

**HAREKETLİ VE SABİT FOTOVOLTAİK
SİSTEMLERİN İSTANBUL İKLİM KOŞULLARI
ALTINDA PERFORMANSLARININ
KARŞILAŞTIRILMASI**

**2019
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

Erdem AKYOL

**HAREKETLİ VE SABİT FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN İSTANBUL
İKLİM KOŞULLARI ALTINDA PERFORMANSLARININ
KARŞILAŞTIRILMASI**

Erdem AKYOL

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Haziran 2019

Erdem AKYOL tarafından hazırlanan “HAREKETLİ VE SABİT FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN İSTANBUL İKLİM KOŞULLARI ALTINDA PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Engin GEDİK

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 21 /06/2019

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

Başkan : Prof. Dr. Hüseyin KURT (NEÜ)

Üye : Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Engin GEDİK (KBÜ)

İmzası



...../...../2019

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.





“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim”

Erdem AKYOL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HAREKETLİ VE SABİT FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN İSTANBUL İKLİM KOŞULLARI ALTINDA PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Erdem AKYOL

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Engin GEDİK

Haziran 2019, 76 sayfa

Yapılan bu çalışmada; yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımına vurgu yapılarak fotovoltaik panellerin öneminin benimsenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda İstanbul iklim şartlarında $40^{\circ}55'12.6''N$ $29^{\circ}17'07.8''E$ coğrafi konumu üzerinde, aynı teknik özelliklere sahip 2 adet güneş takip sistemli fotovoltaik paneller ve sabit fotovoltaik panel sistemlerinin enerji üretimleri kıyaslanmıştır. Bununla birlikte güneş takip sistemli fotovoltaik panel sisteminin ekonomik işletme ömrü boyunca sağladığı fayda ve ekonomik yönden uygulanabilirliği araştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre güneş takipli sistemin performansı sabit PV sistemine göre yaklaşık % 30 daha fazla olduğu bulunmuştur.

Anahtar Sözcükler : Güneş enerjisi, Fotovoltaik, Hareketli Fotovoltaik sistemler.

Bilim Kodu : 92802

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

PERFORMANCE COMPARISON OF TRACKING AND FIXED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS UNDER İSTANBUL CLIMATE CONDITIONS

Erdem AKYOL

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Energy Systems Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Engin GEDİK

June 2019, 76 pages

In this study; it is aimed to adopt the theme of photovoltaic panels taking into consideration energy needs and effective usage of renewable energy sources. For this purpose, the energy production of fixed photovoltaic panel systems and two tracking photovoltaic systems with the same technical characteristics were compared on 40° 55'12.6 "N 29 ° 17'07.8" E geographical position in Istanbul climatic conditions. However, the applicability of the photovoltaic panel system with solar tracking system during the economical operating life has been examined. According to the results obtained from study, the performance of the solar tracking system was found to be approximately 30% higher than that of the fixed PV system.

Key Words : Solar Energy; Photovoltaic; Photovoltaic tracking systems.

Science Code : 92802

TEŞEKKÜR

Çalıőmaya baőladıđım ilk günden beri büyük bir sabır ve özveri ile beni destekleyen baőta kıymetli Danıőman Hocam Sn. Doç.Dr. Engin GEDİK olmak üzere aileme ve çalışma arkadaőlarıma ayrıca çalıőmaya yapmış oldukları katkılardan dolayı UGETAM A.Ő. ve Karabük Üniversitesi'ne teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	7
GÜNEŞ ENERJİSİ	7
2.1. GÜNEŞ.....	7
2.2. GÜNEŞ ENERJİSİ VE KULLANIMI.....	8
2.2.1. Güneş Enerji ve Fotovoltaik Sistemlerin Avantajları.....	9
2.2.2. Güneş Enerji ve Fotovoltaik Sistemlerin Dezavantajları.....	11
2.2.3. Dünya’da Güneş Enerjisinin Durumu	12
2.2.4. Ülkemizde Güneş Enerjisi Potansiyeli	13
BÖLÜM 3	15
MADDENİN YAPISI VE GÜNEŞ PİLLERİ	15
3.1. MADDENİN YAPISI VE YARI İLETKENLER.....	15
3.1.1. N (Negatif) Tipi Yarı İletken.....	17
3.1.2. P (Pozitif) Tipi Yarı İletken.....	17
3.1.3. P – N Kavşağı	18
3.2. FOTOVOLTAİK TEKNOLOJİSİ	19

	<u>Sayfa</u>
3.2.1. Güneş Pilleri	22
3.2.2. Güneş Pillerinin Çalışma İlkeleri	22
3.2.3. Fotovoltaik Hücrelerin Yapısı	23
3.2.4. Güneş Pili Çeşitleri	25
3.2.4.1. Selenyum Güneş Pili.....	25
3.2.4.2. Silisyum Güneş Pilleri	25
3.2.4.3. İnce Film Güneş Pilleri	27
3.2.5. Güneş Pili Kullanım Alanları	29
3.2.6. Güneş Pilinin Çalışmasını Etkileyen Dış Faktörler	30
3.2.6.1. Konum.....	31
3.2.6.2. Çalışma Ortam Sıcaklığı.....	31
3.2.6.3. Gölgeleme	32
BÖLÜM 4	33
MATERYAL VE METOD	33
4.1. FOTOVOLTAİK.....	33
4.1.1. Avantajlar	35
4.1.2. Dezavantajlar	35
4.2. ÇALIŞMA SİSTEMİ	36
4.3. PROJELENDİRME.....	39
4.3.1. DC Hesaplar.....	39
4.3.1.1. Maksimum ve Minimum Evirici DC Giriş Gerilimi Kontrolü	40
4.3.1.2. Maksimum Panel Sayısının Tespiti	40
4.3.1.4. DC Kablo Hesapları.....	42
4.3.2.1. Evirici – AG1 Pano Arası Hat Kesintinin Hesaplanması	47
4.3.2.2. AG1 Pano – AG2 Pano Arası Hat Kesintinin Hesaplanması	49
4.3.3. Sigorta Seçimi.....	52
4.3.3.1. AG1 Panosu Monofaze Sigorta Hesabı	52
Akım Taşıma Kapasitesi	53
4.3.3.2. AG1 Panosu Trifaze Sigorta Hesabı.....	53
4.3.3.3. AG2 Panosu Trifaze Sigorta Hesabı.....	54
4.3.4. Topraklama Hesabı.....	55

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 5	58
SONUÇLAR VE TARTIŞMA	58
5.1. ENERJİ ÜRETİMLERİ	58
5.2. ÜRETİM KAZANÇLARININ KIYASLANMASI	65
5.3. MALİYET ANALİZİ	65
BÖLÜM 6	72
SONUÇ	72
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	76

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.1. Fotovoltaik güneş enerji santrali.....	37
Şekil 4.2. Fotovoltaik panellerin standart test şartlarındaki I-V, P-V karakteristik eğrileri.....	39
Şekil 5.1. 2015 yılı için tesisin aylara göre toplam elektrik üretimi.	58
Şekil 5.2. Sabit ve hareketli sistemlerin karşılaştırılması.	59
Şekil 5.3. Sabit Sistem ile Hareketli Sistem 2'nin karşılaştırılması.....	62
Şekil 5.4. Hareketli sistem 1 ve 2'nin karşılaştırılması.....	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Çeşitli PV materyalleri ve teknolojileri verimlilikler oranları.	29
Çizelge 4.1. PV Endüstrisinin 20 yıllık gelişimi (Mertens 2009).	34
Çizelge 4.2. Sistemde kullanılan PV panellerin teknik özellikleri.	37
Çizelge 4.3. Sistemde kullanılan invertörlerin teknik özellikleri.	38
Çizelge 4.4. DC kablo hesapları.	42
Çizelge 4.5. Evirici Hesapları	425
Çizelge 4.6. AC evirici hesabı.	47
Çizelge 4.7. Pano arası hat kesim hesabı.	50
Çizelge 4.8. Monofaze sigorta teknik özellikler	52
Çizelge 4.9. Trifaze sigorta teknik özellikler (AG1).	53
Çizelge 4.10. Trifaze sigorta teknik özellikler (AG2).	54
Çizelge 4.11. Tesis çevresindeki toprağın özgül direncinin ölçümü.	55
Çizelge 4.12. Topraklama hesabı için teknik veriler.	56
Çizelge 5.1. Aylara göre her üç sistemden elde edilen enerji miktarları.	60
Çizelge 5.2. Hareketli Sistem 1 için 25 yıllık üretim tahmini.	68
Çizelge 5.3. Hareketli Sistem 2 için 25 yıllık üretim tahmini.	69
Çizelge 5.4. Sabit Sistem 1 için 25 yıllık üretim tahmini.	70

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: amper
AC	: alternatif akım
a-Si	: amorf silikon
atm	: atmosfer basıncı
CdTe	: kadmiyum tellürid
CIGS	: bakır indiyum galyum selenit
Cos ϕ	: güç faktörü
DC	: doğru akım
E	: enerji (Wh)
h	: saat
Hz	: hertz
I	: güneş ışınım şiddeti (W/m ²)
K	: kelvin
mm	: milimetre
P	: güç (W)
PAC	: alternatif akım altında nominal güç
P _{Gece}	: gece boyunca tüketilen güç
PPV	: nominal fotovoltaik panel gücü
PV	: fotovoltaik panel
SiO ₂	: silikon dioksit
t	: süre (saat)
UN	: nominal DC voltaj
V	: volt
W	: watt
V	: volt
⁰ C	: santigrat derece
Ω	: ohm

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Yeterli düzeyde yer altı enerji kaynaklarına sahip olmayan Türkiye tüketilmekte olan toplam enerjinin yaklaşık % 75 oranındaki bir kısmını yurt dışından döviz ödeyerek ithal etmekte olup enerjide dışa bağımlılığın en yüksek olduğu birkaç ülke arasında bulunmaktadır (YEGM, 2017). Gelişen sanayi ve artan nüfus ile enerji ihtiyacı günden güne artmakta olup enerjide dışa bağımlılığın hem maddi hem de stratejik olarak dezavantajları ülke yönetimlerini alternatif arayışlarına yöneltmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları ve teknolojileri günden güne artan enerji tüketimi ve gelişen teknolojiler ile artık ülkelerin stratejik enerji politikalarında önemli bir yer almaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları her geçen gün hızla fosil kökenli yakıtların alternatifi haline gelmektedir. Buna bağlı olarak Türkiye Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı'nda 2023 yılına kadar yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payının en az % 20 oranına yükseltileceği ön görülmektedir (YEGM, 2017). Ayrıca karbon emisyonunu ve fosil yakıt kaynaklı hava kirliliğinin azaltılması için de yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim önemli bir ihtiyaç halini almıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından en yaygın kullanılan güneş enerjisinin, gelişen teknolojiye paralel olarak kullanımı da hızlı bir şekilde artmaktadır. Türkiye bulunduğu coğrafi konumu sayesinde güneş enerjisinde yüksek sayılabilecek bir potansiyele sahip durumdadır. Gelişen teknolojiye paralel olarak güneş enerjisinden daha fazla fayda sağlayabileceğimiz sistemler geliştirilmektedir. Bunlardan biri güneş takip sistemli fotovoltaik panellerdir. Güneş takip sistemli fotovoltaik panellerin sabit fotovoltaik sistemlere göre daha verimli oldukları bilinmektedir ancak bunun paralelinde sabit fotovoltaik sistemler ile kıyaslandığında güneş takip sistemli fotovoltaik panellerin kullanıldıkları ekipman yazılım ve sistemler nedeniyle ilk yatırım maliyeti daha yüksektir. Bununla birlikte Güneş takip sistemli fotovoltaik panellerin performanslarının iyileştirilmesine yönelik yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır.

Dakkak ve Baballi (2012) yaptıkları çalışmada 35° eğim acısına sahip sabit PV sistem ile tek eksenli hareketli PV sistemleri ele alarak ilk kurulum maliyetleri ve performanslarını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Hareketli sistemde %30 oranında enerji üretiminde artış sağlandığı çalışma sonunda rapor edilmiştir. Huang vd. (2013) tek eksenli güneş takibi ile PV sistemin verimini arttırmaya yönelik yapmış oldukları deneysel çalışmada; güneş takip sistemlerinin sabit sistemlere göre toplam enerji üretimindeki artışını yaklaşık %37,5 oranında bulmuşlardır. Mehrtash vd. (2012) yaptıkları çalışmada kuzey iklim bölgelerinde 4 farklı PV sistemin performanslarını incelemişlerdir. Bunlar i) yatay olarak sabit, ii) açılı sabit, iii) azimut takip ve iv) çift eksenli takip şeklindedir. Kanada Montreal şehri için PVSOL programında yapmış oldukları simülasyonlar neticesinde yatay sabit sistem ile karşılaştırıldığında; açılı sistem, azimut takipli sistem ve çift eksenli takip sistemlerinin yıllık enerji üretimlerindeki artışlarını sırasıyla %16,8 ; %50, ve %55.7 olarak hesaplamışlardır. Günlük analizler neticesinde ise havanın açık olduğu günlerde çift eksenli güneş takip sisteminin performansının daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır. Rao vd. (2015) yaptıkları çalışmada sabit PV sistem ile çift eksenli güneş takipli PV sistemin performanslarını incelemişlerdir. Ağustos 2012 ve Mart 2013 tarihleri arasında yapmış oldukları deneyler neticesinde sabit sistemin toplamda 336.3 kWh, güneş takipli sistemin ise 407.2 kWh lik güç üretimi gerçekleştirdiklerini rapor etmişlerdir. Güneş takipli sistemin sabit sisteme göre %21,2 oranında daha fazla elektrik üretimi ifade edilirken ilk yatırım maliyetlerine göre bakıldığında toplam 450 gün sonra geri ödeme süresinin olduğu çalışmada ayrıca belirtilmiştir. Yapılan çalışmalardan da görüldüğü üzere güneş takipli sistemler sabit sistemlere göre yaklaşık %20 ile %50 arasında daha fazla enerji üretimlerinin olduğu söz konusudur. Bu nedenle günümüzde PV panellerin güneş takipli olacak şekilde tasarlanıp ve imal edilerek güç üretim sistemleri halinde kullanılmasına yönelik birçok çalışma yapılmış (Wang vd. 2013; Bazyari vd. 2014; z- Loschi vd. 2015; Bahrami vd, 2017) ve yapılmaya devam edilmektedir. Hızlanan güneş enerjisi kullanımı ile bu konu üzerine son yıllarda Türkiye’de yapılan çalışmalarda artış göstermektedir. Dağlı (2018) yaptığı çalışmada Nevşehir ili Derinkuyu ilçesinde kurulması planlanan 1 MW gücündeki güneş enerjisi santralının maliyet analizini ele almıştır. Bununla birlikte güneş enerjisi santralının maliyetine etki eden unsurlara, güncel mevzuat ve yönetmeliklere, teşviklere, yatırım araçlarına, ülkemizdeki ve dünyadaki güneş enerjisi santralleriyle

ilgili teşvik mekanizmalarına değinilip sektörün günümüz itibariyle karşılaştığı sorunlar ile ilgili çözüm önerileri sunmuştur. Sadıkoğlu (2018) yaptığı çalışmada güneş enerjisi sistemlerinin çalışma prensipleri, performans değerlendirmeleri ve tozlanmanın elektrik üretimi üzerinde olan etkilerini değerlendirmiştir. Devreye alınmış bir güneş enerjisi santralinde tozlanmanın performans üzerinde ne gibi etkilere sebep olabileceği irdelenmiştir. Bu etkilerin ekonomik olarak oluşturacağı sonuçlar değerlendirilmiştir. Tozlanmanın güneş enerjisi sistemi üzerinde oluşturduğu etkilerin nasıl giderilebileceği ve tesislerin kurulmadan önce dikkate alması gereken bir parametre olarak değerlendirilmesi güneş enerjisi sistemlerine elektrik üretim verilerine olumlu katkı sağlayacaktır. Haydaroğlu (2017) Dicle Üniversitesi bünyesinde tanıtım, eğitim, üretim ve analiz yapabilmek amacıyla kurulmuş olan 250 kWp'lik güneş enerji santralinin simülasyonu PVSyst V6.39 simülasyon programı ile yapılmış ve IEC 61724 standardında belirtilen performans kriterlerine uygun olarak performansı analiz edilmiştir. Yapılan bu analizle, Güneşten elektrik enerjisi üretiminde etkili olan gölgelenme, kurulum açısı, panel verimliliği gibi parametrelerin üretilen enerji miktarına etkisi de belirlenmiştir. Aynı zamanda santralin bir yıllık üretim değerleri simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Gönültaş (2017) yazmış olduğu tezde, Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerin yaygınlaşması ve bu sistemlerden üretilen enerjiye devlet tarafından alım garantisi verilmesiyle birlikte, bu sistemlerin bir yatırım aracına dönüşebileceğini belirtmiştir. Bütün yatırımlarda olduğu gibi güneş enerjisi yatırımlarında da bir fizibilite çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda kurulması planlanan güneş enerji santrallerinde üretilen enerji miktarının tahmin edilmesi büyük öneme sahiptir. Bu tahminlerin tutarlı olabilmesi için dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Zemine monte güneş enerjisi santral yatırımlarında dikkat edilmesi gereken konuların başında sistemin kurulacağı arazinin seçimi gelmektedir. Bu konu kurulacak santralin performansında temel rol oynayacaktır. Seçilen arazinin bakım durumu, arazinin eğimi, çevresindeki yeryüzü şekillerinin gölgeleme etkisi detaylı olarak irdelenmelidir ve projelendirme aşamasına geçildiğinde göz önünde bulundurulmalıdır. Çatı üzeri güneş enerji santrallerinde durum daha farklıdır. Bu sistemlerde, kurulum yapılması planlanan çatının eğimi ve yönünün projeden projeye farklılık göstermesi ve genelde maksimum performans için gereken değerlerden uzak olması nedeniyle kurulacak santralin üreteceği enerjinin kestirimi zor olmaktadır. Gönültaş'ın çalışmasında, kurulması planlanan çatı veya

arazi güneş enerji santrallerinin tasarımı ve performans analizi üzerine çalışılmıştır. Fotovoltaik hücrelerin karakteristikleri ve çalışma ilkelerine değinilmiş, MATLAB ortamında geliştirilen uygulamalar ile panel açısındaki değişimin panel üzerine gelen ışınım ve sistem üzerindeki etkilerinin yanı sıra arazi seçimi sırasında yapılan hatalar sebebiyle oluşacak güç ve enerji kayıplarının analizi yapılmıştır. Eke vd. (2012) yaptıkları çalışmada, iki çift eksenli güneş takip eden (PV) sistemlerin performans sonuçları bir yıllık bir operasyondan sonra analiz edilmiştir. Ekim 2009'da Muğla Üniversitesi kampüsünde aynı modül ve invertörlere sahip iki özdeş 7.9 kW PV sistemi kurulmuştur. PV sistemin ürettiği veriler simüle edilen verilerle karşılaştırılmıştır. PV sistemlerinin performans ölçümleri önce PV sistemleri sabit pozisyondayken yapılmış, sonra PV sistemleri güneşi iki ekseninde (azimut ve güneş irtifa açıları üzerinde) takip ederken kontrol edilmiş ve gerekli ölçümler yapılmıştır. Yıllık PV elektrik verimi, her sistem için sabit eğim açısı 28 derecede 1.459 kW s/kWp enerji derecesi ile 11.53 MW s olarak hesaplanmaktadır. Sabit sisteme kıyasla çift eksenli güneş takip sisteminde %30,79 daha fazla PV elektrik elde edildiği hesaplanmıştır. Şebekeye verilen yıllık PV elektrik, Nisan-2010 ve Mart-2011 arasında çift eksenli güneş takip PV sistemi için 1.908 kW h / kWp ile 15,07 MW saat değerindedir. Simüle edilen ve ölçülen enerji değerleri arasındaki fark %5'ten az olduğu görülmüştür. Sonuçlar ayrıca farklı çözümlerin karşılaştırılmasına ve elektrik çıktısının hesaplanmasına izin vermektedir. R.G.Vieira (2016) Fotovoltaik güneş enerjisi, enerji üretimindeki düşüşün yanı sıra çevresel kaygılar için bir enerji çözümü olarak da keşfedilmiştir. Bununla birlikte, güneşten gelen elektrik üretmek hala diğer kaynaklara rekabetçi bir yük olarak kabul edilmekte, düşük verimlilik ve yüksek üretim maliyeti sunmaktadır. Mali açıdan daha çekici hale getirmek için fotovoltaik sistemlerin verimliliğini arttırmada güneş izleyicileri kullanılmıştır. Ayrıca çalışmada; sabit fotovoltaik güneş paneli ve Mossoró / RN kentinde kurulu tek eksenli bir hareketlilik paneli arasında karşılaştırmalı bir çalışma yapmayı amaçlamaktadır. İncelenen şehir, Brezilya'nın yarı bölgesinde, yüksek güneş ışınımları altında, kuru bir iklimde ve sıcak bir bölgededir. Kurulduktan sonra, önerilen sistemler, sabit ve mobil sistemler arasında çalışma analizi ve performans karşılaştırmaları yapıp; güneş takip sistemi kullanan panelin, sabit panele göre üretilen bölge ve üretilen güç açısından düşük ortalama kazanç gösterdiği sonucuna varılmıştır. Hammad (2017) yaptığı çalışmada Haşimi Üniversitesi, Zarqa, Ürdün'de kurulu sabit ve çift eksenli açık döngü

izleme PV şebekesine bağlı sistemlerin deneysel performansını ve ekonomik parametrelerini karşılaştırmıştır. Her biri 7.98 kWp etiket kapasitesine sahip her iki sistem de, 9 Şubat 2014 - 8 Şubat 2015 tarihleri arasında tam bir yıl boyunca izlenmiştir. Ekonomik analiz geri ödeme süresini incelerken, performans analizi nihai verim ve dönüşüm verimliliği açısından yapılmış ve elektrik maliyetine ek olarak, iç verim oranı tespit edilmeye çalışılmıştır. Gerçek performans sonuçları, takip sisteminin yıllık üretiminin sabit sisteme göre % 31,29 daha yüksek olduğunu göstermektedir. Sabit sistemin yıllık dönüşüm verimliliği % 13,83 iken, takip sistemi için % 13,85'dir. İzleme sistemi için modüllerin sıcaklığı daha yüksek olsa da, bu yakın eşleşme sabit sistemdeki toz birikimine katkıda bulunurken, izleme sisteminin hareketi sürekli olarak tozu temizlemektedir. Çift eksenli takip sistemi sabit sistemden daha fazla enerji üretirken, 20 yıldaki fizibilite çalışması, sabit PV sisteminin Ürdün'de daha uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Geri ödeme süresinin ekonomik analizi, iç getiri oranı ve elektrik maliyeti, bu parametrelerin sabit PV sistemlerine yatırımı desteklediğini ortaya koymaktadır. Mevcut yenilenebilir enerji kaynakları arasındaki rekabet gücünü artırmak için fotovoltaik (PV) sistemin verimliliğini arttırmaya yönelik kapsamlı araştırmalar devam etmektedir J. F. Lee (2013). Güneş takip sistemi, statik güneş sistemine kıyasla PV sisteminden daha fazla güneş enerjisi toplamak için uygulanan yaklaşımlardan birisidir. Güneş izci, günlük ve mevsimsel olarak gün boyu doğudan batıya doğru pozisyonunu takip etmektedir. Böylece, PV panelleri maksimum güneş ışığı alabilir ve daha fazla enerji üretebilir. Çalışmada, düşük maliyetli bir prototip çift eksenli güneş takip sistemi önerilmiştir. Çift eksenli güneş izleyici prototipi, güneşin hareketini tespit etmek ve yıl boyunca buna göre takip etmek için düşük maliyetli mikrodenetleyici ve ışık sensörleri kullanılmıştır. Çift eksenli takip sisteminin ve sabit pozisyon sisteminin performansı, Malezya iklimi altındaki dış ortama bağlı olarak nitel ve nicel olarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalı sonuçlar, sabit güneş sisteminin ışınım ve enerji kazanımı açısından performansının çift eksenli takip sistemi ile büyüdüğünü göstermiştir.

