplam kutupsal motor enerji tüketimi aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

$$E_T = V_{ORT} \times I_{ORT} \times \Delta t \quad (3.23)$$

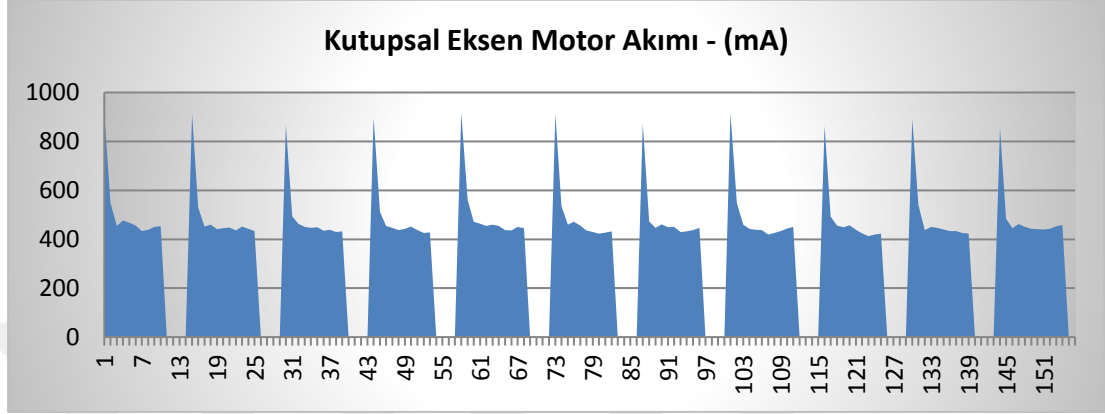
$$E_{T-kutupsal} = 24,55 \times 0,445 \times (98 \times (3,6 / 3600)) = 1,071 \text{ Wh}$$

Yardımcı eksen motoru sabah sistem otomatik modda çalışmadan önce sadece 1 kere çalışmaktadır. 1 Hazirandaki çalışma süresi 12sn'dir. Ortalama motor akımı 250 mA kaydedilmiştir. Bu eksen için motor enerji tüketimi aşağıda hesaplanmıştır.

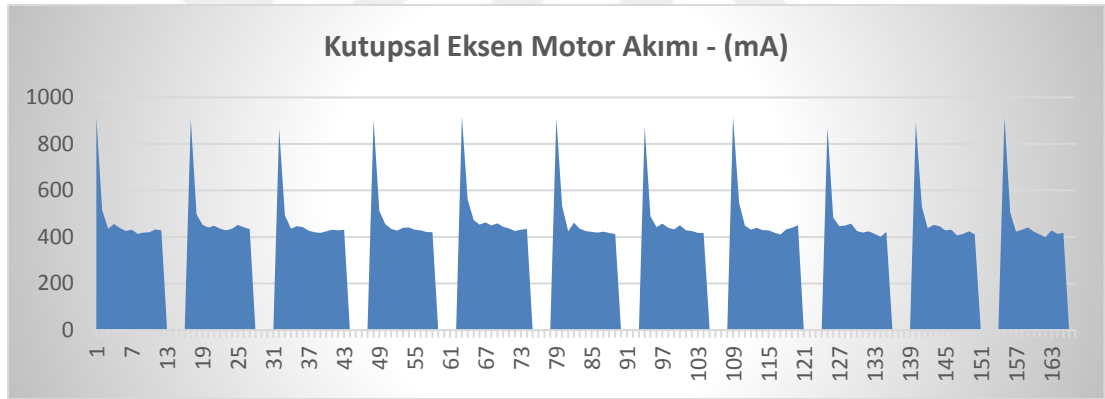
$$E_{T\text{-yükseliş}} = 25,20 \times 0,25 \times (12 / 3600) = 0,021 \text{ Wh}$$

Tek eksen çalışma için toplam tüketim $E_T = 1,092 \text{ Wh}$ çıkmıştır.

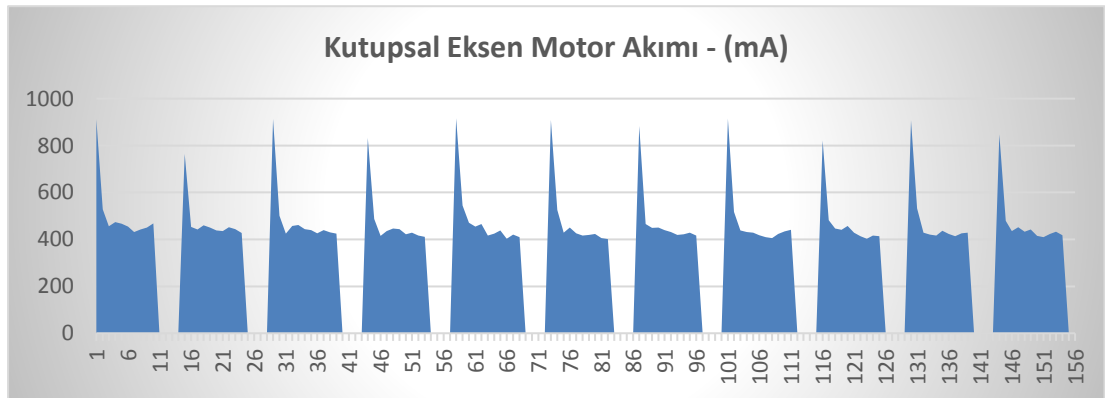
3.5.3. İki eksen çalışma motor tüketimleri



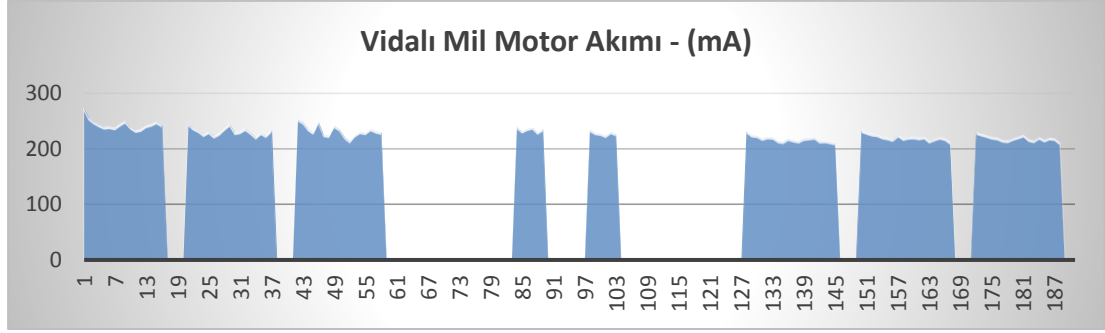
Şekil 3.20. Kutupsal eksen 3 haziran çalışma grafiği - Sabah



Şekil 3.21. Kutupsal eksen 3 Haziran çalışma grafiği - Öğlen



Şekil 3.22. Kutupsal eksen 3 Haziran çalışma grafiği - Akşam



Şekil 3.23. Yardımcı eksen 3 Haziran çalışma grafiği - Günboyu

3 Haziran çalışmıştır. PLC tarafından kaydedilen 2018 günü 2 dk ara ile güneş pozisyonunu güncelleyen sistemde kutupsal eksen motoru sabah saat 07:00'dan, akşam 19:00'a kadar 354 defa kutupsal motor akımı ortalama değeri 440mA ve ortalama çalışma süresi 1,16sn olmuştur. Yardımcı eksen motoru sabah 08:52'den akşam 17:07'ye kadar 243 defa çalışmıştır. PLC tarafından kaydedilen yardımcı eksen motor akımı değeri 276mA ve ortalama çalışma süresi 10,23sn olmuştur. Sabah sistem çalışmadan önce kaydedilen akü gerilimi 25,30V, akşam sistem durduktan sonra kaydedilen akü gerilimi 23,62V'tur. Tüketim hesaplamalarında ortalama akü gerilimi 24,46V olarak alınabilir.

