

T.C.
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ

**GÜNEŞ ENERJİ SİSTEMLERİNDE FARKLI CİNS
PANELLERLE MALİYET VE GÜÇ ANALİZİNİN
YAPILMASI**

Yüksek Lisans Tezi

FİSUN ÇİFTÇİ

İSTANBUL, 2016

T.C.
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ VE ÇEVRE YÖNETİMİ

**GÜNEŞ ENERJİ SİSTEMLERİNDE FARKLI CİNS
PANELLERLE MALİYET VE GÜÇ ANALİZİNİN
YAPILMASI**

Yüksek Lisans Tezi

FİSUN ÇİFTÇİ

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Gürkan SOYKAN

İSTANBUL, 2016

T.C.
BAHÇEŞEHİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ VE ÇEVRE YÖNETİMİ

Tezin Adı: Güneş Enerji Sistemlerinde Farklı Cins Panellerle Maliyet ve Güç
Analizinin Yapılması

Öğrencinin Adı Soyadı: Fisun ÇİFTÇİ

Tez Savunma Tarihi: 27/05/2016

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları yerine getirmiş olduğu Enstitümüz tarafından onaylanmıştır.

.....
Doç. Dr. Nafiz ARICA
Enstitü Müdürü

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları yerine getirmiş olduğunu onaylarım.

.....
Yrd. Doç. Dr. Fehmi Görkem ÜÇTÜĞ
Program Koordinatörü

Bu Tez tarafımızca okunmuş, nitelik ve içerik açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak yeterli görülmüş ve kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Gürkan SOYKAN

Üye : Prof. Dr. Emin TACER

Üye : Yrd. Doç. Dr. Fehmi Görkem ÜÇTÜĞ

İmzalar

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren tez hocam Yrd. Doç. Dr. Gürkan SOYKAN'a, en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez yazımı boyunca bilgisi ile desteğini esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU'ya, manevi desteğini esirgemeyen sınıf arkadaşım Yüksek Kimyager Şeyma DURSUN'a ve bu günlere gelmemde en büyük paya sahip olan ve her zaman yanımda olan annem Handan ÇİFTÇİ'ye, babam Ayhan ÇİFTÇİ'ye ve kızım Eda İMERYÜZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Fisun ÇİFTÇİ

İSTANBUL, 2016

ÖZET

GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİNDE FARKLI CİNS PANELLER İLE MALİYET VE GÜÇ ANALİZİNİN YAPILMASI

Fisun Çiftçi

Enerji ve Çevre Yönetimi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Gürkan Soykan

Mayıs, 2016, 94 Sayfa

Güneş bir füzyon reaktördür. Bünyesindeki dört hidrojen atomunun bir helyum atomuna dönüşüm reaksiyonu sonucunda 9×10^{20} erg'lik bir enerji açığa çıkar ve radyasyon (elektro-manyetik dalga) şeklinde uzaya yayılır. Güneşin uzaya, her yönde sürekli yaydığı radyasyonun gücü 3845×10^{26} Watt'dır. Bu güç dünya atmosferinin dışına 1367 W/m^2 ve atmosferi geçtikten sonra yeryüzüne yaklaşık 1000 W/m^2 'lik bir değerle gelmektedir. Yeryüzündeki artan enerji tüketiminin karşılanması ve karbon salınımının azaltılması amacıyla güneş enerjisi son yıllarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Güneş enerjisinden faydalanabilmek için güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren fotovoltaik sistemler kullanılmaktadır. Fotovoltaik sistemin ana maddesi dünyada H_2O 'dan sonra en çok bulunan silisyum (Si) maddesidir. Katkılanmış silisyumların bir araya getirilerek elektriksel alan oluşumu ile gerçekleştirilen güneş hücrelerinin verimleri arttıkça, yenilenebilir enerjideki yerleri de gün geçtikçe artacaktır. Bu çalışmada; kurulu gücü 1 MW'ın altında olan güneş santrallerinin güç ve maliyet analizlerinin nasıl yapıldığı açıklanarak örnek bir sistemde farklı cins paneller kullanılması durumundaki sonuçlar incelenmiştir. Güç analizi yapılırken fotovoltaik hücrelerin yerleştirildiği coğrafi konumu ile güneş radyasyonunun evrensel ve hücrelerden oluşan panellerin üzerine gelen açıları incelenmiş, matematiksel ifadeleri verilmiştir. Tez çalışmasında PVSOL yazılımı analizlerin yapılması sırasında kullanılmıştır.

Anahtar Kelime: Güneş Enerjisi, Fotovoltaik Panel, Evrensel Açılar, Maliyet Analizi,
Güç Analizi



ABSTRACT

PERFORMING COST AND POWER ANALYSIS WITH DIFFERENT TYPES OF SOLAR PANELS ON SOLAR ENERGY SYSTEMS

Fisun Çiftçi

Energy and Environment Management

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Gürkan Soykan

May, 2016, 94 pages

The sun is a fusion reactor. The result of the conversion reaction of four hydrogen atoms in its structure to one helium atom reveals a 9×10^{20} erg energy and this energy spreads into space in the form of radiation (electromagnetic wave). The power of continuous spreading radiation from the sun to the space in every direction is 3845×10^{46} Watt. This power comes to the outside of earth's atmosphere with 1367 W/m^2 and to the earth approximately with 1000 W/m^2 . In recent years, the solar energy is preferred commonly in order to meet the growing energy consumption and reduce the carbon emission on the earth. Photovoltaic systems that convert solar energy directly into electrical energy are used to benefit from solar energy. The main ingredient of photovoltaic systems is Silicon (Si) that is the most abundant substance in the world after the H_2O . When the efficiency of solar cells that are produced by electric field created by gathering doped silicon is increased, the number of solar cells in the renewable energy will also increase day by day. Explaining how the cost and power analysis are performed in the solar power plants, that has the installed capacity less than 1MW, and analyzing the effect of the different types of panels on the cost and power calculations are given in this study. During the power analysis, the geographic location of photovoltaic cells and the angle of solar cosmic radiation on the panel are examined and the mathematical expressions are given. PVSOL software was used during the power analysis of solar power plant

Keywords: Solar Energy, Photovoltaic Panels, Universal Angles, Cost Analysis, Power
Analysis



İÇİNDEKİLER

TABLOLAR	x
ŞEKİLLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 GÜNEŞ HÜCRELERİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
3. GÜNEŞ ENERJİ SİSTEMLERİ	6
3.1 YARI İLETKENLER	6
3.1.1 Has Yarı iletkenler	8
3.1.2 Katkılı Yarı İletkenler	11
3.1.2.1 n-tipi yarı iletken	11
3.1.2.2 p-tipi yarı iletken	12
3.2 FERMİ ENERJİ SEVİYESİ	13
3.3 FERMİ- DİRAC OLASILIK FONKSİYONU	14
3.4 ENERJİ SEVİYELERİNDE TAŞIYICI DAĞILIMI	15
3.5 p-n JONKSİYONU VE YARIİLETKEN DİYOT	15
3.6 FOTOVOLTAİK DİYOTLAR	16
3.7 FOTOVOLTAİK HÜCRELERİN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ.....	20
3.8 FOTOVOLTAİK PANEL ÇEŞİTLERİ VE TEKNİK ÖZELLİKLERİ.....	25
3.8.1 Tek Kristalli Silisyum Fotovoltaik Panel.....	26
3.8.2 Çok Kristalli Silisyum Fotovoltaik Panel	27
4. KARŞILAŞTIRMA VE BULGULAR	29
4.1 MALİYET VE GÜÇ ANALİZİ	29
4.1.1 Fizibilite Çalışması.....	29
4.1.1.1 Göksel kürelerin devinimi: dünya-güneş arasındaki mekaniksel ve ışınımsal açıların geometrik anlamları.....	33
4.1.1.2 Güneş açıları	38
4.2 ŞEBEKEYE BAĞLI PV SİSTEM TASARIMI.....	45
4.2.1 Pik Saat Tanımı.....	45

4.2.2 Pik Saat ile Enerji Hesaplaması	45
4.3 KAPASİTE FAKTÖRÜ (CF).....	46
4.4 ŞEBEKEYE BAĞLI FOTOVOLTAİK SİSTEMİN BOYUTLANDIRILMASI	47
4.5 GÜNEŞ RADYASYONUNUN BELİRLENMESİ	47
4.6 KARŞILAŞTIRMALI FOTOVOLTAİK SİSTEM SENARYOLARI.....	49
4.6.1 Senaryo 1	50
4.6.2 Senaryo 2	53
4.6.3 Senaryo 3	57
4.6.4 Senaryo 4	58
4.6.5 Senaryo 5	62
4.6.6 Senaryo 6	63
4.7 LİSANSIZ ELEKTRİK ÜRETİMİNE İLİŞKİN KANUN VE YASAL DÜZENLEMELER	70
5. SONUÇ.....	74
KAYNAKÇA	75

TABLULAR

Tablo 4.1: Farklı panellere ait verim yüzdeleri	48
Tablo 4.2: Senaryolarda kullanılan evirici tipleri	50
Tablo 4.3: 990 kW gücündeki fotovoltaik sistemin tek kristalli panel ve yurtdışı üretim evirici için maliyet analizi	51
Tablo 4.4: 990 kW gücündeki fotovoltaik sistemin çok kristalli panel ve yurtdışı üretim evirici için maliyet analizi	52
Tablo 4.5: 990 kW gücündeki fotovoltaik sistemin tek kristalli panel ve yurtiçi üretim evirici için maliyet analizi	53
Tablo 4.6: 990 kW gücündeki fotovoltaik sistemin çok kristalli panel ve yurtiçi üretim evirici için maliyet analizi	54
Tablo 4.7: 660 kW gücündeki fotovoltaik sistemin tek kristalli panel ve yurtdışı üretim evirici için maliyet analizi	57
Tablo 4.8: 660 kW gücündeki fotovoltaik sistemin çok kristalli panel ve yurtdışı üretim evirici için maliyet analizi	58
Tablo 4.9: 660 kW gücündeki fotovoltaik sistemlerin tek kristalli panel ve yurtiçi üretim evirici için maliyet analizi	58
Tablo 4.10: 660 kW gücündeki fotovoltaik sistemlerin çok kristalli panel ve yurtiçi üretim evirici için maliyet analizi	59
Tablo 4.11: 330 kW gücündeki fotovoltaik sistemin tek kristalli panel ve yurtdışı üretim evirici için maliyet analizi	62
Tablo 4.12: 330 kW gücündeki fotovoltaik sistemin çok kristalli panel ve yurt dışında üretilen evirici için maliyet analizi	63
Tablo 4.13: 330 kW gücündeki fotovoltaik sistemin tek kristalli panel ve yurtiçi üretim evirici için maliyet analizi	63
Tablo 4.14: 330 kW gücündeki fotovoltaik sistemin çok kristalli panel ve yurtiçi üretim evirici için maliyet analizi	64
Tablo 4.15: Farklı senaryolar için maliyet ve yıllık üretilecek enerji miktarları	67
Tablo 4.16: II sayılı cetvel	69
Tablo 4.17: Yerli katkı ilavesinden yararlanılması durumu	69

ŞEKİLLER

Şekil 3.1: Kristal yapıda enerji bantları.....	7
Şekil 3.2: Has yarı iletkende düzgün kristal yapı (Si).....	8
Şekil 3.3: Has yarı iletkenlerde elektron-delik çifti oluşumu	8
Şekil 3.4: Fosfor ile katkılanmış silisyum kristal yapısı	12
Şekil 3.5: Enerji seviyelerinde taşıyıcı dağılımı	15
Şekil 3.6: p-n jonksiyonunun yapısı.....	16
Şekil 3.7: Fotovoltaik diyet.....	18
Şekil 3.8: Foton enerjisinin elektrona aktarımı	19
Şekil 3.9: Fotovoltaik hücrenin elektriksel eşdeğer devre şeması	20
Şekil 3.10: Fotovoltaik hücrenin verimi	22
Şekil 3.11: İnce rondela kesitleri.....	26
Şekil 3.12: Çok kristalli silisyum yapısı	28
Şekil 4.1: PVSOL simülasyon programının çalıştırılması sırasında ekran görüntüleri ..	31
Şekil 4.2: PVSOL simülasyon programının çalıştırılması sırasında ekran görüntüleri ..	31
Şekil 4.3: PVSOL simülasyon programının çalıştırılması sırasında ekran görüntüleri ..	32
Şekil 4.4: PVSOL simülasyon programının çalıştırılması sırasında ekran görüntüleri ..	32
Şekil 4.5: Ufuk düzleminin yerküre üzerindeki bir gözlemciye göre tanımlanması.....	34
Şekil 4.6: Tutulma dairesi (ekliptik) ve ekinoks noktaları.....	36
Şekil 4.7: Güneşin doğuşu ve batışı (dünya merkezli güneş hareketi)	36
Şekil 4.8: 21 Aralık, 21 Haziran ve ekinoks noktaları	37
Şekil 4.9: Doğuş - batış noktalarının yıl boyunca yer değiştirmesi	37
Şekil 4.10: Gök küre üzerinde güneş açıları	39
Şekil 4.11: Yer kürenin enlem dairelerinin tanımı.....	40
Şekil 4.12: Yer in açıları (Yükseklik açısı, Güneş Azimut açısı ve Zenit açısı).....	41
Şekil 4.13: Pik saat.....	45
Şekil 4. 14: Tek kristalli panel durumunda güç analizi.....	55
Şekil 4.15: Çok kristalli panel durumunda güç analizi	56
Şekil 4.16: Tek kristalli panel durumunda güç analizi.....	60
Şekil 4.17: Çok kristalli panel durumunda güç analizi	61
Şekil 4.18: Tek kristalli panel durumunda güç analizi.....	65

Şekil 4.19: Çok kristalli panel durumunda güç analizi	66
Şekil 4.20: Fotovoltaik panellerin şebekeye bağlanabilmesine ilişkin akış diyagramı...	73



KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım
AG	: Alçak Gerilim
CF	: Kapasite Faktörü
DC	: Doğru Akım
G	: Sonbahar Ekinoksu
HIT	: Hibrit Hücreler
JRC	: Joint Research Center - Ortak Araştırma Merkezi
K	: İlkbahar Ekinoksu
N	: (North) Kuzey eksen
OG	: Orta Gerilim
PV	: Photovoltaic
PVGIS	: Photovoltaic Geographical Information System
PVSOL	: Photovoltaic Solar
S	: (South) Dünyanın Güney Eksenini

SEMBOLLER

Açıkdevre Gerilimi Sıcaklık Katsayısı	: β
Bölge Zamanı Baz Meridyeni	: L_{ST}
Deklinasyon Açısı	: δ
Deliklerin Hareket Yeteneği	: μ_p
Deliklerin Oluşturdukları Akım	: I_p
Deliklerin Oluşturduğu Akım Yoğunluğu	: J_p
Diyot Gerilimi	: V
Doluluk Faktörü	: FF
Elektronun Hareket Yeteneği	: μ_n
Elektronların Oluşturdukları Akım	: I_n
Elektronların Oluşturduğu Akım Yoğunluğu	: J_n
Elektron Yoğunluğunu	: ρ_E
Enlem Açısı	: ϕ
Fermi Enerji Seviyesi	: E_f
Foton Akımı	: I_F
Fotonun Frekansı	: ν
Fotovoltaik Pilin Açık Devre Gerilimi	: V_{OC}
Fotovoltaik Pilin Kısa Devre Akımı	: I_{SC}
Gözlemcinin Bulunduğu Meridyen	: L_{OC}
Güneş Azimut Açısı	: γ
Güneş Geliş Açısı	: θ
Has Yarıiletkenin Akım Yoğunluğu	: J
Has Yarıiletkenin Özgöl İletkenliği	: σ
Has Yarıiletken Taşıyıcı Yoğunluğu	: n_i
Isıl Gerilim	: V_T
Işığın Dalga Boyu	: λ
İletim Bandının En Alt Seviyesi	: E_C
Kelvin Cinsinden Sıcaklık	: T
Kısadevre Akımının Sıcaklık Katsayısı	: α
Maksimum Güç	: P_{max}

Maksimum Verim	: η_{\max}
p-n Jonksiyonunun Doyma Akımı	: I_0
Saat Açısı	: ω
Sıcaklığa Bağımlı Geçiş Band Aralığının eV Birimi ile İfade Edilişi	: $E_G(T)$
Valans Bandının En Üst Seviyesi	: E_V
Yansıma Oranı	: R
Yasak Bant Aralığı	: E_g
Yükseklik Açısı	: y
Zenit Açısı	: z
$1,38.10^{-23}$ J/K Değerindeki Boltzman Sabiti	: k



1. GİRİŞ

1.1 GÜNEŞ HÜCRELERİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Güneş hücreleri (fotovoltaik diyetler) üzerine güneş ışığı düştüğünde, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren düzeneklerdir. Bu enerji çevriminde herhangi hareketli parça bulunmaz. Güneş hücrelerinin çalışma ilkesi, fotovoltaik olayına yani n ve p tipi silisyum katmanlarının üst üste gelmesi ile oluşan yapıya fotonun gelmesi, yapı içerisinde foton enerjisi ile koparılan elektronların harekete geçmesi olayına dayanır.

İlk kez 1839 yılında Alexandre Edmond Becquerel, elektrolit içerisinde daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilim, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemleyerek fotovoltaik olayını bulmuştur. Katılarda benzer bir olay ilk olarak selenyum kristalleri üzerinde 1876 yılında G.W. Adams ve R.E. Day tarafından gösterilmiştir. Bunu izleyen yıllarda çalışmalar bakır oksit ve selenyuma dayalı foto diyetlerin, yaygın olarak fotoğrafçılık alanında ışık metrelerinde kullanılmasını beraberinde getirmiştir.

1914 yılında fotovoltaik diyetlerin verimliliği %1 değerine ulaşmış ise de gerçek anlamda güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik diyetler ilk kez 1954'de Bell Laboratuvarlarında, Daryl Chapin tarafından silikon kristali üzerinde gerçekleştirilmiştir. Fotovoltaik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edilen bu tarihi izleyen yıllarda araştırmalar ve ilk tasarımlar, uzay araçlarında kullanılacak güç sistemleri için yapılmıştır. Fotovoltaik güç sistemleri 1960'ların başından beri uzay çalışmalarının güvenilir kaynağı olmayı sürdürmektedir.

1970'li yılların başlarına kadar, güneş hücrelerinin uygulamaları sınırlı kalmıştır. Güneş hücrelerinin yeryüzünde de elektriksel güç sistemi olarak kullanılabilmesine yönelik araştırma ve geliştirme çabaları 1954'lerde başlamış olmasına karşın, gerçek anlamda ilgi 1973 yılındaki 1.Petrol Bunalımını izleyen yıllarda olmuştur. Amerika'da, Avrupa'da, Japonya'da büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırma ve geliştirme projeleri başlatılmıştır. Bir yandan uzay çalışmalarında kendini ispatlamış güneş

hücrelerinin verimliliğini artırma çabaları ve diğer yandan alternatif olmak üzere çok daha az yarı iletken malzemeye gerek duyulan ve bu neden ile daha ucuza üretilebilecek ince film güneş hücreleri üzerindeki çalışmalara hız verilmiştir. Güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirmek için basit, çevre dostu olan fotovoltaik sistemlerin araştırılması ve geliştirilmesi, maliyetinin düşürülerek yaygınlaştırılması konusunda yıllardır çalışmalar yapılmaktadır. Ancak son yirmi yılda dünya genelinde artan enerji tüketimi ve çevre konusunda duyarlılığın artması ile fosil yakıtlara dayalı olmayan yeni sistemler ve yenilenebilir enerji kaynakları konusunda çalışmalar hız kazanmıştır.

Dünyadaki büyük şirketlerin devreye girmesiyle fotovoltaik hücreler konusundaki teknolojik gelişmeler ve güç sistemlerine artan talep ve buna bağlı olarak büyüyen üretim kapasitesi, maliyetlerin hızla düşmesini de beraberinde getirmiştir. Yakın geçmişe kadar alışlagelmiş elektrik enerjisi üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında çok pahalı olarak değerlendirilen fotovoltaik güç sistemleri, artık gelecekte güç üretimine katkı sağlayabilecek sistemler olarak değerlendirilmektedir. Özellikle elektrik enerjisi üretiminde hesaba katılmayan ve görünmeyen maliyet olarak değerlendirilebilecek “sosyal maliyet” göz önüne alındığında, fotovoltaik sistemler fosil kaynaklara dayalı sistemlerden daha ekonomik olarak değerlendirilebilir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

İstanbul Teknik Üniversitesi Profesörlerinden Mehmet Sait Türköz'ün "Elektronik" adlı kitabında güneş panelinin çalışma prensibindeki elektron-delik hareketi ve matematiksel ifadeleri incelemiştir. Bu inceleme aslında Si ve Ge gibi has ya da katkıli yarıiletken malzemenin elektriksel özelliklerini inceleme aşamasında gerçekleştirilmiştir. Fermi Enerji Seviyesi yani madde içerisinde aynı enerji seviyesinde iki elektron olamayacağına ilişkin bilginin incelemesi de yine aynı kitapta ele alınmıştır.

Elektrik Mühendisleri Odası (TMMOB) ve Ege Üniversitesi'nin birlikte hazırladıkları "Güneş Enerji Sistemleri Tesisatı Eğitimi" kitabında güneş panellerinin yapısı, kurulumu, standartlar, şebekeden bağımsız ya da bağımlı sistemleri, malzeme bilgisi ve işletimine ilişkin bilgi ve değerlendirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Fabio Andreoli'nin "Yeni Nesil Fotovoltaikler" kitabında yazar; günümüz bilim, teknoloji ve mühendislik uygulama alanlarındaki hızlı gelişim, üretim süreçlerinde var olan bileşenlerin kendilerini sürekli yenilemeleri ve geliştirmelerinin zorunlu olduğunu belirterek, bir tür tasarım ve uygulama kılavuzu olarak hazırladığı kitabın içeriğinin sürekli, meslek içi eğitim ile yenilenmesini istemektedir.

Prof. Dr. Gürbüz Atagündüz'ün "Güneş Enerjisi Temelleri ve Uygulamalar" adlı kitabında güneş panellerinin açıları ve bu açıların elektriksel güç analizindeki önemi ve örneklerle yapılan hesapların fiziksel gerçeklerle karşılaştırılması incelenmiştir.

Prof. Dr. Abdullah Kızılırmak'ın "Küresel Astronomi ve Gök Mekaniği" kitabında yazar; güneş panellerinin yerleştirilme açıları ve açıların elektriksel güç analizindeki önemini incelemiştir.

Y. Doç. Dr. Burak Barutçu'nun "İ.T.Ü Ders Notları" sunumunda panellerin yerleştirme açı hesapları, panel çeşitleri, güç elektroniği, şebeke problemleri ve eviriciler incelenmiştir.

Prof. Dr. Abdurrahman Kılıç ve Doç. Dr. Aksel Öztürk'ün “ Güneş Enerjisi” kitabında; güneş enerjisinde bölgesel meteorolojik özellikler, sistem elemanlarının boyutları ve bölgelere göre farklılıkları, güneş ışınımının Türkiye'deki dağılımı, güneş açıları, güneş sabiti ve atmosfer dışına gelen güneş ışınımı, ayrıca güneş ışınımı toplayıcı sistemleri de incelenmiştir.

California Institute of Technology; “Electricity From Photovoltaic Solar Cells” kaynağında özellikle güneş hücrelerinin yapısı, bilgisayar tabanlı benzetimler, ekonomik analiz, enerji dönüşümünün verimliliği ve kurulacak enerji sistemleri ile ilgili proje yönetimi konuları incelenmiştir.

Colorado State University; “Solar heating and cooling of residential buildings: sizings, installation and operation of systems” kitabında özellikle konutlarda güneş enerjisi kaynaklı ısıtma ve soğutma işlemlerinin nasıl yapıldığı ve sistem boyutlarının nasıl hesaplandığı ile ilgili detaylar verilmiştir.

Gunnarson Knutsson Linnea, Karlstads Universitet “ Solar power on the top of the world: Possibilites to provide the school in Thade, in Nepal, with electricity from a solar cell system” konulu çalışmada bir okulun elektrik enerjisi ihtiyacının enerji depolama sistemi bulunan bir güneş enerjisi sistemi ile karşılanıp karşılanamayacağı incelenmiştir. Sistemin Matlab Simulink üzerinden modeli kurularak simülasyonlar yapıлып ticari bir ürün olan PVsyst yazılımı ile de aynı model için sonuçlar elde edilip karşılaştırmalar yapılmıştır.

