



T.C.

İSTANBUL AREL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**ÇATI ÜZERİ DOĞU-BATI YÖNELİMLİ OPTİMİZERLİ
GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİNİN PİLOT UYGULAMASI
VE GÜNEY YÖNELİMLİ GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİNE
GÖRE ÜRETİM DEĞERLENDİRMESİ VE EKONOMİK
ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS

Hazırlayan: **Savaş ALKAN**

YEMİN METNİ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Çatı Üzeri Doğu-Batı Yönelimli Optimizerli Güneş Enerji Santralinin Pilot Uygulaması ve Güney Yönelimli Güneş Enerji Santraline Göre Üretim Değerlendirmesi ve Ekonomik Analizi” başlıklı bu çalışmanın, bilimsel ahlak ve geleneklere uygun şekilde tarafımda yazıldığını, yararlandığım eserlerin tamamının kaynaklarda gösterildiğini ve çalışmanın içinde kullanıldıkları her yerde bunlara atıf yapıldığını belirtir ve bunu onurumla doğrularım.

13.09.2019

SAVAŞ ALKAN

ONAY

Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının İstanbul Arel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü arşivlerinde aşağıda belirttiğim koşullarda saklanmasına izin verdiğimi onaylarım:

- Tezimin/Raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir.
- Tezim/Raporum sadece İstanbul Arel yerleşkelerinden erişime açılabilir.
- Tezimin/Raporumun yıl süreyle erişime açılmasını istemiyorum. Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir.

13.09.2019

Savaş ALKAN

ÖZET

ÇATI ÜZERİ DOĞU-BATI YÖNELİMLİ OPTİMİZERLİ GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİNİN PİLOT UYGULAMASI VE GÜNEY YÖNELİMLİ GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİNE GÖRE ÜRETİM DEĞERLENDİRMESİ VE EKONOMİK ANALİZİ

Savaş ALKAN

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği

Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Yavuz ATEŞ

Eylül, 2019 - 128 Sayfa

Bu tez çalışması, doğu-batı yönelimli optimizierli güneş enerji santrali kurularak birim alanda daha fazla güneş enerjisinden faydalanmak için bir çözüm ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada 169 kWp gücünde doğu-batı yönelimli güneş enerji santralinin tasarımı, simülasyonu ve kurulumu anlatılmıştır. Fotovoltaik hücrenin çalışma prensibi anlatılarak sistemi oluşturan bölümlere yer verilmiştir. Tasarımı, simülasyonu ve kurulumu yapılan sistemin en önemli özelliği birim alanda daha fazla kurulumu imkân vermesidir. Bu özelliği sayesinde daha fazla kurulu güçte sistem tesis edilebilmekte ve güneş enerjisinden daha fazla düzeyde yararlanılmaktadır.

Tasarımı, simülasyonu ve uygulaması yapılan sistemin bu yeteneği sayesinde sınırlı çatı alanlarında güneş enerjisinden maksimum düzeyde yararlanılmaktadır.

Fotovoltaik sistemlerde her güneş panelinin kendine özgü bir maksimum güç noktası bulunmaktadır. Sistemde kullanılan optimizier ile güneş paneli bazında maksimum güç noktası takibi yapılarak güneş enerjisinden verimli bir şekilde elektrik enerjisi elde edilmektedir.

Bu çalışma, doğu-batı yönelimli sistemin avantajlarının ve dezavantajlarının ön plana çıkarılabilmesi için güney yönelimli sistem ile farklı simülasyon programları ve uygulama sonuçlarının karşılaştırmalarını da kapsamaktadır. Ayrıca bu çalışmada İstanbul Büyükşehir Belediyesi Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde elektrik enerjisi ihtiyacının bir kısmının karşılanması için; konum bilgisi, tesise ait elektrik tüketim değerleri incelenerek simülasyon programları vasıtasıyla optimum performans ve maliyet gözetilerek doğu-batı yönelimli sistemin en verimli çözümü sunulmaya çalışılmıştır. Projesi ve uygulaması gerçekleştirilen sisteme ait toplam maliyet ve geri dönüş süresi, simülasyon ve uygulama verilerinin uyumu gözetilerek hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Doğu-batı yönelimli sistem, optimizer, fotovoltaiik, enerji üretimi, ekonomik analiz.

ABSTRACT

THE EAST-WEST ORIENTED OF OPTIMIZED SOLAR ENERGY POWER PLANT PILOT APPLICATION ON THE ROOF AND THE ECONOMIC ANALYSIS AND PRODUCTION EVALUATION OF THE SOUTH-ORIENTED SOLAR POWER PLANT

Savaş ALKAN

MSc. Thesis, Department of Electrical Electronic Engineering

Advisor: Dr. Yavuz ATEŞ

September, 2019 - 128 Page

This thesis presents a solution to utilize more solar energy per unit area by installing an east-west oriented solar power plant.

In this study, the design, simulation and installation of the 169 kWp power east-west oriented solar power plant is described. The working principle of the photovoltaic cell is explained and the parts that make up the system are given. The most important feature of the system that is designed, simulated and installed is that it allows for more installation in the unit area. Thanks to this feature, the system can be installed with more installed power and more energy is utilized.

Thanks to this capability of the system which is designed, simulated and applied, solar energy is utilized at maximum level in limited roof areas.

In photovoltaic systems, each solar panel has its own maximum power point. With the optimizer used in the system, the maximum power point is tracked on the basis of the solar panel and electrical energy is generated efficiently from the solar energy.

This study includes comparisons of different simulation programs and application results in order to highlight the advantages and disadvantages of the east-west oriented system. In addition, in this study, in order to meet some of the electrical energy needs in Hidayet Türkoğlu Sports Complex of Istanbul Metropolitan Municipality; location information, electricity consumption values of the facility were examined and the most efficient solution of the east-west oriented system was tried to be presented by considering optimum performance and cost through simulation programs. The total cost and turnaround time of the project and implementation of the system were calculated by considering the compliance of the simulation and application data.

Keywords: East-west oriented system, optimizer, photovoltaic, power generation, economic analysis.

ÖNSÖZ

Tezimi hazırlamamda destek ve teşviklerini her zaman şükranla anacağım, danışman hocam Sayın Dr. Yavuz ATEŞ'e teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenim hayatım boyunca her zaman maddi ve manevi destekleri ile yanımda olan ve çalışmalarım sırasında bana gösterdikleri sabır ve desteklerinden dolayı annem Muradiye ALKAN'a, babam Murat ALKAN'a, abim Selçuk ALKAN'a ve sevgili eşime teşekkürlerimi sunarım.

Proje çalışması ve yer tahsisi konusunda yardım ve desteklerini esirgemeyen İstanbul Büyükşehir Belediyesi yetkililerine teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca her türlü desteklerinden dolayı İstanbul Enerji A.Ş.'de çalışan, Enerji Verimliliği Şefi Salih Serkan KIR'a, takım arkadaşlarım Çağatay VARİŞ'a, Hamdi SÜNNETÇİ'ye, Levent BAHADIR'a, M. Akın KÖSE'ye, Uğur DEMİREL'e ve İsmail TAŞKIN'a teşekkür ederim.

Eylül, 2019

Savaş ALKAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	viii
1. BÖLÜM	1
GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Özeti	3
2. BÖLÜM	8
YENİLENEBİLİR ENERJİ	8
2.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları	8
2.1.1 Hidroelektrik Enerjisi	8
2.1.2 Rüzgâr Enerjisi	9
2.1.3 Güneş Enerjisi	9
2.1.4 Jeotermal Enerji	9
2.1.5 Biyokütle Enerjisi	10
2.1.6 Hidrojen Enerjisi	10
2.1.7 Gel-git ve Dalga Enerjisi	11
2.2 Dünya’da Yenilenebilir Enerji Kaynakları Durumu	11
2.3 Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları Durumu	12
3. BÖLÜM	14
GÜNEŞ ENERJİSİ	14
3.1 Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli	16
3.2 İstanbul’da Güneş Enerjisi Potansiyeli	17
3.3 Güneş Geometrisi	19
3.3.1 Enlem Açısı	19
3.3.2 Deklinasyon Açısı (Sapma Açısı)	20
3.3.3 Saat Açısı	20
3.3.4 Zenith Açısı	21
3.3.5 Yükseklik Açısı	21

3.3.6	Güneş Azimut Açısı.....	22
3.3.7	Yüzey Azimut Açısı.....	23
3.4	Fotovoltaik Teknoloji.....	23
3.4.1	Fotovoltaik Teknolojisinin Gelişimi.....	23
3.4.2	Fotovoltaik Çalışma Prensibi.....	25
3.4.3	Fotovoltaik Hücrenin Eş Değer Devre Modellemesi.....	27
3.4.4	Fotovoltaik Hücre Çeşitleri.....	29
3.4.4.1	Kristal Silisyum Fotovoltaik Hücreler	30
3.4.4.2	İnce film Güneş Hücreleri (a-Si, CdTe, CIS veya CIGS)	31
3.4.4.3	Nano Teknolojiye Dayalı Güneş Hücreleri	32
3.4.5	Fotovoltaik Sistemler	33
3.4.5.1	Ada Sistemleri	34
3.4.5.2	Şebeke Bağlantılı Sistemler.....	35
3.4.6	Fotovoltaik Güneş Takip Sistemi	36
3.4.6.1	Tek Eksenli Güneş Takip Sistemi	37
3.4.6.2	Çift Eksenli Güneş Takip Sistemi	38
4.	BÖLÜM	40
	DOĞU-BATI YÖNELİMLİ FOTOVOLTAİK SİSTEMİN TASARIMI	40
4.1	Sistemin Genel Yapısı.....	40
4.1.1	260 Wp Fotovoltaik Güneş Paneli	41
4.1.2	Optimizer	42
4.1.3	İnverter (Evirici)	46
4.1.4	Panel Taşıyıcı Konstrüksiyon ve Balast Betonu.....	48
4.1.5	Kablo ve FV Konnektör.....	51
4.1.6	AG Panosu ve Şalt Ekipmanları	56
4.1.7	Rüzgâr Sensörü (Anemometre)	57
4.1.8	Güneş Işınım Sensörü (Piranometre).....	58
4.1.9	Veri Kayıt Depolama ve Uzaktan Erişim Sistemi	58
4.1.10	Bilgi Ekranı	59
4.2	Sistemin Tasarımı	60
4.2.1	Kompleksin Konumu.....	60

4.2.2	Spor Kompleksine Ait Bilgiler	62
4.2.3	Kullanılan Malzemenin Kompleks İçin Tasarlanan Sisteme Uygunluğu.....	65
5.	BÖLÜM	69
	DOĞU-BATI YÖNELİMLİ OPTİMİZERLİ FOTOVOLTAİK SİSTEMİN SİMÜLASYONLARI	69
5.1	Simülasyon Programlarının Kullanılması	69
5.1.1	PVSOL.....	70
5.1.2	PVGIS	70
5.1.3	Meteonorm.....	70
5.1.4	Sketch-Up	71
5.2	Simülasyon Sonuçları	71
5.2.1	169 kWp 11° Doğu-Batı Yönelimli Güneş Enerji Santralinin Simülasyonu.....	71
5.2.2	169 kWp 30° Güney Yönelimli Güneş Enerji Santralinin Simülasyonu.....	76
5.2.3	110,5 kWp 30° Güney Yönelimli Güneş Enerji Santralinin Simülasyonu.....	80
5.2.4	169 kWp 11° Doğu-Batı Yönelimli Sistem ile 169 kWp 30° Güney Yönelimli Sistemin Karşılaştırması	85
5.2.5	169 kWp 11° Doğu-Batı Yönelimli Sistem ile Mevcut Çatı Alanında Kurulabilecek 110,5 kWp 30° Güney Yönelimli Sistemin Karşılaştırması.....	90
6.	BÖLÜM	95
	DOĞU-BATI YÖNELİMLİ FOTOVOLTAİK SİSTEMİN UYGULAMASI..	95
6.1	169 kWp Doğu-Batı Yönelimli Güneş Enerji Santralinin Simülasyon ve Gerçek Zamanlı Üretim Verilerinin Yıllık Bazda İncelenmesi.....	96
6.2	Gerçek Zamanlı Üretim Verilerinin Panel Bazlı İncelenmesi	103
6.3	169 kWp Doğu-Batı Yönelimli Güneş Enerji Santralinin Gerçek Zamanlı Üretim Verilerinin Günlük Karşılaştırılması	109

6.4 Doğu-Batı Yönelimli Optimizerli Güneş Enerji Sisteminin Maliyet ve Amortisman Analizi	111
7. BÖLÜM	118
SONUÇLAR	118
KAYNAKÇA	124
ÖZGEÇMİŞ	1



SİMGE LİSTESİ

AC	: Alternatif akım
C_t	: Yıllık gelir-yıllık işletme gideri
C_{yat}	: Yatırım bedeli
DC	: Doğru akım
FF	: Dolum faktörü
G	: Solar ışık şiddeti
I	: Akım
I_0	: 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
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MPPT	: Maximum Peak Power Tracker
RTC	: Real Time Clock
SCADA	: Supervisory Control And Data Acquisition
STC	: Standart Test Conditions
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
YEGM	: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü
EİGM	: Enerji İşleri Genel Müdürlüğü
IRENA	: Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
UV	: Ultra Viyole

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Türkiye yenilenebilir enerji kurulu gücü Nisan 2019 verileri	13
Tablo 3.1. İstanbul ili ışınım süresi ve gün uzunluğu	18
Tablo 3.1. Devam.....	19
Tablo 4.1 Solartürk Anatolia 260 Wp fotovoltaik güneş paneli teknik özellikleri	41
Tablo 4.2. Optimizerin teknik özellikleri.....	46
Tablo 4.3. Solar Edge 8 kW invertere ait teknik özellikler.....	47
Tablo 4.4. Dizi verileri	51
Tablo 4.5. Evirici modül verileri.....	54
Tablo 4.6. Formül açıklamaları.....	54
Tablo 4.7. Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi 2018 yılı aylık tüketim verileri.....	65
Tablo 5.1. PVSOL-PVGIS enerji üretim karşılaştırması (169 kWp 11° Doğu-Batı)	74
Tablo 5.2. 169 kWp 11° doğu-batı sistemin aylık çalışma performansı (%).....	74
Tablo 5.2. Devam.....	75
Tablo 5.3. PVSOL-PVGIS enerji üretim karşılaştırması (169 kWp 30° Güney)	78
Tablo 5.3. Devam.....	79
Tablo 5.4. 169 kWp 30° güney sistemin aylık çalışma performansı (%)	79
Tablo 5.5. PVSOL-PVGIS enerji üretim karşılaştırması (110,5 kWp 30° Güney) ...	83
Tablo 5.6. 110,5 kWp 30° güney sistemin aylık çalışma performansı (%)	83
Tablo 5.6. Devam.....	84
Tablo 5.7. PVSOL ve PVGIS kullanılarak oluşturulan 169 kWp gücündeki 11° doğu- batı ve 30° güney yönelimli sistemlerin aylara göre enerji üretim karşılaştırmaları .	86
Tablo 5.8. 169 kWp gücündeki 11° doğu-batı ve 30° güney yönelimli güneş enerji sistemlerinin çıkış parametlerinin karşılaştırılması.....	88
Tablo 5.9. PVSOL ve PVGIS kullanılarak oluşturulan 169 kWp gücündeki 11° doğu- batı ve 110,5 kWp gücünde 30° güney yönelimli sistemlerin aylara göre enerji üretim karşılaştırmaları.....	90
Tablo 5.10. 169 kWp gücündeki 11° doğu-batı yönelimli ve 110,5 kWp gücündeki 30° güney yönelimli güneş enerji sistemlerinin çıkış parametlerinin karşılaştırılması	92

Tablo 6.1. 169 kWp doğu-batı yönelimli güneş enerji santralinin aylara göre gerçek zamanlı enerji üretim verileri	97
Tablo 6.1. Devam.....	98
Tablo 6.2. 169 kWp doğu-batı yönelimli güneş enerji santralinin aylara göre gerçek zamanlı çalışma performansı.....	99
Tablo 6.3. 169 kWp doğu-batı yönelimli güneş enerji santralinin aylara göre PVSOL, PVGIS ve gerçek zamanlı enerji üretim verileri	100
Tablo 6.3. Devam.....	101
Tablo 6.4. 169 kWp gücündeki güneş enerji sisteminin gerçek zamanlı ve simülasyon sonucu elde edilen çıktıları.....	101
Tablo 6.5. Doğu-batı ve güney yönelimli güneş enerji sisteminin nisan, mayıs, haziran ve temmuz ayları panel bazlı gerçek zamanlı verileri	104
Tablo 6.5. Devam.....	105
Tablo 6.5. Devam.....	106
Tablo 6.5. Devam.....	107
Tablo 6.5. Devam.....	108
Tablo 6.6. Her iki sisteme ait üretim farkının en yüksek olduğu günler.....	109
Tablo 6.7. 169 kWp kurulu güce sahip doğu-batı yönelimli optimizasyonlu güneş enerji sisteminin 2016 yılı maliyeti	112
Tablo 6.8. Her iki sisteme ait kurulum maliyetleri ve çıktıları	116

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. 2006-2030 yılları arası dünya enerji projeksiyonu	12
Şekil 3.1. Türkiye güneş enerji potansiyel atlası (GEPA)	16
Şekil 3.2. İstanbul ili güneş enerji potansiyel atlası	18
Şekil 3.3. Enlem açısı gösterimi.....	20
Şekil 3.4. Saat açısı gösterimi	21
Şekil 3.5. Zenith açısı gösterimi.....	21
Şekil 3.6. Yükseklik açısı gösterimi.....	22
Şekil 3.7. Azimut açısı gösterimi	22
Şekil 3.8. Fotovoltaik pilin çalışma prensibi.....	26
Şekil 3.9. FV hücrenin basitleştirilmiş eş değer devresi	27
Şekil 3.10. FV hücrenin tek diyotlu eş değer devresi	28
Şekil 3.11. Monokristal (a) ve Polikristal (b) güneş hücreleri	31
Şekil 3.12. İnce film güneş hücreleri	32
Şekil 3.13 Fotovoltaik tesis çeşitleri	33
Şekil 3.14. Fotovoltaik tesislerde ada sistemi bileşenleri	34
Şekil 3.15. Çatı üzeri şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler.....	36
Şekil 3.16. a) Tek eksenli güneş takip sisteminde yükseklik ekseninin gösterimi b) Tek eksenli güneş takip sisteminde azimut ekseninin gösterimi	37
Şekil 3.17. Çift eksenli güneş takip sistemi gösterimi	38
Şekil 3.18. Çift eksenli fotovoltaik sistem şeması (sensörlü)	39
Şekil 4.1. 260 Wp Polikristal güneş paneli	42
Şekil 4.2. Gölgeleme oluşumu	43
Şekil 4.3. Optimizerli ve dizi inverterli sisteme gölge etkisi	44
Şekil 4.4. Panel bazlı izleme görseli	45
Şekil 4.5. Optimizer ünitesi.....	46
Şekil 4.6. İnverter ünitesi	47
Şekil 4.7. İnverter kabinine ait görseller	48
Şekil 4.8. İzolasyon öncesi zemin temizleme çalışması	49
Şekil 4.9. İzolasyon çalışması	49
Şekil 4.10. Panel taşıyıcı konstrüksiyon modeli	50

Şekil 4.11. Panel taşıyıcı konstrüksiyon ve balast betonu	50
Şekil 4.12. Kablo ve FV konnektör.....	56
Şekil 4.13. AG pano ön ve iç görünüşü	57
Şekil 4.14. Anemometre.....	58
Şekil 4.15. Piranometre	58
Şekil 4.16. Web portal.....	59
Şekil 4.17. Bilgi ekranı	60
Şekil 4.18. Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi harita görseli.....	61
Şekil 4.19. Tesis vaziyet planı.....	61
Şekil 4.20. Aplikasyon krokisi	62
Şekil 4.21. Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi güneş enerji sistemi kurulan çatı alanı	63
Şekil 4.22. Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi 3D görseli	64
Şekil 5.1. 169 kWp 11° Doğu-batı yönelimli sistemin aylara göre enerji üretim eğrisi	73
Şekil 5.2. 169 kWp 11° doğu-batı sistemin çalışma performansı (%).....	75
Şekil 5.3. 169 kWp 11° doğu-batı yönelimli güneş enerji santrali görseli	76
Şekil 5.4. 169 kWp 30° güney yönelimli sistemin aylara göre enerji üretim eğrisi ..	78
Şekil 5.5. 169 kWp 30° güney yönelimli sistemin çalışma performansı (%)	80
Şekil 5.6. 110,5 kWp 30° güney yönelimli sistemin aylara göre enerji üretim eğrisi	82
Şekil 5.7. 110,5 kWp 30° güney yönelimli sistemin çalışma performansı (%)	84
Şekil 5.8. 110,5 kWp 30° güney yönelimli güneş enerji santrali görseli	85
Şekil 5.9. PVSOL kullanılarak oluşturulan 169 kWp gücündeki 11° doğu-batı ve 30° güney yönelimli sistemlerin aylara göre enerji üretim eğrileri	86
Şekil 5.10. PVGIS kullanılarak oluşturulan 169 kWp gücündeki 11° doğu-batı ve 30° güney yönelimli güneş enerji sisteminin aylara göre enerji üretim eğrileri.....	87
Şekil 5.11. PVSOL kullanılarak oluşturulan 169 kWp 11° doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi ile 110,5 kWp 30° güney yönelimli güneş enerji sisteminin aylara göre enerji üretim eğrileri.....	91
Şekil 5.12. PVGIS kullanılarak oluşturulan 169 kWp 11° doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi ile 110,5 kWp 30° güney yönelimli güneş enerji sisteminin aylara göre enerji üretim eğrileri.....	91

Şekil 6.1. Doğu-batı yönelimli uygulama görüntüsü	95
Şekil 6.2. Doğu-batı yönelimli uygulama görüntüsü-2.....	96
Şekil 6.3. 30° Güney yönelimli ölçüm için hazırlanan deney düzeneği görüntüsü ...	96
Şekil 6.5. 169 kWp gücündeki doğu-batı yönelimli güneş santralinin gerçek zamanlı aylara göre çalışma performansı (%)	98
Şekil 6.6. 169 kWp doğu-batı yönelimli güneş enerji santralinin aylara göre PVSOL, PVGIS ve gerçek zamanlı enerji üretim eğrisi.....	100
Şekil 6.7. Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi gerçek zamanlı elektrik gelir ve giderlerine ait grafik (%).....	102
Şekil 6.8. Doğu-batı ve güney yönelimli güneş enerji sisteminin nisan, mayıs, haziran ve temmuz ayları panel bazlı gerçek zamanlı enerji üretim eğrisi.....	104
Şekil 6.9. 21.04.2019 tarihli üretim eğrisi.....	110
Şekil 6.10. 21.04.2019 tarihli üretim eğrisi.....	111
Şekil 6.11. 25 Yıllık güneş paneli enerji üretim projeksiyonu.....	113
Şekil 6.12. 169 kWp doğu-batı yönelimli sistemin yatırım geri dönüş süresi grafiği	114
Şekil 6.13. 110,5 kWp güney yönelimli sistemin yatırım geri dönüş süresi grafiği	114

1. BÖLÜM

GİRİŞ

Dünya genelinde gelişen teknoloji ve artan nüfusla birlikte enerji talebi de hızla artmakta olup mevcut kaynakların bu talebi çok kısa bir süre daha karşılayabileceği bilimsel bir gerçektir. Ayrıca artan nüfus yoğunluğu ve enerji talebine bağlı olarak karbon salınımlarının artması, hava kirliliği ve iklim değişikliğine neden olmaktadır. Bu çevresel etki devam etmesi durumunda dünya genelinde sıcaklıklar artacak, buzullar eriyecek ve deniz seviyesinde yükselmeler olacaktır. Bu tür çevresel etkilerin yaşanmaması ve dünya genelinde sürekli artan enerji talebinin karşılanması adına çevreci ve temiz bir enerji kaynağı olan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı neredeyse bir zorunluluk haline gelmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının temelini güneş enerjisi oluşturmaktadır. Güneşten gelen ışınım enerjisi sayesinde fotovoltaik panellerde elektrik üretimi gerçekleştirilmektedir. Fotovoltaik paneller, çevreci ve temiz yenilenebilir enerji üretimine olanak sağladığı gibi herhangi bir atığı olmadığından ve zararlı bir madde içermediğinden dolayı çevreye duyarlı ekipmanlardır. Ayrıca statik ekipmanlar olduğundan yani yapılarında hareketli veya döner parçalar bulundurmadıklarından, kurulumlarından sonraki işletme ve bakım maliyetleri oldukça düşüktür.

Günümüz şartlarında fotovoltaik panellerin maliyetleri biraz yüksektir. Ancak gün geçtikçe gelişen teknoloji ile birlikte hızla düşüş göstermektedir. Ayrıca fotovoltaik panel verimleri teknolojisi itibarıyla düşük olduğundan (%15-25 arasında) yatırım geri dönüş süreleri uzun yıllar almaktadır. Bu yüzden güneş enerji sistemi tasarımı yapılırken maliyet-performans oranlarına çok dikkat edilmelidir. Buna rağmen ülkemizde elektrik üretim santrali yaşam boyu maliyet analizlerine bakıldığında en ucuz enerji kaynağı güneş enerjisi olmaktadır.

Son yıllarda güneş enerjisinde farkındalığın artması ve bir takım teşviklerin gelmesiyle birlikte fotovoltaik çatı uygulamaları hız kazanmıştır. Özellikle çatılarda bulunan baca, anten, baz istasyonu, klima dış ünitesi, aydınlık vb. gibi etkenlerden dolayı alan kayıpları yaşanmaktadır. Yaşanan alan kayıplarından dolayı çatı alanın müsaade ettiği ölçüde belirli bir kapasitede güneş enerji sistemi kurulabilmektedir. Hâlihazırda sınırlı olan ve yukarıda bahsedilen etkenlerden dolayı daha da sınırlanan çatı alanlarında güneş enerjisinden daha fazla yararlanabilmek adına doğu-batı yönelimli kurulumlar popüler çalışma alanı haline gelmiştir.

1.1 Tezin Amacı

Güneş enerji sistemlerinde en fazla verim güney yönelimde kurulum ile elde edilir. Ancak güney yönelimde kurulan çatı üzeri güneş enerji sistemlerinde güneşin ilk ve son saatlerinde üretim az olmaktadır. Ayrıca çatı alanı sınırlı olan yerlerde, aynı çatı alanı için güney yöneline göre doğu-batı yönelimde daha fazla kurulu güçte güneş enerji sistemi tesis edilebilmektedir. Sınırlı çatı alanlarında santral kurulu gücü ile güneşin ilk ve son saatlerindeki üretimi arttırmak adına doğu-batı yönelimli sistemler son yıllarda hızla artış göstermektedir.

Bu gelişmelere bağlı olarak sınırlı çatı alanlarında daha fazla güneş enerjisinden yararlanabilmek amacıyla tasarımı, simülasyonu ve uygulaması gerçekleştirilen doğu-batı yönelimli sistem açıklanmıştır.

Uygulama sonuçları ile simülasyonlar sonucunda bulunan veriler arasındaki farkın karşılaştırılması ve görülmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde tesis edilen 169 kWp doğu-batı yönelimli fotovoltaik sistemin, tesisin elektrik enerji ihtiyacının bir kısmını karşılaması için yüksek üretimle bir çözüm ortaya konulmuştur.

İstanbul şartlarında güneş enerji santrali kurulabilecek çatı alanlarının kısıtlı olması nedeniyle doğu-batı yönelimi ile daha fazla kurulu güç elde ederek çevreci ve temiz yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisinden daha fazla yararlanılması amaçlanmıştır.

Ayrıca uygulamada, optimizasyon kullanımının güneş enerji sistemlerinde ne gibi avantajları ve dezavantajları olduğunun ortaya çıkarılması amaçlanmıştır.

Bu tez çalışması, yenilenebilir enerjiye yönelik bilinçlenmenin artırılması ve doğu-batı yönelimi fotovoltaik sistemlerin avantajlarının ve dezavantajlarının ortaya çıkarılması amacıyla yapılmıştır.

1.2 Literatür Özeti

Apama Sankar ve Anish Kalathil bu çalışmada doğu-batı ve güney yönelimli fotovoltaik sistemlerin performansını, mevsim, güneş açısı, güneşlenme süresi, hava durumu gibi farklı değişkenlerin etkisi altında incelemişlerdir. Güney yarım kürede bulunan Hindistan Chennai şehrinde HQ kampüsünde çatı üzerine kurulan doğu-batı ve güney yönelimli iki adet fotovoltaik sistemin çıktılarını analiz ederek, aynı çatı alanı için 14,58 kWp kurulu güce sahip doğu-batı yönelimli ve 10,08 kWp güney yönelimli fotovoltaik sistemlerin gerçek zamanlı verilerini karşılaştırmışlardır. Hindistan'da kurulan sistemin güney yarım kürede ve ekvatora yakın bulunması sayesinde güneşlenme süresinin yüksek olacağı ve panellerin maksimum düzeyde ışınımına maruz kalacağını öngörmüşlerdir. Her 15 dakikada bir alınan gerçek zamanlı verileri, Mart, Haziran, Eylül ve Aralık ayları için karşılaştırmışlardır. Bu aylardaki verilerin incelenmesinin nedeni güneşin mevsimsel hareketindeki dünyanın enlemlerine yani ekinokslara, yaz gündönümüne ve kış gündönümüne göre kritik dönemleri temsil etmesi olarak açıklamışlardır. Doğru-batı yönelimli sistemin güney yönelimli sisteme göre söz konusu aylarda yaklaşık %6 oranında daha fazla üretim yaptığını tespit etmişlerdir. Ayrıca doğu-batı yönelimli sistemde enerji üretiminin sabah ve öğleden sonraki saatlerde daha fazla olduğunu, güney yönelimli sistemde

ise gün ortasında daha fazla olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Bu sayede doğu-batı sistemlerin, yük profili ile gün içerisinde daha uzun süreli ve daha iyi eşleştiğini ortaya koymuşlardır. Her iki sistemi aynı alan için değerlendirdiklerinde doğu-batı yönelimli sistemin, güney yönelimli sisteme göre %33 daha fazla kurulu güçte tesis edilebildiğini ortaya koymuşlardır. (Sankar ve diğerleri, 2014:25)

Christy Etukudor ve arkadaşları Güney Batı Nijerya'da fotovoltaik güneş enerji sistemlerinde optimum eğim ve azimut açılarının belirlenmesi için çalışma yürütmüşlerdir. Fotovoltaik güneş panelinin farklı eğim ve azimut açılarındaki sonuçlarını görmek için Nijerya Ota'da bulunan Covenant Üniversitesi'nin Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü binasının çatısına deney düzeneği kurmuşlardır. Deney düzeneği için, tepesine panel montajı yapılabilecek 1,16m yüksekliğinde direk kullanılmış ve direk üzerinde 0°, 5°, 7°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 55°, 70° ve 90° 'lik eğim açılara karşılık gelecek şekilde delikler açılmıştır. Ayrıca azimut açısı ayarı için bir adet pusula ve direk tepesine monte edilen 40W monokristal güneş panelinin çıkış değerlerini ölçmek için bir adet sayaç kullanılmışlardır. Deney düzeneği ile sabah 07:00'dan 18:00'a kadar sürekli ölçüm yapılmıştır. Ölçümlere güney yönünde 0° eğim ile başlanarak, açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçülerek kaydedilmiştir. Aynı şekilde ölçüm güney yönelimde diğer açı değerleri içinde yapılmış ve azimut açısı pusulayı yardımıyla güney-batı (45°), batı (90°), kuzey-batı (135°), kuzey (180°), kuzey-doğu (225°), doğu (270°) ve güney-doğu (315°)'ya çevrilerek söz konusu ölçümler 18:00'a kadar tekrarlanmıştır. Yapılan bu ölçümlerde, maksimum verimin 49,06W ile saat 13:00'da 20° eğim ve güney yönelimde elde edildiği görülmüştür. Sonuç olarak, bu bölgedeki bir fotovoltaik güneş enerji sistemi kurulumu için optimum enerji veriminin, 20° eğim açısıyla güney yönelimde elde edildiğini ortaya koymuşlardır. (Etukudor ve diğerleri, 2018:348)

Suman Chowdhury ve arkadaşları Bangladeş coğrafi şartlarında bina entegre fotovoltaik uygulamaların performansının, eğim ve azimut açısı ile değişiminin ortaya konulması için çalışma yürütmüşlerdir. Simülasyonu yapılan bina entegre fotovoltaik sistemin, azimut açısı 0°'de sabit tutularak, eğim açısı 10° ile 50°

arasında 5'er derecelik açıyla değiştirilerek performansı incelenmiştir. Her 5°'de bir alınan verilerde güç artış oranının sırasıyla %0,41, %1,24, %1,68, %2,59, %3,11, %4,17, %4,85 ve %5,64 olduğu ve toplamda artan güç oranının %26,14 olduğu görülmüştür. Yine aynı şekilde simülasyonu yapılan bina entegre fotovoltaik sistemin, eğim açısı 20°'de sabit tutularak, azimut açısı 160° ile -20° arasında 20'şer derecelik açıyla değiştirilerek performansı incelenmiştir. Her 20°'de bir alınan verilerde güç artış oranının sırasıyla %-1,24 , %-0,82 , %0,0 , %0,41 , %0,83 , %1,69 , %1,72 ve %2,19 olduğu ve toplamda artan güç oranının %6,7 olduğu görülmüştür. Sonuç olarak yaptıkları çalışmada bina entegre fotovoltaik sistemlerin performansının azimut açısından ziyade eğim açısına bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. (Chowdhury ve diğerleri, 2012:20)

Amir Asgharzadeh ve arkadaşları fotovoltaik sistemlerde bifacial panelin yatay ve dikey konumlarda kullanımının, farklı enlem ve hava koşullarına sahip birden fazla lokasyonda performanslarıyla ilgili çalışma yürütmüştür. Ayrıca çalışmada albedo, eğim açısı ve yükseklik gibi parametrelerin bifacial fotovoltaik sistemlerin performansına etkisi araştırılmıştır. Radiance ışık izleme yazılımı kullanılarak, yatay ve dikey konumda bifacial fotovoltaik panelin simülasyonları yapılmıştır. Simülasyonlarda ön ve arka taraf verimleri sırasıyla %17,4 ve %15,6 olan bifacial fotovoltaik panel seçilmiştir. Singapur, Hawaii, Cairo, Albuquerque, Beijing, Paris ve Anchorage lokasyonları için farklı hava koşullarında yatay ve dikey bifacial panellerin yıllık enerji üretimleri karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmada Singapur hariç diğer tüm lokasyonlarda bifacial fotovoltaik panelin dikey konumda kullanılması daha iyi performans sonuçları vermiştir. Singapur için bifacial fotovoltaik panelin yatay konumda daha iyi performans göstermesi, enlem açısının 1,17° olmasından dolayı panelin kendi kendini gölgeleme etkisinin fazla olması olarak açıklanmıştır. Söz konusu çalışma yapılırken bifacial panellerde kirlilikten dolayı oluşacak kayıplar dikkate alınmamıştır. (Asgharzadeh ve diğerleri, 2018:1730)

Taeyon Hwang ve arkadaşları binaya entegre güneş enerji sistemlerinde eğim, yönelim ve paneller arası gölgeleme mesafesinin elektrik üretimine olan etkisiyle

ilgili çalışma yapmışlardır. Güneş panellerinin birbirlerine olan gölge etkisi ve etrafındaki binalardan kaynaklı gölgelenmeler göz önüne alınarak yatay ve dikey konumda farklı eğimlerde analizler yapılmıştır. PV-DesignPro simülasyon programı ile farklı yönelim ve açılara göre üretimler simüle edilmiştir. Farklı eğim ve yönelime göre binaya entegre güneş enerji sistemlerinde kurulu güçteki değişiklikler analiz edilmiştir. Paneller arasındaki mesafe ile panel uzunluğu oranınının 1-3 arasında olması üretim açısından maksimum verimi sağlayacağı sonucuna ulaşmışlardır. (Hwang ve diğerleri, 2011:92)

Oprea Roxana ve arkadaşları sabit fotovoltaik modüller için optimum eğim açısının deneysel olarak değerlendirilmesiyle ilgili çalışma yürütmüşlerdir. Romanya Iasi'daki Gheorghe Asachi Teknik Üniversitesi'nde, Iasi'de kurulacak bir güneş enerji sisteminin performansını değerlendirmek amacıyla deney düzeneği kurarak deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma için güneşi taklit eden 500 W'lık bir halojen lamba ve 10 W'lık bir fotovoltaik güneş paneli ile birlikte azimut, yükseklik ve eğim açısının ayarlanabildiği konstrüksiyon mekanizması kullanarak deney düzeneği oluşturmuşlardır. Romanya'nın Iasi şehrinin coğrafi koordinatlarını göz önünde bulundurularak güneşin konumu hesap edilmiş ve bu konumlara göre güneşi taklit eden düzeneğe fotovoltaik güneş paneli monte edilmiştir. Güneşin konumu her ayın 22'sinde saat 12'de olacak şekilde ayarlanarak, akım, gerilim ve güç ölçümleri yapılmıştır. Sonuç olarak Romanya'nın Iasi şehrinin coğrafi şartlarında ocak, şubat, ekim, kasım ve aralık aylarında; 50°, mart, nisan ve eylül aylarında; 40°, mayıs ve ağustos aylarında; 30°, haziran ve temmuz aylarında ise 20° eğim açılarında maksimum performansta üretim gerçekleştiğini ortaya koymuşlardır. (Roxana ve diğerleri, 2018:594)

Bu tez çalışmasında ise, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksinde tesis edilen doğu-batı yönelimli güneş enerji sisteminin çıktıları değerlendirilecektir. Kurulan sistem, İstanbul ili sınırlarında güneş potansiyelinin belirlenmesi ve güney yönelimli sisteme göre enerji üretim durumunun saptanması adına önem arz etmektedir. Kurulumu gerçekleştirilen sistem 650 adet 260 W'lık polikristal güneş panelinden oluşmaktadır. Doğu-batı sistemlerinin ilk kurulum

maliyeti düşünülduğünde polikristal güneş panellerinin yüksek güçlerde ekonomik açıdan uygun olması sistemi kullanılabilir hale getirmektedir. Sistemde kullanılan optimizer sayesinde panel bazlı maksimum güç noktası takip edilecek olup, enerji kaybının en aza indirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca güney yönelimli sistem yerine aynı alan için daha fazla kurulu güçte kurulum yapılacaktır. Sistem üretim değerleri veri kayıt ve uzaktan izleme sistemi sayesinde Web portalı ve inverter çıkışından ölçülebilecektir. Ölçülen değerler aynı güçteki güney yönelimli güneş enerji sistemi ve aynı çatı alanı için kurulabilecek maksimum güçteki güneş enerji sistemi ile simüle edilerek karşılaştırılacaktır. Farklı konfigürasyonlar için sonuçlar analiz edilecektir.