Toplam motor enerji tüketimini yine (3.23) formülü ile hesaplayabiliriz.

$$E_{T-kutupsal} = V_{ORT} \times I_{ORT} \times \Delta t$$

$$E_{T-kutupsal} = 24,46 \times 0,44 \times (354 \times (1,16 / 3600)) = 1,2276 \text{ Wh}$$

$$E_{T-yükseliş} = 24,46 \times 0,276 \times (243 \times (10,23 / 3600)) = 4,6617 \text{ Wh}$$

İki eksen çalışma için toplam tüketim $E_T = 5,8893 \text{ Wh}$ çıkmıştır.

PLC ünitesinin enerji tüketimi;

$$E_{T-PLC} = 24 \times 0,17 \times 15 = 61,20 \text{ Wh} \text{ olarak hesaplanabilir.}$$

Tablo 3.1. Üç farklı günde alınan sistemin test değerleri

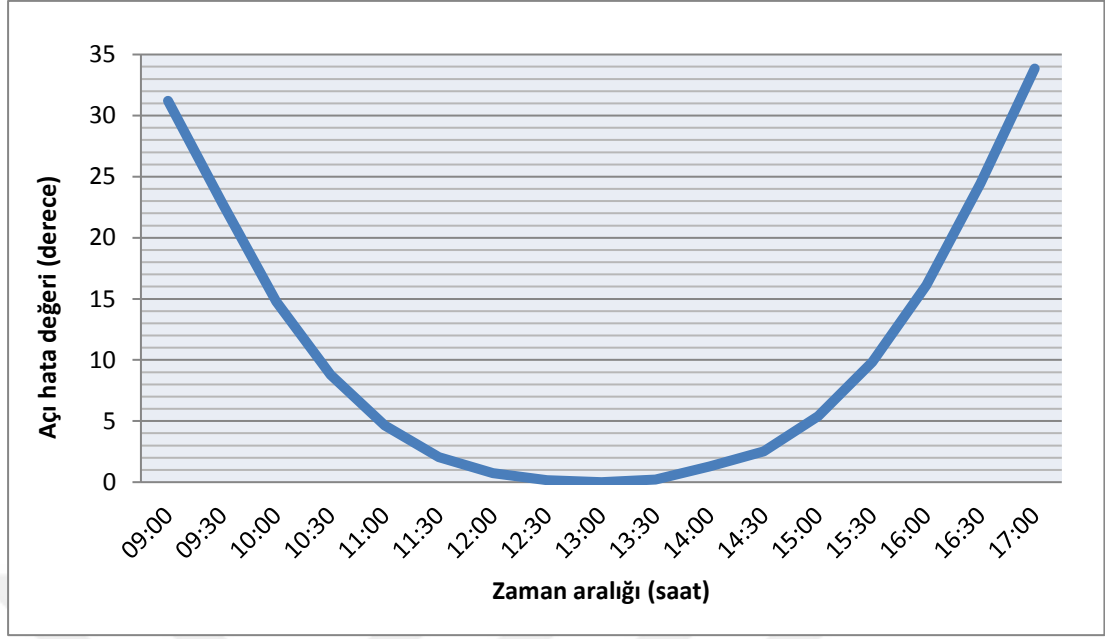
	01.Haziran.2018	03.Haziran.2018	04.Haziran.2018
Ölçülen Test Değerleri	Tek Eksenli Çalışma	İki Eksenli Çalışma	Sabit Açılı FV
Test günündeki ortalama güneşlenme değeri	542,27 W/m ²	554.76 W/m ²	526.2 W/m ²
Güneşten panelin yüzeyine düşen enerji	11713,12 Wh	11982,88 Wh	11365,92 W/m ²
Panelin mikroevirici çıkışında ürettiği enerji	1614 Wh	1672 Wh	1247 Wh
Motor enerji tüketimleri	1,092 Wh	5,8893 Wh	0 Wh
PLC ünitesi enerji tüketimi	61,20 Wh	61,20 Wh	0 Wh
Toplam sistem verimi	13,247 %	13,393 %	10,971 %

Tablo 3.1.de devreye alınan sistemin 1 Haziran 2018 tarihinde tek eksenli çalışma ile, 3 Haziran 2018 tarihinde çift eksen çalışma ile ve 4 Haziran 2018 tarihinde 25 derece sabit açılı şekilde ürettiği elektrik enerjisinin ve sistem tüketimlerinin değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

3.5.4 Tek eksenli sistem hata analizi

Tablo 3.2. Tek eksenli sistemin yükseklik açısı hata analizi

Zaman (Saat)	Eğik Eksen Azimut Açısı	Güneş Yükseklik Açısı	Eğik Eksen Yükseklik Açısı	Yükseklik Açısı Hatası
09:00	6,20	37,30	6,08	- 31,22
09:30	21,20	42,76	19,89	- 22,86
10:00	35,72	48,34	33,55	- 14,79
10:30	48,39	53,78	44,98	- 8,79
11:00	59,14	58,95	54,32	- 4,63
11:30	68,30	63,67	61,62	- 2,04
12:00	76,32	67,63	66,89	- 0,74
12:30	83,32	70,32	70,14	- 0,17
13:00	90,62	71,18	71,18	0
13:30	97,64	69,96	69,74	- 0,22
14:00	105,05	67,01	65,72	- 1,28
14:30	113,25	62,89	60,36	- 2,53
15:00	122,68	58,07	52,68	- 5,39
15:30	133,77	52,84	43,01	- 9,83
16:00	146,84	47,38	31,27	- 16,11
16:30	161,64	41,78	17,33	- 24,45
17:00	177,18	36,13	2,28	- 33,85



Şekil 3.24. Tek eksen 1 Haziran çalışması yükseklik açısı hatasının grafiği - ($\Delta\alpha$)

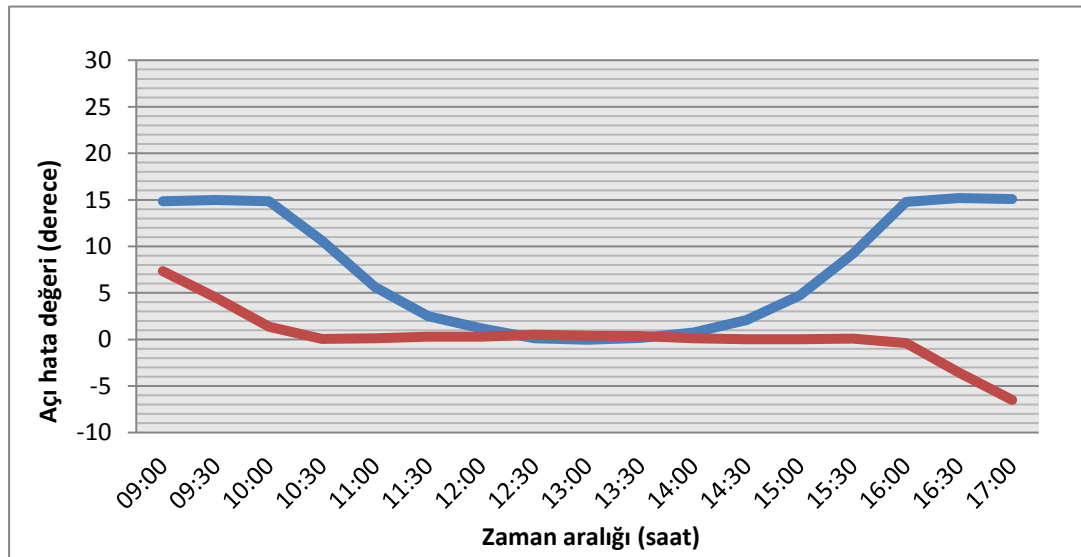
Tablo 3.2 de sistemin 1 haziranda tek eksenli olarak çalıştırılırken alınan takip hatası ölçümleri verilmiştir. Şekil 3.24 de grafikte görüldüğü gibi eğik eksenli sistem tek eksen çalıştırıldığında motor enerji tasarrufuna karşın, yükseklik açısında hata yapar. Bunun sebebi sistemin azimut açısını güneşin konumuna göre hesaplaması ve açı değerini güneşin o anki azimut açısı ile aynı tutmasıdır. Bu durumda yükseklik açısı eğik eksenin sabit eğiminden dolayı azimut açısına bağlı olarak tasarımının doğası gereği kendiliğinden bir değer alır. Bu değer ile güneşin gerçek konumunun yükseklik açısı arasında bir hata mevcuttur. Bu hata sabah ve akşam saatlerinde maksimum değerde, öğlen vaktinde minimum değerdedir. Eğer bu hatayı belirli bir değerde sınırlarsak, azimut açısında bir hataya payına yol açarız. Ancak vektörel olarak toplam hata değeri düşerse güneş ışınlarının panel yüzeyine daha dik gelmesini sağlayacağımız için sistemin verimini arttırmış oluruz.