Mevin Chandel,G.D.Agrawal ,Sanjay Mathur ve Anuj Mathur 'un yazdığı “Techno-economic analysis of solar phtovoltaic pawner plant for garment zone of jaipur city” başlıklı makalede; “İndia'da Stapura sanayi bölgesinde 44 tane sanayi kuruluşu vardır. Bu kuruluşlar genelde tekstil sektörü temelli kuruluşlardır. Üretim ise çoğunlukla pamuk ipliğine dayalı tekstil sektörleridir. Bu nedenle fabrikalarda dikiş, yıkama ve kurutma makineleri kullanılmakta, özellikle kurutma makinelerinin güçleri yüksektir. 2011 Yılında Stapura'da yapılan araştırmalarda; ortalama elektrik enerjisi talebi 1,84 MW'tır. Bu talebin sabit olmadığı ve artış gösterdiği belirlenmiştir. Sanayide günlük elektrik enerjisinin sürekli ve kesintisiz olması gerekir. Öngörülen; şebekeye bağlı 2,5

MW'lık güneş santralidir.” Şeklinde güneş santralinin güç ve maliyet analizi yapılmıştır.



3. GÜNEŞ ENERJİ SİSTEMLERİ

3.1 YARI İLETKENLER

Yarı iletken madde; son yörüngesinde dört valans elektron bulunduran, kristal yapılı bir maddedir. Katı malzemelerin çoğu kristal yapıya sahiptir. Kristal yapı; birim kristal hücrelerin madde içerisinde tekrarlanmasıdır. Bu yapı içerisinde, atomun çekirdeği etrafında elektronların yerleştikleri enerji seviyeleri, dolayısıyla elektronlar birbirlerinden etkilenir. Etkilenme en fazla valans elektronların bulunduğu valans bandında olur. Valans bandı; elektronların atom çekirdeğinin etrafındaki diziliminde son enerji bant aralığı olarak tanımlanırken, valans elektronları ise; bu bant aralığında bulunan elektronlardır. Valans elektronları, elementin elektriksel ve kimyasal özelliklerini belirler.

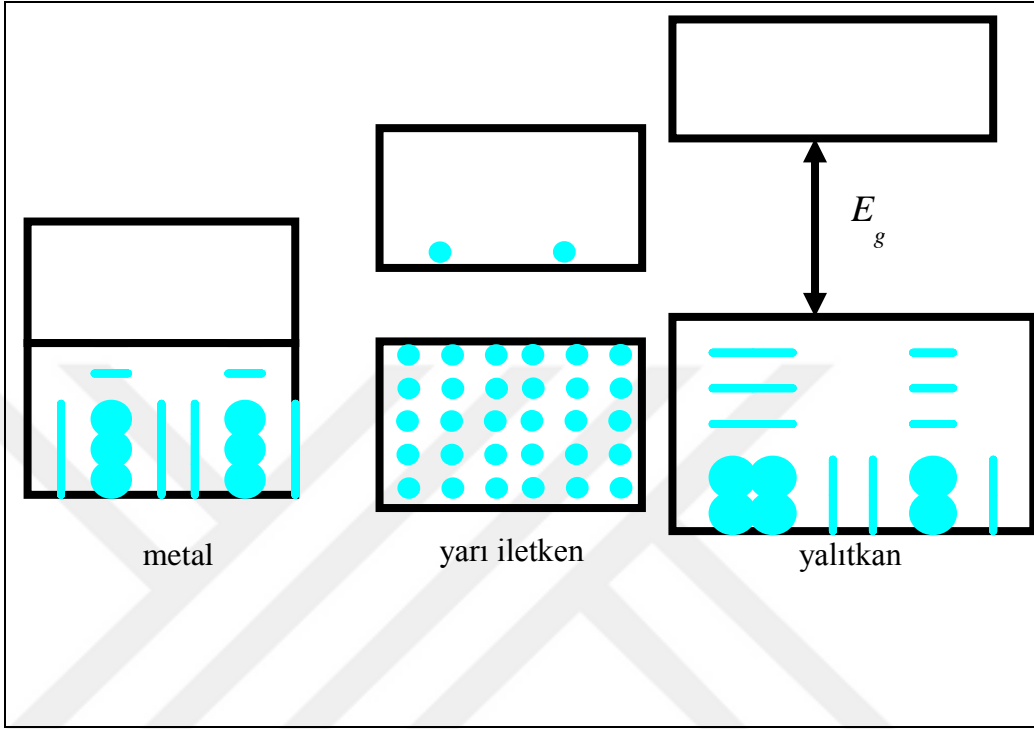
Yarı iletken maddenin kristal yapısında üç farklı enerji bandı tanımlanır. Elektronlar Fermiyon oldukları için Fermi-Dirac istatistiğine uyarlar. Dolayısıyla önce enerji seviyesi düşük bantlardan başlayarak enerji seviyeleri elektronlarla dolar. Elektronların yer aldığı son enerji seviyesine valans bandı denir. Valans bandında bulunan bir elektronun iletim bandı adını alan üst enerji bant seviyesine çıkabilmesi için yasak banda (E_g) karşılık gelen enerji miktarını kazanması gerekir. Yasak bant enerji seviyesini kazanıp yasak bandı geçen elektronlar, atomlarından ayrılmıştır ve serbest olarak malzeme içerisinde hareket edebilirler.

Kristal yapıda, elektronların enerji dağılımında yasak bandın genişliği fazla olursa, valans bandında bulunan elektronların iletim bandına geçmesi zorlaşacak, normal koşullarda akım iletilmesi mümkün olmayacaktır. Bu tür malzemelere yalıtkan adı verilir. Yasak bandı olmayan, yani iletim bandı ile valans bandı bitişik olan her türlü koşulda akım iletiminin mümkün olduğu malzemelere iletken adı verilir. Yasak bant genişliği büyük olmayan ve normal koşullarda az da olsa iletim bandında elektron bulunabilen malzemelere yarı iletken denir.

Yarı iletkenlerin akım iletme özellikleri sıcaklıkla değişir. Belirli bir sıcaklık değerinin altında elektronlar iletim bandına geçmek için gereken enerjiyi kazanamadığından akım

iletimi mümkün olmaz. Sıcaklığın düşük değerlerinde yarı iletken, yalıtkan bir malzeme gibi davranır. Bu durum Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Şekil 3.1: Kristal yapıda enerji bantları



Kaynak: Elektronik (Prof. Dr. M. Sait Türköz)

Si için mutlak sıfırda (0 K’de) yasak bant genişliği 1,21 eV’ur (1eV= 1,6.10⁻¹⁹J). Germanyum (Ge) için yasak bant genişliği aynı koşullarda 0,785 eV’ur.

Si ve Ge’un yasak bant genişliğinin sıcaklık ile değişimi sırasıyla;

$$\text{Si için } E_g(T) = 1,21 - 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot T \quad (3.1)$$

$$\text{Ge için } E_g(T) = 0,785 - 2,23 \cdot 10^{-4} \cdot T \quad (3.2)$$

şeklindedir. Denklem (3.1) ve (3.2) içinde T, Kelvin cinsinden sıcaklığı $E_g(T)$ ise eV cinsinden enerjiyi ifade etmektedir.

300 K’ de yasak bant aralığı, silisyum için 1,1 eV, Germanyum için 0,72 eV değerini alır.

Yarı iletkenler iki farklı biçimde; has ve katkılı yarı iletkenler olarak incelenir.

3.1.1 Has Yarı iletkenler

Yarı iletken malzeme içerisinde katkı malzemesi (yabancı madde) bulunmuyor ve düzgün kristal yapıya sahip ise, böyle yarı iletkenlere has yarı iletken denir. Has yarı iletkende düzgün kristal yapı (Si için) Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

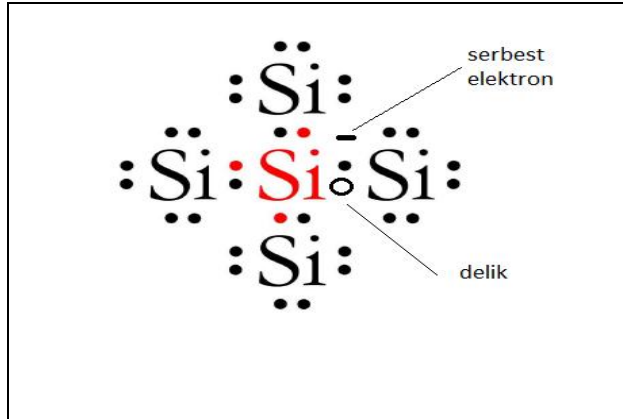
Şekil 3.2: Has yarı iletkende düzgün kristal yapı (Si)



Kaynak: Elektronik (Prof. Dr. M. Sait Türköz)

Has yarı iletkende düzgün kristal yapıda düşük sıcaklıklarda bağlar sağlamdır ve bağ yapısı bozulmaz. Sıcaklık artışı ile atomlar arasında titreşim gerçekleşir ve bağlar uzar. Yasak bant enerji miktarını alan elektronun enerjisi en az iletim bandı seviyesindedir. Bağdan ayrılan elektronun bulunduğu yerde yük dengesi bozulmuştur. Pozitif yüklü atomda, elektronun ayrıldığı yere delik adı verilir. Bu durum Şekil 3.3’te gösterilmiştir.

Şekil 3.3: Has yarı iletkenlerde elektron-delik çifti oluşumu



Kaynak: Elektronik (Prof. Dr. M. Sait Türköz)

Birim hacimde bulunan serbest elektron sayısı (n) ve delik sayısı (p) ise;

$$n = p = n_i \quad (3.3)$$

$$E_g = E_c - E_v \quad (3.4)$$

gibidir. (3.3) ve (3.4) denklemlerinde;

n_i : Has yarı iletken taşıyıcı yoğunluğu

E_c : İletim bandının en alt seviyesi

E_v : Valans bandının en üst seviyesi

Has yarı iletkene elektrik alanı uygulandığında serbest elektron ve deliklere kuvvet etkir. Delik ve elektronların işaretleri farklı olduğundan zıt yönde hareket ederler. Elektronların hareket yönü elektrik alanına ters, deliklerin yönü ise elektrik alanı ile aynıdır. Hareket yönleri ile yüklerin işaretleri ters olduğundan delik ve elektronların oluşturacağı akımlar (3.5) ve (3.6)'da görüldüğü gibi aynı yönde olacaktır.

$$I = I_p - (-I_n) \quad (3.5)$$

$$I = I_p + I_n \quad (3.6)$$

Parametreler;

I_p : Deliklerin oluşturdukları akım,

I_n : Elektronların oluşturdukları akım,

Akım yoğunluğu (J) da delik ve elektronun oluşturduğu akım yoğunluklarının (J_p ve J_n) toplamına eşittir. Denklem (3.7) kullanılarak J hesaplanır.

$$J = J_p + J_n \quad (3.7)$$

J_n ve J_p değerleri (3.8) ve (3.9) kullanılarak hesaplanır.

$$J_n = n \cdot q \cdot \mu_n \cdot E \quad (3.8)$$

$$J_p = p \cdot q \cdot \mu_p \cdot E \quad (3.9)$$

(3.8) ve (3.9) denklemlerinde;

μ_n : Elektronun hareket yeteneği,

μ_p : Deliklerin hareket yeteneği,

E: Elektriksel alan şiddeti (V/m),

q: Elektronun yükü (C) dür.

Has yarı iletkenin akım yoğunluğu (J) bağıntısı elektronun ve deliklerin hareket yeteneğine bağlı olarak düzenlenirse denklem (3.10) elde edilir;

$$J = q \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) \cdot E \quad (3.10)$$

(3.10) denkleminde has yarı iletkenin özgül iletkenliği (σ);

$$\sigma = q \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) \quad (3.11)$$

olarak ifade edilir.

(3.11) bağıntısı, yarı iletkenin katkılı olması durumunda da geçerlidir. Bağıntıdaki μ_n ve μ_p taşıyıcı hareket yetenekleri ortam sıcaklığına, yarı iletkenin cinsine ve saflığına bağlıdır. Deliklerin hareket yeteneği μ_p , elektronların hareket yeteneği μ_n den değer olarak daha küçüktür.

Has yarı iletken için kullanılan (3.3) denklemi (3.11) denkleminin içinde kullanılarak (3.12) eşitliği elde edilir.

$$\sigma = q \cdot n_i (\mu_n + \mu_p) \quad (3.12)$$

3.1.2 Katkılı Yarı İletkenler

3.1.2.1 n-tipi yarı iletken

Has yarı iletkene kristal yapısını bozmadan yabancı malzeme katılarak elektriksel özelliği büyük ölçüde değiştirilebilir. Yarı iletken içerisine yabancı madde katma işlemine katkılama işlemi, katılan yabancı maddeye de katkı atomu denir.

Dört valans değerli yarıiletken içerisine beş valans değerli malzemeler olan Bizmut (Bi,83), Fosfor (P,15), Arsenik (As,33) veya Antimuan (Sb,51) katılıyor ise n-tipi yarı iletken elde edilir. Bağ oluşturamayan katkı atomunun beşinci elektronunun iletim bandına geçebilmesi için Silisyumda 0,04 eV kadarlık bir enerji kazanması yeterlidir. Çok zayıf bir bağ enerjisi ile atomuna bağlı olan katkı atomlarının tümü normal sıcaklıklarda dahi iletim bandına geçmeleri için gereken enerjiyi kazanarak atomlarından ayrılıp serbest hale geçebilirler.

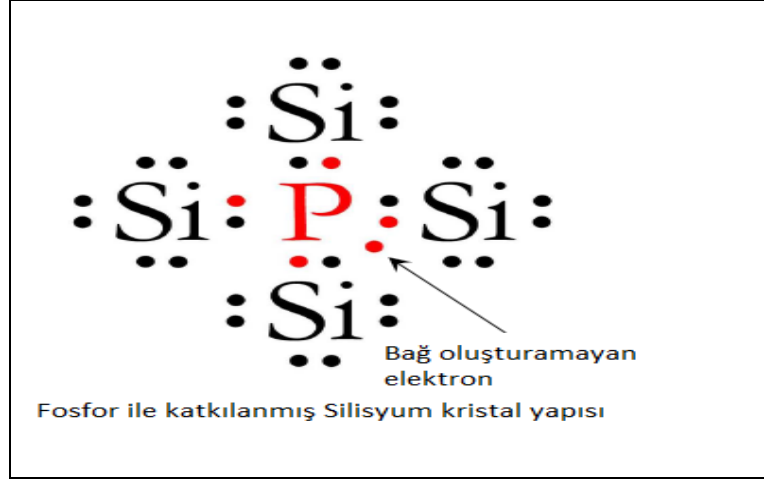
n-tipi katkılı yarı iletkende akım iletiminde deliklerin payı, elektronların payına göre çok küçük olduğundan iletkenlik yaklaşık olarak;

$$\sigma \cong q \cdot n \cdot \mu_n \quad (3.13)$$

biçiminde ifade edilebilir.

Yarı iletken içerisinde bulunan taşıyıcı yüklerden sayısı fazla olan çoğunluk taşıyıcı, az olan ise azınlık taşıyıcı olarak adlandırılır. n-tipi yarı iletkende çoğunluk taşıyıcı elektron, azınlık taşıyıcı ise deliktir. Şekil 3.4' te fosfor ile katılanmış silisyum kristal yapısı gösterilmiştir.

Şekil 3.4: Fosfor ile katkılanmış silisyum kristal yapısı



Kaynak: Elektronik (Prof. Dr. M. Sait Türköz)

3.1.2.2 p-tipi yarı iletken

Has yarı iletkene, kristal yapmayı bozmayacak biçimde üç valans değerli atomlardan oluşan yabancı maddeler katıldığında, oluşan bağda elektron eksikliğinden dolayı bağ yapamamış elektron yani dışarıdan bakıldığında pozitif karakterli, “delik” diye adlandırılan ucu açık bir bağ (elektron kazanmak isteyen boşluk) oluşur. Üç valans değerli atomlar ile katkılanmış yarı iletken p-tipi yarı iletken olarak tanımlanır. Üç valans elektronu olan bu katkı maddelerini Bor (B,5), Alüminyum (Al,13), Galyum (Ga,31) veya İndium (In,49) oluşturur.

Kristal yapmayı bozmayacak biçimde, belirtilen atomlardan biri katılınca, yarı iletken atomları ile katkı atomları arasında bağlar oluşur. Oluşan bağ sayısı, yarı iletkenin valans elektron sayısı olan dörde eşittir. Katkı atomu üç elektronlu olduğundan dördüncü bağı, yarı iletken atomlarından kopardığı elektronla sağlar. Birer elektron kazanan yabancı atomlara -“alan atom”- denir.

Alan atomların elektronlarının enerji seviyesi valans bandının hemen üzerindedir ve alan atomlar az bir enerji kazanılması halinde valans bandından bir elektron kopararak kendi bağı kurar. Pozitif taşıyıcı yüklerin sayısı ve akım iletimindeki payı, negatif yüklü akım taşıyıcılarından fazla olduğundan bu tip yarı iletkene p-tipi yarıiletken denir. p-tipi yarı iletken için özgül iletkenlik yaklaşık olarak;

$$\sigma \cong q_p \cdot \mu_p \quad (3.14)$$

biçiminde ifade edilir. p-tipi yarı iletkende çoğunluk taşıyıcılar delikler, azınlık taşıyıcılar da elektronlardır.

3.2 FERMİ ENERJİ SEVİYESİ

İletken içerisinde valans bandı ile iletken bandı bitişik olduğundan, valans elektronları atomlarından ayrılarak serbest hale geçerler. Çünkü iletken madde yapısı gereği arada yasak bant olmadığı için elektronların dolaşacağı iletim bandının içindedirler. Pauli'nin Dışarılama İlkesi serbest elektronlara da uygulanabilir. Dışarılama İlkesi'ne göre atom içerisinde dört kuantum sayısı da aynı olan iki elektron olamaz. Serbest elektronun sahip olduğu enerji seviyesini kesin olarak belirlemek mümkün değildir. Ancak belirli bir enerji aralığında bulunan elektron sayısı hesaplanabilir. dE enerji aralığında bulunan dn serbest elektron sayısı ise, elektron yoğunluğunu;

$$\rho_E = \frac{dn}{dE} = N(E).f(E) \quad (3.15)$$

biçiminde ifade edilir.

Bu bağıntıdaki $N(E)$, serbest elektronların malzeme içerisinde alabileceği seviyelerin sayısını gösteren bir fonksiyondur. h Planck sabiti ve m parçacığın kütlesidir. Heisenberg'in eylemsizlik ve Pauli'nin Dışarılama İlkesinden hareketle $N(E)$ fonksiyonu;

$$N(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m)^{3/2} .E^{1/2} \quad (3.16)$$

Denklemleri ile hesaplanır. (3.17) bağıntısındaki $f(E)$ fonksiyonu, serbest elektronların E enerji alabilme olasılığını belirleyen Fermi-Dirac olasılık fonksiyonudur.

Bu fonksiyon;

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_f}{k.T}}} \quad (3.17)$$

biçiminde ifade edilir.

(3.17) ifadesinde E_f Fermi Enerji Seviyesi, $k=1,38.10^{-23}$ J/K değerindeki Boltzman sabiti, T ise Kelvin cinsinden sıcaklıktır.

3.3 FERMİ- DİRAC OLASILIK FONKSİYONU

(3.17) denklemi ile verilen Fermi-Dirac olasılık fonksiyonunda, $E>E_f$ olduğunda serbest elektronların bu enerji seviyelerinde bulunma olasılığı sıfır olacaktır. Dolayısıyla elektronlar bu enerji seviyesinde bulunamayacaktır. $E<E_f$ için $f(E)=1$ dir ve serbest elektronların tümünün enerji seviyesi E_f den daha küçük olmaktadır. Bu durum, $E<E_f$ için $\rho_E = N(E)$ ve $E>E_f$ için $\rho_E = 0$ biçiminde ifade edilebilir. E'ye göre ρ_E 'nin 0 ile ∞ arasında alınacak integrali, malzeme içerisindeki serbest elektron sayısını verecektir. Elektron sayısı hesaplanırsa;

$$n = \int_0^{\infty} \rho_E .dE = \int_0^{\infty} N(E).f(E).dE \quad (3.18)$$

Mutlak sıfırda $T = 0$ K için (3.18) ifadesi;

$$n = \int_0^{E_f} N(E).dE = \gamma \int_0^{E_f} E^{1/2}.dE = \frac{2\gamma E_f^{3/2}}{3} \quad (3.19)$$

olarak hesaplanır. (3.19) ifadesindeki γ değeri

$$\gamma = \frac{4\pi(2m)^{3/2}}{h^3} \quad (3.20)$$

Enerjiden bağımsız γ değeri yerine konulduğunda Fermi Enerji Seviyesi için;

$$E_F = \frac{h^2}{8m} \cdot \left[\frac{3n}{\pi} \right]^{2/3} \quad (3.21)$$

eşitliği elde edilir.

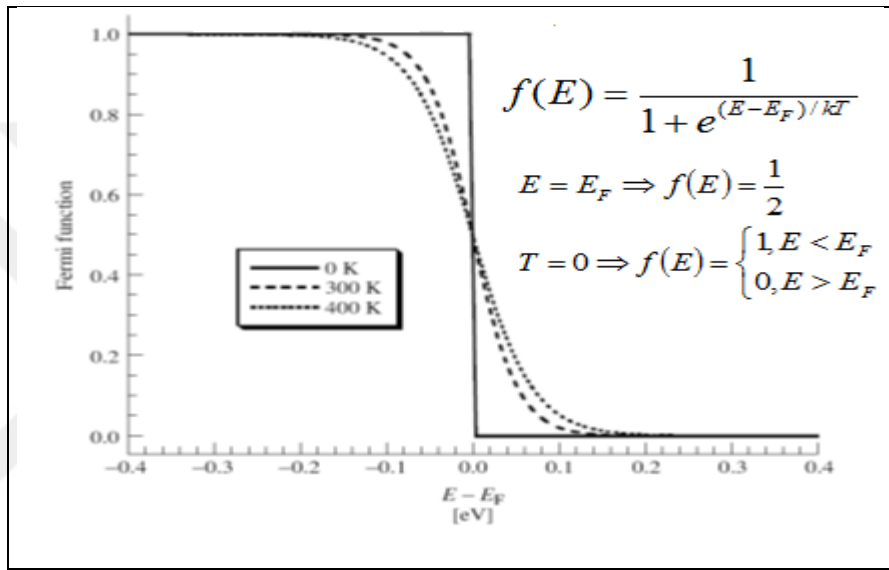
Sıcaklık değeri sıfırdan büyük olduğunda Fermi Enerji Seviyesi'nin değeri değişecektir. Fermi-Dirac olasılık fonksiyonundan görüleceği gibi serbest elektronların enerji

seviyeleri, E_F Fermi Enerji Seviyesi'nden daha büyük enerji seviyelerinde bulunma olasılığı küçük de olsa mümkün olabilmektedir.

3.4 ENERJİ SEVİYELERİNDE TAŞIYICI DAĞILIMI

Fermi-Dirac istatistiğine göre termal denge durumunda, müsaade edilen enerji seviyelerinde elektronların dağılım fonksiyonu, Şekil 3.5'de gösterilmiştir.

Şekil 3.5: Enerji seviyelerinde taşıyıcı dağılımı



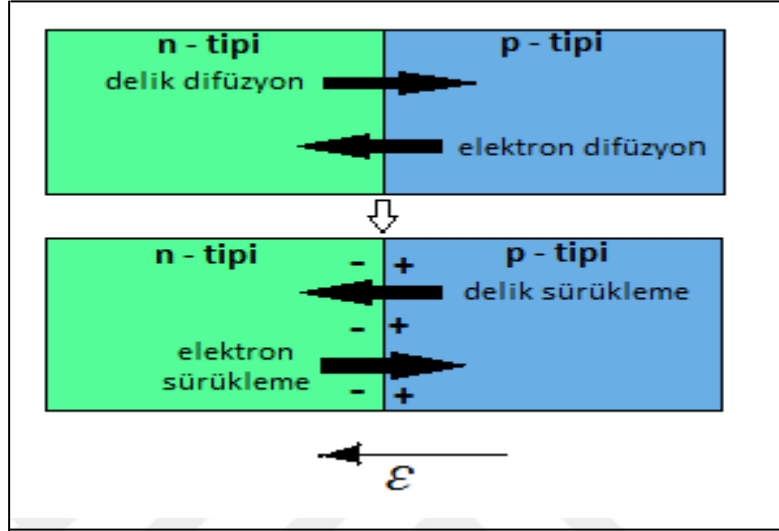
Kaynak: Ders Notları (Doç. Dr. Burak Barutçu)

3.5 p-n JONKSİYONU VE YARIİLETKEN DİYOT

Bir yarıiletken parçasının bir bölgesi p tipi, bir bölgesi n tipi olacak şekilde katkılanırsa p tipi bölgede çok sayıda bulunan delikler, n tipi bölgeye doğru ve n tipi bölgede çok sayıda bulunan elektronlar p tipi bölgeye doğru yayılmaya başlarlar. Hareket edebilen taneciklerin yüksek yoğunlukta buldukları yerden alçak yoğunlukta buldukları yerlere doğru bu şekilde yayılmalarına “-difüzyon-” denir. Difüzyon başladıktan sonra p bölgesinin n bölgesi ile birleştiği bölgede negatif yük fazlalığı, n bölgesinin p bölgesine yakın kısımlarında ise pozitif yük fazlalığı oluşur. Bunun sonucu bölgelerin temas kısmına yakın yerlerde bir elektrik alanı meydana gelir. Alan difüzyon ile doğru orantılı olarak artar. Bir süre sonra, alan tarafından elektron ve delik difüzyonu engellenir. Denge kurulduktan sonra, p-n jonksiyonunun yapısı tamamlanmıştır.

