

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇİFT EKSENLİ GÜNEŞ TAKİP SİSTEMİNİN PİLOT UYGULAMASI,
ÜRETİM DEĞERLENDİRMESİ VE EKONOMİK ANALİZİ**

ÇAĞATAY VARİŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK MAKİNALARI VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. SELİN ÖZÇİRA**

İSTANBUL, 2017

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇİFT EKSENLİ GÜNEŞ TAKİP SİSTEMİNİN PİLOT UYGULAMASI,
ÜRETİM DEĞERLENDİRMESİ VE EKONOMİK ANALİZİ**

Çağatay VARİŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 11/12/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Selin ÖZÇİRA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Selin ÖZÇİRA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Nur BEKİROĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İlhami ÇOLAK
Nişantaşı Üniversitesi







ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında destek ve teşviklerini her zaman şükranla anacağım, danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Selin ÖZÇİRA'ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Yine tez çalışması süresince kendisinden görmüş olduğum destek ve teşviği her zaman şükranla anacağım, Sayın Doç. Dr. Nur BEKİROĞLU'na değerli katkıları için teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca her zaman maddi ve manevi destekleri ile yanımda olan ve çalışmalarım sırasında bana gösterdikleri sabır ve desteklerinden dolayı anneme, babama ve kardeşlerime teşekkürü borç bilirim.

Proje finansmanı ve yer tahsisi konusunda yardımlarını esirgemeyen İstanbul Büyükşehir Belediyesi yetkililerine teşekkürlerimi borç bilirim.

Projeyi oluşturmam konusunda yardımlarını esirgemeyen İstanbul Enerji A.Ş. Enerji Verimliliği Şefi Sayın Salih Serkan KIR'a teşekkür ederim.

Ayrıca her türlü desteklerinden dolayı İstanbul Enerji A.Ş.'de çalışan takım arkadaşlarım Sayın Savaş ALKAN'a, Sayın İsmail TAŞKIN'a, Sayın Hüseyin KARAKAŞ'a ve Sayın Hamdi SÜNNETCİ'ye teşekkür ederim.

Aralık, 2017

Çağatay VARİŞ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.2 Tezin Amacı	19
1.3 Orijinal katkı	20
BÖLÜM 2.....	22
YENİLENEBİLİR ENERJİ.....	22
2.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları	22
2.1.1 Güneş Enerjisi	22
2.1.2 Rüzgar Enerjisi	23
2.1.3 Biyokütle Enerjisi	23
2.1.4 Jeotermal Enerji.....	23
2.1.5 Hidroelektrik Enerjisi	24
2.1.6 Hidrojen Enerjisi	24
2.1.7 Gel-git Dalga Enerjisi.....	24
2.2 Dünyada Yenilenebilir Enerji Kaynakları Durumu	24
2.3 Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları Durumu	25
BÖLÜM 3.....	27
GÜNEŞ ENERJİSİ	27

3.1	Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli	28
3.2	İstanbul’da Güneş Enerjisi Potansiyeli	30
3.3	Güneş Geometrisi	31
3.3.1	Enlem Açısı.....	31
3.3.2	Deklinasyon Açısı (Sapma Açısı)	31
3.3.3	Saat Açısı.....	31
3.3.4	Zenith Açısı	32
3.3.5	Yükseklik Açısı	32
3.3.6	Güneş Azimut Açısı	32
3.3.7	Yüzey Azimut Açısı	33
3.4	Fotovoltaik Teknoloji	33
3.4.1	Fotovoltaik Teknolojisinin Tarihçesi	33
3.4.2	Fotovoltaik Çalışma Prensibi	35
3.4.3	Fotovoltaik Hücresinin Eş Değer Devre Modellemesi.....	36
3.4.4	Fotovoltaik Hücre Çeşitleri	38
3.4.4.1	Kristal Silisyum Fotovoltaik Hücreler	38
3.4.4.2	İnce film Güneş Hücreleri (a-Si, CdTe, CIS veya CIGS).....	39
3.4.4.3	Nano Teknolojiye Dayalı Güneş Hücreleri.....	40
3.4.5	Fotovoltaik Sistemler	40
3.4.5.1	Ada Sistemleri	41
3.4.5.2	Şebeke Bağlantılı Sistemler	42
3.4.6	Fotovoltaik Güneş Takip Sistemi	43
3.4.6.1	Tek Eksenli Güneş Takip Sistemi	44
3.4.6.2	Çift Eksenli Güneş Takip Sistemi	45
BÖLÜM 4		47
ÇİFT EKSENLİ FOTOVOLTAİK SİSTEMİN YAPISI VE TASARIMI		47
4.1	Sistemin Genel Yapısı	47
4.1.1	260 Wp Fotovoltaik Güneş Paneli	48
4.1.2	İnverter (Evirici)	49
4.1.3	Panel Taşıyıcı Konstrüksiyon ve Betonarme.....	50
4.1.4	Denetim Sistemi	52
4.1.5	Elektrik Motorları.....	53
4.1.6	Kablo ve Konnektör	55
4.1.7	AC Pano ve Şalt Ekipmanları	56
4.1.8	Rüzgar Algılama (Anemometre)	57
4.1.9	Veri Depolama ve Uzaktan Erişim Sistemi.....	57
4.1.10	Rüzgar Koruma Sarkacı.....	58
4.2	Sistem Tasarımı	59
4.2.1	Tesisin Yerleşik Konumu	59
4.2.2	Tesise Ait Bilgiler.....	61
4.2.3	Seçilen Malzemenin Tesis İçin Tasarlanan Sisteme Uygunluğu	62
BÖLÜM 5		65
ÇİFT EKSENLİ FOTOVOLTAİK SİSTEMİN SİMÜLASYONU		65

5.1	Simülasyon Programlarının Kullanımı	65
5.1.1	PVSOL.....	66
5.1.2	PVGIS	66
5.1.3	Meteonorm	66
5.1.4	Lumion	67
5.2	Simülasyon Sonuçları	67
5.2.1	5,2 kWp Gücünde Sabit Eksenli Güneş Enerji Sistemi Simülasyonu .	67
5.2.2	5,2 kWp Gücünde Çift Eksenli Güneş Takip Sistemi Simülasyonu.....	71
5.2.3	Sabit Eksenli Güneş Enerji Sistemi ile Çift Eksenli Güneş Takip Sistemi Karşılaştırması	76
5.2.4	Çift Eksenli Güneş Takip Sisteminin Farklı Panel ve İnverter Markaları Kullanılarak Oluşturulan Enerji Üretim ve Maliyet Analizi.....	79
BÖLÜM 6		81
	ÇİFT EKSENLİ FOTOVOLTAİK SİSTEMİN UYGULAMASI	81
6.1	Üretim Verilerinin Aylık Bazda İncelenmesi.....	85
6.1.1	Güneş Takip Sisteminin Temmuz Ayı Verileri	86
6.1.2	Güneş Takip Sisteminin Ağustos Ayı Verileri	87
6.1.3	Güneş Takip Sisteminin Eylül Ayı Verileri	88
6.2	Güneş Takip Sistemi Uygulamasına Ait 3 Aylık Üretim Değerinin Simülasyon Değerleri ile Karşılaştırılması	90
6.3	Çift Eksenli Sistem Uygulamasının Günlük Saat Bazında Veri Sonuçları...	92
6.4	Çift Eksenli Güneş Takip Sisteminin Maliyet ve Amortisman Analizi.....	94
BÖLÜM 7		96
KAYNAKLAR		100
ÖZGEÇMİŞ		103

SİMGE LİSTESİ

AC	Alternatif akım
C_t	Yıllık Gelir-Yıllık İşletme Gideri
C_{yat}	Yatırım Bedeli
DC	Doğru akım
FF	Dolum Faktörü
G	Solar ışık şiddeti
I	Akım
I_o	Sızıntı akım
I_L	Fotovoltaik akım
I_{sat}	Diyot akımı
I_p	Paralel kol akımı
I_{kd}	Kısa devre akımı
I_m	Maksimum akım
kWp	DC kurulu güç
kWh	AC çıkış gücü
P	Güç
P_{max}	Maksimum Güç
R	Direnç
R_s	Seri direnç
R_p	Paralel Direnç
T	Sıcaklık Birimi Kelvin
τ	Geri Dönüşüm Süresi
V	Gerilim
V_{oc}	Açık Devre Gerilimi
V_{mp}	Maksimum Gerilim
η	Fotovoltaik sistem etkinlik katsayısı

KISALTMA LİSTESİ

DMİ	Devlet Meteoroloji İstasyonu
EPA	Environmental Protection Agency
FV	Fotovoltaik
GEPA	Güneş Enerji Potansiyel Atlası
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
LDR	Light dependent resistör
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MLD	Maximum Light Detection
MPPT	Maximum Peak Power Tracker
RTC	Real Time Clock
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
STC	Standart Test Conditions
TGES	Tracker Güneş Enerji Sistemi
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
YEGM	Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 2006-2030 yılları arası dünya üzerindeki enerji durumu	25
Şekil 3.1 Türkiye güneş enerji potansiyel atlası [20]	29
Şekil 3.2 İstanbul ili güneş enerji potansiyel atlası ve lejantı [20]	30
Şekil 3.3 Güneş açıları gösterimi [23].....	32
Şekil 3.4 Fotovoltaik pilin çalışma prensibi [25].....	35
Şekil 3.5 FV hücrenin basitleştirilmiş eş değer devresi	36
Şekil 3.6 FV hücrenin tek diyotlu eş değer devresi	37
Şekil 3.7 Monokristal ve polikristal güneş hücreleri	39
Şekil 3.8 İnce film güneş hücreleri	40
Şekil 3.9 Fotovoltaik tesis çeşitleri	41
Şekil 3.10 Fotovoltaik tesislerde ada sistemi bileşenleri	42
Şekil 3.11 Çatı üzeri şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler	43
Şekil 3.12 (a) Tek eksenli güneş takip sisteminde azimut ekseninin gösterimi (b) Tek eksenli güneş takip sisteminde yükseklik ekseninin gösterimi	44
Şekil 3.13 Çift eksenli güneş takip sistemi gösterimi	45
Şekil 3.14 Çift eksenli fotovoltaik sistem şeması	46
Şekil 4.1 İnverter ünitesi	49
Şekil 4.2 Çelik hasır ve betonarme	50
Şekil 4.3 Taşıyıcı direk	51
Şekil 4.4 Panel taşıyıcı konstrüksiyon	51
Şekil 4.5 Merkezi kontrol ünitesi ve güneş algılama elemanları.....	53
Şekil 4.6 İrtifa ve doğu-batı motorları.....	54
Şekil 4.7 Elektrik motoru ve direk üzerine yerleşimi	54
Şekil 4.8 Kablo ve konnektör.....	56
Şekil 4.9 Sac pano.....	56
Şekil 4.10 Topraklama kazığı	57
Şekil 4.11 Anemometre.....	57
Şekil 4.12 Web arayüzü.....	58
Şekil 4.13 Küçükçekmece sosyal tesisi Google Earth görüntüsü	59
Şekil 4.14 Tesis vaziyet planı	60
Şekil 4.15 Sistem kurulum alanı	60
Şekil 4.16 Küçükçekmece sosyal tesisi	61
Şekil 5.1 Sabit eksenli sistemin aylara göre enerji üretim eğrisi.....	68
Şekil 5.2 Sabit eksenli sistemin çalışma performansı (%)	70
Şekil 5.3 Çift eksenli sistemin aylara göre enerji üretim eğrisi	71

Şekil 5.4 Çift eksenli sistem çalışma performansı (%)	73
Şekil 5.5 Eğim ve yönelim ile kazanılan güç yoğunluğu eğrisi.....	74
Şekil 5.6 Gündönümlerindeki dönme açısı durumları	74
Şekil 5.7 Çift eksenli fotovoltaik sistem çizimleri.....	76
Şekil 5.8 PVSOL ve PVGIS simülasyon programları kullanılarak oluşturulan sabit eksenli güneş enerji sistemi ile çift eksenli güneş takip sisteminin aylara göre enerji üretim eğrileri	77
Şekil 5.9 Farklı güneş paneli ve inverter markaları kullanılarak alınan enerji üretim eğrisi	79
Şekil 5.10 5,2 kWp gücündeki çift eksenli güneş takip sistemi için güneş paneli ve inverter bazlı toplam maliyetler	80
Şekil 6.1 Uygulama görüntüsü	81
Şekil 6.2 Temmuz ayı enerji üretim değerleri	86
Şekil 6.3 Ağustos ayı enerji üretim değerleri	87
Şekil 6.4 Eylül ayı enerji üretim değerleri	88
Şekil 6.5 Çift eksenli güneş takip sisteminin 3 aylık enerji üretimi ve karşılanan fatura giderleri.....	89
Şekil 6.6 Temmuz ayındaki hava durumlarına göre en yüksek üretime sahip günlerdeki enerji durumları	92
Şekil 6.7 Ağustos ayındaki hava durumlarına göre en yüksek üretim yapılan günlerdeki enerji durumları	93
Şekil 6.8 Eylül ayındaki hava durumlarına göre en yüksek üretim yapılan günlerdeki enerji durumları	93
Şekil 6.9 25 Yıllık modül enerji üretim periyodu	95
Şekil 6.10 Sistem geri dönüşüm (amortisman) tablosu	95

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Türkiye yenilenebilir enerji kurulu gücü 2017 Şubat sonu verileri	26
Çizelge 3.1 İstanbul ili güneşlenme süresi ve gün uzunluğu	30
Çizelge 4.1 Parla 260 W fotovoltaiik güneş paneli teknik özellikleri	48
Çizelge 4.2 Fronius 5 kW inverter teknik özellikleri.....	49
Çizelge 4.3 Küçükçekmece sosyal tesisi 2016 yılı aylık tüketim değerleri	62
Çizelge 5.1 PVSOL-PVGIS aylık enerji üretim karşılaştırması	69
Çizelge 5.2 Sabit eksenli sistemin aylık çalışma performansı (%)	70
Çizelge 5.3 PVSOL-PVGIS aylık enerji üretim karşılaştırması (çift eksenli)	72
Çizelge 5.4 Çift eksenli sistemin aylık çalışma performansı (%).....	72
Çizelge 5.5 PVSOL ve PVGIS kullanılarak oluşturulan 5,2 kWp gücündeki sabit eksenli ve çift eksenli sistemlerin aylara göre enerji üretim karşılaştırmaları	76
Çizelge 5.6 Çift eksenli güneş takip sistemi ile sabit eksenli fotovoltaiik sistemin çıkış parametlerinin kıyaslanması.....	78
Çizelge 5.7 Güneş paneli ve inverter bazlı üretim çıkış parametlerinin karşılaştırılması	79
Çizelge 5.8 5,2 kWp çift eksenli güneş takip sistemi için güneş paneli ve inverter bazlı maliyet analizi	80
Çizelge 6.1 Çift eksenli güneş takip sisteminin 3 aylık (Temmuz, Ağustos, Eylül) veri çıktıları.....	82
Çizelge 6.2 Sabit ve çift eksenli sistemin PVGIS, PVSOL ve uygulama değerleri ile 3 aylık enerji üretim analizi	90
Çizelge 6.3 5,2 kWp gücündeki çift eksenli güneş takip sisteminin maliyet tablosu.....	94

ÇİFT EKSENLİ GÜNEŞ TAKİP SİSTEMİNİN PİLOT UYGULAMASI, ÜRETİM DEĞERLENDİRMESİ VE EKONOMİK ANALİZİ

Çağatay VARİŞ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Selin ÖZÇİRA

Bu tez çalışması, çift eksenli güneş takip sistemi kullanılarak güneş enerji sisteminin verimini arttırmak için bir çözüm ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada güneşi izleyebilen, 5,2 kWp gücünde, çift eksenli fotovoltaik sistemin tasarımı ve simülasyonu anlatılmıştır. Fotovoltaik ünitenin çalışma prensibi anlatılarak sistemi oluşturan kısımlara yer verilmiştir. Tasarlanan yapının en önemli özelliği güneşi izleyebilme yeteneğine sahip olmasıdır. Tasarımı, simülasyonu ve uygulaması yapılan sistemin bu yeteneği sayesinde güneş ışınlarından maksimum düzeyde yararlanılmakta ve güneş enerjisi en verimli şekilde kullanılmaktadır. Güneş algılayıcı sensör, gelen ışığın yoğunluğunu ve açısını sürekli olarak ölçtüğü için çift eksenli sistemi en uygun konuma getirmektedir. Bu sayede güneş ışınları fotovoltaik panellerin yüzeyine sürekli dik konumda gelmekte ve güneş enerjisinden verimli bir şekilde elektrik enerjisi elde edilmektedir.

Bu çalışma, çift eksenli güneş takip sisteminin avantajlarının ön plana çıkarılabilmesi için sabit eksenli sistem ile farklı simülasyon programları ve uygulama sonuçlarının karşılaştırmalarını da kapsamaktadır. Tez çalışmasında İstanbul Büyükşehir Belediyesi Küçükçekmece Sosyal Tesisin’de elektrik enerjisi ihtiyacının bir kısmının karşılanması için; konum bilgisi, tesise ait elektrik tüketim değerleri incelenerek simülasyon programları vasıtasıyla optimum performans ve maliyet gözetilerek çift eksenli güneş takip sisteminin en verimli çözümü sunulmuştur. Projesi ve uygulaması gerçekleştirilen sisteme ait toplam maliyet ve geri dönüş süresi, simülasyon ve uygulama verilerinin uyumu gözetilerek hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güneş takip sistemi, çift eksen, enerji üretimi, fotovoltaik, ekonomik analiz.



**DUAL-AXIS TRACKING SYSTEM PILOT APPLICATION OF THE SUN,
EVALUATION OF PRODUCTION AND ECONOMIC ANALYSIS**

Çağatay VARIŞ

Department of Electrical Engineering
MSc. Thesis

Advisor: Asst. Prof. Dr. Selin ÖZÇİRA

This thesis, presents a solution to increase the efficiency of the solar energy system by using a dual axis solar tracking system.

In this study, the design and simulation of a dual axis photovoltaic system is described in 5.2 kW power capable of tracking the sun. The working principle of the photovoltaic unit is explained and the parts forming the system are remarked. The most important feature of the designed structure is its ability to track the sun. By this way designing, simulating and applying the system makes maximum use of solar radiation and solar energy is used in the most efficient way. The sun-sensor detects the intensity and angle of incoming light continuously, so the dual-axis system is in the optimal position. Thus, the solar radiation come to the surface of the photovoltaic panels continuously and the electricity energy is obtained efficiently from the solar energy.

This study also includes the comparison of different simulation programs and application results with fixed axis system in order to take advantage of advantages of dual axis solar tracking system. In the thesis study, the location information, electricity consumption values of the facility will be examined and the most efficient solution of the dual axis solar tracking system will be presented by considering the optimum performance and cost through the simulation programs in order to meet some of the electric energy needs in İstanbul Metropolitan Municipality Küçükçekmece Social Facility. The total cost and return time of the project and application system are calculated taking into account the simulation and adaptation of application data.

Keywords: Solar tracker system, dual axis, energy production, photovoltaic, economic analysis.



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Talep edilen enerjinin hızla artmasına paralel olarak mevcut enerji kaynaklarının çok kısa zamanda tükeneyeceği bilimsel bir gerçektir. Buna ilaveten artan nüfus ve enerji talebine bağlı olarak emisyon değerlerinin mevcut sınırlar içinde tutulması mümkün değildir. Bu kirliliğin devam etmesi durumunda dünya sıcaklığının artacağı ve deniz seviyesinin yükseleceği vb. sonuçlar tüm dünyada enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını kaçınılmaz hale getirmiştir.

Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarının temelini oluşturmaktadır. Bu enerji kaynağının gün ışığından elektrik enerjisine dönüşümü fotovoltaik paneller sayesinde gerçekleşmektedir. Fotovoltaik paneller çevreyi kirletebilecek herhangi bir atık veya zararlı madde içermediğinden çevreye duyarlı ekipmanlardır. Bir diğer önemli özellikleri, kurulumdan sonraki işletme ve bakım maliyetlerinin yok denecek kadar az olmasıdır.

Fotovoltaik panellerin birçok avantajına karşılık, bu panellerin kurulum maliyetleri oldukça yüksektir. Ayrıca panel verimlerinin genel olarak %15-25'ler civarında olması sebebi ile ilk kurulum maliyetlerini amorti edebilme süreleri de oldukça uzundur. Bu sebeple fotovoltaik panellerden etkili bir şekilde yararlanabilmek için performans-maliyet oranlarına dikkat etmek gerekmektedir.

Fotovoltaik panellerin sabit yerleştirildiği uygulamalarda panellerden elde edilen enerji miktarı, güneşin doğuş ve batış saatlerinde düşük olmaktadır. Bu olumsuzluğun önüne geçebilmek için tek eksenli, çift eksenli, güneş odaklamalı sistemler gibi güneşi izleyebilen sistemler son yıllarda popüler çalışma alanları haline gelmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Aşağıda sabit, tek ve çift eksenli fotovoltaik sistemler ile ilgili literatür çalışmaları tarih sırasına göre verilmiştir.

Sabri ve arkadaşları, güneşi izleyebilen 3 kW gücünde çift eksenli fotovoltaik güneş enerji sisteminin tasarımını ve prototipini tanıtmışlardır. Çift eksenli fotovoltaik güneş enerji sisteminin çalışma prensibini ve sistem ekipmanlarını anlatmışlardır. Tasarladıkları bu sistemin özelliği güneşi izleyebilme yeteneğine sahip olmasıdır. Bu sayede güneş ışınları fotovoltaik panellerin yüzeyine sürekli dik konumda gelmekte ve güneş enerjisinden verimli bir şekilde faydalanılmaktadır. Aynı güçteki sabit eksenli fotovoltaik güneş enerji sistemi ile kıyaslandığında üretilen elektrik enerjisinde %45'e varan artış olduğunu söylemişlerdir. Çalışmada tanıtılan çift eksenli fotovoltaik sistem, güneşin doğuşundan batışına kadar olan süre zarfında güneş ışınlarının panele dik düşmesini sağlayacak şekilde güneşi izlemektedir. Tasarladıkları sistemin güneşin konumunu belirleyebilmesi için güneş algılama elemanları kullanmışlardır. Sistemin denetim algoritmasını mikro denetleyici devresi ile gerçekleştirmişlerdir. Fotovoltaik ünitenin iki eksenli hareketi, sistemde bulunan doğu-batı ve yükselme-alçalma motorları ile sağlanmaktadır. Güneş algılama elemanları denetim devresi ile senkronize çalışmaktadır. Algılama elemanlarından gelen bilgiler denetim devresinde değerlendirilerek, sistemin iki eksenli hareketini sağlamak üzere doğu-batı ve yükselme-alçalma motorlarının sürücü devrelerine uygun konum sinyalleri gönderilmektedir. Konum sinyalleri neticesinde motor sürücüleri konumlandırma motorlarını tahrik ederek, fotovoltaik ünitenin iki eksenli hareketini sağlamaktadır. Yatayda 0° ile 180° arası, dikeyde ise 5° ile 90° arası hareket sağlanmıştır. Çalışmalarında sistemlerini mekanik, elektronik denetim sistemi ve enerji dönüşüm ünitesi olarak üç kısımda incelemişlerdir. Mekanik kısımda, 20 adet 150 W'lık panellerden oluşan sistemlerine doğu-batı ve aşağı-yukarı radyal hareketi sağlayacak redüktörlü doğru akım motorları yerleştirmişlerdir. Elektrik denetim sisteminde, PIC kontrolcü kullanmışlardır. Enerji dönüşüm ünitesinde sistemin üretim ve tüketim değerlerini incelemişlerdir. Sistemin günde yaklaşık 30 kWh enerji üretimi olduğunu ve sabit sisteme göre %45 daha fazla elektrik ürettiğini bildirmişlerdir. Günlük tüketim değerinin ise 6,66 Wh olduğunu ve sistemin hareketinden dolayı kaynaklanan enerji

kaybının sadece %0,06 olduğunu göstermişlerdir. İlk kurulum maliyeti yüksek olan sistemde, enerji kaybının az olmasından dolayı amortisman süresinin azaldığını ifade etmişlerdir [1].

Bu tez çalışmasında ise, İBB sosyal tesisine yapılacak pilot projenin yukarıdaki çalışmadan farkı; 5 kW gücünde tasarlanacak olması ve enerji kaybını en az indirmek amacıyla MLD (Maksimum Light Detection) sensör sistemi kullanılacak olmasıdır. Mikro denetleyiciye sahip sürücü ve güneş algılama elemanı ile sistemin güneş ışınlarından maksimum derecede faydalanması sağlanacaktır. Sürücü kontrolü doğrudan merkezi kontrol ünitesi ile sağlanacaktır. Gerçekleştirilecek pilot projede üretim ve tüketim değerlerinin gerçek zamanlı uzaktan izlemesi yapılarak günlük, aylık ve yıllık veriler toplanacaktır.

Huang ve arkadaşları, tek eksenli, üç pozisyona sahip güneş izleyici sistemi kurmuşlardır. Sistemin günlük ve uzun vadede ölçümlerini sabit eksenli fotovoltaik sistemi ile kıyaslayarak karşılaştırma yapmışlardır. Her iki sistemin ürettiği enerji ile de LED aydınlatma sisteminin güç tüketimini karşılamışlardır. Günlük sonuçlar temel alınarak tek eksenli 3 pozisyonlu sistemin, parçalı bulutlu günlerde sabit sisteme göre %35,8 daha fazla elektrik ürettiğini, havanın açık olduğu günlerde ise elektrik üretiminin %35,6 daha fazla olduğunu görmüşlerdir. Uzun vadede ölçümler temel alındığında ise, tek eksenli 3 pozisyonlu sistemin sabit eksenli sisteme göre aylık %18,5 ile %28 arası daha fazla elektrik ürettiğini ölçmüşlerdir. Toplamda 13 ay (1 Mart 2010-31 Mart 2011) için ölçüm yapmışlar ve bu süre zarfı sonunda 3 pozisyonlu sistem ile elde ettikleri elektrik üretiminin %37,5 daha fazla olduğunu görmüşlerdir. Ölçüm mevkisinin solar radyasyonunun yüksek olması durumunda ise elektrik üretim artışının %37,5'ten daha fazla olacağını vurgulamışlardır. Ön gördükleri sistem ile alınan çıkış değerlerinin çift eksenli solar sistemin verdiği sonuçlara yakın olduğunu söylemişlerdir. Sistemlerini 3 pozisyon için, yani güneşin sabah (50°), öğle (25°) ve öğleden sonraki (50°) konumunu göz önünde bulundurarak stand-alone olarak (herhangi bir güç kaynağı veya şebeke tarafından desteklenmeyen) tasarlamışlar ve enerji kaybını en az indirebilmek adına MPPT (Maksimum güç takip noktası) ve DC-DC konvertör kullanmışlardır. 230 Wp'lik sistemin ürettiği enerjiyi güç elektroniği devreleri kullanarak

PWM kontrol ile bataryada depolamışlar ve çıkıştaki 100 W'lık LED sistemi beslemişlerdir [2].

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilecek olan çift eksenli güneş takip pilot projesi ile, sabit eksenli sisteme göre Huang ve arkadaşlarının bahsettiği verim artışı ispatlanmaya çalışılacaktır. Huang ve arkadaşları yaptıkları çalışma ile tek eksenli 3 pozisyonlu 230 Wp'lık solar tracker sistemin, çift eksenli solar tracker sisteme yakın bir güç değeri verdiğini öngörmüşlerdir [2]. Ancak bu tez çalışmasında, sistem daha yüksek güç olan 5 kWp'lık bir güçte tasarlanacak olup, güç arttığında da sistemin uygulanabilirliği gösterilecektir. Ayrıca sistem, yatay eksenle 0° - 300° , dikey eksenle 20° - 90° dönecek şekilde tasarlanacaktır. Bu eksen hareketi işlemi iki adet motor vasıtasıyla gerçekleştirilecektir. Farklı marka panel, evirici için sistem tasarımları araştırılacaktır. Huang ve arkadaşları sistemlerini sadece birer markaya göre tasarlamış ve yapmış olsalar da bu tez çalışmasında farklı markalar için verim ve maliyet analizleri yapılarak, farklı konfigürasyonlar için simülasyon çalışmaları gerçekleştirilecektir. Ayrıca tasarlanacak olan sistem ile üretilen enerji iç tüketimde harcanarak, bataryanın ekstra maliyetinden kaçınılacaktır.

Özçelik ve arkadaşları, hemisferoidal rotasyon ile güneş panelinin maksimum düzeyde gün ışığını absorbe etmesi ve elektrik üretiminin artırılması üzerine çalışmışlardır. Bunun için güneş ışığını takip eden çift eksenli güneş paneli sistemini kullanmışlardır. Azimut ve yükseklik açısını değiştirerek simülasyonlar yapmışlardır. Simülasyon neticesinde güneş izleyici sistemde, uygun pozisyonda maksimum düzeyde solar radyasyon absorbe edildiğini göstermişlerdir. Sistemlerinde güneşten maksimum derecede faydalanmayı sağlayacak mikroişlemci odaklı bir kontrol devresi kullanmışlardır. Kullandıkları güneş paneli modülünü 200 Wp seçmişler ve ölçümlerde bulunmuşlardır. Sabit eksenli sistemin pozisyonunun daima statik olmasından ötürü, açığa bağlı değişimlerin ölçümünü kolaylaştıracak çift eksenli güneş panel sistemini kullanmışlardır. Dünya güneşin etrafında dönerken güneş sapma açısı yıl boyunca $+23,50^{\circ}$ ve $-23,50^{\circ}$ arasında değişmektedir. Eğim açısının karakterize edilmesi ile kuzey yarım kürede eğim açısının yaz aylarında $+23,50^{\circ}$, kış aylarında ise $-23,50^{\circ}$ olduğunu, ilkbahar ve sonbahar mevsimlerinde ise bu açının genellikle 0 olduğunu belirtmişlerdir. Bu bilgilerin ışığında sapma açısını n adet gün sayısına bağlı olan bir formülle ifade

etmişlerdir. Saate bağılı değişen açı değerini hesaplayabilmek için, boylam ve yerel saat bilgilerini kullanmışlar ve bu değeri formulize etmişlerdir. Kuzeyi 0° , güneyi 180° , doğuyu 90° , batıyı 270° olarak almışlar ve azimut açısını saat 12.00'dan önce ve sonra olmak üzere formulize etmişlerdir. Yükselme açısını ise, yatay düzleme göre hesaplamışlar ve güneş ışınları ile yatay düzlem arasındaki açı olarak tanımlamışlardır. Yaptıkları simülasyon ile azimut ve yükselme açısının gerçek güneş radyasyonu verisi ile ilişkisini formülle ifade etmişlerdir. Ayrıca gelen güneş ışığının karadan yansımalarının azimut ve yükselme açısına bağılı formülünü göstermişlerdir. Kullandıkları güneş platformu için iki özdeş 12 V DC motor seçmişlerdir. Güneş platform sistemi için açık döngü transfer fonksiyonu tanımlamışlar ve fotovoltaiik dizi devresini, 12 saat, yani 43200 saniye süreyle simüle etmişlerdir. Simülasyon modeli ile güneş panelinin öğle vakitlerinde maksimum 200 W güç elde edebildiğini göstermişlerdir. PID kontrolöründen gelen cevabın azimut ve yükselme açısının değişimiyle alınan sonuçlar ile benzer olduğunu görmüşlerdir [3].

Bu tez çalışmasında, 5 kW gücünde tasarlanacak olan çift eksenli güneş takip sistemi, sahip olduğu güneş algılama elemanları ile güneş yörüngesini takip edecektir. Güneşin doğudan doğup, batıdan batması sebebi ile azimut değeri $[90 \text{ ile } -90]$ arasında değişecektir. Sistem konum itibari ile güneşten maksimum faydalanmayı sağlayarak doğu, güney ve batı yönlerinde güneşi takip etmiş olacaktır.

Sinan ve arkadaşları, sabit bir fotovoltaiik panel ile çift eksenli güneşi takip eden fotovoltaiik panelin performans farkını, Mayıs ve Haziran aylarında karşılaştırmışlardır. Çift eksenli sistemi sabit fotovoltaiik sistem ile karşılaştırdıklarında çift eksenli sistemde güneş izleme sistemi sayesinde enerji üretiminin yaklaşık %64 oranında arttığını ölçmüşlerdir. Ayrıca, her aya ilişkin performans değerlerini yapmış oldukları simülasyonlar ile karşılaştırmışlardır. Yapmış oldukları uygulamada, çift eksenli sistemin yükseklik ve azimut hareketini sağlayan 2 adet DC motor kullanmışlardır. Uydu çanak anten aparatlarını aktüatör olarak kullanmışlar ve bu sistemin 240° hareket etmesini sağlamışlardır. İki doğrusal potansiyometreyi konum verilerini derece cinsinden almak için kullandıkları millerin etrafına monte etmişlerdir. Her iki aparatı 12V DC ile beslemişler, potansiyometreleri ise cihazın kontrol panosu üzerinden 7805 regülatör

devrelerinden elde edilen 5V DC ile beslemişlerdir. Analog konum verilerini mikrodnetleyicinin analog girişlerine göndermişlerdir. Kontrol ünitesinde, harici bir gerçek zaman saati, iki adet konum sensörü ve motor sürücü devrelerinden gelen geri beslemeyi kullanmışlardır. Enlem ve boylam değerlerini mikrodnetleyicide saklarken, tarih ve saat verilerini hesaplamak için gerçek zamanlı saat kullanmışlardır. İki eksendeki mevcut konum açılarını, yükseklik ve azimut açılarıyla karşılaştırarak, mikrodnetleyiciyi hangi motorun çalışacağına ve hangi yönün seçileceğine karar verecek şekilde programlamışlardır. Yaptıkları programlamada; Mikrodnetleyici vasıtasıyla öncelikle yükseklik motorunu çalıştırmış ve hesaplama yüksekliği açısı geçerli konum açısına eşit olduğunda motoru durdurmuşlardır. Yükseklik açısını bulduktan sonra ikinci motoru çalıştırmış ve güneş paneli azimut açısı, hesaplama açısına eşit olduğunda, ikinci motor durdurmuşlardır. Kontrol ünitesinin bu hesaplamaları her dört dakikada bir tekrarladığını ve buna göre motorları hareket ettirdiğini ifade etmişlerdir. Sabit eksenli (37°) fotovoltaiik panellerin ve çift eksenli güneş izleyicisine monte edilen fotovoltaiik panellerin güç değerlerini, farklı zamanlarda ölçmüşlerdir. Bu ölçümlerde 10 W ve 20 W güç kapasiteli sabit eksenli paneller ile aynı güç değerlerine sahip çift eksenli sistemi karşılaştırmışlardır. Mevcut kontrol sistemini sabit ve çift eksenli solar panellerin maksimum güç noktalarını 1 dakika aralıklarla ölçüm yapacak şekilde tasarlamışlardır. Almış oldukları sonuçları seri port üzerinden bilgisayara aktarmışlardır. Ölçmüş oldukları gerçek değerlerin, simülasyon programından gelen değerlere belirli bir tolerans dahilinde uygun olduğunu görmüşlerdir. Simülasyon sonuçlarının gerçek değerlerle uyumlu olması nedeniyle simülasyon programından çift eksenli izleme sistemi değerlerinin elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Sabit fotovoltaiik sistem ve çift eksenli fotovoltaiik sistem arasındaki performans farkını, Mayıs ayında %64 olarak tespit etmişlerdir. Yapılan çalışmalar neticesinde fotovoltaiik izleyicilerinin pahalı olup olmamalarına bakılmaksızın fotovoltaiik sistemlerde kesinlikle kullanılması gerektiğini vurgulamışlardır. Ayrıca çift eksenli güneş izleyici sisteminin sabit fotovoltaiik sisteme nazaran aynı gücü sağlarken daha az yer kaplayacağını belirtmişlerdir [4].