Yapılan bu çalışmada da literatürdeki yapılan çalışmalardan esinlenerek İstanbul iklim şartları için aynı teknik özelliklere sahip iki adet güneş takip sistemli fotovoltaik paneller ve sabit fotovoltaik panel sistemlerinin enerji üretimleri karşılaştırılmış olup

güneş takip sistemli fotovoltaik panel sisteminin ekonomik işletme ömrü boyunca sağladığı fayda ve ekonomik yönden uygulanabilirliği araştırılmıştır.



BÖLÜM 2

GÜNEŞ ENERJİSİ

2.1. GÜNEŞ

Güneş dünya üzerinde kullanılan en büyük enerji kaynağı olmakla birlikte dünya üzerinde kullanılan birçok enerjinin de temelini oluşturmaktadır. Güneş ışınları sayesinde ısınan havanın yer değiştirmesi ile rüzgâr enerjisinin oluşması, ısınan deniz sularının hareketleri ile dalga enerjisinin oluşması güneşin temelini oluşturduğu diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına birer örnek olarak kabul edilmektedir. Güneş, yenilenebilir enerji kaynakları dışında da dünya üzerinde fotosentez reaksiyonunun temelini oluşturmakta ve dolaylı olarak fosil yakıtlarında oluşmasında etkili olmaktadır.

Güneşin çekirdek bölgesinde bulunan hidrojen atomlarının helyum atomlarına dönüştüğü füzyon reaksiyonlarının sonucu olarak yüksek miktarda enerji açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan bu enerji bütün uzaya ve dünyamıza ulaşmaktadır. Güneşin yapısında bulunan hidrojen atomlarının yüksek sıcaklığın etkisi ile daha ağır bir element olan helyum atomuna dönüşmesi esnasında belirli miktarlarda kütle kaybı meydana gelmektedir. Güneşin bugünkü yaşı yaklaşık olarak 4,5 milyar yıl olduğu tahmin edilmektedir. Günümüzde yapılan tahminler güneşin 5 milyar yıl daha çekirdeğinde gerçekleşen hidrojen helyum füzyonunun devam edeceği yönündedir. Güneşin çekirdek kısmındaki basıncın 340 milyar atm ve çekirdek sıcaklığının ise yaklaşık 15 milyon ⁰ C seviyelerinde olduğu düşünülmektedir. Bu fiziksel şartlar altında bir saniye gibi kısa bir süre içerisinde 657 milyon ton hidrojen atomu helyum atomuna dönüşmektedir. Bu dönüşüm esnasında her saniye 5 milyon ton madde enerjiye dönüşmektedir. Ancak açığa çıkan bu yüksek seviyedeki enerjinin çok kısıtlı bir bölümü dünyamıza ulaşmaktadır.

2.2. GÜNEŞ ENERJİSİ VE KULLANIMI

Güneş, dünyamızda ekolojik sistemin devamı için gerekli olan enerjisinin çok büyük bir bölümünü sağlamaktadır. Bir diğer deyişle Dünya üzerindeki canlılığın en önemli kaynağıdır. Güneş, Dünya'ya en yakın yıldız olmakla birlikte Dünya ile arasındaki mesafe yaklaşık olarak 151,106 milyon kilometredir. 1,4 milyon kilometrelik bir çapa sahip olan Güneş' in çekirdeğinde ki sıcaklığı milyon dereceler ile ifade edilmektedir. Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde bulunan hidrojen atomlarının helyum atomlarına dönüştüğü füzyon esnasında oluşmaktadır. Bu füzyon reaksiyonları esnasında açığa çıkan kütle değişimleri ısı enerjisine dönüşmekte ve uzay boşluğunda yayılmaktadır.

Güneş çekirdeğinde meydana gelen füzyon tepkimesi esnasında, proton bombardımanına maruz kalan hidrojen atomları döteryuma dönüşmektedir. Kararsız halde bulunan bu döteryum çekirdekleri birleşerek helyum atomuna meydana getirmektedirler. Gerçekleşen füzyon reaksiyonu esnasında ortaya çok yüksek miktarda enerji açığa çıkmaktadır. Gerçekleşen füzyon tepkimesi sonucunda meydana gelen kütle kayıpları ise enerjiye dönüşmektedir. Günümüzden tahmini 5 milyar yıl sonra Güneş çekirdeğinde bulunan Hidrojenler tamamen tükenmesinin ardından füzyon reaksiyonlarının gerçekleşmemesi sonucunda Güneşin kütlelerinin çekim kuvveti etkisi altında büzülerek beyaz cüce adı verilen yapıyı oluşturması beklenmektedir.

Güneş çekirdeğinde meydana gelen bütün bu füzyon tepkimesi sonucunda ortaya çıkan enerji miktarının çok düşük bir bölümü yeryüzüne ulaşabilmektedir. Dünya yerkabuğuna ulaşan güneş ışınlarının düşmesinin nedeni ise atmosferde bulunan gazların bu ışınların büyük bir kısmını absorbe etmesidir. Güneşin yüzeyinin yaklaşık olarak sıcaklığı 6000 K olarak tahmin edilmekte olup ve Güneş tarafından yayılan ışınımın yalnızca %70 civarı bir kısmı atmosferden geçerek yeryüzüne ulaşabilmektedir. Dünya atmosferinin en dışında kalan yüzeye ulaşan enerji miktarı metrekare başına 1.367 Watt değerlerindedir, atmosferden geçerek Dünya yüzeyine ulaşan Güneş enerjisinin miktarı ise metrekare başına ortalama 1.367 W/m^2 'dir ve bu değer güneş sabiti olarak kabul edilir.

Güneş enerjisi sistemlerinin projelendirme esnasında güneş ışınım verileri en önemli kıstas durumundadır. Ülkemizde Güneş enerjisinin en yaygın kullanım amacı sıcak su elde etmek olduğu ifade edilebilir. Çok yaygın olamamakla birlikte güneş enerjisi ile binaların ısıtılması ve soğutulması gibi amaçlarla da kullanılabilir. Ancak bu alanlardaki Güneş enerjisinin depolanması ve dönüştürülmesi için ihtiyaç duyulan teknolojilerin yetersizliği günümüzde bu uygulamalar önündeki en büyük engeli teşkil etmektedir.

Kısmen daha yeni bir güneş enerjisinden faydalanma yöntemi ise fotovoltaik sistem uygulamalarıdır. Fotovoltaik sistemler üzerlerinde bulundurdukları güneş pilleri vasıtası ile piller üzerine gelen güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine çevirmektedirler. Bu güneş pilleri doğru akım üretmektedirler.

Güneş pilleri birbirlerine paralel veya seri bağlanabilmektedirler ve bu piller tarafından üretilen gerilim ve akım miktarı arttırılabilmektedir. Güneş pilleri tarafından üretilen doğru akımı bir akümülatör vasıtası ile depolanabileceği gibi, eviriciler (invertörler) kullanılarak dönüştürülmüş alternatif akım olarak da kullanılabilir. Güneş pilleri, uydu benzeri uzay araçlarında kullanılmak üzere gelişimi hız kazanmış; ardından özellikle mevcut elektrik şebekelerinden uzak noktalarda elektrik üretimine alternatif bir yöntem olarak kullanımı yaygınlaşmaktadır. Dünya üzerinde güneş enerjisinden en yüksek verim Güneş Kuşağı olarak adlandırılan bölgede elde edilmektedir. Güneş Kuşağı, 45° kuzey-güney enlemleri arasında kalan kısımlardır.

2.2.1. Güneş Enerji ve Fotovoltaik Sistemlerin Avantajları

1. Güneşin olduğu her yerde kullanılabilirler. Güneş enerjisi ile çalıştığından ek bir yakıtı ihtiyacı yoktur. Herhangi bir fosil yakıtı, yakıtın depolanmasına, taşınmasına ihtiyaç duymadan tamamen bağımsız olarak enerji üretebilmektedirler. Bu sayede herhangi bir ek yakıt masrafı gerektirmeden enerji üretebilmektedirler. Kısaca sistemin elektrik üretimi esnasında ihtiyaç duyduğu enerjinin bir maliyeti bulunmamaktadır.
2. Fotovoltaik sistemlerin en önemli avantajlarından birisi dünya üzerinde her yerde öngörülebilir ölçülerde ulaşılabilen bir enerji kaynağı olan güneş

enerjisinin kullanılmasıdır. Rüzgâr enerjisi ve hidrolik enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının zaman içinde değişen rejimleri ile üzerlerine kurulmuş enerji üretim tesislerinin verimleri ciddi ölçüde değişebilmektedir. Ancak bu tip değişimler güneş enerjisinde, sistemin ekonomik ömrü boyunca öngörülebilir aralıklar içerisinde meydana gelmektedir. Ayrıca fotovoltaik sistemler neredeyse her türlü meteorolojik koşulda üretim yapabilmektedirler.

3. İhtiyaç duyulan enerjinin üretilebileceği kaynakların çeşitliliğini artırmakta ve ülkelerin enerji bağımlılığını azaltmakta pozitif etki sağlayabilmektedirler.
4. Fotovoltaik sistemler uzun kullanım ömürlerine sahiptirler. Kurulumdan sonra uzun yıllar sorunsuz olarak çalışabilmektedirler. Enerji üretimi ile ilgili teorik olarak herhangi bir son kullanım ömrü olmamasına karşın ekonomik ömürleri genel olarak 20 ila 25 yıl kabul edilmektedir.
5. Fotovoltaik sistemler üzerinde bulunan hareketli parçalar hidrolik santraller, rüzgâr santralleri gibi diğer elektrik üretim tesisleri üzerinde kullanılan hareketli parçalara kıyasla yok denecek kadar azdır. Hareketli parçalar, jeneratörler, türbinler düzenli olarak bakıma ihtiyaç duyarken fotovoltaik sistemlerin bakım ihtiyaçları ve maliyetleri diğer sistemlere kıyasla çok düşüktür. Özellikle sabit fotovoltaik sistemlerde yalnızca paneller üzerinde üretimi doğrudan engelleyebilecek toz, kar, kir ve benzeri engellerin temizliğinin yapılması yeterli olmaktadır. Bu sayede düşük bakım masrafları ve oldukça düşük işletme maliyetleri büyük bir avantaj olarak kabul edilmektedir.
6. Fotovoltaik sistemlerde elektrik üretiminde kullanılan güneş enerjisinin her yerde ulaşılabilir olması sayesinde, üretim tesisinin tüketim noktasına olabildiğince yakın bölgelerde kurulması mümkündür. Bu sayede elektriğin iletimi veya depolanması gibi mecburiyetler ortadan kalkmaktadır. Ayrıca iletim sebebiyle oluşacak kayıpların da minimum seviyede tutulması mümkün hale gelmektedir. Kısaca bu teknoloji sayesinde elektrik enerjisine ihtiyaç duyulan her yerde üretim mümkün olabilmektedir.
7. Fotovoltaik sistemler üzerinden elektrik enerjisi üretim aşamasında herhangi bir fosil yakıt ve benzeri tüketim söz konusu olmadığından çevreye zararlı olan sera etkisi oluşturabilecek gaz açığa çıkmamaktadır.

8. Güneşten gelen radyasyonu kullanarak direk elektrik enerjisine çeviren en verimli sistemdir.
9. Ham madde olarak kullanılan silisyumun doğada bol miktarda ve kolayca bulunabilmesi de fotovoltaik sistemler imalatı için bir avantaj teşkil etmektedir.
10. Fotovoltaik teknoloji kullanılarak, güneş enerjisi ile çalışan hesap makinalarında olduğu gibi çok küçük değerlerde üretimler yapılabildiği gibi ihtiyaca dönük olarak MW değerlerine ulaşabilecek tesislerde kurulabilmektedir.
11. Modüler bir yapıya sahip olduklarından dolayı ihtiyaç duyulan üretim kapasitesine paralel olarak kapasite artırımı veya azaltımı mümkündür. Sistem üzerine eklenecek veya sistemden çıkartılacak paneller sayesinde tesis kapasitesi ile rahatlıkla değiştirilebilmektedir.

2.2.2. Güneş Enerji ve Fotovoltaik Sistemlerin Dezavantajları

1. Fotovoltaik sistemlerin en önemli dezavantajı ve gelişmesinin önündeki en büyük engel yüksek sayılabilecek ilk yatırım maliyetine sahip olmalarıdır.
2. Bulutlu, yoğun yağışlı havalarda ve gece boyunca fotovoltaik sistemlerin üretimleri ciddi ölçüde düşmektedir. Bu nedenle bir tesis veya binanın tek enerji kaynağı olarak kullanılması ciddi sorunlar oluşturmaktadır. Üretim düştüğü zamanlarda ihtiyaç duyulan tüketimi desteklemek için yüksek maliyetlere sahip depolama üniteleri gerekmektedir.
3. Fotovoltaik sistemlerin birim yüzeye oranla ürettikleri enerji miktarı diğer enerji üretim teknolojilerine kıyasla çok düşüktür. Bu nedenle fotovoltaik tesisleri kuruldukları yerlerde büyük alanlar kaplamaktadırlar.
4. Zaman içerisinde panel verimlilikleri düşmektedir.

Bu negatif etkiler teknik gelişmelerle birlikte zaman içinde en aza indirilmesi öngörülmektedir (Abu-Zour ve Riffat 2006).

Yenilemeyen enerji kaynaklarına kıyasla güneş enerjisi sistemlerinin çevreye verdiği zararlı etkilerin çok daha az olduğu bilinen bir gerçektir. Bu nedenle güneş enerjisi sistemlerine gereken desteğin verilmesi büyük önem taşımaktadır.

2.2.3. Dünya’da Güneş Enerjisinin Durumu

Sanayileşme ve buna paralel olarak enerji kaynaklarına ulaşma çabaları tüm dünya için çok acı olayların yaşanmasına neden olmuş, dünya savaşları bu kaynakları ele geçirmek adına yapılmıştır. 1970’li yıllara gelindiğinde bu yaklaşımın sürdürülebilir olmadığı kabul görmeye başlanmıştır. Zaman içinde hükümetlerin ve akademik camianın katkıları ile ulusal ve uluslararası birçok toplantı, kongre ve çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda ortaya çıkan görüşler ve raporlar sayesinde 1970’lerden günümüze dek bu konuda ciddi gelişmeler yaşanmaktadır. Bu süreç boyunca dünya devletlerinin enerji kaynaklarına olan bağımlılıklarının yanında sürekli ve güvenilir enerji kaynakları ve teknolojileri de önemli bir gündem haline gelmiştir. Jeotermal ve nükleer enerji hariç diğer tüm enerji kaynaklarının ana kaynağı olan güneş enerjisi bu konuda ele alınan en büyük umut kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Tüm dünyada 40 yıldır güneş enerjisi alanında yürütülen çalışmalar son dönemde hız kazanmıştır. Bunun en büyük nedenlerinden birisi dünyadaki petrol tekellerinin etkisiyle Temmuz 2008’de varil fiyatı 147 dolara kadar artan petrol ve paralelinde kömür ve doğalgaz fiyatlarının artması olarak gösterilmektedir.

İkinci olarak ve asıl üzerinde durulması gereken önemli bir neden, dünya enerji sektörünün, iklimlerde meydana gelen değişimlerden ve bunun sonucunda ortaya çıkan sorunlardan dolayı arayış içerisinde olmasıdır. Fosil kaynakları yetersiz olup enerjide dışa bağımlılığı rahatsızlık veren gelişmiş ülkeler, bu arayış içerisinde güvenilir enerji kaynaklarına yönelerek, yenilenebilir enerji ve temiz teknolojiler konularında çalışmalarını giderek artırmaktadırlar. Dünyanın önde gelen petrol şirketleri dahi stratejik hedeflerini belirlerken alternatif enerji kaynaklarının kullanımını öncelikleri arasına almış durumdadırlar. Gelişmiş ülke ve şirketler yenilenebilir enerjiyi alanını yalnızca enerji arzı açısından değil aynı zamanda

ekonomik yatırımların yapılabileceği ve yeni istihdam alanlarının oluşturulabileceği bir fırsat alanı olarak değerlendirilmektedir. Bundan dolayı dünya devlerinin fosil kaynaklar üzerinde olan rekabetleri önümüzdeki yıllarda yeni teknoloji pazarına da yansiyacaktır. Güneş enerjisi son dönemde dünyanın özellikle iklim değişikliği ile ilgili sorunların çözümü olarak gördüğü en önemli kaynak durumundadır.

Güneş enerjisinden ısıtma, soğutma, direkt ve endirekt elektrik üretiminde yararlanılmakta olup, farklı alanlarda kullanımı giderek artmaktadır. Önümüzdeki 30 yıla kadar dünya enerji ihtiyacının % 26'sının sadece güneşten sağlayacağı tahmin edilmekte olup 2 milyondan fazla kişiye iş imkânı sağlanması beklenmektedir. Ayrıca 2020'li yıllarda güneş enerjisi ile elektrik üretiminin diğer kaynaklar ile üretimle rekabet edebilir seviyeye geleceği öngörülmektedir (Cebeci 2017).

2.2.4. Ülkemizde Güneş Enerjisi Potansiyeli

Ülkemizde yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi bakımından çok şanslı konumdadır. Ülkemizde ortalama güneşlenme süresinin yüksek olması ve ayrıca güneş enerjisi potansiyelimizin ülkemize dağılımı göz önüne alınırsa tüm bölgelerimizden her türlü güneş enerjisi uygulamasına elverişli olduğu söylenebilir.

EİE'nin yapmış olduğu çalışma kapsamında, 1966-1982 yılları arasında Devlet Meteoroloji İşleri (DMİ) Genel Müdürlüğü tarafından güneşlenme süreleri ve ışınım şiddetleri ölçülmüştür. Bu ölçüm verilerinin sonuçlarına ülkemizin güneşlenme süresi günlük toplam 7,2 saat ve ortalama yıllık 2.640 saattir. Ortalama ışınım şiddeti ise 1.311 kWh/m²- yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m²) olarak ölçülmüştür (Karamanav, 2007).

Bununla birlikte ülkemizde güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi coğrafi konuma göre farklılıklar göstermektedir. Türkiye'de en yüksek güneş potansiyeline sahip olan coğrafi bölge Güney Doğu Anadolu Bölgesidir.

