

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE KABLO
KAYIPLARININ İNCELENMESİ

Mehmet Ali KÖPRÜ

Yüksek Lisans Tezi
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Sami EKİCİ

ELAZIĞ-2016

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE KABLO KAYIPLARININ İNCELENMESİ

Yüksek Lisans Tezi
Mehmet Ali KÖPRÜ
121135103

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15.12.2015

Tezin Savunulduğu Tarih : 04.01.2016

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Sami EKİCİ (F.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Resul ÇÖTELİ (F.Ü)
Yrd.Doç. Dr. Mehmet ÜSTÜNDAĞ (B.Ü)

ELAZIĞ-2016

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca ilminden faydalandığım, insani ve ahlaki değerleri ile de örnek aldığım, yanında çalışmaktan onur duyduğum ve ayrıca tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu ilgi, alaka ve sabırdan dolayı bu tezi hazırlarken her türlü bilgi ve tecrübesiyle daima yanımda olan ve desteğini hiç esirgemiyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Sami EKİCİ'ye teşekkür ederim.

Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP)'ın TEKF.14.08 nolu proje ile sağladığı maddi destek için teşekkür ederim.

Ayrıca, çalışmalarım esnasında yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Bingöl Üniversitesi mesai arkadaşlarıma da teşekkürü borç bilirim.

Mehmet Ali KÖPRÜ
ELAZIĞ – 2016

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	X
TABLolar LİSTESİ	XI
KISALTMALAR	VII
SEMBOLLER	IX
1. GİRİŞ	1
1.1. Güneş Enerjisi	3
1.2. Güneş Enerjisi Uygulamaları	4
1.2.1. Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri (CSP)	4
1.2.1.1. Parabolik Kollektör Sistemleri (Parabolic Trough-PTC):	5
1.2.1.2. Doğrusal Fresnel Yansıtıcı (Linear Fresnel Reflector-LFR):	6
1.2.1.3. Güneş Kuleleri	7
1.2.1.4. Parabolik Çanak Sistemleri:	8
1.2.1.5. Güneş Bacaları	8
1.2.1.6. Güneş Pilleri.....	10
1.3. Türkiye'deki Güneş Enerjisi Potansiyeli	11
2. GÜNEŞ PİLLERİ	14
2.1. Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişimi.....	14
2.2. Güneş Pillerinin Yapısı	14
2.2.1. Yarı İletkenler	15
2.2.1.1. N Tipi Madde	16
2.2.1.2. P Tipi Madde.....	17
2.2.1.3. P-N Bileşimi.....	18
2.2. Solar Hücrenin Eşdeğer Devresi	20
2.3. Güneş Pilinin Çalışması	21
2.4. Güneş Panelleri	22
2.4.1. PV Paneli Çeşitleri	23

2.4.2.	Güneş Panellerinde Meydana Gelen Kayıplar	25
2.4.2.1.	Gölgelenme Kayıpları	26
2.4.2.2.	Tozlanma Kayıpları	27
2.4.2.3.	Yansıma Kayıpları	28
2.4.2.4.	Sıcaklık Kayıpları	28
2.4.2.5.	Uyumsuzluk Kayıpları	29
2.4.2.6.	Doğru Akım Kablo Kayıpları	29
2.5.	Doğru ve Alternatif Akım Kablolarından Kaynaklanan Enerji Kayıpları	29
3.	PVSYST PROGRAMI VE BENZETİM ÇALIŞMASI.....	36
3.1.	PVsyst Programı	36
3.2.	PV Sistem Bileşenleri	38
3.3.	PVsyst Benzetim Sonuçları.....	40
4.	DENEYSEL ÇALIŞMA	49
4.1.	DA Kablolarının Boyutlandırılması.....	54
4.2.	Tez Çalışmasındaki PV Sistem için En Uygun Kablo Kesitinin Hesaplanması.	59
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	61
	KAYNAKLAR	63
	ÖZGEÇMİŞ.....	67

ÖZET

Fotovoltaikler güneş enerjisinden doğrudan elektrik enerjisi üreten sistemlerdir. Bu sistemler genel olarak şebekeden bağımsız veya şebekeye bağlı kurulmaktadır. Fotovoltaik sistemlerin bileşenleri evirici, akü, şarj kontrol cihazı ve konnektörlerdir. Bu bileşenlerden kaynaklanan enerji kayıpları sistemin verimini olumsuz etkilemektedir. Bu tez çalışmasında PV sistemlerde kullanılan doğru akım kablolarının neden olduğu enerji ve ekonomik kayıplar incelenmiştir.

Kablo kayıplarının incelenmesi için hem deneysel hem de benzetim çalışması yapılmıştır. Benzetim çalışmaları fotovoltaik sistemlerin benzetim ve analizinde yaygın olarak kullanılan PVsyst programı yardımı ile deneysel çalışmalar ise Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi ana binası terasına kurulan güneş paneli üzerinde gerçekleştirilmiştir.

PVsyst6.2.6 paket programında deneysel çalışmada kurulan fotovoltaik sistemin benzetimi yapılarak PV sistemde meydana gelen kablo kayıpları incelenmiştir. Benzetim çalışmasından elde edilen bulgular incelendiğinde, kablolardan kaynaklanan kayıpların sistem verimini 1.5 mm^2 'lik kablo için %1.7, 4 mm^2 'lik kablo için %0.6, 10 mm^2 'lik kablo için ise %0.2 oranında etkilediği görülmüştür. Yapılan deneysel çalışmada ise küçük PV sistemlerde farklı kesite ve uzunluğa sahip solar kabloların kullanılmasının sistem çıkışını önemli ölçüde değiştirmedeği görülmüştür. Özellikle geniş bir alana kurulacak bir PV sistemde hassas olarak yapılacak bir ölçüm ile bu kayıplar daha belirgin olarak gözlemlenebilir.

PV sistemlerin kurulumunda kurulum maliyeti önemli bir unsurdur. Kurulacak bir PV sistemde kullanılacak en uygun kablo kesitinin hesaplanması için, tez çalışmasında optimal kablo kesiti hesaplamaları yapılmıştır. Bu amaçla literatürdeki çalışmalara benzer olarak, yıllık enflasyon ve indirim oranları kullanılarak şimdiki zaman için para tabloları elde edilmiş ve tez çalışmasında kurulan sistem için en uygun kablo kesiti hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: PV Sistem, Kayıplar, Güneş Enerjisi, Güneş Pili

SUMMARY

EXAMINATION OF CABLE LOSSES IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Photovoltaics are the systems which produce directly electrical energy from the solar energy. Generally, these systems are installed as grid or non-grid connected. The components of PV systems are inverter, battery, charge controller and connectors. The energy losses resulting from these equipments affect the system performance adversely. In this thesis study, the energy and economical losses resulting from direct current cables used in the PV systems are investigated.

Both experimental and simulation studies are performed to investigate cable losses. Simulation studies are performed by using PVsyst software which is widely used in the simulation and analysis of photovoltaic systems and experimental studies are performed in a solar panel installed on the rooftop of Firat University Technology Faculty main building.

The cable losses occurred in PV system which are installed in the experimental study are investigated by using PVsyst6.2.6. When the results of simulation study reviewed, it was shown that cable losses affect the system performance as 1.7% for 1.5 mm², 0.6% for 4 mm², and 0.2% for 10 mm² cables respectively. It was also shown that the usage of different length of cables with different cross sectional area in the small sized PV systems didn't affect the system yield significantly. However, together with a precise measurement these losses can be observed more specifically in the PV system installed in a wide area.

The installation costs play an important role in the PV system installation stage. In the thesis, the calculations of the optimal cable cross sections are performed to find out the best cross sectional areas of solar cables which will be used in the PV system. In this purpose, the present time value of money table is prepared by using the mean inflation rate and tariff discounts as the literature studies and the optimal cross section area of the cable used in the thesis study is obtained.

Keywords: PV System, Losses, Solar Energy, Solar Cell

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Güneş ışınlamının Dünya'ya gelişi ve yansıması	4
Şekil 1.2. Parabolik kolektör enerji dağılımı ve ekipmanları.....	5
Şekil 1.3. Parabolik kolektör sistem santralinin çalışma prensibi.....	6
Şekil.1.4. Doğrusal Fresnel yansıtıcı.....	6
Şekil 1.5. Güneş Kulesi	7
Şekil 1.6. Çanak Sistemler	8
Şekil 1.7. Güneş Bacasının temel çalışma prensibi.....	9
Şekil 1.8. Güneş Bacası santrali	10
Şekil 1.9. Türkiye ile bazı Avrupa ülkelerinin güneşlenme sürelerinin kıyaslanması.....	11
Şekil 1.10. Türkiye'deki elektrik enerjisi kurulu gücü.....	13
Şekil 2.1. Fotovoltaik hücre	15
Şekil 2.2. Saf silisyum kristalinin yapısı.	16
Şekil 2.3. N tipi madde.....	17
Şekil 2.4. P tipi madde.	18
Şekil 2.5. P-N bileşimi	18
Şekil 2.6. PN maddede deplasyon bölgesinin gösterimi	19
Şekil 2.7. PN tipi maddenin doğru ve ters polarlanması	20
Şekil 2.8. Eşdeğer hücre modeli.....	20
Şekil 2.9. Güneş pili V-I ve P-V karakteristiği	22
Şekil 2.10 . Güneş pili, modül ve diziye ait görünüm	23
Şekil 2.11. Modüllerin seri ve paralel bağlantıları	23
Şekil 2.12. Güneş hücreleri ve modülleri	24
Şekil 2.13. Güneş panellerinin 1kWp güç için modül tipi , alan ve kategorisine göre sınıflandırılması	24
Şekil 2.14. Bir PV sisteminde meydana gelen kayıplar	25
Şekil 2.15. Gölgeye maruz kalmış bir güneş paneli	26
Şekil 2.16. Güneş panellerinde tozlanma	28
Şekil 3.1. PVsyst6.2.6 arayüzü.....	36
Şekil 3.2. PVsyst'te benzetim bileşenlerinin seçilmesi.....	37
Şekil 3.3. Kullanılan iletkenlerin seçimi	37

Şekil 3.4. PVsyst sonuçlar menüsü	38
Şekil 3.5. Benzetim ortamının üstten görünüşü.	40
Şekil 3.6. Modüle ait eğim ve yön bilgisi.....	41
Şekil 3.7. Shenzhen Toray 150wp PV modül güç ve gerilim eğrisi	41
Şekil 3.8. Shenzhen Toray 150wp PV modül akım ve gerilim eğrisi	42
Şekil 3.9. 1.5mm ² iletken kesiti için sistem kayıp diyagramı	43
Şekil 3.10. 4 mm ² iletken kesiti için sistem kayıp diyagramı.	44
Şekil 3.11. 10 mm ² iletken kesiti için sistem kayıp diyagramı	44
Şekil 3.12. Farklı uzunluk ve kesitteki kabloların direnç değerleri.....	47
Şekil 3.13. Farklı kesit ve uzunluktaki kablolardan kaynaklanan enerji kayıpları.....	48
Şekil 4.1. Kurulan PV sistem.	50

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 1.1. Türkiye'nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli	12
Tablo 1.2. Türkiye'nin yıllık toplam güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı	13
Tablo 2.1 Farklı Eviriciler için D, G, F parametreleri ve R_{xy} kolersyon katsayısı tablosu ..	32
Tablo 3.1 Kullanılan güneş panelinin teknik özellikleri.....	39
Tablo 3.2. Kullanılan evirici'ye ait teknik bilgiler	39
Tablo 3.3. Kabloları ait teknik bilgiler.....	40
Tablo 3.4. 1.5 mm ² için aylık enerji kayıpları.	45
Tablo 3.5. 4 mm ² için aylık enerji kayıpları.....	46
Tablo 3.6. 10mm ² için aylık enerji kayıpları.....	46
Tablo 4.1. 2.5 mm ² kesitindeki solar kablo için ölçüm sonuçları.....	50
Tablo 4.2. 4 mm ² kesitindeki solar kablo için ölçüm sonuçları.....	51
Tablo 4.3. 6 mm ² kesitindeki solar kablo için ölçüm sonuçları.....	52
Tablo 4.4. 10 mm ² kesitindeki solar kablo için ölçüm sonuçları.....	53
Tablo 4.1. Enflasyon oranı %2 ve indirim oranı %5 olarak kabul edildiğinde 25 yıllık beklenen enflasyon ve indirim oranlarının hesaplanması.....	59
Tablo 4.2. Kritik tarife hesaplamasında kullanılan parametreler ve değerleri.....	60

KISALTMALAR

AM	: Air mass, hava kütlesi
ASI/McSi	: Amorf silikon/ Micro kristal silicon
AWG	: American wire gauge
CdTE	: Kadmiyum Tellur
CIS	: Bakır-İndiyum-Selenid
CSP	: Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri
DA	: Doğru akım
DMİ	: Devlet meteoroloji işleri genel müdürlüğünde
EİE	: Enerji işleri enstitüsü
FÜBAP	: Fırat üniversitesi bilimsel araştırma projeleri koordinasyon birimi
GES	: Güneş enerji santrallerinde
InvLoss	: İnverter kayıpları
LFR	: Doğrusal fresnel yansıtıcı (linear fresnel reflector)
m	: Metre
MisLoss	: Uyumsuzluk kayıpları
ModQual	: Modül kalitesinden kaynaklanan kayıplar
NEC	: National electrical code
OhmLoss	: Kablo kayıpları
PTC	: Parabolik kollektör sistemleri
PV	: Fotovoltaik
STK	: Standart test koşulları
W	: Watt
Wh	: Watt-saat

SEMBOLLER

Al	: Aliminyum
B	: Bor
DP	: Panel sıcaklığından dolayı meydana gelen kayıp katsayısını
EA	: Kesit ile ters orantılı olarak değişen ve iletkenin direncinden kaynaklanan enerji kayıpları
Eg	: Güneş pilinde kullanılan yarı iletkenin band aralığı enerjisini
FA	: Kablo kesiti ile doğrudan ilişkili olmayan kanal açma ve bunun gibi işçilik maliyetleri
Ga	: Galyum
G_{STK}	: STK'da ve mevcut durumdaki aydınlatma miktarını
I_D	: Diyod akımı
I_{MPP}	: Maksimum tepe noktasındaki akım
I_{SC}	: Kısa devre akımı
LA	: Kesit ile doğru orantılı olarak değişen kablo maliyeti
P	: Güç
P_{DA}	: DA gücü
P_{MPP}	: Maksimum tepe noktasındaki güç
P_{PV,peak}	: Standart test koşullarında maksimum panel gücünü
q	: Elektron yükünü belirtmektedir
R	: Direnç
RMS	: Root-mean-square (ortalama karesel hata)
R_{XY}	: Kolerasyon katsayısı
Si	: Silisyum
T_{dış}	: Ortam sıcaklığını
T_{ref}	: Güneş pilinin referans sıcaklığını
U	: İletkenin birim maliyeti
V	: Volt
V_{DA}	: DA gerilim
V_{LL}	: Fazlar arası gerilimi
W	: İşçilik maliyeti
Y₂₅	: 25 yıllık enflasyon oranı
Δθ	: Panel sıcaklığındaki değişim

1. GİRİŞ

Nüfusun artışı, hızlı sanayileşme, şehirleşme ve teknolojinin gelişmesi ile birlikte doğal olan kaynaklara ve daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Giderek artan enerji ihtiyacına cevap verebilmek için mevcut enerji kaynaklarının yanında alternatif enerji kaynaklarına yönelmeye başlanmıştır [1].

Yirminci yüzyılın ikinci yarısından itibaren hızlı bir şekilde artan teknolojik gelişmelere bağlı olarak insanların günlük yaşantıdaki bazı alışkanlıklarının değişmesi, elektrik enerjisi ile çalışan cihazların artması ve bu cihazların hayatın vazgeçilmez birer nesnesi haline gelmesi enerji ihtiyacını da giderek arttırmıştır. Sürekli artan bu enerji ihtiyacının karşılanabilmesi çevresel, sosyal ve ekonomik faktörler göz önüne alındığında tükenebilen yakıtlar yerine yeni ve tükenemiyen enerji kaynağı arayışını zorunlu hale getirmiştir. Tükenebilir olan fosil yakıtların yerini yavaş yavaş yenilenebilir enerji kaynakları almaktadır [2]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemli özelliği doğada sürekli var olmalarıdır. Günümüzde kullanılan başlıca yenilenebilir enerji kaynakları Güneş, rüzgâr, jeotermal, biyoenerji, çevre enerjisi, dalga ve gelgit, hidrolik, hidrojen ve nükleer enerjidir. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin çevre dostu olması bu enerjiye ilgiyi daha da arttırmıştır. Bu ilginin artmasında Kyoto Protokolü gibi uluslararası çevre sözleşmelerinin de büyük etkisi vardır [2].

Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisinin üretimi büyük önem kazanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisinin diğer enerji türlerine göre çok sayıda avantajı bulunmaktadır. Özellikle petrol fiyatlarının çok hızlı artması ve dalgalanmalar göstermesi, güneş enerjisini cazip kılmakta ve güneş enerjisinden ısıtmadan soğutmaya, buhar üretiminden tarım ürünlerini kurutmaya ve elektrik üretimine kadar bir çok farklı alanlarda faydalanma yoluna gidilmektedir [2].

Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretme tekniklerinden biri de fotovoltaik (Photovoltaic-PV) sistemlerdir. PV sistemlerden elektrik üretimi her geçen gün artmaktadır. PV sistemlerden günümüz teknolojisiyle %20-30 civarında verim elde edilmektedir. PV sistemlerin verimini etkileyen çevresel faktörler ve hatalı kurulumdan dolayı doğacak olan kayıplar toplam enerji veriminin düşmesine neden olmaktadır. Bundan dolayı bir PV sistem kurulmak istendiğinde, kayıpları meydana getirecek unsurlar minimum olacak şekilde bir sistemin tasarlanması gerekir.

PV sistemlerde gölgelenme, tozlanma, evirici ve kablolardan kaynaklanan enerji kayıpları ayrı ayrı analiz edilerek kayıpların ölçülmesi ve analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır. Yapılacak çalışmalarla kayıplara neden olan ve düzeltilmesi teknolojik olarak mümkün olan bileşenlerin tespit edilmesi sistemlerin verimini yükseltecektir. Özellikle kablo kayıplarının incelenerek bu alanda çalışan araştırmacılara yön gösterilmesi için ciddi çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Kablo kayıpları PV sistemlerde enerji kaybına neden olmakla birlikte sistemin ekonomik maliyetini de olumsuz etkilemektedir. Literatürde bu alanda farklı çalışmalar yapılmıştır.

Chen vd. [3] PV sistemlerdeki DA kablo kayıplarını hesaplamak için yeni bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntemde güneş radyasyonu bilgisinin RMS (Root-mean-square-RMS) değerini kullanarak kablo kayıplarını incelemişlerdir. RMS değerini hesaplamak için β –dağılımı modelini kullanmışlardır. Geliştirdikleri metodu Sharp NT-175U PV (175 W) paneli kullanarak 30.48m uzunluğunda AWG16 DA kablosu üzerinde test etmişlerdir. Kullanılan panel bir günde 582.17 Wh enerji üretmektedir. Ancak yapılan testler ile bir günde DA kablosundan kayan kaynaklanan enerji kaybı 7.68 Wh olarak ölçülmüştür.

Yapılan başka bir çalışmada ise panellerde oluşan kısmi gölgelenmeden dolayı meydana gelen uyumsuzluk kayıpları en aza indirilmiştir [4]. Geleneksel olarak kullanılan uyumsuzluk kaybı giderme yöntemleri daha fazla kablo kullanımı gerektirmektedir. Ancak bu çalışmada panellerin fiziksel konumları değiştirilmeden hem uyumsuzluk kaybı hemde fazla kablolanmanın önüne geçecek optimal bir Sudoku tasarımı geliştirilmiştir. Paneller arasındaki kablo bağlantıları da bu tasarıma göre yapılarak fazla kablolanmanın önüne geçilmiştir. Dolayısıyla kablo kayıplarında önlenmiştir.

Yuventi [5] PV sistemlerdeki elemanların ara bağlantılarında kullanılan DA kablo miktarını etkin olarak hesaplayarak bir yöntem geliştirmiştir. Bu metotta elektriksel devre teorisi, elektriksel direnç modelleme ve iteratif bir yaklaşım kullanarak optimal kablo uzunluğu ve çapı belirlenmiştir. Bu sayede uzun kabloların ve yanlış kablo kesitinin seçilmesinin önüne geçilerek enerji verimi artırılmıştır.

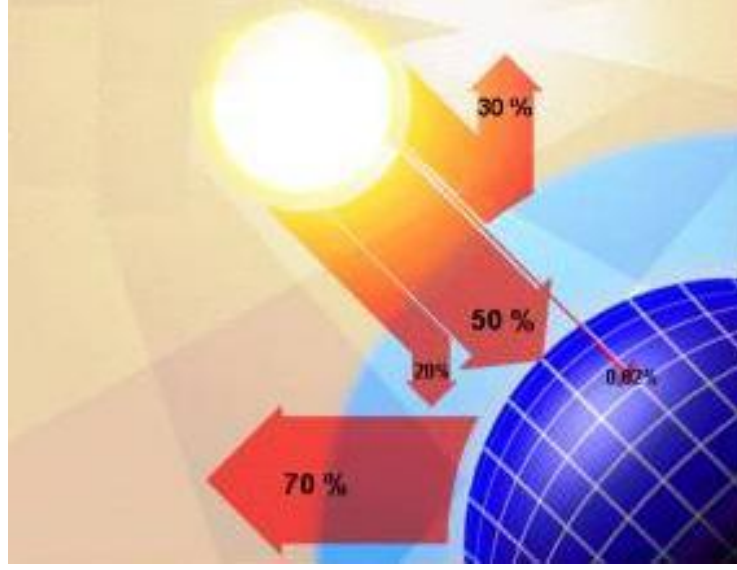
Gan vd. [6] optimal DA kablolarının sistem maliyeti üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada optimal kablo seçimini etkileyen parametreler incelenerek sistemin kayıpları minimize edilmiştir. Parametreler sezgisel yaklaşımlarla tahmin edilmiştir.