Bunun için programda yükseklik açısı hatası sürekli hesaplanarak istenen bir değer üstüne çıkmayacak şekilde ilave bir yazılım yapılmıştır. Yapılan ilk hata ölçümünde yükseklik açısı hatası ortalama 32 derece çıktığı için 4 Temmuz günü açı hatasının maksimum değeri kabaca yarıya indirilerek 15 derecelik bir sınırlama ile bir test yapılmıştır.

Tablo 3.3. Tek eksenli sisteminin 4 Temmuz'da 15° ile sınırlandırılmış yükseklik hata analizi

Zaman (Saat)	Eğik Eksen Azimut Açısı	Güneş Azimut Açısı	Güneş Yükseklik Açısı	Azimut Açısı Hatası	Yükseklik Açısı Hatası
09:00	22,87	0,08	36,54	7,34	14,84
09:30	28,53	5,03	42,00	4,50	14,99
10:00	34,69	10,71	47,61	1,36	14,83
10:30	45,23	17,23	53,07	0,07	10,60
11:00	56,79	25,16	58,35	0,11	5,62
11:30	66,56	35,17	63,25	0,30	2,49
12:00	74,78	48,34	67,49	0,30	1,21
12:30	82,24	65,70	70,59	0,49	0,14
13:00	89,17	86,92	71,95	0,41	- 0,03
13:30	96,11	108,7	71,17	0,37	0,15
14:00	103,3	127,3	68,48	0,13	0,74
14:30	111,3	141,5	64,50	0,03	2,10
15:00	120,5	152,3	59,74	0,04	4,74
15:30	131,6	160,7	54,54	0,08	9,19
16:00	143,7	167,6	49,09	- 0,40	14,79
16:30	150,1	173,5	43,50	- 3,56	15,19
17:00	156,0	178,7	37,85	- 6,50	15,09

Tabloda görüldüğü gibi yükseklik açısını sınırlandırdığımızda sistem bu defa da azimut açısında bir miktar hata yapacaktır. Fakat panelin normal vektörü ile güneş vektörü arasındaki hata açısı, yani azimut ve yükseklik eksenlerindeki hata açılarının bileşkesi ilk duruma göre düşecektir. Şekil 3.25'de $\Delta\alpha$ (kırmızı renkli) ve $\Delta\gamma$ (mavi renkli) açı hataları görülmektedir.



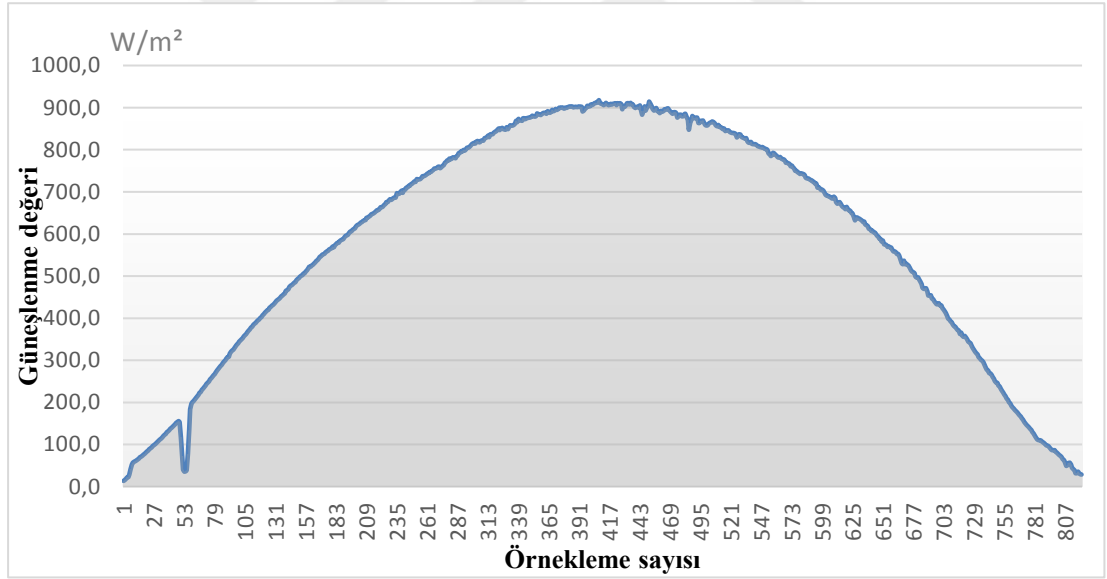
Şekil 3.25. Tek eksen 4 Temmuz çalışması yükseliş ve azimut açısı hataları grafiği

Sistemin 4 Temmuz çalışmasındaki performansını değerlendirmek için o günkü güneşlenme grafiğine ve üretim sayaç bilgilerine bakmak gerekir. Şekil 3.26' da test gününe ait güneşlenme grafiği verilmiştir. Grafiğin altında kalan alan bize o gün toplanan enerji miktarını verir.

Excel programında yapılan hesap ile toplam alan 476485,8 br² çıkmıştır. Zaman eksenindeki her sayı 1 dakikaya karşılık gelmektedir. 1 dakika da 0,0167 saat eder. Bunların çarpım sonucu 7957,3 Wh olarak bulunur. Bu gün boyunca metrekare başına toplanan enerjidir. Panel yüzeyi 1,6 m² olduğundan, panelin topladığı enerji 12731,7 Wh olur.

Elektrik sayacından o günün üretim değeri 1689,6 Wh olarak ölçülmüştür. Bu durumda 4 Temmuz günü tek eksen sistem verimi;

$$\% \eta = (1689,6 / 12731,7) \times 100 = 13,271 \text{ çıkmıştır.}$$

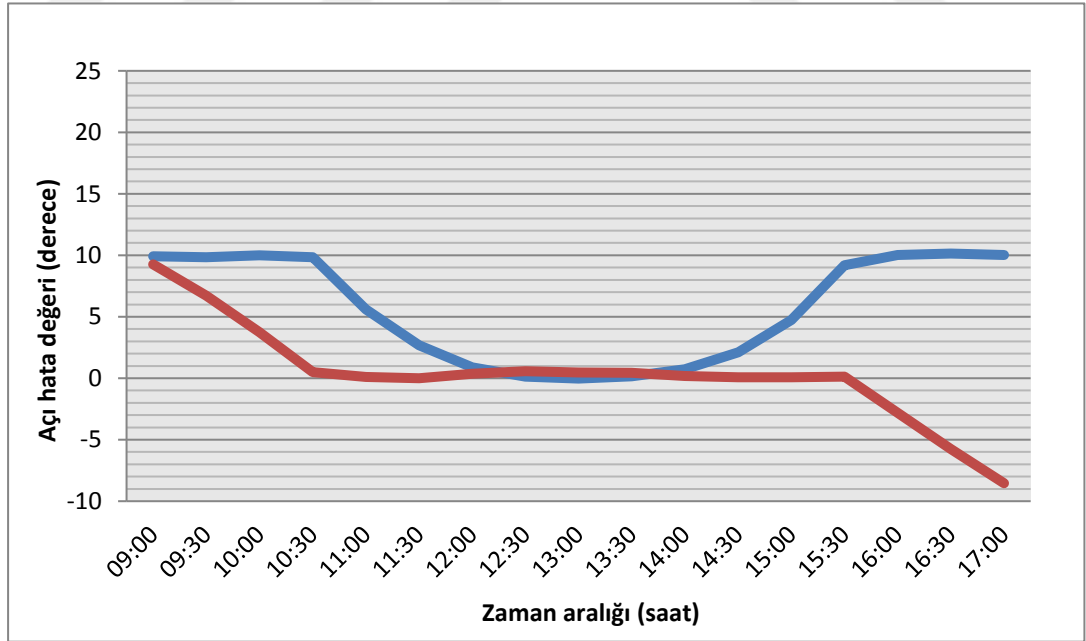


Şekil 3.26. 4 Temmuz günü güneşlenme grafiği saat 06:20-20:00 arası

Tablo 3.3'te görüldüğü gibi hata açılarında yükseliş açısındaki hata azimut açısından çok daha büyüktür. İki hatayı birbirine yaklaştırıp küçültmek için yükseliş hatası 10° ile sınırlandırılıp 5 Temmuz günü bir ölçüm daha alınmıştır.