Bir p-n jonksiyonunda herhangi bir dış elektrik alan yardımı olmadan sürekli bir makroskopik elektrik alanı mevcuttur. p-n jonksiyonunun yapısı Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

Şekil 3.6: p-n jonksiyonunun yapısı



Kaynak: Elektronik (Prof. Dr. M. Sait Türköz)

Geçiş bölgesinde potansiyel elektrik büyüklüğü artarken sol tarafın p tipi kirliliği, sağ tarafında n tipi kirliliği artmaktadır. Bu olay sağ tarafın elektron potansiyeli sol tarafına eşit olana kadar sürecektir. Sağ ve sol taraflar arasındaki potansiyel farkı eşit olduğu zaman yarı iletken malzemede tünel olayının etkisi ile yasak bant aralığı (E_g) oluşur. Yasak bant aralığı, bir bağı kopartarak serbest elektron-delik çifti elde etmek için verilmesi gereken enerji miktarıdır. Geçiş bölgesi içerisinde n-tipi kısımdan p-tipi kısmına doğru elektriksel alan meydana gelir. Oluşan elektriksel alanın yönü çoğunluk taşıyıcıların karşı bölgeye geçişini engelleyecek, azınlık yüklerin ise geçişini kolaylaştıracak yöndedir. Jonksiyona gerilim uygulanmadığında akan net akım sıfırdır.

3.6 FOTOVOLTAİK DİYOTLAR

Fotovoltaik diyotlar, üzerlerine düşen ışık enerjisini elektriksel enerjiye dönüştüren yarı iletken yapılarıdır. İçeriği diğer diyotlarda olduğu gibi p-n jonksiyonuna dayanır. Elde edilecek elektriksel gücün mümkün olduğu kadar fazla olabilmesi için jonksiyon yüzeyleri büyük tutulur. Üretim sırasında belirli bir tip (n veya p tipi) yarı iletken

üzerinde ince bir tabaka biçiminde diğer tipten yarı iletken malzeme oluşturulur. İnce olan tabaka ışığın jonksiyona ulaşmasını sağlar. Jonksiyonuna ışık düşen diyottan tıkama yönünde akan akım;

$$I = I_F - I_0 (e^{V/V_T} - 1) \quad (3.22)$$

İfadesi ile hesaplanır. (3.22) denkleminde I_0 : p-n jonksiyonunun doyma akımını, I_F foton akımını, V diyot gerilimini ve V_T ısıl gerilim değerini göstermektedir. Doyma akımı sıcaklığa bağlı değişmektedir. Diyot gerilimi ise iletim yönünde kutuplamada pozitif, tıkama yönünde kutuplamada negatif değer almaktadır.

Isıl gerilim değeri (3.23) eşitliği ile hesaplanır.

$$V_T = \frac{k.T}{q} \quad (3.23)$$

Uçları açık devre ise, $I = 0$ olduğunda akım ve gerilim bağıntıları;

$$I_F = I_0 (e^{V/V_T} - 1) \quad (3.24)$$

$$V = V_T \ln \left(\frac{I_F}{I_0} + 1 \right) \quad (3.25)$$

biçiminde ifade edilir. I_F/I_0 oranı, 1'den çok büyük olduğunda;

$$V \cong V_T \ln \frac{I_F}{I_0} \quad (3.26)$$

(3.25) eşitliği (3.26) deki gibi ifade edilir.

I_F foton akımı, ışığın p-n jonksiyonuna düşmesi nedeniyle oluşan akımdır ve $I_F = k_1 \cdot L$ biçiminde ışık şiddetine bağlıdır. Bu ifade (3.26) denkleminde yerine yazılırsa;

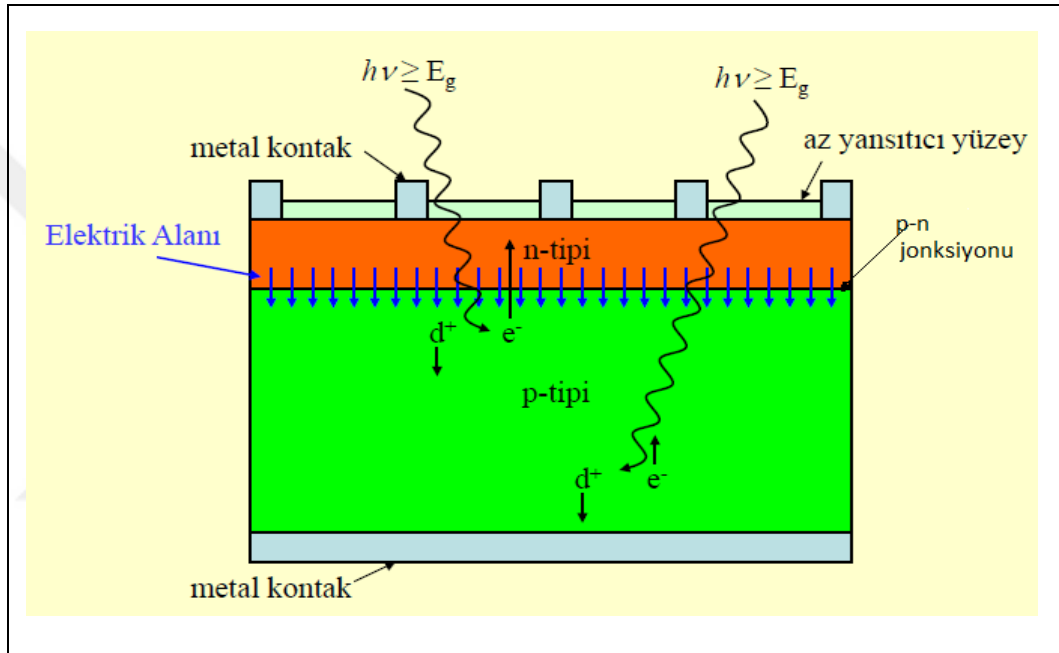
$$V \cong V_T \ln \frac{k_1 \cdot L}{I_0} \quad (3.27)$$

diyot gerilim denklemi elde edilir.

Yukarıdaki denklemlerden de görüldüğü gibi fotovoltaik diyodun uçlarından, jonksiyona düşen ışık şiddetine bağlı olarak bir gerilim alınmaktadır.

k_1 katsayısı, diyodun yapısına, ışığın dalga boyuna ve ışığın p-n jonksiyonunu üzerine geliş açısına bağlıdır. Güneş pilleri bu ilkeye göre çalışır. Sistem için gereken gerekli gerilim ve güç güneş pillerinin uygun sayıda seri ya da paralel bağlanması ile elde edilir. Fotovoltaik diyot Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

Şekil 3.7: Fotovoltaik diyot

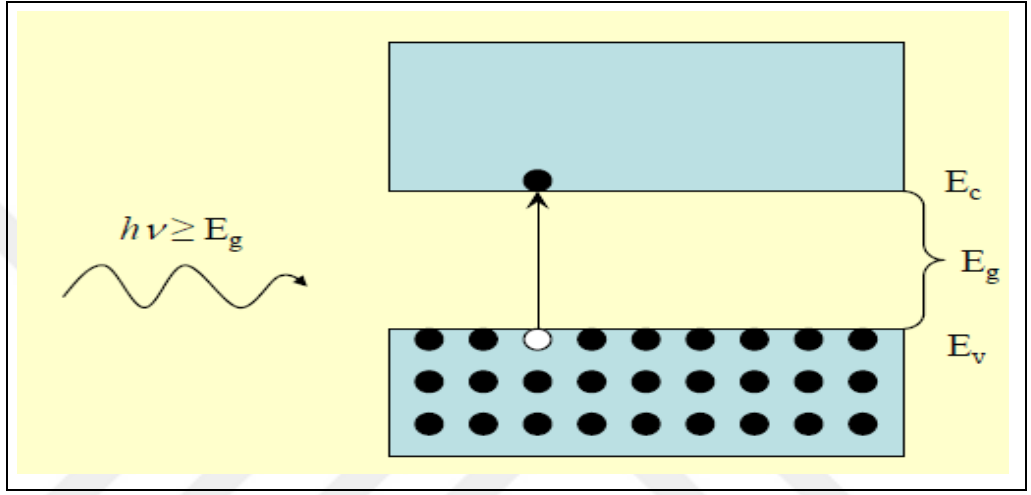


Kaynak: Ders Notları (Doç. Dr. Burak Barutçu)

Enerjisi $h\nu$ olan bir foton, p-n jonksiyonuna geldiğinde, fotonun enerjisi malzemenin bant aralığından büyükse malzeme tarafından emilecektir. Bu durumda bir delik-elektron çifti oluşacak ve elektron oluşan elektriksel alanın tersi yönünde hareket edecektir. Elektron-delik çifti oluşumundan sonra jonksiyon içerisinde elektron-delik çifti çekim kuvveti ile belirli bir süre içerisinde tekrar bir araya gelmeye çalışırlar. Elektriksel alan elektron-delik çiftinin tekrar bir araya gelmesini engeller. Yani p tipi bölgedeki elektron ve n tipi bölgedeki delik, jonksiyona ulaşabilmek için yeterli süreye sahip olmalıdır. Bu süre, önemli bir parametre olan azınlık taşıyıcısı ömrüdür. Daha büyük bir azınlık taşıyıcısı ömrü, delik-elektron çiftlerinin jonksiyonda ayrılma olasılığını büyütür. Oluşacak akımın şiddeti jonksiyona birim zamanda gelen foton sayısı (dolayısı ile ışık şiddeti) ile orantılıdır.

Foton enerjisi yarı iletkene ulaştığında valans elektrona enerjisini verir. Enerjilenen elektron geçiş bandını geçecek enerjiye ulaştı ise iletim bandına geçerek elektron hareketini yani elektrik akımını oluşturur. Şekil 3.8’de foton enerjisinin elektrona aktarımının basit çizimsel gösterimi verilmiştir.

Şekil 3.8: Foton enerjisinin elektrona aktarımı



Kaynak: Ders Notları (Doç. Dr. Burak Barutçu)

Örneğin Silisyumda, oda sıcaklığında;

E_g = 1,1 eV olduğuna göre E > E_g şartını sağlayan, λ değerleri hesaplanırsa;

$$\lambda \leq 1,128 \mu\text{m} = 11280 \text{Å} \quad (3.28)$$

görünen ışığın dalga boyu sınırları;

$$\lambda(\text{kırmızı}) = 8000 \text{Å} \text{ ve } \lambda(\text{mor}) = 4000 \text{Å} \quad (3.29)$$

olarak ifade edilir. Görünen ışık spektrumunun tamamı, mor ötesi ışınların ve kızıl ötesi ışınların bir kısmı, fotovoltaik olaya katkıda bulunabilirler.

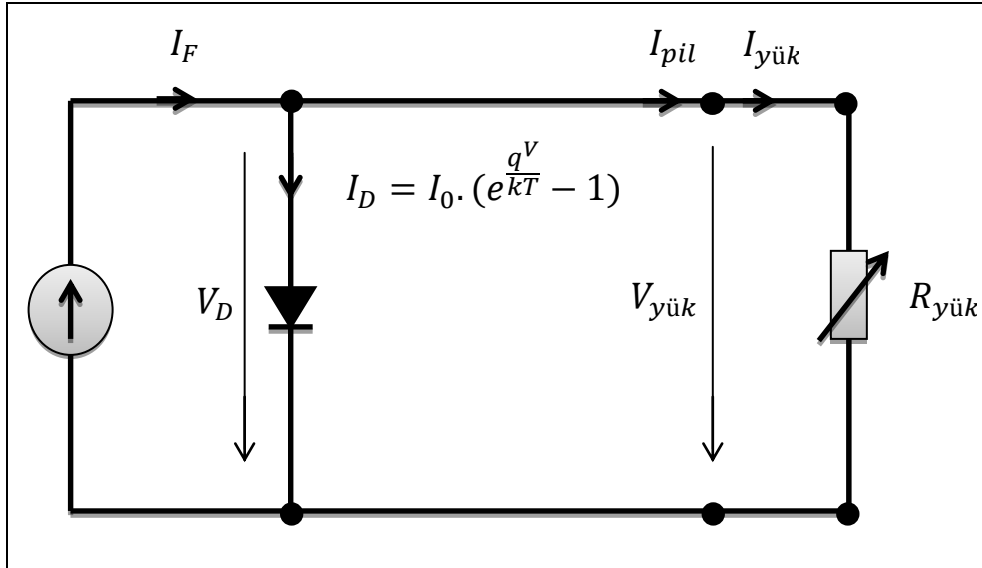
Silisyum 1,1 μm’den daha uzun dalga boylarını geçirir. Infrarede yakın dalga boylarındaki (1100 nm) fotonların %51’i, kırmızı (700 nm) civarındakilerin %33’ü ve mavi (400 nm) civarındakilerin ise %19’u elektron akımına çevrilebilir.

Güneş ışığının %23'ü doğrudan geçip gider. %77'si silikon tarafından emilir. Emilen miktarın %30'u elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Maksimum teorik verim ise %23'dür. Artık foton enerjisi ise ısıya dönüşür.

3.7 FOTOVOLTAİK HÜCRELERİN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ

Fotovoltaik hücrelerin elektrik performansını açıklarken kullanılan en önemli iki değişken açık devre gerilimi (V_{OC}) ve kısa devre akımı (I_{SC})'dır. İdeal bir güneş hücresinin kısa devre akımı ve açık devre gerilimi olabildiğince yüksek ve doluluk faktörü olabildiğince 1'e yakın olmalıdır. Fotovoltaik panel verimi ise fotovoltaik çıkış gücünün, fotovoltaik panel alanı ile panel yüzeyine gelen toplam ışık akışının çarpımına oranıdır. Bunun yanında fotovoltaik panellerin birbirleriyle kıyaslanabilmeleri için standart anma koşullarındaki maksimum güç, kısa devre akımı, açık devre gerilimi, maksimum güç noktasındaki akım ve gerilim grafiği, normal işletim fotovoltaik hücre sıcaklığı ve kısa devre akımı ile açık devre gerilimi için sıcaklık katsayılarından yararlanır. Bir fotovoltaik hücrenin elektriksel eşdeğer devre şeması Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

Şekil 3.9: Fotovoltaik hücrenin elektriksel eşdeğer devre şeması



Fotovoltaik hücrenin eşdeğer şemasında yükü devreden çıkarttığımızda uçlardaki açık devre gerilimini (V_{OC}), uçları kısa devre yaptığımızda kısa devre akımını (I_{SC}) dır. Açık devre geriliminin (V_{OC}) sıcaklık katsayısı (β) negatif ve genellikle kısa devre akımının (I_{sc}) sıcaklık katsayısından (α) büyük olduğu için ($\alpha+\beta$) terimi normalde negatiftir. Örneğin M55 c-Si PV pili için normal çalışma bölgesinde $\alpha= 0.00032$ ve $\beta= -0.0041$ negatif sıcaklık katsayısına sebep olur; $(\alpha+\beta) = -0.00378$. Kısa devre akımının, açık devre geriliminin ve maksimum gücün sıcaklığa bağımlı ifadeleri her iki ifadenin sıcaklığa bağımlı ifadeleri (3.30), (3.31), (3.32), (3.33) denklemleri ile gösterilmiştir;

$$I_{sc} = I_0(1+\alpha\Delta T) \quad (3.30)$$

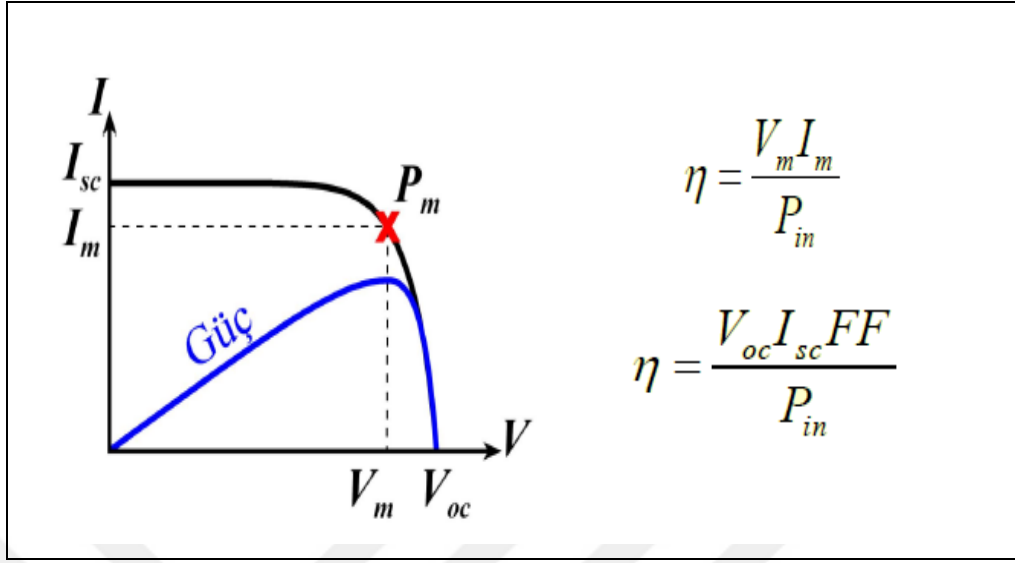
$$V_{oc} = V_0(1+\beta\Delta T) \quad (3.31)$$

$$P_{max} = I_{se} \cdot V_{oc} = I_0 \cdot V_0(1+(\alpha+\beta) \cdot \Delta T + \alpha\beta\Delta T^2) \quad (3.32)$$

$$P_{max} \cong P_0(1+(\alpha+\beta) \cdot \Delta T) \quad (3.33)$$

Bir fotovoltaik hücrenin temel fonksiyonu elektromanyetik enerjinin elektrik enerjisine çevrilmesidir. Çevrim veriminin artması fotovoltaik hücrenin kullanım alanını genişletir. Şekil 3.10'da fotovoltaik hücrenin çalışma eğrisine göre verim ifadesi gösterilmiştir.

Şekil 3.10: Fotovoltaik hücrenin verimi



Kaynak: Ders Notları (Doç. Dr. Burak Barutçu)

$$\eta_{\max} = \frac{\text{Çıkış Gücü}}{\text{Giriş Gücü}} = \frac{FF \cdot V_{OC} \cdot I_{SC}}{P_{in}} \quad (3.34)$$

biçiminde yazılabilir.

Burada Voc açık devre gerilimi, Isc kısa devre akımıdır. FF katsayısı 0.25 ile 1 arasında olup, güç üreten sisteme bağlıdır. Buradaki açık devre gerilimi ve kısa devre akımının en büyük değeri için tanımlanmaktadır. Fill faktörü (doluluk oranı) (3.35) de verilmiştir.

$$FF = \frac{\text{Gerçek Pilin Maksimum Gücü}}{\text{Pilin Maksimum Gücü}} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (3.35)$$

Fotovoltaik hücrenin akım ifadesinde yükün çıkartılıp uçların kısa devre edilmesi ile fotovoltaik hücre akımının kısa devre akımına eşitliği (3.36), (3.37), (3.38) de gösterilmiştir.

$$I_{pil} = I_F - I_D \quad (3.36)$$

$$I_{pil} = I_F - I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (3.37)$$

$$V = 0 \Rightarrow I_{sc} = I_{pil} = I_F \quad (3.38)$$

Fotovoltaik hücrede yük çıkartılıp uçlar açık devre bırakıldığında, fotovoltaik hücrenin gerilim denklemi (3.39) da gösterilmiştir.

$$I_{pil} = I_F - I_D$$

$$I_{pil} = I_F - I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

$$I_{pil} = 0 \Rightarrow V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_F}{I_0} + 1 \right) \quad (3.39)$$

Daha önce belirtildiği gibi, malzemenin bant aralığı E_g , pilin açık devre gerilimi V_{oc} ile doğru orantılıdır. Yani yüksek V_{oc} değerleri için büyük E_g gerekmektedir.

Kısa devre akımı I_{sc} ise hücre yüzeyine gelen radyasyonla yaratılan delik-elektron çifti ile orantılıdır. E_g 'den daha büyük enerjiye sahip olan bu fotonlar delik-elektron çiftleri yaratırlar. Fotovoltaik hücre içinde üretilen akım, yaratılan delik-elektron çifti sayısına doğrudan bağlı olduğundan gelen fotonların mümkün olduğu kadar azının yüzeyden yansması istenir. Fotovoltaik hücre malzemelerinin yüksek kırılma indislerine sahip olmaları ($n = 3$ veya 4 alınır) yansıtma problemini de beraberinde getirmektedir. Örneğin, birim kırılma indisine sahip olan bir ortamda (havada veya boşlukta) bulunan fotovoltaik hücreye güneş ışınları geldiğinde, R yansıtma oranı;

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} = \frac{3}{5} \cong \%36 \quad (3.40)$$

Şeklinde olur.

Mevcut enerjideki bu büyük kayıplar, uygun yansıtma tabakaları konularak azaltılır. Bu açıklamalar göz önüne alındığında fotovoltaik sistemlerde;

- 1- R katsayısını küçük tutabilmek için fotovoltaik hücre yüzeyi yapım sırasında düşük yansıtıcılığı olan bir malzeme ile kaplanır.
- 2- Fotovoltaik hücreye giren ışık ya emilir, ya da belirli bir süre sonunda hücre dışına gönderilir. Hücreye giren ışık fotonlarının yalnız malzeme tarafından emilen kısmı fotovoltaik yöntem kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Bu nedenle yalnız iç emme sınırından daha kısa dalga boylarına sahip olan fotonlar yararlı olmaktadır. Gelen fotonlardan dalga boyları emme sınırı ile aynı olanlar, faydalı enerjiye ait ilave kayıplar meydana getirmeksizin bir delik-elektron çifti yaratırlar. İstenen minimum enerji miktarından daha büyük bir enerjiye sahip bir fotonun emilmesi olayı sırasında yaratılan her delik-elektron çifti, fazla enerjisini dış ortama ısı enerjisi olarak verecektir. Bir fotovoltaik hücrede bu kayıplar güneş radyasyon spektrumu nedeni ile oluşmaktadır. Eğer hücre, emme sınırı dalga boyunda tek renkli (monokromatik) bir ışığa maruz bırakılırsa sözü edilen bu kayıplar olmayacaktır. Saf silisyum olan fotovoltaik hücreler için bu kayıplar, hücreye giren güneş enerjisinin %50'sine ulaşmaktadır. Daha geniş bant aralığına sahip malzemeler kullanılarak, bu spektrum kayıpları bir dereceye kadar azaltılabilir.
- 3- Biriktirme etkinliği, jonksiyona ulaşip emilen fotonlar tarafından üretilen azınlık taşıyıcı sayısının bir ölçüsüdür. Azınlık taşıyıcılarından bazıları jonksiyona doğru yayılırken diğerleri ise uzaklaşmakta ve hücrenin iç bölgesi veya hücre yüzeyinde yeniden birleşmektedirler. Bir silisyum hücrede biriktirme etkinliği %60 ile %70 civarındadır. Dolayısıyla hücrelerin arzu edilen teorik verime ulaşamamalarının en büyük sebeplerinden birinin, taşıyıcıların yeniden birleşmeleri olduğu söylenebilir. Silisyum dışında kullanılan diğer fotovoltaik hücre malzemelerinde, yeniden birleşme kayıpları daha fazla olmaktadır.
- 4- Fotovoltaik hücrelerin meydana getirdiği gerilim, jonksiyonun her iki tarafındaki azınlık taşıyıcıları fazlalığından oluşmaktadır. Bununla birlikte gerilim, delik-elektron çiftlerinin enerjisinden oldukça küçüktür. Örneğin, silisyum malzemede bir delik elektron çiftinin enerjisi yaklaşık 1.2 eV olup, bu da bant aralığı enerjisidir. Maksimum güç şartlarında ve tamamen gün ışığı altında, bir silisyum

hücrenin gerilimi ise 0.4 V değerindedir. Bu nedenle hücre, delik-elektron çiftleri tarafından depo edilen enerjinin sadece bir kısmını faydalı enerjiye dönüştürebilmektedir.

Jonksiyon kaybı olarak adlandırılan bu kayıp, azınlık taşıyıcı yoğunluğu çoğunluk taşıyıcı yoğunluğuna yaklaştığında, sonsuz ışık şiddeti şartlarına uygun şekilde yok olmalı ve gerilim de enerji aralığına yaklaşmalıdır. Eşdeğer devreden görüldüğü üzere, kısa devre akımı kısmen yük üzerinden kısmen de jonksiyon üzerinden ileriye doğru akmaktadır. Bu nedenle gerilim ve jonksiyon kayıpları, jonksiyonun ileri akım-gerilim karakteristiklerine bağlı olur. p-n jonksiyonlar teorisi, ileri akımın artan bant aralığı ile üstel olarak azalması gerektiğini ifade eder. Bundan dolayı jonksiyon kaybı, artan bant aralığı ile azalabilmektedir.