2. BÖLÜM

YENİLENEBİLİR ENERJİ

Yenilenebilir enerji, sürekli devam eden doğal süreçlerdeki var olan enerji akışından elde edilen enerjidir. Güneş var oldukça ve atmosferik olaylar devam ettikçe tükenmeyecek enerji kaynağı anlamına gelmektedir. Günümüzde dünyada enerji tüketiminin yüzde 80'i fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Çevreci ve temiz yenilenebilir enerji kaynakları gün geçtikçe yaygınlaşarak petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmaktadır.

2.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynakları Güneş, Rüzgâr, Biyokütle, Jeotermal, Hidrolik, Hidrojen ve Okyanus enerjisi (dalga ve gel-git) olarak sıralanabilir. Bu enerji kaynakları, fosil enerji kaynaklarının tersine zamanla tükenmez ve kömür, petrol, doğalgaz gibi yenilenemeyen enerji kaynaklarına alternatiflerdir. Farklı alanlarda kullanımları mümkündür. Aşağıda bazı yenilenebilir enerji türleri açıklanmıştır. (Ege Üniversitesi, b.t.)

2.1.1 Hidroelektrik Enerjisi

Su, Güneş ve yerçekiminin etkisiyle atmosfer ile yeryüzü arasında sürekli dolaşır. Güneşten gelen ışınların etkisiyle buharlaşan su atmosfere doğru yükselir, daha sonra yağmur, kar ya da dolu şeklinde yoğunlaşarak yer çekiminin etkisiyle tekrar yeryüzüne döner. Dünyadaki bu döngü hidrolik enerjinin temelini oluşturur. Hidrolik enerji, bu döngü sayesinde yükseklik kazanan suyun sahip olduğu potansiyel enerjinin, kinetik enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilir. Hidrolik enerji, kurulan hidroelektrik santraller vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Barajlarda tutulan suyun, kanallar ya da borular yardımı ile serbest bırakılmasıyla kinetik enerji kazanır ve bu kinetik enerji türbinleri döndürür. Suyun akış etkisiyle dönen türbinlerden jeneratör yardımıyla elektrik enerjisi üretilir. (Varış, 2017)

2.1.2 Rüzgâr Enerjisi

Güneş ışınlarının Dünya'ya farklı açılarda gelmesi farklı sıcaklıklarda bölgeler meydana getirerek basınç farklılıklarına neden olur. Alçak basınç merkezinden yüksek basınç merkezine doğru olan hava akımına Rüzgâr denir. Basınç farkından oluşan hava akımının kinetik enerjisinin kullanılmasına Rüzgâr enerjisi denir. Rüzgâr enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları arasında oldukça büyük bir öneme sahiptir. Rüzgâr enerjisinin temel kaynağı güneş olup güneşten yeryüzüne gelen enerjinin %2'si Rüzgâr enerjisini oluşturmaktadır. Rüzgâr enerjisi su pompalama, sıkıştırma, yağ çıkarma, tahıl öğütme ve elektrik üretimi amacıyla kullanılmaktadır. (Varış, 2017)

2.1.3 Güneş Enerjisi

Güneş dünyadan 150 milyon km uzaklıkta 1,4 milyon km çapında olan bir yıldızdır. Dünya'nın yaklaşık 110 katı büyüklüğündedir. Güneş enerjisi, güneşteki füzyon tepkimelerinden oluşan ısı ve ışık olarak yayılan tükenmez ve temiz bir enerji türüdür. Güneş'te açığa çıkan enerjinin tamamının yeryüzüne ulaşması mümkün değildir. Güneş ve Dünya arasındaki uzaklıktan dolayı güneş enerjisinin yaklaşık % 50'si atmosferi geçerek yeryüzüne ulaşır. Bu % 50'lik kısmın ise yaklaşık % 30'u atmosfer katmanlarından geri yansıtılır. Güneş'ten dünyaya gelen güneş enerjisinden 10^{10} MW'lik enerji, ışık kaynağı olarak ulaşmaktadır. Güneş sistemi var olduğu sürece devam edecek bir enerji kaynağı olduğu için sonsuz bir enerji kaynağıdır. Aynı zamanda da tüm enerji kaynaklarına dolaylı ya da doğrudan kaynaklık eden bir enerji türüdür. Güneş enerjisinden birçok farklı formda yararlanılabilir. Güneş kollektörü ve toplayıcılar ile ısı ve elektrik üretimi sağlanabilirken, fotovoltaik modüller sayesinde de elektrik üretimi yapılabilmektedir. (Varış, 2017)

2.1.4 Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, yerkabuğunun derinliklerinde birikmiş olan ısının aktarımı ile oluşan sıcak su ya da buhar kaynaklarından elde edilen ısı enerjisidir. Jeotermal

enerjinin oluşumunda yerkürenin magmatik yapısı ve tektonik hareketlilikler etkilidir. Jeotermal kaynaklar, genellikle deprem fay hatlarının ve volkanik yapıların bulunduğu ana tektonik plaka sınırları boyunca bulunur. Yeryüzü derinliğine doğru açılan kuyulardan borular yardımıyla çıkan sıcak su veya buhar, türbin-jeneratör sistemi ile elektrik enerjisine çevrilir. Jeotermal kaynaklar elektrik üretiminin yanı sıra, ısıtma, sağlık ve tarım uygulamaları vb. olarak da kullanılmaktadır. (Varış, 2017)

2.1.5 Biyokütle Enerjisi

Doğada bulunan bitkilerin ve canlı organizmaların kökeni olarak ortaya çıkan biyokütle, genelde Güneş enerjisini fotosentez yardımıyla depolayan bitkisel organizmalar olarak adlandırılır. Biyokütle, bir türe veya çeşitli türlerden oluşan bir topluma ait yaşayan organizmaların belirli bir zamanda sahip olduğu toplam kütle olarak da tanımlanabilir. Bitkiler sayesinde gerçekleştirilen fotosentez ile enerji kaynağı olan organik maddeler sentezlenirken tüm canlıların solunumu için gerekli olan oksijeni de atmosfere verilir. Üretilen organik maddelerin yakılması sonucu ortaya çıkan karbondioksit ise, daha önce bu maddelerin oluşması sırasında atmosferden alınmış olduğundan biyokütleden enerji elde edilmesi sırasında çevre, CO₂ salımı açısından korunmuş olacaktır. Bu bağlamda bitkiler, yalnızca besin kaynağı olarak kullanılmakla kalmayıp aynı zamanda çevre dengesini sağlayarak tükenmez enerji kaynağı konumundadırlar. (Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, 2019)

2.1.6 Hidrojen Enerjisi

Doğada serbest halde bulunmadığından sadece hidrojen içeren bileşiklerden elde edilir. Hidrojenin bir enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi için yapısında bulunan bileşiklerden ayrılması gereklidir. Hidrojen üretiminde genellikle iki ayrı yöntem, buhar reformasyonu ve elektroliz yöntemi kullanılmaktadır. Elektroliz yöntemi ile elde edilen hidrojen sera gazı çıkışı olmadığından bu yöntemle üretilen hidrojen yenilenebilir enerji kaynağıdır. Hidrojen, ulaşımda, uzay sanayinde, elektrik

retiminde, endüstriyel alanda ve evlerde kullanılmaktadır. Hidrojen sıvı ve gaz formunda bulunabilmesi ile taşınabilmekte ve depolanabilmektedir. (Varış, 2017)

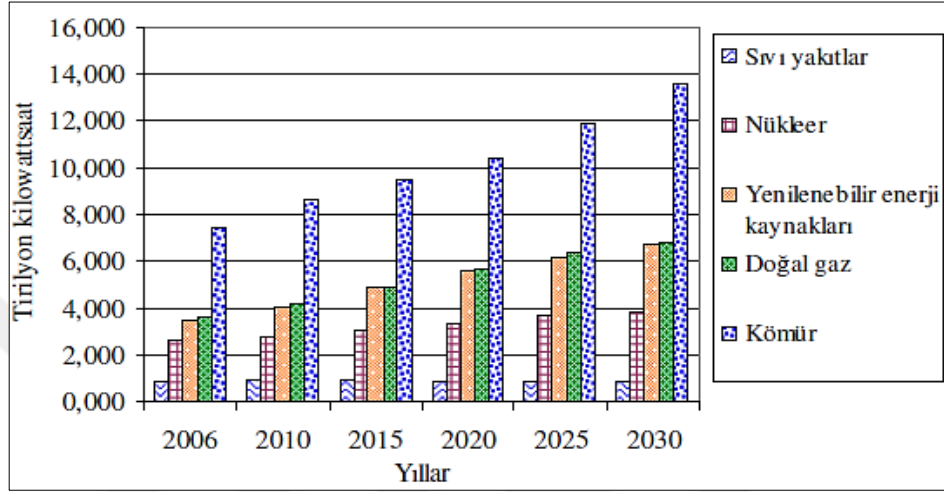
2.1.7 Gel-git ve Dalga Enerjisi

Dünya kütlesinin yaklaşık %71'i su ile kaplıdır. Rzgrlar vasıtasıyla oluşan akıntılar, yüzey dalgaları ve gelgitler nedeniyle bu su kütleleri sürekli hareket halindedir. Suyun yeryüzündeki bu hareketi vasıtasıyla yoğun miktarda kinetik enerji oluşmaktadır. Oluşan bu kinetik enerji yenilenebilir enerji elde etmede oldukça büyük bir potansiyele sahiptir. Gel-git enerjisi için özel olarak üretilen türbinlerde bu kinetik enerji elektrik enerjisine çevrilmektedir. Bu zel türbinler okyanus dalgalarının yüzey hareketinden veya yüzeyin altındaki basınç dalgalanmalarından enerji üretebilmektedirler.

2.2 Dünya'da Yenilenebilir Enerji Kaynakları Durumu

Dünya genelinde kullanılan enerjinin çok büyük bir bölümü, petrol ürünleri (benzin, dizel akaryakıtlar ve propan gibi), doğal gaz, kömür, uranyum (nükleer enerji) gibi yenilenemeyen enerji kaynaklarından oluşmaktadır. Petrol fiyatlarındaki istikrarsızlık ve petrol türevli enerji kaynaklarından oluşan hava kirliliği nedeniyle birçok ülke temiz ve çevreci bir enerji kaynağı olan yenilenebilir enerji kaynakları alanında çalışmalarına hız vermiştir. Hızla gelişmekte olan yenilenebilir enerji kaynaklarının Dünya enerji tüketimindeki artışın yaklaşık yıllık %3 oranında olması beklenmektedir. Bu konuda devletler tarafından çalışmalar yapılarak kanun, yönetmelik ve mevzuatlar yayınlanmaktadır. Ayrıca kamu ve özel sektör tarafından da yenilenebilir enerji kaynakları için fonlar oluşturulmaktadır. Hatta hkmetler yenilenebilir enerji yatırımcılarına bir takım teşvikler sunmaktadırlar. Bu gelişmeler sayesinde günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtlara nazaran elektrik üretiminde daha fazla pay almaya başlamıştır.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en fazla büyüme hidroelektrik enerji, Rüzgâr enerjisi ve güneş enerjisinde olmaktadır. Yenilenebilir enerji üretim teknolojileri hâlihazırda maliyet olarak fosil yakıtlarla yeni yeni rekabet etmeye başlasa da hükümetlerin çevreci politikaları ve teşvikleri sayesinde yatırımları her geçen gün artmaktadır. (Bedeloğlu, 2010)



Kaynak: Bedeloğlu A., Demir A. ve Bozkurt Y., (2010)

Şekil 2.1. 2006-2030 yılları arası dünya enerji projeksiyonu

2.3 Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları Durumu

Ülkemizde lisanssız elektrik üretim yönetmeliğinin yayınlanması ile birlikte büyük bir ivme kazanan yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı son 5 yılda ciddi bir artış göstermiştir.

Enerji Piyasaları Düzenleme Kurulu’nun yayınladığı Nisan 2019 verilerine göre ülkemizin elektrik kurulu gücü 89.651,13 MW olup bu kurulu gücün % 47,73’lük kısmını, 42.795,62 MW’ını yenilenebilir enerji kaynaklı üretim santralleri oluşturmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en fazla payı %66’lık oran ile hidroelektrik santralleri almaktadır. Bu kaynakların geri kalan kısmının ise %17’sini Rüzgâr, %12’sini güneş, %3’ünü jeotermal, %2’sini biyokütle enerjisi oluşturmaktadır. (EPDK, 2019)

Tablo 2.3 Türkiye yenilenebilir enerji kurulu gücü Nisan 2019 verileri

Yenilenebilir Enerji	MW
Hidrolik Enerji	28.402
Rüzgâr	7.073
Güneş	5.348
Jeotermal	1.303
Biyokütle	670
Kurulu Güç	42.796

Kaynak: <https://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/3-0-23-3/elektrikaylik-sektor-raporlar>

Ülkemizde güneş enerjisi yatırımları 2014 yılında başlamış olup 40 MW kurulum yapılmıştır. Güneş enerjisi yatırımları son yıllarda çok hızlı bir yükseliş göstermiştir. 2015 yılında 249 MW'a, 2016 yılında 833 MW'a, 2017 yılında 3.421 MW'a, 2018 yılında 5.063 MW'a, 2019 yılı Nisan ayı itibari ile ise 5.348 MW'a ulaşmıştır.

3. BÖLÜM

GÜNEŞ ENERJİSİ

Günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları arasında üzerinde en çok çalışılan enerji türü güneş enerjisidir. Güneş, dünyamıza ve diğer gezegenlere enerji veren büyük bir enerji kaynağıdır. M.Ö.267 yılında Arşimet'in iç bükey aynaları kullanarak güneş enerjisini odakladığı ve Sirakuza'yı kuşatan gemileri yaktığı iddia edilmektedir. Güneş enerjisi konusundaki çalışmalar 1600 yılında Galileo'nun bulduğu mercekle başlamıştır. Asırlardan beri güneş ışınları yeryüzüne gelmesine rağmen, güneş ışınlarından enerji üretimi çalışmaları oldukça yenidir.

Güneş enerjisi, güneş çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile hidrojen gazının helyuma dönüşmesi sonucu açığa çıkan ışıma enerjisidir. Son derece sıcak olan güneş çekirdeğinde proton-proton birleşmesinden kaynaklı nükleer füzyon gerçekleşir. Protonların birleşmesinden helyum ve nötrinolar (elektriksel olarak nötr partikül) oluşur ve devasa bir enerji ortaya çıkar. Ortaya çıkan bu enerji iki farklı şekilde dünyamıza ulaşır. Bunlardan biri elektromanyetik radyasyon bir diğeri ise yüklü parçacıklardan oluşan partikül radyasyonudur. Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin şiddeti yaklaşık olarak 1370 W/m^2 'dir. Ancak bu enerji atmosferden geçerken belli bir oranda sönmelenmektedir. Yeryüzüne ulaşan güneş enerjisi $0-1100 \text{ W/m}^2$ değerleri arasında değişim gösterir. Yeryüzüne ulaşan bu enerjinin küçük bir bölümü dahi günümüzde tüketilen enerjiden katbekat fazladır.

Güneş ışınım değerlerini ölçmek, en yüksek verimin hangi bölgeden alınacağını belirlemek açısından çok önemlidir. Dünya genelinde bulunan meteoroloji istasyonlarından ve uydulardan alınan veriler ışığında coğrafi olarak güneş enerjisinin potansiyelini gösteren haritalar oluşturulmuştur.

1970'lerden sonra hız kazanan güneş enerjisi çalışmaları sayesinde güneş enerji sistemleri teknolojik olarak ilerleme sağlayarak, maliyet açısından düşüş göstermiş ve çevresel temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir.

Dünyada sürekli artan nüfus ve gelişen teknoloji ile birlikte elektrik enerjisi kullanımının hızla arttığı göz önüne alınacak olursa fosil yakıtlar gibi çevresel etkileri olmayan, çevreci ve temiz bir enerji kaynağı olan güneş enerjisinin önemi daha da iyi anlaşılmaktadır.

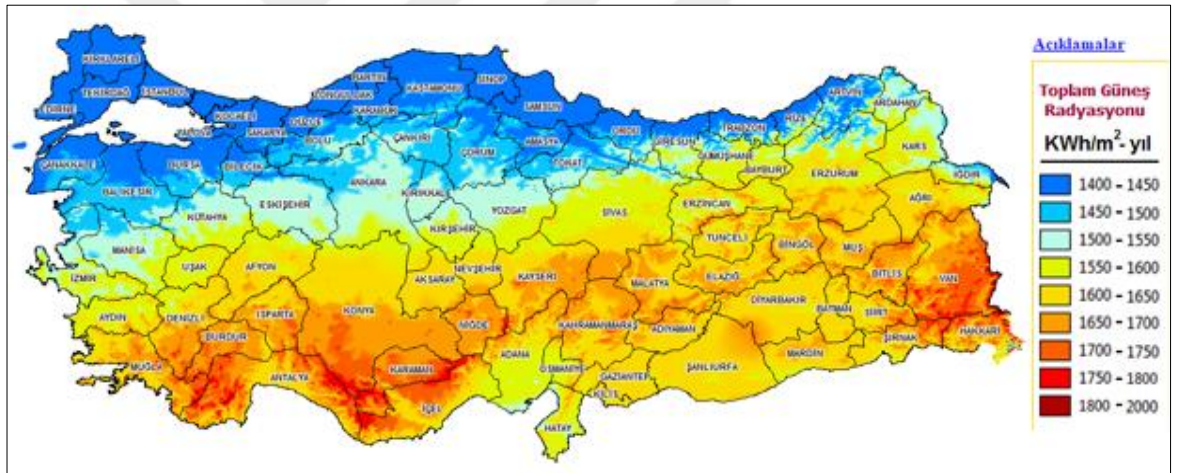
Silikon gibi bazı materyaller güneş enerjisini direkt olarak elektrik enerjisine çevirme özelliğine sahiptir. Bu çevrim olayına fotovoltaiik etki denir. Fotovoltaiik etki, yarı iletken olarak adlandırılan bazı materyallerin güneş ışığını direkt olarak elektriğe çevirebilmesi olarak açıklanmaktadır.

Klasik fotovoltaiik hücreler genellikle silikon bazlı yarı iletken malzemelerden yapılmış bileşenlerdir. Silikon bazlı yarı iletken malzemeler, fotonları soğurarak onların enerjisini elektrik enerjisine çevirebilmektedir. Yarı iletken malzemedan oluşan hücrelerin ön ve arka kısımlarında elektronlar toplanır. Hücrede soğurulan ışınım enerjisi ile oluşan elektron hareketi sayesinde bir elektrik akımı meydana gelir ve elektrik üretilmiş olur. İstenilen gerilim seviyesini elde etmek için ise hücreler kendi aralarında seriler halinde bağlanırlar.

Hücrelerde soğurulan güneş ışınım ile oluşan elektron hareketi güneş ışınımı devam ettiği müddetçe, teoride sonsuz olarak sürmektedir. Bu süreklilik sayesinde elektrik akımı oluşarak güç elde edilmiş olur. Elde edilen güç, soğurulan ışınım miktarıyla doğru orantılıdır. Üretilen bu doğru akım inverterler vasıtasıyla alternatif akıma çevrilerek şebekeye aktarılır. (Haselhuhn, Hemmerle, 2012: 3-12)

3.1 Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli

Güneş dünyamız için sonsuz bir enerji kaynağıdır. Ülkemizde bu sonsuz enerji kaynağından yararlanma potansiyeli açısından oldukça iyi bir konumdadır. Ülkemizde giderek artan enerji talebinin yanı sıra enerjide dışa bağımlılık, petrol fiyatlarındaki istikrarsızlık ve arz güvenliği gibi nedenlerden dolayı güneş enerjisi önemini giderek arttırmaktadır. Ülkemizde güneş enerjisinden yararlanma adına birçok çalışma yapılmaktadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası’na (GEPA) göre, ülkemizin yıllık toplam güneşlenme süresi 2.737 saat (günlük 7,5 saat), ülkemize ulaşan yıllık toplam güneş enerjisinin ise 1.527 kWh/m² yıl olduğu tespit edilmiştir. (Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, 2019)



Kaynak: <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx>

Şekil 3.1. Türkiye güneş enerji potansiyel atlası (GEPA)

Güneş enerjisi, güneş var oldukça devam eden ve çevreye zarar vermeyen sonsuz bir enerji kaynağıdır. Çevreci ve sonsuz bir enerji kaynağı olmasının yanı sıra bu alanda gelişen teknoloji ile birlikte düşen yatırım maliyetleri sayesinde kullanımı her geçen gün yaygınlaşarak artmaktadır. Elektrik şebekesinin olmadığı taşra, yüksek rakımlı bölge, açık deniz vb. bölgelerde güneş panelleri sayesinde bedava elektrik sağlanmaktadır. Ayrıca yaşam boyu santral maliyet analizi yapıldığında güneş enerjisi en ucuz enerji kaynakları arasında yer almaktadır.

Ülkemiz doğalgaz ve petrol gibi fosil kaynak rezervi açısından kendi kendine yeten bir konumda değildir. Bu nedenle petrol ve doğalgazın neredeyse tamamına yakını (petrolün %90'ını, doğalgazın %99'unu) Rusya, Azerbaycan, Cezayir, İran, Irak, Suudi Arabistan vb. ülkelerden ithal etmektedir. Maalesef ülkemizin elektrik üretiminin yarısından fazlası bu ithal kaynaklardan karşılanmaktadır. Bu durum arz güvenliği açısından bir zafiyet oluşturmaktadır. Ayrıca ülke ekonomisi açısından da cari açık oluşmasına neden olmaktadır. Hâlbuki ülkemiz, yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli bakımından oldukça zengindir. Hükümet tarafından yenilenebilir enerji kaynaklarına verilecek teşvik ve desteklerle kullanımının artırılması sağlanarak ülke ekonomisi ve güvenliğine katkı sağlanabilir. (Enerji İthalat Faturası, Anonim, b.t.)

Türkiye, güneş ışınımı açısından dünya ortalamasının üzerinde ışınım almaktadır. Ayrıca güneşlenme süresi uzun olduğundan elektrik üretimi açısından oldukça elverişli bir konumdadır.

Yenilenebilir enerjide ülkemizin öne çıkan özellikleri aşağıda vurgulanmıştır.

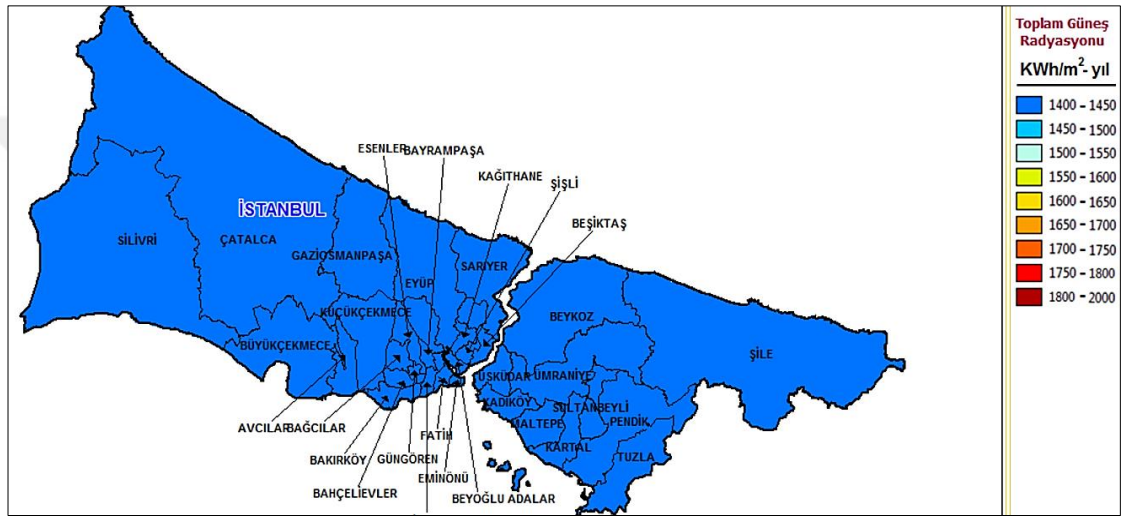
- Jeotermal kaynaklar açısından dünyada ilk beş ülke arasındadır,
- Rüzgâr enerjisinde 80.000 MW potansiyele sahiptir.
- Coğrafi konumu itibarıyla çok sayıda doğal kaynağa sahiptir,
- Güneş enerji potansiyeli Avrupa ortalamasının üzerindedir.

3.2 İstanbul'da Güneş Enerjisi Potansiyeli

İstanbul, nüfus bakımından en yoğun, enerji tüketimi açısından da en fazla enerji tüketen ilimizdir. Göç alan bir il olması nedeniyle de son yıllarda enerji talebinde sürekli artış olmaktadır. Bu nedenle enerji talep artışını dengelemek ve mevcut enerji tüketimini belirli bir oranda karşılayabilmek adına uygun çatı alanlarına ve arazilere kurulacak olan güneş enerji santralleri büyük önem arz etmektedir. İstanbul, sanayi şehri olması, güneş enerji sektöründe geniş firma portföyüne sahip olması ve

bünyesinde birçok finans kuruluşu barındırmasıyla güneş enerjisi yatırımları yapılması açısından önemli üstünlüklere sahiptir.

Eski adıyla Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM), yeni adıyla Elektrik İşleri Genel Müdürlüğü (EİGM) tarafından hazırlanan Güneş Enerji Potansiyel Atlası'na (GEPA) göre İstanbul için güneş radyasyonu yıllık ortalama 1.400-1.450 kWh/m² 'dir. Bu ışınım seviyesine İstanbul ili güneş santrali kurulumu için oldukça elverişli bir bölgedir. (Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, 2019)



Kaynak: <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/pages/34.aspx>

Şekil 3.2. İstanbul ili güneş enerji potansiyel atlası

Tablo 3.2 İstanbul ili ışınım süresi ve gün uzunluğu

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

Tablo 3.2 Devam

Eylül	8,2	12,3
Ekim	6,2	10,9
Kasım	4,3	9,7
Aralık	2,8	9,1
Ortalama	6,6	12

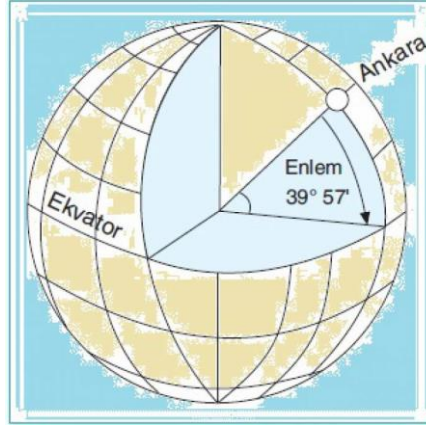
Kaynak: <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx>

3.3 Güneş Geometrisi

Dünyamız samanyolu içerisinde belirli bir yörüngede hem kendi hem de güneşin etrafında dönmektedir. Dünyamıza gelen güneş ışınımı, dünyanın kendi eksenini etrafında ve güneş çevresinde dönmesi ile belirlenmektedir. Bu dönüş hareketleri sayesinde dünyaya gelen ışınlar ile yeryüzü arasında değişik açılar oluşur. Bu açılarının bilinmesi ile güneşten dünyamıza gelen güneş ışınımından en yüksek seviyede faydalanabilir.

3.3.1 Enlem Açısı

Ekvator düzlemi ile yeryüzündeki herhangi bir noktayı dünya merkezine birleştiren doğru arasında kalan açıdır. Kuzey yönde pozitif (+), güney yönde negatif (-) olmak üzere -90° ile 90° arasında değişmektedir. Herhangi bir bölge için enlem açısı atlastan okunabilmektedir. Türkiye, coğrafi konumu itibarıyla $36-42^{\circ}$ kuzey paralelleri, $26-45^{\circ}$ doğu meridyenleri içinde yer almaktadır. Enlem açısı güneş yükseklik açısının hesaplanmasında da kullanılmaktadır. (Eskier, 2017)



Kaynak: http://akhisarmyo.cbu.edu.tr/db_images/file/gunes-enerjisi-1-1283TR.pdf

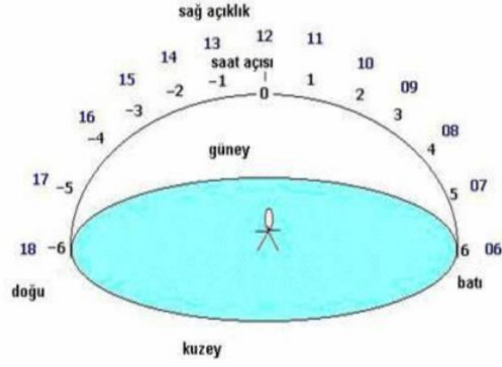
Şekil 3.3. Enlem açısı gösterimi

3.3.2 Deklinasyon Açısı (Sapma Açısı)

Güneş ışınları ve dünya yüzeyi arasındaki açı ilişkisi bakımından deklinasyon açısı en önemli açıdır. Güneş ışınlarının aylar ve mevsimlere göre dünyaya geliş açısı olup ayrıca diğer bir tanımlamayla da güneş ışınlarının ekvator düzlemi ile yaptığı açıdır. Deklinasyon açısının bir diğer adı ise sapma açısıdır. Deklinasyon açısı dünyanın kendi eksenini ve yörünge düzlemi ile yaptığı 23,45 derecelik açıdan kaynaklanmaktadır. Dünya dönme ekseninde eğik olmasaydı deklinasyon açısı daima sıfır olacaktı. (Akhisar Meslek Yüksek Okulu, 2012)

3.3.3 Saat Açısı

Saat açısı güneş ışınlarının bulunduğu boylam (güneş boylamı) ile göz önüne alınan yerin boylamı arasında kalan açıdır. Saat açısı, öğleden önce negatif (-) öğleden sonra pozitif (+) olmaktadır. Güneş öğlesinde, güneş saati tam 12 olmaktadır. Güneş öğle vakti ile ilgili zaman arasındaki saat farkının 15 sabit sayısı ile çarpılması sonucunda güneşin saat açısı bulunur. Bu sabit sayı, dünyanın güneş etrafında bir defa dönüşü ile yapmış olduğu 360°'lik açının bir günlük zaman dilimine yani 24'e bölünmesi ile elde edilmektedir. Diğer bir ifade ile bu katsayı, dünyanın güneş çevresinde 1 saatlik süre zarfında yaptığı açıdır. Her saat 15°'lik açığa karşılık gelir. Güneş açıları güneş öğlesine göre simetridir. (Akhisar Meslek Yüksek Okulu, 2012)

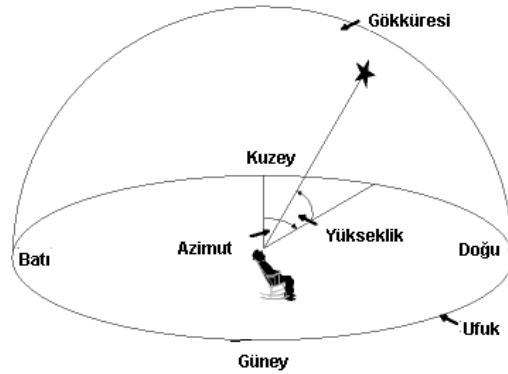


Kaynak: http://akhisarmyo.cbu.edu.tr/db_images/file/gunes-enerjisi-1-1283TR.pdf

Şekil 3.4. Saat açısı gösterimi

3.3.4 Zenith Açısı

Güneş ışınımı ile yatay yüzeyin dikey düzlemi arasında kalan açıdır. Başka bir ifadeyle güneş ışınlarının yatay düzleme geliş açısıdır. Güneşin doğuşu ve batışı sırasında 90° 'dir. Güneş ışınlarının dik geldiği durumda ise 0° olmaktadır. (Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, 2010)



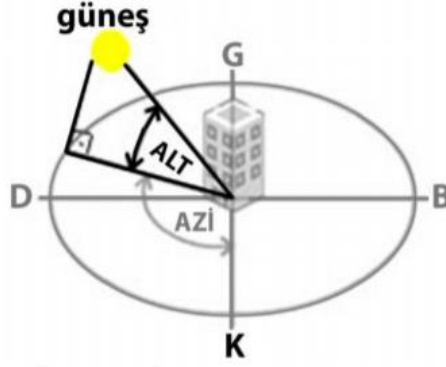
Kaynak: http://www.koeri.boun.edu.tr/astronomy/iridyum_uydular%FD.htm

Şekil 3.5. Zenith açısı gösterimi

3.3.5 Yükseklik Açısı

Yükseklik açısı, yeryüzüne gelen direkt güneş ışını ile yatay düzlem arasındaki açıdır. En yüksek değerini tüm mevsimler için geçerli olan öğle vaktinde almaktadır. Güneş doğuşu ve batışı sırasında 0° 'dir. Güneşin yükseklik açısı 21 Aralık'ta $26,5^\circ$

ile en küçük, 21 Haziran'da ise $73,5^\circ$ ile en büyük değerine ulaşmaktadır. (Akhisar Meslek Yüksek Okulu, 2012)

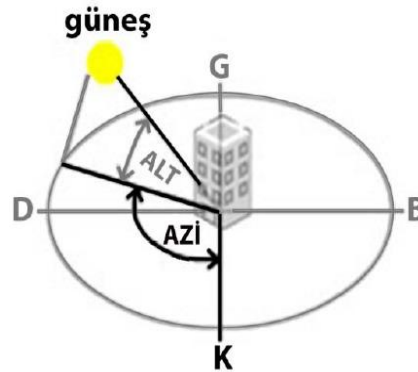


Kaynak: <https://www.learnlick.com/quiz/show/23191>

Şekil 3.6. Yükseklik açısı gösterimi

3.3.6 Güneş Azimut Açısı

Güneş azimut açısı, güneş-dünya doğrultusunun yatay düzlemdeki izdüşümü ile kuzey-güney doğrultu arasında kalan açıdır. Yani kuzey-güney doğrultusu ile güneşten gelen ışınım arasındaki açıdır. Ayrıca güneş azimut açısı, kuzeye göre saat dönüş yönünde sapmayı belirtir. Güneyden doğuya doğru negatif (-), batıya doğru pozitif (+) olarak kabul edilmektedir. Saat 12:00'da güneş azimut açısı $AZI = 180^\circ$ olmaktadır. (Güneş Açıları, Anonim, b.t.)



Kaynak: <https://www.learnlick.com/quiz/show/23191>

Şekil 3.7. Azimut açısı gösterimi

3.3.7 Yüzey Azimut Açısı

Yüzeyin dikinin yatay düzlemdeki izdüşümü ile güney doğrultusundaki açıdır. Yüzey azimut açısı güneyde sıfır (0°), doğu yönünde negatif (-), batı yönünde pozitif (+) 'dir. (Akhisar Meslek Yüksek Okulu, 2012)

3.4 Fotovoltaik Teknoloji

Fotovoltaik teknoloji, güneş ışığından doğrudan elektrik üretme teknolojisidir. Yarı iletken fotovoltaik güneş hücreleri vasıtasıyla güneşten gelen fotonlar soğurularak hücre yapısındaki serbest elektronlara enerji kazandırılır. Kazanılan bu enerji ile başlayan serbest elektron hareketi sonucunda da elektrik akımı oluşur. Fotovoltaik hücrelerde üretilen akım doğru akım formundadır. Bu akımın büyüklüğü güneş ışınım şiddeti, güneş ışınım geliş açısı ve sıcaklığa (hücre ve çevre sıcaklığı) bağlı olarak değişkenlik gösterir.

3.4.1 Fotovoltaik Teknolojisinin Gelişimi

İnsanoğlu yüzyıllar boyu güneş enerjisinden değişik formlarda faydalanmıştır. Güneşten fotovoltaik teknoloji ile elektrik üretim çalışmaları ise 1800'lü yıllarda başlamıştır. Fotovoltaik teknoloji ilk kez 1839 yılında ünlü Fransız bilim adamı Edmond Becquerel'in buluşuyla başlamıştır. Edmond, elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğu gözlemleyerek fotovoltaik olayını bulmuştur. Fakat o dönemde bu etki çok küçüktür ve herhangi bir faydası yoktur.

1904 yılına gelindiğinde ise Albert Einstein fotovoltaik etki ve ışığın kuantumu hakkındaki çalışmalarını açıkladı. Fakat Einstein'nın açıkladığı bu çalışmalar ilginç bir fizik deneyi olmanın ötesine geçemedi.

1954 yılında ABD’de yaşayan Chapin, Fuller ve Pearson adlı bilim adamları bir laboratuvarında silisyum içerikli ilk fotovoltaik hücreyi tanıttılar. Fotovoltaik hücre üretildiğinde %6 verime sahipti ve kısa bir süre içerisinde bu verim %10’a kadar yükseltildi.

Fotovoltaik teknolojinin en önemli kullanım alanı o zamanlarda uzay teknolojisiydi. 1958 yılında ilk kez Vanguard adlı uyduda 108 tane fotovoltaik hücre kullanımı gerçekleştirilmişti. Bu hücreler sayesinde uyduya beklenenden daha fazla süreyle elektrik sağlanmıştı. Bu sayede kısıtlıda olsa fotovoltaik hücre piyasası gelişmeye başlamıştı. Fakat yüksek maliyetler nedeniyle, o dönemde fotovoltaik teknolojinin uzay teknolojisi dışındaki alanlarda kullanılamayacağı düşünülüyordu.

Fotovoltaik hücreler zaman içerisinde şebekeden bağımsız elektrik tedarik sistemlerinde kullanılmaya başlandı. Bu hücrelerin kullanımı küçük ölçekteki saat ve hesap makinesi gibi cihazlarla başlayıp zamanla daha büyük cihaz ve tesislere yayıldı. Silisyum, fotovoltaik hücreler için düşük ışık soğurma özelliği nedeniyle ideal bir malzeme olmasa da başından beri fotovoltaik teknolojide bu malzeme kullanıldığı için piyasanın hâkimiydi.

Fotovoltaik hücre üretimi, yıllarca silisyum üretiminden arta kalan atıklarla yapıldı. Mikroişlemciler için gerekli yüksek kalite silisyum kristallerinden arta kalan malzemeler fotovoltaik hücreler için oldukça uygundu. Ancak artık silisyumlardan yapılan fotovoltaik hücreler bu teknolojinin büyümesinin önünde engel olmaya başladı.

1961 yılında fotovoltaik teknolojinin teorisi ile ilgili temeller atıldı. Shockley ve Queisser adlı araştırmacılar yayınladıkları bir çalışmada termodinamik temeller bazında fotovoltaik hücrelerden elde edilebilecek verimi hesapladılar. Shockley ve Queisser’in yaptığı bu çalışma günümüzde de hala geçerliliğini korumaktadır.

1970 yılında ABD’li Mobil-Tyco şirketi tarafından EFG yöntemini geliştirildi. Bu yöntemde kristalleştirilen silisyum, sekizgen biçiminde bir grafit kalıbının içinden çekilerek meydana getirilir. Çekme işlemi sonrasında meydana gelen sekizgen silindirler kesilerek dilimler oluşturulur. Bu sayede silisyum bloklar kolay bir şekilde kesilir. Söz konusu şirket geçen zaman içerisinde Alman üretici RWE-Schott tarafından satın alınmış olup bu yöntem Almanya’da da yaygınlaşmıştır.