Tablo 3.4. Tek eksenli sisteminin 5 Temmuz'da 10° ile sınırlandırılmış yükseklik hata analizi

Zaman (Saat)	Eğik Eksen Azimut Açısı	Güneş Azimut Açısı	Güneş Yükseklik Açısı	Azimut Açısı Hatası	Yükseklik Açısı Hatası
09:00	28,01	0,12	36,43	9,26	9,91
09:30	33,92	5,08	41,90	6,72	9,85
10:00	39,84	10,76	47,51	3,75	9,99
10:30	46,01	17,33	53,01	0,49	9,85
11:00	56,81	25,26	58,28	0,11	5,59
11:30	66,30	35,28	63,18	0,01	2,67
12:00	74,79	48,43	67,40	0,36	0,88
12:30	82,24	65,74	70,51	0,56	0,14
13:00	89,17	86,87	71,86	0,48	- 0,03
13:30	96,12	108,6	71,09	0,43	0,15
14:00	103,3	127,1	68,40	0,17	0,74
14:30	111,3	141,4	64,44	0,07	2,10
15:00	120,5	152,1	59,70	0,08	4,73
15:30	131,6	160,6	54,51	0,14	9,18
16:00	138,5	167,5	49,05	- 2,81	10,03
16:30	144,7	173,4	43,47	- 5,76	10,14
17:00	150,6	178,6	37,82	- 8,54	10,01

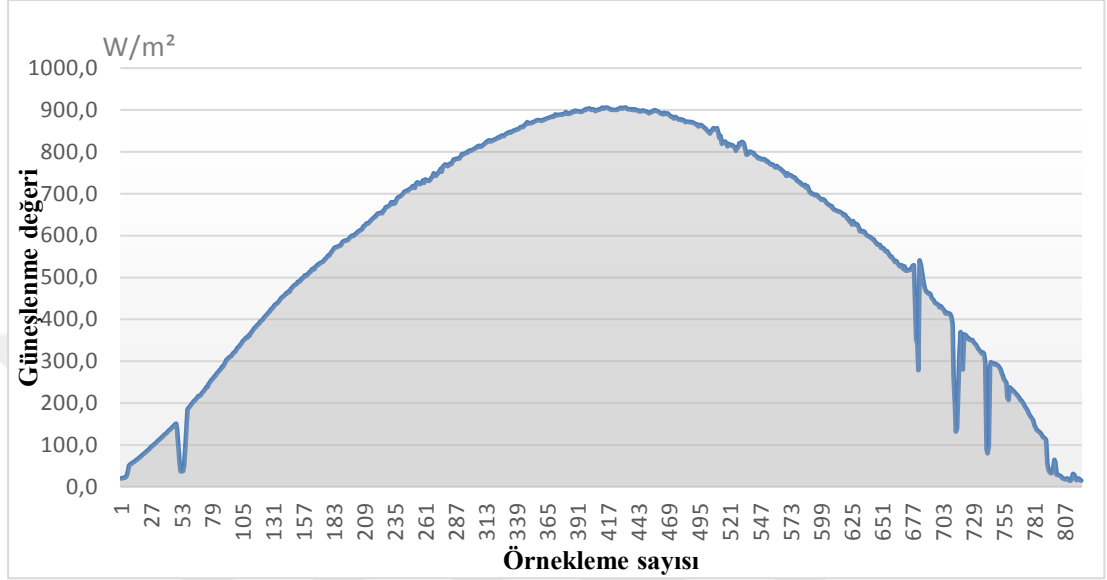


Şekil 3.27. Tek eksen 5 Temmuz çalışması yükseliş ve azimut açısı hataları grafiği

Sistemin 5 Temmuz günü olan çalışmasındaki performansına baktığımızda, Şekil 3.28'deki güneşlenme grafiğinin alanından hesaplanan panel üzerine toplanan enerji

12523 Wh olmuştur. Elektrik sayacından hesaplanan üretilen enerji 1664,7 Wh olmuştur. Bu değerlere göre 5 Temmuz günü tek eksen sistem verimi;

$$\% \eta = (1664,7 / 12523) \times 100 = 13,297 \text{ çıkmıştır.}$$



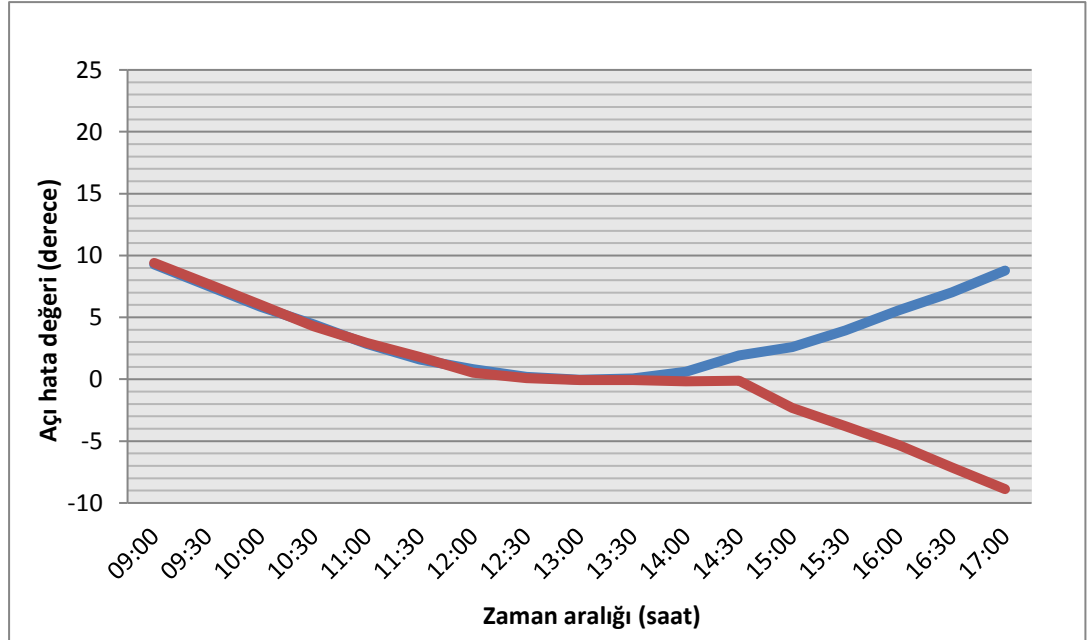
Şekil 3.28. 5 Temmuz günü güneşlenme grafiği saat 06:20 - 20:00 arası.

Şekil 3.27'den de görüldüğü üzere 5 Temmuzdaki ölçümde sabah ve akşam saatlerinde azimut açısı ve yükseliş açısı hataları mutlak değer olarak birbirine çok yakın çıkmıştır. Tablo 3.4'e baktığımızda hata iyileştirme yapılması gereken yerlerin sabahtan öğleye doğru olan saatler ve öğleden akşama doğru olan saatler olduğu görülmektedir. Bunun için PLC'de her iki hata değerini birbirine eşitleyen bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma ile beraber program hata optimizasyonu özelliği kazanmış ve son halini almıştır. Tasarlanan sistem tek eksen çalışmada minimum hata ile takip özelliğini kullanarak 7 Temmuz günü test edilmiş ve günboyu ölçümler alınmıştır.