- 5- Kayıpların sonucusu ise, akımın elektrotlara ulaşmak için alacağı yol jonksiyonun ardındaki çok ince yüzeyin direncinden meydana gelmektedir. Uygulamada, bir silisyum hücrede bu iç direnç birkaç ohm'dur. İncelenen diğer kayıplardan farklı olarak direnç kaybı hücrede kullanılan malzemeye bağlı bir özellik olmayıp hücre yapımında kullanılan geometrinin bir sonucudur.
- 6- Fotovoltaik hücre sıcaklığının çevrim verimine olan etkisidir. Kısa devre akımının sıcaklığa karşı değişimi ile açık devre geriliminin sıcaklığa karşı değişimi karşılaştırıldığında gerilimin akıma göre sıcaklık bağımlılığının yaklaşık on kat fazla olduğu gösterilmiştir.

3.8 FOTOVOLTAİK PANEL ÇEŞİTLERİ VE TEKNİK ÖZELLİKLERİ

Fotovoltaik panellerin yapısında kullanılan en yaygın yarı iletken malzeme silisyumdur. Panellerde kullanılan silisyumun yapısına bağlı olarak başlıca iki farklı fotovoltaik panel söz konusudur. Bunlar tek kristalli silisyum ve çok kristalli silisyum paneller şeklinde sınıflandırılmaktadır.

3.8.1 Tek Kristalli Silisyum Fotovoltaik Panel

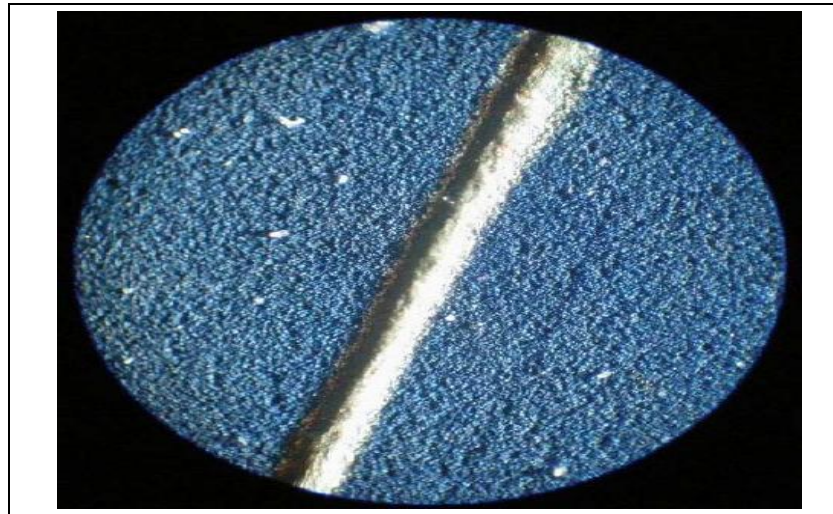
Tek kristalli silikon (Mono kristal - Silisyum), metalürjik işleme ile külçe (ingot) olarak adlandırılan uzun çubuklar haline getirilebilmektedir. Bu çubuklar plakalara bölündükten sonra, elektronik endüstrisinde kullanılan hammaddeyi oluşturmaktadır. Saflık derecesi ne kadar fazla olursa ürün o kadar verimli ancak pahalı olacaktır. Çapı 15 cm'ye ulaşan, saflık derecesi yüksek olan bu külçeler "Czochralski Çekmesi" ve "Yüzer Bölge" yöntemi denilen iki kristal oluşum yöntemi ile elde edilir. Bu külçeler çok güç bir biçme işlemiyle, ince rondelalar halinde (75-100 mm çap, birkaç yüz mikrometre kalınlık) kesilir. Bu kesme işlemi sırasında külçenin yaklaşık yarısı talaş olarak ziyan olur. Külçenin yapım sürecinin uzun olması ve kesme işlemi sırasında yarısının ziyan olması nedeniyle maliyetleri yüksektir.

Bu ince rondelalar, güneş hücresinin gövdesini oluşturmakta kullanılır. Bu amaçla bir çok tamamlayıcı işlem uygulanır.

- Yüzeysel katkılamayla bir eş-eklem gerçekleştirme,
- Metal kontaktları çökeltme,
- Koruyucu kılıflarla zırhlama.

Rondelaların kesilmesi ile elde edilen ince rondela kesitlerine ait yapı (75-100mm çap, birkaç yüz mikrometre kalınlık) Şekil 3.11'de gösterilmiştir.

Şekil 3.11: İnce rondela kesitleri



Kaynak: Ders Notları (Doç. Dr. Burak Barutçu)

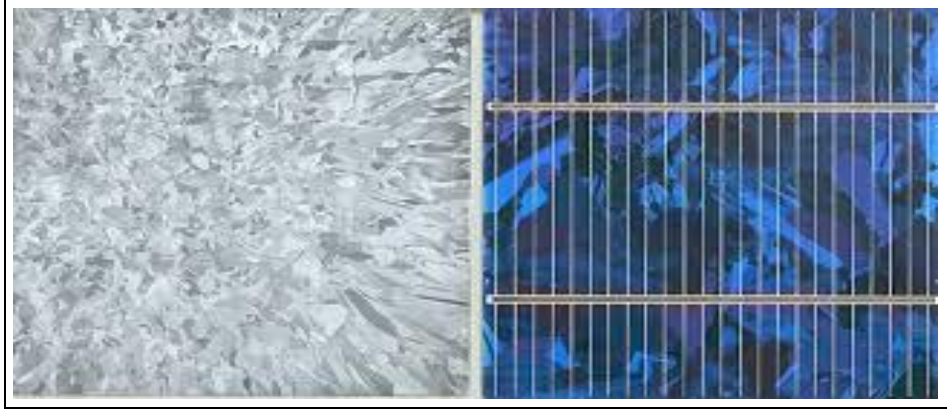
Tek kristalli silisyumdan yapılmış güneş hücreleri çok iyi bir verim sağlar. Bu verim laboratuvarında %23 ve üretimde %13-14 kadardır.

Fotovoltaik modüller genelde çok sayıdaki bileşenin katmanlar halinde üst üste yerleştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Birinci ya da taban katman, sonraki katmanlar için bir destek gibi hareket eden düşük termal genişleme katsayılı bir yalıtım malzemesinden yapılmaktadır. İkincil katman, ince plastik bir levhadır (Etylenvinylacetat kopolimer). Üçüncü katman, birbirine elektriksel olarak bağlanmış fotovoltaik hücrelerden oluşmaktadır. Dördüncü katman, yine Etylenvinylacetat kopolimerden yapılmaktadır. Son katman ise oldukça şeffaf ve temperlenmiş camdan oluşmaktadır. Monte edilmiş olan sandviç, hızlı bir kalıp döküm prosesiyle vakumun oluşturulduğu bir katman oluşturma birimine gönderilmekte ve modül, Etylenvinylacetat eriyene kadar ısıtılmakta ve son olarak bileşenler kalıcı bir şekilde bir arada sabitlenmektedir. Nihai işlemler, genelde modülün bir alüminyum çerçeveye sabitlenmesini ve güneş pilinin arkasına elektriksel bir kontak kutusunun bağlanmasını içermektedir.

3.8.2 Çok Kristalli Silisyum Fotovoltaik Panel

Silisyum güneş hücrelerinin üretiminde harcanan enerji miktarını ve maliyeti azaltmak için tek kristalli “Czochralski” silisyumdan daha düşük kalitede (dolayısıyla düşük saflıkta) bir malzeme üretmeye ve kullanmaya yönelik teknikler geliştirilmiştir. Böylece gerek külçe, gerek biçme işlemini ortadan kaldıran, doğrudan levha biçiminde (şerit halinde kristalleşmeye dayanan yeni yöntemler) çok kristalli silisyum(polikristal silisyum) elde edilmiştir. Verimin daha düşük olmasına rağmen çok kristalli silisyumdan yapılan güneş hücreleri önem kazanmaktadır. Çok kristalli silisyum yapısı Şekil 3.12’de gösterilmiştir.

Şekil 3.12: Çok kristalli silisyum yapısı



Kaynak: Ders Notları (Doç. Dr. Burak Barutçu)

Çok kristalli silisyum panellerin verimi tek kristalli modüllere göre daha düşük olduğundan aynı güç miktarının üretilebilmesi için daha büyük yüzey alanı gerekmektedir. Bu nedenle panellerin yerleştirileceği yüzey alanı küçük ise tek kristalli modüller tercih edilmelidir. Ancak yerleştirilecek alan ile ilgili bir kısıt temel seçim kriteri, yerleştirilecek panellerin modüllerin maliyetidir.

4. KARŞILAŞTIRMA VE BULGULAR

4.1 MALİYET VE GÜÇ ANALİZİ

Fotovoltaik bir sistem projesi, iki aşamadan oluşur. Bu aşamalar sırasıyla;

- a. Topografik, jeomorfolojik ve güneş ışınım çalışmalarını içeren fizibilite çalışması,
- b. Uygulama aşaması.

şeklinde belirlenmiştir. Birinci aşamadaki fizibilite çalışması;

- i. Teknik bakış açısı ile projenin nasıl gerçekleştirilebileceğine ilişkin değerlendirmeleri,
- ii. Finansal bakış açısı ile projenin en uygun maliyet ile yapılabilirliğine ilişkin değerlendirmeleri,
- iii. Sistem kurulumunun ne kadar süreceğine ilişkin değerlendirmeleri kapsamaktadır.

Buradaki amaç, projenin hem teknik hem de maliyet bakımından başarılı olup olmayacağını değerlendirmesidir. Bu çalışmalar sırasında, istenen sonuç elde edilene kadar gerekli revizeler yapılmaktadır. Fizibilite çalışması genelde iş planının çekirdeği olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma, gerekli kredilerin ve izinlerin alınması bakımından önemlidir.

Uygulama aşaması olan ikinci aşama, kurulacak sistemin devreye alınmasına kadarki adımlardan oluşur. Bu aşama, donanımların satın alınması, gerekli sözleşmelerin yapılması, ürün montajlarının yapılması, test, şebeke bağlantısı ve üretilen enerjinin satılması adımlarını içermektedir.

4.1.1 Fizibilite Çalışması

Fotovoltaik bir projeye ilişkin yaklaşım, geniş kapsamlı ve çok sayıdaki akademik disiplinle ilişkilidir. Dolayısıyla projenin yürütülmesi için proje katılımcılarının mesleki yeterlilikleri önemlidir. Uygulanacak olan projenin bütünü için uygulama aşamalarında, temel referans noktasının kullanıcılar olduğu ve sistemin, kullanıcıların tüm

ihtiyaçlarını karşılaması gerektiği unutulmamalıdır. Sistemin ayrıca teknik, finansal ve zamansal kısıtlamalara uygun olması gerekir. Bu nedenle aşağıdaki kavramlar tanımlanmalıdır;

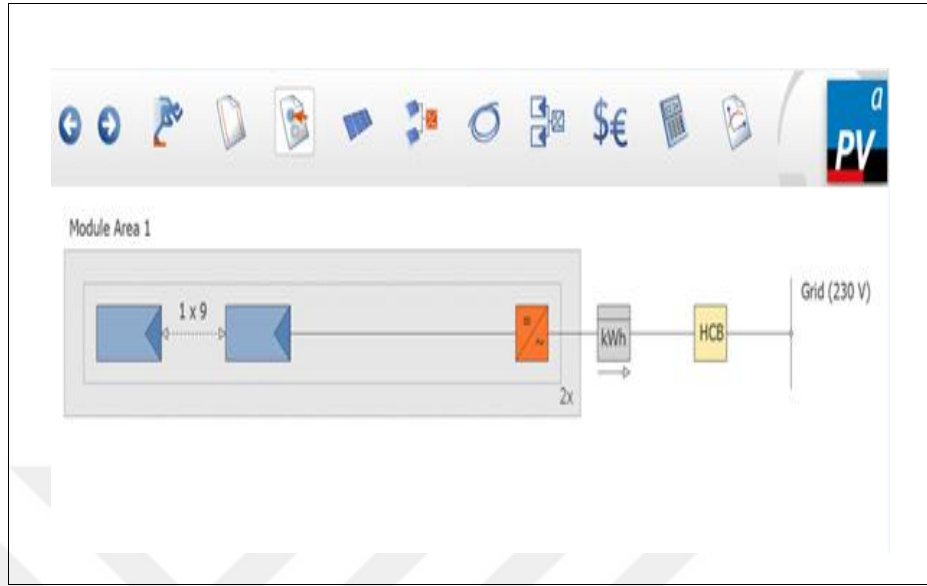
- a. Sistemin elektrik kapasitesi,
- b. Satış şartları ve yatırım getiri senaryosu,
- c. Yetkiler ve gerekli izinler.

Fotovoltaik bir sistemin enerji kapasitesi, ortamın güneş ışınım elverişliliğiyle; başka bir deyişle, sistemin inşa edilmesinin planlandığı bölgedeki güneş ışınım miktarı, gölgelenme ve iklim koşulları ile bire bir ilişkilidir. Bölgenin beklenen ışınım potansiyelinin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için, bölgenin coğrafi koordinatlarının doğru bir biçimde belirlenmesi ve yine bu koordinatlara göre güneşin konumunun bilinmesi önemlidir (Güneşin yükseklik açısı, azimutu, saat açısı ve panelin yatayla yaptığı açı ve diğer güneş açıları).

Sistemi kurmak için yapılan fizibilite çalışması aşamasındaki; güç analizi PVSOL benzetim programı ile gerçekleştirilmektedir. PVSOL programı, binaların üç boyutlu tasarımlarının yapılabilmesi, piyasadaki panel ve eviricilere ulaşma imkanı, modül-evirici bağlantı şekilleri, yıllık verimlilik tahmini ve fizibilite raporlarını sunmaktadır. Ayrıca, iklim koşulları bilgisi, gölgelenme simülasyonu ve modül-evirici bağlantı şekillerini tasarlama imkanı bulunmaktadır.

PVSOL programında, programın veri tabanından çağırılan evrensel açılar matematiksel ifadeleriyle incelenmiştir. PVSOL programının çalıştırılması sırasındaki çeşitli ekran görüntüleri Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de gösterilmiştir.

Şekil 4.1: PVSOL benzetim programının çalıştırılması sırasında ekran görüntüleri



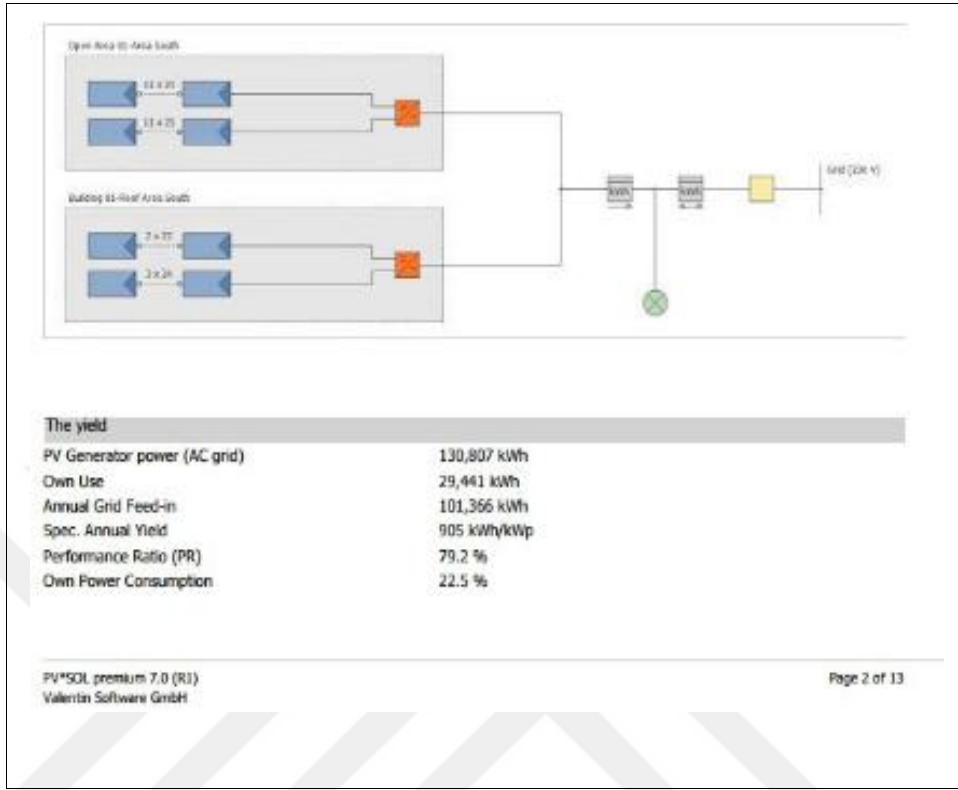
Kaynak: PVSOL benzetim programı

Şekil 4.2: PVSOL benzetim programının çalıştırılması sırasında ekran görüntüleri



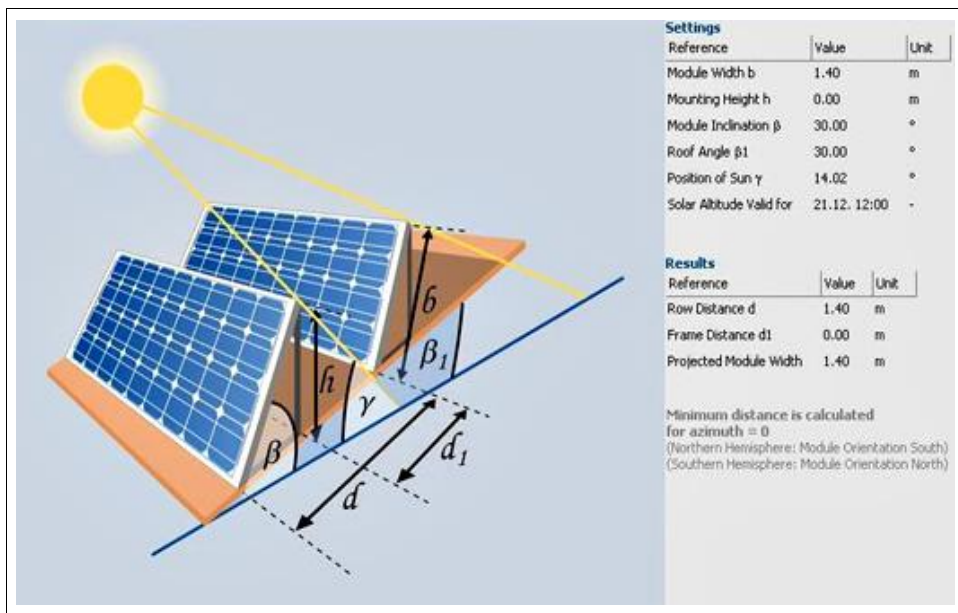
Kaynak: PVSOL benzetim programı

Şekil 4.3: PVSOL benzetim programının çalıştırılması sırasında ekran görüntüleri



Kaynak: PVSOL benzetim programı

Şekil 4.4: PVSOL benzetim programının çalıştırılması sırasında ekran görüntüleri



Kaynak: PVSOL benzetim programı

4.1.1.1 Göksel kürelerin devinimi: dünya-güneş arasındaki mekaniksel ve ışınımsal açıların geometrik anlamları

Johannes Kepler, gezegenlerin güneşin etrafında sabit hızla dönüş teorisini değiştirir. Kepler'e göre; gezegenler daire değil elips şeklindeki yörünge üzerinde hareket ederler. Elipsin, dairede olduğu gibi bir odak noktası değil, iki odak noktası vardır. Güneş de her gezegenin eliptik yörüngesi için bu iki odak noktasından birinde bulunur. Diğer yasası ise; bir gezegeni güneşe bağlayan doğru parçası, elips biçimindeki bu yörünge üzerinde, eşit zaman aralıklarında eşit alanlar tarar. Bu iki yasanın ışığında, dünya güneşe yakın aralıktan geçerken hızı fazla, uzak aralıktan geçerken hızı daha düşük olacaktır.

Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü için kullanılan güneş panellerinde en önemli olgu, panellerin doğru hesaplanmış açı ile yerleştirilmesi ve elde edilecek enerjinin veriminin maksimum olmasıdır. Bu açıların geometrik olarak belirlenmesi ve hesaplamaları sırasında güneş ışınlarının dünyaya geliş açıları ve dünyanın (N-S) eksenini etrafındaki dönüşü birlikte incelendiğinde, Aristoteles'in ve Copernicus'un evren sistemlerinin her ikisinden de faydalanılır.

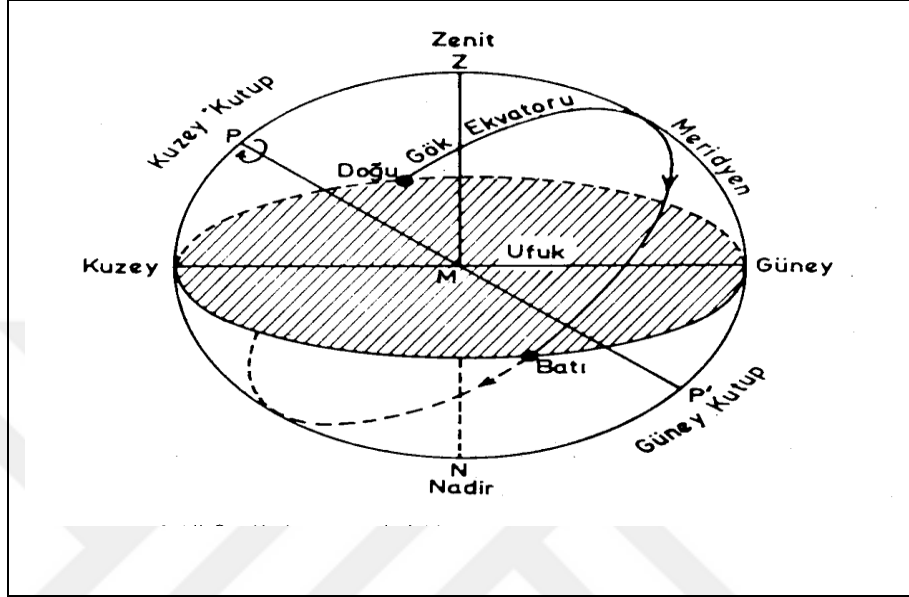
Günlük Hareket; gök küresine serpilmiş olan yıldızların belirli bir eksen etrafında topluca dönme hareketidir. Her gün tekrar eden bu harekette ister yer dönsün ister gök dönsün, bu dönmenin iki eksenini vardır. Bu eksenin dünyayı deldiği noktalara "dünyanın kutupları", göğü deldiği noktalara da "göğün kutupları" denir. Bu kutupların bir tanesinin yakınında kutup yıldızı vardır. Dolayısıyla bu kutba kuzey kutbu, diğeri ise güney kutbu olarak adlandırılmıştır.

Küresel astronomi, ilk önce gök kubbesini bir küre ve gözlemciyi de (rasıdı) onun merkezinde duruyormuş gibi kabul eder. Bazen de gözlemcinin yeri olarak, yerin (dünyanın) merkezi ele alınır. Gerçekte bu yaklaşım doğru olmasa da gök küresinin sonsuz yarıçaplı olduğunu bir evrende, varsayımda büyük bir hata yoktur (Kızılırmak 1964, s.54).

Ufuk, gözlemcinin bulunduğu noktadan yer küresine çizilen teğete ufuk çizgisi; Zenit-Nadir doğrusuna dik olan bu teğetin gökküre ile kesişiminde, gözlemci merkez olmak üzere, gözlemci-gökküre kesişim noktası arasındaki yarıçapın taradığı alana ufuk ya da

ufuk düzlemi denir. Ufuk düzleminin yerküre üzerindeki bir gözlemciye göre tanımlanması Şekil 4.5’de gösterilmiştir.

Şekil 4.5: Ufuk düzleminin yerküre üzerindeki bir gözlemciye göre tanımlanması



Kaynak: Atagüngüz, G., Güneş Enerjisi Temelleri ve Uygulamaları

Zenit ve Nadir noktalarını belirlemek için dünya (yerküre) üzerinde herhangi bir noktadaki çekül doğrultusu, gökküreyi iki noktada keser. Bunlardan biri yukarıda (tepede) diğeri ufkun altındadır. Yukarıdakine Zenit, aşağıdakine ise Nadir noktaları denir.¹

Gök küresine serpilmiş olan yıldızların belirli bir eksen çevresinde döndükleri gözlenir. Aslında dönen yerküredir ve bunun sunucunda da yıldızlar ve gök küre dönüyormuş gibi görünür. Dönme eksenine dik olan ve yerküre merkezinden alınan kesit düzlemine ekvator düzlemi; bu düzlemin yer küre ile arakesitine yer ekvatoru, gök küre ile arakesitine ise gök ekvatoru denir.