Bir diğer silisyum saflaştırma yöntemi Evergreen yöntemidir. Bu yöntemle dilimler doğrudan eriyikten çekilerek meydana getirilir. Silisyum yüksek sıcaklığa dayanıklı, eriyiğin içine daldırılan iki telin arasında birikir. 2009 yılında bu yöntemle seri üretime geçilmiş ve yıl boyunca yaklaşık 100 MW modül üretimi gerçekleştirilmiştir.

Uzun yıllardan beri yarı iletken teknolojisinde malzeme geliştirme çalışmaları halen devam etmektedir. Bu çalışmalardaki amaç ışık soğurma özelliği yüksek olan malzemeler kullanıp birim alandaki verimi yükseltmek ve bununla birlikte daha ucuza üretmektir.

3.4.2 Fotovoltaik Çalışma Prensibi

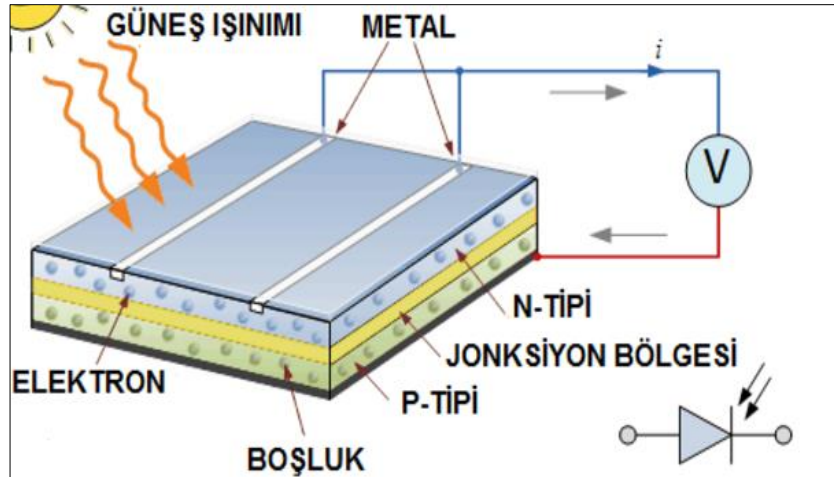
Atom yapısında bir fazla elektron olan üst katmanın fazla elektronu, güneş ışınlarının fotonlarıyla uyarılması sonucu atom yapısı bir elektron eksik olan alt katmana ilerleme eğilimi gösterir. Bu üst katmandan alt katmana doğru akan elektronlar bir dış devreye bağlandığında elektrik akımı oluşur. Şekil 3.8’de fotovoltaik pilinin çalışma prensibi gösterilmiştir.

Fotovoltaik hücreler tarafından emilen güneş radyasyonunun tamamı elektrik enerjisine dönüştürülemede ve atık ısı olarak çevreye verilmektedir. Bu atık ısı, fotovoltaik hücrelerin sıcaklık artışına neden olarak fotovoltaik panellerin elektriksel veriminin düşmesine neden olmaktadır. Fotovoltaik panellerde oluşan bu ısıdan

faydalanmak ve fotovoltaik hücreleri soğutmak amacı ile hibrit yapıda olan fotovoltaik termal sistemler geliştirilmiştir (Chow, 2010; Theodore, 2011).

Bu sistemde; fotovoltaik hücre sıcaklıkları bir akışkan sirkülasyonu ile ısı çekmek suretiyle düşürülmekte ve fotovoltaik panel yüzeyinden çekilen ısı sayesinde elektrik ve ısı enerjisi eş zamanlı olarak üretilebilmektedir. Bu tasarımla; fotovoltaik panellerin verimlerinin en üst düzeyde tutulması, panellerin kurulum alanlarından tasarruf yapılması ve güneş enerjisinden elektrik üretiminin yanı sıra çeşitli alanlarda kullanılabilir termal ısı üretimi gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Fotovoltaik güç teknolojisi, genellikle birkaç santimetrekare boyutunda yarı iletken pozitif ve negatif iki ayrı katmandan oluşan hücrelerden meydana gelir. Bu hücrenin yapısı, temel olarak geniş alanlı bir p-n diyotudur. Güneşten gelen ışınım enerjisi direkt olarak hücrede elektrik akımına dönüştürülür. İhtiyaç duyulan gücün üretilmesi amacıyla çok sayıda hücre birbirlerine eklenerek modül yapısı oluşturulur. (Yılmaz, 2013:478)



Kaynak: Yılmaz Ş., Güneş M. ve Kılıç E., (2013)

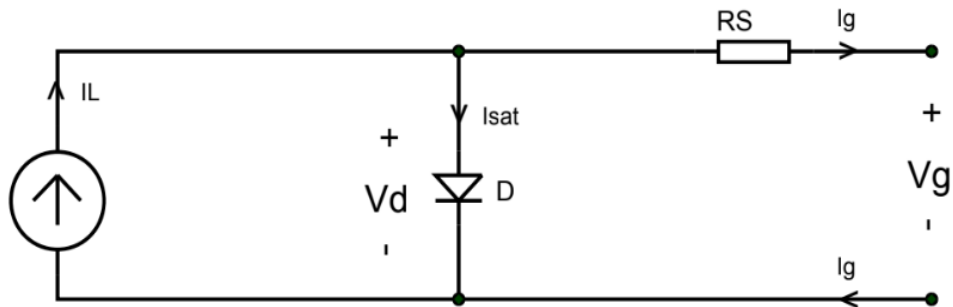
Şekil 3.8. Fotovoltaik pilin çalışma prensibi

Tüm fotovoltaik pillerin çalışma prensibi aynı şekildedir. Yarı iletken silikon malzemeler olan n-tipi ve p-tipi malzemeler birleştirildiğinde jonksiyon bölgesinde elektrik alan elde edilir. Jonksiyon bölgesinde oluşan elektrik alan diyot davranışı

göstermektedir. Oluşan bu elektrik alan sayesinde elektronların p-tipi silikon malzemeden n-tipi silikon malzemeye geçişine engel olunurken, ters yönde geçişine ise engel olunmaz. Güneşten gelen ışınım enerjisi jonksiyon bölgesi tarafından emilir. Emilen fotonların enerjisi, malzemedeki elektron sistemine transfer edilir ve hareketli elektronlar ile deliklerin oluşması sağlanır. Bu oluşum sayesinde jonksiyon bölgesinde potansiyel fark meydana gelir ve bu potansiyel fark elektrik alan altında hızlanarak dış devre boyunca akım ile DC güç meydana getirir. Fotovoltaik gerilimin meydana geldiği alan, birbirinden yalıtılmış iki malzemedeki elektronların kimyasal potansiyel farkıdır. Birbirinden yalıtılmış malzemelerdeki elektronların kimyasal potansiyel farkları fermi seviyesi olarak adlandırılır. Söz konusu malzemeler birleştirildiklerinde eklem yeni bir termodinamik dengeye yaklaşmaktadır. Bu denge, sadece iki malzemedeki fermi seviyeleri eşit olduğu zaman meydana gelmektedir. Bu durum fermi seviyesinin başlangıçtaki farkına eşit gerilime sahip olan iki malzeme arasındaki gerilim farkı sağlanana kadar, bir malzemeden diğerine olan elektron akışıyla ortaya çıkar. Bu gerilimin etkisiyle fotoakımı ortaya çıkar. (Güneş Sistemleri, Anonim, b.t.)

3.4.3 Fotovoltaik Hücrenin Eş Değer Devre Modellemesi

Fotovoltaik hücre davranışının anlaşılması için davranışları iyi bilinen elektriksel bileşenler kullanılarak eşdeğer devre modelinin oluşturulması gerekir. İdeal bir fotovoltaik hücre paralel bir akım kaynağı ve diyot ile modellenebilir. Solar ışık şiddeti ile direkt orantılı olan akım kaynağı, I_L fotoakımını meydana getirir. Şekildeki diyot ile fotovoltaik hücrenin p-n geçiş bölgesini temsil etmektedir.

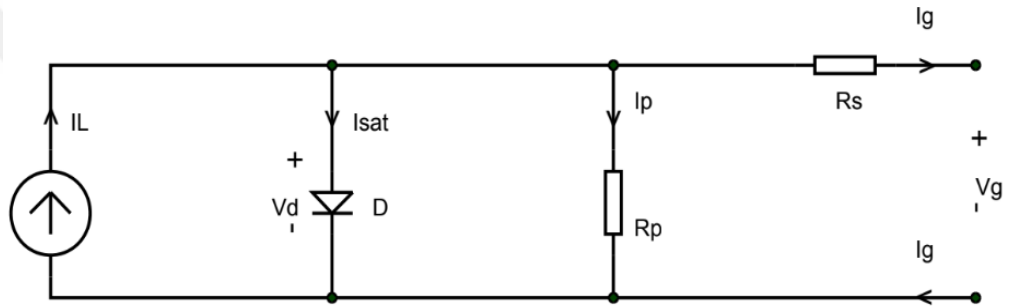


Şekil 3.9. FV hücrenin basitleştirilmiş eş değer devresi

Kirchhoff'un akımlar kanunu kullanılarak basitleştirilmiş eşdeğer devrenin akım gerilim (I-V) denklemi çıkarılabilir.

$$I_g = I_L - I_{sat} = I_L - I_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right) \quad (3.1)$$

Şekilde görüldüğü üzere basitleştirilmiş eşdeğer devre ile fotovoltaik hücrenin elektriksel işlemi için optimal bir gösterim elde edilmektedir. Fotovoltaik hücrelerde pratikte harici kontaklar üzerinde gerilim düşümü gözlenir. Bu gerilim düşümünü seri bir R_s direnci ile ifade edebiliriz. Ayrıca sızıntı akımını da paralel bir R_p direnciyle ifade edebiliriz.



Şekil 3.10. FV hücrenin tek diyotlu eş değer devresi

- I_L (Fotovoltaik akım): Fotovoltaik hücre üzerine düşen ışık radyasyonu ile doğru orantılıdır.
- I_{sat} (Diyot akımı): Fotovoltaik hücre üzerine düşen ışık radyasyonu ile oluşan gerilime ve sızıntı akımını I_0 'a bağlıdır ve denklem (3.2) ile ifade edilir.

$$I_{sat} = I_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right) \quad (3.2)$$

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

$$I_p = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V_g + I_g \cdot R_s}{R_p}$$

(3.3)

- Hücreden çıkış akımı;

$$I = I_L - I_{sat} - I_p$$

(3.4)

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

$$V_g = V_d - I \cdot R_s$$

(3.5)

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

$$I_g = I_L - I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p}$$

(3.6)

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

3.4.4 Fotovoltaik Hücre Çeşitleri

Fotovoltaik hücreler, üzerine düşen güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine çeviren yarı iletken sistemlerdir. Fotovoltaik hücreler, güneş hücreleri, fotovoltaik piller ve güneş pilleri olarak da adlandırılırlar. Klasik bir fotovoltaik hücrenin %98'i silisyumdan oluşur. Silisyum genel olarak doğada silisyum dioksit (SiO_2) ve kuvars halde bulunur. Silisyumun güneş panellerinde kullanılabilmesi için saflaştırılması gerekmektedir. Silisyum saflaştırma işlemleri ise oldukça maliyetlidir. Güneş pillerinin maliyetinin yüksek olmasının nedeni bu saflaştırma işlemleri maliyetinden

kaynaklanmaktadır. Fotovoltaik hücreler teknolojilerine göre 3 ana başlık altında incelenebilir. (Energy Informative, 2019).

- Birinci nesil hücreler; Kristal silisyum hücreleri (c-Si ve mc-Si),
- İkinci nesil hücreler; İnce film güneş hücreleri (a-Si, CdTe, CIS veya CIGS),
- Üçüncü nesil hücreler; Nano teknolojiye dayalı güneş hücreleri (Tandem, Supertandem, Intermediate Band Solar Cells vs.) olarak sınıflandırılabilir.

3.4.4.1 Kristal Silisyum Fotovoltaik Hücreler

Güneş ışınımlarını emme oranları düşüktür. Bu oranın düşük olmasına rağmen verimlerinin %12-20 arasında olması üreticiler için oldukça cazip bir durumdur. Üretici firmaların en çok tercih ettiği seçenek olup pazar payının %93'nü oluşturmaktadırlar. Genel olarak üreticiler tarafından 25 yıllık bir verim garantisi sunulmaktadır. Wafer, yani ince silikon dilimlerinin kalınlıkları 0,17 mm'ye kadar düşürülmüştür. Polikristal (mc-Si) ve Monokristal (c-Si veya SIN) olarak ikiye ayrılmaktadırlar. (Haselhuhn ve Hemmerle, 2012:3)

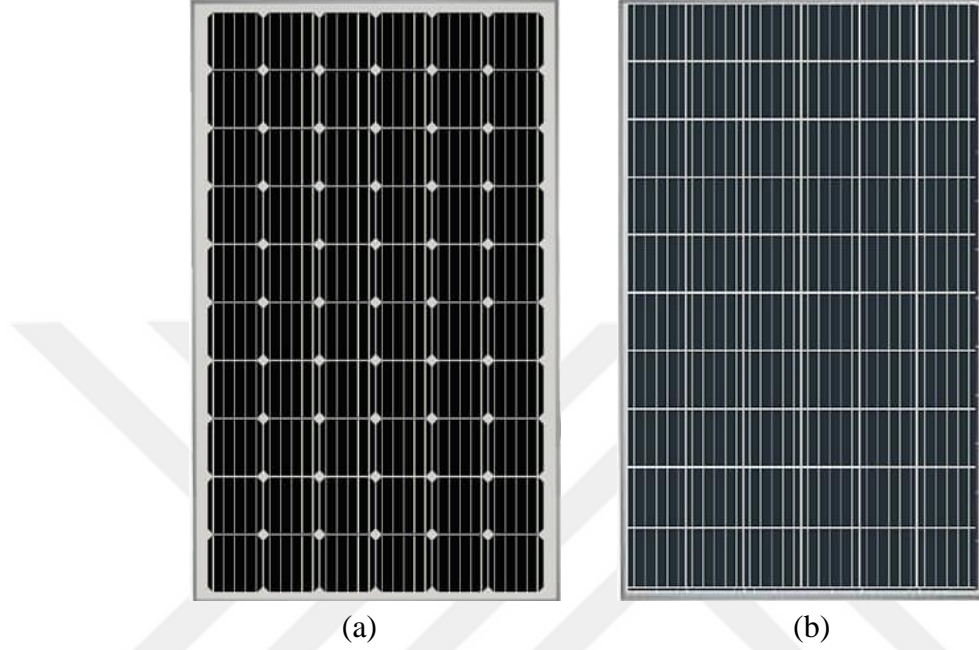
- **Monokristal Hücre (c-Si)**

- » Verimleri %15-20 arasındadır.
- » Laboratuvar ortamında %21,5'lik bir verime ulaşılmıştır.
- » 20 yıllık bir sürede %7 civarında verim kaybı meydana gelmektedir.
- » Verimlerinin yüksek oluşundan dolayı uzun vadeli yatırımlar için idealdir.
- » Saf silisyum elde etmek için üretim süreci zor olduğundan dolayı pahalıdır.

- **Polikristal Hücre (mc-Si)**

- » Verimleri %12-16 arasındadır.
- » Laboratuvar ortamında %16,2'lik bir verime elde edilmiştir.

- » 20 yıllık bir sürede %14 civarında verim kaybı meydana gelmektedir.
- » Üretim süreci kolay olduğundan ucuzdurlar.
- » Performans maliyet oranları yüksek olduğundan çok tercih edilirler.



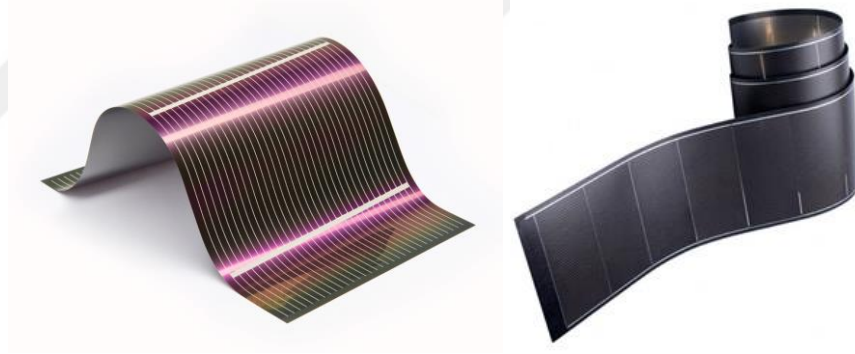
Kaynak: <https://energyinformative.org/best-solar-panel-monocrystalline-polycrystalline-thin-film/>

Şekil 3.11. Monokristal (a) ve Polikristal (b) 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 civarında verim kaybı oluşmaktadır.
 - » Üretim için gerekli donanımların maliyeti yüksek olmasına karşın üretim süreçleri ucuz olduğundan firmalar için üretimi cazip hale gelmektedir.

- **Kadmiyum-Tellür (Cd-Te)**
 - » Verimleri %9-11 arasındadır.
 - » Üretim maliyetleri oldukça düşüktür.
 - » Sadece rijit cam ile kullanılabilir.
- **CIGS (Copper indium gallium (di)selenide, Bakır indiyum galyum diselenyum)**
 - » Verimleri %11-14 arasındadır.
 - » Esnek veya cam yüzeylerde kullanılabilir.
 - » Pazar payı her geçen gün artmaktadır.
 - » Üretim maliyetleri yüksektir.



Kaynak: <http://solar.inventoturkiye.com/a-si-thin-film-solar-panel-a-si-ince-film-gunes-paneli/>

Şekil 3.12. İnce film güneş hücreleri

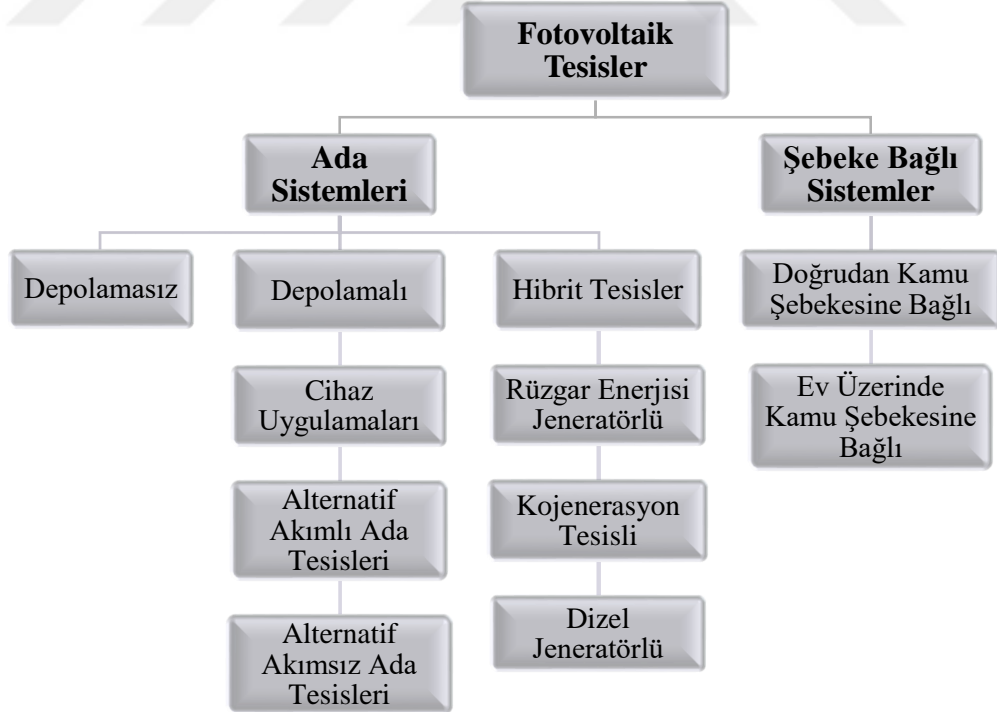
3.4.4.3 Nano Teknolojiye Dayalı Güneş Hücreleri

Nano teknolojiye dayalı güneş hücreleri araştırmaları halen devam etmektedir. Ticarileşen bir ürün ortaya konulması halinde enerji üretimi konusunda yüksek verime ulaşılarak büyük bir atılım yapılmış olacaktır. Hali hazırda teorik olarak %63,2 ile %86,8 arası verime sahip olan bu teknoloji için 1 cm^2 'de %35,4 verime ulaşılmıştır.

3.4.5 Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik sistemler kuruluş açısından ikiye ayrılır. Bunlar şebekeden bağımsız ada sistemler ve şebeke bağlantılı sistemlerdir. Ada sistemleri şebekeden bağımsız olduğundan fotovoltaik enerji kazancı kurulduğu tesisteki enerji tüketimine eş değer seviyeye yakın olacak şekilde ayarlanır. Fotovoltaik enerji üretimi güneş ışınımına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Çoğu zaman tüketicilerin o andaki ihtiyaçlarına eşit olmadığından genellikle ayrıca depolama üniteleri ile kullanılmaktadır. Ancak depolama sistemleri maliyetleri günümüzde oldukça yüksektir.

Şebeke bağlantılı sistemlerde ise enterkonnekte elektrik şebekesi devasa bir enerji depolayıcı gibi görev görmektedir. Dünya çapında fotovoltaik tesislerin çok büyük kısmı şebeke bağlantılı olarak tesis edilmekte ve işletilmektedir. Bu tür tesislerde üretilen enerji genelde güneş enerjisinden gelir elde etmek amacıyla enterkonnekte elektrik şebekesine aktarılmaktadır. (Haselhuhn ve Hemmerle, 2012:3)



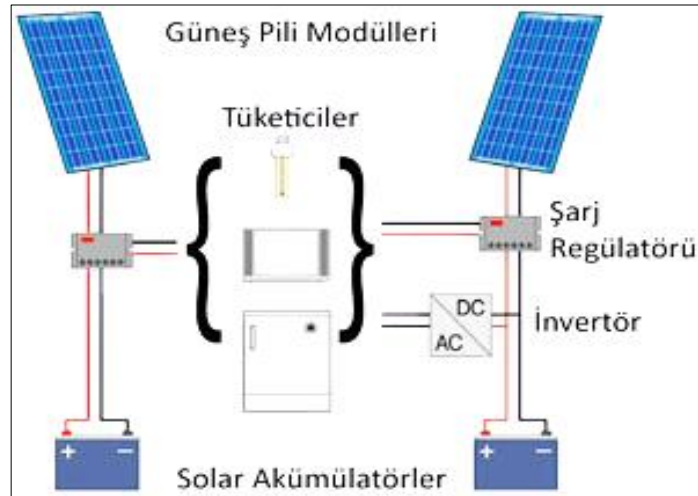
Kaynak: Haselhuhn R. ve Hemmerle C., 2012

Şekil 3.13 Fotovoltaik tesis çeşitleri

3.4.5.1 Ada Sistemleri

Fotovoltaik teknolojisinin ilk ekonomik kullanım alanları şebekeden bağımsız sistemler yani ada sistemleri olmuştur. Enterkonnekte elektrik şebekesi üzerinden enerji tedarikinin mümkün olmadığı, ekonomik açıdan anlamlı olmadığı ya da istenmediği her yerlerde fotovoltaik ada sistemleri kullanılmaktadır. Ada sistemlerin kullanım alanları gittikçe artmaktadır. Elektrik şebekesinin bulunmadığı gelişmemiş ülkelerde veya elektrik ihtiyacı olan lokasyona elektrik sağlamak için yapılacak altyapı yatırımının çok çok yüksek olması durumunda ada sistemleri için büyük potansiyel bulunmaktadır. Hesap makineleri, el fenerleri, batarya şarj cihazları, güneş enerjili radyolar, fotovoltaik hücrelerin ada sisteminin sık kullanıldığı örnekler olup gittikçe daha da yaygınlaşmaktadır.

Ada sistemlerinde, arz ve talebin dengelenmesi yani enerji üretimi ve tüketimi arasında genellikle var olan zamansal farkın giderilmesi için enerji depolama ünitelerine ihtiyaç vardır. Bu amaca en uygun enerji depolama üniteleri akülerdir. Ancak aküler depolama işlerini sağlıklı bir şekilde tek başına yapamaz. Bunun için akım kontrol ünitesi yani şarj regülatörü kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle tipik bir ada sistemi güneş pili, akım kontrol ünitesi (şarj regülatörü), akü (depolama ünitesi) ve tüketici bileşenlerinden oluşur. (Varış, 2017)



Kaynak: Varış, 2017

Şekil 3.14. Fotovoltaik tesislerde ada sistemi bileşenleri

3.4.5.2 Şebeke Bağlantılı Sistemler

Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemlerin başlıca özelliği adında anlaşılacağı gibi enterkonnekte elektrik şebekesine bağlı oluşlarıdır. 1991 yılında Alman hükümeti tarafından ‘Bin Çatıya Fotovoltaik Tesis’ adlı teşvik programı başlatıldıktan sonra, ülkede kurulan şebeke bağlantılı fotovoltaik tesislerin sayısı sürekli olarak artış göstermiştir. Ülkemizde yapılan mevzuat çalışmalarında ise, Kamuoyunda ‘Çatı mevzuatı’ olarak bilinen, tüketim tesisiyle aynı noktada olan ve 10 kW güç ile sınırlanan üretim tesisleri için başvuruları ve başvuru sonrası işlemleri düzenleyen “Elektrik Piyasasında Tüketim Tesisi İle Aynı Ölçüm Noktasından Bağlı ve Güneş Enerjisine Dayalı Üretim Tesisleri İçin Lisanssız Üretim Başvurularına ve İhtiyaç Fazlası Enerjinin Değerlendirilmesine İlişkin Usul ve Esaslar”a ilişkin çalışmalar sonuçlandırılmış ve ilgili mevzuat 18.01.2018 tarihli Resmî Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Söz konusu mevzuat ile birçok kolaylık sağlanmıştır;

- İhtiyaç fazlası enerji üretiminin tesisin bulunduğu ilgili dağıtım şirketlerine satılması kolaylaştırıldı,
- Düzenleme ile özellikle dağıtım süreleri kısaldı ve başvuruya kolaylık getirildi,
- Evden taşınmak söz konusu olduğunda çatı santralini evin yeni sahibine veya kiracıya devretme olanağı sağlandı,
- Çatı ve cephe uygulamalı yenilenebilir enerji üretim tesislerinden, ürettikleri elektrik enerjisini tedarik şirketlerine satanlara gelir vergisi ve buna bağlı KDV muafiyeti getirildi.

Büyük kolaylıklar sağlayan bu mevzuat sayesinde çatı üzeri güneş enerji sistemlerinin artacağı öngörülmektedir.

Şebeke bağlantılı bir güneş enerji sistemi genel olarak, güneş paneli, doğru akım kablo tesisatı, inverter, alternatif akım ana şalteri, alternatif akım kablo tesisatı ve sayaç bileşenlerinden oluşur.

Çatı üzeri güneş enerji sistemleri kurulumunda başlarda müstakil evler çoğunlukta, gün geçtikçe farklı bina türlerinde (apartman, okul, alışveriş merkezi, ticari yapılar, kamu binaları, stadyum) kurulan fotovoltaik tesislerin sayısı hızla artmaktadır. Bunun haricinde özellikle enerji şirketleri ve yatırım fonları tarafından geniş çatı alanlarına çok sayıda şebeke bağlantılı fotovoltaik tesisler kurulmaktadır. (Varış, 2017)



Kaynak: Varış, 2017

Şekil 3.15. Çatı üzeri şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler

3.4.6 Fotovoltaik Güneş Takip Sistemi

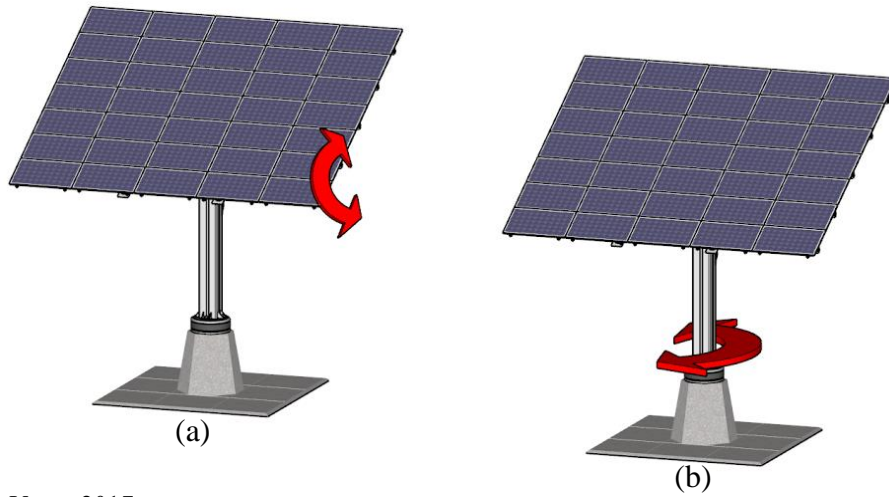
Güneş enerjisinden daha fazla yararlanmak adına yapılan çalışmalar hızla devam etmektedir. Bu çalışmalardan başlıcası güneş enerji panellerinin güneş ışınlarını dik bir açı ile alabilmeleri için güneşi hareketi boyunca takip eden sistem tasarlamaktır.

Bir diğer yöntemde maksimum güç noktasının izlenmesidir (MPPT). Bu yöntemle güneş panelinden elde edilen gücün sürekli maksimum değerde tutulması sağlanmaktadır. Bunun için özel güç elektroniği devreleri ve geliştirilmiş

algoritmalar tasarlanmaktadır. Güneş takip sistemi ile güneş enerjinden elde edilen mevcut enerji üretimi, %40'lara varan oranda artırılabilir. Ayrıca bu sisteme maksimum güç takip sistemi de uygulanarak, sistemde toplam %65'lere varan bir enerji üretimi sağlanabilir. Güneş takip sistemleri eksen sayısına göre tek eksenli ve çift eksenli olmak üzere ikiye ayrılır. (Acar ve Kılınçdemir, 2016)

3.4.6.1 Tek Eksenli Güneş Takip Sistemi

Tek eksenli güneş takip sisteminde güneş panelleri yalnızca aşağı veya yukarı yönlü tek eksen üzerinde hareket eder. Bu sistem ile güneş enerjisinden elde edilen mevcut enerji üretimi % 15-30 oranında arttırmak mümkündür.



Kaynak: Varış, 2017

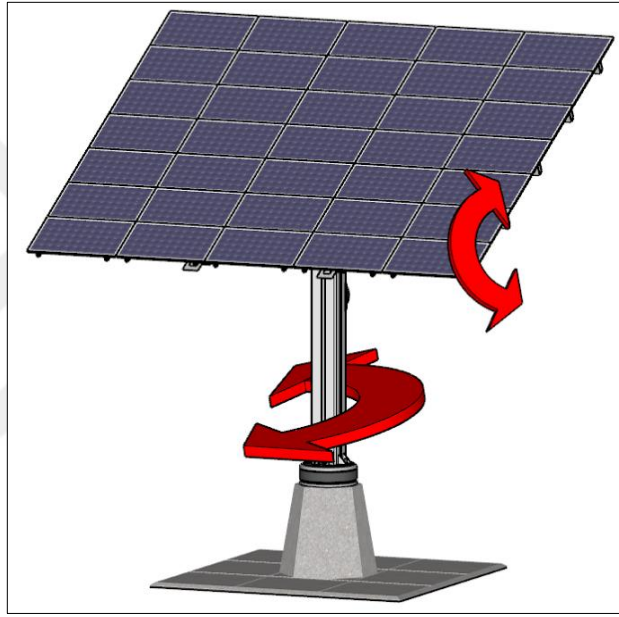
Şekil 3.16. a) Tek eksenli güneş takip sisteminde yükseklik ekseninin gösterimi b)

Tek eksenli güneş takip sisteminde azimut ekseninin gösterimi

Tek eksenli güneş takip sisteminde paneller, doğu-batı hattında veya kuzey-güney hattında hareket edebilir. (Acar ve Kılınçdemir, 2016)

3.4.6.2 Çift Eksenli Güneş Takip Sistemi

Çift eksenli güneş takip sistemlerinde güneşin gökyüzündeki konumu, sensörler veya geçmiş meteorolojik verilerden elde edilen açı bilgisi vasıtasıyla belirlenerek güneş takibi yapabilmektedir. Kontrol sistemi doğu-batı ve kuzey-güney eksenlerinde hareket etmektedir. Çift eksenli kontrol sistemi ile güneş enerjisinden elde edilen enerji üretimi %30-45 oranlarında artırılabilir. Azimut eksenini ile paneller sağa-sola hareket ettirilirken, zenit eksenini ile aşağı-yukarı hareket ettirilir.



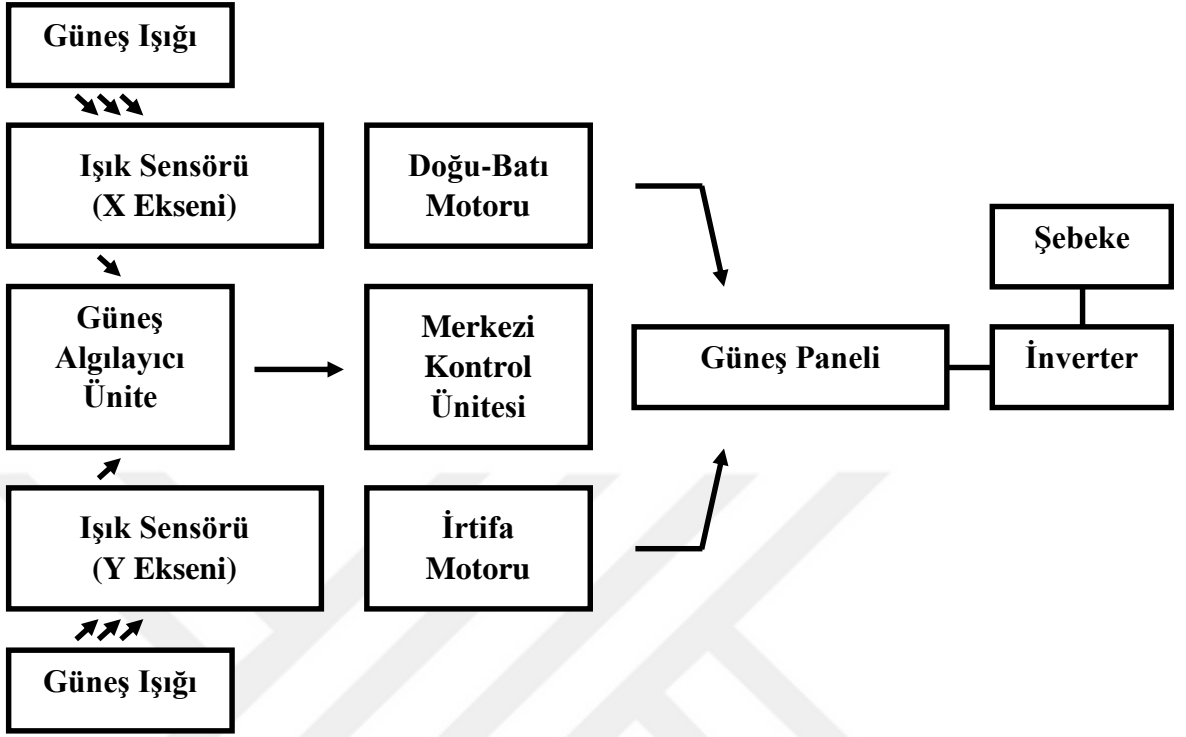
Kaynak: Varış, 2017

Şekil 3.17. Çift eksenli güneş takip sistemi gösterimi

Sistem güneşini takip edebilmesi için güneşin konumuna ihtiyaç duymaktadır. Sistemde güneşin konumunun bulabilmesi için sensörler veya güneşin geçmiş konum verilerinden elde edilen yeni konum bilgileri yer almaktadır. Aşağıda sensörlü çift eksenli fotovoltaik takip sisteminin şeması verilmiştir.

Güneş algılama sensörleri denetim devresine sürekli sinyal göndererek senkronize çalışmaktadır. Merkezi kontrol ünitesi sensörlerden gelen bilgileri

değerlendirilerek, sistemin çift eksenli hareketini sağlamak üzere irtifa motorlarına uygun konum sinyallerini gönderir.



Kaynak: Varış, 2017

Şekil 3.18. Çift eksenli fotovoltaik sistem şeması (sensörlü)

Motor sürücülerine gelen konum sinyalleri sayesinde motorlar tahrik edilir ve fotovoltaik sisteminin çift eksenli hareketi sağlanır. Bu hareket, güneş ışınlarından maksimum düzeyde sağlanıncaya kadar devam eder. (Acar ve Kılıncdemir, 2016)

4. BÖLÜM

DOĞU-BATI YÖNELİMLİ FOTOVOLTAİK SİSTEMİN TASARIMI

İstanbul Büyükşehir Belediyesi'ne ait Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde elektrik enerjisi ihtiyacının bir kısmının karşılanması amacıyla kurulan 169 kWp kurulu güce sahip şebeke bağlantılı, doğu-batı yönelimli güneş enerji santralının yapısı ve tasarımı aşağıda anlatılacaktır.

4.1 Sistemin Genel Yapısı

Doğu-batı yönelimli fotovoltaik güneş enerji santralinde kullanılacak malzemeler ve malzemelerin montaj detayları aşağıda verildiği gibidir.

- Güneş paneli: 260 Wp güce sahip 650 adet polikristal güneş paneli,
- İnverter: 8 kW güce sahip 25 adet 3 fazlı solar inverter,
- Optimizer: Panel bazlı izleme ve panel bazlı maksimum güç takibi olanağı sağlayan 650 adet optimizer
- Pano ve şalt ekipmanları: Solar panel giriş çıkış bağlantıları için DC toplama panosu, AC çıkış için pano ve topraklama,
- Taşıyıcı konstrüksiyon ve sabitleyici balast betonu: Solar panel sistemine uygun dayanım ve özelliklerde taşıyıcı sistem,
- Kablo: FV kabloları ve güç kabloları,
- Konnektör: MC4 konnektör,
- Güneş ışınımı: Güneş ışınımını algılayıcı sensör (pironometre),
- Sıcaklık ölçümü: Ortam ve modül sıcaklığı algılayıcı sensör,
- Rüzgâr ölçümü: Rüzgâr algılama sensörü (anemometre),
- Veri depolama ve uzaktan erişim sistemi: Uzaktan izleme yazılımı, veri kayıt ve kurulumu,
- Bilgi ekranı (Kiosk): 23" İnç ekran ve PC modülü.

4.1.1 260 Wp Fotovoltaik Güneş Paneli

Güneş panelleri, üzerlerindeki güneş hücreleri vasıtasıyla güneşten gelen ışınımı soğurarak DC elektrik üreten yarı iletken yapılardır. Fotovoltaik etki prensibine göre çalışan güneş panellerinin üzerine güneş ışığı düştüğünde gerçekleşen elektron hareketleri ile panel uçlarında DC gerilim üretilir.