Bu tez çalışmasında kurulumu ve projelendirmesi yapılacak olan 5,2 kWp'lik çift eksenli güneş enerji sisteminde gerçek zamanlı zaman rölesi ve astronomik zaman saati yerine güneş konumunu takip eden MPPT ünitesi kullanılacaktır. İnverterde MPPT ünitesi

kullanılmakta olup maksimum güç noktası tespiti ile sistem çalışmasının en yüksek verimde çalışması sağlanacaktır. Yapılacak sistem, web portal yazılımı olan PVGIS ve PC yazılımı olan PVSOL simülasyon programlarında karşılaştırılacaktır. Karşılaştırma sonucu alınan günlük ve aylık bazdaki sonuçlar gerçek üretim değerleri ile karşılaştırılacaktır. Simülasyon programlarının kullandığı verilerde ışıınım oranlarının az tutulduğu düşünülmektedir. Sistemin gerçek verilerinin simülasyon verilerine göre daha üstün olacağı beklenmektedir.

Huang ve arkadaşları, Taipei bölgesine tek eksenli 3 pozisyonlu güneş takip sistemi inşa etmişlerdir. Kurdukları sistemi sabit eksenli solar sistem ile kıyaslamışlar ve çıkan sonuçlar neticesinde sistemin sabit eksenli sisteme göre %37,5 daha fazla elektrik ürettiğini ispatlamışlardır. Kurdukları sistemin çatılarda uygulanabilirliğini ortaya koymuşlardır. Yaptıkları sistemi bina üstü çatılara uygun olarak tasarlamışlardır. Binaya entegrasi yapıldığında sistemin %25-37 arası verim artışına sahip olduğunu ölçmüşlerdir. Ve bu sistemin ekstra bir maliyetinin olmadığını ortaya koymuşlardır. Bina entegrasyonu sırasında sistemin tam olarak güneşe bakmama ihtimaline göre tek eksenli, 3 pozisyonlu güneş takip sistemini kullanarak, fotovoltaik sistemin yanlış hizalanması sonucu ortaya çıkabilecek enerji kayıplarını ölçmüşlerdir. Sistemlerini güney yönünde, güneydoğu yönünde 45° ve güneybatı yönünde 45° olacak şekilde yerleştirmişlerdir. Kurdukları sistem neticesinde güneydoğu yönünde oluşan enerji kaybını %4,42-6,82 arasında, güneybatı yönünde ise % 4,31-6,79 olarak ölçmüşlerdir. Bu kaybın ihmal edilebileceğini vurgulamışlardır. Sabah, öğle ve öğleden sonra yön değiştirecek şekilde bir kontrol mekanizması tasarlamışlar ve sistemi; sabah 10.20 'de yataya, 13.40'ta batıya, 18.30'da doğuya dönecek şekilde sabit açılı olarak teşkil etmişlerdir. Test sonuçlarını sabit eksenli solar sistem ile kıyaslamışlardır. Her iki bağımsız sistemin çıkışına da LED aydınlatma sistemi bağlamışlar ve buna göre ölçümler almışlardır. Tek eksenli 3 pozisyonlu sistemin döndürme işlemini 50 W gücünde bir DC motor ile sağlamışlardır. Sistemin açılı konumunun algılanabilmesi için konum sensörü yerleştirmişlerdir. Sistemin kontrol algoritmalarını ve izleyici hareketlerini mikroişlemci PIC ile sağlamışlardır. Sabit sisteme göre parçalı bulutlu havada %35,8, gökyüzünün açık olduğu durumda ise %35,6 daha fazla elektrik üretmişlerdir. Yaptıkları sistemin çift eksenli güneş takip sistemi performansına yakın olduğunu savunmuşlardır. 01.03.2010-

31.05.2012 tarihleri arasında solar ışı nım de ğerlerine göre ay bazlı sabit solar sistem ile tek eksenli 3 pozisyonlu solar sistemin aylık üretim de ğerlerini kıyaslamışlardır. Tek eksenli, 3 pozisyonlu sistemde ay bazlı %17,2 ile %29,3 verim artışı olduğunu ölçmüşlerdir. Kullanmış oldukları 130 Wp güneş paneli için 12 V 100 Ah batarya ve 25 W LED sistemi ile yanlış konumlandırma sonucu maksimum %8'lik bir verim kaybı olacağını göstermişlerdir [5].

Bu tez çalışmasında ise, İstanbul Büyükşehir Belediyesi sosyal tesisine yapılacak çift eksenli güneş takip sisteminin dikey ve yatay konumlandırması güneş algılama sensörü ile sa ğlanacaktır. Do ğudan batıya do ğru dönen sistem güneşin konumuna göre hareket edeceğinden, güneşten maksimum fayda sa ğlayacaktır. Bu 5,2 kWp'lik çift eksenli solar sistemin yalnızca güney ve yönlerini takip etmeksizin, do ğu ve batı yönleri takibi yapmasından da kaynaklanmaktadır. Kurulumu yapılan sistem ile güneş algılama elemanlı sistemin ve konum sensörlü sisteme göre farkları ve avantajları gözlemlenecektir.

Lee ve arkadaşları, Malezya'da yapmış oldukları çalışma ile sabit eksenli fotovoltaik sistem ile çift eksenli güneş takip eden fotovoltaik sistemi karşılaştırmışlardır. Malezya iklimi altında dış  evre etkenlerine ba ğlı bu sistemlerin, nitelik ve nicelik olarak verilerini karşılaştırmışlardır. Düşük maliyetli, çift eksenli güneş takip sistemi ve sabit fotovoltaik sistem kullanmışlardır. Uygulama yaptıkları güneş paneli 210 W güce ve monokristal hücre yapısına sahiptir. Sabit fotovoltaik sistem ile çift eksenli sistemin verilerinin karşılaştırılabilmesi için, panellerin maksimum güç noktalarını, gerilimlerini, açık devre gerilimlerini, kısa devre akımlarını, maksimum güç gerilim de ğerlerini, maksimum güçteki akım de ğerlerini eşit almışlardır. Çift eksenli güneş izleyici prototipinde, güneşin hareketini algılamak ve buna göre yıl boyunca takip etmek için mikrodenetleyici sistemi ve fotoresist r kullanmışlardır. Güneş izleme mekanizması, güneşin konumunu bulmak için iki çift fotoresist r sensörü üzerine kurulmuştur. İki adet DC motorun görevi fotovoltaik panelleri güneş e do ğru tutma ve döndürme fonksiyonuna sahiptir. Mikrodenetleyici ile kontrolü on beş dakika baz alınarak güneş yolu boyunca düşük bir hız için uygulamışlardır. Çift eksenli güneş izleyici sistemi kuzey-güney yönünde 30 ile -30 derece arasında, do ğu-batı yönünde ise 70 ile -70 derece

arasında dönüş kabiliyetine sahip olacak şekilde tasarlamışlardır. 07.00 ve 19.00 saatleri arasında yapmış oldukları günlük ölçümler neticesinde çift eksenli sistemde sabit fotovoltaik sistem ile kıyaslandığında, güneşli günlerde %82,12 bulutlu günlerde ise %24,91 verim artışının olduğunu ölçmüşlerdir. Metrekare başına düşen enerji üretim değerlerinde ise bulutlu günlerde %10,8 güneşli günlerde %60,3 artış olduğunu ifade etmişlerdir. Yapmış oldukları hesaplamaların neticesinde, sistemlerinin bulutlu günlerde performans/maliyet oranı bakımından çok fazla artış göstermediğini ancak, Malezya gibi fazla güneş potansiyeline sahip bir yerde güneşten elde edilen kazancın büyük ölçüde olacağını belirtmişlerdir. Bu durumun fotovoltaik sisteminin başlangıç masrafını azaltacağından avantajlı olacağını ifade etmişlerdir [6].

Bu tez çalışması ise, Lee ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen sistem ile güneş takibi ve kontrol bakımından benzerlik göstermektedir. Fakat 5,2 kWp'lik güneş takip sisteminde, fotovoltaik panel hücre tipi farklıdır. Bu tezde 5,2 kWp'lik çift eksenli güneş sistem için kullanılacak olan güneş panelleri polikristal hücre tipindedir. 260 W'lık 20 adet güneş paneli kullanılacaktır. Polikristal hücrelerin monokristal hücrelere göre büyük sistemlerde ekonomik açıdan daha uygun olması sistemi avantajlı kılmaktadır. Sistemin kurulum itibarı ile yatay ekseninde 0° - 300° ve irtifa ekseninde ise 20° ile 90° arasında oluşu güneş enerjisinden faydalanma oranını önemli ölçüde arttıracaktır.

Khadidja ve arkadaşları, Cezayir' in Ouargla şehrinde sabit eksenli fotovoltaik sistem ile tek ve çift eksenli güneş takip sisteminin ışınlam ve açığa bağlı değişen üretim değerleri üzerine karşılaştırmalar yapmışlardır. Üretimin iyileştirilmesi için kullanılabilen güneş takip sistemlerinin ışınlam ve açığa bağlı optimizasyonunu tasarlamış ve uygulamışlardır. Ouargla şehrinde yıllık güneşlenme süresini m^2 başına 2900 kWh olarak belirtmişlerdir. Ve ortalama güneş ışığı süresinin 3300 saatten daha fazla olduğunu söylemişlerdir. Ouargla şehrinde ölçülen genel radyasyon değerlerinin, aralık ayında $2,280 \text{ kWh}/m^2$, Temmuz ayında $7,620 \text{ kWh}/m^2$, günlük radyasyon değerlerinin ise Ocak ayında $1,324 \text{ kWh}/m^2$ ve Mayıs ayında $1,984 \text{ kWh}/m^2$ olduğunu belirtmişlerdir. Güneş radyasyonunu doğrudan, dağınık ve yansıyan radyasyon olarak tanımlamışlar ve bu tanımları enlem, yükseklik, eğim ve yatay konumu baz alarak formüle etmişlerdir. Toplam güneş ışınlamı yoğunluğunu doğrudan, dağınık ve yansıyan radyasyonun toplamı şeklinde ifade

etmişlerdir. Solar ışıının açısını ise azimut ve yükseklik açısına göre formülize etmişlerdir. Önerdikleri güneş takip sisteminin, bazı teknik gereksinimlerini belirtmişlerdir. Kurulu sistemin veriminin en üst düzeye çıkabilmesi için; minimum enerji tüketimine sahip olması gerektiği, optimum performans/maliyet oranına sahip olması gerektiğini, farklı çevre koşullarında (rüzgar, toz, yağmur) çalışma güvenilirliğinin olması gerektiğini, takip sisteminin hareketinin basit olması gerektiğini (motor, vites, sensör) ve bir kontrol merkezi ile entegrasyonunun gerekliliğini vurgulamışlardır. Kurmuş oldukları güneş izleyicili fotovoltaik sistemde güneş paneli, DC elektrik motoru, akıllı motor sürücü, PLC hareket ve hız sensörü, kullanmışlardır. Güneş takip sisteminin enini 1075 mm, boyunu ise 418 mm olarak tasarlamışlardır. Kurmuş oldukları sistemler arasında kıyaslamalarda bulunmuşlar ve m^2 başına güç, güç ve verim olarak karşılaştırmışlardır. 24 saatlik dilimde sabit eksenli sistem ile kuzey-güney doğrultuda hareket eden tek eksenli solar sistemin yaklaşık 55 derecedeki verilerine bakıldığında her iki sistemin de m^2 başına düşen güç miktarının en yüksek olduğu anlarda tek eksenli sistemin sabit sisteme göre daha fazla üretim yaptığını görmüşlerdir. 24 saatlik dilimde sabit eksenli ve çift eksenli sistemi karşılaştırdıklarında ise 13.00'da en yüksek değerleri aldıklarını bulmuşlar ancak çift eksenli sistemin daha fazla üretim yaptığını görmüşlerdir. Bütün sistemleri güç üretimi ve verim bakımından kıyasladıklarında çift eksenli sistemin en yüksek, sabit sistemin ise en düşük olduğunu göstermişlerdir. Kuzey-güney yönlü tek eksenli sistemin çift eksenliden az, doğu-batı yönlü tek eksenli sistemden ise daha fazla üretim yaptığını ifade etmişlerdir. Mevcut sistemlerin ve kurulumu yapılacak santrallerin maksimum düzeyde üretim yapabilmesi için birçok koşulun düşünülmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Uygun açı değerleri hesaplanarak gölgelenmenin azaltılabileceğini ve üretim değerlerinin arttırılabileceğini belirtmişlerdir. Açı, ışıının ve sistem farklarının güç üretimi ve maliyet bakımından değişikliklere yol açabileceğini vurgulamışlardır [7].

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilecek olan sistemde PLC yerine mikroişlemci sürücü devresi kullanılacaktır. Sürücü devresi ile sistemin doğu-batı hareketini ve yüksekliğini kontrol eden motorların güneşe göre dönmesi sağlanacaktır. Mikroişlemcinin daha ucuz ve basit yapısı bu sistemi avantajlı kılmaktadır. Ayrıca sistemde rüzgar sensörlerinin bulunması sistemin güvenilirliğini büyük ölçüde arttırmıştır. Sistemin aşırı

rüzgar koşullarında kendini otomatik korumaya alması bunun için ayrıca rüzgar koruma sarkacına sahip olması sistemin sürekliliğini ve güvenilirliğini sağlamaktadır.

Yao ve arkadaşları, sabit fotovoltaik sistem ile çift eksenli güneş takip izleyici sistemini karşılaştırmak için iki farklı strateji geliştirmişler ve bunu sistemlerinde uygulamışlardır. Bu stratejilerini normal izleme sistemi ve günlük olarak ayarlanan izleme sistemi olarak sınıflandırmışlardır. Normal izleme sisteminde önceden belirlenmiş olan izleme hatalarını daha küçük tutmuşlardır. Günlük olarak ayarlanabilen izleme sistemini ise birinci eksen günde bir kez ayarlayarak, ikinci eksen de 15 derece/saat sabit hızda döndürerek ayarlamışlardır. Sabit fotovoltaik sistem ile karşılaştırıldığında, normal izlemeye sahip çift eksenli sistemin ortalama enerji verimliliğinin %23,6 daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Günlük olarak ayarlanan çift eksenli sistemin ise ortalama enerji verimliliğinin sabit sisteme göre %31,8 daha fazla olduğunu ölçmüşlerdir. Normal izleme sisteminde kullanmış oldukları mikroişlemciyi güneşin zamanına ve pozisyonuna göre programlamışlardır. Birincil ve ikincil eksen için olan motorlar bu mikroişlemci tarafından kontrol edilmiştir. Mekanik sistemin hareketini mikro işlemci ve motor kullanarak sağlamışlardır. Gerçek zamanlı olarak izleme doğruluğunu görmek için kişisel bilgisayar ve mikroişlemciyi birbirlerine bağlamışlardır. Normal izleme yönteminde 0,15 derecenin altında bir hata ile iyi bir izleme performansı elde edildiğini ifade etmişlerdir. Günlük ayarlama yönteminin ise basit izleme amacı için kullanıldığını belirtmişlerdir. Günlük olarak ayarlanan izleme sisteminde birincil eksen güneş konumu ve zamanına göre 1 gün önceki veri baz alınarak ayarlanmış, ikinci eksen 15 derecelik bir alanda 2 dakikalık periyotlar ile döndürülmüştür. Her adım için saatte 0,5 derece planlanmıştır. Bunu yaparken ARM temelli mikroişlemci, gerçek zaman saati, analog ve dijital sinyaller, sürücü modülü ve güneş konum tespiti için sensör kullanmışlardır. Normal izleme sistemine sahip fotovoltaik sistemi, sabit fotovoltaik modül ile karşılaştırmak için 2 farklı gün ölçüm almışlardır. 21 Temmuz'da almış oldukları veri neticesinde, çift eksenli sistemin sabit fotovoltaik sisteme göre veriminin %22,5 daha fazla olduğunu görmüşlerdir. 15 Eylül'de almış oldukları veride ise çift eksenli sistemin sabit eksenli sisteme göre veriminin %24,7 daha fazla olduğunu ölçmüşlerdir. Ortalama olarak çift eksenli normal izleyici sisteminin sabit fotovoltaik sisteme göre %23,6 daha fazla verimde çalıştığını göstermişlerdir. Günlük olarak ayarlanan izleme sistemine sahip çift

eksenli sistemi, sabit fotovoltaik modül ile karşılaştırmak için normal izleme sisteminde yaptıkları gibi 2 farklı gün için veri almışlardır. 17 Temmuz da almış oldukları veri neticesinde, çift eksenli sistemin sabit fotovoltaik sisteme göre veriminin %34,9 daha fazla olduğunu görmüşlerdir. 12 Eylül’ de almış oldukları veride ise çift eksenli sistemin sabit eksenli sisteme göre veriminin %28,6 daha fazla olduğunu ölçmüşlerdir. Ortalama olarak çift eksenli günlük olarak ayarlanan sistemin sabit fotovoltaik modüle göre veriminin %31,8’ daha fazla olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Günlük olarak ayarlanabilen çift eksenli sistemin, normal izlemeye sahip çift eksenli sisteme göre veriminin daha yüksek olmasının sebeplerinden birini de günlük olarak ayarlanan sistemin enerji tüketiminin daha az olmasına bağlamışlardır. Sensör ve zaman odaklı güneş izleme sistemlerinin performans maliyet dengesinin sağlanması ile uygulanabilir olacağını ve bu sistemlerin gelişimi ile güneş enerji kulelerinin gelişeceğini belirtmişlerdir [8].

Bu tez çalışmasında ise İBB sosyal tesisine yapılacak olan çift eksenli güneş takip projesinde konum ve zaman bazlı olmaksızın doğrudan güneşi takip eden merkezi kontrol ve güneş algılama ünitesi kullanılacaktır. Bu nedenle verimin zaman ve konum odaklı sensöre göre daha fazla olacağı düşünülmektedir. Sistem izlemesi inverter web yazılımı ve AC panolara bağlanacak olan analizör vasıtasıyla yapılacaktır. İnverterlerin RS232, RS485 portuna ve modbus protokollerine sahip oluşu sistemin izlenmesini hızlı hale getirecektir. Böylece sistem günlük, haftalık, aylık ve yıllık olarak düzenli olarak izlenebilecektir.

Lazoraiu ve arkadaşları, STC (Standart Test Koşulları) Standartlarında 142,4 Wp değerine sahip düşük güçlü sabit fotovoltaik sistem ile 142,4 Wp’lik düşük güçlü, tek eksenli güneş izleyicili fotovoltaik sistemi karşılaştırmışlardır. Kurdukları takip sistemi ile günlük enerji artışını ispatlamaya çalışmışlardır. Ayrıca solar tracker sistemin enerji tüketim durumunu analiz etmişlerdir. Enerji tasarrufunu sağlayabilmek için sistemlerinde MPPT kullanmışlardır. Güneş takipli sistemde gündüz ve akşam saatlerinde önemli ölçüde verim artışı olduğunu ispatlamışlardır. Sabit fotovoltaik sistemi fotovoltaik modül, MPPT’li şarj kontrolörü ve 12 V 40 Ah değerlerine sahip batarya ile tasarlamışlardır. Güneş takip sistemi ise solar sensör, fotovoltaik modül, PLC, MPPT’li şarj kontrolörü ve 12 V 40 Ah değerlerine sahip batarya ile

tasarlamışlardır. Sabit fotovoltaik sistemi 30° eğimli yerleştirmişlerdir. Yaptıkları takip sisteminin ise dönüş açısı değerlerini 0° ile 120° arasında ayarlamışlardır. 2 adet fotosensör kullanmışlar ve sistemin dönüş hızını her 0,5 saniyede 12° olacak şekilde tasarlamışlardır. İnşa ettikleri bu sistem ile dereceye bağlı değişen akım değerlerine ulaşmışlardır. Sonuçları 1 ay süre ile almışlardır. Bu 1 ay içerisinde gökyüzünün açık olduğu gün sayısı 15, parçalı bulutlu olduğu gün sayısı 9, bulutlu olduğu gün sayısı ise 6 gün olarak saptanmıştır. Bu günler içerisinde gökyüzünün açık olduğu günlerde en yüksek elektrik üretimi artışı olduğunu ve bu oranın %15 ile %20 arasında olduğunu ispatlamışlardır. Sistemin genel olarak ise %12 ile %20 arası bir verim artışı olduğunu göstermişlerdir. Enerji üretiminin yanında enerji tüketim değerini de hesap ederek, net enerji miktarına ulaşmışlardır. Gökyüzünün açık olduğu günlerde 1000W/m² ışınım değeri altında güneş takip sisteminin 929 W, sabit sistemin ise 754 W güç ürettiğini görmüşlerdir. Gökyüzünün parçalı bulutlu olduğu günlerde ise güneş takip sisteminin 1000 W/m² ışınım değeri altında 690 W, sabit fotovoltaik sistemin ise 594 W güç ürettiğini saptamışlardır. Bulutlu günlerde ise 1000 W/m² ışınım değeri altında güneş takip sisteminin 594 W, sabit sistemin ise 515 W değer verdiğini ölçmüşlerdir. Güneş takip sisteminin dönüş sırasında harcadığı enerjiyi yaklaşık 50 W olarak hesaplamışlar ve net enerji hesabında bu değeri üretilen enerjiden çıkarmışlardır [9].

Bu tez çalışmasında yapılacak olan çift eksenli güneş takip sistemi projesinde enerji kaybını en aza indirmek için güneş algılama sensör ünitesi kullanılacaktır. Sürücü kontrolü mikroişlemci ile sağlanacaktır. Yapılan bu sensör sistemi ile güneşten faydalanma değeri fotosensörün yaptığı etkiye nazaran daha fazla olacaktır. Lazoraui ve arkadaşlarının yapmış olduğu tek eksenli sistemin dönüş açısının 120° gibi bir açıyla kısıtlı oluşu, güneşten daha az faydalanılmasına sebebiyet vermiştir. Ancak, çift eksenli sistemde dikey ve yatay yönde hareketten ötürü daha fazla güneş ışınımından faydalanılacaktır. Bu nedenle daha fazla elektrik üretimi olacaktır. Yapmış oldukları sistemde dönüş hızı 0,5 saniyede 12° olarak ayarlanmıştır. Bu hızın güneşin konumu için çok fazla olduğu düşünülmektedir. Bu çalışmada ise çift eksenli güneş takip sisteminin döndürme açısı dakikada 30°, yükselme açısı ise dakikada 13° olacaktır.

Şaban ve arkadaşları, solar radyasyonun ve açı etkisinin fotovoltaik sistemler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. 4,6 kWp gücünde çift eksenli güneş takip sistemi ile 4,6 kWp gücünde sabit sistem ile kıyaslamalarda bulunmuşlardır. Tek eksenli, güneş takip sistem ile %36 verim artışının olduğuna, çift eksenli güneş takip sistemi ile ise verim artışının %41 olduğuna dayanarak, mikrokontrolör vasıtasıyla uygun pozisyonlarda yapılan yerleşim ile üretilen elektrik miktarının artacağını savunmuşlardır. Çift eksenli takip sisteminin 2 motora sahip olmasından dolayı maliyetinin arttırmasına rağmen, akşam ve sabah saatlerinde tek eksenli takip sistemine göre daha fazla enerji ürettiğini belirtmişlerdir. Takip sistemlerinin açık ve kapalı çevrimlerinin olduğu, hızlı hava değişimlerinde kapalı çevrim sistemin daha fazla enerji tüketmesinden dolayı açık çevrim sistemin sezonsal hava koşulları ve güneş pozisyonu ile daha inilti olduğu bahsetmişlerdir. Yaptıkları çalışma ile zenit, azimut ve saatlik açı değerlerini ölçmüşlerdir. Farklı saatler için azimut değerlerini hesaplamışlardır. LDR (Light dependent resistör) sensörleri kullanarak, basit bir izleme sistemi kurmuşlar ve optimum açı değerlerini kaydetmişlerdir. Bu fotosensörleri güneş konumunu ayırt edebilmek ve orantısal denetleyiciye sinyal gönderebilmesi için tasarlamışlardır. Çift eksenli güneş takip sisteminin, dönüş yeteneği dikeyde 0° ile 90° , yatayda ise 0° ile 180° arasında olacak şekilde tasarlamışlardır. Sistemdeki sensörlerin referans gerilim değerini 9 V olarak ayarlamışlardır. Sistem, güneşe göre konumunu bu iki ayrı sensörün gerilim değerine göre ayarlamıştır. Ayarlanan bu açı değerleri ile ölçüm alındığında çift eksenli takip sisteminin saatte 55,91 W, sabit sistemin ise 41,71 W tüketim yaptığını ölçmüşlerdir. Ancak üretilen elektrik değerinin %30 ile %50 arası artışta olduğunu ifade etmişlerdir. Ölçüm alınan günlerin bulutlu olmasından dolayı sistemlerinin veriminin ancak %34,02 olduğunu göstermişlerdir. Sabit sistemde operasyon süresini 4113 saat tutmuşlar ve bunun neticesinde 7233 kWh enerji üretimi sağlamışlardır. Çift eksenli güneş takip sistemi ile 4211 saat ölçüm aldıklarında üretimin 10096 kWh olduğunu görmüşler ve söz konusu sistemin sabit sisteme göre daha verimli olduğunu ortaya koymuşlardır [10].

Bu tez çalışmasında sosyal tesise yapılacak olan pilot projede, yatay eksenin 0° - 300° arasında değişime sahip olmasından ötürü daha yüksek dereceli konumlarda da kurulumunun yapılabilmesi sistemin kullanılabilirliği konusunda önemli bir avantaj

sağlamaktadır. Güneş takibi LDR sensör yerine güneş ışığından daha fazla faydalanmayı sağlayacak MLD (Maksimum Light Detection) sensör ile sağlanacaktır. Şaban ve arkadaşlarının sistemlerini gerilim değişimine göre baz almalarından ötürü herhangi bir gerilim hatasında, sistemin güneş takip izleyicisinde sıkıntı oluşacak, buna bağlı olarak üretilen enerji miktarı azalma gösterecektir. Test kapsamında yapılacak olan pilot projede mikroişlemci ve kumanda paneli ile herhangi bir hatanın oluşması engellenmiş olup, üretimin maksimum seviyede yapılması sağlanmış olacaktır. Ayrıca yaptıkları sistemin MPPT kontrol devresi içermediği görülmüş olup, yeterince enerji üretiminin yapılamadığı düşünülmektedir. Tez çalışması dahilinde gerek inverterlerin MPPT özellikli olması gerekse güneş algılama sensörlerinin bir merkezi kontrol ünitesi ile takip edilecek olması sistemi avantajlı kılmaktadır.

Vokas ve arkadaşları, Yunanistan'ın tüm vilayetlerinde gerçek enerji üretimini ortaya çıkarabilmek için orta ölçekli tek eksenli ve çift eksenli fotovoltaik enerji sisteminin güç üretim ve çıkış verim değerlerini karşılaştırmışlardır. Daha önce yapmış oldukları sabit fotovoltaik sistemler ile ilgili çalışmalarda, gerçek ve tahmin edilen enerji üretimi arasında belirgin bir fark olduğunu görmüşlerdir. Gerçek ölçümler Yunanistan'ın dört bir yanında 40'dan fazla tek eksenli ve 80'den fazla çift eksenli fotovoltaik sistemden toplanmış olup bu ölçümler yapmış oldukları simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları ile gerçek ölçümler arasında belirgin bir farklılık olduğunu göstermişlerdir. Bu çalışmayı yapmak için 4 ayrı metot uygulamışlardır. Bu metotları; tek eksenli ve çift eksenli sistemin üretim değerlerinin simülasyonda teorik olarak karşılaştırılması, tek eksenli ve çift eksenli sistemin gerçek ölçüm sonucu ortaya çıkan verilerin karşılaştırılması, bunlara ek olarak; tek eksenli sistemin simülasyon değerlerinin yine tek eksenli sistemin gerçek ölçüm değerleriyle ve çift eksenli sistemin simülasyon değerleri ile çift eksenli sistemin gerçek ölçüm değerlerini kıyaslayarak gerçekleştirmişlerdir. Bunları yaparken, 13 bölgeden ölçtükleri 42 adet tek eksenli fotovoltaik sistem ile 21 ilden veri aldıkları 82 adet çift eksenli fotovoltaik sistemi kullanmışlardır. Tek eksenli fotovoltaik sistem ile çift eksenli fotovoltaik sistemin simüle edilmesi sonucunda kWh/kWp/yıl değerlerinde çift eksenli sistemin ortalama %1,95 daha fazla üretim yaptığını görmüşlerdir. Tek eksenli fotovoltaik sistem ile çift eksenli sistemin gerçek ölçüm değerlerinde ise çift eksenli sistemin ortalama %8,47 daha fazla

Üretim yaptığını görmüşlerdir. Tek eksenli sistemin simülasyon ve gerçek ölçüm değerleri arasında yaptıkları ölçümlerde, gerçek değerlerin ortalama %21,69 daha fazla olduğunu llerdir. Ayrıca ift eksenli sistemin simülasyon ve gerçek ölçüm değerleri arasındaki farkın gerçek ölçüm lehine %29,48 olduğunu hesaplamışlardır. Bunların yanı sıra sabit eksenli fotovoltatik sistemin gerçek üretim değerlerini tek eksenli ve çift eksenli fotovoltatik sistemin gerçek üretim değerleriyle kıyaslamışlardır. Tek eksenli sistemin gerçek verilerde %25,2 daha fazla üretim yaptığını, çift eksenli sistemin ise %34,5 daha fazla üretim yaptığını hesaplamışlardır. Bu alıma ile mevcut simülasyon yazılım paketleri tarafından sağlanan teorik sonuçlar ile gerçek (llen) operasyonel veriler arasında büyük bir ayırım olduğuna dikkat çekmişlerdir. Bu karılatırmanın yatırımcılar, bankalar ve benzer araştırmalar yapan tüm mühendisler ile bilim adamları tarafından dikkate alınması gereken bir gerçek olduğunu vurgulamışlardır [11].

Bu tez çalışmasında yapacağımız çift eksenli fotovoltatik sistem, PC program yazılımı (PVSOL vs.) ve web yazılımı (PVGIS) ile ayrı ayrı simüle edilecektir. Web portal vasıtasıyla SCADA sisteminden gerçek sistem verilerinin anlık takibi yapılacak ve simülasyon verileri ile kıyaslanacaktır. Çeşitli panel markaları ve tipleri ile farklı yapıdaki inverterler seçilerek değişik konfigürasyonlar oluşturulacak ve analiz edilecektir. G ve verim odaklı karılatırmaların yanı sıra, sistem geri dönüşüm süreleri, maliyet, enerji tasarrufu ve çevresel etki gibi çıktılar da gösterilecektir.

Fathabadi, MPPT nitesi kullanarak, sensörsüz çift eksenli güneş takip sistemi tasarlamıştır. Kullanmış olduğu MPPT denetleyicisi ile fotovoltatik modülün maksimum çıkış gücünü sürekli olarak hesaplamış ve azami çıkış gücünün en yüksek değerini aldığı güneş yönünü bulmak için yükseklik ve azimut aı sapmalarını kullanmıştır. Bu nermi olduğu sistem ile hesap etmiş olduğu 0,11 derecelik izleme hatasının, sensörlü ve sensörsüz diğer sistemlere nazaran daha az olduğunu söylemiştir. MPPT sayesinde mevsimlere bağlı olarak güneş enerjisinde %28,8-%43,6 arasında bir artış olduğunu ifade etmiştir. Fathabadi, ift eksenli güneş izleyicisi olan sistemde step motor, motor sürücüsü, DC dönüştürücü, MPPT kontrolör ve fotovoltatik modül kullanmıştır. Adım açısı 1,8° ve sarım oranı ($N1/N2$) 1/15 olan iki adet özdeş step motoru kullanmıştır. Biri

yükseklik açısını ayarlamak için, diğeri de azimut açısını ayarlamak için kullanılmıştır. Her sürücü, ilgili step motora uygun kontrol sinyalleri ve besleme gerilimi sağlamıştır. Böylece kademeli motor, MPPT kontrol cihazı tarafından istenen adım sayısına göre döndürülmüştür. Teorik sonuçları deneysel olarak doğrulamak ve önerilen takip sistemin performansını değerlendirmek için oluşturulan fotovoltaik sistemde, MPPT için mikrodenetleyici kullanılmıştır. Sistemi, oluşturmuş olduğu güneş takip akış şemasına göre analog ve dijital sinyaller aracılığıyla kontrol etmiştir. MPPT fotovoltaik akımının ve geriliminin hesabı ile maksimum çıkış gücünü elde ederek, 9 noktaya göre yükseklik ve azimut açılarının değiştirildiğini ifade etmiştir. Kademeli motorda vermiş olduğu 1,8°'lik dönüş fotovoltaik modülün 174 ms de, 0,12° dönmesini sağlamıştır. Bu sırada MPPT döngüsü ortalama 400 ms'de tamamlanmıştır. 19 Ocak 2014 ve 19 Ağustos 2015 aralığında alınan ölçümler ile sabit eksenli fotovoltaik sistem ile sensörlü ve sensörsüz takip sistemlerinin karşılaştırma tablosunu oluşturmuştur. Kendi yaptığı sistemin diğer sensörsüz ve sensörlü sistemlere göre daha fazla enerji ürettiğini hesaplamıştır. Oluşturduğu sistemin bahar aylarında sabit eksenli sisteme göre %33,6, yaz aylarında %43,6, sonbahar aylarında %38,3, kış aylarında ise %28,8 daha fazla üretim yaptığını gözlemlemiş, yıllık ortalama üretilen enerji değerinin %37,1 daha fazla olduğunu belirtmiştir [12].

Bu tez çalışmasında ise, İstanbul ili sınırları içerisinde bulunan İBB (İstanbul Büyükşehir Belediyesi) sosyal tesisine kurulacak olan çift eksenli güneş takip sistemi sensörlü olacaktır. Sensörlü sistem konum ve zaman odaklı olmaksızın, doğrudan güneşi algılayan sensörler ile inşa edilecektir. 5,2 kWp'lik hareketli sistem 300° dönme açısına sahip olacaktır ve döndürme hızı dakikada 30° olacaktır. Yükselme açısı 20° ile 90° arasında olacaktır. Yükselme hızı ise dakikada 13° olacak şekilde tasarlanacaktır. Güneş algılayıcı sensörlere bağlı güneş takibinin bu açı değerleri ile konum ve zaman odaklı sistemlere göre daha fazla üretim yapması beklenmektedir.