Yıllar içinde gelişen teknolojinin de yardımı ile yapılan yeni ölçümler ve çalışmalar sonucunda Türkiye'nin güneş enerji kapasitesinin daha önce ölçülmüş olan bu

değerlere kıyasla çok daha yüksek bir potansiyele sahip olduğu tespit edilmiştir. 1992 yılından itibaren EİE ve DMİ, ülkemizdeki güneş potansiyelinin daha güvenilir ölçülebilmesi için çeşitli saha uygulamaları ve çalışmalar yapmaktadırlar. Bu çalışmalar sonucunda, ülkemizin gerçek güneş potansiyelinin daha önce ulaşılmış değerlere kıyasla % 20-25 daha fazla çıkması öngörülmektedir. Buna göre yaklaşık olarak güneş ışınımının 1.500 kWh/m²-yıl değerinden daha fazla olduğu tahmin edilmektedir.



BÖLÜM 3

MADDENİN YAPISI VE GÜNEŞ PİLLERİ

3.1. MADDENİN YAPISI VE YARI İLETKENLER

Madde, bir çekirdek ve bu çekirdek etrafında dönen elektronlardan oluşmaktadır. Atom çekirdeği pozitif yüklü olmakla birlikte oransal olarak çok ağır bir yapıya sahiptir. Elektronlar ise negatif yüke sahip olup atom çekirdeğinin etrafında belirli yörüngelerde hareket etmektedirler. Bu iki zıt yük herhangi bir dış tesir olmaması durumunda birbirlerini dengelemektedirler. Elektronlar atom çekirdeğine olan uzaklarına yani üzerinde hareket ettikleri yörüngenin yarıçapı ile orantılı bir şekilde enerjiye sahiptirler. Elektronlar buldukları konuma göre kinetik ve potansiyel enerjilere sahiptirler. Elektronlar, her biri belirli sayıda elektron bulundurabilen enerji bantları adı verilen alanlarda bulunmaktadır. Bu enerji bantları art arda gelmektedirler. Dış bir kaynaktan enerji almış olan elektron bir üst seviyede bulunan enerji bandına geçmektedir. Eğer bir elektron daha düşük bir enerji bandına geçecek olur ise bu sefer dışarıya enerji verecektir. Son tabakada bulunan elektronlar, denge elektronları veya valans elektronları olarak adlandırılmaktadırlar. Bu valans elektronları maddeler arasında kimyasal bileşikler oluşmasını sağlamaktadır. Son tabakası dolu olmayan bir atom, etrafında bulunan başka bir atoma ait elektronu kendine bağlama eğilimine sahiptir. İç tabakalarda bulunan elektronlar ise dış tabakalarda bulunan elektronlara kıyasla atom çekirdeğine kuvvetli bir şekilde bağlıdırlar. Atom üzerine dışarıdan ısıl bir enerji uygulanır ise, elektronun yörünge üzerindeki titreşimi artış gösterecektir. Elektronun, mevcut yörüngesi değişmediği sürece herhangi bir enerji yayılımı veya enerji absorpsiyonu meydana gelmemektedir. Elektron dışarıdan bir dış etki ile belirli bir enerji seviyesine ulaşarak mevcut atom yörüngesinden ayrılabilir. Bu durumda geride kalan atom ise pozitif iyon halini almaktadır.

Maddeler elektrik karakteristiklerine göre 3 kısımda incelenebilirler. Bunlar yalıtkan maddeler, iletken maddeler ve yarı iletken maddelerdir. Fotovoltaik sistemlerde elektrik üretimi amacıyla kullanılan malzemeler yarı iletken maddelerdir. Elektrik dirençleri 10^{-2} - 10^9 Ω cm değerleri arasında kalan malzemeler yarı iletken kabul edilmektedir. Fotovoltaik sistemlerde ham madde olarak yarı iletken silisyum (Si) en yaygın kullanıma sahip olan maddelerdendir. Yarı iletkenlerin fotovoltaik sistemlerde kullanılmasına sebep olan en önemli özellikleri elektrik iletim özelliğinin sıcaklık değişimi ile artabilmesidir. Yarı iletken malzemelerin sıcaklıkları arttırıldıkça, öz dirençleri azalmakta ve iletken malzemelerde gerçekleşenin aksine elektrik iletkenlikleri artmaktadır. Sıcaklık dışında yarı iletken malzemelerde iletkenliğe etki eden bir başka faktörde malzemenin saflık oranıdır.

Atomların son yörüngelerinde buldukları denge elektronlarının serbest hale geçmeleri durumunda o madde elektriksel olarak artık iletken bir özellik sergileyecektir. Bir malzemeyi elektriği iletilebilir hale getirmek için malzeme üzerine harici bir enerji uygulanmalıdır. Uygulanan bu enerji sonucunda valans bandında yer alan elektron koparak iletkenlik bandına geçiş yapacaktır. Ancak yarı iletken malzemelerde valans bandı ile iletkenlik bandı arasında yer alan ve üzerinde herhangi bir elektron olmayan yasak bant adı verilen bir bölge bulunmaktadır. Yasak bant yarı iletken malzemelerde; yalıtkan malzemelere göre daha küçük, iletken malzemelere göre ise daha büyüktür. Yasak bant dışarıdan bir enerji ile etkilenen valans bandı üzerindeki elektronun koparak iletkenlik bandına geçmesini güçleştirmektedir. Dışardan uygulanan enerji ile valans bandından iletkenlik bandına geçen elektronlar artık akım taşıyabilme özelliğini kazanmış olacaklardır.

Yarı iletken atomlarda, bir elektronun valans bandından koparak, yasak bandı geçmesi ve ardında iletkenlik bandına ulaşabilmesi için yaklaşık ortalama 1 eV değerinde bir enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Dışardan verilen enerji sonucunda valans bandından kopan elektronun yeri başka bir elektron tarafından doldurulacaktır.

3.1.1. N (Negatif) Tipi Yarı İletken

Fotovoltaik sistemlerde, güneş pili ham maddesi olarak; kadmiyum tellür, galyum arsenit ve en yaygın olarak ise silisyum kullanılmaktadır. Bu maddeler yarı iletken özellik göstermektedirler. Bu malzemelerin fotovoltaik hücre yapılarında kullanılabilmesi için negatif veya pozitif katkılama adı verilen bir işleme tabi tutulmalıdırlar. Katkılama işlemi, kullanılmak istenen saf yarı iletken malzemenin eritilmesi ve oluşan bu eriyiğin içerisine ihtiyaç duyulan katkıların ilave edilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Katkılama işleminden sonra elde edilen malzemenin pozitif veya negatif tip olduğunu eriyik halde iken içine katılan maddeler belirlemektedir.

En yaygın kullanıma sahip olan silisyumun güneş pillerinde kullanılabilir hale getirilmesi için eriyik içerisine periyodik cetvelde 5. Grup elementlerinden eklenmektedir. Silisyumun en dışarıdaki yörüngesinde 4 elektron bulunmaktadır. Eriyik içerisine katılan beşinci grup elementlerinin dış yörüngesinde bulunan tek elektron, silisyumun kristal yapısı içine katılmaktadır. Periyodik cetvel üzerinde 5. Grupta bulunan elementler “N Tipi” katkı maddesi adını almaktadırlar. N tipi yarı iletkenlerin katkılama süreçlerinde kullanılan katkı maddeleri elektron vererek, yarı iletken malzemenin elektron sayısında artmaya sebep olmaktadır. Bu nedenle bu tip katkı malzemeleri “verici” olarak da adlandırılmaktadırlar.

3.1.2. P (Pozitif) Tipi Yarı İletken

Pozitif tip veya P tipi olarak adlandırılan yarı iletkenlerin katkılama süreci de N tipi iletkenlerinki ile benzerlik göstermektedir. P tipi yarı iletken malzemenin üretimi esnasında da saf eriyik içerisine ihtiyaca yönelik katkı malzemeleri eklenmektedir. Ancak burada farklı olarak silisyum veya germanyum gibi yarı iletken malzeme eriyiklerinin içerisine son yörüngesinde 3 elektron bulunduran indium, galyum, bor, alüminyum gibi katkı maddeleri eklenmektedir. Eriyikte soğumaya bağlı meydana gelen katılma esnasında katkı malzemesi olarak kullanılan atomlar, komşu atomlar arasında kovalent bağ oluşturmaktadır. Yarı iletken maddenin, örneğin silisyumun sahip olduğu elektronlardan biri bağ yapacak katkı malzemesi atomu bulamaz ve elektriksel olarak pozitif yüklü bir iyon halini alacaktır.

3.1.3. P – N Kavşığı

Monokristal bir yapıya sahip olan P tipi bir yarı iletkenin N tipine dönüştüğü bölgeye P-N kavşığı adı verilmektedir. Katkılama işlemi sonucunda meydana gelen N ve P tipi yarı iletken malzemelere ayrı ayrı bakıldığında boşta kalan yüklerin herhangi bir yönelimi söz konusu olmamaktadır. Ancak N ve P tipi yarı iletkenlerden oluşan malzeme katmanları birbirleri üzerine dizilmeleri durumunda aralarında P – N kavşığı meydana geldiği görülmektedir.

N tipi yapısında bulunan fazla elektronlar P tipi yarı iletken tarafından kapılmaktadırlar. N tipi bölgelerinde pozitif iyonize atomlar bulunmaktadır. P tipi bölgelerinde ise, negatif iyonize atomlar bulunmaktadır. Farklı özelliğe sahip bu yarı iletkenler temas ettirildiklerinde N tipi bölgesi içerisinde bulunan elektronlar P tipi özelliğini taşıyan bölgelere doğru hareket etmeye başlayacaklardır. P tipi yarı iletken bölgesinde bulunan elektron boşlukları ise N tipi bölgesine doğru hareket etmeye başlayacaktır. Bu sayede N tipi bölgede kalan atomlar pozitif, P tipi bölgede kalan atomlar negatif olarak iyonlaşmış olacaklardır. Kavşağın iki tarafında da iyonize halde bulunan atomlar, kristal içerisinde, N yönünden P yönüne doğru olan elektriksel bir alan meydana getirilmektedir. Bu kesişim noktasında serbest yük bulunmamaktadır. Bu bölgeye geçiş bölgesi adı verilmektedir. Kavşakta oluşan bu potansiyel fark, temas halinde bulunan iki farklı özellikteki yarı iletken malzeme arasında elektron ve boşluk geçişleri için bir potansiyel duvar meydana getirir. N bölgesinden ayrılan bir elektron, geride bir boşluk bırakacaktır ve bu boşluk elektronu kendine doğru çekme eğilimine sahiptir. Aynı zamanda N bölgesinden ayrılan bu elektronun önünde bulunan P tipi bölgede içerisindeki negatif yükler elektronu iteceklerdir. Kısaca kavşak üzerinde oluşan elektriksel alan, yakınlarında bulunan bu elektronu P bölgesinden N bölgesi yönünde itecektir. P bölgesinde valans ve iletkenlik bandı enerjileri N bölgesine kıyasla daha yüksek değerlerdedirler.

P-N kavşığı üzerine yeterli enerjiye sahip bir güneş ışını düşmesi durumunda P tipi bölge pozitif, N tipi bölge ise negatif yüklenecek ve bu iki bölge arasında bir potansiyel fark meydana gelmiş olacaktır.

3.2. FOTOVOLTAİK TEKNOLOJİSİ

Güneş enerjisi insanlığın ilk var olduğu günden beri, aydınlatma, ısınma gibi en temel ihtiyaçlarının karşılanmasında kullanılmıştır. Ancak günümüz modern anlamında güneş enerjisinden faydalanabildiğimiz fotovoltaik olarak adlandırdığımız güneş enerjisinin direkt olarak elektriğe dönüştürülmesi çalışmaları yalnızca son 70 yıllık bir dönemde faydalı bir şekilde kullanılmıştır. Fotovoltaik teknolojileri üzerine ortaya çıkan bu yeni çalışma alanı ve başarılı denemeler sonucunda ortaya çıkmış olan fotovoltaik sanayisinin, süratle büyüyen ve gelişmekte olan dünya enerji geleceğinin önemli bir parçası olması beklenmektedir.

Kelime olarak ışık manasında ki Photo ve elektrik gerilim birimi olan Volta terimlerinin bir araya gelmesi ile “Photovoltaic” kelimesi oluşmuştur. Fotovoltaik teknolojisi 180 yılı aşkın süredir gelişmektedir, ancak son çeyrek asırda bu gelişme son derece hız kazanmıştır. Fotovoltaik çok yakın geçmişte güç üretimi için uygulanabilir bir teknoloji haline gelmiştir. Fotovoltaik sistemlerin icadı, Fransız bir fizikçi olan Edmund Becquerel tarafından 1839 yılında fotovoltaik etkiyi keşfetmesi olarak kabul edilir. O tarihte henüz 19 yaşında olan Edmund Becquerel iletken bir eriyikte bulunan iki platin elektrotuna güneş ışığı düştüğünde bir elektrik akımı meydana geldiğini tespit etmiştir. Ancak meydana gelen elektriksel etkinin çok küçük olması ve o dönemde elektrik akımının pratik uygulama alanlarının çok kısıtlı olması sebebiyle bu keşiften o dönemde anlamlı bir fayda üretilmemiştir.

1873 yılında da İngiliz mühendis Willoughby Smith, sualtı telgraf kabloları için materyal testleri sırasında selenyumun ışığa duyarlılığını gözlemlemiştir. Işıksız ortamda yüksek rezistans gösteren selenyum ışığa maruz kaldığında yüksek iletkenlik göstermiştir. Daha sonralarda bu direncin ışığın yoğunluğuyla ters orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Fotoiletkenliğin bu keşfi, güneş enerjisinden faydalanmak için selenyum maddesinin nasıl kullanılabileceği hakkında çalışmalara yol açmıştır.

Albert Einstein konuyla ilgili olarak 1904 yılında fotoelektrik etki, ışığın kuantum doğası konularında ki çalışmalarını bilim dünyası ile paylaşmıştır. Ancak Albert

Einstein tarafından yapılan bu çalışmalardan sonra dahi bu fiziksel etki uzunca bir süre pratik herhangi bir uygulama alanı bulamayan, sadece bir fizik deneyi olarak kalmıştır. Günümüzde anladığımız ve kullandığımız fotovoltaiik hücrelerin ilk üretimi ancak yarıiletken teknolojisindeki gelişmeler sonucunda mümkün hale gelmiştir. Günümüzde yüksek saflık derecesine sahip saf silisyum, fotovoltaiik hücrelerin üretiminde kullanılan en temel ve önemli malzemedir. İlk silisyum kullanılarak üretilen fotovoltaiik hücre Calvin Souther Fuller, Daryl Chapi, Gerald Pearson adlı üç bilim insanı tarafından 1954 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde üretilmiştir. Üretilen bu ilk hücre henüz % 6 oranında bir verime ulaşabilmekteydi. Ancak bu verim yapılan çalışmalar sonucunda çok kısa bir sürede % 10'a kadar yükseltilebilmiştir.

1839 yılında Edmund Becquerel tarafından keşfedilen fotoelektriksel etki o tarihlerde pratik uygulama alanı için bir karşılık bulamasa da, 1950'li yıllarda özellikle soğuk savaşın etkisi ile kızışıp hızlanan uzay çalışmalarında kendisine ciddi ve önemli bir kullanım alanı bulmuştur. Bu alanda ilk olarak 17 Mart 1958 yılında Amerika Birleşik Devletleri tarafından uzaya yollanan Vanguard adlı dünya yörüngeli uyduda 108 adet fotovoltaiik hücre kullanılmıştır. Bir uyduda ilk defa kullanılmakta olan fotovoltaiik hücre teknolojisi, Vanguard uydusu ile haberleşmenin kesildiği 1964 yılına kadar beklenenin çok üzerinde bir süre uydunun ihtiyaç duyduğu elektriği sağlamıştır. Bu sayede artık ciddi bir kullanım potansiyeli fark edilen fotovoltaiik sistemlerin gelişimi hız kazanmıştır. Ancak ham madde ve üretim aşamasında ki yüksek maliyetleri nedeniyle fotovoltaiik sistemlerin askeri amaçlar ve uzay araçları dışında kullanımı ciddi ölçüde sınırlı kalmıştır (Keskinel , 2015).

Zaman içerisinde yapılan çalışmalar ve üretim teknolojilerinin gelişmesi ile fotovoltaiik hücrelerin üretim maliyetleri kısmen daha makul seviyelere inmiştir. Saatler, hesap makineleri, yol aydınlatma sistemleri gibi düşük elektrik enerjisine ihtiyaç duyulan alanlarda kullanımları yaygınlaşmıştır. Ardından elektrik şebekelerinden uzak bölgelerde ihtiyaç duyulan elektriğin üretimi için şebekeden bağımsız çalışan fotovoltaiik sistemler de kullanılmaya başlanmıştır.

Fotovoltaik sistemlerde çalışma prensibi temel olarak, güneş ışığına maruz kalan yarı iletken malzemenin doğru akım üretmek için elektrik enerjisi elde edilmesi olayına dayanmaktadır. Bu enerji dönüşümü esnasında sistemde herhangi bir hareketli makine elemanı bulunmamaktadır. Bu olay tamamen pil üretiminde kullanılan yarı iletken malzemenin fiziksel özelliğine bağlıdır. Fotovoltaik etki kısaca yarı iletken bir malzemenin, belirli bir enerji seviyesinin üzerinde ki fotonları absorbe etmesi sonucunda bu yarı iletken malzemeye ait elektronların hareket etmesi ve bu hareket sonucunda bir doğru akımın meydana gelmesi olayıdır. Bu etki fotoelektrik etki olarak da tanımlanmaktadır.

Günümüzde uzay çalışmalarında başarılı bir şekilde kullanılmakta olan silikon kristalin kullanılarak üretilen güneş pillerinin verimliliğini artırma çabaları devam etmektedir. Diğer bir taraftan da alternatif olmak üzere çok daha az ham madde gereksinimine sahip bir teknoloji olan ve bu sebepten dolayı üretim maliyetlerini düşürebilecek ince film güneş pilleri üzerindeki çalışmalara hız verilmiştir. Fotovoltaik teknolojisi ile güneş enerjisinden elektrik üretiminin gayet kolay, basit ve çevreci bir yöntem olarak hızla kullanım alanlarını arttırmaktadır. Günümüzde özellikle hızla gelişen teknoloji, artan nüfus ve buna paralel olarak gündün güneş enerjisi ihtiyacının artmasına bağlı olarak bu enerji ihtiyacını karşılamak için alternatif yolların aranması bir mecburiyet haline almaktadır. Bu durumda konvansiyonel elektrik üretim teknolojilerine güçlü alternatiflerden birisi de güneş enerjisinden elektrik üretim sistemleridir. Ayrıca son yıllarda karbon salınımı, küresel ısınma ve artan çevre kirliliği gibi nedenlerden dolayı çevre konusunda duyarlılık artmaktadır. Buna paralel olarak hükümetler ve büyük enerji firmaları fosil yakıtlara alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynakları konusunda çalışmalar yapmaya zorlanmışlardır. Büyük teknoloji ve enerji şirketlerinin de devreye girmesiyle fotovoltaik teknoloji konusunda ki gelişmeler ihtiyacın artması ile büyüyen üretim kapasiteleri sayesinde maliyetler hızla düşmektedir. Yakın geçmişe kadar konvansiyonel elektrik enerjisi üretim yöntemleri ile kıyaslandığında yüksek yatırım maliyetine sahip olarak kabul gören fotovoltaik güç sistemleri, artık yakın gelecekte güç üretimine ciddi katkılar sağlayabilecek sistemler olarak değerlendirilmektedir.

3.2.1. Güneş Pilleri

Güneş pilleri, güneş ışığının etkisi ile direkt olarak elektrik enerjisi üretebilen yarı iletken malzemelerdir. Çeşitli geometrik yapılara sahip olan güneş pilleri, yüzey alanları 100 santimetrekare civarında üretilmektedirler. Güneş pillerinin kalınlıkları ise yarım milimetreden daha küçük boyutlardadır. Güneş pilleri fotovoltaik prensibe göre çalışmaktadırlar. Dünya üzerinde coğrafi konuma göre metrekare başına düşen güneş enerji miktarı yılda 800-2.600 kWh arasında değişiklik göstermektedir. Güneş pillerinin kullanımı ile bu güneş enerjisinden % 70' e varan bir verimle elektrik enerjisi üretilebilmektedir. Güneş pilleri birbirlerine paralel veya seri şekilde bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir. Bu yapıya güneş pili modülü ya da fotovoltaik modül adı verilir. İhtiyaç duyulması halinde bu modüllerin birbirlerine seri ya da paralel şekilde bağlanması ile fotovoltaik bir dizi oluşturabilir.