Doğu-batı yönelimli sistemde güneş panelleri 260 Wp gücünde polikristal türde seçilmiştir. 650 adet kullanılan bu güneş panelleri ile toplamda 169 kWp'lik bir kurulu güç elde edilmektedir. Standart test koşulları altında (ışınım 1.000 W/m^2 , A.M (Air Mass) 1,5, hücre sıcaklığı $25 \text{ }^\circ\text{C}$) kullanılacak güneş panellerine ait teknik özellikler Tablo 4.1'de gösterilmiştir. Paneller konstrüksiyon üzerinde doğu-batı yönelimde olacak şekilde yerleştirilmiştir. Sistemin doğu-batı yönelimli olması sayesinde güneşin doğuş ve batış saatlerinde güneş panellerinden daha fazla faydalanılmaktadır. (Güneş Paneli, Anonim, b.t.)

Tablo 4.1 Solar Türk Anatolia 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	30,51 V
Panel boyutları	1640x992x40mm	Maks. güç akımı	8,53 A
Ağırlık	18,5 kg	Açık devre gerilimi	34,3 V
Çerçeve	Alüminyum	Kısa devre akımı	9,09 A
Bağlantı kutusu	IP67 koruma sınıfı	Güç toleransı	%3
Çıkış kabloları	1 m, MC4 uyumlu	Pmaks sıcaklık katsayısı	-0.43 ($^\circ\text{C}$)

Kaynak: <https://www.solarturk.com.tr/uploads/ST-ANATOLIA-datasheet-2017.pdf>



Kaynak: <https://www.solarturk.com.tr/uploads/ST-ANATOLIA-datasheet-2017.pdf>

Şekil 4.1. 260 Wp Polikristal güneş paneli

Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde tesis edilen 169 kWp güneş enerji sisteminde yerli üretici Solar Türk firması tarafından imal edilen Anatolia serisi 260 Wp gücündeki güneş panelleri kullanılmıştır.

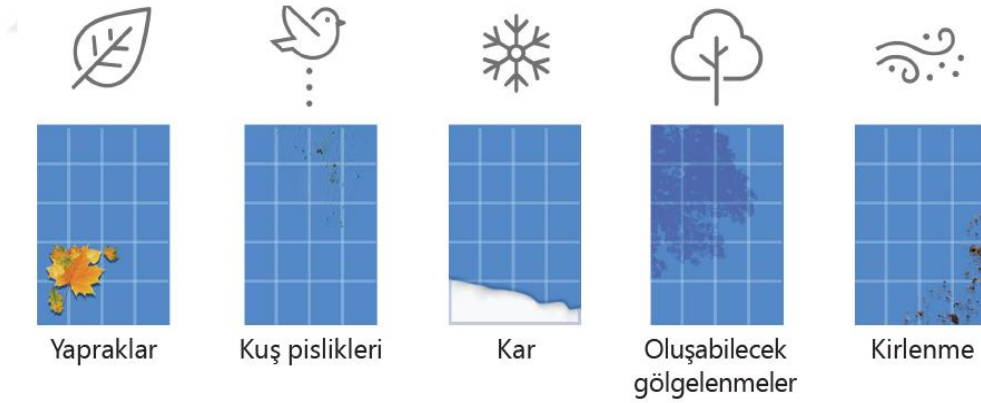
4.1.2 Optimizer

Optimizer, güç kablosu üzerinden inverter ile haberleşen DC/DC (buck-boost) devresidir. Güneş panellerine güneş ışınının gelmesiyle optimizer uçlarında gerilim oluşur. Oluşan bu gerilim 6 Vdc üzeri olunca optimizerler tarafından invertere mevcut solar kablo üzerinden uyanma sinyali gönderilir ve inverter gece modundan çıkarak uyanır. İnverterin uyanmasıyla birlikte optimizerler güvenlik modundan çıkıp üretim moduna geçer ve çıkış gerilimlerini arttırmaya başlarlar. Artan gerilim seviyesi inverter çalışma gerilimi aralığına ulaştığında, inverter tarafından şebeke parametreleri kontrol edilir ve güç üretilmeye başlar. Üretilen güç verileri her 5 dakikada bir invertere iletilir.

Güneş panelleri optimizerlere paralel bağlanır. Daha sonra güneş paneli bağlanan optimizerler seri şekilde birbirlerine bağlanarak dizi oluşturulur ve invertere bağlanır. Burada optimizerler seri bağlandığından güneş panelleri,

optimizer vasıtasıyla birbirlerinden izole olmuş olur ve bir panelde olan olumsuzluk serideki diğer panelleri etkilemez. Güneş panelleri optimizerin gücüne göre birebir veya bir optimizere iki güneş paneli olacak şekilde bağlanabilir. (Güç Optimizeri, Anonim, b.t.)

Fotovoltaik sistemlerde her güneş panelinin kendine özgü bir maksimum güç noktası bulunmaktadır. Optimizer ile güneş paneli bazında maksimum güç noktası takibi yapılır ve paneller arası güç etkisi ortadan kaldırılarak daha fazla elektrik enerjisi üretimi sağlanır. Bu özelliği sayesinde gölge olmasa bile paneller arası uyumsuzluk (mismatch) farkından kaynaklı etki ortadan kaldırılır. Söz konusu etki ile üretici firma beyanına göre ilk yılda %2 civarında 20. yılda ise %5 civarında daha fazla üretim yapılmaktadır. Fotovoltaik paneller arasındaki tolerans farklılıkları ve güneş ışınımının güneş paneline gelmesini engelleyecek herhangi bir gölgelenme güç kaybına sebebiyet verir. Örneğin Şekil 4.2’de görüldüğü gibi Yaprak, kuş pisliği, kar, gölgelenme, kirlenme vb.

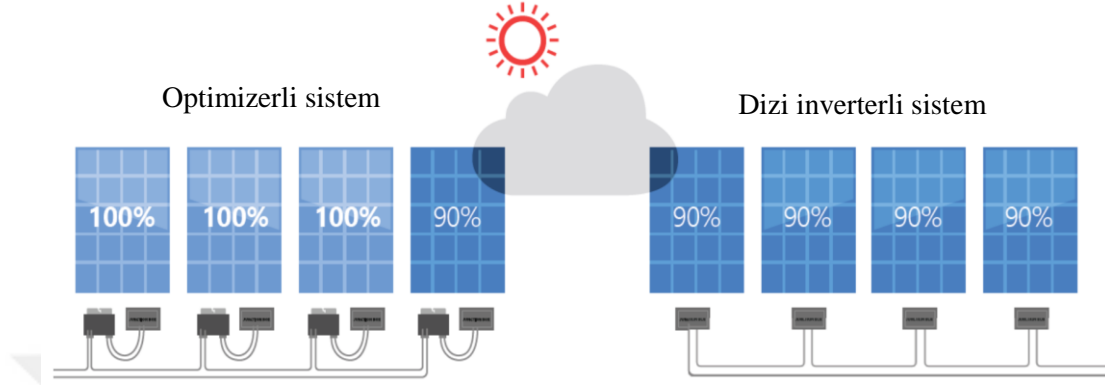


Kaynak: <https://www.solaredge.com/sites/default/files/se-homeowners-brochure-tur.pdf>

Şekil 4.2. Gölgeleme oluşumu

Dizi inverterli bir sistemde bir panelde herhangi bir nedenle gölgelenme olduğunda yani enerji üretimi düştüğünde, dizideki diğer panellerde enerji üretimi düşen panel kadar enerji üretir. Serideki diğer panellerinde en düşük üretimi yapan panel kadar üretim yapması ciddi kayıplara neden olmaktadır. Optimizerli bir sistemde ise her panel maksimum enerji üretir ve dizideki diğer paneller herhangi bir panelden kaynaklanacak üretim kaybından etkilenmezler. Ayrıca dizi inverterli bir

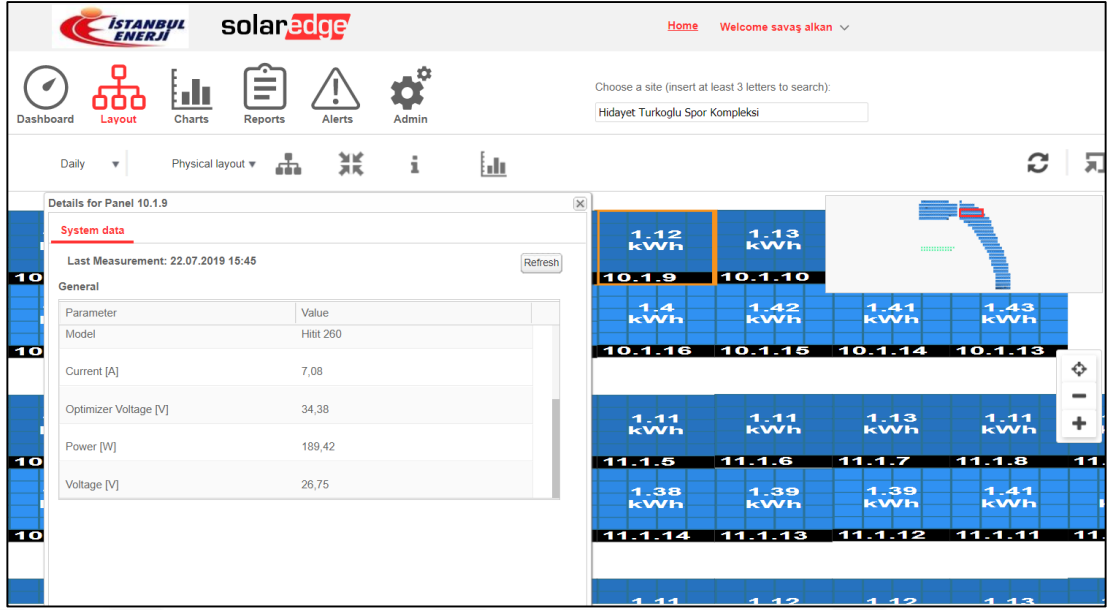
sistemde aynı seride farklı eğimde, yönelimde ve güçte panel kullanılması sistemi olumsuz etkilerken, optimizierli bir sistemde aynı seride farklı eğim, yönelim ve güçlerde panel kullanılması sistemi olumsuz etkilemez.



Kaynak: <https://www.solaredge.com/sites/default/files/se-homeowners-brochure-tur.pdf>

Şekil 4.3. Optimizierli ve dizi inverterli sisteme gölge etkisi

Optimizierin bir diğier özelliği ise panel bazlı izleme yapılabilmesine olanak sağlamasıdır. Bulut tabanlı uzaktan izleme sistemi ile güneş panellerinin akım (A), gerilim (V) ve güç (W) bilgileri anlık olarak alınabilmektedir. Bu sayede güneş panelinin performansı ve arıza durumları anlık olarak takip edilebilmektedir. Ayrıca işletme ve bakım açısından oldukça kolaylık sağlayarak, işletme ve bakım maliyetlerinin minimuma inmesini sağlamaktadır. Örneğin dizi inverterli bir sistemde bir dizide panel arızalandığında, arızalı paneli bulabilmek için dizideki tüm panellerin ölçülmesi gerekmektedir. Oysaki optimizierli sistemde arızalı panel, panelin bağlı olduğu optimiziere verilen adres numarasına göre (10.1.9) noktasal olarak bulunabilmektedir. Bu durum işletme ve bakım esnasında zamandan ve işçilikten tasarruf sağlamaktadır. Panel bazlı izlemeye ait görsel Şekil 4.4'te verilmiştir. (İzleme Sistemi, Anonim, b.t.)



Kaynak: <https://monitoring.solaredge.com/solaredge-web/p/home>

Şekil 4.4. Panel bazlı izleme görseli

Panellerin seri olarak dizilmesiyle, dizilerde oluşan DC voltaj panel sayısı ile değişmekle beraber genellikle 800-1.500 Vdc seviyelerinde olmaktadır. Bu voltaj seviyesi kurulum, bakım ve işletme aşamasında büyük bir tehlike arz etmektedir. Optimizerin açık devre uç gerilimi 1 Vdc'dir. Optimizer inverterle haberleşemediğinde veya uçları açık devre olduğunda optimizere bağlı bulunan güneş panelinin çıkış gerilimi ne olursa olsun optimizer uçlarında 1 Vdc çıkış görülür. Örneğin bir seride 30 güneş paneli olsa ve bu güneş panellerinin her biri 40 Vdc çıkış verse eğer optimizer inverter ile haberleşmiyor veya açık devre ise seri çıkışında 1.200 Vdc yerine 30 Vdc görülür. Bu sayede kurulum esnasında montaj ekibine, bakım ve işletme esnasında bakım personeline ve olası bir yangın esnasında itfaiye personeline, yüksek DC voltajdan koruma sağlanmaktadır.

Optimizer DC/DC dönüştürücü elektronik bir devre olduğundan çok küçükte olsa sistemde bir enerji kaybına neden olmaktadır. Üretici katalog değerlerinde verimi %99,5 olarak verilmektedir. Ayrıca güneş enerji sistemlerinde kullanılan ekstra bir cihaz olduğundan Tablo 6.7.'deki 2016 yılı maliyet tablosundan da görüleceği üzere sistem maliyetinin yaklaşık %7'sini oluşturmaktadır. Yani sistemin ilk yatırım maliyetini yükseltmektedir.



Kaynak: <https://www.solaredge.com/sites/default/files/se-homeowners-brochure-tur.pdf>

Şekil 4.5. Optimizer ünitesi

Tablo 4.2. Optimizerin teknik özellikleri

Optimizer			
Mekanik Özellikler		Elektriksel Özellikler	
Boyut	139x165x41mm	DC giriş gücü	300 W
Ağırlık	880 gr.	Maksimum giriş gerilimi	48 Vdc
Koruma sınıfı	IP68	Verim	% 99,5
Çıkış kabloları	1 m, MC4 uyumlu	Açık devre gerilimi	1 Vdc

Kaynak: <https://www.solaredge.com/sites/default/files/se-homeowners-brochure-tur.pdf>

4.1.3 İverter (Evirici)

Doğru akımı alternatif akıma çeviren ve aynı zamanda devredeki frekansı düzenleyen, tek veya üç fazlı çalışma sistemine sahip olan cihazlara inverter denir.



Kaynak: <https://www.europe-solarstore.com/solaredge-se8k.html>

Şekil 4.6. İnverter ünitesi

200 kWe çıkış gücüne sahip olan sistem için seçilen inverterlerin teknik özellikleri Tablo 4.3'te gösterilmiştir. Güneş panellerinde üretilen DC gerilim, inverter aracılığıyla AC gerilime çevrilerek spor kompleksinin trafo merkezine aktarılacaktır. İnverter üzerinden alınan güç, spor kompleksinin öz tüketiminde kullanılacaktır. 540x315x260 mm ölçülerinde, 33,2 kg ağırlığında, IP65 koruma sınıfında, trafosuz, -20/60 °C çalışma sıcaklığındaki invertere ait elektriksel veriler aşağıdaki gibidir. (İnverter, Anonim, b.t.)

Tablo 4.1 Solar Edge 8 kW invertere ait teknik özellikler

Giriş Verileri	Maks. dizi kısa devre akımı	13,5 A
	Nominal giriş gerilimi	700 V
	Maks. giriş gerilimi	900 V
	MPP gerilim aralığı	184-264,5 V
Çıkış Verileri	AC nominal güç	8000 W
	AC çıkış akımı	13 A
	Şebeke	400 V/230 V
	Frekans	50 Hz/60 Hz

Kaynak: <https://www.europe-solarstore.com/solaredge-se8k.html>

Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksinde tesis edilen güneş enerji santralinde Solar Edge marka solar inverter kullanılmıştır. Söz konusu inverterin gece modunda enerji tüketimi maksimum 2,5 W olup çok iyi bir seviyededir. İnverterler elektronik ekipman olduklarından sıcaklıkla verimleri düşmektedir. Bu durumu en aza indirmek adına kompleks çatısında inverterler için kabin yapılmıştır. Şekil 4.7.'de İnverter kabinine ait görseller paylaşılmıştır.



Şekil 4.7. İnverter kabinine ait görseller

4.1.4 Panel Taşıyıcı Konstrüksiyon ve Balast Betonu

Çatı üzeri güneş enerji santrali kurulumlarında çok önemli iki etken bulunmaktadır. Bunlar çatı statiği (yük taşıma kapasitesi) ve çatı izolasyonudur. Tesis edilecek güneş enerji santralinden kaynaklı çatıya gelecek ekstra yükler, yapılan statik hesaplarla analiz edilmiş ve çatı statiği açısından uygun görülmüştür. Ancak çatıda izolasyon sorunu olduğu ve alt katlara su aktığı görülmüştür. Bu durumun santral kurulumu öncesinde giderilmesi gerekmektedir. Güneş enerji santrali tesis edilmeden önce kompleksin çatısında izolasyon çalışması yapılmış ve söz konusu sorun giderilmiştir. Şekil 4.8. ve 4.9.'da çatı izolasyonuna ait görseller paylaşılmıştır.

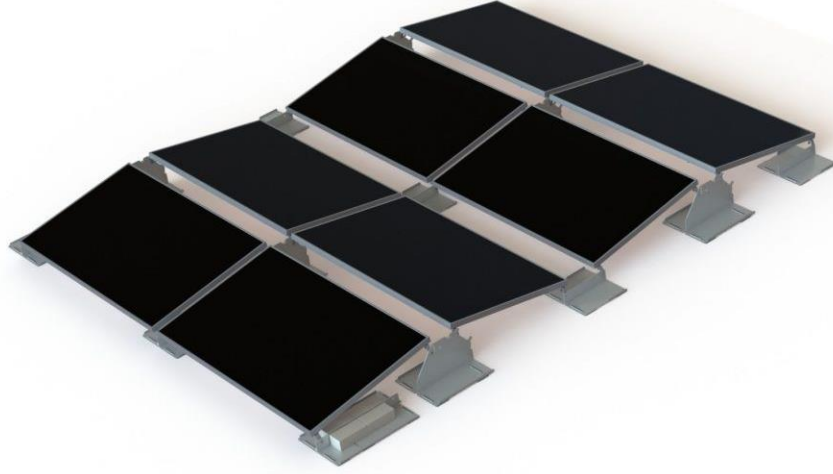


Şekil 4.8. İzolasyon öncesi zemin temizleme çalışması



Şekil 4.9. İzolasyon çalışması

Panel taşıyıcı konstrüksiyon tasarımı doğu-batı yönelimli olacak şekilde tasarlanmıştır. Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi konumu için üretici tarafından yapılan simülasyonlarda, doğu-batı yönelimli konstrüksiyonun eğim açısı 11° olacak şekilde belirlenmiştir. Şekil 4.10.'da Panel taşıyıcı konstrüksiyon modeline ait görsel paylaşılmıştır.



Şekil 4.10. Panel taşıyıcı konstrüksiyon modeli

Tasarımı yapılan konstrüksiyon sisteminin yerleşimi yapılmış olup, balast betonu olarak dikdörtgen parke taşları kullanılmıştır. Balast beton olarak kullanılan parke taşlarının yerleri ve adetleri statik hesaba göre belirlenmiş ve konulmuştur. Kullanılan parke taşının hacmi $100\text{mm} \times 200\text{mm} \times 80\text{mm} = 1,16 \text{ dm}^3$ 'tür. Parke taşı ağırlığı 3,5 kg'dır. Şekil 4.11.'de Panel taşıyıcı konstrüksiyon ve balast betonuna ait görsel paylaşılmıştır.



Şekil 4.11. Panel taşıyıcı konstrüksiyon ve balast betonu

4.1.5 Kablo ve FV Konnektör

Fotovoltaik panellerinin kendi arasında ve inverterler ile bağlantıları arasında solar kablo kullanılmıştır. Solar kablolar dış ortama uygun, yüksek sıcaklık ve ısıya dayanıklı, UV dirençli, yanmaz özellikli, kurşunsuz, çift izoleli olarak IEC 60228 standardına göre üretilmiştir. Sistemde kullanılan solar kablonun kesiti 6 mm² uzunluğu ise 4.100 m'dir.

Fotovoltaik panel ve evirici arasındaki kablo bağlantılarında MC4 tipi erkek ve dişi tip konnektörler kullanılmıştır. Konnektörler, bağlantı kutusu ve soketler -40°C ile 100°C arası işletme sıcaklığına uygun, yüksek akıma uygun ve IP 67 koruma sınıfında TÜV onaylıdır.

AC Pano ile İnverter arasında çekilen kablo alev iletmeyen N2XH alçak gerilim (0,6/1 kV) kablosudur. AC bara ile inverter arasında çekilen kablolar, 3x(1x150)+70 mm² kesitinde maksimum %3 gerilim düşümüne izin verecek şekilde tasarlanmıştır. Sistemde yaklaşık 60 m alçak gerilim kablosu kullanılmıştır. Kablo ve FV konnektör görselleri Şekil 4.12.'de gösterilmiştir.

DC Güç Kaybı ve Gerilim Düşümü Hesabı;

Komplekse ait dizi verileri Tablo 4.4'te verilmiştir. Bu veriler doğrultusunda DC güç kaybı ve gerilim düşümü hesabı yapılacaktır.

Tablo 4.1 Dizi verileri

	Sembol	Değer	Birim
Dizi Gücü	P_{dizi}	6.760	W
Dizi Gerilimi	U_{dizi}	750	V
Dizi Akımı	I_{dizi}	8,53	A
Dizi Kablo Uzunluğu	L_{dizi}		m
Dizi Kısa Devre Akımı	I_{sc}	9,09	A
Dizi Kablo Kesiti	S_{DC}		mm ²

$$\text{DC Kablo Güç Kaybı (P}_{\text{kayıp}}) = (L_{\text{dizi}} \times I_{\text{sc}}^2) / (S_{\text{DC}} \times K)$$

$$\text{DC Kablo Gerilim Düşümü \%} = (100 \times L_{\text{dizi}} \times P_{\text{dizi}}) / (K \times S_{\text{DC}} \times U_{\text{dizi}}^2)$$

Bütün diziler aynı sayıda fotovoltaik modülün seri bağlanmasıyla oluşmuştur. Seri bağlı fotovoltaik modüllerin birbirleriyle bağlantısı 6 mm² PV1 – F kablo ile yapılmıştır. Buna göre; tüm dizilerin, güçleri, akımları ve gerilimleri birbirine eşittir.

K: İletkenlik Katsayısı (Bakır için 56, Alüminyum için 34) m/Ωmm²

$$K = 56 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$$

$$S_{\text{DC-1}} = 6 \text{ mm}^2$$

Tüm dizilerin, invertere bağlantıları 6 mm² PV1 – F kablo ile yapıldığından 2%'lik DC gerilim düşümü sınırının altında kaldığı hesaplanarak tespit edilmiştir. Dizi toplama kutularını eviriciye bağlamak üzere kullanılan DC kablolar için de hem güç kaybı hem de gerilim düşümü hesabı yapılarak doğru kablo kesitleri tespit edilmiştir.

Maksimum Kablo Mesafesine Göre Güç Kaybı Hesabı;

$$\text{DC Kablo Güç Kaybı (P}_{\text{kayıp}}) = 2 \times (L_{\text{dizi}} \times I_{\text{sc}}^2) / (S_{\text{DC}} \times K)$$

$$P_{\text{kayıp}} = 2 \times ((131+129) \times 8,76^2) / (6 \times 56)$$

$$P_{\text{kayıp}} = 2 \times (19951.78 / 336) = 118,76 \text{ W}$$

Maksimum Kablo Mesafesine Göre Gerilim Düşümü Hesabı;

$$\text{DC Kablo Gerilim Düşümü \%} = (100 \times L_{\text{dizi}} \times P_{\text{dizi}}) / (K \times S_{\text{DC}} \times U_{\text{dizi}}^2)$$

$$\text{DC Kablo Gerilim Düşümü \%} = (100 \times (131+129) \times 6760) / (56 \times 6 \times 750^2)$$

$$\text{DC Kablo Gerilim Düşümü \%} = 175.760.000 / 189.000.000 = 0.92 < 2\% \text{ Uygunur.}$$

Dizilerden İnverterlere Kullanacağımız Kablolar İçin Akım Taşıma Hesabı;

$$I_{Max} = 1,25 \times I_{SC}$$

$$I_{Max} = 1,25 \times 9,09$$

$$I_{Max} = 11,36 \text{ A}$$

Ege kablo kataloğunda belirtilen solar kablo katalog bilgileri doğrultusunda proje kapsamında kullanacağımız 6 mm² PV1-F kablo için akım taşıma kapasitesi 70 A'dır. Ege kablo kataloğunda belirtilen sıcaklık koşulları ile ilgili düzeltme faktörü, 55 °C ortam sıcaklığında PV1-F kablo için izin verilen 90 °C sıcaklık için 0,71 değeri kullanılır.

EMO Elektrik Tesisleri Genel Teknik Şartnamesi ve Uygulama Esasları kitabındaki kablo akım taşıma kapasiteleri tablosunda belirtilen tek damarlı kablolarda düzeltme faktörü kullanıldığında kablo tavaasında sık şekilde çok sayıda kablunun yan yana döşenmesi durumu için kullanılacak düzeltme faktörü 0,38 olarak kullanılır.

$$I_{TK} = \text{Kablo Akım Taşıma Kapasitesi} \times \text{Sıcaklık Faktörü} \times \text{Düzeltilme Faktörü}$$

$$I_{TK} = 70 \times 0,71 \times 0,38$$

$$I_{TK} = 18,89 \text{ A} > 11,36 \text{ A Uygundur.}$$

Komplekse Ait AC Gerilim Düşümü Hesabı;

Komplekse ait veriler ve formül açıklamaları Tablo 4.5. ve Tablo 4.6.'da verilmiştir. Bu veriler doğrultusunda gerilim düşümü hesabı yapılacaktır.

Tablo 4.1 Evirici modül verileri

	Sembol	Değer	Birim
AC Kurulu Gücü	N_k	8.000	We
AC Nominal Gerilim	U_N	400	V
Maksimum Kablo Uzunluğu	L_k	4	m
Kablo Kesiti	S_k	5 x 6	mm ²

Tablo 4.1 Formül açıklamaları

	Sembol
Güç Kaybı (W)	$P_{kayıp}$
Elektrik İletkenliği	K
Gerilim Düşümü Oranı	%e
Solar Kablo Akım Taşıma	ITK
İşletme Akımı	I_N
Güç Faktörü	$\cos\emptyset$

Evirici İçin;

$$I_N = \frac{N_k}{U_N \times \sqrt{3} \times \cos\emptyset}$$

(4.1)

$$I_N = \frac{8.000}{400 \times \sqrt{3} \times 1}$$

$$I_N = 11,56 \text{ A}$$

AG Toplama Panosu İçin;

$$I_N = \frac{N_k}{U_N \times \sqrt{3} \times \cos\emptyset}$$

(4.2)

$$I_N = \frac{200.000}{400 \times \sqrt{3} \times 1}$$

$$I_N = 289,02 \text{ A}$$

Evirici – AG Toplama Panosu Arası Güç Kaybı Hesabı;

$$P_{\text{kayıp}} = \frac{3 \times L_K \times I_N^2}{S_K \times K}$$

(4.3)

$$P_{\text{kayıp}} = \frac{3 \times 4 \times 11,56^2}{5 \times 6 \times 56}$$

$$P_{\text{kayıp}} = 0,95 \text{ W}$$

Evirici – AG Toplama Panosu Arası Gerilim Düşümü Hesabı;

$$\%e = \frac{\sqrt{3} \times 100 \times L_K \times I_N}{S_K \times U_N \times K}$$

(4.4)

$$\%e = \frac{\sqrt{3} \times 100 \times 4 \times 11,56}{5 \times 6 \times 400 \times 56}$$

$$\%e = 0,012 < 3 \rightarrow \text{Uygundur.}$$

AG Toplama Panosu – AG Ana Dağıtım Panosu Arası Güç Kaybı Hesabı;

AG saha toplama panolarından, AG ana dağıtım panosuna maksimum mesafe 60m'dir. 3 x (1x150) + (1x70) mm² kesite sahip N2XH kablo kullanılmıştır.

$$P_{\text{kayıp}} = 596,66 \text{ W}$$

AG Saha Toplama – AG Ana Dağıtım Panosu Arası Gerilim Düşümü Hesabı:

$$\%e = \frac{\sqrt{3} \times 100 \times L_K \times I_N}{S_K \times U_N \times K}$$

$$\%e = \frac{\sqrt{3} \times 100 \times 60 \times 289,02}{3 \times 150 \times 400 \times 56}$$

$\%e = 0,030 < 3 \rightarrow$ Uygunur.

$\%e$ (gerilim düşümü) $\%3$ değerinden küçük olduğu için bu kesit uygundur.



Şekil 4.12. Kablo ve FV konnektör

4.1.6 AG Panosu ve Şalt Ekipmanları

Enerji analizörünün, sigortaların, arayüz koruma rölesinin, kaçak akım koruma rölesinin, veri kaydedicinin (data logger), haberleşme kartlarının dış ortamdan korunması ve inverterlerin AC çıkış kablo bağlantılarının toplanması için 1800x1600x600 mm ölçülerinde 1 adet AG pano tasarlanmıştır. Pano içerisinde 1 adet 4 kutuplu 400A 50kA Motorlu Kompakt Şalter, 1 adet 160/125A Sigortalı Yük Ayırıcı, 6 adet 400/5A 10VA Class:0,5 Akım Trafosu, 5 adet 1x16A C Tipi Otomatik Sigorta 6kA, 2 adet 2x10A C Tipi Otomatik Sigorta 6kA, 26 adet 4X20A

C Tipi Otomatik Sigorta 6kA, 26 adet 4x25A 300mA Kaçak Akım Koruma Rölesi, 1 adet TİP 1+2+3 VG Teknoloji 100kA B+C Sınıfı 3p+N Kontak Çıkışlı AG Parafudr, 1 adet 3 Fazlı 4 Telli 4 Tarifeli X/5(10A) 3x220/380V Elektronik Kombi Sayaç ve 1 adet MPR45S Haberleşmeli Enerji Analizörü bulunmaktadır. Harici tip, sac karkas yapı ve IP65 koruma sınıfında olan pano, 1.500 Vac izolasyon anma gerilimine dayanıklı olarak üretilmiştir. Ayrıca panoda güvenlik amaçlı uyarıcı etiket ve levhalar mevcuttur.



Şekil 4.13. AG pano ön ve iç görünüşü

4.1.7 Rüzgâr Sensörü (Anemometre)

Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nin Rüzgâr verilerinin ölçülebilmesi için sisteme bir adet anemometre bağlanmıştır. Anemometre sayesinde m/s cinsinden Rüzgâr hızı ölçülebilmektedir.



Şekil 4.14. Anemometre

4.1.8 Güneş Işınım Sensörü (Piranometre)

Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nin güneş ışınım verilerinin ölçülebilmesi için sisteme bir adet piranometre bağlanmıştır. Piranometre sayesinde W/m^2 cinsinden güneş ışınımı ölçülebilmektedir.

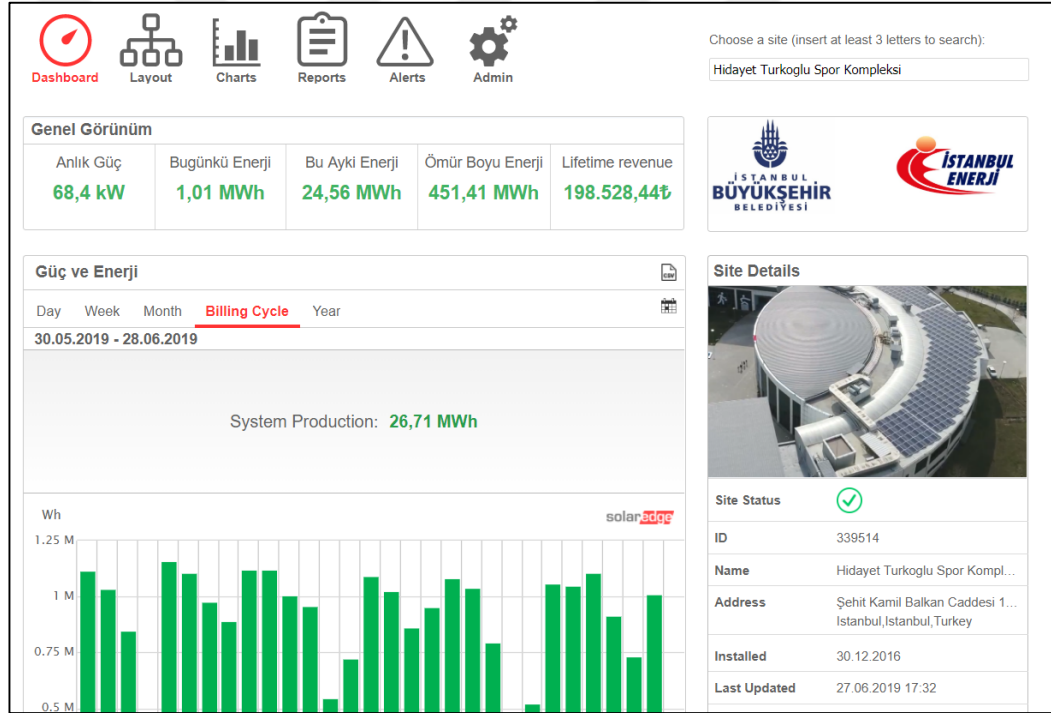


Şekil 4.15. Piranometre

4.1.9 Veri Kayıt Depolama ve Uzaktan Erişim Sistemi

Doğu-batı yönelimli optimizierli fotovoltaik sistemin AC panosuna konulmuş olan datalogger (veri kaydedici) cihazı vasıtasıyla invertere ait veriler kaydedilerek

izlenebilmektedir. AC panoya konulan veri kaydedici cihaza Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde bulunan mevcut internet hattından internet bağlantısı sağlanmıştır. Veri kaydedici cihazın (datalogger) inverterin haberleşme kartına bağlanması ve web portala açılmasıyla birlikte invertere ve güneş panellerine ait; üretilen güç, şebekeye verilen güç, inverter verimi, çıkış frekans değerleri, gün içinde, son bir ayda ve kurulumdan itibaren üretilen enerji, sistem günlük kaydı, (Santralde oluşan hata mesajları, uyarılar), panel verim düşüşü ikazı gibi veriler izlenmektedir. Santralde üretilen enerjiyle ve sistem durumuyla ilgili tüm bilgiler inverterin web portalı üzerinden izlenmektedir. Ayrıca üretilen enerjiye dair bilgiler panoya bağlanılan haberleşmeli analizör vasıtasıyla da görülebilmektedir. Şekil 4.16.'da Web portalına ait görsel paylaşılmıştır.



Kaynak: <https://monitoring.solaredge.com/solaredge-web/p/home>

Şekil 4.16. Web portal

4.1.10 Bilgi Ekranı

İstanbul halkının yoğun olarak kullandığı Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde yapılan bu uygulamada, güneş enerji santralinde alınan veriler

kompleksin girişindeki bilgi ekranına (kiosk) yansıtılmıştır. Bu sayede halkta yenilenebilir enerji kaynaklarına olan bilincin artırılması amaçlanmıştır.



Şekil 4.17. Bilgi ekranı

4.2 Sistemin Tasarımı

169 kWp kurulu güce sahip çatı üzeri doğu-batı yönelimli optimizierli güneş enerji santralinin kurulduğu Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'ne ait konum bilgisi, komplekse ait elektrik tüketim verileri ve kompleks çatısında kurulan güneş enerji sisteminin tasarlanan sisteme uygunluğu incelenerek, malzemeler seçilirken dikkat edilen kriterler açıklanmıştır.

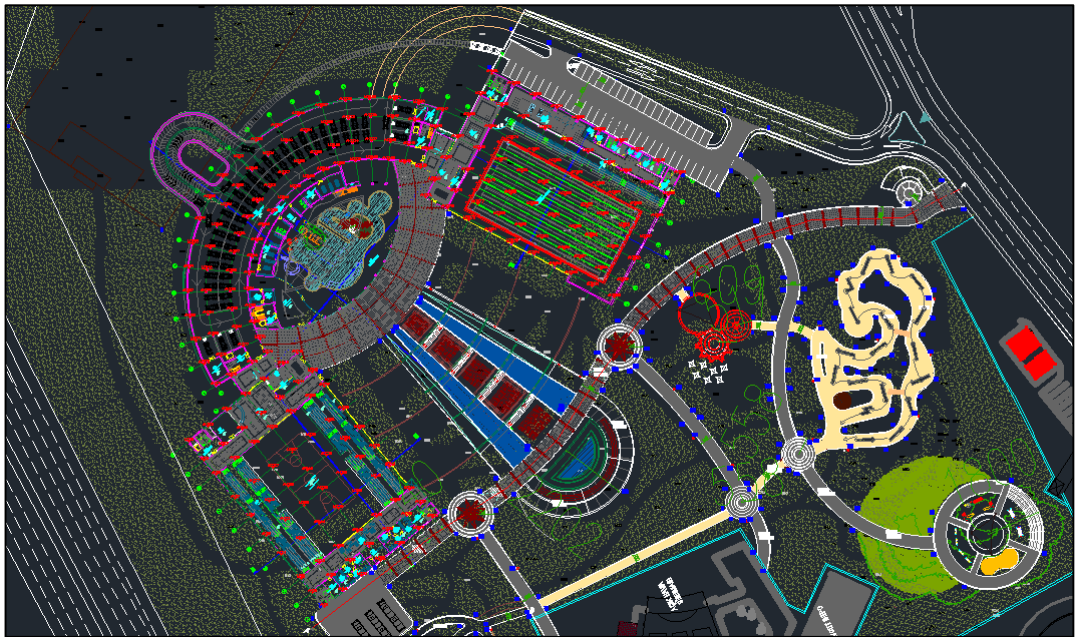
4.2.1 Kompleksin Konumu

41.06530750, 28.88433391 koordinatları arasında ve dilim orta meridyeni 27, dilim genişliği 6° olan İstanbul Büyükşehir Belediyesi'ne ait Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi, Yıldırım Mahallesi, Şehit Kamil Balkan Cad. Adapark Yanı Bayrampaşa adresindedir. Bayrampaşa Adapark yanında kurulmuş olan Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'ne ait harita görüntüsü şekil 4.18'de gösterilmiştir.