Sidek ve arkadaşları, sabit eğimli fotovoltaik güneş enerji sistemlerini açık çevrime sahip çift eksenli güneş takip sistemi ile karşılaştırmışlardır. GPS (Global Positioning System) içeren mikroişlemci sistemine güneş takip denklem ve algoritmalarını yükleyerek çift eksenli sistemin güneş yörüngesini takip etmesini sağlamışlardır. Güneş

izleyicisinin kendisini güneş yolu yörünge algoritmasına bağlı olarak $\pm 0,5^\circ$ hassasiyetle konumlandırabildiğini görmüşlerdir. Önerilen çift eksenli güneş takip cihazının sabit eğimli fotovoltaik sistemlere kıyasla %12,8 ile %26,9 arası daha yüksek bir güç ürettiğini hesaplamışlardır. Bu çalışmada önerilen çift eksenli güneş takip sistemi; elektronik kontrol sistemi, master/slave mikrodenetleyiciler, GPS/pusula/RTC (Real Time Clock) modülleri, yükseklik/azimut konumlandırma sensörleri, aktüatör sürücülerinden oluşan mekanik yapı, PV panel ve yükseklik/azimut ayarlayan aktüatörlerden oluşmuştur. Çift eksenli sistemin mekanik alt yapısını ise doğu-batı ve yükseklik yönünde hareket etmesini sağlayan 2 adet DC Motor kullanarak tasarlamışlardır. Gömülü GPS modülü aracılığıyla belirlenmiş konum için tarih, saat, boylam ve enlem gibi önemli bilgiler edinmiş ve tüm yıl boyunca güneşin konum verileri tablo haline getirilmiştir. Gömülü pusula sensörünü kullanarak izleme sisteminin yönünü, kuzeye göre azimut yönlendirme referansı olarak hizalandırmışlardır. İzleme sistemi ile tablolanmış veri tabanından gelen bilgilere dayanarak otomatik olarak fotovoltaik modül güneşe doğru hizalanmıştır. Günün sonunda fotovoltaik modül başlangıç konumuna geri döndürülmüş ve geceleri elektronik sistemi, güç tüketimini azaltmak için uyku moduna almışlardır. Çift eksenli sistem ile karşılaştırma amacıyla Malezya Serdang'ta kurulan sabit eğimli fotovoltaik güneş panellerini 3° kuzey, $101,72^\circ$ doğuya göre hizalandırmışlardır. Her iki sistemde de monokristal güneş paneli kullanmışlardır. Her iki fotovoltaik modülü, çevredeki binalardan ve ağaçlardan kaynaklanan gölgelerin önüne geçmek için açık bir alana yerleştirmişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde güneş izleyicisinin kendisini otomatik olarak güneş yolu yörünge algoritmasına göre $\pm 0,5^\circ$ hassasiyetle konumlandırabildiğini görmüşlerdir. $1''$ lik harekette yükseklik izleme için tüketilen enerjilerin yukarı ve aşağı doğru harekette sırasıyla 0,5 mWh ve 0,2 mWh olduğunu saptamışlardır. Azimut izleme için güç tüketiminin hem saat yönünde hem de saat yönünün tersinde 0,23 mWh olduğunu ölçmüşlerdir. Kontrolör için tüketilen enerjilerin gün içinde 14.4 Wh olduğunu görmüşlerdir. Güneşli günlerde güneş takip cihazının enerji kazancının sabit eğimli fotovoltaik sisteme göre %26,9 daha fazla olduğunu görmüşler ve parçalı bulutlu günlerde bu değerin %25,6 olduğunu, bulutlu günlerde ise %12,8 daha fazla üretim yapıldığını ölçmüşlerdir [13].

Bu tez çalışmasında ise, İstanbul Büyükşehir Belediyesi sosyal tesisine yapılacak çift eksenli güneş takip sistemi tasarlanacaktır. Yapılacak olan sistem İstanbul ili sınırlarında güneş potansiyelinin ve çift eksenli sistemin sabit eksenli sisteme göre enerji üretim durumunun saptanması adına önem arz etmektedir. Kurulumu gerçekleştirilecek sistem 20 adet 260 W'lık polikristal güneş panelinden oluşacaktır. Takip sistemlerinin ilk kurulum maliyeti düşünüldüğünde polikristal güneş panellerinin yüksek güçlerde ekonomik açıdan uygun olması sistemi kullanılabilir hale getirmektedir. Sistemde GPS modülü yerine güneş algılayıcı sensörler kullanılacak olup, enerji kaybının en aza indirilmesi hedeflenmektedir. Sistem geceleri başlangıç konumuna geri döndürülüp uyku moduna alınacaktır. Sistem üretim değerleri Web portalı ve inverter çıkışından ölçülebilecektir. Ölçülen değerler aynı güçteki çift eksenli, tek eksenli ve sabit eksenli güneş enerji sistemleri ile simülasyon vasıtasıyla karşılaştırılacaktır. Farklı konfigürasyonlar için sonuçlar analiz edilecektir.

1.2 Tezin Amacı

Fotovoltaik panellerin sabit yerleştirildiği uygulamalarda panellerden elde edilen enerji miktarı, güneşin ilk ve son saatlerinde düşük olmaktadır. Bu olumsuzluğun önüne geçebilmek için tek eksenli, çift eksenli, güneş odaklamalı sistemler gibi güneşi izleyebilen sistemler son yıllarda popüler çalışma alanları haline gelmiştir.

Bu gelişmelere bağlı olarak bu çalışmada, gün içerisinde güneş enerjisinden en fazla şekilde yararlanabilmek amacıyla simülasyonu ve tasarımı gerçekleştirilen güneşi izleyebilen çift eksenli fotovoltaik sistem açıklanmıştır.

Farklı simülasyon programlar kullanılarak bu programlar arasındaki farkın görülmesi ve bu farklı simülasyon programlarından alınan sonuçların uygulama sonuçları ile karşılaştırılması amacı güdülmüştür.

Bu çalışmada, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Küçükçekmece Sosyal Tesis'i'nde çift eksenli güneş takip sisteminin tesisin elektrik enerji ihtiyacının bir kısmını karşılaması için yüksek verimde bir çözüm ortaya konulmuştur.

İstanbul şartlarında güneş ışıınım değeri için en uygun yönün güney olduğu göz önüne alınırsa 5,2 kWp'lik güneş takip sisteminin yalnızca güney yönü dışında da doğu-batı

yönlerini takip edebilme yeteneği sayesinde güneş ışınlarından maksimum düzeyde faydalanma amaçlanmıştır.

Bu çalışma, yenilenebilir enerjiye yönelik bilinçlenmenin artırılması ve güneş enerji teknolojilerinden olan çift eksenli fotovoltaiik sistemin avantajlarını ortaya çıkarmak amacıyla yapılmıştır.

1.3 Orijinal katkı

Bu tez çalışmasında çift eksenli güneş takip sistemi kullanılarak güneş enerji sisteminin verimini arttırmak için bir çözüm ortaya koyulmuştur. Halka açık bir tesisin elektrik enerji ihtiyacının bir kısmının karşılanması için konum bilgisi, yükseklik ve azimut açıları, topografik bilgiler ve tesise ait elektrik tüketim değerleri incelenmiş, optimum performans-maliyet gözetilerek 5,2 kWp güçteki sistemin simülasyonu ve tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Güneş algılayıcı sensör ile gelen ışığın yoğunluğunun ve açısının sürekli ölçülerek çift eksenli sistemin güneş ışınlarından maksimum fayda sağlaması hedeflenmiştir. Güneş ışığını takip eden çift eksenli sistemin konum bilgisine bağlı olarak irtifa ekseninde (20° - 90°), azimut ekseninde ise (0° - 300°) hareketi ile maksimum düzeyde ışınlm soğurması sağlanmıştır.

Sistem tasarlanırken farklı programlar kullanılarak meteorolojik ve topografik veriler ile simülasyon çalışması yapılmıştır. Daha sonra uygun sistem bileşenleri; bileşenler arası uyum, enerji üretimi, spesifik güç yoğunluğu gibi kriterler gözetilerek meteorolojik, topografik, elektriksel koşullar arasından optimum seçim uygulanmıştır. Simülasyonlar, sabit eksenli güneş enerji sistemi ile çift eksenli güneş takip sistemi arasındaki farkların analiz edilebilmesi açısından aynı veriler ve koşullar kullanılarak sabit eksen tip için de gerçekleştirilmiş ve özellikle çift eksenli sistemin bölgesel karakteristiklerden daha az etkilendiği ve ışınlm kazanç oranları baz alındığında eğim ve güneş ışığına yönelimin modül üzerine düşen ışınlm miktarını olumlu yönde etkilediği ortaya çıkmıştır.

Bu simülasyonlardan alınan sonuçlar değerlendirilerek projesi ve uygulaması gerçekleştirilen sistemin simülasyon sonuçlarını destekler yönde yüksek verimde üretim yaptığı gözlemlenmiştir.

Uygulama gerçekleştirilirken anlık üretim değerlerinin okunabileceği ve SCADA sisteminden Web portala aktarılan verilerin görselleştirildiği bir bilgi ekranı yerleştirilerek tesis ziyaretçilerinin bilgilendirilmesi gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca tez çalışmasında üretilen enerji miktarı göz önüne alınarak çift eksenli 5,2 kWp’lik güneş takip sistemi sayesinde engellenen CO₂ emisyonunun ve buna karşılık gelen ağaç adedinin hesabı gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın sonunda projesi ve uygulaması gerçekleştirilen sisteme ait toplam maliyet ve geri dönüş süresi; modül yaşlanması da göz önünde bulundurularak simülasyon ve uygulama verilerinin uyumu gözetilerek hesaplanmıştır.



BÖLÜM 2

YENİLENEBİLİR ENERJİ

Yenilenebilir enerji; adından da anlaşılabilir olduğu gibi, kendini tekrar eden, yenilenen bir enerji kavramıdır. Dünya, güneş ve atmosferik olaylar var oldukça bitmeyecek enerji anlamına gelmektedir. Yenilenebilir enerji kavramı, tüketim karşısında kaynakta önemli bir azalış göstermeyen kaynak türleri için kullanılmaktadır. Örneğin güneşten elde edeceğimiz enerji, toplam güneş enerjisi bazında çok küçük kalacaktır. Doğada yok olmayacağı düşünülen kaynaklar için kullanılan yenilenebilir kavramı yerine yinelenenebilir kavramını da kullanılabilmektedir.

2.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji; güneş, rüzgar, biyokütle, jeotermal, dalga enerjisi gibi kaynaklardan elde edilmektedir. Bu kaynaklar, fosil enerji kaynaklarına alternatif olarak tükenmeyen enerji kaynakları olarak doğada bulunmaktadır. Çeşitli uygulama alanları bulunmaktadır. Güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, gel-git (dalga) enerjisi, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji, hidroelektrik enerji ve hidrojen enerjisi türlerine sahiptir [14].

2.1.1 Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, kaynağı Güneş'teki füzyon tepkimelerinden oluşan tükenmez ve temiz bir enerji türüdür. Güneş kütlelerinin saniyede 5 milyon tonluk kısmı gün ışınlamına dönüşmektedir. Dünyaya güneş enerjisinden 10^{10} MW'lık enerji, ışık kaynağı olarak ulaşmaktadır. Güneş enerjisi güneşten doğrudan ya da dolaylı olarak dönüştürülebilen enerji olarak tanımlanabilir. Güneş enerjisinden güneş kolektörü ve toplayıcılar ile ısı

ve elektrik üretimi sağlanabilirken, fotovoltaik piller sayesinde de elektrik üretmek mümkündür.

2.1.2 Rüzgar Enerjisi

Konum olarak rüzgar açısından uygun yerlere kurulan rüzgar türbinleri; havanın kinetik enerjisini elektrik enerjisine çevirerek rüzgar enerjisi açığa çıkarmaktadır. Rüzgar enerjisi elektrik üretiminin yanı sıra aynı zamanda sondaj ve tarımsal sulama gibi küçük ölçekli uygulamalar için de kullanılmaktadır.

2.1.3 Biyokütle Enerjisi

Canlı organizmaların kökeni olan biyokütle, genelde güneş enerjisini fotosentez yardımıyla depolayan bitki organizmaları olarak adlandırılır. Biyokütle, çeşitli türlerden oluşan bir topluma ait yaşayan organizmaların belirli bir zamanda sahip olduğu toplam kütle olarak tanımlanmaktadır. Bitkiler aracılığıyla gerçekleştirilen fotosentez ile enerji kaynağı olarak kullanılan organik maddeler sentezlenirken tüm canlıların solunumu için gerekli olan oksijen atmosfere verilir. Üretilen organik maddelerin yakılması sonucu ortaya çıkan CO₂, organik maddelerin oluşması sırasında atmosferden alındığı için biyokütleden enerji elde edilmesi sırasında çevre, CO₂ ve O₂ açısından dengelenmiş olur. Bu bağlamda bitkiler, yalnızca besin kaynağı olarak kullanılmakla kalmayıp aynı zamanda çevre dengesini sağlayarak tükenmez enerji kaynağı konumundadırlar.

2.1.4 Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, yerkabuğunun derinliklerinde birikmiş ısının oluşturduğu sıcak su ve buhar kaynaklarından oluşmaktadır. Sıcaklıkları bulundukları ortam sıcaklığının üzerindedir. Çevresindeki yeraltı ve yerüstü su kaynaklarına göre daha fazla erimiş mineral ve gaz içermektedir. Ayrıca herhangi bir akışkan içermemesine rağmen teknik yöntemler ile ısısından yararlanılan, yerin derinliklerindeki "Sıcak Kuru Kayalar" da jeotermal enerji kaynağı olarak bilinmektedir [15].

2.1.5 Hidroelektrik Enerjisi

Hidroelektrik santraller akan suyun potansiyelini elektriğe dönüştürmektedir. Akan su içindeki enerji miktarı ve suyun akış hızı ile suyun potansiyel enerjisi belirlenir. Nehirde akan su, büyük miktarda kinetik enerji taşımaktadır. Suyun yüksek bir noktadan düşürüldüğünde ise yüksek miktarda potansiyel enerji elde edilmektedir. Kanal ya da borular ile alınan su, türbinlere doğru akar ve elektrik üretimi için türbinlerin dönmesi sağlanır. Türbinler jeneratörlere bağlı olmakla birlikte mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedirler.

2.1.6 Hidrojen Enerjisi

Doğada ve atmosferde bileşikler halinde bulunan hidrojen serbest halde bulunmadığından doğal bir enerji kaynağı olmaktan çıkmaktadır. Bununla birlikte hidrojen birincil enerji kaynakları ile çeşitli maddelerden üretilebilmektedir. Hidrojen üretiminde çeşitli dönüştürme işlemleri kullanılmaktadır. Hidrojenin ısınma ve elektrik üretimi gibi birçok kullanım alanı bulunmaktadır. Gaz ve sıvı halde bulunan hidrojen, taşınabilmekte ayrıca depolanabilmektedir.

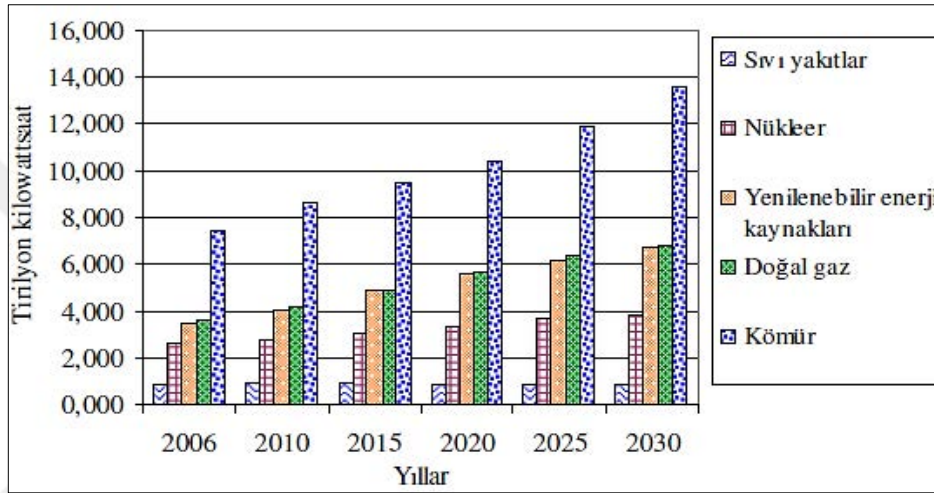
2.1.7 Gel-git Dalga Enerjisi

Gel-git enerjisinde, gel-git olayı için üretilmiş olan özel türbinler kullanılmaktadır. Bu özel türbinler, iki yönlü olarak hareket edebilmektedirler. Gel-git olayı ile deniz yükselmekte ve alçalmaktadır. Bu iki deniz seviyesi farkından yararlanılarak, türbinler çalışmakta ve elektrik üretilmektedir. Gel-git enerjisi için özel türbinlerin yanında, gel-git barajının kurulumunun da yapılması gerekmektedir.

2.2 Dünyada Yenilenebilir Enerji Kaynakları Durumu

Dünyanın üzerinde hızla gelişmekte olan yenilenebilir enerji kaynaklarının tüketimindeki artışın yıllık %3 oranında olması beklenmektedir. Dünya üzerinde gerek petrol fiyatlarındaki dalgalanmalar gerekse fosil yakıtların çevreye olan negatif etkisi, dünyanın yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimini arttırmıştır. Hükümetler ve özel şirketler bu konu üzerine fonlar kurmaya başlamışlardır. Hükümetler yenilenebilir enerji yatırımcılarına bu kaynaklara yönelim için teşvikler sunmaktadırlar. Fosil yakıtlar

içerisinde bulunan kömür ve doğalgaz elektrik üretiminde en fazla paya sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynakları ise, fosil yakıtları bir kenara iterek elektrik üretiminde giderek daha fazla pay almaya çalışmaktadır. Bu alanda, yapılan istatistikler ile 2006-2030 yılları arasında yıllık ortalama %2,9'luk bir büyüme artışının olması beklenmektedir. Büyüme en fazla hidroelektrik enerji ve rüzgar enerjisinde olmaktadır. Bu dönem içerisinde, yenilenebilir enerji üretim teknolojilerinin fiyat olarak fosil yakıtlarla rekabet edemeyecek olmasından ötürü, yapılacak yatırımlarda hükümet politikalarının ve teşviklerin büyük rol oynayacağı belirtilmektedir [16].



Şekil 2.1 2006-2030 yılları arası dünya üzerindeki enerji durumu

2.3 Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları Durumu

Türkiye’de 2017 şubat sonu itibariyle 78529 MW kurulu güçte elektrik üretim santrali olup, bu santrallerin %44’lik kısmına tekabül eden 34702 MW kurulu güçte yenilenebilir enerji santralleri bulunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en fazla payı %77’lik oran ile hidroelektrik santraller sahiplenmektedir. Bu kaynakların geri kalan %17’sini rüzgar, %3’ünü jeotermal, %2’sini ise güneş enerjisi karşılamaktadır.

Çizelge 2.1 Türkiye yenilenebilir enerji kurulu gücü 2017 Şubat sonu verileri [17]

Türkiye Yenilenebilir Enerji Kurulu Gücü 2017 Şubat Sonu	MW
Rüzgar	5.788
Güneş	848
Hidrolik Enerji	26.695
Atık Isı Kazanımı	467
Jeotermal	904
Kurulu Güç	34.702

Güneş enerjisinin bu düşük oranı ilerleyen yıllarda hızla büyüyerek yenilenebilir enerji kaynakları arasındaki konumunu güçlendirecektir.

BÖLÜM 3

GÜNEŞ ENERJİSİ

Güneş enerjisi, son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde, üzerinde en çok çalışılan enerji kaynağı olmuştur. Güneş, dünyamıza ve diğer gezegenlere enerji veren büyük bir enerji kaynağıdır. Güneş ışınları, asırlardan beri yeryüzüne geldiği halde, güneş ışınlarından faydalanmaya başlama oldukça yenidir. Arşimet'in M.Ö.267 yılında iç bükey aynalarla güneş enerjisini odaklayarak Sirakuza'yı kuşatan gemileri yaktığı iddia edilmektedir. Güneş enerjisi konusundaki çalışmalar, 1600 yılında Galileo'nun bulmuş olduğu mercek ile artmaya başlamıştır [18].

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile (hidrojen gazının helyuma dönüşmesi) açığa çıkan ısıma enerjisidir. Güneşte gerçekleşen nükleer füzyon merkezde gerçekleşir, çünkü güneşin çekirdeği son derece sıcak ve yoğundur. Bu gerçekleşen füzyon proton-proton birleşmesinden kaynaklanmaktadır. Protonların birleşmesi sonucunda helyum meydana gelir, bunun yanında elektriksel olarak nötr partikül olan nötrinolar oluşur ve çok büyük bir enerji açığa çıkar. Oluşan bu enerji iki farklı yoldan dünyaya ulaşır. Bunlardan birincisi elektromanyetik radyasyon diğeri başta elektronlar olmak üzere yüklü parçacıkların oluşturduğu partikül radyasyonudur. Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin şiddeti yaklaşık olarak 1370 W/m^2 değerindedir, ancak atmosferden geçerken belli bir miktar güneş enerjisi kaybolmaktadır. Yeryüzüne ulaşan miktar $0-1100 \text{ W/m}^2$ değerleri arasında değişim gösterir. Bu enerjinin dünyaya gelen küçük bir bölümü dahi, insanlığın mevcut enerji tüketiminden kat kat fazladır.

Güneşten faydalanmak için ışıınım değęlerini ölçmek ve en yüksek verimin nereden alınacağını belirlenmesi çok önemlidir. Günümüzde bu ölçümler belirli sürelerde belirli ekipmanlar ile yapılmakta ve uzun süreli güneş haritaları çıkartılıp aynı zamanda uydular yardımı ile veriler daha da kesinlik kazanmaktadır.

Güneş ışıınımından faydalanılması ile ilgili çalışmalar 1970'lerden sonra hız kazanmakla birlikte güneş enerji sistemleri teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından düşme göstermiş, çevresel olarak temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir.

Dünyanın sürekli artan elektrik enerjisi kullanımı da göz önüne alınacak olursa fosil yakıtlar gibi çevreye zararlı etkileri olmayan ve sonsuz güneş enerjisine verilmesi gereken önemin ne kadar büyük olduğu daha iyi anlaşılmaktadır.

Silikon gibi bazı materyaller güneş enerjisini direkt olarak elektrik enerjisine çevirmektedir. Bu olaya fotovoltaiik etki denir. 19. Yüzyıl'da keşfedilen fotovoltaiik etki; yarı iletken olarak adlandırılan bazı materyallerin güneş ışığını direkt olarak elektriğe çevirebilmesi olarak açıklanmaktadır.

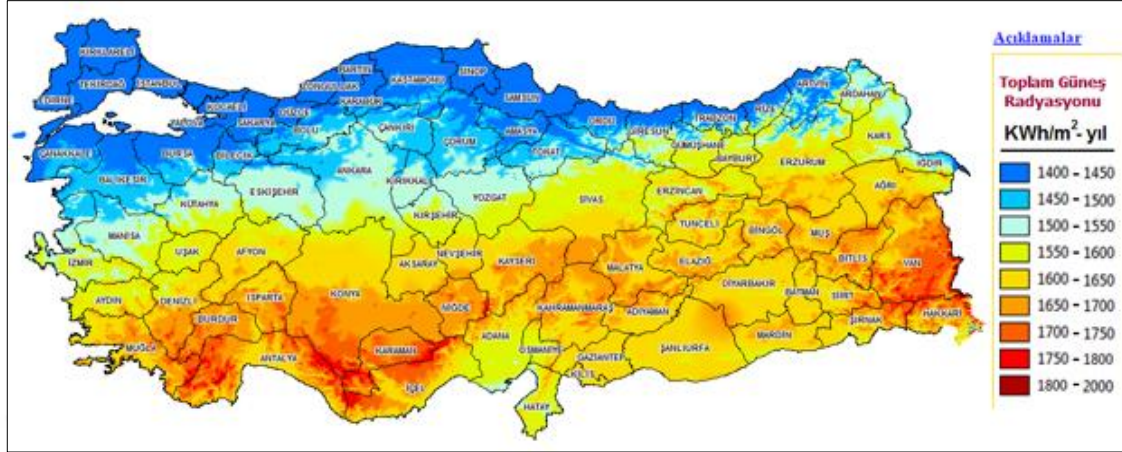
Klasik fotovoltaiik hücreler genellikle yarı iletken malzeme olan silikondan yapılmış bileşenlerdir. Bu malzeme, fotonları soğurarak onların enerjisini elektrik enerjisine çevirmektedir. Bu moleküller hücrelerin ön ve arka kısımlarında toplanır. Burada oluşturulan gerilim sayesinde bir elektrik akımı meydana gelir. Modüllere ve panellere monte edilmiş hücreler, yeterince yüksek gerilim elde etmek için kendi aralarında seriler halinde bağlanırlar.

Fotonlar yarı iletken materyalin uç kısmına ulaştığında, enerjilerini elektronlara transfer etmektedirler. Sonradan gelenler hareket halindedir ve böylece güç yaratılmış olur. Elde edilen akım, alınan ışık miktarıyla doğru orantılıdır. Doğru akım daha sonra şebekeyi beslemek üzere inverterler yardımıyla alternatif akıma çevrilmektedir [19].

3.1 Türkiye'de Güneş Enerjisi Potansiyeli

Güneş enerjisi, ülkemiz için sonsuz bir enerji kaynağıdır. Güneş enerjisinden elektrik ve ısı enerjisi elde edilmesi, ülke genelinde önemi giderek artan bir konu haline gelmiştir. Ülkemiz, güneş enerjisini tanıma ve bu kaynaktan yararlanma bakımından, kendini geliştirmekte olan ülkelerden biridir. Enerji Bakanlığı tarafından hazırlanan, Türkiye'nin

Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre, yıllık toplam güneşlenme süresi 2737 saat (günlük toplam 7,5 saat), yıllık toplam gelen güneş enerjisinin ise 1527 kWh/m²yıl olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.1 Türkiye güneş enerji potansiyel atlası [20]

Güneş enerji sistemleri çevreye zarar vermeyen ve tükenmeyen bir enerji türüdür. Zararsız, sonsuz ve çok ucuz bir enerji kaynağı olduğu için güneş panelleri her geçen gün artan bir yaygınlıkta kullanılmaktadır. Güneş pili ya da panelleri elektrik şebekesinin olmadığı bölgelerde, bedava elektrik sağlamaktadır. Bununla beraber çevreye zarar vermeden temiz enerji kullanmak isteyen birçok kişi tarafından güneş panelleri tercih edilmektedir.

Türkiye doğalgaz, petrol gibi fosil kaynak potansiyeli açısından oldukça yetersiz bir konumdadır. Petrolün %93'ünü, doğalgazın %97'sini yurtdışından ithal etmektedir. Elektrik üretiminin yarısından fazlasını ithal kaynaklardan sağlayan ülkemiz hem ekonomik hem ulusal güvenlik açısından büyük bir zafiyet altındadır. Oysaki yenilenebilir enerji kaynakları bakımından zengin olan ülkemizde, bu kaynaklara dayalı elektrik üretimi yatırımlarının cazip hale getirilmesi ve bunun hükümet tarafından desteklenmesi son derece önemlidir.

Işınım süresi uzun olan Türkiye, güneş enerjisinde elektrik üretimi açısından oldukça avantajlı bir konumdadır. Yenilenebilir enerji alanında Türkiye için güçlü noktalar aşağıda verilmiştir.

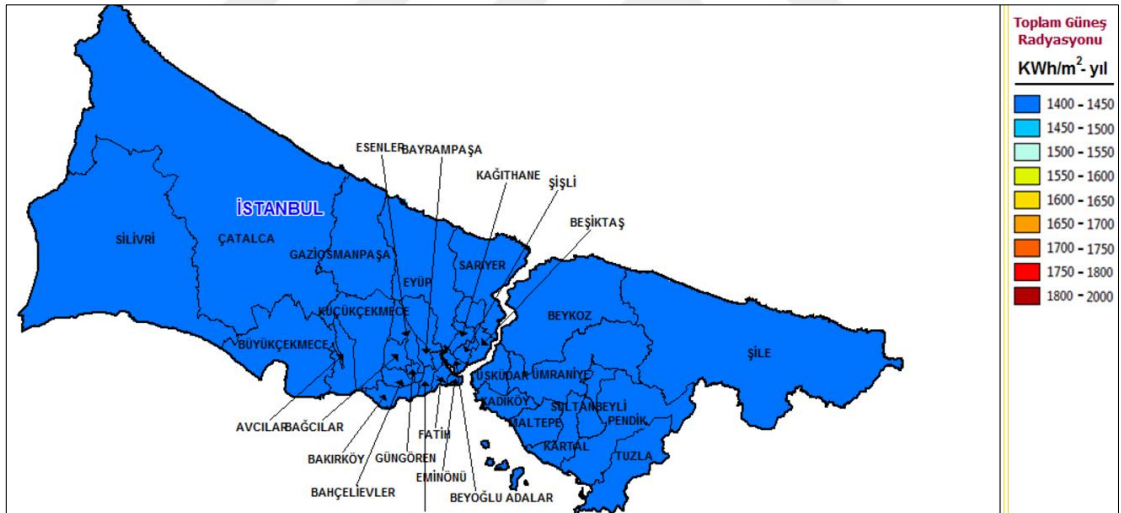
- Türkiye coğrafi konumu itibarıyla çok sayıda doğal kaynağa sahiptir,

- Jeotermal kaynaklar açısından dünyada ilk beş ülke arasındadır,
- Güneş enerji potansiyeli birçok Avrupa ülkesinin toplam potansiyelinden daha yüksektir.

3.2 İstanbul'da Güneş Enerjisi Potansiyeli

İstanbul ili, enerji tüketimi konusunda ülkemizin önde gelen bölgelerinden birisidir. Mevcut tüketimin bir kısmını karşılayabilmek adına uygun çatılara ve sahalara kurulacak güneş enerjisi santralleri İstanbul ili için büyük önem arz etmektedir. İstanbul ilinin, güneş enerji sektöründe faaliyet gösteren çok sayıda firmaya sahip olması nedeniyle İstanbul ili bu yatırımları destekleme potansiyeli bakımından önemli üstünlüklere sahiptir.

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM) tarafından hazırlanan Güneş Enerji Potansiyel Atlasına göre İstanbul ili, yıllık ortalama 1400-1450 kWh/m² güneş radyasyonu ile güneş santrali kurmak için elverişli bir bölge konumundadır.



Şekil 3.2 İstanbul ili güneş enerji potansiyel atlası ve lejantı [20]

Çizelge 3.1 İstanbul ili ışıınım süresi ve gün uzunluğu [21]

Aylar	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Ortalama
İşınım Süresi (Saat/Gün)	2,5	3,6	4,3	6,6	8,9	10,6	10,7	10,2	8,2	6,2	4,3	2,8	6,6
Gün Uzunluğu (Saat/Gün)	9,4	10,5	11,7	13,1	14,3	14,9	14,6	13,6	12,3	10,9	9,7	9,1	12

3.3 Güneş Geometrisi

Yeryüzünde, güneş ışınımı dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesi ve güneş çevresinde yaptığı eliptik yörüngesi ile belirlenmektedir. Güneşten gelen ışınlar ile dünya yüzeyi arasında belirli açılar oluşur. Güneş ışınımından en yüksek verimde faydalanabilmek için güneş açılarının bilinmesi gerekmektedir.

3.3.1 Enlem Açısı

Yeryüzündeki herhangi bir noktayı dünya merkezine birleştiren doğru ile ekvator düzleminin arasında kalan açıdır. Kuzey yön pozitif (+) olmak üzere -90° ile 90° arasında değişmektedir. Enlem açısı herhangi bir bölge için atlastan okunabilmektedir. Türkiye, 36° - 42° kuzey paralelleri ve 26° - 45° doğu meridyenleri arasında yer almaktadır. Enlem açısı güneş yükseklik açısının hesaplanmasında da kullanılmaktadır.

3.3.2 Deklinasyon Açısı (Sapma Açısı)

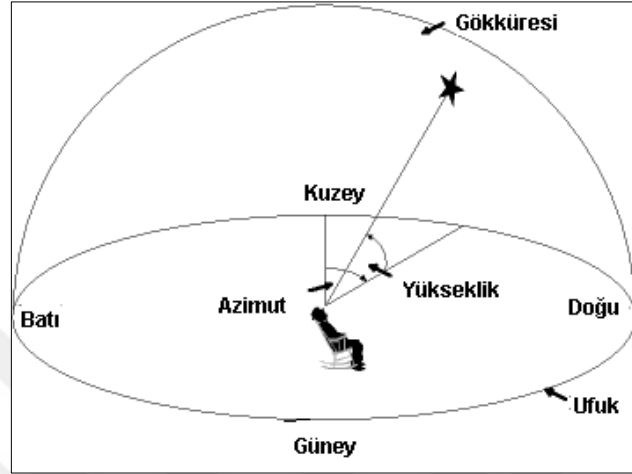
Deklinasyon açısı; güneş ışınları ve dünya yüzeyi arasındaki açı ilişkisi bakımından en önemlisidir. Deklinasyon açısı güneş ışınlarının aylar ve mevsimlere göre dünyaya geliş açısıdır. Diğer bir ifade ile güneş ışınlarının Ekvator düzlemi ile yaptığı açıdır. Deklinasyon açısı için kullanılan diğer bir tabir ise sapma açısıdır. Deklinasyon açısı dünyanın kendi eksenini ve yörünge düzlemi ile yaptığı $23,45$ derecelik açıdan kaynaklanmaktadır. Örneğin dünya dönme ekseninde eğik konumda bulunmasaydı sapma açısı daima sıfır olurdu [22].

3.3.3 Saat Açısı

Saat açısı güneş ışınlarının bulunduğu boylam ile göz önüne alınan yerin boylamı arasında kalan açıdır. Saat açısı, güneş boylamının göz önüne alınan yerin boylamı ile kesiştiği "güneş öğlesi"nden önce ise -, sonra ise + olarak alınır. Güneş öğlesinde, güneş saati 12.00'dir. Güneşin saat açısı, güneş öğle vakti ile ilgili zaman arasındaki saat farkının, 15 sabit sayısı ile çarpılması sonucu bulunur. Bu sabit sayı, dünyanın güneş etrafında bir defa dönüşü ile yapmış olduğu 360° 'lık açının 24'e bölünmesi ile elde edilmektedir. Diğer bir söylemle bu katsayı, dünyanın güneş çevresinde 1 saatte yaptığı açıdır. Bir saat 15 boylama eşittir. Güneş açıları güneş öğlesine göre simetriktir [22].

3.3.4 Zenith Açısı

Zenit açısı, güneş ışıını ile yatay yüzeyin dikey düzlemi arasında kalan açıdır. Zenit açısı, başka bir ifadeyle güneş ışınlarının yatay düzleme geliş açısıdır. Zenit açısı, güneşin doğuşu batışı sırasında 90° iken, güneş ışınlarının dik geldiği durumda 0° olmaktadır.



Şekil 3.3 Güneş açıları gösterimi [23]

3.3.5 Yükseklik Açısı

Yükseklik açısı, güneş ışını ile yatay düzlem arasında kalan açıdır. Yükseklik açısı, en yüksek değerini tüm mevsimler için öğle vaktinde almaktadır. Güneşin doğuşu ve batışı sırasında güneş yükseklik açısı 0° 'dir. Güneşin yüksekliği 21 Aralık'ta $26,5^\circ$ ile en küçük, 21 Haziran'da $73,5^\circ$ ile en büyük değerine ulaşmaktadır [22].

3.3.6 Güneş Azimut Açısı

Azimut açısı, güneş-dünya doğrultusunun yatay düzlemdeki izdüşümü ile kuzey-güney doğrultu arasında kalan açıdır. Yani yeryüzünün kuzey-güney doğrultusu ile güneş ışıını arasında kalan açıdır. Ayrıca güneş azimut açısı, kuzeye göre saat dönüş yönünde sapmayı belirtir. Güneyden doğuya doğru -, batıya doğru + olarak kabul edilmektedir. Saat 12'de güneş azimut açısı $\gamma_s = 180^\circ$ olmaktadır. Yüzey-güneş azimut açısı (β) olarak ifade edilmektedir.

3.3.7 Yüzey Azimut Açısı

Yüzeyin dikinin yatay düzlemdeki izdüşümü ile güney doğrultusundaki açıdır. Yüzey azimut açısı güneyde sıfır, doğuya doğru negatif (-), batıya doğru pozitif (+) 'dir [22].

3.4 Fotovoltaik Teknoloji

Fotovoltaik güneş hücresi, güneşin yaydığı fotonları soğurarak yani fotonun sahip olduğu enerjiyi kendi yapısında bulunan serbest elektronlara kazandırarak, elektrik akımı oluşmasını sağlar. Üretilen elektrik akımı doğru akım formundadır ve elektrik akımının büyüklüğü, güneş ışınım şiddeti, hücre ve çevresel sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik gösterir.

3.4.1 Fotovoltaik Teknolojisinin Tarihçesi

Fotovoltaik teknolojisi uzun bir geçmişe sahiptir. Hikayesi 1839 yılında, kendisi gibi ünlü fizikçiler olan Antoine-Cesar Becquerel'in oğlu ve Henry Becquerel'in babası Edmond Becquerel'in buluşuyla başladı. Becquerel'e göre bir eriyikte bulunan iki platin elektrotuna güneş ışığı düştüğünde, elektrik akımı meydana gelmektedir. Ancak bu etki çok küçüktür ve o zamanlar günlük hayat için herhangi bir faydası yoktur.