3.2.2. Güneş Pillerinin Çalışma İlkeleri

Günümüzde kullanılan güneş pillerinde en çok tercih edilen ham madde silisyumdur. Alternatif pek çok malzeme kullanılmasına rağmen silisyumun kullanım oranına henüz hiçbir alternatifi yaklaşmamaktadır. Silisyum panel üzerine güneş ışınlarının düşmesi sonucu, silisyum atomunun son yörüngesinde bulunan valans elektronu negatif yüklenmektedir. Işık, foton adı verilen saf enerji partiküllerinden meydana gelmektedir. Fotonlar bir atoma çarptıkları zaman, atomun toplam enerjisinde bir artış meydana gelir ve atoma ait en kolay kopabilecek durumda olan yani en son yörünge üzerinde bulunan denge elektronu kopmaktadır. Serbest kalan bu elektronda, voltaj olarak adlandırılabilen bir potansiyel enerji meydana gelmektedir. Bu olay sonucunda açığa çıkan elektrik enerjisinin ihtiyaç duyulan her noktada kullanabilmek mümkündür. Ancak bu enerjiden faydalanabilmek için en kritik nokta serbest kalan elektronların pil dışına nasıl çıkartılacağıdır. Güneş pilinin imalatı esnasında, ön yüzeye yakın bir bölgede iç elektrostatik bir alan oluşturulmaktadır ve bu alan sayesinde elektronların serbest kalabilmesi sağlanmaktadır. Pil yapısında kullanılan silisyum kristalinin içerisine katılan farklı elementler sayesinde kristal elektriksel olarak dengesiz bir halde bulunmaktadır. Üzerine ışığın düşmesi ile malzemede denge bozulmaktadır ve elektronlar serbest kalarak diğer pil yüzeyine doğru harekete

geçmektedirler. Foton demeti güneş pilinin içerisinde hareket ederek atomlar ile çarpıştıkları esnada, elektronlar enerji kazanmakta ve bir üst seviyeye çıkmaktadırlar. Bu süreç sonunda elektronlarda pil içindeki elektro-statik bölgeye ve oradan da pil dışına akmaktadırlar ve bu sayede kullanılabilir bir elektrik akımı meydana gelmektedir.

3.2.3. Fotovoltaik Hücrelerin Yapısı

Fotovoltaik hücreler, ışık enerjisinden elektrik enerjisine dönüşümü sağlayan malzemelerdir. Bu dönüşüm yarı iletken malzemeler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Fotonlar yarı iletken hücreler üzerine düşerek enerjileriyle yarı iletken malzemelerin bünyelerinde bulunan serbest elektronları harekete geçirirler ve bu sayede elektrik akımı üretilmiş olur.

Fotovoltaik bir hücre tarafından üretilebilecek güç çok küçük değerlerdedir, dolayısıyla kullanılabilir seviyede güç üretebilmek için bu hücreler belirli gruplar halinde bir araya getirilmektedirler. Fotovoltaik hücreler birleştirilerek modülleri adı verilen yapılar meydana getirilmektedir ve bu modüllerin birleştirilmesi sonucu ise güneş panelleri meydana gelmektedir.

Tek kristalli silisyum güneş pilinin rengi koyu mavi olup, ağırlığı 10 gramın altında imal edilmektedirler. Pilin üst yüzeyinde, pil tarafından üretilen akımı toplayacak ve malzemesi genellikle bakır olan ön kontaklar bulunmaktadır. Bunlar negatif kontaklardır. Kontakların altında 150 mm kalınlığında, yansıma özelliği olmayan bir kaplama tabakası bulunmaktadır. Bu tabaka olmazsa, silisyum üzerine düşen ışınımın üçte birine yakın kısmı yansiyacaktır. Bu kaplama tabakası, pil yüzeyinden olan yansımayı önlemektedir. Pilin ön yüzeyi, normal olarak yansıyan ışığın bir kısmını daha yakalayabilmek amacıyla, piramitler ve konikler şeklinde dizayn edilmişlerdir. Yansıtıcı olmayan kaplamanın altında, pilin elektrik akımının ortaya çıktığı yapı bulunmaktadır. Bu yapı, iki farklı katman halindedir. N-katmanı, fosfor atomları eklenmiş silisyumdan oluşan ve pilin negatif tarafını oluşturan katmandır. P-katmanı ise, bor atomları eklenmiş silisyumdan oluşmuş, pilin pozitif tarafıdır. İki katman arasında, P-N kavşağı denilen, pozitif ve negatif yüklü elektronların karşılaştığı bir

bölge bulunur. Pilin arka yüzeyinde, elektronların girdiği pozitif kontak görevi gören arka kontak yer alır.

Üretilen piller, standart test koşullarında test edildikten sonra, tüketiciye sunulmaktadır. Güneş pilleri laboratuvar ortamında, 25 °C sıcaklık, 1.000 W/m² ışınım şiddeti ve 1,5 Hava-Kütle oranı gibi koşulların altında test edilmektedirler. Bu testlerden ilgili standartlara göre geçebilen piller son tüketiciye ulaşmaktadır. Hava-kütle oranı, güneş ışınımının geçirilme oranını göstermek için faydalanılan atmosfer kalınlığına verilen addır. Güneşin tam tepede olduğu durumda, bu oran, 1 olarak kabul edilmektedir. Atmosfer tarafından emilen ışınımın oranına bağlı olarak, pilin üreteceği elektrik miktarı da değişeceğinden, bu oran önemli bir parametre olarak göz önünde bulundurulmaktadır.

Normal şartlar altında ortalama bir silisyum güneş pili tarafından, yaklaşık olarak yarım volt değerinde bir elektrik üretilmektedir. Bu pillerin seri şekilde bağlanması sonucunda daha yüksek değerlerde gerilim üretebilmek mümkün hale gelmektedir.

Çoğu zaman 30 ila 36 adet arasında güneş pilinden meydana gelen sistemlerde yaklaşık olarak 17 volt değerinde bir çıkış gücüne ulaşabilmektedir. Bu değer genel olarak kullanımı tercih edilmekte olan 12 volt kapasiteli akümülatörlerin şarj edilmesi için kullanılabilir. Pillerin seri bağlanması sonucu oluşturulan modüller de kendi aralarında rahatlıkla seri veya paralel bir şekilde bağlanabilmektedirler.

Güneş pilleri ince ve hassas yapıları nedeniyle çok kırılgan malzemelerdir. Bu sebeple pillerin birleşmesi ile meydana gelen modüller koruyucu bir çerçeve içerisine monte edilmektedirler. Modülü meydana getiren pillerin sayısı, modüle ait çıkış gücünü belirlemektedir. Fotovoltaik sistemlerde genel olarak 12 Volt değerindeki akümülatörler ile kullanılmaktadırlar. Bu akümülatörlerin şarj edilebilmesi için 30 – 36 civarında silisyum güneş pilinden üretilmiş modüller yeterli gelmektedir. Ancak çok daha yüksek çıkış güçlerinin ihtiyaç duyulduğu uygulamalarda daha fazla pil kullanımı ile daha büyük modüller üretilebilmektedir.

Modüllerin seri veya paralel bağlanarak elektriksel olarak birleştirilmeleri sonucu meydana gelen yapıya panel adı verilmektedir. Paneller sayesinde ihtiyaç duyulan

kısmen yüksek güçlere ulaşmak mümkün hale gelmektedir. Panellerdeki çıkış gücü, 12 V, 24 V, 48 V veya daha yüksek değerlere ulaşabilmektedir. İhtiyacın çok yüksek olduğu tüketim alanlarına yönelik panellerden oluşan yapılara ise örgü adı verilmektedir.

3.2.4. Güneş Pili Çeşitleri

Güneş pillerinin üretim teknolojileri ve üretimde kullanılan ham maddeler birden çok alternatife sahiptirler. Hâlihazırda güneş pillerinin imalatında kullanılan ondan fazla ham madde bulunmakta olup yeni birçok malzeme üzerinde de çalışmalar devam etmektedir. Güneş pilleri arasında en çok selenyum güneş pilleri ve silisyum güneş pilleri tercih edilmektedir.

3.2.4.1. Selenyum Güneş Pili

Arı halde bulunan selenyumun, halojenler veya alkali metaller ile karıştırılması sonucunda Pozitif (P) tipi yarı iletkenler meydana gelmektedir. Meydana gelen bu malzeme üzerine gümüş tabaka uygulanmaktadır. Bu tabaka 1-2 mikron kalınlığa sahiptir. Bu kaplama işlemi sayesinde P-N kavşağı oluşturulmaktadır. Selenyum güneş pilleri yüksek sıcaklıklardaki kullanımlar için uygun değildirler.

3.2.4.2. Silisyum Güneş Pilleri

Ham madde olarak silika olarak da bilinen SiO_2 (silikon dioksit) kullanılan güneş pilleridir. Alternatif güneş pili ham maddelerine kıyasla en yüksek performans/maliyet oranına sahip güneş pilleri silisyum kullanılarak elde edilen pillerdir. Ayrıca doğada SiO_2 çok miktarda bulunmakta ve normal kumdan rahatlıkla elde edilebilen bir ham maddedir. Bu iki avantajı sayesinde silisyum piller günümüzde en çok kullanılan pil haline gelmiştir. Ayrıca uzay programlarında ve uzay araçlarının ihtiyaç duydukları enerji üretim için çoğu zaman kristal silisyum güneş pillerinden faydalanılmaktadır.

Kristal Silisyum Güneş Pilleri

Silisyum yarı iletken bir özelliğe sahiptir. Hem verimi hem de ekonomik olarak alternatiflerine kıyasla avantajlı olması sebebiyle en çok tercih edilen güneş pili ham maddesi haline gelmiştir. Ayrıca üretimindeki hammaddelerin ve işlemlerin büyük bölümü yarı iletken endüstrisiyle aynı olması da imalat süreçlerinde büyük avantaj ve kolaylık sağlamaktadır. Mevcut teknolojilerin verimliliğini artırarak, üretim ve yatırım maliyetlerini düşürmek amacıyla önemli araştırmalar devam etmektedir.

Monokristal Silisyum Güneş Pilleri

Monokristal güneş pilleri silindirik bir külçe halinde büyütülmüş tek bir silisyum kristalinden üretilmektedir. Yüksek saflıktaki polisilisyum parçaları boron ile birlikte bir potada eritilmektedir. Küçük bir tohum kristal eriyik maddeye batırılır, yavaşça döndürülerek geri çekilmektedir. Saatler içinde tohum kristal büyüyerek 100 cm boy ve 20 cm çapa kadar büyüklükte bir silindir kristal haline gelmektedir. Külçe yuvarlak olduğu için kenarlar çoğunlukla daha kare veya dikdörtgen bir şekle ulaşmak için kırılır, böylelikle pillerin modülde birbirine daha yakın yerleştirilebilmesi sağlanmaktadır. Daha sonra oluşan bu külçeler elmaslı tel testere kullanılarak istenen boyutlara getirilmektedirler. Bu üretim yönetimine CHROZALSKI tekniği de denmektedir ve pil üretiminde günümüzde dahi en çok kullanılan yöntem olarak devam etmektedir. Bu tekniğin en büyük dezavantajı ise imalat süresince meydana gelen yüksek malzeme kayıplarıdır. Ticari monokristal pillerin verimliliği % 15 ila % 18 arasındadır, bazı laboratuvar örneklerinin ise verimliliği % 27'ye kadar çıkabilmektedir.

Semikristal (Yarıkristal) Silisyum Güneş Pilleri

Yarıkristal güneş pilleri, eriyik haldeki silisyumun katılaşması sonucu meydana gelen silisyum kristallerinden oluşmaktadır. Yarıkristal güneş pillerinde verimliliği soğutma esnasında oluşan silisyum taneciklerin sınırlarında meydana gelen kayıplar belirlemektedir. Yarıkristal güneş pillerinde verimlilik yaklaşık % 14'tür (DGS 2012; Mertens 2009).

Ribbon Silisyum Güneş Pilleri

Ribbon eriyik haldeki bir silikon karışımından ince bir şerit çekilmesi ile elde edilmektedir. Eriyik materyal paralel kalıplar arasında çekilir, burada soğuyarak aralıksız birçok kristalli şerit meydana gelmektedir. Şerit (ribbon) daha sonra belirli aralıklarla kesilerek dikdörtgen şeklinde levhalar oluşturulmaktadır. Ribbon silikon kullanılarak üretilen piller diğer silikon türlerine göre düşük verimliliğe sahiptir (% 11 - % 13) fakat üretim aşamasında daha az malzeme kaybı yaşanmasından dolayı üretim süreci daha düşük maliyetlidir. Laboratuvar ortamında ölçülen verim oranları ise % 13 - % 14 arasında tespit edilmiştir.

Polikristal Silisyum Güneş Pilleri

Polikristal Silisyum pilleri ribbon silisyum imalat teknolojileri kullanılarak üretilmektedirler. Ticari amaçlı kullanımlarında pil verimlilikleri % 10 ila % 14 arasında iken laboratuvar ortamında gerçekleştirilen ölçümlerde ise verimlilikleri % 20 seviyelerine kadar çıkabilmektedir.

Amorf Silisyum Güneş Pilleri

Amorf Silisyum pilleri çok kısa süre içerisinde bozularak üretim miktarları düşmektedir. İnce film teknolojisinde çok sık kullanılan bir pil türüdür. Ticari amaçlı kullanımlarında pil verimlilikleri %8-9 arasında çok küçük değerlerde iken laboratuvar şartlarında ise verimlilikleri yalnızca %12 'ye kadar çıkabilmektedir.

3.2.4.3. İnce Film Güneş Pilleri

İnce film fotovoltaik malzemeler hücre tasarımına modül bazlı yaklaşımlar olarak ortaya çıkmışlardır. İnce film modüller kimyasal buhar biriktirme teknikleri kullanılarak ince bir yarı iletken malzeme tabakası ile kaplanmaktadır. Günümüzde bakır indiyum, amorf silikon (a-Si), galyum selenit (CIGS) ve kadmiyum tellür (CdTe) kendi aralarında rekabet halinde bulunan ince film teknolojileridir. İnce film modüllerin alternatiflerine kıyasla üretimi daha düşük maliyetlidir ve önemli ölçüde

daha az hammadde gerektirmektedir. Fakat silisyum güneş pilleri ile kıyaslandığında daha düşük verimlerde çalışmakla birlikte daha düşük bir dayanıma sahiptirler. Monokristal güneş pillerine kıyasla çok daha ince yapılara sahiptirler ve montajlama işlemlerinde kolaylık sağlamaktadırlar.

Galyum Arsenit: Galyum Arsenit ile imal edilmiş güneş pilleri yüksek verimlere ulaşabilmektedir. Bu zamana kadar üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda laboratuvar şartlarında % 30'un üzerinde verim değerlerine ulaştıkları gözlemlenmiştir. Ancak ticari uygulamalarda bu verimlilik oranı % 28 - %32 aralığında değişmektedir. Bu malzeme her ne kadar yüksek verimliliğe sahip olsa dahi yüksek maliyetleri ve toksit etkisi nedeniyle kullanım alanları kısıtlı hale gelmektedir. Galyum elektromanyetik radyasyonun farklı dalga boylarına yanıt verebilecek yarı iletken yapılar oluşturabilmek amacıyla indiyum, alüminyum ve fosfor ile katkılandırılmaktadır. Bu özellik sayesinde özellikle optik yoğunlaştırıcıli fotovoltaiik uygulamalara ihtiyaç duyulan alanlara yönelik olarak yüksek verimlilik sahibi çok eklemlili piller üretilebilmektedir. Çok eklemlili galyum piller güneş enerjisinin farklı dalga boylarına yanıt verebilen pil katmanlarına sahiptirler ve bu sayede çok yüksek verimliliklere ulaşabilmektedirler. Üst katman en kısa dalga boylu radyasyonu yakalarken daha uzun dalga boyları alt katmanlardan geçer ve emilmektedirler. Bu tip sistemlerde kullanılan galyum arsenit güneş pillerinin verimleri ticari uygulamalarda % 40 gibi yüksek bir değere ulaşırken, laboratuvar şartlarında % 40'ında üzerindeki verim değerlerine ulaşabilmektedirler (DGS 2012; Mertens 2009). Çizelge 3.1'de çeşitli PV materyallerine ait verimlilikler oranları verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çeşitli PV materyalleri ve teknolojileri verimlilikler oranları.

Malzeme	Ticari Ürünlerde Verimlilik (%)	Laboratuvar Şartlarında Ölçülen Verimlilik (%)
Çok eklemli galyum arsenit (GaAs), yoğunlaştırıcı	38 – 40	43,5
Çok eklemli galyum arsenit (GaAs), yoğunlaştırmayan	28 – 32	34,1
Monokristal silikon	15 – 18	27,6
Polikristal silikon	11,5 – 14	20,4
Bakır indiyum galyum selenit (CIGS)	12 – 14	20,3
Kadmiyum tellür (CdTe)	9 – 11	17,3
Amorf silikon (a-Si)	8 – 9	12,5
Boya ile duyarlı hale getirilmiş (Grätzel)	8 – 10	11,8
Polimer (Organik)	2 – 4	10

3.2.5. Güneş Pili Kullanım Alanları

Güneş pilleri, elektrik enerjisinin gerekli olduğu her uygulamada kullanılabilir. Güneş pili modülleri uygulamaya bağlı olarak, akümülatörler, invertörler, akü şarj denetim aygıtları ve çeşitli elektronik destek devreleri ile birlikte kullanılarak bir güneş pili sistemi (fotovoltaik sistem) oluşturulmaktadır. Bu sistemler, özellikle yerleşim yerlerinden uzak, elektrik şebekesi olmayan yörelerde, jeneratöre yakıt taşımının zor ve pahalı olduğu durumlarda kullanılmaktadırlar. Bunun dışında dizel jeneratörler ya da başka güç sistemleri ile birlikte karma olarak kullanılmaları da mümkün hale gelmiştir. Bu sistemlerde yeterli sayıda güneş pili modülü, enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Güneşin yetersiz olduğu zamanlarda ya da özellikle gece süresince kullanılmak üzere genellikle sistemde akümülatör bulundurulmaktadır. Güneş pili modülleri gün boyunca elektrik enerjisi üreterek bunu akümülatörde depolar, gerekli olan enerji ise akümülatörden sağlanmaktadır. Akünün aşırı şarj ve deşarj sonucu zarar görmesini engellemek için kullanılan denetim birimi ise akünün durumuna göre ya güneş pillerinden gelen akımı ya da yükün çektiği akımı kesme özelliğine sahiptir. Şebeke uyumlu alternatif akım elektriğinin gerekli olduğu uygulamalarda, sisteme bir invertör eklenerek akümülatördeki DC gerilim, 220 V, 50 Hz'lik sinüs dalgasına

dönüştürülmektedir. Benzer şekilde, uygulamanın şekline göre çeşitli destek elektronik devreler sisteme katılabilmektedir. Bazı sistemlerde, güneş pillerinin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlayan maksimum güç noktası izleyici cihazları eklenebilmektedir.

Şebeke bağlantılı güneş pili sistemleri yüksek güçte santral boyutunda sistemler şeklinde olabileceği gibi daha çok görülen uygulaması binalarda küçük güçlü kullanım şeklindedir. Bu sistemlerde örneğin bir konutun elektrik gereksinimi karşılanırken, üretilen fazla enerji elektrik şebekesine satılır, yeterli enerjinin üretilmediği durumlarda ise şebekeden enerji alınır. Böyle bir sistemde enerji depolaması yapmaya gerek yoktur, yalnızca üretilen DC elektriğin, AC elektriğe çevrilmesi ve şebeke uyumlu olması yeterlidir. Güneş pili sistemlerinin şebekeden bağımsız (stand-alone) olarak kullanıldığı tipik uygulama alanları aşağıda sıralanmıştır.

1. Haberleşme istasyonları, kırsal radyo, telsiz ve telefon sistemleri
2. Petrol boru hatlarının katodik koruması
3. Metal yapıların (köprüler, kuleler vb.) korozyondan koruması
4. Elektrik ve su dağıtım sistemlerinde yapılan telemetrik ölçümler, hava gözlem istasyonları
5. Bina içi ya da dışı aydınlatma
6. Dağ evleri ya da yerleşim yerlerinden uzaktaki evlerde TV, radyo, buzdolabı gibi elektrikli aygıtların çalıştırılması
7. Tarımsal sulama ya da ev kullanımı amacıyla su pompası
8. Orman gözetleme kuleleri
9. Deniz fenerleri
10. İlk yardım, alarm ve güvenlik sistemleri
11. Deprem ve hava gözlem istasyonları
12. İlaç ve aşı soğutma

3.2.6. Güneş Pilinin Çalışmasını Etkileyen Dış Faktörler

Sahada yapılan ölçümlerde fotovoltaik panellerin kullanım verimlerinin, laboratuvar ortamlarında ölçülmüş verimlerine kıyasla düşük olduğu görülmektedir. Bunun en

belirleyici sebebi panellerin gerçek kullanım koşullarının laboratuvar ortamına kıyasla daha değişken olması olarak kabul edilmektedir. Fotovoltaik panellerde üretimi etkileyen en önemli faktörlerden birisi güneşlenme süresidir. Güneşlenme süresindeki kontrol edilemeyen değişiklikler, örneğin bulutlu kapalı bir hava fotovoltaik sistem üretimini olumsuz etkilemektedir. Ancak fotovoltaik sistemlerin çalışmasını etkileyen başka dış faktörlerde bulunmaktadır. Bu faktörlerin birçoğunun olumsuz etkisi tasarım aşamasında veya işletme esnasında alınacak önlemler ile engellenebilmektedir. Dış faktörler sebebiyle fotovoltaik sistemler üzerinde meydana gelen önemli kayıplar aşağıdaki gibidir;

1. Modül yüzeylerinde kirlenme (% 1 - % 5 Verim Kaybı)
2. Modül Yüzeyinde Gölgeleme (% 0 - % 5 Verim Kaybı)
3. Yansıma kaybı (% 2,5 - % 5 Verim Kaybı)
4. Modüllerde oluşan sıcaklık (% 2 Verim Kaybı) (DGS 2012; Öztürk 2014).