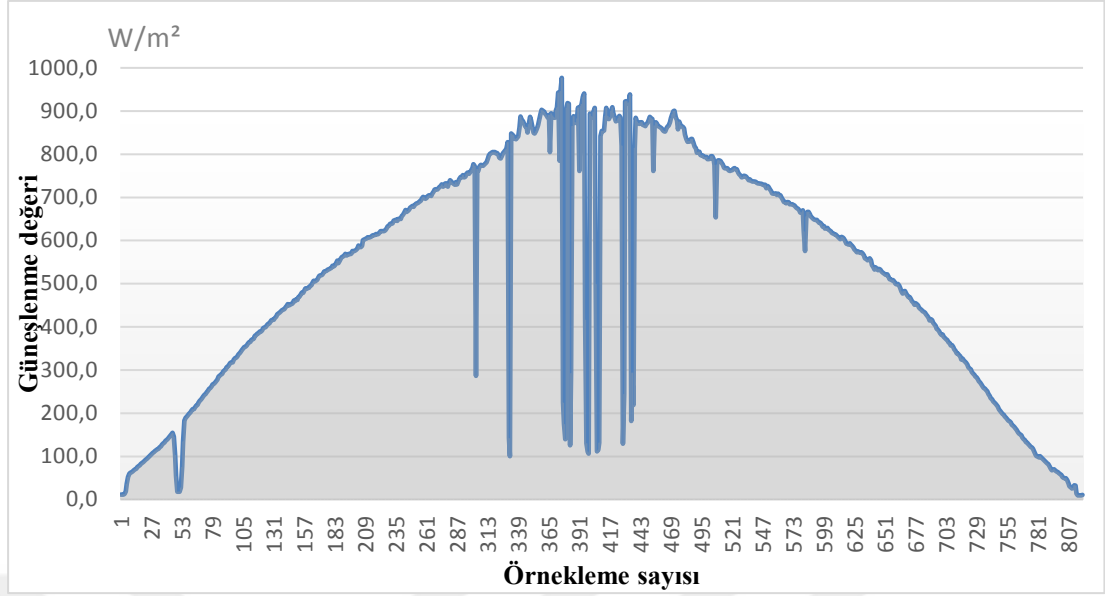
Tablo 3.5. Tek eksenli sisteminin 7 Temmuz'da $\Delta\alpha=\Delta\gamma$ algoritması ile sınırlandırılmış azimut ve yükseliş hata analizi

Zaman (Saat)	Eğik Eksen Azimut Açısı	Güneş Azimut Açısı	Güneş Yükseliş Açısı	Azimut Açısı Hatası	Yükseliş Açısı Hatası
09:00	28,52	0,27	36,24	9,40	9,28
09:30	36,24	5,23	41,71	7,71	7,57
10:00	44,20	10,93	47,32	6,02	5,86
10:30	51,91	17,51	52,81	4,29	4,44
11:00	59,88	25,44	58,08	2,94	2,86
11:30	67,59	35,44	62,97	1,80	1,59
12:00	74,79	48,53	67,20	0,52	0,80
12:30	81,98	65,71	70,29	0,09	0,18
13:00	88,92	86,65	71,65	-0,08	-0,04
13:30	95,86	108,2	70,91	-0,08	0,06
14:00	103,1	126,7	68,28	-0,18	0,61
14:30	111,0	140,9	64,34	-0,13	1,92
15:00	117,9	151,7	59,61	-2,31	2,61
15:30	125,6	160,2	54,43	-3,80	3,95
16:00	133,6	167,1	49,01	-5,33	5,58
16:30	141,4	173,1	43,41	-7,14	7,03
17:00	149,3	178,3	37,76	-8,88	8,78

Tablo 3.5'deki değerlerden ve Şekil 3.29'te grafikten gördüğümüz gibi yapılan hata optimizasyonu ile 34° ye varan hata açısı, $9,5^\circ$ ye kadar düşürülmüştür.



Şekil 3.29 Tek eksen 7 Temmuz çalışması yükseliş ve azimut açısı hataları grafiği



Şekil 3.30. 7 Temmuz günü güneşlenme grafiği saat 06:20 - 20:00 arası.

Sistemin 7 Temmuz günü olan çalışmasındaki performansına baktığımızda, Şekil 3.30'daki güneşlenme grafiğinin alanından hesaplanan panel üzerine toplanan enerji 11565,6 Wh olmuştur. Elektrik sayacından hesaplanan üretilen enerji 1537,9 Wh olmuştur. Bu değerlere göre 5 Temmuz günü tek eksen sistem verimi;

$$\% \eta = (1537,9 / 11565,6) \times 100 = 13,303 \text{ çıkmıştır.}$$

3.5.5. FV panelin eksen açısına bağlı verim kaybı hesabı

Buraya kadar yapılan çalışma ve ölçümler ile tasarlanan sistemin tek ekseninde minimum hata ile güneş takibi yapabileceği bir yazılım geliştirilmiştir. Fakat yine de sistem tek eksen çalışmada sabah ve akşam saatlerinde kabaca 9,5°'ye varan hata yapmaktadır. Bu hatanın ne gibi bir verim kaybına yol açtığı araştırılması gerekir.

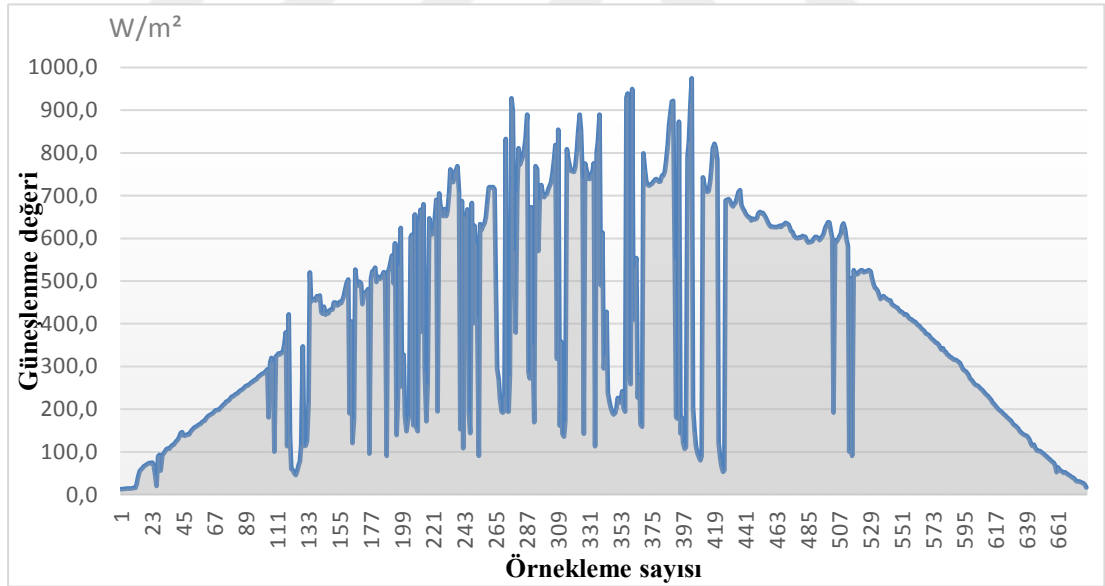
Bunun için sistem önce 2 Eylül günü iki eksenli olarak çalıştırılmış ve bu değer referans değeri olarak alınmıştır. 3 Eylül günü ve sonrasında her gün kutupsal eksen bilinçli olarak fazladan 4° hata yaptırılarak, panelin 4°, 8°, 12°, 16°, ve 20° hata açılarındaki verim kaybı ölçülmüştür.

Tablo 3.6. FV panel veriminin eksen açısına bağlı düşüşü

Ölçüm Tarihi	Eksen Hata Açısı	Üretilen Enerji	Toplanan Enerji	Sistem Verimi	Verim Kaybı
2 Eylül 2018	0°	940,3 Wh	6922,6 Wh	% 13,583	Referans
3 Eylül 2018	4°	812,6 Wh	6211,5 Wh	% 13,082	% 3,68
4 Eylül 2018	8°	701,4 Wh	5585,4 Wh	% 12,557	% 7,55
5 Eylül 2018	12°	705,9 Wh	5655,2 Wh	% 12,482	% 8,11
8 Eylül 2018	16°	748,2 Wh	6086,1 Wh	% 12,293	% 9,50
10 Eylül 2018	20°	787,9 Wh	6433,9 Wh	% 12,246	% 9,84

Tablo 3.6'daki değerler incelendiğinde panel açısındaki 20°'lik bir sapmanın bile gün boyunca maksimum %10'luk bir verim kaybına yol açtığı görülmektedir. Bu ölçümler ışığında tasarlanan sistemin tek eksende çalışırken 7 Temmuz günü yaptığı hatanın güneşlenme grafiği ile ağırlıklı olan verim kaybı hesabı sonucunda, % 2,1 kayıpla çalıştığı hesaplanmıştır.