Günlük harekette yıldızlar genel olarak doğarlar, ufkun üstünde bir zaman yükselirler, meridyene en yüksek noktaya erişirler (üst geçiş) sonra alçalırlar ve batarlar. Aynı

¹ Zenit ve Nadir sözcükleri; Arapçadan batı dillerine geçmiştir. Zenit noktasına başucu noktası, Nadir noktasına da ayakucu noktası biçiminde ifade edilir.

harekete ufkun altında devam ederler, meridyende en alçak noktaya erişirler (alt geçiş) ve sonra tekrar yükselerek ufkun üstüne çıkarlar. Bir yıldızın ufkun üstünde çizdiği çemberin ufkun üstünde kalan parçasına gün yayı, ufkun altında kalan parçasına ise gece yayı denir. Bu yayların belirttiği düzlemler dönme eksenine diktir. Ekvatorda bulunan bir yıldızın ait gün ve gece yayları eşittir. Bu nedenle ekvatorunda bulunan bir yıldızın ufuk düzleminin tam doğu noktasından doğar ve batı noktasından batar. Ufkun üstünde kalma süresi 12 saattir.

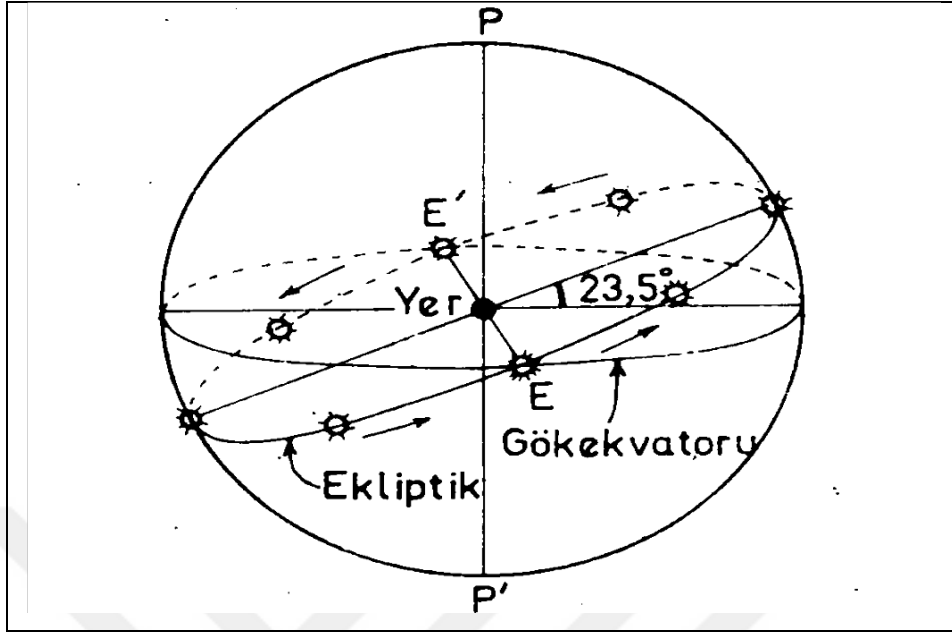
Güneş de dünya merkezli günlük hareketinde doğar, ufukta yükselir, sonra alçalır ve batar. Bir yıl boyunca yapılan gözlemlerde güneşin günde dört dakika geri kaldığı ve gün-gece yaylarının devamlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Yıldızların hareketi ile güneşin (görünen) hareketi arasındaki bu fark, yerkürenin güneş çevresinde dolaşmasından ve ayrıca güneşin yerküreden yıldızlar kadar uzak olmamasından kaynaklanmaktadır (Kızılırmak 1964, s.58).

Bir yıl boyunca güneşin meridyenden her gün 1^0 (4 dakika) geri kaldığı noktalar belirlenirse, gökküresi üzerinde bir çember elde edilir. Astronomide oluşan bu daireye tutulma dairesi (ekliptik) denir.

Tutulma dairesi, ekvatora göre $23^0 27'$ eğiktir. Güneş 21 Mart ve 23 Eylül'de bu iki dairenin kesişme noktaları olan ve bahar (ekinoks) noktaları denilen yerlerde bulunur. Bu tarihlerde güneş ekvatordadır. Güneşin ekvatora nazaran açılma uzaklığı, kuzey yarımküreye için 21 Haziran'da en büyük ($+23^0 27'$), 21 Aralık'ta ise en küçüktür ($-23^0 27'$). Bu iki tarihten birincisi yaz dönencesi (Yengeç Dönencesi), diğeri kış dönencesi (Oğlak Dönencesi) dir ve bu tarihler gün dönümü adıyla da anılır. İlkbahar başlangıcı olarak kabul edilen 21 Mart'tan sonra güneş ekvatorundan uzaklaşmaya başlar, yaz dönencesinde duraklar ve tekrar ekvatora yaklaşır. Güz başlangıcı olan 23 Eylül'de yeniden ekvatora gelir ve sonra güneye doğru ilerler. Kış dönencesinden $-23^0 27'$ lık bir uzaklığa erişir ve burada da durakladıktan sonra tekrar ekvatora yaklaşır (Kızılırmak 1964, s.58).

Tutulma dairesi (ekliptik) ve ekinoks noktaları Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

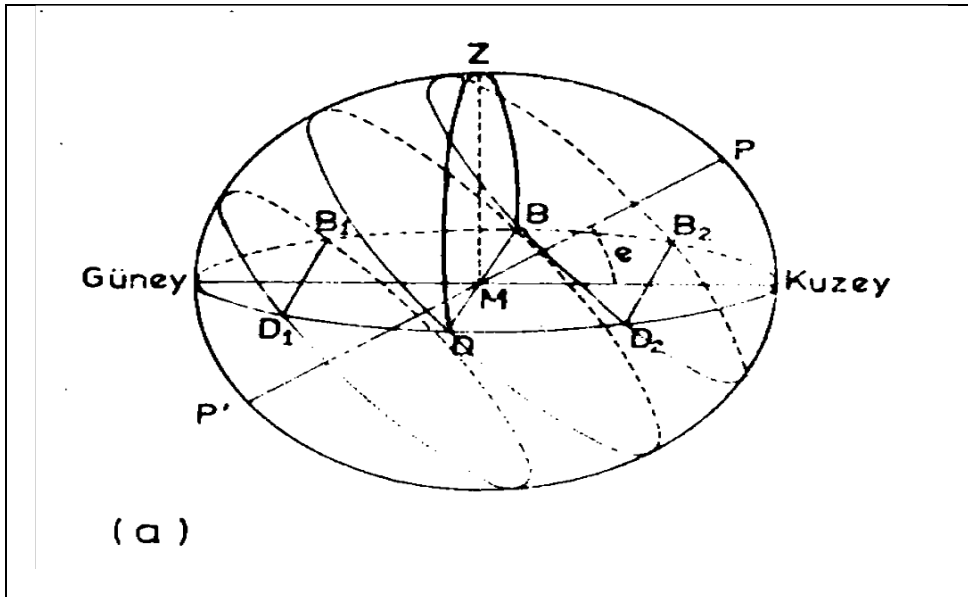
Şekil 4.6: Tutulma dairesi (ekliptik) ve ekinoks noktaları



Kaynak: Doç. Dr. Abdullah Kızılırmak, Astronomi Dersleri, Cilt-I, Küresel Astronomi ve Gök Mekanîği

Güneşin dünya merkezli hareketi; doğuşu ve batışı Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

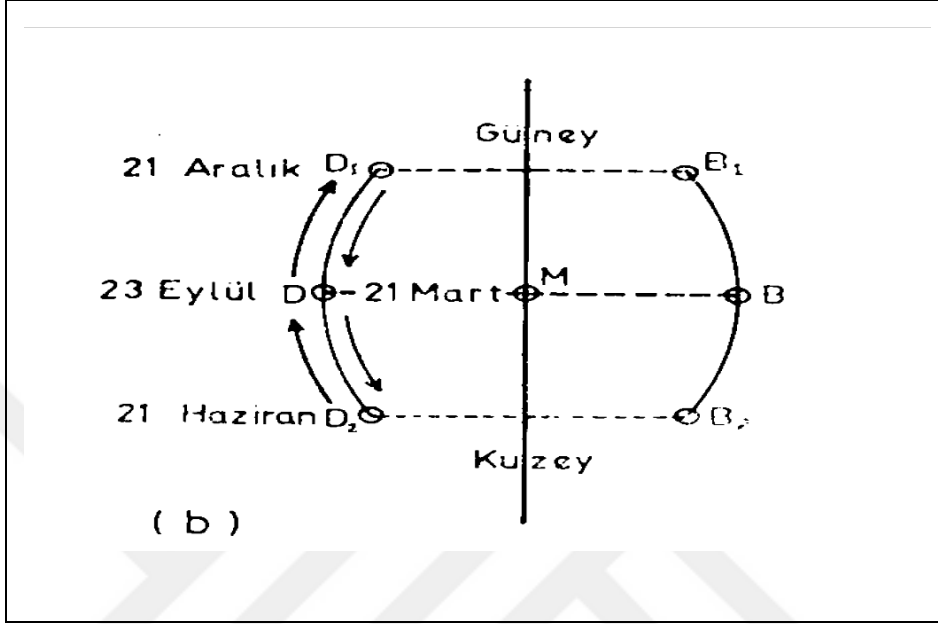
Şekil 4.7: Güneşin doğuşu ve batışı (dünya merkezli güneş hareketi)



Kaynak: Doç. Dr. Abdullah Kızılırmak, Astronomi Dersleri, Cilt-I, Küresel Astronomi ve Gök Mekanîği

21 Aralık kış dönencesi, 21 Haziran yaz dönencesi ve ekinoks noktaları Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

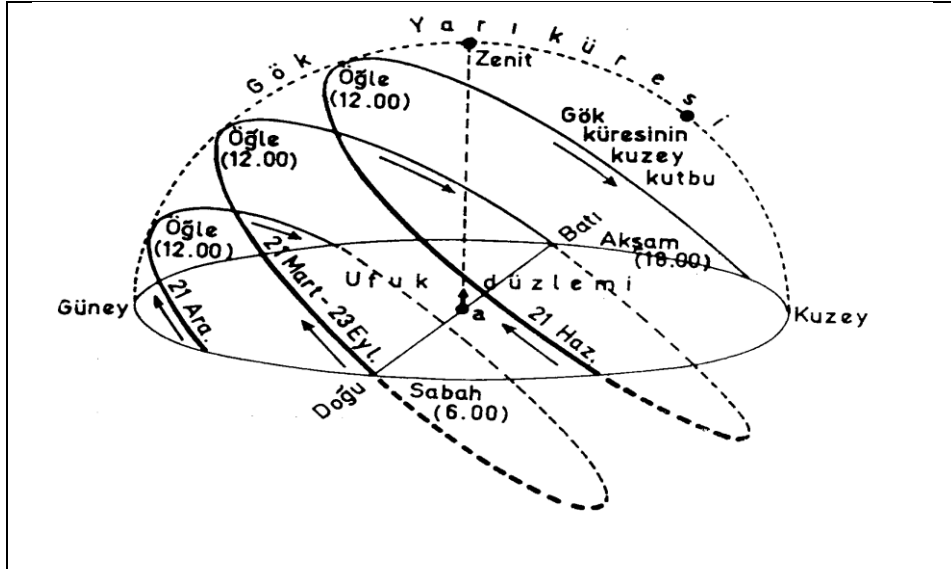
Şekil 4.8: 21 Aralık, 21 Haziran ve ekinoks noktaları



Kaynak: Doç. Dr. Abdullah Kızılırmak, Astronomi Dersleri, Cilt-I, Küresel Astronomi ve Gök Mekanığı

Doğuş ve batış noktalarının yıl boyunca yer değiştirmesi ise Şekil 4.9’da gösterilmiştir.

Şekil 4.9: Doğuş - batış noktalarının yıl boyunca yer değiştirmesi



Kaynak: Doç. Dr. Abdullah Kızılırmak, Astronomi Dersleri, Cilt-I, Küresel Astronomi ve Gök Mekanığı

4.1.1.2 Güneş açıları

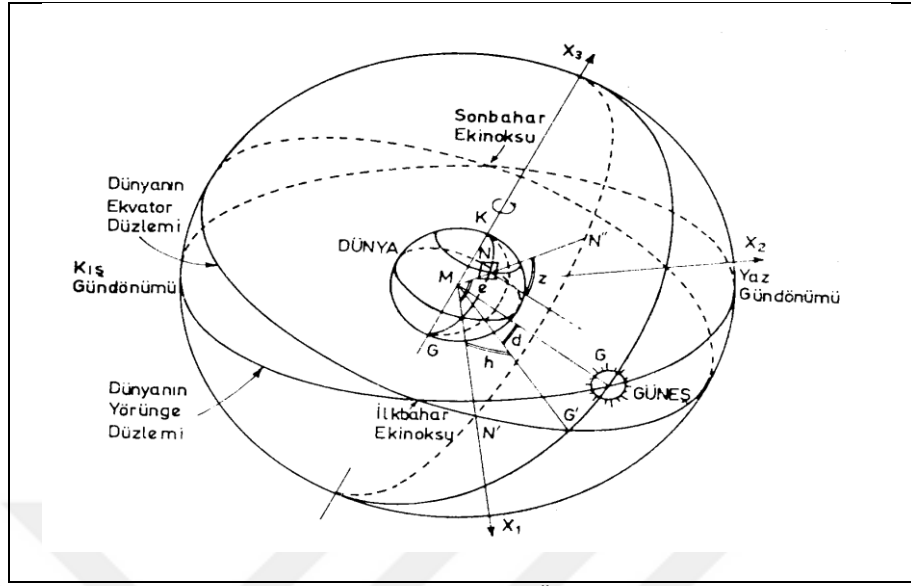
Güneş enerjisi, güneşteki gazının helyuma dönüşmesi şeklindeki füzyon sürecinden açığa çıkan ışınım enerjisidir. Termonükleer bir reaktör olan güneşten çeşitli dalga boylarında enerji yayılmakta (62 MW) ve güneşin bütün yüzeyinden yayılan enerjinin sadece iki milyarda biri yeryüzüne gelmektedir. Dünyaya güneşten 150 milyon km kat ederek gelen enerji, dünyada bir yılda kullanılan enerjinin yaklaşık 15000 katıdır.

Güneş enerjisinin atmosfer dışındaki ışınım değeri yaklaşık 1370 W/m^2 'dir. Güneş enerjisinin yeryüzündeki dağılımı dünyanın şekli nedeniyle büyük farklılıklar göstermekte olup, dünyaya gelen ortalama güneş enerjisi ($0-1100 \text{ W/m}^2$) aralığındadır.

Güneş radyasyonunun enerji olarak %46'sı spektrumun kızıl ötesi bölgesinde, %45'i görünür ışık bölgesinde ve geri kalan yüzdesi ise mor ötesinde bulunur. Güneş ışınımının tamamı yeryüzüne ulaşamaz, %30 kadarı dünya atmosferi tarafından geri yansıtılır, %50'si atmosferi geçerek dünya yüzeyine ulaşır. Güneşten gelen ışınımın %20'si ise, atmosfer ve bulutlarda tutulur. Dünyaya gelen bütün güneş ışınımı, sonunda ısıya dönüşür ve uzaya geri verilir.

Dünya üzerindeki herhangi bir noktaya göre güneşin gökyüzündeki konumu gün ve yıl boyunca değişir. Güneş-dünya arasındaki açıları belirlerken dünyanın kendi ve güneş etrafındaki hareketini, konumsal yapısına göre daha iyi algılayabilmek için dünya merkezli Gökküre-güneş hareketi referans alınır (Aristoteles Evreni). Gökküre üzerinde güneş açıları Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

Şekil 4.10: Gök küre üzerinde güneş açıları



Kaynak: Dr. Abdurrahman Kılıç, Doç. Dr. Aksel Öztürk, Güneş Enerjisi

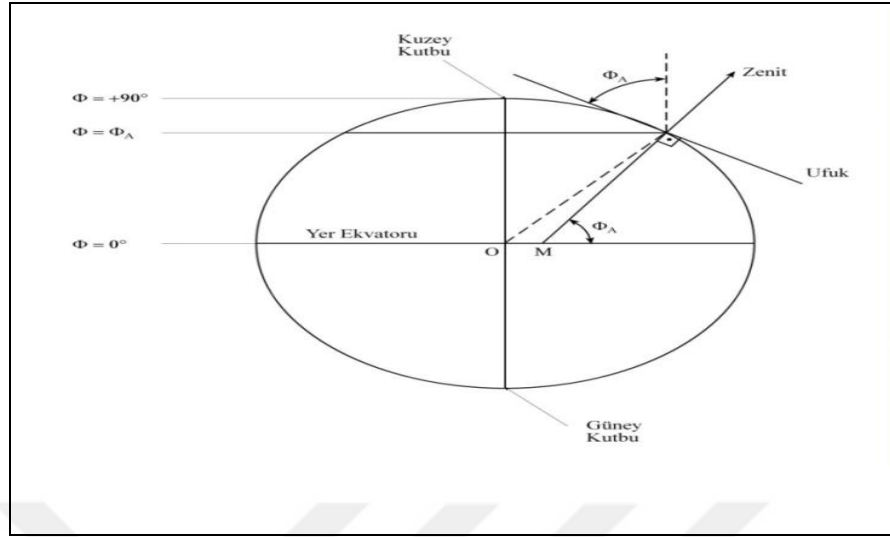
Yeryüzündeki bir N noktasına gelen direkt güneş ışınımı doğrultusu, o yerin enlemi, ϕ yerin enlem açısı, ω saat açısı ve δ güneşin deklinasyon açısı biliniyorsa belirlenebilir.

Enlem Açısı (ϕ): Göz önüne alınan yeri (N), dünya merkezine (M) birleştiren doğrunun dünyanın ekvator düzlemi ile yaptığı açıdır. (NMN') açısıdır. Ekvatoru referans almak üzere, açısal büyüklük kuzeye doğru (+) işareti ile, güneye doğru (-) işareti ile ifade edilir. Kuzey kutbu için +90 (K), güney kutbu için -90 (G) olur.

Aslında enlem açısı ya da coğrafi enlem dairesi tanımı için yerküre üzerinde herhangi bir noktada gözlemci olduğunu düşünelim. Gözlemcinin olduğu bu noktaya teğet bir düzlem yerleştirdiğimizde, bu düzleme teğet noktasından dik bir doğrunun ekvator düzlemiyle yaptığı açı diye tanımlanır. Oysaki dünya küre biçiminde değil “geoid” biçimindedir.

Bu nedenle yerküreye teğet olan bir düzlemin teğet noktasından geçen normali dünya merkezinden geçmez. Enlem açısını bulabilmek için, gözlemcinin bulunduğu yerden yerküre eksenine (kuzey-güney kutup eksenine) paralel bir doğru çekildiğinde, teğet düzlem ile bu doğru arasındaki açı, o yerin (noktanın) enlem açısını (ϕ) verir. Yer kürenin enlem dairelerinin tanımı Şekil 4.11’de gösterilmiştir.

Şekil 4.11: Yer kürenin enlem dairelerinin tanımı



Kaynak: Prof. Dr. Ing. Gürbüz Atagündüz, Güneş Enerjisi Temelleri ve Uygulamaları

Saat Açısı (ω): Göz önüne alınan yerin boylamı ile güneşi dünya merkezine birleştiren doğrunun, yani güneş ışınlarının belirttiği boylam (Güneş boylamı denilebilir) arasındaki açıdır. Güneşin ve göz önüne alınan noktanın gök küre ekvator düzlemindeki izdüşümleri alınırsa NMG' açısı saat açısıdır.

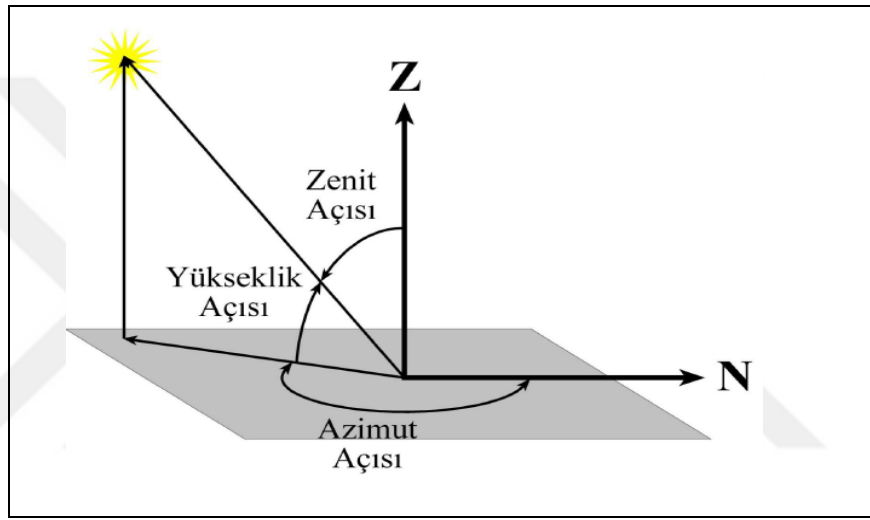
Saat açısı; güneş boylamının göz önüne alınan yerin boylamı ile aynı olduğu güneş öğlesinden itibaren ölçülür. Öğleden önceki (-), öğleden sonraları (+) alınır. İki boylam arası 15° 'dir. Zaman olarak 1 saate denk gelir.

Deklinasyon açısı (δ): Güneş ışınlarının ekvator düzlemiyle yaptığı açıdır. Şekil.4.10 'da ki (GMG') açısıdır. Bu açı dünyanın dönme ekseninin, yörünge düzlem normali ile yaptığı ($23^\circ 27'$)'lik açıdan ileri gelir. Ekinoks noktalarında 21 Mart ilkbahar ekinoksu (K), 22 Eylül sonbahar ekinoksu (G)'de deklinasyon açısı sıfır olur ve gündönümü noktalarında (21 Haziran yaz gündönümünde $+23,45^\circ$ ve 22 Aralık kış gündönümünde $-23,45^\circ$) mutlak değerce maksimum olur. Deklinasyon açısı: $-23,45^\circ < \delta < +23,45^\circ$ aralığında değişir.

Zenit Açısı (z) : Yatay bir düzleme direkt gelen güneş ışınlarının doğrultusu ile yatay düzlemin normali arasındaki açıya zenit açısı denir. Diğer bir ifade ile güneş ışınlarının yatay düzleme geliş açısıdır.

Güneş ışınları yatay düzleme dik geldiğinde, normalle paralellik oluşturduğundan $z=0^0$ 'dır. Güneşin doğusunda ve batışında $z=90^0$ 'dır. Güneş ışınlarının yere geldiği konuma göre oluşturduğu açılar Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

Şekil 4.12: Yerin açıları (Yükseklik açısı, Güneş Azimut açısı ve Zenit açısı)



Kaynak: Dr. Abdurrahman Kılıç, Doç. Dr. Aksel Öztürk, Güneş Enerjisi

Yükseklik Açısı (y) : Direkt güneş ışınlarının yatay düzlemle yaptığı açıdır. Yükseklik ve zenit açılarının toplamı 90^0 'dir. ($z+y=90^0$)

Dolayısıyla; $\sin y = \cos z$ olur.

Güneş Azimut Açısı(γ): Güneşin doğrultusunun tam bilinmesi için kutupsal koordinat sisteminde, azimut açısına da ihtiyaç duyulur. Aslında üçüncü bir koordinat gibi düşünülebilir. Dolayısıyla güneş ışınının yere izdüşüm doğrultusunun güneyle yaptığı açıya güney azimut, kuzeyle yaptığı açıya ise kuzey azimut açısı denir.

Güneş radyasyonu ile gelen enerjinin hesaplanabilmesi için önce yerel standart zaman ile güneş zamanı arasındaki bağıntıyı bilmek gerekir.

Güneş zamanı; gözlemci meridyeni ile yerel saat baz meridyeni arasındaki farkı ve güneş zahiren gözlemci meridyenini geçtiği andaki dünyanın dönüş hızı düzensizliklerini dikkate almaktır. Güneş zamanı tanımı, güneşin gökyüzündeki zahiri açısal hareketini baz almaktadır. Güneş öğlesi olarak, güneşin zahiren tam gözlemci meridyeninde ve gözlemcinin zenitinde, yani gözlenen günün güneş yükseklik açısının(h) en yüksek değerini aldığı an olarak tanımlanmaktadır. Böylece yerel standart zaman ile güneş zamanı arasında bir bağıntı vardır:

$$\text{Güneş zamanı} = \text{Yerel Standart Zaman} \pm 4 (L_{ST} - L_{OC}) + E \quad (4.1)$$

(+) işareti Greenwich-Meridyeninden (0^0 – Meridyeni) batısı ve (-) işareti de doğusu için kullanılır.