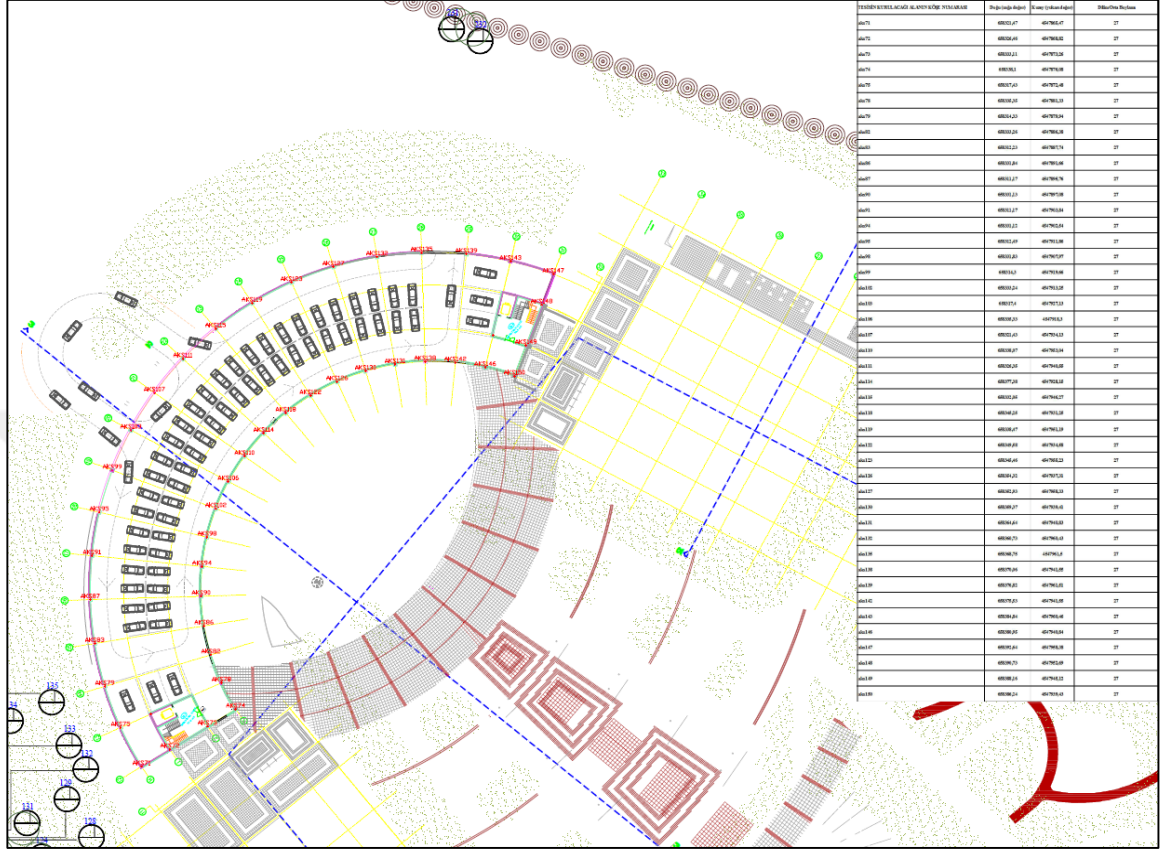
Şekil 4.18. Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi harita görseli

Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'ne ait tesis vaziyet planı Şekil 4.19'da gösterilmektedir.



Şekil 4.19. Tesis vaziyet planı

Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi’de kurulan güneş enerji santraline ait alan ve köşe koordinatları şekil 4.20’deki aplikasyon krokisinde gösterilmiştir.

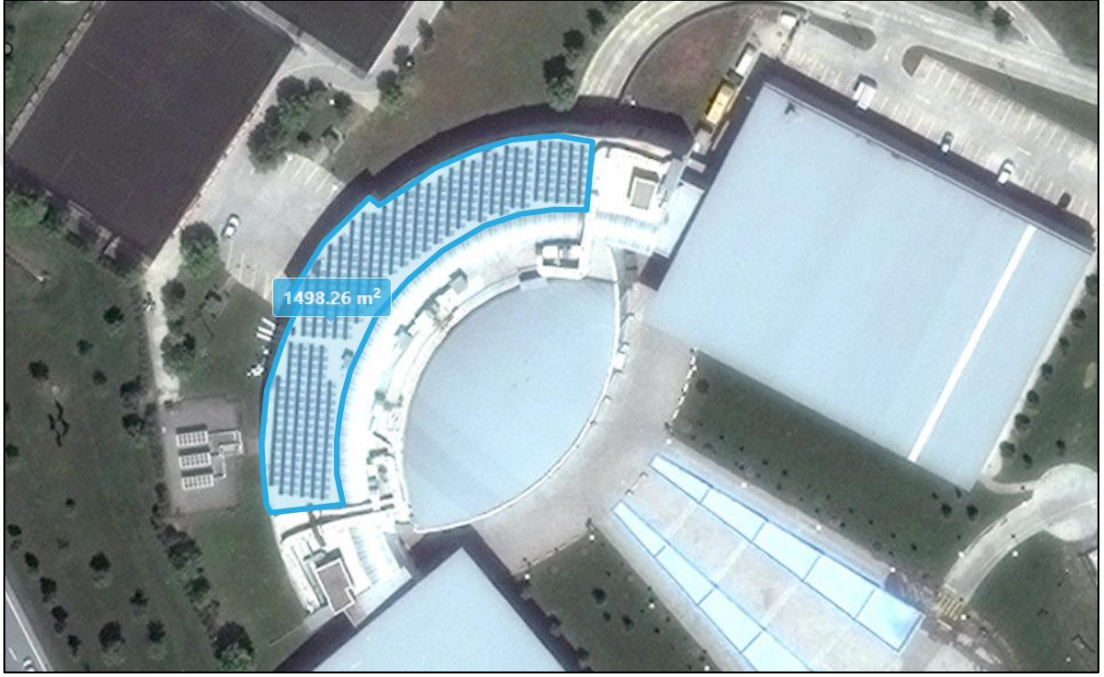


Şekil 4.20. Aplikasyon krokisi

4.2.2 Spor Kompleksine Ait Bilgiler

Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi, 2010 yılında İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından halkın kullanımına açılmıştır. Tesis 57.081 m² yüzey alana inşa edilmiştir. Spor kompleksinde, kapalı spor salonu (1.306 seyirci kapasiteli), yüzme havuzu (280 seyirci kapasiteli), atlama kuleli yüzme havuzu, aqua yüzme havuzu, fitness salonları, step-aerobik ve pilates salonu, uzak doğu sporları salonu, masa tenisi salonu, iki halı saha, idari birimler ve iki kafeterya bulunmaktadır. Spor kompleksinin yıllık kursiyer sayısı 61.571’dir.

Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde güneş enerji sistemi, orta kısımda bulunan hilal şeklindeki çatı alanına tesis edilmiştir. Güneş enerji sistemi kurulumu yapılan çatı alanı yaklaşık 1.500 m²'dir. Çatı eğimi 0° olup zemini düz betondan oluşmaktadır. Çatı alanında, havalandırma kanalları, bacalar ve kenar kısımlarda parapet bulunmaktadır. Bu nedenle alan kayıpları yaşanmış ve çatı alanın tamamı güneş enerji sistemi kurulumu için kullanılamamıştır. Kurulum yapılan çatı alanı Şekil 4.21'de tesis görseli ise Şekil 4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.21. Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi güneş enerji sistemi kurulan çatı alanı



Şekil 4.22. Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi 3D görseli

Orta gerilim tek zamanlı ticarethane aboneliği olan Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi, Serbest tüketici kategorisinde olup elektriği CK Boğaziçi Elektrik Perakende Satış A.Ş.'den satın almaktadır. Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nin kurulu gücü; 3.200 kW olup sözleşme gücü; 2.000 kW'tır. Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi 2018 yılında 3.579.868 kWh elektrik tüketilmiş olup yıllık toplam elektrik faturası tutarı KDV dahil 1.783.371,61 TL'dir Komplekse ait aylık tüketim verileri Tablo 4.7'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2 Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi 2018 yılı aylık tüketim verileri

İlk Okuma Tarihi	Son Okuma Tarihi	Aktif Tüketim (kWh)	Birim Fiyat (TL)	Fatura Tutarı (TL)
1.01.2018	31.01.2018	353.343	0,43	151.175,24
1.02.2018	29.02.2018	263.069	0,43	112.552,16
29.02.2018	31.03.2018	267.154	0,43	114.299,90
31.03.2018	30.04.2018	226.872	0,42	94.386,43
1.05.2018	31.05.2018	232.348	0,42	96.664,63
1.06.2018	30.06.2018	361.207	0,42	150.274,33
1.07.2018	31.07.2018	380.022	0,42	158.102,01
1.08.2018	31.08.2018	436.397	0,50	219.294,12
1.09.2018	30.09.2018	307.414	0,57	176.105,83
1.10.2018	31.10.2018	248.555	0,68	168.729,33
1.11.2018	30.11.2018	234.663	0,68	159.298,87
1.12.2018	31.12.2018	268.824	0,68	182.488,76

Kaynak: İBB Enerji Yönetimi ve Aydınlatma Müdürlüğü, 2019

4.2.3 Kullanılan Malzemenin Kompleks İçin Tasarlanan Sisteme Uygunluğu

Doğu-batı yönelimli optimizasyonlu güneş enerji santralının en önemli özelliği aynı alana kurulacak güney yönelimli bir santraldan daha fazla kurulu güçte kuruluma olanak sağlamasıdır. Bu sayede yenilenebilir enerjiden daha fazla faydalanılacak olup karbon (CO₂) salınımı ise daha da azaltılacaktır. Sistem tasarımı ile güneş doğarken ve batarken güneş ışınlarından maksimum düzeyde yararlanılmaktadır. Güney yönelimli uygulamalarda güneş ışınları sadece belirli bir zaman diliminde panellere dik olarak düşmektedir. Doğu-batı sistemde ise güneş güney yöndeysen daha az üretim olmasına karşın güneş doğarken ve batarken ki zaman diliminde daha fazla enerji üretimi yapılabilmektedir. Aynı zamanda doğu-batı sistem ile aynı alanda daha fazla güneş enerji sistemi kurulabilmektedir. Aynı çatı alanında 30° güney

yönelimli bir kurulum yapılsaydı 169 kWp yerine 110,5 kWp kurulu güçte sistem kurulabilecekti.

Çatı üzeri güneş enerji santrali kurulumlarında iki önemli etken bulunmaktadır. Bunlar çatı statığı (yük taşıma kapasitesi) ve çatı izolasyonudur. Tesis edilecek güneş enerji santralinden kaynaklı çatıya gelecek ekstra yükler, yapılan statik hesaplarla analiz edilmiş ve çatı statığı açısından uygun görülmüştür. Ancak çatıda izolasyon sorunu olduğu ve alt katlara su sızdığı görülmüştür. Bu durumun santral kurulumu öncesinde giderilmesi gerekmektedir. Güneş enerji santrali tesis edilmeden önce kompleksin çatısında izolasyon çalışması yapılmış ve söz konusu sorun giderilmiştir.

Bu uygulamada konstrüksiyon sistemi paslanmalara karşı dayanımı yüksek ve uzun ömürlü olan alüminyum malzeme seçilmiştir. Ayrıca yeni yapılan çatı izolasyonuna zarar vermemek adına ağırlık sistemi seçilmiş ve çatı yüzeyinde herhangi bir delme işlemi yapılmamıştır.

169 kWp kurulu gücündeki doğu-batı yönelimli güneş enerji santralinde 260 Wp gücünde 650 adet polikristal fotovoltaik panel kullanılmıştır. Güneş enerji santrali için alınan paneller yerli üretici tarafından imal edildiğinden maliyet-performans oranı oldukça yüksektir. Polikristal paneller yapıları gereği üretim süreçleri basit olduğundan hızlı bir şekilde tedarik edilebilmektedir. Söz konusu santral için sipariş edilen paneller 21 gün içerisinde spor kompleksinde teslim alınmıştır. Düşük maliyetli olması sebebiyle çerçeveli tip güneş paneli tercih edilmiştir. Bu sayede yatırım geri dönüş süresinin daha da kısaltılmasına katkı sağlanmıştır.

Güneş panellerinden maksimum enerji alınabilmesi ve panellerin anlık olarak izlenmesi için her bir güneş panelinde bir adet olacak şekilde toplamda 650 adet optimizör kullanılmıştır.

Optimizör sayesinde santralde bulunan güneş panellerinden biri herhangi bir nedenden dolayı üretim kaybı yaşadığında sadece ilgili panelin üretimi düşecek olup

serideki diğler paneller etkilenmeyecektir. Bu sayede maksimum enerji üretimi sağlanacaktır. Eğer optimizer kullanılmazaydı, serideki tüm paneller gölgelenmeden dolayı en az üretimi gerçekleştiren güneş paneli kadar üretim yapacak ve üretimde ciddi bir kayıplar yaşanacaktı. Panellerin seri olarak dizilmesiyle oluşan DC voltaj seri panel sayısı ile değışmekle beraber genellikle 800-1500 V_{dc} seviyelerinde olmaktadır. Güneş panellerine monte edilen optimizer inverter ile haberleşmediğinde veya açık devre olduğunda 1 volt çıkış vererek dizilerde oluşan 800-1500 V_{dc} gerilim seviyesinden koruma sağlamaktadır. Bu sayede santralin bakım onarımı anında oluşabilecek elektrik çarpması durumu engellenmiş olacaktır. Ayrıca optimizerle panel bazlı izleme yapılabilmesi sayesinde, sistem performansı ve arıza durumları anlık olarak takip edilerek işletme ve bakım maliyetlerinin de minimuma inmesini sağlanmaktadır. Optimizer DC/DC dönüştürücü elektronik bir devredir. Optimizerin birçok avantajı olmasına rağmen elektronik bir devre olduğunda %0,5'lik bir enerji kaybı yaşanmaktadır. Optimizer verimi %99,5'tir.

Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde tesis edilen 169 kWp güneş enerji santralinde 25 adet 8 kW inverter kullanılmıştır. Toplam inverter çıkış gücü 200 kWe olmaktadır. 169 kWp DC kurulu güce karşılık 200 kWe inverter çıkış gücü olmaktadır. Burada seçilen inverter gücü ve adedi sistem performansı açısından uygun değildir. İdeal şartlarda olması gereken DC kurulu gücün, inverter çıkış gücünden %5-15 daha yüksek olmasıdır. Çünkü güneş panellerinde üretilen elektrik inverter AC çıkış tarafına ulaşana kadar kayıplar yaşayacaktır. Bu kayıplar, sıcaklık kayıpları, kablo kayıpları, optimizer kayıpları, inverter kayıpları vb. kayıplardır.

Ayrıca sistem performansının daha iyi olması açısından yüksek güçte az sayıda inverter seçilmesi gerekmektedir. İnverter gücü düşük seçildiğinde fazla sayıda inverter gerekmede ve bu durum maliyetin artması, arıza noktasının artması, kayıpların artması vb. gibi dezavantajlar oluşturmaktadır.

Seçilen inverter %98 verime sahip olup piyasada bulunan diğler inverterlere göre yüksek verimlidir. Bu sayede inverter çıkışından alınan güç maksimum seviyede olmaktadır. İnverter elektronik bir cihaz olduğundan güneş enerji santrallerinde en

sık rastlanılan arıza noktalarındandır. Bu nedenle inverter kalitesi çok önemlidir. Ayrıca arıza durumunda teknik destek sağlayacak bakım ekibinin İstanbul il sınırları içerisinde olması oldukça önemlidir.

169 kWp çatı üzeri güneş enerji santralının verilerinin izlenebilmesi için sistemde kullanılan İnverter, RS 485, Ethernet, Wi-Fi haberleşme portlarına ve modbus haberleşme protokolüne sahiptir. Bu özelliği sayesinde güneş enerji santraline ait tüm veriler herhangi bir portala aktarılabilmekte veya inverter üreticisinin kendi web portalında izlenebilmektedir. İstanbul halkının yoğun olarak kullandığı Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde yapılan bu uygulamada güneş enerji santralinde alınan veriler kompleks girişindeki bilgi ekranına (kiosk) yansıtılmıştır. Bu sayede halkta yenilenebilir enerji kaynaklarına olan bilincin artırılması amaçlanmıştır.

Güneş ışınımı, Rüzgâr hızı, ortam ve modül sıcaklık bilgilerini almak için sistemde 1 adet meteoroloji istasyonu kullanılmıştır. Bu veriler sayesinde sistemin performansı takip edilmektedir.

5. BÖLÜM

DOĞU-BATI YÖNELİMLİ OPTİMİZERLİ FOTOVOLTAİK SİSTEMİN SİMÜLASYONLARI

Doğu-batı yönelimli optimizierli fotovoltaiik sistemin tasarımı aşamasında simülasyon yapılmış olup sistemin kurulumu öncesinde ışınlmıı tespiti, üretim analizi ve maliyet çalışması yapılmıştır.

5.1 Simülasyon Programlarının Kullanılması

Piyasada birçok fotovoltaiik simülasyon programı bulunmaktadır. Bunlardan başlıcaları; PVSol, PVSyst, PVGIS, PVWats, Sunny Design, Archelios, HelioScpoe vb. programlardır. Ayrıca inverter üreticilerine ait birçok program bulunmaktadır. Güneş enerji santralının kurulumu öncesi doğru bir tasarım yapılabilmesi adına simüle edilmesi gerekmektedir. Bu tür programlar santralin kurulu gücünün ve üretim tahminlerinin tespiti ile ekonomik analizinin yapılabilmesine olanak sağlamaktadır.

Güneş enerji santralinde kullanılacak güneş panelleri, gerilim üretici olarak farklı sayılarda dizi oluşturacak şekilde seri bağlanır. Güneş panellerinin seri ve dizi sayısı tespit edilirken inverterin çalışma aralıkları ile uyumlu olacak şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Her solar inverterin DC giriş tarafında farklı MPP giriş aralığı vardır. Ayrıca her solar inverter giriş akımı ve gerilimi sınırlandırılmıştır. Olası tasarımlar için güneş panellerinin dizilimi ve eğimi simülasyon programları ile tahmin edilerek değerlendirilebilir. Bu programlarla tasarım desteğinin yanında gölgelenme analizi, verim analizi, enerji üretim ve emisyon tasarruf miktarları, tesis devre şemalarının çizimi ve ekonomik analiz yapılarak bir rapor halinde çıktı alınabilmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan programlar aşağıda açıklanmıştır.

5.1.1 PVSOL

PVSOL veri tabanında dünya çapındaki 8.000 konuma ait iklim verisi yer almaktadır. Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde tesis edilen güneş enerji santrali PVSOL programı ile simüle edilmiştir. Programla sistem planlaması ve optimizasyonu ile yıllık enerji üretim değerleri simüle edilmiştir. Program sahip olduğu ışınım verileri ve kurulum için kullanılan malzeme kütüphanesi ile kompleksin iki boyutlu ve üç boyutlu dizaynını yapabilmektedir. Ayrıca aylık ve yıllık enerji üretim değerleri gibi çeşitli simülasyon sonuçları da alınabilmektedir. Güneş ışınımını kullanarak ve güneşin konumunu simüle ederek de gölgelenme analizinin yapılabilmesini sağlamaktadır. Güneş panellerinde bulunan By-Pass diyot devresi ve güneş konumu dikkate alınarak güneş paneli bazında gölgelenme analizi yapılmaktadır. Diğer programların çoğunda ise sistemin tamamında veya dizi bazında gölgelenme analizi yapılabilmektedir. Güneşin zaman içerisindeki konumu (yükseklik, enlem, azimut vs. gibi) kullanılarak sistemin enerji üretiminin maksimum olduğu noktalar tespit edilebilmektedir.

5.1.2 PVGIS

PVGIS, Avrupa komisyonu tarafından sunulan web tabanlı Avrupa ve Afrika bazlı bölgesel ışınım değerlerine sahip bir programdır. Web tabanlı program olan PVGIS iki farklı uydudan ışınım verileri almaktadır. PVGIS'ten alınan ışınım sonuçları için doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi ile güney yönelimli güneş enerji sisteminin üretim karşılaştırması yapılabilmektedir. Kompleksin bulunduğu konumun ışınım verilerine göre aylık ve yıllık bazda enerji üretim değerleri görülebilmektedir. En uzun gece, en uzun gündüz ve yatay düzleme düşen ışınım ile güneş açısına bağlı oluşan grafikte görülebilmektedir. (PVGIS, 2019)

5.1.3 Meteonorm

Meteonorm dünyada yaklaşık 1.700 meteoroloji istasyonundan aldığı veriyi interpolate ederek belirlenen lokasyonun ışınım değerlerini hesaplamaktadır.

Dolayısıyla 1.700 meteoroloji istasyondan alınan ışı nım verilerinden oluş an bir güneş ışı nımı veri havuzudur. Meteoroloji istendiği takdirde saatlik veri sunabilmektedir. Meteoroloji verileri genellikle güneş enerji santralleri üzerinden gelen verilerdir. Bu özelliği sayesinde ışı nım doğruluğu diğer meteoroloji kaynak veya sitelerine göre daha güvenilir olarak bilinmektedir.

5.1.4 Sketch-Up

Sketch-Up üç boyutlu görüntü ve imge veren bir modelleme programıdır. Güneş enerji santralinin kompleks üzerindeki yerleşiminin gösterilmesi, yani vaziyet planı oluşturulması amacıyla kullanılmıştır.

5.2 Simülasyon Sonuçları

Güneş enerji santrali modellenirken yukarıda bahsi geçen programlar kullanılmıştır. Doğu-batı yönelimli santral ile güney yönelimli santral, enerji üretimi, performans oranı ve ekonomik açıdan karşılaştırılmıştır. Aynı kurulum alanı için her iki santralinde ışı nım kazancı, eğim ve yönelime bağlı güç yoğunluğu durumları incelenmiştir.

169 kWp güçteki 11° doğu-batı yönelimli güneş enerji santralinin, 169 kWp 30° güney yönelimli güneş enerji santralinin ve 110,5 kWp 30° güney yönelimli güneş enerji santralinin karşılaştırılabilmesi için üretim ve verim analizi aşağıda açıklanmıştır.

5.2.1 169 kWp 11° Doğu-Batı Yönelimli Güneş Enerji Santralinin Simülasyonu

169 kWp güçteki 11° doğu-batı yönelimli güneş enerji santralinin üretim ve verim analizi aşağıda verilmiştir.

Tasarımı yapılan sistem PVSOL yazılımı, PVGIS Web Portalı ve Meteonorm hava durumu bilgisi temel alınarak simüle edilmiştir. Doğu-batı yönelimli güneş enerji santralindeki veriler, Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi konumundaki güneş ışınımı, Solar Türk güneş paneli ve Solar Edge solar inverter davranışları incelenerek sistem analizi yapılmıştır.

169 kWp 11° doğu-batı yönelimli güneş enerji santralinin kurulumunun tasarlandığı Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde yatay düzlem üzerine düşen ışınım miktarı 1.386 kWh/m² 'dir. GES'in kurulumu 11° doğu-batı yönünde tasarlanmış olup, standart spektrum sapması ve modül yansımalarının negatif etkileri de dahil edildiğinde modül yüzeyinin doğu ve batı yönündeki 11°'lik eğimi sayesinde modül üzerinde ortalama m² 'de 109,13 kWh ışınım kaybı yaşanmaktadır. Modül üzerine düşen toplam ışınım miktarı; (1.386 – 109,13) kWh/m² = 1.276,87 kWh/m²'dir. 1.057 m²'lik modül alanına sahip GES'in üzerine düşen ışınım miktarının enerji karşılığı ise 1.276,87 kWh/m² x 1.057 m² = 1.349.651,59 kWh olmaktadır.

PVSOL simülasyon programında panel teknik özelliklerine göre denklem (5.1)'den de faydalanılarak kapasite faktörü %15,62 olarak hesaplanmıştır.

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{OC} \times I_{SC}}$$

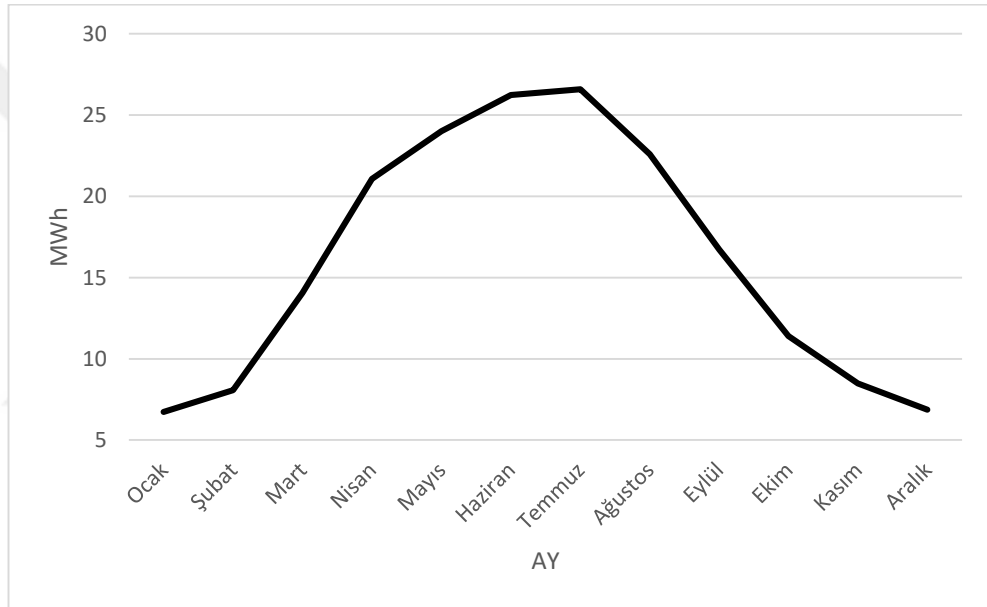
(5.1)

169 kWp 11° doğu-batı yönelimli fotovoltaik sistemin yapılan simülasyon sonuçlarına göre kapasite faktörü de göz önünde bulundurularak yıllık; 1.349.651,59 kWh x %15,62 = 210.815,57 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 optimizasyon kayıpları olmasından ötürü yıllık enerji üretimi 192.829 kWh olmaktadır. Bu kayıp toplam yıllık enerji üretiminin yaklaşık %8,53'üne tekabül etmektedir. Kapasite

faktörünün oluşturduğu %15,62'lik elektrik enerjisi üretiminden %8,53'lük bir kayıp oluşmaktadır. Bu büyüklükte ve yönelimdeki bir sistem için kayıp oranı kabul edilebilirdir.

Yıllık 192.829 kWh üretim yapan sistemin aylara göre enerji üretim eğrisi Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Kurulu gücü 169 kWp olan sistemin, kurulu güç başına üretilen yıllık elektrik enerjisini ifade eden spesifik güç verimi;

$192.829 \text{ kWh} / 169 \text{ kWp} = 1141 \text{ kWh/kWp}$ olarak PVSOL ile hesap edilmiştir.



Şekil 5.1. 169 kWp 11° Doğu-batı yönelimli sistemin aylara göre enerji üretim eğrisi

169 kWp gücündeki 11° doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi kurulumu için PVSOL ve PVGIS aylık üretim verileri Tablo 5.1'de karşılaştırılmıştır. Simülasyon yaparken PVSOL meteonorm verilerini, PVGIS ise uydu verilerini kullanmaktadır. Simülasyon sonuçlarının aylık bazda enerji üretim değerleri karşılaştırıldığında PVGIS, PVSOL'e göre toplamda %3,9 daha fazla üretim göstermektedir. Aylık enerji üretim değerleri incelendiğinde en yüksek üretimin temmuz ayında gerçekleştiği görülmektedir.

Tablo 5.2 PVSOL-PVGIS enerji üretim karşılaştırması (169 kWp 11° Doğu-Batı)

Ay	kWh (PVSOL)	kWh (PVGIS)
Ocak	6,74	6,54
Şubat	8,07	8,58
Mart	14,06	14,72
Nisan	21,08	20,5
Mayıs	24,02	25,5
Haziran	26,24	26,8
Temmuz	26,59	28,9
Ağustos	22,6	25,6
Eylül	16,73	18,18
Ekim	11,4	11,94
Kasım	8,49	7,87
Aralık	6,86	5,58
Toplam	192,88	200,71

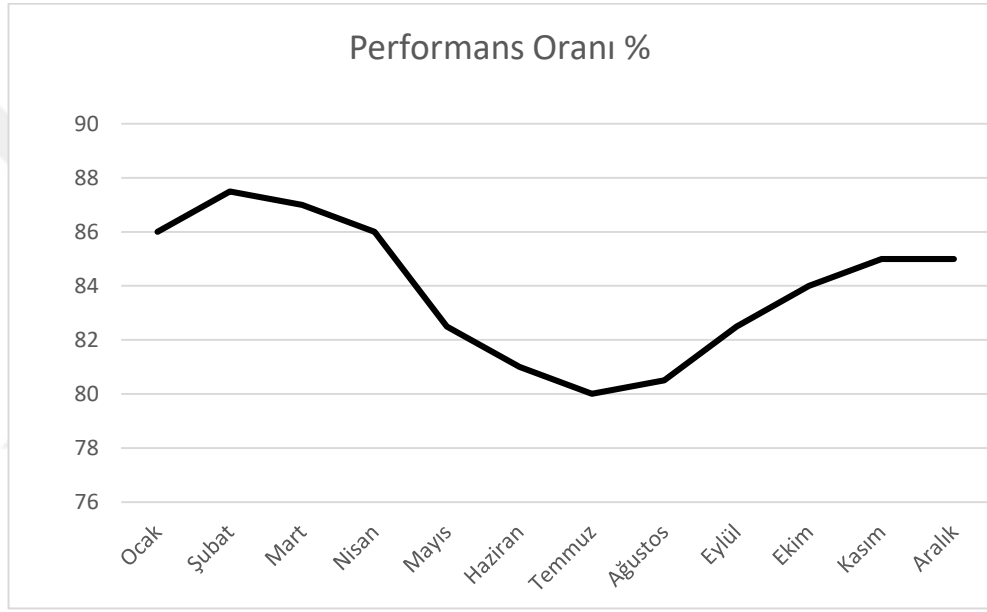
169 kWp 11° doğu-batı yönelimli güneş enerji sisteminin aylık performans değerleri Tablo 5.2.'de, grafiği Şekil 5.2.'de gösterilmiştir. Sistem yılda ortalama % 83,92 performans oranı ile çalışmaktadır. Sistem performans oranı sistemin tasarlanma aşamasındaki performansının, sistem parametrelerine göre değişimini ifade etmek için kullanılır. Bu değişim miktarı performans oranının 1'den çıkarılmasıyla bulunmaktadır. Bu değer gerçek değerlerin hesaplanan değerlerden, verimden bağımsız bir şekilde sapmasını göstermektedir.

Tablo 5.2. 169 kWp 11° doğu-batı sistemin aylık çalışma performansı (%)

Ay	Sistem Performans Oranı (%)
Ocak	86,0
Şubat	87,5
Mart	87,0
Nisan	86,0
Mayıs	82,5
Haziran	81,0

Tablo 5.2. Devam

Temmuz	80,0
Ağustos	80,5
Eylül	82,5
Ekim	84,0
Kasım	85,0
Aralık	85,0
Ortalama	83,9

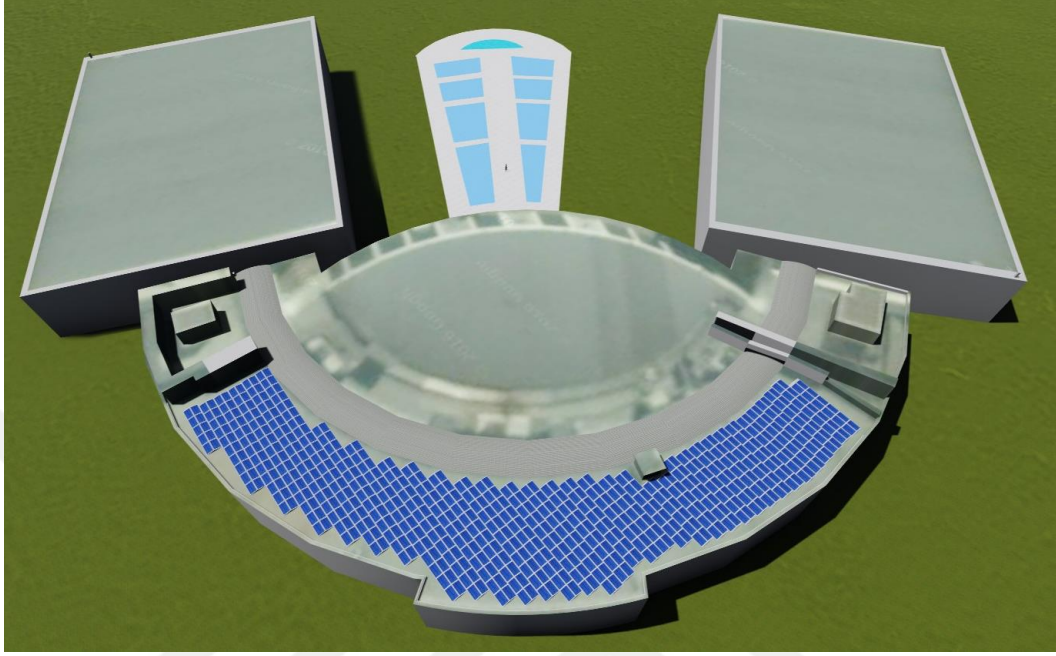


Şekil 5.2. 169 kWp 11° doğu-batı sistemin çalışma performansı (%)

169 kWp 11° doğu-batı sistemi ile ilk yılda toplamda 192.829 kWh üretim yapılacak olup, yaklaşık karbon ayak izi, TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu)'ten alınan karbon emisyonu verisine göre; $192.829 \text{ kWh/yıl} \times 0,52 \text{ kg} = 100,27 \text{ ton CO}_2$ 'dir. (TÜİK, 2014)

Ayrıca kurulacak olan sistem ile ilk yılda EPA (Environmental Protection Agency)'dan alınan veriye göre; $100,27 \text{ ton CO}_2 / 39 \text{ kg CO}_2 = 2.571$ adet ağaç dikimine eş değer CO₂ salınımı engellenmiş olacaktır. (EPA, 2015)

169 kWp 11° doğu-batı fotovoltaik sistemin ve tesis üzerindeki görünümü Sketch-Up programı ile çizilmiş olup, görseller Şekil 5.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. 169 kWp 11° doğu-batı yönelimli güneş enerji santrali görseli

5.2.2 169 kWp 30° Güney Yönelimli Güneş Enerji Santralinin Simülasyonu

169 kWp 30° güney yönelimli güneş enerji santralinin mevcut çatı alanına kurulumu mümkün değildir. Bu güçte bir kurulum yapılabilmesi için mevcut çatı ile aynı özelliklere sahip olmak kaydıyla, yaklaşık 2.300 m² çatı alanı gerekmektedir. Söz konusu çatı alanına böyle bir kurulum yapılamayacak olmasına rağmen üretim ve verim analizi yapılabilmesi için 169 kWp güçteki güney yönelimli güneş enerji sisteminin simülasyonu yapılmıştır.

Tasarımı yapılan sistem PVSOL yazılımı, PVGIS Web Portalı ve Meteonorm hava durumu bilgisi temel alınarak simüle edilmiştir. Güney yönelimli güneş enerji santralindeki veriler, Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'ndeki güneş ışınımı, Solar Türk güneş paneli ve Solar Edge solar inverter davranışları incelenerek sistem analizi yapılmıştır.

169 kWp 30° güney yönelimli güneş enerji santralının kurulumunun tasarlandığı Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde yatay düzlem üzerine düşen ışınım miktarı 1.386 kWh/m² 'dir. GES'in kurulumu 30° güney yönünde tasarlanmış olup, standart spektrum sapması ve modül yansımalarının negatif etkileri de dahil edildiğinde modül yüzeyinin doğu ve batı yönündeki 30°'lik eğimi sayesinde modül üzerine ek olarak m² 'de 66,68 kWh ışınım düşmektedir. Modül üzerine düşen toplam ışınım miktarı; (1.386 + 66,68) kWh/m² = 1.452,68 kWh/m²'dir. 1.057 m²'lik modül alanına sahip GES'in üzerine düşen ışınım miktarının enerji karşılığı ise 1.452,68 kWh/m² x 1.057 m² = 1.535.482,76 kWh olmaktadır.

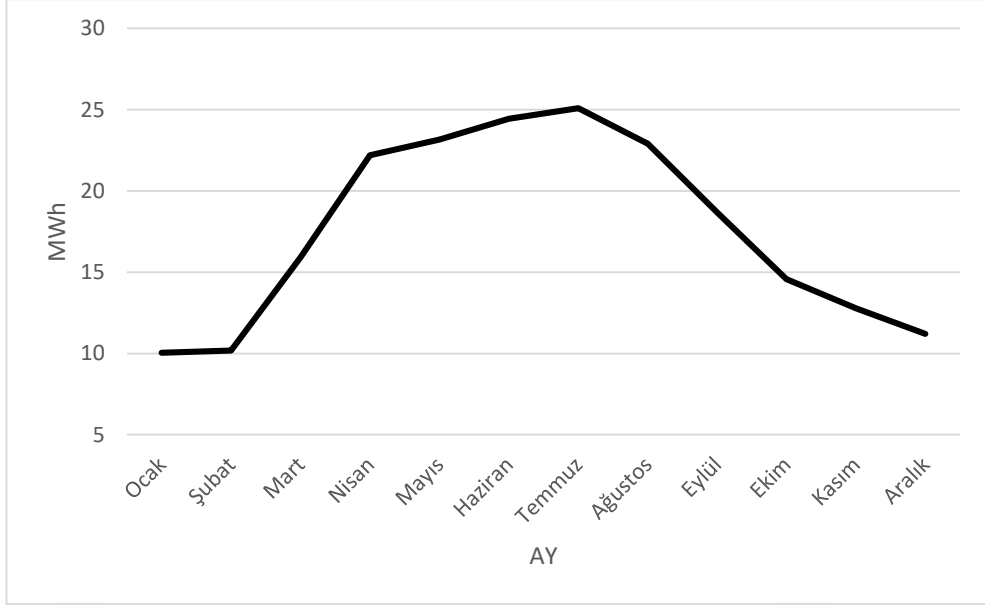
PVSOL simülasyon programında panel teknik özelliklerine göre denklem (5.2)'den de faydalanılarak kapasite faktörü %15,62 olarak hesaplanmıştır.

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (5.2)$$

30° güney yönelimli fotovoltaik sistemin yapılan simülasyon sonuçlarına göre kapasite faktörü de göz önünde bulundurularak yıllık; 1.535.482,76 kWh x %15,62 = 239.842,4 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 optimizasyon kayıpları olmasından ötürü yıllık enerji üretimi 211.250 kWh olmaktadır. Bu kayıp toplam yıllık enerji üretiminin yaklaşık %11,92'sine tekabül etmektedir. Kapasite faktörünün oluşturduğu %15,62'lik elektrik enerjisi üretiminden %11,92'lik bir kayıp oluşmaktadır. Bu büyüklükte bir sistem için kayıp oranı kabul edilebilirdir.

Yıllık 211.250 kWh üretim yapan sistemin aylara göre enerji üretim eğrisi Şekil 5.4.'te gösterilmiştir. Kurulu gücü 169 kWp olan sistemin, kurulu güç başına üretilen yıllık elektrik enerjisini ifade eden spesifik güç verimi;

211.250 / 169 kWp = 1250 kWh/kWp olarak PVSOL ile hesap edilmiştir.