3.5.6. Eğik eksenli sistemin hata optimizasyonlu yazılım ile testi

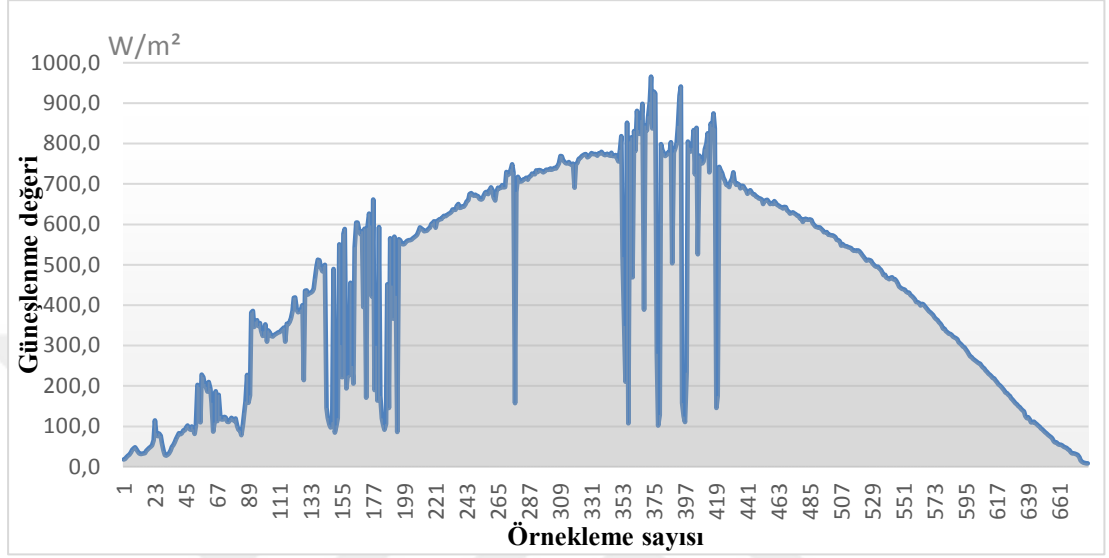


Şekil 3.31. 17 Eylül günü güneşlenme grafiği

Sistemin 17 Eylül günü olan çalışmasındaki performansına baktığımızda, Şekil 3.31'deki güneşlenme grafiğinin alanından hesaplanan panel üzerine toplanan enerji 7315,3 Wh olmuştur. Elektrik sayacından hesaplanan üretilen enerji 1082 Wh olmuştur. Kutupsal eksen ve yardımcı eksen motorlarının enerji tüketimi 11,495 Wh

ölçülmüştür. PLC enerji tüketimi 53,04 Wh olarak ölçülmüştür. Bu değerlere göre 17 Eylül günü iki eksen çalışan sistemin verimi;

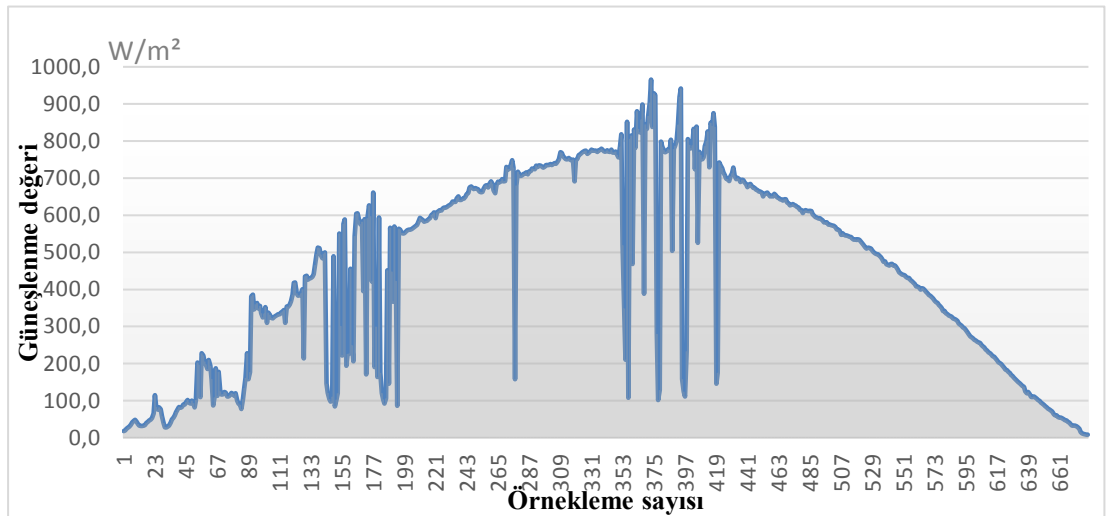
$$\% \eta = (1017,5 / 7315,3) \times 100 = 13,909 \text{ çıkmıştır.}$$



Şekil 3.32. 20 Eylül günü güneşlenme grafiği

Sistemin 20 Eylül günü olan çalışmasındaki performansına baktığımızda, Şekil 3.32'deki güneşlenme grafiğinin alanından hesaplanan panel üzerine toplanan enerji 8201,6 Wh olmuştur. Elektrik sayacından hesaplanan üretilen enerji 977 Wh olmuştur. Bu değerlere göre 20 Eylül günü sabit sistem verimi;

$$\% \eta = (977 / 8201,6) \times 100 = 11,912 \text{ çıkmıştır.}$$



Şekil 3.33. 24 Eylül günü güneşlenme grafiği

Sistemin 24 Eylül günü olan çalışmasındaki performansına baktığımızda, Şekil 3.33'deki güneşlenme grafiğinin alanından hesaplanan panel üzerine toplanan enerji 9554,5 Wh olmuştur. Elektrik sayacından hesaplanan üretilen enerji 1408 Wh olmuştur. Kutupsal eksen motorunun enerji tüketimi 1,243 Wh ölçülmüştür. PLC enerji tüketimi 53,04 Wh olarak ölçülmüştür. Bu değerlere göre 24 Eylül günü hata optimizasyonlu yazılımın tek eksen sistemin verimi;

$$\% \eta = (1353,7 / 9554,5) \times 100 = 14,168 \text{ çıkmıştır.}$$

3.5.7. Eğik eksenli tasarımın farklı zaman aralıkları ile performansı

Tablo 3.7. Takip zaman aralığının değişiminin verime etkisi.

Ölçüm Tarihi	Takip Zaman Aralığı	Üretilen Enerji	Toplanan Enerji	Motor Tüketimi	Sistem Verimi
24 Eylül 2018	2 dk	1408 Wh	9554,5 Wh	1,243 Wh	% 14,168
07 Ekim 2018	8 dk	1308 Wh	8921,6 Wh	1,162 Wh	% 14,054
05 Ekim 2018	12 dk	1366 Wh	9401,2 Wh	1,359 Wh	% 13,951
03 Ekim 2018	16 dk	946 Wh	6546,7 Wh	1,326 Wh	% 13,619
06 Ekim 2018	20 dk	1272 Wh	8951,4 Wh	1,251 Wh	% 13,604

Tablo 3.7'ye baktığımızda takip aralığındaki artışın sistem verimini düşürdüğü görülmektedir. Çünkü sistem güneşi ne kadar uzun aralıklarla takip ederse güneşin doğrultusu ile panel normalinin açılı farkı o kadar artacaktır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında geliştirilen tasarımın ilk versiyonu ile Haziran 2018'de ölçüm verileri alınmaya başlanmıştır. Bu veriler sonucunda daha öncekilerde olduğu gibi iki eksen çalışmada daha fazla güneş enerjisi topladığı doğrulanmıştır. İkinci bir algoritmayla ise bu tasarımın daha verimli bir çalışma şekli ortaya konmuştur. Sadece tek eksenle çalıştırılarak geleneksel azimut-yükseliş tipi iki eksenli takip platformlarına yakın bir performans edilmiştir. Böylece iki motor yerine tek motor çalıştırılarak sistemin enerji tüketimi azaltılarak toplam verimi artırılmıştır.