Kablo kayıplarının incelenmesi ile ilgili yapılan çalışmalar genellikle benzetim aşamasında kalmaktadır. Gerçek PV sistemler üzerindeki kablo kayıplarının araştırılması ile ilgili yeteri kadar çalışma yoktur. Bu nedenle tez çalışmasında hem benzetim hem de gerçek bir PV sistem uygulaması yapılarak kablo kayıpları incelenmiştir. Ayrıca kablo kesitlerinden kaynaklanan enerji kayıpları ve kablo maliyetinin toplam maliyet üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kablolamadan kaynaklanan kayıpların minimize edilmesi için optimal kablo kesiti seçimi matematiksel olarak hesaplanmıştır.

1.1. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde oluşan füzyon süreci ile birlikte açığa çıkan ışıma enerjisidir. Güneş enerjisinin şiddeti Dünya yüzeyinde yaklaşık 0-1000 W/m² değerleri arasında değişim gösterir [7]. Güneşten Dünya'ya gelen enerjinin küçük bir bölümü dahi, tüketilen enerji miktarından çok fazladır. Özellikle 1970'lerden sonra Güneş enerjisi ile ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Teknolojinin gelişmesiyle Güneş enerjisi sistemlerinde ilerleme kaydedilmiştir. Özellikle son yıllarda güneş enerjisi temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak tüm Dünya'da yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Dünya'ya 150 milyon km mesafede bulunan Güneş'ten Dünya atmosferine gelen enerji miktarı Dünya'da bir yılda tüketilen toplam enerjinin 20 katıdır. Şekil 1.1'de de görüldüğü gibi güneşten gelen toplam ışıının ancak %50'si yeryüzüne ulaşmaktadır. Güneşten Dünya'ya gelen toplam ışıının miktarın yaklaşık %20'si atmosfer ve bulutlar tarafından absorbe edilmektedir. Gelen ışıının %30'u atmosferden geri yansırken yeryüzüne ulaşan ışıının %1'den daha az bir miktarı bitkilerdeki fotosentez olayında kullanılmaktadır. Genel olarak bakıldığında Güneş enerjisinin diğer bütün enerji çeşitlerinin doğrudan ya da dolaylı olarak kaynağı olduğu görülmektedir [7].



Şekil 1.1. Güneş ışıının Dünya'ya gelişi ve yansıması [7].

1.2. Güneş Enerjisi Uygulamaları

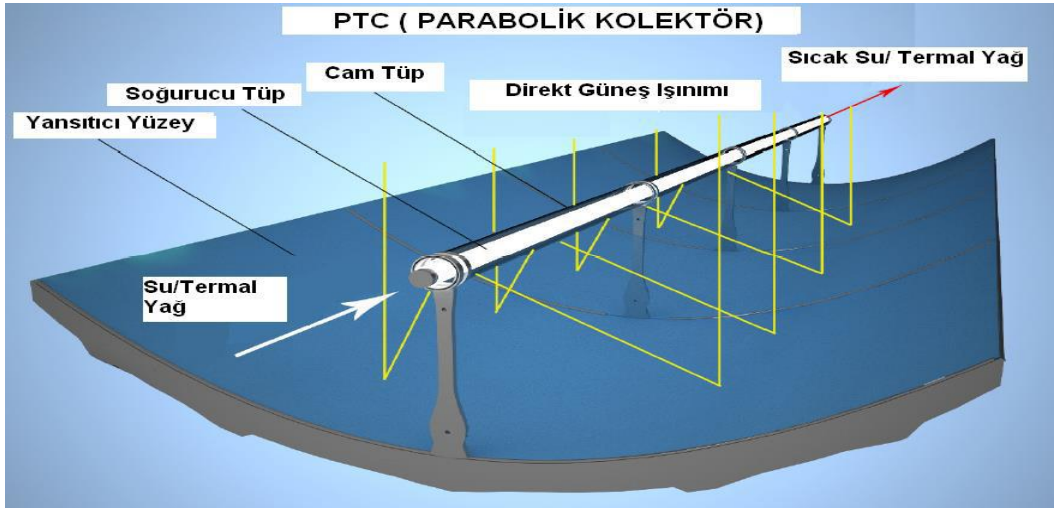
Sonsuz bir enerji kaynağı olan güneş enerjisini uygun teknolojiyle birçok alanda farklı amaçlarda kullanmak mümkündür. Güneş enerjisi sonsuz bir enerji olmasına rağmen, bu enerjiden verimli bir biçimde yararlanmak kolay değildir. Güneş enerjisinden verimli bir biçimde etkin olarak faydalanabilmek için farklı teknolojilere gereksinim duyulmaktadır. Güneş pilleri, güneş enerjili su ısıtıcıları, konsantre güneş enerji sistemleri, güneş bacaları gibi yöntemler bunlardan bazılarıdır.

1.2.1. Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri (CSP)

Güneş enerjisini kullanarak farklı yöntem ve metotlar ile termal enerji elde edilebilir. Yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemleri güneş ışığını tek bir merkezi alanda yoğunlaştırarak enerji elde edilme yöntemidir. Bu sistemlerden daha iyi verim elde etmek için açık gökyüzü ve sıcak bölgelerin tercih edilmesi gerekir. Günümüzde dört çeşit yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemi vardır.

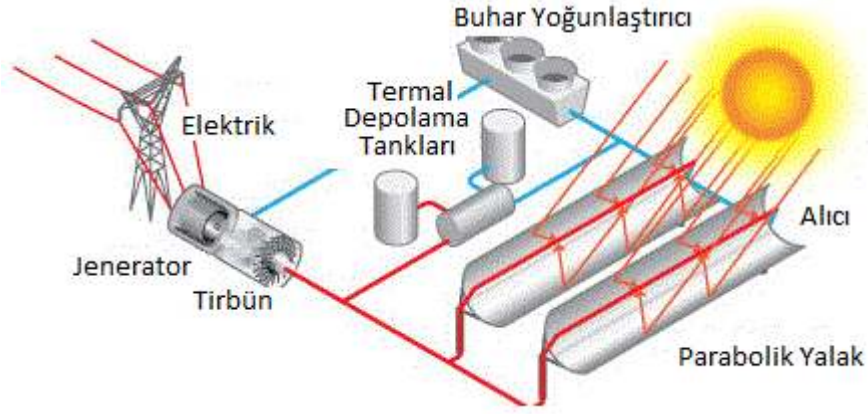
1.2.1.1. Parabolik Kollektör Sistemleri (Parabolic Trough-PTC):

Parabolik güneş kolektörleri diğer termoelektrik teknolojilerine göre en yaygın kullanılan teknolojidir. Kolektörler, parabolik olarak tasarlanmış yoğunlaştırıcı dizilerden oluşur. Kollektörün iç kısmında güneş ışınımını yansıtıcı malzemeler kullanılır ve kollektörün odak noktasında güneş ışığını absorbe eden ve boydan boya uzanan siyah bir boru bulunur. Güneş ışınımı kollektör merkezine yerleştirilen absorban boruya kollektör sayesinde aktarılır. Kolektörler güneşin hareketini izleyen doğu-batı eksenli bir sistem üzerine yerleştirilirler. Güneş enerjisini toplamak için absorban borunun içinde ısıyı transfer etmek için ısı transfer yağı kullanılır. Çevreye zarar vermeyen ve maliyet açısından daha ucuz olan suyun kullanılmasına yönelik çalışmalar devam etmektedir [7]. Absorban boru içerisinde ısınan sıvı elektrik üretimi için enerji santraline gönderilir. Şekil 1.2.'de parabolik kollektörün enerji dağılımı ve ekipmanları görülmektedir.



Şekil 1.2. Parabolik kollektör enerji dağılımı ve ekipmanları [8].

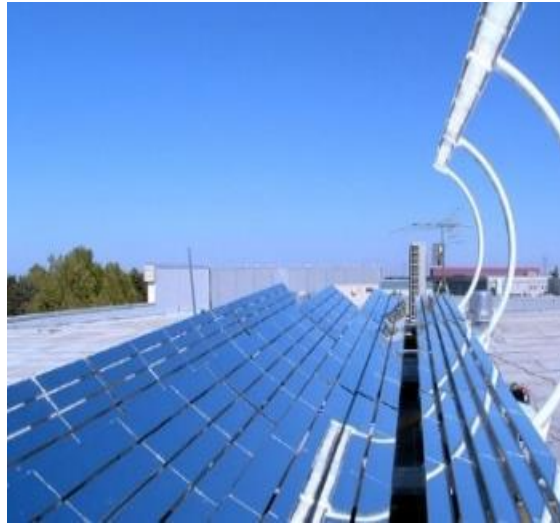
Isı taşıma akışkanı için düz plaka ve CSP tipi güneş kolektörlerinde bir kaç tüp kullanılır. Bu da termal kayıpların artmasına neden olur. Yoğunlaştırılmış parabolik kolektörlerinde ise ısı akışkanı için bir adet soğurucu tüpün kullanımı yeterli olmaktadır. Sadece bir soğurucu tüpün kullanılması ile termal kayıplar azaltılmış ve PTC'ler ile güneş ışınımının termal enerjiye dönüştürülme sürecinin verimliliği artırılmıştır [8]. Parabolik kollektör sistem santralinin çalışma prensibi Şekil 1.3'te verilmiştir.



Şekil 1.3. Parabolik kollektör sistem santralinin çalışma prensibi [7].

1.2.1.2. Doğrusal Fresnel Yansıtıcı (Linear Fresnel Reflector-LFR):

Doğrusal Fresnel yansıtıcı sistemlerin çalışması parabolik kollektör sistemleri ile aynı prensibe sahiptir. Bu sistemde amaç güneşten gelen ışınları oluşturulan merkezi bir çizgi üzerinde toplamaktır. Şekil 1.4'te de görüldüğü gibi parabolik kollektör sistemlerinde farklı olarak yerleştirilen parabolik aynaların hepsinden yansıyan güneş ışığını merkeze yerleştirilen oluğa yansıtılmasıdır. Bu tip sistemler, parabolik kollektör sistemlerinden daha ucuz ve daha avantajlıdır [9].



Şekil.1.4. Doğrusal fresnel yansıtıcı [9].

1.2.1.3. Güneş Kuleleri

Güneş kule sistemleri etrafına belli bir açıyla yerleştirilmiş çok sayıda ayna aracılığıyla güneşten gelen ışınları güneş kulelerinin merkezine odaklar. Bu tip sistemler, güneş ışınımının odaklandığı bir adet kule, güneş ışınlarını yansıtan aynalar, soğuk ve sıcak eriyik tuz depoları, buhar türbini ve jeneratörden meydana gelir [10,11]. Güneş kulelerinde ısı transferini sağlayan farklı maddeler kullanılmıştır. Şu anki mevcut teknolojilerde eriyik tuz kullanan sistemler güneş kulesinde sıvı haldeki eriyik tuzu yüksek sıcaklığa ulaştırarak depolama tankına, buradan da buhar üretme sistemine aktarır. Üretilen yüksek sıcaklıktaki buhar ile türbün çalıştırılır ve elektrik enerjisi elde edilir. Soğuyan eriyik tuz tekrar güneş kulesine pompalanır. Bu sistemler enerji depolamaksızın yıllık %25 kapasite faktörü ile çalışırlar. Fakat sadece enerji depolayarak yedek yakıt kaynağı ihtiyacı olmaksızın %65 kapasite faktörü ile çalışırlar. Sistem enerji depolayarak çalışırsa %75 kapasite faktörü ile çalışabilmektedirler [10]. Bu tür sistemlerin kurulum aşamasında maliyeti çok yüksektir. Düşük kapasiteli sistemler ekonomik olmamaktadır. Bu sistemlerin ekvatora yakın, sürekli güneş alan daha ziyade çöl bölgelerinde kurulmaları daha uygundur. Çünkü uzun güneşlenme sürelerinin yanında kuruldukları bölgenin sıcaklık değerinin yüksek olması sistemin daha verimli çalışmasını sağlar. Fakat sistemin ciddi miktarda suya ihtiyacının olması dezavantaj olarak değerlendirilmektedir [10]. Şekil 1.5'te kurulu güneş kulesi santrali verilmiştir.



Şekil 1.5. Güneş kulesi [9].

1.2.1.4. Parabolik Çanak Sistemleri

Bu tip sistemlerde çanağın odak merkezine yerleştirilen bir alıcı bulunmaktadır. Alıcının içinde sıvı yada hava geçmekte ve alıcının içerisinde sıcaklıkla çalışan stirling motor veya mikro türbinler bulunmaktadır. Güneşten gelen ışınımın çanak yardımıyla çanağın odak merkezine yerleştirilen alıcıya iletilmesi sonucu yüksek derecede ısı meydana gelmektedir. Ortaya çıkan bu yüksek sıcaklıkla beraber sistem çalışmaya başlar ve elektrik enerjisi üretilir. Bir çanaktan 7-25 kW aralığında güç elde edilebilir. Çanak sayısı artırılarak elde edilen güç de artırılabilir. Sistemin en büyük dezavantajı kurulum maliyetinin yüksek olmasıdır. Şekil 1.6'da çanak sistemlerinden oluşan kurulu bir santral görülmektedir [9].

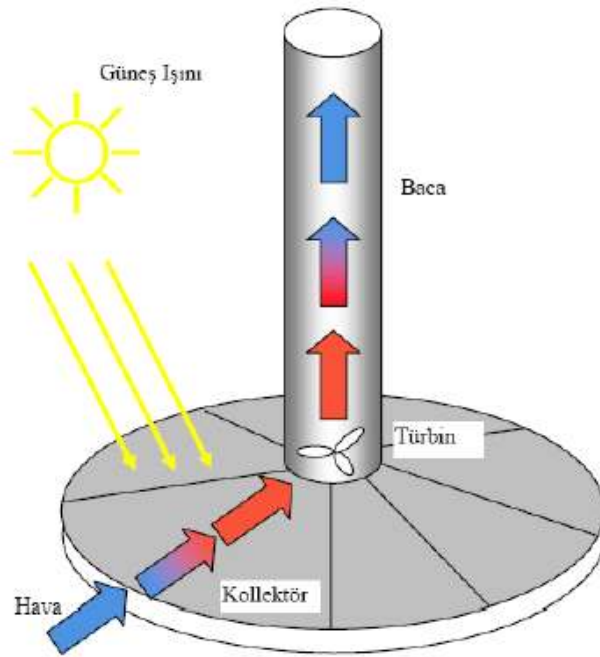


Şekil 1.6. Çanak sistemler [9].

1.2.1.5. Güneş Bacaları

Güneş bacası, güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etmek için geliştirilen ısı bir sistemdir. Diğer sistemlere göre farklı bir çalışma prensibine sahiptir. Bu sistemde üç temel fiziksel prensip (sera etkisi, baca çekişi ve kinetik enerjiye dönüşüm) söz konusudur [12]. Bu sistemlerde, güneş bacasının etrafında dairesel olarak yerden belirli bir yükseklikte

konumlandırılan kollektörler bulunur. Güneşten gelen ışınlamalar bu cam kollektörlerin altında bulunan havanın ısınmasını sağlar. Dış ortamdaki soğuk hava ile ısınan bu hava arasında yoğunluk farkı meydana gelir. Isınan hava kollektörün merkezinde bulunan ve dikey olarak yerleştirilen bacada hava akımı oluşur ve böylece baca çekişi hızlandırılır. Hava, üst ucu açık olarak bulunan bacadan dış ortama doğru hareket eder. Hızı artarak bacaya yönelen hava, bacanın giriş bölgesinde bulunan türbin ve buna bağlı olan generatörü döndürmek suretiyle elektrik enerjisi elde edilmiş olur. Bu çevrim güneş ışınlamı ne kadar fazlaysa o kadar hızlı bir şekilde gerçekleşir. Baca aynı zamanda kollektör altındaki havayı emdiği için, açık bulunan kollektör yanlarından tekrar hava girer. Böylece sürekli bir çalışma sağlanmış olur. Güneş bacasının temel çalışma prensibi Şekil 1.7’de verilmiştir [12]. Şekil 1.8’de ise kurulu bir güneş bacası santralinin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 1.7. Güneş bacasının temel çalışma prensibi [12].

Güneş bacasının diğer elektrik üretim sistemlerine göre bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Güneş bacasının bazı önemli avantajları şunlardır:

1. Güneş ışınlamı cam yüzeye yoğun olarak gelmediğinde de kapalı havalarda dahi difüz ışınlamadan faydalanılabilir.
2. Kollektör altındaki zemine döşenecek hortumlar ile ucuz ve kolay ısı enerjisi depolanabilir.
3. Güneş bacası sistemleri diğer sistemlere göre daha güvenilir sistemlerdir.

4. Yapısı karmaşık olmayıp kolay bulunan malzemeler ile inşa edilebilir [12].

Güneş bacasının bazı önemli dezavantajları ise şunlardır:

1. Üretilen enerjinin artırılması durumunda sera çapının da artırılması gerekir. Ancak bu işlem maliyeti olumsuz etkiler.
2. Enerji kapasitesi arttırılırsa baca yüksekliğinin de artması gerekir. Ancak bu durumda rüzgâr kuvvetine karşı bacanın sabitlenmesi için sağlam bir konstrüksiyona ihtiyaç duyulur.
3. Güneş ışınımına ve sıcaklığa ihtiyaç olduğundan mevsimsel olarak üretim kapasitesi değişim gösterir.
4. Kollektörün tozlanması verimi azaltır.



Şekil 1.8. Güneş bacası santrali [13].

1.2.1.6. Güneş Pilleri

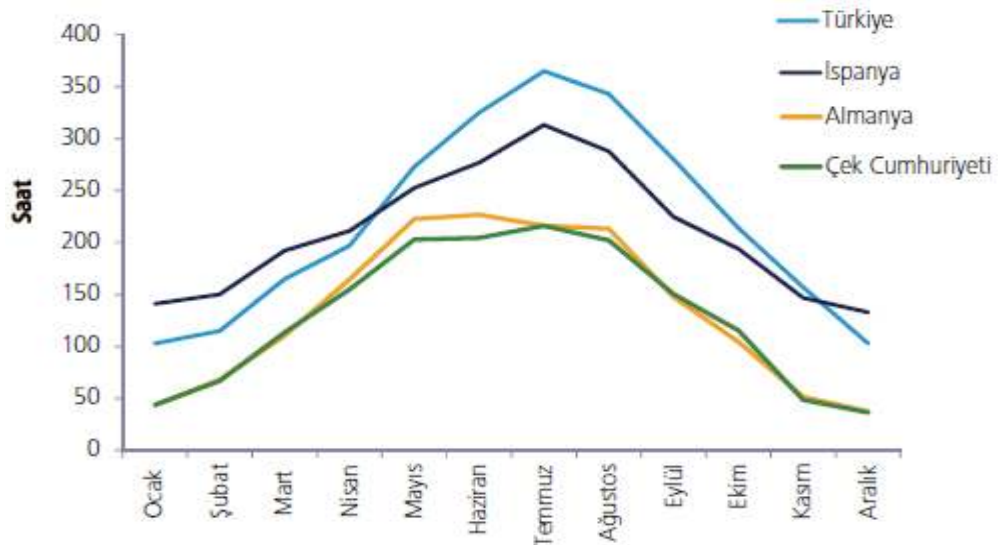
Fotovoltaik sistemlerde elde edilen elektrik enerjisi, güneş ışığının elektrik enerjisine dönüşmesi ile olur. Güneş pilleri yarı iletken maddelerdir. Yapıları P ve N tipi eklemde oluşan diyodlara benzer. Güneş ışığının yüzeylerine gelmesiyle fotonlar tarafından pilden koparılan elektronlar eklemde harekete geçerek bir elektrik akımı

olurturur [14]. Üzerine düşen ışık miktarına bağlı olarak uçlarında gerilim oluşur. Güneş pillerinin ürettiği gerilim, güneşten gelen ışık miktarına bağlıdır. Işınım arttıkça üretilen gerilimde doğru orantılı olarak artar.

Güneş pillerinin ürettiği akım DA akımdır. Bu tür cihazların, elektrik enerjisi üreten diğer cihazlara göre avantajlarının başında modüler yapıda olmaları gelir. Modüler yapıda olmaları istenildiği zaman sökölüp başka yere kurulabilir olmasıdır. Hidroelektrik santralleri veya diğer fosil yakıtlarla çalışan sistemler için doğal olarak böyle bir durum mümkün değildir. Enerjisini güneşten aldığı için herhangi bir yakıt maliyeti yoktur ve çevre kirliliği oluşturmazlar. İlk kurulum aşamasında maliyetleri yüksek ve verimleri düşüktür.

1.3. Türkiye'deki Güneş Enerjisi Potansiyeli

Türkiye, güneş kuşağında yer aldığından dolayı güneş enerjisi potansiyeli bakımından bir çok ülkeye göre avantajlı konumdadır. Bu enerjisi potansiyeline rağmen ülkemizde enerji üretimine yönelik yapılan yatırım miktarı güneş enerjisi potansiyeli daha düşük olan bir çok ülkeye göre daha azdır. Günümüzde Almanya enerji ihtiyacının yaklaşık %2'lik bir kısmını güneş enerjisinden karşılamaktadır. Şekil 1.9'da güneş enerjisini etkin olarak kullanan bazı Avrupa ülkeleriyle ülkemizin aylık güneşlenme süreleri görülmektedir [15].



Şekil 1.9. Türkiye ile bazı avrupa ülkelerinin güneşlenme sürelerinin kıyaslanması [15].

Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğünde (DMİ) mevcut bulunan 1966-1982 yıllarında ölçülen güneşlenme süresi ve ısınım şiddeti verilerinden yararlanarak EİE tarafından yapılan çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7.2 saat), ortalama toplam ısınım şiddeti 1311 kWh/m²-yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m²) olduğu tespit edilmiştir. Aylara göre Türkiye güneş enerji potansiyeli ve güneşlenme süresi değerleri ise Tablo 1.1’de verilmiştir [16].

Tablo 1.1. Türkiye'nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli [16].