Şekil 5.4. 169 kWp 30° güney yönelimli sistemin aylara göre enerji üretim eğrisi

169 kWp gücündeki 30° güney yönelimli güneş enerji sistemi kurulumu için PVSOL ve PVGIS aylık üretim verileri Tablo 5.3.'te karşılaştırılmıştır. Simülasyon yaparken PVSOL meteonorm verilerini, PVGIS ise uydu verilerini kullanmaktadır. Simülasyon sonuçlarının aylık bazda enerji üretim değerleri karşılaştırıldığında PVGIS, PVSOL'e göre toplamda %6,9 daha fazla üretim göstermektedir. Aylık enerji üretim değerleri incelendiğinde en yüksek üretimin temmuz ayında gerçekleştiği görülmektedir.

Tablo 5.2 PVSOL-PVGIS enerji üretim karşılaştırması (169 kWp 30° Güney)

Ay	kWh (PVSOL)	kWh (PVGIS)
Ocak	10,04	10,1
Şubat	10,17	11,6
Mart	15,92	17,8
Nisan	22,2	22,2
Mayıs	23,17	25,4
Haziran	24,45	25,5
Temmuz	25,1	28,1
Ağustos	22,9	27,1
Eylül	18,67	21,6

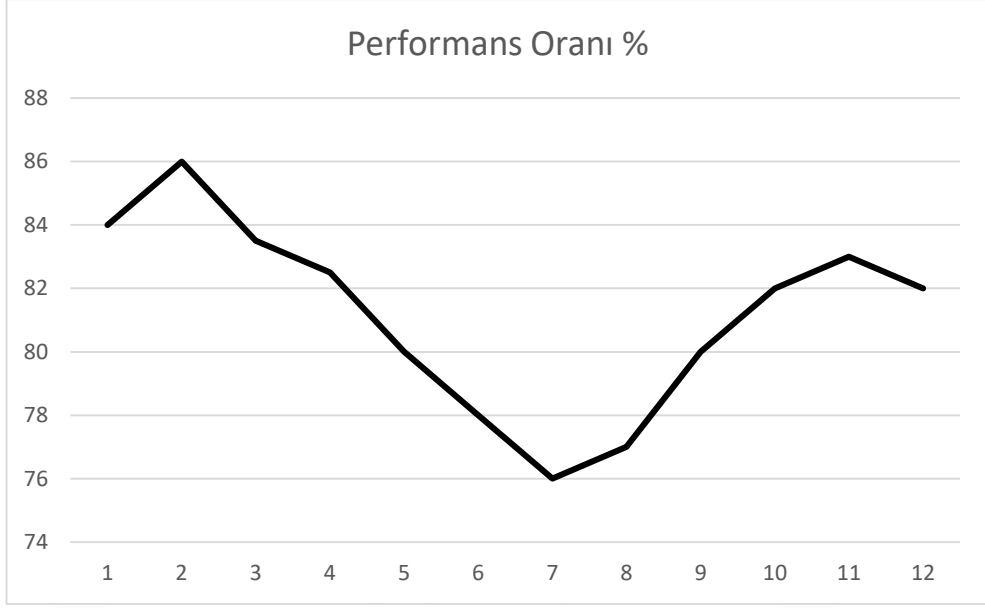
Tablo 5.2 Devam

Ekim	14,58	16,1
Kasım	12,79	12,3
Aralık	11,26	9,16
Toplam	211,25	226,96

169 kWp 30° güney yönelimli güneş enerji sisteminin aylık performans değerleri Tablo 5.4.'te, grafiği de Şekil 5.5.'te gösterilmiştir. Sistem yılda ortalama % 81,16 performans oranı ile çalışmaktadır. Sistem performans oranı sistemin tasarlanma aşamasındaki performansının, sistem parametrelerine göre değişimini ifade etmek için kullanılır. Bu değişim miktarı performans oranının 1'den çıkarılmasıyla bulunmaktadır. Bu değer, gerçek değerlerin hesaplanan değerlerden, verimden bağımsız bir şekilde sapmasını göstermektedir.

Tablo 5.2 169 kWp 30° güney sistemin aylık çalışma performansı (%)

Ay	Sistem Performans Oranı (%)
Ocak	84,0
Şubat	86,0
Mart	83,5
Nisan	82,5
Mayıs	80,0
Haziran	78,0
Temmuz	76,0
Ağustos	77,0
Eylül	80,0
Ekim	82,0
Kasım	83,0
Aralık	82,0
Ortalama	81,2



Şekil 5.5. 169 kWp 30° güney yönelimli sistemin çalışma performansı (%)

169 kWp 30° güney yönelimli sistem ile ilk yılda toplamda 211.250 kWh üretim yapılacak olup, yaklaşık karbon ayak izi, TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu)'ten alınan karbon emisyonu verisine göre; $211.250 \text{ kWh/yıl} \times 0,52 \text{ kg} = 109,85 \text{ ton CO}_2$ 'dir. (TÜİK, 2014)

Ayrıca kurulacak olan sistem ile ilk yılda EPA (Environmental Protection Agency)'dan alınan veriye göre; $109,85 \text{ ton CO}_2 / 39 \text{ kg CO}_2 = 2.816$ adet ağaç dikimine eş değer CO₂ salınımı engellenmiş olacaktır. (EPA, 2015)

169 kWp 30° güney yönelimli fotovoltaik sistem pratikte aynı çatı alanına kurulamayacağı için görsel oluşturulamamıştır.

5.2.3 110,5 kWp 30° Güney Yönelimli Güneş Enerji Santralinin Simülasyonu

Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi çatı alanı yaklaşık 1.500 m²'dir. Mevcut çatı alanına 30° güney yönelimli güneş enerji sistemi tesis edilseydi, 110,5 kWp kurulu güçte bir sistem kurulabilecekti.

169 kWp 11° doğu-batı yönelimli mevcut kurulu sistem ile 110,5 kWp 30° güney yönelimli güneş enerji sisteminin karşılaştırılabilmesi için üretim ve verim analizi yapılmıştır.

Tasarımı yapılan sistem PVSOL yazılımı, PVGIS Web Portalı ve Meteonorm hava durumu bilgisi temel alınarak simüle edilmiştir. Güney yönelimli güneş enerji sistemindeki veriler, Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'ndeki güneş ışınlamı, Solar Türk güneş paneli ve Solar Edge solar inverter davranışları incelenerek sistem analizi yapılmıştır.

110,5 kWp 30° güney yönelimli güneş enerji santralin kurulumunun tasarlandığı Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde yatay düzlem üzerine düşen ışınlam miktarı 1.386 kWh/m² 'dir. Güneş enerji sisteminin kurulumu 30° güney yönünde tasarlanmış olup, standart spektrum sapması ve modül yansımalarının negatif etkileri de dahil edildiğinde modül yüzeyinin güney yönündeki 30°'lik eğimi sayesinde modül üzerine ek olarak m² 'de 66,68 kWh ışınlam düşmektedir. Modül üzerine düşen toplam ışınlam miktarı; (1.386 + 66,68) kWh/m² = 1.452,68 kWh/m²'dir. 701 m²'lik modül alanına sahip GES'in üzerine düşen ışınlam miktarının enerji karşılığı ise 1.452,68 kWh/m² x 701 m² = 1.018.328,68 kWh olmaktadır.

PVSOL simülasyon programında panel teknik özelliklerine göre denklem (5.3)'den de faydalanılarak kapasite faktörü %15,62 olarak hesaplanmıştır.

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}}$$

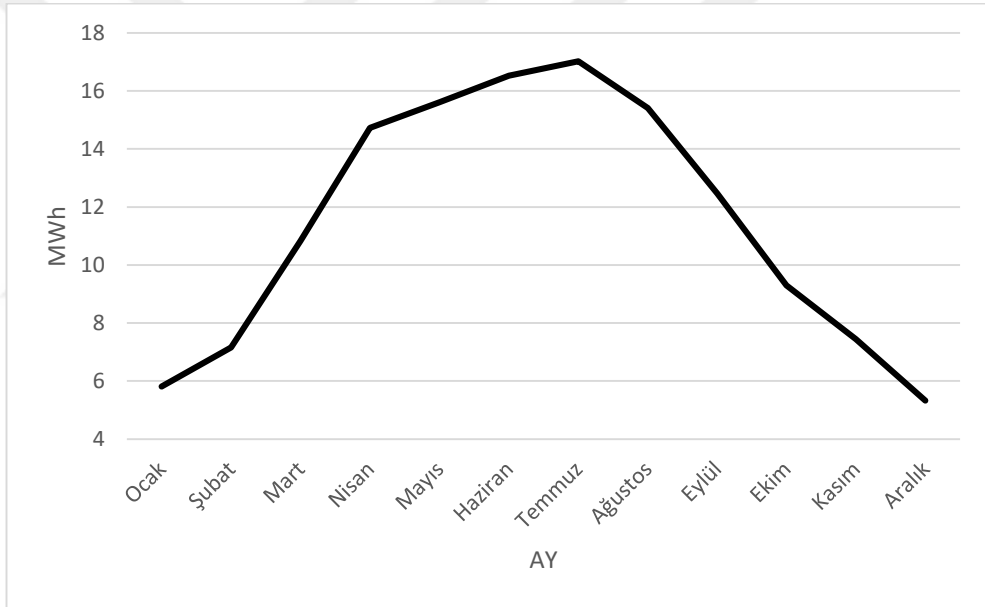
(5.3)

110,5 kWp 30° güney yönelimli fotovoltaik sistemin yapılan simülasyon sonuçlarına göre kapasite faktörü de göz önünde bulundurularak yıllık; 1.018.328,68 kWh x %15,62 = 159.062,93 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 optimizer kayıpları olmasından ötürü yıllık enerji üretimi 137.633 kWh olmaktadır. Bu kayıp toplam yıllık enerji üretiminin yaklaşık %13,47'sine tekabül etmektedir. Kapasite faktörünün oluşturduğu %15,62'lik elektrik enerjisi üretiminden %13,47'lik bir kayıp oluşmaktadır. Bu büyüklükte bir sistem için kayıp oranı kabul edilebilirdir.

Yıllık 137.633 kWh üretim yapan sistemin aylara göre enerji üretim eğrisi Şekil 5.6.'da gösterilmiştir. Kurulu gücü 169 kWp olan sistemin, kurulu güç başına üretilen yıllık elektrik enerjisini ifade eden spesifik güç verimi;

$137.633 / 110,5 \text{ kWp} = 1245 \text{ kWh/kWp}$ olarak PVSOL ile hesap edilmiştir.



Şekil 5.6. 110,5 kWp 30° güney yönelimli sistemin aylara göre enerji üretim eğrisi

110,5 kWp gücündeki 30° güney yönelimli güneş enerji sistemi kurulumu için PVSOL ve PVGIS aylık üretim verileri Tablo 5.5.'te karşılaştırılmıştır. Simülasyon yaparken PVSOL meteonorm verilerini, PVGIS ise uydu verilerini kullanmaktadır. Simülasyon sonuçlarının aylık bazda enerji üretim değerleri karşılaştırıldığında PVGIS, PVSOL'e göre toplamda %7,17 daha fazla üretim göstermektedir. Aylık enerji üretim değerleri incelendiğinde en yüksek üretimin temmuz ayında gerçekleştiği görülmektedir.

Tablo 5.2 PVSOL-PVGIS enerji üretim karşılaştırması (110,5 kWp 30° Güney)

Ay	kWh (PVSOL)	kWh (PVGIS)
Ocak	5,81	6,62
Şubat	7,16	7,61
Mart	10,83	11,6
Nisan	14,73	14,5
Mayıs	15,61	16,6
Haziran	16,52	16,7
Temmuz	17,02	18,3
Ağustos	15,42	17,7
Eylül	12,47	14,1
Ekim	9,30	10,5
Kasım	7,45	8,04
Aralık	5,33	5,99
Toplam	137,63	148,26

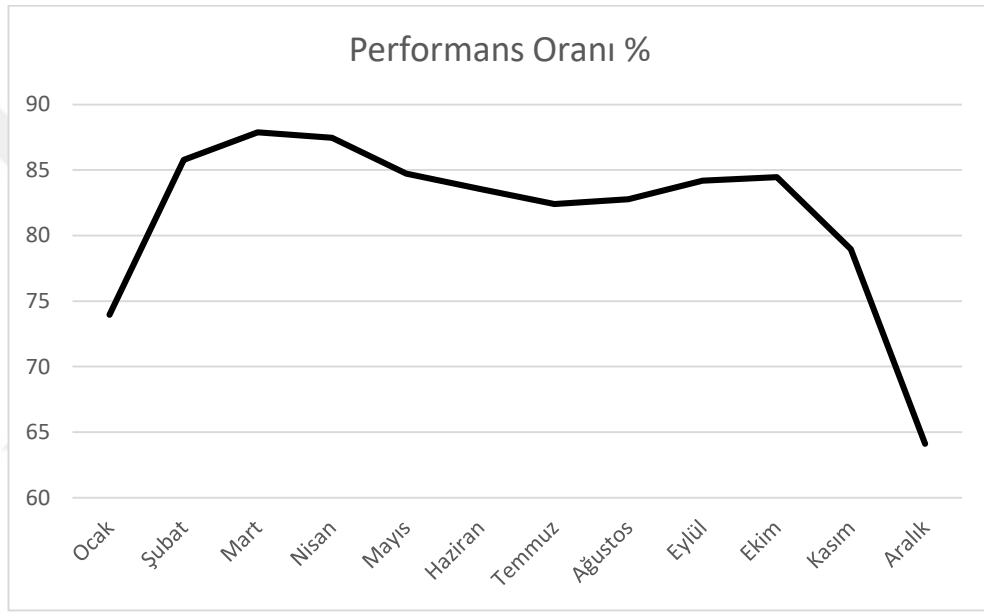
110,5 kWp 30° güney yönelimli güneş enerji sisteminin aylık performans değerleri Tablo 5.6'da, grafiği de Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Sistem yılda ortalama % 81,9 performans oranı ile çalışmaktadır. Sistem performans oranı sistemin tasarlanma aşamasındaki performansının, sistem parametrelerine göre değişimini ifade etmek için kullanılır. Bu değişim miktarı performans oranının 1'den çıkarılmasıyla bulunmaktadır. Bu değer, gerçek değerlerin hesaplanan değerlerden, verimden bağımsız bir şekilde sapmasını göstermektedir.

Tablo 5.2 110,5 kWp 30° güney sistemin aylık çalışma performansı (%)

Ay	Sistem Performans Oranı (%)
Ocak	73,9
Şubat	85,7
Mart	87,8
Nisan	87,4
Mayıs	84,7
Haziran	83,5

Tablo 5.2 Devam

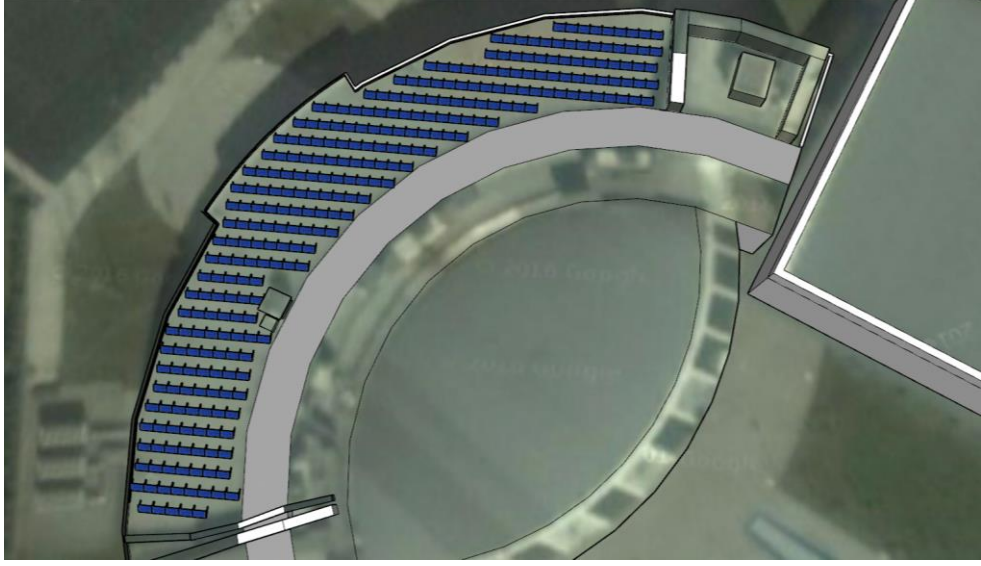
Temmuz	82,4
Ağustos	82,7
Eylül	84,1
Ekim	84,4
Kasım	78,9
Aralık	64,1
Ortalama	81,6



Şekil 5.7. 110,5 kWp 30° güney yönelimli sistemin çalışma performansı (%)

110,5 kWp 30° güney yönelimli sistem ile ilk yılda toplamda 137.633 kWh üretim yapılacak olup, yaklaşık karbon ayak izi, TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu)'ten alınan karbon emisyonu verisine göre; $137.633 \text{ kWh/yıl} \times 0,52 \text{ kg} = 71,57 \text{ ton CO}_2$ 'dir. (TÜİK, 2014)

Ayrıca kurulacak olan sistem ile ilk yılda EPA (Environmental Protection Agency)'dan alınan veriye göre; $71,57 \text{ ton CO}_2 / 39 \text{ kg CO}_2 = 1.835$ adet ağaç dikimine eş değer CO₂ salınımı engellenmiş olacaktır. (EPA, 2015)



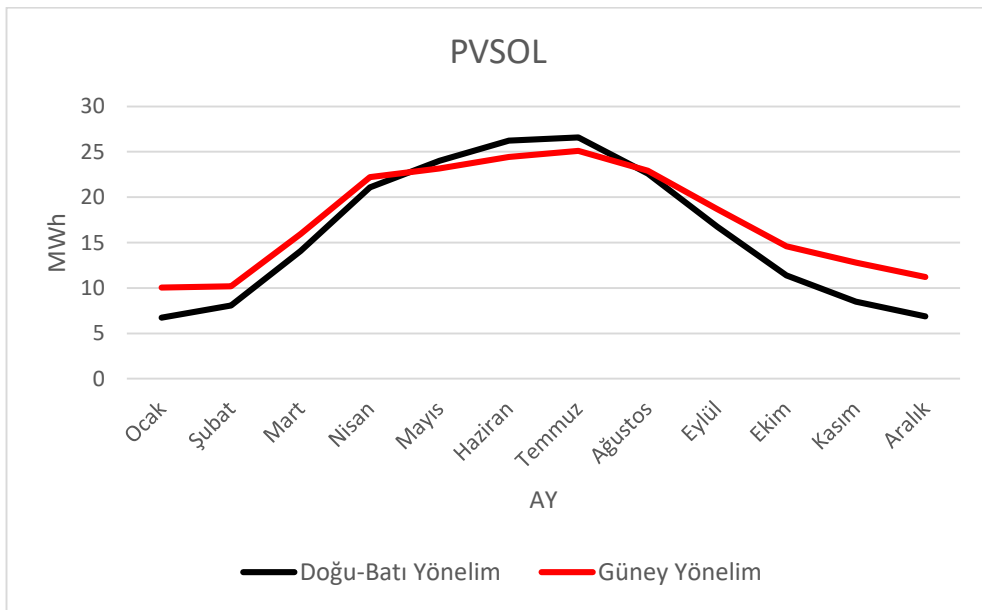
Şekil 5.8. 110,5 kWp 30° güney yönelimli güneş enerji santrali görseli

5.2.4 169 kWp 11° Doğu-Batı Yönelimli Sistem ile 169 kWp 30° Güney Yönelimli Sistemin Karşılaştırması

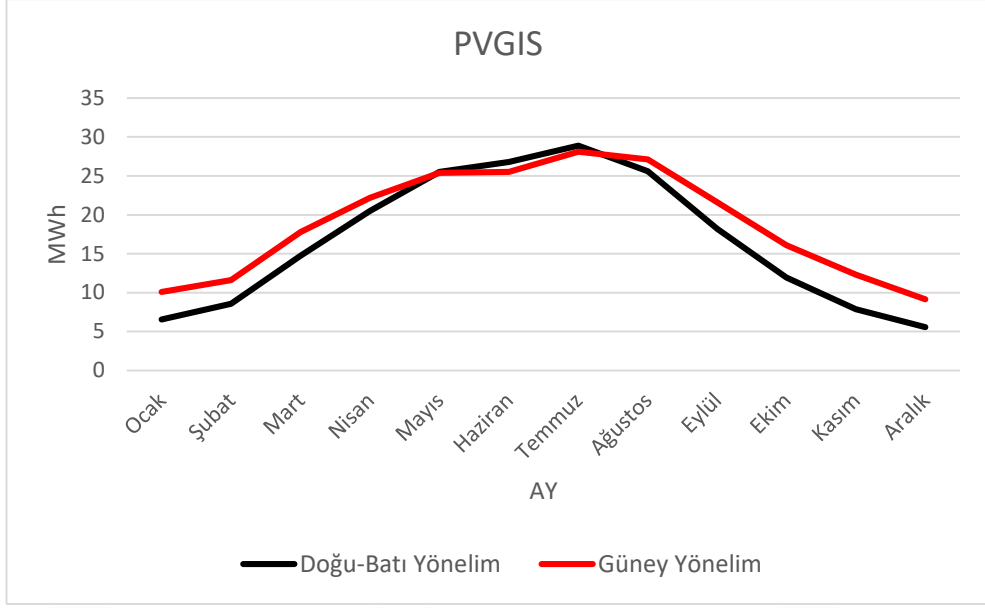
Simülasyonu yapılan 169 kWp kurulu güce sahip 11° doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi ile 169 kWp gücündeki 30° güney yönelimli güneş enerji sisteminin aylara göre enerji üretim değerleri PVSOL ve PVGIS simülasyon programları kullanılarak hesap edilmiştir. Bu simülasyonlar yapılırken aynı güçte farklı yönelimdeki iki sistem arasındaki üretim ve verim farkının ortaya konulması amaçlanmıştır. Tablo 5.7.'de 169 kWp gücündeki 11° doğu-batı ve 30° güney yönelimli sistemlerin aylara göre enerji üretim değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 5.2 PVSOL ve PVGIS kullanılarak oluşturulan 169 kWp gücündeki 11° doğu-batı ve 30° güney yönelimli sistemlerin aylara göre enerji üretim karşılaştırmaları

PVSOL ile Aylara göre Enerji Üretim Karşılaştırması			PVGIS ile Aylara göre Enerji Üretim Karşılaştırması		
Ay	KWh (Doğu-Batı)	kWh (Güney)	Ay	KWh (Doğu-Batı)	kWh (Güney)
Ocak	6,74	10,04	Ocak	6,54	10,1
Şubat	8,07	10,17	Şubat	8,58	11,6
Mart	14,06	15,92	Mart	14,72	17,8
Nisan	21,08	22,2	Nisan	20,5	22,2
Mayıs	24,02	23,17	Mayıs	25,5	25,4
Haziran	26,24	24,45	Haziran	26,8	25,5
Temmuz	26,59	25,1	Temmuz	28,9	28,1
Ağustos	22,6	22,9	Ağustos	25,6	27,1
Eylül	16,73	18,67	Eylül	18,18	21,6
Ekim	11,4	14,58	Ekim	11,94	16,1
Kasım	8,49	12,79	Kasım	7,87	12,3
Aralık	6,86	11,2	Aralık	5,58	9,16
Toplam	192,88	211,25	Toplam	200,71	226,96



Şekil 5.9. PVSOL kullanılarak oluşturulan 169 kWp gücündeki 11° doğu-batı ve 30° güney yönelimli sistemlerin aylara göre enerji üretim eğrileri



Şekil 5.10. PVGIS kullanılarak oluşturulan 169 kWp gücündeki 11° doğu-batı ve 30° güney yönelimli güneş enerji sisteminin aylara göre enerji üretim eğrileri

Her iki simülasyon programının sonuçlarına göre hem doğu-batı yönelimli hem de güney yönelimli güneş enerji sistemi için temmuz ayı, üretimin en yüksek olduğu aydır.

PVSOL ile yapılan simülasyonda, Şekil 5.9.'daki grafikten de görüleceği üzere doğu-batı yönelimli sistemde, güneşlenme süresinin yüksek olduğu mayıs, haziran, temmuz ve ağustos aylarında elektrik üretimi daha fazla olmaktadır. Diğer aylarda ise güney yönelimli sistemde elektrik üretimi daha fazla olmaktadır.

PVGIS ile yapılan simülasyonda, Şekil 5.10.'daki grafikten de görüleceği üzere doğu-batı yönelimli sistemde, güneşlenme süresinin yüksek olduğu mayıs, haziran ve temmuz aylarında elektrik üretimi daha fazla olmaktadır. Diğer aylarda ise güney yönelimli sistemde elektrik üretimi daha fazla olmaktadır.

PVSOL ile yapılan simülasyonda, PVGIS'e kıyasla doğu-batı ve güney yönelimli sistemlerde üretilen enerjinin farkı daha az olmaktadır. Doğu-batı yönelimli sistem için üretim değerleri değişimi, her iki simülasyon programında da aylık bazda benzerlik göstermektedir. Güney yönelimli sistem için üretim

değerlerindeki değişime bakıldığında ise tepe değerlerde PVGIS'in daha yüksek sonuçlar verdiği görülmektedir. Her iki program ile yapılan simülasyon sonuçları arasındaki fark kullandıkları farklı veri kaynaklarından ileri gelmektedir. PVSOL kullanılarak analiz edilen doğu-batı yönelimli güneş enerji sisteminin enerji üretimindeki değişim farkı güneşin yoğun olduğu aylarda daha gerçekçidir.

169 kWp gücündeki 11° doğu-batı yönelimli ve 30° güney yönelimli güneş enerji sistemlerinin enerji üretimi, üretim getirisi, engellenen karbon (CO₂) salınımı, doğaya sağlanan ağaç katkısı, elektrik tüketimi karşılanacak hane sayısı gibi verileri bulunmuş ve sonuçlar yıllık bazda Tablo 5.8.'de verilmiştir. Söz konusu değerler hesaplanırken, PVSOL ile bulunan enerji üretim verisi baz alınmıştır. Bunun nedeni PVSOL ile PVGIS'e göre sistem kayıplarının daha detaylı hesaplanabilmesidir.

Tablo 5.2 169 kWp gücündeki 11° doğu-batı ve 30° güney yönelimli güneş enerji sistemlerinin çıkış parametrelerinin karşılaştırılması

Yönelim Durumu	Enerji Üretimi (kWh/yıl)	Üretim Getirisi (TL/yıl)	Karbon Ayak İzi (ton/yıl)	Ağaç Katkısı (adet/yıl)	Hane Sayısı (adet/yıl)
Doğu-Batı	192.829	158.508,86	100,27	2.571	123
Güney	211.250	173.651,25	109,85	2.816	135

Simüle edilen 169 kWp kurulu güçte farklı yönelimlerdeki sistemlerin, enerji üretim değerleri karşılaştırıldığında; güney yönelimli güneş enerji sisteminin, doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemine göre yıllık $(211.250 - 192.829) / 192.829 = \% 9,55$ daha fazla üretim yaptığı görülmektedir. Ancak mevcut çatı alanına kurulan doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi yerine, aynı çatı alanına 30° güney yönelimli bir güneş enerji sistemi kurulsaydı, maksimum 110,5 kWp kurulu güçte bir sistem kurulumu gerçekleştirilebilecekti.

Simüle edilen sistemlerin kazanç durumları, Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nin tek terimli alçak gerilim ticarethane tarifesi olan, KDV dahil elektrik

alış birim fiyatı 0,82 TL/kWh'a göre oluşturulmuştur. KDV dahil elektrik birim fiyatına göre yapılan hesaplamalarda güney yönelimli güneş enerji sisteminin, doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemine göre yılda $173.651,25 - 158.508,86 = 15.142,39$ TL daha fazla getirisi bulunmaktadır.

Çevreci ve temiz enerji kaynağı olan yenilenebilir enerjiden elektrik üretimi sayesinde karbon emisyon salınımı da azalacaktır. TÜİK'in yayınladığı verilere göre 1 kWh elektrik kullanımı 0,52 kg CO₂ üretmektedir. (TÜİK, 2014)

Güney yönelimli güneş enerji sistemi ile yılda 109,85 ton karbon salınımının önüne geçilirken, doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi ile 100,27 ton karbon salınımının önüne geçilmektedir. Güney yönelimli güneş enerji sistemi, doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemine göre yılda $109,85 - 100,27 = 9,58$ ton daha fazla karbon salınımını engellemektedir.

Çevreci ve temiz enerji kaynağı olan yenilenebilir enerjiden elektrik üretimi sayesinde azaltılan karbon salınımının ağaç eş değeri ise Avrupa Çevre Ajansı (EPA) verilerine göre 1 kg CO₂ için 1/39 adet ağaç olarak hesap edilmiştir. (EPA, 2015)

Güney yönelimli güneş enerji sistemi ile elde edilen ağaç eşdeğer kazanımı yılda 2.816 adet ağaç olurken, doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi ile 2.571 adet ağaç olmaktadır. Güney yönelimli güneş enerji sistemi ile elde edilen ağaç eşdeğer kazanımı, doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemine göre yılda $2.816 - 2.571 = 245$ adet daha fazladır.

TÜİK tarafından yayınlanan verilere göre bir hanenin elektrik tüketimi yılda ortalama 1.559 kWh olmaktadır. (TÜİK, 2014)

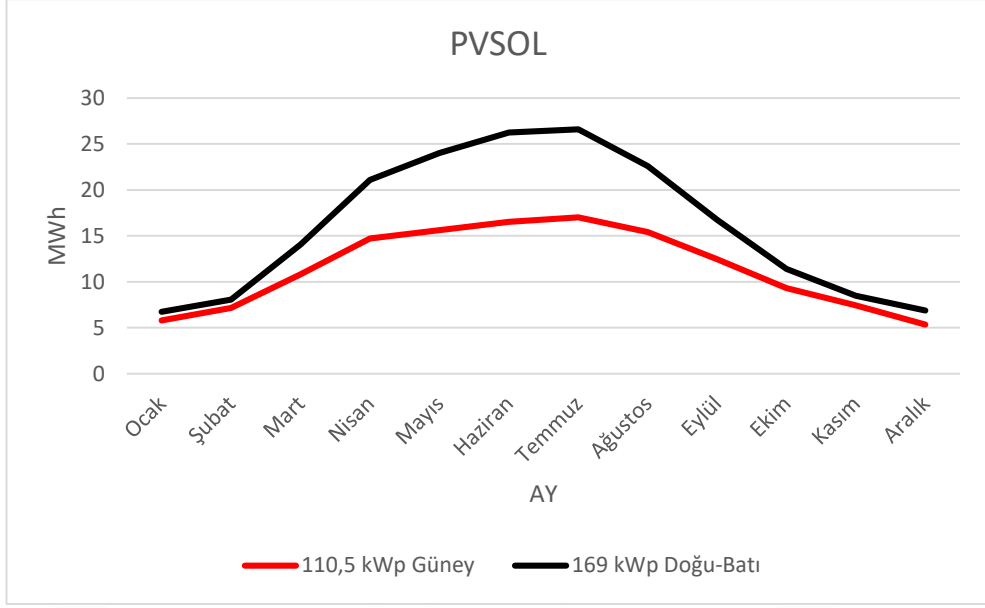
Güney yönelimli güneş enerji sistemi, doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemine göre yılda $135 - 123 = 12$ adet daha fazla hanenin elektrik tüketimini karşılamaktadır.

5.2.5 169 kWp 11° Doğu-Batı Yönelimli Sistem ile Mevcut Çatı Alanında Kurulabilecek 110,5 kWp 30° Güney Yönelimli Sistemin Karşılaştırması

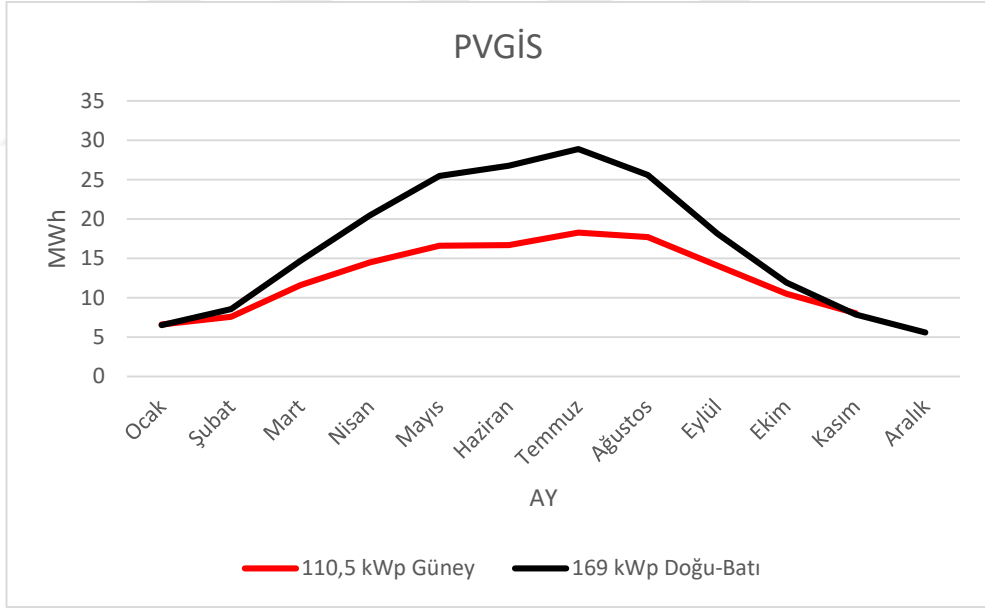
Simülasyonu yapılan 169 kWp kurulu güce sahip 11° doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi ile 110,5 kWp gücündeki 30° güney yönelimli güneş enerji sisteminin aylara göre enerji üretim değerleri PVSOL ve PVGIS simülasyon programları kullanılarak hesap edilmiştir. Bu simülasyon yapılırken aynı çatı alanındaki farklı güç ve yönelimlerdeki sistemler arasındaki üretim ve verim farkının ortaya konulması amaçlanmıştır. Tablo 5.9.'da 169 kWp gücündeki 11° doğu-batı ve 110,5 kWp gücünde 30° güney yönelimli sistemlerin aylara göre enerji üretim değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 5.2 PVSOL ve PVGIS kullanılarak oluşturulan 169 kWp gücündeki 11° doğu-batı ve 110,5 kWp gücünde 30° güney yönelimli sistemlerin aylara göre enerji üretim karşılaştırmaları

PVSOL ile Aylara göre Enerji Üretim Karşılaştırması			PVGIS ile Aylara göre Enerji Üretim Karşılaştırması		
Ay	KWh (Doğu-Batı)	kWh (Güney)	Ay	KWh (Doğu-Batı)	kWh (Güney)
Ocak	6,74	5,81	Ocak	6,54	6,62
Şubat	8,07	7,16	Şubat	8,58	7,61
Mart	14,06	10,83	Mart	14,72	11,6
Nisan	21,08	14,73	Nisan	20,5	14,5
Mayıs	24,02	15,61	Mayıs	25,5	16,6
Haziran	26,24	16,52	Haziran	26,8	16,7
Temmuz	26,59	17,02	Temmuz	28,9	18,3
Ağustos	22,6	15,42	Ağustos	25,6	17,7
Eylül	16,73	12,47	Eylül	18,18	14,1
Ekim	11,4	9,30	Ekim	11,94	10,5
Kasım	8,49	7,45	Kasım	7,87	8,04
Aralık	6,86	5,33	Aralık	5,58	5,99
Toplam	192,88	137,63	Toplam	200,71	148,26



Şekil 5.11. PVSOL kullanılarak oluşturulan 169 kWp 11° doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi ile 110,5 kWp 30° güney yönelimli güneş enerji sisteminin aylara göre enerji üretim eğrileri



Şekil 5.12. PVGIS kullanılarak oluşturulan 169 kWp 11° doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi ile 110,5 kWp 30° güney yönelimli güneş enerji sisteminin aylara göre enerji üretim eğrileri

Her iki simülasyon programının sonuçlarına göre hem doğu-batı yönelimli hem de güney yönelimli güneş enerji sistemi için temmuz ayı, üretimin en yüksek olduğu aydır.

PVSOL ile yapılan simülasyonda, güç farkından dolayı doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi, güney yönelimli sisteme göre yıl boyunca daha fazla enerji üretmektedir. PVGIS ile yapılan simülasyonda ise doğu-batı yönelimli sistemin kurulu gücünün, güney yönelimli sisteme göre yaklaşık %35 fazla olmasına karşın ocak, kasım ve aralık aylarında güney yönelimli sistem daha fazla enerji ürettiği görülmektedir. Bunun durum söz konusu aylarda güneşlenme süresinin çok düşük olması olarak açıklanabilir.

169 kWp gücündeki doğu-batı yönelimli ve 110,5 kWp gücündeki güney yönelimli güneş enerji sistemlerinin enerji üretimi, üretim getirisi, engellenen karbon (CO₂) salınımı, doğaya sağlanan ağaç katkısı, elektrik tüketimi karşılanacak hane sayısı gibi verileri bulunmuş ve sonuçlar yıllık bazda Tablo 5.10.'da gösterilmiştir. Söz konusu değerler hesaplanırken, PVSOL ile bulunan enerji üretim verisi baz alınmıştır. Bunun nedeni PVSOL ile PVGIS'e göre sistem kayıplarının daha detaylı hesaplanabilmesidir.

Tablo 5.2 169 kWp gücündeki 11° doğu-batı yönelimli ve 110,5 kWp gücündeki 30° güney yönelimli güneş enerji sistemlerinin çıkış parametrelerinin karşılaştırılması

Yönelim Durumu	Enerji Üretimi (kWh/yıl)	Üretim Getirisi (TL/yıl)	Karbon Ayak İzi (ton/yıl)	Ağaç Katkısı (adet/yıl)	Hane Sayısı (adet/yıl)
Doğu-Batı	192.829	158.508,86	100,27	2.571	123
Güney	137.633	113.136,77	71,57	1.835	88

Simüle edilen farklı güç ve yönelimdeki sistemlerin, enerji üretim değerleri kıyaslandığında; doğu-batı yönelimli güneş enerji sisteminin, güney yönelimli güneş enerji sistemine göre yıllık $(192.829 - 137.633) / 137.633 = \% 40$ daha fazla üretim yaptığı görülmektedir. Aynı çatı alanına güney yönelimli kurulum yerine doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi kurulumu yaparak güneş enerjisinden %40 daha fazla yararlanılabilmektedir.

Simüle edilen sistemlerin kazanç durumları, Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nin tek terimli alçak gerilim ticarethane tarifesi olan, KDV dahil elektrik alış birim fiyatı 0,82 TL/kWh'a göre oluşturulmuştur. KDV dahil elektrik birim fiyatına göre yapılan hesaplamalarda doğu-batı yönelimli güneş enerji sisteminin, güney yönelimli güneş enerji sistemine göre yılda $158.508,86 - 113.136,77 = 45.372,09$ TL daha fazla getirisi bulunmaktadır.