3.2.6.1. Konum

Fotovoltaik sistemlerin tesis edildiği bölgeler ve o bölgelerde ki konumları öncelikle güneşlenme açısından incelenmektedir. Sistem üzerinde kullanılan fotovoltaik panellerin herhangi bir yapı veya coğrafi etki altında kalmadan gün içerisinde güneş ışınlarından en yüksek derecede faydalanabileceği bir bölgede konumlandırılmaları beklenmektedir. Ayrıca bölgedeki rüzgârın panel arkalarının havalandırılması için kullanılması panel arkasında ki ısıyı düşürerek elektrik üretim veriminin artmasını sağlayacaktır. Bu nedenle fotovoltaik sistemlerin yerleştirilmesinde bölgede ki rüzgâr rejimi de göz önünde bulundurularak konumlandırma yapılmalıdır.

3.2.6.2. Çalışma Ortam Sıcaklığı

Fotovoltaik sistemlerin öngörülen verimlerde çalışabilmeleri için en önemli koşullardan birisi çalışma ortamının sıcaklığıdır. Yüksek ortam sıcaklıkları fotovoltaik panellerin arka kısmında sıcaklığın yükselmesine ve panelin üretim veriminin düşmesine neden olmaktadır. Bu sebepten dolayı özellikle yüksek sıcaklıklara ulaşılan bölgelerde fotovoltaik panellerin tasarımında soğutma önemli bir kıstas olarak kabul

edilmektedir. Özellikle tasarımlarda rüzgâr ile panellerin arkasında bir hava akışı sağlayarak doğal bir soğutma sistemi oluşturmak hedeflenmektedir.

Ortam sıcaklığının düşük olduğu bölgelerde ise panel arkalarında iyi bir soğutma sağlandığı için yüksek verimler elde edilebilmektedir. Ancak aşırı soğuk bölgelerde kar yağışının yüksek oranlarda olması sonucu panel üzerinde kar birikmesi panel verimini düşürmektedir. Bu gibi durumlarda düzenli olarak panel yüzeylerinin kar tabakasından temizlenmesi için gerekli iş yükü dolayısıyla fazladan işletme maliyeti olarak karşımıza çıkabilmektedir.

3.2.6.3. Gölgeleme

Fotovoltaik paneller üzerine düşen gölgeler panel üzerine gelen güneş ışınlarını kesmektedir ve dolayısıyla panelin verimini düşürmektedir. Bu nedenle sistem tasarımlarında bina, ağaç, telefon ve elektrik direkleri, diğer güneş panelleri ve güneş ışınlarına engel oluşturabilecek coğrafi yapılar göz önünde bulundurularak bu engellerin en aza indirilmesi hedeflenmektedir. Kısmi olarak gölgelenmiş tek bir modül, fotovoltaik paneller üzerinde birbirlerine elektriksel olarak bağlanmış modüllerden oluşan bütün bir serinin üretimini olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple panel üzerindeki en küçük bir gölgeleme dahi büyük verim kayıplarına sebep olabilmektedir.

BÖLÜM 4

MATERYAL VE METOD

4.1. FOTOVOLTAİK

Fotovoltaik, belirli yarı iletkenlerin kendilerine has özelliklerini kullanarak güneş radyasyonunu direkt olarak elektriğe dönüştüren bir güneş enerjisi teknolojisidir. Fotovoltaik (PV) sistemlerde, genellikle kristal silikondan yapılmış olan ve ışığa maruz kaldığında küçük bir doğru akım üreten levhalar kullanılmaktadır. Bu PV piller, diğer adıyla güneş pilleri, birbirine bağlanarak modül adı verilen yapı oluşturulur ve modüller hiçbir hareketli parça, gürültü ya da emisyon olmadan kayda değer miktarda elektriksel güç üretebilmektedirler.

Fotovoltaik (PV) sistemler bir PV modül paneli ve güneş enerjisini tüketiciler tarafından kullanılabilir elektriğe dönüştürmek için gereken farklı elektriksel aksamardan oluşan bir elektrik sistemidir. Bu aksamlar PV sistemlerinin tasarımında farklı durumlar için birçok şekilde düzenlenebilir, ancak en yaygın konfigürasyon ticari ve konut binalarında kullanılan şebeke bağlantılı sistemlerdir. Bu PV sistemleri akülerde enerji depolama özelliğine de sahip olabilmektedirler. Panel genellikle çatıya ya da bina yanında yere monte edilmektedir.

İnvertör, şarj regülatörü ve ayırıcılar gibi elektriksel aksamlar panelden gelen DC gücü denetleyerek DC tüketicilere yöneltir veya AC tüketicilerin kullanımı için AC güce dönüştürmektedirler. Bazı aksam işlevleri birleştirilerek bir güç şekillendirme birimi (PCU) oluşturulabilmektedir. Elektrik tüketen bir aygıtı tüketici adı verilmektedir. Tüketicilere örnek olarak lambalar, pompalar, ısıtıcılar, motorlar ve elektronik cihazlar verilebilir.

Günümüzde PV teknolojisi iletişim ağları, şebeke bağlantılı konutlar ve ofis binaları, kırsal aydınlatma ve su pompalama sistemleri gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle gelişen fotovoltaik teknolojileri, kullanım ve kurulum konusunda ki zaman içinde artan bilinçlenmenin etkisi ile bu kullanım Çizelge 4.1 altında gözüktüğü gibi hızlı bir şekilde artmaktadır.

On binlerce Amerikan evi şu anda elektrik şebekesinin tamamen dışında konumlanmış olup bağımsız PV sistemleriyle kendi elektriklerini üretebilmektedir. Zaman içerisinde hükümetler ve yerel otoriteler tarafından desteklenen teşvikler sonucunda bu sayının daha da artması beklenmektedir.

Çizelge 4.1. PV Endüstrisinin 20 yıllık gelişimi (Mertens 2009).

Endüstri Özelliği	1990	2009
Kurulmuş kapasite	<50 MW/yıl dünya	>10GW/yıl dünya; >500MW/yıl ABD
Ürün listeleme ve sertifikasyon	Başlangıç aşamasında gelişmekte	Çoğu ya da tüm teçhizat UL listeleme standartlarına tabi
Sistem Voltajı	Konut \leq 48 VDC	Konut <600VDC, ticari <1000 VDC
Öne çıkan pazarlar	Bağımsız sistem	Şebeke etkileşimli konut ve ticari, altyapı ölçekli
PV şirketlerinin sayısı	Yüzlerce	On binlerce
Maksimum sistem boyutu	10 kW – 100 kW	1 MW – 20+ MW
Şebeke bağlantısı	Çok Kısıtlı İzin	20 MWA kadar Bağlantı İzni
Ruhsatlama, kişisel sertifikasyon	Yok	Dünya genelinde yerel otoriteler tarafından ruhsatlama ve sertifikasyon programları
Müteahhit ve kurulumcular	Küçük uzmanlaşmış şirketler	Büyük şirketler, elektrik sistemi şirketleri ve proje geliştiricileri
PV endüstrisi global hasılatı	200 milyon USD	82 milyar USD

4.1.1. Avantajlar

Bir PV sistemi ile temin edilen elektrik, başka bir güç üretim teknolojisinden gelen elektriğin yerini kolaylıkla alabilmektedir. Eğer alternatif, örneğin uzak bir konuma şebeke bağlantısı gibi oldukça pahalı bir sistem ise PV sistemi tüketiciye yüklü miktarda tasarruf olanağı sunabilmektedir. Ayrıca, PV sistemlerinin diğer avantaj ve faydaları da potansiyel maddi tasarrufun ötesinde değer katmaktadır. PV sistemi sahiplerinin birçoğu temiz “yeşil” enerji üretimine büyük önem vermektedirler. Fotovoltaik, hiçbir gürültü ya da kirliliğe sebep olmadan enerji üreten çevre dostu bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, PV sistemleri oldukça esnektir ve birçok farklı uygulamaya kolaylıkla adapte edilebilmektedirler. PV panellerinin modüler yapısı ve diğer aksamlar sistemleri daha yüksek kapasite için kolayca genişletme olanağı sunmaktadır. Hareketli hiçbir parça olmadığından, PV sistemleri son derece sağlamdır ve asgari bakımla çok uzun süre dayanabilmektedirler.

PV sistemleri ayrıca kullanıcılarına enerji bağımsızlığı sağlamaktadır. Tamamlayıcı bir PV sistemi şebeke güç kesintilerine karşı bir destek sunarken, bağımsız bir sistem kesinti riskini tamamen ortadan kaldırmaktadır. Bunun yanı sıra güneş ışığı ücretsiz ve sürekli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Geleneksel yöntemle üretilen elektriğin pahalılaşması beklendiğinden ve PV sistemi maliyetleri gün geçtikçe azaldığından, PV sistemlerinin gelecekteki enerji fiyat artışlarına karşı bir koruyucu olarak da kullanılacağı ön görülmektedir.

4.1.2. Dezavantajlar

PV sistemlerin kullanımını kısıtlamış olan bazı dezavantajlar da bulunmaktadır. Şu anda en önemli sorun PV sistemlerinin rakip güç üretim teknolojilerine kıyasla ilk maliyetinin yüksek olması görünmektedir. Bir başka dezavantaj da bir PV sisteminin kayda değer miktarda güç üretebilmesi için görece yüksek bir panel alanına ihtiyaç duymakta olmasıdır. Önemli miktarda güç üretiminin mümkün olup olmadığında belirleyici etken belirli bir konumdaki güneş radyasyonu seviyesidir.

Ayrıca bazı topluluklar ve bazı bölgeler arasında güneş enerjisi sistemlerinin, özellikle de fotovoltaik sistemin potansiyeli hakkında bilgi eksikliği bulunmaktadır. Tüketiciler hangi çeşit sistemlerin mümkün olduğunun, hatta kendi uygulamaları ya da konumları için bir güneş enerjisi sisteminin uygulanabilir olup olmadığının dahi farkında olmayabilirler. Bir PV sistemi kurmak isteyen tüketiciler, bölgelerindeki altyapının henüz bu kurulumu mümkün kılacak kadar gelişmemiş olduğunu düşünebilmektedirler. Nitelikli bir kurulumcu bulmak zor olabileceği gibi, yerel elektrik şirketleri ve yetkililerin PV sistemleri hakkında yetersiz bilgisi kurulum için engel teşkil edebilmektedir.

PV endüstrisinin önde gelen isimleri bu sorunlarla ilgilenmektedirler. Dünya genelinde hükümetler ek masrafları dengelemek ve “yeşil” elektrik kullanımını teşvik amacıyla PV kurulumlarına mali destek sağlamaktadırlar. Benzer teşvik uygulamaları ülkemizde de uygulanmaya başlanmıştır. Araştırma kurumları ve üreticiler daha küçük panellerle veya güneş radyasyonu miktarı düşük olan bölgelerde daha fazla enerji üretebilmek için pillerin ve modüllerin verimliliğini artıracak yeni PV teknolojileri üstünde çalışmaktadırlar.

4.2. ÇALIŞMA SİSTEMİ

Çalışmada kullanılmış olan ilgili Fotovoltaik (PV) Güneş Enerji Santrali (Şekil 4.1) 2015 yılı içerisinde tüm izinlerini tamamlayarak devreye alınmıştır. Sistem, kurulu gücü 13,8 kW kapasitede üretim gerçekleştirebilecek şekilde, 60 adet 230 W gücündeki EcosunPV marka güneş panelleri ve 3 adet ABB PVS300-4600 W invertör kullanılarak tesis edilmiştir.

Tesis toplamda 2 adet hareketli ve 1 adet sabit sistemden oluşmaktadır. Her sistemin üzerine yirmişer adet 230 W gücünde panel monte edilmiştir. Bu panellerin her birinin üretim gücü 4,6 kW 'tır. Hareketli sistemin çalışması tek eksenli olup 45 derecelik açı ile güney cephe üzerinden doğu-batı yönünde hareket edecek şekilde yerleştirilmiştir, sabit sistem ise hareketsiz olup 30 derecelik açı ile güneye konumlandırılmıştır. Tesisin kurulumunda kullanılan ekipmanların maliyetleri arazi maliyeti hariç, Sabit Fotovoltaik Sistem için 26.633,60 TL, Hareketli Fotovoltaik Sistem için 32.318,55

TL'dir. Sistemde kullanılan güneş panellerinin ve invertörün teknik özellikleri sırasıyla Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3 üzerinde verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.2'de PV panellerin standart test şartlarındaki I-V, P-V karakteristik eğrileri verilmektedir.



Şekil 4.1. Fotovoltaik güneş enerji santrali.

Çizelge 4.2. Sistemde kullanılan PV panellerin teknik özellikleri.

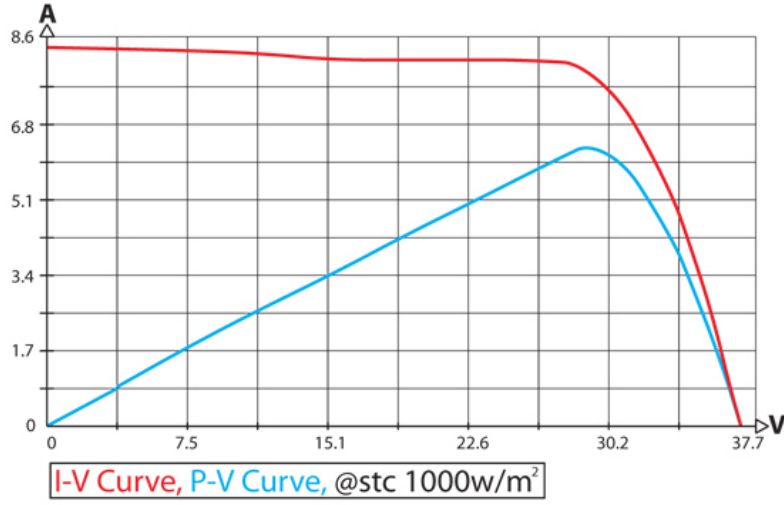
Açıklama	Özellikler
Solar Hücre	60 Poly-crystalline 156 x 156 mm
Ön cam	3.2 mm temperlenmiş
Bağlantı kutusu	IP65 Rated
Çıkış kabloları	900mm'den uzun MC4 konnektör ile uyumlu
Çerçeve	Anotlanmış Alüminyum
Ağırlık ve ölçüler	20 kg - 1652 x 1000 x 50 mm
Standart test şartları	1000 W/m ² , 25 °C, Air Mass= 1.5
Nominal maks. Gücü	230 W
Nominal voltaj	29.9 V
Nominal akım	7.69 A
Açık devre voltajı	37.2 V
Kısa devre akımı	8.59 A
Maks. Sistem voltajı	600 V Doğru Akım

Çizelge 4.3. Sistemde kullanılan invertörlerin teknik özellikleri.

PVS300-TL-4600W-2 (4.6 kW)	
Giriş (DC)	Teknik Özellikler
Nominal PV-gücü (PPV)	4700 W
Maksimum PV-gücü (PPV,Maks)	5200 W
DC voltaj aralığı (UDC)	335 – 800 V
Maks. DC voltaj (UDC,Maks)	900 V
Nominal DC voltaj (UN)	480 V
Maks. DC akım (IDC,Maks)	14.6 A
DC giriş sayısı (paralel)	4
Çıkış (AC)	
Nominal AC çıkış gücü (PAC)	4600 W
Nominal AC akım (IAC,Nom)	20.0 A
Nominal voltaj (VAC, Nom)	230 V
Çalışma aralığı, şebeke voltajı	180 – 276 V
Çalışma aralığı, şebeke frekansı	47 – 63 Hz
Şebeke akımının harmonik bozulması (KIAC)	< 3 %
Güç faktörü (cosfi)	1
Şebeke bağlantısı	Tek faz: L, N ve PE
Verim	
Maks. Verim (PAC,Maks)	97.1 %
Bekleme modunda (PStandby)	< 12 W
Gece tüketimi(PGece)	< 1 W
Çevresel Limitler	
Koruma Derecesi	IP55
İzin verilen ortam sıcaklığı	-25 C° , + 60 C°
Bağıl nem(yoğunlaşmayan)	0 – 100 %
Maks. Rakım	2000 m
Akustik gürültü seviyesi	< 45dBA

ESP-230-L Characteristics

Module IV Graph 230W



Şekil 4.2. Fotovoltaik panellerin standart test şartlarındaki I-V, P-V karakteristik eğrileri.

4.3. PROJELENDİRME

Fotovoltaik sistemlerin verimlerini ve dolayısıyla üretim değerlerinin etkilendiği en önemli unsur sistem üzerinde kullanılan güneş pilleri olarak kabul edilmektedir. Ancak sistemin ilk kurulum aşamasında karşılaşılabilecek elektriksel tasarım hataları ciddi verim kayıplarına neden olabilmektedir. Bunun yanı sıra uygun olmayan elektrik projeleri tesis güvenliği açısından da ciddi tehditler oluşturmaktadır. Bu bölümde hem teknik yaklaşımlar hem de yasal mevzuatlar gereği çalışmanın yapılması esnasında tesis edilen fotovoltaik sistemlere ait elektriksel tasarımlar ele alınmıştır.

4.3.1. DC Hesaplar

Bu bölümde tesisin tasarımı için gerekli olan eviricinin (invertörün) kontrolü, kullanılabilen panel sayısının belirlenmesi, paneller tarafından üretilen doğru akım için gerekli teknik alt yapının belirlenmesi konuları incelenmiştir.

4.3.1.1. Maksimum ve Minimum Evirici DC Giriş Gerilimi Kontrolü

Evirici tasarımı esnasında, modüllerin sıcaklık değerleri ve bu sıcaklık değerlerine ışınımın etkisi dikkate alınmaktadır. Eviricinin çalışma aralığı FV jeneratörünün sıcaklık değerlerinden etkilendiği göz önüne bulundurularak ayarlamalar yapılmaktadır.

4.3.1.2. Maksimum Panel Sayısının Tespiti

Modüllerin çalışma gerilimleri, ortam sıcaklığının düşmesi ile ters orantılı bir şekilde artmaktadır. Modüllerin bu özelliğinden dolayı, modüllerin normal çalışması esnasında karşılaşılabilecek en yüksek çalışma gerilimi düşük ortam sıcaklığı altında açık devre gerilimi olacaktır. İstanbul iline ait Meteoroloji Genel Müdürlüğü sitesinden alınan verilere göre 1960-2012 yılları arasındaki en düşük ve yüksek sıcaklık değerleri sırası ile ; -6,8 °C ve 40,6 °C'dir.

Buna göre maksimum panel sayısı hesaplanırken aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır. Maksimum panel sayısının hesaplanabilmesi için öncelikle ortam sıcaklığının -10 °C (muhtemel en düşük sıcaklık) olması durumunda Eşitlik 4.2 kullanılarak her bir modül için evirici girişinde meydana gelecek gerilim değeri hesaplanmaktadır. Ardından eşitlik 4.1 kullanılarak sistem üzerinde tesis edilebilecek maksimum modül sayısı hesaplanmaktadır.

$$n_{\max} = \frac{U_{\text{evirici max.}}}{U_{L(\text{modül}-10^{\circ}\text{C})}} \quad (4.1)$$

$$B_L = -0,3600 \% / ^{\circ}\text{C}$$

$$C_{\min} = -10^{\circ}\text{C} \text{ alınmıştır.}$$

$$U_{L(\text{modül}-10^{\circ}\text{C})} = \left(1 - (C - C_{\min}) \times \frac{B_L}{100}\right) \times U_{L(\text{stc})} \quad (4.2)$$

$$U_{L(\text{modül}-10^{\circ}\text{C})} = \left(1 - (25 - (-10)) \times \frac{-0,36}{100}\right) \times 37,2 = 41,89 \text{ V}$$

$$n_{\max} = \frac{900}{41,89} = 21,48 \text{ adet (Maksimum kullanılabilir modül sayısı)}$$

Kullanılan eviricinin 4 adet girişi mevcuttur. Bu girişlerden biri kullanılacak olup 20 adet modül seri olarak bağlanacaktır. 20 adet modül için -10°C sıcaklık koşullarında evirici giriş gerilimi $837,8 \text{ V} < 900 \text{ V}$ olduğundan eviricinin giriş gerilimi uygun bulunmuştur.

4.3.1.3. Minimum Panel Sayısının Tespiti

Aşırı sıcak yaz aylarında sistemin kurulduğu bölgeye göre modül sıcaklıkları yaklaşık 70°C ' ye kadar çıkabilmektedir. Genel olarak bu değer göz önünde bulundurularak bir dizide kullanılacak minimum modül sayısı belirlenmektedir.