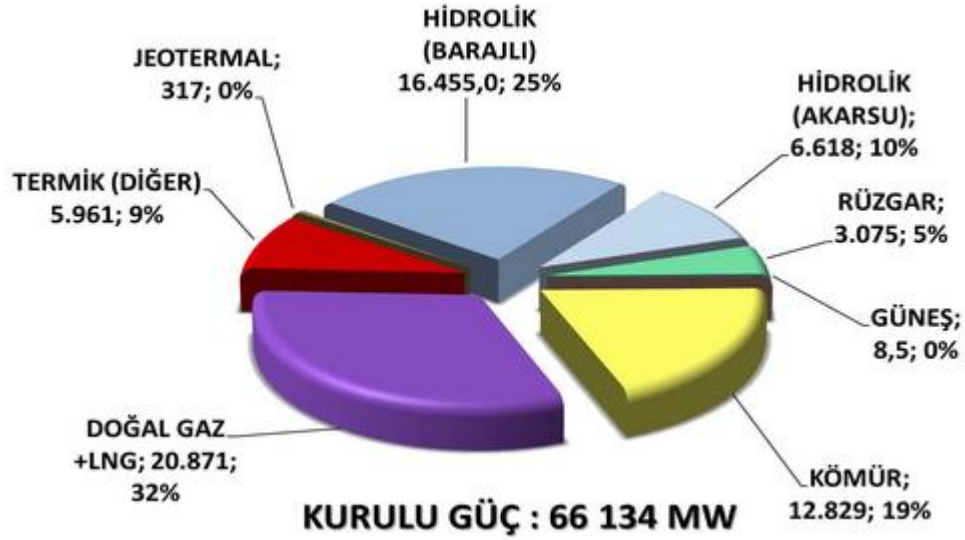
Aylar	Aylık Toplam Güneş Enerjisi		Güneşlenme Süresi(Saat/Ay)
	(Kcal/cm ² -ay)	(kWh/m ² -ay)	
Ocak	4.45	51.75	103.0
Şubat	5.44	63.27	115.0
Mart	8.31	96.65	165.0
Nisan	10.51	122.23	197.0
Mayıs	13.23	153.86	273.0
Haziran	14.51	168.75	325.0
Temmuz	15.08	175.38	365.0
Ağustos	13.62	158.40	343.0
Eylül	10.60	123.28	280.0
Ekim	7.73	89.90	214.0
Kasım	5.23	60.82	157.0
Aralık	4.03	46.87	103.0
Toplam	112.74	1311	2640
Ortalama	308.0 cal/cm ² -gün	3.6 kWh/m ² -gün	7.2 saat/gün

Türkiye'nin güneşlenme süresi ve Güneş enerjisi potansiyeli bölgelere göre dağılımı da Tablo 1.2' de verilmiştir.

Tablo 1.2. Türkiye'nin yıllık toplam güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı [16].

BÖLGE	TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ (kWh/m ² -yıl)	GÜNEŞLENME SÜRESİ (Saat/yıl)
G.DOĞU ANADOLU	1460	2993
AKDENİZ	1390	2956
DOĞU ANADOLU	1365	2664
İÇ ANADOLU	1314	2628
EGE	1304	2738
MARMARA	1168	2409
KARADENİZ	1120	1971

Tablo 1.3'te de görüldüğü gibi Türkiye'nin en çok güneş enerjisi alan bölgesi Güney Doğu Anadolu Bölgesi olup, bunu Akdeniz Bölgesi izlemektedir. Tablo 1.1 ve Tablo 1.2 incelendiğinde ülkemizin güneş enerjisi bakımından zengin bir ülke olduğu görülmektedir. Türkiye’de üretilen elektrik enerjisi kurulu gücü ve üretiminin kaynaklara dağılımı aşağıdaki Şekil 1.10’da verilmiştir.



Şekil 1.10. Türkiye’deki elektrik enerjisi kurulu gücü (31.05.2014)[17].

Yukarıdaki grafikte de görüldüğü gibi güneş enerjisinden elektrik üretimi toplam kurulu gücün yanında yok denecek kadar azdır.

2. GÜNEŞ PİLLERİ

Güneş pilleri (fotovoltaik diyodlar) üzerine güneş ışığı düştüğünde, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren yarı iletken malzemelerdir. Bu enerji çevriminde herhangi bir hareketli parça bulunmamaktadır. Güneş pillerinin çalışma ilkesi, Fotovoltaik prensibe dayanır.

2.1. Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişimi

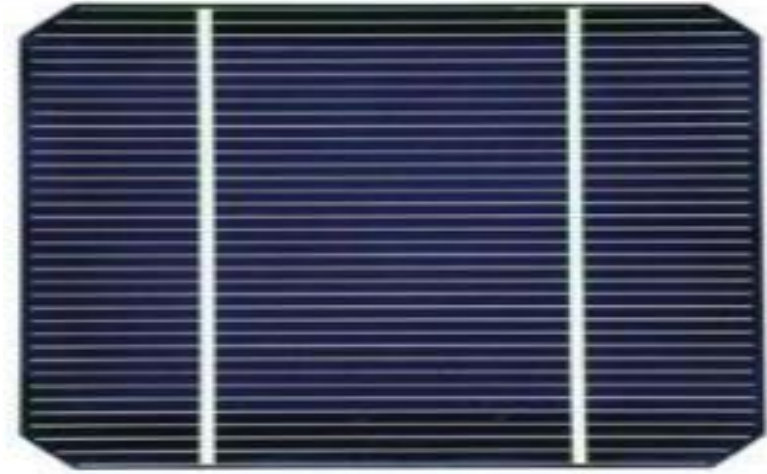
18. yüzyılın başlarında Becquerel, elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemleyerek Fotovoltaik olayını bulmuştur. Benzer bir olayı 1876 yılında G.W.Adams ve R.E Day tarafından katılarda selenyum kristalleri üzerinde göstermiştir. Bundan sonraki çalışmalarda bakır oksit ve selenyuma dayalı foto diyodlar fotoğrafçılık alanında ışık metrelerinde kullanılmıştır. 1954 yılında Chapin tarafından güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik diyodlar ilk kez silikon kristali üzerinde gerçekleştirilmiştir. Fotovoltaik pillerin ilk tasarımları uzay araçlarında kullanılacak güç sistemleri için yapılmıştır. 1960'ların başından beri fotovoltaik güç sistemleri uzay çalışmalarının güvenilir kaynağı olmayı sürdürmektedir. Güneş pili uygulamaları 1970'li yılların başlarına kadar uzay araştırmaları ile sınırlı kalmıştır. 1973 yılında dünyada meydana gelen petrol krizinden sonra Amerika, Avrupa ve Japonya'da güneş pilleri ile ilgili geniş kapsamlı araştırma ve geliştirme projeleri başlatılmıştır. Günümüzde güneş pilleri önem kazanmıştır. Güneş pillerinin verimliliğini arttırmak ve maliyeti düşürmek için çalışmalara hız verilmiştir [16].

2.2. Güneş Pillerinin Yapısı

Gün ışığından elektrik enerjisi elde etmek için kullanılan fotovoltaikler (güneş pilleri), Alessandra Volt'tan esinlenerek voltaj anlamına gelen ve Yunanca'da ışık anlamındaki “photo” kelimesinin birleştirilmesiyle “photovoltaic” adını almıştır. [18].

Güneş pili yapımında en çok silisyum (1.1eV) ve galyum arsenit (GaAs-1.43eV), cadmiyum tellür (CdTe) gibi anorganik yarı iletken malzemeler kullanılır. Güneş pilleri P

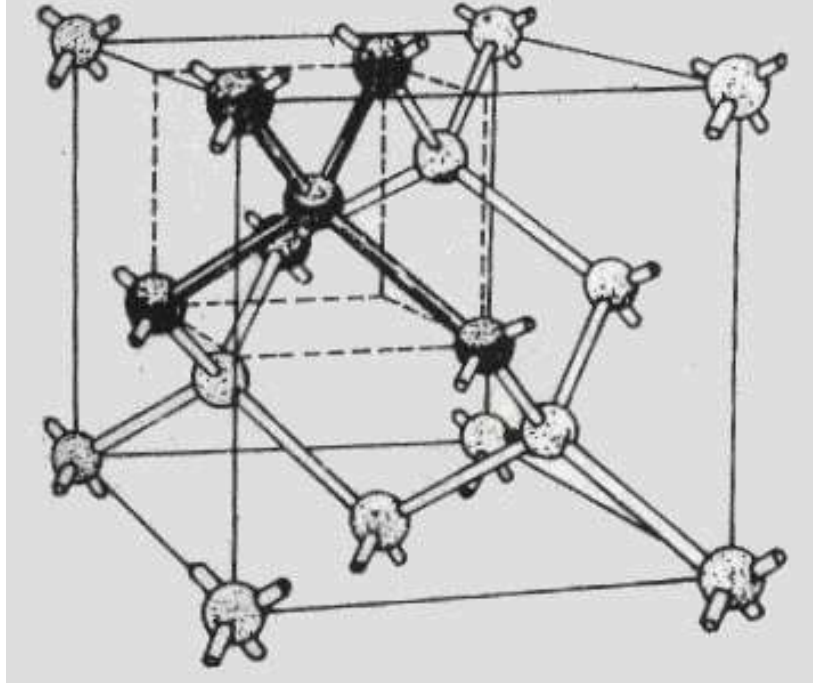
ve N tipi yarı iletken malzemelerin birleşiminden meydana gelir. P ve N tipi madde; yarı iletkenlere belirli miktarda katkı maddesi eklenerek elde edilir [19]. Şekil 2.1’de fotovoltaiik hücre modeli verilmiştir.



Şekil 2.1. Fotovoltaiik hücre

2.2.1. Yarı İletkenler

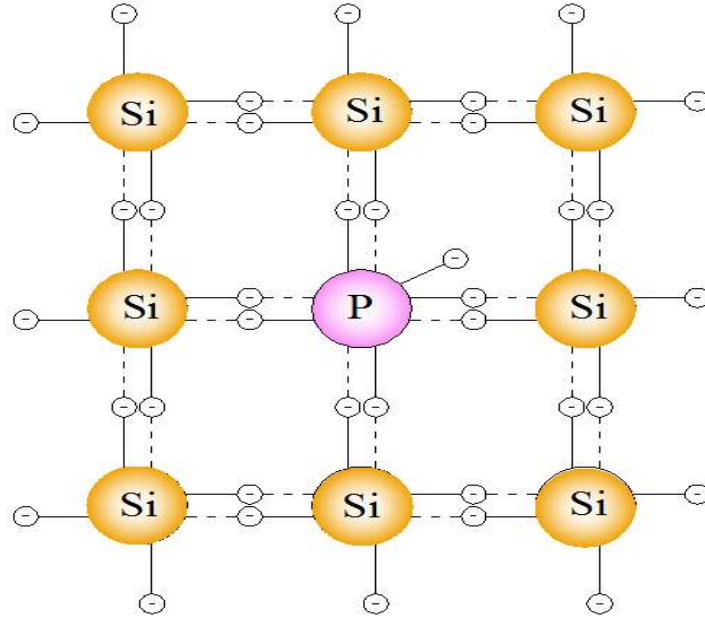
Yarı iletkenin malzemenin elektriksel özelliğini arttırmak için içine çok az miktarda uygun seçilmiş farklı bir atomun katılanması ile yarı iletkenin elektriksel özelliği önemli ölçüde değiştirilebilir. Saf yarı iletkenin yapısal özelliklerini bozmayacak miktarda ve denetimli bir biçimde yarı iletken kristale yerleştirilen yabancı atomlara “safsızlık-atımları” ve bu işleme de “katkılama” adı verilir [20]. Katkılamayı daha iyi açıklamak için silisyum kristali örnek verilirse, saf silisyum kristalinde her atom 14 elektrona sahiptir. En dış yörüngedeki dört valans elektronu en yakınındaki dört silisyum atomu ile bağ yaparak silisyum kristalindeki ana yapı taşı oluşturur. Ana yapı taşı, merkezindeki bir silisyum atomu ile birbirine komşu olmayan birer silisyum atomunun küpün köşelerine yerleşmesi ile kurulur. Silisyum kristali bu yapı taşlarının yinelenerek uzayı doldurması ile oluşur. Şekil 2.2 ‘de saf silisyum kristalinin yapısı görülmektedir [21].



Şekil 2.2. Saf silisyum kristalinin yapısı [20].

2.2.1.1. N Tipi Madde

N tipi madde, saf silisyum malzemeye son yörüngesinde 5 valans elektrona sahip atomdan katkı maddesi eklenerek elde edilir. Silisyuma katkı maddesi olarak 5 valans elektrona sahip olan fosfor atomundan belli bir oranda eklendiğinde, silisyumun 4 valans elektronu ile fosfor atomunun 4 valans elektronu kovalent bağ oluşturur. Fosfor atomunun 1 valans elektronu bağ oluşturmaz ve açıkta kalır. Açıkta kalan bu elektron herhangi bir atoma bağlı olmadığından iletkenliği artırır. Silisyuma katkılanan atomların katkı oranına göre iletkenlik kontrol edilebilir. Katkılanma sonucu oluşan bu serbest elektronlar çoğunluk yük taşıyıcılarıdır. Çoğunluk yük taşıyıcı elektron olan maddeye N tipi yarı iletken malzeme denir. N-tipi malzemede yük taşıyıcılar elektronlardır. Fosfor maddesinin silisyum atomları ile oluşturduğu kovalent bağ Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

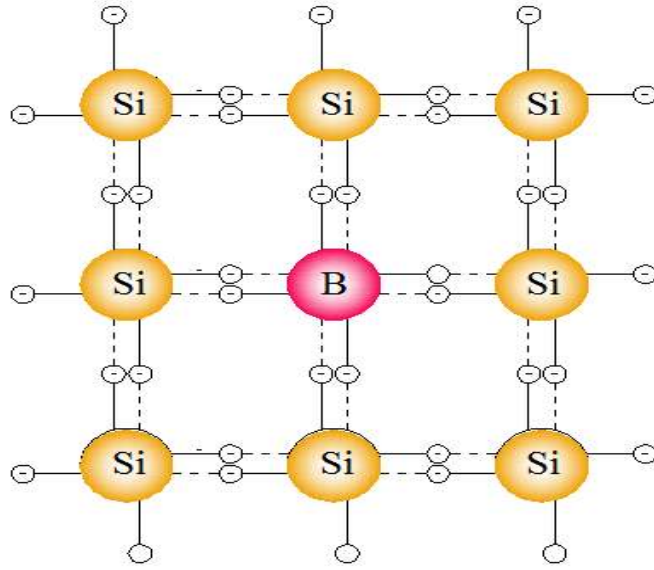


Şekil 2.3. N Tipi Madde

2.2.1.2. P Tipi Madde

P tipi madde oluşturmak için saf silisyum atomunun içine son yörüngesinde 3 valans elektrona sahip atomdan belli bir oranda eklenme yapılır. Yapılan katkılanma sonucu oluşan yeni kristal yapıda katkı olarak eklenen atomun 3 valans elektronu ile silisyumun 3 valans elektronu ortak kovalent bağ oluşturur. Fakat silisyumun 1 valans elektronu ortak valans bağı oluşturamaz. Bu durumda 1 elektron eksikliği meydana gelir. Bu elektron eksikliğine boşluk denir. Böylece yeni kristal yapıda boşluk sayısı artırılmış olur. 3 valans elektrona sahip atomlara; alüminyum (Al), Bor (B) ve Galyum (Ga) elementlerini örnek olarak verebiliriz.

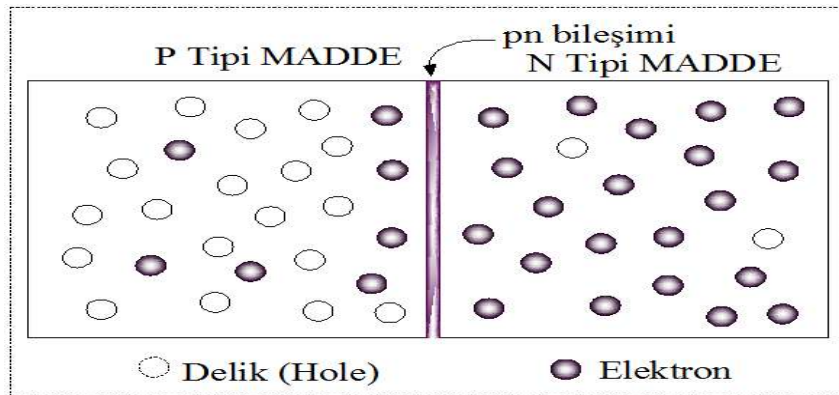
Silisyum maddesine eklenen katkı miktarı ile boşlukların sayısını kontrol edilebiliriz. P tipi maddede meydana gelen boşluklar pozitif yüklüdür ve çoğunluk yük taşıyıcıları boşluklardır. P tipi maddede elektronlar azınlık yük taşıyıcılarıdır. Bor maddesinin silisyum atomları ile oluşturduğu kovalent bağ Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. P Tipi Madde

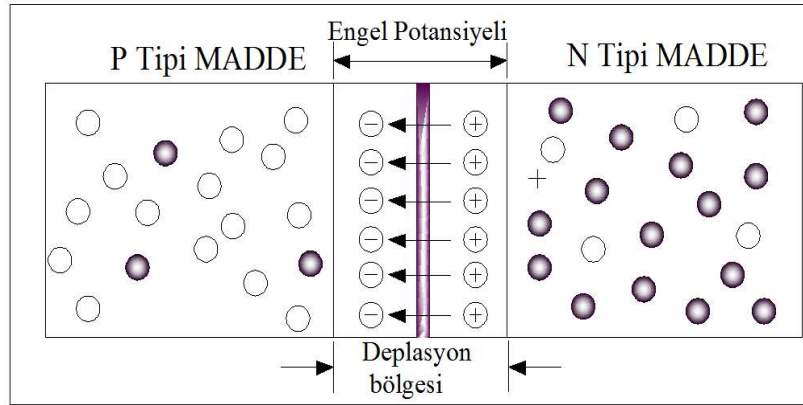
2.2.1.3. P-N Bileşimi

Silisyum kristaline yeterli miktarda katkı maddesi eklenerek oluşturulan P tipi ve N tipi maddeler tek başlarına elektriksel işlevleri yerine getiremezler. P ve N tipi maddelerin elektriksel işlevlerini yerine getirebilmeleri için bir arada kullanılmaları gerekir. Bu birleşime ise PN birleşimi denir. N bölgesinde çoğunlukta olan serbest elektronlar akım taşıyıcı olarak görev yaparlar ve çoğunluk yük taşıyıcıları olarak adlandırılırlar. Bu bölgede meydana gelen boşluklar ise azınlık yük taşıyıcılarıdır. P bölgesinde ise çoğunluk yük taşıyıcıları boşluklar ve azınlık yük taşıyıcıları elektronlardır.



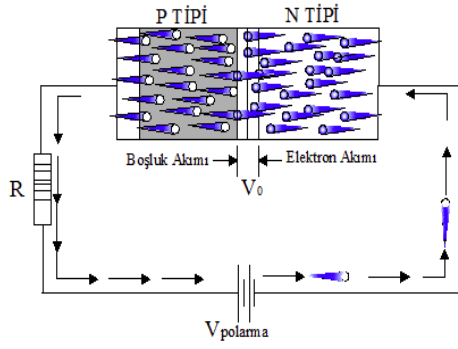
Şekil 2.5. P-N Bileşimi

P ve N maddesi Şekil 2.5'te görüldüğü gibi birleştirildiğinde N maddesinde fazla olan serbest elektronlar, P maddesinde fazla olan boşluklarla birleşir ve aynı işlem P maddesindeki fazla oyukların N maddesine geçip elektronlarla birleşmesiyle devam eder. Elektron ve boşlukların bu hareketliliği P maddesini net (-) yüklü, N maddesi ise (+) yükle yüklenmiş olur. P maddesi tamamen (-) yükle ve N maddesinde (+) yükle yüklendiğinden, P maddesi N maddesindeki elektronları, N maddesi de P maddesindeki oyukları iter. Böylece PN birleşiminin arasında “deplasyon bölgesi” denilen bir bölge (katman) oluşur. Bu durum Şekil 2.6’da gösterilmiştir. İletim dengesi sağlandığında deplasyon bölgesi, PN birleşiminde iletim elektronlarının bulunmadığı noktaya kadar genişler.

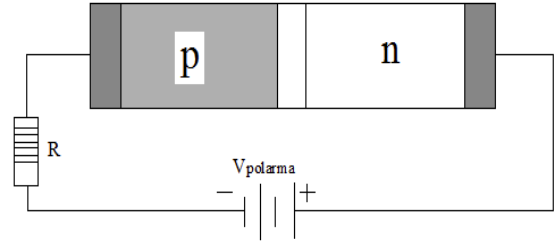


Şekil 2.6. PN maddede deplasyon bölgesinin gösterimi

Karanlık ortamda ve ısı dengesi koşullarında difüzyon ve sürüklenme arasında denge oluşur. P-N birleşimini ters polarizasyon yapıldığında karanlık ortamda engel katmanı genişler. Sadece sızıntı akımı denilen küçük bir akım geçişi meydana gelir. PN birleşimi doğru yönde polarizasyonlanırsa engel katmanı küçülür çoğunluk yük taşıyıcıların difüzyonu artar ve net bir akım akışı meydana gelir. Şekil 2.7’de PN tipi maddenin doğru ve ters polarizasyonu gösterilmiştir.



a) Doğru polarma

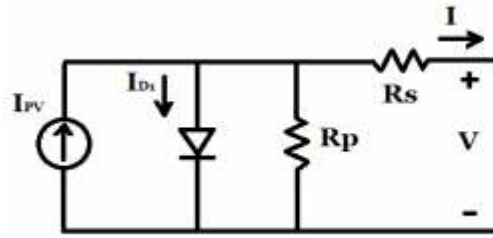


b) Ters polarma

Şekil 2.7. PN tipi maddenin doğru ve ters polarlanması

2.2. Solar Hücresinin Eşdeğer Devresi

PV hücreleri ihmallerin göz önüne alınmadığı durumda; Şekil 2.8’de ki gibi bir akım kaynağı, akım kaynağına paralel bağlı direnç ile diyod ve oluşan yapıya seri bağlı bir direnç ile ifade edilirler [21].