Eşitlikteki yerel standart zaman, gözlemcinin bulunduğu ‘‘Zaman Bölgesi’’ nin baz meridyenine göre verilir. Eşitlikte;

Parametreler;

L_{ST} : Bölge Zamanı Baz Meridyeni

L_{OC} : Gözlemcinin Bulunduğu Meridyen

4 rakamı ise dereceden dakikaya çevirme faktörüdür. Birimi (dakika/derece) dir.

E: Yerkürenin Rotasyon Hızlarındaki Düzensizliği dikkate alır ve:

$$E = 9,87 \cdot \sin(2B) - 7,5 \cdot \cos(B) - 1,5 \cdot \sin(B) \quad (4.2)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

Bağıntıdaki B açısı ise;

$$B = \frac{360 \cdot (n - 81)}{364} \quad (4.3)$$

Denklemdaki n günün yıl içindeki sayısıdır.

Güneş Geliş Açısı (Θ): Güneş ışınları yeryüzüne iki biçimde gelir. Atmosfer içinde hiçbir sapmaya uğramadan gelen ışına direkt ışına (radyasyon), atmosfer içinden geçerken yönlerini yansıma ya da saçılma nedeni ile değiştirerek gelen ışına ise difüz ışına (radyasyon) denir. Yatay ya da eğik düzleme gelen güneş ışınının geliş açısı;

$$\cos\Theta = \sin\delta \cdot \sin\phi \cdot \cos\beta - \sin\delta \cdot \cos\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega \quad (4.4)$$

bağlantısı ile hesaplanır.

Parametreler;

Θ : Eğik düzlemin normali ile direkt güneş ışını arasındaki açıdır ve güneş geliş açısı olarakta adlandırılır.

δ : Deklinasyon açısı ($-23,45^\circ < \delta < +23,45^\circ$),

β : Eğik düzlemin yerle yaptığı açı,

γ : Azimut açısı,

ω : Saat açısı her 15° bir saate eşdeğerdir. Güneş öğlesinde $\omega=0^\circ$ 'dır,

ϕ : Enlem açısı.

Yatay düzlemde güneş doğarken ve batarken zenit açısı $\Theta_z : 90^\circ$ dir.

Eşitlikte $\Theta = \Theta_z$ ve $\beta=0^\circ$ alındığında, güneşin doğuşu ve batışı için eşitlik;

$$\cos\Theta_z = \sin\delta \cdot \sin\phi + \cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\omega \quad (4.5)$$

olur.

Denklemdaki ω_s : saat açısının güneşin doğuşu ve batışını göstermek için s ile indislenmiştir. Güneşin doğuşu için negatif ($-\omega_s$) ve batışı için ise pozitif ($+\omega_s$) alınacaktır.

Eğik bir düzlemde güneşin doğuş ve batışında saat açısının hesaplanabilmesi için, doğuş ve batış anında güneş geliş açısı $\Theta = 90^\circ$ olduğu düşünülürse eşitlik;

$$0 = A - B + C \cdot \cos\omega + D \cdot C + E \cdot \sin\omega \quad (4.6)$$

olur.

Burada yılın belli bir günü, yerküre üzerinde verilen bir yer, yatayla belli bir derece açı yapan (β) ve hangi yöne bakacağı belli olan bir eğik düzlemin doğuş ve batışı A,B,C,D ve E terimleri hesap günü için sabit ve yalnız ω değişken olarak alındığında eşitlik;

$$0 = A - B + C \cdot \cos\omega + D \cdot \cos\omega + E \cdot \sin\omega \quad (4.7)$$

olur.

Burada yılın belli bir günü, yerküre üzerinde verilen bir yer, yatayla belli bir açı yapan (β) ve hangi yöne bakacağı belli olan bir eğik düzlemin doğuş ve batışı A,B,C,D ve E hesaplanacak gün için sabit ve yalnız ω değişken olarak alındığında;

$$A = \sin\delta \cdot \sin\phi \cdot \cos\beta$$

$$B = \sin\delta \cdot \cos\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma$$

$$C = \cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \cos\beta \cdot \cos\gamma$$

$$D = \cos\delta \cdot \sin\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma$$

$$E = \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma$$

Eğik bir düzlem için saat açısı ω_β ve güneşin doğuş ve batış saat açıları da $\omega_{\beta r}$ ve $\omega_{\beta s}$ olarak tanımlanacaktır. $\sin^2 \beta + \cos^2 \beta = 1$ dikkate alındığında;

$$\omega_\beta = \arccos \left(\frac{-N \pm \sqrt{N^2 - 4 \cdot M \cdot P}}{2M} \right) \quad (4.8)$$

biçiminde ifade edilmiştir.

$$A - B = K; \quad C + D = L; \quad L^2 + E^2 = M; \quad 2 \cdot K \cdot L = N; \quad K^2 + E^2 = P \quad (4.9)$$

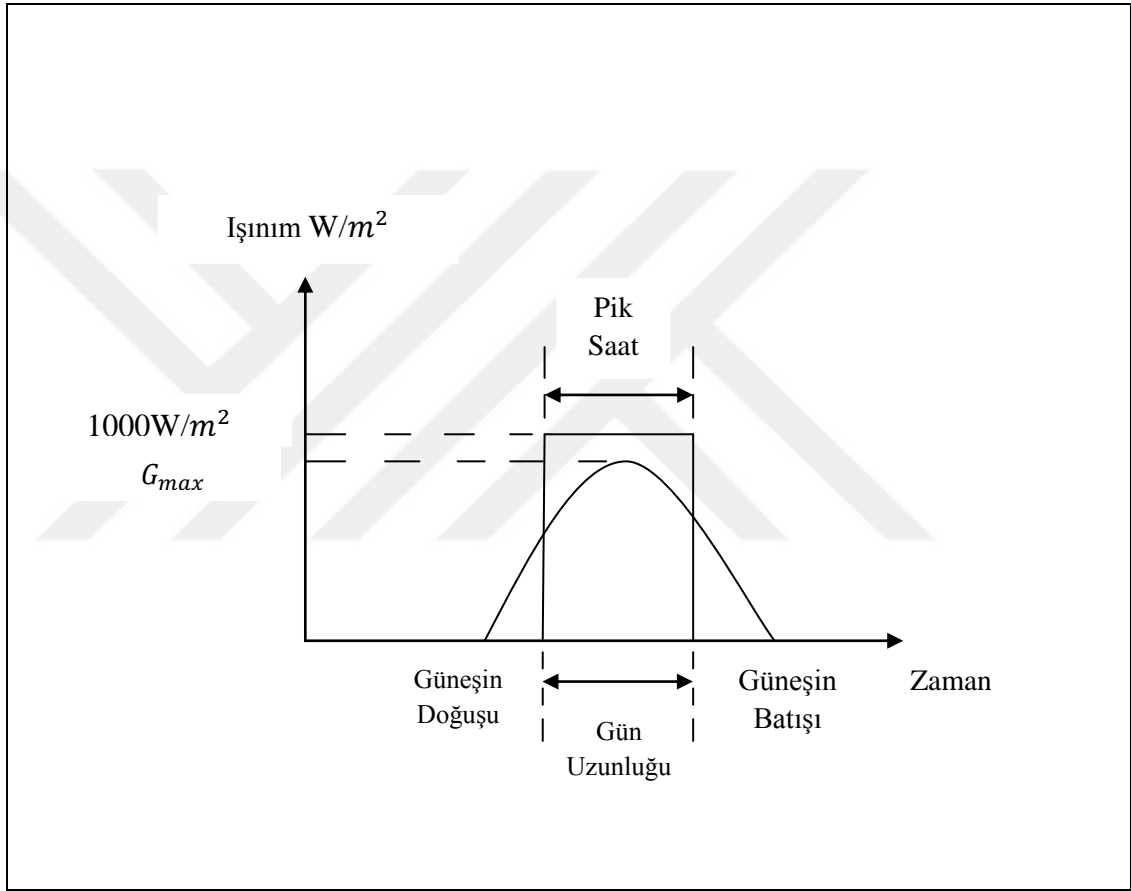
olarak alınmıştır.

4.2 ŞEBEKEYE BAĞLI PV SİSTEM TASARIMI

4.2.1 Pik Saat Tanımı

1000W/m² sabit ışınım şiddetinde, günlük toplam güneş radyasyonuna eşit bir enerjiyi elde edebilmek için geçen süreye denir. Pik saat tanımı Şekil 4.13’de gösterilmiştir.

Şekil 4.13: Pik saat



Kaynak: Güneş Enerjisi Sistemleri (TMMOB, Ege Üniversitesi)

4.2.2 Pik Saat ile Enerji Hesaplaması

Bir fotovoltaik sistemden alınabilecek enerji, ortalama verim η_{ort} , gelen güneş radyasyonu ve fotovoltaik pilin yüzey alanı ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\text{Enerji (kWh /gün)} = \text{Radyasyon (kWh/m}^2\text{gün)} \cdot \text{Alan(m}^2\text{)} \cdot \eta_{ort} \quad (4.10)$$

Işınım 1 kWh/m² iken, sistem çıkışında elde edilecek güç ifadesi;

$$P_{ac}(kW) = \frac{1kW}{m^2} \cdot \text{Alan (m}^2\text{)} \cdot \eta_1 \quad (4.11)$$

Burada η_1 , 1kW/m²'deki sistem verimidir. Yukarıdaki iki denklemi birleştirirsek;

$$\text{Enerji (kWh/gün)} = P_{ac}(kW) \left(\frac{\text{Radyasyon (kWh/m}^2\text{gün)}}{1 \text{ kWh/m}^2} \right) \cdot \underbrace{\left(\frac{\eta_{ort}}{\eta_1} \right)}_{\sim 1} \quad (4.12)$$

Pik saat

NOT: Sistem veriminin gün boyunca sabit olduğu kabul ediliyor.

$$\text{Enerji (kWh /gün)} = P_{ac}(kW) \cdot (\text{Pik saat}) \quad (4.13)$$

Öyleyse, 1 kWh/m² için sistemin üreteceği enerji P_{ac} hesaplanıp, pik saat ile çarpılırsa sistemde gün boyu üretilecek enerji yaklaşık olarak belirlenebilir.

4.3 KAPASİTE FAKTÖRÜ (CF)

Bir enerji üretim sisteminde üretilen enerjiyi anma gücüne göre ifade etmenin en basit yolu kapasite faktörünü tanımlamaktır.

$$\text{Enerji (kWh /yıl)} = P_{ac}(kW) \cdot CF \cdot 8760(\text{saat/yıl}) \quad (4.14)$$

Kapasite faktörü enerji üretim sisteminin yıl boyunca ürettiği toplam enerjinin tam güçte çalışmaya göre oranını belirlemektedir. Buna göre şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin kapasite faktörü aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$CF = \frac{\text{pik saat/gün}}{24\text{saat/gün}} \quad (4.15)$$

Anma gücü kapasite faktörünü değiştirmemektedir. Kapasite faktörünün değeri Türkiye koşullarında sabit eğimli sistemler için 0.16-0.26 arasında değerler almaktadır. Güneş ışınlarını takip eden sistemlerde, kapasite faktörünün değeri artar.

4.4 ŞEBEKEYE BAğLI FOTOVOLTAİK SİSTEMİN BOYUTLANDIRILMASI

Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerde, yedek enerji kaynağı olarak aküye ihtiyaç yoktur. Sistem; güneş enerjisi devre dışı kaldığında, elektrik Őebekesini devreye sokar. Bu nedenle Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin boyutlandırılması, Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemler kadar kritik değildir. Buna karşın kurulacak sistemin boyutu birim enerji maliyetini etkilemektedir. Çünkü gücü iki katına çıkarınca birim enerji maliyeti tam iki katına çıkmayabilir. Bu yüzden Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin boyutlandırılması için gerekli olan elektriksel gücün yanı sıra, fotovoltaik modüllerin yerleşimi için kullanılabilir alanın büyüklüğü ve sistem kurulumu için ayrılan bütçeye daha çok bağımlıdır. Bununla birlikte, gerekli değerlendirmeleri yapabilmek için fotovoltaik sistemin üretebileceği enerjinin iyi bir yaklaşıklıkla tahmin edilmesi de önemlidir. Önceki bölümlerde anlatılan “Pik Saat” yöntemi burada kullanılabilir.

4.5 GÜNEŞ RADYASYONUNUN BELİRLENMESİ

Güneş radyasyonunun yıl boyunca ölçülmesi en doğru bilgiyi verecektir. Ancak hem sürenin uzun olması hem de ölçülen değerlerin değişken olması nedeniyle ışınım tahmin yöntemlerinin kullanılması daha uygundur. Avrupa Komisyonu (European Commission) Ortak Araştırma Merkezinin (Joint Research Center, Ortak Araştırma Merkezi, JRC) web sayfasında Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) adı altında bütün Avrupa ve Afrika ülkelerinin ışınım değerleri ücretsiz olarak yayınlanmaktadır.

Şebekeye bağlı fotovoltaik sistem tasarımında üretmeyi hedeflediğimiz yıllık elektrik enerjisi (kWh/yıl) belirlenmiş ise P_{ac} (kW) alternatif güç miktarı enerji formülünden bulunur.

$$\text{Enerji(kWh /gün)} = P_{ac}(\text{kW}).(\text{Pik saat}).(365) \quad (4.16)$$

Evirici verimi, sıcaklığın etkisi, tozlar, uyumsuzluk kayıpları ve diğer kayıplar göz önünde bulundurulduğunda, sistemin verimini yaklaşık %75 aldığımızda DC güç;

$$P_{dc} = \frac{P_{ac}(kW)}{0,75} \quad (4.17)$$

biçiminde hesaplanır.

Şebekeye bağlı fotovoltaik sistem tasarımında; güneş ışınlarının (radyasyonlarının) geldiği toplam panel alanı, panellerin verimleri ve gelen güneş radyasyonu, sistemin dc gücünü verir (P_{dc}).

$$P_{dc} = (\text{güneş radyasyonu}) \times (\text{alan}) \times (\text{verim}) \quad (4.18)$$

Farklı panellere ait verim yüzdeleri Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1: Farklı panellere ait verim yüzdeleri

Panel tipi	Panel Verimi
m-Si	% 13
p-Si	% 12
a-Si	% 5
CdTe	% 10
CIS	% 11

Kaynak: Güneş Enerjisi Sistemleri (TMMOB, Ege Üniversitesi)

Bu aşamada gerekli fotovoltaik sistemin ait gücü; fotovoltaik sistemin alanına, verimine ve güneş radyasyonuna bağlı olarak bulunmuştur. Farklı fotovoltaik teknolojiler ve güneş takip seçenekleri göz önünde bulundurularak bu aşama daha optimize edilebilir. Güncel fotovoltaik sistem tasarımında;

- Fotovoltaik modül ve evirici seçimleri birbirinden bağımsız değildir. Evirici ve PV modüllerin uyumlu olması sistem verimini arttıran bir etkiye sahiptir. Bu etkileşim aynı zamanda fotovoltaik modül bağlantısını da yapılandırmaktadır.

- b. Ticari olan modüllerin çoğunluğu 36 veya 72 hücrelidir. Bu modüller 12 V ve 24 V nominal gerilimli sistemlere uyumlu olması için tasarlanmıştır.
- c. Son yıllarda şebekeye bağlı sistemler için daha yüksek gerilimli ve daha yüksek güçlü modüller de piyasada mevcuttur. Dolayısıyla fotovoltaik modül ve evirici seçimi yapılarak tasarıma devam edilir.

Şebekeye bağlı fotovoltaik sistem tasarımında seçilecek olan panel ve eviricinin farklı teknik özellikleri ile çoklu kombinasyonlar oluşturulabilir. Her kombinasyonun panel ve evirici verimi farklı olacağı için, belirlenmiş santral gücüne göre maliyet analizleri de farklı olacaktır. Güneş santralinin kurulum aşamasında bu farklı değerler birer kriter olarak göz önünde bulundurulmalıdır. Diğer yandan bağlanılan şebekenin standartları da yerine getirilmelidir. Örneğin; 48 V'u aşan sistemlerde ilave koruma ekipmanları gerekebilir ve bu durum maliyetleri değiştirebilir. Ayrıca sistemin hiçbir yerinde gerilimin 600 V'u aşmaması şart koşulmaktadır.

Dizi içindeki her panel için bir bypass diyotu, her dizi için sigorta, tüm fotovoltaik modülleri eviriciden ayırmak için bir DC ayırıcı & kesici, şebeke bağlantı tarafında bir AC (Alternatif Akım) ayırıcı & kesici öngörülür. Toprak hatası kesicisi, parafudr (surge arrester), paratoner, AC ve DC (Doğru Akım) uygun standartlı kablolama hesaplanarak sisteme eklenir.

4.6 KARŞILAŞTIRMALI FOTOVOLTAİK SİSTEM SENARYOLARI

Bu tez çalışmasında 1 MW altındaki kurulu gücü olan şebekeye bağlı olarak çalışacak lisanssız fotovoltaik sistemler incelenmiştir. Kurulu gücü 1 MW altında olan sistemlerde farklı kurulu güçlerde farklı panel tiplerinin güç ve maliyet analizine nasıl etki yaptıkları araştırılacaktır. Bu kısımda güç analizi için PVSOL programı kullanılmıştır. Fotovoltaik sistemin kurulacağı alanın coğrafi konum bilgileri simülasyon programına giriş değeri olarak verilmektedir.

Konya'nın Sarayönü ilçesine bağlı olan Konar Köyü mevkiinde; şebekeye bağlı olarak çalışacak olan bir güneş santralinin güç ve maliyet analizleri gerçekleştirilecektir. Yer olarak belirlediğimiz Konar Köyü'nde yükseltilmiş fotovoltaik sistem kurulum 6639,6 m²'lik boş bir alandır. Azimut açısı fotovoltaik paneller güneşe bakacak şekilde

yerleştirileceği için 0° alınır. Konya'nın bulunduğu enleme göre panellerin yatay ile yaptığı açı 30° olarak belirlenmiştir.

Sistemin kurulum aşamasında güç ve maliyet analizi farklı senaryolar ile karşılaştırılacak ve elde edilen sonuçlar yorumlanacaktır. Kurulumu gerçekleştirecek kişi ya da firmalara öngörü ve seçim olasılıkları sunulacaktır. Tablo 4.2'de senaryolar ile ilgili özet bilgi verilmiştir.

Tablo 4.2: Senaryolarda kullanılan evirici tipleri

Senaryo Numarası	Kurulu Güç (kW)	Evirici Üretim Yeri
1	990	Yurtiçi
2	990	Yurtdışı
3	660	Yurtiçi
4	660	Yurtdışı
5	330	Yurtiçi
6	330	Yurtdışı

4.6.1 Senaryo 1

Fotovoltaik güneş santrali 990 kW, tek kristalli ve çok kristalli panellerinin boyutları arasında ihmal edilebilir bir fark olduğu için güneş santralinin alanı her iki panel cinsi için de 6639,6 m² olarak alınmıştır. Farklı cins panellerin; verim ve fiyatlarının farklılığından dolayı güç ve maliyet analizi karşılaştırılması yapılmıştır.

- i. Panel olarak yurtdışında üretilmiş, 250 W tek kristalli panel ve 250 W çok kristalli panel kullanılmıştır. Panel miktarı 3960 adettir.
- ii. Evirici olarak yurtdışında üretilmiş 30 kW'lık evirici kullanılmıştır. Evirici miktarı 33 adettir.
- iii. Kablolama kısmında yerli üretim olan 6 mm²'lik TUV 2 PFG "1169" belgeli, iletken olarak IEC 60228 kalaylı bakır, izolasyonu ozona ve ultraviyole ışınlarına, aşırı ısıcağa ve soğuğa, yangına dayanıklı solar izolasyon malzemeli

DC kablo kullanılmıştır. Tüm senaryolarda 6 çıkışı olan eviricinin her bir çıkış ucundan panellere gidip-dönen kablo miktarı 90m alınmıştır.

- iv. Yerli üretim olan taşıyıcı sistemler alüminyum-çelik malzemeden yapılmış, konstrüksiyonu yüksek ürün kullanılmıştır.

990 kW gücündeki lisanssız güneş santralının yurtdışında üretilen evirici kullanıldığı durumda tek kristalli fotovoltaik panel ile kurulumu için yapılan maliyet analizi Tablo 4.3'de gösterilmiştir.

Tablo 4.3: 990 kW gücündeki fotovoltaik sistemin tek kristalli panel ve yurtdışı üretim evirici için maliyet analizi

Ürün tipi	Adet	Birim Fiyat(TL)	Fiyat(TL)
Panel 250 W	3960	650	2574000
Evirici 30 kW (yurtdışı üretim)	33	9000	297000
Kablo	17820m	4 TL/m	71280
Taşıyıcı Ayak	3960	70	277200
		Toplam Maliyet(TL)	3219480

990 kW gücündeki lisanssız güneş santralının yurtdışında üretilen evirici kullanıldığı takdirde çok kristalli panel ile kurulumu için yapılan maliyet analizi Tablo 4.4'de gösterilmiştir.

Tablo 4.4: 990 kW gücündeki fotovoltaik sistemin çok kristalli panel ve yurtdışı üretim evirici için maliyet analizi

Ürün Tipi	Adet	Birim Fiyat(TL)	Fiyat(TL)
Panel 250 W	3960	550	2178000
Evirici 30 kW (yurtdışı üretim)	33	9000	297000
Kablo	17820m	4 TL/m	71280
Taşıyıcı Ayak	3960	70	277200
		Toplam Maliyet(TL)	2823480

Tek kristalli panel kullanılarak kurulumu gerçekleştirilen güneş santralin maliyet analizinde, toplam maliyetin %80'nini paneller oluşturmaktadır. Çok kristalli panel kullanıldığında bu oran %77'ye düşmektedir. Panel fiyatları geçmiş ile kıyaslandığında her geçen zaman aralığında biraz daha düşmekte ve maliyet analizindeki yüzde miktarı da azalmaktadır. Şebekeye bağlı olan güneş santralinden elektrik enerjisi üreten gerçek ve tüzel kişiler, ihtiyaçlarının üzerinde ürettikleri elektrik enerjisini dağıtım sistemine vermeleri halinde 4628 sayılı kanunun üçüncü maddesinin üçüncü fıkrası kapsamında belirlenen fiyatlardan 10 yıl boyunca faydalanabilirler (Üretilen elektrik enerjisinin alış fiyatı = 13,3 ABD dolar cent/kWh). Bununla birlikte fotovoltaik güneş santralının kurulumu sırasında yerli ürün kullanımı ile bu fiyata beş yıl boyunca yerli ürün teşvik fiyatı da eklenir.

Bu çalışmada evirici ile şebekeye bağlanma noktası arasında öngörülen ürünlerin (kablo, ayırıcı, transformatör, sayaç, topraklama, parafudr ve diğer ürünler) maliyet analizi yapılmamıştır. Çünkü şebeke bağlantı noktasının coğrafi konumu nedeniyle santrale ne kadar yakınlıkta olduğu bilinmemektedir.

PVSOL benzetim programıyla yaptığımız güç analizinde; tek kristalli paneller ile kurulan güneş santralin gücü 1501339 kWh/yıl bulunmuştur. Analiz gerçekleştirilirken sistemin kullanım oranı %89, gölgelemeden dolayı oluşan kazanç kaybı %1,2/yıl olarak

alınmıştır. Üretilen temiz enerjiden dolayı kaçınılan CO₂ emisyonu ise 900512 kg/yıl'dır.

Çok kristalli paneller ile kurulan güneş santralının gücü ise 1456705 kWh/yıl olarak bulunmuştur. Sistemin kullanım oranı %86,7; gölgelemeden dolayı oluşan kazanç kaybı %2, 3/yıl olarak alınmış ve üretilen yenilenebilir enerjiden dolayı kaçınılan CO₂ emisyonu ise 873255 kg/yıl'dır.

4.6.2 Senaryo 2

990 kW'lık güneş enerji sisteminde yerli evirici kullanarak tek kristalli ve çok kristalli paneller için maliyet analizini yaptığımızda yurtdışında üretilen evirici kullanımına göre 165000 TL'lik bir kazanç söz konusudur. 990 kW gücündeki lisanssız güneş santralının yerli üretim evirici kullanıldığı takdirde tek kristalli panel ile kurulumu için yapılan maliyet analizi Tablo 4.5'de gösterilmiştir.

Tablo 4.5: 990 kW gücündeki fotovoltaik sistemin tek kristalli panel ve yurtiçi üretim evirici için maliyet analizi

Ürün Tipi	Adet	Birim Fiyat(TL)	Fiyat(TL)
Panel 250 W	3960	650	2574000
Evirici 30 kW (yerli üretim)	33	4000	132000
Kablo	17820m	4 TL/m	71280
Taşıyıcı Ayak	3960	70	277200
		Toplam Maliyet(TL)	3054480

990 kW gücündeki lisanssız güneş santralının yerli üretim evirici kullanıldığı takdirde çok kristalli panel ile kurulumu için yapılan maliyet analizi Tablo 4.6'da gösterilmiştir.