Buna göre minimum panel sayısı aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanabilmektedir. Öncelikle Eşitlik 4.5 kullanılarak çalışma ortamının ulaşabileceği maksimum sıcaklık hesaplanmaktadır. Ardından Eşitlik 4.4 kullanılarak maksimum ortam sıcaklığının etkisi altında her bir modülün evirici giriş gerilimine etkisi, panel nominal gerilimi hesaplanmaktadır. Bu verilerin hesaplanmasının ardından Eşitlik 4.3 kullanılarak minimum panel sayısı tespit edilebilmektedir.

$$n_{\min} = \frac{U_{MPV(\text{Evirici min})}}{U_{MPP(\text{modül } 70^{\circ}\text{C})}} \quad (4.3)$$

$$\beta_{MPP} = -0,47 \quad (\text{Modül Sıcaklık Katsayısı})$$

$$U_{MPP(STC)} = 29,9 \text{ V} \quad (\text{Standart Test Koşullarında Panel Maksimum Güç Gerilimi})$$

$$C_{\max} = 25 + 40,6 = 65^{\circ}\text{C} \quad (\text{Maksimum Çalışma Ortam Sıcaklığı}) \quad (4.4)$$

$$C = 25^{\circ}\text{C} \quad (\text{Standart Test Koşullarındaki Ortam Sıcaklığı})$$

$$U_{MPP(\text{modül } 65^{\circ}\text{C})} = \left(1 + (C_{\max} - C) \times \frac{\beta_{MPP}}{100}\right) \times U_{MPP(stc)} \quad (4.5)$$

$$U_{MPP(modül\ 65^{\circ}C)} = \left(1 + (65 - 25) \times \frac{-0,47}{100}\right) \times 29,9 = 24,28\ V$$

$$n_{min} = \frac{335}{24,48} = 14,0\ adet$$

20 adet modül için 65 °C sıcaklık koşullarında evirici giriş gerilimi 485,6 V > 335 V olduğundan eviricinin giriş gerilimi uygun bulunmuştur.

4.3.1.4. DC Kablo Hesapları

Tesis edilecek fotovoltaik sistemler üzerinde DC akım taşımak için kullanılması planlanan ekipmanlara ait ön görülen teknik özellikler Çizelge 4.4. belirtilmiştir.

Çizelge 4.4.'te belirtilen teknik özelliklerin uygunlukları aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmaktadır.

Çizelge 4.4. DC kablo hesapları.

Parametre	Formül	Değer	Birim	Açıklama
A_M		4	mm ²	Modül veya dizi kablo kesiti
I		0,9	M	Bir panele ait kablo uzunluğu
n		20	Adet	Panel sayısı
P_M			W	Stc modül veya dizi hattı kaybı
P_{MPP}			W	STC dizi gücü
L	$L = n \cdot I$	18	m	Dizi toplam kablo uzunluğu
I_{MPP}		7,69	A	Panel nominal akımı
I_{SC}		8,59	A	Panel kısa devre akımı
U_{MPP}		29,9	V	Panel nominal gerilimi

Çizelge 4.4. (devam ediyor).

c	56	m/Ω.m m ²	Bakır için iletkenlik
I _{sc}	8,59	A	FV panel kısa devre akımı
I _z	55	A	FV kablo akım taşıma kapasitesi

Dizi Kablo Kesiti Hesabı

Dizi kablo kesiti için minimum ihtiyaç duyulan kesit alanı Eşitlik 4.6 kullanarak hesaplanmaktadır.

$$A_M = \frac{2 \times L \times I_{SC}}{0,01 \times n \times U_{MPP} \times c} = \frac{2 \times 18 \times 8,59}{0,01 \times 20 \times 29,9 \times 56} = 0,92 \text{mm}^2 \quad (4.6)$$

Üretici firma tarafından STR P 230 panelleri için kablo kesiti 1x4 mm² olarak üretilmektedir. Bu durumda 0,92mm² < 4mm² olduğu için kablo kesiti uygundur.

Dizi Hattı Akım Taşıma Kapasitesi

Fotovoltaik sistem üzerindeki dizi hattı tarafından güvenli bir şekilde taşınabilecek maksimum akım miktarı Eşitlik 4.7 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$I_{max} = 1,25 \times I_{sc} = 1,25 \times 8,59 = 10,74 \text{ A} \quad (4.7)$$

$$I_{max} < I_z$$

10,74 A < 55A Bu durumda 4mm² kablo kesiti uygundur.

Dizi Hattı Gerilim Düşümü

Fotovoltaik paneller tarafında üretilen elektriğin taşınması esnasında dizi hattı üzerinde meydana gelecek olan gerilim düşümü oranı Eşitlik 4.8 kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu oranın % 1 değerinin altında kalması beklenmektedir.

$$\% e = \frac{200 \times L \times I_{SC}}{A_M \times c} = \frac{200 \times 18 \times 8,59}{4 \times 20 \times 29,9 \times 56} = 0,23 \quad (4.8)$$

Gerilim düşümü % 0,23 < % 1 olduğundan seçilen kablo kesiti uygun kabul edilmektedir.

Dizi Hattı Güç Kaybı

Fotovoltaik paneller tarafında üretilen elektriğin taşınması esnasında meydana gelecek modül veya dizi hattı güç kaybı Eşitlik 4.9 kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu oranın % 1 değerinin altında kalması beklenmektedir.

$$P_M = \frac{2 \times L \times I_{SC}^2}{A_M \times c} = \frac{2 \times 18 \times 8,59^2}{4 \times 56} = 11,85 \text{ W} \quad (4.9)$$

Ana Hat Kesit Hesabı

Evirici-1 için ana hat uzunluğu 12 m,

Evirici-2 için ana hat uzunluğu 27 m,

Evirici-3 için ana hat uzunluğu 42 m'dir.

Her 3 eviriciye bağlanacak olan ana hat için kullanılan kablo kesiti 6 mm² olup bu hatlardan en uzun olan 42 metre uzunluğundaki hat için hesaplama ve kontroller yapılmıştır. Bunun sebebi en uzun hattın sorunsuz ve uygun şekilde çalışmasını sağlayacak kablo kesit alanının, görece olarak daha kısa uzunluklarda ki hatlarda da sorunsuz bir şekilde çalışacak olmasıdır. Sistem üzerinde kullanılması öngörülen eviriciye ait teknik detaylar Çizelge 4.5'te verilmiştir. Ön görülen bu teknik değerlerin sistemin uygun ve güvenli olarak çalışması için yeterli olup olmadığı aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmakta ve kontrol edilmektedir.

Çizelge 4.5. Evirici hesapları.

Parametre	Formül	Değer	Birim	Açıklama
V		0,01		Kayıp faktörü
P _{FV}		230	w	FV panel anma gücü
N		20	Ad.	Panel sayısı
P _{FV-TOP}	$P_{FV-TOP} = n \cdot P_{FV}$	4600	w	Eviricinin A ve B girişi için toplam anma gücü
L		42	m	Ana hat uzunluğu
A _A		6	mm ²	Ana hat kablo kesiti
I _{sc}		8,59	A	FV panel kısa devre akımı
I _z		70	A	FV kablo akım taşıma kapasitesi

Ana Hat Kablo Kesiti

Ana hat için kullanılacak kablo kesit alanı Eşitlik 4.10 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$A_A = \frac{2 \times L \times I_{sc}^2}{(v \times P_{FV-TOP} - P_M) \times c} = \frac{2 \times 42 \times 8,59^2}{(0,01 \times 4600 - 11,85) \times 56} = 3,24 \text{ mm}^2 \quad (4.10)$$

Her bir evirici için kullanılan kablunun kesiti 6 mm² dir. Bu durumda 3,24 mm² < 6 mm² olduğu için seçilen kablo kesiti uygundur.

Ana Hat Akım Taşıma Kapasitesi

Ana hat üzerinden sorunsuz bir şekilde taşınabilecek maksimum akım Eşitlik 4.11 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$I_{max} = 1,25 \times I_{sc} = 1,25 \times 8,59 = 10,74 \text{ A} \quad (4.11)$$

$$I_{max} < I_z$$

10,74 A < 70 A Bu durumda seçilen 6 mm² kablo kesiti uygundur.

Ana Hat Gerilim Düşümü

Fotovoltaik paneller tarafında üretilen elektriğin taşınması esnasında ana hat üzerinde meydana gelecek olan gerilim düşümü oranı Eşitlik 4.12 kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu oranın % 1 değerinin altında kalması beklenmektedir.

$$\% e = \frac{200 \times L \times I_{sc}}{A_M \times n \times U_{MPP} \times c} = \frac{200 \times 42 \times 8,59}{6 \times 20 \times 29,9 \times 56} = 0,36 \quad (4.12)$$

Gerilim düşümü % 0,36 < % 1 olduğundan seçilen kablo kesiti uygundur.

Ana Hat Güç Kaybı

Ana Hat üzerinde meydana gelebilecek güç kaybı Eşitlik 4.13 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$P_A = \text{Ana hat güç kaybı (W)}$

$$P_A = \frac{2 \times L \times I_{sc}^2}{A_A \times c} = \frac{2 \times 42 \times 8,59^2}{6 \times 56} = 18,45 \text{ W} \quad (4.13)$$

Toplam Güç Kaybı

Bu bölümde meydana gelecek toplam güç kaybı Eşitlik 4.14 kullanılarak hesaplanmaktadır. Toplam güç kaybı, ana hat üzerinde meydana gelen güç kaybı ve dizi hattı üzerinde meydana gelen güç kaybının toplanması ile elde edilmektedir.

$P_G = \text{Toplam Güç Kaybı (W)}$

$$P_G = P_A + P_M = 18,45 + 11,85 = 30,3 \text{ W} \quad (4.14)$$

4.3.2. AC Hesaplar

Fotovoltaik sistemler üzerinde tesis edilmiş güneş pilleri, güneş ışınlarının etkisi ile doğru akım elektrik üretmektedirler. Elektrikli cihazlarda kullanılabilir olması için güneş pilleri tarafından üretilen bu elektriğin alternatif akıma dönüştürülmesi gerekmektedir. Doğru akım ile alternatif akım arasında ki bu dönüşüm invertör adı verilen cihazlar ile gerçekleştirilmektedir. Bu bölümde, invertör tarafından alternatif akıma dönüştürülmüş elektriğin en az kayıp ile iletilmesi ve güvenli bir şekilde işletilmesi için gerekli olan teknik alt yapının belirlenmesi konuları ele alınacaktır.

4.3.2.1. Evirici – AG1 Pano Arası Hat Kesintinin Hesaplanması

Tesis edilecek fotovoltaik sistem üzerinde kullanılacak eviricilere ait ön görülen ve hesaplanan teknik değerler Çizelge 4.6’da gösterilmektedir. Bu teknik özelliklerin uygunlukları aşağıdaki formüllerle hesaplanarak uygunluk kontrolleri yapılmaktadır.

Çizelge 4.6. AC evirici hesabı.

Parametre	Değer	Birim	Açıklama
P_{EV-AC}	4.600	W	Evirici çıkış gücü
L_{I-AC}	2	m	Evirici AG-1 pano arası AC kablo uzunluğu
A_{I-AC}	10	mm ²	Evirici AG-1 pano arası AC kablo kesiti
I_K	60	A	Kablo akım taşıma kapasitesi (Havada)
% e	1,5	-	Gerilim düşümü
U_{AC}	230	V	Evirici çıkış gerilimi
e	56	m/Ω.m m ²	Bakır için iletkenlik
I_{AC}	20	A	Evirici maksimum çıkış akımı

Fotovoltaik paneller tarafından üretilen doğru akım elektriği alternatif akıma dönüştürecek olan evirici (inventör) ile elektriksel sistemin kullanımı için tesis edilecek olan AG1 panosu arasındaki hattın güvenli ve uygun bir şekilde çalışabilmesi için gerekli olan minimum kesit alanı Eşitlik 4.15 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$A_{AG1-AC} = \frac{200 \times L_{1-AC} \times P_{EV-AC}}{c \times e \times U_{AC}^2} = \frac{200 \times 2 \times 4600}{56 \times 1,5 \times 230^2} = 0,41 \text{ mm}^2 \quad (4.15)$$

Evirici ile AG1 panosu arasında kullanılacak olan iletken 10 mm² kesitli seçilmiştir. Bu durumda 0,41mm² < 10 mm² olduğu için seçilen kablo kesiti uygundur.

Evirici-AG1 Pano Arası Kablo Akım Taşıma Kapasitesi

Evirici ile AG1 arasında elektriğin taşınması için tesis edilen hattın maksimum akım taşıma kapasitesi Eşitlik 4.16 ile hesaplanmaktadır.

$$I_{max} = 1,25 \times I_{AC} = 1,25 \times 20 = 25 \text{ A} \quad (4.16)$$

$$I_{max} < I_K$$

25 A < 60 A Bu durumda seçilen 10 mm² kablo kesiti uygundur.

Evirici-AG1 Pano Arası Gerilim Düşümü Hesabı

Evirici ile AG1 arasında elektriğin taşınması için tesis edilen hat üzerinde meydana gelen gerilim düşümü Eşitlik 4.17 ile hesaplanmaktadır. Bu oranın % 1,5 değerinin altında kalması beklenmektedir.

$$\% e = \frac{2 \times 100 \times L_{1-AC} \times I_{AC}}{A_{1-AC} \times c \times U_n} = \frac{2 \times 100 \times 2 \times 20}{10 \times 56 \times 230} = 0,06 \quad (4.17)$$

Gerilim düşümü % 0,06 < % 1,5 olduğu için uygundur.

Evirici -AG1 Pano Arası Güç Kaybı Hesabı

Evirici ile AG1 arasında tesis edilen hat üzerinde meydana gelebilecek güç kaybı Eşitlik 4.18 kullanılarak meydana gelen kayıp oranı ise Eşitlik (4.19) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$P_{AG1-Kay} = \frac{2 \times L_{1-AC} \times I_{AC}^2}{A_{1-AC} \times c} = \frac{2 \times 2 \times 20^2}{10 \times 56} = 2,86 \text{ W} \quad (4.18)$$

$$P_{AG1-Kay}(\%) = 2,86 \times \frac{100}{4600} = 0,06 \quad (4.19)$$

Toplam Güç Kaybı

Evirici ile AG1 arasında tesis edilen hat üzerinde meydana gelecek toplam güç kaybı Eşitlik 4.20 kullanılarak hesaplanmaktadır. Evirici ile AG1 arasında tesis edilen hat üzerinde meydana gelecek toplam güç kaybı oranı ise Eşitlik 4.21 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$P_{AG1-Kay} = 3 \times 2,86 = 8,58 \text{ W} \quad (4.20)$$

$$P_{AG1-TKay}(\%) = 8,58 \times \frac{100}{13800} = 0,062 \quad (4.21)$$

4.3.2.2. AG1 Pano – AG2 Pano Arası Hat Kesitinin Hesaplanması

Tesis edilecek fotovoltaik sistemin uygun ve güvenli şekilde çalışabilmesi için tesis edilmiş AG1 ve AG2 panoları arasında kullanılması öngörülen hatta ait teknik detaylar Çizelge 4.7'da gösterilmektedir. Bu teknik özelliklerin uygunlukları aşağıdaki formüllerle hesaplanarak uygunluk kontrolleri yapılmaktadır.

Çizelge 4.7. Panolar arası hat kesim hesabı.

Parametre	Formül	Değer	Birim	Açıklama
P_{EV-AC}		13.800	W	Eviriciler toplam çıkış gücü
$P_{AG1-TK_{ay}}$		8,58	W	Toplam Güç Kaybı
P_{AG1-AC}		13.791	W	AG1 panosu toplam çıkış gücü
L_{2-AC}		230	m	AG-1 – AG-2 pano arası AC kablo uzunluğu
A_{2-AC}		25	mm ²	AG-1 ile AG-2 pano arası AC kablo kesiti
I_K		106	A	Kablo akım taşıma kapasitesi (Havada)
% e		3	-	Gerilim düşümü
U_{AC}		400	V	AG-1 panosu çıkış gerilimi
C		56	m/Ω.m m ²	Bakır için iletkenlik
I_{AC}	$\frac{P_{AG1-AC}}{1,73 \times U_{AC}}$	20	A	AG1 max. çıkış akımı

AG1 panosundan çıkacak olan maksimum akım Eşitlik 4.22 kullanılarak hesaplanmaktadır. 2 pano arasında kullanımına ihtiyaç duyulan kablonun kesit alanı ise Eşitlik 4.23 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$I_{AC} = \frac{P_{AG1-AC}}{1,73 \times U_{AC}} = \frac{13791}{1,73 \times 400} = 20A \quad (4.22)$$

$$A_{AG2-AC} = \frac{100 \times L_{2-AC} \times P_{AG1-AC}}{c \times e \times U_{AC}^2} = \frac{100 \times 230 \times 13792}{56 \times 3 \times 400^2} = 11,8 \text{ mm}^2 \quad (4.23)$$

AG-1 panosu ile AG-2 panosu arasında kullanılacak olan iletken 25 mm² kesitli seçilmiştir. Bu durumda 11,8 mm² < 25 mm² olduğu için seçilen kablo kesit değeri uygundur.

AG1 Pano – AG2 Pano Arası Kablo Akım Taşıma Kapasitesi

AG1 ve AG2 panoları arasında tesis edilecek hat üzerinde meydana gelebilecek maksimum akım değer Eşitlik 4.24 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$I_{max} = 1,25 \times I_{AC} = 1,25 \times 20 = 25 A \quad (4.24)$$

$$I_{max} < I_K$$

25 A < 106 A Bu durumda seçilen 25 mm² kablo kesiti uygundur.

AG1 Pano – AG2 Pano Arası Gerilim Düşümü Hesabı

AG1 ve AG2 panoları arasında tesis edilecek hat üzerinde meydana gelebilecek gerilim düşüm oranı Eşitlik 4.25 kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu değer % 3ün altında kalması beklenmektedir.

$$\% e = \frac{100 \times L_{2-AC} \times I_{AC}}{A_{2-AC} \times c \times U_{AC}} = \frac{100 \times 230 \times 20}{25 \times 56 \times 400} = 0,82 \quad (4.25)$$

Gerilim düşümü % 0,82 < % 3 olduğu için uygundur.

AG1 Pano – AG2 Pano Arası Güç Kaybı Hesabı

AG1 ve AG2 panoları arasında tesis edilecek hat üzerinde meydana gelebilecek güç kaybı değeri Eşitlik 4.26 kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu kayıpların % 3 oranının altında kalması beklenmektedir.

$$P_{AG2-Kay} = \frac{L_{2-AC} \times I_{AC}^2}{A_{2-AC} \times c} = \frac{230 \times 20^2}{25 \times 56} = 65,71 W \quad (4.26)$$

Toplam Güç Kaybı Hesabı

Sistem üzerinde bu noktaya kadar meydana gelen toplam güç kaybı Eşitlik 4.7 ile kayıp oranı ise eşitlik 4.28 ile hesaplanmaktadır.

$$P_{Kay} = P_{AG1-Kay} + P_{AG2-Kay} \quad (4.27)$$

$$P_{Kay} = 8,58 + 65,71 \quad P_{Kay} = 74,29 \text{ W}$$

$$P_{Kay}(\%) = 74,29 \times 100 / PEV - AC \quad (4.28)$$

$$P_{Kay}(\%) = 74,29 \times 100 / 13.800, \quad P_{Kay}(\%) = 0,54$$

4.3.3. Sigorta Seçimi

Bu bölümde fotovoltaik tesisin güvenli bir şekilde işletilebilmesi için ihtiyaç duyulan elektrik sigorta tasarımı ele alınacaktır.

4.3.3.1. AG1 Panosu Monofaze Sigorta Hesabı

Monofaze hat üzerine yerleştirilecek sigorta için öngörülen teknik özellikler Çizelge 4.8'de verilmiştir. Bu değerlerin uygunlukları ve hesaplamaları aşağıdaki formüllere göre yapılmaktadır.

Çizelge 4.8. Monofaze sigorta teknik özellikler.

Formül İşareti	Değer	Birim	Açıklama
P_{EV-AC}	4600	W	Evirici çıkış gücü
$P_{AG1-Kay}$	2,86	W	Evirici – AGI arası güç kaybı
U_{AC}	230	V	Evirici çıkış gerilimi
I_n		A	Akım taşıma kapasitesi

Akım Taşıma Kapasitesi

Kullanılacak sigorta için akım taşıma değeri Eşitlik 4.29 ile hesaplanmaktadır. Hesaplamanın ardından ulaşılan değer 1,25 'lik bir güvenlik katsayısı ile çarpılarak sigorta için kullanılacak akım kapasitesi belirmemektedir.

$$I_n = (P_{(EV-AC)} - P_{AG1-Kay}) / (U_{AC} \times \cos \emptyset) \quad (4.29)$$

$$I_n = (4.600 - 2,86) / (230 \times 0,95) = 21,04 \text{ A}$$

$$1,25 \times I_n = 1,25 \times 21,04 = 26,3 \text{ A}$$

Seçilen Sigorta: 32 A

4.3.3.2. AG1 Panosu Trifaze Sigorta Hesabı

AG1 panosu için tesis edilmiş trifaze hat üzerine yerleştirilecek sigorta için öngörülen teknik özellikler Çizelge 4.9'da verilmiştir. Bu değerlerin uygunlukları ve hesaplamaları aşağıdaki formüllere göre yapılmaktadır.