Şekil 2.8. Eşdeğer hücre modeli

Eşdeğer güneş hücresi devresindeki I_{PV} güneş ışığı tarafından üretilen elektrik akımını, I_{D1} diyod akımını, I yük akımını R_s seri direnç değerini, R_p paralel direnç değerini ifade etmektedir. Güneş pilinde oluşan elektrik akımı denklem (2.1)’ deki gibi ifade edilir [22, 23].

$$I_{PV} = (I_{SC} + K_1(T - T_{ref}))\lambda/1000 \quad (2.1)$$

Burada λ , kW/m^2 olarak ışıınımı, I_{SC} güneş pilinin 25°C ’deki kısa devre akımını K_1 güneş pilinin kısa devre akımı sıcaklık sabitini ve T ise güneş pilinin Kelvin olarak çalışma sıcaklığını gösterir. Denklem (2.2)’de ise ters doyum akımı I_{rs} verilmiştir. Burada V_{oc}

güneş pilinin açık devre gerilimini, N_s güneş pili modülündeki seri modül sayısını, k Boltzman sabitini, A ise güneş pilinde kullanılan malzemeye göre ideallik katsayısını ifade etmektedir.

$$I_{rs} = I_{SC} / (e^{(\frac{qV_{OC}}{N_s k A T})} - 1) \quad (2.2)$$

Pile verilen sıcaklık değeri ile I_s doyum akımının değeri değişir. Doyum akımı Denklem (2.3)'te verilmiştir [22,23]. Burada T_{ref} güneş pilinin referans sıcaklığını, E_g güneş pilinde kullanılan yarı iletkenin band aralığı enerjisini, q ise elektron yükünü belirtmektedir.

$$I_s = I_{rs} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 e^{\frac{(q \cdot E_g)}{A k \cdot (1/T_{ref} - 1/T)}} \quad (2.3)$$

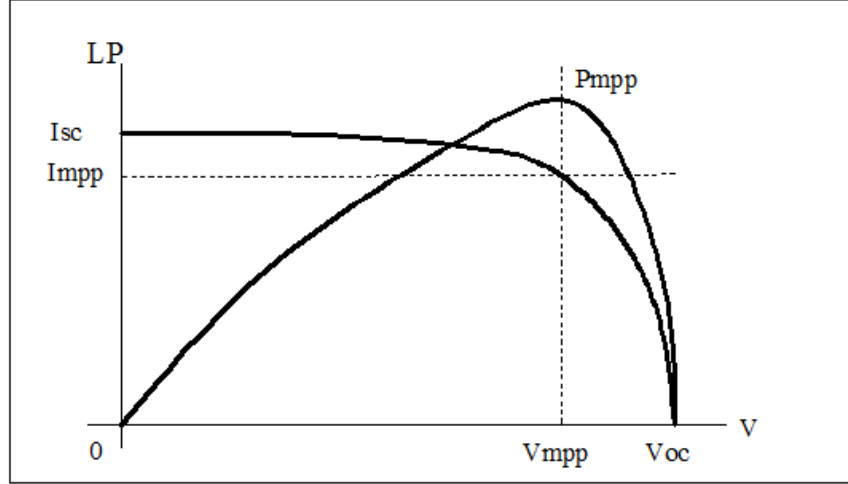
I akımı ise denklem (2.4)'teki gibi ifade edilir.

$$I = I_{PV} - I_s \left[e^{\left(\frac{q(V + I R_s)}{A k T} \right)} - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (2.4)$$

2.3. Güneş Pilinin Çalışması

Güneş pilini oluşturan yarı iletken madde, P ve N birleşiminin arasında oluşan yasak bir enerji aralığı tarafından ayrılan iki enerji bandından oluşur. Bu iki enerji bandından biri valans diğeri iletkenlik bandıdır. Bu yasak enerji aralığında bulunan elektronun enerjisine eşit ya da daha büyük enerjili bir foton yarı iletken tarafından soğrulduğu zaman, soğrulan fotun enerjisini valans bandındaki bir elektrona aktararak elektronun yasak enerji bandından iletkenlik bandına çıkmasını sağlar [24]. Elektronun kopmasıyla bir elektron-boşluk çifti oluşur. Elektronun kopması güneş pilinin ara yüzeyinde meydana gelmiş ise elektrik alan sayesinde elektron-boşluk çiftleri birbirinden ayrılır, güneş pili holleri P bölgesine, elektronları N bölgesine iterek bir pompa gibi çalışır. Fotonun enerjisi ile birbirinden ayrılan elektron - boşluk çiftleri, güneş pilinin uçlarında bir çıkış gücü oluştururlar. Bu döngü tekrar bir fotonun pil yüzeyine çarpmasıyla devam eder.

Fotonlar tarafından yarı iletkenin iç kısmında elektron - boşluk çiftleri oluşturulmaktadır. Elektronları itecek yeterli elektrik alan olmadığı zaman tekrar birleşerek kaybolmaktadırlar [24]. Aşağıdaki şekilde güneş pilinin V-I ve P-V karakteristik eğrisi verilmiştir.

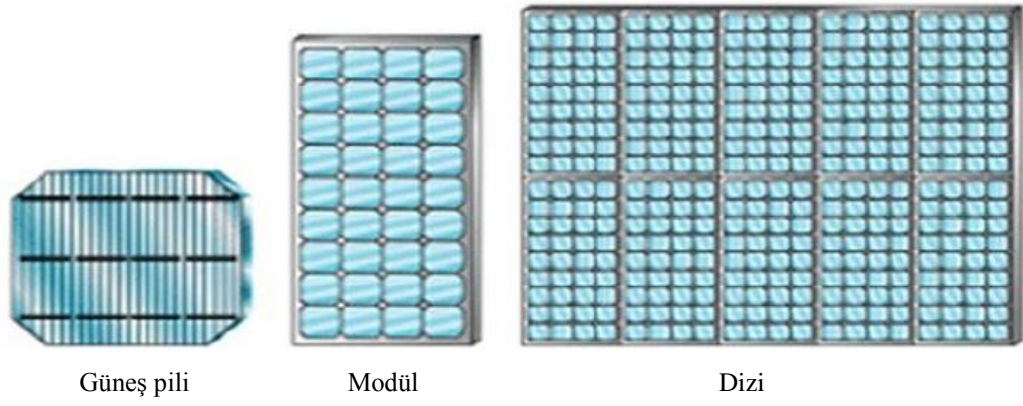


Şekil 2.9. Güneş pili V-I ve P-V karakteristiki

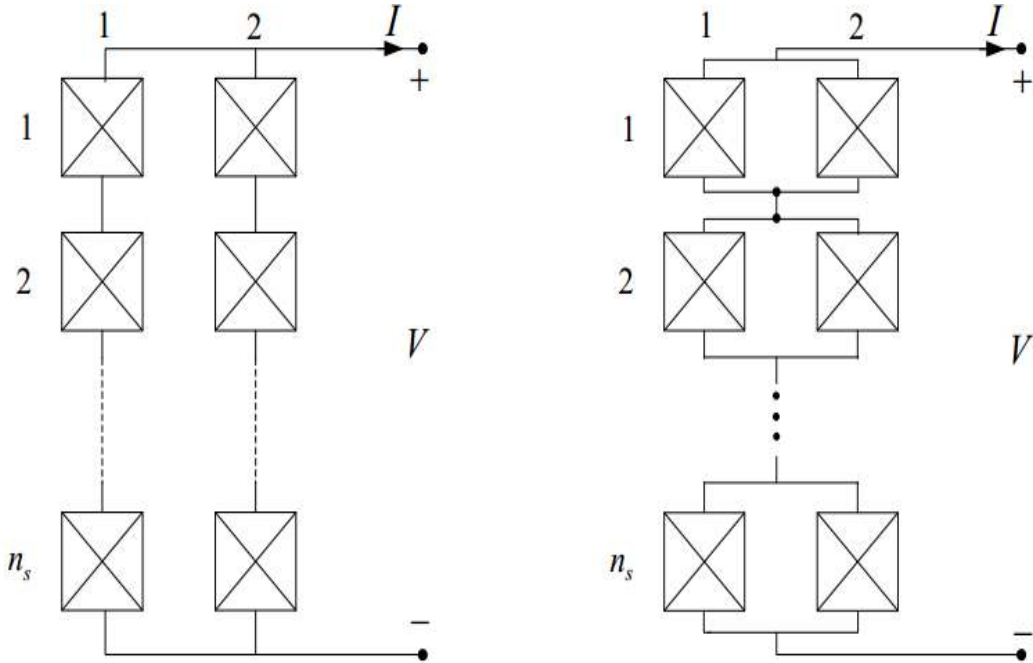
Güneş pilleri Şekil 2.9'da gösterilen karakteristiki üzerindeki herhangi bir noktada çalışabilirler. Bu grafiklerin üzerinde iki önemli nokta bulunmaktadır. Bunlar açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımıdır (I_{sc}). Şekil 2.9'da da görüldüğü gibi açık devre gerilimi sıfır akımdaki maksimum devre gerilimi, kısa devre akımı ise sıfır gerilimdeki maksimum devre akımıdır [22, 25]. Görüldüğü gibi güneş pili doğrusal olmayan bir karakteristiğe sahiptir.

2.4. Güneş Panelleri

Güneş pillerinin güç çıkışını artırmak için birbirlerine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir, bu yapıya güneş pili modülü ya da fotovoltaik modül adı verilir. İstenilen güç talebine göre modüller birbirlerine paralel ya da seri bağlanarak bir kaç W'tan MW'lara kadar olan sistemler oluşturulabilir [26]. Şekil 2.10'da güneş pili, modül ve diziye ait görünüm verilmiştir. Şekil 2.11'de de modüllerin seri ve paralel bağlantıları gösterilmiştir.



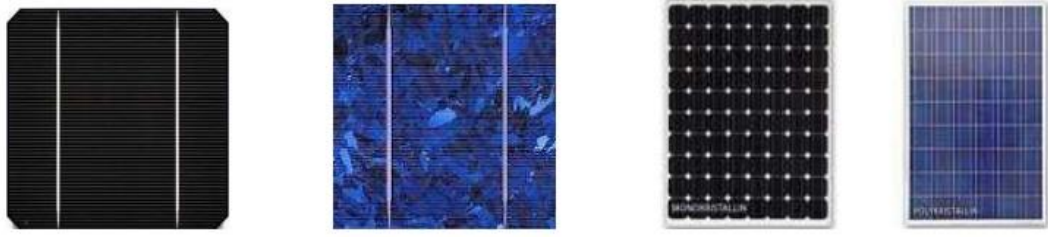
Şekil 2.10 . Güneş pili, modül ve diziye ait görünüm [26].



Şekil 2.11. Modüllerin seri ve paralel bağlantıları [27].

2.4.1. PV Paneli Çeşitleri

Günümüz PV sistem tasarımlarında en yaygın kullanılan PV paneller monokristal ve polikristal yapıdaki Silisyum panellerdir [28]. Şekil 2.12’de mono ve polikristal hücre ve modül yapıları görülmektedir.



Şekil 2.12. Güneş hücreleri ve modülleri [29].

Şekil 2.13'te kristal ve ince film solar modüllerin aynı güç üretimi için kapladıkları alanlar verilmektedir.



Modül Tipi	Yüksek Performans (Hibrit)	Mono Kristal (Mono Kristal Silikon)	Poli Kristal (Poli Kristal Silikon)	CIS-Modüller (Bakır-İndiyum-Selenid)	CdTE-Modüller (Kadmiyum Tellur)	ASI/McSi Modüller (Amorf silikon/ Mikro kristal Silicon)
1kWp-Güç İçin Alan Gereksinimi	6-7 m ²	7-9 m ²	7,5-10 m ²	9-11 m ²	9-15 m ²	11-14 m ²
Kategori	Kristal Solar Modüller			İnce Film Solar Modüller		

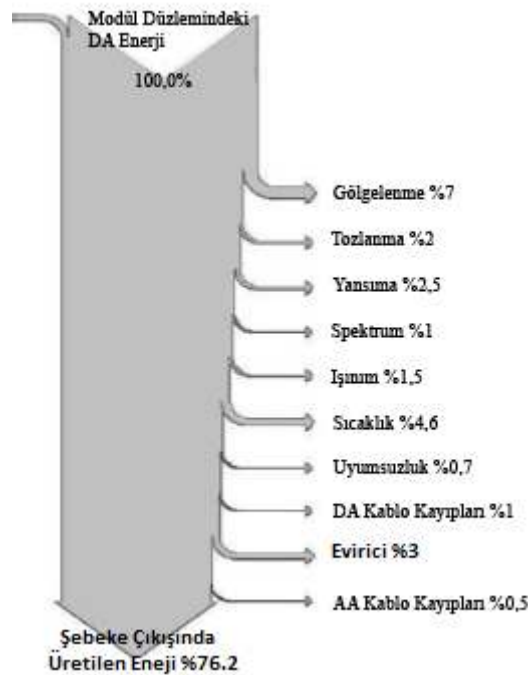
Şekil 2.13. Güneş panellerinin 1kWp güç için modül tipi, alan ve kategorisine göre sınıflandırılması

Şekil 2.13'te görüldüğü gibi kristalin solar modüllerin aynı güç gereksinimi için kapladıkları alan ince film solar modüllere göre daha azdır. Bu da kristalin solar modüllerin verimlerinin ince film solar modüllerden daha iyi olduğunu göstermektedir. İnce film solar modüllerin verimleri az olduğundan kullanım oranı düşüktür. Monokristal modüllerin verimleri polikristal modüllere göre daha iyi olmasına rağmen en yaygın olarak kullanılan polikristal modüllerdir. Monokristal modüller üretim aşamalarının uzun olmasından dolayı daha maliyetli olduklarından daha az tercih edilmektedirler. Fakat uzun

vadeli yatırımlar için monokristal modüller iyi bir seçenektir. Polikristalin modüllerin tercih edilmesinin nedeni daha kolay ulaşılabilir olması ve maliyetlerinin daha düşük olmasıdır.

2.4.2. Güneş Panellerinde Meydana Gelen Kayıplar

Günümüz teknolojisinde üretilen güneş pillerinden yüzde yüz verim elde edilememektedir. Verimleri düşük olduğundan dolayı güneş pillerinden elde edilen enerjinin mümkün olduğunca az kayıpla tüketiciye ulaşması gerekir. Bunun için güneş pillerinde meydana gelen kayıpları minimum seviyeye getirmek ve bu kayıplara neden olan unsurları ortadan kaldırmak için çalışmalar yapılmaktadır. PV sistemlerinde meydana gelen kayıplara neden olan unsurlar, çevresel faktörler ve PV sistemi şebekeye bağlamak için kullanılan ara elemanlardır. Çevresel faktörler gölgelenme, tozlanma vb. iken, bağlantı ara elemanlarında ise evirici ve kablolarda meydana gelen kayıpları sıralayabiliriz. Bu kayıpların bir arada olduğu düşünülürse üretilen enerjinin önemli bir kısmının kaybolduğu görülür. PV sistemleri bu kayıpları göz önüne alarak kurmak ve mümkün olduğu kadar üretilen enerjiyi yerinde tüketmek gerekir. Şekil 2.14’de bir PV sisteminde meydana gelen kayıplar görülmektedir.

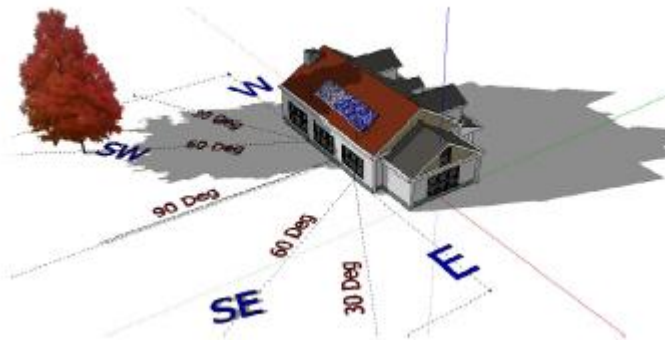


Şekil 2.14. Bir pv sisteminde meydana gelen kayıplar

Yukarıdaki şekilde de görüldüğü gibi bir PV sistemde üretilen enerjinin yaklaşık % 25' i kayıplardan dolayı kaybolmaktadır [29].

2.4.2.1. Gölgeleme Kayıpları

PV panellerin performansını etkileyen en önemli etmenlerden birisi gölgelemedir. Gölgelemeye sebep olabilecek etmenler; komşu binalar, çalılar, direkler ve ağaçlar olarak sayılabilir [18, 30]. Genellikle şehir merkezlerinde çok yakın inşa edilen binalar birbirlerinin üzerine gölge düşürmektedirler [18, 31]. Bazen yanlış tasarımdan dolayı binanın kendi kendini gölgelemesi de mümkündür. Gölgelemeye sebep olabilecek bu gibi durumlar panelin performansını düşüreceği için tasarım aşamasında doğru kararlar verilmelidir. PV panel sisteminin kurulacağı konumun dikkatli seçilmesi gerekir. Şekil 2.15'te görüldüğü gibi gölgeleme yapabilecek bir diğer unsur ise ağaçlardır. PV panel tasarımı yapılırken çevredeki ağaçlar iyi analiz edilmelidir. Ağaçların olduğu bir bölgede tasarım yapılmak isteniyorsa mümkünse kışın yaprak döken ağaçlar tercih edilmelidir. Böylece kışın daha düşük açıyla gelen güneş ışınlarının panel üzerine düşürülmesi kolaylaşmaktadır [18, 22].



Şekil 2.15. Gölgeye maruz kalmış bir güneş paneli [29].

Modülün kısa devre akımı (I_{sc}) modül üzerindeki 1 hücrenin gölgelemesi ile çok fazla değişmez. Fakat gölgelenen hücre sayısı arttıkça azalır. Açık devre gerilimi bir hücrenin gölgelemesi ile yaklaşık 0,61V azalır. Bunun sebebi gölgeli hücrenin diğer hücrelere yük gibi davranması ve üzerinde sıcak noktaların oluşmasıdır. Açık devre gerilimindeki 0,61V değerindeki azalmanın çıkış gücüne etkisi azdır. Fakat gerilimdeki

0,61V'luk azalma modülün üzerinde 80°C'lik sıcaklığın oluşmasına neden olur ve modülün fiziki yapısında bozulmalara neden olur [32].

Bu tür olumsuz durumları ortadan kaldırmak için by-pass diyodu kullanılır. By-pass diyodun kullanılmadığı duruma göre en önemli farkı, açık devre geriliminde değişim olmamasıdır. Bunun sebebi akım üreten diğer hücrelerin gölgeli hücre üzerinde negatif bir gerilim uygulamadan direk baypas diyod üzerinden geçmesidir. By-pass diyod kullanımı ile V_{oc} gerilimindeki azalma engellenmiştir. Bu sayede hücreler de sıcak nokta oluşumuna karşı korunmuş olmaktadır [32].

2.4.2.2. Tozlanma Kayıpları

PV modüllerin yüzeylerinin herhangi bir nedenden kirlenmesi ya da yüzeyde yağın kardan dolayı kar birikmesi modüllere gelen solar ışınım miktarının azalması nedeniyle gerçekleşen kayıplardır [29]. Tozlanmadan dolayı meydana gelen kayıplar için yapılan araştırmalar sonucu, özellikle yağış miktarının az olduğu bölgelerde bu kayıplar sıradışı durumlarda %15 oranlarına ulaşmaktadır [29, 33]. Şekil 2.16'da tozdan dolayı kirlenmiş güneş paneli gösterilmiştir. Bu gibi durumlarla karşılaşılırsa yapılması gereken modüllerin temizlenmesidir. Fakat büyük güçlü güneş enerji santrallerinde (GES) ve özellikle su sıkıntısının olduğu bölgelerde bu işlem pahalıya mal olur [29].

Tozlanmadan dolayı meydana gelen güç kaybı en son düşen yağmurdan beri geçen zamana, tozun cinsine ve temizlik programına bağlıdır [29, 34]. Yatayla eğim arasındaki açı 15°'den büyükse yağmurun panel üzerindeki tozu temizlemede etkili olacağı varsayılır. Bu durumda tozlanmadan kaynaklanan verim kaybı %0.5 ile sınırlıdır [29, 34]. Eğim açısı 15°'den küçükse, ya da yağış miktarının az veya seyrek olması, çevredeki tarım arazilerinde ya da endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan tozlanma ve hava kirliliğinin fazla olduğu kurulum sahasına has özellikler varsa bu değer arttırılabilir. Fakat yapılan araştırmalar göstermiştir ki tozlanmadan kaynaklanan kayıplar nadiren %4'ün üstüne çıkar [29, 34].



Şekil 2.16. Güneş panellerinde tozlanma [36].

2.4.2.3. Yansıma Kayıpları

Solar ışınının belli bir kısmı hücreler tarafından emilirken bir kısmı da modül yüzeyine çarparak geri yansır. Bu geri yansıyan ışınlarından dolayı oluşan kayıplara yansıma kayıpları denir [29].

PV modüllerin yüzeylerini kaplamak için kullanılan camlar emilmeyi maksimum seviyeye, yansımadan dolayı meydana gelen kayıpları en aza getirmek için tasarlanmış temperli bir yapıya sahiptir. Hücrelerde ise ışığın yansımalarını önlemek için yansıma önleyici kaplama (Anti – reflective coating) yapılır [29].

2.4.2.4. Sıcaklık Kayıpları

Güneş panelleri 25 °C sıcaklık, 1.000 W/m² güneş radyasyonu ve 1.5 AM (Air Mass, hava kütlesi) standart test koşullarında test edilir. Panellerin verimleri standart test koşullarına göre hesaplanır. Panelin elektrik üretmesi, güneş ışınımı alması ile birlikte başlar. Panel üzerine düşen güneş ışınımının bir kısmı elektrik enerjisine dönüşürken bir kısmı da ısı enerjisine dönüşerek ortaya çıkar [37].

Panelde meydana gelen sıcaklık arttıkça PV'nin performansı düşmektedir. PV paneller güneş enerjisinin tamamını elektrik enerjisine dönüştürmezler sadece %5-25'ini elektrik enerjisine dönüştürürler. Bu nedenle güneş panellerinin elektrik enerjisine dönüştüremediği fazla enerji modüllerde ısınmaya sebep olur [30, 38]. Kristal silisyumdan

yapılmış hücreler amorf silisyum hücrelere oranla sıcaklıktan daha fazla etkilenirler [31, 38].

2.4.2.5. Uyumsuzluk Kayıpları

Fotovoltaik sistemlerde kayıpların önemli kaynaklarından birisi de modül içinde iki veya daha fazla dizinin ürettiği enerjinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu uyumsuzluk kısmi gölgelenme, kirlenme gibi dizilerde kayıplara neden olabilecek faktörlerden kaynaklanmaktadır [39].