Kurulan güneş enerji sistemi ile çevreci ve temiz enerji kaynağı olan yenilenebilir enerjiden elektrik üretimi sayesinde karbon salınımı da azalacaktır. TÜİK'in yayınladığı verilere göre 1 kWh elektrik kullanımı 0,52 kg CO₂ üretmektedir. (TÜİK, 2014)

Doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi ile yılda 100,27 ton karbon salınımının önüne geçilirken, güney yönelimli güneş enerji sistemi ile 71,57 ton karbon salınımının önüne geçilmektedir. Doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi, güney yönelimli güneş enerji sistemine göre yılda $100,27 - 71,57 = 28,7$ ton daha fazla karbon salınımını engellemektedir.

Çevreci ve temiz enerji kaynağı olan yenilenebilir enerjiden elektrik üretimi sayesinde azaltılan karbon salınımının ağaç eş değeri ise Avrupa Çevre Ajansı (EPA) verilerine göre 1 kg CO₂ için 1/39 adet ağaç olarak hesap edilmiştir. (EPA, 2015)

Doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi ile elde edilen ağaç eşdeğer kazanımı yılda 2.571 adet ağaç olurken, güney yönelimli güneş enerji sistemi ile 1.835 adet ağaç olmaktadır. Doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi ile elde edilen ağaç eşdeğer kazanımı, güney yönelimli güneş enerji sistemine göre yılda $2.571 - 1.835 = 736$ adet daha fazladır.

TÜİK tarafından yayınlanan verilere göre bir hanenin elektrik tüketimi yılda ortalama 1.559 kWh olmaktadır. (TÜİK, 2014)

Doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi, güney yönelimli güneş enerji sistemine göre yılda $123 - 88 = 35$ adet daha fazla hanenin elektrik tüketimini karşılamaktadır.



6. BÖLÜM

DOĞU-BATI YÖNELİMLİ FOTOVOLTAİK SİSTEMİN UYGULAMASI

Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde kurulumu yapılan güneş enerji santraline ait detaylı proje bilgileri 4. Bölümde verilmiştir. 169 kWp gücündeki doğu-batı yönelimli güneş enerji santralinin 27.01.2017 tarihinde kurulumu tamamlanmış ve devreye alınmıştır. Ayrıca doğu-batı yönelimli santralin güney yönelimli santralle karşılaştırılması için 17.04.2019 tarihinde santraldeki iki adet panel güney yöne çevrilerek ölçüm için deney düzeneği oluşturulmuştur.

169 kWp çatı üzeri doğu-batı yönelimli güneş enerji santralinde tesis edilen izleme sistemi vasıtasıyla hem doğu-batı yönelimli sistemde hem de güney yönelimli ölçüm düzeneğinde nisan, mayıs, haziran ve temmuz aylarındaki üretim verileri izlenmiştir. Şekil 6.1., 6.2. ve 6.3.'te komplekste kurulan doğu-batı yönelimli güneş enerji santrali ve güney yönelimli ölçüm düzeneğine ait uygulama görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 6.1. Doğu-batı yönelimli uygulama görüntüsü



Şekil 6.2. Doğu-batı yönelimli uygulama görüntüsü-2

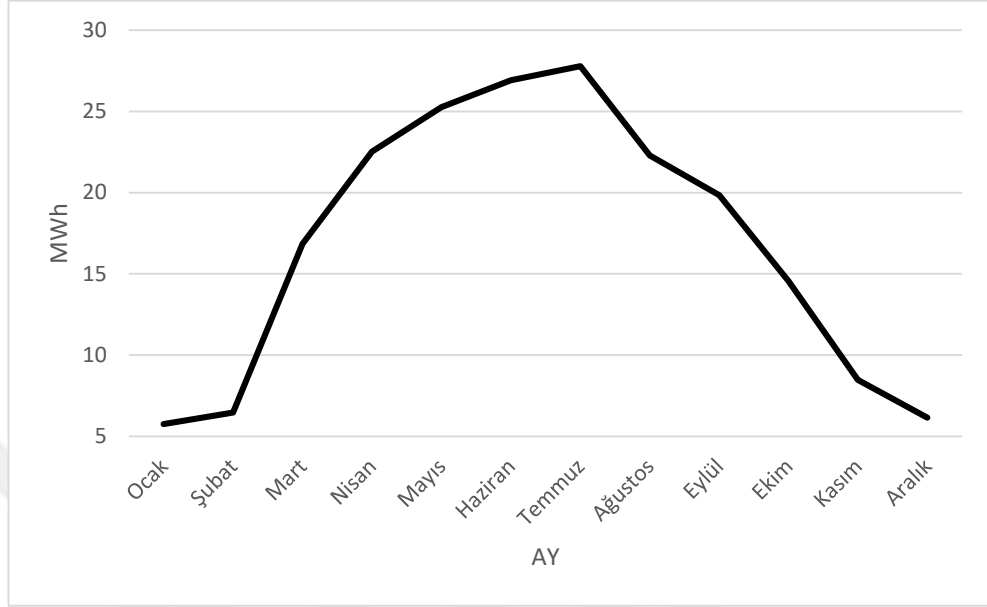


Şekil 6.3. 30° Güney yönelimli ölçüm için hazırlanan deney düzeneği görüntüsü

6.1 169 kWp Doğu-Batı Yönelimli Güneş Enerji Santralinin Simülasyon ve Gerçek Zamanlı Üretim Verilerinin Yıllık Bazda İncelenmesi

İstanbul Büyükşehir Belediyesi'ne ait Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde 2017 yılında tesis edilen 169 kWp gücündeki çatı üzeri doğu-batı yönelimli güneş enerji santralinin gerçek zamanlı enerji üretimi ve sistem performans verileri yıllık bazda izlenmiştir. İzleme sisteminden alınan gerçek zamanlı üretim verilerine göre

söz konusu sistemde yılda 202.85 MWh elektrik üretilmiş olup sistem performansının %84,26 olduğu görülmüştür.



Şekil 6.4. 169 kWp gücündeki doğu-batı yönelimli güneş santralinin aylara göre gerçek zamanlı enerji üretim eğrisi

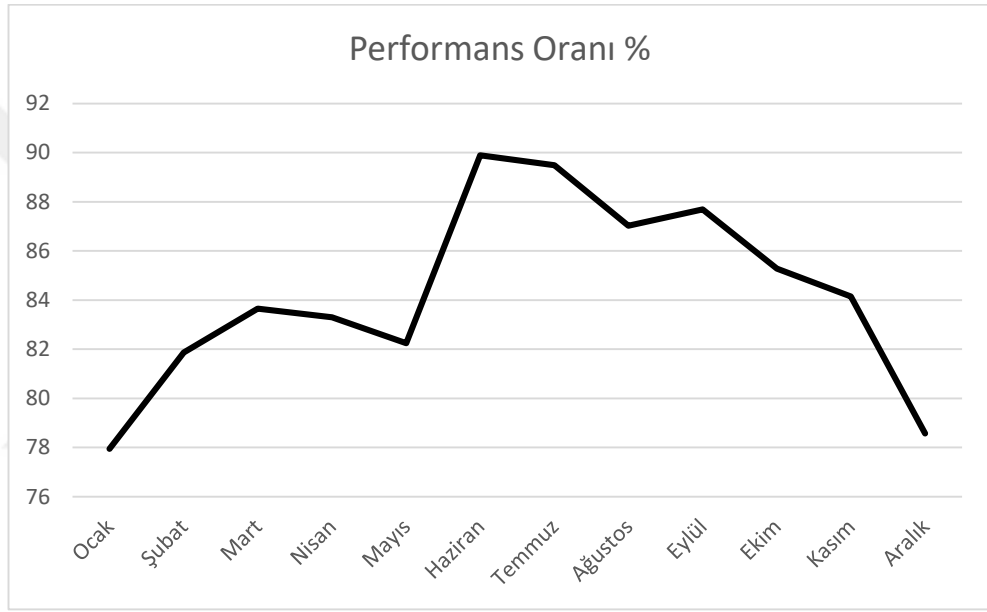
Şekil 6.4.'teki gerçek zamanlı enerji üretim grafiğinden de görüleceği üzere en yüksek üretim 27,78 MWh ile temmuz ayında, en düşük üretim ise 5,75 MWh ile ocak ayında gerçekleşmiştir. Daha önce yapılan simülasyon sonuçlarından da temmuz ayının en yüksek elektrik üretiminin yapıldığı ay olduğu görülmüştür.

Tablo 6.1. 169 kWp doğu-batı yönelimli güneş enerji santralinin aylara göre gerçek zamanlı enerji üretim verileri

Ay	Reel Üretim (MWh)
Ocak	5,75
Şubat	6,47
Mart	16,85
Nisan	22,52
Mayıs	25,25
Haziran	26,91

Tablo 6.1. Devam

Temmuz	27,78
Ağustos	22,28
Eylül	19,85
Ekim	14,57
Kasım	8,47
Aralık	6,15
Toplam	202,85



Şekil 6.5. 169 kWp gücündeki doğu-batı yönelimli güneş santralinin gerçek zamanlı aylara göre çalışma performansı (%)

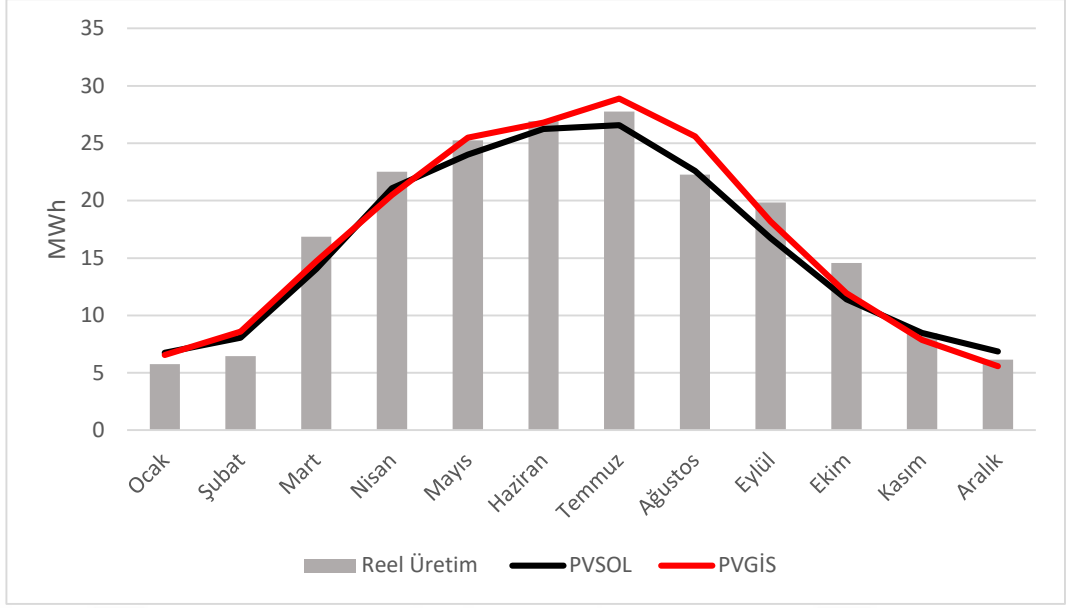
Şekil 6.5.'teki gerçek zamanlı çalışma performans oranı grafiğinden de görüleceği üzere en yüksek performans %89,9 ile haziran ayında, en düşük performans ise %77,9 ile ocak ayında gerçekleşmiştir. Şekil 6.4.'teki enerji üretim grafiğinden de görüldüğü gibi en yüksek üretimin 27,78 MWh ile temmuz ayında yapılmasına rağmen, en yüksek performans %89,9 ile haziran ayında gerçekleşmiştir. Bu durum 23,8 °C olan temmuz ayı ortalama sıcaklığının, 21,4 °C olan haziran ayı ortalama sıcaklığından daha yüksek olması olarak açıklanabilir. Sıcaklık artışı ile güneş panellerinin verimleri düşmektedir. Sıcaklıkla oluşan kayıplar güneş paneli üreticileri tarafından katalog değerlerinde belirtilmektedir. Örneğin bu projede

kullanılan Solar Türk 260 Wp Anatolia serisi güneş panelinin, sıcaklık katsayısı - 0,43%/°C olarak katalogda belirtilmiştir.

Tablo 6.2. 169 kWp doğu-batı yönelimli güneş enerji santralının aylara göre gerçek zamanlı çalışma performansı

Ay	Performans Oranı (%)
Ocak	77,9
Şubat	81,8
Mart	83,6
Nisan	83,3
Mayıs	82,2
Haziran	89,8
Temmuz	89,4
Ağustos	87,0
Eylül	87,6
Ekim	85,2
Kasım	84,1
Aralık	78,5
Ortalama	84,2

Veri kayıt depolama ve uzaktan izleme sisteminden alınan gerçek zamanlı veriler, PVSOL ve PVGIS ile yapılan simülasyon sonuçları karşılaştırılarak Şekil 6.6.'da verilmiştir.



Şekil 6.6. 169 kWp doğu-batı yönelimli güneş enerji santralinin aylara göre PVSOL, PVGIS ve gerçek zamanlı enerji üretim eğrisi

Gerçek zamanlı enerji üretim eğrisinin karakteristiği PVSOL ile yapılan simülasyon sonucu ortaya çıkan üretim karakteristiği ile benzerlik göstermektedir. Gerçek zamanlı enerji üretim değerleri, PVSOL programı ile yapılan simülasyon sonuçlarına göre %5,16 PVGIS programı ile yapılan simülasyon sonuçlarına göre %1,06 daha fazladır. Alınan veriler ortaya çıkarmıştır ki uygulama sistemine ait gerçek veriler; simülasyon verilerine göre daha yüksek üretim göstermektedir. Enerji üretim değerleri açısından incelendiğinde, gerçek zamanlı enerji üretim değerlerinin PVGIS ile yapılan simülasyon sonucu elde edilen üretim değerlerine daha yakın olduğu görülmektedir.

Tablo 6.1 169 kWp doğu-batı yönelimli güneş enerji santralinin aylara göre PVSOL, PVGIS ve gerçek zamanlı enerji üretim verileri

TARİH	PVSOL (MWh)	PVGİS (MWh)	Reel Üretim (MWh)
Ocak	6,74	6,54	5,75
Şubat	8,07	8,58	6,47
Mart	14,06	14,72	16,85
Nisan	21,08	20,5	22,52
Mayıs	24,02	25,5	25,25

Tablo 6.1 Devam

Haziran	26,24	26,8	26,91
Temmuz	26,59	28,9	27,78
Ağustos	22,6	25,6	22,28
Eylül	16,73	18,18	19,85
Ekim	11,4	11,94	14,57
Kasım	8,49	7,87	8,47
Aralık	6,86	5,58	6,15
Toplam	192,88	200,71	202,85

169 kWp gücündeki doğu-batı yönelimli güneş enerji sisteminin gerçek zamanlı enerji üretimi, üretim getirisi, engellenen karbon (CO₂) salınımı, doğaya sağlanan ağaç katkısı, elektrik tüketimi karşılanacak hane sayısı gibi verileri bulunmuş ve sonuçlar yıllık bazda Tablo 6.4'te verilmiştir. Söz konusu değerler hesaplanırken, gerçek zamanlı enerji üretim verisi baz alınmıştır. Ayrıca gerçek zamanlı üretim verisi ile elde edilen çıktılardan PVSOL simülasyonu ile kıyaslanması adına PVSOL simülasyonu sonucu elde edilen çıktılarda Tablo 6.4'te gösterilmiştir.

Tablo 6.1 169 kWp gücündeki güneş enerji sisteminin gerçek zamanlı ve simülasyon sonucu elde edilen çıktıları

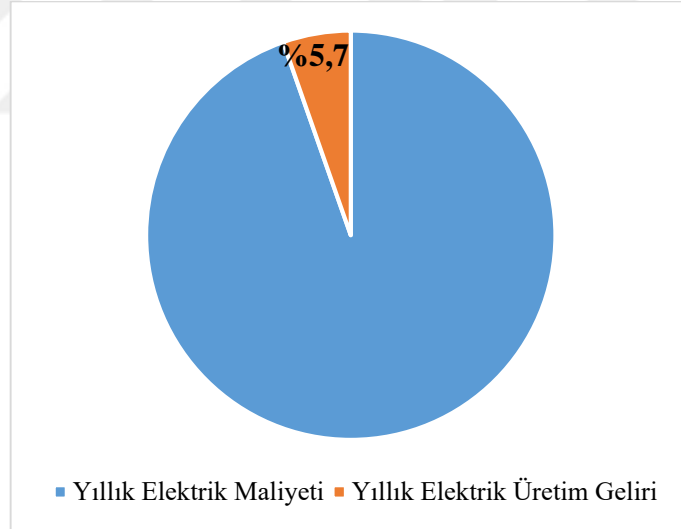
Yönelim Durumu	Enerji Üretimi (kWh/yıl)	Üretim Getirisi (TL/yıl)	Karbon Ayak İzi (ton/yıl)	Ağaç Katkısı (adet/yıl)	Hane Sayısı (adet/yıl)
Gerçek Zamanlı	202.846	166.743	105,48	2.704	130
PVSOL Simülasyon	192.829	158.508	100,27	2.571	123

Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde tesis edilen 169 kWp kurulu gücündeki doğu-batı yönelimli sistem ile yılda 202.846 kWh elektrik üretimi gerçekleşmiştir. Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi tek terimli alçak gerilim ticarethane tarifesi aboneliği olup kullanılan elektriğin güncel birim fiyatı 2019 3. Çeyrek EPDK tarifesine göre KDV dahil 0,82 TL/kWh'tir. Söz konusu sistem ile yılda üretilen

202.846 kWh elektrik sayesinde $(202.846 \text{ kWh} \times 0,82 \text{ TL/kWh}) = 166.743,01 \text{ TL}$ gelir elde edilmektedir.

Bölüm 4.2.2.'de verilen Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'ne ait 2018 yılı elektrik tüketim bilgileri ışığında EPDK tarafından yayınlanan 2019 3. Çeyrek güncel elektrik birim fiyatı KDV dahil 0,82 TL/kWh tarifesine göre tekrar hesaplandığında, kompleksin güncel yıllık elektrik gideri 2.935.491,76 TL olmaktadır.

Tesis edilen 169 kWp kurulu gücündeki doğu-batı yönelimli sistem ile yılda elde edilen gelir ile tesisin elektrik giderinin %5,67'si karşılanmaktadır. Şekil 6.7'de üretilen elektrik ile komplekste tüketilen elektriğin hangi oranda karşıladığına ait grafik verilmiştir.



Şekil 6.7. Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi gerçek zamanlı elektrik gelir ve giderlerine ait grafik (%)

Çevreci ve temiz enerji kaynağı olan yenilenebilir enerjiden elektrik üretimi sayesinde karbon salınımı da azalacaktır. TÜİK'in yayınladığı verilere göre 1 kWh elektrik kullanımı 0,52 kg CO₂ üretmektedir. (TÜİK, 2014)

Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde tesis edilen 169 kWp kurulu gücündeki doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi ile yılda 105,48 ton karbon salınımının önüne geçilmektedir.

Çevreci ve temiz enerji kaynağı olan yenilenebilir enerjiden elektrik üretimi sayesinde azaltılan karbon salınımının ağaç eş değeri ise Avrupa Çevre Ajansı (EPA) verilerine göre 1 kg CO₂ için 1/39 adet ağaç olarak hesap edilmiştir. (EPA, 2015)

Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde tesis edilen 169 kWp kurulu gücündeki doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi ile elde edilen ağaç eşdeğer kazanımı yılda 2.704 adet ağaç olmaktadır.

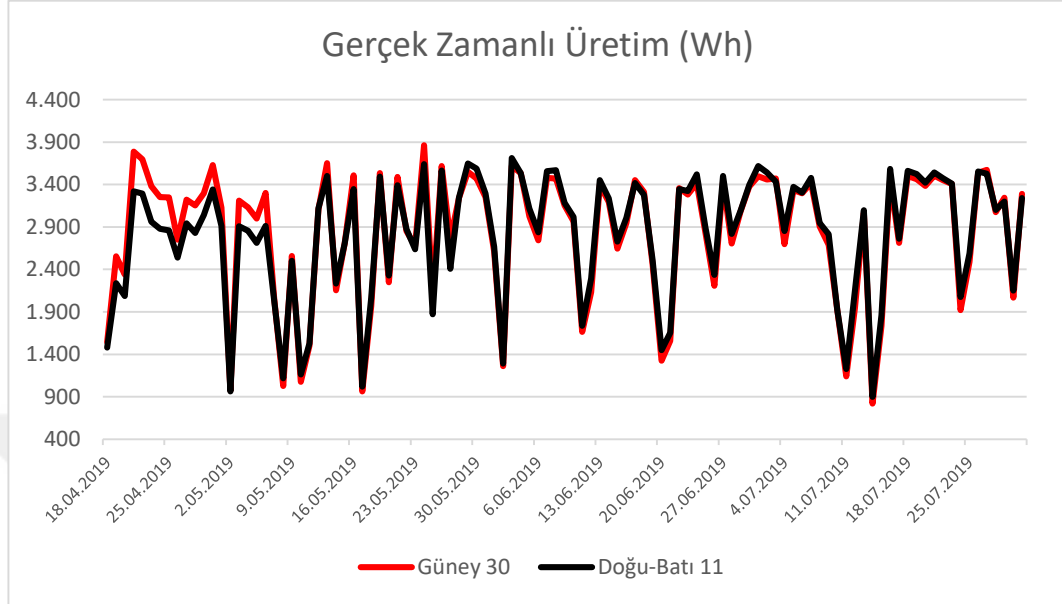
TÜİK tarafından yayınlanan verilere göre bir hanenin elektrik tüketimi yılda ortalama 1.559 kWh olmaktadır. (TÜİK, 2014)

Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde tesis edilen 169 kWp kurulu gücündeki doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi yılda 130 hanenin elektrik tüketimi karşılanmaktadır.

6.2 Gerçek Zamanlı Üretim Verilerinin Panel Bazlı İncelenmesi

İstanbul Büyükşehir Belediyesi Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi için tasarlanan ve kurulumu gerçekleştirilen 169 kWp çatı üzeri doğu-batı yönelimli güneş enerji santralinde tesis edilen veri kayıt ve uzaktan izleme sistemi vasıtasıyla nisan, mayıs haziran ve temmuz aylarındaki gerçek zamanlı üretim verileri panel bazlı izlenmiştir. Ayrıca oluşturulan 30° güney yönelimli ölçüm deney düzeneğinden elde edilen gerçek zamanlı verilerle, doğu-batı yönelimli santralden elde edilen gerçek zamanlı veriler iki adet panel kullanılarak panel bazlı karşılaştırılmıştır. Panel bazlı ölçüm alınan 18.04.2019- 31.07.2019 tarihleri arasında 57 günün güneşli, 20 günün parçalı bulutlu ve 28 günün bulutlu olduğu görülmüştür. Söz konusu tarihler

arasında üretim verileri izlenen sistem için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiş olup Şekil 6.8'de gösterilmiştir.



Şekil 6.8. Doğu-batı ve güney yönelimli güneş enerji sisteminin nisan, mayıs, haziran ve temmuz ayları panel bazlı gerçek zamanlı enerji üretim eğrisi

Tablo 6.2 Doğu-batı ve güney yönelimli güneş enerji sisteminin nisan, mayıs, haziran ve temmuz ayları panel bazlı gerçek zamanlı verileri

Tarih	Sıcaklık (°C)	Hava Durumu	Güney (Wh)	Doğu-Batı (Wh)	Fark (Wh)
18.04.2019	10,2	Güneşli	1.542,50	1.479,25	63,25
19.04.2019	10,1	Bulutlu	2.555,00	2.238,75	316,25
20.04.2019	8,3	Bulutlu	2.341,00	2.086,00	255,00
21.04.2019	10,3	Bulutlu	3.789,50	3.320,75	468,75
22.04.2019	10,6	Güneşli	3.697,00	3.293,75	403,25
23.04.2019	13,3	Güneşli	3.382,50	2.962,75	419,75
24.04.2019	15,8	Bulutlu	3.253,00	2.878,50	374,50
25.04.2019	16,8	Parçalı Bulutlu	3.250,50	2.861,50	389,00
26.04.2019	14,4	Bulutlu	2.751,50	2.538,00	213,50

Tablo 6.2 Devam

27.04.2019	15,2	Güneşli	3.220,50	2.943,75	276,75
28.04.2019	17,5	Bulutlu	3.155,00	2.831,00	324,00
29.04.2019	19,1	Güneşli	3.296,00	3.042,75	253,25
30.04.2019	18,6	Güneşli	3.628,00	3.342,00	286,00
1.05.2019	17,7	Güneşli	3.127,50	2.914,50	213,00
2.05.2019	15,1	Bulutlu	975,00	962,25	12,75
3.05.2019	16,0	Güneşli	3.212,50	2.907,75	304,75
4.05.2019	18,1	Güneşli	3.132,50	2.857,75	274,75
5.05.2019	18,7	Bulutlu	3.001,50	2.714,50	287,00
6.05.2019	19,3	Bulutlu	3.301,50	2.914,50	387,00
7.05.2019	15,5	Parçalı Bulutlu	2.049,00	2.024,50	24,50
8.05.2019	12,8	Bulutlu	1.027,50	1.117,75	-90,25
9.05.2019	14,7	Parçalı Bulutlu	2.556,50	2.500,00	56,50
10.05.2019	15,3	Bulutlu	1.076,00	1.163,00	-87,00
11.05.2019	16,2	Bulutlu	1.502,50	1.526,50	-24,00
12.05.2019	18,1	Güneşli	3.105,00	3.118,75	-13,75
13.05.2019	18,1	Bulutlu	3.651,50	3.501,00	150,50
14.05.2019	18,0	Bulutlu	2.155,50	2.233,25	-77,75
15.05.2019	20,2	Bulutlu	2.706,00	2.705,00	1,00
16.05.2019	20,8	Bulutlu	3.508,00	3.348,50	159,50
17.05.2019	17,3	Parçalı Bulutlu	964,00	1.019,75	-55,75
18.05.2019	17,6	Bulutlu	1.970,00	2.066,50	-96,50
19.05.2019	20,9	Güneşli	3.536,50	3.494,75	41,75
20.05.2019	22,5	Parçalı Bulutlu	2.248,00	2.329,75	-81,75
21.05.2019	22,0	Bulutlu	3.492,00	3.391,75	100,25
22.05.2019	21,3	Güneşli	2.854,00	2.877,00	-23,00
23.05.2019	21,5	Bulutlu	2.673,60	2.638,20	35,40
24.05.2019	18,6	Güneşli	3.864,00	3.642,00	222,00

Tablo 6.2 Devam

25.05.2019	18,5	Bulutlu	2.102,00	1.873,00	229,00
26.05.2019	21,1	Güneşli	3.620,00	3.567,20	52,80
27.05.2019	23,5	Parçalı Bulutlu	2.760,00	2.409,00	351,00
28.05.2019	25,2	Güneşli	3.242,50	3.245,25	-2,75
29.05.2019	23,8	Güneşli	3.550,00	3.647,00	-97,00
30.05.2019	23,0	Güneşli	3.470,00	3.588,25	-118,25
31.05.2019	24,4	Güneşli	3.251,00	3.294,25	-43,25
1.06.2019	22,3	Güneşli	2.610,50	2.668,50	-58,00
2.06.2019	21,6	Parçalı Bulutlu	1.259,50	1.291,50	-32,00
3.06.2019	22,1	Bulutlu	3.617,50	3.711,50	-94,00
4.06.2019	22,5	Parçalı Bulutlu	3.536,50	3.534,00	2,50
5.06.2019	23,2	Güneşli	3.026,00	3.117,75	-91,75
6.06.2019	23,7	Güneşli	2.745,00	2.839,00	-94,00
7.06.2019	24,2	Parçalı Bulutlu	3.480,00	3.558,50	-78,50
8.06.2019	25,4	Güneşli	3.471,00	3.570,25	-99,25
9.06.2019	25,0	Güneşli	3.154,00	3.183,25	-29,25
10.06.2019	24,5	Güneşli	2.965,00	3.018,25	-53,25
11.06.2019	23,3	Bulutlu	1.663,50	1.735,75	-72,25
12.06.2019	23,1	Güneşli	2.130,50	2.295,75	-165,25
13.06.2019	25,0	Bulutlu	3.392,00	3.452,00	-60,00
14.06.2019	25,1	Güneşli	3.196,00	3.237,00	-41,00
15.06.2019	25,0	Parçalı Bulutlu	2.644,50	2.727,50	-83,00
16.06.2019	25,5	Parçalı Bulutlu	2.948,50	3.007,25	-58,75
17.06.2019	26,9	Parçalı Bulutlu	3.453,50	3.419,00	34,50
18.06.2019	26,3	Parçalı Bulutlu	3.312,50	3.277,50	35,00
19.06.2019	25,4	Parçalı Bulutlu	2.457,50	2.510,75	-53,25
20.06.2019	23,7	Bulutlu	1.326,00	1.450,00	-124,00
21.06.2019	24,2	Güneşli	1.559,00	1.652,50	-93,50

Tablo 6.2 Devam

22.06.2019	26,6	Bulutlu	3.356,50	3.347,25	9,25
23.06.2019	27,1	Parçalı Bulutlu	3.284,50	3.324,75	-40,25
24.06.2019	28,8	Parçalı Bulutlu	3.413,00	3.520,25	-107,25
25.06.2019	27,9	Güneşli	2.835,50	2.892,75	-57,25
26.06.2019	27,7	Güneşli	2.207,50	2.336,25	-128,75
27.06.2019	28,0	Güneşli	3.431,50	3.503,25	-71,75
28.06.2019	25,8	Güneşli	2.706,50	2.818,75	-112,25
29.06.2019	25,0	Parçalı Bulutlu	3.087,50	3.094,75	-7,25
30.06.2019	23,2	Güneşli	3.377,50	3.397,00	-19,50
1.07.2019	24,0	Güneşli	3.499,00	3.617,25	-118,25
2.07.2019	25,8	Güneşli	3.461,50	3.542,50	-81,00
3.07.2019	26,6	Güneşli	3.471,00	3.434,00	37,00
4.07.2019	26,9	Güneşli	2.696,50	2.853,75	-157,25
5.07.2019	26,8	Güneşli	3.335,00	3.373,25	-38,25
6.07.2019	25,7	Güneşli	3.296,50	3.305,50	-9,00
7.07.2019	27,3	Güneşli	3.419,00	3.479,75	-60,75
8.07.2019	26,7	Güneşli	2.905,50	2.945,25	-39,75
9.07.2019	29,9	Güneşli	2.691,00	2.813,00	-122,00
10.07.2019	25,1	Parçalı Bulutlu	1.921,00	1.922,50	-1,50
11.07.2019	21,1	Bulutlu	1.141,50	1.225,75	-84,25
12.07.2019	21,5	Güneşli	1.944,00	2.147,50	-203,50
13.07.2019	23,3	Güneşli	3.069,50	3.097,50	-28,00
14.07.2019	21,2	Bulutlu	817,50	896,75	-79,25
15.07.2019	20,5	Bulutlu	1.735,00	1.861,25	-126,25
16.07.2019	22,9	Güneşli	3.469,00	3.582,75	-113,75
17.07.2019	24,3	Parçalı Bulutlu	2.711,50	2.761,00	-49,50
18.07.2019	24,8	Parçalı Bulutlu	3.502,00	3.563,00	-61,00
19.07.2019	25,6	Güneşli	3.464,50	3.526,00	-61,50

Tablo 6.2 Devam

20.07.2019	25,9	Güneşli	3.384,00	3.421,00	-37,00
21.07.2019	26,2	Güneşli	3.504,50	3.543,50	-39,00
22.07.2019	26,5	Güneşli	3.452,00	3.475,25	-23,25
23.07.2019	27,0	Güneşli	3.406,50	3.410,25	-3,75
24.07.2019	23,7	Güneşli	1.922,00	2.076,25	-154,25
25.07.2019	24,4	Güneşli	2.491,50	2.590,25	-98,75
26.07.2019	25,8	Güneşli	3.538,50	3.555,50	-17,00
27.07.2019	26,0	Güneşli	3.572,00	3.529,25	42,75
28.07.2019	26,3	Güneşli	3.077,00	3.103,50	-26,50
29.07.2019	26,5	Güneşli	3.244,00	3.201,50	42,50
30.07.2019	27,5	Güneşli	2.068,00	2.149,25	-81,25
31.07.2019	28,3	Güneşli	3.288,50	3.240,75	47,75

Yukardaki 105 günlük panel bazlı gerçek zamanlı üretim değerleri incelendiğinde doğu-batı yönelimli sistemin 66 gün boyunca, güney yönelimli sistemin ise 39 gün boyunca daha fazla elektrik üretimi gerçekleştirdiği görülmüştür.

Doğu batı yönelimli sistemin daha fazla üretim yaptığı 66 gün incelendiğinde 41 günün güneşli, 13 günün parçalı bulutlu ve 12 günün bulutlu olduğu görülmüştür. Güney yönelimli sistemin daha fazla üretim yaptığı 39 gün incelendiğinde ise 16 günün güneşli, 7 günün parçalı bulutlu ve 16 günün bulutlu olduğu görülmüştür.

Söz konusu panel bazlı gerçek zamanlı nisan, mayıs, haziran ve temmuz ayı verilerinden de görüleceği üzere doğu-batı yönelimli sistem güneşli günlerde daha fazla üretim yapmaktadır. Bu durum Tablo 3.1.'de verilen İstanbul ili ışınım süresi ve gün uzunluğu tablosundan da görüleceği gibi ölçüm alınan aylarda güneşlenme süresinin yüksek olması olarak açıklanabilir.

Bununla birlikte gerçek zamanlı verilerden daha net çıktılar alınabilmesi için deney düzeneğinden bir yıllık periyot boyunca ölçüm alınması gerekmektedir. Bu sayede mevsimsel etkiler, sıcaklık etkisi, ışınım etkisi, güneşlenme süresinin etkisi, güneşin konumu vb. etkiler daha net analiz edilebilecektir.

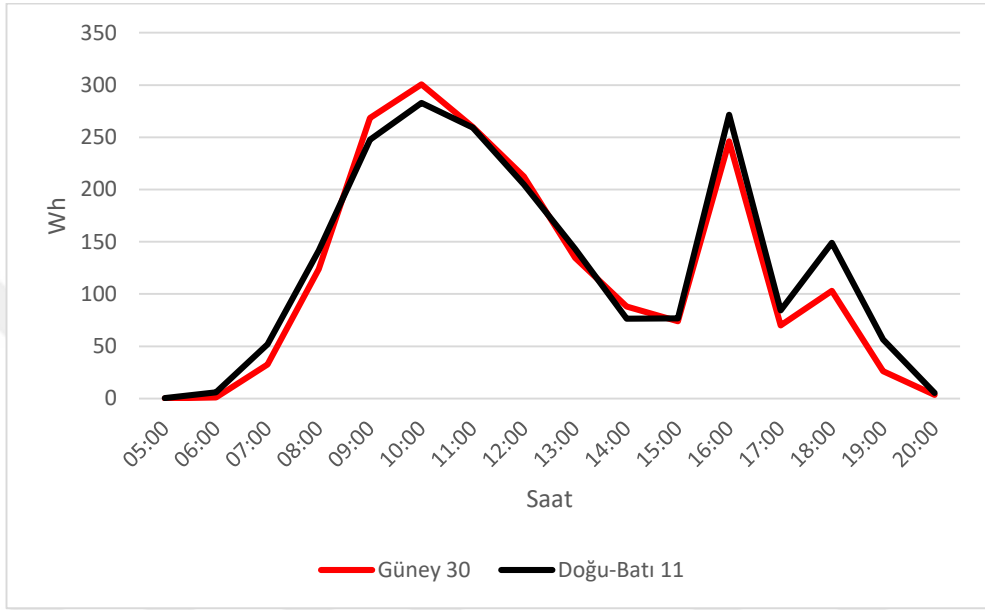
6.3 169 kWp Doğu-Batı Yönelimli Güneş Enerji Santralinin Gerçek Zamanlı Üretim Verilerinin Günlük Karşılaştırılması

Veri kayıt ve uzaktan izleme sisteminden 18.04.2019 - 31.07.2019 tarihleri arasında alınan panel bazlı ölçümlerde güney yönelimde en yüksek üretim farkı 21.04.2019 tarihinde, doğu-batı yönelimde ise en fazla üretim farkı 12.07.2019 tarihinde gerçekleşmiştir. Söz konusu üretimler Tablo 6.6.'da verilmiştir.

Tablo 6.6. Her iki sisteme ait üretim farkının en yüksek olduğu günler

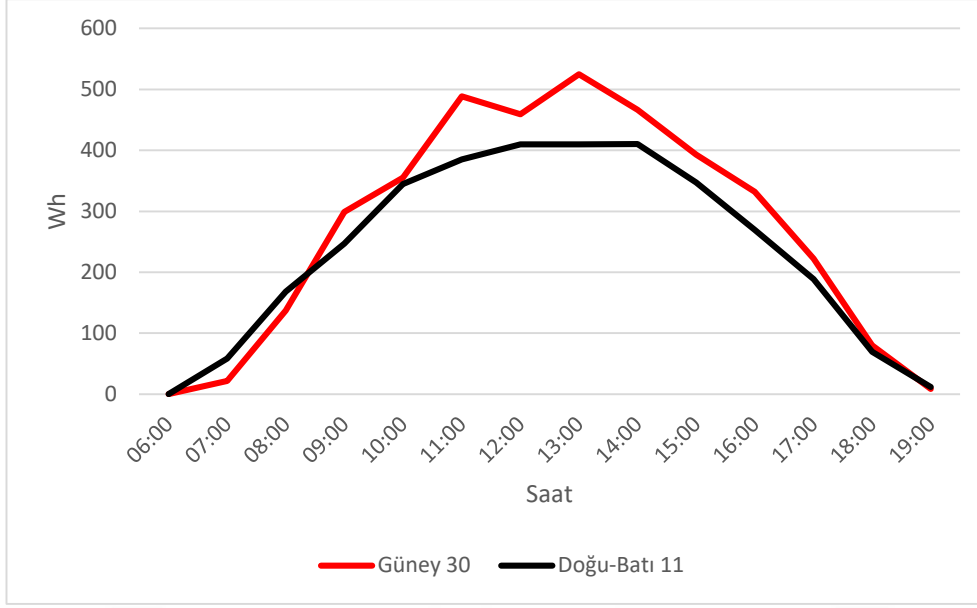
Saat	21.04.2019			12.07.2019		
	Güney 30°	Doğu-Batı 11°	Fark	Güney 30°	Doğu-Batı 11°	Fark
05:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	-0,25
06:00	0,00	0,00	0,00	1,00	6,00	-5,00
07:00	22,00	58,50	-36,50	32,50	51,75	-19,25
08:00	137,50	168,25	-30,75	124,00	141,75	-17,75
09:00	299,00	247,00	52,00	268,50	247,75	20,75
10:00	355,50	344,75	10,75	300,50	282,75	17,75
11:00	488,50	385,00	103,50	260,00	259,25	0,75
12:00	459,50	410,00	49,50	212,50	204,75	7,75
13:00	525,00	410,00	115,00	134,50	143,25	-8,75
14:00	466,50	410,50	56,00	88,00	76,25	11,75
15:00	393,00	347,25	45,75	74,00	76,75	-2,75
16:00	332,00	269,75	62,25	246,00	271,50	-25,50
17:00	222,50	188,50	34,00	70,00	84,25	-14,25
18:00	80,00	69,75	10,25	103,00	149,00	-46,00
19:00	8,50	11,50	-3,00	26,00	56,50	-30,50
20:00	0,00	0,00	0,00	3,50	5,25	-1,75

Her iki sisteme ait üretim farkının en yüksek olduğu günler tablosundan da görüleceği üzere sabah ve akşam saatlerinde doğu-batı yönelimli sistemin, öğlen saatlerinde ise güney yönelimli sistemin daha fazla üretim yaptığı görülmüştür. Bu sayede doğu-batı sistemlerin, yük profili ile gün içerisinde daha uzun süreli ve daha iyi eşleştiği görülmektedir.