Çizelge 4.9. Trifaze sigorta teknik özellikler (AG1).

Parametre	Değer	Birim	Açıklama
P_{AG1-AC}	13.800	W	Evirici çıkış gücü
$P_{AG1-Kay}$	8,58	W	Evirici – AG1 arası güç kaybı
U_{AC}	400	V	Evirici çıkış gerilimi
I_n		A	Akım taşıma kapasitesi
$\cos \emptyset$	0,95	-	Güç Faktörü

Akım taşıma kapasitesi

Kullanılacak sigorta için akım taşıma değeri Eşitlik 4.30 ile hesaplanmaktadır. Hesaplamanın ardından ulaşılan değer 1,25 'lik bir güvenlik katsayısı ile çarpılarak sigorta için kullanılacak akım kapasitesi belirmemektedir.

$$I_n = (P_{(EV-AC)} - P_{AG1-Kay}) / (\sqrt{3} \times U_{AC} \times \cos \emptyset) \quad (4.30)$$

$$I_n = (13.800 - 8,58) / (\sqrt{3} \times 400 \times 0,95) = 20,08 \text{ A}$$

$$1,25 \times I_n = 1,25 \times 20,8 = 26 \text{ A}$$

Seçilen Sigorta: 50 A

4.3.3.3. AG2 Panosu Trifaze Sigorta Hesabı

AG2 panosu için tesis edilmiş trifaze hat üzerine yerleştirilecek sigorta için öngörülen teknik özellikler Çizelge 4.10'da verilmiştir. Bu değerlerin uygunlukları ve hesaplamaları aşağıdaki formüllere göre yapılmaktadır.

Çizelge 4.10. Trifaze sigorta teknik özellikler (AG2).

Parametre	Değer	Birim	Açıklama
P_{AG2-AC}	13791	W	Evirici çıkış gücü
$P_{AG1-Kay}$	39,85	W	Evirici – AGI arası güç kaybı
U_{AC}	400	V	Evirici çıkış gerilimi
I_n		A	Akım taşıma kapasitesi
$\cos \emptyset$	0,95	-	Güç Faktörü

Akım taşıma kapasitesi

Kullanılacak sigorta için akım taşıma değeri Eşitlik 4.31 ile hesaplanmaktadır. Hesaplamanın ardından ulaşılan değer 1,25 'lik bir güvenlik katsayısı ile çarpılarak sigorta için kullanılacak akım kapasitesi belirlenmektedir.

$$I_n = (P_{(EV-AC)} - P_{AGI-Kay}) / (UAC \times \cos \emptyset) \quad (4.31)$$

$$I_n = (1.3791 - 39,85) / (400 \times 0,95) = 36 \text{ A}$$

$$1,25 \times I_n = 1,25 \times 36 = 45 \text{ A}$$

Seçilen Sigorta: 50 A

4.3.4. Topraklama Hesabı

Bu bölümde fotovoltaik tesisin güvenli bir şekilde işletilebilmesi için ihtiyaç duyulan topraklama tasarımı ele alınacaktır.

Topraklama hesabı ve kontrolleri için gerçekleştirilmiş ölçümlere ait teknik veriler Çizelge 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Tesis çevresindeki toprağın özgül direncinin ölçümü.

A - GENEL BİLGİLER	
ÖLÇÜM TARİHİ	01/02/2014
HAVA DURUMU	Açık
TOPRAK DURUMU	Nemli
B - KULLANILAN ÖLÇÜM CİHAZI	
MARKA-MODEL	Kyoritsu 4106-Earth Resistance Tester
SERİ NO	W0371214
HATA SINIFI	% 1

Çizelge 4.11. (devam ediyor).

ÖLÇÜM YÖNTEMİ		3 uçlu	
C - ÖLÇÜM SONUÇLARI			
SIRA NO	a (m)	R ÖLÇÜLEN (Ω)	n (Ω.m)
1	3	39	117
2	4	42	168
3	5	38	190
4	3	41	123
ORTALAMA		40	149,5

AÇIKLAMALAR

a: Ölçüm kullanılan kazıkların arasındaki uzaklık.

R: Ölçüm yapılan zemin toprağına ait direnç değeri.

n: Hesaplanarak bulunan zemin toprağına ait özgül direnç değeri

İş Güvenliği Kanununun 270.-354. maddeleri gereğince elektrik tesislerinde topraklama yapılması mecburidir. Ayrıca Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliğinin 7. ve 10. maddeleri uyarınca topraklama sisteminin tesis edilmesi gerekmektedir.

Çizelge 4.12. Topraklama hesabı için teknik veriler.

Parametre	Formül	Değer	Birim	Açıklama
ρ_e		40	Ω	Toprak özgül direnci (Ölçümle bulundu)
l_y		50	m	Yatay topraklayıcı uzunluğu
d_y		0,00636	m	Yatay topraklayıcı çapı
R_y	$\frac{\rho_e}{\pi \cdot l_y} \ln \frac{2 l_y}{d_y}$		Ω	Topraklama eş değer direnci

Fotovoltaik tesislerin güvenli bir şekilde çalışabilmesi için mutlaka gerekli topraklama tesisatının kurulası gerekmektedir. Bu tesis için gerekli olan topraklama hesabı Çizelge

4.12'de belirtilmiş teknik veriler ve aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu kapsamda topraklama eş değer direncinin hesabı için Eşitlik 4.32 kullanılmaktadır. Hesaplanan bu değer için uygun bir topraklama için 5Ω küçük olması gerekmektedir.

$$R_y = \frac{\rho_e}{\pi \cdot l_y} \ln \frac{2 \cdot l_y}{d_y} \quad (4.32)$$

$$R_y = \frac{40,00}{3,14 \times 50} \ln \frac{2 \times 50}{0,00636} = 2,45 \Omega$$

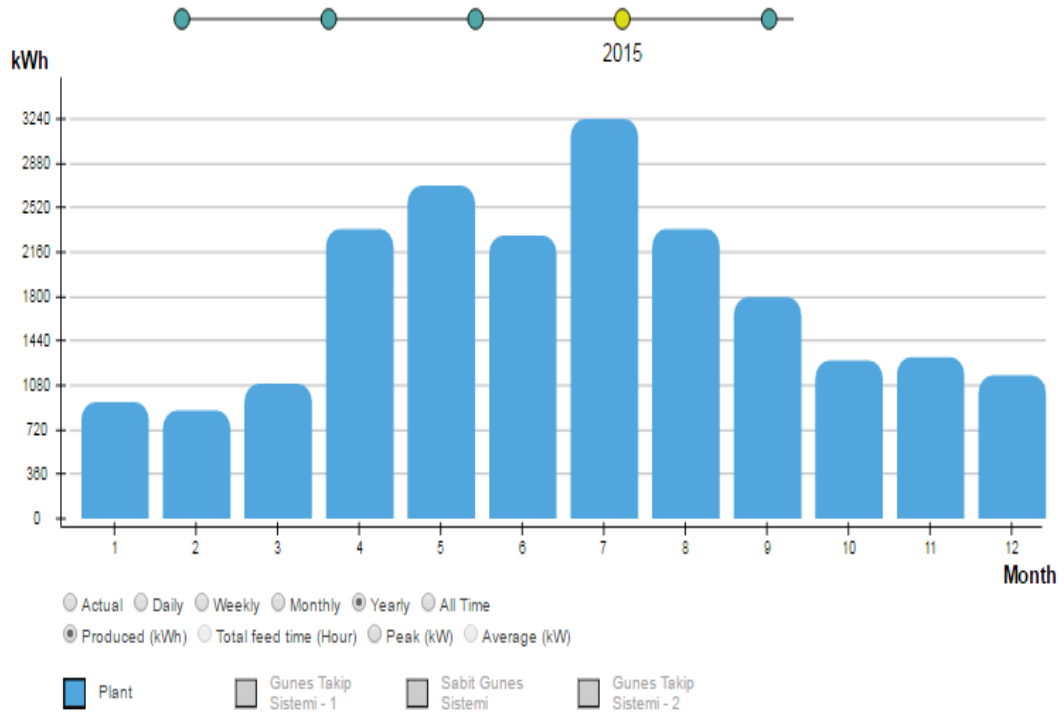
$2,4502 < 5$ uygundur.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

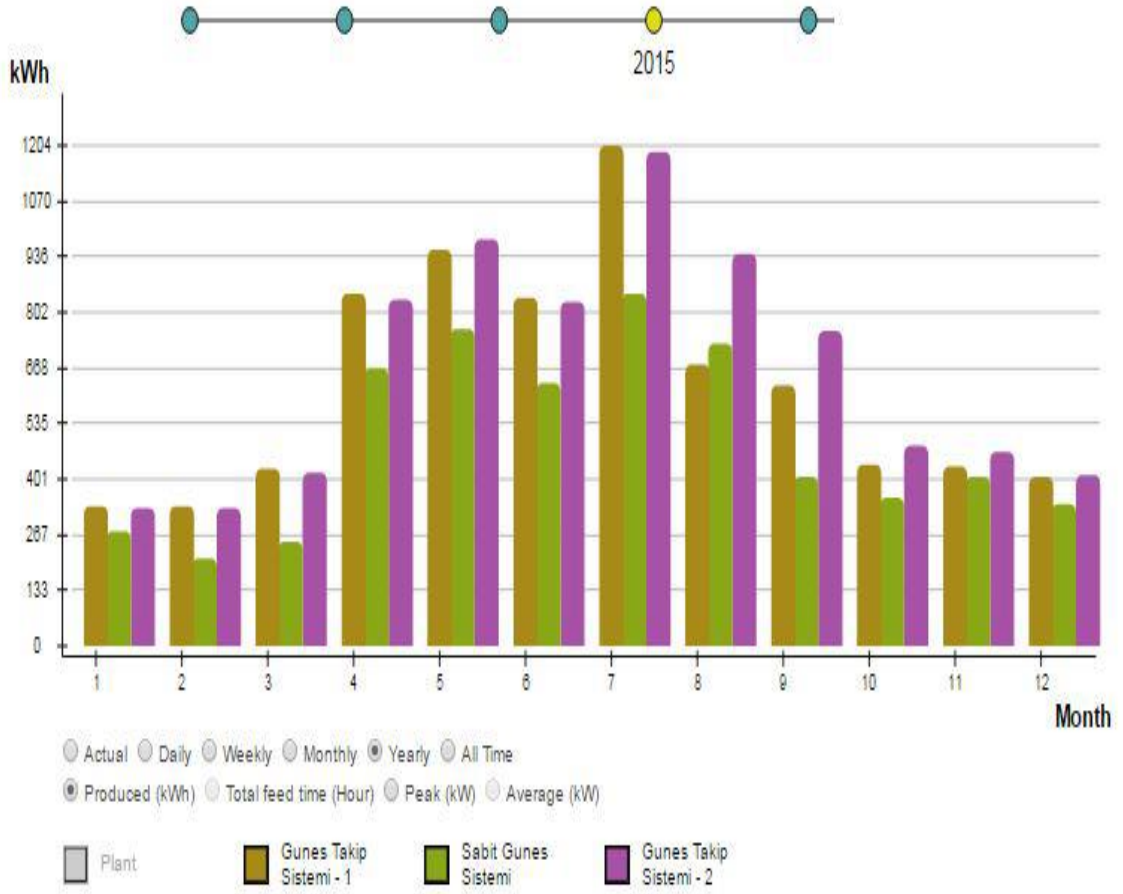
5.1. ENERJİ ÜRETİMLERİ

Üretimin anlık olarak izlendiği bir yıllık süre boyunca kurulu tesis üzerindeki 2 adet hareketli sistem ve 1 adet sabit fotovoltaik sistem üzerinden toplamda 2015 yılı için 21.336,0 kWh 'lik bir elektrik üretimi elde edilmiştir. Aylara göre üretilen elektrik miktarı Şekil 5.1 'de görülmektedir. Özellikle güneşlenme süresinin uzun olduğu yılın 4. ve 8. ayları arasında üretilen elektrik miktarı, yılın diğer aylarına kıyasla çok daha yüksek değerlere ulaşmıştır. En yüksek elektrik üretimi temmuz ayında 3.240,6 kWh iken, en düşük üretim 879,3 kWh ile şubat ayında gerçekleşmiştir.



Şekil 5.1. 2015 yılı için tesisin aylara göre toplam elektrik üretimi.

Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Çizelge 5.1 incelendiğinde; toplam üretimde sabit ve hareketli fotovoltaik sistemlerin karşılaştırılması görülmektedir. Benzer şekilde yılın 4. ve 8. ayları arasında her üç sistemde de enerji üretimleri daha fazla olmuştur. Bununla birlikte; yıllık üretimin tamamına bakıldığında hareketli fotovoltaik sistemler sabit fotovoltaik sistem ile kıyaslandığında daha fazla enerji ürettiği açık bir biçimde görülmektedir.



Şekil 5.2. Sabit ve hareketli sistemlerin karşılaştırılması.

Çizelge 5.1. Aylara göre her üç sistemden elde edilen enerji miktarları.

	Hareketli Sistem 1	Sabit Sistem	Hareketli Sistem 2
Ocak	337,2	276,0	333,5
Şubat	337,5	209,5	332,3
Mart	426,1	252,3	415,8
Nisan	848,9	669,5	834,6
Mayıs	951,6	764,9	980,9
Haziran	840,0	634,4	827,9
Temmuz	1204,2	848,9	1187,5
Ağustos	667,3	728,8	944,3
Eylül	629,0	406,7	758,4
Ekim	436,9	357,4	432,6
Kasım	430,9	406,4	467,9
Aralık	404,8	341,0	410,1
Toplam	7514,4	5895,8	7925,8

Sabit sistemlerde günlük maksimum üretim 11.00 ile 15.00 saatleri arasında gözlenmektedir. Bunun en temel sebebi; sabitlenmiş fotovoltaik sistemlerin tam güney yönüne 30 derecelik açı ile konumlandırılmış olması ve bu sayede güneş ışınlarının bu saatler arasında güney yönünden paneller üzerine dike yakın bir açı ile gelmesidir. Güneş ışınlarının panel üzerine daha düşük açılı geldiği günün sabah ve akşam saatlerinde enerji üretimi ise ciddi oranda düşmektedir. Özellikle yaz aylarında güneşin doğması ve batması arasında ki sürenin uzun olması, yani güneşlenme sürelerinin uzamasına rağmen mevcut güneş potansiyelin çok düşük bir oranı verimli kullanılabilmektedir. Kurulu tesis üzerinde 2015 yılı boyunca sabit fotovoltaik sistem tarafından üretilen toplam enerji miktarı 5.895,8 kWh 'lık bir değere ulaşmaktadır.

Tek eksenli hareketli güneş enerji santralinin sabit sisteme kıyasla üretiminin yüksek olmasının en temel sebebi ise hareketli fotovoltaik sistemlerin güneşin doğmasından, batmasına kadar güneşi takip ederek güneş ışınından sabit sistemlere kıyasla çok daha fazla yararlanmasıdır. Bu sayede hareketli fotovoltaik sistemler günün bütün saatlerinde güneş potansiyelinden sabit sistemlere kıyasla çok daha fazla yararlanabilmektedirler. Çizelge 5.1 'de görülebileceği gibi 2015 yılı boyunca toplam üretimde göz önünde bulundurulduğunda hareketli Sistem 1 tarafından üretilen toplam

enerji 7.514,4 kWh ve hareketli Sistem 2 tarafından üretilen toplam enerji ise 7.925,8 kWh 'tir.

Hareketli fotovoltaik sistemlerde, sistem hareketini sağlayan motorların enerji tüketimleri ile ilgili bazı çekinceler mevcuttur. Hareketli sistemler üzerinde kullanılan motor gücü ve bu motor tarafından tüketilen elektrik miktarına bakıldığında, güneş takip sistemli fotovoltaik paneller üzerinde kullanılan hareket motorlarının gün içerisinde yalnızca 1 saat civarında bir çalışma süresine sahip olduğu görülmektedir. Bu 1 saatlik süre gün içerisinde belirli aralıklarla gerçekleşen yön değiştirme hareketinin, sabah saatlerindeki güneşe yönelme ve üretimin sifira yaklaştığı akşam saatlerinde panellerin stand-by pozisyonunu aldığı çalışma süreleridir. Motor gerilim değerleri 24 V ve kullandığı akım 2,2 A olduğu göz önünde bulundurularak PS300-4.6 kW güneş takip sisteminin Eşitlik 5.1'e göre hesaplama yapıldığında 52,8 W güç harcadığı görülmektedir.

$$P = I \times V \quad (5.1)$$

Saatlik tüketilen enerji 52,8 Wh olmaktadır.

$$E=P \times t \quad (5.2)$$

Basit bir hesapla 2015 yılı boyunca hareketli fotovoltaik sistemlerin motorları tarafından çekilen enerji şu Eşitlik 5.2 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$365 \times 0,0528 = 19,272 \text{ kWh (1 yıl boyunca gerçekleşen toplam tüketim miktarı)}$$

Güneş takipli sistemlerden elde edilen enerjiler Hareketli sistem 1 ve Hareketli sistem 2 için sırasıyla 7.514,4 kWh ve 7.925,8 kWh olduğu göz önünde bulundurulursa yaklaşık en düşük 7.495,128 kWh 'lik enerji üretimi söz konusudur. Bu da sabit sistemden elde edilen enerjiden daha fazladır.

Çalışmada; tesis üzerinde aynı özelliklere sahip iki adet hareketli fotovoltaik sistem kullanılmasına rağmen işletme sürecinde oluşan aksaklıklar, çeşitli kontrollerin

gerçekleştirilebilmesi için sistemin kısa süreli durdurulması gibi sebeplerden üretim değerlerinde farklılıklar görülmektedir. Yukarıdaki hesaplamalarda çalışma yılı içerisinde enerji üretimi düşük olan sistem göz önünde bulundurularak daha dar toleranslı bir hesaplama yapılmıştır. Bir yıl içerisinde motor tarafından gerçekleştirilen toplam enerji sarfiyatı 19,272 kWh iken Hareketli 1 fotovoltaik sistemi tarafından üretilen net enerji ise 7.495,128 kWh' tir. Bu tüketim değerinin bir yıl içerisinde üretilen enerji miktarı ile kıyaslandığında % 0.25 gibi çok küçük bir dilime karşılık geldiği görülmektedir.



Şekil 5.3. Sabit sistem ile hareketli sistem 2'nin karşılaştırılması.

Şekil 5.3. incelendiğinde 2015 yılı boyunca hareketli fotovoltaik sistem 2 ve sabit fotovoltaik sistemler tarafından üretilen enerji miktarlarının aylara göre değerleri görülmektedir. Her iki sistemde toplam üretilen enerji miktarı 13.821,6 kWh 'tir. Sistem tarafından üretilen elektrik miktarları incelendiğinde Hareketli Fotovoltaik Sistem 2'nin sabitlenmiş fotovoltaik sisteme kıyasla yıl içinde çok daha fazla üretim yaptığı açık bir şekilde görülmektedir. İkili sistem göz önünde bulundurularak yıl boyunca üretilen toplam elektrik miktarına bakıldığında hareketli sistemin ve

sabitlenmiş sistemin toplam üretim içerisindeki payları sırasıyla % 57 ve % 43 olduğu görülmektedir.

Hareketli sistemlerin ve sabit sistemin üretim değerleri arasında ki farka bakıldığında, 2015 yılı boyunca üretilen toplam enerjileri dikkate alınarak hareketli fotovoltaik sistemin sabit fotovoltaik sisteme kıyasla yaklaşık % 30 daha verimli çalıştığı görülmektedir. Hareketli ve sabit sistemler arasındaki enerji üretim farkları Şekil 5.4.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Hareketli sistem 1 ve 2'nin karşılaştırılması.

Hareketli fotovoltaik sistemler üzerlerinde buldukları internet bağlantısını kullanarak o güne ait anlık güneşin konum verilerine ulaşarak güneşin batışına kadar geçen sürede güneşin konumunu takip ederek enerji üretiminde en yüksek verime ulaşmaktadır. Güneşin batmasıyla birlikte sistem 1 saat mevcut konumunu koruduktan sonra güney konumuna dönmektedir. Hareketli sistem güney konumuna döndükten

sonra mevcut konumu referans alarak sabah güneşin doğuşunu beklemek üzere doğu yönünde konumlanmak için hareket etmektedir. Bu esnada hafızasına aldığı ilgili güne ait güneş hareket verilerini silmekte ve doğacak yeni güneş için verileri beklemeye geçmektedir.