2.4.2.6. Doğru Akım Kablo Kayıpları

Normalde iyi tasarlanmış bir kurulumun, DA kablo kayıplarının % 2'den daha düşük olması gerekir ve zamanla bu oran yükselmemelidir. Ancak bu her zaman böyle değildir. Kablolarda meydana gelen bazı kayıpların nedeni korozyon ve aşırı ısınmadır [15].

Bir PV sistem kurulumunda, PV ile evirici bağlantısı için kablo kullanılır. DA kablo kayıp gücü zamana bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Burada r_{DA} kablonun DA direnci, V_{DA} kablo uçlarındaki DA gerilimi, $P_{kayıp}$ ise DA kablo kayıp gücüdür.

$$P_{DA-kablo,kayıp}(t) = 2 \cdot I_{DA,kablo}^2(t) r_{DA} \quad (2.5)$$

$$P_{DA-kablo,kayıp}(t) = 2 \cdot \left(\frac{P_{DA,kablo}(t)}{V_{DA}} \right)^2 r_{DA} \quad (2.6)$$

Omik kayıplar nedeniyle DA enerji kaybı, kablo direncinin artmasıyla doğru orantılıdır.

2.5. Doğru ve Alternatif Akım Kablolarından Kaynaklanan Enerji Kayıpları

PV sistemlerde elektrik üretimi pahalı olduğu için sistem kayıplarının en aza indirilmesi gerekir. Sistem kayıplarının önemli bir kısmı elektriksel alanlarda meydana gelir. Bu kayıplar büyük ölçüde kablo ve eviricilerde oluşur.

PV sistemlerin çalışma koşulları STK (standart test koşulları) altındadır. Fakat normal şartlarda PV sistem çıkışı değişken olduğundan ve nadiren STK'da çalıştığından dolayı ortaya çıkan kablo yüklenmesi farklılıklar gösterir ve STK'ya göre seçilen kesit uygun olmayabilir. DA ve AA kablo kesitinden dolayı meydana gelen gerilim düşümü enerji kaybına neden olmakta ve verimi düşürmektedir. PV sistem kablolarında meydana gelebilecek kayıpları minimize etmek için kablo kesitlerinin iyi hesaplanması gerekir. PV panelin DA çıkışından elde edilen güç denklem (2.7)'deki gibi yazılabilir [40].

$$P_{DA}(t) = P_{PV,peak} \frac{G(t)}{G_{STK}} [1 + DP \cdot \Delta\theta] \quad (2.7)$$

Burada P_{DA} t anındaki DA gücünü, $P_{PV,peak}$ standart test koşullarında maksimum panel gücünü, G_{STK} , ve $G(t)$ ise STK'da ve mevcut durumdaki aydınlatma miktarını, DP panel sıcaklığından dolayı meydana gelen kayıp katsayısını ve $\Delta\theta$ ise panel sıcaklığındaki değişimi göstermektedir. Panel sıcaklığındaki değişim denklem (2.8)'den elde edilmektedir ve $T_{dış}$ ortam sıcaklığını ifade etmektedir.

$$\Delta\theta = T_{dış} + 30 \quad (2.8)$$

t anında sürekli hal gücü denklem (2.9)'daki gibi yazılabilir.

$$P(t) = \frac{A+T}{B+Ct} \quad (2.9)$$

Güneş panelleri güneş ışığına maruz kaldıkları andan itibaren ısınmaya başlar. T_{max} panelin yıl içinde güneşe maruz kaldığı toplam süre olarak kabul edilir. Iraklion, Madrid, Münih, Varşova ve Edinburgh bölgelerinin yıllık ortalama güneşlenme süreleri $T_{max} = 4400$ saattir [40]. A, B ve C ortama bağlı katsayılarıdır. A katsayısı, yıllık maksimum maruz kalınan toplam sıcaklığa eşittir. $P(0)$ için A katsayısı aşağıdaki gibi elde edilir.

$$A = -T_{max} = -4400 \quad (2.10)$$

$P(0) = P_{max}$ olduğunda B katsayısı denklem (2.11)'den hesaplanır. A ve B katsayıları P_{max} ve T_{max} parametrelerine bağlıdır. C katsayısı için temel bağıntı denklem (2.12)'dir. Denklem (2.10) ve (2.11) kullanılarak C katsayısı denklem (2.13) ve (2.14)'teki gibi yazılabilir.

$$P_{max} = \frac{A}{B} \Rightarrow B = \frac{A}{P_{max}} \quad (2.11)$$

$$C = \frac{A+100}{867,5.P_{max}} - \frac{B}{1000} \quad (2.12)$$

$$C = \frac{0,481}{P_{max}} \quad (2.13)$$

$$C = \frac{1}{2.P_{max}} \quad (2.14)$$

Solar evirici verimi denklem (2.15) ile tanımlanmaktadır. $P_{AA}(t)$ anlık alternatif akım (AA) gücü, $P_{DA}(t)$ anlık DA gücü ve P_k kayıpları göstermektedir.

$$\eta(t) = \frac{P_{AA}(t)}{P_{DA}(t)} = \frac{P_{DA}(t) - P_k(t)}{a(t)} \quad (2.15)$$

Evirici verimi üretilen DA gücüne bağlı olarak değişmekte ve bu değişimle meydana gelen dinamik verime Euro verim denilmektedir. Euro verim denklem (2.16)'da verilen bağıntıyla hesaplanır. Verim indeksleri, anlık gücün nominal güce oranını göstermektedir.

$$\eta_{Euro} = 0.03\eta_{5\%} + 0.06\eta_{10\%} + 0.13\eta_{20\%} + 0.10\eta_{30\%} + 0.48\eta_{50\%} + 0.2\eta_{100\%} \quad (2.16)$$

Herhangi bir eviricinin verim eğrisi denklem (11)'den hesaplanabilmektedir. η Evirici verimini, $P_{DA,p.u}$ DA gücünün perunit değerini göstermekte D, G ve F değerleri düzeltme katsayısı olup tasarım tablosundan alınmaktadır (Tablo 2.1).

Tablo 2.1 Farklı eviriciler için D, G, F parametreleri ve R_{xy} kolerasyon katsayısı tablosu [40].

	D	G	F	R_{xy}
Sunways, 3.6kW	96.83	-1.95	-0.347	0.997
SMA, 9kW	98.93	-1.70	-0.221	0.986
Danfoss, 15kW	99.69	-1.56	-0.464	1.000
SMA, 17kW	99.63	-1.70	-0.325	0.986
Siemens, 20 kW	99.22	-1.08	-0.252	0.982
Satcon, 100 kW	99.97	-3.22	-0.644	0.995
Siemens, 20 kW	98.57	-0.76	-0.088	0.993

$$\eta(P_{da,p.u}) = D + GP_{DA,p.u} + \frac{F}{P_{DA,p.u}} \quad (2.17)$$

Şebekeye verilen AA enerjisi iki farklı durum için hesaplanmaktadır. Birincisi eviricilerin toplam nominal gücünün üretilen güçten fazla olma durumudur. Bu durumda yıllık üretilen toplam enerji denklem (2.18)'den hesaplanır. Bu durumda evirici asla güç sınırlama modunda çalışmaz. Denklem (2.9), (2.11) ve (2.14) kullanılarak denklem (2.18) ve (2.19) aşağıdaki gibi yazılabilir. Elde edilen AA enerji optimum evirici gücünü belirlemede kullanılır. İlk durum için optimum evirici gücü denklem (2.20)'den hesaplanır.

$$\begin{aligned} E_{AA} &= \int_0^{T_{max}} P_{DA}(t) \eta(P_{DA,p.u}) \cdot dt \\ &= \int_0^{T_{max}} P_{DA}(t) \left(D + G \frac{P_{DA}(t)}{P_{inv,N}} + F \frac{P_{inv,N}}{P_{DA}(t)} \right) dt \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$E_{AA} = T_{max} \cdot \left\{ F \cdot P_{inv,N} + 2DP_{max}[1 - \ln(2)] + \frac{2GP_{max}^2}{P_{inv,N}} + [3 - 4\ln(2)] \right\} \quad (2.19)$$

$$\frac{dE_{AA}}{dP_{inv,N}} = 0 \Rightarrow P_{inv,N}^{opt} = P_{max} \sqrt{\frac{2G[3-4\ln(2)]}{F}} \quad (2.20)$$

İkinci durum, eviricilerin toplam nominal gücünün üretilen güçten az olma durumudur. Bu durumda üretilen toplam AA enerjisi denklem (2.21)'den hesaplanır. Denklem (2.17) kullanıldığında evirici verimi denklem (2.22)'da verilen bağıntıyla bulunmaktadır.

$$E_{AA} = T_{inv,N} P_{inv,N} \eta(P_{inv,N,p.u}) + \int_{T_{inv,N}}^{T_{max}} P_{AA}(t) \eta(P_{AA,p.u}) dt \quad (2.21)$$

$$\eta(P_{inv,N,p.u}) = D + G + F \quad (2.22)$$

Üretilen toplam gücün eviricilerin nominal gücüne eşit olması durumunda, optimal evirici gücü denklem (2.23)'ten hesaplanır. Aynı bağıntı denklem (2.9), (2.11), (2.14) ve (2.21) kullanıldığında denklem (2.24)'teki gibi yazılabilir.

$$P_{inv,N} = \frac{A+T_{inv,N}}{B+CT_{inv,N}} \Rightarrow T_{inv,N} = \frac{ACP_{inv,N}}{1-CP_{inv,N}} - A \quad (2.23)$$

$$E_{AA} = T_{max} \left\{ \begin{aligned} &2P_{max} \ln \left(1 - \frac{P_{inv,N}}{2P_{max}} \right) \left[D + \frac{4GP_{max}}{P_{inv,N}} \right] \\ &+ 4GP_{max} + P_{inv,N}(F + 2D + 2G) \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

Evirici gücünün optimum seçilmemesi durumunda sistemde fazladan kayıplar meydana gelir ve bu kayıplar sistemin verimliliğini azaltır. Bu verim kaybı denklem (2.25)'den hesaplanmaktadır.

$$REL = \frac{E_{AA,max} - E_{AA}}{E_{AA,max}} 100 \quad (2.25)$$

Optimum evirici gücü bulunduktan sonra etkin evirici verimi hesaplanabilir (Denklem 2.26). Etkin evirici verimi $P_{inv,N} > P_{max}$ olması durumunda denklem (2.27)'den ve $P_{inv,N} = P_{max}$ olması durumunda denklem (2.28)'den hesaplanır.

$$\eta_{eff,opt} = \frac{E_{AA,max}}{E_{DA}} = \frac{E_{AA,max}}{\int_0^{T_{max}} P_{DA}(t) dt} \quad (2.26)$$

$$\eta_{eff,opt} = \frac{E_{AA,max}}{E_{DA}} = D - \frac{\sqrt{2FG(3-4\ln 2)}}{(1-\ln 2)} \quad (2.27)$$

$$\eta_{eff,opt} = \frac{E_{AA,max}}{E_{DA}} = D + \frac{F+2G(3-4\ln 2)}{(1-\ln 2)} \quad (2.28)$$

Herhangi bir PV sistem tesisatının kablo kayıplarından dolayı meydana gelen enerji kayıplarını P_{DA} olarak analitik bir ifade ile elde etmek mümkündür. Yıllık kablo enerji kayıplarının hesaplanması, kablo maliyeti ile birlikte uygun kablo kesitinin belirlenmesi tasarımı yapan mühendisler için teknik ve ekonomik kriterlere dayalı uygun bir yöntem olabilir.

DA kablolar PV dizilerinin bağlantılarında ve PV ile evirici arasındaki bağlantı için kullanılırlar. Herhangi bir t anında kablolarda meydana gelen güç kayıpları denklem (2.29)'dan hesaplanmaktadır. N_t , PV panel dizi grubu sayısı, N ise dizilere bağlı DA kablo sayısı olduğu varsayılırsa;

$$\begin{aligned} P_{DA-kablo,kayıp}(t) &= 2I_{DA,kablo}^2(t)r_{DA} \\ &= 2\left(\left(\frac{P_{DA,kablo}(t)}{V_{DA}}\right)\right)^2 r_{DA} = \frac{2r_{DA}}{V_{DA}^2} P_{DA,kablo}^2(t) = \frac{2r_{DA}}{V_{DA}^2} \left(\frac{N}{N_t}\right)^2 P_{DA}^2(t) \end{aligned} \quad (2.29)$$

Burada r_{DA} DA kablo direnci, V_{DA} DA kablo uçlarındaki gerilimdir.

Eviricilerin toplam gücü üretilen gücün maksimum değerinden büyükse denklem (2.9), denklem (2.10), (2.11) ve (2.14) kullanılarak, (2.30)'daki gibi yazılabilir. Burada üretilen DA gücü eviricilerin toplam nominal gücünden daha fazladır. Üretilen DA gücünün daha az olması durumuna denklem (2.31) kullanılmaktadır.

$$W_1 = \int_0^{T_{max}} P_{DA}^2(t) dt = \int_0^{T_{max}} \left(\frac{A+t}{B+Ct}\right)^2 dt = 2T_{max}P_{max}^2[3 - 4\ln(2)] \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} W_2 &= \int_0^{T_{inv,N}} P_{inv,N}^2 dt = \int_{T_{inv,N}}^{T_{max}} \left(\frac{A+t}{B+Ct}\right)^2 dt \\ &= 8T_{max}P_{max}^2 \left[\ln\left(1 - \frac{P_{inv,N}}{2P_{max}}\right) + \frac{P_{inv,N}}{2P_{max}} \left(1 + \frac{P_{inv,N}}{2P_{max}}\right) \right] \end{aligned} \quad (2.31)$$

Eviricilerin toplam nominal gücünün üretilen DA gücüne eşit veya büyük olması durumunda DA kablolarında meydana gelen enerji kaybı, denklem (2.29) ve (2.30) kullanılarak denklem (2.32)'daki gibi yazılabilmektedir. Üretilen DA gücünün fazla olması durumunda denklem (2.33) kullanılır.

$$E_{DA-kablo,kayıp} = \int_0^{T_{max}} P_{DA-kablo,kayıp}(t) dt = \frac{2r_{DA}}{V_{DA}^2} \left(\frac{N}{N_t}\right)^2 W_1 \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned}
E_{DA-kablo,kayıp} &= \int_0^{T_{inv,N}} P_{DA-kablo,kayıp}(t) dt + \int_{T_{inv,N}}^{T_{max}} P_{DA-kablo,kayıp}(t) dt \\
&= \frac{2r_{DA}}{V_{AA}^2} \left(\frac{N}{N_t} \right)^2 W_2
\end{aligned} \tag{2.33}$$

Tek fazlı eviricilerin AA kablosunda meydana gelen kayıplar, toplam nominal gücünün üretilen DA gücünden fazla olması durumunda denklem (2.34) ile hesaplanır. Toplam nominal gücünün üretilen DA gücünden az olması durumunda ise denklem (2.35) kullanılır. Bu denklemlerde r_{AA} AA kablosunun direncini ve V_{1ph} faz ile nötr arasındaki gerilimi ifade etmektedir. Üç fazlı eviricinin AA kablo kayıpları denklem (2.36)'tan hesaplanır. V_{LL} fazlar arası gerilimi ve $I_{AA,kablo}$ akımın etkin değerini ifade etmektedir.

$$E_{AA-kablo,kayıp}^{1ph} = \frac{2r_{AA}}{V_{1ph}^2} \left(\frac{N_i}{N_{it}} \right)^2 W_1 \tag{2.34}$$

$$E_{AA-kablo,kayıp}^{1ph} = \frac{2r_{AA}}{V_{1ph}^2} \left(\frac{N_i}{N_{it}} \right)^2 W_2 \tag{2.35}$$

$$\begin{aligned}
P_{AA-kablo,kayıp}(t) &= 3I_{AA,kablo}^2(t)r_{DA} = 3 \left(\frac{P_{DA,cablo}(t)}{\sqrt{3}V_{LL}} \right)^2 r_{AA} \\
&= \frac{r_{AA}}{V_{LL}^2} \left(\frac{N_i}{N_{it}} P_{DA}(t) \right)^2 = \frac{r_{AA}}{V_{LL}^2} \left(\frac{N_i}{N_{it}} \right)^2 P_{DA}^2(t)
\end{aligned} \tag{2.36}$$

Üç fazlı eviricilerde yıllık enerji kaybı, eviricilerin toplam nominal gücünün üretilen maksimum güçten fazla olması durumunda denklem (2.36)'dan, az olması durumunda ise denklem (2.37)'den hesaplanır.

$$E_{AA-kablo,kayıp}^{3ph} = \int_0^{T_{max}} P_{AA-kablo,kayıp}(t) dt = \frac{r_{AA}}{V_{LL}^2} \left(\frac{N_i}{N_{it}} \right)^2 W_1 \tag{2.37}$$

$$\begin{aligned}
E_{AA-kablo,kayıp}^{3ph} &= \int_0^{T_{inv,N}} P_{AA-kablo,kayıp}(t) (dt) + \int_{T_{inv,N}}^{T_{max}} P_{AA-kablo,kayıp}(t) dt \\
&= \frac{r_{AA}}{V_{LL}^2} \left(\frac{N_i}{N_{it}} \right)^2 W_2
\end{aligned} \tag{2.38}$$

3. PVSYST PROGRAMI VE BENZETİM ÇALIŞMASI

Bu tez çalışmasında PV sistemlerde kullanılan kabloların neden olduğu enerji kayıpları incelenmiştir. Bu bölümde PVsyst6.2.6 programı kullanılarak yapılacak deneysel çalışmanın benzetimi yapılmıştır.

3.1. PVsyst Programı

PVsyst programı şebekeye bağlı veya bağımsız PV sistemleri, PV sulama sistemlerini ve DA şebekelerini kurup güneş santralinin tasarımını yapıp sonuçlarını inceleme imkânı sağlayan bir PV sistem benzetim programıdır. Ana menü ekranında ön tasarım, proje tasarımı ve araçlar başlıkları altında farklı seçim olanakları sunmaktadır. Ön tasarım menüsü hızlı ve kolay modelleme menüsüdür.



Şekil 3.1. PVsyst6.2.6 arayüzü

Bu program; tasarım mühendisleri ve araştırmacılar için boyutlandırma, benzetim ve veri analizi için oldukça yararlı araçlar içermektedir. En yeni PVsyst Sürümü olan 6.2.6, İngilizce, Fransızca, Almanca, İspanyolca ve İtalyanca gibi birçok dilde arayüzünü kullandırma imkânı sağlamaktadır [41]. PVsyst, kurulacak sistem için kullanılacak panel

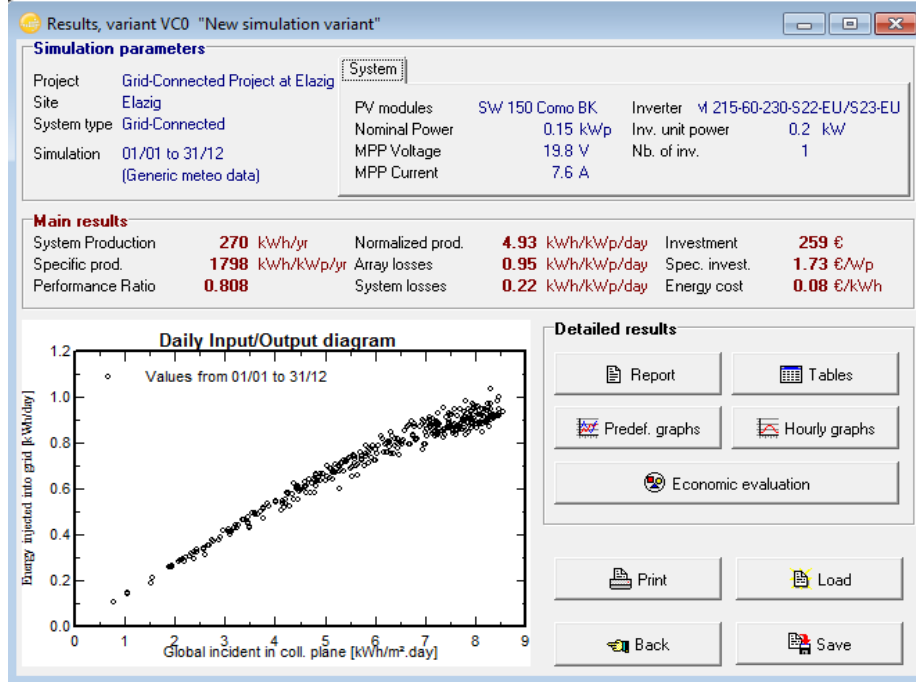
ve evirici değerlerini üretici firma ve nominal güçlerine bağlı olarak Şekil 3.2’de görüldüğü gibi seçme olanağı sunmaktadır.

Şekil 3.2. PVsyst’te benzetim bileşenlerinin seçilmesi

Aynı zamanda paneller için ve panel evirici arasında kullanılacak kablo kesiti ve uzunluğunu seçme ve kablo maliyetlerini görme imkanı sağlar (Şekil 3.3).

Şekil 3.3. Kullanılan iletkenlerin seçimi

PVsyst “Sonuçlar” menüsü (Şekil 3.4), ön ekonomik değerlendirme yaparak sistem bileşenlerini, boyutlarını, aylık üretim ve performanslarını değerlendirir. Araçlar menüsü ise veritabanındaki veri ve bileşenlerin yönetimi ile grafik görüntüler ve tabloları içermektedir [41].



Şekil 3.4. PVsyst sonuçlar menüsü

3.2. PV Sistem Bileşenleri

Tez çalışmasının gerçek uygulamasının yapılması için 150 Wp gücünde bir güneş paneli kullanılmıştır. Bu sistemde bir adet panel, bir adet evirici, şarj kontrol cihazı, akü ve solar kablolar kullanılmıştır.

PV sistemde Shenzhen Topray marka 150 Wp gücünde TPS-105 monokristal güneş paneli kullanılmıştır. Panel ile ilgili temel karakteristikler Tablo 3.1’de görülmektedir.

Tablo 3.1 Kullanılan güneş panelinin teknik özellikleri [42].