Albert Einstein 1904 yılında fotovoltaik etki ve ışığın kuantumu hakkındaki çalışmasını tanıttı. Einstein'ın bu açıklamalarından sonra da bu fiziksel etki uzun bir süre boyunca pratik herhangi bir getirisi olmayan, ilginç bir fizik deneyi olmanın ötesine geçemedi. Ancak yarı iletken teknoloji geliştirildikten sonra tam anlamıyla fotovoltaik hücrenin yapımı gerçekleştirilmiş oldu.

Silisyum içerikli ilk fotovoltaik hücre ABD'de yaşayan Chapin, Fuller ve Pearson adlı bilim adamlarının Murray Hill'deki laboratuvarlarında, 1954 yılında tanıtılmıştı. Hücre henüz %6 oranında bir verime sahipti. Ancak kısa bir süre içerisinde bu verim %10'a kadar yükseltilebilmişti.

En önemli kullanım alanı o zamanlarda uzay teknolojisinde yatıyordu. İlk kullanımı, 1958 yılında Vanguard adlı uyduda kullanılan 108 tane fotovoltaik hücre ile gerçekleştirilmişti. Bu hücreler tüm beklentileri aşarak uyduya beklenenden çok daha uzun süreyle elektrik sağlamıştı. Böylelikle, kısıtlı ama kaliteli bir fotovoltaik hücre

piyasası gelişmişti. Sovyetler Birliği de fotovoltaik hücre kullanımı konusunda aynı şekilde ileriye, ancak son derece gizli tutulduğu için bu gerçek çok daha sonra ortaya çıktı. Yüksek maliyetler nedeniyle, fotovoltaik teknolojinin uzay teknolojisi dışındaki alanlarda kullanılması uzun zaman hayalperestlik olarak görüldü.

Fotovoltaik hücreler yavaş yavaş şebekeden bağımsız elektrik tedarik sistemlerinde kullanılmaya başlandı. Fotovoltaik hücreler saat ve hesap makinesi gibi küçük ölçekteki cihazlarla başlayıp zamanla daha büyük cihaz ve tesislere yayıldı. Silisyum nispeten düşük ışık soğurma özelliği nedeniyle FV hücreler için ideal bir malzeme sayılmazsa da başından beri bu malzeme piyasaya hakimdi.

Fotovoltaik hücre sanayisi yıllar boyunca silisyum üretiminde arta kalan atıklarla rahat bir varlık sürdürmüştür. Mikroişlemci endüstrisinin yüksek kalite kriterlerine uygun olmayan silisyum kristalleri, fotovoltaik hücreler için son derece uygundu. Ancak son yıllarda karşılıklı fayda sağlayan bu durum, fotovoltaik piyasasının büyümesi önünde bir engel haline gelmiştir.

Silisyum dilimleri ya Czochralski monokristallerden ya da bloklar halinde dökülen çoklu kristallardan meydana getirilebilir. Ancak silisyum dilimlerini veya şeritlerini doğrudan eriyikten çekilerek üretim yöntemleri de vardır.

Uzun süredir geliştirilen ve kullanılmakta olan bir diğer üretim yöntemi, 1970 yılında ABD’de Mobil-Tyco şirketinde geliştirilmiş olan EFG yöntemidir. Bu şirket daha sonraları Alman üretici RWE-Schott tarafından satın alınarak anılan yöntem Almanya’da da yaygınlaştırılmıştır. Bu yöntemde kristalleşen silisyum sekizgen biçiminde, bir eriyikte meydana gelen bir grafit kalıbının içinden çekilerek meydana getirilir. Daha sonra bu şekilde meydana gelen sekizgen silindirlerden dilimler kesilir. Bu sayede silisyum bloklarının zorlu bir şekilde kesilmesi gereği ortadan kalkar.

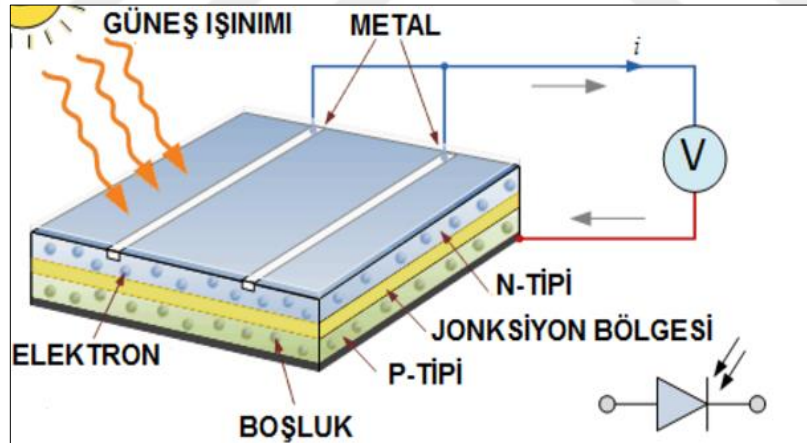
Dilimleri doğrudan eriyikten çekerek meydana getirmeye izin veren bir diğer teknoloji, Evergreen yöntemidir. Bunda silisyum yüksek sıcaklığa dayanıklı, eriyiğin içine daldırılan iki telin arasında birikir. ABD’nin Massachusetts eyaletinde bulunan Evergreen Solar şirketi bu yöntemi seri üretime kadar götürerek 2009 yılında yaklaşık 100 MW kapasiteli modül üretimini gerçekleştirmiştir.

Uzun yıllardan beri, silisyumun başka bir malzeme ile değiştirilmesi çabaları devam etmektedir. Bunun için hücreleri daha ince ve bununla birlikte daha ucuz yapmak için ışık soğurma özelliği yüksek olan malzemeler araştırılmaktadır. Bunun sonucunda ortaya çıkan hücre türü, kristal yapıli silisyum hücrelerden 100 kat kadar daha ince olabilen, ince film hücrelerdir.

Fotovoltaik teknolojinin tarihçesi ile ilgili teoriyi de unutmamak gerekir. Shockley ve Queisser adlı araştırmacıların 1961 yılında yayınladıkları temel bir çalışmada ilk kez termodinamik temeller bazında fotovoltaik hücrelerle elde edilebilecek verim hesaplanmıştır. Bu sonuçlar günümüzde hala geçerliliğini korumaktadır.

3.4.2 Fotovoltaik Çalışma Prensibi

Fotovoltaik güç teknolojisi, genellikle birkaç santimetrekare boyutunda yarı iletken hücrelerden meydana gelir. Hücrenin katı hal yapısı, temel olarak eklem bölgesi üst yüzeye yakın bulunan geniş alanlı bir p-n diyotudur. Güneş ışığı, hücrede direkt olarak elektrik akımına dönüştürülür. Çok sayıda hücre, gerekli gücün üretilmesi amacıyla birbirine eklenerek panel yapısı oluşturulur [24].



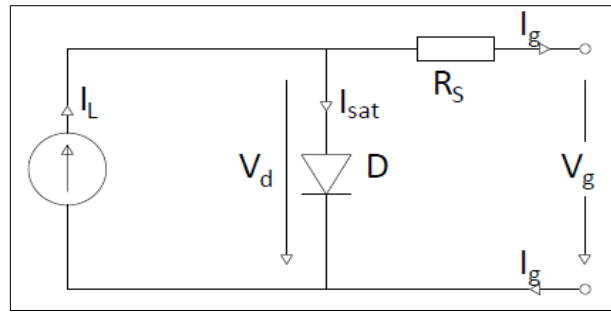
Şekil 3.4 Fotovoltaik pilin çalışma prensibi [25]

Tüm fotovoltaik piller benzer şekilde çalışmaktadır. Silikon malzemeler olan n-tipi ve p-tipi malzemeler birleştirildiğinde jonksiyon bölgesinde elektrik alan oluşur. Elektrik alan, diyot davranışı gösterip, elektronların p-tipi silikon malzemedan n-tipi silikon malzemeye geçişine engel olurken, ters yönde geçiş engellemenmezler. Işık, jonksiyon tarafından emildiğinde, emilen fotonların enerjisi, malzemedeki elektron sistemine

transfer edilerek hareketli elektronların ve deliklerin oluşması sağlanır. Bunlar jonksiyon bölgesinde bir potansiyel fark meydana getirip elektrik alan altında hızlanarak dış devre boyunca akım ve DC güç meydana getirirler. Fotovoltaik gerilimin ortaya çıktığı alan, fermi seviyesi olarak adlandırılan, birbirinden yalıtılmış iki malzemedeki elektronların kimyasal potansiyel farklarıdır. Birleştirildiklerinde eklem yeni bir termodinamik dengeye yaklaşmaktadır. Bu denge, sadece iki malzemedeki fermi seviyeleri eşit olduğu zaman elde edilebilmektedir. Bu durum fermi seviyesinin başlangıçtaki farkına eşit gerilime sahip olan iki malzeme arasındaki gerilim farkı sağlanana kadar, bir malzemedeki diğerine olan elektron akışıyla ortaya çıkar. Fotoakımı ortaya çıkaran etken bu gerilimdir [26].

3.4.3 Fotovoltaik Hücresinin Eş Değer Devre Modellemesi

Bir fotovoltaik pilin elektronik davranışının anlaşılması için, davranışları iyi bilinen ayrık elektriksel bileşenler kullanılarak elektriksel eşdeğer devresinin elde edilmesi gerekir. İdeal bir fotovoltaik pil, bir diyot ve paralel bir akım kaynağı kullanılarak modellenenebilir. Akım kaynağı solar ışık şiddeti G ile direkt orantılı olan fotoakımı I_L 'yi meydana getirir. Şekildeki diyot, fotovoltaik pilin p-n geçiş bölgesini temsil etmektedir.



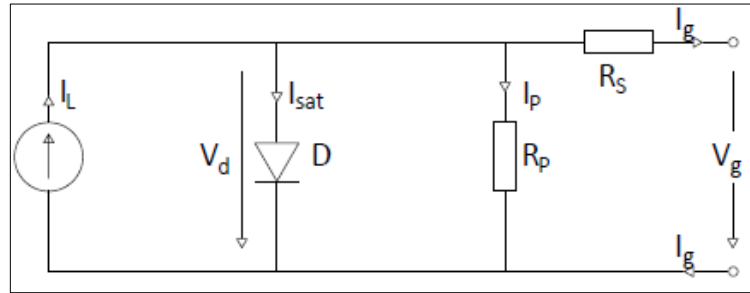
Şekil 3.5 FV hücresinin basitleştirilmiş eş değer devresi

Basitleştirilmiş eşdeğer devrenin akım gerilim (I-V) denklemi, Kirchhoff'un akım kanunundan çıkarılabilir.

$$I_g = I_L - I_{sat} = I_L - I_o \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (3.1)$$

Görüldüğü gibi, basitleştirilmiş eşdeğer devre fotovoltaik pilin elektriksel işlemi için optimal bir gösterimini vermemektedir. Gerçek fotovoltaik pillerde, harici kontaklar

üzerinde gerilim düşümü gözlenir. Buradaki gerilim kaybı seri bir R_s direnci ile ifade edilebilir. Ayrıca paralel bir R_p direnciyle ifade edilecek olan sızıntı akımı da gözlenir.



Şekil 3.6 FV hücrenin tek diyotlu eş değer devresi

- Fotovoltaik akım I_L : Fotovoltaik pil üzerine düşen ışık radyasyonu ile doğru orantılıdır.
- Diyot akımı I_{sat} : Gerilime ve sızıntı akımı I_o 'a bağlıdır ve denklem (3.2) ile ifade edilir.

$$I_{sat} = I_o [\exp(qV / nkT) - 1] \quad (3.2)$$

- Paralel kol akımı I_p : Paralel kol direncindeki eklem gerilimi etkisi ile ortaya çıkan ve denklem (3.3) ile ifade edilen akımdır. Paralel kol direnci R_p , n ve p jonksiyon boyunca akan elektronlara bağlı olarak ortaya çıkan kaybı belirler.

$$I_p = \frac{V_d}{R_p} = \frac{V_g + I_g R_s}{R_p} \quad (3.3)$$

- Hücreden çıkış akımı;

$$I = I_L - I_{sat} - I_p \quad (3.4)$$

- Yarı iletken direncine, opak elektrot direncine ve bağlantı kayıplarından dolayı ortaya çıkan seri direnç R_s denklem (3.5) ile gösterilen gerilim düşümüne sebep olur.

$$V_g = V_d - IR_s \quad (3.5)$$

- (3.2) ve (3.3) denklemleri (3.4)'te yerine konulursa;

$$I_g = I_L - I_o \left(\exp\left(\frac{q(V_g + I_g R_s)}{nkT}\right) - 1 \right) - \frac{V_g + I_g R_s}{R_p} \quad (3.6)$$

Denklemleri ile tek bir hücre için genel bir matematiksel model elde edilmektedir.

3.4.4 Fotovoltaik Hücre Çeşitleri

Güneş pilleri (fotovoltaik), yüzeylerine gelen güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken maddelerdir. Güneş pillerinin %98'i silisyumdur. Fakat saf halde olmayan silisyum genel olarak silisyum dioksit (SiO_2) ve kuvars halde bulunur. Bu maddelerden silisyumu saflaştırma işlemi oldukça maliyetlidir. Bu nedenle güneş pillerinin maliyeti de silisyum kaynaklı yükselmektedir.

Fotovoltaik hücreler birinci nesil, ikinci nesil ve üçüncü nesil olmak üzere 3 ana başlık altında incelenebilir. Birinci nesil hücreler; kristal silisyum hücreleri (c-Si ve mc-Si), ikinci nesil hücreler; ince film güneş hücreleri (a-Si, CdTe, CIS veya CIGS), üçüncü nesil hücreler ise nano teknolojiye dayalı güneş hücreleri (Tandem, Supertandem, Intermediate Band Solar Cells vs.) olarak sınıflandırılabilir.

3.4.4.1 Kristal Silisyum Fotovoltaik Hücreler

Güneş ışınlarını emme oranı düşük olmasına rağmen verimlerinin %12-20 arasında olması üreticiler için caziptir. Üretici firmaların tercih ettiği seçenektir ve pazar payının %93'nü oluşturmaktadırlar. Genel olarak 25 yıllık verim garantisi sunulmaktadır. Wafer denen ince silikon dilimlerin kalınlıkları 0,17 mm'ye kadar düşürülmüştür. Monokristal (c-Si veya SIN) ve Polikristal (mc-Si) olarak ikiye ayrılabilirler [19].

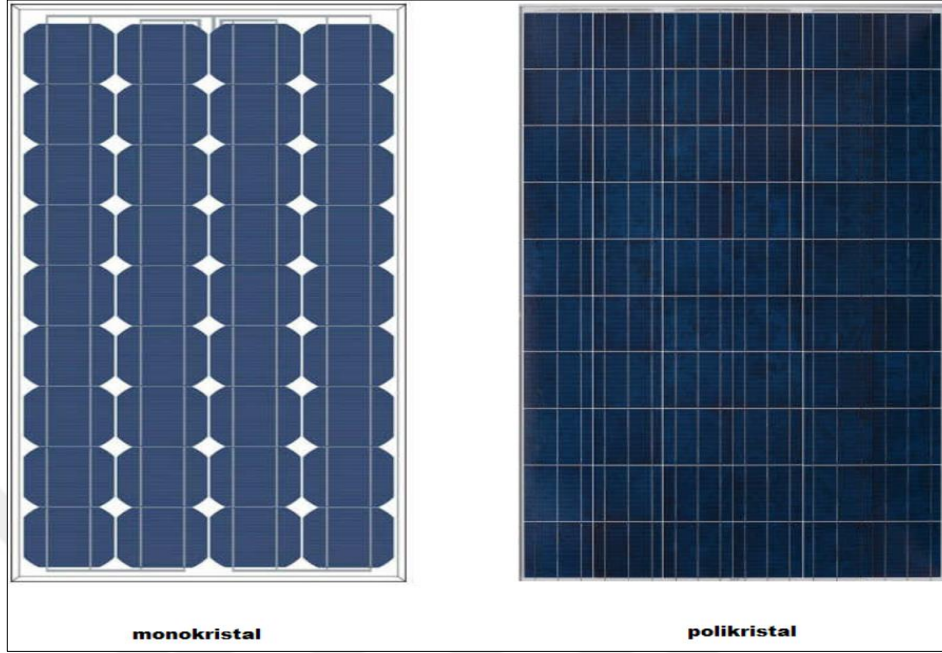
- **Monokristal Hücre (c-Si)**

- Verimleri %15 ile %20 arasındadır, verimlerinin yüksek oluşundan dolayı uzun vadeli yatırımlar için idealdir.
- Laboratuvar ortamında %20'lik bir verime ulaşılmıştır.
- Genellikle 20 yıllık bir sürede %7 verim kaybı meydana gelmektedir.
- Saf silisyum ihtiyacı yüzünden pahalıdır.

- **Polikristal Hücre (mc-Si)**

- Verimleri %12-16 arasındadır, kristal yapıları tam homojen olmadığından ucuzdurlar.
- Performans-maliyet oranı düşünüldüğünde daha çok tercih edilirler.

- Laboratuvar ortamında %16,2'lik bir verime ulaşılmıştır.
- 20 yıllık bir sürede %14 verim kaybı meydana gelmektedir.



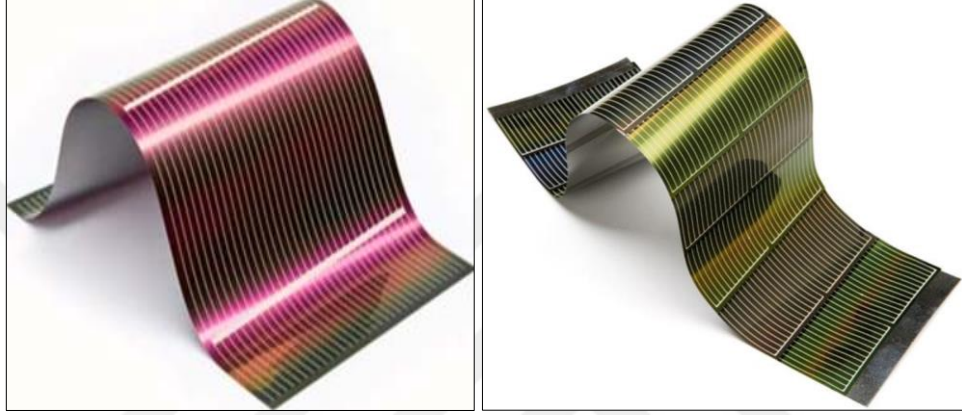
Şekil 3.7 Monokristal ve polikristal güneş hücreleri

3.4.4.2 İnce film Güneş Hücreleri (a-Si, CdTe, CIS veya CIGS)

- **Amorf Silisyum (a-Si)**
 - Verimleri %8-10 arasındadır.
 - Zaman içerisinde %21'lere yakın verim kaybı oluşmaktadır.
 - Üretim için yüksek maliyetli donanımlar gerektirmektedir fakat üretim süreci ucuz olduğu için firmalar bu hücre tipine de yönelmektedir.
- **Kadmiyum-Tellür (Cd-Te)**
 - 1 cm²'de %17'lik, 8390 cm²'de %11'lik bir verime ulaşılmıştır.
 - Üretim maliyeti düşüktür.
 - California'da elektroliz yardımı ile hidrojen üretimi için 25 kW'lık iki panel kurulmuştur.
 - Sadece rijit cam ile kullanılabilir.

- **CIGS (Copper indium gallium (di)selenide, Bakır indiyum galyum diselenyum)**

- Verimleri %11-14 arasındadır.
- Cam veya esnek yüzey ile kullanılabilir.
- Artmakta olan bir pazar payına sahiptir.
- Pahalı üretim süreci ile birlikte geniş alan gereksinimi bulunmaktadır.



Şekil 3.8 İnce film güneş hücreleri

3.4.4.3 Nano Teknolojiye Dayalı Güneş Hücreleri

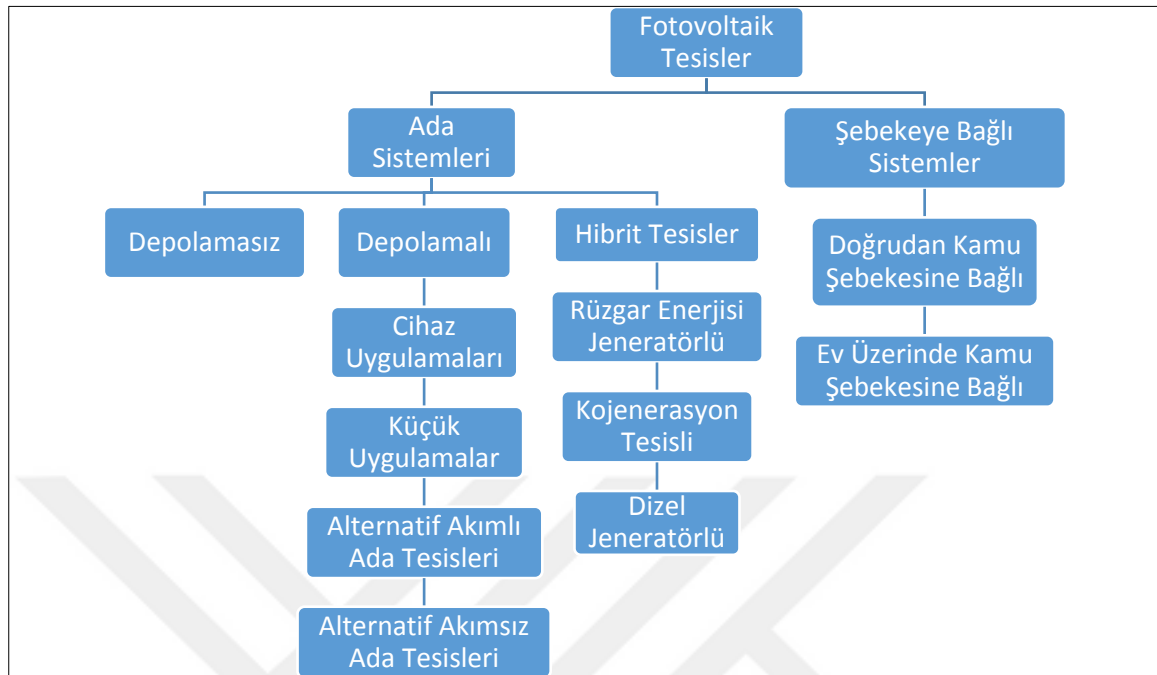
Araştırmaları halen süren bu teknolojiye tam anlamıyla sonuca gelinememiştir. Geliştirilmesi halinde yüksek verim ile üretime başlanarak enerji konusunda büyük bir atılım yapılacaktır. Teorik olarak %63,2-%86,8 arası verime sahip olan bu hücre tipi için 1 cm^2 'de ulaşılmış olan değer %35,4 olarak belirlenmiştir.

3.4.5 Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik sistemler, kuruluş açısından ada sistemleri ve şebeke bağlantılı sistemler olmak üzere ikiye ayrılır. Ada sistemlerinde, fotovoltaik enerji kazancı kurulduğu tesisdeki enerji tüketimine göre ayarlanır. Fotovoltaik enerji üretimi, çoğunlukla tüketicilerin o anki ihtiyaçlarına eşit olmadığından, genellikle ayrıca depolama üniteleri kullanılmaktadır.

Şebeke bağlantılı sistemlerde, elektrik şebekesi enerji depolayıcı olarak görev görmektedir. Dünya çapında FV tesislerin çoğu şebeke bağlantılı olarak işletilmektedir.

Bu tür tesislerde güneş enerjisinden elde edilen elektrik için ödenen yüksek ücret nedeniyle üretilen enerji çoğunlukla genel elektrik şebekesine aktarılmaktadır [19].



Şekil 3.9 Fotovoltaik tesis çeşitleri

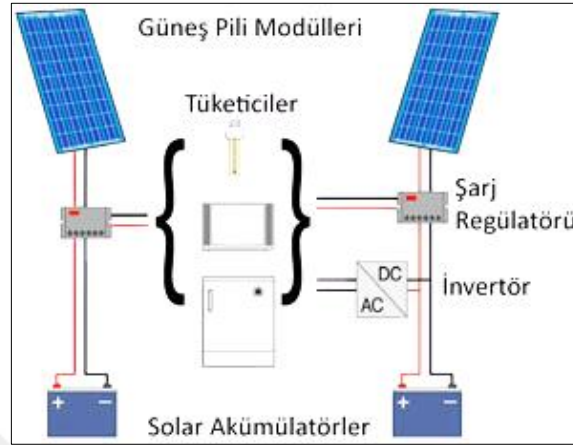
3.4.5.1 Ada Sistemleri

Fotovoltaik teknolojinin ilk ekonomik kullanım alanları ada sistemleri olmuştur. Toplu enerji şebekesi üzerinden elektrik tedarikinin mümkün olmadığı, ekonomik açıdan anlamlı olmadığı ya da istenmediği her yerde, fotovoltaik ada sistemleri düşük maliyetli olarak kullanılabilirdi. Bunların kullanım alanı gittikçe büyümektedir. Bazen geniş coğrafyalarda bile hiçbir elektrik şebekesinin bulunmadığı gelişmemiş ülkelerde ada sistemleri için özellikle büyük potansiyel bulunmaktadır. Sanayileşmiş ülkelerde de teknolojik yenilikler ve maliyeti düşüren üretim yöntemleri sonucunda yeni potansiyeller açılmaktadır.

Küçük uygulamalarda da güneş enerjili elektrik üretimi gittikçe daha çok yaygınlaşmaktadır. Hesap makineleri, saatler, batarya şarj cihazları, el feneri, güneş enerjili radyolar, FV hücrelerin ada sistemi olarak başarılı kullanımı için bilinen örneklerdir.

Ada sistemlerinde, enerji üretimi ve tüketimi arasında genellikle var olan zamansal farkın giderilmesi için enerji depolayıcılarına ihtiyaç vardır. Bu amaca uygun enerji

depolayıcıları akülerdir. Ancak aküler kullanıldığında bunların korunması, temin edilebilirliğinin sağlanması ve kullanım ömrünün uzatılması için akım kontrol ünitesi olarak uygun bir şarj regülatörünün kullanımı kaçınılmazdır. Bu nedenle tipik bir ada sistemi FV jeneratör, şarj regülatörü, akü ve tüketici bileşenlerinden oluşur.



Şekil 3.10 Fotovoltaik tesislerde ada sistemi bileşenleri

3.4.5.2 Şebeke Bağlantılı Sistemler

Şebeke bağlantılı FV tesislerin başlıca özelliği, toplu elektrik şebekesine bağlı oluşlarıdır. Alman hükümeti 1991 yılında 'Bin Çatıya FV Tesis' adlı teşvik programını başlattıktan sonra, ülkede kurulan şebeke bağlantılı FV tesislerin sayısı sürekli olarak artmıştır. Türkiye'de yapılan mevzuat çalışmalarında ise, çatı sistemleri için 10 kW' a kadar kurulum kolaylığı sağlanması yönünde çalışmalar devam etmektedir. Geliştirilecek mevzuat çalışmalarının çatı sistem kurulumlarını daha da kolaylaştıracağı öngörülmektedir.

Şebeke bağlantılı bir FV tesis, genel olarak FV jeneratör, jeneratör bağlantı kutusu, doğru akım kablo tesisatı, alternatif akım ana şalteri, inverter, alternatif akım kablo tesisatı ve sayaç bileşenlerinden oluşur.

Başlarda müstakil evlerin çatılarına kurulan FV tesisler çoğunlukta iken, gittikçe farklı bina türlerinde (apartman, okul, alışveriş merkezi, ticari yapılar, kamu binaları, stadyum) kurulan FV tesislerin sayısı artmaktadır. Bunun dışında özellikle enerji şirketleri ve yatırım fonları tarafından geniş alanlara artan sayıda, büyük şebeke bağlantılı FV tesisler kurulmaktadır.



Şekil 3.11 Çatı üzeri şebeke bağlantılı fotovoltaiik sistemler

3.4.6 Fotovoltaiik Güneş Takip Sistemi

Güneş enerjisi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre ilk kurulum maliyetinin yüksekliği ve düşük verimliliği nedeniyle daha az tercih edilmektedir. Sonsuz bir enerji olan güneş enerjisinin dünya üzerindeki potansiyeli çok yüksektir. Güneş enerji sistemlerinin kurulum maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen işletme ve bakım maliyetleri diğer enerji türlerine göre çok daha düşüktür. Güneş enerji sistemlerinin verimliliğini arttırmaya ve maliyetleri azaltmaya yönelik çalışmalar halen devam etmektedir.

Güneş enerji sistemlerindeki düşük verimliliğin başlıca nedenleri aşağıdaki gibidir:

- Güneş ve Dünya'nın dönüş hareketlerinden dolayı güneş enerjisinden sürekli faydalanamama,
- Güneş ışınlarının atmosferden geçerken ısıtım kaybına uğraması,
- Fotovoltaiik hücrelerin maksimum verimi, ancak güneş ışınları dik geldiği zaman verebilmeleri,
- Kötü hava koşullarında istenilen ısıtım miktarının alınamaması,

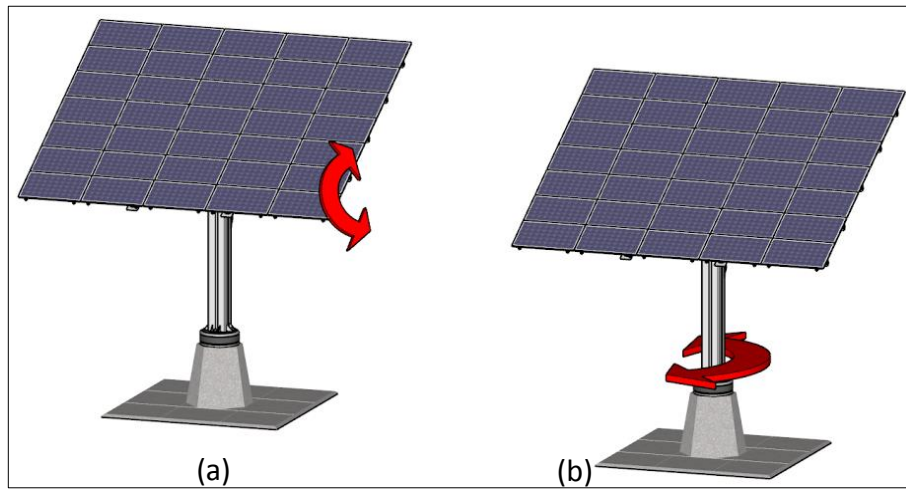
- Yüksek güç elde etmek için geniş yüzey alanı ihtiyacı sebebiyle maliyetin yükselmesi şeklinde sıralanabilir.

Tüm bu olumsuz sebeplerden ötürü güneş enerjisinden tam anlamıyla faydalanılamamaktadır. Bu nedenle bazı verim arttırma çalışmaları gerçekleştirmek gereklidir. Bunlardan birincisi güneş enerji panellerini güneş ışınlarını dik bir açı ile alabilmeleri için hareketli olarak tasarlamak ve sistemin güneşi, güneşin hareketi boyunca takip etmesini sağlamaktır.

Diğer bir yöntem ise maksimum güç noktası takibidir (MPPT). Bu yöntemde güneş panelinden elde edilecek gücün yüke bağlı olarak sürekli maksimum değerinde tutulması sağlanmaktadır. Bu işlem özel güç elektroniği devreleri ve geliştirilmiş algoritmalar ile gerçekleştirilebilir. Güneş takip sistemleri ile bir sistemin verimi, %40'lara varan oranlarda arttırılabilir. Bunun yanında maksimum güç takip sisteminin de uygulanması sistemde toplam %65'lik bir verim artışı sağlayabilir. Güneş takip sistemleri eksen sayısına göre tek eksenli ve çift eksenli olmak üzere iki farklı şekilde sınıflandırılır.

3.4.6.1 Tek Eksenli Güneş Takip Sistemi

Bu kontrol sisteminde güneş panelleri yalnızca tek eksen üzerinde hareket etmektedir. Tek eksenli güneş takip sistemi ile verimliliği %15-30 oranlarında arttırmak mümkündür.

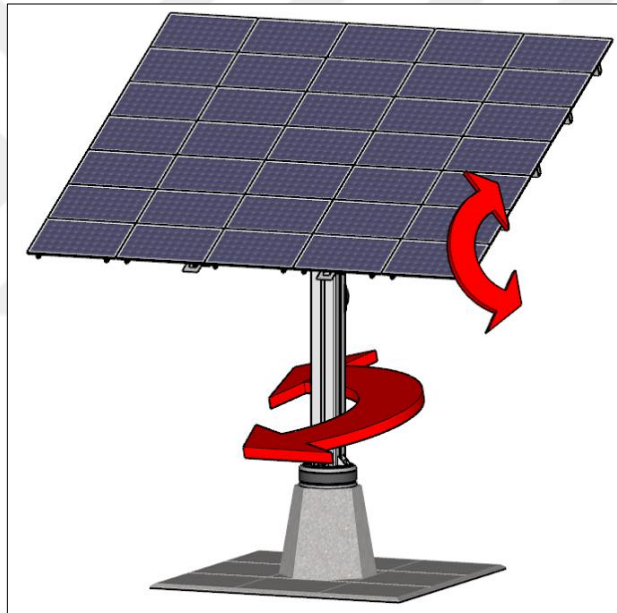


Şekil 3.12 (a) Tek eksenli güneş takip sisteminde azimut ekseninin gösterimi (b) Tek eksenli güneş takip sisteminde yükseklik ekseninin gösterimi

Tek eksenli kontrol sisteminde eksen doğu-batı hattında olup paneller kuzey-güney doğrultusunda hareket edebilir. Aynı zamanda paneller kuzey-güney hattına yerleştirilip hareketi doğu-batı ekseninde yaptırılabilir. Bunların yanısıra belirli bir eğim açısı ile hareket eden sistemlerde de tek eksenli güneş takip sistemi kurulabilir.

3.4.6.2 Çift Eksenli Güneş Takip Sistemi

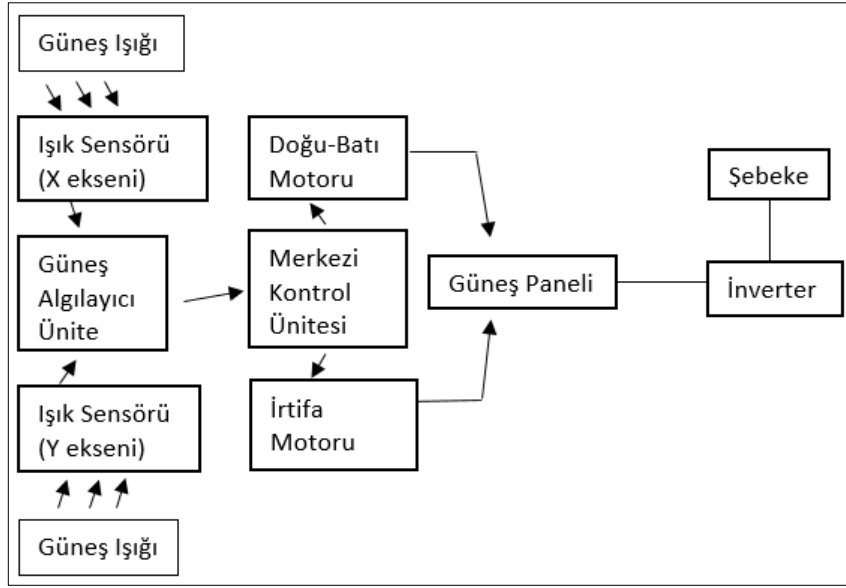
Çift eksenli güneş takip sistemlerinde güneşin gökyüzündeki konumunu belirten iki açı değeri ile güneş takibi yapılabilmektedir. Kontrol sistemi azimut ve zenit eksenlerinde hareket etmektedir. Çift eksenli kontrol sistemi ile panel verimliliği %30-45 oranlarında arttırılabilmektedir. Azimut eksen panelin doğu-batı yönündeki hareketinin, zenit eksen ise panelin yüksekliğinin ayarlandığı eksenlerdir.