Tesiste kullanılmakta ve takip edilmekte olan 2 hareketli fotovoltaik sistemin enerji üretim değerleri arasında da farklar oluştuğu gözlenmiştir. Bu farkların oluşmasının muhtemel sebepleri;

1. Hareketli sistemlerin güneş takibinde oldukları süre içerisinde dışarıdan gelen olumsuz bir fiziksel müdahale sonucunda ilgili sistem kendisini korumaya alabilmekte ve olumsuz dış etken ortadan kalkana kadar hareketsiz beklemektedir. Olumsuz dış etkenin ortadan kalkması sonucunda ilgili hareketli sistem tekrar harekete geçmekte ancak herhangi bir etkiye maruz kalmayan ve çalışmasına düzgün bir şekilde devam eden diğer sistemin güneş takip konumu ile arasında fark oluşmaktadır. Bu konum farkı iki hareketli sisteme ait üretim değerleri arasında da bir fark oluşturabilmektedir.
2. Özellikle fotovoltaik panellerin şiddetli rüzgârlara maruz kaldığı günlerde bu tip durumlarla karşılaşılabilir. Bu gibi olumsuzluklar fotovoltaik panellerin konumlandırılmasının ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.
3. Tesis üzerinde kullanılan hareketli fotovoltaik sistemler tek eksenle hareket edebildiğinden dolayı yaz ve kış mevsimlerinde güneşin yüksekliğine bağlı olarak ve çevredeki gölgelenme etkisi oluşturan komşu yüksek binalar ve aydınlatma direkleri sebebiyle bazı fotovoltaik modüllerin güneş ışınlarından direkt yararlanamamasından kaynaklanan üretim farklılıkları meydana gelebilmektedir.
4. Hareketli fotovoltaik sistemler üzerinde tesis edilen topraklama hattından veya diğer elektrik kaynaklı hatalar sebebiyle sistemlerden birisinin devreden çıkarak belirli bir süre çalışmaz durumda kalması ve beklenen verimde enerji üretilmemesinden kaynaklanan farklar oluşabilmektedir.

5.2. ÜRETİM KAZANÇLARININ KIYASLANMASI

Çalışmanın gerçekleştirildiği tesiste kullanılmakta olan konstrüksiyon elemanlar yerli imalattır. Yerli imalat kullanılması sebebiyle 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun'da belirtilen ücretlendirme skalasına göre tesis teşvikten yararlanmaya hak kazanmıştır. Buna göre satış fiyatı üzerine ilave 14.1USD cent / kWh olarak bir teşvik desteği belirlenmiştir. 2015 yılı ortalama Dolar kuru baz alınarak hesaplanacak olursa 38,42 kuruş bulunmaktadır.

Çalışma yılına ait üretimin maddi karşılığı aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir.

Genel Toplamda; $0,3842 \text{ TL} \times 21.336 \text{ kWh} = 8.197,29 \text{ TL}$ tutarında üretim gerçekleştirilmiştir.

Fotovoltaik tesis üzerinde bulunan sabit ve hareketli fotovoltaik sistemler tarafından üretilen enerji miktarı aşağıda gösterilmiştir

Hareketli fotovoltaik sistemler tarafından üretilen toplam enerji miktarı;

Hareketli Sistem 1: $0,3842 \text{ TL/kWh} \times 7.514,4 \text{ kWh} = 2.887,032 \text{ TL}$

.

Hareketli Sistem 2: $0,3842 \text{ TL/kWh} \times 7.925,8 \text{ kWh} = 3.045,092 \text{ TL}$

Sabit sistem tarafından üretilen toplam enerji miktarı ise;

Sabit Sistem: $0,3842 \text{ TL/kWh} \times 5.895,8 \text{ kWh} = 2.265,089 \text{ TL}$

5.3. MALİYET ANALİZİ

Bu çalışmanın gerçekleştirildiği fotovoltaik sistem tarafından üretilen elektrik enerjisinin tamamı sistemin kurulduğu tesis tarafından kullanılmaktadır. Sistemin kurulumu esnasında tüm maliyetler ilgili kurumun öz kaynakları tarafından

karşılanmış olup herhangi bir ekstra kredi veya faiz maliyeti bulunmamaktadır. Ayrıca fotovoltaik sistemin kurulmasında asıl hedeflenen tesisin elektrik giderlerini çevreci bir yöntem kullanarak azaltmak istenmesidir. Bu durumda fotovoltaik sistemin mali olarak uygulanabilirliğini incelemek için en uygun yöntemlerden birisi olan Basit Geri Ödeme Süre (Simple Payback Period / SPP) analiz yöntemi kullanılarak yatırımının yaklaşık geri dönüşüm süresi hesaplanabilmektedir.

Fotovoltaik sistemlerin kurulumunda Hareketli sistemler için ayrı ayrı 32.318,55 TL değerinde bir ilk yatırım maliyeti oluşmuşken, sabit sistem için bu ilk yatırım maliyeti 26.633,089 TL olarak meydana gelmiştir. Bu durumda hareketli ve sabit fotovoltaik sistemler için ayrı ayrı geri ödeme süreleri Eşitlik 5.3 ile hesaplanabilmektedir.

$$SPP = \frac{\text{İlk Yatırım Maliyeti}}{\text{Yatırımın Yıllık Getirisi}} \quad (5.3)$$

Hareketli Sistem 1 için Geri Ödeme Süresi:

$$SPP = \frac{32.318,55}{2.887,032} \approx 11,2 \text{ yıl}$$

Hareketli Sistem 1 için Geri Ödeme Süresi:

$$SPP = \frac{32.318,55}{3.045,092} \approx 10,6 \text{ yıl}$$

Sabit Sistem için Geri Ödeme Süresi:

$$SPP = \frac{26.633,60}{2.265,089} \approx 11,8 \text{ yıl}$$

Tesis tüketimi için kurulan hareketli fotovoltaik sistemlerden “Hareketli Sistem 1” üzerinde oluşan arızalar ve çeşitli ölçümlerin yapılabilmesi için sistemin hareketsiz bırakılmasından kaynaklı nedenlerden dolayı “Hareketli Sistem 2” ye kıyasla ciddi ölçüde düşük bir üretim gözlenmektedir. Hareketli fotovoltaik sistemlerden beklenen

performansa en yakını Hareketli 2 sistemi sergilemiş olduğu için geri dönüşüm sürelerinin kıyaslamasında Hareketli Sistem 2 ile Sabit Sistemin geri ödeme sürelerinin göz önünde bulundurularak kıyaslanması daha gerçekçi bir sonuç verecektir. Bu durumda Sabit Sisteme kıyasla Hareketli Sistem 2 kullanıcılarına % 10 daha kısa bir geri ödeme süresi sunmaktadır.

Fotovoltaik sistem yatırımlarının katkısını mali olarak incelemek için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Bu kapsamda, ilk kurulum maliyetleri sabit ve hareketli fotovoltaik sistemler için ayrı ayrı ele alınarak üretici tarafından garanti edilmiş ve genel yaklaşım olarak da tasarımlarda kullanılan 25 yıllık ekonomik ömür göz önünde bulundurularak hesaplamalar yapılacaktır.

Fotovoltaik sistemler sahada ilk kurulumlarından itibaren özellikle paneller üzerinde oluşan aşırı kirlenme gibi etkilerden dolayı ciddi oranda verim kaybına uğramaktadırlar. Bu çalışmada yapılan ölçümler ve imalatçı tarafından verilen garanti kapsamında bu oran yaklaşık % 2,5 olarak belirlenmiştir. Panel imalatı ve standart test sonuçları ve yine imalatçı tarafından garanti edilen lineer performans düşümü ilk yılın ardından, yıllık maksimum % 0,7 gibi sabit bir değer olarak ön görülmektedir. Bu koşullar göz önünde bulundurularak yıllara bağlı ön görülen mali getiriler Hareketli Fotovoltaik Sistemler ve Sabit Fotovoltaik Sistem için ayrı ayrı Çizelge 5.2, Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4 altında verilmiştir.

Çizelge 5.2 Hareketli sistem 1 için 25 yıllık üretim tahmini.

Yıl	İlk Yıl Toplam Gelir	İlgili Dönem İçin Verim Kaybı	İlgili Dönem İçin Öngörülen Toplam Gelir
2015	2.887,032 TL	-	2.887,032 TL
2016	2.887,032 TL	% 2,50	2.814,86 TL
2017	2.887,032 TL	% 3,20	2.794,65 TL
2018	2.887,032 TL	% 3,90	2.774,44 TL
2019	2.887,032 TL	% 4,60	2.754,23 TL
2020	2.887,032 TL	% 5,30	2.734,02 TL
2021	2.887,032 TL	% 6,00	2.713,81 TL
2022	2.887,032 TL	% 6,70	2.693,60 TL
2023	2.887,032 TL	% 7,40	2.673,39 TL
2024	2.887,032 TL	% 8,10	2.653,18 TL
2025	2.887,032 TL	% 8,80	2.632,97 TL
2026	2.887,032 TL	% 9,50	2.612,76 TL
2027	2.887,032 TL	% 10,20	2.592,55 TL
2028	2.887,032 TL	% 10,90	2.572,35 TL
2029	2.887,032 TL	% 11,60	2.552,14 TL
2030	2.887,032 TL	% 12,30	2.531,93 TL
2031	2.887,032 TL	% 13,00	2.511,72 TL
2032	2.887,032 TL	% 13,70	2.491,51 TL
2033	2.887,032 TL	% 14,40	2.471,30 TL
2034	2.887,032 TL	% 15,10	2.451,09 TL
2035	2.887,032 TL	% 15,80	2.430,88 TL
2036	2.887,032 TL	% 16,50	2.410,67 TL
2037	2.887,032 TL	% 17,20	2.390,46 TL
2038	2.887,032 TL	% 17,90	2.370,25 TL
2039	2.887,032 TL	% 18,60	2.350,04 TL
		TOPLAM	64.865,83 TL

Çizelge 5.3. Hareketli sistem 2 için 25 yıllık üretim tahmini.

Yıl	İlk Yıl Toplam Gelir	İlgili Dönem İçin Verim Kaybı	İlgili Dönem İçin Öngörülen Toplam Gelir
2015	3.045,092 TL	-	3.045,092 TL
2016	3.045,092 TL	% 2,50	2.968,96 TL
2017	3.045,092 TL	% 3,20	2.947,65 TL
2018	3.045,092 TL	% 3,90	2.926,33 TL
2019	3.045,092 TL	% 4,60	2.905,02 TL
2020	3.045,092 TL	% 5,30	2.883,70 TL
2021	3.045,092 TL	% 6,00	2.862,39 TL
2022	3.045,092 TL	% 6,70	2.841,07 TL
2023	3.045,092 TL	% 7,40	2.819,76 TL
2024	3.045,092 TL	% 8,10	2.798,44 TL
2025	3.045,092 TL	% 8,80	2.777,12 TL
2026	3.045,092 TL	% 9,50	2.755,81 TL
2027	3.045,092 TL	% 10,20	2.734,49 TL
2028	3.045,092 TL	% 10,90	2.713,18 TL
2029	3.045,092 TL	% 11,60	2.691,86 TL
2030	3.045,092 TL	% 12,30	2.670,55 TL
2031	3.045,092 TL	% 13,00	2.649,23 TL
2032	3.045,092 TL	% 13,70	2.627,91 TL
2033	3.045,092 TL	% 14,40	2.606,60 TL
2034	3.045,092 TL	% 15,10	2.585,28 TL
2035	3.045,092 TL	% 15,80	2.563,97 TL
2036	3.045,092 TL	% 16,50	2.542,65 TL
2037	3.045,092 TL	% 17,20	2.521,34 TL
2038	3.045,092 TL	% 17,90	2.500,02 TL
2039	3.045,092 TL	% 18,60	2.478,70 TL
		TOPLAM	68.417,13 TL

Çizelge 5.4 Sabit sistem 1 için 25 yıllık üretim tahmini.

Yıl	İlk Yıl Toplam Gelir	İlgili Dönem İçin Verim Kaybı	İlgili Dönem İçin Öngörülen Toplam Gelir
2015	2.265,089 TL	-	2.265,089 TL
2016	2.265,089 TL	% 2,50	2.208,46 TL
2017	2.265,089 TL	% 3,20	2.192,61 TL
2018	2.265,089 TL	% 3,90	2.176,75 TL
2019	2.265,089 TL	% 4,60	2.160,89 TL
2020	2.265,089 TL	% 5,30	2.145,04 TL
2021	2.265,089 TL	% 6,00	2.129,18 TL
2022	2.265,089 TL	% 6,70	2.113,33 TL
2023	2.265,089 TL	% 7,40	2.097,47 TL
2024	2.265,089 TL	% 8,10	2.081,62 TL
2025	2.265,089 TL	% 8,80	2.065,76 TL
2026	2.265,089 TL	% 9,50	2.049,91 TL
2027	2.265,089 TL	% 10,20	2.034,05 TL
2028	2.265,089 TL	% 10,90	2.018,19 TL
2029	2.265,089 TL	% 11,60	2.002,34 TL
2030	2.265,089 TL	% 12,30	1.986,48 TL
2031	2.265,089 TL	% 13,00	1.970,63 TL
2032	2.265,089 TL	% 13,70	1.954,77 TL
2033	2.265,089 TL	% 14,40	1.938,92 TL
2034	2.265,089 TL	% 15,10	1.923,06 TL
2035	2.265,089 TL	% 15,80	1.907,20 TL
2036	2.265,089 TL	% 16,50	1.891,35 TL
2037	2.265,089 TL	% 17,20	1.875,49 TL
2038	2.265,089 TL	% 17,90	1.859,64 TL
2039	2.265,089 TL	% 18,60	1.843,78 TL
		TOPLAM	50.892,02 TL

Panel imalatçısı tarafından verilen performans garantisi kapsamında yıllara göre hesaplanan panellerin üretim verimlerinde ki düşüşler ve buna bağlı tesisin ekonomik ömrü olarak kabul edilen 25 yıllık süre boyunca elde edilecek tahmini gelirler sırasıyla hesaplanmıştır. Buna göre 25 yıl sonunda sistemlerden elde edilebilecek gelirler toplamda sırasıyla Hareketli Sistem 1 için 64.865,83 TL, Hareketli Sistem 2 için 68.417,13 TL, Sabit Sistem için 50.892,02 TL olarak öngörülmektedir.

Bu veriler ışığında hareketli fotovoltaik sistemlerin ilk yatırım maliyetlerinin sabit sistemlerin ilk yatırım maliyetlerine kıyasla yaklaşık % 22 daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak hareketli sistemlerin ekonomik ömürleri boyunca sabit sistemlere kıyasla % 30' un üzerinde fazladan bir getiri sağladıkları görülmektedir.

BÖLÜM 6

SONUÇ

Enerjide dışa bağımlılığın hem maddi hem de stratejik olarak önemli bir sorun olduğu çağımızda yenilenebilir enerji kaynaklarından doğa dostu ve güvenli olan güneş enerjisinden daha çok faydalanmamız zaruri bir ihtiyaç halini almıştır. Ancak güneş enerjisi ve benzeri yenilenebilir enerji kaynaklarında elde edilen enerjinin depolanarak saklanma teknolojisi günümüzde halen pahalı bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple güneş enerjisinden elektrik üretiminin en verimli şekilde kullanılabilmesi için üretilen enerjinin tüketim noktasına olabildiğince yakın bir noktada tesis edilmesi tercih edilmektedir. Bu sayede fotovoltaik tesislerini olabildiğince kullanım noktalarına yakın yerlere tesis edilmesi ekipmanlar ile ilgili olarak ilk yatırım maliyetini düşürdüğü gibi geri dönüş süresini de kısaltmaktadır. Ancak özellikle İstanbul gibi arazi maliyetlerinin çok yüksek olduğu yerleşim alanlarında mümkün olan minimum alanlarda maksimum üretim hedeflenmelidir. Böyle bir yaklaşım sonucunda bu çalışmada da görüldüğü gibi hareketli fotovoltaik sistemlerin seçilmesi ile yalnızca ekipmanların ilk yatırım maliyetinde % 22 oranında bir artış karşılığında toplam enerji üretiminde yaklaşık % 30 gibi fazladan bir fayda elde edilebilmektedir. Özellikle ilerleyen teknolojiye paralel olarak panellerin ekonomik ömürlerinin artması ile işletme ömrü boyunca elde edilebilecek % 30 oranında ki fazladan kazanç çok daha önemli bir avantaj halini alacaktır. Ancak özellikle hareketli sistemlerin herhangi bir sebepten dolayı devre dışı kalması çalışmada da görüldüğü gibi üretim değerlerini sabit sistemlerinde altına çekebilmektedir. Hareketli fotovoltaik sistemlerin kullanımında karşılaşılan bu işletme zorluğu tasarımlarda mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Bahrami, A. Okoye, C.O., Atikol, U., “Technical and economic assessment of fixed, single and dual-axis tracking PV panels in low latitude countries”, *Renewable Energy* 113, 563-579 (2017).
2. Bazyari, S. Keypour, R. Farhangi, S. Ghaedi, A. Bazyari, K. A “Study on the Effects of Solar Tracking Systems on the Performance of Photovoltaic Power Plants”, *Journal of Power and Energy Engineering*, 2, 718-728 (2014).
3. Cebeci, E., “Türkiye’de Güneş Enerjisinden Elektrik Üretim Potansiyelinin Araştırılması ”, *İktisadi Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü Uzmanlık Tezi*, Ankara (2017).
4. Çıtıröğlü, A., “Güneş Enerjisinden Yararlanarak Elektrik Üretimi”, *Mühendis ve Makine*, Cilt: 41, Sayı: 485 (2000).
5. Dağlı, E., “Ekonomik Analiz Yöntemleri Kullanılarak 1 MW Güneş Enerjisi Santralının Değerlendirilmesi” *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi*, Osmaniye (2018).
6. Dakkak, M. and Babelli, A., “Design and Performance Study of a PV Tracking System (100W-24Vdc/220Vac)”, *Energy Procedia*, 19, 91-95 (2012).
7. DGS, “Photovoltaische Anlagen 5”, *DGS*, Berlin,85-102 (2012).
8. Eke, R., Senturk A., "Performance Comparison of a Double-axis Sun Tracking Versus Fixed PV System", *Solar Energy* 86 -9, 2665-2672 (2012).
9. Gönültaş, E., “Güneş enerji Santrallerinin Tasarımı ve Performans Analizi”, *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, Elazığ (2017).
10. Hammad, B., “Performance and Economic Comparison of Fixed and Tracking Photovoltaic Systems in Jordan”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 80*, 827-839 (2017).
11. Haydaroğlu, C., “Güneş enerji Santrallerinin Tasarımı ve Performans Analizi”, *Dicle Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, Elazığ (2017).

12. Huang, B.J., Huang, Y.C., Chen, G.Y., Hsu, P.C., and Li, K., “Improving Solar PV System Efficiency Using One-Axis 3-Position Sun Tracking”, *Energy Procedia* **33**, 280-287 (2013).
13. İnternet: Türkiye Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM), “Enerji Verimliliği Ulusal Eylem Planı” http://www.yegm.gov.tr/document/enerji_verimliliği_ulusal_eylem_plani_17_11_2016_document.pdf (2017).
14. Karamanav, M., ‘Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri’ *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya (2007).
15. Keskinel, S., “Enerji Verimliliği Kapsamında Binalarda Fotovoltaik Güç Sistemlerinin Uygulamalı Analizi”, *İ.T.Ü., Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı Enerji Bilim ve Teknoloji Programı Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul (2015).
16. Lee, J.F., “Performance Comparison of Dual-Axis Solar Tracker Vs Static Solar System in Malaysia”, *IEEE*, Kuala Lumpur (2013).
17. Loschi, H.J., Iano, Y., Leon, J., Moretti, A., Conte, F.D., and Braga, H., “A Review on Photovoltaic Systems: Mechanisms and Methods for Irradiation Tracking and Prediction”, *Smart Grid and Renewable Energy*, **6**, 187-208 (2015).
18. Mehrtash, M., Quesada, G., Dutil, Y., and Rouse, D., “Performance Evaluation of Sun Tracking Photovoltaic Systems in Canada”, *Proc. of 20th Annual International Conference on Mechanical Engineering-ISME2012*, Iran (2012).
19. Mertens, K. “Photovoltaik für Profis. Verkauf, Planung Montage von Solarstromanlagen”, *Hanser*, 131-135 Deutschland (2009).
20. Öztürk, E., “Fotovoltaik Panellerin Verimine Modül Sıcaklığının Etkisinin Deneysel Olarak”, *Karabük Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Yüksek lisans Bitirme Tezi*, Karabük (2014).
21. Rao, R.R., Swetha, H.R., Srinivasan, J., and Ramasesha, S.K., “Comparison of performance of solar photovoltaics on dual axis tracker with fixed axis at 13° N latitude”, *Current Science*, **108**, 2087-2094 (2015).
22. Sadıkoğlu, F., “Bir 1 MWp Şebekeye Bağlı Güneş Enerjisi Santrali Performans Analizi”, *N.E.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi*, Konya (2018).
23. Wang, J.M. and Lu, C.L., “Design and Implementation of a Sun Tracker with a Dual-Axis Single Motor for an Optical Sensor-Based Photovoltaic System”, *Sensors*, **13**, 3157-3168 (2013).

24. Vieira, R.G., “Comparative Performance Analysis Between Static Solar Panels And Single-Axis Tracking System on a Hot Climate Region Near to the Equator”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **Volume 64**, 672-681 (2016).



ÖZGEÇMİŞ

Erdem AKYOL 1985 yılında Ankara’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Samsun’da tamamladı. 2011 yılında Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda başlamış olduğu yüksek lisans programına devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Çamlık Mahallesi Yahya Kemal Beyatlı C. No:1 Kurtköy-Pendik

İSTANBUL

Tel : 0532 15 85 911

E-posta : erdmakyol@gmail.com