Marka	Shenzhen Topray
Model	TPS-105 150W
Maksimum güç	150 W
Maksimum sistem gerilimi (V)	1.000
Maksimum güç noktası gerilimi (V)	17.80
Maksimum güç noktası akımı (A)	8.42
Açık devre gerilimi (V)	22.50
Kısa devre akımı (A)	8.882
Modül hücre sayısı	60
Hücre tipi	monocrystalline
Boyutlar U/G/Y(mm)	1480x680x25
Ağırlık (Kg)	11.5

Kurulması planlanan güne uygun olacak şekilde Nordic Solar WT-30SN-12E marka evirici temin edilmiştir. Eviriciye ait detaylı teknik bilgiler Tablo 3.2’de verilmiştir. Kurulan şebeke bağlantısız sistemde ProVista Technology ISC3020 marka şarj kontrol cihazı kullanılmıştır.

Tablo 3.2. Kullanılan evirici’ye ait teknik bilgiler [43].

Model	WT-30SN-12E
Güç	300 W
Demeraj Gücü	600 W
Giriş Gerilimi	12VDC / 24VDC / 48VDC
Çıkış Gerilimi	220V / 230V / 240VAC
Verim	% 85
Frekans	50 / 60 Hz
Toplam Harmonik Distorsiyon (THD)	< %3
Çıkış Dalga Şekli	Tam Sinüs
Boyutlar (G x D x Y)	210 x 147 x 66 mm
Ağırlık	1.4 kg
Sertifikalar	UL / e-13 / CE / FCC onaylı

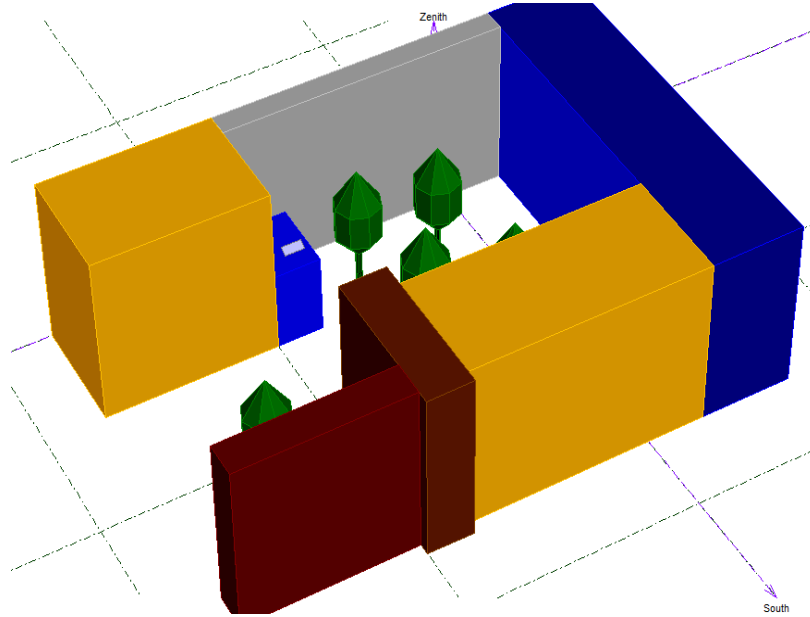
Farklı kesitlerdeki kabloların enerji kayıplarını ölçmek için üç farklı kesitte solar kablo kullanılmıştır. Kullanılan kesitler 4 mm², 6 mm² ve 10 mm² şeklinde olup bu kablolarla ait detaylı teknik bilgiler Tablo 3.3’te verilmiştir.

Tablo 3.3. Kablolara ait teknik bilgiler

Nominal kesit	mm ²	1.5	2.5	4	6	10
İletken Çapı	mm	1.60	1.95	2.50	3.00	4.10
Dış çap (minumum)	mm	4.40	4.70	5.20	5.70	6.80
Dış çap (maksimum)	mm	4.80	5.60	6.10	6.10	7.20
Yaklaşık kablo ağırlığı	Kg/km	30	60	80	120	120
Minimum DA iletken direnci (20 °C de)	Ω/km	13.7	5.09	3.39	1.95	1.24

3.3. PVsyst Benzetim Sonuçları

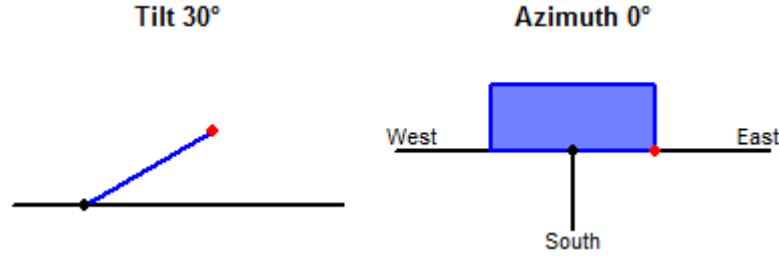
Bu çalışmada PVsyst6.2.6 paket programında yapacağımız uygulamanın benzetimi yapılarak PV sisteminde meydana gelen kablo kayıpları incelenmiştir. Şekil 3.5'te uygulamayı yapacağımız yerin kuş bakışı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.5. Benzetim ortamının üstten görünüşü

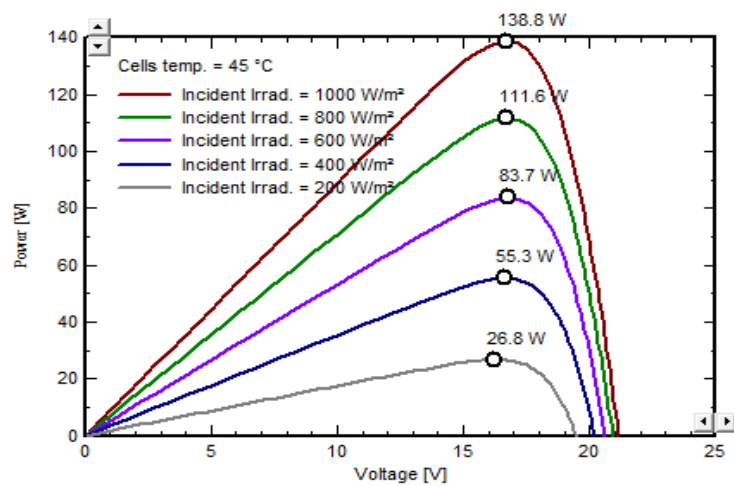
Benzetim çalışmasında Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilen güneşlenme süreleri ile hesaplanan Elazığ ilinin 2009-2012 yılları arasındaki aylık ortalama güneş ışınlamı, dış ortam sıcaklığı verileri ve coğrafik konum bilgisi sisteme manuel olarak aktarılmıştır [44]. PVsyst programında deneysel çalışmada kullanılan Shenzen Topray marka 150 Wp monokristal panel ve Lintech marka evirici seçilmiştir.

Benzetim çalışmasında, eğim açısı 30 derecelik bir açıyla güney yönünde (azimut=0) olacak şekilde konumlandırılmıştır. Modüle ait eğim ve yön bilgisi Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6. Modüle ait eğim ve yön bilgisi

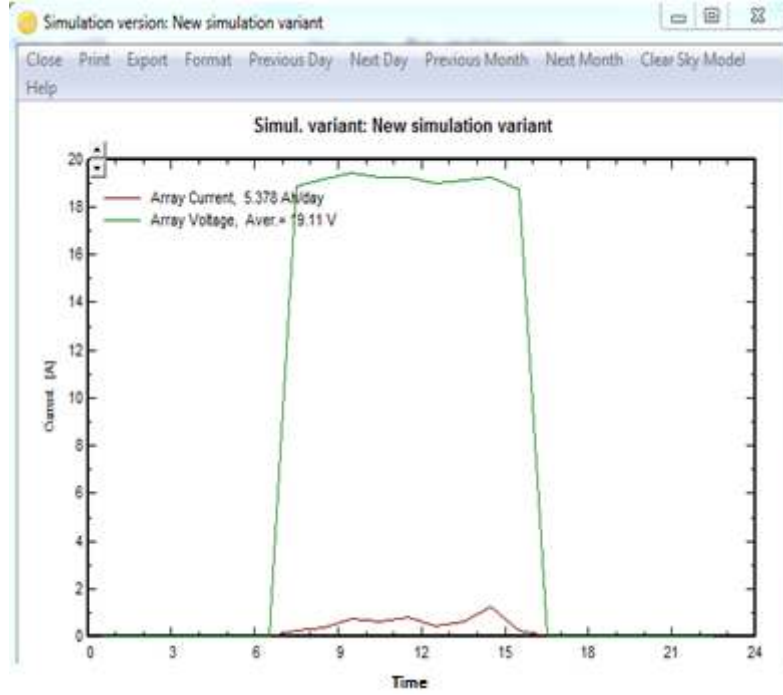
PVsyst programında deneysel çalışmada kullanılan Shenzen Topray marka 150 Wp monokristal panelin gerilim güç eğrisi ve güneş radyasyonuna bağlı maksimum güç noktasında ürettiği güç Şekil 3.7’deki gibidir.



Şekil 3.7. Shenzhen Topray 150wp PV modül güç ve gerilim eğrisi

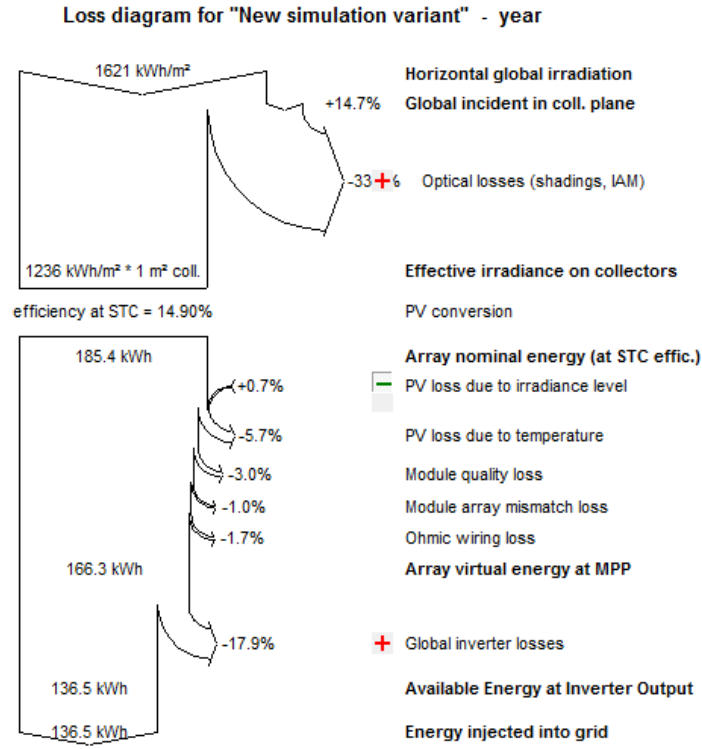
Şekil 3.7’de de görüldüğü gibi güneş radyasyonu azaldıkça PV panelin gerilimi fazla bir değişim göstermezken ürettiği güç güneş radyasyonuna bağlı olarak önemli ölçüde azalmaktadır.

Güneş panelinin akım-gerilim karakteristiği sıcaklığa ve ışımaya bağlı olarak değişir. PV sistemin ürettiği gerilim ve akım değişimi Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Shenzhen Toray 150wp PV modül akım ve gerilim eğrisi

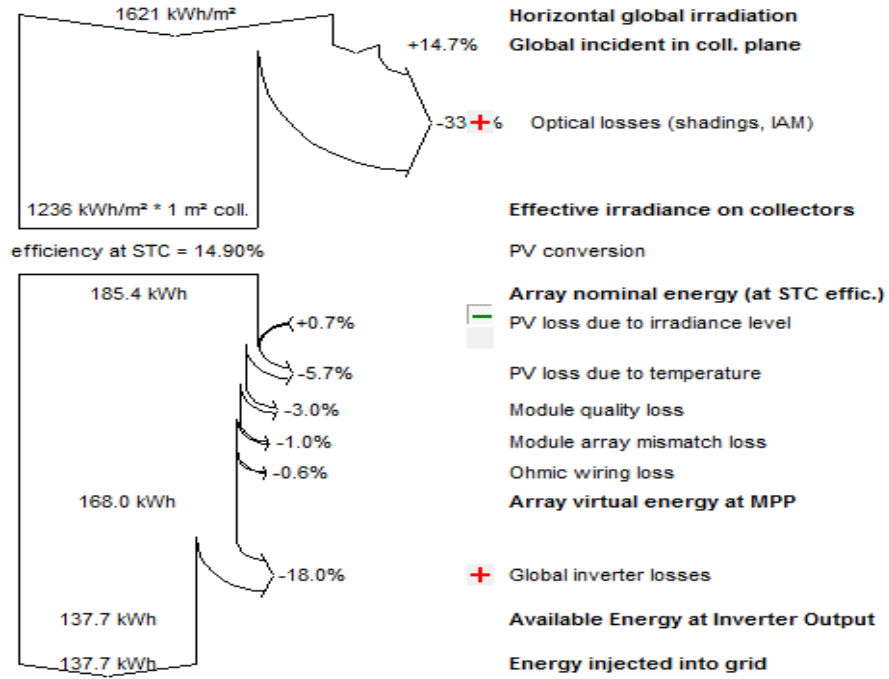
Sistemde evirici ile panel arasındaki bağlantı için farklı kesitteki kablolar kullanılarak kablo kayıpları incelenmiştir. Standart test koşulları (1000 W/m^2 güneş ışınlımı, 25°C sıcaklık ve 1.5AM hava kütlesi) için PV sistem verimi %14.90'dır. Şekil 3.9'da kablo kesiti 1.5 mm^2 olan 5m uzunluğundaki solar kablo için kurulu sisteme ait kayıp diyagramı gösterilmiştir. Şekil 3.9'da görüldüğü gibi sistemde kullanılan kablolardan kaynaklanan kayıp %1.7 olmuştur. PV sistemin yıllık ürettiği enerji 185.4 kWh olmakla birlikte şebekeye bir yılda aktarılan toplam enerji miktarı 136.5 kWh'tir. Sistemde meydana gelen kablo, sıcaklık evirici, uyumsuzluk, modul kalite kayıplarının sebep olduğu yıllık toplam enerji kaybı 48.9 kWh'tir.



Şekil 3.9. 1.5mm² iletken kesiti için sistem kayıp diyagramı

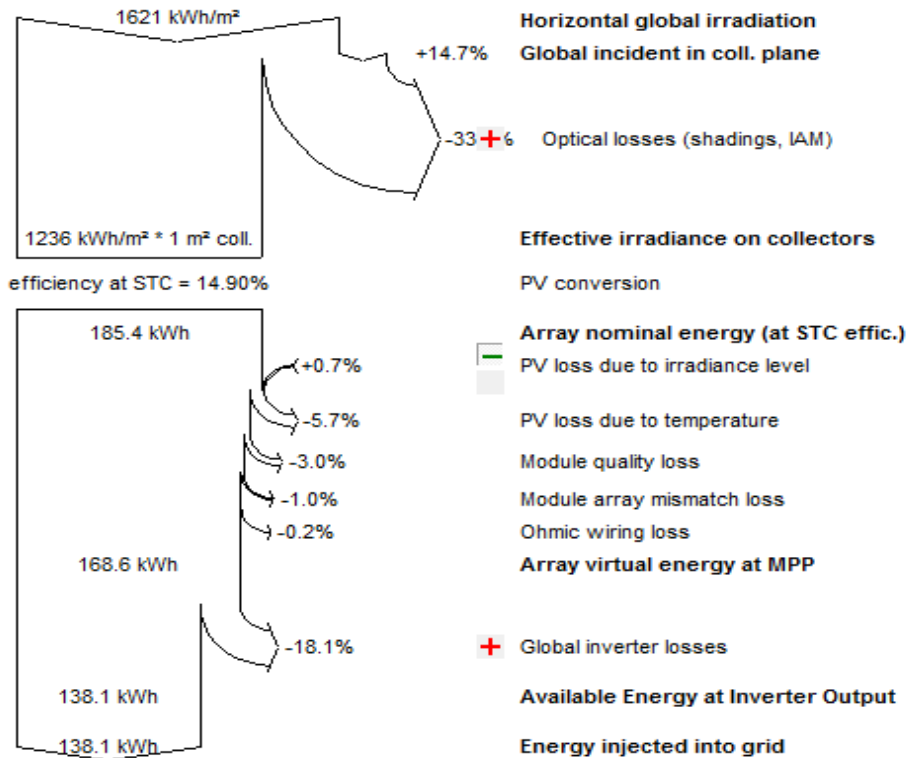
Şekil 3.10'da 4 mm² kesitindeki kablo için sistemde %0.6 oranında kablo kaybı meydana gelmiştir. PV sistemde %5.7 sıcaklık kaybı, %3 kalite kaybı, %1 uyumsuzluk kaybı, %18 evirici kaybı %33 gölgelenme kaybı meydana gelmiştir. Yıllık ürettiği enerji 185.4 kWh iken şebekeye bir yılda aktarılan toplam enerji miktarı 137.7 kWh'tir. Sistemde meydana gelen yıllık toplam enerji kaybı 47.7 kWh'tir. Şekil 3.11'de 10 mm² kesitindeki kablo kullanıldığında ise kablo kayıpları %0.2 olmaktadır. Yıllık ürettiği enerji 185.4 kWh iken şebekeye bir yılda aktarılan toplam enerji miktarı 138.1 kWh'tir. Sistemde meydana gelen yıllık toplam enerji kaybı 47.3 kWh'tir

Loss diagram for "New simulation variant" - year



Şekil 3.10. 4 mm² iletken kesiti için sistem kayıp diyagramı

Loss diagram for "New simulation variant" - year



Şekil 3.11. 10 mm² iletken kesiti için sistem kayıp diyagramı

Benzetim çalışmalarında kullanılan kablo kesitlerine bağlı olarak PVsyst programından elde edilen aylık detaylı sistem kayıpları sırasıyla Tablo 3.4-3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.4. 1.5 mm² için aylık enerji kayıpları

Aylar	ModQual kWh	MisLoss kWh	OhmLoss kWh	EArrMPP kWh	InvLoss kWh
Ocak	0.259	0.084	0.086	8.19	1.838
Şubat	0.344	0.111	0.158	10.86	2.160
Mart	0.485	0.157	0.261	15.27	2.775
Nisan	0.485	0.157	0.243	15.27	2.719
Mayıs	0.531	0.172	0.306	16.69	2.881
Haziran	0.532	0.172	0.301	16.71	2.838
Temmuz	0.560	0.181	0.334	17.59	2.921
Ağustos	0.567	0.183	0.346	17.81	2.936
Eylül	0.537	0.174	0.323	16.85	2.790
Ekim	0.468	0.151	0.239	14.74	2.527
Kasım	0.311	0.101	0.130	9.83	1.911
Aralık	0.204	0.066	0.059	6.46	1.499
Toplam	5.282	1.708	2.795	166.26	29.795

Tablo 3.4'teki ModQual modül kalitesinden kaynaklanan kayıpları, MisLoss Uyumsuzluk kayıplarını, OhmLoss kablo kayıplarını, InvLoss evirici kayıplarını ve EArrMPP ise maksimum güç noktasındaki (MPP) sanal dizi enerjisini göstermektedir.

Tablo 3.5. 4 mm² için aylık enerji kayıpları

Aylar	ModQual kWh	MisLoss kWh	OhmLoss kWh	EArrMPP kWh	InvLoss kWh
Ocak	0.259	0.084	0.032	8.24	1.879
Şubat	0.344	0.111	0.059	10.96	2.216
Mart	0.485	0.157	0.098	15.44	2.036
Nisan	0.485	0.157	0.091	15.42	2.769
Mayıs	0.531	0.172	0.115	16.88	2.925
Haziran	0.532	0.172	0.113	16.90	2.874
Temmuz	0.560	0.181	0.125	17.00	2.956
Ağustos	0.567	0.183	0.130	18.02	2.972
Eylül	0.537	0.174	0.125	17.05	2.830
Ekim	0.468	0.151	0.089	14.89	2.573
Kasım	0.311	0.101	0.049	9.91	1.951
Aralık	0.204	0.066	0.022	6.49	1.526
Toplam	5.282	1.708	1.048	167.99	30.308

Tablo 3.6. 10mm² için aylık enerji kayıpları

Aylar	ModQual kWh	MisLoss kWh	OhmLoss kWh	EArrMPP kWh	InvLoss kWh
Ocak	0.259	0.084	0.013	8.26	1.835
Şubat	0.344	0.111	0.024	10.99	2.238
Mart	0.485	0.157	0.039	10.99	2.860
Nisan	0.485	0.157	0.037	15.48	2.789
Mayıs	0.531	0.172	0.046	16.94	2.941
Haziran	0.532	0.172	0.045	16.97	2.887
Temmuz	0.560	0.181	0.050	17.87	2.968
Ağustos	0.567	0.183	0.052	18.10	2.986
Eylül	0.537	0.174	0.050	17.13	2.846
Ekim	0.468	0.151	0.036	14.94	2.590
Kasım	0.311	0.101	0.020	9.94	1.967
Aralık	0.204	0.066	0.009	6.50	1.536
Toplam	5.282	1.708	0.419	168.61	30.503

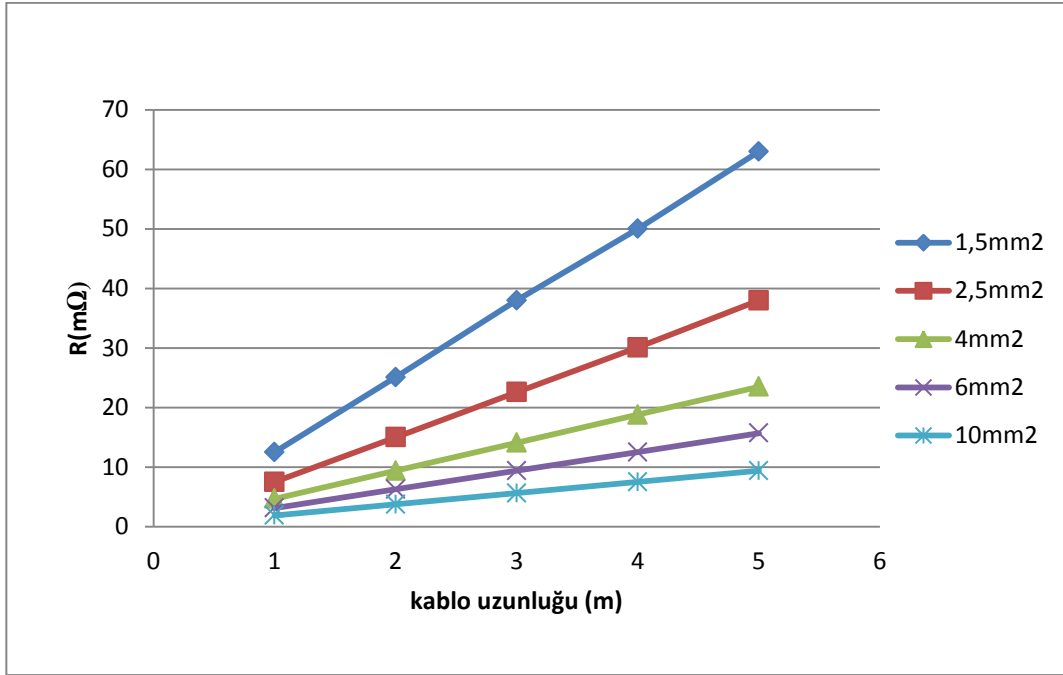
Yukarıdaki tablolara bakıldığında PV sistemde kullanılan kablolardan kaynaklanan yıllık enerji kayıplarının da kablo kesitine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Kablo kesiti arttıkça sistemde meydana gelen enerji kayıpları da azalmaktadır. Tablo 3.4'e

bakıldığında kullanılan kablo kesitinden kaynaklanan yıllık kayıpların 2.795 kWh olduğu görülmektedir. Modül kalite kaybı 5.282 kWh, uyumsuzluk kaybı 1.708 kWh ve evirici kayıpları 30.503 kWh'tir.