Şekil 3.13 Çift eksenli güneş takip sistemi gösterimi

Sistemin güneşi takip edebilmesi için ilk olarak güneşin konumunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu işin gerçekleştirilebilmesi için sistemde güneş algılama elemanları kullanılmaktadır. Aşağıda çift eksenli fotovoltaik sistem şeması verilmiştir.

Güneş algılama elemanları denetim devresi ile senkronize çalışmaktadır. Algılama elemanlarından gelen bilgiler merkezi kontrol ünitesinde değerlendirilerek, sistemin çift eksenli hareketini sağlamak üzere doğu-batı ve irtifa motorlarının sürücüsüne uygun konum sinyalleri gönderilmektedir.



Şekil 3.14 Çift eksenli fotovoltaik sistem şeması

Konum sinyalleri sayesinde motor sürücülerini motorları tahrik ederek, fotovoltaik sisteminin çift eksenli hareketini sağlamaktadır. Bu hareket, güneş ışınlarının fotovoltaik panellerine dik gelmesi sağlanana kadar devam etmektedir. Güneş ışınlarının fotovoltaik panellere dik düşmesini sağlayan mekanik sistemin yanı sıra sistemdeki bir diğer önemli husus ise fotovoltaik panellerden elde edilen elektrik enerjisinin inverter vasıtasıyla şebekeye aktarılmasıdır.

ÇİFT EKSENLİ FOTOVOLTAİK SİSTEMİN YAPISI VE TASARIMI

İstanbul Büyükşehir Belediyesi Küçükçekmece Sosyal Tesisin’de elektrik enerjisi ihtiyacının bir kısmının karşılanması için kurulacak olan 5,2 kWp kurulu güce sahip şebeke bağlantılı, çift eksenli güneş takip sisteminin yapısı ve tasarımı aşağıda anlatılacaktır.

4.1 Sistemin Genel Yapısı

Çift eksenli fotovoltaik güneş enerji sisteminde kullanılacak malzeme ve montaj detayı aşağıda verildiği gibidir.

- Güneş paneli: 260 Wp güce sahip 20 adet polikristal güneş paneli,
- İnverter: 5 kW gücünde 3 fazlı solar inverter,
- Pano ve şalt Ekipmanları: Solar panel giriş çıkış bağlantıları, AC çıkış için pano ve topraklama,
- Taşıyıcı konstrüksiyon ve sabitleyici betonarme: Solar panel sistemine uygun dayanım ve özelliklerde,
- Direk: Güneş enerji sistemini taşıyabilecek statığe uygun 4 m uzunluğunda direk,
- Kablo: FV kabloları ve güç kabloları,
- Konnektör: MC4 konnektör,

- İrtifa ve doğu-batı motorları: TGES irtifa (yukarı-aşağı) ve doğu-batı güneş takip motorları,
- Motor kontrol ve güneş algılama ünitesi: Motor hareketini sağlayan kontrol ünitesi ve güneş konumunu algılayıcı sensör ünitesi,
- Rüzgar algılama: TGES rüzgar algılama sensörü (anemometre),
- Veri depolama ve uzaktan erişim sistemi: Uzaktan izleme yazılımı, data kablosu ve kurulumu,
- Rüzgar koruma sarkacı: Aşırı rüzgarlı havalarda sistemin koruma altına alınması.

4.1.1 260 Wp Fotovoltaik Güneş Paneli

Güneş panelleri, üzerlerindeki güneş hücreleri vasıtasıyla güneş enerjisini soğuran sonsuz ünitelerdir. Fotovoltaik etki prensibine göre çalışan güneş panellerinin üzerine, güneş ışığı düştüğünde panel uçlarında DC gerilim üretilir.

Çift eksenli güneş takibi yapan fotovoltaik sistemde güneş panelleri 260 Wp gücünde polikristal tipte seçilmiştir. 20 adet kullanılan bu güneş panelleri ile toplamda 5,2 kWp'lik bir kurulu güç elde edilmektedir. Standart test koşulları altında (ışınım 1000 W/m², A.M (Air Mass) 1,5, hücre sıcaklığı 25 °C) kullanılacak güneş panellerine ait teknik özellikler Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Paneller konstrüksiyon üzerinde güney konumda olacak şekilde yerleştirilmiştir. Sistemin çift eksenli hareketi sayesinde güneşin doğuş ve batış saatlerinde de panel veriminden faydalanılmıştır.

Çizelge 4.1 Parla 260 Wp fotovoltaik güneş paneli teknik özellikleri

260 Wp Polikristal Güneş Paneli			
Mekanik Özellikler		Elektriksel Özellikler	
Hücre tipi	Polikristal	Nominal güç	260 W
Hücre sayısı	6x10	Maks. güç gerilimi	31 V
Panel boyutları	1001x1665x42mm	Maks. güç akımı	8,4 A
Ağırlık	19,5 kg	Açık devre gerilimi	38,4 V
Çerçeve	Alüminyum	Kısa devre akımı	8,9 A
Bağlantı kutusu	IP67 koruma sınıfı	Güç toleransı	%3
Çıkış kabloları	1 m, MC4 uyumlu	P _{maks} sıcaklık katsayısı	-0.43 (°C)

4.1.2 İnverter (Evirici)

Devredeki frekansı düzenleyen, doğru akımı alternatif akıma çeviren ve tek veya üç fazlı çalışma sistemine sahip olan cihazlara inverter denir.



Şekil 4.1 İnverter ünitesi

5 kWe çıkış gücüne sahip olacak sistem için seçilen inverter teknik özellikleri Çizelge 4.2 gösterilmiştir. Panellerden gelen DC gerilim, inverter aracılığıyla AC gerilime çevrilerek sosyal tesisin panosuna aktarılacaktır. İnverter üzerinden alınan güç, sosyal tesisin iç tüketiminde harcanacaktır. 645x431x204 mm ölçülerinde, 19,9 kg ağırlığında, IP65 koruma sınıfında, trafosuz, kontrollü hava soğutması olan, -25/60 °C çalışma sıcaklığındaki invertere ait elektriksel veriler aşağıdaki gibidir.

Çizelge 4.2 Fronius 5 kW inverter teknik özellikleri

Giriş Verileri	
Maks. giriş akımı	16 A
Maks. dizi kısa devre akımı	24 A
Min. giriş gerilimi	150 V
Besleme başlangıç gerilimi	200 V
Nominal giriş gerilimi	595 V
Maks. giriş gerilimi	1000 V
MPP gerilim aralığı	163 V-800 V
MPP tracker sayısı	2

Çizelge 4.2 Fronius 5 kW inverter teknik özellikleri (devamı)

Çıkış Verileri	
AC nominal güç	5000 W
AC çıkış akımı	7,2 A
Şebeke	380 V/220 V
Frekans	50 Hz/60 Hz
THD	<%3
Güç faktörü	0,85-1 (end./kap.)

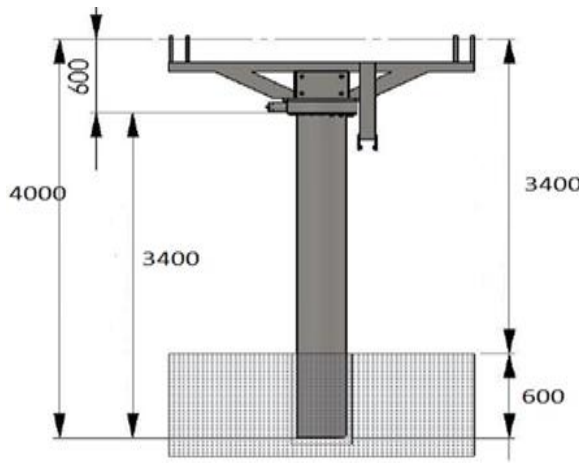
4.1.3 Panel Taşıyıcı Konstrüksiyon ve Betonarme

Panel taşıyıcı konstrüksiyon ve taşıyıcı direğin sabitlenebilmesi için tesiste kazı çalışması yapılmış olup, çelik hasır ve C30/37 kalitesinde hazır beton kullanılmıştır. Kullanılan hazır beton, direk ankrajına ve ağırlığına uygun olarak 2,20m x 2,20m ölçülerinde tasarlanmıştır. Kullanılan beton hacmi 220cm x 220cm x 85cm= 4,11 m³ 'tür. Kirişlerde 10 mm çapında 42 m ve 12 mm çapında 60 m uzunluğunda net 68 kg çelik çubuk kullanılmıştır. Çelik hasırlarda ise 114 kg brüt, 89 kg net demir çubuk kullanılmıştır. Şekil 4.2'de çelik hasır ve betonarmeye ait görseller paylaşılmıştır.



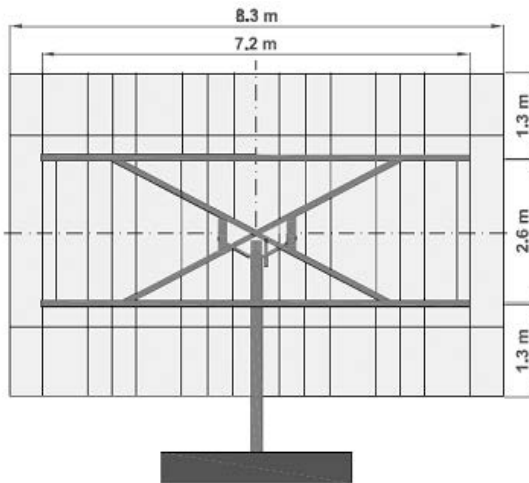
Şekil 4.2 Çelik hasır ve betonarme

Taşıyıcı direk yüksekliği 4000 mm olup 600 mm'si çelik hasır ve beton içerisinde gömülü kalacak şekilde sabitlenmiştir. Şekil 4.3'te taşıyıcı direğe ait görseller paylaşılmıştır.



Şekil 4.3 Taşıyıcı direk

20 adet panelin birleşmesiyle oluşan güneş takip sistemi 35 m^2 modül alanına sahiptir. Sistemdeki paneller arasında 10 adet alüminyum profil vardır. Taşıyıcı sistem, sıcak daldırma galvaniz çelik konstrüksiyondan oluşmuştur. Panellerin birbirine kenetlenebilmesi için çelik kelepçeler kullanılmıştır. Uç noktalarda altta ve üstte olmak üzere toplamda 20 adet kelepçe kullanılmıştır. Bağlantı noktalarında ise 40 adet kelepçe bulunmaktadır. Konstrüksiyonun gerekli tüm bağlantı elemanları paslanmaz çelik olup A2-70 inox kalitesindedir. Konstrüksiyon üzerinde panellerin sabitlenebilmesi için sisteme 8 adet çelik konstrüksiyon aşık eklenmiştir. Şekil 4.4'te konstrüksiyona ait görseller paylaşılmıştır.



Şekil 4.4 Panel taşıyıcı konstrüksiyon

4.1.4 Denetim Sistemi

Merkezi kontrol ünitesi çift eksenli fotovoltaik sistemde güneş algılama elemanlarından gelen bilgiler doğrultusunda güneşin konumuna karar verir. Güneş algılama elemanları denetim devresi ile senkronize çalışmaktadır. Algılama elemanlarından gelen bilgiler merkezi kontrol ünitesinde değerlendirilerek, sistemin çift eksenli hareketini sağlamaktadır. Güneş algılama ünitelerinin içinde bulunan MLD sensör sistemi ile güneş konumu algılanır. Maksimum ışık algılama ilkesi (MLD sensör), güneş modülünün maksimum enerji noktasına doğru, en hızlı ve en tasarruflu takibini temel alır.

MLD sensöründeki iki sensör hücresi, gün boyunca bir modül yüzeyinin hareketini sağlayan referans değerler sağlar. Üçüncü bir sensörden gelen ışımaya bilgisi kontrol ünitesi tarafından kullanılır ve akşam saatlerinde sistemin sıfırlanması sağlanır. Işımaya bağlı olarak, bir diferansiyel amplifikatör, ışımaya karakteristiğini logaritmik karakteristikten dağınık ışık tarafından oluşturulan doğrusal karakteristiğe geçiş yapmaya zorlar. Doğrusal karakteristikte ışımaya, logaritmik karakteristiğe göre daha yüksek bir değere sahiptir. Doğrusal karakteristiğe sahip ışıyım ölçümleri kontrol devresine gönderilir.

Motor sürücüsünün çalışma prensibi, MLD sensöründen gelen bilgilere bağlı olarak mikro işlemci tarafından üretilen tetikleme sinyallerinin Mosfet devresini sürmesi şeklindedir. Bir akım sınırlayıcı, motorun ve sistemin aşırı yüklenmesini önler. Aşırı yüklenme durumunda (örneğin donmuş mekanik sistem) motor kapanır.

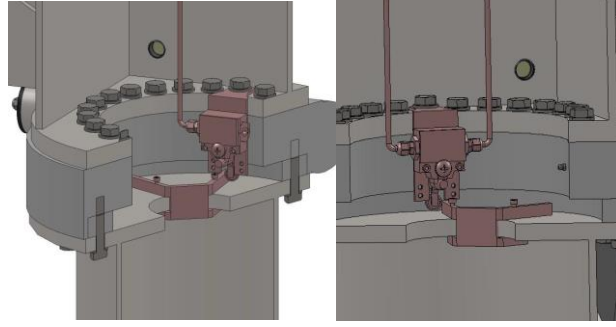
MLD sensör, gelen ışığın yoğunluğunu ve açısını sürekli olarak ölçer ve merkezi kontrol ünitesi sayesinde güneş modülü en avantajlı konuma gelir. Modül sadece güneş ışınlarını hesaba katmakla kalmaz aynı zamanda kar, su veya çakıl gibi maddelerin üzerinden yansıyan ışıkları ve bulutlardan nüfuz eden dağınık güneş ışıyımını da hesaba katar. Merkezi kontrol ünitesi ve güneş algılama elemanlarının görüntüsü Şekil 4.5'te görülmektedir.



Şekil 4.5 Merkezi kontrol ünitesi ve güneş algılama elemanları

4.1.5 Elektrik Motorları

Redüktörlü elektrik motorları merkezi kontrol ünitesinden aldığı bilgiler doğrultusunda, sistemi güneşin konumuna doğru azimut ve zenit eksenlerinde hareket ettirmektedir. Bu motorların görüntüsü Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6 İrtifa ve doğu-batı motorları

Konstrüksiyon üzerine yerleştirilen redüktörlü doğru akım motorları vasıtasıyla sistemin çift eksende hareketi sağlanmıştır. Azimut ekseninde hareket için redüktörlü doğu-batı motoru, zenit ekseninde hareket için ise redüktörlü irtifa motoru kullanılmıştır. Hareketli sistem doğu-batı ekseninde 300° dönme açısına sahiptir. Sistemin hareket hızı dakika $30''$ 'dir. Sistemin yukarı aşağı yönünde değişen irtifa açısı 20° ile 90° arasındadır. İrtifa hızı dakikada $13''$ 'dir. Direk üzerine yerleştirilen motor görüntüleri Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Elektrik motoru ve direk üzerine yerleşimi

4.1.6 Kablo ve Konnektör

Güneş panellerinin kendi arasında ve inverterler ile bağlantıları arasında fotovoltaiik kablo kullanılmıştır. FV enerji kabloları yüksek sıcaklık ve ısıya dayanıklı, UV dirençli, çift izoleli, halojensiz, kurşunsuz, nominal kablo kesiti TÜV tarafından onaylanmış ve IEC 60228 standardına uygun olarak üretilmiştir. Kullanılan fotovoltaiik kablonun kesiti 6 mm²'dir. Sistemde kullanılan FV kablo uzunluğu yaklaşık 60 m'dir.

FV- solar kablo ve solar kablo- evirici bağlantılarında MC4 tipi erkek ve dişi tip konektörler kullanılmıştır. Konektörler, özel bağlantı elemanları ve soketler -40°C ile 100°C arası işletme sıcaklığına uygun, IP 67 koruma sınıfına haiz, yüksek akıma uygun olarak TÜV onaylıdır.

İnverter ile AC Pano arasında kullanılan kablo çelik zırlı NYFGBY tipi kablodur. Evirici ile AC bara arasında çekilecek kablolar, TGES maksimum gücünde en fazla %3 gerilim düşümüne izin verecek şekilde 4x10 mm² kesitte tasarlanmıştır. Sistemde kullanılan AC kablo yaklaşık 60 m'dir. Kablo ve konnektör görselleri Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

Tesise ait gerilim düşümü hesabı;

Gerilim: U=1 kV, uzaklık: L=60 m, İletkenlik Katsayısı: k(Cu)=56m/Ω mm², İletken Kesiti: 10 alınır ise, gerilim düşümü;

$$\%e = (100 \times 10^4 \times 60) / (56 \times 10 \times 10^6) = 0,1 \text{ olarak bulunur.}$$

Burada elde edilen değer, istenen %e (gerilim düşümü) %3 değerinden küçük olduğu için bu işlemi tekrarlamaya gerek yoktur.

Tesise ait kısa devre hesabı;

IEC 60949:1988 standarına göre hesaplama yapılmaktadır. XLPE izoleli bir kablo için:

Kısa devre başlangıç sıcaklığı: 84°C, Kısa devre bitiş sıcaklığı: 250°C, Kısa devre süresi: 1 saniyedir.

IEC 60949:1988 standardına göre, üstteki kriterler doğrultusunda hesaplanan kısa devre hesap katsayısı = 0,146376 kA/mm²'dir.

$$\text{Kısa devre akımı (kA)} = 0,146376 \text{ kA}/(\text{mm}^2) \times \text{iletken kesiti (mm}^2)$$

N2XY 1x10 bakır iletkenli kablo için (üstte verilen kısa devre parametrelerine bağlı olarak), Kısa devre akımı (kA) = 0,146376 x 10, kısa devre akımı (kA) = 1,46'dir.



Şekil 4.8 Kablo ve konnektör

4.1.7 AC Pano ve Şalt Ekipmanları

İnverterin, sigortaların, kaçak akım koruma rölesinin, izleme analizörünün, haberleşme kartlarının dış ortamdan korunması ve sistemin kablo bağlantılarının toplanması için 1200x1200x400 mm ve 1000x600x400 mm ölçülerinde 2 adet pano tasarlanmıştır. Pano içerisinde 2 adet güç ayırıcı, 1 adet 40 A kaçak akım koruma rölesi, 2 adet C25 otomatik sigorta, 3 adet monofaze C20 otomat, 6 adet 6 A sigorta, 1 adet 10 A sigorta, 3 adet 60/5A akım trafosu, 1 adet reaktif röle, 1 adet modem bulunmaktadır. Sac, paslanmaz ve IP65 koruma sınıfına haiz olan pano, 1000 Vdc ve 1500 Vac izolasyon anma gerilimine uygun olarak üretilmiştir. Pano içinde ve dışında uyarıcı tehlike levhaları bulunmaktadır.



Şekil 4.9 Sac pano

Panel üzerinde sürekli bir gerilim olması ve sistemde herhangi bir kaçak olabilmesi ihtimaline karşı sistem topraklaması için 2 adet 16 mm çapında bakır topraklama kazığı kullanılmış olup, sistemin toprak ile bağlantısı sağlanmıştır. Topraklama için 20 metre 16 mm²'lik ve 6 metre 25 mm²'lik bakır kablo kullanılmıştır.



Şekil 4.10 Topraklama kazığı

4.1.8 Rüzgar Algılama (Anenometre)

Küçükçekmece Sosyal Tesisi'nin rüzgar hızının ölçülmesi ve çift eksenli güneş sisteminin aşırı rüzgarlarda kendini korumaya alabilmesi için sisteme bir adet anenometre bağlanmıştır.

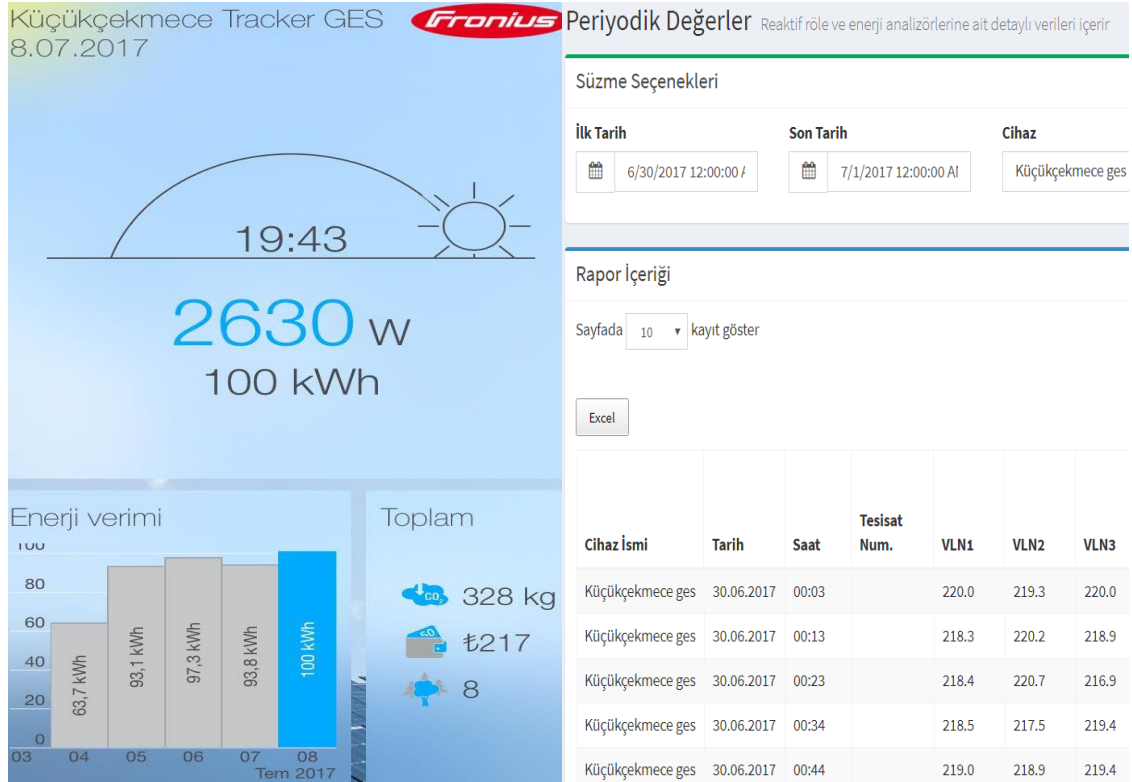


Şekil 4.11 Anenometre

4.1.9 Veri Depolama ve Uzaktan Erişim Sistemi

Çift eksenli fotovoltaiik sistemin panosuna konulmuş olan inverter ve enerji analizörü vasıtasıyla izleme yapılmaktadır. Sistem panosuna bir adet GSM (Global System for Mobile Communications) modem yerleştirilmiştir. İnverter haberleşme kartının ve inverter datakodlarının web portala yüklenmesiyle beraber invertere ait; modüllerden gelen güç, şebekeye verilen güç, inverter verimi, çıkış frekans değerleri, gün içinde, son

bir ayda ve kurulumdan itibaren üretilen enerji, sistem günlük kaydı, (TGES' te gerçekleşen olağan dışı olaylar, hata mesajları, uyarılar), panel verim düşüş ikazı gibi veriler izlenmektedir. Sistemde üretilen değerler inverterin kendi web arayüzü üzerinden izlenildiği gibi, panoya bağlanılan akım trafosu ve analizör vasıtasıyla da görülebilmekte, ayrıca uzaktan kontrolü sağlanmaktadır. Şekil 4.12'de iki ayrı web portalına ait görsel paylaşılmıştır.



Şekil 4.12 Web arayüzü

4.1.10 Rüzgar Koruma Sarkacı

DMİ (Devlet Meteoroloji İstasyonu) verilerine göre İstanbul için ölçülen en yüksek rüzgar hızı 98,64 km/h olarak hesaplanmıştır. Türk Standardı TS-498 hesaplamalarında kullanılacak rüzgar hızı, yüksekliği 8 metreye kadar olan sistemler için 28 m/s olarak belirlenmiştir. Rüzgar hızının fırtına veya kasırga durumunda DMİ ve MGM'in (Meteoroloji Genel Müdürlüğü) belirlediği rüzgara hızını aşması durumunda; 5,2 kWp çift eksenli güneş takip sisteminin zarar görmemesi için sisteme rüzgar koruma sarkacı eklenmiştir [27].

4.2 Sistem Tasarımı

5,2 kWp kurulu güce sahip çift eksenli güneş takip sisteminin kurulduğu Küçükçekmece Sosyal Tesisi'ne ait konum bilgisi, tesise ait elektrik tüketim değerleri ve tesise kurulan FV sistemin tasarlanan sisteme uygunluğu incelenmiş olup, aşağıda malzemeler seçilirken gözetilen faktörler açıklanmıştır.

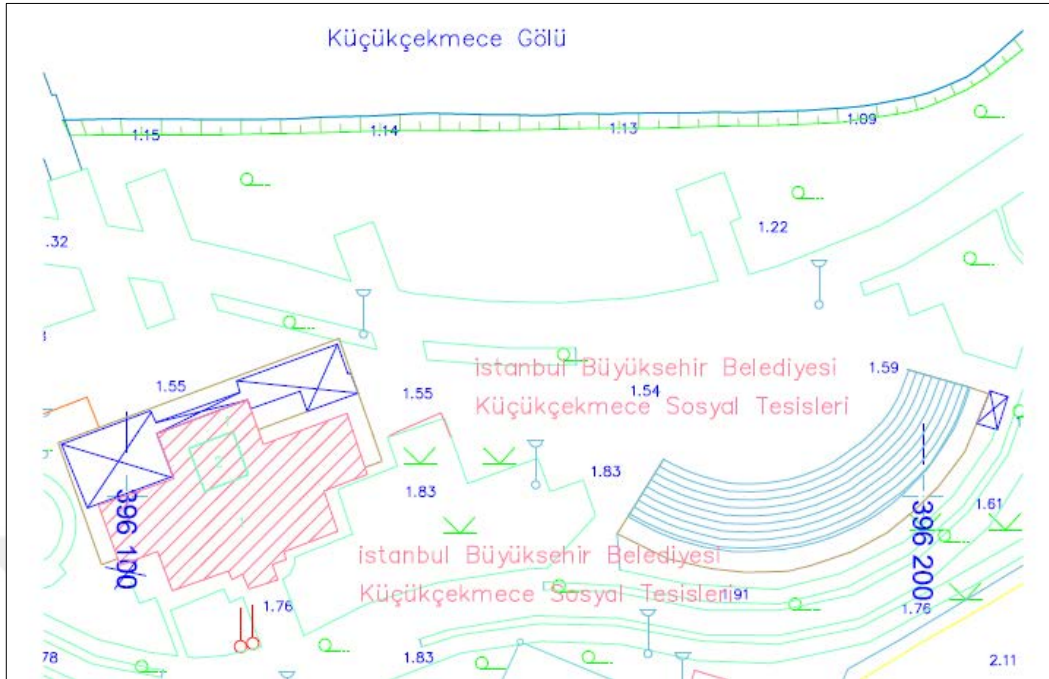
4.2.1 Tesisin Yerleşik Konumu

Yukarı değeri 45,40° ile sağa değeri 64,85° koordinatları arasında ve ITRF-96 Projeksiyon tipine göre dilim orta meridyeni 27, dilim genişliği 6° olan İstanbul Büyükşehir Belediyesi'ne ait Küçükçekmece Sosyal Tesisi Fatih Mahallesi, Yalı Caddesi, 34290 adresindedir. Küçükçekmece gölü kıyısında kurulmuş olan Küçükçekmece Sosyal Tesisi'ne ait Google Earth görüntüsü şekil 4.13'te gösterilmiştir.



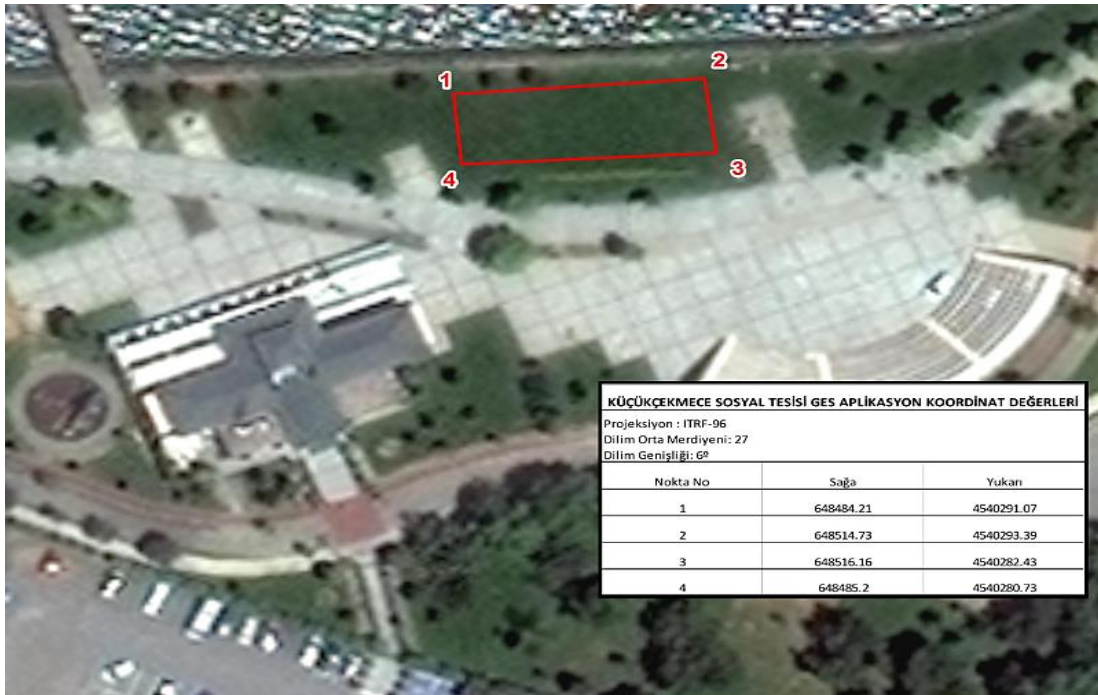
Şekil 4.13 Küçükçekmece sosyal tesisi Google Earth görüntüsü

Küçükçekmece Sosyal Tesisi'ne ait tesis vaziyet planı şekil 4.14'te gösterilmektedir.



Şekil 4.14 Tesis vaziyet planı

Küçükçekmece Sosyal Tesisi'ne kurulan çift eksenli FV sistemin tesis üzerinde kurulacağı alan ve köşe koordinatları şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.15 Sistem kurulum alanı

4.2.2 Tesise Ait Bilgiler

İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 1994 yılında sosyal tesisleri halkın kullanımına açmıştır. Bu sosyal tesislerden biri olan Küçükçekmece sosyal tesisi, 2006 yılında faaliyete geçmiş olup, 237 m² açık alanı ve 283 m² kapalı alanı ile restaurant olarak hizmet vermektedir. Tesis kapalı alanda 130 kişiye, açık alanda ise 120 kişiye hizmet verebilmektedir. Tesisin 1 haftadaki ortalama müşteri sayısı 3500'dür.



Şekil 4.16 Küçükçekmece sosyal tesisi

Serbest tüketici kategorisindeki ikili anlaşma ile elektrik alan Küçükçekmece Sosyal Tesisi; 150 kW kurulu güç ve 90 kW sözleşme gücüne sahiptir. Müşteri grubu; ticarethane, tek terimli ve alçak gerilim (AG) kapsamında olan tesis, enerji bedeli ve dağıtım bedeli kapsamında CK Boğaziçi Elektrik Perakende Satış A.Ş'den 2016 itibarı ile birim fiyatı 0,299940 TL/kWh ile elektrik satın almaktadır.

Küçükçekmece Sosyal Tesisi'ne ait elektronik sayaç üzerinden okunan 2016 yılı KDV hariç aylık fatura tutarları Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 Küçükçekmece sosyal tesisi 2016 yılı aylık tüketim değerleri

İlk Okuma Tarihi	Son Okuma Tarihi	Aktif Tüketim (kWh)	Birim Fiyat (TL)	Fatura Tutarı(TL)
01.01.2016	31.01.2016	12910,840	0,299940	3872,477350
01.02.2016	29.02.2016	9434,540	0,299940	2829,795928
29.02.2016	31.03.2016	9755,220	0,299940	2925,980687
31.03.2016	30.04.2016	8958,680	0,299940	2687,066479
01.05.2016	31.05.2016	9204,980	0,299940	2760,941701
01.06.2016	30.06.2016	11215,900	0,299940	3364,097046
01.07.2016	31.07.2016	14474,080	0,299940	4341,355555
01.08.2016	31.08.2016	15584,020	0,299940	4674,270959
01.09.2016	30.09.2016	10236,280	0,299940	3070,269823
01.10.2016	31.10.2016	9614,020	0,299940	2883,629159
01.11.2016	30.11.2016	9647,000	0,299940	2893,521180
01.12.2016	31.12.2016	11171,300	0,299940	3350,719722

4.2.3 Seçilen Malzemenin Tesis İçin Tasarlanan Sisteme Uygunluğu

Bu çalışmada anlatılan çift eksenli fotovoltaiik sistemin en önemli özelliği, güneş panellerini taşıyan sistemi hareket ettirerek güneşe yönelmelerini sağlamasıdır. Böylece sistem elektrik üretimini maksimum hale getirmektedir. Tasarımı, simülasyonu ve uygulaması yapılan sistemin bu yeteneği sayesinde güneş ışınlarından maksimum düzeyde yararlanılmakta ve güneş enerjisi en verimli şekilde kullanılmaktadır. Klasik uygulamalarda ise, güneş ışınları sadece belirli bir zaman diliminde panellere dik olarak düşmektedir. Bu da panellerden elde edilen enerjinin gün içi ortalamasını oldukça düşürmektedir. Güneş izleyebilen sistemde ise güneş enerjisinden gün boyu yararlanma olanağı ortaya çıkmaktadır. Çift eksenli fotovoltaiik sistem eğim ve yönelimi ile klasik sistemlerde ortaya çıkan kayıp enerjinin sisteme katılımını sağlamaktadır.

5,2 kWp gücündeki çift eksenli güneş takip sisteminde 260 W gücünde 20 adet polikristal güneş panelleri kullanılmıştır. Küçükçekmece Sosyal Tesisi için seçilen polikristal yapılı güneş panelleri mümkün olduğunca düşük maliyetle m² başına

olabildiğince yüksek bir enerji kazanımı sağlayan modüllerdir. Polikristal güneş panellerinin maliyet-performans oranı oldukça yüksektir. Polikristal yapıli modüllerin ebatları ve biçimi bakımından özel bir gereksinim olmadığından hızlı tedarik sürecine sahiptirler. Türkiye sınırları içerisinde üretim imalatlarının çok fazla olması ile beraber tedarikçi çeşitliliği olmakta ve böylece firmalar arası rekabet sayesinde ürünün daha uygun bir fiyata alınması sağlanmaktadır. Sipariş verilen paneller iki hafta içerisinde sahaya ulaşmıştır. Paneller sahip oldukları çerçeve yapısı sayesinde montaj karkaslı tesislerde veya özel profil sistemlerde kullanılabilirler. Çift eksenli modül taşıyıcı sistemin özel tip profil sistem olması sebebiyle çerçeveli tip güneş paneli tercih edilmiştir. Düşük maliyete sahip olması, arazi ve çatı kurulumlarında geri dönüş süreleri bakımından avantajlı hale gelmektedir.