Tablo 4.6: 990 kW gücündeki fotovoltaik sistemin çok kristalli panel ve yurtiçi üretim evirici için maliyet analizi

Ürün Tipi	Adet	Birim Fiyat(TL)	Fiyat(TL)
Panel 250 W	3960	550	2178000
Evirici 30 kW (yerli üretim)	33	4000	132000
Kablo	17820m	4 TL/m	71280
Taşıyıcı Ayak	3960	70	277200
		Toplam Maliyet(TL)	2658480

990 kW gücündeki lisanssız güneş santralinde yerli üretim evirici kullanıldığında PVSOL programı ile yapılan güç analizindeki güç bilanço değerleri, yurtdışı evirici kullanıldığında yapılan güç analizindeki güç bilanço değerleri ile aynıdır. Senaryo 1 ve Senaryo 2'nin tek kristalli ve çok kristalli panellere ait güç analizi Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'de gösterilmiştir.

Şekil 4.14: Tek kristalli panel durumunda güç analizi

PV sistemi enerji bilançosu		
Toplam yatay ışın	1.516,2 kWh/m²	
Standart spektrumdan sapma	-15,16 kWh/m ²	-1,00 %
Modül düzeyinin oryantasyonu ve eğilimi	150,10 kWh/m ²	10,00 %
Ufuk çizgisi tarafından yaygın ışının gölgelenmesi	0,00 kWh/m ²	0,00 %
Modül yüzeyine yansıma	-71,72 kWh/m ²	-4,34 %
Modül üzerine toplam ışın	1.579,4 kWh/m²	
	1.579,4 kWh/m ²	
	x 6639,63 m ²	
	= 10.486.588,5 kWh	
PV toplam ışın	10.486.588,5 kWh	
Kirlenme	0,00 kWh	0,00 %
STC dönüştürme (Modül nominal etkinlik oranı 15,39 %)	-8.873.217,17 kWh	-84,61 %
PV nominal enerji	1.613.371,3 kWh	
modüle özgü kısmı gölgeleme	-37.311,45 kWh	-2,31 %
Düşük ışık davranışı	53.864,20 kWh	3,42 %
Modülün nominal sıcaklık sapma	-40.873,60 kWh	-2,51 %
Diyotlar	-3.422,37 kWh	-0,22 %
Mismatch (üretici bilgileri)	-31.712,56 kWh	-2,00 %
Mismatch (ara bağlantı / gölgeleme)	281,76 kWh	0,02 %
İnvertör düzenleyici olmadan PV-enerji (DC)	1.554.197,3 kWh	
MPP-gerilim alanı sebebiyle düzenleme	-64,32 kWh	0,00 %
Maks. DC Akımı sebebiyle düzenleme	0,00 kWh	0,00 %
Maks. DC Performans sebebiyle düzenleme	0,00 kWh	0,00 %
Maks. AC Performans/cos phi sebebiyle düzenleme	-233,89 kWh	-0,02 %
MPP Adaptasyon	-1.553,90 kWh	-0,10 %
PV-enerji (DC)	1.552.345,2 kWh	
WR Girişinde bulunan enerji	1.552.345,2 kWh	
Giriş ve nominal gerilim arasındaki sapma	-2.172,42 kWh	-0,14 %
DC/AC dönüşümü	-33.668,43 kWh	-2,17 %
Stand-by tüketimi	-473,68 kWh	-0,03 %
Toplam kablo kayıpları	-15.160,31 kWh	-1,00 %
Standby kullanımı hariç PV enerji (AC)	1.500.870,4 kWh	
Şebeke besleme	1.501.339,3 kWh	

Kaynak: PVSOL simülasyon programı

Şekil 4.15: Çok kristalli panel durumunda güç analizi

PV sistemi enerji bilançosu		
Toplam yatay ışın	1.516,2 kWh/m²	
Standart spektrumdan sapma	-15,16 kWh/m ²	-1,00 %
Modül düzeyinin oryantasyonu ve eğilimi	150,10 kWh/m ²	10,00 %
Ufuk çizgisi tarafından yaygın ışının gölgelenmesi	0,00 kWh/m ²	0,00 %
Modül yüzeyine yansımaya	-71,72 kWh/m ²	-4,34 %
Modül üzerine toplam ışın	1.579,4 kWh/m²	
	1.579,4 kWh/m ²	
	x 6639,63 m ²	
	= 10.486.588,5 kWh	
PV toplam ışın	10.486.588,5 kWh	
Kirlenme	0,00 kWh	0,00 %
STC dönüştürme (Modül nominal etkinlik oranı 15,33 %)	-8.878.658,50 kWh	-84,67 %
PV nominal enerji	1.607.930,0 kWh	
modüle özgü kısmı gölgeleme	-37.161,98 kWh	-2,31 %
Düşük ışık davranışı	12.611,34 kWh	0,80 %
Modülün nominal sıcaklık sapma	-41.337,24 kWh	-2,61 %
Diyyotlar	-2.318,27 kWh	-0,15 %
Mismatch (üretici bilgileri)	-30.794,48 kWh	-2,00 %
Mismatch (ara bağlantı / gölgeleme)	-433,40 kWh	-0,03 %
İnvertör düzenleyici olmadan PV-enerji (DC)	1.508.496,0 kWh	
MPP-gerilim alanı sebebiyle düzenleme	-93,61 kWh	-0,01 %
Maks. DC Akımı sebebiyle düzenleme	0,00 kWh	0,00 %
Maks. DC Performans sebebiyle düzenleme	0,00 kWh	0,00 %
Maks. AC Performans/cos phi sebebiyle düzenleme	-377,55 kWh	-0,03 %
MPP Adaptasyon	-1.508,02 kWh	-0,10 %
PV-enerji (DC)	1.506.516,8 kWh	
WR Girişinde bulunan enerji	1.506.516,8 kWh	
Giriş ve nominal gerilim arasındaki sapma	-2.020,45 kWh	-0,13 %
DC/AC dönüşümü	-33.077,23 kWh	-2,20 %
Stand-by tüketimi	-446,75 kWh	-0,03 %
Toplam kablo kayıpları	-14.709,72 kWh	-1,00 %
Standby kullanımı hariç PV enerji (AC)	1.456.262,7 kWh	
Şebeke besleme	1.456.704,9 kWh	

Kaynak: PVSOL simülasyon programı

4.6.3 Senaryo 3

660 kW kurulu gücünde lisanssız güneş santralini tek kristalli ve çok kristalli panellerle ayrı ayrı incelediğimizde santralin yıllık enerji miktarı; kurulumu tek kristalli olan santralde 964862,4 kWh/yıl, kurulumu çok kristalli olan santralde 952114 kWh/yıl 'dır.

PVSOL programında güç analizi yapılırken 660kW için panel miktarı: 250 W'lık panellerden 2640 adet, 30 kW'lık evirici sayısı ise 22 adet olarak belirlenmiştir.

Kurulumu tek kristalli panel ile gerçekleştirilmiş olan santralde kaçınılan CO₂ emisyon miktarı 578736 kg/yıl ve çok kristalli panel için gerçekleştirilmiş santralde kaçınılan CO₂ emisyon miktarı 571091 kg/yıl 'dır. 660 kW gücündeki lisanssız güneş santralinin, yurtdışında üretilen evirici kullanıldığı takdirde tek kristalli panel ile kurulumu için yapılan maliyet analizi Tablo 4.7'da gösterilmiştir.

Tablo 4.7: 660 kW gücündeki fotovoltaik sistemin tek kristalli panel ve yurtdışı üretim evirici için maliyet analizi

Ürün Tipi	Adet	Birim Fiyat(TL)	Fiyat(TL)
Panel 250 W	2640	650	1716000
Evirici 30 kW (yurtdışı üretim)	22	9000	198000
Kablo	11880m	4 TL/m	47520
Taşıyıcı Ayak	2640	70	184800
		Toplam Maliyet(TL)	2146320

660 kW gücündeki lisanssız güneş santralinin yurtdışında üretilen evirici kullanıldığı takdirde çok kristalli panel ile kurulumu için yapılan maliyet analizi Tablo 4.8'de gösterilmiştir.

Tablo 4.8: 660 kW gücündeki fotovoltaik sistemin çok kristalli panel ve yurtdışı üretim evirici için maliyet analizi

Ürün Tipi	Adet	Birim Fiyat(TL)	Fiyat(TL)
Panel 250 W	2640	550	1452000
Evirici 30 kW (yurtdışı üretim)	22	9000	198000
Kablo	11880m	4 TL/m	47520
Taşıyıcı Ayak	2640	70	184800
		Toplam Maliyet(TL)	1882320

4.6.4 Senaryo 4

660 kW gücünde lisanssız güneş santralini tek kristalli ve çok kristalli panellerle ayrı ayrı incelemede 30 kW'lık eviricinin yerli ürün kullanılmasında maliyet analizinde 110000 TL'lik kazanç sağlanmıştır.

660 kW gücündeki lisanssız güneş santralinin yerli üretim evirici kullanıldığı takdirde tek kristalli panel ile kurulumu için yapılan maliyet analizi Tablo 4.9'de gösterilmiştir

Tablo 4.9: 660 kW gücündeki fotovoltaik sistemlerin tek kristalli panel ve yurtiçi üretim evirici için maliyet analizi

Ürün Tipi	Adet	Birim Fiyat (TL)	Fiyat(TL)
Panel 250 W	2640	650	1716000
Evirici 30 kW (yerli üretim)	22	4000	88000
Kablo	11880m	4 TL/m	47520
Taşıyıcı Ayak	2640	70	184800
		Toplam Maliyet(TL)	2036320

660 kW gücündeki lisanssız güneş santralının yerli üretim evirici kullanıldığı takdirde çok kristalli panel ile kurulumu için yapılan maliyet analizi Tablo 4.10'da gösterilmiştir.

Tablo 4.10: 660 kW gücündeki fotovoltaik sistemlerin çok kristalli panel ve yurtiçi üretim evirici için maliyet analizi

Ürün Tipi	Adet	Birim Fiyat(TL)	Fiyat(TL)
Panel 250 W	2640	550	1452000
Evirici 30 kW (yerli üretim)	22	4000	88000
Kablo	11880m	4 TL/m	47520
Taşıyıcı Ayak	2640	70	184800
		Toplam Maliyet(TL)	1772320

Senaryo 3 ve Senaryo 4'ün tek kristalli ve çok kristalli panellere ait güç analizi Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de gösterilmiştir.

Şekil 4.16: Tek kristalli panel durumunda güç analizi

PV sistemi enerji bilançosu		
Toplam yatay ışın	1.516,2 kWh/m²	
Standart spektrumdan sapma	-15,16 kWh/m ²	-1,00 %
Modül düzeyinin oryantasyonu ve eğilimi	150,10 kWh/m ²	10,00 %
Ufuk çizgisi tarafından yaygın ışının gölgelenmesi	0,00 kWh/m ²	0,00 %
Modül yüzeyine yansımaya	-71,72 kWh/m ²	-4,34 %
Modül üzerine toplam ışın	1.579,4 kWh/m²	
	1.579,4 kWh/m ²	
	x 4426,42 m ²	
	= 6.991.059,0 kWh	
PV toplam ışın	6.991.059,0 kWh	
Kirlenme	0,00 kWh	0,00 %
STC dönüştürme (Modül nominal etkinlik oranı 14,93 %)	-5.947.179,56 kWh	-85,07 %
PV nominal enerji	1.043.879,5 kWh	
modüle özgü kısmı gölgeleme	-24.084,49 kWh	-2,31 %
Düşük ışık davranışı	26.939,90 kWh	2,64 %
Modülün nominal sıcaklık sapma	-25.926,12 kWh	-2,48 %
Diyotlar	-2.091,97 kWh	-0,20 %
Mismatch (üretici bilgileri)	-20.374,34 kWh	-2,00 %
Mismatch (ara bağlantı / gölgeleme)	290,14 kWh	0,03 %
İnvertör düzenleyici olmadan PV-enerji (DC)	998.632,6 kWh	
MPP-gerilim alanı sebebiyle düzenleme	-65,35 kWh	-0,01 %
Maks. DC Akımı sebebiyle düzenleme	0,00 kWh	0,00 %
Maks. DC Performans sebebiyle düzenleme	0,00 kWh	0,00 %
Maks. AC Performans/cos phi sebebiyle düzenleme	0,00 kWh	0,00 %
MPP Adaptasyon	-998,57 kWh	-0,10 %
PV-enerji (DC)	997.568,7 kWh	
WR Girişinde bulunan enerji	997.568,7 kWh	
Giriş ve nominal gerilim arasındaki sapma	-1.192,35 kWh	-0,12 %
DC/AC dönüşümü	-21.767,82 kWh	-2,18 %
Stand-by tüketimi	-301,88 kWh	-0,03 %
Toplam kablo kayıpları	-9.743,07 kWh	-1,00 %
Standby kullanımı hariç PV enerji (AC)	964.563,5 kWh	
Şebeke besleme	964.862,4 kWh	

Kaynak: PVSOL simülasyon programı

Şekil 4.17: Çok kristalli panel durumunda güç analizi

PV sistemi enerji bilançosu		
Toplam yatay ışın	1.516,2 kWh/m²	
Standart spektrumdan sapma	-15,16 kWh/m ²	-1,00 %
Modül düzeyinin oryantasyonu ve eğilimi	150,10 kWh/m ²	10,00 %
Ufuk çizgisi tarafından yaygın ışının gölgelemesi	0,00 kWh/m ²	0,00 %
Modül yüzeyine yansımaya	-71,72 kWh/m ²	-4,34 %
Modül üzerine toplam ışın	1.579,4 kWh/m²	
	1.579,4 kWh/m ²	
	x 4426,42 m ²	
	= 6.991.059,0 kWh	
PV toplam ışın	6.991.059,0 kWh	
Kirlenme	0,00 kWh	0,00 %
STC dönüştürme (Modül nominal etkinlik oranı 15,04 %)	-5.939.340,72 kWh	-84,96 %
PV nominal enerji	1.051.718,3 kWh	
modüle özgü kısmı gölgeleme	-24.257,21 kWh	-2,31 %
Düşük ışık davranışı	7.780,28 kWh	0,76 %
Modülün nominal sıcaklık sapma	-27.015,63 kWh	-2,61 %
Diyotlar	-1.466,54 kWh	-0,15 %
Mismatch (üretici bilgileri)	-20.135,18 kWh	-2,00 %
Mismatch (ara bağlantı / gölgeleme)	-257,44 kWh	-0,03 %
İnvertör düzenleyici olmadan PV-enerji (DC)	986.366,6 kWh	
MPP-gerilim alanı sebebiyle düzenleme	-102,24 kWh	-0,01 %
Maks. DC Akımı sebebiyle düzenleme	0,00 kWh	0,00 %
Maks. DC Performans sebebiyle düzenleme	0,00 kWh	0,00 %
Maks. AC Performans/cos phi sebebiyle düzenleme	-311,28 kWh	-0,03 %
MPP Adaptasyon	-985,95 kWh	-0,10 %
PV-enerji (DC)	984.967,1 kWh	
WR Girişinde bulunan enerji	984.967,1 kWh	
Giriş ve nominal gerilim arasındaki sapma	-1.519,16 kWh	-0,15 %
DC/AC dönüşümü	-21.716,60 kWh	-2,21 %
Stand-by tüketimi	-296,25 kWh	-0,03 %
Toplam kablo kayıpları	-9.614,35 kWh	-1,00 %
Standby kullanımı hariç PV enerji (AC)	951.820,7 kWh	
Şebeke besleme	952.114,0 kWh	

Kaynak: PVSOL simülasyon programı

4.6.5 Senaryo 5

330 kW gücünde lisanssız güneş santralini tek kristalli ve çok kristalli panellerle ayrı ayrı incelediğimizde santralin yıllık enerji miktarı; kurulumu tek kristalli olan panel için 485505,3 kWh/yıl, kurulumu çok kristalli olan panel için 482178,1 kWh/yıl 'dır.

PVSOL programında güç analizi yapılırken 330kW için panel miktarı: 250 W'lık panellerden 1320 adet, 30 kW'lık evirici sayısı ise 11 adet olarak belirlenmiştir.

Kurulumu tek kristalli panel ile gerçekleştirilmiş olan santralde kaçınılan CO₂ emisyon miktarı 291214 kg/yıl ve çok kristalli panel için gerçekleştirilmiş santralde de kaçınılan CO₂ emisyon miktarı 289216 kg/yıl'dır. 330 kW gücünde lisanssız güneş santralinin maliyet analizi aşağıda verilmiştir.

330 kW gücündeki lisanssız güneş santralinin yurtdışında üretilen evirici kullanıldığı takdirde tek kristalli panel ile kurulumu için yapılan maliyet analizi Tablo 4.11'de gösterilmiştir.

Tablo 4.11: 330 kW gücündeki fotovoltaik sistemin tek kristalli panel ve yurtdışı üretim evirici için maliyet analizi

Ürün Tipi	Adet	Birim Fiyat(TL)	Fiyat(TL)
Panel 250 W	1320	650	858000
Evirici 30 kW (yurtdışı üretim)	11	9000	99000
Kablo	5940m	4 TL/m	23760
Taşıyıcı Ayak	1320	70	92400
		Toplam Maliyet(TL)	1073160

330 kW gücündeki lisanssız güneş santralinin yurtdışında üretilen evirici kullanıldığı takdirde çok kristalli panel ile kurulumu için yapılan maliyet analizi Tablo 4.12'de gösterilmiştir.

Tablo 4.12: 330 kW gücündeki fotovoltaik sistemin çok kristalli panel ve yurt dışında üretilen evirici için maliyet analizi

Ürün Tipi	Adet	Birim Fiyat(TL)	Fiyat(TL)
Panel 250 W	1320	550	726000
Evirici 30 kW (yurtdışı üretim)	11	9000	99000
Kablo	590m	4 TL/m	23760
Taşıyıcı Ayak	1320	70	92400
		Toplam Maliyet(TL)	941160

4.6.6 Senaryo 6

330 kW gücünde lisanssız güneş santralini, tek kristalli ve çok kristalli panellerle ayrı ayrı incelemede 30 kW'lık eviricinin yerli ürün kullanımında maliyet analizinde 55000 TL'lik kazanç sağlanmıştır. 330 kW gücündeki lisanssız güneş santralinin yerli üretim evirici kullanıldığı takdirde tek kristalli panel ile kurulumu için yapılan maliyet analizi Tablo 4.13'de gösterilmiştir.

Tablo 4.13: 330 kW gücündeki fotovoltaik sistemin tek kristalli panel ve yurtiçi üretim evirici için maliyet analizi

Ürün Tipi	Adet	Birim Fiyat(TL)	Fiyat(TL)
Panel 250 W	1320	650	858000
Evirici 30 kW (yerli üretim)	11	4000	44000
Kablo	590m	4 TL/m	23760
Taşıyıcı Ayak	1320	70	92400
		Toplam Maliyet(TL)	1018160

330 kW gücündeki lisanssız güneş santralinin yerli üretim evirici kullanıldığı durumda çok kristalli panel ile kurulumu için yapılan maliyet analizi Tablo 4.14'de gösterilmiştir.

Tablo 4.14: 330 kW gücündeki fotovoltaik sistemin çok kristalli panel ve yurtiçi üretim evirici için maliyet analizi

Ürün Tipi	Adet	Birim Fiyat(TL)	Fiyat(TL)
Panel 250 W	1320	550	726000
Evirici 30 kW (yerli üretim)	11	4000	44000
Kablo	590m	4 TL/m	23760
Taşıyıcı Ayak	1320	70	92400
		Toplam Maliyet(TL)	886160

Senaryo 5 ve Senaryo 6'nın tek kristalli ve çok kristalli panellere ait güç analizi Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da gösterilmiştir.

Şekil 4.18: Tek kristalli panel durumunda güç analizi

PV sistemi enerji bilançosu		
Toplam yatay ışın	1.516,2 kWh/m²	
Standart spektrumdan sapma	-15,16 kWh/m ²	-1,00 %
Modül düzeyinin oryantasyonu ve eğilimi	150,10 kWh/m ²	10,00 %
Ufuk çizgisi tarafından yaygın ışının gölgelenmesi	0,00 kWh/m ²	0,00 %
Modül yüzeyine yansıma	-71,72 kWh/m ²	-4,34 %
Modül üzerine toplam ışın	1.579,4 kWh/m²	
	1.579,4 kWh/m ²	
	x 2213,21 m ²	
	= 3.495.529,5 kWh	
PV toplam ışın	3.495.529,5 kWh	
Kirlenme	0,00 kWh	0,00 %
STC dönüştürme (Modül nominal etkinlik oranı 15,33 %)	-2.959.552,83 kWh	-84,67 %
PV nominal enerji	535.976,7 kWh	
modüle özgü kısmı gölgeleme	-11.915,19 kWh	-2,22 %
Düşük ışık davranışı	3.674,38 kWh	0,70 %
Modülün nominal sıcaklık sapma	-13.768,80 kWh	-2,61 %
Diyotlar	-765,14 kWh	-0,15 %
Mismatch (üretici bilgileri)	-10.264,04 kWh	-2,00 %
Mismatch (ara bağlantı / gölgeleme)	-133,57 kWh	-0,03 %
İnvertör düzenleyici olmadan PV-enerji (DC)	502.804,3 kWh	
MPP-gerilim alanı sebebiyle düzenleme	-52,42 kWh	-0,01 %
Maks. DC Akımı sebebiyle düzenleme	0,00 kWh	0,00 %
Maks. DC Performans sebebiyle düzenleme	0,00 kWh	0,00 %
Maks. AC Performans/cos phi sebebiyle düzenleme	-138,29 kWh	-0,03 %
MPP Adaptasyon	-502,61 kWh	-0,10 %
PV-enerji (DC)	502.111,0 kWh	
WR Girişinde bulunan enerji	502.111,0 kWh	
Giriş ve nominal gerilim arasındaki sapma	-672,51 kWh	-0,13 %
DC/AC dönüşümü	-11.029,08 kWh	-2,20 %
Stand-by tüketimi	-148,92 kWh	-0,03 %
Toplam kablo kayıpları	-4.902,60 kWh	-1,00 %
Standby kullanımı hariç PV enerji (AC)	485.357,9 kWh	
Şebeke besleme	485.505,3 kWh	

Kaynak: PVSOL simülasyon programı

Şekil 4.19: Çok kristalli panel durumunda güç analizi

PV sistemi enerji bilançosu		
Toplam yatay ışın	1.516,2 kWh/m²	
Standart spektrumdan sapma	-15,16 kWh/m ²	-1,00 %
Modül düzeyinin oryantasyonu ve eğilimi	150,10 kWh/m ²	10,00 %
Ufuk çizgisi tarafından yaygın ışının gölgelenmesi	0,00 kWh/m ²	0,00 %
Modül yüzeyine yansımaya	-71,72 kWh/m ²	-4,34 %
Modül üzerine toplam ışın	1.579,4 kWh/m²	
	1.579,4 kWh/m ²	
	x 2213,21 m ²	
	= 3.495.529,5 kWh	
PV toplam ışın	3.495.529,5 kWh	
Kirlenme	0,00 kWh	0,00 %
STC dönüştürme (Modül nominal etkinlik oranı 14,93 %)	-2.973.589,78 kWh	-85,07 %
PV nominal enerji	521.939,7 kWh	
modüle özgü kısmı gölgeleme	-11.613,14 kWh	-2,22 %
Düşük ışık davranışı	12.790,81 kWh	2,51 %
Modülün nominal sıcaklık sapma	-12.967,15 kWh	-2,48 %
Diyotlar	-1.055,23 kWh	-0,21 %
Mismatch (üretici bilgileri)	-10.181,90 kWh	-2,00 %
Mismatch (ara bağlantı / gölgeleme)	140,99 kWh	0,03 %
İnvertör düzenleyici olmadan PV-enerji (DC)	499.054,1 kWh	
MPP-gerilim alanı sebebiyle düzenleme	-32,14 kWh	-0,01 %
Maks. DC Akımı sebebiyle düzenleme	0,00 kWh	0,00 %
Maks. DC Performans sebebiyle düzenleme	0,00 kWh	0,00 %
Maks. AC Performans/cos phi sebebiyle düzenleme	0,00 kWh	0,00 %
MPP Adaptasyon	-499,02 kWh	-0,10 %
PV-enerji (DC)	498.522,9 kWh	
WR Girişinde bulunan enerji	498.522,9 kWh	
Giriş ve nominal gerilim arasındaki sapma	-596,28 kWh	-0,12 %
DC/AC dönüşümü	-10.878,07 kWh	-2,18 %
Stand-by tüketimi	-150,94 kWh	-0,03 %
Toplam kablo kayıpları	-4.868,98 kWh	-1,00 %
Standby kullanımı hariç PV enerji (AC)	482.028,7 kWh	
Şebeke besleme	482.178,1 kWh	

Kaynak: PVSOL simülasyon programı

Tablo 4.15: Farklı senaryolar için maliyet ve yıllık üretilecek enerji miktarları

Senaryo Numarası	Evirici Tipi	Panel Tipi (Kristal)	Toplam Maliyet (TL)	Yıllık Üretilecek Enerji (kWh/yıl)
1	Yurtdışı	Tek	3219480	1501339
1	Yurtdışı	Çok	2823480	1456705
2	Yurtiçi	Tek	3054480	1501339
2	Yurtiçi	Çok	2658480	1456705
3	Yurtdışı	Tek	2146320	964862
3	Yurtdışı	Çok	1882320	952114
4	Yurtiçi	Tek	1882320	964862
4	Yurtiçi	Çok	1772320	952114
5	Yurtdışı	Tek	1073160	485505
5	Yurtdışı	Çok	941160	482178
6	Yurtiçi	Tek	1018160	485505
6	Yurtiçi	Çok	886160	482178

PVSOL benzetim programı ile yaptığımız güç analizinde lisanssız güneş santralının kurulum gücü 990 kW olarak öngörülmüş ve 6639,6 m²'lik boş bir alana konuşlandırılmıştır. 250 W'lık tek kristalli ya da çok kristalli panel ve 30 kW'lık evirici (yerli ve yurtdışı) seçim senaryoları ile karşılaştırmalar yapıldığında;

- a. 990 kW gücünde tek kristalli paneller ile kurulan güneş santralının enerjisi 1501339 kWh/yıl'dır.
- b. 990 kW gücünde çok kristalli paneller ile kurulan güneş santralının enerjisi 1456705 kWh/yıl'dır.