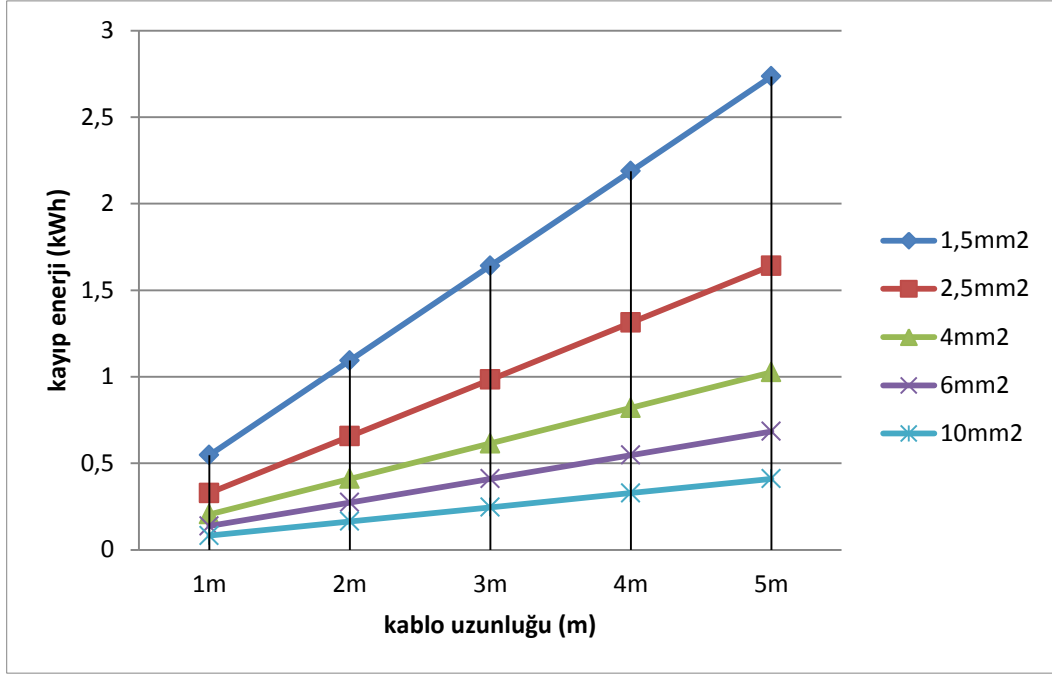
Kablo direnci kesitle ters, uzunlukla doğru orantılıdır. Şekil 3.12'de farklı kesitteki solar kabloların direncinin uzunluk ile değişimi gösterilmiştir.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

3.1



Şekil 3.12. Farklı uzunluk ve kesitteki kabloların direnç değerleri



Şekil 3.13. Farklı kesit ve uzunluktaki kablolardan kaynaklanan enerji kayıpları

Şekil 3.13'te farklı kesitlerde ve farklı uzunluklardaki kablolarda meydana gelen enerji kayıpları verilmiştir. Şekil 3.13'te de görüldüğü gibi kablo kesiti azaldıkça veya uzunluğu arttıkça enerji kaybı artmaktadır. Bu enerji kayıplarını azaltmak için kablo kesitinin büyütülmesi önerilebilir fakat kablo kesiti arttıkça sistem maliyeti de artmaktadır. Bunun için kurulum aşamasından önce PV sistemde kullanılacak en uygun kablo boyutlarının hesaplanması gereklidir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bir önceki bölümde PVsyst kullanılarak farklı kesit ve uzunluklarda kablolar kullanılarak oluşturulan bir PV sistemdeki enerji kayıpları incelenmiştir. Tüm malzemeler temin edildikten sonra Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi ana binasındaki güney yönüne bakan terasa benzetimi yapılan PV sistem kurulmuştur. Shenzhen Topray marka 150 Wp gücünde TPS-105 monokristal panel, Nordic Solar WT-30SN-12E marka evirici, ProVista Technology ISC3020 marka şarj kontrol cihazı kullanılmıştır.

Kurulan PV sistem Şekil 4.1’de görülmektedir. Evirici çıkışına yük olarak 2.5mm² lik ölçümlerde 100 W’lık akkor flamanlı bir ampül, diğer ölçümlerde ise 75 W’lık akkor flamanlı bir ampül bağlanarak sistem test edilmiştir. Sistemin kurulum ve bağlantı aşamaları tamamlandıktan sonra her bir kablo kesiti ve uzunluğu için ölçüm aşamasına geçilmiştir.

İlk olarak 2.5 mm² kesit alanına sahip solar kablo ile enerji kayıpları incelenmiştir. 2.5 mm² lik kablonun 5 farklı uzunluktaki çalışma karakteristikleri incelenerek her bir uzunluğa ait akım ve gerilim değerleri ölçülmüştür. Tablo 4.1’de farklı uzunluklardaki 2.5 mm² kesitli solar kablonun kullanılması ile elde edilen ölçüm sonuçları görülmektedir. Panel ve evirici çıkışından ölçülen gerilimlere bakıldığında farklı uzunluklar için elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bunun nedeni solar kabloların iç dirençlerinin çok küçük olmasıdır. 2.5 mm² lik kablonun iç direnci 5.09 Ω /km dir. Kullanılan kablo uzunluğu maksimum 5 m olarak seçilmiştir. Kullanılan 5 m uzunluğundaki kablonun yaklaşık iç direnci 0.025 Ω ’dur. Bu değer çok küçük olduğu için gerilim düşümü yok denecek kadar azdır.



Şekil 4.1. Kurulan PV sistem

Tablo 4.1. 2.5 mm² kesitindeki solar kablo için ölçüm sonuçları

Uzunluk (m)	Güneş Paneli		Kontrol cihazı giriş gerilimi (V)	İnvertör çıkış gerilimi (V)	Yük akımı (A)
	Gerilim (V)	Panel Akımı (A)			
5.0	20.66	5.73	20.66	233.8	0.45
4.0	20.59	6.82	20.59	233.8	0.45
3.0	20.64	6.96	20.64	233.8	0.45
2.0	20.67	6.92	20.67	233.8	0.45
1.0	20.61	5.36	20.61	233.8	0.45

4 mm² lik kablonun 7 farklı uzunluktaki çalışma karakteristikleri incelenerek her bir uzunluğa ait akım ve gerilim değerleri ölçülmüştür. Tablo 4.2’de farklı uzunluklardaki 4 mm² kesitli solar kablonun kullanılması ile elde edilen ölçüm sonuçları görülmektedir. Panel ve evirici çıkışından ölçülen gerilimlere bakıldığında farklı uzunluklar için elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bunun nedeni solar kabloların iç dirençlerinin çok küçük olmasıdır. 5 m uzunluğundaki 4 mm² lik kablonun yaklaşık iç direnci 0.016 Ω ‘dur. Özellikle büyük bir alanda kurulu olan güneş santrallerinde kullanılan kablolarda oluşan gerilim düşümleri daha açık bir şekilde gözlemlenebilir. Kullanılan ölçüm cihazlarının da doğru bir ölçüm için oldukça hassas olması gereklidir.

Tablo 4.2. 4 mm² kesitindeki solar kablo için ölçüm sonuçları

Uzunluk (m)	Güneş Paneli		Kontrol cihazı giriş gerilimi (V)	İnvertör çıkış gerilimi (V)	Yük akımı (A)
	Gerilim (V)	Panel Akımı (A)			
5.0	19.18	0.55	19.18	233.9	0.52
4.5	18.92	0.50	18.92	233.9	0.57
4.0	19.85	0.49	18.85	233.9	0.5
3.5	18.84	0.55	18.84	233.8	0.5
3.0	18.95	0.50	18.94	233.9	0.47
2.0	19.15	0.52	19.14	233.8	0.41
1.0	19.32	0.43	19.31	233.8	0.52

Yapılan üçüncü çalışmada 6 mm² lik solar kablo kullanılmıştır. 6 mm² lik kablo 7 farklı uzunlukta test edilmiştir. Tablo 4.3’te bu kabloları ait ölçüm sonuçları verilmiştir. Kablo kesiti arttığından dolayı kablonun iç direnci kablo kesiti ile ters orantılı olarak düşmektedir. Bu nedenle 4 mm²’lik kabloda karşılaşılan benzer durum 6 mm²’lik kabloda daha belirgin olarak kendini göstermektedir. Yani sistemde ölçülen gerilim düşümü neredeyse yok denecek düzeydedir.

Tablo 4.3. 6 mm² kesitindeki solar kablo için ölçüm sonuçları

Uzunluk (m)	Güneş Paneli		Kontrol cihazı giriş gerilimi (V)	İnvertör çıkış gerilimi (V)	Yük akımı (A)
	Gerilim (V)	Panel Akımı (A)			
5	19.45	0.45	19.45	233.7	0.5
4.5	19.43	0.45	19.43	233.7	0.51
4	19.38	0.49	19.38	233.7	0.45
3.5	19.4	0.5	19.4	233.7	0.46
3	19.44	0.45	19.44	233.7	0.47
2	19.28	0.47	19.28	233.8	0.47
1	19.3	0.38	19.3	233.8	0.47

Elektrik tesislerinde gerilim düşümünü önlemek için genellikle daha büyük kesitlerde kablolar kullanılır. Burada amaç kesiti arttırarak gerilim düşümünü istenilen seviyeye düşürmektir. Bu uygulamayı solar sistemlerdeki gerilim kayıplarında da gözlemlemek amacıyla önceki kesitlerden daha büyük olan 10 mm² kesitindeki solar kablo kullanılarak son uygulama gerçekleştirilmiştir. Kablo 7 farklı uzunlukta kullanılarak her bir uzunluğa ait ölçümler kaydedilmiştir. Önceki küçük kesitli ölçümlerimizde gerilim düşümü çok küçük değerlerde ölçülmüştü. Elde edilen ölçüm sonuçları Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. 10 mm² kesitindeki solar kablo için ölçüm sonuçları

Uzunluk (m)	Güneş Paneli		Kontrol cihazı giriş gerilimi (V)	İnvertör çıkış gerilimi (V)	Yük akımı (A)
	Gerilim (V)	Panel Akımı (A)			
4m	19.29	0.47	19.28	233.8	0.66
3.5m	19.53	0.45	19.52	233.8	0.49
3m	19.63	0.5	19.62	233.9	0.53
2.5m	19.59	0.51	19.59	233.9	0.52
2m	19.67	0.53	19.67	234	0.5
1.5m	19.58	0.52	19.58	234	0.41
1m	19.12	0.52	19.12	234	0.51

Tablo 4.2, Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'teki veriler incelendiğinde PV panel çıkış gücü ile evirici çıkış gücü değerlerinin aynı olmadıkları görülmektedir. İlk etapta değerler arasında fark bulunmaması gerektiği beklenmektedir. Ancak ölçümler alınırken PV sistem gölgede kaldığından dolayı panelin ürettiği güç düşmüştür. Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de de panelin ürettiği güç düşüşüyle beraber akımın düşüşü açık bir şekilde görülmektedir. Bu nedenle eviricinin ihtiyaç duyduğu fazla enerjinin akü tarafından karşılanması çıkış güçleri arasındaki farkı oluşturmaktadır.

Tez çalışmaları esnasında gerek PVsyst benzetimi gerekse gerçek uygulama çalışmaları sırasında ortaya çıkan en önemli bulgu şöyle ifade edilebilir:

Panel ile evirici arasındaki mesafenin kısa olduğu durumlar için kullanılan kablo kesitinin gerilim düşümünü azaltmak için büyük seçilmesinin fazla bir etkisi yoktur. Özellikle büyük ölçekli güneş santrallerinde kablo kayıplarının etkisi daha belirgin olarak hissedilebilir. Kesit azaldıkça veya kablo uzunluğu arttıkça enerji kaybı artmaktadır. Bu enerji kayıplarını azaltmak için kablo kesitinin büyütülmesi önerilebilir fakat kablo kesiti arttıkça sistem maliyetide artar. Bunun için en uygun kablo boyutunun hesaplanması gereklidir.

PV sistemlerde kullanılan DA kablolarının optimal olarak boyutlandırılması için tasarımı yapan mühendisler çok zaman harcarlar. Panel çıkışından eviricilerin bağlantı noktasına kadar olan DA iletkenlerin optimal boyutlandırılması gereklidir. Eğer iletken kesiti çok küçük seçilirse kayıplar artar ve güneş sisteminde önemli güç kayıpları meydana

gelir. İletken kesitinin çok büyük seçilmesi durumunda ise iletken maliyeti artar ve bu da güneş sisteminden elde edilen birim enerji maliyetini arttırır. PV sistemlerin maliyeti yüksek olduğundan sisteme yüksek kablo maliyetinin de eklenmesi kabul edilebilir bir durum değildir. İletken kesiti hesabından sonra bu durum analiz edilebilir.

Mühendisler özellikle büyük güçlü santrallerde bu sorunla sıkça karşılaşırlar. Üretici firmalar iletken kesitlerini optimal seviyede belirleyerek tüketicilere maliyet konusunda yardımcı olmaktadır. Panel ile evirici arasındaki kayıpları ve maliyeti hesaplayarak optimal kablo kesitini belirleyen bir çok çalışma bulunmaktadır [45].

Gün boyunca solar radyasyon düzeyi değişkendir ve bu da eviricilerin DA giriş geriliminin değişken olduğunu gösterir. Eviriciler geniş bir DA gerilim aralığında çalışacak şekilde tasarlanırlar. Kablolarda meydana gelen gerilim kayıplarını bulmak güneş sistemlerinde bulunması gereken en önemli tasarım özelliklerinden biridir. Gerilim düşümü değerleri elektriksel yüklerin tasarım aşamasında belirlenir. Örneğin sanayi uygulamalarında kablolarda meydana gelen gerilim düşümünün %5 ten küçük olması istenir. Düşük gerilimlerde çalışabilen solar eviriciler geniş işletme gerilim aralığında aktif kalabilmektedir. Bu yüzden iletkenlerde meydana gelen kayıplar belirlenen limitin üzerine çıkabilmektedir.

4.1. DA Kablolarının Boyutlandırılması

Tasarımcılar işletme esnasında meydana gelebilecek aksaklıkları daha önceden bildiklerinden kablo kesitine bağlı meydana gelen gerilim düşümünden dolayı güç kayıplarını en aza indirmeye ve maliyetleri de göz önüne alarak iletken kesitini mümkün mertebe arttırmaya çalışırlar. Birçok tasarımcı ulusal ve uluslararası standartlara bağlı olarak gerilim düşümünü %1.5'in altında tutmaya çalışır [45].

Bir PV sistemde kullanılacak kablolar ile ilgili temel maliyet bileşenleri;

- ✓ kesit ile doğru orantılı olarak değişen kablo maliyeti (D),
- ✓ kesit ile ters orantılı olarak değişen ve iletkenin direncinden kaynaklanan enerji kayıpları (E) ve
- ✓ kablo kesiti ile doğrudan ilişkili olmayan kanal açma ve bunun gibi işçilik maliyetleridir (F).

Kablo maliyetini hesaplamada tüm mali bileşenler için bir A indisi atanırsa, örneğin S seçilen iletken kesiti, S_A ise izin verilen akım değerine göre seçilmiş minimum iletken kesiti olarak eklenirse maliyet hesabı denklem (4.1) deki gibi ifade edilebilir [45].

$$\text{Toplam Maliyet} = D_A \frac{S}{S_A} + E_A \frac{S_A}{S} + F_A \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)'de de görüldüğü gibi S sonsuza doğru büyüdükçe kablo maliyeti artacağından toplam maliyet de artar. Şayet S kesiti sıfıra doğru küçültülürse denklem (4.1)'deki ikinci bileşen olan enerji kayıpları belirleyici maliyet bileşeni olur ve bu durumda da toplam maliyet artar. En uygun kablo kesitini bulmak için denklem (4.1)'in $\frac{S}{S_A}$ 'ya göre birinci türevi alınır;

$$\text{Toplam Maliyet}' = D_A - E_A \left(\frac{S_A}{S} \right)^2 \quad (4.2)$$

Denklem (4.2) sıfıra eşitlenip yeniden düzenlenerek S/S_A oranı çekilirse en az maliyete sahip iletken kesiti bulunabilir.

$$\left(\frac{S}{S_A} \right) = \sqrt{\frac{E_A}{D_A}} \quad (4.3)$$

Denklem (4.3)'te en uygun iletken kesitinin hesaplanmasında işçilik ve diğer maliyetlerin bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

$\frac{S}{S_A} < 1$ olarak elde edilirse iletken kesiti izin verilen akıma göre seçildiğinden ve S_A minimum kesit olduğundan seçilecek kesit tekrar S_A olmalıdır. Böyle bir durumda gerilim düşümünden kaynaklanan kayıpları azaltmak için kablo kesitinin artırılıp arttırılmayacağına karar vermek gerekir. Uygun kesitin seçimi için $\frac{S}{S_A} > 1$ olarak bulunduğunda ise optimum kablo kesitinin belirlenmesi için bir prosedür geliştirmek gerekir [45].

Denklem (4.3) incelendiğinde, en uygun kablo kesini (S) bulmak için kablo kesitiyle doğru ve ters orantılı olan maliyet bileşenlerini bilmek gerekir. İletkenin kesitiyle ile doğru orantılı olan ve toplam maliyeti etkileyen D_A aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$D_A = (U + W)ln \quad (4.4)$$

Buradaki U iletkenin birim maliyeti (\$/m), W işçilik maliyeti (\$/m), l iletkenin uzunluğu (m) ve n ise akım taşıyan iletken sayısını ifade etmektedir.

İletkenin kesitiyle ters orantılı olarak maliyeti etkileyen E_A ise iletkenin direncinden kaynaklanan enerji kayıplarının bir fonksiyonudur. İletken kesiti azalırken iletken maliyeti de azalır ancak iletkenin direncinden kaynaklanan gerilim düşümü kayıpları artar.

Standart bir işletmede elektrik tesisatı için kullanılan iletkenleri seçmek kolaydır. İşletmelerde kullanılan motor, aydınlatma gibi tesislerde 24 saat için ve yıl boyunca çekilen akım sabittir. Fakat güneş enerji santrallerinde gün içinde güneş radyasyonunun değişim göstermesinden solar kablolardan geçen akım $0 - I_{mp}$ aralığında değişim göstermektedir. I_{mp} maksimum güç noktasındaki panel akımıdır. Güneş santralleri 24 saat boyunca çalışmazlar, güneş enerjisinin olmadığı saatlerde enerji üretmediklerinden kullanılmazlar ve buda maliyet üzerindeki etkisini arttırır.

Bir güneş santralinde I^2R den kaynaklanan enerji kayıplarının toplamı yıl boyunca watt-saat olarak hesaplanabilir. Her bir iletken için bir yıllık güneş kuşağında 8760 saat olacak şekilde yıllık enerji kayıpları hesaplanabilir. Bu kayıplar L_A olarak ifade edilirse;

$$L_A = \sum_{h=1}^{h=8760} I_h^2 R_A n \quad (4.5)$$

Burada I_h iletkenin geçen saatlik akımı, R_A ise iletken direncini temsil eder. Saatlik iletken akımları PVsyst gibi bir program ile yapılacak benzetim çalışmasından elde edilebilir. İletkenin etkin kullanımını ifade etmek için aşağıdaki gibi bir şekil faktörü (K) tanımlanabilir.

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{h=8760} I_h^2}{I_{mp}^2 8760} \quad (4.7)$$

Kablo direnci R_A ise aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$R_A = \rho \frac{l}{s_A} \quad (4.8)$$

ρ değeri iletkenin öz direnci olup sıcaklığa ve geçen akıma göre değişim gösterir Nominal işletme şartlarında öz dirençteki değişim küçük olduğundan sabit bir ortalama değer kabul edilebilir.