Sistemde oluşabilecek kablo kaybı, gölgelenme, DC-AC dönüşüm oranı, yansıma, tozlanma sebeplerinden ötürü net olarak 5 kW'lık güç alınabilmesi için 5,2 kW güçte panel seçilmiştir. Üretilen elektrik enerjisinin sosyal tesisin iç tüketiminde harcanması için kullanılacak inverter gücü bu bağlamda 5 kW olarak tasarlanmıştır. İnverter; çift eksenli fotovoltaik sistemin verilerinin izlenebilmesi için, RS 485 haberleşme portu ve modbus protokolüne sahiptir. Seçilen inverterin diğer inverterlere göre %98'lik yüksek verimi çıkıştan alınan gücü maksimum kılmaktadır. İnverter sahip olduğu elektronik yapısından dolayı güneş enerji sistemlerinde en çok hataya maruz kalınan noktadır. Bu da inverter bakımını önemli bir noktaya taşımaktadır. Seçilen inverter için teknik desteğin ve bakım ekibinin sistemin yapıldığı il sınırları içerisinde olması önem arz etmektedir. Ayrıca yapılan tesis ile halkın yenilenebilir enerji kaynaklarına bilinçlendirilmesi amaçlanmaktadır. Bu bağlamda tesis üzerine sistem verilerinin izlendiği kiosk (bilgi ekranı) yerleştirilmiştir. İnverter web portalının sahip olduğu arayüzün Türkçe olması, çift eksenli sistemin sosyal tesise kurulan kiosk üzerinden doğrudan izlenebilmesine imkan vermiştir.

Seçilen güneş algılayıcı sensörler merkezi kontrol ünitesi tarafından kontrol edilmektedir. Güneş algılama ünitelerinin içinde bulunan MLD sensör sistemi ile güneş konumu algılanmaktadır. Astronomik zaman saati uygulamaları yerine tercih edilen maksimum ışık algılama ilkesi (MLD sensör), güneş modülünün maksimum enerji noktasına doğrudan ulaşabilmesine sağlar. Astronomik zaman saati ile ayarlanan

kontrol yöntemlerinde güneş takibi zaman ayarlı olup, güneşin konumundan anlık olarak faydalanılamadığı için tercih edilmemiştir. Güneş algılayıcı sensör, gelen ışığın yoğunluğunu ve açısını sürekli olarak ölçtüğü için çift eksenli sistemi en uygun konuma getirir. MLD sensör gün ışığının yanında yansıyan ışıkları ve bulutlardan nüfuz eden dağınık güneş ışınlarını da hesaba katmaktadır. Bu da sensör ünitesini diğer sistemlere göre avantajlı hale getirmektedir.

Küçükçekmece Sosyal Tesisi Küçükçekmece gölünün kıyısında olmasından ötürü kurulum alanı nemli bir bölgedir. Bu bağlamda panel taşıyıcı konstrüksiyon sistemi paslanmaz çelik ve sıcak daldırma galvanizden oluşmaktadır. Sıcak daldırma galvaniz işlemi her ne kadar klasik çelik sistemlere göre maliyetli olsa da sistemin dayanıklılığı, ömrü ve görüntüsü açısından önem arz etmektedir.

ÇİFT EKSENLİ FOTOVOLTAİK SİSTEMİN SİMÜLASYONU

Çift eksenli güneş takip sisteminin tasarımı aşamasında simülasyonu yapılmış olup, uygulama öncesinde sistem kurulum yerinin ışınlam tespiti, üretim analizi ve maliyet çalışması yapılmıştır.

5.1 Simülasyon Programlarının Kullanımı

Fotovoltaik simülasyon programlarının kullanım alanları çok yönlüdür. FV tesislerin planlamasında, FV tesisin boyutlarını tespit ve optimize etmek gerekir. Simülasyon programları kullanılarak sınır değerleri, çalışma durumları ve çalışmanın kendisi farklı yönlerden simüle edilebilir. Doğru verim tahminleri ve tahmin raporları için simülasyon programlarının kullanılması gereklidir.

FV modüller gerilim üretici olarak seri şekilde bağlanmıştır. FV modül ve evirici gibi bileşenlerin çalışma aralıklarının birbirine uyması gerekir. Her inverterin doğru akım tarafında kendine ait MPP giriş aralığı vardır. Aynı zamanda her inverter akım ve gerilim sınır değerlerine sahiptir. Her olası inverter konfigürasyonu için meteorolojik hava profilini, FV modülün hizalanmasını ve eğimini simülasyon programları tahmin edebilir ve değerlendirebilir. Simülasyon programları planlama desteğinin yanında gölgelenme, optimum tesis çözümü, enerji ve emisyon tasarruf miktarı, verim analizi ve tesis devre şemalarını da vererek rapor halinde sunabilmektedir. Aşağıda bu tez de kullanılan simülasyon programları açıklanmıştır.

5.1.1 PVSOL

PVSOL programı bu çalışmada tesis planlaması, sistem optimizasyonu ve enerji üretim değerlerinin, tasarım aşamasında görülebilmesi için kullanılmıştır. Sahip olduğu bölgesel ışıınım verileri, tesis için kullanılan bileşenlerin veritabanı, tesis 2D ve 3D dizaynı, aylık ve yıllık enerji üretim değerleri gibi çeşitli simülasyon sonuçlarını verebilmektedir. Ufuk saati ve güneş ışıını kullanarak gölgelenme tespitinin yapılabilmesini sağlamaktadır. PVSOL’de By-Pass diyot devresi ve güneş geliş açısı göz önünde tutularak gölgelenmeler modül bazında dikkate alınmaktadır. Diğer çoğu simülasyon programında ise sistem bütünü veya dizi bazında gölgelenme sunulmaktadır. Güneşin yükseklik, enlem, azimut vs. gibi değerlerinin kullanılarak sistemin üretiminin tepe yaptığı noktaların tespit edilebilmesini sağlamaktadır.

5.1.2 PVGIS

PVGIS programı; Avrupa ve Afrika bazlı bölgesel ışıınım değerlerine sahiptir. Web programı olan PVGIS kurulum alanındaki ışıını ve sistem üretimi ile ilgili verileri iki farklı uydudan aktarmaktadır. Alınan ışıınım sonuçları için çift eksenli güneş takip sistemi ile sabit eksenli fotovoltaik sistemin üretim kıyaslamasını yapabilmektedir. Günlük, aylık ve yıllık enerji üretim değerlerini gösterebilmektedir. 21 Haziran, 21 Aralık ve yatay düzleme düşen ışıınımlar ile güneş açısına bağlı değişen grafiği verebilmektedir. Modül üzerine düşen güç değerlerini yani güç yoğunluğunu gösterebilmektedir.

5.1.3 Meteonorm

Meteonorm; aranılan bölgenin ışıınım ortalama değerini veya planlanan yerin yakınında çalışan FV tesislerdeki ışıınım verilerini kullanabilmektedir. Meteonorm, FV modülleri spektral hassasiyet ile değerlendirmektedir. Meteonorm verileri genellikle piranometre üzerinden gelen verilerdir. Bu yüzden ışıınım doğruluğu diğer meteoroloji kaynak veya sitelerine göre daha güveniliridir.

5.1.4 Lumion

Lumion 3D görüntü ve imge veren bir animasyon programıdır. Fotovoltaik sistemin ve tesis üzerindeki yerleşiminin gösterilmesi amacıyla kullanılmıştır.

5.2 Simülasyon Sonuçları

Bu tez çalışmasında yukarıda açıklanan 4 farklı simülasyon programı sistem modellenirken yeteneklerine uygun olarak kullanılmıştır. Enerji üretimi ve performans oranı açısından, sabit eksenli güneş enerji sistemi ve çift eksenli güneş takip sistemi karşılaştırılmıştır. Çift eksenli güneş takip sistemi için ayrıca bir avantaj durumunda olan ışınlam kazancı, eğim ve yönelime bağlı güç yoğunluğu ve dönme açısı durumları incelenmiştir.

5.2.1 5,2 kWp Gücünde Sabit Eksenli Güneş Enerji Sistemi Simülasyonu

Çift eksenli güneş takip sisteminin sabit eksenli sistem ile karşılaştırılabilmesi için 5,2 kWp gücünde sabit eksenli güneş enerji sisteminin üretim ve verim analizi yapılmıştır. Tasarımı yapılan sistemin simülasyonu PVSOL yazılımı, PVGIS Web Portalı ve Meteoronorm hava durumu bilgisi temel alınarak oluşturulmuştur. Sistemin analizi; çift eksenli güneş takip sisteminde kullanılan veriler, Küçükçekmece Sosyal Tesisi'ndeki güneş ışınlamı, Parla güneş paneli ve Fronius marka inverter davranışları incelenerek yapılmıştır.

Sabit eksenli fotovoltaik sistem kurulumunun tasarlandığı Küçükçekmece Sosyal Tesisi'nin yatay düzlem üzerine düşen ışınlam miktarı $1364,5 \text{ kWh/m}^2$ olarak belirlenmiştir. Sistem kurulumu güney yönünde tasarlanmış olup, standart spektrum sapması ve modül yansımalarının negatif etkileri de dahil edildiğinde modül yüzeyinin güney yönündeki 30° 'lik eğimi sayesinde tek bir modül üzerine ek olarak m^2 başına $43,08 \text{ kWh}$ ışınlam düşmektedir. Toplamda modül üzerine düşen ışınlam miktarı; $1364,5 \text{ kWh/m}^2 + 43,08 \text{ kWh/m}^2 = 1407,58 \text{ kWh/m}^2$ 'dir. 35 m^2 'lik alana sahip sistemin üzerine düşen ışınlam miktarının enerji karşılığı ise $1407,58 \text{ kWh/m}^2 \times 35 \text{ m}^2 = 49265,3 \text{ kWh}$ olmaktadır.

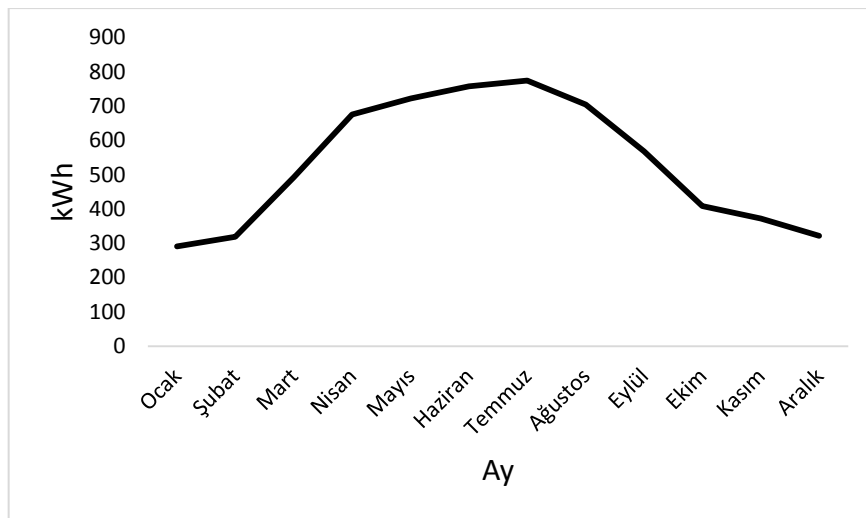
PVSOL simülasyon programında panel teknik özelliklerine göre denklem (5.1) kullanılarak dolum faktörü %15,6 olarak hesaplanmıştır.

$$FF = \frac{V_{mp}^{xl} I_{mp}}{V_{oc}^{xl} I_{sc}} \quad (5.1)$$

Sabit eksenli fotovoltaik sistemin yapılan simülasyon sonuçlarına göre dolum faktörü de göz önünde bulundurularak yıllık; 49265,3 kWh x %15,6 = 7685,3 kWh elektrik enerjisi üretilmektedir. Ancak modül üzerinde meydana gelen kirlilik, nominal modül sıcaklığından sapma, diyot üzerinde oluşan kayıplar, inverter dönüşüm oranı, kablo kaybı, gerilim sapması ve performans uyumunun düşüklüğüne bağlı kayıplar olmasından ötürü yıllık enerji üretimi 6410,5 kWh olmaktadır. Bu kayıp toplam yıllık enerji üretiminin yaklaşık %16'sına tekabül etmektedir. Dolum faktörünün oluşturduğu %15,6'lık elektrik enerjisi üretiminden %16'lık bir kayıp oluşmaktadır. Bu büyüklükte bir sistem için kayıp oranı kabul edilebilirdir [28].

Yıllık 6410,5 kWh üretim yapan sistemin aylara göre enerji üretim eğrisi Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Kurulu gücü 5,2 kWp olan sistemin, kurulu güç başına üretilen yıllık elektrik enerjisini ifade eden spesifik güç verimi;

6410,5 kWh / 5,2 kWp = 1232,7 kWh/kWp olarak PVSOL ile hesap edilmiştir.



Şekil 5.1 Sabit eksenli sistemin aylara göre enerji üretim eğrisi

5,2 kWp gücündeki sabit eksenli fotovoltaik sistem kurulumu için PVSOL ve PVGIS aylık üretim verileri Çizelge 5.1'de karşılaştırılmıştır. PVSOL meteonorm verilerini

kullanırken, PVGIS uydu verilerini kullanmıştır. PVGIS aylık enerji üretim değeri olarak PVSOL'e göre toplamda %7 daha fazla üretim göstermektedir. Aylık üretim değerleri incelendiğinde en yüksek elektrik enerjisi üretiminin Temmuz ayında gerçekleştiği görülmektedir.

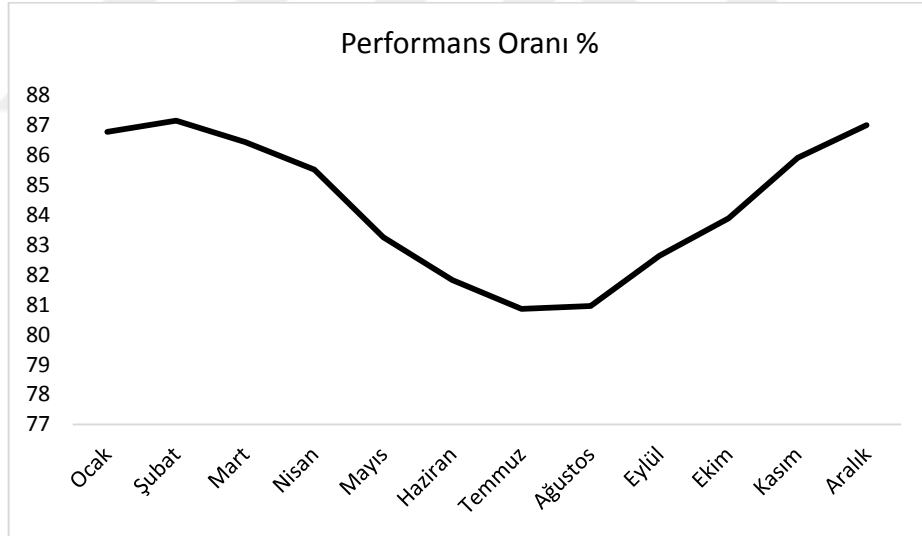
Çizelge 5.1 PVSOL-PVGIS aylık enerji üretim karşılaştırması (sabit eksenli)

Ay	kWh (PVSOL)	kWh (PVGIS)
Ocak	291	309
Şubat	319	350
Mart	493	581
Nisan	676	644
Mayıs	722	773
Haziran	758	773
Temmuz	775	836
Ağustos	705	791
Eylül	568	652
Ekim	409	520
Kasım	372	373
Aralık	322	272
Toplam	6410	6874

Sabit eksenli fotovoltaik sistemin aylık performans değerleri Çizelge 5.2'de gösterilmiş olup, grafiği Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Sistem yılda ortalama % 84,34 performans oranı ile çalışmaktadır. Performans oranı sistemin tasarlanma aşamasındaki performansının sistem parametrelerine göre değişimini ifade etmekte kullanılır. Bu sapma miktarı performans oranının 1'den çıkarılmasıyla bulunmaktadır. Gerçek değerlerin hesaplanan değerlerden verimden bağımsız olarak sapmasını göstermektedir.

Çizelge 5.2 Sabit eksenli sistemin aylık çalışma performansı (%)

Ay	Sistem Performans Oranı (%)
Ocak	86,77
Şubat	87,14
Mart	86,43
Nisan	85,51
Mayıs	83,25
Haziran	81,82
Temmuz	80,86
Ağustos	80,95
Eylül	82,63
Ekim	83,88
Kasım	85,9
Aralık	86,99
Ortalama	84,34

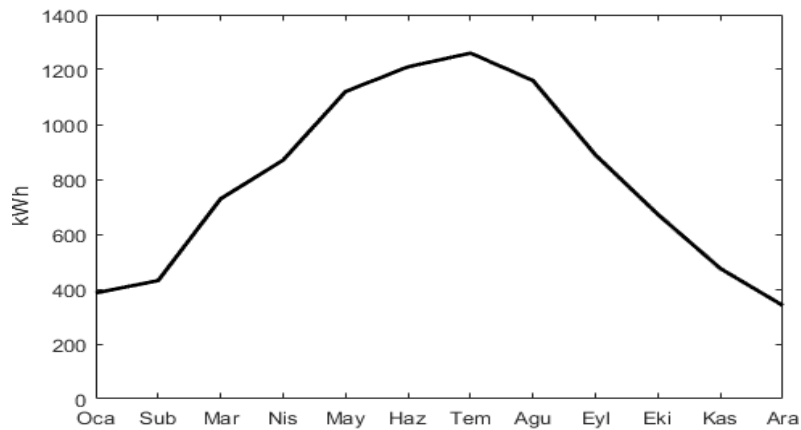


Şekil 5.2 Sabit eksenli sistemin çalışma performansı (%)

5.2.2 5,2 kWp Gücünde Çift Eksenli Güneş Takip Sistemi Simülasyonu

Tasarımı ve uygulaması yapılan 5,2 kWp kurulu güce sahip çift eksenli güneş takip sisteminin simülasyonu PVSOL yazılımı, PVGIS Web Portalı ve Meteonorm hava durumu bilgisi temel alınarak oluşturulmuştur.

Çift eksenli sistem kurulumunun yapıldığı Küçükçekmece Sosyal Tesis'i'nin yatay düzlem üzerine düşen ışıınım miktarı $1364,5 \text{ kWh/m}^2$ olarak belirlenmiştir. Standart spektrum sapması ve modül yansımasının negatif etkileri dahil edildiğinde modül yüzeyinin yönlendirilmesi ve eğimi sayesinde ek olarak m^2 başına $487,92 \text{ kWh}$ ışıınım düşmektedir. Toplamda modül üzerine düşen ışıınım miktarı; $1364,5 \text{ kWh/m}^2 + 487,92 \text{ kWh/m}^2 = 1852,42 \text{ kWh/m}^2$ 'dir. 35 m^2 'lik alana sahip sistemin üzerine düşen ışıınım miktarının enerji karşılığı; $1852,42 \text{ kWh/m}^2 \times 35 \text{ m}^2 = 64834,7 \text{ kWh}$ 'dir. Dolum faktörünün %15,6 olarak hesaplandığı çift eksenli fotovoltaik sistemin yapılan simülasyon sonuçlarına göre yıllık; $64834,7 \text{ kWh} \times \%15,6 = 10114,2 \text{ kWh}$ üretim yapması beklenmektedir. Ancak modül üzerinde meydana gelen kirlilik, nominal modül sıcaklığından sapma, diyot üzerinde oluşan kayıplar, inverter dönüşüm oranı, kablo kaybı, sistem tüketimi, gerilim sapması ve performans uyumunun düşüklüğüne bağlı kayıpların olmasından ötürü yıllık enerji üretimi $8489,4 \text{ kWh}$ olmaktadır. Bu kayıp toplam yıllık enerji üretiminin %16'sına tekabül etmektedir. Bu büyüklükte bir sistem için kayıp oranı kabul edilebilirdir [28]. Yıllık $8489,4 \text{ kWh}$ üretim yapan sistemin aylara göre enerji üretim eğrisi Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Kurulu gücü 5,2 kWp olan sistemin yıllık spesifik güç verimi, $8489,4 \text{ kWh} / 5,2 \text{ kWp} = 1632,5 \text{ kWh/kWp}$ olarak PVSOL ile hesap edilmiştir.



Şekil 5.3 Çift eksenli sistemin aylara göre enerji üretim eğrisi

5,2 kWp gücündeki çift eksenli fotovoltaik sistem kurulumu için PVSOL ve PVGIS aylık üretim verileri Çizelge 5.3'te karşılaştırılmıştır. PVSOL meteonorm verilerini kullanırken, PVGIS uydu verilerini kullanmıştır. PVGIS aylık enerji üretim değeri olarak PVSOL'e göre toplamda %7 daha fazla üretim göstermektedir.

Çizelge 5.3 PVSOL-PVGIS aylık enerji üretim karşılaştırması (çift eksenli)

Ay	kWh (PVSOL)	kWh (PVGIS)
Ocak	394	369
Şubat	431	412
Mart	658	697
Nisan	877	831
Mayıs	940	1070
Haziran	1004	1160
Temmuz	1109	1200
Ağustos	1006	1110
Eylül	658	849
Ekim	538	643
Kasım	503	454
Aralık	371	325
Toplam	8489	9120

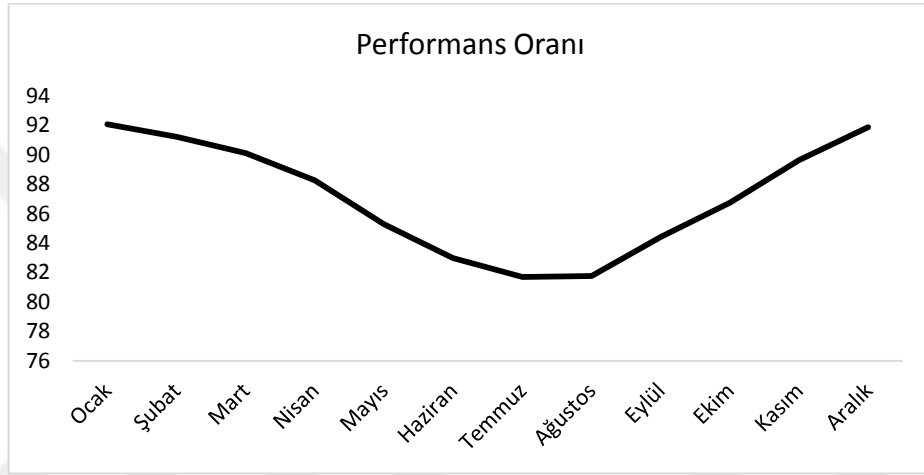
Çift eksenli fotovoltaik sistemin aylık performans değerleri çizelge 5.4'de gösterilmiş olup, grafiği şekil 5.4'de gösterilmiştir. Sistem yılda ortalama % 87,17 verim ile çalışmaktadır. Yüksek üretimin olduğu durumlarda hesaplanan değerden sapma miktarı daha yüksek olmaktadır. Buna bağlı olarak da Temmuz ayında üretim en yüksek olmasına rağmen performans oranı en düşük olarak gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.4 Çift eksenli sistemin aylık çalışma (%) performansı

Ay	Sistem Performans Oranı (%)
Ocak	92,08
Şubat	91,22
Mart	90,13
Nisan	88,28
Mayıs	85,29
Haziran	82,97

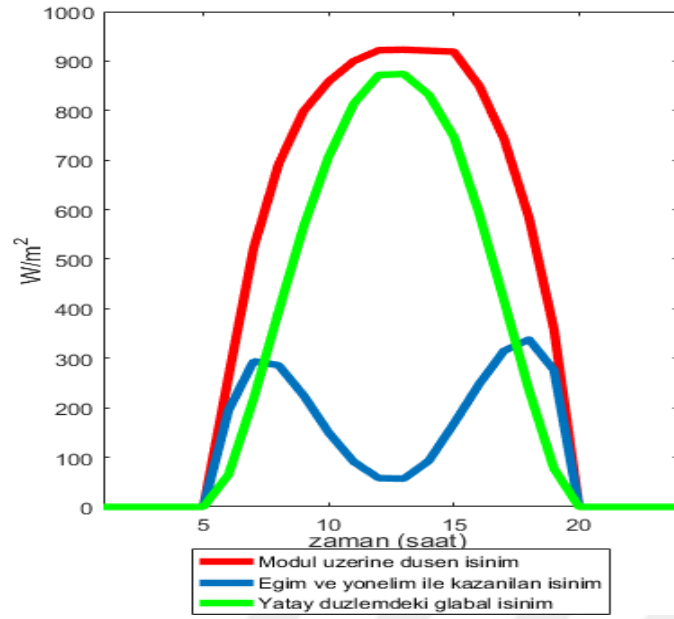
Çizelge 5.4 Çift eksenli sistemin aylık çalışma (%) performansı (devamı)

Temmuz	81,69
Ağustos	81,75
Eylül	84,41
Ekim	86,74
Kasım	89,64
Aralık	91,89
Ortalama	87,17



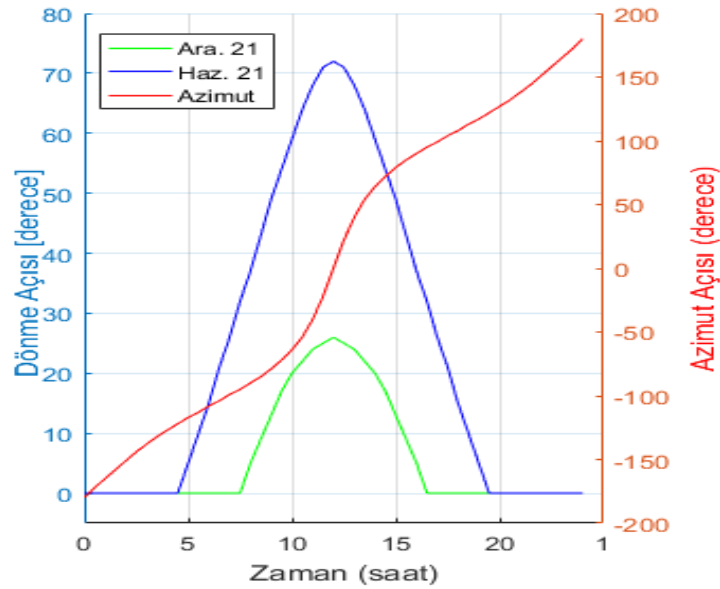
Şekil 5.4 Çift eksenli sistem çalışma performansı (%)

Çift eksenli fotovoltaik sistemin eğimi ve gün ışığına yönelimi modül üzerine düşen ışıının, yatay düzleme düşen ışıının miktarından daha fazla olmasını sağlamıştır. Üzerine 1364,5 kWh/m² ışıının düşen çift eksenli fotovoltaik sistemin eğimi ve yönelimi ile ek olarak 487,92 kWh/m² daha ışıının kazanılmıştır. Sistemde horizontal ışıının yani $487,92 / 1364,5 = \%35,7$ 'sini ışıının kazancı olarak göstermektedir. ışıının kazancı hesabında literatürde ve proje konfigürasyonlarında baz alınan yöntem (kazanılan ışıının)/(ortam ışıını) şeklindedir. Dağlık ve yükseltisi fazla olan bölgelerde ise bu yöntem kümülatif toplam değer kullanılmadığı için sağlıklı olmamaktadır. Toplamda kümülatif ışıının kazancı oranı ise $487,92 / (1364,5+487,92) = \%26,3$ olmaktadır. Bu verim ifadesi kümülatif olduğu için bölgesel farklardan daha az etkilenmektedir. Bu fark Şekil 5.5'te gösterilmektedir. Modül üzerine m² başına düşen ışıının kırmızı, yatay düzleme m² başına düşen ışıının yeşil, eğim ve yönelim ile m² başına kazanılan güç ise mavi olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.5 Eğim ve yönelim ile kazanılan güç yoğunluğu eğrisi

Yukarı değeri $45,40^\circ$ ile sağa değeri $64,85^\circ$ koordinatları arasında ve ITRF-96 Projeksiyon tipine göre dilim orta meridyeni 27, dilim genişliği 6° olan Küçükçekmece Sosyal Tesis'i'ne kurulan çift eksenli fotovoltaik sistemin dönme açısına göre değişen azimut grafiği Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



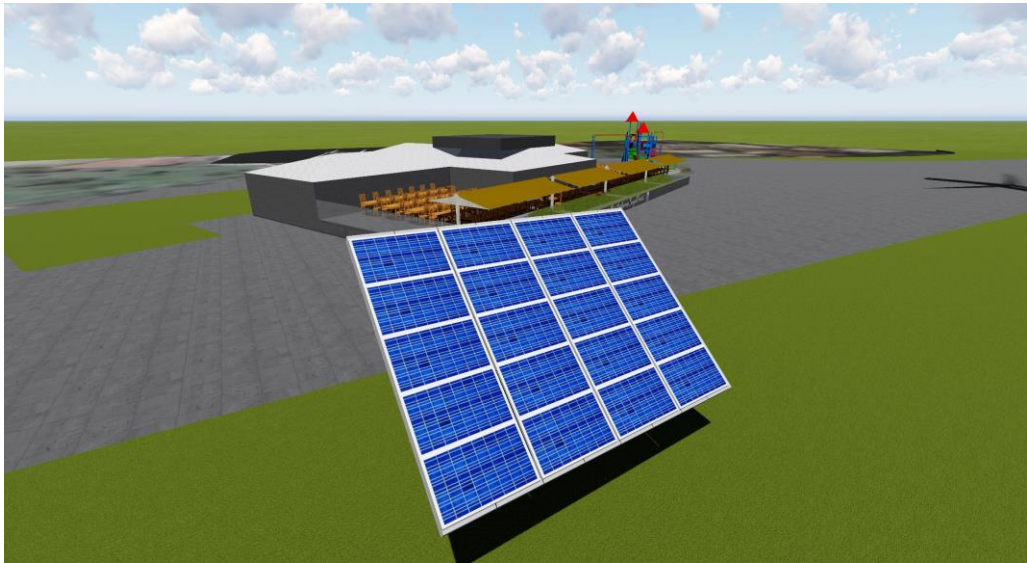
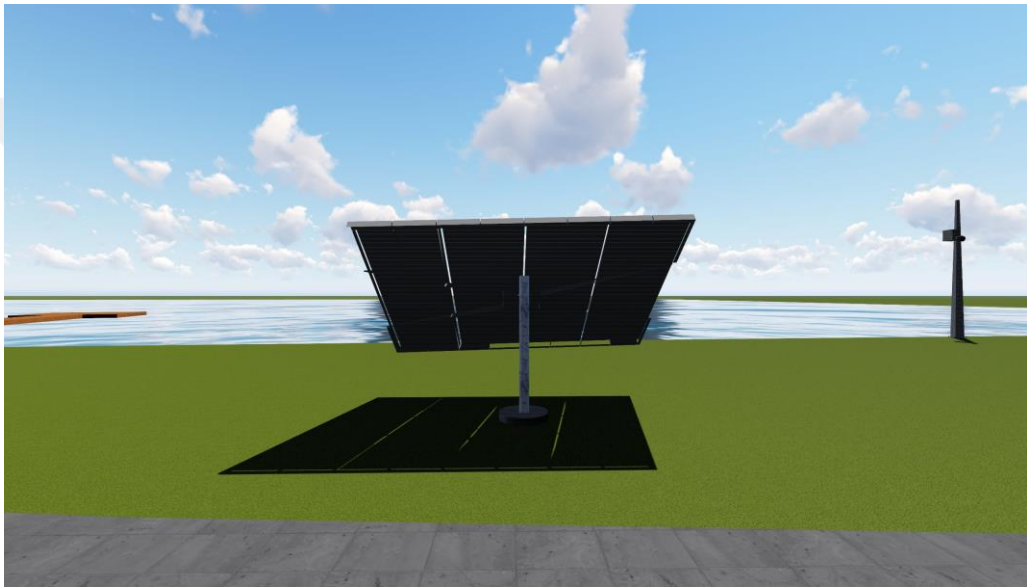
Şekil 5.6 Gündönümlerindeki dönme açısı durumları

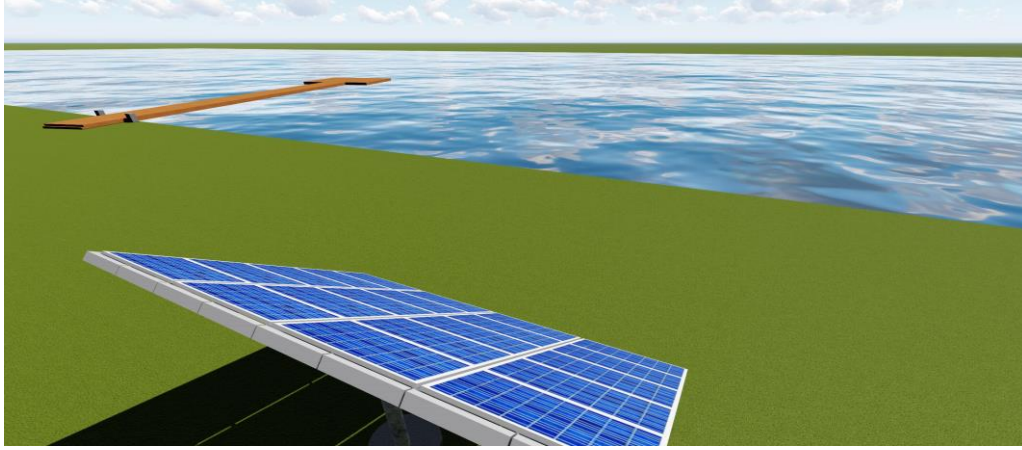
21 Haziran gündönümünde saat 12:30'da sistem güneyden sapma miktarına göre (azimut açısı) 72° döndürme gerçekleştirirken, 21 Aralık gündönümünde saat 12:30'da 25° döndürme gerçekleşmiştir.

Çift eksenli güneş takip sistemi ile ilk yılda toplamda 8489 kWh üretim yapılacak olup, yaklaşık karbon ayak izi, TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu)'ten alınan karbon emisyonu verisine göre; $8489,4 \text{ kWh/yıl} \times 0,52 \text{ kg} = 4,4 \text{ ton CO}_2$ 'dir [29].

Ayrıca kurulacak olan sistem ile ilk yılda EPA (Environmental Protection Agency)'dan alınan veriye göre; $4,4 \text{ ton CO}_2 / 39 \text{ kg CO}_2 = 113$ adet ağaç dikimine eş değer CO₂ salınımı engellenmiş olacaktır [30].

Çift eksenli fotovoltaik sistemin ve tesis üzerindeki görünümü Lumion programı ile çizilmiş olup, görseller Şekil 5.7'de gösterilmiştir.