Şekil 6.9. 21.04.2019 tarihli üretim eğrisi

Güney yönelimde en yüksek üretimin farkının olduğu 21.04.2019 tarihinde hava 10,3° ve bulutludur. Söz konusu tarihte güney yönelimde 3.789,50 Wh üretilirken doğu-batı yönelimde 3.320,75 Wh üretilmiş olup 468,75 Wh üretim farkı bulunmaktadır. Havanın bulutlu olması sebebiyle öğlen saatlerinde üretimde düşüş yaşanmıştır.



Şekil 6.10. 21.04.2019 tarihli üretim eğrisi

Doğu-batı yönelimde en yüksek üretimin farkının olduğu 12.07.2019 tarihinde hava $21,5^{\circ}$ ve güneşlidir. Söz konusu tarihte doğu-batı yönelimde 1.944 Wh üretilirken güney yönelimde 2.147,50 Wh üretilmiş olup 203,50 Wh üretim farkı bulunmaktadır.

6.4 Doğu-Batı Yönelimli Optimizerli Güneş Enerji Sisteminin Maliyet ve Amortisman Analizi

Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde tesis edilen 169 kWp kurulu güce sahip çatı üzeri doğu-batı yönelimli optimizerli güneş enerji sistemi için kullanılan 650 adet 260 Wp fotovoltaik güneş panelinin, 650 adet 300W optimizerin, 25 adet 8 kW inverterin, konstrüksiyon ve balast betonun, meteoroloji istasyonunun, fotovoltaik kabloların, pano ve şalt ekipmanların, uzaktan izleme sisteminin, topraklama ve yıldırım tesisatının, nakliyenin, projelendirme ve onay işlerinin 2016 yılı toplam maliyeti 850.00 TL+KDV'dir. Bu toplamı oluşturan kalemler Tablo 6.7.'de gösterilmiştir.

Tablo 6.4 169 kWp kurulu güce sahip doğu-batı yönelimli optimizierli güneş enerji sisteminin 2016 yılı maliyeti

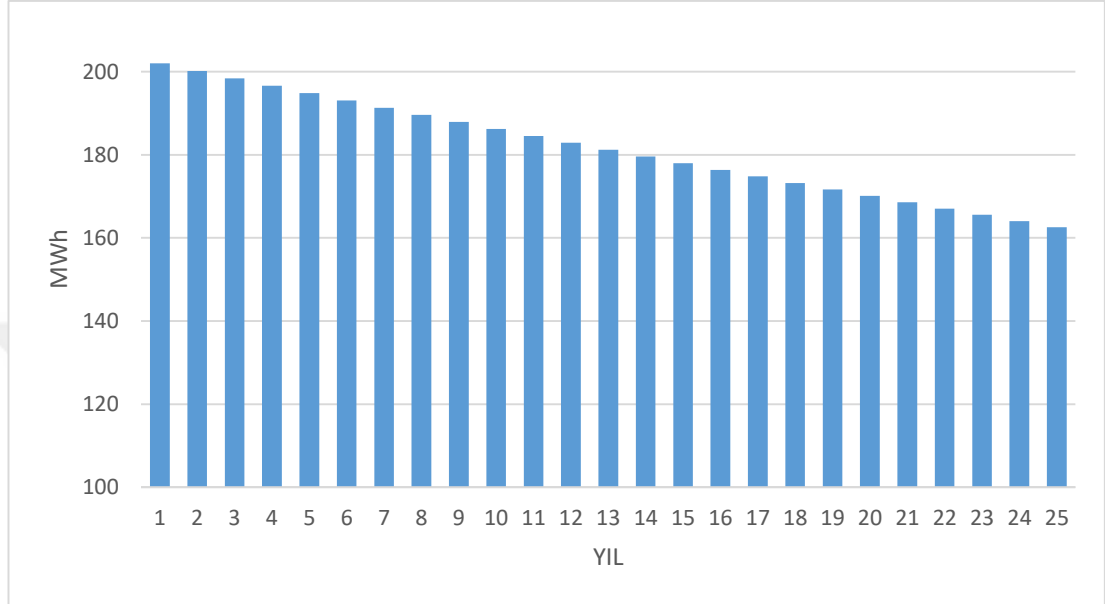
Malzeme/Hizmet Adı	Birim	Miktar	Birim Fiyat (TL)	Toplam Fiyat (TL)
Güneş paneli	Adet	650	678	440.700
İnverter	Adet	25	3.400	85.000
Optimizer	Adet	650	102	66.300
Taşıyıcı konstrüksiyon ve balast betonu	Takım	1	170.000	170.000
Kablo ve konnektör	Takım	1	32.300	32.300
Pano ve şalt ekipmanları	Adet	1	22.000	22.000
Meteoroloji istasyonu	Adet	1	9.000	9.000
Uzaktan izleme	Adet	1	200	200
Topraklama ve yıldırım	Takım	1	4.500	4.500
Proje ve onay işleri	Takım	1	12.000	12.000
Nakliye	Adet	1	8.000	8.000
Toplam (TL)				850.000

2016 yılı santral kurulum maliyeti 850.000 TL+KDV ve elektrik birim fiyatı 0,43 TL/kWh baz alınarak yapılan maliyet analizine göre 169 kWp güneş enerji santralinin yatırım geri dönüş süresi 15,7 yıl olarak hesaplanmıştır.

Ancak 2016 yılından günümüze kadar gelişen teknoloji ile birlikte sistem yatırımının yarısını oluşturan güneş panellerinin maliyeti dünya genelinde %25'e varan oranda düşüş yaşamıştır. Güneş paneli fiyatlarında yaşanan bu düşüş son dönemde ülkemizde artan döviz kurlarından dolayı ciddi oranda hissedilememiştir. Söz konusu sistem günümüzde 750.000 TL+KDV güncel bedel ile kurulabilmektedir. (SSRN, 2019)

Kullanılan güneş panelleri için üretici tarafından 10 yıllık süre sonunda %90, 25 yıllık sonunda ise %80 verim garantisi verilmiştir. Doğu-batı yönelimli fotovoltaik güneş enerji sisteminin enerji üretim projeksiyonu Şekil 6.11'de gösterilmiştir. Bu grafik aynı zamanda yıllar içerisinde güneş panellerinin üretebileceği nominal

elektrik enerjisini göstermektedir. Doğu-batı yönelimli 169 kWp kurulu güce sahip güneş enerji sisteminin ilk yıl üretimi 202.846 kWh olmakla birlikte güneş paneli yaşlanmasına bağlı olarak bu değer grafikten de görüldüğü üzere 10 yılın sonunda %90 ve 25 yılın sonunda ise %80 oranına düşmektedir.



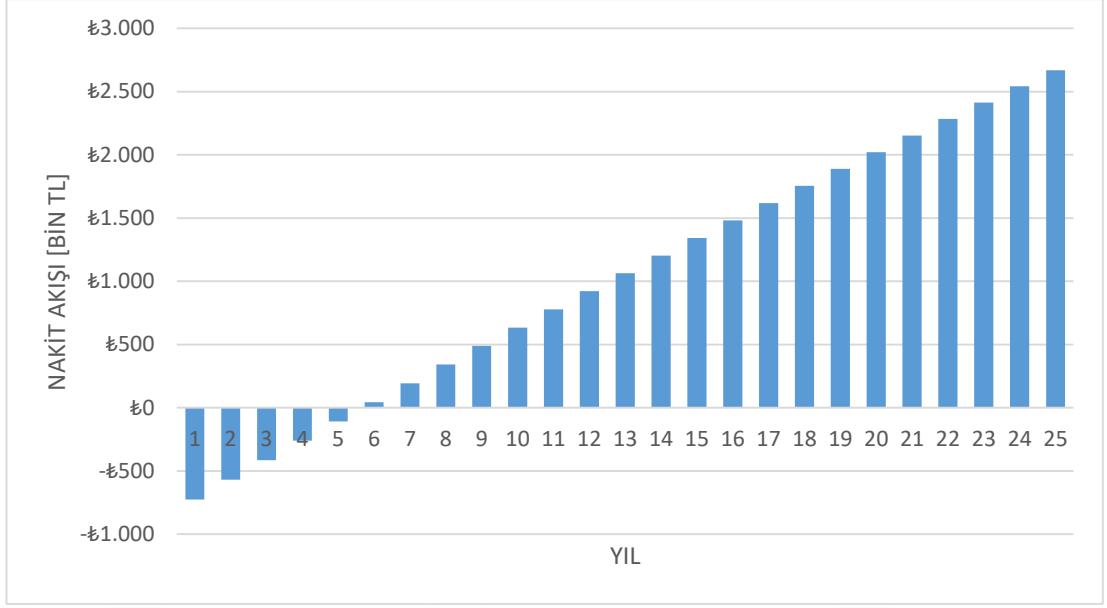
Şekil 6.11. 25 Yıllık güneş paneli enerji üretim projeksiyonu

Güneş paneli enerji üretim projeksiyonu grafiği gerçekleştirilen maliyet analizi hesaplamalarında kullanılmıştır. Sistemin yatırım geri dönüş süresi hesabı denklem 6.1 ile hesaplanmıştır.

$$\tau = -C_{yat} + \sum_{t=1}^T C_T$$

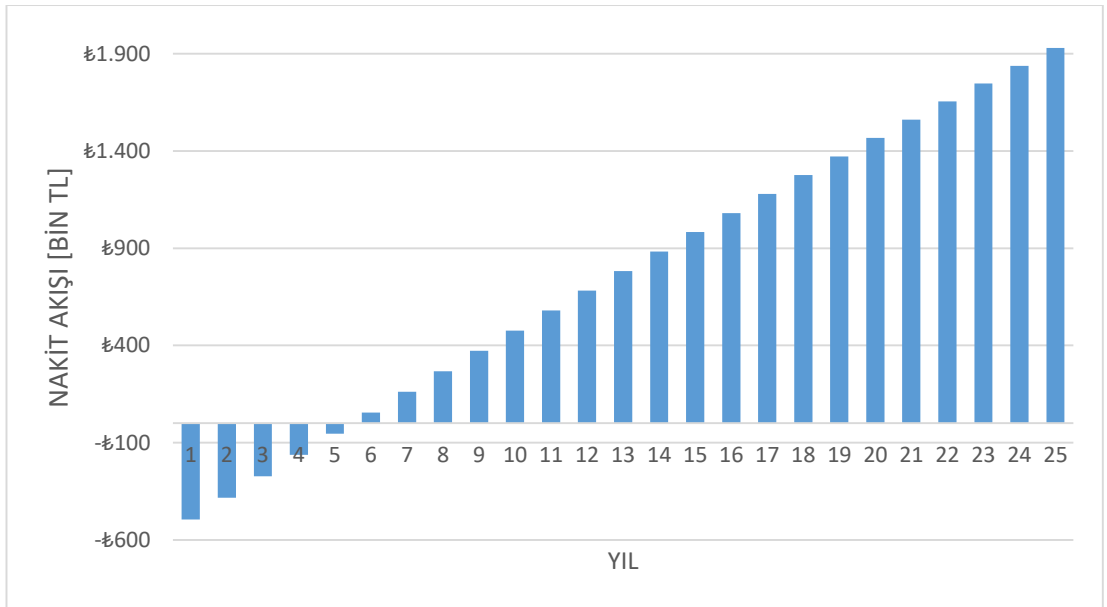
(6.1)

2017 yılında Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde tesis edilen çatı üzeri doğu-batı yönelimli 169 kWp kurulu güce sahip güneş enerji sisteminin, 2019 yılı 6. ayına göre güncel maliyeti 750.000 TL+KDV'dir. Güncel maliyet ve güncel elektrik birim fiyatı 0,82 TL/kWh baz alınarak yapılan maliyet analizine göre söz konusu güneş enerji santralının yatırım geri dönüş süresi 6,7 yıl olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan güncel sistem yatırım geri dönüş süresine ait grafik Şekil 6.12'de verilmiştir.



Şekil 6.12. 169 kWp doğu-batı yönelimli sistemin yatırım geri dönüş süresi grafiği

Bununla birlikte aynı sistem özelliklerine sahip 110,5 kWp kurulu güçteki güney yönelimli güneş enerji sisteminin, 2019 yılı 6. ayna göre maliyeti 515.000 TL+KDV'dir. Sistem maliyeti ve güncel elektrik birim fiyatı 0,82 TL/kWh baz alınarak yapılan maliyet analizine göre söz konusu güneş enerji santralının yatırım geri dönüş süresi 6,5 yıl olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan sistem yatırım geri dönüş süresine ait grafik Şekil 6.13'de verilmiştir.



Şekil 6.13. 110,5 kWp güney yönelimli sistemin yatırım geri dönüş süresi grafiği

2019 yılı 6. aya göre 169 kWp kurulu güce sahip doğu-batı yönelimli bir güneş enerji sisteminin maliyeti 750.000 TL+KDV olurken 110,5 kWp kurulu güçteki güney yönelimli güneş enerji sisteminin maliyeti 515.000 TL+KDV olmaktadır. İlk yatırım aşamasında 169 kWp kurulu güce sahip doğu-batı yönelimli bir güneş enerji sistemi, 110,5 kWp kurulu güçteki güney yönelimli bir güneş enerji sistemine göre $(750.000 - 515.000) = 235.000$ TL+KDV daha maliyetli olmaktadır. Özetle ilk yatırım maliyeti olarak iki sistem karşılaştırıldığında 169 kWp kurulu güce sahip doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi, aynı sistem bileşenlerine sahip 110,5 kWp kurulu güçteki güney yönelimli bir güneş enerji sistemine göre %45 daha yüksek maliyetli olmaktadır.

Söz konusu maliyetler ve elektrik birim fiyatı baz alınarak yapılan maliyet analizine göre Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'te verilen yatırım geri dönüş süresi grafiklerinden de görüleceği üzere 169 kWp kurulu güce sahip doğu-batı yönelimli bir güneş enerji sisteminin yatırım geri dönüş süresi 6,7 yıl olurken 110,5 kWp kurulu güçteki güney yönelimli bir güneş enerji sisteminin yatırım geri dönüş süresi 6,5 yıl olmaktadır. Yatırım geri dönüş süresi olarak söz konusu iki sistem karşılaştırıldığında 110,5 kWp kurulu güçteki güney yönelimli güneş enerji sisteminin yatırım geri dönüş 0,2 yıl daha erken olmaktadır. Ancak üretim değerleri açısından karşılaştırıldığında Tablo 6.1.'de verilen gerçek zamanlı üretim verisine göre 169 kWp kurulu güce sahip doğu-batı yönelimli bir güneş enerji sisteminden yılda 202.510 kWh elektrik üretilirken, Tablo 5.5.'de verilen PVSOL simülasyonundan elde edilen verilere göre 110,5 kWp kurulu güçteki güney yönelimli güneş enerji sisteminden 137.633 kWh elektrik üretilmektedir. Ayrıca bu üretimler karşılaştırıldığında 169 kWp kurulu güce sahip doğu-batı yönelimli sistem 110,5 kWp kurulu güçteki güney yönelimli güneş enerji sistemine göre yılda $(202.846 - 137.633) = 65.213$ kWh daha fazla elektrik üretmiştir. Bu üretimle 169 kWp kurulu güce sahip doğu-batı yönelimli sistem, 110,5 kWp kurulu güçteki güney yönelimli güneş enerji sistemine yılda %47 oranında daha fazla üretim yaparak 53.607 TL gelir sağlamaktadır. Karşılaştırmalı olarak her iki sisteme ait tesis maliyeti, enerji üretimi, üretim getirisi, engellenen karbon (CO₂) salınımı, doğaya sağlanan ağaç katkısı, elektrik tüketimi karşılanacak hane sayısı ve yatırım geri dönüş süresi gibi veriler bulunmuş ve sonuçları Tablo 6.8'de verilmiştir.

Tablo 6.4 Her iki sisteme ait kurulum maliyetleri ve çıktıları

Yönelim Durumu	Tesis Maliyeti (TL)	Enerji Üretimi (kWh/yıl)	Üretim Getirisi (TL/yıl)	Karbon Ayak İzi (ton/yıl)	Ağaç Katkısı (adet/yıl)	Hane Sayısı (adet/yıl)	Yatırım Geri Dönüşü (yıl)
169 kWp Doğu-Batı Sistem	750.000	202.846	166.743	105,48	2.704	130	6,7
110,5 kWp Güney Sistem	515.000	137.633	113.136	71,57	1.835	88	6,5
Sistemlerin Farkları	235.000	65.213	53.607	33,91	869	42	0,2

Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde tesis edilen 169 kWp kurulu güce sahip doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi ile kompleksin yıllık elektrik ihtiyacının %5,67'si karşılanırken, simüle edilen 110,5 kWp kurulu güçteki güney yönelimli güneş enerji sistemi ile %3,84'ü karşılanmaktadır.

Güneş enerji sistemlerinde teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte her geçen gün dünya genelinde üretim maliyetleri düşmekte, güneş paneli verimleri ise artmaktadır. Ayrıca ülkemizde son yıllarda elektrik birim fiyatlarında ciddi artışlar görülmektedir.

Güneş enerji sistemlerinde maliyetlerin her geçen gün düşmesi ve elektrik birim fiyatındaki artışlar ile yatırım geri dönüş süreleri azalmaktadır. Nitekim güneş enerji sisteminin kurulduğu 2017 yılına göre yapılan hesaplamalarda yatırım geri dönüş süresi 15,7 yıl olarak bulunmuşken, 2019 yılı 6. ayı güncel sistem maliyeti ve elektrik birim fiyatı baz alınarak yapılan maliyet analizine göre 6,7 yıl olarak bulunmuştur.

Bu veriler ışığında 169 kWp kurulu güce sahip doğu-batı yönelimli güneş enerji sisteminin aynı alanda kurulabilecek 110,5 kWp kurulu güçteki güney yönelimli güneş enerji sistemine göre avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir.

Avantajları;

- Aynı birim alanda %35 daha fazla kurulu güçte kurulum yapılmaktadır.
- İlk yıl için %40 daha fazla elektrik üretimi yapılmaktadır.
- Yük profili ile gün içerisinde daha uzun süreli ve daha iyi eşleştiği görülmektedir.
- Daha fazla karbon salınımı engellenerek doğaya daha fazla katkı sağlanmaktadır.
- Yatırım geri dönüş süresi tamamlandığında yıllık %47 daha fazla getiri elde edilmektedir.
- Gelişen teknolojiyle birlikte sistem maliyetleri düştüğünde veya elektrik birim fiyatları yükseldiğinde, yatırım geri dönüş süreleri aynı alandaki güney yönelimli kurulumla göre daha kısa süreli olacaktır.
- Güneşlenme süresinin yüksek olduğu yaz aylarında aynı güçteki güney yönelimli kurulumdan daha fazla enerji üretmektedir.

Dezavantajları;

- İlk yatırım maliyetleri yüksektir.
- Yatırım geri dönüş süresi daha uzundur.

7. BÖLÜM

SONUÇLAR

Bu tez çalışması, doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi tesis edilerek güney yönelimli sisteme göre güneş enerjisinden birim alanda daha fazla yararlanılması için bir çözüm ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen doğu-batı yönelimli güneş enerji sisteminin en önemli özelliği, güney yönelimli sisteme göre birim alanda daha fazla kurulu güç tesis edilmesini sağlamasıdır. Tasarımı, simülasyonu ve uygulaması yapılan sistemin bu yeteneği sayesinde, yüksek güçlerde kurulum yapılarak, güneş enerjisinden maksimum düzeyde yararlanılmaktadır.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'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.

Sistem tasarımıyla ilgili seçilen malzemeler detaylı olarak anlatılmış ve güneş enerji sistemlerinde ekstra kullanılan optimizer cihazına ayrıca değinilerek, optimizerin avantaj ve dezavantajları vurgulanmıştır. Optimizer ile güneş paneli bazında maksimum güç noktası takibi yapılır ve paneller arası uyumsuzluk (mismatch) farkından kaynaklı güç etkisi ortadan kaldırılarak daha fazla elektrik enerjisi üretimi sağlanır. Bununla birlikte dizide bir panelde herhangi bir nedenle gölgelenme olduğunda dizideki diğer paneller, bu panelden kaynaklanacak üretim kaybından etkilenmezler. Bu özelliği sayesinde aynı seride farklı eğim, yönelim ve güçlerde paneller kullanılabilir. Optimizerin bir diğer özelliği ise panel bazlı izleme yapılabilmesine olanak sağlamasıdır. Bu sayede güneş panelinin performansı ve arıza durumları anlık olarak takip edilebilmektedir. Ayrıca işletme ve bakım açısından

oldukça kolaylık sağlayarak, işletme ve bakım maliyetlerinin minimuma inmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte optimizer inverterle haberleşemediğinde ya da uçları açık devre olduğunda optimizere bağlı bulunan güneş panelinin çıkış gerilimi ne olursa olsun optimizer uçlarında 1 Vdc çıkış görülür. Bu sayede kurulum esnasında montaj ekibine, bakım ve işletme esnasında bakım personeline ve olası bir yangın esnasında itfaiye personeline, dizilerde oluşan 800-1500 Vdc seviyelerindeki yüksek gerilimden koruma sağlanmaktadır.

Optimizer DC/DC dönüştürücü elektronik bir devre olduğundan çok küçükte olsa sistemde bir enerji kaybına neden olmaktadır. Ayrıca güneş enerji sistemlerinde kullanılan ekstra bir cihaz olduğundan sistemin ilk yatırım maliyetlerini sistem büyüklüğüne göre değiştirmekle beraber söz konusu proje için yaklaşık %7 oranında yükseltmektedir.

Doğu batı yönelimli sistemin, güney yönelimli sistem ile karşılaştırılabilmesi için üretim ve verim analizleri yapılmıştır. Tasarımı yapılan sistemin simülasyonu PVSOL yazılımı, PVGIS Web Portalı ve Meteonorm hava durumu bilgisi temel alınarak oluşturulmuştur.

169 kWp Doğu-batı yönelimi optimizerli fotovoltaik sistemin simülasyon sonucu incelendiğinde modül üzerinde meydana gelen kirlilik, nominal modül sıcaklığından sapma, diyot üzerinde oluşan kayıplar, inverter dönüşüm oranı, optimizer kayıpları, kablo kaybı ve gerilim sapması olmasından ötürü yıllık enerji üretimi PVSOL simülasyon programı sonucunda 192,88 MWh, PVGIS sonucunda ise 200,71 MWh olarak hesap edilmiştir. Veri kayıt ve uzaktan izleme sisteminden alınan gerçek zamanlı verilere göre ise 202.85 MWh elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir.

Gerçek zamanlı enerji üretim eğrisinin karakteristiği PVSOL ile yapılan simülasyon sonucu ortaya çıkan üretim karakteristiği ile benzerlik göstermektedir (Şekil 6.6). Gerçek zamanlı enerji üretim değerleri, PVSOL programı ile yapılan

simülasyon sonuçlarına göre %5,16 PVGIS programı ile yapılan simülasyon sonuçlarına göre %1,06 daha fazladır. Alınan veriler ortaya çıkarmıştır ki uygulama sistemine ait gerçek veriler; simülasyon verilerine göre daha yüksek üretim göstermektedir. Enerji üretim değerleri açısından incelendiğinde, gerçek zamanlı enerji üretim değerlerinin PVGIS ile yapılan simülasyon sonucu elde edilen üretim değerlerine daha yakın olduğu görülmektedir. Uygulama sonuçları ile PVGIS ve PVSOL simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında, üretim farkının ve PVSOL'ün PVGIS'ten daha az üretim yapmasının sebebi farklı meteorolojik verilerin kullanması ve detaylandırmasından kaynaklandığı ortaya çıkmaktadır.

Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi 2018 yılı elektrik tüketimi 3.579.868 kWh olarak gerçekleşmiştir. Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi'nde tesis edilen 169 kWp kurulu güce sahip doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi ile kompleksin yıllık elektrik ihtiyacının %5,6'sı karşılanırken, 110,5 kWp kurulu güçteki güney yönelimli güneş enerji sistemi simülasyon sonuçlarına göre ise %3,8'i karşılanmaktadır.

Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi çatı alanı yaklaşık 1.500 m²'dir. Mevcut çatı alanına kurulu 169 kWp doğu-batı yönelimi optimizasyonlu fotovoltaik sistem yerine 30° güney yönelimli güneş enerji sistemi tesis edilseydi, 110,5 kWp kurulu güçte bir sistem kurulabilecekti. Mevcut çatı alanı için güney yönelimli sistem yerine doğu-batı yönelimli sistem tesis edilerek kurulu güçte yaklaşık %35'lik bir artış sağlanmaktadır. Aynı çatı alanı için 169 kWp 11° doğu-batı yönelimli mevcut kurulu santral ile 110,5 kWp 30° güney yönelimli güneş enerji santralinin kıyaslanabilmesi için üretim ve verim analizi yapılmıştır.

110,5 kWp güney yönelimli fotovoltaik sistemin simülasyon sonucu incelendiğinde modül üzerinde meydana gelen kirlilik, nominal modül sıcaklığından sapma, diyot üzerinde oluşan kayıplar, inverter dönüşüm oranı, optimizasyon kayıpları, kablo kaybı ve gerilim sapması olmasından ötürü yıllık enerji üretimi PVSOL simülasyon programı sonucunda 137,63 MWh, PVGIS sonucunda ise 148,26 MWh olarak hesap edilmiştir.

Simüle edilen farklı güç ve yönelimdeki sistemlerin, enerji üretim değerleri kıyaslandığında; 169 kWp doğu-batı yönelimli güneş enerji sisteminin, 110,5 kWp güney yönelimli güneş enerji sistemine göre yıllık $(192.829 - 137.633) / 137.633 = \%40$ daha fazla üretim yaptığı görülmektedir. Aynı çatı alanına güney yönelimli kurulum yerine doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemi kurarak güneş enerjisinden %40 daha fazla yararlanılabilmektedir.

169 kWp gücündeki doğu-batı yönelimli sistemin gerçek zamanlı enerji üretim değerleri ve 110,5 kWp güney yönelimli güneş enerji sisteminin PVSOL simülasyonu sonucu bulunan enerji üretim değerleri ile üretim getirisi, engellenen karbon (CO₂) salınımı, doğaya sağlanan ağaç katkısı, elektrik tüketimi karşılanacak hane sayısı gibi veriler bulunmuştur. Söz konusu üretimler kıyaslandığında 169 kWp kurulu güce sahip güney yönelimli sistem 110,5 kWp kurulu güçteki güney yönelimli güneş enerji sistemine göre yılda $(202.846 - 137.633) = 65.213$ kWh daha fazla elektrik üretmiştir. Bu üretimle yılda %47 oranında daha fazla elektrik üretimi gerçekleştirerek 53.607 TL getiri sağlanmıştır. Ayrıca 33,91 ton daha fazla karbon salınımını engellenerek doğaya 864 adet ağaç dikimine eşdeğer katkı sağlanmıştır. Bununla birlikte 42 adet daha fazla hanenin elektrik tüketimini karşılamaktadır.

2019 yılı 6. ayına göre 169 kWp kurulu güce sahip güney yönelimli bir güneş enerji sisteminin maliyeti 750.000 TL+ KDV olurken aynı çatı alanına kurulabilecek 110,5 kWp kurulu güçteki güney yönelimli güneş enerji sisteminin maliyeti ise 515.000 TL+ KDV olmaktadır. İlk yatırım aşamasında 169 kWp kurulu güçteki güney yönelimli güneş enerji sistemi 235.000 TL+ KDV yani %45 daha yüksek maliyetli olmaktadır. Söz konusu maliyetler, modül enerji düşüş profili ve güncel elektrik birim fiyatı baz alınarak yapılan maliyet analizine göre 169 kWp kurulu güce sahip güney yönelimli bir güneş enerji sisteminin yatırım geri dönüş süresi 6,7 yıl olurken 110,5 kWp kurulu güçteki güney yönelimli bir güneş enerji sisteminin yatırım geri dönüş süresi 6,5 yıl olmaktadır. Yatırım geri dönüş süresi olarak söz konusu iki sistem karşılaştırıldığında 110,5 kWp kurulu güçteki güney yönelimli güneş enerji sisteminin yatırım geri dönüş 0,2 yıl daha erken olmaktadır.

Güneş enerji sistemlerinde teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte her geçen gün dünya genelinde üretim maliyetleri düşmekte, güneş paneli verimleri ise artmaktadır. Ayrıca ülkemizde son yıllarda elektrik birim fiyatında ciddi artışlar görülmektedir.

Güneş enerji sistemlerinde maliyetlerin her geçen gün düşmesi ve elektrik birim fiyatındaki artışlar ile yatırım geri dönüş süreleri azalmaktadır. Nitekim güneş enerji sisteminin kurulduğu 2017 yılına göre yapılan hesaplamalarda yatırım geri dönüş süresi 15,7 yıl olarak bulunmuştu. Ancak güncel sistem maliyeti ve güncel elektrik birim fiyatı baz alınarak yapılan maliyet analizine göre 169 kWp doğu-batı yönelimli güneş enerji santralının yatırım geri dönüş süresi 6,7 yıl olarak bulunmuştur.

Bu çıktılar ışığında 169 kWp kurulu güce sahip doğu-batı yönelimli güneş enerji sisteminin aynı alanda kurulabilecek 110,5 kWp kurulu güçteki güney yönelimli güneş enerji sistemine göre avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir.

Avantajları;

- Aynı birim alanda %35 daha fazla kurulu güçte kurulum yapılmaktadır.
- İlk yıl için %40 daha fazla elektrik üretimi yapılmaktadır.
- Yük profili ile gün içerisinde daha uzun süreli ve daha iyi eşleştiği görülmektedir.
- Daha fazla karbon salınımı engellenerek doğaya daha fazla katkı sağlanmaktadır.
- Yatırım geri dönüş süresi tamamlandığında yıllık %47 daha fazla getiri elde edilmektedir.
- Gelişen teknolojiyle birlikte sistem maliyetleri düştüğünde veya elektrik birim fiyatları yükseldiğinde, yatırım geri dönüş süreleri aynı alandaki güney yönelimli kurulumla göre daha kısa süreli olacaktır.
- Güneşlenme süresinin yüksek olduğu yaz aylarında aynı güçteki güney yönelimli kurulumdan daha fazla enerji üretmektedir.

Dezavantajları;

- İlk yatırım maliyetleri yüksektir.
- Yatırım geri dönüş süresi daha uzundur.

Doğu-batı yönelimli güneş enerji sistemlerinin, güneşlenme süresinin yüksek olduğu ekvatora yakın olan bölgelerde kurulması önerilmektedir. Ülkemizde ise güney bölgelerde önerilmekte olup kuzey kısımlar için elektrik birim fiyatları yükseldikçe ve kurulum maliyetleri düştükçe daha uygun hale gelecektir.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin 2023 yılına kadar elektrik ihtiyacının %55'i yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması hedeflenmektedir. Bu hedef kapsamında gelecekte kurulumu planlanan güneş enerji santrallerinde tezde edinilen bilgiler değerlendirilecektir.

KAYNAKÇA

Haselhuhn R., Hemmerle, C. (2012). *Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie*. 3-12.
Türkiye: Çataklı Enerji Yayıncılık.

Roxana, O., Marcel, I., Dragos, M. ve Ravan, B. (18-19 October. 2018).
Experimental Evaluation of the Optimum Tilt Angle for Fixed Photovoltaic
Modules. *International Conference and Exposition on Electrical And Power
Engineering*. Romania: 594-598

Chowdhury, S., Al-Amin, M. ve Ahmad, M. (20-22 December 2012). Performance
Variation Of Building Integrated Photovoltaic Application With Tilt And
Azimuth Angle In Bangladesh. *7th International Conference on Electrical
and Computer Engineering*. Bangladesh: 896-899

Mosalam, H. (4-6 December 2018). Evaluation Study Design And Operation Of A
Building Integrated Photovoltaic System. *International Conference on
Smart Grid*. Japan: 195-201

Yılmaz, Ş. (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.

Hwang, T., K. Seokyoung. ve Kim, J. T. (2011). Optimization Of The Building
Integrated Photovoltaic System In Office Buildings-Focus On The
Orientation, Inclined Angle And Installed Area. *Energy and Buildings*. 46.0,
92-104

Asgharzadeh, A., Deline, C., Stein, J. ve Toor, F. (10-15 June 2018). A Comparison Study of the Performance of South/North-facing vs East/West-facing Bifacial Modules under Shading Conditions. *7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*. USA: 1730-1734.

Sankar, A. ve Kalathil, A. (6-9 August 2014). Qualitative Validation Of Empirically Observed Higher Generation In East-West Orientated PV Arrays Over Conventional South Orientation. *Region 10 Humanitarian Technology Conference*. India: 25-28.

Etukudor, C., Orovwode, H., Wara, S., Agbetuyi, F., Adozhe, A., Obieje, B. ve Oparaocha, N., (28-29 June 2018). Optimum Tilt and Azimuth Angles for Solar Photovoltaic Systems in South-West Nigeria. *PES/IAS PowerAfrica*. South Africa: 348-353.

Bedeloğlu, A. (2010). Fotovoltaik Teknolojisi: Türkiye ve Dünyadaki Durumu, Genel Uygulama Alanları ve Fotovoltaik Tekstiller. [Electronic Version] *Electronic Journal of Textile Technologies*. 4: 43-58. (12 Mart 2019).

Varış, Ç. (2017). Çift Eksenli Güneş Takip Sisteminin Pilot Uygulaması, Üretim Değerlendirmesi Ve Ekonomik Analizi, *Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi FBE.

Ege Üniversitesi. (2019) *Yenilenebilir Enerji Kaynakları*.

<https://eusolar.ege.edu.tr/tr-3482/yenilenebilir-enerji-kaynaklari.html> (1 Temmuz 2019).

Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. (2019). *Biyokütle Enerjisi*.

http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/biyokutle_enerjisi.aspx (2 Temmuz 2019).

EPDK. (2019). *Elektrik Piyasası Aylık Sektör Raporları*.

<https://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/3-0-23-3/elektrikaylik-sektor-raporlar> (1 Nisan 2019).

SSRN. (2019). *Feasibility Study Of City Scale Solar Power Plants Using Public Buildings*.https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3397772 (17 June 2019).

Bloomberght. (2019). *Enerji İthalatı*.

<https://www.bloomberght.com/enerji/haber/2194843-enerji-ithalati-faturasi-2018-de-yuzde-15-6-artti> (6 Şubat 2019).

Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. (2019). *Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası*.

<http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx> (1 Nisan 2019).

Eskier, U. (2017). *Enlem ve Boylam*. <https://www.makaleler.com/enlem-ve-boylam-nedir> (1 Nisan 2019).

Akhisar Meslek Yüksek Okulu. (2012). *Güneş Enerjisi Ve Uygulamaları Ders Notları*.
http://akhisarmyo.cbu.edu.tr/db_images/file/gunes-enerjisi-1-1283TR.pdf (21 Nisan 2019).

Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü. (2010). *İridyum Uydusu*

Parlamaları.http://www.koeri.boun.edu.tr/astronomy/iridyum_uydular%FD.htm (8 Nisan 2019).

Güneş Açıları. (2019). *Güneş Açıları*. <https://www.learnclick.com/quiz/show/23191> (6 Temmuz 2019).

- Güneş Takip Sistemi. (2016). *Güneş Enerji Takip Sistemleri*.
http://www.emo.org.tr/ekler/c7f5e8dcaf51a49_ek.pdf (6 Nisan 2019).
- Güneş Sistemleri. (2019). *Güneş Hücre Çeşitleri*.
<http://www.gunessistemleri.com/guneshucreleri.php> (8 Mayıs 2008).
- PVGIS. (2019). *Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi*. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
(10 Temmuz 2019).
- TUİK. (2014). *Ekonomik Faaliyetlere Göre Hava Emisyon Hesapları*.
http://tuik.gov.tr/PreTabloArama.do?metod=search&araType=hb_x (8 Mayıs 2019).
- Environmental Protection Agency. (2015). *Karbon Hesabı*.
<https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator-calculations-and-references> (6 Temmuz 2019).
- Solar Edge. (2019). *Güç Optimizeri* <https://www.solaredge.com/sites/default/files/se-homeowners-brochure-tur.pdf> (24 Haziran 2019).
- Energy Informative. (2019). *Panel Çeşitleri*. <https://energyinformative.org/best-solar-panel-monocrystalline-polycrystalline-thin-film/> (30 Haziran 2019)
- İnvento Türkiye. (2019). *İnce Film Güneş Hücreleri*
<http://solar.inventoturkiye.com/a-si-thin-film-solar-panel-a-si-ince-film-gunes-paneli/> (05 Mayıs 2019)
- Solar Türk (2019). *Güneş Paneli*. <https://www.solarturk.com.tr/uploads/ST-ANATOLIA-datasheet-2017.pdf> (15 Mayıs 2019)

Solar Edge. (2019). *Solar Edge İzleme Sistemi*.

<https://monitoring.solaredge.com/solaredge-web/p/home> (3 Temmuz 2019).

Solar Edge. (2019). *Solar Edge İnverter*. [https://www.europe-](https://www.europe-solarstore.com/solaredge-se8k.html)

[solarstore.com/solaredge-se8k.html](https://www.europe-solarstore.com/solaredge-se8k.html) (5 Temmuz 2019).



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Savaş ALKAN

Doğum Tarihi ve Yeri : 14.04.1986 İstanbul

Medeni Hali : Evli

E-posta : savasalkan18@hotmail.com

Adres : Eyüpsultan / İstanbul

Adres İş : İstanbul Dünya Ticaret Merkezi (İDTM) Blokları A2
Blok No:10 Kat:17 Ofis No: 467 34149 Yeşilköy /
İSTANBUL

Telefon : 0536 477 31 40

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik Müh.	Sakarya Üniversitesi	2011
Ön Lisans	Elektrik Müh.	Abant İzzet Baysal Üniversitesi	2007
Lise	Sayısal	Şişli Endüstri Meslek Lisesi	2004

YABANCI DİL

İngilizce

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2015-Devam ediyor	İstanbul Enerji A.Ş.	Elektrik Elektronik Mühendisi
2014-2015	Kadife Tekstil Mensucat San ve Ticaret A.Ş.	Bakım Mühendisi
2012-2014	Çevrim Elektrik	Elektrik Şantiye Şefi