İki eksenli çalışmada sistem daha önce birçok çalışmada incelendiği gibi sabit sisteme göre yüzde 22,1 daha verimli çıkmıştır. Tek eksenli çalışmada ise tasarımın sabit eksene göre yüzde 20,8 daha verimli çıktığı görülmüştür.

Tek eksen ile iki eksen arasında verim açısından sadece yüzde 1,3 lük bir fark çıkmıştır. Fakat motor tüketimleri açısından iki eksenli sistemin, tek eksenli sisteme göre 6 kat daha fazla enerji tükettiği görülmüştür. Tasarımın eksen motorlarının tüketimi burada kontrol sistemi tüketimine göre çok az gözüksün de 100kW mertebesindeki bir kurulumda kontrol ünitesi gücü aynı kalacak fakat motor güçleri 12-15 kW mertebesine çıkacaktır. Bu durumda da önerilen tek eksenli çalışmanın önemi ortaya çıkacaktır.

Haziran ayındaki ölçümlerde sistemin tek eksen çalışmada yükseliş ekseninde 34°'ye varan hata yaptığı görülmüş ve bu konuda yazılımda iyileştirme yapılmıştır. Her iki eksenlerdeki takip hatası 9° civarına düşürülmüştür. Sistemin hata optimizasyonlu bu ikinci versiyonu ise 17, 20 ve 24 Eylül 2018 tarihlerinde çalıştırılıp ölçümler alınmıştır.

Sabah ve akşam vakitlerinde 9 dereceye varan hatanın sebep olduğu verim kaybının günlük kümülatif toplamdaki oranı %4 civarındadır. Buradan hareketle tasarlanan sistemin 100kW'lık versiyonunun tek eksen optimizasyonlu çalışmadaki topladığı enerji kabaca 96kW olacaktır. Motor tüketimleri de normal iki eksen tüketiminin (12-15kW) 1/6'sı seviyesinde, yani 2-2,5kW aralığında olacaktır.

Yeni yaklaşımın net enerji kazancı $96\text{kW} - 2,5\text{kW} = 93,5\text{ kW}$ olacaktır.

Bu iki eksenli çalışmada $100\text{kW} - 15\text{kW} = 85\text{ kW}$ olacaktır.

Tablo 3.8. Hata optimizasyonlu yazılımın karşılaştırmalı değerleri.

	24 Eylül 2018	17 Eylül 2018	20 Eylül 2018
Ölçülen Test Değerleri	Tek Eksenli Çalışma	İki Eksenli Çalışma	Sabit Açılı FV
Test günündeki ortalama güneşlenme değeri	501,8 W/m ²	377.8 W/m ²	427.1 W/m ²
Güneşten panelin yüzeyine düşen enerji	9554,5 Wh	7315,3 Wh	8201,6 W/m ²
Panelin mikroevirici çıkışında ürettiği enerji	1408 Wh	1082 Wh	977 Wh
Motor enerji tüketimleri	1,243 Wh	11,495 Wh	0 Wh
PLC ünitesi enerji tüketimi	53,04 Wh	53,04 Wh	0 Wh
Toplam sistem verimi	14,168 %	13,909 %	11,912 %

Tablo 3.8.'deki değerlere bakıldığında ilginç olarak tasarlanan sistemin 24 Eylül günü hesaplanan performansı, iki eksen çalışan sistemden bile yüksek çıkmıştır. İlk bakışta bu garip gelse de ölçüm tarihlerinin tam da sonbahar ekinoksu zamanına denk geldiği görülmektedir. Geliştirilen tasarımın doğası gereği, 21 Eylül ve 21 Mart tarihlerine yakın günlerde tek eksen takip ile güneşin gökyüzündeki rotası birbirine çok yaklaşmaktadır. İki eksenli takipte sistem hassas takip edebilmek için iki motoruda çalıştırmakta ve gereksiz yere enerji tüketmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada geliştirilen eğik eksenli tasarım, bulgulara tartışılan farklı yöntemlerle ve farklı değişkenlerin incelenmesi için yaklaşık 4 ay boyunca 19 farklı gün ve koşulda çalıştırılmıştır. Bunlar içerisinde tasarımın tek eksen ile hata optimizasyonlu çalışmasında da hedeflenen en düşük tüketim ve yüksek verim değerlerine ulaşılmıştır. İstanbul, Tuzla bölgesi şartlarında sistemin optimum çalışma parametreleri bulunmuştur. Aynı zamanda önerilen tek eksenli çalışmanın panel yüzeyinin topladığı güneş enerjisinin miktarı kritik derecede düşürmediği ortaya çıkarılmıştır. Böylelikle yardımcı eksenin vasıtası ile panel eğimi günlük bazda değiştirilerek tasarımın yıl boyunca verimli bir şekilde kullanılabilmesi test edilerek tezin amaçlanan öngörüsü doğrulanmıştır.

Bu projede, şebeke bağlantılı bir evirici ve çift yönlü sayaç sayesinde üretilen enerji doğrudan elektrik şebekesine verileceğinden, depolama için akülerin ilk yatırım ve bakım maliyeti olmadan evsel fotovoltaik sistemlerin tasarlanması konusuna dikkat çekmiştir. Eksen motorları 24 volt dc olarak seçilmiş ve piyasada kolay bulunan otomobil silecek motoru ve akülü oyuncak araba motoru kullanılmıştır. Böylece çok hassas kontrol için geleneksel sistemlerde kullanılan servo veya adım motorlarının ve enkoderlerin enerji verimindeki olumlu etkisine rağmen getirdiği maliyet yükünden dolayı evsel kullanımlarda daha basit sistemlerin uygulamasına dikkat çekmiştir.

Tasarımda kullanılan PLC sisteme gelecekte oluşturulması muhtemel olan akıllı şebekeler ile haberleşme olanağı sağlamaktadır. İlave edilecek sıcaklık, basınç, rüzgar sensörleri ile sistem hava koşullarına göre kendisini en elverişli pozisyona alabilecektir. Ayrıca sensörler ile kendi üzerindeki tespit ettiği problemleri haberleşme kanalı ile şebeke kontrol merkezlerine iletebilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Mamlook R., Nijmeh S., Abdullah S.M., A Programmable Logic Controller to Control Two Axis Sun Tracking System, *Information Technology Journal*, 2006, **5**(6), 1083-1087.
- [2] Tudorache T., Kreindler L., Design of a Solar Tracker System for PV Power Plants, *Acta Polytechnica Hungarica*, 2010,**7**(1), 23-39.
- [3] Sungur C., Multi-axis Sun-tracking System with PLC Control for Photovoltaic Panels in Turkey, *Elsevier Renewable Energy*, 2009, **34**, 1119-1125.
- [4] Luo W., A Solar Panels Automatic Tracking System Based on Omron PLC, *7th Asian Control Conference*, Hong Kong, China, 27-29 August 2009.
- [5] Beyoğlu M.F., Balıkesir İlinde ift Eksenli Güneş Takip Sistemi ile Sabit Eksenli PV Sistemin Verimlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2011, 299362.
- [6] Şenpınar A., Cebeci M., Evaluation of power output for fixed and two-axis tracking PV arrays, *Elsevier Applied Energy*, 2012, **92**, 677-685.
- [7] Orhun M., Farklı Güneş Panellerinin Adaptif Bir Güneş Takip Sistemi zerinde Yıllık Performanslarının Karşılaştırılması ve G Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2013, 354550.
- [8] Zhan T., Lin W., Tsai M., Wang G., Design and Implementation of the Dual-axis Solar Tracking System, *IEEE 37th Annual Computer Software and Applications Conference*, Kyoto, Japan, 22-26 July 2013.
- [9] Okoye C. O., Abbasoğlu S., Empirical Investigation of Fixed and Dual Axis Sun Tracking Photovoltaic System Installations in Turkish Republic of Northern Cyprus, *Journal of Asian Scientific Research*, 2013, **3**(5),440-453.
- [10] Assaf E.M., Design and Implementation of a Two Axis Solar Tracking System Using PLC Tecniques by An Inexpensive Method, *International Journal of Academic Scientific Research*, 2014, **2**(3), 54-65.
- [11] Madhan G., Muruganand S., Sureshkumar N., PLC Based On-grid System for Home Appliances, *Journal of NanoScience and Nano Technology*, 2014, **2**(2), 120-124.