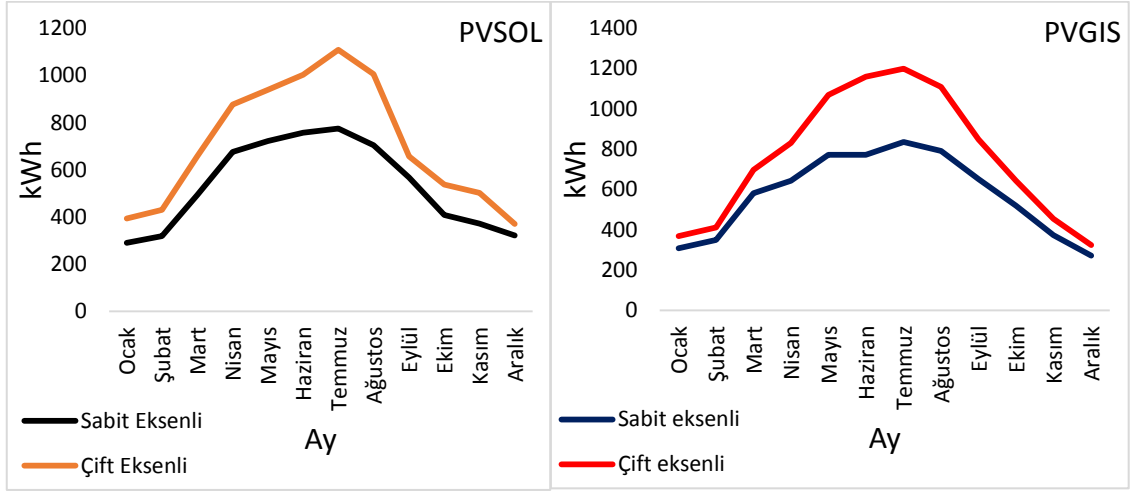
Şekil 5.7 Çift eksenli fotovoltaik sistem çizimleri

5.2.3 Sabit Eksenli Güneş Enerji Sistemi ile Çift Eksenli Güneş Takip Sistemi Karşılaştırması

Simülasyonu yapılan 5,2 kWp kurulu güce sahip sabit eksenli güneş enerji sistemi ile çift eksenli 5,2 kWp gücündeki güneş takip sisteminin aylara göre enerji üretim değerleri PVSOL ve PVGIS simülasyon programları kullanılarak hesap edilmiştir. Çizelge 5.5'te sabit eksenli ve çift eksenli sistemlerin karşılaştırmalı olarak enerji üretim değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.5 PVSOL ve PVGIS kullanılarak oluşturulan 5,2 kWp gücündeki sabit eksenli ve çift eksenli sistemlerin aylara göre enerji üretim karşılaştırmaları

PVSOL ile Aylara göre Enerji Üretim Karşılaştırması			PVGIS ile Aylara göre Enerji Üretim Karşılaştırması		
Ay	KWh (Sabit)	kWh (Çift)	Ay	KWh (Sabit)	kWh (Çift)
Ocak	291	394	Ocak	309	369
Şubat	319	431	Şubat	350	412
Mart	493	658	Mart	581	697
Nisan	676	877	Nisan	644	831
Mayıs	722	940	Mayıs	773	1070
Haziran	758	1004	Haziran	773	1160
Temmuz	775	1109	Temmuz	836	1200
Ağustos	705	1006	Ağustos	791	1110
Eylül	568	658	Eylül	652	849
Ekim	409	538	Ekim	520	643
Kasım	372	503	Kasım	373	454
Aralık	322	371	Aralık	272	325
Toplam	6410	8489	Toplam	6874	9120



Şekil 5.8 PVSOL ve PVGIS simülasyon programları kullanılarak oluşturulan sabit eksenli güneş enerji sistemi ile çift eksenli güneş takip sisteminin aylara göre enerji üretim eğrileri

Her iki simülasyon programının sonuçlarına göre hem sabit hem de çift eksen için Temmuz ayı üretimin en yüksek olduğu aydır. Ancak PVSOL ile yapılan simülasyonda düşük değerli üretimlerde PVGIS'e kıyasla çift ve sabit eksenli sistemlerin ürettiği enerji farkı daha fazla olmaktadır. Sabit eksenli sistem için üretim değeri değişimi, her iki simülasyon programında aylık bazda benzerdir. Çift eksenli sistem için üretim değişimine bakıldığında ise tepe değerlerde PVGIS'in daha yüksek sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu simülasyon sonuçları arasındaki farklar kullandıkları farklı data kaynaklarından ileri gelmektedir. PVSOL kullanılarak analiz edilen çift eksenli güneş takip sisteminin enerji üretimindeki değişim farkı güneş konum takibinin, güneşin görüldüğü aylarda iyi yapılabilmesinden ötürü daha karakteristiktir.

5,2 kWp gücündeki çift eksenli ve sabit eksenli sistemlerin enerji üretimi, kazanç, engellenen karbon salınımı, karşılanan ağaç sayısı, tüketimi karşılanacak hane sayısı gibi verileri bulunmuş olup yıllık bazdaki sonuçlar Çizelge 5.6'da gösterilmiştir. Bu değerler bulunurken, PVSOL sistem kayıplarını da hesaba kattığından dolayı PVGIS yerine PVSOL ile bulunan enerji üretim verisi baz alınmıştır.

Çizelge 5.6 Çift eksenli güneş takip sistemi ile sabit eksenli fotovoltaik sistemin çıkış parametrelerinin kıyaslanması

Eksen Durumu	Enerji Üretimi (kWh/yıl)	Kazanç (TL/yıl)	CO ₂ (ton/yıl)	Ağaç (adet/yıl)	Hane (adet/yıl)
Sabit Eksenli	6410	1922,61	3,33	85,47	4,11
Çift eksenli	8489	2546,19	4,41	113,19	5,45

- Simülasyonları yapılan 5,2 kWp kurulu gücündeki sistemlerin, enerji üretim değerleri kıyaslandığında; çift eksenli güneş takip sisteminin sabit eksenli güneş enerji sistemine göre yıllık $(8489-6410) / 6410 = \% 32$ daha fazla üretim yaptığı görülmektedir.
- Simülasyonların kazanç durumları, Küçükçekmece Sosyal Tesisi'nin elektrik alım birim fiyatı olan 0,29994 TL/kWh'a göre oluşturulmuştur. Bu durumda çift eksenli güneş takip sistemin sabit eksenli sisteme göre yılda $2546,19 - 1922,61 = 623,58$ TL daha fazla getirisi bulunmaktadır.
- Kurulacak güneş enerji sistemleri ile karbon emisyon salınımı da azalacaktır. TÜİK verilerine göre 1 kWh elektrik kullanımı 0,52 kg CO₂ üretmektedir [29]. Çift eksenli güneş takip sistemi yılda 4,41 ton karbon emisyonunun önüne geçerken, sabit eksenli sistem 3,33 ton karbon salınımını engellemektedir. Çift eksenli sistem sabit eksenli güneş enerji sistemine göre yılda $4,41 - 3,33 = 1,08$ ton daha fazla karbon salınımını engellemektedir.
- Azaltılan karbon emisyonunun ağaç eş değeri ise EPA verilerine göre 1 kg CO₂ için 1/39 adet ağaç olarak hesap edilmiştir [30]. Çift eksenli sistem ile elde edilen ağaç eşdeğer kazanımı sabit eksenli sisteme göre yılda 27,72 adet daha fazladır.
- Bir adet hane TÜİK verilerine göre yılda ortalama 1559 kWh elektrik tüketmektedir [29]. Çift eksenli güneş takip sistemi sabit eksenli güneş enerji sistemine göre yılda $5,45 - 4,11 = 1,34$ adet daha fazla hanenin elektrik tüketimini karşılamaktadır.

5.2.4 Çift Eksenli Güneş Takip Sisteminin Farklı Panel ve İnverter Markaları Kullanılarak Oluşturulan Enerji Üretim ve Maliyet Analizi

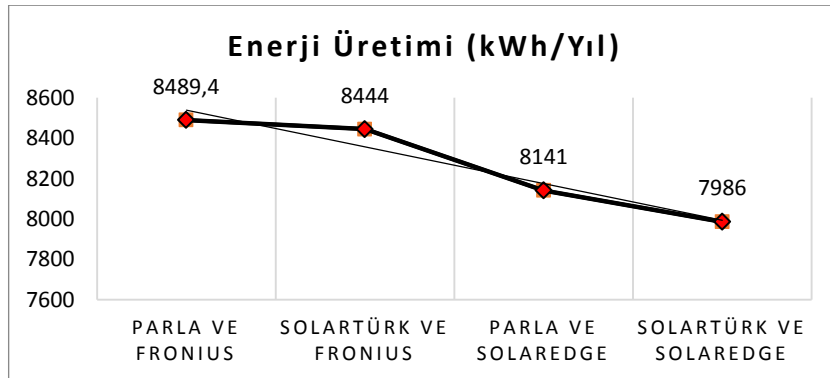
Küçükçekmece Sosyal Tesisi çift eksenli güneş takip sistemi uygulamasında Bereket Parla serisi güneş paneli ve Fronius marka inverter tercih edilmiştir. Bu tercihler belirlenirken sistemler arası performans uyumu, enerji üretimi ve maliyet gibi analiz çalışmaları yapılmıştır. Bu başlıkta farklı panel markalarından Solartürk Anatolia serisi güneş paneli ve Solaredge marka inverter verileri kullanılarak yapılan karşılaştırmaya yer verilmiştir.

Parla ve Solartürk güneş panelleri ile Fronius ve Solaredge marka inverterler aralarında eşleştirilerek enerji üretimi, performans oranları, spesifik güç yoğunluğu ve engellenen CO₂ salınımları kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamalar Çizelge 5.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.7 Güneş paneli ve inverter bazlı üretim çıkış parametlerinin karşılaştırılması

Eşleşmeler	Enerji Üretimi	Performans Oranı	Spesifik Güç Yoğunluğu	Engellenen CO2 Emisyonu
Parla ve Fronius	8489,4 kWh/yıl	87,17%	1632,5 kWh/kWp	4414,5 kg/yıl
Solartürk ve Fronius	8444 kWh/yıl	85,90%	1623 kWh/kWp	4390,9 kg/yıl
Parla ve Solaredge	8141 kWh/yıl	82,80%	1565,6 kWh/kWp	4233,3 kg/yıl
Solartürk ve Solaredge	7986 kWh/yıl	81,20%	1535,7 kWh/kWp	4152,7 kg/yıl

5,2 kWp’lik sistem için yıllık bazda yapılan simülasyon neticesinde enerji üretim analizi yapıldığında, en iyi uyumun Parla serisi güneş paneli ile Fronius marka inverter arasında olduğu görülmektedir. Eşleşmeler arası enerji üretim eğrisi Şekil 5.9’da gösterilmiştir.



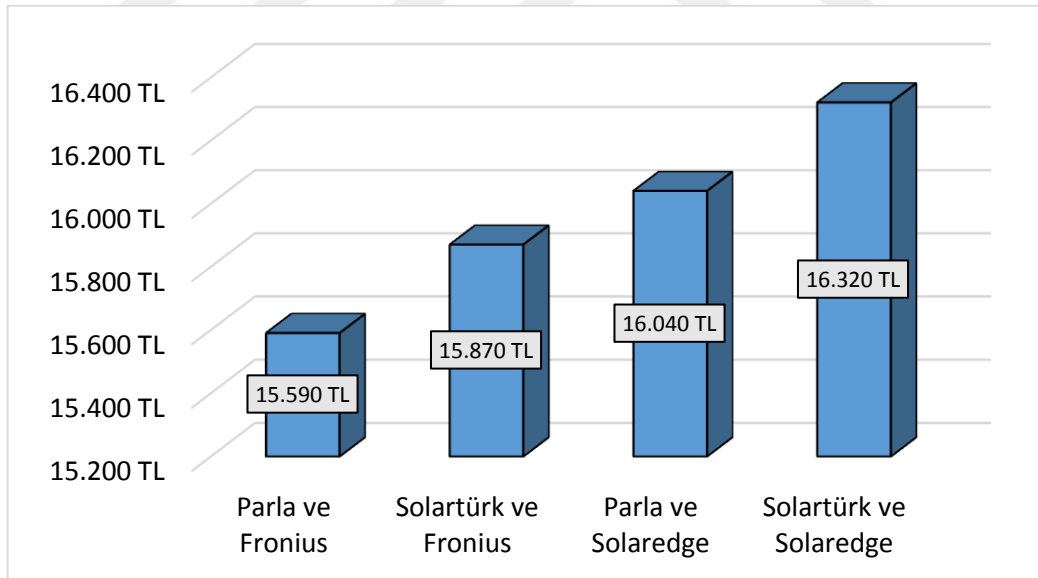
Şekil 5.9 Farklı güneş paneli ve inverter markaları kullanılarak alınan enerji üretim eğrisi

5,2 kWp gücündeki çift eksenli güneş takip sisteminde kullanılan 20 adet güneş paneli ve 1 adet inverter için farklı markalarla oluşturulan maliyet analizi 2016 verilerine göre; Bereket Parla serisi güneş paneli, Solartürk Anatolia serisi güneş paneli, Fronius ve Solaredge marka inverterler kullanılarak oluşturulmuştur. Maliyet tablosu Çizelge 5.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.8 5,2 kWp çift eksenli güneş takip sistemi için güneş paneli ve inverter bazlı maliyet analizi

Enerji Üretim Elemanı	Marka	Adet	Birim Maliyet	Toplam Maliyet
Güneş Paneli	Parla	20	513 TL	10.260 TL
	Solartürk	20	527 TL	10.540 TL
İnverter	Fronius	1	5.330 TL	5.330 TL
	Solaredge	1	5.780 TL	5.780 TL

Güneş paneli ve inverter grupları incelendiğinde ortaya çıkan maliyet analizinde en uygun maliyetin Bereket Parla serisi güneş paneli ve Fronius marka inverterde olduğu görülmüştür. Toplam maliyetler Şekil 5.10’da gösterilmiştir.



Şekil 5.10 5,2 kWp gücündeki çift eksenli güneş takip sistemi için güneş paneli ve inverter bazlı toplam maliyetler

Parla ve Fronius eşleşmesinin hem maliyet hem de enerji üretimi açısından en optimum seçim olduğu görülmüştür. Bu tez çalışmasında bu optimum çözüm kullanılmıştır.

ÇİFT EKSENLİ FOTOVOLTAİK SİSTEMİN UYGULAMASI

Uygulaması Küçükçekmece Sosyal Tesisi'ne yapılan Bölüm 4'te detaylı proje bilgileri verilen 5,2 kWp gücündeki çift eksenli güneş takip sisteminin Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarındaki üretim verileri izlenmiş olup, bu üç aylık verilere göre net üretilen enerji, kazanç, engellenen CO₂ emisyonu, karşılanan ağaç ve tüketimi karşılanacak hane sayısı gibi değerler bulunmuştur. Aşağıda tesise ait uygulama görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 6.1 Uygulama görüntüsü

Çizelge 6.1 Çift eksenli güneş takip sisteminin 3 aylık (Temmuz, Ağustos, Eylül) veri çıktıları

Tarih	Sıcaklık (°C)	Hava Durumu	Üretilen Enerji (kWh)	Kazanç (TL)	CO2 (kg)	Ağaç (Adet)	Hane (Adet)
01.07.2017	35	Güneşli	40,7	12,21	21,16	0,54	0,03
02.07.2017	34	Parçalı Bulutlu	37,67	11,30	19,59	0,50	0,02
03.07.2017	32	Parçalı Bulutlu	44,9	13,47	23,35	0,60	0,03
04.07.2017	25	Parçalı Bulutlu	32,19	9,66	16,74	0,43	0,02
05.07.2017	27	Güneşli	46,84	14,05	24,36	0,62	0,03
06.07.2017	28	Güneşli	53,38	16,01	27,76	0,71	0,03
07.07.2017	27	Güneşli	47,76	14,33	24,84	0,64	0,03
08.07.2017	27	Güneşli	52,91	15,87	27,51	0,71	0,03
09.07.2017	31	Güneşli	48,83	14,65	25,39	0,65	0,03
10.07.2017	29	Güneşli	45,52	13,65	23,67	0,61	0,03
11.07.2017	30	Güneşli	53,73	16,12	27,94	0,72	0,03
12.07.2017	29	Güneşli	49,91	14,97	25,95	0,67	0,03
13.07.2017	31	Güneşli	43,91	13,17	22,83	0,59	0,03
14.07.2017	27	Parçalı Bulutlu	22,01	6,60	11,45	0,29	0,01
15.07.2017	27	Parçalı Bulutlu	45,05	13,51	23,43	0,60	0,03
16.07.2017	27	Parçalı Bulutlu	31,32	9,39	16,29	0,42	0,02
17.07.2017	27	Bulutlu	7,28	2,18	3,79	0,10	0,00
18.07.2017	23	Bulutlu	18,11	5,43	9,42	0,24	0,01
19.07.2017	26	Parçalı Bulutlu	49,52	14,85	25,75	0,66	0,03
20.07.2017	28	Güneşli	51,9	15,57	26,99	0,69	0,03
21.07.2017	27	Parçalı Bulutlu	42,32	12,69	22,01	0,56	0,03
22.07.2017	31	Parçalı Bulutlu	50,64	15,19	26,33	0,68	0,03
23.07.2017	33	Parçalı Bulutlu	48,14	14,44	25,03	0,64	0,03
24.07.2017	31	Güneşli	47,89	14,36	24,90	0,64	0,03
25.07.2017	33	Güneşli	44,83	13,45	23,31	0,60	0,03

Çizelge 6.1 Çift eksenli güneş takip sisteminin 3 aylık (Temmuz, Ağustos, Eylül) veri çıktıları (devamı)

26.07.2017	33	Güneşli	45,49	13,64	23,65	0,61	0,03
27.07.2017	31	Parçalı Bulutlu	36,31	10,89	18,88	0,48	0,02
28.07.2017	28	Parçalı Bulutlu	35,24	10,57	18,32	0,47	0,02
29.07.2017	27	Parçalı Bulutlu	49,31	14,79	25,64	0,66	0,03
30.07.2017	31	Parçalı Bulutlu	23,1	6,93	12,01	0,31	0,01
31.07.2017	28	Parçalı Bulutlu	40,18	12,05	20,89	0,54	0,03
Tarih	Sıcaklık (°C)	Hava Durumu	Üretilen Enerji (kWh)	Kazanç (TL)	CO2 (kg)	Ağaç (Adet)	Hane (Adet)
01.08.2017	31	Parçalı Bulutlu	37,15	11,14	19,32	0,50	0,02
02.08.2017	29	Parçalı Bulutlu	33,89	10,16	17,62	0,45	0,02
03.08.2017	31	Parçalı Bulutlu	38,39	11,51	19,96	0,51	0,02
04.08.2017	33	Parçalı Bulutlu	33,60	10,08	17,47	0,45	0,02
05.08.2017	36	Parçalı Bulutlu	40,71	12,21	21,17	0,54	0,03
06.08.2017	35	Parçalı Bulutlu	42,36	12,70	22,02	0,56	0,03
07.08.2017	32	Parçalı Bulutlu	39,45	11,83	20,51	0,53	0,03
08.08.2017	29	Parçalı Bulutlu	13,26	3,98	6,89	0,18	0,01
09.08.2017	30	Parçalı Bulutlu	29,06	8,72	15,11	0,39	0,02
10.08.2017	30	Güneşli	43,79	13,13	22,77	0,58	0,03
11.08.2017	32	Parçalı Bulutlu	43,88	13,16	22,82	0,59	0,03
12.08.2017	32	Güneşli	44,85	13,45	23,32	0,60	0,03
13.08.2017	30	Güneşli	40,83	12,25	21,23	0,54	0,03
14.08.2017	28	Parçalı Bulutlu	35,74	10,72	18,58	0,48	0,02
15.08.2017	26	Parçalı Bulutlu	29,33	8,80	15,25	0,39	0,02

Çizelge 6.1 Çift eksenli güneş takip sisteminin 3 aylık (Temmuz, Ağustos, Eylül) veri çıktıları (devamı)

16.08.2017	26	Parçalı Bulutlu	28,35	8,50	14,74	0,38	0,02
17.08.2017	25	Parçalı Bulutlu	36,14	10,84	18,79	0,48	0,02
18.08.2017	27	Parçalı Bulutlu	42,38	12,71	22,04	0,57	0,03
19.08.2017	29	Parçalı Bulutlu	37,53	11,26	19,51	0,50	0,02
20.08.2017	26	Parçalı Bulutlu	34,12	10,23	17,74	0,45	0,02
21.08.2017	26	Bulutlu	22,28	6,68	11,58	0,30	0,01
22.08.2017	23	Bulutlu	7,79	2,34	4,05	0,10	0,00
23.08.2017	26	Parçalı Bulutlu	28,08	8,42	14,60	0,37	0,02
24.08.2017	27	Parçalı Bulutlu	43,71	13,11	22,73	0,58	0,03
25.08.2017	26	Parçalı Bulutlu	47,78	14,33	24,85	0,64	0,03
26.08.2017	28	Parçalı Bulutlu	40,78	12,23	21,21	0,54	0,03
27.08.2017	28	Parçalı Bulutlu	36,30	10,89	18,88	0,48	0,02
28.08.2017	31	Güneşli	45,75	13,72	23,79	0,61	0,03
29.08.2017	30	Parçalı Bulutlu	37,94	11,38	19,73	0,51	0,02
30.08.2017	26	Parçalı Bulutlu	31,64	9,49	16,45	0,42	0,02
31.08.2017	24	Parçalı Bulutlu	39,64	11,89	20,61	0,53	0,03
Tarih	Sıcaklık (°C)	Hava Durumu	Üretilen Enerji (kWh)	Kazanç (TL)	CO2 (kg)	Ağaç (Adet)	Hane (Adet)
01.09.2017	26	Güneşli	46,29	13,88	24,07	0,62	0,03
02.09.2017	30	Güneşli	45,47	13,64	23,64	0,61	0,03
03.09.2017	28	Güneşli	46,60	13,98	24,23	0,62	0,03
04.09.2017	27	Güneşli	43,48	13,04	22,61	0,58	0,03
05.09.2017	25	Parçalı Bulutlu	38,07	11,42	19,80	0,51	0,02
06.09.2017	24	Parçalı Bulutlu	28,13	8,44	14,63	0,38	0,02
07.09.2017	27	Güneşli	44,42	13,32	23,10	0,59	0,03

Çizelge 6.1 Çift eksenli güneş takip sisteminin 3 aylık (Temmuz, Ağustos, Eylül) veri çıktıları (devamı)

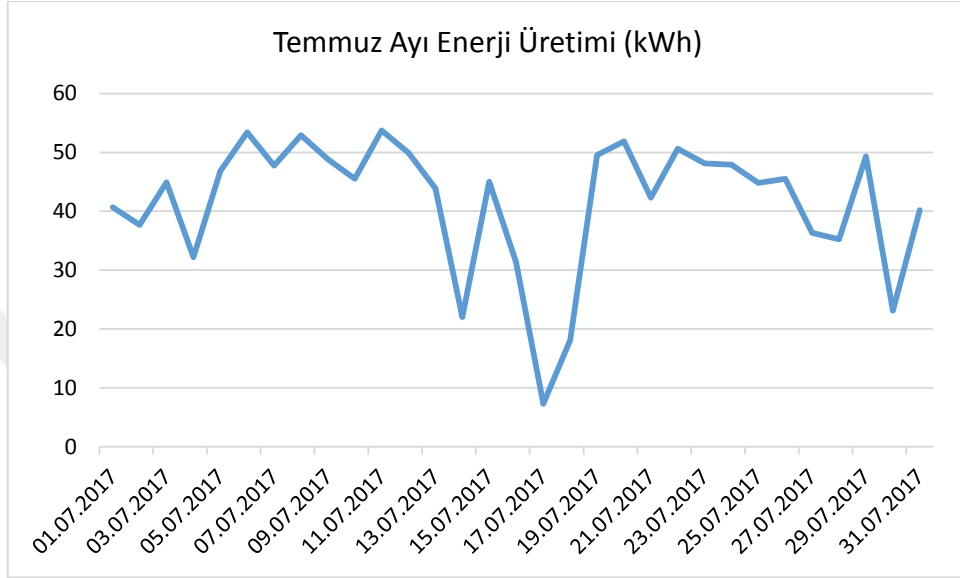
08.09.2017	29	Parçalı Bulutlu	42,53	12,76	22,12	0,57	0,03
09.09.2017	27	Parçalı Bulutlu	38,70	11,61	20,12	0,52	0,02
10.09.2017	32	Parçalı Bulutlu	34,90	10,47	18,15	0,47	0,02
11.09.2017	30	Güneşli	38,23	11,47	19,88	0,51	0,02
12.09.2017	29	Güneşli	40,87	12,26	21,25	0,54	0,03
13.09.2017	28	Güneşli	41,66	12,50	21,66	0,56	0,03
14.09.2017	27	Güneşli	35,49	10,64	18,45	0,47	0,02
15.09.2017	28	Güneşli	39,80	11,94	20,70	0,53	0,03
16.09.2017	28	Bulutlu	24,80	7,44	12,90	0,33	0,02
17.09.2017	28	Güneşli	30,48	9,14	15,85	0,41	0,02
18.09.2017	29	Parçalı Bulutlu	32,66	9,80	16,98	0,44	0,02
19.09.2017	29	Güneşli	37,72	11,31	19,61	0,50	0,02
20.09.2017	29	Güneşli	35,40	10,62	18,41	0,47	0,02
21.09.2017	26	Bulutlu	26,07	7,82	13,56	0,35	0,02
22.09.2017	22	Parçalı Bulutlu	30,36	9,11	15,79	0,40	0,02
23.09.2017	23	Güneşli	39,70	11,91	20,64	0,53	0,03
24.09.2017	25	Parçalı Bulutlu	33,34	10,00	17,34	0,44	0,02
25.09.2017	25	Bulutlu	24,08	7,22	12,52	0,32	0,02
26.09.2017	25	Bulutlu	16,81	5,04	8,74	0,22	0,01
27.09.2017	23	Parçalı Bulutlu	30,08	9,02	15,64	0,40	0,02
28.09.2017	22	Bulutlu	14,48	4,34	7,53	0,19	0,01
29.09.2017	19	Bulutlu	3,80	1,14	1,97	0,05	0,00
30.09.2017	20	Bulutlu	3,88	1,16	2,02	0,05	0,00

6.1 Üretim Verilerinin Aylık Bazda İncelenmesi

İstanbul Büyükşehir Belediyesi Küçükçekmece Sosyal Tesisi için tasarlanan ve kurulumu gerçekleştirilen 5,2 kWp'lik çift eksenli güneş takip sisteminin 3 ay boyunca enerji üretimi izlenmiş olup, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarındaki üretim verileri incelenmiştir. Aşağıda bu aylar için 3 aylık enerji üretimi ve karşılanan fatura giderleri hesaplanmış ve bir sonraki bölümde hesaplanan değerler karşılaştırılmıştır.

6.1.1 Güneş Takip Sisteminin Temmuz Ayı Verileri

14 günün güneşli, 15 günün parçalı bulutlu ve 2 günün bulutlu geçtiği Temmuz ayına ait, Küçükçekmece Sosyal Tesis'i'nin ortalama ortam sıcaklığı 29,1 °C'dir. 01.07.2017-31.07.2017 tarihleri arasında üretim verileri izlenen sistem için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiş ve Şekil 6.2'de sunulmuştur.



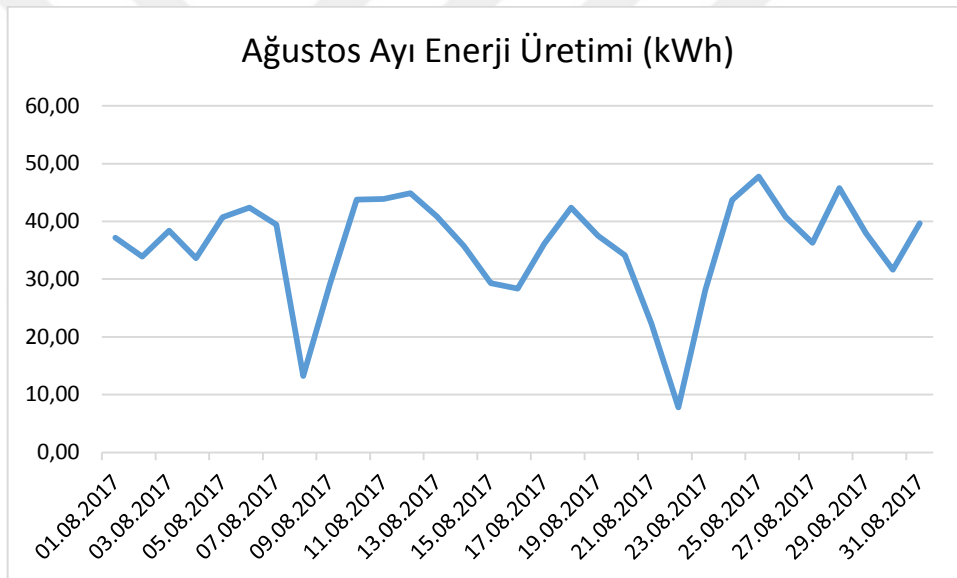
Şekil 6.2 Temmuz ayı enerji üretim değerleri

- Temmuz ayı boyunca alınan üretim verileri incelendiğinde sistemin günlük ortalama 41,51 kWh üretim yaptığı görülmüştür. Temmuz ayı boyunca ise toplamda 1286,89 kWh enerji üretilmiştir.
- Temmuz için üretilen enerjiye karşılık gelen kazanç değeri günde ortalama 12,45 TL'dir. Temmuz ayı boyunca ise toplamda 385,99 TL kazanç elde edilmiştir. Tesise ait 2016 yılındaki Temmuz ayı elektrik faturası incelendiğinde sosyal tesise 4341,35 TL fatura geldiği görülmektedir. Sistemin bu üretim değeri ile tesise ait faturanın %8,8'ini karşıladığı görülmektedir.
- 5,2 kWp'lik sistemi ile üretilen elektrik enerjisinin eşdeğeri olarak engellenen CO₂ emisyonu incelendiğinde günlük ortalama 21,59 kg CO₂ salınımı engellenmiştir. Toplamda ise aylık 669,18 kg CO₂'ye karşılık gelen emisyon engellenmiştir.

- CO₂ eş değeri karşılanan ağaç sayısı günlük ortalama 0,55 adettir. Aylık toplamda ise 17,16 adet ağaca eşdeğer enerji üretimi yapılmıştır [30].
- Tüketimi karşılanacak hane sayısı günde ortalama 0,03 adettir. Toplamda ise Temmuz ayı boyunca 0,83 adet hanenin yıllık tüketimine eş değer üretim yapılmıştır [29].

6.1.2 Güneş Takip Sisteminin Ağustos Ayı Verileri

4 günün güneşli, 25 günün parçalı bulutlu ve 2 günün bulutlu geçtiği Ağustos ayına ait olduğu Küçükçekmece Sosyal Tesis'i'nin ortalama ortam sıcaklığı 28,8 °C'dir. 01.08.2017-31.08.2017 tarihleri arasında üretim verileri izlenen sistem için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiş ve Şekil 6.3'te gösterilmiştir.



Şekil 6.3 Ağustos ayı enerji üretim değerleri

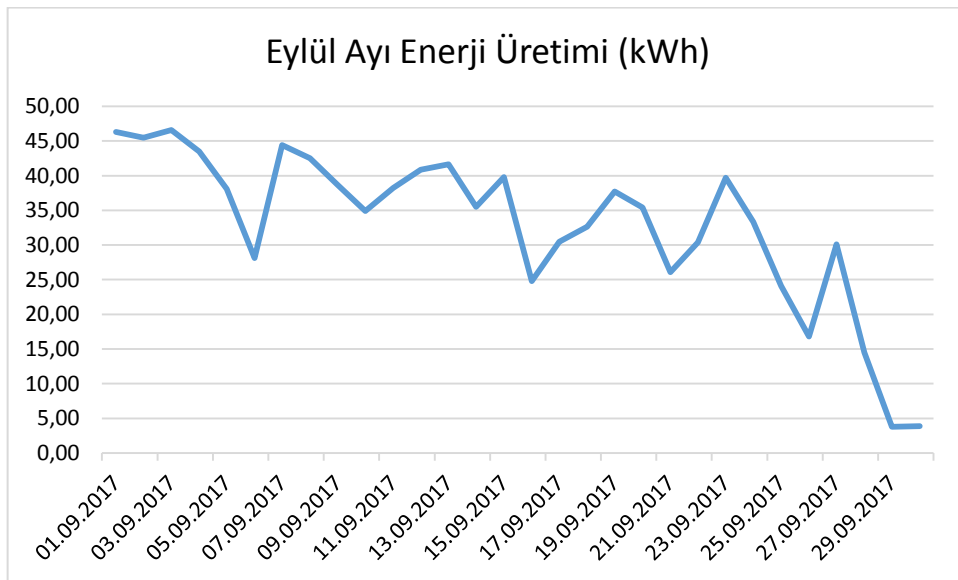
- Ağustos ayı boyunca alınan üretim verileri incelendiğinde sistemin günlük ortalama 35,69 kWh üretim yaptığı görülmüştür. Ağustos ayı boyunca ise toplamda 1106,45 kWh enerji üretilmiştir.
- Ağustos için üretilen enerjiye karşılık gelen kazanç değeri günde ortalama 10,71 TL'dir. Ağustos ayı boyunca ise toplamda 331,87 TL kazanç elde edilmiştir. Tesise ait 2016 yılındaki Ağustos ayı elektrik faturası incelendiğinde sosyal

tesise 4674,27 TL fatura geldiği görülmektedir. Sistemin bu üretim değeri ile tesise ait faturanın %7'sini karşıladığı görülmektedir.

- 5,2 kWp'lik sistem ile engellenen CO₂ emisyonu incelendiğinde günlük ortalama 18,56 kg CO₂ salınımı engellenmiştir. Toplamda ise aylık 575,35 kg CO₂'ye karşılık gelen emisyon engellenmiştir.
- CO₂ eş değeri karşılanan ağaç sayısı günlük ortalama 0,48 adettir. Aylık toplamda ise 14,75 adet ağaca eşdeğer enerji üretimi yapılmıştır [30].
- Tüketimi karşılanacak hane sayısı günde ortalama 0,02 adettir. Toplamda ise Ağustos ayı boyunca 0,71 adet hanenin yıllık tüketimine eş değer üretim yapılmıştır [29].

6.1.3 Güneş Takip Sisteminin Eylül Ayı Verileri

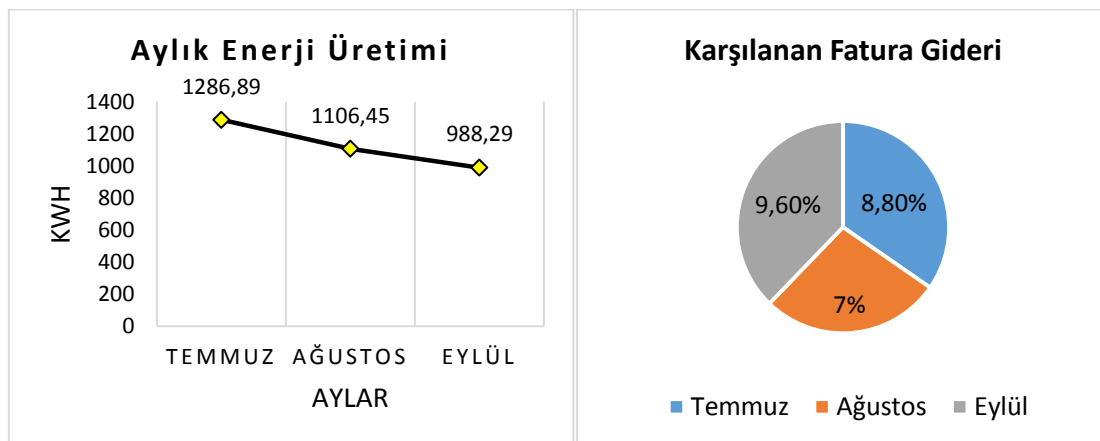
14 günün güneşli, 9 günün parçalı bulutlu ve 7 günün bulutlu olduğu Küçükçekmece Sosyal Tesis'i'nin Eylül ayına ait ortalama ortam sıcaklığı 26,3 °C'dir. 01.09.2017-30.09.2017 tarihleri arasında üretim verileri izlenen sistem için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiş olup Şekil 6.4'te gösterilmiştir.



Şekil 6.4 Eylül ayı enerji üretim değerleri

- Eylül ayı boyunca alınan üretim verileri incelendiğinde sistemin günlük ortalama 32,94 kWh üretim yaptığı görülmüştür. Eylül ayı boyunca ise toplamda 988,29 kWh enerji üretilmiştir.
- Eylül için üretilen enerjiye karşılık gelen kazanç değeri günde ortalama 9,88 TL'dir. Eylül ayı boyunca ise toplamda 296,43 TL kazanç elde edilmiştir. Tesise ait 2016 yılındaki Eylül ayı elektrik faturası incelendiğinde sosyal tesise 3070,26 TL fatura geldiği görülmektedir. Sistemin bu üretim değeri ile tesise ait faturanın %9,6'sını karşıladığı görülmektedir.
- 5,2 kWp'lik sistem ile engellenen CO₂ emisyonu incelendiğinde günlük ortalama 17,13 kg CO₂ salınımı engellenmiştir. Toplamda ise aylık 513,91 kg CO₂'ye karşılık gelen emisyon engellenmiştir.
- CO₂ eş değeri karşılanan ağaç sayısı günlük ortalama 0,44 adettir. Aylık toplamda ise 13,18 adet ağaca eşdeğer enerji üretimi yapılmıştır [30].
- Tüketimi karşılanacak hane sayısı günde ortalama 0,02 adettir. Toplamda ise Eylül ayı boyunca 0,63 adet hanenin yıllık tüketimine eş değer üretim yapılmıştır [29].

Aylık bazda veriler incelendiğinde en fazla üretimin temmuz ayında yapıldığı görülmektedir. Ancak tesis tüketiminin temmuz ayında fazla olmasından kaynaklı karşılanan fatura gideri %8,8'dir.



Şekil 6.5 Çift eksenli güneş takip sisteminin 3 aylık enerji üretimi ve karşılanan fatura giderleri

Eylül ayında üretimin Temmuz ve Ağustos aylarından düşük olmasına rağmen tesisin düşen tüketim gideri ile fatura giderinin %9,6'sı sistemdeki enerji üretimi sayesinde karşılanmıştır. Aylık enerji üretim değerleri ve karşılanan fatura giderleri Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Işımanın en yoğun olduğu ay olan Temmuz'a ait veriler dikkate alındığında çift eksenli güneş takip sisteminin seçilmesi ve doğru bir şekilde projelendirilmesi sonucunda diğer aylara nazaran yüksek üretim değeri görülmüştür. Çift eksenli güneş takip sisteminin eğim ve gün ışığına yönelimi panel üzerine düşen ışıınım değerinin yatay düzleme düşen ışıınım değerinden fazla olmasını sağlaması nedeniyle, özellikle ışımanın yoğun olduğu durumlarda sistemin daha yüksek verime ulaştığı görülmektedir.

6.2 Güneş Takip Sistemi Uygulamasına Ait 3 Aylık Üretim Değerinin Simülasyon Değerleri ile Karşılaştırılması

5,2 kWp kurulu gücüne sahip çift eksenli güneş takip sisteminin temmuz, ağustos ve eylül ayları boyunca izlemesi yapılmış olup, uygulama sonuçlarından elde edilen üretim değerleri PVSOL ve PVGIS simülasyon programları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonuçları Çizelge 6.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.2 Sabit ve çift eksenli sistemin PVGIS, PVSOL ve uygulama değerleri ile 3 aylık enerji üretim analizi

Enerji Üretim Değerleri (kWh)			
Metodlar	Temmuz Ayı	Ağustos Ayı	Eylül Ayı
Sabit Eksenli (PVGIS)	836	791	652
Çift Eksenli (PVGIS)	1200	1110	849
Sabit Eksenli (PVSOL)	775	705	568
Çift Eksenli (PVSOL)	1109	1006	658
Çift Eksenli (Uygulama)	1286,89	1106,45	988,29

- Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen uygulama sistemi ile PVGIS simülasyon programı kullanılarak oluşturulan sabit eksenli sistem karşılaştırıldığında, çift eksenli sistem Temmuz ayında %53 daha fazla üretim yapmıştır. Ağustos ayında %39,8, eylül ayında ise bu değer %51,5 olarak görülmektedir. Sonuçlardan görüldüğü üzere sabit eksenli sistemin üretim potansiyeli daha düşük olmakla

birlikte daha önce yapılan literatür çalışmalarında bahsedildiği gibi %64 seviyelerine kadar ulaşabilmektedir.

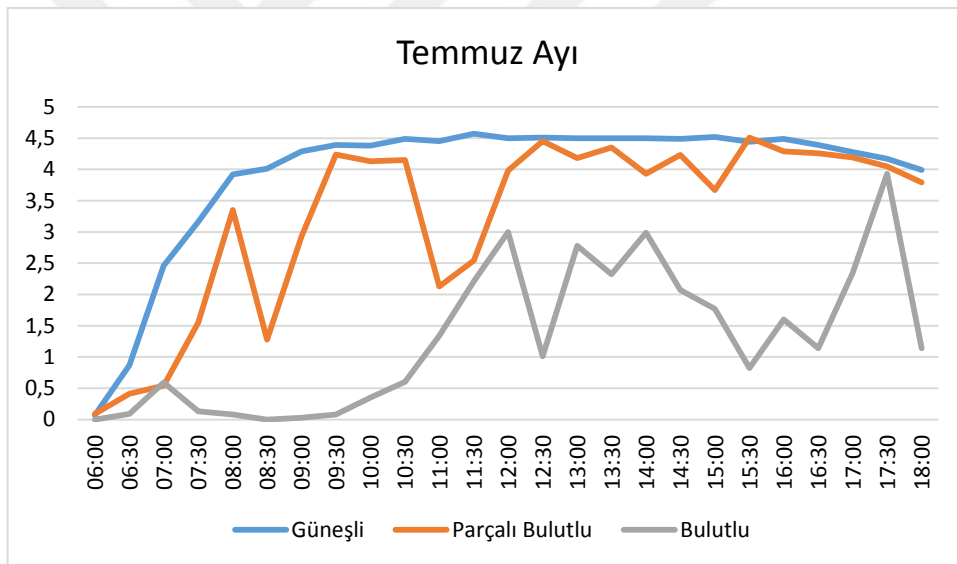
- Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen çift eksenli uygulama sistemi ile PVGIS simülasyon programı kullanılarak oluşturulan çift eksenli sistem karşılaştırıldığında, çift eksenli sistem Temmuz ayında %7,2 daha fazla üretim vermiştir. Ağustos ayında PVGIS ile bulunan enerji değeri uygulama verisine göre daha yüksek görülmektedir. Bu fark yaklaşık 3,5 kWh olup, takriben 42 dakika boyunca modülün tam yükte maruz kaldığı ışınım karşılık gelen değerdir. Bu sapma kayda değer etki göstermemektedir. Eylül ayında ise uygulama verisi PVGIS kullanılarak oluşturulan çift eksenli sisteme göre %16,4 daha fazla üretim yapmaktadır. Alınan bu uygulama ve simülasyon sonuçlarına göre çift eksenli güneş takip sistemi uygulamasına en yakın optimizasyonun çift eksenli PVGIS simülasyon programı ve çift eksenli uygulama sonuçları arasında olduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarından alınan değerlere bakıldığında ortaya çıkan PVGIS ve PVSOL programları arasındaki üretim farkının ve de PVSOL'ün PVGIS'ten daha az üretim yapmasının sebebi farklı meteorolojik bilgileri kullanması ve detaylandırmasından kaynaklandığı görülmektedir.
- Temmuz ayında çift eksenli sistem uygulaması, PVSOL simülasyon programı kullanılarak oluşturulan sabit eksenli sisteme göre %66 daha fazla üretim yapmıştır. Ağustos ayında %56,9, Eylül ayında ise %73 daha fazla üretim yapıldığı görülmektedir. Çift eksenli uygulama sisteminin sabit eksenli sisteme göre avantajlarından kaynaklanan etkilerin dışında bu yüksek değerlerdeki sapmalara neden olan bir diğer etki ise PVSOL ve PVGIS'in farklı meteorolojik veriler kullanması ve detaylandırmasıdır.
- Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen çift eksenli uygulama sistemi; PVSOL simülasyon programı kullanılarak oluşturulan çift eksenli sisteme göre temmuz ayında %16 daha fazla üretim yapmaktadır. Ağustos ayında %9,9, Eylül ayında ise %50 daha fazla üretim yapıldığı görülmüştür. Bu farkın PVSOL programının kullandığı verilerde ışınım oranlarının Eylül ayında az tutulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Alınan değerler ortaya çıkarmıştır ki uygulama sistemine ait gerçek veriler; simülasyon verilerine göre daha yüksek üretim göstermektedir.

6.3 Çift Eksenli Sistem Uygulamasının Günlük Saat Bazında Veri Sonuçları

Çift eksenli sistemin Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarındaki güneşli, parçalı bulutlu ve bulutlu olduğu üçer gün seçilmiş olup, 30 dakikalık verileri incelenmiştir. Temmuz, Ağustos ve Eylül ayına ait en yüksek üretim gerçekleştiği meteorolojik farklılıklara sahip günler seçilmiştir.

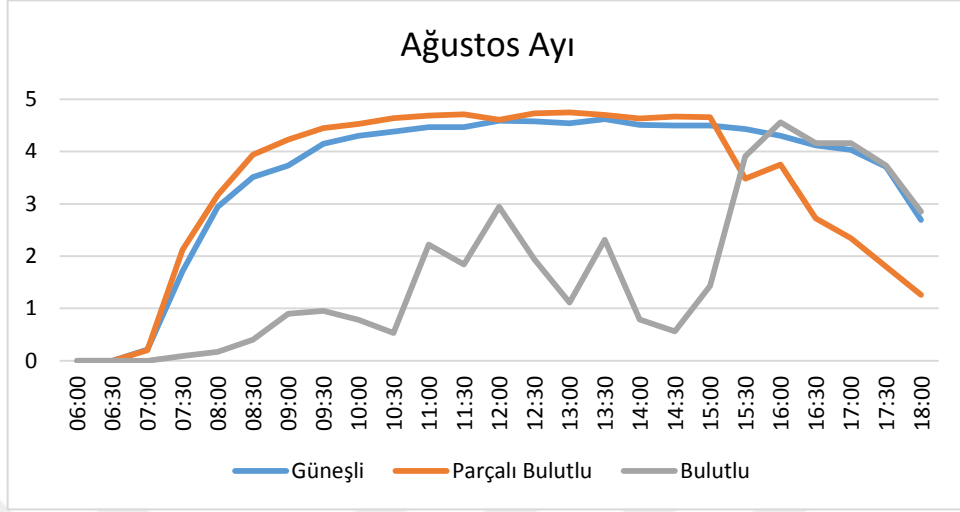
Şekil 6.6 'da görüldüğü gibi Temmuz ayında örnek olarak seçilen güneşli bir günde güneş takip sisteminin 53,73 kWh üretim yapmakta olduğu, örnek olarak seçilen parçalı bulutlu bir günde 45,05 kWh, örnek olarak seçilen bulutlu bir günde ise güneş takip sisteminin 18,11 kWh üretim yaptığı görülmüştür.



Şekil 6.6 Temmuz ayındaki hava durumlarına göre en yüksek üretime sahip günlerdeki enerji durumları

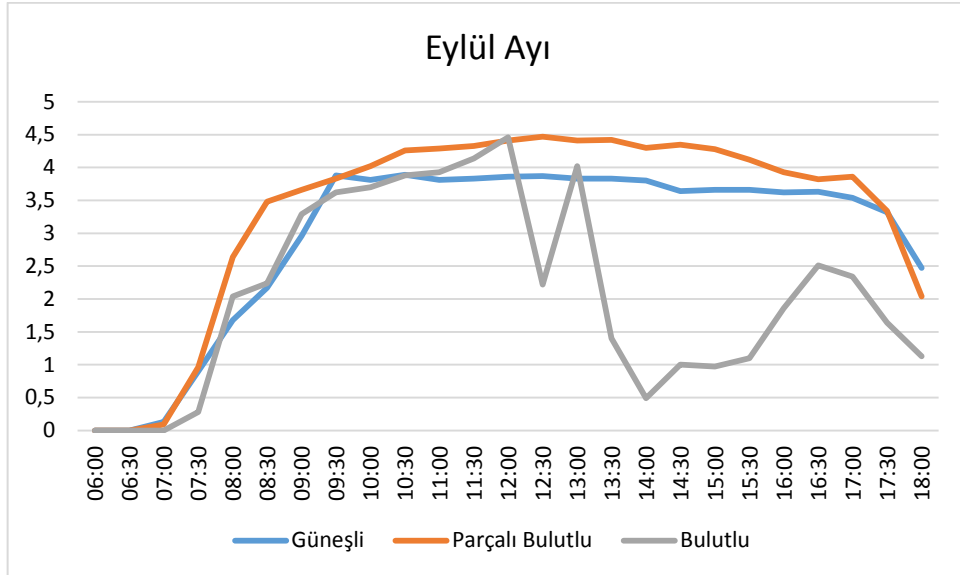
Şekil 6.7 'de görüldüğü gibi Ağustos ayında örnek olarak seçilen güneşli bir günde güneş takip sisteminin 45,75 kWh üretim yapmakta olduğu, örnek olarak seçilen parçalı bulutlu bir günde 47,78 kWh, örnek olarak seçilen bulutlu bir günde güneş takip sisteminin 22,28 kWh üretim yaptığı görülmüştür. Panel yüzeyinin soğurmuş olduğu ışıınım miktarı parçalı bulutlu bir günde güneşli bir günden daha yüksek olabilmektedir.

Bunun nedeni güneş ışınlarının yükseklik ve zenit açılarına bağlı olarak değişen ışıma şiddetidir.



Şekil 6.7 Ağustos ayındaki hava durumlarına göre en yüksek üretim yapılan günlerdeki enerji durumları

Şekil 6.8’de görüldüğü gibi Eylül ayında örnek olarak seçilen güneşli bir günde güneş takip sisteminin 46,6 kWh üretim yapmakta olduğu, örnek olarak seçilen parçalı bulutlu bir günde 42,53 kWh, örnek olarak seçilen bulutlu bir günde güneş takip sisteminin 26,07 kWh üretim yaptığı görülmüştür.



Şekil 6.8 Eylül ayındaki hava durumlarına göre en yüksek üretim yapılan günlerdeki enerji durumları

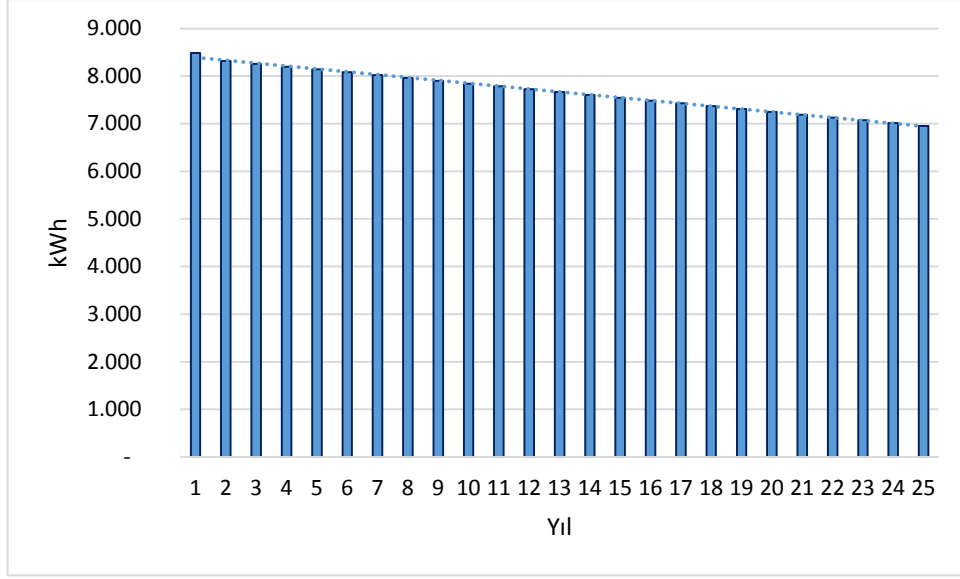
6.4 Çift Eksenli Güneş Takip Sisteminin Maliyet ve Amortisman Analizi

5,2 kWp kurulu güce sahip sistem için kullanılan 20 adet 260 Wp fotovoltaik güneş panelinin, 5 kW on-grid inverterin, direk, konstrüksiyon ve ankraj işlerinin, irtifa ve doğu-batı motorlarının, merkezi kontrol ünitesinin, rüzgar sensörünün, fotovoltaik kabloların, rüzgar koruma sarkacının, pano ve şalt ekipmanlarının, uzaktan izleme sisteminin, topraklama ve yıldırım tesisatının, nakliyenin, projelendirme ve onay işlerinin toplam maliyeti 37000 TL'dir. Bu toplamı oluşturan kalemler Çizelge 6.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.3 5,2 kWp gücündeki çift eksenli güneş takip sisteminin maliyet tablosu

Malzeme	Fiyat
Güneş paneli	10260 TL
İnverter	5330 TL
Taşıyıcı konstrüksiyon ve betonarme	5750 TL
Direk	2350 TL
Kablo ve konnektör	200 TL
Pano ve şalt ekipmanları	500 TL
Motor, kontrol ve sensör üniteleri	9450 TL
Uzaktan izleme	60 TL
Topraklama ve yıldırım	300 TL
Rüzgar koruma sarkacı	300 TL
Proje ve onay işleri	2000 TL
Nakliye	500 TL
Toplam	37000 TL

Modül için 10 yıllık süre sonunda %90, 25 yıl sonunda ise %80 verim garantisi verilmiştir. Çift eksenli fotovoltaik sistemin enerji üretim periyodu Şekil 6.9'da gösterilmiştir. Zaman içerisinde 20 adet modülün üretebileceği yıllık nominal elektrik enerjisinin değişim grafiğidir. Bu tez çalışmasında kullanılan 20 adet modülün 1 yıllık üretimi 8489,4 kWh olmakla birlikte modül yaşlanmasına bağlı olarak bu değer grafikten de görüldüğü üzere 10 yılın sonunda %90 ve 25 yılın sonunda %80 oranına düşmektedir.

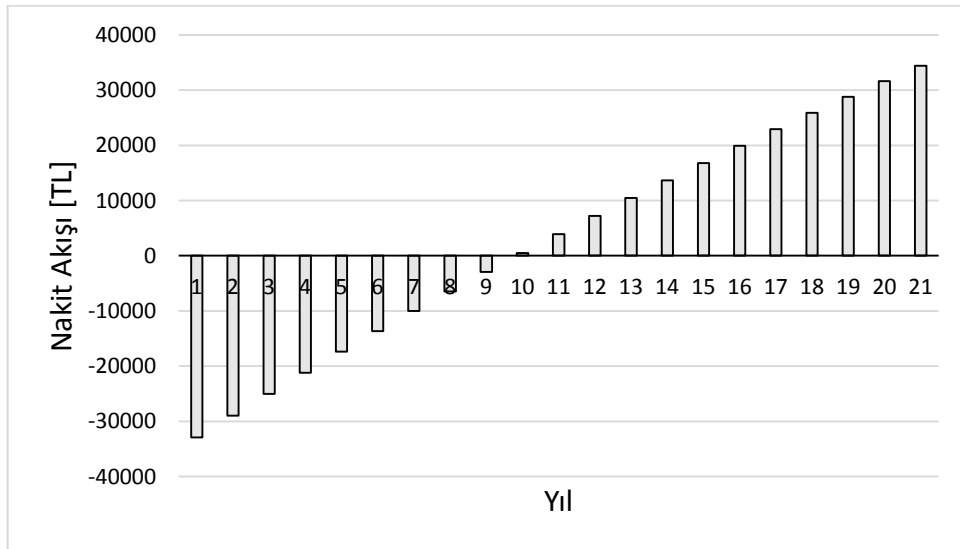


Şekil 6.9 25 Yıllık modül enerji üretim periyodu

Modül enerji üretim periyodu grafiği bu tez çalışmasında gerçekleştirilen maliyet analizindeki hesaplamalarda kullanılmıştır. Bu hesaplamalar ile sisteme ait geri dönüşüm (amortisman) tablosu Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Sistem geri dönüşüm süresi hesabı denklem 6.1 ile hesaplanmıştır.

$$\tau = -C_{yat} + \sum_{t=1}^T C_t \quad (6.1)$$

Şekil 6.9'da gösterilen modül enerji üretim periyodu da dahil edilerek hesaplanan Sistemin geri dönüş süresi (amortisman) Şekil 6.10'da 9,8 yıl olarak bulunmuştur.



Şekil 6.10 Sistem geri dönüşüm (amortisman) tablosu

BÖLÜM 7

SONUÇLAR

Bu tez çalışması, çift eksenli güneş takip sistemi kullanılarak güneş enerji sisteminin verimini arttırmak için bir çözüm ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen çift eksenli fotovoltaik sistemin en önemli özelliği, güneş panellerini taşıyan sistemi hareket ettirerek güneşe yönelmelerini sağlamasıdır. Tasarımı, simülasyonu ve uygulaması yapılan sistemin bu yeteneği sayesinde güneş ışınlarından maksimum düzeyde yararlanılmakta ve güneş enerjisi en verimli şekilde kullanılmaktadır. Güneş algılayıcı sensör, gelen ışığın yoğunluğunu ve açısını sürekli olarak ölçtüğü için çift eksenli sistemi en uygun konuma getirmektedir.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi Küçükçekmece Sosyal Tesis'i'nde elektrik enerjisi ihtiyacının bir kısmının karşılanması için, konum bilgisi ve tesise ait elektrik tüketim değerleri incelenerek simülasyon programları vasıtasıyla optimum performans ve maliyetinin gözetilmesi ile sistemin tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda değerlendirilmiştir.

Çift eksenli güneş takip sisteminin sabit eksenli sistem ile karşılaştırılabilmesi için 5,2 kWp gücünde sabit eksenli güneş enerji sisteminin üretim ve verim analizi yapılmıştır. Tasarımı yapılan sistemin simülasyonu PVSOL yazılımı, PVGIS Web Portalı ve Meteonorm hava durumu bilgisi temel alınarak oluşturulmuştur.

Sabit eksenli fotovoltaik sistemin simülasyon sonucu incelendiğinde modül üzerinde meydana gelen kirlilik, nominal modül sıcaklığından sapma, diyot üzerinde oluşan kayıplar, inverter dönüşüm oranı, kablo kaybı, gerilim sapması ve performans

uyumunun düşüklüğüne bağlı kayıplar olmasından ötürü yıllık enerji üretimi PVSOL simülasyon programı sonucunda 6410,5 kWh, PVGIS sonucunda ise 6874 kWh olarak hesap edilmiştir.

Çift eksenli fotovoltaik sistemin simülasyon sonucu incelendiğinde modül üzerinde meydana gelen kirlilik, nominal modül sıcaklığından sapma, diyot üzerinde oluşan kayıplar, inverter dönüşüm oranı, kablo kaybı, gerilim sapması ve performans uyumunun düşüklüğüne bağlı kayıplar olmasından ötürü yıllık enerji üretimi PVSOL simülasyon programı sonucunda 8489,4 kWh, PVGIS sonucunda ise 9120 kWh olarak hesap edilmiştir. Bu simülasyon sonuçları arasındaki farklar kullandıkları farklı data kaynaklarından ileri gelmektedir. PVSOL kullanılarak analiz edilen çift eksenli güneş takip sisteminin enerji üretimindeki değişim farkı güneş konum takibinin, güneşin görüldüğü aylarda iyi yapılabilmesinden ötürü daha karakteristiktir. PVSOL programında kullanılan ışıınım verileri güncel olmadığı için alınan değer daha düşük çıkmaktadır. Sisteme eklenecek olan piranometre vasıtasıyla güncel ölçüm verileri alınarak, iklim değişikliğinden etkilenen ortam ışıınım değerleri ile uygulama sonucuna yakınsanabilir.

Simülasyonları yapılan 5,2 kWp kurulu gücündeki sistemlerin, enerji üretim değerleri kıyaslandığında; çift eksenli güneş takip sisteminin sabit eksenli güneş enerji sistemine göre yıllık $(8489-6410) / 6410 = \% 32$ daha fazla üretim yaptığı görülmektedir.

Çift eksenli fotovoltaik sistemde verim hesabı yapılırken bölgesel farklardan daha az etkilenildiği görülmektedir. İki sistem arasındaki farkın, ışıınım kazancı oranları baz alındığında eğimin ve güneş ışığına yönelimin modül üzerine düşen ışıınımı etkilenmesinden kaynaklanmış olduğu ortaya çıkmaktadır. Çift eksenli güneş takip sistemi ile yatay düzleme düşen güneş ışıınımları daha fazla soğurulur. Çift eksenli takip sisteminin gün boyunca güneşin pozisyonunu takip etme yeteneğine bağlı olarak, güneşin doğuş ve batış saatlerinde diğer güneş enerji sistemlerine göre daha çok verim alınmıştır.

Çift eksenli güneş takip sisteminde panel alanının rüzgar yüküne maruz kalmaması için paneller arası boşluk bırakılmış olup, bu etki sistem alanını büyötmüştür. Arazi

kurulumlarında gölgelenmenin ve alanın önemli olduğu koşullar için olumsuz bir faktör olarak değerlendirilebilir.

Küçükçekmece Sosyal Tesisi çift eksenli güneş takip sistemi uygulamasında Bereket Parla serisi güneş paneli ve Fronius marka inverter tercih edilmiştir. Bu tercihler belirlenirken sistemler arası performans uyumu, enerji üretimi, spesifik güç yoğunluğu, engellenen CO₂ salınımları ve maliyet gibi analiz çalışmaları yapılmıştır. Farklı panel markalarından Solartürk Anatolia serisi güneş paneli ve Solaredge marka inverter verileri göz önünde bulundurularak karşılaştırma yapılmıştır. Parla ve Fronius eşleşmesinin hem maliyet hem de enerji üretimi açısından en optimum seçim olduğu görülmüştür. Tez çalışmasında bu optimum çözüm kullanılmıştır.

5,2 kWp kurulu gücüne sahip çift eksenli güneş takip sisteminin Temmuz, Ağustos ve Eylül ayları boyunca izlemesi yapılmış olup, uygulama sonuçlarından elde edilen üretim değerleri PVSOL ve PVGIS simülasyon programları ile karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen uygulama sistemi PVGIS simülasyon programı kullanılarak oluşturulan sabit eksenli sisteme göre Temmuz ayında %53 daha fazla üretim yapmıştır. Ağustos ayında %39,8, Eylül ayında ise bu değer %51,5 olarak görülmektedir. Sonuçlardan görüldüğü üzere sabit eksenli sistemin üretim potansiyeli daha düşük olmakla birlikte daha önce yapılan literatür çalışmalarında bahsedildiği gibi %64 seviyelerine kadar ulaşabilmektedir.

Temmuz ayında çift eksenli sistem uygulaması PVSOL simülasyon programı kullanılarak oluşturulan sabit eksenli sistem karşılaştırıldığında çift eksenli proje uygulamasının %66 daha fazla üretim yaptığı belirlenmiştir. Ağustos ayında %56,9, eylül ayında ise %73 daha fazla üretim yaptığı görülmektedir.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen çift eksenli proje uygulaması PVSOL simülasyon programı kullanılarak oluşturulan çift eksenli sisteme göre Temmuz ayında %16 daha fazla üretim yapmaktadır. Ağustos ayında %9,9, Eylül ayında ise %50 daha fazla üretim yaptığı görülmüştür. Bu farkın PVSOL programının kullandığı verilerde ışınlam oranlarının Eylül ayında az tutulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen çift eksenli uygulama sistemi PVGIS simülasyon programı kullanılarak oluşturulan çift eksenli sisteme göre Temmuz ayında %7,2 daha

fazla üretim vermiştir. Ağustos ayında PVGIS ile üretilen enerji değeri uygulama verisine göre daha yüksek görülmektedir. Eylül ayında ise uygulama verisi PVGIS kullanılarak oluşturulan çift eksenli sisteme göre %16,4 daha fazla üretim yapmaktadır.

Alınan bu uygulama ve simülasyon sonuçlarına göre çift eksenli güneş takip sistemi uygulamasına en yakın optimizasyonun çift eksenli PVGIS simülasyon programı ve çift eksenli uygulama sonuçları arasında olduğu görülmektedir.

Uygulama sonuçları ile kıyaslandığında simülasyon sonuçlarından alınan değerlere bakıldığında ortaya çıkan PVGIS ve PVSOL programları arasındaki üretim farkının ve de PVSOL'ün PVGIS'ten daha az üretim yapmasının sebebinin, farklı meteorolojik bilgileri kullanması ve detaylandırmasından kaynaklandığı ortaya çıkmaktadır.

Alınan değerler ortaya çıkarmıştır ki uygulama sistemine ait gerçek veriler; simülasyon verilerine göre daha yüksek üretim göstermektedir.

5,2 kWp kurulu güce sahip sistem için kullanılan 20 adet 260 Wp fotovoltaik güneş panelinin, 5 kW on-grid inverterin, direk, konstrüksiyon ve ankraj işlerinin, irtifa ve doğu-batı motorlarının, merkezi kontrol ünitesinin, rüzgar sensörünün, fotovoltaik kabloların, rüzgar koruma sarkacının, pano ve şalt ekipmanlarının, uzaktan izleme sisteminin, topraklama ve yıldırım tesisatının, nakliyenin, projelendirme ve onay işlerinin toplam maliyeti 37000 TL'dir. Bu tez çalışmasında kullanılan 20 adet modülün 1 yıllık üretimi 8489,4 kWh olmakla birlikte modül yaşlanmasına bağlı olarak bu değer 10 yılın sonunda %90 ve 25 yılın sonunda %80 oranına düşmektedir.

Modül enerji üretim periyodu da dahil edilerek hesaplanan sistemin geri dönüş süresi (amortisman) 9,8 yıl olarak bulunmuştur.

Bu tez çalışmasında tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilen çift eksenli 5,2 kWp'lik güneş takip sistemi sayesinde engellenen CO₂ emisyonunun 3 ayda 1758,44 kg olduğu ve buna karşılık gelen ağaç adedinin 45,08 olduğu ortaya çıkmaktadır.

İlerleyen projeler için çift eksenli güneş takip sisteminin yüksek verimli bi-facial (çift taraflı) ve HIT teknolojiye sahip güneş panelleri ile entegre edilerek verimin maksimum düzeyde alınması sağlanabilir. Ayrıca yüzer güneş enerji sistemlerinde ve çatı uygulamalarında denenerek çift eksenli sistemin ekstra veriminden faydalanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Çamur, S., Arifoğlu, B., Beşer, E. ve Kandemir Beşer, E., (2010). "Design and application of a 3kW sun tracking photovoltaic energy conversion unit," Electrical, Electronics and Computer Engineering (ELECO), 2010 National Conference on, 53-57.
- [2] Huang B.J., Ding W.L. ve Huang Y.C., (2011). "Long-term field test of solar PV power generation using one-axis 3-position sun tracker", Solar Energy, 85(9):1935-1944.
- [3] Ozcelik S., Prakash H. ve Chaloo R., (2011). "Two-Axis Solar Tracker Analysis and Control for Maximum Power Generation", Procedia Computer Science, 6: 457-462.
- [4] Kivrak S., Gunduzalp M. ve Dincer F., (2012). "Theoretical and experimental performance investigation of a twoaxis solar tracker under the climatic condition of Denizli, Turkey", Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), 332-336.
- [5] Bin-Juine H., Yin-Chen H., Guan-Yu C., Po-Chien H. ve Kang L. (2013). "Improving Solar PV System Efficiency Using One-Axis 3-Position Sun Tracking", Energy Procedia, 33: 280-287.
- [6] Lee, J. F. ve Rahim, N. A., (2013) "Performance comparison of dual-axis solar tracker vs static solar system in Malaysia," 2013 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT), Lankgkawi, 102-107.
- [7] Bouziane K., Korichi D., Azoui B. ve Settou N., (2014). "Optimisation of a Solar Tracker System for Photovoltaic Power Plants in Saharian Region, Example of Ouargla", Energy Procedia, 50: 610-618.
- [8] Yingxue Y., Yeguang H., Shengdong G., Gang Y. ve Jinguang D., (2014). "A multipurpose dual-axis solar tracker with two tracking strategies", Renewable Energy, 72: 88-98.
- [9] Lazaroiu C.G., Michela L., Mariacristina R. ve Mario P., (2015). "Comparative analysis of fixed and sun tracking low power PV systems

- considering energy consumption”, Energy Conversion and Management, 92: 143-148.
- [10] Yilmaz S., Ozcalik H.R., Dogmus O., Dincer F., Akgol O. ve Karaaslan M., (2015). “Design of two axes sun tracking controller with analytically solar radiation calculations”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 43: 997-1005.
- [11] Vokas G.A., Zoridis G.C. ve Lagogiannis K.V., (2015). “Single and Dual Axis PV Energy Production Over Greece: Comparison Between Measured and Predicted Data”, Energy Procedia, 74: 1490-1498.
- [12] Fathabadi H., (2017). "Novel Online Sensorless Dual-Axis Sun Tracker," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 22: 321-328.
- [13] Sidek M.H.M., Azis N., Hasan W.Z.W., Kadir M.Z.A. Ab, Shafie S. ve Radzi M.A.M., (2017). “Automated positioning dual-axis solar tracking system with precision elevation and azimuth angle control”, Energy, 124: 160-170.
- [14] Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, http://eusolar.ege.edu.tr/yenilenebilir_enerji_kaynaklari.html, 17 Şubat 2017.
- [15] Külen A.T., “Bir Fotovoltaik Güneş Enerjisi Santralının Fizibilitesi, Kıbrıs Bölgesinde 1.6 MWp’lik Güneş Enerjisi Santrali İçin Enerji Üretim Değerlendirmesi Ve Ekonomik Analizi”, İstanbul, 2016: 6-15.
- [16] Bedeloğlu A., Demir A. ve Bozkurt Y., (2010) “ Fotovoltaik Teknolojisi: Türkiye ve Dünyadaki Durumu, Genel Uygulama Alanları ve Fotovoltaik Tekstiller”, Electronic Journal of Textile Technologies, 4: 43-58.
- [17] Enerji Enstitüsü, <http://enerjiensitüsü.com/turkiye-kurulu-elektrik-enerji-gucu-mw/>, 15 Mart 2017.
- [18] Doğaner F., Keçecioğlu O. ve Şeker Y.Ö, “Yenilenebilir Enerji Sistemlerinin İncelenmesi”, İstanbul, 2016, 3-11.
- [19] Haselhuhn R. ve Hemmerle C. (2012). “Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie”, Çataklı Enerji Yayıncılık, Nisan, 3-12.
- [20] Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, <http://www.eie.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx>, 1 Nisan 2012.
- [21] Urbano J.A., Matsumoto Y., Asomoza R., Aceves F.J., Sotelo A. ve Jacome A., (2003), “5Wp PV Module-Based Stand-Alone Solar Tracking System”, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2463-2465.
- [22] Akhisar Meslek Yüksek Okulu, http://akhisarmyo.cbu.edu.tr/db_images/file/gunes-enerjisi-1-1283TR.pdf, 21 Mart 2012.
- [23] Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, http://www.koeri.boun.edu.tr/astronomy/iridyum_uydular%FD.htm, 8 Aralık 2010.
- [24] Güneş Takip Sistemi, http://www.emo.org.tr/ekler/c7f5e8dcaf51a49_ek.pdf, 6 Nisan 2016.

- [25] Yılmaz Ş., Güneş M. ve Kılıç E., (2013) “4,6 Kw Gücünde Fotovoltaik Generatörün Modellenmesi ve Sabit ve Güneş İzleyici Sistem Olarak Gaziantep Şartların Çalışmasının İncelenmesi”, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Malatya, 478.
- [26] Güneş Sistemleri, <http://www.gunessistemleri.com/guneshucreleri.php>, 8 Mayıs 2008.
- [27] RMC Mühendislik, <http://www.rmc.com.tr/cephe-yuku-hesaplamalari/>, 10 Haziran 2014.
- [28] PVGIS, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>, 6 Mayıs 2017.
- [29] Ekonomik Faaliyetlere Göre Hava Emisyon Hesapları http://tuik.gov.tr/PreTabloArama.do?metod=search&araType=hb_x, 8 Ekim 2014.
- [30] Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator-calculations-and-references>, 6 Temmuz 2015.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Çağatay VARİŞ
Doğum Tarihi ve Yeri :16.08.1992 ve Samsun
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta : cagatayvaris92@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2015
Lise	Sayısal	Bafra Anadolu Lisesi	2010

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2016-Devam ediyor	İstanbul Enerji A.Ş.	Proje Mühendisi
2015	Ser Elektrik Otomasyon	Stajyer
2015	MÇ Mühendislik	Stajyer

YAYINLARI

Bildiri

1. Varış Ç., Bekiroğlu N., Özçıra S., “Güneşi İzleyebilen 5,2 kW Gücünde Çift Eksenli Fotovoltaik Sistem Tasarımı ve Simülasyonu”, V. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi, 1-5, 18-21 Ekim 2017, İzmir.