Maliyet analizine göre tek kristalli panel ile güneş santralının kurulumu 3219480 TL, çok kristalli panel ile güneş santralının kurulumu 2823480 TL'dir. Her ne kadar tek kristallinin verimi yüksek ve enerji miktarı çok kristalliye göre 44 634 kWh/yıl fazla olsa da piyasada, çok kristalli panel ile kurulumu gerçekleştirilen güneş santrali maliyetinin düşük ve tek kristalliye göre sadece %1 ya da %2'lik verim düşüklüğüne sahip olması, çok kristallinin işletmeciler tarafından tercih edilme sebebidir.

Tek kristalli ve çok kristalli panellerin boyutları arasındaki fark ihmal edilebilir büyüklüktedir. Dolayısıyla aynı alan kullanım açısından bakıldığında da yine çok kristalli paneller tercih edilme sebebidir.

Tek kristalli (250 W) boyutları: 1640mm x 992mm x 40mm

Çok kristalli (250 W) boyutları: 1645mm x 992mm x 46mm

- c. 990 kW'lık tek kristalli PV santralin maliyetinin geri dönüşüm süreci (amorti süreci) yaklaşık 5-6 yıldır. Tek kristalli paneller ile kurulumu gerçekleştirilen santralin yıllık enerji maliyeti 1501339,3 kWh' dir. Devletin enerjiyi alım fiyatı 13,3 ABD dolar cent/kWh'dir (1 ABD doları \cong 3TL).

Santralin 1 yıllık ürettiği enerjiyi devletin satın alma değeri ile hesapladığımızda yıllık kazanç;

$$1501339,3(\text{kWh/yıl}) \times 0,133(\text{dolar/kWh}) \times 3(\text{TL/dolar}) = 599034,38 \text{ TL} \quad (4.19)$$

$$\frac{\text{PV'nin Toplam Kurulum Maliyeti(TL)}}{\text{Üretilen Enerjinin Yıllık Değeri(TL)}} = \frac{3219480 \text{ TL/yıl}}{599034,38 \text{ TL/yıl}} = 5,374 \quad (4.20)$$

Santralin yaklaşık 6 yılda kendini amorti edebileceği söylenebilir.

- d. 990 kW'lık PV santralin maliyetinin geri dönüşüm süreci (amorti süreci) yaklaşık 4-5 yıldır. Çok kristalli paneller ile kurulumu gerçekleştirilen santralin yıllık enerji maliyeti 1 456 705 kWh' dir. Devletin enerjiyi alım fiyatı 13,3 ABD dolar cent/kWh'dir (1 ABD doları \cong 3TL).

Santralin 1 yıllık ürettiği enerjiyi devletin satın alma değeri ile hesapladığımızda yıllık kazanç;

$$1\,456\,705(\text{kWh/yıl}) \times 0,133(\text{dolar/kWh}) \times 3(\text{TL/dolar}) = 581225,295 \text{ TL} \quad (4.21)$$

$$\frac{\text{PV'nin Toplam Kurulum Maliyeti(TL)}}{\text{Üretilen Enerjinin Yıllık Değeri(TL)}} = \frac{2823480 \text{ TL/yıl}}{581225,29 \text{ TL/yıl}} = 4,8578 \quad (4.22)$$

Santralin yaklaşık 5 yılda kendini amorti edebileceği söylenebilir.

- e. Resmi Gazetede 27809 Sayı ile yayınlanan “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanunda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun’un II Sayılı cetvelinde yer alan Yerli Katkı İlavesinden yararlanılması durumu Tablo 4.16’de gösterilirken; II Sayılı Cetvel ise Tablo 4.17’de gösterilmiştir.

Tablo 4.16: II sayılı cetvel

II Sayılı Cetvel		
Tesis Tipi	Yurt İçinde Gerçekleşen İmalat	Yerli Katkı İlavesi (ABD Doları cent/kWh)
Fotovoltaik güneş enerjisine dayalı üretim tesisi	1- PV panel entegrasyonu ve güneş yapısal mekaniği imalatı	0,8
	2- PV modülleri	1,3
	3- PV modülünü oluşturan hücreler	3,5
	4- Evirici	0,6
	5- PV modülü üzerine güneş ışınını odaklayan malzeme	0,5

Kaynak: Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanunda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun

Tablo 4.17: Yerli katkı ilavesinden yararlanılması durumu

PV panel entegrasyonu ve güneş yapısal mekaniği imalatı	+	PV modülleri	+	Evirici	=	Toplam Yerli Katkı İlavesi
0,8		1,3		0,6		2,7

Kaynak: Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanunda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun

Santral kurulumundan itibaren 5 yıl boyunca kWh başına 13,3+2,7=16 dolar cent ücret alınabileceğinden tek kristalli paneller ile kurulumu gerçekleştirilen santralin yıllık enerji üretimi 1501339,3 kWh olduğundan;

$$1501339,3(\text{ kWh/yıl}) \times 0,16(\text{dolar/kWh}) \times 3(\text{TL/dolar}) = 720642,86\text{TL} \quad (4.23)$$

$$\frac{\text{Santralin Toplam Kurulum Maliyeti(TL)} \quad 3219480 \text{ TL/yıl}}{\text{Üretilen Enerjinin Yıllık Değeri(TL)} \quad 720642,864 \text{ TL/yıl}} = \frac{3219480}{720642,864} = 4,467 \quad (4.24)$$

Santralin yaklaşık 5 yılda kendini amorti edebileceği söylenebilir.

- f. Çok kristalli paneller ile kurulumu gerçekleştirilen santralin yıllık enerji maliyeti 1 456 705 kWh olarak bulunmuştur. 16 dolar cent/kWh üzerinden yeni geri ödeme süresini hesaplırsak;

$$1456705(\text{ kWh/yıl}) \times 0,16(\text{dolar/kWh}) \times 3(\text{TL/dolar}) = 699218,4 \text{ TL} \quad (4.25)$$

$$\frac{\text{Santralin Toplam Kurulum Maliyeti(TL)} \quad 2823480 \text{ TL/yıl}}{\text{Üretilen Enerjinin Yıllık Değeri(TL)} \quad 699218,4 \text{ TL/yıl}} = \frac{2823480}{699218,4} = 4 \quad (4.26)$$

Santralin yaklaşık 4 yılda kendini amorti edebileceği söylenebilir.

4.7 LİSANSIZ ELEKTRİK ÜRETİMİNE İLİŞKİN KANUN VE YASAL DÜZENLEMELER

1 MW'ın altında lisanssız elektrik üretimi için yapılan ilk yasal düzenleme 5627 sayılı "Enerji Verimliliği Kanunu" ile gündeme gelmiştir. Kanunun geneli ve maddelerine ilişkin gerekçelerinde "Yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak yalnızca kendi ihtiyacını karşılaması amacıyla azami 100 kW'lık elektrik üretim tesislerinin desteklenmesi" ve bu doğrultuda "Yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının on yıl içinde yaygınlaştırılması" öngörülmekteydi.

5627 sayılı kanun ile 4628 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu'na eklenen fıkralar ise; “Yalnızca kendi ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla bakanlık tarafından yürürlüğe konulacak yönetmelikte belirlenen değerin üzerinde verimi olan kojenerasyon (ısı ve elektrik ve/veya mekanik enerjinin aynı tesiste eş zamanlı olarak üretimi 6446 K.md.3.f1-v) tesisi kuran gerçek ve tüzel kişi, lisans alma ve şirket kurma yükümlülüğünden muaf tutulacağı ilgili yönetmelikte düzenlenir”.

“Yalnız kendi ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı kurulu gücü azami 200 kW'lık üretim tesisi ile mikrokojenerasyon (elektrik enerjisine dayalı kurulu gücü 100 kW ve altında olan kojenerasyon 6446K.md.3.f1-v) tesisi kuran gerçek ve tüzel kişiler, lisans alma ve şirket kurma yükümlülüğünden muaftır” biçiminde yasalaşmıştır. Lisanssız üretimin yasalaşan bu haline ihtiyaç fazlası üretime dair bir düzenleme getirilmemiş, bu husus “Kurul” tarafından çıkacak ikincil mevzuata bırakılmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı lisanssız elektrik üretiminde ihtiyaç fazlası elektrik enerjisinin sisteme verilmesiyle ilgili ilk yasal düzenleme 5784 sayılı kanun ile gündeme gelmiştir. Kanun ile yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı lisanssız elektrik üretiminde kurulu güç 500 kW'a çıkarılmış ve ihtiyaç fazlası elektrik enerjisinin de sisteme verilmesi kabul edilmiştir.

Son olarak 2 Ekim 2013 tarihinde 28783 sayılı resmi gazetede yayımlanan yönetmeliğin birinci maddesi gereğince; kurulu gücü azami 1 MW'lık yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim tesisi lisanssız kurulabilir. 14/3/2013 tarihli ve 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu'nun 14. maddesi kapsamında tüketicilerin elektrik ihtiyaçlarının tüketim noktasına en yakın üretim tesislerinden karşılanması, arz güvenliğinin sağlanmasında küçük ölçekli üretim tesislerinin ülke ekonomisine kazandırılması, etkin kullanımının sağlanması ve elektrik şebekesinde meydana gelen kayıp miktarlarının düşürülmesi amacıyla lisans alma ile şirket kurma yükümlülüğü olmaksızın elektrik enerjisi üretebilecek gerçek veya tüzel kişilere uygulanacak usul ve esaslar belirlenmiştir.

Lisansız güneş santrali kurulumunda tarife garantili şebekeye bağlantı sistemi iki şekilde gerçekleştirilir;

- i. Alçak Gerilim (AG)'den şebekeye bağlanmak,
- ii. Orta Gerilim (OG)'den şebekeye bağlanmak.

Sahadaki enerji alış verişi için şebekeye bağlı sistemler üreticilerin ürettikleri tüm enerjiyi harcamalarına ve böylece üreticilerin kullanıcı haline gelmelerine olanak sağlamaktadır. Ancak şebekeye bağlı olan sistem, üretilen enerjinin yetmemesi durumunda şebekeden gerekli enerjinin çekilmesi ve ücretinin ödenmesini ya da üretilen enerjinin tüketim sonrası fazla gelmesi durumunda şebekeye geri verilmesini ve bunun devlet tarafından alım garantisi ile ücretlendirilmesini içerir. Bu sistemler AG noktasından yapıldığında santral kurulumu maliyeti ciddi oranda düşmektedir. Dolayısıyla evirici çıkışının OG transformatörüne getirilme maliyeti ve kablolar üzerindeki gerilim düşümü artar.

Üretim tesisinin;

- a. Kurulu gücü ≤ 5 kW ise AG seviyesinde tek fazlı olarak,
- b. Kurulu gücü > 5 kW ise AG seviyesinde üç fazlı olarak bağlanır.
- c. (T.md.5.f2)
- d. Kurulu gücü ≤ 11 kW ise AG seviyesinden,
- e. Kurulu gücü > 11 kW ise teknik değerlendirme sonucuna göre AG veya
- f. Yüksek Gerilim (YG) seviyesinden şebekeye bağlanır (Y.md.12.f1).

Bağlanılacak noktanın bağlanabilirlik oranının;

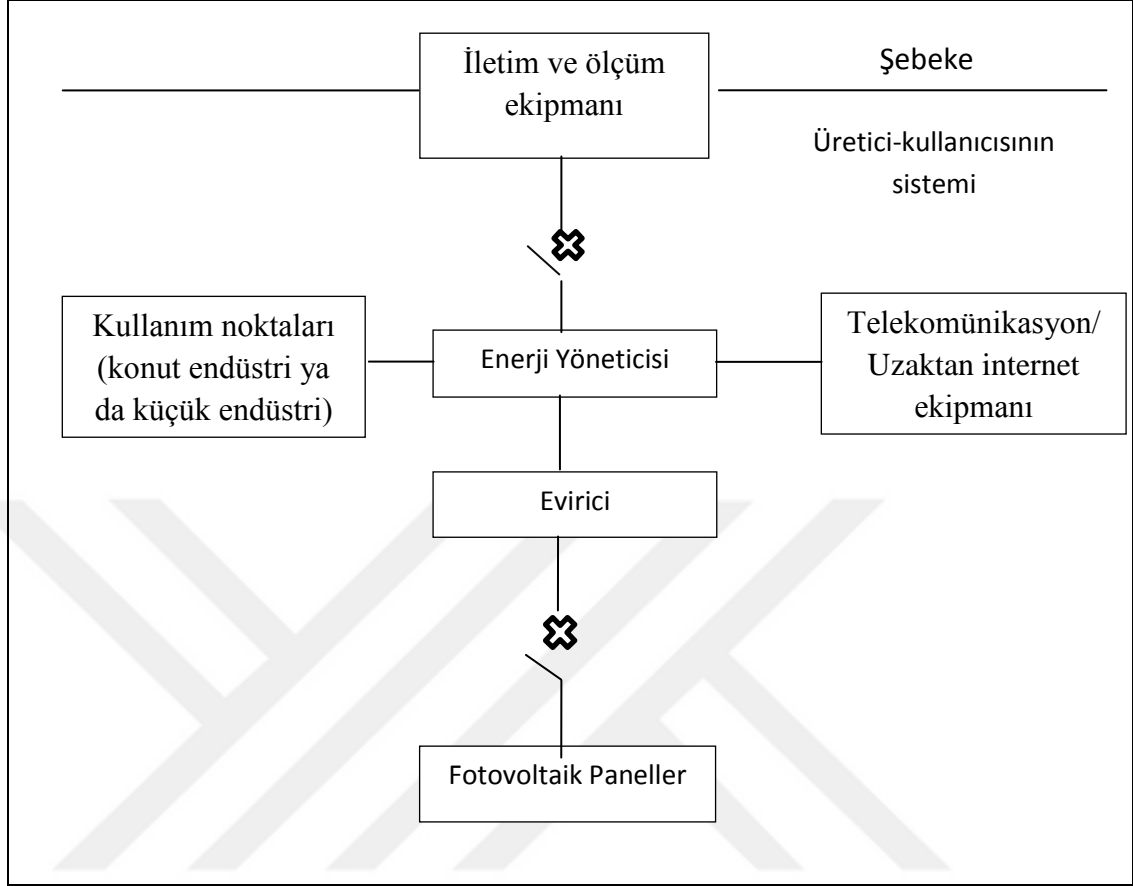
- a. Kurulu gücü 1000 kW'ın üzerindeki kojenerasyon tesisleri için 30'un,
- b. Diğer üretim tesisleri için 70'in üzerinde olması esastır (Y.md.12.f5).

Bağlanabilirlik Oranı ise: dağıtım sistemine bağlı üretim tesislerinin kısa devre katkısı hariç bağlantı noktasındaki üç faz kısa devre akımının bağlanacak üretim tesisinin nominal akımına bölünümü ile elde edilecek değeri (Y.md.4.f1-d).

$$\text{Bağlanabilirlik Oranı} = \frac{I_k''}{I_n} \quad (4.27)$$

Şekil 4.20'de fotovoltaik panellerin şebekeye bağlanabilmesine ilişkin akış diyagramı verilmiştir.

Şekil 4.20: Fotovoltaik panellerin şebekeye bağlanabilmesine ilişkin akış diyagramı



Kaynak: Yeni Nesil Fotovoltaikler (Fabio Andreolli)

AG seviyesinden bağlanacak üretim tesislerini toplam kapasitesi, bu üretim tesislerinin bağlı olduğu dağıtım transformatörünün ilgili şebeke işletmecisine ait bir transformatör olması halinde transformatör gücünün %30'unu geçemez.

Transformatörün başvuru sahibine ait olması durumunda, söz konusu kapasite transformatör gücü kadar olur (Y.md.12.f3).

5. SONUÇ

Fotovoltaik sistemlerin tasarımı için yapılacak olan maliyet ve güç analizi tasarımın en önemli kısmını oluşturmaktadır. Yapılan analizler sonucuna göre planlanan sistemin maddi olarak uygun olup olmadığına karar verilir. Fotovoltaik sistemlerin kurulumunda, paneller modüler bir yapıya sahip oldukları için santral gücü değiştirildiğinde güç ve maliyet analizi sonuçları da doğru orantılı olarak değişim gösterecektir.

Şebekeye AG seviyesinden 3 fazlı bağlantı yapılması durumunda evirici çıkışındaki sinüs dalgasının kusursuz olmamasından dolayı şebekede harmonikler oluşur ve kirlenmeye sebep olur. Dolayısıyla enerji kalitesi düşer. Fotovoltaik sistemlerin gücü büyüdükçe şebekeye bağlantı noktalarına harmonik filtresi konulması gerekliliği artmaktadır. OG veya YG seviyesinden bağlanması durumunda transformatör kullanılması gerekir. Transformatör metal devresinden dolayı harmoniklerin bir kısmını zayıflatacağından bu kirlenme daha az olur.

Lisanssız yenilenebilir enerji santrallerinin bir bölgede kurulabilmesi için o bölgede kurulu gücün toplamda en az 1/30'u kadar güce sahip bir tüketim tesisi olması gerekir. Bu nedenle bu çalışmada kullanılan 990 kW'lık kurulum için 33 kW, 660 kW'lık kurulum için 22 kW ve 330 kW'lık kurulum için de 11 kW gücünde tüketim tesisinin kurulum yapılması düşünülen bölgede olması gerekir.

Fotovoltaik hücre fiyatlarında son yıllarda görülen belirgin düşüş; tek ve çift eksenli güneş izleme sistemlerinin kullanımını efektif olmaktan çıkartmıştır. İzleme sisteminin getireceği ek maliyetin miktarını sabit panellerin sayısını arttırmak için kullanılması enerji üretiminde daha etkin olmaktadır. İzleyici sistemde ışığın daha efektif kullanımının getirdiği enerji üretiminde artışı ve maliyet fazlalığı sabit sistemde panel fazlalığına karşılık geldiğinde, aynı maliyetle daha fazla enerji üretilmektedir.

KAYNAKÇA

Kitaplar

- Andreolli, F., 2015. *Yeni nesil fotovoltaikler: üçüncü nesil teknolojiye geçmek için tasarım ve uygulama kılavuzu*, Ankara: Emo Yayınları, ss.23-155.
- Atagündüz, G., 1989. *Güneş enerjisi ve uygulamaları*, İzmir: Ege Üniversitesi Güneş Enerji Enstitüsü Yayınları, ss. 1-61.
- Copernicus, N., 2010. *Göksel kürenin devinimleri üzerine*, C., C., Çevik, (Çev.), İstanbul: Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları (orijinal basım tarihi 1543), ss. 19-49.
- Kalogirou, S., A., 2009. *Solar Energy Engineering: processes and systems*, United States of America: Academic Press, ss. 53-71.
- Kılıç, A., & Öztürk, A., 1983. *Güneş enerjisi*, İstanbul: Kipaş Dağıtımçılık.
- Kızılırmak, A., 1964. *Küresel astronomi ve gök mekaniği*, Astronomi Dersleri Cilt I, İzmir: Ege Üniversitesi Matbaası, ss. 54-87.
- Smart, W., M. & Gökdoğan, N., T., 1940. *Kürevi astronomi*, İstanbul: Maarif Matbaası, ss.1-45.
- Türköz, M., S., 2009. *Elektronik*, İstanbul: Birsen Yayınevi, ss. 1-111.
- Klucher, T.M., 1979. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy* 23 (2), 111–114.
- Hottel, H.C., Woertz, B.B., 1942. Evaluation of flat plate solar heat collector. *ASME Trans.* 64, 91.
- Kalogirou, S., 2003. Generation of typical meteorological year (TMY-2) for Nicosia, Cyprus. *Renewable Energy* 28 (15), 2317–2334.
- Klein, S.A., Beckman, W.A., Duffie, J.A., 1976. A design procedure for solar heating systems. *Solar Energy* 18, 113–127.
- Gregg, B.A. and Hanna, M.C., 2003. Comparing organic to inorganic photovoltaic cells: Theory, experiment and simulation. *Journal of Applied Physics*, Vol. 93, pp. 3605-3614.
- Schilla, T. 2003. Development of a Network Model of a PV Array and Electrical System for Grid Connected Applications, PhD Thesis, University of Northumbria.

Colorado State University, 1980, Solar heating and cooling of residential buildings:
sizing, installation and operation of systems, Solar Energy Applications Laboratory
Colorado State University

Passadena, Calif, 1986, Electricity From Photovoltaic Solar Cells, California Institute of
Technology, Jet Propulsion Laboratory.



Sürelî Yayınlar

- Chandel, M., Agrawal, G., D., Mathur, S. & Mathur, A., 2014. Techno-economic analysis of solar photovoltaic power plant for garment zone of Jaipur city, *Centre for Energy and Environment, Malaviya National Institute of Technology, Jaipur: Elsevier Ltd.*
- Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 2009. *Dünyada ve Türkiye 'de güneş enerjisi*, **0011**, Ankara: EKC Form Ofset, ss. 17-61.
- Lameira, V., J. & Vergura, S., 2011. Technical-financial comparison between a PV plant and a CSP plant, *Revista Elektronika Sistemasi & Gestao*. **6**, ss. 210-220.
- Ültanır, M.,Ö., 1996. *Bilim ve Teknik*, s.5015
- Enslin, J.H.R., Wolf, M.S., Snyman, D.B. and Swiegers, W. 1997. Integrated Photovoltaic Maximum Power Point Converter, *IEEE Trans.*
- Hiyama, T., Kouzuma, S., Imakubo, T. and Ortmeyer, T.H. 1995. Evaluation of Neural Network Based Real Time Maximum Power Tracking Controller for PV System, *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 10, pp. 543-548.

Diğer Yayınlar

- Acarman, T., (1996). Güneş pillerinden şebekeye enerji aktarılmasının analizi ve tasarımı, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, s.57.
- Batman, M., A., (2001). Elektrik üretimi için güneş pillerinin kullanımında verimi artırıcı yeni bir yöntem, *Doktora Tezi*, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.104.
- Oturanç, G., (1989). Extraterrestrial güneş radyasyonunun hesaplanmasında güneş geliş açısının astronomik koordinat sistemlerinde incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İzmir: Ege Üniversitesi Güneş Enerji Enstitüsü.
- Tarıcan, A., (1994). Güneş pili santralleri, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, s.178.
- TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, *Güneş enerji sistemleri tesisatı eğitimi*, Ankara: Emo Yayınları.
- Yalçın, L., (2010). Haymana araştırma ve uygulama çiftliğinin güneş enerjisi potansiyelinin belirlenmesi ve güneş enerjisinden yararlanabilme olanakları, *Doktora Tezi*, Ankara: Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yıldız, M., (2002). Fotovoltaik pil ve modüllerin simülasyonu ve performans analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya: Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.48.
- Hsieh, J.S., 1986. Solar Energy Engineering. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Kreith, F., Kreider, J.F., 1978. Principles of Solar Engineering. McGraw-Hill, New York.
- Meinel, A.B., Meinel, M.P., 1976. Applied Solar Energy.
- AddisonWesley, Reading, MA. Meteonorm, 2009. Maps. Available from: www.meteonorm.com.
- Schilla, T. 2003. Development of a Network Model of a PV Array and Electrical System for Grid Connected Applications, PhD Thesis, University of Northumbria.
- Mohan, N., Undeland, T.M. and Robbins, W.P. 1995. Power Electronics, Converters, Applications and Design (2nd Edition), John Wiley & Sons, New York
- Barutçu.B, 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi Ders Notları.
- Linnea.K.G, 2013, Solar power on the top of the world: Possibilities to provide the school in Thade, in Nepal, with electricity from a solar cell system, doctoral thesis, Karlstads University.