- [12] Öztürk A., Alkan S., Hasırcı U., Tosun S., Experimental performance comparison of a 2-axis sun tracking system with fixed system under the climatic conditions of Düzce, Turkey, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2016, **24**, 4383-4390.
- [13] Veligorskyi O., Kosenko R., Stepenko S., High-efficiency Solar Tracker Development and Effectiveness Estimation, *International Conference on Intelligent Energy and Power Systems*, Kyiv, Ukraine, 2-6 June 2014.
- [14] Yao Y., Hu Y., Gao S., Yang G., Du J., A Multipurpose Dual-axis Solar Tracker with Two Tracking Strategies, *Elsevier Renewable Energy*, 2014, **72**, 88-98.
- [15] Er E., Eke R., Design of A Tracking System with Programmable Logic Controller (PLC), *The Journal of Global Engineering Studies*, 2016, **3**(1), 32-45.
- [16] Tirmikci C. A., Yavuz C., Comparison of Solar Trackers and Application of A Sensorless Dual Axis Solar Tracker, *Journal of Energy and Power Engineering*, 2015, **9**, 556-561.
- [17] Köprü M. A., Fotovoltaik Sistemlerde Kablo Kayıplarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2016, 424183.
- [18] Vastav B. K., Nema S., Swarnkar P., Rajesh D., Automatic Solar Tracking System using Delta PLC, *International Conference on Electrical Power and Energy Systems*, Maulana Azad National Institute of Technology, Bhopal, India, 14-16 December 2016.
- [19] Lakshmi S. D., Harine S., Subasini S.T., Priyanka S.T., PLC Based PV Module Tracking with Microcontroller Backup, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2016, **5**(5), 1-6.
- [20] Smirnov A. A., Malugin S.A., Bakanov A.V., Design Integrated PV Facility with Dual-axis Solar Tracking System Mounted on the South Building Face, *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*, Saint-Petersburg, Russian Federation, 16-19 May 2017.
- [21] Madharia N., Kashyap T., Prabhakar, PLC based Solar Panel Tracking System with Automatic Tilting Arrangement and Tilt Angle Optimization, *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, 2017, **5**(9), 56-58.
- [22] Filik T., Başaran Filik Ü., Efficiency Analysis of The Solar Tracking PV Systems in Eskişehir Region, *Anadolu University Journal of Science and Technology A-Applied Science and Engineering*, 2017, **18**(1), 209-217.

- [23] Arslan İ., Tekirdağ Koşullarında Polikristal ve Monokristal Tip PV Güneş Panellerinin Verimlilik Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 2018, 495028.
- [24] Kapluhan E., Enerji Coğrafyası Açısından Bir İnceleme: Güneş Enerjisinin Dünyadaki ve Türkiye'deki Kullanım Durumu. *İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Dergisi*, 2014, **29**, 70-98.
- [25] Çanka Kılıç F., Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri, *Mühendis ve Makina*, 2015, **56**(671), 28-40.
- [26] ETBK, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Bilgi Merkezi, Güneş, <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes>, (Ziyaret Tarihi: 17.06.2018)
- [27] YEGM, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Güneş Enerjisi ve Teknolojileri, http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/g_enj_tekno.aspx, (Ziyaret Tarihi: 17.06.2018)
- [28] Yücel Y., Güneş Enerjisinden Yararlanmak Amacı ile Fotovoltaik Sistemlerin Binalarda Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Arel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016, 454800.
- [29] Schiffer H.W., World Energy Resources 2016, World Energy Council, ISBN: 978 0 946121 58 8, 591-598, 2016.
- [30] Üçgül İ., Ergün E., Doğrusal Fresnel Güneş Güç Sistemi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Yekarum e-Dergi*, 2012, **1**(3), 11-17.
- [31] Haberlin H., *Photovoltaics: System Design and Practice*, 2nd ed., John Wiley & Sons Ltd Publication, West Sussex, United Kingdom, 2012.
- [32] Sopian K., Cheow S. L., Zaidi S. H., An Overview of Crystalline Silicon Solar Cell Technology: Past, present, and future, *AIP Conference Proceedings*, 2017, **1877**(1),020004-1- 020004-11.
- [33] Askari M.B, Mirzaei M. A. V., Mirhabibi M., Types of Solar Cells and Application, *American Journal of Optics and Photonics*, 2015, **3**(5), 94-113.
- [34] Dunlop J.P., *Photovoltaic Systems*, 2nd ed., American Technical Publishers, Inc., USA, 2010.
- [35] Ullal H. S., Stone J.L., Zweibel K., Surek T. Mitchell R. L., Polycrystalline Thin-Film Solar Cells and Modules, *6th International Photovoltaic Science & Engineerig Conference*, New Delhi, India, 10-14 February 1992.
- [36] IRENA, Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, *IRENA Working Paper*, 2012, **1**(4/5), 1-34.

- [37] Ahmed M.I., Habib A., Javaid S.S., Perovskite Solar Cells: Potentials, Challenges, and Opportunities, *International Journal of Photoenergy*, 2015, **2015**(592308), 1-13.
- [38] Jager K., Isabella O, Smets A., van Smajj R., Zeman M., *Solar Energy: Fundamentals, Technology, and Systems*, Delft University of Technology, 2014.
- [39] Teodorescu R., Liserre M., Rodriguez P., *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, John Wiley & Sons Ltd., 2011.
- [40] Nguyen N., *Solar Tracking System*, B.Sc. Thesis, Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, Helsinki, 2016.
- [41] Singh R., Kumar S., Gehlot A., Pachauri R., An Impretive Role of Sun Trackers in Photovoltaic Technology: A Review, 2018, *Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **82**(2018), 3263-3278.
- [42] Sick F., Erge T., *Photovoltaics in Buildings: A Design Handbook for Architects and Engineers*, International Energy Agency, 1993.
- [43] Luo X., Wang J., Dooner M., Clarke J., Overview of Current Development in Electrical Storage Technologies and the Application Potential in Power System Operation, *Elsevier Applied Energy* **137** (2015) 511-536.
- [44] Messenger R. A., Ventre J., 2005. *Photovoltaic Systems Engineering* 2nd Edition, CRC Press ISBN 0-8493-1793-2
- [45] Gustavsson J, *Energy Storage Technology Comparison*, KTH School of Industrial Engineering and Management, B.Sc. Thesis, 2016.
- [46] B. Han, S.F. Lu, I. Jiang, Y. Du, 2016. A review of the Energy Storage System applied in power grids, *Advances in Power and Energy Engineering*-(Editor:Y. Sun) CRC Press ISBN 978-1-315-67680-7
- [47] *Electrical Energy Storage*, International Electrotechnical Commission WP EES:2011-12, ISBN 978-2-88912-889-1.
- [48] Prinsloo G., Dobson R., *Solar Tracking*, 2015. Stellenbosch: Solarbooks ISBN 978-0-620-61576
- [49] M.H.M Sidek, W.Z.W Hasan, M.Z.A.Ab. Kadir, S.Shafie, M.A.M.Radzi, S.A.Ahmad, M.H.Marhaban, GPS Based Portable Dual-Axis Solar Tracking System Using Astronomical Equation, *IEEE International Conference Power & Energy*, Kuching, Malaysia, 1-3 December 2014

KİŞİSEL ESERLER VE YAYINLAR

Kunduz İ., Yörükeren N., İki Eksenli Güneş Takip Platformlarında Eğik Eksenli Tasarım Uygulaması ve Eksen Motorlarının Enerji Tüketiminin İncelenmesi, *3e Electrotech dergisi*, 2018, **25**(289), 50-52.



ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Lüleburgaz'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Lüleburgaz'da, lise öğrenimini Kırklareli Teknik Lisesi'nde tamamladı. Hacettepe Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden 2002 yılında mezun oldu. Askerlik hizmetini yedek subay olarak tamaladıktan sonra 2004 yılında özel sektörde bakım mühendisi olarak çalışmaya başladı. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine 2013 yılında başladı. Halen İstanbul'da özel bir şirkette bakım müdürü olarak çalışmaktadır.