İletkenlerin yıllık enerji kayıplarını hesaplamak için denklem (4.6) ve (4.7) kullanılarak denklem (4.5) yeniden aşağıdaki gibi yazılır.

$$L_A = \frac{KI_{mp}^2 8760 \rho \ln}{S_A 1000} \quad (4.8)$$

Burada 1000 değeri yıllık enerji kayıplarını *kWh* cinsinden hesaplamak için eklenmiştir. Bu kayıpların her yıl tekrarlandığı göz önünde bulundurulursa bir güneş santralinin 25 yıllık işletme süresi için toplam kayıp maliyeti hesaplanabilir. Üretilen enerjinin kWh başına mevcut tarifesi mevcut durum için T olarak kabul edilir ise kullanım ömrü boyunca iletkenlerin ekonomik kayıpları $L_A T$ olarak ifade edilir. Santralin 25 yıllık işletme süresi boyunca enflasyona bağlı olarak tarifiedeki birim fiyatı değişir. Her yıl için 1\$ için enflasyon farkı ve indirim miktarı eklenerek 25 yıl için bir enflasyon katsayısı (γ_{25}) ile mevcut durumdaki enerji kayıpları kullanılarak 25 yıllık toplam enerji kaybı aşağıdaki gibi bulunabilir. γ_{25} 'in hesaplanması ilgili detaylı bilgiler kaynak [45]'de bulunabilir.

$$E_A = L_A T \gamma_{25} \quad (4.9)$$

Denklem (4.9) kullanılarak 25 yıl için toplam enerji kayıp maliyeti denklem (4.10)'daki gibi yazılabilir;

$$E_A = \frac{KI_{mp}^2 8760 \rho \ln T \gamma_{25}}{S_A 1000} \quad (4.10)$$

Denklem (4.4) ve (4.10) kullanılarak denklem (4.3) aşağıdaki gibi yazılır;

$$\frac{S}{S_A} = \sqrt{\frac{KI_{mp}^2 8760 \rho T \gamma_{25}}{S_A 1000 (U+W)}} \quad (4.11)$$

Bu eşitlikten görüldüğü gibi seçilecek en uygun kablo kesitinin kablonun uzunluğu ve iletken sayısı ile ilişkisi bulunmamaktadır. Bu denklemden çıkarılacak diğer bir sonuç

ise en uygun kablo kesitinde gerilim düşümünün de hiçbir etkisi yoktur. Bunun nedeni gerilim düşümünün iletken uzunluğunun bir fonksiyonu olmasıdır. $S \geq S_A$ olarak bulunursa izin verilen akım şiddeti için gerekli kesit oranı optimal büyüklükte ve asgari kesitten büyük olur. Eğer $S < S_A$ olarak bulunursa bu kesit izin verilen akım şiddetinden küçük olduğundan kullanılamaz. Bu durumda S_A optimal iletken kesiti olarak seçilir. $S = S_A$ olduğu özel durumda minimum iletken kesiti gerekli iletken kesitine eşit olur. $S \div S_A$ değerinin 1 olduğu durumdaki T değeri kritik tarife olarak adlandırılır [45]. Kritik tarife T_C (\$/kWh) olarak ifade edilir ise;

$$T_C = \frac{S_A(U+W)}{KI_{mp}^2 8.76 \rho \gamma_{25}} \quad (4.12)$$

Çoğu güneş santralinde seçilecek iletken kesiti izin verilen akım taşıma kapasitesine sahip kesitten büyük olarak seçildiği için ($S \geq S_A$) uygulanan tarife kritik tarifeden büyük olur ($T > T_C$). Bu durumda denklem (4.12) ile (4.13) kullanılarak aşağıdaki eşitlik yazılabilir;

$$\frac{S}{S_A} = \sqrt{\frac{T}{T_C}} \quad (4.13)$$

Seçilecek en uygun iletken kesiti bu durumda;

$$S = S_A \sqrt{\frac{T}{T_C}} \text{ olur.} \quad (4.14)$$

Denklem (4.14) incelendiğinde bir PV sistemde kullanılacak en uygun iletken kesiti, seçilebilecek minimum iletken kesiti, mevcut yerel elektrik tarifesi ve kritik tarifeye bağlıdır. $T < T_C$ durumunda $S < S_A$ olur. Bu da kesitin izin verilen akım şiddetine uygun olmadığını ve kesitin S_A olacağını gösterir.

Denklemlerin türetilmesi karışık olmasına rağmen sonuç basittir. Birkaç iyi bilinen ve tespit edilmesi kolay parametreleri kullanarak kritik tarifeyi bulmak kolaylaşır. Kritik tarifeyi bulmak için aşağıdaki bilgilere ihtiyaç duyulur:

- İzin verilen akım şiddetine bağlı S_A hesaplanır.
- Kurulumda kullanılacak cihazlar, seçilen kablo ve işçilik maliyeti

- K'nın hesaplanması için santralin kurulacağı bölgenin güneşlenme süresi
- Seçilen modülün maksimum güç noktasındaki I_{mp} akım değeri
- Kullanılacak iletkenin ρ değeri
- 25 yıllık beklenen enflasyon ve indirim oranları

4.2. Tez Çalışmasındaki PV Sistem için En Uygun Kablo Kesitinin Hesaplanması

Bölüm 4 ve 4.1'de bahsedildiği gibi bir PV sistemdeki kayıpların minimum seviyeye düşürülmesi için yapılacak en önemli işlemlerden biri de kullanılacak kablo kesitinin uygun şekilde seçilmesidir. Bu bölümde tez çalışmasında kurulan PV sistem için en uygun ve düşük maliyetli kablo kesitinin hesaplanması gösterilecektir.

İzin verilen akım şiddetine bağlı kesit hesabı yapmak için panelin kısa devre akımının bilinmesi gerekir. Panelin ürettiği I_{SC} akımına göre izin verilen akım şiddetine uygun kablo kesiti bulunur. Tablo 3.1 de $I_{SC} = 8,820 A$ olarak belirtilmiştir. Bu akım değerine göre 2014 NEC (National Electrical Code) 310.15 (B) (16) tablosuna göre 12 AWG (American wire gauge) THWN aliminyum kablonun kullanılması uygundur [45]. NEC bölüm 9 Tablo 8'e göre, seçilen kablonun kesit alanı 3.31 mm^2 dir. THWN aliminyum kablonun üretim maliyeti 1.388 \$/m, işçilik maliyeti ise 1 \$/m'dir.

Şekil faktörü denklem 4.6'ya göre hesaplanıp $K = 0.74$ olarak elde edilir. PV sistem ömrü 25 yıl, enflasyon oranı %2, yıllık indirim oranı %5 olarak alındığında 25 yıl için şimdiki zaman para tablosu 4.5'deki gibi oluşturulmuş ve $\gamma_{25} = 17.53\$$ olarak elde edilmiştir [45].

Tablo 4.5. Enflasyon oranı %2 ve indirim oranı %5 olarak kabul edildiğinde 25 yıllık beklenen enflasyon ve indirim oranlarının hesaplanması.

YILLAR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ENFLASYON ARTIŞI(%2)	1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.20	1.22	1.24
İNDİRİM ORANI(%5)	0.97	0.94	0.92	0.89	0.87	0.84	0.82	0.79	0.77	0.75	0.73
BÜGÜNKÜ FİYAT	0.97	1.91	2.83	3.72	4.59	5.43	6.24	7.04	7.81	8.55	9.28

Tablo 4.5'in devamı.

12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1.27	1.29	1.32	1.35	1.37	1.40	1.43	1.46	1.49	1.52	1.55	1.58	1.61	1.64
0.71	0.69	0.67	0.65	0.63	0.61	0.59	0.58	0.56	0.54	0.53	0.51	0.50	0.48
9.99	10.67	11.34	11.99	12.62	13.23	13.82	14.40	14.96	15.50	16.03	16.54	17.04	17.53

Kritik tarife hesaplamasında kullanılan tüm bu parametreler Tablo 4.6’da toplu olarak görülmektedir.

Tablo 4.6. Kritik tarife hesaplamasında kullanılan parametreler ve değerleri

S_A	3.31mm ²
U	1.388\$/m
W	1\$/m
K	0.74
Imp	8.42 A
ρ	0.0382
γ_{25}	17.53\$

Tablo 4.6’daki değerler denklem 4.12’ de yerine yazıldığında kritik tarife aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$T_c = \frac{S_A(U+W)}{KI_{mp}^2 8.760 \rho \gamma_{25}} = \frac{3.31(6.94+5)}{0.74 \times 8.42^2 \times 8.760 \times 0.0382 \times 17.53} = 0.128\$/\text{kWh}$$

Hesaplanan kritik tarife değerine göre en uygun kablo kesiti bulunabilir. Kritik tarife değeri cent’e dönüştürülerek 12.8 ¢/kWh değeri elde edilir. Yerel elektrik tarifesini 13¢/kWh olarak kabul edilirse [45], en uygun kablo kesiti aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$S = S_A \sqrt{\frac{T}{T_c}} = 3.31 \sqrt{\frac{13}{12.8}} = 3.33 \text{ mm}^2$$

Bulunan en uygun kesit hesabına göre PV sistemde kullanılacak kablo kesiti 3.33 mm²’dir. Bu kesitte kablo üretimi olmadığı için, hesaplanan kesite uygun olması açısından en yakın bir üst kesit olan 4mm²’lik kablo seçilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında PV sistemlerde kullanılan kablolarda meydana gelen kayıplar incelenmiştir. Yapılan çalışmalar kapsamında ilk olarak güneş enerjisi ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. Benzetim ve uygulama çalışmalarına geçmeden önce PV sistemlerde karşılaşılan kayıplar hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Daha sonra Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından desteklenen TEKF.14.08 nolu proje kapsamında satın alınan PVsyst6 paket programı ile gerçekleştirilmek istenen PV sistemin benzetimi yapılmıştır.

Benzetim çalışmasında gerçek uygulamanın uygulanacağı fiziksel alan gerçeğine mümkün olduğu kadar yakın olacak şekilde çizilmiştir. Daha sonra paket programa konum ve eğim açısı gibi bildiler girilmiştir. Elazığ ili için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilen 1990-2012 yılları arasında saatlik olarak ölçülmüş olan güneşlenme süreleri ve dış ortam sıcaklıkları kullanılarak hesaplanan aylık ortalama toplam ve yayılı güneş ışıınımı değerleri ile sıcaklık değerleri PVsyst programına manuel olarak girilmiştir. PVsyst programı içerisinde Dünya genelinde yaygın olarak kullanılan hemen hemen tüm firmalara ait güneş paneli ve intertör modelleri teknik özellikleriyle birlikte mevcuttur. Benzetim çalışmasında gerçek uygulamada kullanılan Shenzhen Topray, TPS-105, 150 W güneş paneli ve 300 W nominal güce sahip Lintech marka tam sinüs evirici seçilmiştir. 1.5, 4, 6 ve 10 mm² kesitindeki kablolar ile benzetim yapılmış ve sistemdeki kablo kayıpları incelenmiştir. PVsyst paket programında yapılan ölçümler sonucunda kablolamadan kaynaklanan kayıpların sistem verimini 1.5mm²'lik kablo için %1.7, 4mm²'lik kablo için %0.6, 10mm²'lik kablo için ise %0.2 oranında etkilediği görülmüştür. PVsyst paket programı ayrıca saatlik, aylık ve yıl bazındaki toplam üretilen güç, akım, gerilim ve diğer kayıplar ile ilgili detaylı bilgilere ulaşma ve grafiklerini çizdirme imkânı sunmaktadır.

Benzetim çalışması yapıldıktan sonra Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi terasına kurulan PV sistem üzerinde 4 mm², 6 mm² ve 10 mm² kesitlerinde solar kablo kullanılarak gerilim ve akım değerleri ölçülmüştür. Her bir kesit için kablolar 1m, 2 m, 2.5 m, 3 m, 3.5 m, 4 m, 4.5 m ve 5 m olmak üzere farklı uzunluklarda kullanılarak her bir durum için gerilim ve akım ölçümleri yapılmıştır. Bu kablo kesitleriyle yapılan çalışmalardan elde edilen çıkış güçlerinde gözle görülür bir fark ortaya çıkmamıştır. Panelin çıkış gücü 4mm²'lik kablo için 9,23 W, 6mm²'lik kablo için 9.49 W, 10mm²'lik kablo için ise 9.06 W

olarak ölçülmüştür. Bunun nedeni PV sistemlerde kullanılan kabloların iç dirençlerinin çok küçük olmasıdır. Özellikle geniş bir alana kurulacak çok daha fazla uzunluğa sahip kablolarda hassas olarak yapılacak bir ölçüm ile bu kayıplar daha belirgin olarak gözlemlenebilir.

PV sistemlerin kurulumundan önce dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri de maliyet hesabıdır. Gerekenden daha büyük kesite sahip kabloların kullanılması daha düşük direnç ve gerilim düşümüne neden olmakla birlikte kablo maliyetinin gereksiz biçimde artmasına neden olmaktadır. Bu durumda hem sistem güvenliğini hem de gereksiz maliyet artışlarını dikkate alarak en uygun kablo kesitini belirlemek gerekir. Bu amaçla, tez çalışmasında gerçekleştirilen PV sistem için matematiksel olarak en uygun kablo kesiti hesaplanmıştır. Tez çalışmasında, yıllık enflasyon ve indirim oranları sırasıyla %2 ve %5 olarak seçilerek şimdiki zaman para tabloları elde edilmiş ve kurulan sistem için en uygun kablo kesiti 4mm^2 olarak hesaplanmıştır.

Tez çalışmaları sonucu hesaplanan optimal kablo kesiti yerine 6mm^2 'lik kablo kullanılırsa, kablonun her metresinde 0.696\$'lık mali kayıp meydana gelir. 6mm^2 'lik kablo kesiti için sistemin kritik tarifi tekrar hesaplandığında 16.58 ¢/kWh olarak bulunur. Optimal kablo yerine daha büyük kesitli kablo seçilirse, yerel tarife kritik tarifenin altında kalır ve kurulan PV sistem ekonomik olmaktan çıkar.

KAYNAKLAR

- [1] Keçel, S., ve Yavuzcan, H. G., 2008. Türkiye’deki bölgesel sıcaklık değişimlerinin güneş panellerinin verimliliğine etkisi, *Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi*, **22**, 12-20
- [2] Yörükoğulları, E., 2013.Yenilenebilir enerji kaynakları (Ünite-1), Anadolu Üniversitesi Web-Ofset tesisleri, Eskişehir.
- [3] Chen, S., Quinn, S., Hsu, C.T. and Lehman, B., 2012. Estimation method of DC wire losses in photovoltaic systems, *IEEE 34nd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Scottsdale, AZ, September 2012,1-5 (in USA).
- [4] Potnuru, S. R., Pattabiraman, Dinesh., Ganesan, S.I., Chilakapati, N., 2015. Positioning of PV panels for reduction in line losses and mismatch losses in PV array, *Renewable Energy*, **78**, 264-275.
- [5] Yuventi, J., 2012. A method for evaluating the influence of wiring on the performance of components in a photovoltaic system design, *Solar Energy*, **86**, 2996-3003.
- [6] Chin Kim Gan; Yi Ming Lee; Pudjianto, D.; Strbac, G., 2014. Role of losses in design of DC cable for solar PV applications, in *Power Engineering Conference (AUPEC)*, Perth, WA, September-October 2014, 1-5(in Australia).
- [7] http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/g_enj_tekno.aspx, 30.11.2015.
- [8] Lokurlu, A., Gunkel, C., ve Lokurlu, D. Konsantre edici parabol sistemlerle ekonomik olarak soğutma, buhar ve elektrik üretimi. <http://www.sanayisurasi.gov.tr/pdfs/konsantre-edici-parabol-sistemlerle-ekonomik-olarak-sogutma-buhar-ve-elektrik-uretimi.pdf>. 03.12.2015.
- [9] Aşık, B., Ay, F., Sert, E., Alptekin, S., ve Karakaya,F., Türkiye, Almanya, İspanya Ve Portekiz’de güneş enerjisine genel bakış. <http://www.esolarproject.com/files/Article-7.11.2014-TR.pdf>. 03.12.2015.
- [10] Erdal, H. İ., 2011. Parabolik oluk sistem güneş santralleri ile güneş kuleleri yatırımlarının teknik değerlendirmesi ve maliyet karşılaştırması. *Enerji piyasa ve düzenleme*, **2**, 21-48.
- [11] Güven, Ş.Y., Üçgül, İ.,ve Şenol, R., 2004. Güneş enerjisi ısı uygulamaları ve güneş kulelerinin incelenmesi. *Mühendis ve Makine*, **533**, 17-28.

- [12] **Gün, A. R., Kurban, M.**, 2011. Güneş bacası sistemlerinin analizi ve karşılaştırmalı değerlendirilmesi, *6. International Advanced Technologies Symposium*, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 16-18 Mayıs. s.156-161.
- [13] <http://makina.bou.edu.tr/en/?yenilenebilir>, 30.11.2015.
- [14] **Bayrak, G., Cebeci, M.**, 2012. 3.6 kw gücündeki fotovoltaiik generatörünmatlab simulink ile modellenmesi. Erciyes üniversitesi fen bilimleri enstitüsü dergisi,2012, 28(3):198-204
- [15] YEGM, National Oceanic and Atmospheric Administration <http://www.deloitte.com/assets/Dcom>, 18.06.2014.
- [16] **Karamanav, M.**, 2007. Güneş Enerjisi Ve Güneş Pilleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [17] Türkiye Elektrik Enerjisi İstatistikleri http://www.emo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=88369#.U6H4dpR_uNY, 03.12.2015.
- [18] **Turhan, M. S. ve Çetiner, Y. D. D. İ.**, 2012. Fotovoltaiik sistemlerde performans değerlendirmesi. *6. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu*, Uludağ Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bursa, 12-13 Nisan, Bursa, s.1-9.
- [19] **Kınay, O., Bekiroğlu, N., ve Yumurtacı, Z.**, Güneş Pilleri(Fotovoltaiik Piller). <http://www.yildiz.edu.tr/~okincay/dersnotu/gunespilleri1bolum.pdf>, 03.12.2015.
- [20] **Kaymak, M.K.**, Fotovoltaiik (Güneş Pilleri). <http://web.itu.edu.tr/~kaymak/PV.html>, 03.12.2015.
- [21] **Ünlü, M., Çamur, S., ve Arifoğlu, B.**, 2011. Devre temelli fotovoltaiik hücre modeli. *VI. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Pamukkale Üniversitesi, Denizli
- [22] **Yavuz, A., Başol, D., Ertay, M., ve Yücedağ, İ.**, 2013. Fotovoltaiik eşdeğer devrelerinin analizi için bir eğitim aracı. *1st International Symposium On Innovative Technologies In Engineering And Science*. Düzce Üniversitesi, Düzce.
- [23] **Tsai, HL., Tu, CS., ve Su, YJ.**, 2008. Development of generalized photovoltaic model using matlab/simulink. *IAENG Proc. of the World Cong. on Eng. and Comp. Sci.* San Francisco, October 2008, 22-24, (in USA).

- [24] **Emir, O.**, 2002. Güneş Pilleri. *Seminer notları*, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, ISPARTA.
- [25] **Yılmaz, H.E.**, 2010. Fotovoltaik sistemlerde kullanılan yumuşak anahtarlama bir inverter devresinin gerçekleştirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [26] Yapıcı, C., Aslantaş, N., 2008. Amorf Yarıiletkenler. <https://www.yumpu.com/tr/document/view/6043258/amorf-malzemeler-sakarya-universitesi>. 10.12.2015
- [27] Fotovoltaik güneş enerji sistemleri (PV) http://www.yarbis1.yildiz.edu.tr/web/userCourseMaterials/tanriov_1b2f9b8d0e6537370b0f0b274687f835.pdf, 18.06.2014.
- [28] **Kocakaya, H.**, Güneş paneli üretim tesisi analizi, http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/ba5492f3bc2f401_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=2, 21.05.2014.
- [29] **Deniz, E.**, Güneş Enerjisi Santrallerinde Kayıplar. http://www.emo.org.tr/ekler/38f0038bf09a40b_ek.pdf, 03.12.2015.
- [30] **Roberts, S., Guariento, N.**, 2009. Building integrated photovoltaics a handbook. Birkhauser Press, Berlin, Germany.
- [31] **Thomas, R., Fordham, M.**, 2001. Photovoltaics and Architecture. Spon Press, London and Newyork.
- [32] **Sarioğlu G., Eke R.**, 2012. Çok kristalli silisyum (mc-si) bir fotovoltaik modülün kısmi gölgeleme altında parametrelerinin incelenmesi, *SDÜ Fen Dergisi*, **7** (2), 123-140
- [33] **Piliouline, M., Carretero, J., M. Sidrachde-Cardona, D. Montiel, P. Sánchez-Friera.** 2008. Comparative analysis of the dust losses in photovoltaic modules with different cover glasses. *Proceedings of 23rd European Solar Energy Conference*, Valencia, September 2008, 2698-2700 (in Spain)
- [34] **Kymakis, E.; Kalykakis, S.ve Papazoglou, T.M.**, 2009. Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of crete. *Energy Conversion and Management*, **50**, 433–438,
- [35] **Detrick, A., Kimber, A. ve Mitchell, L.** 2005. Performance evaluation standards for photovoltaic modules and systems, *Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference*, Lake Buena Vista, January 2005, 1581-1586 (in USA)

- [36] <http://www.limitsizenerji.com/haberler/yabanc-haberler/831-kendini-temizleyebilen-gunes-panelleri>, 04.12.2015.
- [37] <http://www.gunessistemleri.com/fotovoltaik-sicaklik.php>, 28.05.2014.
- [38] **Turhan,M.S. Çetiner,İ.**, 2012. Fotovoltaik sistemlerde performans değerlendirmesi. *6. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu*, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 12-13 Nisan, s. 243-252.
- [39] **Koirala, B. P., Sahan, B., & Henze, N.** 2009. Study on MPP mismatch losses in photovoltaic applications. *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)*, Hamburg, september 2009, 3727-3733(in Germany).
- [40] **Malamaki, K., N. D., Demoulas, C. S.**, 2013. Minimization of electrical losses in two-axis tracking pv systems. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, **28(4)**, 2445-2455.
- [41] **Kıyanççek, E.**, 2013. Fotovoltaik sistemlerin boyutlandırılması için pvs2 paket programının gerçekleştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [42] Solarcell 2014-2015 ürün kataloğu, <http://www.solarcell.com.tr/merak-ettikleriniz.asp>, 04.12.2015.
- [43] Comix İnternational Co Ltd İnvertör Kataloğu, <http://www.comix.com.tw/?page=product§ion=DAPI&subsection=SINE&productID=wt30sn12e>, 04.12.2015.
- [44] **Ekici, B. B., Gülten, A.**, 2015 Elazığ ili için şebeke bağlantılı bir fotovoltaik sistemin performansanalizi, *II. Uluslar arası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu (ISBS 2015)*, Gazi üniversitesi, Ankara 28-30 Mayıs, s.1-6
- [45] **Gershony, Z.,Mccalmont,T.** 2012. Optimal DC cable selection in pv desing, *Solar Pro*, **5.5**, s.64-73

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Ali KÖPRÜ, 1981 yılında Muş’da doğdu. 2007 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği Bölümünden mezun oldu. 2010 yılından itibaren Bingöl Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Elektrik Programında Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır.