

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**KAMPÜS BİNALARINDA ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ BİR ÇATI ÜSTÜ
FOTOVOLTAİK SİSTEM TASARIMI VE BENZETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa CEYLAN

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

HAZİRAN 2018

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**KAMPÜS BİNALARINDA ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ BİR ÇATI ÜSTÜ
FOTOVOLTAİK SİSTEM TASARIMI VE BENZETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mustafa CEYLAN
(301091063)**

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Coşkun FIRAT

HAZİRAN 2018

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301091063 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mustafa CEYLAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KAMPÜS BİNALARINDA ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ BİR ÇATI ÜSTÜ FOTOVOLTAİK SİSTEM TASARIMI VE BENZETİMİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Coşkun FIRAT**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Fatih ÖZTÜRK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Talat İNAN
Boğaziçi Üniversitesi

Teslim Tarihi : **03 Mayıs 2018**
Savunma Tarihi : **07 Haziran 2018**

Kıymetli eşime,

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışması sürecinde her türlü yardımını benden esirgemeyen ve her zaman motivasyon kaynağı olan değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Coşkun FIRAT'a teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca beni her an desteklemiş olan annem Nermin CEYLAN ve babam Necati CEYLAN'a, beni akademik hayata yönlendiren ağabeyim Adil Ali CEYLAN'a ve bu çalışmanın zahmetini benimle birlikte omuzlayan hayat arkadaşım Esra CEYLAN'a şükranlarımı sunarım.

Haziran 2018

Mustafa CEYLAN
(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Türkiye’de Güneş Enerjisi	8
1.1.1 Türkiye’de güneş radyasyonu	8
1.1.2 Türkiye’de güneş enerjisi kullanımı.....	12
1.1.3 Yenilenebilir Enerji Kaynakları Kanunu	14
1.2 Literatür Taraması	16
1.3 Tezin Amacı	21
1.3.1 İTÜ’de güneş enerjisinden faydalanma	21
1.3.2 Amaç	23
2. FOTOVOLTAİK SİSTEM EKİPMANLARI	25
2.1 Fotovoltaik Modül.....	34
2.2 Akü.....	36
2.2.1 OPzS akü.....	37
2.2.2 Jel aküler	37
2.2.3 Kuru aküler.....	38
2.3 Evirici.....	38
2.3.1 Şebekeye bağlı (on-grid) eviriciler.....	39
2.3.2 Şebekeden bağımsız (off-grid) eviriciler	39
2.4 Şarj Regülatörü.....	39
2.4.1 Darbe genişlik modülasyonlu (PWM) şarj regülatörleri.....	39
2.4.2 Maksimum güç noktası izleyicili (MPPT) şarj regülatörleri	40
3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER VE PERFORMANSLARI	41
3.1 Binalarda Uygulanan Fotovoltaik Sistemler	41
3.1.1 Fotovoltaik sistemlerin çatılarda kullanımı.....	42
3.1.2 Fotovoltaik sistemlerin cephelerde kullanımı	46
3.1.3 Fotovoltaik sistemlerin diğer bina elemanlarında kullanımı.....	47
3.2 Açık Alanda Uygulanan Fotovoltaik Sistemler	49
3.3 Şebekeden Bağımsız Sistemler	50
3.3.1 Direkt bağlı sistemler	50
3.3.2 Bataryalı sistemler.....	51
3.3.3 Şarj kontrollü bataryalı sistemler	51
3.3.4 Batarya depolamalı ve AC ile DC yükler	52

3.4 Şebekeye Bağlı Sistemler	53
3.5 Karma Sistemler	54
3.6 Performansı Etkileyen Faktörler	55
3.6.1 Performans etkisi açısından fotovoltaik teknolojisi	55
3.6.2 Çevresel faktörler	56
3.6.2.1 Güneş pili sıcaklığı	56
3.6.2.2 Güneş radyasyonu	57
3.6.2.3 Modül yerleşimi	58
3.6.2.4 Enlem.....	58
3.6.2.5 Rüzgâr	59
3.6.2.6 Gölgeleme	59
3.6.2.7 Kirlilik	59
3.6.2.8 Albedo	60
3.7 Performans Parametreleri	60
3.8 Modellemede Kullanılan Yazılım	61
3.8.1 PV*SOL yazılımı kullanımı	63
3.8.2 Yazılımda kullanılan hesaplamalar	68
4. İTÜ ENERJİ ENSTİTÜSÜ ÇATI TİPİ FV SİSTEM MODELLEMESİ	71
4.1 Enerji Enstitüsü'ndeki Elektrik Tüketimi	71
4.2 Binaların Çatı, Dış Duvar ve Kampüste Uygun Arazi Alanları	75
4.3 Enerji Tüketimi / FV Üretime Uygun Alan Açısından Yer Seçimi	76
4.3.1 Çatı alanları	79
4.3.2 Modüllerin çatı yerleşimi	80
4.3.3 Üretilecek elektrik enerjisi tahmini	81
4.4 İTÜ Enerji Enstitüsü Modeli	81
4.4.1 İklim verileri.....	81
4.4.2 Elektrik tüketim verileri	82
4.4.3 Üç boyutlu tasarım	83
4.4.4 Akü grubu seçimi	90
4.4.5 Ekonomik analiz.....	92
4.4.6 Sonuçlar.....	92
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	95
KAYNAKLAR.....	97
ÖZGEÇMİŞ	105

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AC	: Alternatif akım
AR-GE	: Araştırma ve geliştirme
BIPV	: Binaya entegre fotovoltaik sistem
DC	: Doğru akım
DMİ	: Devlet Meteoroloji İşleri
DSSC	: Boya duyarlı güneş pili
EİE	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü
EPDK	: Elektrik Piyasası Denetleme Kurulu
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
EVA	: Etilen vinil asetat
FV	: Fotovoltaik
GEPA	: Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası
GES	: Güneş enerjisi santrali
GIS	: Coğrafi Bilgi Sistemi
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
LCOE	: Seviyelendirilmiş elektrik maliyeti
MPPT	: Maksimum güç noktası izleyicisi
PET	: Polietilen tereftalat
PVB	: Poli vinil butiral
PWM	: Darbe genişlik modülasyonlu
STC	: Standart test koşulları
YEGM	: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü
YEKDEM	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması

SEMBOLLER

A	: Fotovoltaik modül (veya diyot) alanı
E	: Net elde edilen enerji
E_{dif}	: Difüze güneş radyasyonu
E_{dir}	: Direkt gelen güneş ışıınımı
E_{eğim}	: Eğik yüzeye gelen toplam güneş radyasyonu
E_{FV}	: Fotovoltaik modülden elde edilebilecek enerji miktarı
E_{inv}	: Evirici enerji çıkışı
E_{tüketim}	: Günlük tüketilen elektrik enerjisi
E_{üretim}	: Günlük üretilebilecek elektrik enerjisi
E_{yan}	: Yansıyan güneş radyasyonu
FF	: Dolum faktörü
G	: (Etkin) güneş radyasyonu
G_s	: Referans güneş radyasyon sabiti
h	: Modül yüksekliği
H	: Güneşlenme süresi
I	: Akım
I_{sc}	: Kısa devre akımı
KO	: Kirlilik oranı
N_m	: Modül sayısı
N_{ŞA}	: Normal şartlar altındaki modül çalışma sıcaklığı
P	: Güç
P₀	: Standart koşullardaki güç değeri
P_{in}	: Diyota gelen ışın gücü
P_{max}	: Maksimum güç
P_T	: Sıcaklık düzeltmesi yapılmış güç çıkışı
PR	: Performans oranı
RP_T	: Güç çıkışı indirgeme yüzdesi
T_d	: Ortam sıcaklığı
T_{MÇS}	: Modül çalışma sıcaklığı
T_{STC}	: Standart test koşullarındaki modül çalışma sıcaklığı
V	: Gerilim
V_{oc}	: Açık devre gerilimi
W_P	: Tepe güç değeri
Y_f	: Nihai yıllık hasat
Y_r	: Referans hasat değeri
β	: Eğim
γ	: Güç düşüşüne ait sıcaklık katsayısı
η	: Verim
η_{inv}	: Evirici verimi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Dünyadaki FV kurulu güce göre ilk 5 ülke.	6
Çizelge 1.2 : Türkiye’de lisanslı GES’ler.	14
Çizelge 1.3 : 5346 sayılı Kanuna ekli II Sayılı Cetvel (Güneş enerjisi bölümü).	15
Çizelge 2.1 : Gelişim sırasına göre FV güneş pilleri.	29
Çizelge 3.1 : Farklı güneş pili teknolojilerinin sıcaklık katsayısı.	57
Çizelge 3.2 : Yüzeyler için albedo değerleri.	60
Çizelge 4.1 : Enerji Enstitüsü elektrik tüketim verileri.	72
Çizelge 4.2 : Solar Türk Enerji P-250 modülünün özellikleri.	76
Çizelge 4.3 : Ön hesaplamalar ile elde edilen değerler.	78
Çizelge 4.4 : Enstitü çatısının alan ve boyutları.	80
Çizelge 4.5 : Çatı alanlarına yerleştirilebilecek maksimum modül sayıları.	81
Çizelge 4.6 : Çatı alanlarındaki modül sayıları.	87
Çizelge 4.7 : Maliyetler.	92
Çizelge 4.8 : FV sistemlerin ürettiği enerji ve performans oranları değerleri.	94

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : 2015 yılı için dünya toplam enerji üretiminin kaynaklara göre dağılımı. ..	3
Şekil 1.2 : 2015 yılı için dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjinin kaynaklara göre dağılımı.	3
Şekil 1.3 : 2015 yılı için dünyada elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı.	4
Şekil 1.4 : 1990-2015 yılları arasında dünyadaki senelik enerji üretim miktarının yüzde olarak artışı.	4
Şekil 1.5 : 2000-2016 yılları arasında dünyadaki FV kurulu güç değerleri.	5
Şekil 1.6 : Dünyada 2016 senesi için yenilenebilir enerji kaynaklarındaki istihdam. .	6
Şekil 1.7 : Yenilenebilir ve diğer kaynaklardan elde edilebilecek enerji miktarı ile dünyanın enerji tüketimi miktarlarının karşılaştırılması.	7
Şekil 1.8 : Türkiye'nin konumu, güneş kuşağı.	9
Şekil 1.9 : Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA).	9
Şekil 1.10 : Türkiye global radyasyon değerleri (kWh/m ² -gün).	10
Şekil 1.11 : Türkiye güneşlenme süreleri (saat).	10
Şekil 1.12 : Türkiye FV tipine göre alan-üretilebilecek enerji grafiği.	11
Şekil 1.13 : Düzlemsel kolektör ısı güneş enerjisi sistemi.	12
Şekil 1.14 : İTÜ Enerji Enstitüsü çatısında kurulmuş olan FV sistem.	22
Şekil 1.15 : Arı 6 Enerji Teknokent binasındaki BIPV sistem.	22
Şekil 1.16 : Arı 3 binasının bahçesinde kurulu FV sistem.	23
Şekil 2.1 : Silikon atomundaki boşluk ve serbest elektron.	26
Şekil 2.2 : Silikon atomları için oluşturulmuş p-tipi ve n-tipi bölgeler.	26
Şekil 2.3 : Açık devre gerilimi.	27
Şekil 2.4 : Bir FV diyotun I-V ve P-V eğrileri.	28
Şekil 2.5 : Monokristal ve polikristal güneş pilleri.	30
Şekil 2.6 : İnce film güneş pili.	31
Şekil 2.7 : Çok eklemlili güneş pilinin güneş spektrumundaki duyarlılığı.	32
Şekil 2.8 : Boya duyarlı güneş pili.	33
Şekil 2.9 : Güneş pili, modül ve dizi.	34
Şekil 2.10 : Standart modülde güneş pillerinin seri bağlanma şekli.	35
Şekil 2.11 : OPzS tipi akü grubu.	37
Şekil 2.12 : Jel akü tipi akü grubu.	38
Şekil 2.13 : MPPT tipi bir şarj regülatörü.	39
Şekil 3.1 : FV sistemlerin binalardaki uygulamaları.	42
Şekil 3.2 : Düz çatı üzerine kurulu bir FV sistem.	43
Şekil 3.3 : Eğimli çatı üzerine sonradan monte edilmiş bir FV sistem.	44
Şekil 3.4 : Eğrisel çatı üzerine kurulu FV sistem.	44
Şekil 3.5 : Cambridge Üniversitesi Mühendislik Fakültesi binası çatısındaki FV sistem uygulaması.	45
Şekil 3.6 : Atriumda FV sistem kullanımı örneği.	45
Şekil 3.7 : Bina cephesi üzerine montaj yapılan FV sistem.	47

Şekil 3.8 : Balkon korkuluğu olarak FV sistem kullanılması.	48
Şekil 3.9 : Gölgelek olarak kullanılan FV sistem örneği.	48
Şekil 3.10 : Kayseri Çiftlik GES.	49
Şekil 3.11 : Direkt bağlı FV sistetm.	50
Şekil 3.12 : Şebekeden bağımsız bataryalı FV sistem.	51
Şekil 3.13 : Şarj kontrollü bataryalı FV sistem.	52
Şekil 3.14 : AC ve DC yüklerin bulunduğu bataryalı FV sistem.	52
Şekil 3.15 : Şebekeye bağlı FV sistem.	53
Şekil 3.16 : Hibrit enerji sistemi.	54
Şekil 3.17 : Güneş pilinin sıcaklığa bağlı I-V eğrisi.	56
Şekil 3.18 : Farklı güneş radyasyonlarına göre I-V eğrileri.	57
Şekil 3.19 : Farklı enlem değerleri için güneş radyasyonu değerleri.	58
Şekil 3.20 : By-pass diyotunun çalışma şekli.	59
Şekil 3.21 : PV*SOL'da uydu fotoğrafları ile üç boyutlu tasarım görüntüsü	62
Şekil 3.22 : Pencere simgelerinin bulunduğu ana menü.	63
Şekil 3.23 : Welcome penceresi.	63
Şekil 3.24 : Project Data penceresi.	64
Şekil 3.25 : System Type, Climate and Grid penceresi.	65
Şekil 3.26 : 3D Design penceresi.	65
Şekil 3.27 : 3D Visualization penceresi.	66
Şekil 3.28 : Devre diyagramı.	66
Şekil 3.29 : Yerleşim krokisi.	67
Şekil 3.30 : Results penceresi.	67
Şekil 3.31 : Direkt, difüze ve yansıyan güneş radyasyonları.	68
Şekil 4.1 : 2014 yılı elektrik tüketiminin aylara göre dağılımı (yazılım üzerinden).	73
Şekil 4.2 : 2015 yılı elektrik tüketiminin aylara göre dağılımı (yazılım üzerinden).	73
Şekil 4.3 : 2016 yılı elektrik tüketiminin aylara göre dağılımı (gerçek veriler).	74
Şekil 4.4 : 2016 yılı için yazılımın hazırladığı ve gerçek veriler ile aylık elektrik tüketiminin dağılımı.	74
Şekil 4.5 : Enerji Enstitüsü uydu görüntüsü.	75
Şekil 4.6 : İTÜ Enerji Enstitüsü arazisi.	76
Şekil 4.7 : Enerji Enstitüsü çatı alanları.	79
Şekil 4.8 : Modül yerleşim mesafeleri.	80
Şekil 4.9 : Enerji Enstitüsü konumunun MeteoSyn üzerinde seçimi.	82
Şekil 4.10 : Yazılım üzerinden yapılan aylık elektrik tüketimi dağılımı.	83
Şekil 4.11 : Enerji Enstitüsü'nün üç boyutlu çizimi.	83
Şekil 4.12 : Modüllerin yerleşimi.	84
Şekil 4.13 : A çatısı yerleşim krokisi.	84
Şekil 4.14 : B çatısı yerleşim krokisi.	85
Şekil 4.15 : C çatısı yerleşim krokisi.	85
Şekil 4.16 : D çatısı yerleşim krokisi.	86
Şekil 4.17 : E çatısı yerleşim krokisi.	86
Şekil 4.18 : Siemens SINVERT PVM serisi evirici.	87
Şekil 4.19 : A çatısı için evirici konfigürasyonu.	88
Şekil 4.20 : B çatısı için evirici konfigürasyonu.	88
Şekil 4.21 : C çatısı için evirici konfigürasyonu.	89
Şekil 4.22 : D çatısı için evirici konfigürasyonu.	89
Şekil 4.23 : E çatısı için evirici konfigürasyonu.	90
Şekil 4.24 : SMA Technology – Sunny Island 8.0H model evirici.	90
Şekil 4.25 : Sonnenschein – A602/1415 SOLAR model akü.	91

Şekil 4.26 : FV sistemin devre diyagramı.	91
Şekil 4.27 : Sonuçlar penceresi.....	93
Şekil 4.28 : FV sistemin ürettiği elektrik enerjisinin aylara göre dağılımı.....	93

KAMPÜS BİNALARINDA ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ BİR ÇATI ÜSTÜ FOTOVOLTAİK SİSTEM TASARIM VE BENZETİMİ

ÖZET

Yenilenebilir enerji kaynakları, diğer enerji kaynaklarına göre insanlığın enerji talebini karşılayabilecek en temiz ve güvenilir kaynaklardır. Bu sebeple yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji elde edilmesi çalışmaları hızla artmaktadır. Dünyada tüm enerji üretiminde yenilenebilir enerjinin payı %13.4 ve elektrik enerjisi üretimindeki pay ise %22.8 civarında olsa da, yenilenebilir enerjiye yapılan yatırım, bu alandaki istihdam oranı ve kurulu güç miktarlarının senelik artışlarına bakılınca, bu konuda dünyanın çok daha hızlı ilerlediği görülmektedir. Bu oranlara benzer şekilde fotovoltaik sistemler, yenilenebilir enerji kaynakları arasında üretim payı olarak düşük bir oranda kalsa da, senelik olarak dünyada %45.5 civarında bir artışa sahiptir. Daha önceden maliyetli bir enerji üretim şekli olarak görülen fotovoltaik sistemler, son yıllarda bu konuda yapılan ilerlemeler ile çok daha cazip hale gelmiştir.

Türkiye coğrafi konumu itibarıyla çok iyi bir güneş enerjisi potansiyeline sahip olsa da daha çok güneşten sıcak su üretimi için uygulanan ısı güneş sistemleri alanında faydalanılmıştır. Enerji üretimi konusunda fotovoltaik teknoloji ülkemizde son on yıla kadar yok denecek kadar az bir paya sahipti. Türkiye’de son yıllardaki fotovoltaik kurulu gücündeki artış ise ülkenin hedefleri doğrultusunda çok ümit vericidir.

Yenilenebilir enerjinin mutfağı olarak tanımlanan üniversiteler yeşil veya sürdürülebilir kampüs projeleri yürütmektedirler. Bu projeler doğrultusunda görece elektrik üretiminin fazla sayılabileceği üniversite kampüsleri için fotovoltaik sistem uygulamaları, hem eğitim ve araştırma hem de elektrik üretimi adına çok güçlü bir alternatiftir. Bu sebeple bir çok üniversite kampüsü için hem teorik hem de uygulamalı çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada İstanbul Teknik Üniversitesi Ayazağa Kampüsü’nde bulunan Enerji Enstitüsü binaları için şebekeden bağımsız bir fotovoltaik sistem tasarlanmış ve benzetimi yapılmıştır. Tasarım ve benzetim işlemlerinde PV*SOL yazılımı kullanılmıştır. Fotovoltaik sistem uygulamaları açık alan, bina çatıları veya bina cephesi uygulamaları olarak yapılabilir. Açık alan uygulaması için enstitünün uygun bir arazisinin olmaması ve bina cephesi için tasarlanacak bir sistemin de çok maliyetli olacağı ön görülmesi sebebiyle tasarlanacak fotovoltaik sistem için en uygun yer olarak enstitü binalarının çatıları seçilmiştir. Enstitünün elektrik tüketim verileri göz önünde bulundurularak tüm elektrik tüketiminin fotovoltaik sistemler ile karşılanması için gerekli modül adeti hesaplanmıştır. Daha sonra binaların uygun olan çatı alanları için bir ön hesaplama yapılarak çatılara yerleştirilebilecek maksimum modül adet sayısı hesaplanmıştır. Ön hesaplamaların sonucu, çatı alanlarına kurulabilecek maksimum kapasitedeki bir fotovoltaik sistemin enstitünün elektrik tüketiminin yarısından azını karşılayabileceği ortaya çıkmıştır. Şebekeden bağımsız bataryalı bir sistem için böyle sonuç uygundur.

PV*SOL yazılımının üç boyutlu tasarım aracı ile enstitü binaları modeli oluşturulmuş ve modüllerin bina çatılarına uygun şekilde yerleştirilmesi ile fotovoltaiik sistem tasarlanmıştır. Modül olarak yerli üretim bir model seçilmiştir. Yazılımın otomatik oluşturduğu konfigürasyon seçenekleri doğrultusunda fotovoltaiik sistemin diğer ekipmanları olan eviriciler ve bataryalar seçilmiştir. Benzetim sonucu fotovoltaiik sistemin yıllık 88.642 kWh elektrik enerjisi üreteceği hesaplanmıştır. Bu miktar enstitünün gerçek yıllık elektrik tüketiminin %25'i kadardır. %72,3 verimle çalışan sistemin performans oranı %79,8 olarak hesaplanmıştır. Birim başına maliyet değeri ise 0,95 TL/kWh olarak hesaplanmıştır.

DESIGN AND SIMULATION OF A OFF-GRID PHOTOVOLTAICS SYSTEM ON CAMPUS BUILDINGS

SUMMARY

Compared to the other energy resources the renewable energy are clean and safe resources that can supply energy demand of the human beings. For this reason, recently the usage of the renewable energy resources and hence the studies and researches on the renewable energy have been increased rapidly. The renewables accounted for 13.4% of the global energy production and 22.8% of the world electricity generation in 2015. The penetration of the renewable energy is supposedly increased significantly in the long-term scenarios. The renewable energy sector is demonstrating the capacity of delivering cost reductions provided by the appropriate policy frameworks. While the share of renewable energy in total energy production in the world is 13.4% and the share of electricity energy production is around 22.8%, it is seen that the world is proceeding much faster in this area when considering the investments made in renewable energy, the annual increase in the employment rate and the amount of installed power in this area. Although the energy production by photovoltaic systems holds a smaller share compared to the rest of the renewables energy supply, the increase has been especially high at average annual rates of 45,5% since the year 1990. A breakthrough in cost of photovoltaic power production was observed over the last years due to the massive investment in research and development. Nowadays, the photovoltaic systems are widely common and the photovoltaic generated electricity costs less than before. Therefore, the annual installed capacity in 2016 has been increased by 50% with 76.6 GW compared to the installed capacity in 2015 with 51.2 GW. Besides, the World total installed power capacity has been reached the value of 306.5 GW. As it is in the previous years, also in 2016, China, USA and Japan has protected their ranks in the photovoltaic markets. China has increased the installed photovoltaic power capacity to a total of 77,9 GW by adding more 34,5 GW in 2016. This value equals to the quarter of the world total capacity. The photovoltaic power investment in USA was increased by 98% in 2016 with the capacity of 14,8 GW. Japan as the third largest country in the market has increased the installed photovoltaic power capacity by 8.6 GW in 2016. The photovoltaic power investment in Europe has been decreased by 22 % and the installed power in 2016 was 6,7 GW. In 2016, the lowest photovoltaic sale contract in the history with 24,4 USD / MWh was signed in Abu Dhabi. According to the US investment bank Lazard Capital's latest levelized cost of electricity (LCOE), the cost of the large-scale solar power plants are more cheaper than the new combined cycle gas turbines, coal and nuclear power plants.

In spite of having some disadvantages, the photovoltaics systems have got many advantageous such as the direct conversion of sunlight into electricity, the absence of mechanical or moving parts, the absence of noise problem, the failure due to reaching high temperatures, the creation of pollution, and the long and durable life. The

photovoltaic energy has a wide range of microwatt and megawatts. In the photovoltaic systems, the solar energy is used directly as a free and inexhaustible source of energy.

Due to possessing the insufficient fossil energy sources Turkey is largely dependent on foreign energy resources. This situation has led the country to go for the new energy sources including renewable energy. For the country, solar energy is among the most predominant sources in terms of the production of the energy among the other renewable energy sources.

Turkey has an advantageous of geographical position in terms of solar energy. Unfortunately Turkey mostly used this potential on behalf of solar water heating rather than generating electricity by solar energy. Its potential for electricity generation couldn't be utilized until the regulations and laws were enacted. Though the developments of photovoltaic systems in recent years are encouraging. Turkey's solar industry has just come out of its best year so far, adding about 1.7 GW of new photovoltaic capacity in 2017.

Universities always have been focal points of change. The mixture of academic research, student activism and institutional influence has allowed campus communities to promote widespread technical and social transformations. During the last few years, a few of these institutions have begun to lead in renewable energy. With green and sustainable campus projects, the universities have taken a big step towards meeting new environmental goals. Photovoltaic system applications for university campuses, where electricity production is more than comparable to these projects, is a powerful alternative for both education and research as well as electricity generation.

At Istanbul Technical University which is one of the leading university in Turkey, the solar energy is used in many different fields. For example, solar charged ITU-BUS and solar lighting have been active in order to create an environment-friendly and sustainable campus within the ITU Green Campus project. The ITU Solar Vehicle Team has designed and produced ARIBA and ARUNA vehicles. ARIBA is a racing car produced by the team for TUBITAK Formula G races. The family car ARUNA is Turkey's first domestic vehicle powered by solar energy. The solar powered boat, produced by the ITU Solar Team, has been the 3rd place in the world. In addition, there are many academic and scientific studies in ITU including the development of selective surface solar collectors, photovoltaic conversion by thin films obtained via electrochemical coating, application of solar batteries and solar cooling.

In this study, for the Energy Institute which is in Istanbul Technical University Ayazaga Campus, a photovoltaic system using PV*SOL software has been designed and simulated. Designed system is an off-grid photovoltaic system with batteries. All surfaces in the building such as roofs and facades exposed to direct solar radiation are, in principle, suitable for the installation of photovoltaic arrays. The chosen system for the Institute is a rooftop type. The inter-row distance of the photovoltaic modules is important for the localization of the system on the roofs. Calculation of inter-row spacing of photovoltaic module is needed to prevent interrow shading. A simple rule for minimum spacing between rows is to allow a space equals to three times the height of the panels. According to this rule, it is calculated that the maximum 385 modules can be installed on the institute's roofs. Taking into account the electricity consumption of the institute, the number of modules needed to meet all electricity consumption with photovoltaic systems has been calculated. The conclusion of the preliminary calculations is that a photovoltaic system at the maximum capacity that

can be installed in the roof areas is less than half of the electricity consumption of the institute. This is suitable for a off-grid photovoltaic system with batteries.

PV * SOL has a 3D design tool to draw the buildings and design the system. The photovoltaic system has been designed by placing the modules in the appropriate positions on the building roofs. A made in Turkey module was selected for the system. In accordance with the configuration options that the software automatically generates the number/capacity of the inverters and the batteries.

The simulated photovoltaic system is estimated to produce an annual electrical energy of 88.642 kWh. This amount is 25% of the actual annual electricity consumption of the institute. The performance ratio of the system with 72.3% efficiency was calculated as 79.8%. Cost per unit is calculated as 0,95 TL / kWh.

1.GİRİŞ

İnsanoğlu içinde bulunduğu doğa ile sürekli bir ilişki halinde olup ve doğaya bağımlı olarak varlığını sürdürmektedir. Öncelikle dünyamız ve daha büyük düşünüldüğünde evren, sadece bugünü yaşayanlar için değil gelecek nesiller için de yaşanılacak tek yerdir. Bu durum bugün yaşayanlara bazı sorumluluklar yüklemektedir; doğaya zarar vermeden, sürdürülebilirlik ilkesini göz önünde bulundurarak doğadan faydalanmak. İnsan medeniyetlerinin gelişimi ile yaşamın gerektirdiği ihtiyaçlar, insanlığı bu sorumluluktan uzaklaştırmaya itse de; bireysel ve toplumsal olarak alınan tüm kararlar ve gösterilecek duyarlık doğal yaşamın sürdürülebilirliğine katkı sağlayacaktır.

İnsanlığın varlığını sürdürmesi için gereken en önemli etkenlerden biri de enerjidir. Enerji, hemen hemen hayatın her alanında kullanılmakta ve teknolojinin gelişimi ile de daha önemli hale gelmektedir. Dünya nüfusunun artması ile birlikte enerji ihtiyacı da hızla artmaktadır. Bu durum, enerjiyi küreselleşen dünyada bütün ülkeler için en önemli sorunlardan biri haline getirmiştir ve enerjinin elde edilme şekilleri de dünya için tartışılacak bir konu haline gelmiştir. Günümüz teknolojileri ile enerji fosil yakıtlar, nükleer enerji ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmektedir.

Fosil yakıt rezervleri var olan enerji ihtiyacına bağlı tüketim ile hızlı bir şekilde azalmaktadır. Bu tür yakıtların ekosisteme verdiği zararlar da göz önünde bulundurulduğunda, alternatif enerji kaynaklarının önemi ortaya çıkmaktadır. Ayrıca fosil yakıtlardan enerji üretilebilmesi için enerji hammaddesinin yeraltı kaynaklarından temin ediliyor olması gerçeği, ülkelerin enerji üretimlerinde farklılıklar oluşmasına sebep olmaktadır. Fosil yakıt kaynakları çoğunlukla belirli coğrafi bölgelerde yoğunlaştığı için, bu kaynaklara sahip olmayan birçok ülke enerji hammaddeleri satın alarak enerji üretimlerine dahil etmektedirler. Bu durum ise bu ülkeler için dışa bağımlılığa neden olmaktadır.

Nükleer enerji ise kurulum maliyeti yüksek olan bir enerji türüdür. Kurulum maliyetinin yüksek olması yanında yaşanan kötü tecrübelerin yarattığı korku ve

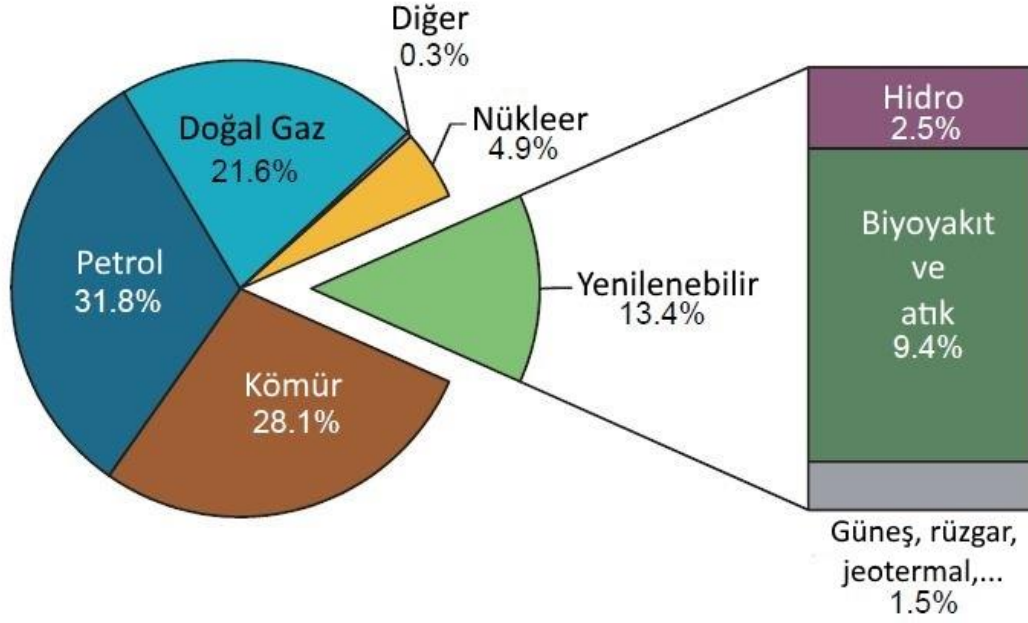
endişe, bu santralleri çok tartışmalı bir hale getirmiştir. Fakat çevresel zararlar adına taşıdığı risklere rağmen birçok ülke için de vazgeçilmez bir enerji üretim biçimidir.

Yenilenebilir enerji kaynakları doğaya zarar vermeden doğadan elde edilebilen ve tükenmeyen enerji kaynaklarıdır. Diğer enerji elde etme şekilleri ile karşılaştırıldığında, doğa ve insan ilişkisinin sürdürülebilirliğini risk taşımadan devam ettirebilecek tek yöntemin yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanmak olduğu söylenebilir.

Gelişmiş ülkeler başta olmak üzere dünyada birçok ülkede enerji konulu konferans ve sempozyumlar düzenlenmektedir. Sık sık organize edilen bu toplantılar arasında, yenilenebilir enerji kaynak ve sistemleri ile ilgili olanlar sayıca hızla artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları özellikle enerji verimliliği ve kullanımı konusunda öncelikli ele alınan ve incelenen bir konudur. Yenilenebilir enerji kaynakları çevre sorunlarına neden olmayan, canlıların yaşamını tehdit etmeyen, temiz, güvenilir ve sürdürülebilir niteliktedir.

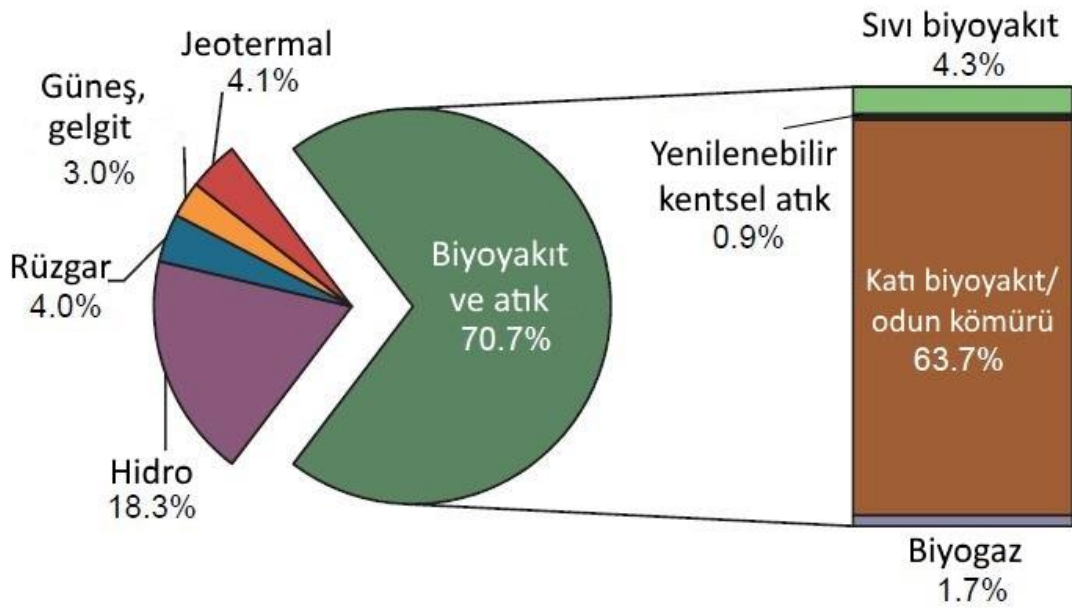
Yenilenebilir enerji kaynakları, kaynağa ulaşmada kesintiler söz konusu olmasıyla beraber doğanın kendi dengesi içinde, bir sonraki gün aynen mevcut olabilen enerji kaynağıdır. İsminden de anlaşıldığı gibi kendini yenileyebilen enerji kaynakları olarak da tanımlanabilen yenilenebilir enerji kaynakları, hiç tükenmeyen enerji kaynakları olarak düşünülebilir. Bu kaynaklar enerji sınıflandırması yapıldığında; depo edilebilirliğine, kullanılabilirliğine, ekonomik olup olmadığına ve doğaya zarar verip vermemesine göre incelenir [1]. Yenilenebilir enerji kaynakları; güneş, rüzgâr, biyokütle, jeotermal, hidro kaynaklar, dalga ve diğer termal kaynaklar olarak sıralanabilir. Yenilenebilir kaynaklar ile enerji üretiminin toplam üretilen enerjiye göre oranı Şekil.1.1’de gösterilmiştir. 2015 yılı Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerjinin üretilen tüm enerji miktarına göre yüzdesi 13,4’tür [2].

Bu %13,4’lük payın yenilenebilir enerji kaynakları çeşitlerine göre kendi içinde dağılımı Şekil.1.2’de gösterilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde enerji üretimindeki en büyük paya %70,7 ile biyokütle ve atık kaynaklar sahiptir. İkinci sırayı ise %18,3’lük bir değer ile hidro enerji kaynakları almaktadır. Bu iki tip enerji kaynağı çok büyük oranda yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimini oluştururken, rüzgâr, güneş ve jeotermal kaynaklarının oranları her biri yaklaşık %3 civarında olup

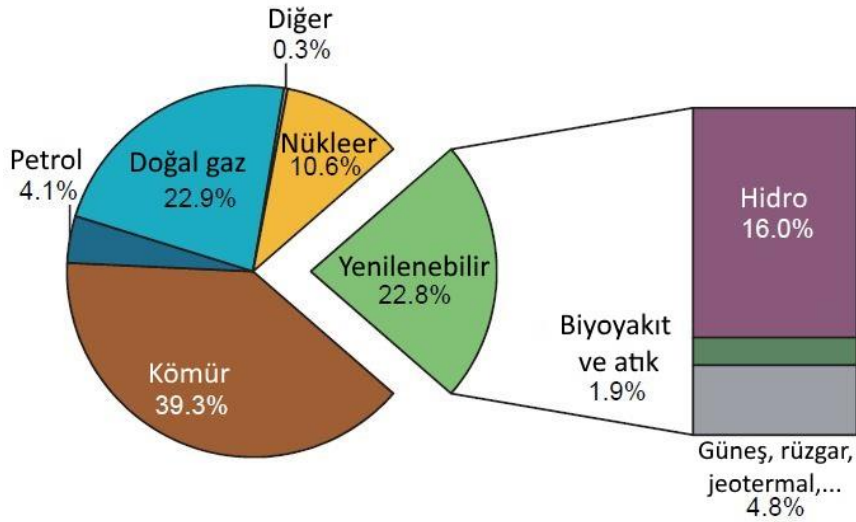


Şekil 1.1 : 2015 yılı için dünya toplam enerji üretiminin kaynaklara göre dağılımı.

biyokütle ve hidro kaynaklara oranla çok daha azdır. Şekil 1.3’de ise dünyada yine 2015 senesi için elektrik üretimi açısından yakıt cinsine göre bakıldığında yenilenebilir enerji kaynakları yüzde 22,8 olarak gözükmemektedir [2]. Oranlardan görüldüğü gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji ve elektrik üretimindeki paylarının %10-20 mertebesinde olduğu söylenebilir.

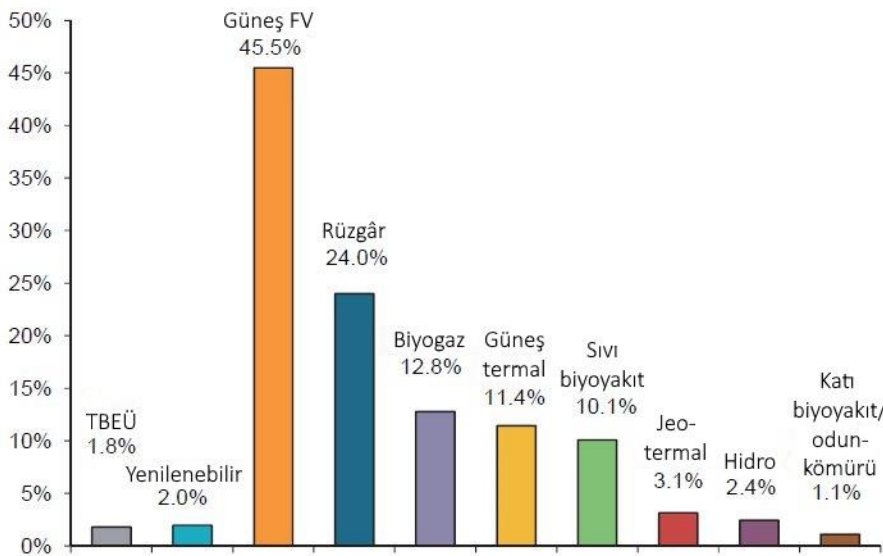


Şekil 1.2 : 2015 yılı için dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjinin kaynaklara göre dağılımı.



Şekil 1.3 : 2015 yılı için dünyada elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı.

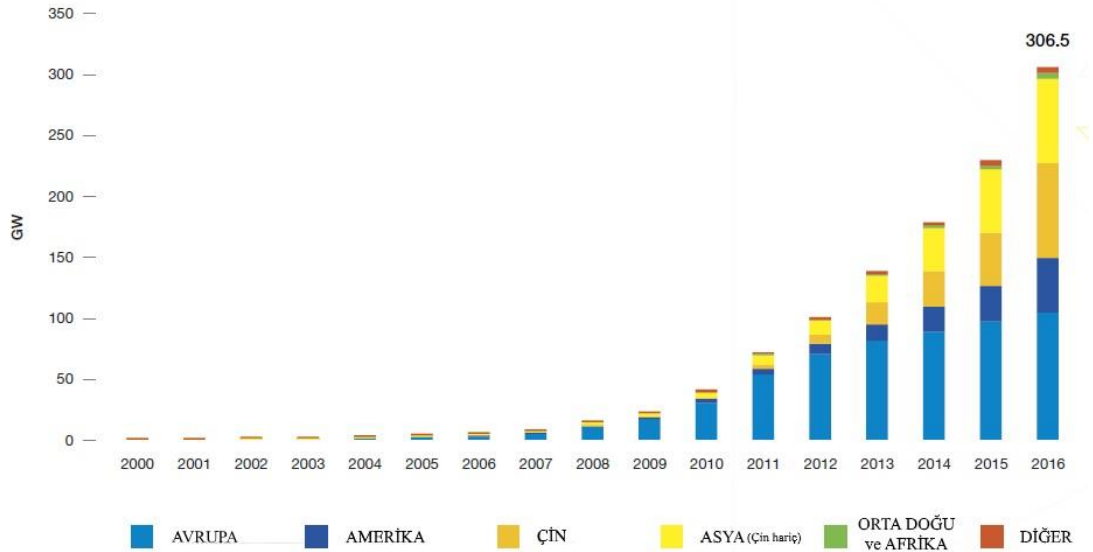
Güneş enerjisi ise diğer yenilenebilir enerji kaynakları arasında %2-3 gibi küçük bir paya sahipse de büyüme açısından bakıldığında en hızlı büyüyen ve gelişim gösteren yenilenebilir enerji kaynağıdır. Şekil.1.4'te 1990-2015 yılları arasındaki senelik enerji üretim miktarının ortalama artışı yüzde olarak gösterilmiştir. Grafikten anlaşıldığı üzere bu yıllar arasında senelik toplam birincil enerji üretim (TBEÜ) artışı ortalama %1,8 iken, yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen enerji miktarı ortalama %2,0'lık bir artış ile her sene yükselmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş %45,5 ile büyük bir fark ile en yüksek ortalama yıllık artış değerine sahip kaynaktır. Güneşten sonraki en yüksek değer rüzgâr enerjisine ait olup %24,0 değerindedir [2].



Şekil 1.4 : 1990-2015 yılları arasında dünyadaki senelik enerji üretim miktarının yüzde olarak artışı.

Dünyadaki yenilenebilir enerji projelerine yatırım, 2017 yılı için bir önceki yıla göre %13 artış ile 333 milyar dolar olmuştur. Yenilenebilir enerji projelerine yapılan yatırım rekoru 360 milyar dolar ile 2015 yılında gerçekleşmiştir. 2017 yılında yenilenebilir enerji projelerine yapılan 333 milyarlık yatırımın 133 milyarlık payı Çin'e aittir. Temiz enerjide 2017'nin lideri olan Çin, bir önceki seneye göre %24 artış göstermiştir. 2017 yılında güneş enerjisine yapılan yatırımlar bir önceki seneye göre %18 artarak 160 milyar dolara ulaşmıştır. Bu miktarın yarısından fazlası yine Çin'de gerçekleşmiştir [3].

Dünyada yılda kurulan güç kapasitesi açısından fotovoltaik (FV) sistemler, 2016 yılında önceki oranları korumaya devam ederek bir önceki yıla göre %50 civarında bir artış göstermiştir. 2015 yılında toplam 51,2 GW gücünde FV sistem kurulmuşken, 2016 yılı için bu değer 76,6 GW'tır. Dünyadaki toplam kurulu güç kapasitesi 2016 yılı sonunda 306,5 GW değerine ulaşmıştır. Dünyadaki toplam kurulu gücün 2000 yılından sonraki gelişimi Şekil 1.5'te gösterilmiştir [4].



Şekil 1.5 : 2000-2016 yılları arasında dünyadaki FV kurulu güç değerleri.

2016 yılı için Çin, Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ve Japonya FV marketindeki sıralamalarını, önceki senelerdeki gibi korumaktadırlar. Çin 2016 yılında şebekesine 34,5 GW'lık FV güç ekleyerek toplam kapasitesini 77,9 GW'a çıkarmıştır. Bu değer dünya genelinin çeyreği oranındadır. ABD, kurulan güç açısından senelik yatırımını 2015 yılına göre %98 arttırarak, 2016 yılında 14,8 GW'lık bir kurulu gücü işletmeye almıştır. Japonya, markette üçüncü büyük ülke olarak 2016 yılında kurduğu FV güç

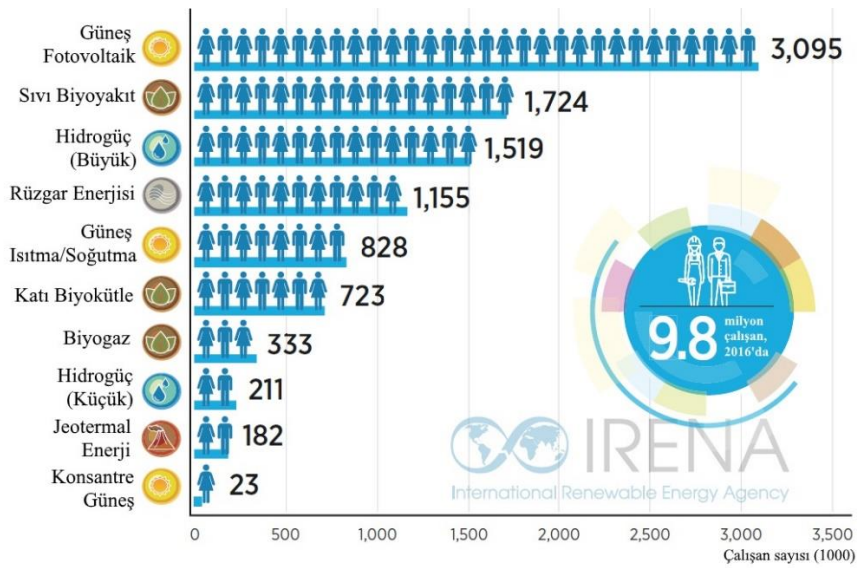
değeri 8,6 GW'tır. Avrupa'nın FV güç için senelik işletmeye aldığı miktar seneden seneye %22 oranında azalmıştır ve 2016 yılı içinde devreye soktuğu FV güç 6,7 GW'tır.

2016 yılında 24,4 USD/MWh değeri ile tarihteki en düşük FV satış sözleşmesi Abu Dabi'de imzalandı. ABD yatırım bankası Lazard Capital'ın en son Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti (LCOE) hesaplamalarına göre, büyük ölçekli güneş enerjisi santralleri (GES) maliyeti, yeni kombine çevrim gaz türbinlerinden, kömür ve nükleer santrallerden daha ucuzdur [4]. 2016 yılı sonu ve 2017 yılı içerisindeki güncelleme tarihlerine göre dünyadaki FV kurulu gücün ülkelere göre son durumu Çizelge 1.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 : Dünyadaki FV kurulu güce göre ilk 5 ülke [5].

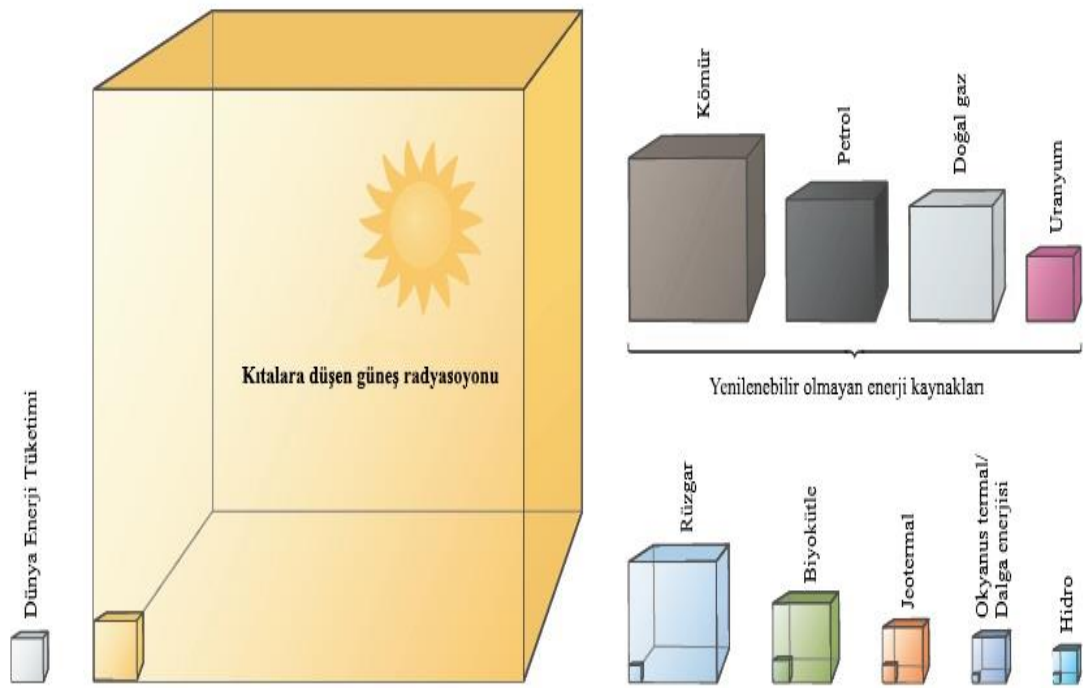
Ülke	Güncelleme	Kurulu Güç (MW)
Çin	Haziran 2017	102,470
Japonya	Aralık 2016	42,750
Almanya	Ekim 2017	42,710
ABD	Aralık 2016	40,300
İtalya	Aralık 2016	19,279

Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'na göre dünyada 2016 senesindeki yenilenebilir enerji sektöründe çalışan insan sayısı, yenilenebilir enerji kaynağının çeşidine göre dağılımı ile Şekil.1.6'da gösterilmiştir. Bu grafik de FV güneş enerjisi sektörünün ne kadar büyümüş olduğu hakkında fikir vermektedir [6].



Şekil 1.6 : Dünyada 2016 senesi için yenilenebilir enerji kaynaklarındaki istihdam.

Yeryüzündeki tüm enerji kaynaklarının dolaylı veya direkt kaynağı güneştir. IEA'ya göre, 90 dakikada yeryüzüne gelen güneş ışığı, tüm dünyanın bir yıllık enerji ihtiyacını karşılayacak miktardadır [7]. Şekil.1.7'de kıtalara düşen güneş radyasyonu miktarının enerji kaynaklarından elde edilebilecek potansiyel enerji miktarı ile karşılaştırılması gösterilmektedir. Büyük küpler enerji kaynağının miktarını gösterirken, küçük küpler günümüz teknolojisi ile bu enerjinin ne kadarının kullanılabilir olabileceğini göstermektedir. En soldaki küpün dünyadaki enerji tüketim miktarını gösterdiğini dikkate alırsak, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve özellikle güneş enerjisinin aslında ne kadar yeterli bir kaynak olduğunu fark edebiliriz [8].



Şekil 1.7 : Yenilenebilir ve diğer kaynaklardan elde edilebilecek enerji miktarı ile dünyanın enerji tüketimi miktarlarının karşılaştırılması.

FV güneş enerjisi sistemlerinin kurulum maliyetleri diğer enerji kaynaklarına göre daha yüksektir. Ayrıca, veriminin ve kapasite faktörünün de kısmen düşük olduğu söylenebilir [9]. Bu dezavantajlara karşılık FV sistemlerin; güneş ışınlarını direkt olarak elektriğe dönüştürmesi, mekanik veya hareketli parça içermemesi, gürültü-ses sıkıntısının olmaması, yüksek sıcaklıklara ulaşmaması, kirlilik oluşturmaması ve uzun ömürlü olması gibi birçok avantajı sayılabilir. FV enerji, mikrowattan megawatt mertebelerine geniş bir aralıkta üretilebilir. FV sistemlerde güneş enerjisi doğrudan maliyetsiz ve tükenmez bir enerji kaynağı olarak kullanılır [10].

1.1 Türkiye’de Güneş Enerjisi

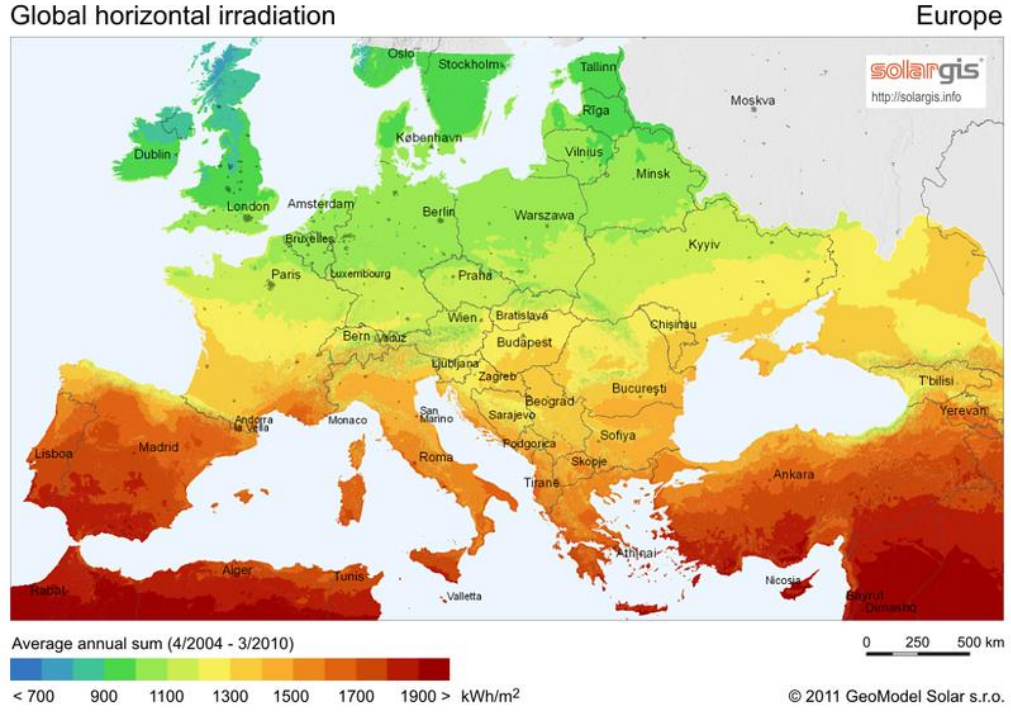
Türkiye fosil enerji kaynakları açısından kısıtlı bir ülke olması sebebiyle, enerjide büyük oranda dışa bağımlıdır ve her yıl milyarlarca dolarlık harcamalar ile enerji ithal etmektedir. Bu durum ülkemizi yeni enerji kaynakları arayışına yöneltmiştir. Türkiye’deki enerji araştırmaları var olan enerji kaynaklarından en verimli şekilde yararlanma yanında aynı zamanda yenilenebilir enerji kaynaklarının da daha verimli kullanımı konusunda yapılmaktadır. Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında ülkemiz için en baskın üretim kaynakları arasında sayılabilir. Türkiye, Avrupa Birliği’nde güneşten elektrik enerjisi üretimi yapabilen ülkelere göre çok daha yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Türkiye eskiye göre güneşten elektrik enerjisi üretimi konusunda bir hayli ilerlemiş olsa da, ülkemizin Avrupa Birliği ülkelerindeki bilinçlendirme ve teşvik konularında hala bu ülkelere göre geri kaldığı söylenebilir. Avrupa Birliği ülkelerinin büyük bir kısmı, güneş enerjisinden faydalanmayı yaygınlaştırmak amacı ile tüketicileri güneş enerjisi konusunda hem bilinçlendirmekte hem de birçok teşvik mekanizması ile çeşitli imkânlar sunmaktadır. Ülkemizde bu teşviklerin yeterli olduğu söylenemez [11].

1.1.1 Türkiye’de güneş radyasyonu

Kuzey yarımkürede yer alan Türkiye, 36-42° kuzey enlemleri ve 26-45° doğu boylamları arasında yer alır [12]. Bu mükemmel coğrafi konum ile ülkemiz, güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeden daha avantajlı konumdadır. Şekil 1.8’de de görüldüğü üzere Türkiye güneş kuşağında yer almaktadır [13]. Bu konuma rağmen güneş enerjisinden faydalanma oranı öngörülenden çok daha azdır. Bu sebeple, ihtiyaç duyulan enerjinin karşılanması için yakın gelecekte, diğer yenilenebilir enerjiler ile birlikte özellikle güneş enerjisi önemli bir çözüm olarak etkili ve sürdürülebilir bir şekilde hayata geçirilmelidir [7].

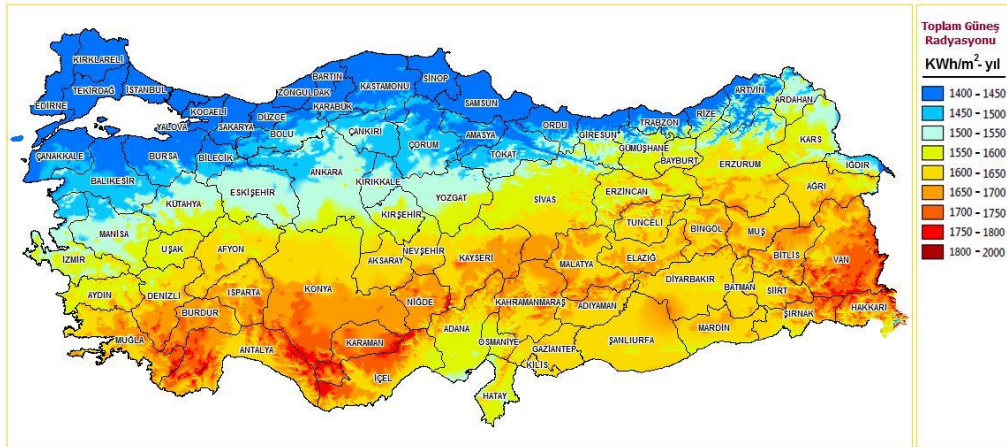
Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü’nün (EİE) alt birimlerinden Enerji Kaynakları Etüt Daire Başkanlığı’na bağlı Güneş Enerjisi Şubesi, 1982 yılından itibaren güneş enerjisi ile ilgili araştırma, geliştirme, bilgilendirme ve tanıtım gösterileri çalışmalarını yürütmektedir. 2011 yılı itibari ile kurulan Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM) bu çalışmalarını devam ettirmekte olup yeni çalışmalar da yürütmektedir [14]. EİE’nin başlattığı ve yeni teşkilatlanmada YEGM’nin devam ettirdiği çalışmalar ile Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyelini

ortaya koymak amacıyla Şekil 1.9’da gösterilen Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) hazırlanarak kullanıma sunulmuştur [15].



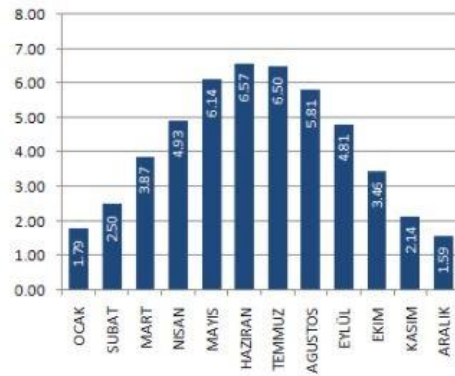
Şekil 1.8 : Türkiye’nin konumu, güneş kuşağı.

GEPA’nın hazırlanmasında, uluslararası geçerliliği olan Coğrafi Bilgi Sistemi’nde kullanılan ESRI (Environmental Systems Research Institute) Güneş Radyasyon Modeli’nden faydalanılmıştır. Modelde kullanılan parametrelerin hesaplanması ve model ölçümlemesinin yapılması için EİE ve Devlet Meteoroloji İşleri (DMİ) istasyonlarında 1985-2006 yıllarına ait ölçüm yapılan saatlik güneş ölçüm değerleri kullanılmıştır [16].

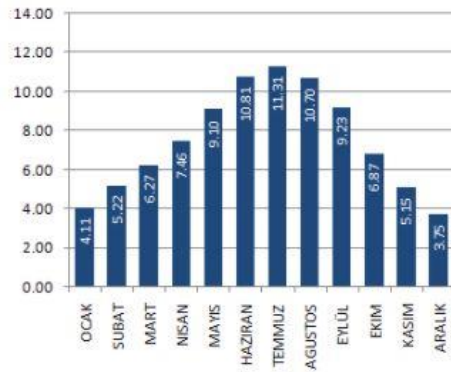


Şekil 1.9 : Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA).

GEPA'ya göre, yıllık toplam güneşlenme süresi 2741 saattir. Ortalama gelen güneş enerjisi miktarı ise 1527 kWh/m²-yıl'dır. Hem enlem değeri hem de rutubetli olması sebebiyle en az ışıınım alan bölge Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesi'dir. Marmara ve Kuzey Ege Bölgesi, Karadeniz'e göre biraz daha iyi durumdadır. Güney Ege ve Orta Anadolu Bölgeleri orta derecede ışıınım almaktadır. Doğu Akdeniz ve Doğu Anadolu Bölgeleri ışıınım değerleri iyi bölgelerdir. Güney Doğu Bölgesi'nin sağ en alt ucu ışıınım değerleri en iyi olan bölgemizdir. Sert ve soğuk iklime sahip bu yer kışın en fazla ışıınım alan yerdir. Rakım yüksektir. Havadaki su buharı, yağmur ve kar şeklinde yoğunlaşmakta ve atmosfer daha berrak olup ışıınımın engellenmesi en az seviyede olmaktadır. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli açısından en zengin bölgeleri Van-Hakkâri bölgesi ve Batı Akdeniz Bölgesi'dir. Global radyasyon değerinin en yüksek olduğu yıl içi süre Haziran ayına aittir. Aylık bazda ortalama günlük ışıınım şiddeti 4,18 kWh/m²gün'dür. Güneşlenme süresinin en yüksek olduğu yıl içi süre Temmuz ayına aittir. Aylık bazda ortalama günlük güneşlenme süresi 7,49 saat/gün'dür. Güneş radyasyon değerleri ve güneşlenme sürelerinin aylara göre dağılımı sırasıyla Şekil 1.10 ve Şekil 1.11'de gösterilmiştir [15].

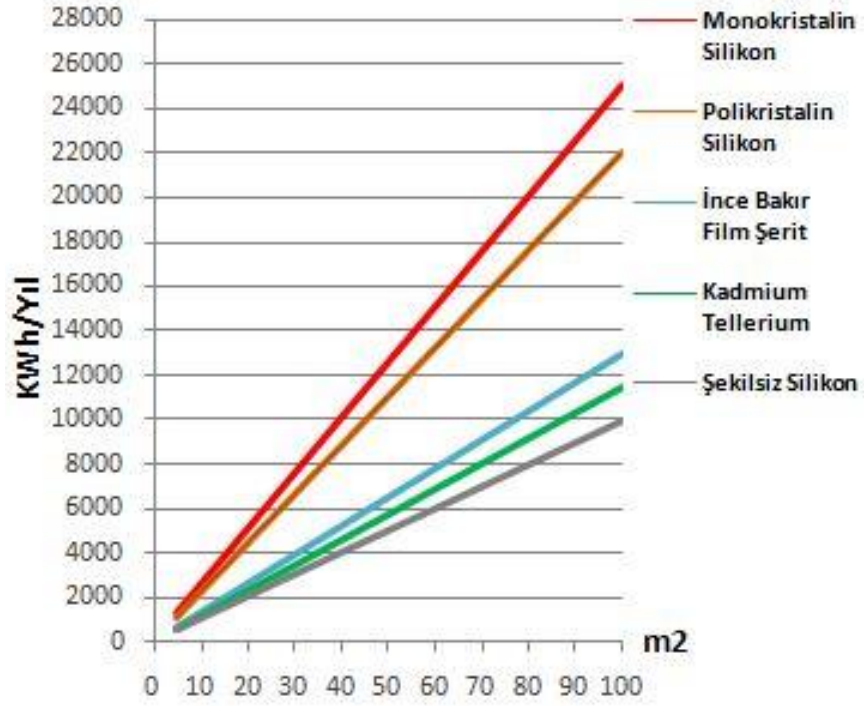


Şekil 1.10 : Türkiye global radyasyon değerleri (kWh/m²-gün).



Şekil 1.11 : Türkiye güneşlenme süreleri (saat).

FV teknolojilerine bağılı olarak farklı tür güneş pillerine göre farklı verim ve dolayısıyla farklı güç çıktıları elde edilmektedir. Şekil 1.12’de GEPA’ya göre Türkiye’nin ortalama toplam ışınım değeri özelinde farklı tip teknolojilere göre m² başına üretilebilecek enerji miktarı grafikte gösterilmiştir [16].



Şekil 1.12 : Türkiye FV tipine göre alan-üretilebilecek enerji grafiği.

EİE tarafından gerçekleştirilen çalışmanın sonuç verileri göstermektedir ki; Türkiye’de var olan güneş enerjisi potansiyelinden yararlanıldığı takdirde yıllık ortalama 380 milyar kWh elektrik enerjisi üretilebilecektir. Bu potansiyel 56.000 MW termik santral kapasitesine eşdeğer güneş enerjisi kapasitesi olduğunu göstermektedir. Brüt potansiyel değeri ele alındığında var olan kurulu güç miktarı çok az kalmaktadır; Türkiye’de en son verilere göre toplam FV sistem kapasitesi 2500 MW civarındadır. Yüzey alanına yılda düşen toplam güneş enerjisi miktarı hesaplandığında Türkiye 977×10^{12} kWh değerinde güneş enerjisini toplayabilmektedir. Bir yılda düşen enerji miktarı olduğu göz önünde bulundurulduğunda; bu enerji miktarı $111,5 \times 10^6$ MW gibi çok yüksek bir kurulu güç değerine denk gelmektedir. Bu kurulu güç miktarı ise var olan tüm elektrik santralleri toplam kurulu gücünün 1000 katından daha fazladır. Fosil yakıt karşılığı olarak brüt potansiyel 80.000 Mtep/yıl’dır. Brüt potansiyel değerinin tamamının kazanılması düşünülemeyeceği için kaba bir hesapla hedeflenecek potansiyel 500 Mtep/yıl düzeyinde varsayılabilir [11, 17].

1.1.2 Türkiye’de güneş enerjisi kullanımı

Güneş enerjisinden faydalanmak adına geliştirilen uygulamalar yöntem, malzeme ve teknolojik düzey olarak çeşitlilik göstermekle birlikte temelde iki ana gruba ayrılabilir; ısı güneş teknolojileri ve FV güneş teknolojileri.

- **Isıl güneş teknolojileri;** güneş enerjisinin ısı enerjisine dönüştürüldüğü teknolojilerdir. Elde edilen ısı enerjisi direkt olarak kullanıldığı gibi, dolaylı yoldan elektrik üretiminde de kullanılabilir.
- **FV güneş teknolojileri;** güneş enerjisinin direkt olarak elektrik enerjisine dönüştürüldüğü teknolojilerdir [18].

Isıl güneş enerjisi teknolojilerinde ısı elde etmek için güneş kolektörleri ve reflektörleri kullanılır. Şekil 1.13’te örnek bir güneş kolektörlü ısı güneş enerjisi sistemi görülmektedir [19].



Şekil 1.13 : Düzlemsel kolektör ısı güneş enerjisi sistemi.

Güneş kolektörleri, topladıkları güneş enerjisini bir akışkan üzerinden ısıya çevirirler. Bu akışkan çoğunlukla su olur. Üretilen sıcak su ile elektrik elde edilebilir fakat uygulamalarda genellikle sıcak su direkt olarak kullanılır. Türkiye’de güneş kolektörlerinin çoğu Akdeniz ve Ege Bölgelerinde kullanılmakta olup, ülkemizdeki kurulu güneş kolektörü miktarı 2015 yılı verilerine göre 19.487.206 m²’dir. Yıllık üretim hacmi yaklaşık 1 milyon m²’dir ve bu üretimin bir miktarı ihraç edilmektedir. Ülkemizde 10’u büyük olmak üzere 100’den fazla kolektör üreticisi vardır. Isıl güneş

enerjisi kullanımı yine 2015 verilerine göre ülkemizde kurulu güç olarak 13.637 MW_{th}'tır. Bu değer ile ülkemiz kolektör kurulu gücü bakımından dünyada Çin ve ABD'den sonra 3. sırada yer almaktadır. Almanya 13.246 MW_{th} değeri ile Türkiye değerine çok yakın olup 4. sıradadır. Kişi başına düşen kurulu güç açısından bakıldığında ise Türkiye 172 W_{th} ile dünyada 9. Sıradadır [20, 21].

FV sistemler, temelde güneş enerjisini direkt olarak elektriğe çeviren güneş pilleri ile kurulur. Türkiye'de FV teknolojisinin kullanımı çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Güneş enerjisinden yararlanma potansiyelinin iyi seviyede olduğu ülkemizde bu teknoloji yavaş bir başlangıç yapsa da, son yıllardaki ivmenin istenilen seviyede olduğu söylenebilir. 2009 yılında kurulu güç 1 MW iken, sadece 2015 ve 2016 yıllarında işletmeye alınan santrallerin kurulu güç değerleri sırasıyla 248,8 MW ve 571 MW'tır. 2017 yılı içerisinde devreye alınan FV sistemler kurulu güç miktarı, tüm Avrupa ülkelerinde 2017 yılı için devreye alınan toplam kurulu güç miktarının %28'ini oluşturarak 2017 yılı için Türkiye'yi FV sistemlerde birinci yapmıştır. 2017 yılında yaklaşık 1,79 GW kurulu güç devreye alınarak, Türkiye'nin toplam GES kurulu gücü 2647 MW'a ulaşmıştır [11, 22, 23].

Türkiye'deki GES'lerden 10 tanesi lisans veya ön lisansa sahiptir. Bu santrallerin kapasiteleri Çizelge 1.2'de gösterilmiştir. Ön lisans alma aşamasında olan santraller de hesaba katıldığında Türkiye'deki lisanslı GES kurulu gücü yaklaşık 600 MW olacaktır [24]. Lisanslı GES'lerin pazarı ülkemizde henüz yenidir. Bu projelerin kârlılıkları, projenin kurulum yerine ve ihale katkı payı bedeline bağlı kalmaktadır. Lisans alma zorluğu da göz önünde bulundurulunca bir GES için lisans almak zararlı gibi gözükmektedir. Bu dezavantajlar yanında lisanslı bir GES'in; serbest piyasa fiyatı veya Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM) fiyatı kullanabilme, düşük işletme giderleri, gelecekte büyüme potansiyeli ve imkanı, serbest tüketicilere doğrudan satış imkanı, montaj işlerinin kısa süreli ve kolay olması gibi avantajlı yönleri vardır [25].

Doğal Doğayı Koruma Vakfı'nın (WWF-Türkiye) Güneş Atlası'na göre, toplam 790 km²'lik bir alana yayılacak güneş modülleriyle Türkiye'nin şu andaki elektrik ihtiyacının tamamını karşılamak mümkündür. Son yıllardaki ivmeye bakıldığında Türkiye'nin 2019 yılı için 3000 MW ve 2023 yılı için 5000 MW FV kurulu güç hedefleri ulaşılabilir gözükse de, var olan potansiyel değere göre bu hedeflerin büyütülmesi gerekmektedir [26].

Çizelge 1.2 : Türkiye’de lisanslı GES’ler.

Santral	Kapasite (MW _e)	Durumu
Konya Alibeyhöyüğü GES	18 MW	Ön lisans
Kayseri Özkoyuncu Yeşilhisar GES	15 MW	Ön lisans
Maraş Elbistan GES	10 MW	Ön lisans
Denizli Acıpayam GES	10 MW	Lisans
Muş Alparslan GES	9 MW	Ön lisans
Sivas Hamal GES	9 MW	Ön lisans
Elazığ Akfen GES	8 MW	Lisans
Şırnak Silopi GES	7 MW	Ön lisans
Burdur GES	6 MW	Ön lisans
Muğla GES	6 MW	Ön lisans
Denizli Tavas GES	5 MW	Ön lisans
Erzurum Halk Enerji GES	5 MW	Lisans

Ülkemizin güneş enerjisi özelinde yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili 2023 hedefleri şu şekilde sıralanabilir:

- Elektrik enerjisi ihtiyacının %30’unun yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması.
- En az 5000 MW güneş enerjisi kapasitesine ulaşılması [27].
- Isı ve elektrik ihtiyacının en az %2’sinin güneş enerjisi ile karşılanması.
- AR-GE kaynaklarının %5’inin yenilenebilir enerji kaynaklı teknoloji alanlarına aktarılması.
- Güneş enerjisi teknolojilerinin %100 yerli üretimi ve geliştirilmesi [28].

1.1.3 Yenilenebilir Enerji Kaynakları Kanunu

Türkiye’de tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının tespiti ve değerlendirilmesinde Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM) görevlidir. Bu kurum, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) bünyesinde yer alır. Ülkemizde güneş enerjisinde önemli bir adım olarak, FV sistemlerin kullanımını yaygınlaştırmak amacıyla, gerekli olan 5346 sayılı “Yenilenebilir Enerji Kaynakları Kanunu” (YEK Kanunu) 29.12.2010 yılında revize edilmiş ve 2013’te mevzuat çalışmaları tamamlanmıştır [7]. YEK Kanunu haricinde güneş enerjisi santralleri ile ilgili kanun ve yönetmelikler 6446 Sayılı Elektrik Piyasası Kanunu, Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği, Lisanssız Elektrik Üretimi Yönetmeliği ve ilgili Elektrik Piyasası Denetleme Kurulu (EPDK) Kurul Kararları ve Tebliğleri sayılabilir [25].

“Güneş Enerjisine Dayalı Lisans Başvurularının Teknik Değerlendirilmesi Hakkında Yönetmelik” 1 Haziran 2013 tarih ve 28664 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Teknik değerlendirme çalışmaları tamamlanan bölgeler için “Rüzgâr ve Güneş Enerjisine Dayalı Üretim Tesisi Kurmak Üzere Yapılan Ön Lisans Başvurularına İlişkin Yarışma Yönetmeliği” kapsamında yarışmalar yapılmaya başlanmıştır [7].

YEK Kanunu kapsamında lisanslı işletmelere uygulanacak teşvik fiyatları, 31.12.2020 tarihine kadar işletmeye girecek olan YEKDEM tabi YEK Belgeli üretim lisansı sahipleri için 5346 sayılı Kanuna ekli ‘I Sayılı Cetvelde’ yer almaktadır ve on yıl süreyle uygulanır. I sayılı cetvele göre güneş enerjisine dayalı üretim tesisine 13,3 ABD Doları cent/kWh fiyatı uygulanır. Benzer şekilde yerli üretimi teşvik etme amacıyla; 31.12.2020 tarihine kadar işletmeye girecek olan santrallerin yurt içinde imal edilmiş ekipmanları için 5346 sayılı kanuna ekli I sayılı cetvelde belirtilen fiyatlara, üretim tesisinin işletmeye giriş tarihinden itibaren beş yıl süreyle aynı kanuna ekli ‘II Sayılı Cetvelde’ belirtilen fiyatlar ilave edilir. II sayılı cetvelin FV sistemler ile ilgili bölümü Çizelge 1.3’de gösterilmiştir [25].

Çizelge 1.3 : 5346 sayılı Kanuna ekli II Sayılı Cetvel (Güneş enerjisi bölümü).

Tesis Tipi	Yurt içinde gerçekleşen imalat	Yerli Katkı İlavesi (ABD Doları cent/kWh)
C – Fotovoltaik güneş enerjisine dayalı üretim tesisi	1- FV panel entegrasyonu ve güneş yapısal mekaniği imalatı	0,8
	2- FV modülleri	1,3
	3- FV modülünü oluşturan hücreler	3,5
	4- İnverter	0,6
	5- FV modülü üzerine güneş ışınını odaklayan malzeme	0,5

Son gelişme olarak 27 Mart 2018 tarihli Resmi Gazete’de yayınlanan yenilenebilir enerji ve enerji verimliliği alanında önemli maddeler içeren 7103 sayılı “Vergi Kanunları ile Bazı Kanun ve Kanun Hükmünde Kararnamelerde Değişiklik Yapılması Hakkında Kanun” gösterilebilir. Düzenlemeye göre konut sahipleri veya kiracılarının oturdukları konutların çatı veya cephelerinde kuracakları, kurulu güçleri 10 kW’a

kadar olan sistemlerde ürettikleri elektrik enerjisinin ihtiyaç fazlasını son kaynak tedarik şirketlerine satmaları halinde gelir vergisinden muaf olabileceklerdir. Yasanın 76. maddesi ile Enerji Performans Sözleşmesi tanımlanmıştır, 77. maddesi ile de kamu idarelerinin enerji tasarrufu yatırımları için bu sözleşmeleri imzalayıp, on beş yılı aşmayacak şekilde yükümlülük altına girebilmektedirler. Düzenlemenin lisanssız yürütülebilecek faaliyetleri düzenleyen maddesine yapılan ek ile Enerji Bakanlığı'nın görüşü alınarak, EPDK'nın belirleyeceği limitler ile usul ve esaslar çerçevesinde elektrik depolama ve talep tarafı katılımı kapsamında gerçekleştirilecek elektrik piyasası faaliyetleri için lisans yükümlülüğü bulunmayacaktır [29].

1.2 Literatür Taraması

Dünyada ve ülkemizde üniversite kampüsleri için FV sistemler hakkında yapılmış birçok çalışma mevcuttur.

Moslehi ve Arababadi [30] Arizona Devlet Üniversitesi'nin Tempe kampüsü için farklı enerji kaynaklarını ömür çevrimi yaklaşımı ile karşılaştırmıştır. FV sistemlerin sürdürülebilirliğini sorgulama amaçlı yapılan çalışmada karşılaştırılan diğer kaynaklar; kömür, doğal gaz, nükleer ve hidro kaynaklardır. Enerji kaynakları çevresel, ekonomik ve sosyal etki olarak üç faktör üzerinden incelenmiştir. FV sistemler çevresel ve ekonomik etkiler açısından diğer kaynaklara göre kabul edilebilir olsa da, sosyal etkileri açısından geliştirilmesi gerekmektedir. Çalışmada FV sistemler, düşük güvenlik ve hava koşullarına fazla bağımlı olması sebebiyle sürdürülebilirlik adına diğer kaynaklara göre sosyal açıdan bir alternatif olarak görülmemiştir. Hoyos [31] ABD'de bulunan üniversitelerin kampüslerindeki kurulu FV sistemleri farklı değişkenler üzerinden istatistiksel olarak analiz etmiştir. Bu değişkenler; kurulum senesi, eyalet, enstitü, şehirler, kurucu firma, güneş paneli üreticisi, evirici üreticisi, kurulum ücreti, kurulu güç, yıllık elektrik üretimi, panel montaj tipi, panel sayısı, güneş pili çeşidi, verim değerleridir. Kwan [32] ABD'de kolej kampüslerindeki FV sistemleri çevresel, ekonomik, sosyal ve politik olarak incelemiştir. Los Angeles Bölgesi Kolejler Topluluğu'nun net sıfır enerji politikası doğrultusunda, Los Angeles City College kampüsünü inceleyerek, kampüsün elektrik tüketimi için 2010 yılında 4600 kW'lık bir kurulu güce ihtiyacı olduğunu ve 2020 senesinde bu kurulu gücün iki katına çıkarılması gerektiğini saptamıştır.

Lee ve diğ. [33] New Haven Üniversitesi kampüsünün FV sistem için ekonomik uygunluğunu göstermiştir. Çalışmada kampüs içerisinde bulunan Celentano Hall binasının çatısında kurulu olan FV sistemin verileri kullanılmıştır. Analiz sonucu, yıllık 82.800 kWh elektrik enerjisi üreten bu sistemin geri ödeme süresi 11 yıl olarak hesaplanmıştır. Aynı analiz kampüsteki 25 adet bina için de yapılarak her binanın geri ödeme süresi belirlenmiştir. Her bina için kurulacak uygun FV sistemlerin geri ödeme süreleri 8 ile 12 yıl arasında değişmekte olup, kampüsün FV sistemler için geri ödeme süresi ortalaması 11 yıl olarak hesaplanmıştır. FV sistemlerin ömrü 25 yıl olarak ön görülerek, yıllık değerlere göre yaklaşık 3 milyon \$ elektrik harcaması yapan kampüs için 250.000 \$'lık bir miktarın kazanılabileceği belirlenmiştir. Küçüksarı ve diğ. [34] Arizona'daki bir üniversite kampüs alanı için en uygun yeri ve optimum FV sistem büyüklüğünü belirleyen, Coğrafi Bilgi Sistemi'ne (GIS) entegre edilmiş bir matematiksel optimizasyon ve simülasyon modeli önermiştir. GIS modülü uygulanabilir çatı alanlarını ve panel kapasitelerini belirlemek için geliştirilmiştir. Optimizasyon modülü ise FV sistemin kurulumu ve işletimi için maksimum kârın tespitinde kullanılmıştır. Martin ve Jo [35] Illinois State Üniversitesi kampüsü için büyük ölçekli bir FV sistemini analiz etmişlerdir. Sistemin modellenmesi yazılım kullanarak yapılmıştır. Sekiz adet sistem modellenmiş olup, uygun üç tanesinin simülasyonu yapılmıştır.

Patel [36] 15 kW gücündeki bir FV sistemin matematik modellenmesi ve simülasyonunu yapmıştır. Tasarlanan FV sistem; evirici, hava kompresörü, hava tankı ve bir mikro-türbin ile beraber işletilecek şekilde Clemson Üniversitesi kampüsü için bir mikro-şebeke modellenmiştir. Güneşlenme saatlerine göre en uygun ve verimli çalışma durumu saptanmıştır. Ransom [37] 46W'lık tek bir güneş panelinin kurulumunu gerçekleştirerek, 2002 yılının Mayıs ayı için üretilen enerji miktarını 4,26 kWh olarak ölçmüştür. Baylor Üniversitesi kampüsü için tasarlanan büyük sistemin güneş paneli sayısı 46.393'tür. Bu şekilde çalışma büyük sistemin kurulması durumunda bir ay için kampüsün elektrik ihtiyacının %5'ini karşılayabileceğini göstermiştir. Kelly [38] Miami Üniversitesi'ndeki Ecology Research Center binasının çatısına 1 kW gücünde bir FV sistem tasarlamış ve kurmuştur. Staj uygulaması kapsamında işletmeye alınan sistem 2003 Kasım ayında yapılan üç haftalık ölçüm sonucu 50 kWh elektrik üretmiştir.

Routhier [39] Arizona State Üniversitesi'ndeki FV penetrasyonunu arttırmak için soğutma amaçlı ısı enerjisi deposu kullanılmasını önermiştir. Çalışmada yapılan simülasyona göre ısı enerjisi deposu kullanıldığı takdirde FV sistemlerin enerji üretimindeki payı %48'e kadar çıkarılabilecektir.

Kolanu [40] Kaliforniya State Üniversitesi Long Beach kampüsünde mezunlar derneği merkez binasının çatısı için net sıfır enerji binası yaklaşımı ile iki farklı opsiyonlu FV sistem tasarlamıştır. Opsiyonlar FV sistemin yalnız ve batarya destekli kullanılması şeklindedir. HOMER yazılımının kullanıldığı çalışmada 170 kW'lık FV sistemin bataryalı seçeneğinin geri ödeme süresi olarak daha uygun olduğu belirlenmiştir. Pathirana ve Muhtaroglu [41] Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nin Kuzey Kıbrıs Kampüsü için bir FV sisteminin fizibilite çalışmasını yapmışlardır. Şebekeye bağlı ve bağımsız sistem için analizler yapılmıştır. Çalışmada aylık güneş kaynağı ve elektrik talebi verileri kullanılmıştır.

Drif ve diğ. [42] UNIVER projesi kapsamında Jaén Üniversitesi binalarında kurulu olan 200 kWp gücündeki FV sistemin performans analizini yapmıştır. Sistem senede 210 MWh'lık bir elektrik üretimi ile üniversite kampüsünün elektrik ihtiyacının %8'inden fazlasını karşılayabilmektedir. Al Bdawawi ve diğ. [43] Birleşik Arap Emirlikleri Üniversitesi kampüsünde golf arabalarının şarj istasyonu için 2 kW'lık bir FV sistem tasarlamış ve kurmuştur. Ekonomik analiz sonucu sistemin geri ödemesi 10 yıl olarak hesaplanmıştır. Congedo ve diğ. [44] Salento Üniversitesi kampüsünde oto park alanında kurulu olan, 3° ve 15° eğim açlarına sahip iki farklı gruptan oluşan, toplamda 960 kW'lık bir FV sistemin performans analizini yapmıştır. Ali [45] Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nin Kuzey Kıbrıs Kampüsü için bir FV sistemin 1-6 MW değerleri arasında tek seferlik kurulum ve her 7 yılda 1 MW kurulu güç eklenmesi şeklinde adım adım kurulum durumlarını analiz ederek karşılaştırmıştır. Çeşitli yöntemler ile elektrik tüketim belirsizliği ve elektrik ücret belirsizliklerinin uzun süreli tahmin edildiği çalışmada kampüs için en uygun gücün 2-3 MW arası olduğu saptanmıştır. Sadati ve diğ. [46] Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nin Kuzey Kıbrıs Kampüsü için bir FV sistemin teknik ve ekonomik analizlerini yapmıştır. Çalışma sabit eğimli, doğu-batı ekseninde hareketli ve çift-eksen hareketi ile takip sistemli şeklinde üç ayrı sistemin karşılaştırılması odaklıdır. Berwal ve diğ. [47] Deenbandhu Chhotu Ram Üniversitesi kampüsündeki Saraswati kütüphane binası çatısında kurulu olan 50 kW gücündeki FV sistemin teknik ve ekonomik analizini yapmıştır. Sistemin

ortalama aylık 5200 kWh değerinden fazla bir elektrik enerjisi üreteceği ve 5,7 yılda kendini geri ödeyebileceği hesaplanmıştır.

Hasapis ve diğ. [48] Crete Teknik Üniversitesi kampüsünde uygun açık alanlarda kurulabilecek büyük ölçekli FV sistemler tasarlamıştır. Büyük ölçekli sistem toplamda 13.950 m²'lik bir alanı kaplamakta ve 8203 adet FV modülden oluşmaktadır. PVsyst yazılımı ile yapılan simülasyon ile 2,01 MW gücündeki sistemin kampüsün elektrik tüketiminin %47'sini karşılayabileceği hesaplanmıştır. Kalkan ve diğ. [49] Southampton Üniversitesi'nin Highfield kampüsü için bir fotovoltaik sistem ve bir de ısı pompası tasarlamıştır. Simülasyon için PVSyst yazılımının kullanıldığı çalışmada FV sistemin 5,6 yıl içinde kendini geri ödeyeceği ve kampüs elektrik tüketiminin %4'ünü karşılayacağı hesaplanmıştır. Khatri [50] MNIT Üniversitesi kampüsündeki kız öğrenci yurdu elektrik tüketimini göz önünde bulundurarak bir FV sistem tasarlamıştır. 336 kW gücündeki sistem 4816 m²'lik bir alan için tasarlanmış olup, geri ödeme süresi 8,24 yıldır. Shukla ve diğ. [51] MANIT enstitüsü kampüsündeki öğrenci yurtları için bir FV sistem tasarlamıştır. 110 kW gücündeki şebekeden bağımsız sistemin simülasyonu BlueSol yazılımı ile yapılmış olup, sistemin senelik ürettiği elektrik enerjisi miktarı 1927 kWh olarak hesaplanmıştır.

Şenol ve diğ. [52] Uluslararası Kıbrıs Üniversitesi kampüsü için kurulabilecek büyük ölçekli FV sistemleri incelemiştir. 450 ile 1250 kW arasındaki kurulu güç değerleri için PV*SOL yazılımı ile simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyonlar sonucu geri ödeme sürelerine göre en uygun kurulu güç değerleri; var olan tüketim değerine göre 850 kW, ön görülen tahmini tüketim değerlerine göre ise 1200 kW'tır. Kampüs alanı ile ilgili kurulum kısıtlamaları göz önünde bulundurulduğunda ise kurulabilecek maksimum kapasitedeki FV sistemin gücü 982 kW olarak saptanmıştır. 982 kW'lık sistemin geri ödeme süresi 5,9 yıldır.

Yan [53] Queensland Üniversitesi'nde kurulu 1,22 MW gücündeki FV sistemin performans analizini yapmıştır. Sistem içerisinde farklı eğim açılara ve farklı cephelere bakan panel setleri mevcuttur. Yapılan analiz farklı konumlandırılmış bu setlerin karşılaştırılması odaklı yapılmıştır. 2,5° eğimli güney cephesine bakan setin 4 yıllık süreçte daha fazla elektrik enerjisi üretebileceği ön görülürken, 5,5° eğim açısındaki kuzey cephesine bakan setin daha yüksek bir verimde işletileceği belirlenmiştir.

Chakraborty ve diğ. [54] Indian School of Mine kampüsü için farklı güneş pili teknolojilerini karşılaştırma yaklaşımı ile FV sistem analizi yapmıştır. Güç kayıpları, kurulum alanı ihtiyacı, performans oranı, kapasite faktörü, enerji verim faktörü ve maliyet açısından incelendiğinde dokuz farklı güneş pili teknoloji içinden en uygun olanı amorf-silikon güneş pili teknolojisi olarak belirlenmiştir. Bu güneş pili teknolojisi için kampüste kurulabilecek maksimum alan değeri 50.604 m²'dir. FV sistemin toplam üretebileceği enerji miktarı ile kampüs ihtiyacının %40'ını karşılayabileceği ön görülmüştür.

Tan ve Chow [55] UCSI Üniversitesi'nin North Wing kampüsünde kurulu olan 100 kW'lık FV sistemini iki farklı tarife durumu üzerinden karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Bu durumlardan biri yürürlükte hali hazırda uygulanan tarife teşvik sistemidir, diğeri ise yakın gelecek için yenilenebilir enerji sistemlerinde ön görülen elektrik üretim-tüketim net ölçüm sistemidir.

Durak [56] İnönü Üniversitesi kampüsünde kurulu olan 5 MW gücündeki FV sistemin ekonomik analizini yapmıştır. FV sistemin geri ödeme süresi 14,5 yıl olarak hesaplanmıştır. Alkan [57] Düzce Üniversitesi kampüsünde, Düzce şartlarında bir evin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilecek seviyede 2,5 kW kurulu güce sahip şebekeden bağımsız ve takip sistemli bir FV sistemin matematiksel analizini, fizibilitesini ve kurulumunu gerçekleştirmiştir.

Tozlu [58] Muğla Üniversitesi kampüsündeki Türk Evi isimli öğrenci kafeteryası çatısında kurulu FV sistemin karakteristiğini incelemiştir. Yapılan simülasyon sonucu 25,6 kW'lık sistemin yıllık enerji üretimi miktarı %2'lik bir bağıl hata ile gerçek üretilen enerji miktarı ile uyushmaktadır. Eke ve Şentürk [59] Muğla Üniversitesi kampüsünde kurulu 7,9 kW'lık özdeş iki FV sistemi sabit ve iki eksende takip sistemli olarak karşılaştırmıştır. İki eksende takipli FV sistemin, sabit sisteme göre yaklaşık %30 daha fazla elektrik enerjisi üretebildiği saptanmıştır. Demircan [60] Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Eğitim Fakültesi S bloğundaki binaya entegre FV sisteminin performansını incelemiştir. 40,39 kW kurulu güce sahip sistem, ölçümlerin yapıldığı bir yıllık süreçte 31,73 MWh elektrik enerjisi üretmiştir.

Jafarzadeh [61] İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Ayazağa kampüsü için 900 kW'lık bir kurulu güç değerinde rüzgar türbini, FV sistem ve rüzgar-FV hibrit sistemlerini analiz ederek karşılaştırmıştır. Üç farklı güneş pili teknolojisine göre simülasyonu

yapılan FV sistemin 875-888 MWh değerleri arsında elektrik enerjisi üretebileceği hesaplanmıştır. Yerli [62] İTÜ Meteoroloji Parkı'na kurulu 750 kW'lık FV sistemi incelemiştir. Çalışma meteorolojik verilerin FV sistem üzerinde nasıl etki yaptığını ortaya koymuştur.

1.3 Tezin Amacı

İTÜ Süleyman Demirel Kongre Merkezi'nde düzenlenen 10. Uluslararası Temiz Enerji Sempozyumu'nda sempozyumun yürütme kurulu başkanı Prof. Dr. Ahmet Duran ŞAHİN konuşmasında, dünyanın yenilenebilir enerjide çığır açtığını, özellikle rüzgâr enerjisinin çok yüksek kurulu güç değerlerine ulaştığını, güneş ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının da aynı şekilde gelişmesi ve yaygınlaşması gerektiğini belirtmiştir. Şahin, “Yenilenebilir enerjinin mutfağı üniversitelerdir.” sözü ile üniversitelerin yenilenebilir enerji uygulamaları ve araştırmaları konusundaki önemini vurgulamıştır [63]. T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın bu konuda, “Kampüslerde, sürdürülebilir enerji kaynaklarından olan küçük su kaynakları, jeotermal kaynaklar, rüzgâr, dalga ve güneş enerjisi, biyokütle, biyogaz kaynakları gibi değişik alternatiflerin değerlendirilmesiyle kampüsün tüm enerji ihtiyacını karşılayabilmesi yanında gelir getirici unsur olarak yararlanılabilecek yatırımlar düşünülmelidir” şeklinde bir tavsiyesi bulunmaktadır [64].

1.3.1 İTÜ'de güneş enerjisinden faydalanma

Türkiye'nin önde gelen üniversitelerinden olan İstanbul Teknik Üniversitesi'nde çok farklı alanlarda güneş enerjisinin kullanımı söz konusudur. İTÜ Yeşil Kampüs projesinin kapsamında çevreci ve sürdürülebilir bir kampüs oluşturma amacıyla güneş enerjisi ile çalışan İTÜ-BÜS'ler ve aydınlatma elemanları faaliyete geçmiştir [65]. İTÜ Güneş Arabası Ekibi, ARIBA ve ARUNA araçlarını tasarlamış ve üretmiştir. ARIBA, ekibin TÜBİTAK Formula G yarışları için ürettiği bir yarış arabasıdır. ARUNA ise Türkiye'nin ilk yerli güneş enerjisi ile çalışan aile arabasıdır [66]. İTÜ Güneş Teknesi Ekibi tarafından üretilen güneş enerjisi ile çalışan tekne, Dünya 3.'sü olmuştur [67]. Ayrıca, İTÜ'de yapılan akademik ve bilimsel çalışmalar olarak seçici yüzey güneş kolektörlerinin geliştirilmesi, elektrokimyasal kaplama yöntemiyle ince film eldesiyle de FV dönüşüm, güneş pillerinin sistem üzerinde uygulaması ve güneşle soğutma... vs. sayılabilir [68].

Bu çalışmanın konusu olan fotovoltaik güç sistemlerinin İTÜ’de kurulu olan örnekleri; İTÜ Enerji Enstitüsü çatısında kurulu fotovoltaik sistem ve Arı6 Enerji Teknokent binasındaki sistem sayılabilir. Ayrıca Arı3 binasının bahçesine kurulmuş bir güneş enerjisi sistemi de mevcuttur. Enerji Enstitüsü çatısında kurulu olan fotovoltaik sistem Şekil 1.14’te gösterilmiştir.



Şekil 1.14 : İTÜ Enerji Enstitüsü çatısında kurulmuş olan FV sistem.

Arı 6 Enerji Teknokent binasında kurulu olan fotovoltaik sistem binaya entegre fotovoltaik sistem (BIPV) örneklerindendir. Bu sistem Şekil 1.15’te gösterilmiştir.



Şekil 1.15 : Arı 6 Enerji Teknokent binasındaki BIPV sistem.

Şekil 1.16’da gösterilen Arı 3 binasının bahçesinde kurulu güneş enerjisi sistemi ise açık alan uygulamalarına örnektir.



Şekil 1.16 : Arı 3 binasının bahçesinde kurulu güneş enerjisi sistemi.

1.3.2 Amaç

Üniversiteler geleceğin inşasında önemli bir yer tutan eğitim kurumları olarak, yenilenebilir enerji konusunda öncelikle öğrenci ve personeline, daha geniş çerçevede ise tüm topluma kampüslerinde eğitim ve uygulama alanları sağlayan birimlerdir. Dünyanın enerji gereksinimi ve ağırlıklı olarak kullandığı tükenen enerji kaynakları düşünüldüğünde, yenilenebilir enerji kaynakları vazgeçilmez olmakla birlikte, üniversitelerin de bu konuda teşvik etme ve bilinçlendirme sorumluluğunun yanında uygulama alanında da öncü olması gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı konusunda ise en hızlı gelişen teknolojilerden biri FV sistem teknolojileridir.

Üniversite kampüsleri belirsiz ve görece yüksek enerji tüketim değerlerine sahip olmaları yanında, FV sistem kurulumları için genellikle uygun alanlara sahiptir. Bu perspektiften bakıldığında, FV teknoloji üzerine çok fazla çalışma yapılmış olmasına rağmen, üniversitelerin hem tasarım hem de uygulama anlamında daha çok çalışma yapması beklenmektedir. Bu çalışmanın amacı da üniversitelerin bu gereksinimleri doğrultusunda literatüre bir katkı sağlamaktır.

Bu çalışma, İTÜ Enerji Enstitüsü için uygun FV sisteminin modellemesi ve benzetimi işini kapsamaktadır. Benzetim sonucu enstitünün elektrik tüketimi de göz önünde bulundurularak, sistemin ne kadar elektrik enerjisi üreterek enstitüye katkı sağlayacağı belirlenmiştir. FV sistemlerin kampüs uygulamalarının çoğalması adına ilgili birimlere yol gösterici bir çalışma olması hedeflenmiştir.

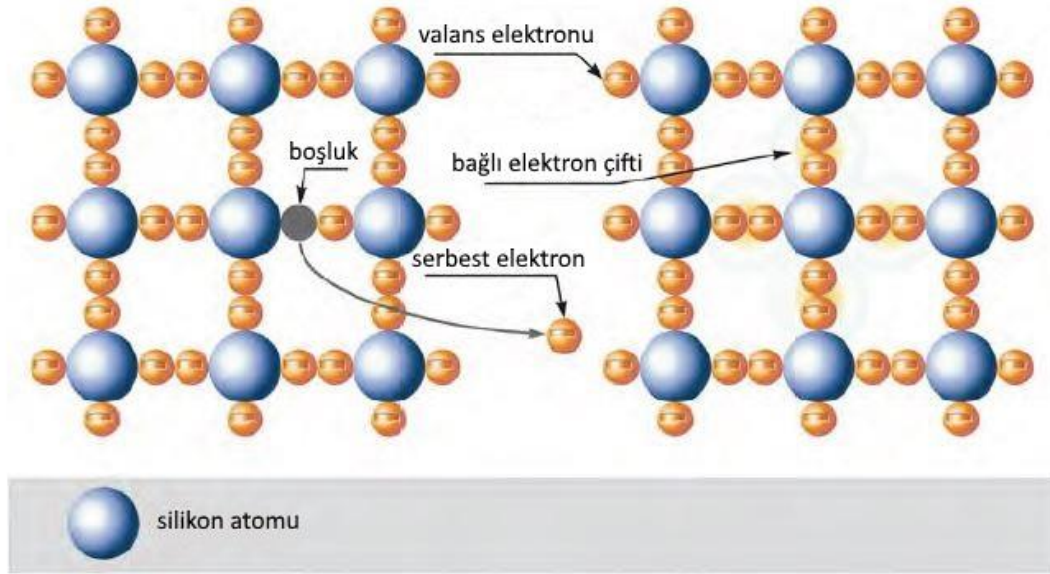
2. FOTOVOLTAİK SİSTEM EKİPMANLARI

Bir FV sistemin temel yapı taşı güneş pili'dir. Güneş pilleri, güneş ışığını direkt olarak elektriğe çevirirler [10]. *Fotovoltaik* kelimesi anlam olarak ışığın direkt olarak elektrik enerjisine çevrimini ifade etmektedir. Güneş pillerinde silikon, galyum, arsenik, kadmiyum, tellür, bakır, indiyum, selenür gibi yarı iletken malzemeler kullanılır [8]. Yapılarındaki bu yarı iletken malzeme sayesinde güneş pilleri, güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirirler. Güneş pili üzerine düşen güneş ışığı ile fotonlar, yarı iletken malzemeye ulaşırlar. Yarı iletken malzemeye çarpan fotonlar, elektron kopararak güneş pilinin yüzeyi ile arka yüzey arasında bir potansiyel fark oluşmasına sebep olurlar. Bu fark yarı iletken üzerindeki boşlukların pozitif bölgeye, elektronların ise negatif bölgeye doğru hareket etmesinden kaynaklanır. Oluşan potansiyel fark ile de elektrik enerjisi elde edilmiş olur [57].

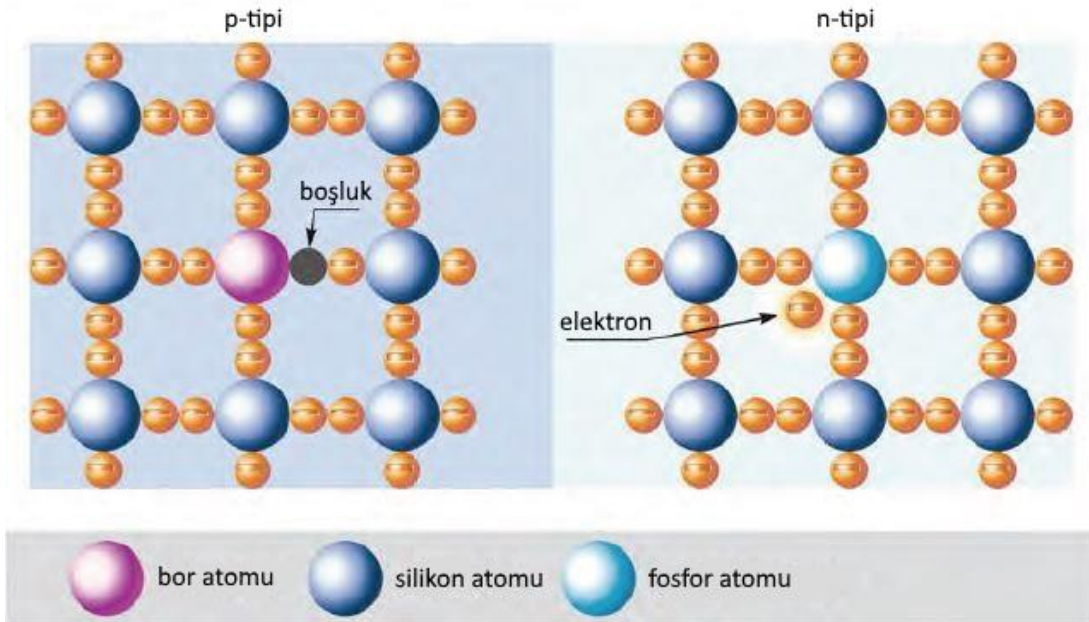
FV dönüşümün gerçekleşmesi için, güneş ışığını soğurabilecek özellikteki yarı iletken malzemenin yasak enerji aralığı güneş spektrumu ile çalışabilecek yapıda ve elektrik yüklerinin birbirinden ayrılabilmesine izin verebilecek uzunlukta yasak bant genişliğine sahip olması gerekmektedir. FV dönüşüm, yarı iletken malzemeye uygulanacak iki aşama ile meydana gelir; taşıyıcı yük çifti olan elektron-boşluk çiftinin oluşturulması ve bu yük çiftlerinin birbirinden ayrılması [69].

Yarı iletken malzemenin atomik yapısı kararlı kristal yapıdır. Atomlar birbirine valans elektronları ile bağlıdır. Yarı iletkenlik özelliği sayesinde ışık veya ısı etkisi ile valans elektronları iletken enerji bandına yükseltilebilir ve böylece bu bağlar kırılabilir. Serbest kalan elektron ayrılarak yapıda bir boşluk bırakır. Şekil 2.1'de yarı iletken malzemelerin atomik yapılarındaki boşluk ve serbest elektron gösterilmiştir. Kristal yapısında elektron eksikliği ile boşluk bulunan yapı p-tipi, fazla elektronu bulunan yapı ise n-tipi bölge olarak tanımlanır. Kararlı kristal yapısı bulunan yarı iletken malzemeye bir elektron eksik ve bir elektron fazlası bulunan başka malzemelerin katılması ile bu yapılar elde edilebilir. Şekil 2.2'de örnek silikon atomlarında kurulmuş bir yapıyı göstermektedir. Silikon atomlarından oluşan kristal yapıya bor atomunun eklenmesi

ile p-tipi, fosfor atomunun eklenmesi ile n-tipi bölge oluşturulmuştur. Silikon atomuna göre bor atomu bir eksik elektron, fosfor atomu ise bir fazla elektrona sahiptir [8].



Şekil 2.1 : Silikon atomundaki boşluk ve serbest elektron.



Şekil 2.2 : Silikon atomları için oluşturulmuş p-tipi ve n-tipi bölgeler.

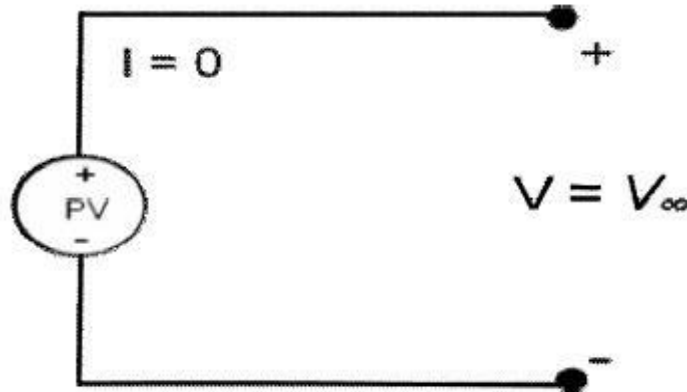
Eğer n-tipi ve p-tipi katmanlar birleştirildiği takdirde, aralarında 'p-n eklemi' şeklinde tanımlanan bir bölge oluşur. Pozitif yüklü atomlar geçişin n-tipi bölgesinde, negatif yüklü atomlar ise geçişin p-tipi bölgesinde kalır. Yük taşıyıcılarının hareketinin zıttı yönde bir elektrik alanı oluşur. Yapıya ışık etkisi geldiği takdirde, fotonlar elektronlar tarafından emilir. Giren enerji elektron bağlarını koparır. Serbest kalan elektronlar

elektrik alanı üzerinden n-tipi bölgeye çekilir. Boşluklar yine elektrik alan üzerinden yükün taşınma yönü tersinde p-tipi bölgesine çekilir. Bu prosese ‘fotovoltaik etki’ denilmektedir. Bu etki ile yapı üzerinde potansiyel fark oluşmuştur. Yüksüz durum için güneş pilinde açık-devre voltajı meydana gelmiştir. Bir elektrik devresi bağlandığı takdirde, devre üzerinden akım akacaktır [8].

Güneş pillerinin karakteristiklerini ortaya çıkaran beş temel parametreden bahsedilebilir. Bu parametreler; kısa devre akımı, açık devre gerilimi, maksimum güç noktası, dolum faktörü ve verimdir [70].

Kısa devre akımı; diyot uçlarının kısa devre edilmesiyle yani devrenin uçları arasındaki potansiyel farkın sıfır olmasıyla ($V=0$) devreden çekilen akım değerine denir. *Short circuit* (kısa devre) anlamındaki ifadesinin kısaltması olarak I_{SC} ile gösterilir. Kısa devre akımı, ideal bir diyot için diyot üzerine ışık düştüğü zaman oluşan akım değerine eşittir [70].

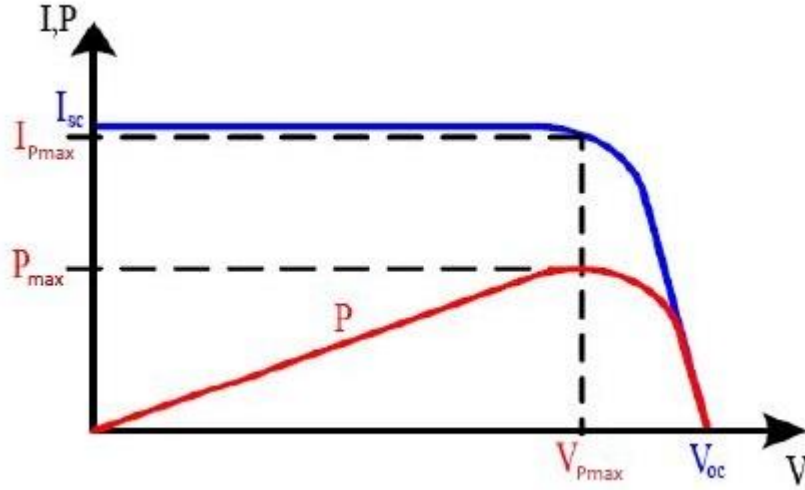
Açık devre gerilimi; diyot uçlarına yük bağlamadığı anda yani akımın sıfır olduğu zaman ($I=0$) diyot uçlarından ölçülen gerilim değerine denir. *Open circuit* (açık devre) ifadesinin kısaltması olarak V_{OC} ile ifade edilir. Açık devre gerilimi Şekil 2.3’te gösterilmiştir [70].



Şekil 2.3 : Açık devre gerilimi.

Maksimum güç noktası; bir FV diyottan elde edilebilecek maksimum güç değeridir. Diyottan elde edilen güç değeri, akım ve gerilimin değerlerinin çarpımına eşittir. Dolayısıyla maksimum güç $I \times V$ değerinin en büyük olduğu durumda oluşur. P_{max} ile ifade edilir. Eğer V_{OC} ve I_{SC} değerleri söz konusu ise I veya V değerlerinden birinin

sıfır olması sebebiyle sistemden herhangi bir güç elde edilemez. Maksimum güç noktasına aynı zamanda tepe gücü de (*peak power*) denir ve W_P ile ifade edilir. Şekil 2.4'te tipik bir FV diyotun akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) eğrileri beraber gösterilmiştir [70].



Şekil 2.4 : Bir FV diyotun I-V ve P-V eğrileri.

Dolum faktörü; Maksimum gücün kısa devre akımı ve açık devre geriliminin çarpımına oranı olarak tanımlanır. *Fill factor* (dolum oranı) tabirinin kısaltması olarak FF ile ifade edilir. Dolum faktörü, diyodun seri dirençlerinin ve bağlantının kalitesinin ölçümüdür. Denklem 2.1 'de dolum faktörünün matematiksel eşitliği gösterilmiştir. FV diyotlar için dolum faktörü değeri 0,7 ile 0,85 arasında değişmektedir [70].

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = V_{max} \frac{I_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.1)$$

Verimlilik; maksimum güç değerinin diyot üzerine gelen ışının gücüne olan oranı olarak tanımlanır. Diyot üzerine gelen ışının gücü P_{in} ile ifade edilir. G: etkin ışınım şiddeti ve A: FV diyotun alanı olmak üzere verimlilik eşitliği denklem 2.2'de gösterilmiştir [70].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{G \cdot A} \quad (2.2)$$

Güneş pilleri kullanılan teknolojiye göre farklı özelliklere sahiptirler. Ticari olarak kullanılan, FV marketinde yer almış güneş pili çeşitleri; monokristal, polikristal ve

ince film güneş pilleri olarak sayılabilir. Bu çeşitlerin hepsi de yarı iletken malzeme teknolojisine dayanmaktadır. Yarı iletken malzeme silisyum, galyum arsenit, kadmiyum tellür gibi malzemelerdir. Güneş pilleri bu şekilde farklı teknolojilere göre kullanılan yarı iletken malzemenin çeşidi ile verimlilik ve üretim noktasında birbirlerine göre üstünlükler gösterebilirler. Üretimlerinde çok fazla enerji harcanan monokristal silisyum yapısındaki güneş pilleri yüksek verimli güneş pilleridir. Üretim sırasındaki bu enerji kullanımını azaltma amaçlı olarak polikristal silisyum yapısındaki güneş pilleri geliştirilmiştir. Polikristal güneş pillerinin ise monokristal güneş pillerine göre verimleri daha düşüktür. Amorf silisyum güneş pilleri geniş bir bant aralığına sahip oldukları için güneş ışığını daha fazla absorbe etmektedirler. İnce film güneş pilleri ise kararlı bir yapıya sahiptirler [57].

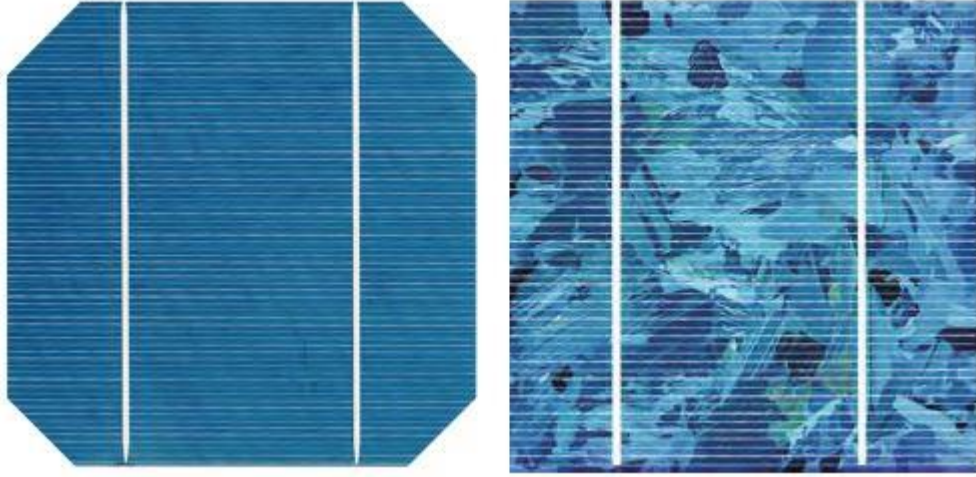
Literatürde güneş pilleri çeşitleri tarihsel gelişimlerine göre nesiller üzerinden sınıflandırılmıştır. Çizelge 2.1’de üç nesil sınıflandırılma gösterilmektedir [69].

Çizelge 2.1 : Gelişim sırasına göre FV güneş pilleri.

Nesil	Tip
1. Nesil Güneş Pilleri	Monokristal Silisyum Piller
	Polikristal Silisyum Piller
	Amorf Silisyum Piller
2. Nesil Güneş Pilleri	Kadmiyum Tellür Piller
	Bakır İndiyum Selenoid Piller
	Galyum Arsenik Piller
	Çok Eklemlili Piller
	Organik Piller
3. Nesil Güneş Pilleri	Boya ile Duyarlaştırılmış Piller
	Plastik Piller
	Nanokristal Yapılar

Birinci nesil güneş pilleri: Kristal silisyum yarıiletken teknolojisine dayanan birinci nesil güneş pilleri ilk üretilen güneş pilleridir. 1963 yılında Japonya’da üretilen dünyanın ilk ticari güneş paneli kristal silisyum güneş pillerinden oluşmaktadır. Günümüzde dünya FV pazarında halen en ticari ve en çok kullanılan güneş pili teknolojisidir. Verimleri %20’nin altındadır fakat düşük verimli olmalarının yanında üretim kolaylıkları ve ucuzlukları sebebiyle dünya FV pazarındaki oranları %80’nin üstündedir ve gelecekte de bu durumun çok değişmeyeceği ön görülmektedir.

Monokristal ve polikristal şeklinde ikiye ayrılırlar (Şekil 2.5). Bu ayrım güneş pilinin üretiminde kullanılan silisyumun saflık derecesine göre yapılmaktadır. Daha saf silisyuma sahip güneş pilleri monokristal güneş pilleridir. Monokristal güneş pilleri, polikristal güneş pillerine göre daha verimli fakat daha maliyetlidir. Günümüz FV teknolojisinin geldiği noktada iki tür arasındaki verim farkı çok büyük boyutlarda değildir. Bu sebeple de büyük ölçekli güneş enerjisi santrallerinde maliyetler öncelikli olması sebebiyle polikristal panellerin çok sıklıkla kullanıldığı görülmektedir [69, 71].



Şekil 2.5 : Monokristal ve polikristal güneş pilleri [8].

İkinci nesil güneş pilleri: İkinci nesil güneş pilleri, ince film teknolojisi ile üretildikleri için bu isimle de anılmaktadır (Şekil 2.6). İnce film güneş pilleri 1970’li yıllardan itibaren üretilmeye başlanmıştır. Üretim maliyetlerinin düşürülmesi amacıyla ortaya çıkan bu teknoloji ile maliyetler konusunda istenilen hedefe ulaşılsa da ince film güneş pillerinin verimleri birinci nesil güneş pillerine göre hep düşük kalmıştır. İkinci nesil güneş pillerinin verimlerinin %10 civarında olduğu söylenebilir. Verimlerinin düşük olması sebebiyle kristal silisyum güneş pilleri kadar yaygın olmasalar da, çevre koşullarına ve konuma bağlı olarak maliyet-performans analizlerine göre kristal silisyum güneş pillerine göre daha avantajlı olabilmektedirler. Günümüzde halen bu teknoloji içerisinde verim artırma çalışmaları hızla devam etmektedir. Ayrıca bu teknoloji uzay ve uydu çalışmalarında yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Bunun sebebi ise ince film güneş pillerinin atmosfer dışındaki verimlerinin %30’ları bulabilmesidir. İnce film teknolojisinin bir başka avantajı ise kolay tasarlanabilir olmalarıdır. Bu özellik ile bu tip güneş pilleri, BIPV uygulamalarında avantajlı bir şekilde kullanılabilir. İnce film güneş pillerinin

binaların cam yüzey, cephe veya çatı gibi konvansiyonel malzemeleri yerine kullanılması ile hem konvansiyonel bina malzemesinin işlevi yerine getirilmiş olmakta hem de elektrik enerjisi üretimi mümkün olmaktadır. Akıllı binaların yaygınlaşması ile FV bina uygulamalarının da büyük ölçekli santraller yanında FV pazarında yer alması ile gelecekte bu teknolojinin daha da yaygınlaşacağı tahmin edilmektedir. Birinci nesil güneş pillerinin FV pazarındaki ezici büyüklüğüne rağmen ince film güneş pillerinin kullanımı son yıllarda artmıştır. Bu artışa rağmen bu teknolojinin pazardaki birinci nesil güneş pili oranını yakalaması çok uzak gözükmemektedir [69, 71].



Şekil 2.6 : İnce film güneş pili [72].

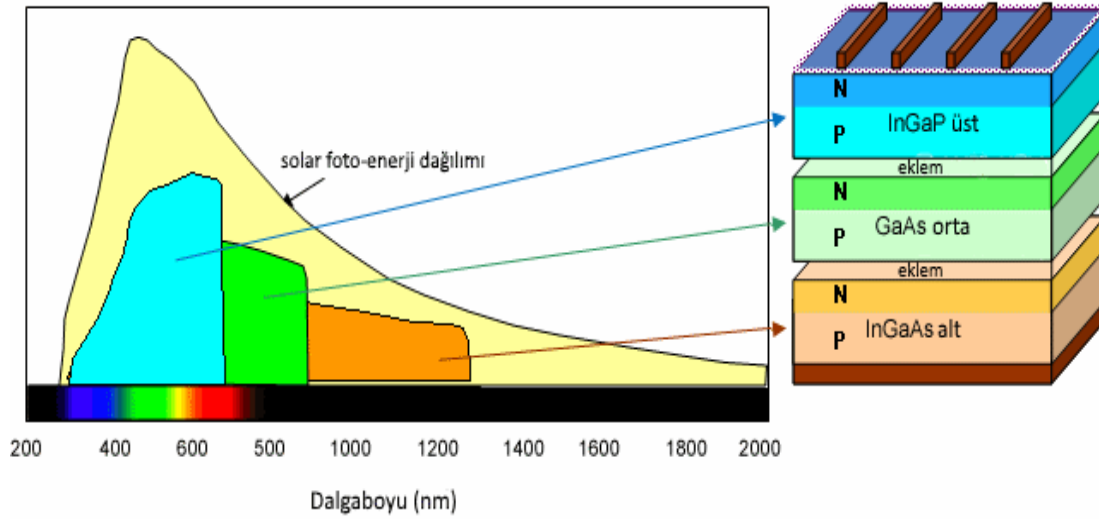
İkinci nesil güneş pilleri, günümüzde yapıldıkları malzeme üzerinden; amorf silisyum, kadmiyum tellür, bakır indiyum selenür ve bakır indiyum galyum diselenür gibi çeşitler ile sınıflandırılmaktadır [71].

Üçüncü nesil güneş pilleri: Günümüzün yeni teknolojilerinden biri olan üçüncü nesil güneş pillerinin araştırma ve geliştirme süreçleri devam etmektedir. Laboratuvar şartlarında üretilmeleri söz konusu olup tam olarak ticari ürün olarak pazarda yer almamışlardır. Bu sebeple piyasada çok fazla kullanım alanından söz edilmese de gelecekte ekonomik ve kullanılır olarak pazarda yer alabilecekleri öngörülmektedir.

Galyum Arsenür güneş pilleri üçüncü nesil güneş pili çeşitlerinden biridir. Bu tip piller daha çok uzay uygulamalarında kullanılmaktadır. En verimli galyum arsenür güneş

pilin laboratuvar ortamında kaydedilmiş en yüksek verim değeri %32,6'dır. Uygulamalarda ise bu türün genel olarak veriminin %20 ile %30 arasında değiştiği söylenebilir [71].

Çok eklemli güneş pilleri de üçüncü nesil güneş pillerinin bir türüdür. Günümüzde bu tip güneş pillerinin çalışmaları hızla artmaktadır. Yarı iletkenlerin uygun şekilde üst üste eklenmesi verimin artırılmasını sağlamaktadır. Bu tabakalar güneş spektrumunun farklı aralıklarına duyarlıdır (Şekil 2.7) [73]. Tabakaların uygun şekilde yerleştirilerek birlikte kullanımları güneş ışınından daha iyi faydalanmayı sağlamaktadır ve verim arttırılmış olur.

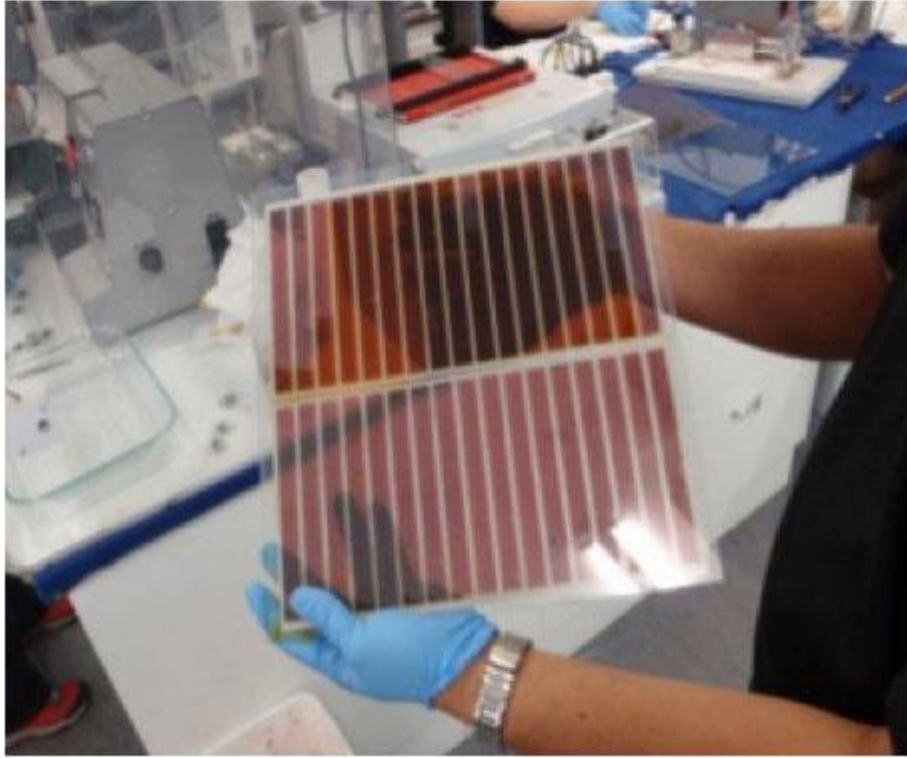


Şekil 2.7 : Çok eklemli güneş pilinin güneş spektrumundaki duyarlılığı.

Nanoteknolojinin ilerlemesi ile mikrokristal yapıda üretilen güneş pilleri üzerine yapılan çalışmalar da verim artırma ve maliyet düşürme olarak devam etmektedir. Günümüz nanoteknolojisi sayesinde nanokristal sentezi ile pil yapımına daha uygun, daha küçük yasak bant aralığına sahip, iletkenliği daha yüksek, daha kararlı moleküller sentezlemek mümkün olmaktadır. Organik yapılı iletken malzemelerin kullanıldığı yapıların, maliyet ve verim oranları düştükçe yarı iletken malzemelerin yerini alacakları tahmin edilmektedir. Yine son dönem üzerinde çalışılan başka bir çeşit ise plastik güneş pilleridir. Plastik güneş pilleri esneklik, hafiflik ve şeffaflık özellikleri ile diğer çeşitlere göre çok farklı özellikler sergilemektedirler. Bu yapısal özellikler bu tip güneş pillerinin kullanım alanlarını çok fazla arttırmaktadır. Nano- veya mikrokristalli, organik ve plastik güneş pilleri sayılan özellikleri yanında diğer nesil güneş pillerine göre çok düşük verim değerlerine sahiptir. Günümüz çalışmaları

üçüncü nesil güneş pillerinin verimlerini arttırmaya yönelik olarak yoğunlaşmaktadır. Bu tip güneş pillerinin verimleri %6 civarındadır [69].

Üçüncü nesil güneş pilleri içerisinde sayılabilecek son tür 'Boya Duyarlı Güneş Pilleri'dir (DSSC) (Şekil 2.8) [74]. Cam esaslı veya esnek olarak üretilmektedirler. Boya duyarlı bir malzeme ile güneş ışığını emerler. Çözelti prosesleri kolaydır. Verimleri ise üçüncü nesil diğer güneş pilleri değerinde olduğu için bu tip de ticari olarak çok kullanılmamaktadır ve verim artırma çalışmaları devam etmektedir [69].



Şekil 2.8 : Boya duyarlı güneş pili.

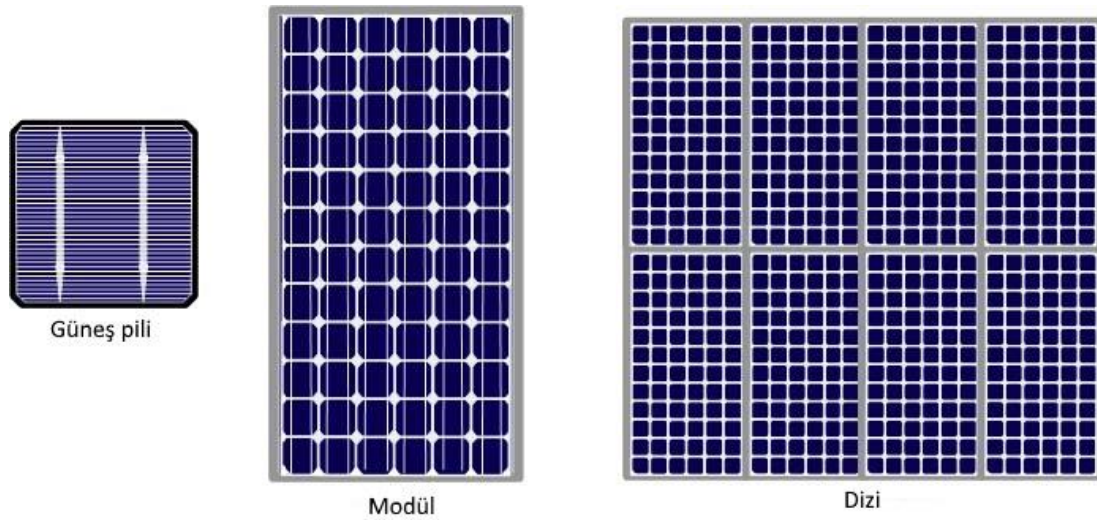
Temel yapı taşı olan güneş pillerinin bir araya getirilmesi ve bazı ekipmanların eklenmesi ile birkaç Watt'tan Megawatt'lara kadar FV sistemler oluşturulabilir. Tipik bir FV sistemin ekipmanları şu şekilde sıralanabilir;

- **FV modül;** güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü birimdir. Elde edilen akım doğru akımdır ve bazı cihazlar ile alternatif akıma çevrilmesi gerekir.
- **Batarya (akü);** elektrik akımının depolandığı birimdir. Güneş ışığının olmadığı zamanlarda da üretilmiş elektiriğin kullanılması için bu depolama aygıtı gereklidir.
- **İnverter (evirici);** doğru akımı alternatif akıma çevirecek olan cihaz bu ekipmandır.

- **Şarj kontrolörü;** akü ve eviricinin arasına yerleştirilen cihazdır. FV modülden gelen akımın kontrolü için kullanılır. Akünün fazla yüklenmesini veya tamamen kurumasını önlemesi açısından önemlidir.
- **Doğru akım (DC) kesici;** FV modül ve sistem arasına konarak, FV modülü gerektiğinde sistemden akım olarak sistemden ayırmak için kullanılır.
- **Alternatif akım (AC) kesici;** eviriciden sonra, eviriciyi şebekeden veya AC akımın olduğu birimden koparmak için kullanılır. Bazı eviriciler bu kesiciye kendi içinde bulundurmaktadır.
- **Sayaç;** üretilen veya şebekeye verilen elektrik miktarını ölçmek için kullanılan sayaçtır [75].

2.1 Fotovoltaik Modül

Güneş pilleri bir araya getirilerek modüller, modüller birleştirilerek ise diziler tasarımlanır (Şekil 2.9) [76].



Şekil 2.9 : Güneş pili, modül ve dizi.

Kare, dikdörtgen veya dairesel şekillerde olup, yaklaşık 100 cm^2 civarında alana sahip güneş pilleri tek başlarına çok fazla enerji üretemedikleri için bu piller seri veya paralel bağlanarak modülleri oluştururlar. Modül, panel ve dizi şeklinde büyütülerek büyük ölçekli güneş santralleri oluşturulur [77].

Güneş pilleri birbirine bağlanırken yüksek değerlerde gerilim elde edilmek isteniyorsa piller seri olarak bağlanır. Bu şekilde piller üzerinden geçen akım değeri sabit kalırken

gerilim değeri pil sayısı ile çarpılarak katlanmış olur. Oluşturulacak modülden yüksek akım değerleri elde edilmek isteniyorsa, güneş pilleri paralel olarak bağlanır. Bu durumda ise var olan voltaj değeri tek bir güneş pilinin voltaj değerine eşitken, akım değeri güneş pili sayısı ile çarpılarak katlanır [58].

Ticari olan standart modüller genelde güneş pillerinin seri olarak bağlanması ile üretilir. Şekil 2.10'da gösterildiği gibi standart modüller, bir güneş pilinin negatif kutbu ile sonraki güneş pilinin pozitif kutbunun bağlanması ile üretilir. Lehim veya kurşunsuz bağlantı iletkenleri ile bağlanan güneş pilleri arasında birkaç milimetrelik aralık olur. Bu bağlantılar modülün güneşe bakan ön yüzünde olabileceği gibi arka yüz üzerinden de yapılabilir. Arka yüzeyden bağlanmış modüllerde güneş pilleri arası mesafe çok daha az olmaktadır [8].



Şekil 2.10 : Standart modülde güneş pillerinin seri bağlanma şekli.

Standart modüllerde genelde güneş pili sayısı 36 veya 72 adettir. Geometrik dizilim olarak modüller, her bir sırada 4 veya 6 adet güneş pilinin bulunduğu 9 veya 12 adet sıradan oluşturulur. Güneş pilleri bir çeşit film malzeme ile bir arada tutulur. Bu malzeme genellikle etilen vinil asetat (EVA) veya poli vinil butiral (PVB) dir. Günümüzde piyasadaki modüllerin %95'inden fazlasında EVA kullanılırken,

avantajları ile PVB kullanımı da hızla artmaktadır. Bu iki malzeme dışından modüllerde termoplastik poliüretan, iyonomer, poliakrilik dökme reçine, teflon ve silikon da kullanılmaktadır [8].

Modüller üretilirken güneş pillerini mekanik gerilmelerden ve dış etkilere korumak adına çeşitli malzemeler ile muhafaza edilerek kaplanır. Bu kaplama şekline göre farklı çeşitleri olan modüllerden en fazla kullanılanı alüminyum çerçeveli-camlı modüllerdir. Modülün yüzeyi bir cam tabaka ile korunurken, modülün dış kenarları bir alüminyum çerçeveye oturtulmuştur. Çerçevesiz modüllerde genellikle arka kısım polietilen tereftalat (PET) bir filminden oluşur ve üstüne oturtulan güneş pili ön yüzey olarak başka bir PET tabaka veya cam ile kapatılır. Çerçevesiz modüller daha çok başka bir sistem veya şebekeye bağlantı gereksinimi olmayan durumlarda kullanılırlar. Bazı modüllerde de arka kısım taban malzemesi de metal olmaktadır. Genelde paslanmaz çelik veya alüminyum alaşım kullanılır [77].

2.2 Akü

Üretilen elektriğin şebekeye verilmediği fotovoltaiik sistemlerde, üretilen elektriği tüketilmediği zamanlarda elektrik enerjisi kimyasal enerjiye dönüştürülerek akülerde depolanır. Böylece güneş şartlarının iyi olmadığı durumlarda depolanan enerji kullanılabilir.

Aküler, elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depolayan ve istenildiği takdirde kimyasal enerjiyi tekrar elektrik enerjisine çevirerek sisteme aktaran cihazlardır. Fotovoltaiik sistemlerde kullanılacak akülerden beklenen temel özellikler şu şekilde sıralanabilir:

- Derin deşarj durumlarında akünün kısa bir süre sonra tam performansına ulaşması.
- Yüksek miktardaki derin deşarjlarda mükemmel performans sağlaması.
- Yüksek sıcaklığa karşı direnç.
- Enerji girişinin düzenli olmadığı durumlar için uygunluk.
- Dengeleme şarjına ihtiyaç duymaması.
- Minimize edilmiş kendiliğinden deşarj.
- Su kaybına karşı maksimum koruma.
- Aşırı dayanıklı polimer ayırıcı sayesinde yüksek performans.
- Düşük iç direnç sayesinde rahat şarj imkanı [78].

Fotovoltaik sistemler ile elektrik üretimi işletmelerinde genellikle kullanılan akü çeşitleri; OPzS aküler, jel aküler ve kuru akülerdir.

2.2.1 OPzS akü

Az bakımlı, tüplü sabit tesis (OPzS) akümülatörleri, sistemlere kesintisiz enerji kaynağı olarak bağlanmak üzere üretilmiş sabit tesis aküleridir. Minimum bakım gerektirir ve düşük enerji maliyetlidir. Temel özelliği olan düşük antimonlu kurşun alaşımı, kendi kendine deşarjını azaltarak su kaybı oranını büyük ölçüde düşürür. Aktif maddeyi tutuşu ve şarj-deşarj kabiliyeti aynı seviyededir [79]. Şekil 2.11’da OPzS tipi aküler gösterilmektedir [80].



Şekil 2.11 : OPzS tipi akü grubu.

2.2.2 Jel aküler

Jel akü modelleri; soğuk ortam sıcaklıklarında daha uzun kullanım ömrü ve daha iyi performans sağlayan silikon jel teknolojisi ile üretilmektedir. Jel akü modelleri özel seperatör ile donatılmış olup, tam kapalı bakım gerektirmeyen akülerdir. Jel akülerin

derin deşarj döngüsü Absorbed Glass Matt (AGM) aküleri ile kıyaslandığında %50 daha fazladır. Yüksek güvenilirlik ve kaliteye sahiptir [79]. Şekil 2.12’de jel akü grubu gösterilmektedir [78].



Şekil 2.12 : Jel akü tipi akü grubu.

2.2.3 Kuru aküler

Tamamıyla kapalı, bakım gerektirmeyen tipte akülerdir. Çok geniş bir ısı yelpazesinde çalışılabilir. Emniyet valfleriyle teçhiz edilmiştir. Uzun ömürlü, sağlam ve uygun dizayn yapısına sahiptir. Yatay, dikey ya da herhangi bir pozisyonda çalışabilir. Ters çevrilse bile asit sızdırmaz [79].

2.3 Evirici

Eviriciler DC üreten güneş enerjisi kaynaklarını AC’ye çeviren, sistemin kalbi niteliğinde ürünlerdir. Şebekeye bağlı (on-grid) eviriciler ve şebekeden bağımsız (off-grid) eviriciler olarak ikiye ayrılırlar.

2.3.1 Şebekeye bağlı (on-grid) eviriciler

Güneş panelinden gelen DC gerilimi AC gerilime çevirerek AC kullanıma uygun hale getirebilen ve AC'ye çevirmiş olduğu fazla elektrik enerjisini şebekeye verebilen evirici tipidir.

2.3.2 Şebekeden bağımsız (off-grid) eviriciler

Güneş panelinden gelen DC güç ile şarj edilen akülerden aldığı DC gerilimi AC gerilime çeviren eviricilere denir [79].

2.4 Şarj Regülatörü

Şarj regülatörleri, güneş enerjisinden elde edilen gerilimi istenilen gerilim değerine çeviren ürünlerdir. Genel olarak şebekeden bağımsız (off-grid) sistemlerde kullanılan bu ürünlerin seçiminde en önemli kıstas verim değerleridir. Şarj regülatörleri iki ana gruba ayrılmaktadır; Darbe Genişlik Modülasyonlu (PWM) ve Maksimum Güç Noktası İzleyicili (MPPT) (Şekil 2.13) [81].



Şekil 2.13 : MPPT tipi bir şarj regülatörü.

2.4.1 Darbe genişlik modülasyonlu (PWM) şarj regülatörleri

Basit şarj kontrolörleri bağımsız solar sistemleri için en uygun çözümdür. Üzerindeki LCD ekran veya LED'ler sayesinde akü durumu şarj durumu gibi bilgiler

görülebilmektedir. Açık ve kapalı kurşun aküleri optimum ölçüde şarj edilebilir. 12V ve 24V akü veya akü gruplarını şarj edebilir. Verimleri maksimum güç noktası izleyicilerle (MPPT) göre düşüktür.

2.4.2 Maksimum güç noktası izleyicili (MPPT) şarj regülatörleri

Profesyonel şarj denetleyiciler MPPT tekniğine göre çalışır. MPPT şarj regülatörleri gerilim aralıklarında %98 verimlerde çalışmaktadır. Akü özelliklerine göre en uygun şekilde şarj sağladığı için akü ömürlerini %50 uzatmaktadır. Bu nedenle sistem ömrü uzadığından sistem maliyeti de düşmektedir [79].

3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER VE PERFORMANSLARI

Uygun FV modül veya dizilerin seçimi ile elektrik enerjisi üretimi için FV sistemler tasarlanır. Birbirlerine bağlı ve uyumlu çalışma gerekliliği sonucu seçilen ekipmanların bütünü ile FV sistem oluşturulur. FV sistemler montaj ve şebekeye bağlantıları ile ilgili olarak sınıflandırılabilir. Bu bölümde FV sistemlerin uygulama farklılıklarına göre çeşitleri tanıtılmıştır. Bu sınıflandırmaların yanında FV sistemler teknik olarak incelenmiştir. Bu teknik inceleme içerisinde FV teknolojilerin en önemli teknik etkeni olan güneş radyasyonu ve FV sistemlerin performansını etkileyen faktörler ve parametreler vardır. Ayrıca çalışmada kullanılan yazılım tanıtılmıştır.

FV sistemler, öncelikle uygulamanın yapılacağı alana bağlı olarak bina tipi veya açık alan şeklinde iki farklı uygulama çeşidine sahiptir. Eğer açık alan bir arazi söz konusuysa bu açık alan tipi bir FV sistemdir. Uygulama alanı bir bina ise FV sistem eklemeli veya entegre olarak iki çeşitte işletmeye alınabilir. FV sistemler çalışma koşulları ve ihtiyaçları göz önünde bulundurulduğunda ise iki grupta sınıflandırılabilir; şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı. Ayrıca karma (hibrit) sistemler olarak tanımlanan, başka elektrik üretim sistemleri ile birlikte işletmeye alınan FV sistemler de mevcuttur.

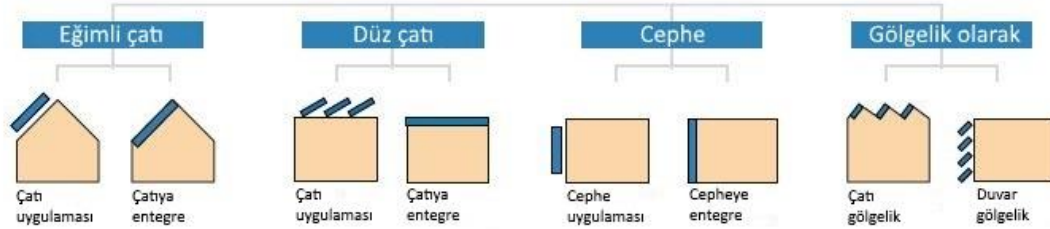
3.1 Binalarda Uygulanan Fotovoltaik Sistemler

FV sistemler binalarda çok çeşitli şekillerde kullanılabilir. Bu sistemlerdeki modüllerin yerleştirilmesi, konumları ve montajları, binanın konumuna ve güneşlenme açısına göre en uygun şekilde ayarlanır. Çoğunlukla eklemeli dediğimiz şekilde binaya sonradan uygulanan bir sistem, binaya entegre olarak tasarlanmış bir bina elemanı FV sistemine göre daha maliyetlidir. Binanın mimarisi içinde tasarlanmış binaya entegre olarak uygulanan sistemler ‘binaya entegre fotovoltaik’ (*BIPV-building-integrated photovoltaics*) olarak isimlendirilir. Bu sistemlerden en iyi verimi almak adına binanın tüm enerji yükleri göz önüne alınmalı ve enerji ihtiyacı en asgari seviyeye indiren tasarım uygulanmalıdır [8, 82].

FV sistemlerin binalardaki uygulamaları üç çeşit olarak ele alınabilir:

- 1- Çatı uygulamaları
- 2- Cephe uygulamaları
- 3- Diğer bina elemanlarında kullanımı [82].

Bu üç çeşit kullanımın eklemeli ve entegre uygulamaları mevcuttur (Şekil 3.1) [8].



Şekil 3.1 : FV sistemlerin binalardaki uygulamaları.

3.1.1 Fotovoltaik sistemlerin çatılarda kullanımı

Bina çatılarının, FV sistemler için bir binadaki en uygun yer olduğu söylenebilir. FV sistemlerin çatı uygulamalarında sistem çatı üzerine bir montaj veya yapı sistemi ile monte edilebilir ya da entegre sistem olarak çatı malzemesi şeklinde uygulanmış olabilir. Günümüz teknolojisinde kiremit üzerine entegre edilmiş FV modüller olduğu gibi kiremitin kendisi bir FV hücre olan sistemlerde ticari olarak üretilmeye başlanmıştır. Çatı uygulamalarının asıl amacının enerji tüketimini karşılamak adına elektrik üretimi olmasının yanında çatı uygulamaları binayı ve çatıyı da dış hava koşullarına karşı korur. Cephe uygulamalarına karşın genellikle daha kolay ve daha az maliyetli oldukları söylenebilir. Cephe uygulamalarına göre çok daha kolay ve estetiği bozmadan istenilen eğim açısına ulaşılabilir ve yönelme daha kolay sağlanabilir. Çatı uygulamalarının cephe uygulamalarına göre bir önemli avantajı da sistem panellerinin arkasının daha kolay havalandırılması sayesinde oluşan sıcaklığın daha çok engellenebiliyor olmasıdır. FV sistemlerin çatı uygulamaları biçimsel anlamda 5 ayrı çeşit olarak sınıflandırılabilir:

- 1- Düz çatılarda kullanım
- 2- Eğimli çatılarda kullanım
- 3- Eğrisel çatılarda kullanım
- 4- Testere dişli çatılarda kullanım

5- Atriumlarda (yapı ortasındaki açık alan, avlu) kullanım [82].

Düz çatı uygulamaları açık alan uygulamalarına benzer şekilde istenilen eğim açısı ile konumlandırma yapılabilen sistemlerdir. Genellikle bu sistemler küçük ölçekli açık alan uygulamalarına göre daha güvenli ve gölgelenme etkisi olarak daha düşük değerlere sahiptir. Kurulumun yapılmak istendiği çatı için mutlaka fiziki ve çevresel koşulların uygunluğuna bakılmalıdır. Şekil 3.2’de düz çatı uygulaması bir FV sistem gösterilmektedir [83].



Şekil 3.2 : Düz çatı üzerine kurulu bir FV sistem.

Eğimli çatılarda kurulan sistemler için genellikle farklı bir eğim açısı verilmeyerek, çatı eğimi kullanılır. Sistemler çatıya sonrada monte edilebilir veya çatı ile entegre tasarlanabilir. Günümüzün son teknolojisi ise güneş pili olarak üretilen kiremitlerdir. Geleneksel kiremitlerden daha dayanıklı olan bu FV kiremitler, bir çatı yapı elemanı olarak elektrik üretebilmektedir [84]. Şekil 3.3’te eğimli bir çatı üzerindeki FV sistem uygulaması gösterilmektedir. Şekil 3.4’te ise eğrisel bir çatı üzerinde kurulu FV sistem gösterilmektedir.



Şekil 3.3 : Eğimli çatı üzerine sonradan monte edilmiş bir FV sistem [85].



Şekil 3.4 : Eğrisel çatı üzerine kurulu FV sistem [86].

Şekil 3.5’te testere dişli çatı üzerine kurulu fotovoltaik sisteme örnek olarak Cambridge Üniversitesi Mühendislik Fakültesi binası çatısına kurulmuş olan fotovoltaik sistem gösterilmektedir [87].



Şekil 3.5 : Cambridge Üniversitesi Mühendislik Fakültesi binası çatısındaki FV sistem uygulaması.

FV sistemlerin atrium uygulamalarında önemli husus yapının atrium özelliğini koruyabilmesi adına şeffaflıktır. Güneş pilleri atrium üzerini örten yapının şeffaflık özelliğini koruyacak şekilde tasarlanmalıdır. Sonradan uygulanması maliyetli ve zor olmakla birlikte genelde yapının mimarisi içerisinde BIPV olarak tasarlanır. Şekil 3.6’de atrium üzerindeki bir FV sistem uygulama örneği gösterilmiştir [88].



Şekil 3.6 : Atriumda FV sistem kullanımı örneği.

3.1.2 Fotovoltaik sistemlerin cephelerde kullanımı

Bina cepheleri için tasarlanan FV sistemler, duvar üstü monte edilen veya binaya entegre şekilde olabilir. Cephe uygulaması FV sistemlerin çatı üstü uygulamalara göre daha zor olduğu söylenebilir çünkü yapının görselliği ve estetiğinin korunması durumu söz konusudur. Statik yük hesaplamaları ve montaj uygunluğu açısından da cephe uygulamalarının, çatı üstü uygulamalara göre daha zor ve maliyetli olduğu söylenebilir.

FV sistemin kullanımı ve verimi açısından, sistemin uygulanacağı cephenin büyük ve uzun olması avantaj sağlar. Benzer amaçlar ile bina cephesinin gölgelenmeden uzak olması ve gün ışığını en çok alan cepheye bakması uygundur. Sistemin tasarlanması aşamasında mümkünse cephe üzerindeki konumlanma için gölgelenme modellemeleri yapılmalıdır. Bu şekilde en verimli tasarıma ulaşılmaya çalışılır. Bina cephesi uygulamalarında FV modüllerin genelde düşey olarak kullanıldığı söylenebilir. Cephe uygulamalarındaki bir önemli husus da FV sistem ile cephe yani duvar arasında kalan havanın sıcaklığıdır. Sistem ve cephe arasının havalandırıldığı sistemlerinin bulunduğu cephelerde sistemin sıcaklığı-verim ilişkisi çok göz önünde bulundurulmayabilir. Havalandırmanın olmadığı sistemlerde ise mutlaka ısıya çok duyarlı olmayan güneş pili teknolojisi tercih edilmelidir.

FV sistemlerin cephe uygulamaları tasarımları ve montajları konusunda karmaşık detaylar gerektirebilir. Tasarımda sistemin boyutu, elektrik iletim sisteminin kurulması, kablolama ve duvar yüzeyine entegre etme gibi konuları belirleyebilmek, maliyetleri azaltıp işçiliği basite indirgeyebilmek adına dikkat edilmesi gereken hususlar şu şekilde sıralanabilir:

- FV sistemin yapı üstünde oluşturacağı yük hesaplanmalı ve bu hesaba göre bir tasarım yapılmalıdır.
- Kirlilik oranını düşürerek verimin yükseltilmesi amacı ile yapılacak temizleme işlemleri için tasarımın veya cephenin bu işleme uygun olması gerekir.
- Cephe üzerindeki konumlandırmada gölgelenme modellemesinin iyi yapılması gerekmektedir.
- Cephede kaplanan alan, cephe yüzeyinin şekli ve havalandırma boşluğunun oluşturulabilmesi gibi durumlar göz önünde bulundurulmalıdır. Bu durumların sonuçlarına göre uygulanacak sistemdeki güneş pili teknolojisi seçilmelidir.

Farklı güneş pili teknolojilerinin bu durumların değerlendirilmesine göre farklı avantajlar ve dezavantajlara sahiptirler.

- Özellikle binaya entegre uygulamalar için geçerli olmak üzere cephe uygulamalarında FV sistemin yapının görsel bütünlüğünü bozmaması gerekir. Yapılan tasarım ve seçilen güneş pilinin buna göre seçilmesi gerekmektedir [82].

Şekil 3.7’de cephe üzerine bir FV sistem uygulaması gösterilmiştir [89].



Şekil 3.7 : Bina cephesi üzerine montaj yapılan FV sistem.

3.1.3 Fotovoltaik sistemlerin diğer bina elemanlarında kullanımı

Çatı ve cephe yüzeyine uygulanması dışında FV sistemler bir bina için başka yapı elemanları yerine veya üstüne de uygulanabilir. Bu elemanlar; saçak, balkon korkuluğu, merdiven korkuluğu, bahçe duvarı, pencere panjurları, gölgeleme elemanları... vb. olarak sıralanabilir [82]. Şekil 3.8’de bir FV sistem balkon korkuluğu olarak kullanılması örneği gösterilmiştir [90].



Şekil 3.8 : Balkon korkuluğu olarak FV sistem kullanılması.

Şekil 3.9’da ise FV sistemin gölgelik olarak kullanılması örneği gösterilmektedir [91].



Şekil 3.9 : Gölgelik olarak kullanılan FV sistem örneği.

3.2 Açık Alanda Uygulanan Fotovoltaik Sistemler

FV sistemlerin açık alan uygulamaları son yıllarda önemini artırmaktadır. Bu tip sistemler var olan güneş enerjili sistemlerin kurulu gücünün çok büyük bir kısmını oluşturmaktadır.

Tıpkı binalarda uygulanan FV sistemler gibi açık alandaki uygulamalar da sağlam ve hava koşullarına dirençli yapılar olarak işletmeye alınmalıdır. Montaj ve temel yapılarının seçiminde ve kullanımında uygulamanın yapılacağı alandaki toprağın kalite, yük ve pH değerleri dikkate alınmalıdır. Arazinin tarım arazisi olma gibi özel durumları da hesaba katılmalıdır [8]. Açık alan arazi FV sistem uygulamasına örnek olarak Şekil 3.10'da Kayseri Çiftlik GES gösterilmiştir [92].



Şekil 3.10 : Kayseri Çiftlik GES.

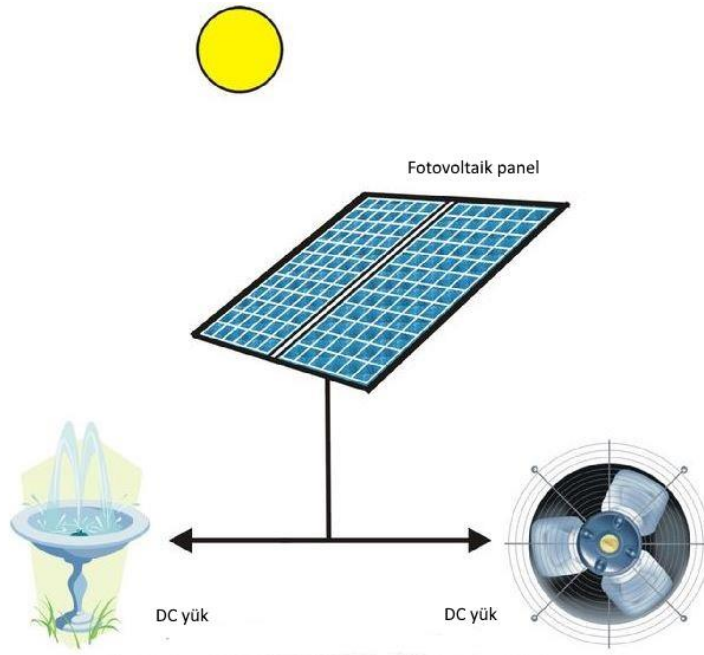
Toprak üzerine kurulan sistemlerin dışında açık alanda gölgeleme sistemleri, sokak elemanları, bariyer sistemleri gibi sistemlere de entegre edilmiş veya eklenmiş FV sistemler kullanılmaktadır [82].

3.3 Şebekeden Bağımsız Sistemler

Stand-alone veya *off-grid* olarak da tanımlanan bu sistemler temel olarak şebekeye bağlı değildir. Elde edilen elektrik enerjisinin depolanmasına veya direkt olarak kullanımına göre 4 ayrı sistem tipinden bahsedilebilir: Direkt bağlı sistemler, bataryalı sistemler, şarj kontrollü bataryalı sistemler ve bataryalı AC ve DC yük barındıran sistemler.

3.3.1 Direkt bağlı sistemler

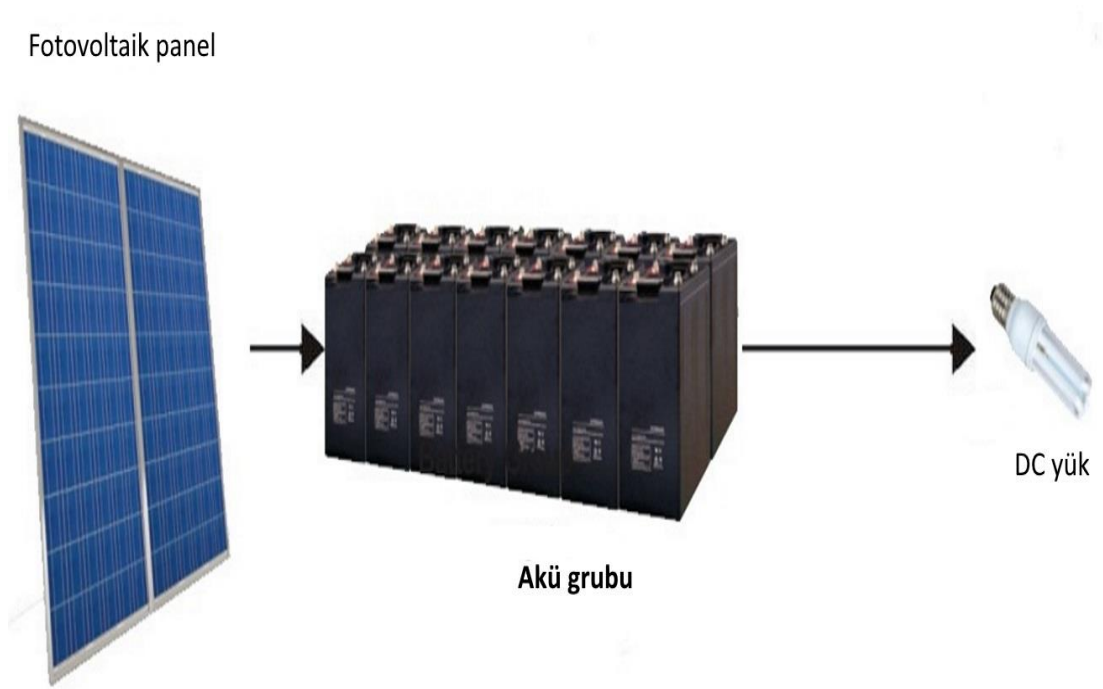
Şebekeden bağımsız sistemler içerisindeki en basit FV sistem çeşididir. FV sistem elektrik tüketen DC yüke direkt olarak artı ve eksi uçlar üzerinden bağlanır. Elektrik enerjisini depolayan herhangi bir ekipman barındırmayan sistem, elektrik enerjisini üretecek FV sistem ve yükün aynı yerde olduğu durumlarda kullanılabilir [70]. Şekil 3.11’de gösterildiği şekilde FV sistem, DC yüke bağlı FV panel veya panellerden oluşur [93]. Başka bir ekipman içermeyen basitliği yanında bu sistem tipi için sürekli olarak güneş radyasyonu durumuna bağlı bir elektrik üretimi söz konusudur. Sistemin, DC yükün bu belirsizliği ve güneşlenmenin olmadığı saatlerde elektrik enerjisini tüketememek durumunu kaldırabilecek özellikte olması gerekmektedir. Bu kısıtlamalar yüzünden bu sistem tipi çok fazla uygulama alanı bulamamaktadır. Özellikle büyük ölçekli güneş santrallerinde kullanılamaz.



Şekil 3.11 : Direkt bağlı FV sistetm.

3.3.2 Bataryalı sistemler

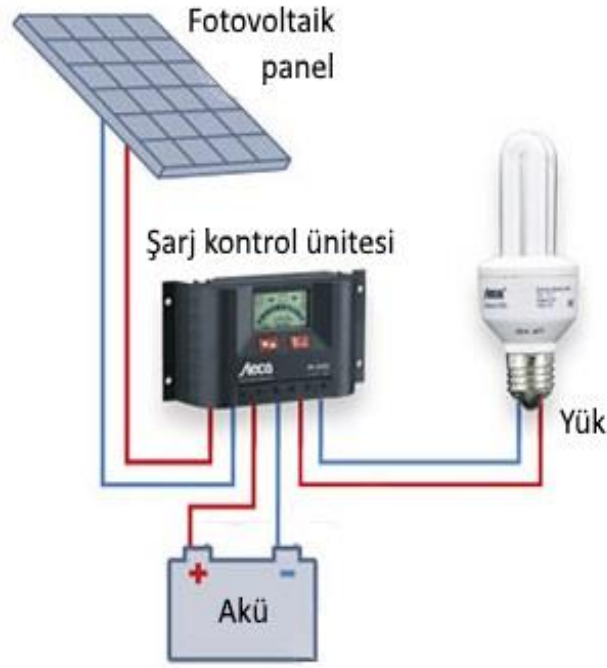
Genelde uygulamada elektrik tüketimi gücün üretildiği anda değil günün her saatine dağılmış olarak farklı zamanlarda gerçekleşir. FV sistemlerin güneşlenme sürelerinde elektrik enerjisi üretebilmeleri sebebi ile üretilen elektriğin kullanılmadığı zamanlarda depolanması ihtiyacı doğmaktadır. Şebekeden bağımsız sistemlerde bu gereksinimden ötürü bir akü grubu ile üretilen elektrik enerjisi depolanmaktadır. Yük profilinin belirsiz olmadığı, iyi tanımlandığı durumlarda bir şarj kontrolü söz konusu olmadan bataryalı sistemler kullanılır. Ayrıca akü kapasitesinin FV sistemin kapasitesinden büyük olduğu durumlarda da kullanılabilir [70]. Şekil 3.12’de gösterildiği gibi sistem FV panel veya paneller ile bir akü grubuna bağlanır [94]. Akü grubu ise yükü beslemektedir.



Şekil 3.12 : Şebekeden bağımsız bataryalı FV sistem.

3.3.3 Şarj kontrollü bataryalı sistemler

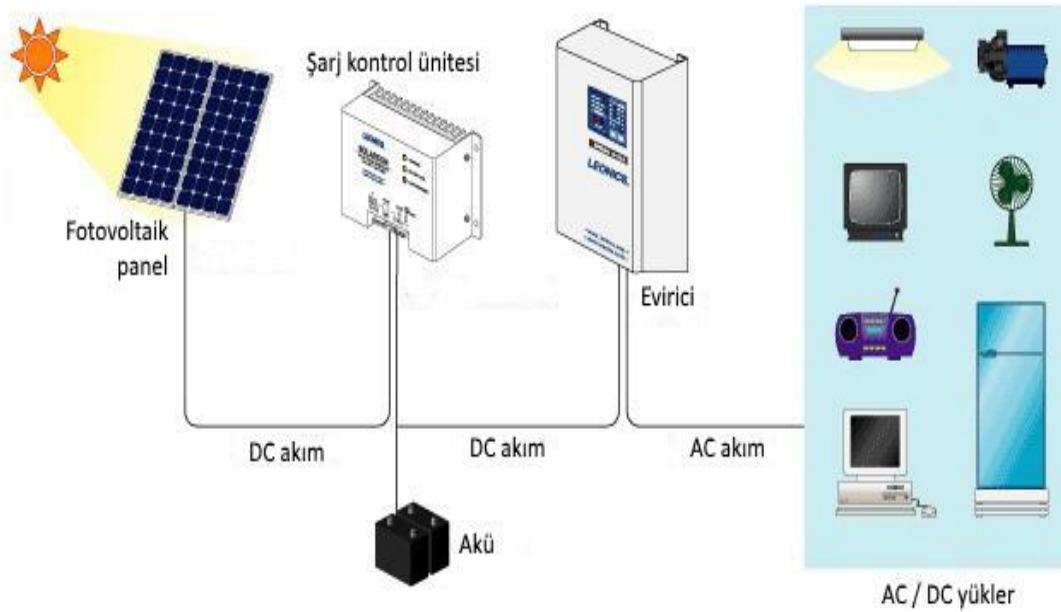
Elektrik tüketimini gerçekleştiren yük iyi tanımlanamıyorsa, değişkenlik gösteriyorsa şebekeden bağımsız FV sistem için bir şarj kontrolü gerekir. FV panel veya panellerin ve yükün birbirine göre optimal veya sınırlamalı bir şekilde akü ölçülendirildiği takdirde de aküyü aşırı şarj veya deşarjdan korumak için bir şarj kontrolü gerekmektedir. Bu sebeple bu sistem tipinde sisteme bir şarj kontrol ünitesi eklenir [70]. Şekil 3.13’de şarj kontrollü bataryalı sistem gösterilmiştir [95].



Şekil 3.13 : Şarj kontrollü bataryalı FV sistem.

3.3.4 Batarya depolamalı ve AC ile DC yükler

Elektrik tüketen sistemler sadece DC değil AC yükler de içerdiği durumlarda şebekeden bağımsız FV sisteme bir evirici eklenmesi gerekir [70]. AC ve DC yükleri beraber barındıran akü grubu ve şarj kontrol sistemine sahip FV sistem Şekil 3.14'te gösterilmiştir [96].



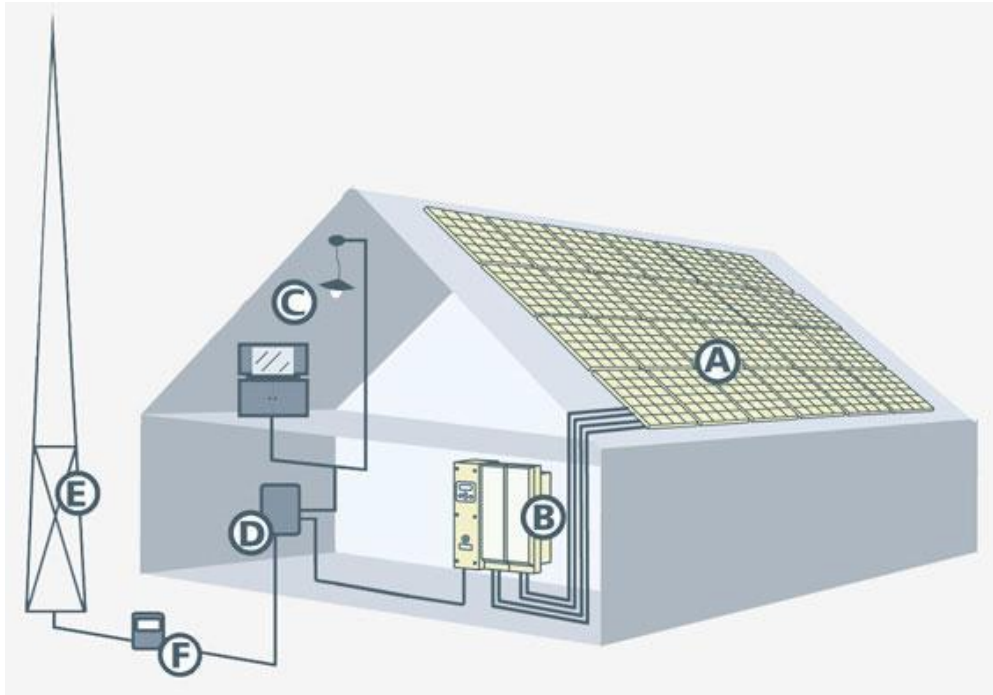
Şekil 3.14 : AC ve DC yüklerin bulunduğu bataryalı FV sistem.

3.4 Şebekeye Bağlı Sistemler

Şebekeye bağlı (*grid-connected*) sistemlerde elektrik tüketimini gerçekleştiren yük, dağıtım paneli sayesinde hem FV panellere hem de şebekeye bağlıdır. Bu şekilde gereken elektrik enerjisi iki birim tarafından da ortak olarak karşılanır. Yükün elektrik tüketimi ihtiyacı olmadığı zamanlarda FV paneller tarafından elektrik üretiliyorsa bu elektrik enerjisi şebekeye aktarılır. Bu anlamda şebeke sonsuz bir akü gibi düşünülebilir, dolayısıyla bu sistemlerde akü grubuna gerek yoktur. FV paneller tarafından elektrik üretilmediği takdirde veya üretilen elektrik yük için yeterli olmadığı zamanlarda yükün gereksinimi şebeke tarafından karşılanır. Şebekeden alınan veya şebekeye verilen elektrik enerjisi miktarları bir sayaç yardımıyla belirlenir [82].

Şebekeye bağlı bir FV sistem Şekil 3.15'te gösterildiği gibi şu ekipmanları içerir [82]:

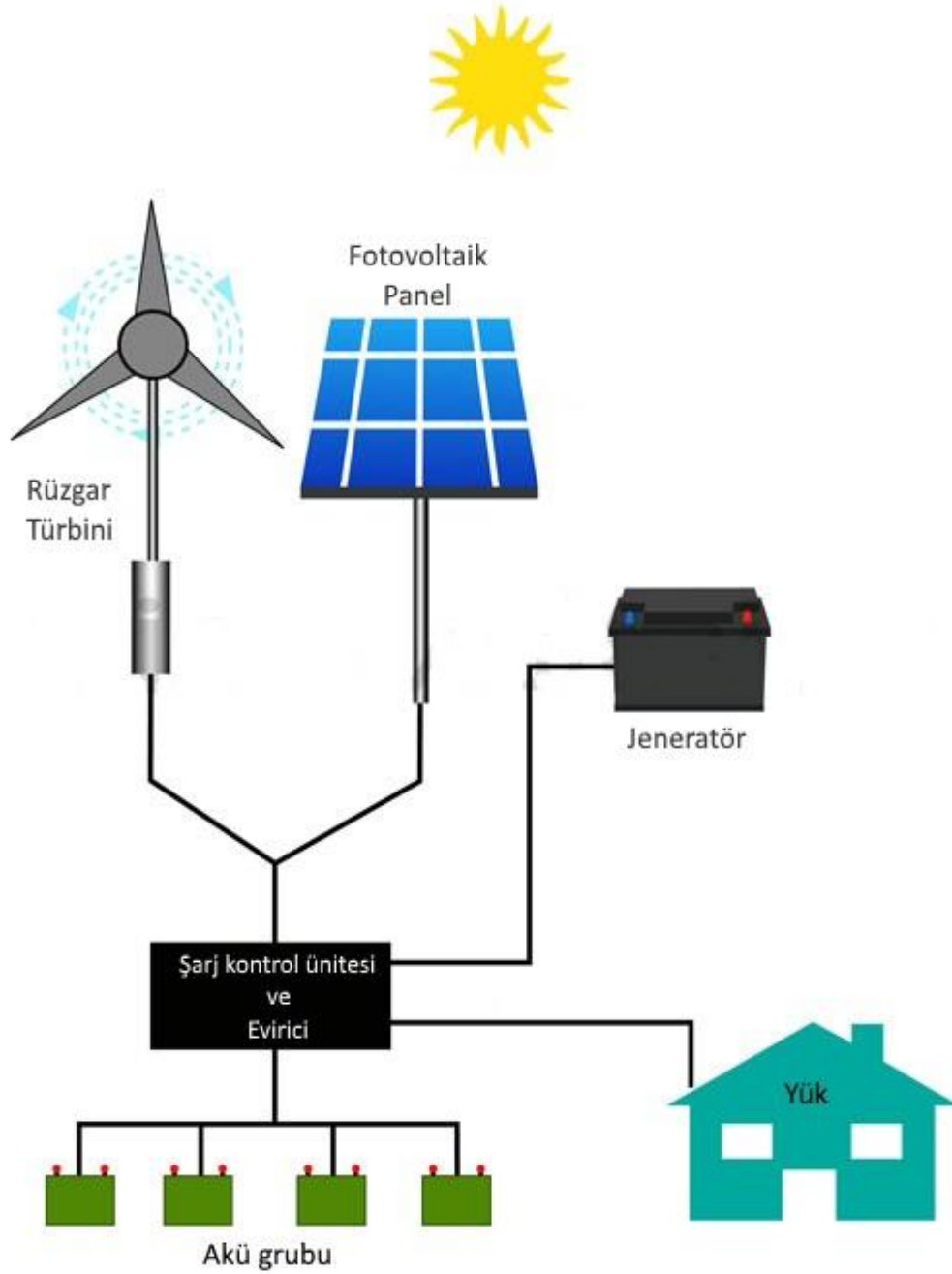
- (A) Fotovoltaik paneller
- (B) Evirici
- (C) Yük
- (D) Dağıtıcı panel
- (E) Şebeke
- (F) Sayaç



Şekil 3.15 : Şebekeye bağlı FV sistem.

3.5 Karma Sistemler

Karma (hibrit) sistemlerde FV sisteminin yanında başka bir veya birden fazla elektrik üretici beraber kullanılır. Diğer elektrik üreten sistem rüzgar türbini, biyogaz kaynaklı sistemler, hidro kaynaklı sistemler, ısıt üreteçler veya fosil yakıtlı sistemler olabilir [70]. Şekil 3.16'da hibrit enerji sistemi gösterilmektedir [97].



Şekil 3.16 : Hibrit enerji sistemi.

Hibrit sistemlerde kullanılan farklı üreteçler genellikle farklı seviyelerde elektrik enerjisi üretirler. Üretilen elektrik enerjisi değerlerindeki bu değişkenlik akü grubuna zarar verebilir. Bu sebeple hibrit sistemler ya akü grubu olmaksızın şebekeye bağlı sistemler olurlar ya da bu sistemler içinde iyi bir akü kontrol ve yönetimi gerekmektedir [70].

3.6 Performansı Etkileyen Faktörler

Güneşi devasa bir nükleer reaktör gibi düşünebiliriz ve devasa büyüklüğü sebebi ile dünya için sonsuz bir enerji kaynağı gibi de düşünülebilir. Ancak güneş, sonsuz bir enerji kaynağı gibi düşünülse de, teknolojik ve çevresel bazı faktörler sebebiyle güneşten elde edilebilecek enerji miktarı kısıtlıdır. Yüksek verim ile üretim istenen sistemlerde bu faktörlerin çok iyi incelenmesi gerekmektedir.

Bir sistemin performansının ölçütü o sistemin çalışma verimidir. Güneş modülleri için maksimum çıkış gücünün standart test koşullarında modül alanına düşen güneş enerjisine oranı, güneş modülünün verimi olarak tanımlanır. Denklem 3.1’de güneş modülü veriminin hesaplanması gösterilmiştir.

$$\eta = \frac{P_{max}}{G \cdot A} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{G \cdot A} \quad (3.1)$$

Burada G güneş radyasyonu, A ise modül alanıdır. I_{max} ve V_{max} güneş pilinin maksimum güç noktasındaki akım ve voltaj değerleri olup, bu terimlerin çarpımları maksimum güç noktası P_{max} değerini verir [75].

Fotovoltaik modülün çıkış gücünü etkileyen faktörler dikkatlice incelenmelidir. Bu faktörler iki ana grupta incelenebilir; teknolojik ve çevresel faktörler.

3.6.1 Performans etkisi açısından fotovoltaik teknolojisi

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi FV güneş pilleri malzemelerine göre çok çeşitlilik göstermektedir. Farklı malzemelerden üretilmiş güneş pillerinin verimleri de farklı değerler göstermektedir. Verimli güneş pilinin seçimi direkt olarak FV sistemin verimine pozitif yönde etkir. Kristal tabanlı güneş pilleri ticari ürünlerde verim konusunda şu an liderdir. Mono-kristal güneş pilinin verim değerleri %13 ile %17 arasında değişmektedir. Üretim süreçlerinin uzun olması ve fazla enerji gerektirmesi sebebi ile mono-kristal tür güneş pilleri diğer poli-kristal ve ince film teknolojilerine

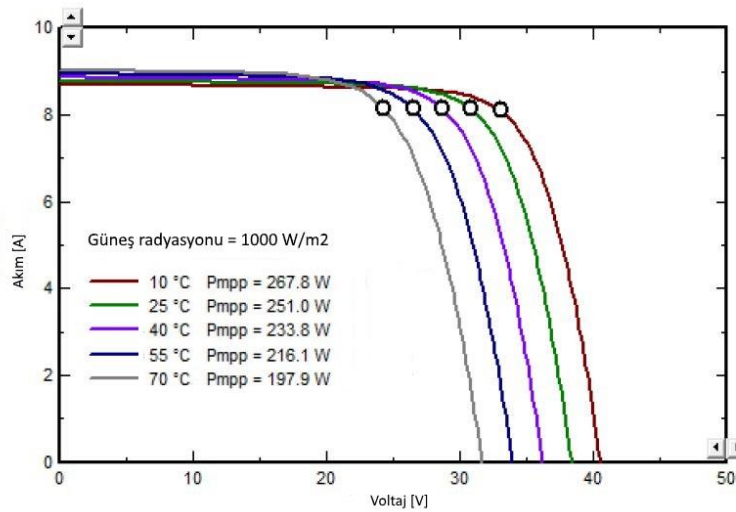
göre daha maliyetlidir. Poli-kristal tip güneş pillerinin verimleri ise %10 ile %14 arasında değerlerdir. Amorfus silikon, kadmiyum tellür, bakır indiyum galyum selenid gibi malzemelerin kullanıldığı ince film teknolojisi ile üretilen güneş pilleri ticari anlamda daha yeni bir teknolojidir ve verim değerleri kristal tabanlı güneş pillerine göre daha düşük seviyelerdedir. Güneş spektrumundaki daha büyük bir bölgeyi soğurma amacıyla peş peşe farklı yasak enerji aralıklı güneş pillerinin sıralanması ile oluşturulan çok eklemli güneş pilleri günümüz teknolojisinde elde edilebilecek en yüksek verim değerine sahiptir. Bu değer laboratuvar koşulları için çok eklemli güneş pilinde %46 olarak ölçülmüştür [75].

3.6.2 Çevresel faktörler

Güneş pilinin sahip olduğu üretim teknolojisi yanında performansı etkileyen en büyük faktör çevresel etkilere dir. Bunlar; güneş pili sıcaklığı, güneş ışımalarının seviyesi, gölgelenme, kirlilik, albedo ve rüzgar hızı olarak sayılabilir [75].

3.6.2.1 Güneş pili sıcaklığı

Güneş pili verimi I-V karakteristiği ile bağlantılıdır. Sıcaklığın açık devre voltajına olan etkisi, kısa devre akımına olan etkisinden daha fazladır. Sıcaklık arttıkça, güneş pilinin verimi düşer. Şekil 3.17’de bir 250W gücündeki bir polikristal silikon güneş pili için verilen I-V diyagramında farklı çalışma sıcaklıklarındaki eğriler görülmektedir. Sıcaklık artışı ile daha çok açık devre voltajının düşmesi ve dolayısıyla güç ve verim değerlerinin azaldığı diyagramda görülmektedir [75].



Şekil 3.17 : Güneş pilinin sıcaklığa bağlı I-V eğrisi.

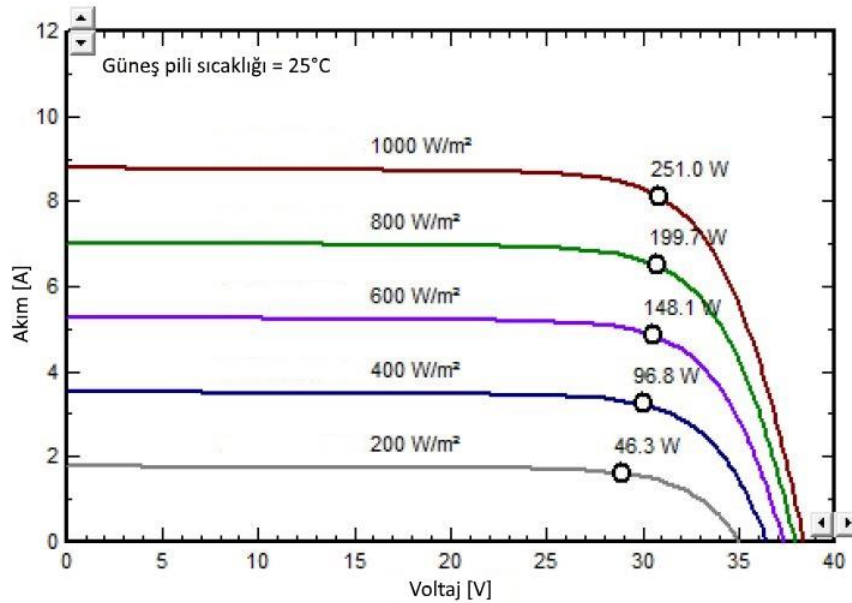
Sıcaklığın verime etkisi pozitif ve negatif yön açısından değişmese de sıcaklığın verimi ne kadar etkilediği güneş pilinin çeşidine göre değişiklik göstermektedir. Verim açısından, amorf silikon güneş pilleri sıcaklıktan en az etkilenen tür iken, poli-kristal güneş pilleri en fazla etkilenen türdür. Çizelge 3.1’de farklı güneş pili türleri için sıcaklığın verime etkisini gösteren yaklaşık sıcaklık katsayısı değerleri gösterilmiştir [75].

Çizelge 3.1 : Farklı güneş pili teknolojilerinin sıcaklık katsayısı.

Teknoloji	Açıklama	Sıcaklık katsayısı (-%/°C)
Mono-Si	Monosilikon	0,40
Poli-Si	Polisilikon	0,45
a-Si	Amorfus silikon	0,20
μc-Si	Mikrokristal silikon	0,26
CIGS	Bakır indiyum galyum selenit	0,36
CdTe	Kadmiyum tellür	0,25

3.6.2.2 Güneş radyasyonu

Güneş pili verimini etkileyen en önemli faktörlerden biri güneş radyasyonudur. Güneş radyasyonu arttıkça güneş pilinin verimi de artmaktadır. Şekil 3.18’de bir güneş pili için 25 °C sıcaklıkta farklı güneş radyasyonları için I-V diyagramı gösterilmiştir. Güneş radyasyonuna bağlı olarak açık devre voltaj değeri logaritmik olarak artarken, kısa devre akımı lineer olarak artmaktadır [75].



Şekil 3.18 : Farklı güneş radyasyonlarına göre I-V eğrileri.

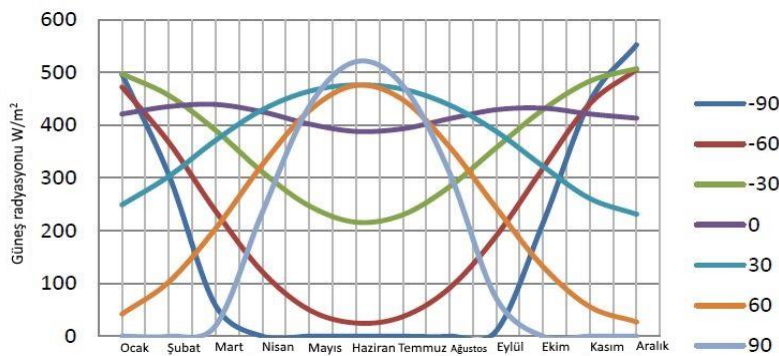
Güneş radyasyonunun verime etkisi güneş pili çeşidine göre incelendiğinde ise kristal tabanlı güneş pillerinin yüksek güneş radyasyonlarında daha iyi performansa sahip oldukları görülmektedir. Düşük güneş radyasyonlarında amorf silikon güneş pilleri mono-kristal ve poli-kristal türlere göre daha iyi bir karakteristik sergilemektedir [75].

3.6.2.3 Modül yerleşimi

Güneş pilinden elde edilen enerji çıkışını etkileyen en önemli faktörün güneş radyasyonu olması yanında güneş pilinin konumu da pilin güneş radyasyonundan ne derece faydalandığını etkilemektedir. Güneş radyasyonundan maksimum fayda elde etmek adına modül, optimum azimut ve eğim açısı ile yerleştirilmelidir. Yıllık üretilen enerjiyi maksimize etmek adına eğim açısı enlem açısına eşit olmalıdır. Değiştirilebilir eğim açısı özelliğine sahip sistemlerde maksimum yıllık enerji üretimi için eğim açısı, enlem açısına göre yaz döneminde $10-15^\circ$ az, kış döneminde ise $10-15^\circ$ çok olmalıdır. Azimut açısı ise ideal olarak 0° olmalıdır, yani Kuzey Yarım Küre için modülün tam güney cepheye döndürülmüş olması gerekir. Güneşi takip eden sistemler, değişen azimut açısı değerleri ile daha çok elektrik enerjisi üretebilmektedir [75].

3.6.2.4 Enlem

Dünyanın geometrik yapısı sebebiyle güneş ışınları farklı enlemlere farklı yoğunluklarda ulaşır. Tropikal bölgelere daha dik açıyla gelen güneş radyasyonu, kutup bölgelerine doğru daha düşük açılar ile düşer. Ayrıca ekvatorдан kutup bölgelerine doğru gidildikçe, güneş radyasyonu daha fazla miktarda atmosfer ile karşılaşacağı için güneş radyasyonunun yoğunluğu azalır. Bu durumlar sebebiyle güneş pilinin performansını etkileyen bir faktör de enlem değeridir [75]. Şekil 3.19’da güneş radyasyonunun farklı enlemlere hangi değerler ile ulaştığı gösterilmiştir.



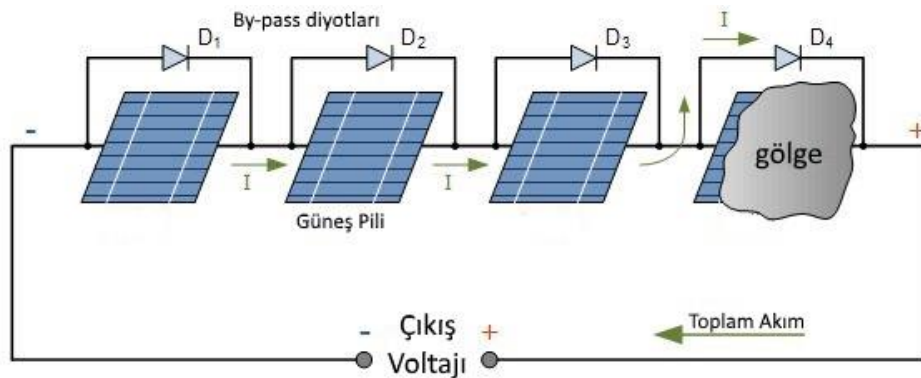
Şekil 3.19 : Farklı enlem değerleri için güneş radyasyonu değerleri [98].

3.6.2.5 Rüzgâr

Rüzgâr, güneş pili üzerinde direkt bir etkiye sahip değildir. Rüzgâr, güneş pilinin çalışma sıcaklığını etkilemektedir. Rüzgâr, doğal bir havalandırma sistemi olarak güneş pilinin sıcaklığını düşürmektedir ve sıcaklık da güneş pilinin verimini etkilemektedir [99].

3.6.2.6 Gölgeleme

Gölgeleme güneş pili performansını negatif yönde etkileyen bir faktördür. Gölgeleme sebepleri bulutlar, binalar, ağaçlar... vs. olabilir. Bir modül üzerine düşen gölge sebebiyle bir ya da birden fazla güneş pili elektrik üretimini durdurabilir. Modül üzerinde tüm güneş pilleri birbirine bağlı olduğu için modül de elektrik üretmez. Bu durum by-pass diyotları sayesinde aşılr. Şekil 3.20’de gösterildiği gibi bir güneş pili üzerine gölge düştüğü ve o pil elektrik üretimini durdurduğu takdirde, gölgelenmemiş diğer güneş pillerinin ürettiği elektrik akımı by-pass diyotu üzerinden akarak gölgelenmiş güneş pilini es geçer. Bu şekilde modül elektrik üretmeye devam eder [100].



Şekil 3.20 : By-pass diyotunun çalışma şekli.

3.6.2.7 Kirlilik

Kirlilik güneş pili performansını olumsuz etkileyen bir faktördür. Toz, kum ve kar gibi dış ortam etkenlerinden kaynaklanabilir. FV sistemin kurulacağı yer için tahmini bir yüzde ile değerlendirilir ve konuma göre farklı değerlere ulaşabilir. Dış ortam etkeni olarak yağmur, temizleyici özellik olarak genelde kirliliği azaltır. Sistem bakımları sırasında insan gücü veya otomatik ekipmanlar ile güneş pilleri temizlenir [75].

3.6.2.8 Albedo

Albedo, yansıma katsayısı veya aklık derecesi olarak da tanımlanabilir. Bir yüzeyin güneş radyasyonunu ne kadar yansıttığı ile ilgili bir orandır. Albedo değerleri 0 ile 1 arasında değişir. 0 değeri tüm güneş radyasyonun soğuran yüzeyi gösterirken, 1 değeri tüm güneş radyasyonunu yansıtabilen yüzeyi ifade eder. Özellikle eğimli FV sistemler için önemli bir değerdir. Albedo değerine bağlı olarak yüzey üzerinden yansıyan güneş radyasyonu da, güneş pili tarafından emilir [75]. Çizelge 3.2’de farklı yüzeyler için albedo değerleri gösterilmiştir [8].

Çizelge 3.2 : Yüzeyler için albedo değerleri.

Yüzey	Albedo
İşlenmemiş toprak	0,26
Çimen	0,18-0,23
Asfalt	0,15
Ağaçlık	0,05-0,18
Çakıl	0,18
Beton	0,20-0,30
Eski kar katmanı	0,45-0,70
Yeni kar katmanı	0,80-0,90

3.7 Performans Parametreleri

Nihai yıllık hasat olarak tanımlanan değer, FV sistemden elde edilen net enerji miktarının, sistemin standart koşullar altında (1000 W/m^2 güneş radyasyonu, 25°C sıcaklık) elde edilen toplam güç miktarına oranıdır. Denklem 3.2 ile hesaplanan nihai yıllık hasat, FV sistemden elde edilen yıllık enerji değerini sistemin üretmesi için gereken toplam işletme saati olarak da tanımlanabilir.

$$Y_f = \frac{E}{P_0} \quad (3.2)$$

Burada Y_f nihai yıllık hasadı, E toplam net elde edilen enerjiyi, P_0 ise standart koşullardaki güç değerini göstermektedir. Nihai yıllık hasadın birimi kWh/kW’tan saat olarak belirtilir.

Referans hasat değeri, toplam güneş radyasyonunun referans güneş radyasyonu sabiti olarak kabul edilen 1 kW/m^2 değerine oranı olarak tanımlanır. Güneşlenme süresinin tepe değeri olarak da ifade edilebilir. Y_r referans hasat değeri, H toplam güneş

radyasyon değeri ve G_s referans güneş radyasyon sabiti değeri olmak üzere; Y_r değeri denklem 3.3'teki gibi hesaplanır.

$$Y_r = \frac{H}{G_s} \quad (3.3)$$

Performans oranı (PR), nihai yıllık hasadın referans hasat değerine oranıdır. Gerçekte elde edilen enerji değerinin teorik olarak elde edilecek enerji değerine oranı olarak tanımlanabilir. Denklem 3.4'teki gibi hesaplanan bu boyutsuz değer sistem kayıplarını görmek ve farklı FV sistemlerin karşılaştırılması adına kullanılan bir değerdir [75].

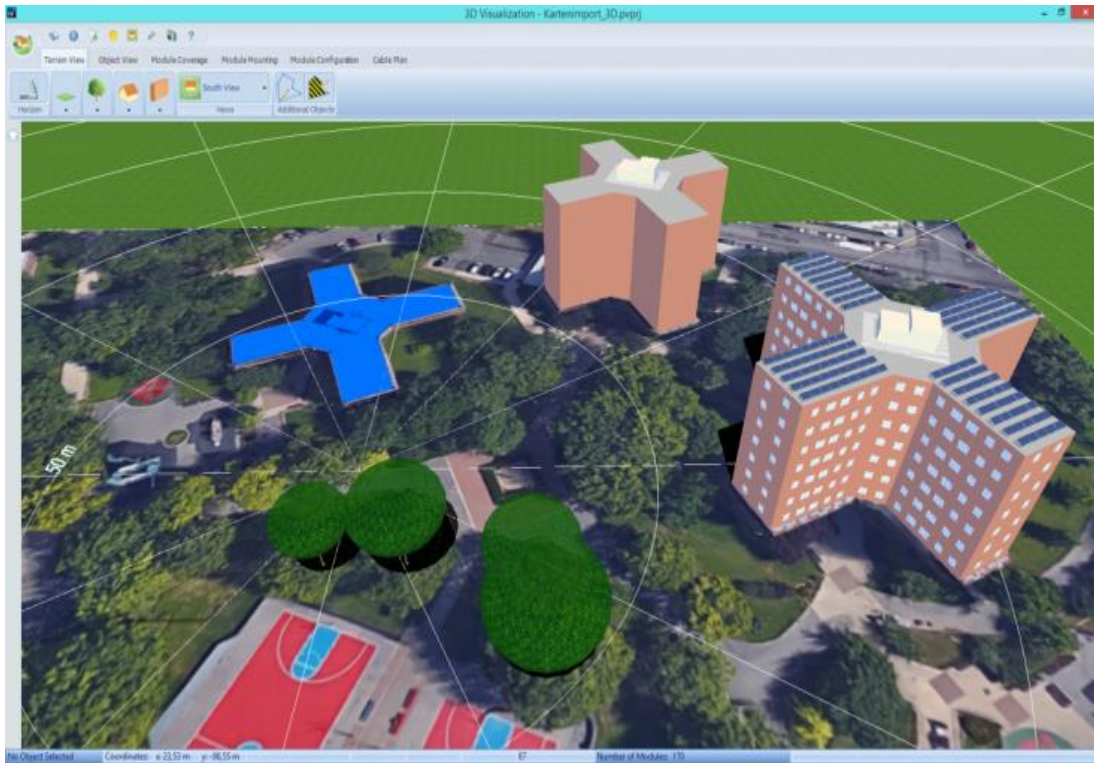
$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} = \frac{\text{gerçek enerji çıktısı}}{\text{teorik nominal enerji çıktısı}} \quad (3.4)$$

3.8 Modellemede Kullanılan Yazılım

FV sistemlerin performanslarını hesaplamaya yardımcı olan farklı tiplerde birçok yazılım mevcuttur. Güneş panelleri, eviriciler, şarj regülatörleri ve diğer ekipmanların etkileri ile hesaplama yapan bu yazılımlar FV sistemin çıkış gücünü hesaplamada kullanılmaktadır. En önemli etken olan güneş radyasyonu da hesaplamalar içindedir. Farklı yazılımlar güneş radyasyonu modellemesi için farklı metotlar kullanmaktadır, verilerin alındığı ve incelendiği platformlar da farklı olmaktadır [101].

FV hesaplayıcı yazılımlar bedava ve ücretli, online ve kurulu yazılım olarak çok çeşitlidir. Bu yazılımlar farklı yönleri ile genel veya profesyonel kullanıma sunulmuştur. Bedava olan kurulu yazılımlar; SAM (System Advisor Model), RETScreen, HOMER Legacy v.2.68, Skelion, Hybrid2 olarak sıralanabilir. Bilgisayara kurulum gerektirmeden online olarak kullanılabilen bedava yazılımlar ise; SISIFO, PV-GIS, PVWatts, PV*SOL online, DIAFEM, Easy-PV olarak sayılabilir. Daha profesyonel kullanımlar için uygun olan ücretli kurulum gerektiren yazılımlar; Solarius-PV, PV Designer Solmetric, Archelios PRO, Solarmapper, PVComplete, PVscout, PVSYST, SolarPRO, Plan4Solar PV, PV F-Chart, INSEL, PV*SOL, Polysun, HOMER, EasySolar, HELIOS 3D, Solergo, PV-DesignPro, Skelion şeklinde sayılabilir. Ücretli online yazılımlar; HelioScope, PolySun, SOLARPLUS, SolarDesignTool, AuroraSolar, Solargis-PvPlanner, EasySolar, SolarModel, i-Pals WEB olarak sıralanabilir [102].

Bu çalışmada PV*SOL yazılımının demo versiyonu kullanılmıştır. Yazılım Alman menşeli Valentin Software tarafından üretilmiştir [103]. FV sistemlerin tasarımı için kullanılan yazılım, öz tüketim ve depolama sistemlerinin de hesaplamalara katıldığı dinamik bir yazılımdır. Yazılım iklim verileri için MeteoSyn verilerini kullanmaktadır. MeteoSyn iklim veri tabanı Deutsche Wetterdienst tarafından Almanya için 1981-2000 seneleri için sunulan yaklaşık 450 iklim verileri ve dünya çapında Meteonorm 7.0 bazında da 1986-2005 seneleri için sunulan 8000'den fazla iklim verileri bulunduruyor. Program içerisinde iklim verileri haritadan seçilebildiği gibi kullanıcı kendi ölçümlerini kayıt ederek veya mevcut veri tabanı ile interpolasyon yaparak oluşturabilir. PV*SOL yazılımı FV sistem ekipmanları için 15500 adet modül ve 4000 adet evirici gibi geniş bir veri tabanı içermektedir. Veri tabanları üreticiler tarafından sürekli güncelleştirilmektedir. PV*SOL yazılımı '3D Visualization' bölümü ile 3 boyutlu tasarım kabiliyetini sağlamaktadır. Şekil 3.21'de görüldüğü gibi 3 boyutlu tasarım uydu haritaları ile entegre olabilmektedir.



Şekil 3.21 : PV*SOL'da uydu fotoğrafları ile üç boyutlu tasarım görüntüsü.

PV*SOL yazılımında benzetim dakikalık veya saatlik veriler ile yapılmakta ve sonuç raporu diyagramlar ve nakit akışı tablosu olarak elde edilebilmektedir. Enerji bilanço tablosu ile bir FV sistemin bütün gelir ve kayıpları değerlendirilebilmektedir [104].

3.8.1 PV*SOL yazılımı kullanımı

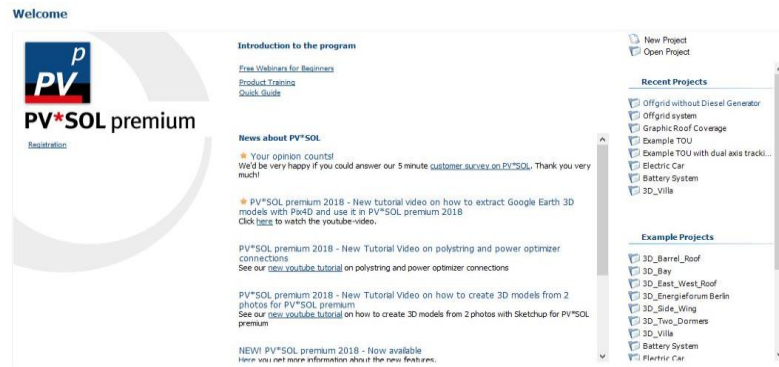
PV*SOL yazılımı arayüzünde dokuz adet pencere bulunmaktadır. Projenin özelliklerine göre başka pencereler de bu menüye otomatik olarak eklenmektedir. Şekil 3.22’de bu pencerelere geçişleri sağlayan simgelerin bulunduğu menü gösterilmektedir. Dokuz pencere başlıkları şu şekilde sıralanır:

- Welcome
- Project Data
- System Type, Climate and Grid
- 3D Design
- Cables
- Circuit Diagram
- Financial Analysis
- Results
- Presentation



Şekil 3.22 : Pencere simgelerinin bulunduğu ana menü.

Welcome Penceresi: Bu pencere yazılımın başlangıç penceresidir. Yazılım için öğretici videoların bulunduğu ve başlangıç için bir webinar içeren sitelere ve hızlı başlangıç yardımına ulaştıran linkler bu pencerede bulunmaktadır. Yeni proje ve daha önceden kaydedilmiş proje açma, son kullanılan projeler ve örnek projeler de bu pencerede bulunmaktadır. Şekil 3.23’te *Welcome* penceresi gösterilmektedir.



Şekil 3.23 : Welcome penceresi.

Project Data Penceresi: Bu pencere projenin genel tanımlayıcı bilgilerinin girildiği bölümdür. Proje numarası, projeyi gerçekleştiren, tarih, proje ismi, projeyi temsil eden resim, proje açıklaması gibi bilgiler bu pencerede girilir. PV*SOL yazılımı, ticari olarak FV sistem projelendirmesi yapan firma veya kişilerin, FV sistem kurmayı planlayan işletme veya şahıslar için oluşturacağı tasarım ve fizibilite çalışmalarının yapılmasında kullanılmaktadır. Bu sebeple yazılımın kullanımı, sunum ve rapor çıktıları FV sistem kurmayı planlayan bir müşteriye sunum odaklı olarak tasarlanmıştır. Project Data penceresinde bu doğrultuda müşteri bilgileri olarak şirket ismi, iletişim kurulan personelin ismi, telefon ve adres verileri de girilebilmektedir. Şekil 3.24'te Project Data penceresi gösterilmektedir.

Project Data

Project Number

Project Designer

Customer Details

Customer Number

Contact Person

Company

Phone

Fax

E-Mail

Address

Start of Operation

Project Name

Project Image

Project Description

Address of Installation

Şekil 3.24 : Project Data penceresi.

System Type, Climate and Grid Penceresi: Bu pencerede sistem türü, FV sistemin kurulacağı konum ve iklim bilgileri ile bu konumun şebeke özellikleri girilmektedir. Sistem tipi olarak; şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız sistem çeşitleri seçilmektedir. Proje için 3 boyutlu tasarım bölümünün kullanıp kullanılmayacağı da bu pencerede seçilebilmektedir. Şekil 3.25'te System Type, Climate and Grid penceresi gösterilmektedir.

İklim özellikleri seçilirken yazılımın kendi verilerinden konumlar seçilebildiği gibi harita üzerinden yeni bir konum da seçilip veri sistemine eklenebilmektedir. Yeni konum eklemede yazılım MeteoSyn uygulamasına geçiş yapmaktadır. MeteoSyn kendi verileri üzerinden interpolasyon yaparak yeni eklenecek konumun güneş radyasyon ve iklim verilerini oluşturabilmektedir.

System Type, Climate and Grid

Type of System
Grid Connected PV System

Type of Design
☒ Use 3D Design

Climate Data

Country	Germany	Location	Berlin
Latitude	52° 31' 30" (52,53°)	Annual sum of global irradiation	1030 kWh/m ²
Longitude	13° 24' 48" (13,41°)	Annual Average Temperature	9,3 °C
Time zone	UTC+1		
Time Period	1981 - 2010		
Resolution	Hourly		

AC Mains

Voltage (N-L)	230 V
Number of Phases	3-phase
cos φ	1
Maximum Feed-in Power Clipping	No

[Simulation Parameters](#)

Şekil 3.25 : System Type, Climate and Grid penceresi.

3D Design Penceresi: 3D Design penceresi Şekil 3.26’da gösterilmektedir. Bu bölüm FV sistemin tasarımının gerçekleştirildiği bölümdür. Düzenleme butonu ile 3D Visualization uygulaması yeni bir pencerede açılmaktadır. 3 boyutlu tasarım bu uygulama ile yapılmaktadır. Yazılım uydu görüntüleri ile de entegre çalışmaktadır.

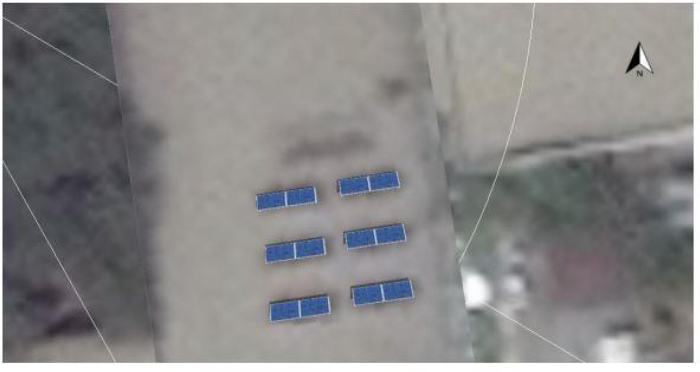
3D Design

3D Visualization

- Mounting Surface West
- Degradation of Module

System Planning with 3D Visualization

[Edit](#)



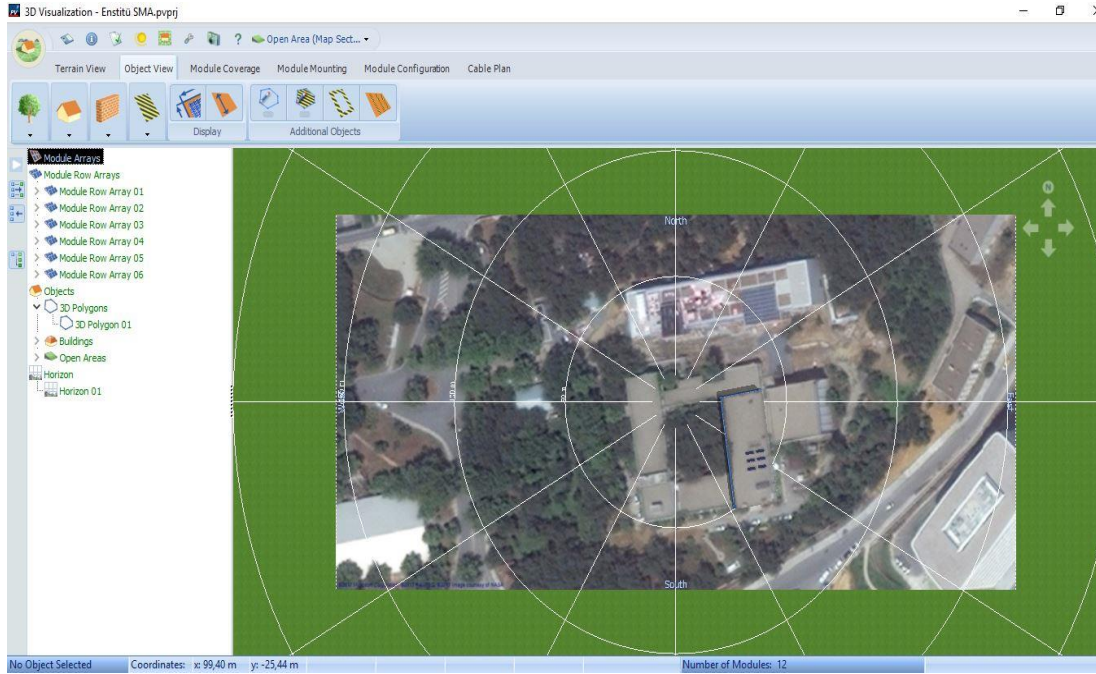
Number of Covered Areas: 1
Number of Modules: 12
Number of Inverters: 12
PV Generator Output: 2,88 kWp

[Configuration Check](#)

Şekil 3.26 : 3D Design penceresi.

FV sistemin kurulacağı arazi veya binalar oluşturulabilmektedir. Sistemde kullanılacak modüllerin seçimi, modül sayıları, modüllerin konumlandırılması, modül-evirici sayı konfigürasyonları, kablo düzeni bu uygulama ile yapılmaktadır.

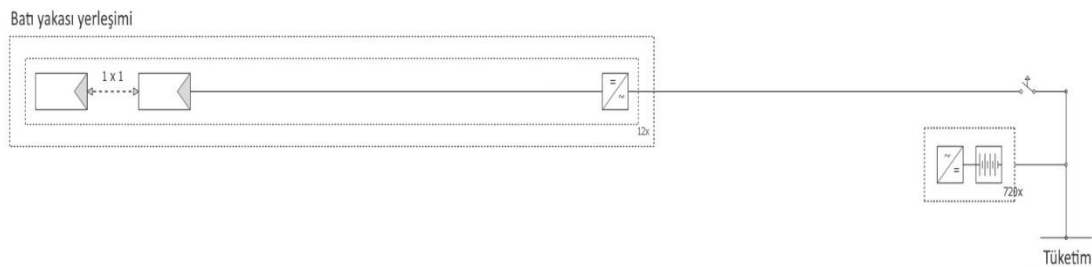
Şekil 3.27’de 3D Visualization penceresi görülmektedir. 3D Visualization penceresi kapatılırken, yazılım yapılan tasarımın verilerini ana programa aktarmaktadır. Bu aktarma sırasında kullanıcının isteğine göre 3D Visualization ile yapılmış arazi ve bina bilgileri doğrultusunda gölgelenme analizi de yapılabilir.



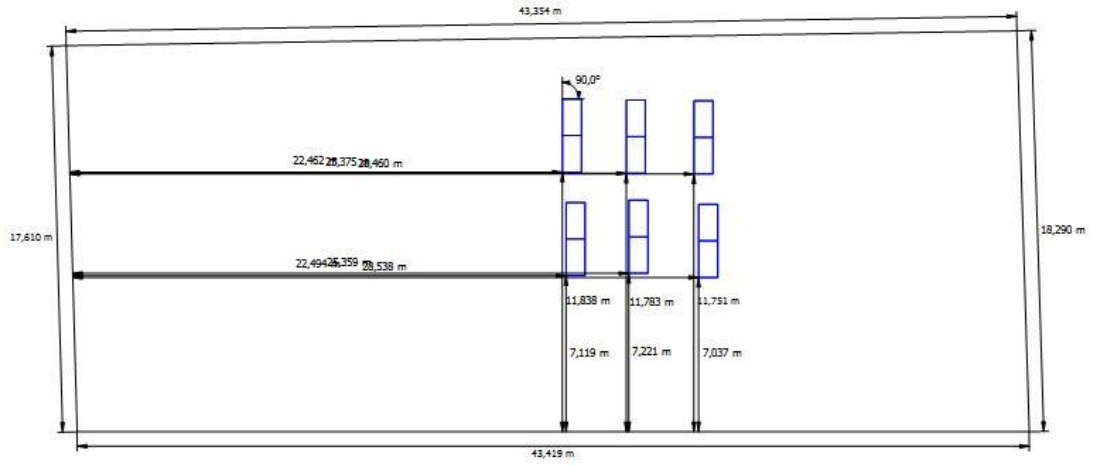
Şekil 3.27 : 3D Visualization penceresi.

Cables Penceresi: Bu bölümde kablo bilgileri girilmektedir. Kablo kayıpları genel yüzde olarak tek bir değer şeklinde girilebildiği gibi var olan kablo planına göre ayrıntılı bilgi girilmesi ile de yazılım tarafından hesaplanabilmektedir.

Circuit Diagram Penceresi: Bu pencere tasarlanmış FV sistemin devre diyagramının ve panel yerleşiminin ölçülendirme değerlerini de içeren krokisinin gösterildiği penceredir. Veri girişi yapılmayan bu pencereden çizimler istenilen bir kaç çeşit formatta dışarı aktarılabilir. Örnek bir proje için Şekil 3.28’de devre diyagramı ve Şekil 3.29’da modül yerleşiminin krokisi gösterilmektedir.



Şekil 3.28 : Devre diyagramı.



Şekil 3.29 : Yerleşim krokisi.

Financial Analysis Penceresi: Bu pencerede ekonomik analiz için gerekli olan maliyet bilgileri girilmektedir. Modül, evirici ve akü ücretleri ile projenin ömrü ve faiz oranı girilmektedir. Ayrıca işçilik maliyeti, kablo maliyeti ve diğer maliyet adı altında maliyet değerleri girilebilmektedir. Yazılım seçilen konuma göre para birimini otomatik olarak ayarlamaktadır.

Results Penceresi: Bu pencerenin simgesi aynı zamanda bir çalıştırma butonu görevi görmektedir. Bu pencereye geçiş yapmak istendiğinde yazılım analizi başlatmaktadır. Analiz sonuçları birçok değer isteğe göre farklı grafik ve tablolar ile desteklenerek kullanıcıya sunulmaktadır. Şekil 3.30'da örnek bir proje için Results penceresi gösterilmektedir.

Results



Şekil 3.30 : Results penceresi.

Presentation Penceresi: Bu pencerede analiz sonuçları olan veriler Word, Excel veya Adobe Acrobat (*.pdf) formatında dışa aktarılabilir.

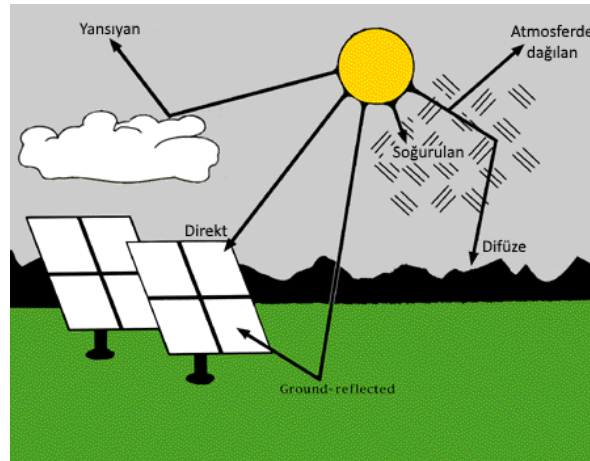
Bu çalışmada tasarlanan FV sistem şebekeden bağımsız bir sistemdir. PV*SOL yazılımında ilgili sistem tipi seçildiği takdirde menüye *Consumption* ve *Battery Inverter and Battery* şeklinde iki menü daha eklenmektedir. *Consumption* penceresi elektrik tüketim verilerinin girildiği bölümdür. Yıllık toplam elektrik tüketim verisi ve FV sistemin bağlı olduğu yükün türü (standart ev, normal mesai saatlerinde aktif ofis, gece kulübü... gibi) girildiği takdirde aylara göre tüketim dağılımını yazılım otomatik olarak yapmaktadır. Ayrıca aylık elektrik tüketim verileri özel olarak her ay için ayrı girilebilmektedir. *Battery Inverter and Battery* penceresinde akü ve akü eviricilerinin bilgileri girilmektedir. Yazılım kullanıcının tasarladığı FV sistemin özelliklerine göre kendi veri havuzundan uygun olan akü ve eviricileri listelemektedir. Kullanıcı uygun olan ekipmanların dizildiği bu listeden akü ve evirici seçebilmektedir.

3.8.2 Yazılımda kullanılan hesaplamalar

PV*SOL yazılımı eğik yüzeye gelen güneş ışınımı değerini denklem 3.5'te gösterildiği şekilde hesaplamaktadır [105].

$$E_{eğim} = E_{dir} + E_{dif} + E_{yan} \quad (3.5)$$

Burada $E_{eğim}$ eğik yüzeye gelen toplam güneş radyasyonu değeridir. E_{dir} direkt gelen güneş ışınımı iken, E_{dif} difüze güneş radyasyonu, E_{yan} ise yansıyan güneş radyasyonudur. Şekil 3.31'de direkt, difüze ve yansıyan güneş radyasyonları gösterilmektedir [106].



Şekil 3.31 : Direkt, difüze ve yansıyan güneş radyasyonları.

FV sistemlerin performanslarını hesaplamak için kullanılan yazılımlarda farklı güneş radyasyon modelleri kullanılmaktadırlar [102]. PV*SOL yazılımında Hay ve Davis [107] tarafından tanımlanan anizotropik model kullanılmaktadır. Ayrıca yine güneş radyasyonunun hesabında Reindl ve d. [108] tarafından belirlenen indirgeme katsayıları kullanılmaktadır.

FV sistemin güç çıkışı ve performansının hesaplanması için PV*SOL yazılımında veri tabanındaki modüllerin karakteristik özellikleri kullanılır. Bu modüllerin standart test koşulları altında ölçülmüş verilerinin; sıcaklık, güneş radyasyonu gibi değişken diğer parametreler karşısındaki davranışları karakteristik eğrileri oluşturmaktadır. Yazılım bu eğriler üzerinden gereken verileri direkt veya interpolasyon ile elde ederek kullanır [105].

4. İTÜ ENERJİ ENSTİTÜSÜ ÇATI TİPİ FV SİSTEM MODELLEMESİ

Bu çalışmada İTÜ Ayazağa Kampüsü'nde bulunan Enerji Enstitüsü için bir FV güneş enerjisi sistemi tasarlanmıştır. Bu tasarım için PV*SOL yazılımı kullanılmıştır. Modelleme için yazılımın içindeki MeteoSyn veri tabanındaki iklim değerleri kullanılmıştır. Enstitünün elektrik tüketim değerleri ve bina yerleşimi, çatı alanları göz önünde bulundurularak program aracılığıyla hesaplamalar yapılmıştır. Tasarlanan sistemin ekonomik analizi yapılarak ne kadar uygulanabilir olduğu ortaya konmuştur.

4.1 Enerji Enstitüsü'ndeki Elektrik Tüketimi

Ayazağa kampüsü İTÜ'nün en büyük ve ana kampüsüdür. Kampüs Sarıyer ilçesi sınırlarında Maslak'ta, yaklaşık olarak 41.106N ve 29.024E koordinatlarında bulunmaktadır. Enerji Enstitüsü Ayazağa Kampüsü sınırlarında kuzey-doğu bölgesinde eski ismi ile “Enerji Kapı” olarak bilinen yeni ismiyle “1773 Kapısı” girişinin yanında yer almaktadır.

Enerji Enstitüsü, 1961 yılında kurulmuş olan Nükleer Enerji Enstitüsü'nün 2003 yılında yeniden yapılandırılması ile kurulmuştur. Enerji ve ilgili alanlarda eğitim, öğretim ve araştırma etkinlikleri sürdüren kurum, Enerji Bilim ve Teknoloji ile Radyasyon Bilim ve Teknoloji olmak üzere iki adet lisansüstü programa sahiptir. Enerji Bilim ve Teknoloji yüksek lisans ve doktora seviyelerinde programlar iken Radyasyon Bilim ve Teknoloji sadece yüksek lisans programıdır. Enstitünün sahip olduğu akademik personel sayısı 38'dir. Endüstri ve proje destekli araştırma görevlileri de eklendiği zaman bu sayı 47'ye ulaşmaktadır. Kurumda çalışan idari personel sayısı ise 21'dir. Enstitü bünyesindeki laboratuvarlar şöyle sıralanabilir:

- Akü Teknolojileri Test ve Araştırma Laboratuvarı
- Düşük Seviyeli Radyoaktivite Ölçümleri Laboratuvarı
- Enerji Verimliliği ve Aydınlatma Tekniği Laboratuvarı
- Fotometri ve Radyometri Laboratuvarı
- Isıl Test ve Termoelektrik Teknolojileri Laboratuvarı

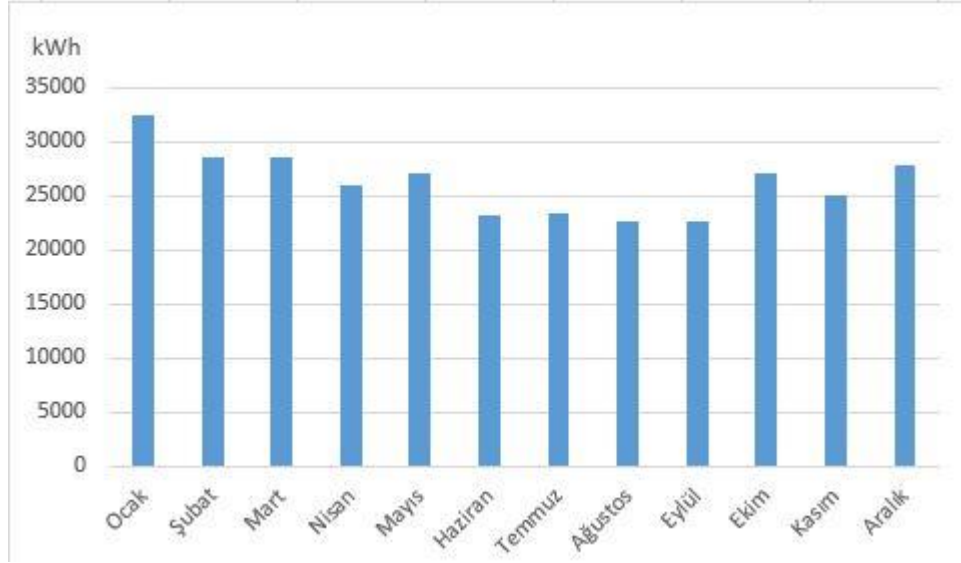
- İnci Akü Yeni Teknolojiler Araştırma Laboratuvarı
- Kriyojenik Teknolojiler Laboratuvarı
- Malzeme Üretim ve Hazırlama Laboratuvarı
- Nötron Aktivasyon Analizi Laboratuvarı
- Radyasyon Uygulamaları Laboratuvarı (2 adet)
- Radyografi Laboratuvarı
- Toprak Kaynaklı Isı Pompaları Test ve Araştırma Laboratuvarı
- Yeni Enerji Teknolojileri Laboratuvarı
- Yenilenebilir Enerji Veri Analizi ve İşaret İşleme Laboratuvarı [109].

Enerji Enstitüsü için İdari ve Mali İşler Daire Başkanlığı'na bağlı Mali İşler Şube Müdürlüğü'nden alınan veriler doğrultusunda 2014-2016 yılları arasındaki elektrik tüketim değerleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : Enerji Enstitüsü elektrik tüketim verileri.

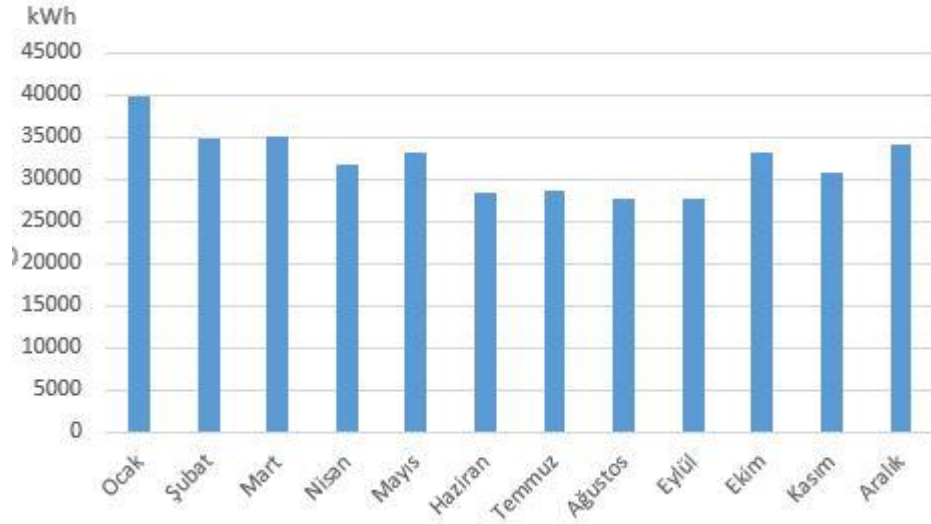
Yıl	Tüketim (kWh)
2014	315.029
2015	384.977
2016	421.637

Enerji Enstitüsü'nün 2014 yılı içerisindeki elektrik tüketimi 315.029 kWh'tir. Yıllık elektrik tüketiminin aylara göre dağılımı verileri elde edilemediği için aylık dağılım olarak PV*SOL yazılımın aylık yük dağılımı kullanılmıştır. PV*SOL yazılımı seçilen profil türüne göre yıllık toplam elektrik tüketim miktarını aylara göre dağıtmaktadır. Bu profil türleri; ev tipi, gece kulübü gibi gece aktif olan binalar, ısı pompası veya ısıtma sistemleri barındıran hane veya ticari binalar, hafta içi mesai saatlerinde aktif olan ofis türü şeklinde sayılabilir. Elektrik tüketim verilerinin girildiği Consumption penceresinde yıllık değer programa girilerek, yük dağılımı olarak ticari yük profili seçilmiştir. Bu profil, yükü hafta içi günlerde 8:00-18:00 saatleri arası olarak dağıtmaktadır. Şekil 4.1'de 2014 yılı için yıllık elektrik tüketiminin PV*SOL yazılımı üzerinden yapılmış aylara göre dağılımı gösterilmektedir. Yazılımın oluşturduğu aylık dağılıma göre en yüksek tüketim değeri Ocak ayında görülmekte olup bu değer 32.568,2 kWh'tir. En düşük tüketim değeri ise Eylül ayında görülmekte olup bu değer 22.683,9 kWh'tir.



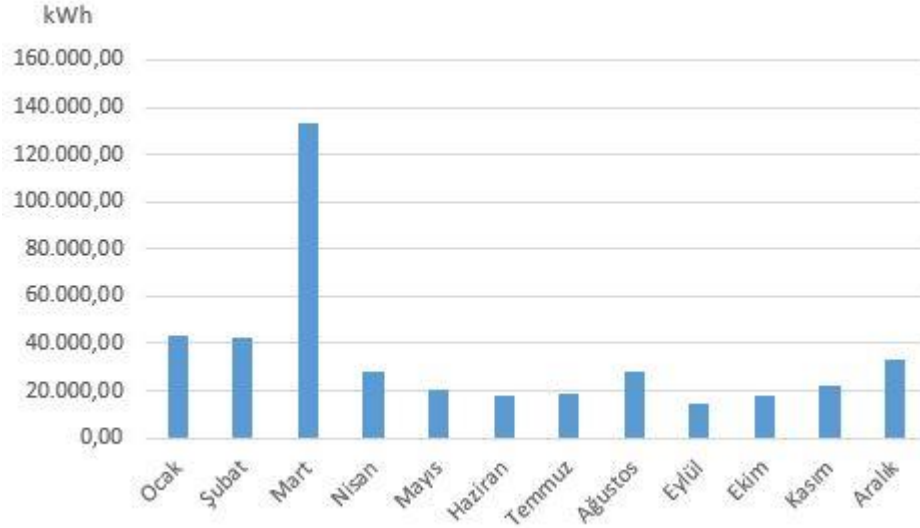
Şekil 4.1 : 2014 yılı elektrik tüketiminin aylara göre dağılımı (yazılım üzerinden).

Benzer şekilde 2015 yılı için de yıllık toplam elektrik tüketim değeri bilinmekte olup, aylara göre dağılımı elde edilememiştir. 2015 yılı için toplam elektrik tüketim değeri 384.977 kWh olup, PV*SOL yazılımı ile yapılmış aylara göre dağılım Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



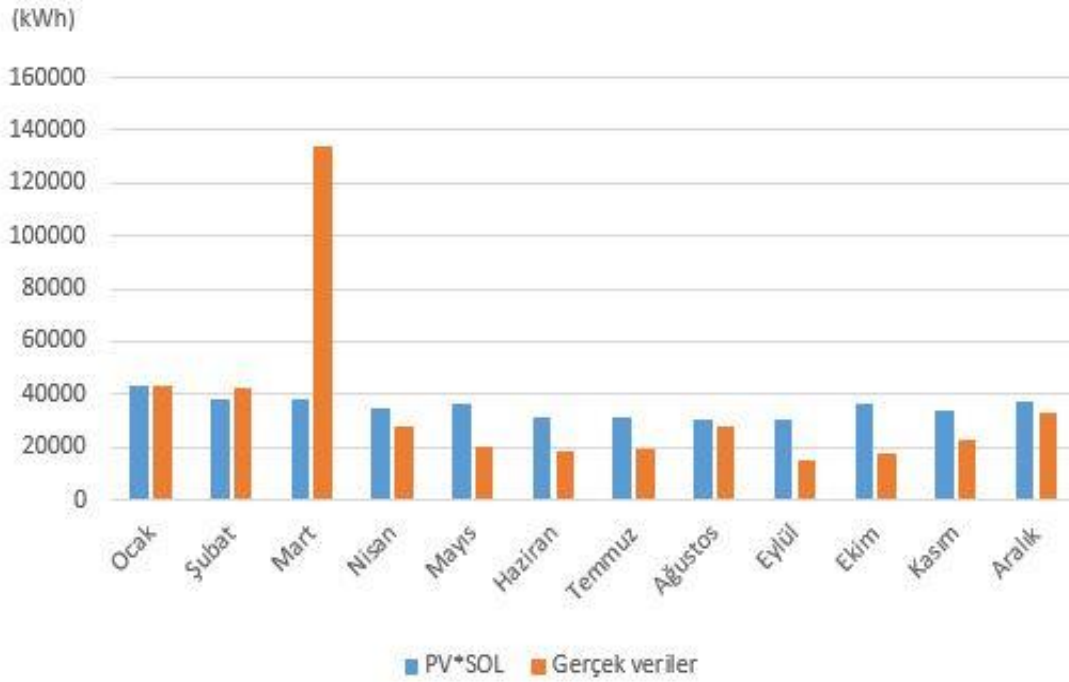
Şekil 4.2 : 2015 yılı elektrik tüketiminin aylara göre dağılımı (yazılım üzerinden).

Enerji Enstitüsü’nün 2016 yılı içerisindeki elektrik tüketimi 421.637 kWh olup, bu tüketimin aylara göre dağılımı bilinmektedir ve Şekil 4.3’te gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde Mart ayında 133.525 kWh ile en yüksek tüketimin, Eylül ayında ise 14.724 kWh ile en az tüketimin olduğu görülmektedir. 2016 yılı için aylık ortalama elektrik tüketim değeri 35.136 kWh’tir.



Şekil 4.3 : 2016 yılı elektrik tüketiminin aylara göre dağılımı (gerçek veriler).

2016 yılı elektrik tüketimi verileri PV*SOL yazılımı üzerinden de aylık dağılım ile işlenmiştir. Şekil 4.4'te yazılımın hazırladığı ve gerçek aylık dağılım verileri karşılaştırılmaktadır. Yazılımın hazırladığı aylık dağılımın Mart ayı haricinde gerçeğine uygun olduğu görülmektedir. 2016 yılı Mart ayında özel bir durum olduğu ve bu sebeple elektrik tüketim verisinin diğer aylara göre çok yüksek bir tepe değere ulaştığı düşünülmektedir.



Şekil 4.4 : 2016 yılı için yazılımın hazırladığı ve gerçek veriler ile aylık elektrik tüketiminin dağılımı.

4.2 Binaların Çatı, Dış Duvar ve Kampüste Uygun Arazi Alanları

Enerji Enstitüsü binası temel olarak dört adet koridordan oluşmaktadır. Bu koridorlar orta avlu oluşturacak şekilde dikdörtgen bir yapı oluşturmaktadır. Orta avlu ağaçlık bir alandır. Yapıya ek olarak batı tarafından eklenmiş bir reaktör binası bulunmaktadır. Ufak bir hol ile bina içinden reaktör binasına geçilebilmektedir. Şekil 4.5'te Enerji Enstitüsü'nün uydu görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 4.5 : Enerji Enstitüsü uydu görüntüsü [110].

Enerji Enstitüsü binası giriş katı, bodrum ve üst kat olmak üzere üç katlıdır. Üst kat sadece batı kenarına denk gelen yapıda vardır ve bu katta öğretim görevlileri odaları ve yönetim bulunur. Bodrum katında ise laboratuvarlar bulunmaktadır. En geniş alan olan giriş katında ise derslikler, akademik ve idari personel odaları ile laboratuvarlar bulunmaktadır.

Enerji Enstitüsü'nün, Şekil 4.6'da da görüldüğü gibi, FV sistem kurulumuna uygun açık alan arazisi bulunmamaktadır [111]. Cephe uygulaması için de yapının uygun cephesi bulunmamaktadır veya düşünülebilecek tasarımların işçilik maliyeti olarak çok yüksek olacağı ön görülmektedir. Enstitü binalarının çatıları ise düz çatı tipi olup, boş bulunması sebebiyle FV sistem kurulumu için çok uygundur. Toplam çatı alanın yaklaşık 2450 m² olduğu söylenebilir. Asansör makine odası gibi yapıların ve ağaç gölgelendirmesi ve montajı zorlayacak farklı geometriye sahip alanlar çıkarıldığında

bu deęer yaklaşık 2000 m² olmaktadır. atı kenarlarında bulunan parapetler de dūşūldūęu zaman sistemin uygulanabileceęi alan brüt 1850 m² olarak alınmıřtır.



şekil 4.6 : İTÜ Enerji Enstitüsü arazisi.

4.3 Enerji Tüketimi / FV Üretime Uygun Alan Açısından Yer Seçimi

Tüketim ve üretim dengesini sağlamak adına sistem boyutunu tahmin etmek için bazı hesaplamalar yapılması gerekmektedir. Bu hesaplamalar için önemli olan seçilen güneş modülü ve karakteristik değerleri ile sistemin uygulanacağını alanın büyüklüğüdür. Güneş modülü olarak yerli bir üretici olan Solar Türk Enerji firmasının P 250 modeli seçilmiştir. Bu modülün karakteristik özellikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir [112].

Çizelge 4.2 : Solar Türk Enerji P-250 modülünün özellikleri.

Modül	Solar Türk Enerji P-250
Maksimum güç	250 W
Boyutlar (Boy x En)	1,647 x 0,992 (m)
Açık devre gerilimi	37,41 V
Maksimum güç noktası gerilimi	29,98 V
Kısa devre akımı	8,79 A
Modül verimi (STC)	%15,3
Gerilim düşümüne ait sıcaklık katsayısı	%(-0,32) / °C

Seçilen modülün özellikleri göz önünde bulundurulduğunda, modülün m² başına 6,54 kWp elektrik gücü üretebileceği hesaplanmıştır. Karşılanması istenecek elektrik tkretim değerleri için gerekli olan modül sayısının tahmini hesabı öncelikle güneş modülünün çalışma sıcaklığını tespit etmek ile başlar. Modül alışma sıcaklığı $T_{MS}$ denklem 4.1 ile hesaplanır [54].

$$T_{MS} = T_d + (NA - 20) \quad (4.1)$$

Burada; T_d ortam sıcaklığı, $NA$ ise normal şartlar altındaki modül çalışma sıcaklığıdır. Güneş pillerinin verimleri, çalışma sıcaklığının artması ile beraber azalmaktadır. Panelin g çıkışındaki bu indirgeme yüzdesi RP_T , denklem 4.2'deki hesaplanmaktadır. Modül retici firmaları tarafından üç adet sıcaklık katsayısı bilgisi verilir. Bu sıcaklık katsayıları birim sıcaklık artışına karşılık gelen güç, gerilim ve akım düşüşlerini ifade etmektedir. γ ile gösterilen terim g düşüşüne ait sıcaklık katsayısı olup birimi %/°C'dir ve birim sıcaklık artışı başına panel gücünün yüzde kaç düşüşünü gösterir [54].

$$RP_T = (T_{MS} - T_{STC}) \gamma \quad (4.2)$$

T_{STC} değeri standart test koşullarındaki modül çalışma sıcaklığıdır ve 25°C'dir.

Güneş modülünün standart test koşullarındaki maksimum güç çıkışı olan P_{max} değeri, g çıkışı indirgeme yüzdesi RP_T ile denklem 4.3 ile P_T 'ye dönüştürülür. P_T ifadesi modülün sıcaklık düzeltmesi yapılmış g çıkışı değeridir ve birimi Watt'tır [54].

$$P_T = P_{max}(1 - RP_T) \quad (4.3)$$

Referans hasat değeri Y_r , Bölüm 3.7'de anlatıldığı şekilde denklem 3.3 ile hesaplanır.

FV modülden elde edilebilecek enerji miktarı denklem 4.4 ile hesaplanır.

$$E_{FV} = P_T \cdot Y_r(1 - KO) \quad (4.4)$$

Burada E_{FV} FV modülden elde edilebilecek enerji miktarı iken, KO kirlilik oranı olup yüzde olarak hesaba katılmaktadır [54].

Üretilen elektrik enerjisi direkt olarak FV modülden alınmamaktadır. Enerji ıkışı evirici üzerinden olacağı için FV modülden elde edilen enerji miktarı evirici verimi ile

çarpılır. Evirici verim değerinin η_{inv} ile ifade edildiği denklem 4.5 ile evirici enerji çıkışı E_{inv} hesaplanmaktadır [54].

$$E_{inv} = E_{FV} \cdot \eta_{inv} \quad (4.5)$$

FV sistemden elde edilebilecek enerji miktarı E_{inv} değeri ile N_m modül sayısının çarpımı ile elde edilir. Başka bir bakış açısı ile elektrik tüketim değeri üzerinden gerekli modül sayısı belirlenecekse elektrik tüketim değerinin E_{inv} değerine bölünmesi ile N_m gerekli modül sayısı elde edilmiş olur. $E_{tüketim}$ günlük tüketilen elektrik enerjisi ve $E_{üretim}$ günlük üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı olmak üzere ilgili terimlerin ilişkileri denklem 4.6 ve denklem 4.7’de gösterilmiştir [54].

$$E_{üretim} = N_m \cdot E_{inv} \quad (4.6)$$

$$N_m = \frac{E_{tüketim}}{E_{inv}} \quad (4.7)$$

Ön hesaplamalar ile elde edilen değerler Çizelge 4.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : Ön hesaplamalar ile elde edilen değerler.

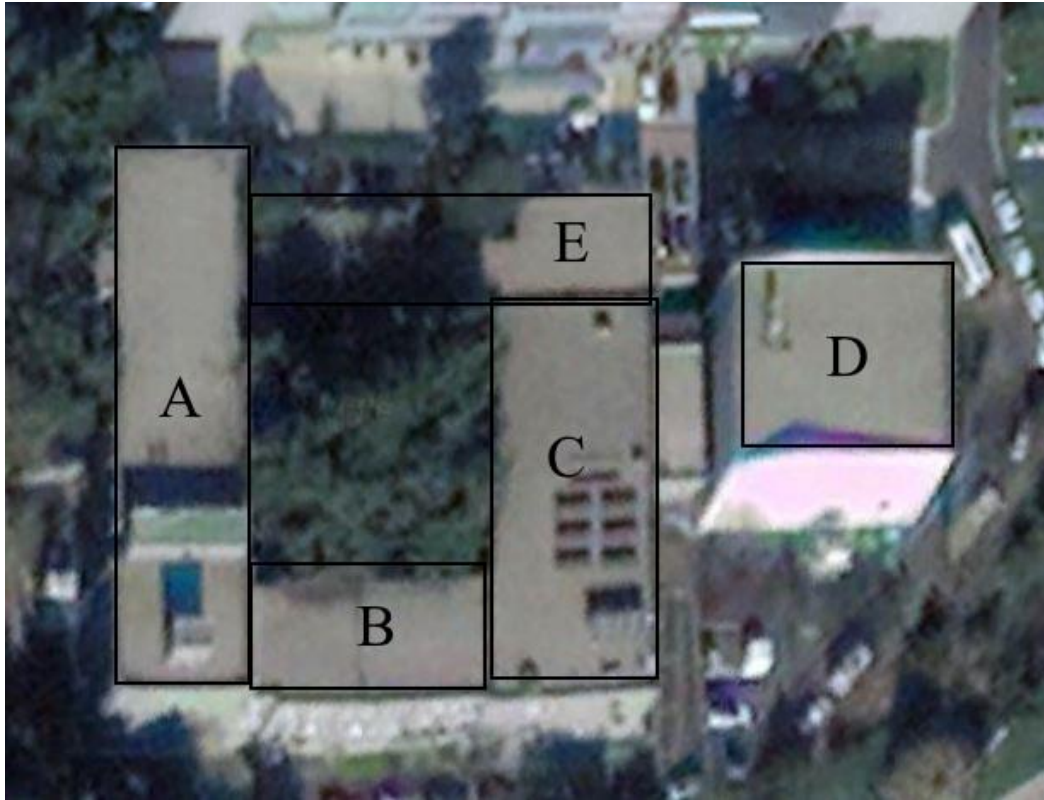
Tanım	Terim	Değer
Ortam sıcaklığı	T_d	15 °C
Normal şartlar altında modül çalışma sıcaklığı	$NŞA$	45 °C
Modül çalışma sıcaklığı	$T_{MÇS}$	40 °C
Standart test koşullarında modül çalışma sıcaklığı	T_{STC}	25 °C
Güç düşüşüne ait sıcaklık katsayısı	γ	0,43 °C ⁻¹
Güç çıkışı indirgeme yüzdesi	RP_T	%6,45
Maksimum güç çıkışı	P_{max}	0,25 kW
Modülün sıcaklık düzeltilmesi yapılmış güç çıkışı	P_T	0,23 kW
İstanbul için ortalama global radyasyon değeri	H	4,42 kWh/m ²
Referans güneş radyasyon değeri	G	1 kW/m ²
Referans hasat değeri	Y_r	4,42 kWh/kW
Modülden elde edilebilecek enerji miktarı	E_{FV}	1,03 kWh
Kirlilik oranı*	KO	%0
Evirici verimi	η_{inv}	0,98
Evirici enerji çıkışı	E_{inv}	0,96 kWh
Enstitü günlük ortalama elektrik tüketimi	$E_{tüketim}$	1000 kWh
Gerekli modül sayısı	N_m	1040

* Kirlilik oranı %0 olarak kabul edilmiştir.

Ön hesaplamalara göre Enerji Enstitüsü'nün tüm yıllık elektrik tüketimi FV sistem ile karşılanmak istenirse, gerekli modül sayısı 1040 adet olarak belirlenmiştir.

4.3.1 Çatı alanları

Enerji Enstitüsü için kurulacak olan şebekeden bağımsız FV güneş enerjisi sisteminin daha önce de belirtildiği gibi uygun açık alan arazisi olmaması sebebiyle sadece çatı sistemi olarak hesaplamaları yapılmıştır. Şekil 4.7'de görüldüğü gibi çatı alanı 5 parçaya bölünmüş olarak değerlendirilmiştir. Bu bölümlere A, B, C, D ve E harfleri ile tanımlama yapılmıştır. E alanının bir kısmı orta ağaçlık alandan kaynaklanan fazla gölgelenmeye maruz kalmaktadır. Bu sebeple E alanının sadece bir kısmı için panel kurulumu tasarlanmıştır. Benzer şekilde A alanı için de asansör makine odası (enstitüde bir asansör yoktur fakat bina mimarisinde asansör düşünüldüğü için bir asansör makine odası yapısı vardır) olması sebebiyle bu kısımların olduğu alana panel kurulmayacak olup, sadece bu kısmın kuzeyinde kalan alan sistem için hesaplanmıştır.



Şekil 4.7 : Enerji Enstitüsü çatı alanları.

5 ayrı parça olarak düşünülen çatıların FV sistem için düşünülen, 0,5 m parapetlerin de düşüldüğü kullanılabilir alanları ve boyutları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Kuzey-güney eksenini boy, doğu-batı eksenini ise en olarak tanımlanmıştır.

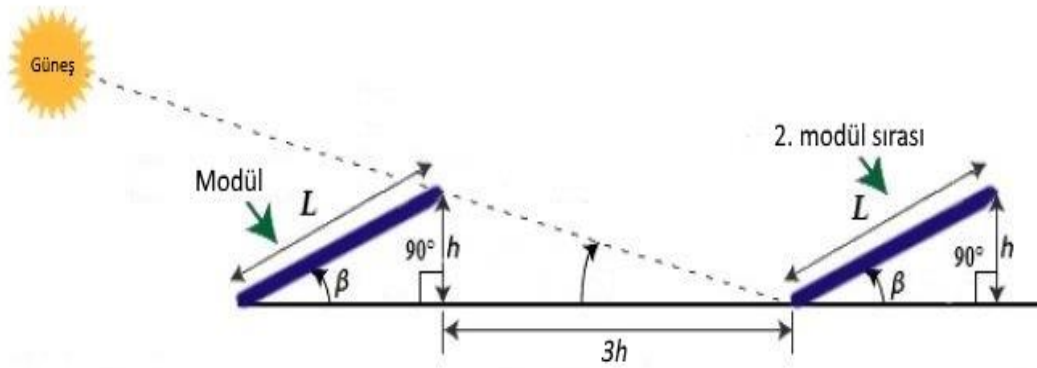
Çizelge 4.4 : Enstitü çatısının alan ve boyutları.

Bölüm	Kullanılabilir alan (m ²)	Boy / En (m)
A*	425	36,5 / 13
B	263	12 / 25
C	789	40,5 / 17
D	427	20 / 23,5
E*	113	9,75 / 14

* A ve E bölümlerinin sadece panel kurulumu gerçekleştirilecek alanları yazılmıştır.

4.3.2 Modüllerin çatı yerleşimi

Bölüm 3'te de bahsedildiği gibi modüllerin yerleşimi güney cephesi doğrultusunda ve enlem açısına eşit eğim açısında yerleştirilmelidir. İstanbul için eğim açısı değeri 41 °'dir. Modül sıraları yerleştirilirken eğim açısı sebebiyle her sıra bir yükseklik değerine sahip olmaktadır. Bu yüksekliğe göre bir modül sırası kendi arkasındaki sıra için gölgelenmeye sebep olur. Gölgelemeyi engellemek adına modül yerleşimi Şekil 4.8'deki gibi yapılmalıdır [54].



Şekil 4.8 : Modül yerleşim mesafeleri.

Şekil 4.8'de gösterildiği gibi β eğim açısı ile yerleştirilen modüller için, iki modül sırası arasında kalan mesafe modül yüksekliği h değerinin 3 katı olmalıdır [54]. Seçilen modülün boyunun 1,647 m, eninin ise 0,992 m olduğu göz önünde bulundurularak yatay pozisyonda yerleşim için bir modülün, gerekli modüller arası mesafenin de katılmasıyla, kapladığı alan 4,44 m² olarak hesaplanmıştır. 41 ° eğim açısı dikkate alınarak panellerin devrilme riskini azaltmak adına yatay pozisyonda yerleşim uygun görülmüştür. Yatay pozisyonda yerleşime göre bir modül sırası için gerekli boy mesafesi 2,7 m'dir. Bir sıra içerisinde modüller bitişik olarak montajlanacağı için bir modülün kapladığı en mesafesi ise bir modülün eni kadar yani 0,992 m'dir.

Çatı alanı tek bir parça değil, beş adet farklı alandan oluşmaktadır. Çizelge 4.4'teki kenar boyutları göz önünde bulundurulduğunda tüm çatı alanına toplamda 385 adet modül yerleştirilebilmektedir. Her bir çatı alanına en fazla kaç modül yerleştirilebileceği Çizelge 4.5'te gösterilmiştir. Boy/modül bir çatı alanının boy kenarına sığabilecek maksimum sıra sayısını ifade etmektedir. En/modül ise bir çatı alanının en kenarına sığabilecek maksimum modül sayısı yani bir sırada olabilecek maksimum modül sayısını ifade etmektedir.

Çizelge 4.5 : Çatı alanlarına yerleştirilebilecek maksimum modül sayıları.

Bölüm	Boy/modül	En/modül	Toplam
A	13	7	91
B	4	14	56
C	14	9	126
D	7	13	91
E	3	7	21

4.3.3 Üretilen elektrik enerjisi tahmini

Enerji Enstitüsü'nün elektrik tüketiminin tümünü karşılayacak FV sistem için gerekli modül sayısı 1040 olarak hesaplanmıştı. Enstitünün çatı alanlarına yerleştirilebilecek maksimum modül sayısı ise 385'tir. Ön hesaplamalara göre çatıya kurulabilecek sistemin yıllık tüketimin yarısından azını karşılayabileceği görülmektedir. Şebekeden bağımsız akülü tasarlanacak sistem için, akü grubunun aşırı yüklenmemesi adına, elektrik tüketiminin tamamını karşılaması istenmemektedir. Bu sebeple karşılanacak elektrik enerjisi tahmini uygundur. Denklem 4.6 ile yapılan hesaba göre sistemin tahmini maksimum üretebileceği elektrik enerjisi miktarı 134.449 kWh'tir.

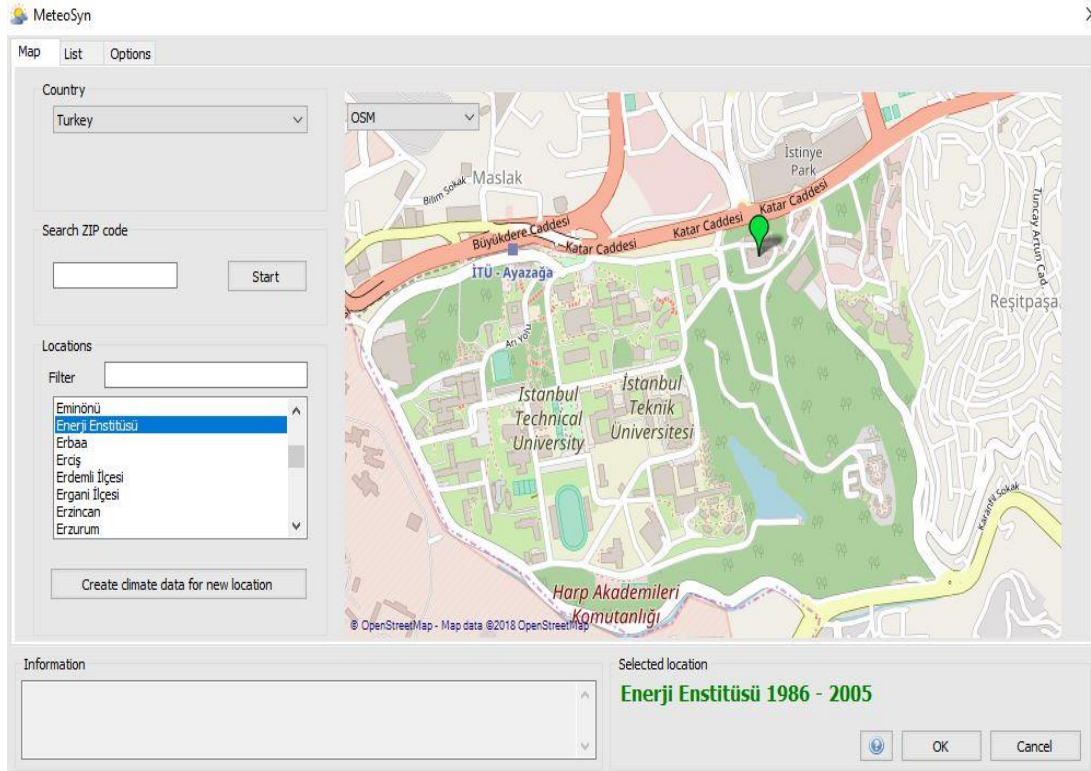
4.4 İTÜ Enerji Enstitüsü Modeli

Enerji Enstitüsü için yapılan FV sistem tasarımında şebekeden bağımsız bir sistem tasarımı yapılmıştır. PV*SOL yazılımında 'System Type, Climate and Grid' sayfası altında sistem tipi ve iklim verileri seçimleri yapılmaktadır.

4.4.1 İklim verileri

Sistem tipi seçimi sonrası yapılacak işlem enstitünün iklim verilerinin PV*SOL yazılımına işlenmesidir. Yazılımda konum olarak harita üzerinden yeni yer tanımlama

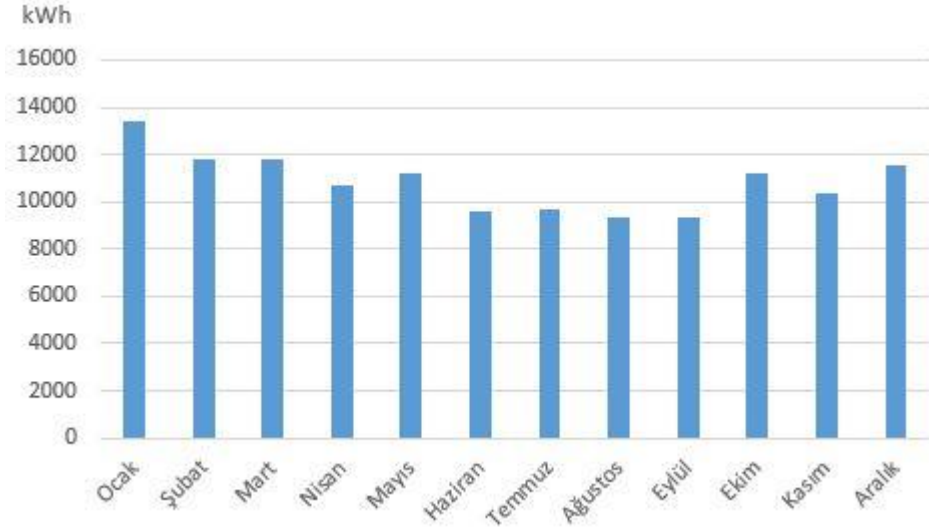
ile Enerji Enstitüsü'nün konumu girilmiştir (Şekil 4.9). MeteoSyn veri tabanı üzerinde, seçilen konuma yakın ölçüm merkezlerinde 1986-2005 yılları arasındaki veriler bulunmaktadır ve bu veriler ile interpolasyon yapılarak enstitü verileri oluşturulmaktadır. Enstitünün coğrafi konumu 41,11° N enlemi ve 29,03° E boylamıdır. Yıllık ortalama güneş radyasyonu 1462 kWh/m², sıcaklık ise 15,3 °C'dir. Yıllık ortalama albedo %20, kirlilik kaybı oranı ise %0 olarak girilmiştir.



Şekil 4.9 : Enerji Enstitüsü konumunun MeteoSyn üzerinde seçimi.

4.4.2 Elektrik tüketim verileri

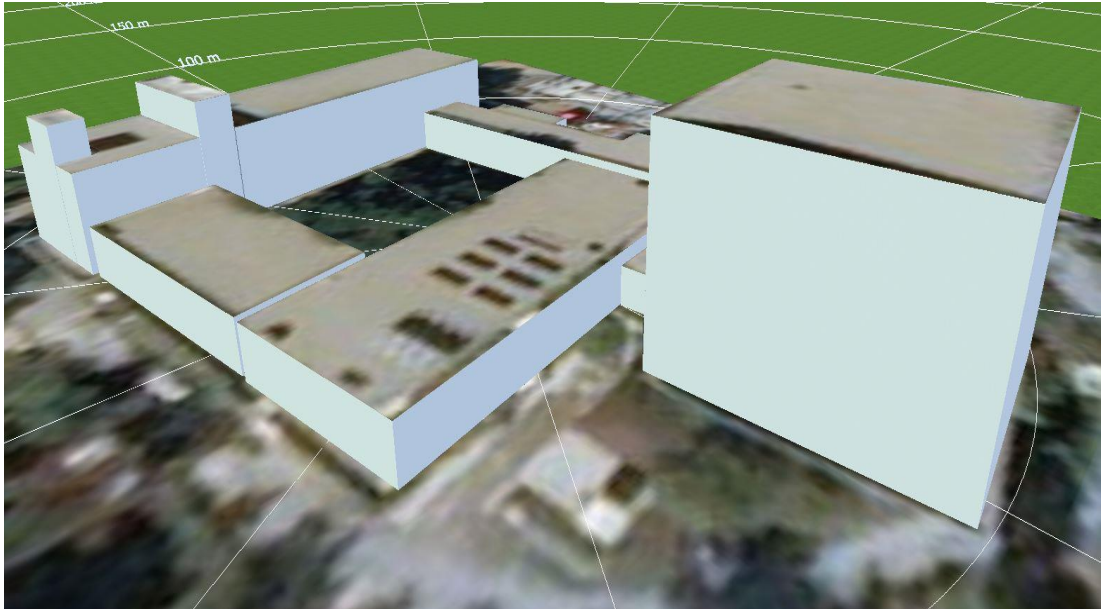
Yazılım sırasında sonraki sayfa *Consumption* yani elektrik tüketim değerlerinin girildiği bölümdür. Ön hesaplamalar sonucu elde edilen üretilebilecek maksimum elektrik enerjisi değeri göz önünde bulundurularak yıllık elektrik tüketim değeri 130.000 kWh olarak alınmıştır. Şekil 4.10'da PV*SOL yazılımının, hafta içi mesai saatleri içerisinde elektrik tüketiminin söz konusu olduğu ofis tipi bir birime göre, yıllık elektrik tüketimini aylara göre dağıtımını gösterilmektedir. Yazılımın oluşturduğu aylık tüketim dağılımı gerçek 2016 aylık elektrik tüketimi verileri ile karşılaştırıldığında yazılım verilerinin gerçek değerlerin altında olduğu görülmektedir. Bu durum şebekeden bağımsız bir sistemde aylık olarak da akülerin aşırı yüklenmemesi açısından uygundur.



Şekil 4.10 : Yazılım üzerinden yapılan aylık elektrik tüketimi dağılımı.

4.4.3 Üç boyutlu tasarım

3 boyutlu tasarım için Enerji Enstitüsü'nün uydu fotoğrafı üzerinden binanın 3 boyutlu kaba bir tasarımı çizilmiştir. Şekil 4.11'de bu çizim gösterilmektedir. PV*SOL yazılımı, uydu fotoğraf görüntüsü üzerinde çizilen çokgenlerin uzatılması ile 3 boyutlu yapıların çizilebilmesini sağlamaktadır.



Şekil 4.11 : Enerji Enstitüsü'nün üç boyutlu çizimi.

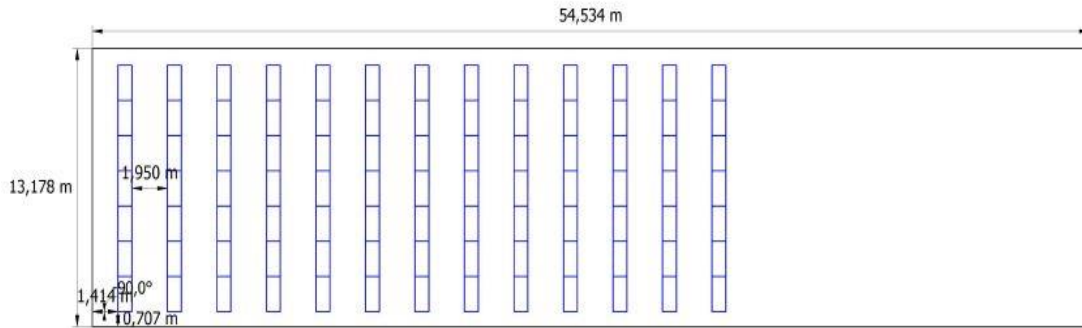
Sistem için modül olarak yerli üretim olan Solar Türk Enerji'nin Anatolia serisinden polikristal teknoloji P-250 modeli seçilmiştir. Bu modülün özelliklerinden daha önce

bahsedilmiştir. Modüllerin çatı yerleşimi için olan eğimleri İstanbul'un enlem değeri göz önünde bulundurularak 41° olarak seçilmiştir. Modüllerin çatı alanlarındaki yerleşimleri Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Modüller yatay olarak yerleştirilerek sıraları oluşturmaktadır ve sıra halinde çatı alanları doldurulmuştur. Binanın güney cephesine göre paralel olarak yerleştirilmiş, yani doğu-batı eksenine göre 9° 'lik bir fark ile güney yönüne doğru konumlandırılmışlardır. İki modül sırası arası mesafe 1,95 m olarak hesaplanmıştır.



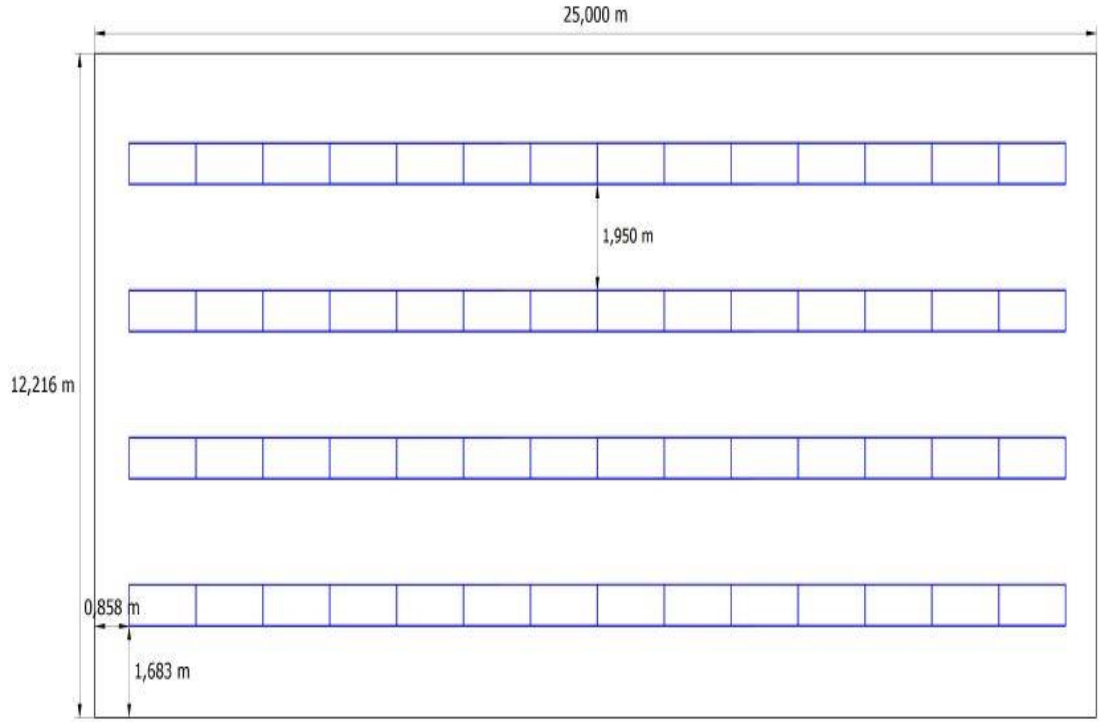
Şekil 4.12 : Modüllerin yerleşimi.

A çatısı alanına kurulacak FV sistemin yerleşim planı krokisi Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



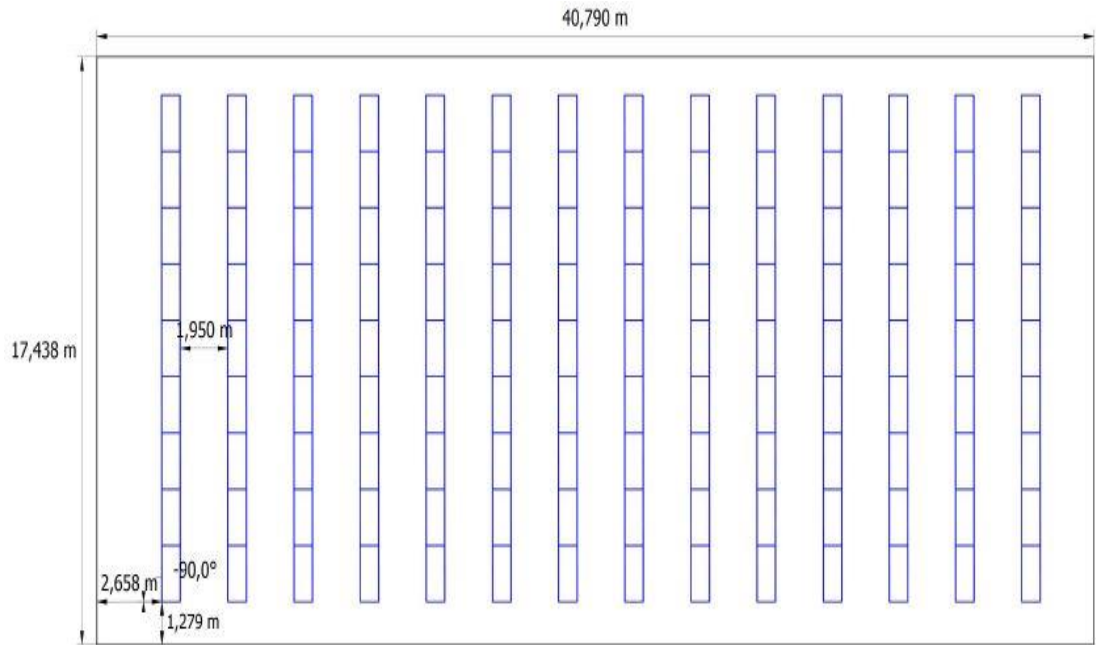
Şekil 4.13 : A çatısı yerleşim krokisi.

B çatısı alanına kurulacak FV sistemin yerleşim planı krokisi Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



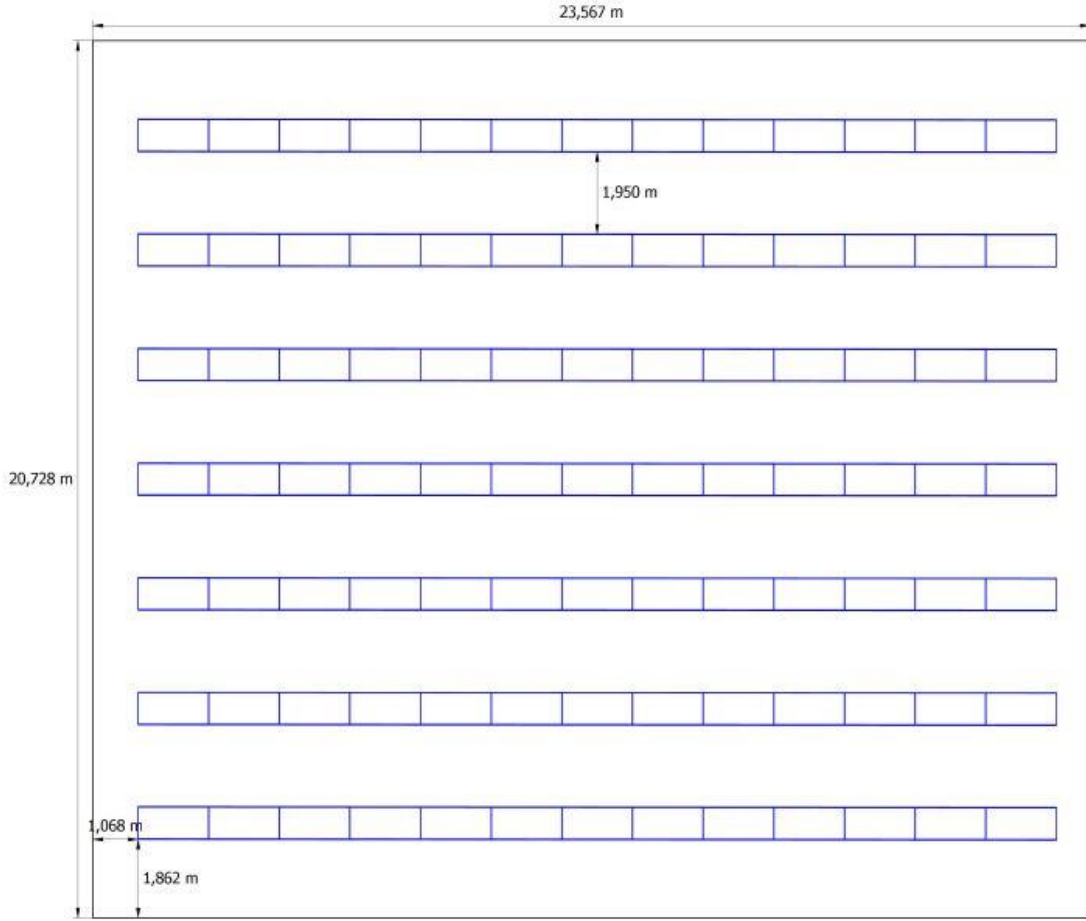
Şekil 4.14 : B çatısı yerleşim krokisi.

C çatısı alanına kurulacak FV sistemin yerleşim planı krokisi Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



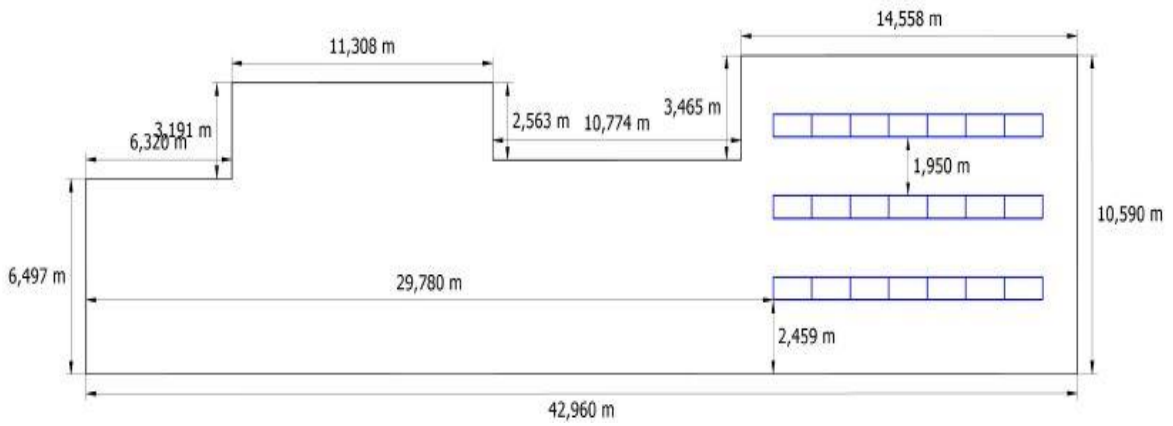
Şekil 4.15 : C çatısı yerleşim krokisi.

D çatısı alanına kurulacak FV sistemin yerleşim planı krokisi Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16 : D çatısı yerleşim krokisi.

E çatısı alanına kurulacak FV sistemin yerleşim planı krokisi Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



Şekil 4.17 : E çatısı yerleşim krokisi.

Beş adet çatı alanları için modül sıra sayısı, her bir sıradaki modül sayısı, toplam modül sayısı ve kurulu güç değerleri Çizelge 4.6’de gösterilmiştir. Çatıya kurulu sistemin toplam kurulu gücü 96,25 kW’tır.

Çizelge 4.6 : Çatı alanlarındaki modül sayıları.

Bölüm	Sıra sayısı	Bir sıradaki modül sayısı	Modül sayısı	Kurulu güç (kW _p)
A	13	7	91	22,75
B	4	14	56	14
C	14	9	126	31,5
D	7	13	91	22,75
E	3	7	21	5,25

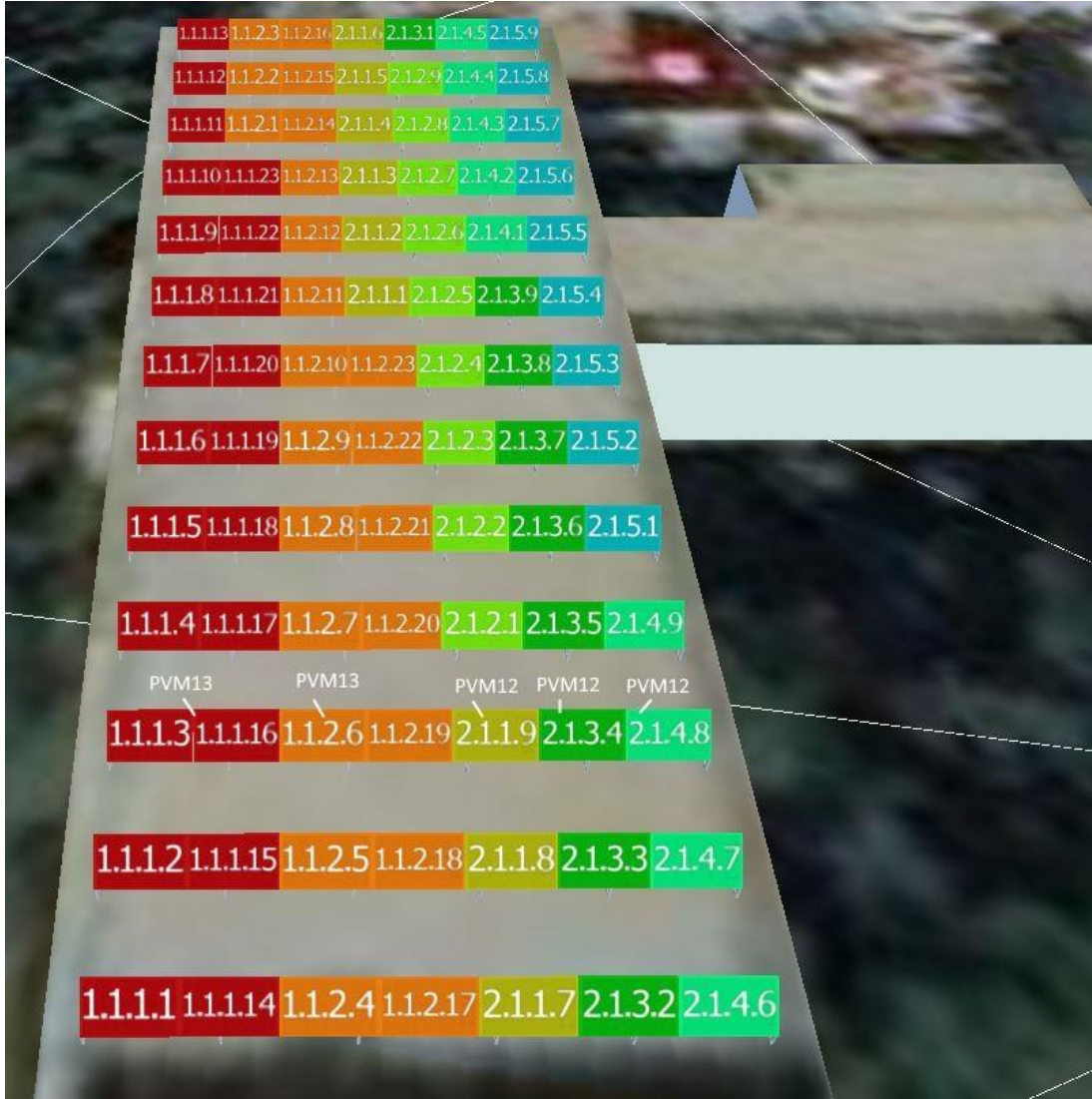
PV*SOL yazılımı; modülün seçilmesi ve modüllerin ilgili alana yerleştirilmesinden sonra tasarlanan sistem için uygun evirici konfigürasyonunu yapabilmektedir. Yazılım tasarlanan FV modülleri için Siemens'in SINVERT PVM serisine ait evirici modellerini seçmiştir. Siemens'in SINVERT PVM serisi Şekil 4.18'de gösterilmiştir [113].



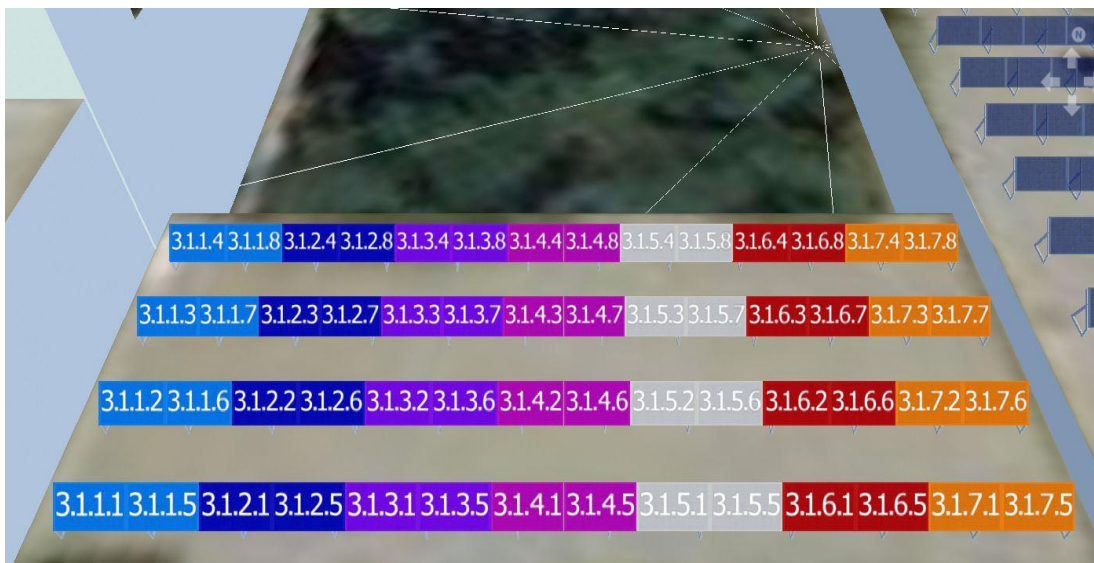
Şekil 4.18 : Siemens SINVERT PVM serisi evirici.

A çatısı üzerine kurulacak 91 modüllü FV sistem için SINVERT PVM13 ve PVM12 olmak üzere iki adet evirici seçilmiştir. Şekil 4.19'da A çatısı için evirici konfigürasyonu gösterilmektedir. PVM13 eviricisine 23'er adet 2 seri, PVM12 eviricisine ise 9'ar adet 5 seri modül bağlanmıştır.

B çatısı üzerinde kurulacak 56 modülden oluşan fotovoltaiik sistem için SINVERT PVM16 model evirici seçilmiştir. Şekil 4.20'de B çatısı için evirici konfigürasyonu gösterilmektedir. PVM16 eviricisine 8'er adet 7 seri modül bağlanmıştır.



Şekil 4.19 : A çatısı için evirici konfigürasyonu.

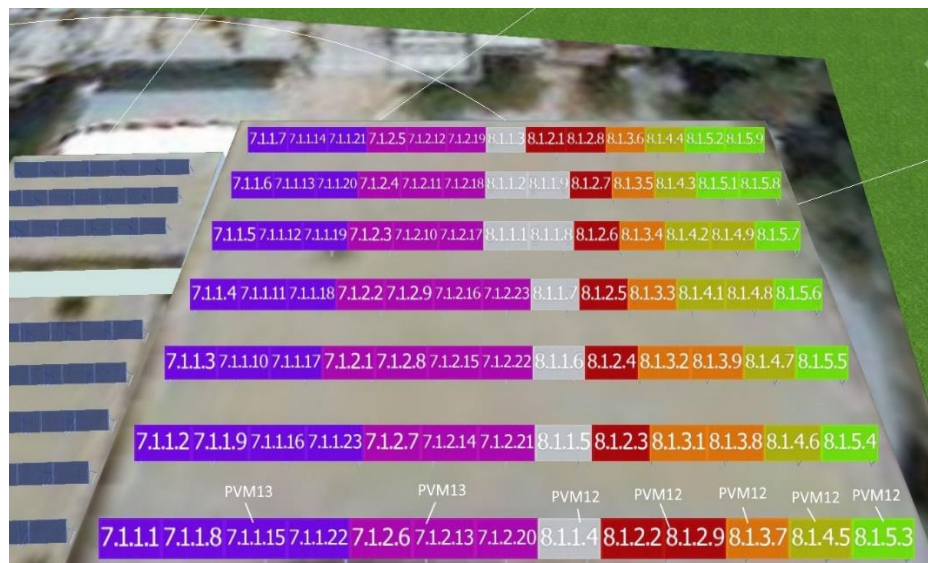


Şekil 4.20 : B çatısı için evirici konfigürasyonu.

5. serileri => 1. PVM17
6. serileri => 2. PVM17

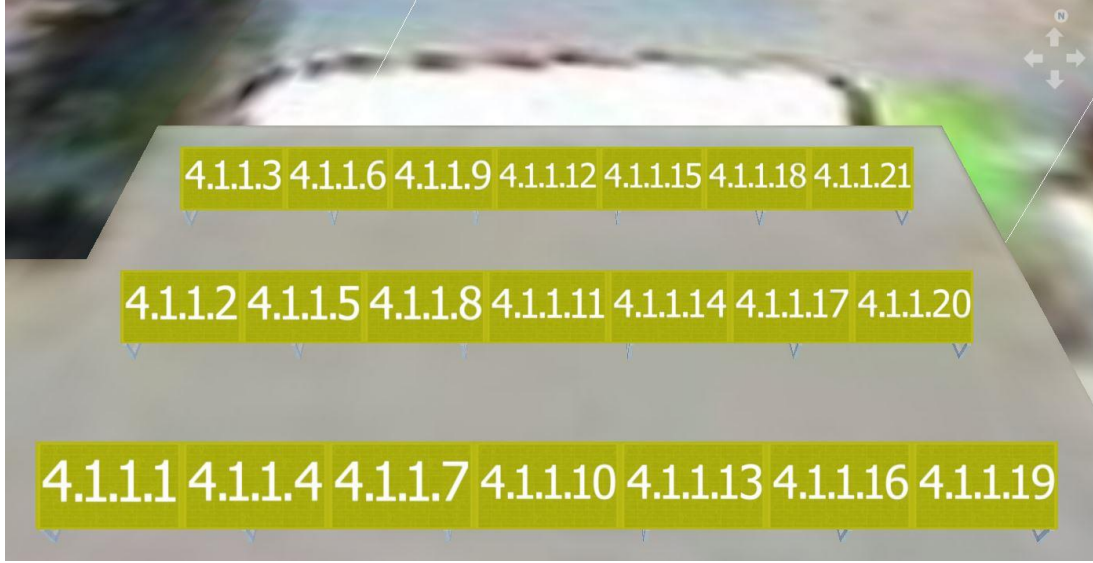
51303 5127 51221 51334 6117 61121 61214 6137 61321
51111 5126 51220 51333 6116 61320 61213 6136 61320
51112 5125 51219 61332 6115 61119 61212 6135 61319
51111 5124 51218 51331 6114 61118 61211 6134 61318
51110 5123 51217 51330 6113 61117 61210 6133 61317
51119 5122 51216 5139 6112 61116 6129 6132 61316
5118 5121 51215 5138 6111 61115 6128 6131 61315
5117 51121 51214 5137 51321 61114 6127 61221 61314
5116 51120 51213 5136 51320 61113 6126 61220 61313
5115 51119 51212 5135 51319 61112 6125 61219 61312
5114 51118 51211 5134 51318 61111 6124 61218 61311
5113 51117 51210 5133 51317 61110 6123 61217 61310
5112 51116 5129 5132 51316 6119 6122 61216 6139
5111 51115 5128 5131 51315 6118 6121 61215 6138

D çatısı üzerinde kurulacak FV sistem için A çatısının konfigürasyonu seçilmiştir. Şekil 4.22’de D çatısı için evirici konfigürasyonu gösterilmektedir.



89

E çatısı üzerinde kurulacak olan 21 modülden oluşan FV sistem için SINVERT PVM10 model evirici seçilmiştir. Şekil 4.23'te E çatısı için evirici konfigürasyonu gösterilmektedir. FV sistemindeki 21 modülün hepsi PVM10 eviricisine bağlanmıştır.



Şekil 4.23 : E çatısı için evirici konfigürasyonu.

4.4.4 Akü grubu seçimi

PV*SOL yazılımı içerisinde seçilen sistem tipi şebekeden bağımsız tip olduğu için, “akü eviricileri ve akü” penceresi oluşmuştur. Bu bölümde yazılım sistem için uygun olan akü ve akü eviricilerini listelemektedir. Yazılımın veri tabanı içerisinde akü eviricisi olarak SMA Solar Technology firmasının Sunny Island 8.0H eviricisi seçilmiştir. Şekil 4.24'te Sunny Island 8.0H eviricisi gösterilmektedir [114].



Şekil 4.24 : SMA Technology – Sunny Island 8.0H model evirici.

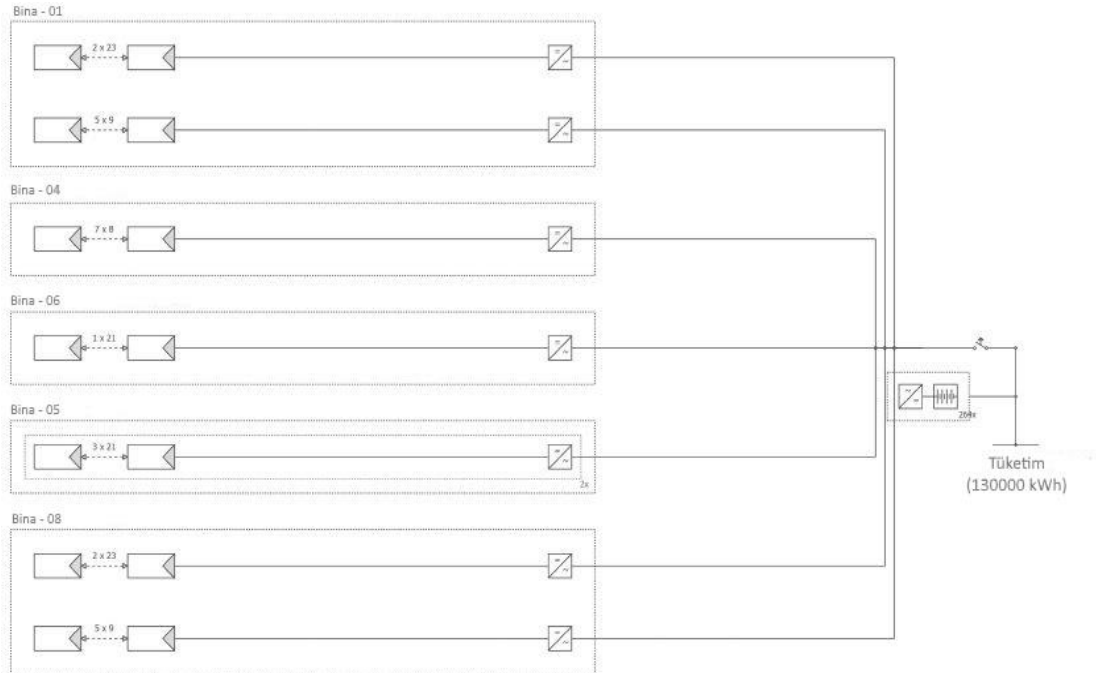
Akü grubu için PV*SOL yazılımının veri tabanından Sonnenschein firmasının A600 SOLAR jel tipi akü serisinden A602/1415 SOLAR modeli seçilmiştir. Şekil 4.25'te bu akü modeli gösterilmektedir [115].



Şekil 4.25 : Sonnenschein – A602/1415 SOLAR model akü.

İyi tasarlanmış bir kablo sistemi ile FV sistemin güç çıkışı kaybı %2'nin altında kalır. Bu oran zaman ile artan bir değer değildir. Tasarlanan FV sistem için kablo kayıpları 4 mm^2 kesit alanına sahip kablo kullanılacağı düşünülerek %0,60 olarak girilmiştir [116].

FV sisteminin bütün olarak devre diyagramı Şekil 4.26'da gösterilmiştir.



Şekil 4.26 : FV sistemin devre diyagramı.

4.4.5 Ekonomik analiz

PV*SOL yazılımının ekonomik analiz yapabilmesi için ekipmanların adet fiyatları ve diğer maliyetler olarak yazılımda girilmesi gerekmektedir. Çizelge 4.7’de tasarlanan FV sistemde kullanılan ekipmanların yaklaşık adet fiyatları gösterilmektedir [117-120].

Çizelge 4.7 : Maliyetler.

Ekipman	Model	Adet fiyatı (TL)	Adet
Modül	STR P 250	690	385
	SINVERT PVM13	7.000	2
	SINVERT PVM12	7.000	2
Evirici	SINVERT PVM16	7.500	1
	SINVERT PVM10	6.000	1
	SINVERT PVM17	7.500	1
Akü evirici	Sunny Island 8.0H	14.500	12
Akü	A602/1415 Solar	4.000	264

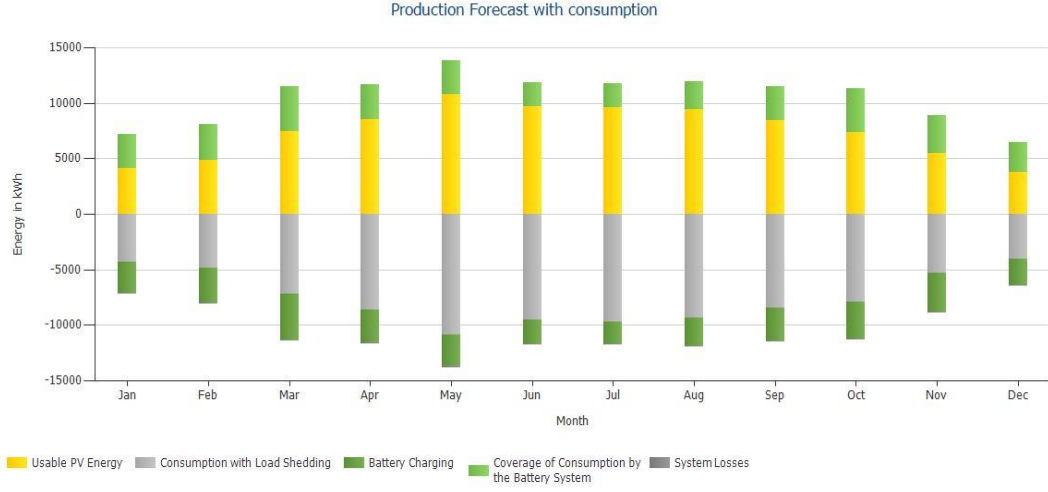
Kablo maliyetleri 5.000 TL, işçilik maliyeti 50.000 TL ve diğer maliyetler 10.000 TL olarak belirlenmiştir [121]. Sistemin toplam maliyeti 1.617.150 TL olarak hesaplanmıştır.

4.4.6 Sonuçlar

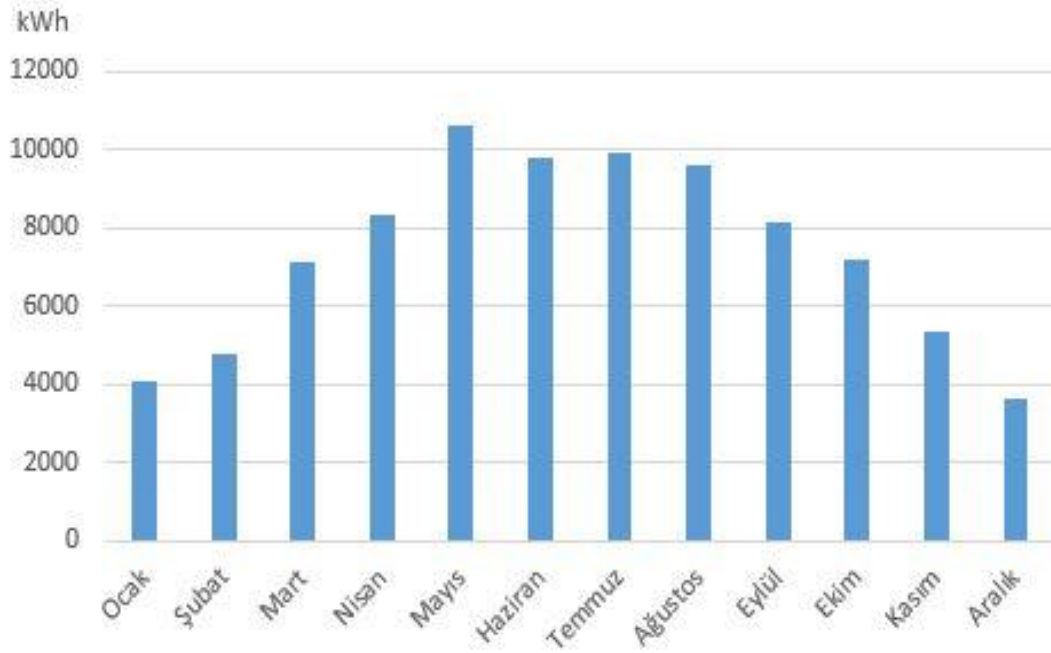
PV*SOL yazılımı ile FV sistemin benzetimi yapılmıştır. Benzetim sonucuna göre sistem yıllık 88.642 kWh elektrik üretecektir. %72,3 verimle ile çalışan sistemin performans katsayısı %79,8’dir. PV*SOL yazılımının benzetim sonuçlarını sunduğu pencere Şekil 4.27’de gösterilmiştir. Sonuçlar penceresindeki aylık dağılım grafiğinde FV sistem tarafından üretilip direkt kullanılan elektrik enerjisi değeri, bataryaların ne kadar şarj edildiği, tüketilen elektriğin batarya tarafından karşılanan kısmı ve sistem kayıpları bulunmaktadır. Birim enerji başına maliyet değeri ise 0,95 TL/kWh olarak hesaplanmıştır.

Yazılımın yaptığı benzetim sonuçlarına göre FV sisteminden elde edilen yıllık elektrik enerjisinin aylara göre dağılımı Şekil 4.28’de gösterilmektedir. Bu grafik incelendiğinde en yüksek miktardaki elektrik üretiminin Mayıs ayında gerçekleştiği görülmektedir.

Financial Analysis		Tech. Quality of the PV System	
Fuel Costs	0,00 €/year	PV Generator Energy (AC grid)	89.337 kWh/year
Total Investment Costs	7.161.150,00 €	Spec. Annual Yield	1.224 kWh/kWp
Specific Costs	3,97 €/kWh	Performance Ratio (PR)	79,8 %
System Integration			
System Efficiency	76,6 %	Solar Fraction	100,0 %



Şekil 4.27 : Sonuçlar penceresi.



Şekil 4.28 : FV sistemin ürettiği elektrik enerjisinin aylara göre dağılımı.

Tüm FV sisteminin modüller üzerinden elde edebileceği maksimum yıllık enerji miktarı 117.817 kWh'tir. Sistemi oluşturan A, B, C, D ve E çatıları üzerine kurulmuş beş ayrı FV sistemidir. Beş ayrı çatı alanı için tasarlanmış olan FV sistemleri ayrı ayrı

incelendiğinde, her bir sistemin üretebileceği maksimum yıllık enerji miktarı ve performans oranları Çizelge 4.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8 : FV sistemlerin ürettiği enerji ve performans oranları değerleri.

Çatı	Güç (kWp)	Üretilebilecek maksimum enerji (kWh)	Performans oranı
A	22,75	28277,4	81,5
B	14	16135,2	74,9
C	31,5	38480,6	79,4
D	22,75	28749,2	82
E	5,25	6174,7	77,6

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada İTÜ Ayazağa kampüsünde bulunan Enerji Enstitüsü için bir FV sistem tasarlanmış ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Tasarım ve benzetim işlemleri PV*SOL demo yazılımı ile yapılmıştır.

Enerji Enstitüsü'nün FV sistem için uygun açık alan arazisi bulunmamaktadır ve cephe üzerine montaj FV sistemleri de uygun görülmemiştir. Enstitü binasının boş ve düz çatıları FV sistem kurulumu için uygundur. Beş ayrı çatı bölmesi için FV sistemler tasarlanmıştır. Enstitünün yıllık elektrik tüketimi verileri göz önünde bulundurulduğunda yapılan ön hesaplamalara göre; bu tüketimin tümü FV sistemler ile karşılanmak istenseydi seçilen modül için 1040 adet modül gerektiği belirlenmiştir. Çatı alanlarının uygun olan bölümleri için yapılan hesaplar da ise çatı alanlarının en fazla 385 adet modül alabileceği saptanmıştır.

PV*SOL yazılımı ile yapılan tasarım sonucunda 385 adet modül beş ayrı çatı alanı için yerleştirilmiştir. Evirici, akü ve akü eviricisi seçimleri yazılım üzerinden yapılmıştır. Yazılımın eviriciler için konfigürasyonu kendi veri tabanı üzerinden otomatik olarak yapabilme özelliği vardır. Seçilen ekipmanların adet fiyatları yazılıma işlenerek yazılımın ekonomik analizi de yapması sağlanmıştır.

Yapılan simülasyon sonucu tasarlanan FV sistemin tümünden elde edilebilecek yıllık elektrik enerjisi miktarı 88.642 kWh olarak elde edilmiştir. Sistemin verimi yazılım tarafından %72,3 olarak hesaplanmıştır. Simülasyon sonucu üretilen elektrik enerjisi miktarı Enerji Enstitüsü'nün gerçek yıllık elektrik tüketim miktarı ile karşılaştırıldığında, tasarlanan FV sistemin bu tüketimin yaklaşık %25'ini karşılayabileceği görülmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının arttırılması ve teşvik edilmesi adına, üniversitelerde bu tür çalışmaların arttırılması ve teşvik edilmesi gerekmektedir. Yapılan uygunluk çalışmalarının sonuçlarına göre uygun olan FV sistemleri işletmeye alınmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **Özdemir, F. Ö.** (2012). Yenilenebilir Enerji Kavramı ve Ülkemizdeki Durumu. *Gencay*, 11, 20-24.
- [2] **International Energy Agency.** (2016). Key Renewables Trends Excerpt from: Renewables information.
- [3] **Dünyada temiz enerjiye yatırım, 333 milyar doları geçti.** (2018). <<https://www.dunya.com/dunya/dunyada-temiz-enerjiye-yatirim-333-milyar-dolari-gecti-haberi-399004>>, erişim tarihi: 05.05.2018.
- [4] **Solar Power Europe.** (2017). Global Market Outlook For Solar Power / 2017-2021.
- [5] **Yılmaz, A.** <www.enerjiatlas.com/ulkelere-gore-gunes-enerjisi.html>, erişim tarihi 28.03.2018.
- [6] **International Renewable Energy Agency.** (2017). Renewable Energy and Jobs Annual Review 2017.
- [7] **Kılıç, F. Ç.** (2015). Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri, *Mühendis ve Makina*, cilt 56, sayı 671, 28-40.
- [8] **The German Solar Energy Society (DGS).** (2013). *Planning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers.* Earthscan from Routledge.
- [9] **Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi.** (2009). *Dünya'da ve Türkiye'de Güneş Enerjisi* (DEK-TMK Yayın No: 0011/2009). Ankara: EKC Form Ofset.
- [10] **Şen, Z.** (2008). *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques: Atmosphere, Environment, Climate Change and Renewable Energy.* London: Springer.
- [11] **Dinçer, F.** (2011). Türkiye'de Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi Potansiyeli – Ekonomik Analiz ve AB Ülkeleri ile Karşılaştırmalı Değerlendirme, *KSU Mühendislik Dergisi*, 14(1), 8-17.
- [12] **Türkiye Ulusal Coğrafi Veri Portalı.** <www.geoportal.gov.tr>, erişim tarihi 19.03.2018.
- [13] **Solargis.** <<http://solargis.info>>, erişim tarihi 19.03.2018.
- [14] **EİE.** <www.eie.gov.tr/yenilenebilir/g_enj_calismalari.aspx>, erişim tarihi 25.02.2018.
- [15] **EİE.** <www.eie.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx>, erişim tarihi 25.02.2018.
- [16] **EİE.** <www.eie.gov.tr/MyCalculator/Aciklamalar.aspx>, erişim tarihi 25.02.2018.
- [17] **Yılmaz, A.** <www.enerjiatlas.com/gunes>, erişim tarihi 02.04.2018.

- [18] **Varınca, K.B. ve Gönüllü, M. T.** (2006). Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Bu Potansiyelin Kullanım Derecesi, Yöntemi ve Yaygınlığı Üzerine Bir Araştırma, *I. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi 2006*, 270-275. Eskişehir: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Haziran 21-23.
- [19] **KIR, A.** <www.gunessistemleri.com/dogal.php>, erişim tarihi 01.04.2018.
- [20] **Weiss, W., Spörk-Dür, M. ve Mauthner, F.** (2017). *Solar Heat Worldwide / Global Market Development and Trends in 2016 / Detailed Market Figures 2015*, IEA Solar Heating & Cooling Programme, May 2017. Graz: Steinhuber Infodesign.
- [21] **Gülgen, M.** *PV Installation Design* [Adobe Acrobat Reader (.pdf) sunum dosyası]. Alınan yer <<http://bibliobot.org/en/document/view/20909910/pv-and-solar-thermal-installation-in-turkey>>
- [22] **Clover, I. ve Tsagas, I.** (2018). <www.pv-magazine.com/2018/02/09/europe-added-8-61-gw-of-solar-in-2017-with-turkey-taking-top-spot/>, erişim tarihi 02.04.2018.
- [23] **Tsagas, I.** (2018). <www.pv-magazine.com/2018/01/10/turkey-adds-1-7-gw-of-solar-pv-in-2017/>, erişim tarihi 02.04.2018.
- [24] **Yılmaz, A.** <www.enerjiatlası.com/haber/lisansli-gunes-enerjisinde-son-durum>, erişim tarihi 02.04.2018.
- [25] **Erkan, H.** (2015, 23 Ocak). *Güneş Enerjisi Santrali (GES) Yatırım Süreci ve Mevzuat*. EMO-GENSED-İTÜ Güneşin Geleceğini Anlatıyor.
- [26] **Bayraktar, K. G.** (2016). Güneş Ülkemizin Enerji Geleceğidir. *Enerji ve Maden Dergisi*, 13, s.50-54.
- [27] **T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.** (2014, Aralık). Türkiye Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı.
- [28] **Çalışkan, M.** *Türkiye Rüzgar ve Güneş Enerjisi Potansiyeli* [Adobe Acrobat Reader (.pdf) sunum dosyası]. Alınan yer <<http://docplayer.biz.tr/8566501-Turkiye-ruzgar-ve-gunes-enerjisi-potansiyeli-mustafa-caliskan-eie-yenilenebilir-enerji-kaynaklari-subesi-mudur-vekili.html>>
- [29] **Torba yasa resmi gazetede yayınlandı.** (2018, 28 Mart). Erişim: 02.04.2018, <<http://yesilekonomi.com/yenilenebilir-enerji/torba-yasa-resmi-gazete-de-yayinlandi>>
- [30] **Moslehi, S ve Arababadi, R.** (2016). Sustainability Assessment of Complex Energy Systems Using Life Cycle Approach- Case Study: Arizona State University Tempe Campus. *Procedia Engineering*, 145, 1096-1103.
- [31] **De Hoyos, D. N.** (2016). *A novel approach for evaluating the impact of fixed variables on photovoltaic (pv) solar installations using enhanced meta data analysis among higher education institutions in the United States.* (Doktora tezi). ProQuest Dissertations and Thesis veritabanından alındı (ProQuest No. 10196585).
- [32] **Kwan, C. L.** (2011). *Progressing deployment of solar photovoltaic installations in the United States.* (Doktora Tezi). ProQuest Dissertations and Thesis veritabanından alındı (UMI No. 3486603).

- [33] **Lee, J., Chang B., Aktas, C. ve Gorthala R.** (2016). Economic feasibility of campus-wide photovoltaic systems in New England. *Renewable Energy*, 99, 452-464.
- [34] **Kucuksari, S., Khaleghi, A. M., Hamidi, M., Zhang, Y., Szidarovsky, F., Bayraksan, G. ve Son, Y.** (2014). An Integrated GIS, optimization and simulation framework for optimal PV size and location in campus area environments. *Applied Energy*, 113, 1601-1613.
- [35] **Martin, R. L. ve Jo, J. H.** (2014). Promoting Sustainable Infrastructure: A Feasibility Analysis of Utility-Scale PV Covered Parking Structure. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, Volume 5, Special issue-SB13 Seoul, 312-316.
- [36] **Patel, S. M.** (2012). *Alternative energy sources – integration of power generation systems into a microgrid at Clemson University and an atmospheric thermodynamic driven mechanical clock.* (Yüksek lisans tezi). ProQuest Dissertations and Thesis veritabanından alındı (UMI No. 1532209).
- [37] **Ransom, K. G.** (2003). *An Evaluation of Photovoltaic Generation Potential and Load Demand Usage at Baylor University.* (Yüksek lisans tezi). ProQuest Dissertations and Thesis veritabanından alındı (UMI No. 1413050).
- [38] **Kelly, B.** (2003). *Promoting Environmental and Educational Benefits of a Photovoltaic Array Installation at Miami University.* (Staj raporu). ProQuest Dissertations and Thesis veritabanından alındı (UMI No. 1418981).
- [39] **Routhier, A. F.** (2016). *Using Thermal Energy Storage to Increase Photovoltaic Penetration at Arizona State University's Tempe Campus.* (Yüksek lisans tezi). ProQuest Dissertations and Thesis veritabanından alındı (ProQuest No. 10110998).
- [40] **Kolanu, H. K.** (2017). *Zero Net Energy Building: Feasibility Study at California State University, Long Beach.* (Proje raporu). ProQuest Dissertations and Thesis veritabanından alındı (ProQuest No. 10251325).
- [41] **Pathirana, W. P. M. R. ve Muhtaroğlu, A.** (2013). Multifaceted Feasibility Analysis of PV Solar Application in Northern Cyprus. *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol.3, No4, 941-950.
- [42] **Drif, M., Pérez, P. J., Aguilera, J., Almonacid, G., Gomez, P., De la Casa, J. ve Aguilar, J. D.** (2007). Univer Project. A grid connected photovoltaic system of 200 kW_p at Jaén University. Overview and performance analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91, 670-683.
- [43] **Al Bdwawi, A., Al Ahbabi, H., Al Shamsi, S. A. ve Hussein, A. A.** (2015). Modular Photovoltaic Charging Station for UAE University Golf Carts. *Energy Procedia*, 75, 314-318.
- [44] **Congedo, P. M., Malvoni, M., Mele, M. ve De Giorgi, M. G.** (2013). Performance measurements of monocrystalline silicon PV modules. *Energy Conversion and Management*, 68, 1-10.

- [45] **Ali, S. M. H.** (2015). *Optimal Photovoltaic Size Estimation for a Campus Area Considering Uncertainties in Load, Power Generation and Electricity Rates*. (Yüksek lisans tezi). Sustainable Environment and Energy Systems, Middle East Technical University Northern Cyprus Campus.
- [46] **Sadati, S. M. S., Jahani, E. ve Taylan, O.** (2015). Technical and Economic Analyses for Sizing PV Power Plant with Storage System for METU NCC. *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2015, November 13-19, 2015, Texas*.
- [47] **Berwal, A. K., Kumar, S., Kumari, N., Kumar, V. ve Haleem, A.** (2017). Design and analysis of rooftop grid tied 50 kW capacity Solar Photovoltaic (SPV) power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 1288-1299.
- [48] **Hasapis, D., Savvakis, N., Tsoutsos, T., Kalaitzakis, K., Psychis, S. ve Nikolaidis, N. P.** (2017). Design of large scale prosuming in Universities: The solar energy vision of the TUC campus. *Energy and Buildings*, 141, 39-55.
- [49] **Kalkan, N., Bercin, K., Cangul, O., Morales, M. G., Saleem, M. M. K. M., Marji, I., Metaxa, A. ve Tsigkogianni, E.** (2011). A renewable energy solution for Highfield Campus of University of Southampton. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2940-2959.
- [50] **Khatrri, R.** (2016). Design and assessment of solar PV plant for girls hostel (GARGI) of MNIT Univesity, Jaipur city: A case study. *Energy Reports*, 2, 89-98.
- [51] **Shukla, A. K., Sudhakar, K. ve Baredar, P.** (2016). Design, simulation and economic analysis of standalone roof top solar PV system in India. *Solar Energy*, 136, 437-449.
- [52] **Şenol, M., Abbasoğlu, S., Kükrer, O., Babatunde, A. A.** (2016). Aguide in installing large-scale PV power plant for self consumption mechanism. *Solar Energy*, 132, 518-537.
- [53] **Yan, R., Saha, T. K., Meredith, P., Goodwin, S.** (2013). Analysis of yearlong performance of differently tilted photovoltaic systems in Brisbane, Australia. *Energy Conversion and Management*, 74, 102-108.
- [54] **Chakraborty, S., Sadhu, P. K., Pal, N.** (2015). Technical mapping of solar PV for ISM-an approach toward green campus. *Energy Science and Engineering*, 3, 196-206
- [55] **Tan, R. H. G., Chow, T. L.** (2016). A Comprative Study of Feed in Tariff and Net Metering for UCSI University North Wing Campus with 100kW Solar Photovoltaic System. *Energy Procedia*, 100, 86-91.
- [56] **Durak, F. S.** (2016). *Fotovoltaik Sistemlerin Ekonomik Analizi: Malatya'daki Bir Kamu Binası Örneği*. (Yüksek lisans tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [57] **Alkan, S.** (2014). *Düzce Şartlarında Bir Evin Enerji İhtiyacını Karşılacak Fotovoltaik Sistemin Kurulumu*. (Yüksek lisans tezi). Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.

- [58] **Tozlu, C.** (2004). *Muğla Üniversitesinde Kurulu Şebekye Bağlı Fotovoltaik Güç Sistemlerinin Performans Analizi*. (Yüksek lisans tezi). Muğla Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla.
- [59] **Eke, R. ve Senturk, A.** (2012). Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system. *Solar Energy*, 86, 2665-2672.
- [60] **Demircan, C.** (2014). *40,5 kWp Kurulu Güçteki Fotovoltaik Güç Sisteminin Binaya Katkısının İncelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). Muğla Sıtkı Koçman, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla.
- [61] **Jafarzadeh, N.** (2017). *Analysis of Hybrid Wind-Solar Power Plant for ITU Ayazaga Campus*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [62] **Yerli, B.** (2011). *İstanbul İklim Şartlarında Meteorolojik Parametrelerin PV (Fotovoltaik Pil) Elektrik Üretimi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [63] **Türkiye'nin yenilenebilir enerji hafızası İTÜ'de oluşuyor.** (2016, 25 Ekim). Erişim: 03.04.2018, <<http://bilgicagi.com/turkiyenin-yenilenebilir-enerji-hafizasi-itude-olusuyor/>>
- [64] **T.C. Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı.** (2012). Dünyada ve Türkiye'de Sürdürülebilir Kampüs Uygulamaları. *Kalkınmada Anahtar Verimlilik*, 284. Erişim: 08.07.2017, <<http://anahtar.sanayi.gov.tr/tr/News/dunya-da-ve-turkiyede-surdurulebilir-kampus-uygulamalari/53>>
- [65] **Yazman, D.** (2012, 4 Temmuz). 1. Ödül, İTÜ Ayazağa Yerleşkesi Sınırlı Kentsel Tasarım ve Mimari Proje Yarışması. *Arkitera*. Erişim adresi <www.arkitera.com/proje/841/1-odul-itu-ayazaga-yerleskesi-sinirli-kentsel-tasarim-ve-mimari-proje-yarismasi>, erişim tarihi 03.04.2018.
- [66] **Url-1** <<http://itugae.com/aribalar.html>>, erişim tarihi 03.04.2018.
- [67] **İTÜ'nün Güneş Teknesi Dünya Üçüncüsü Oldu.** (2007, Eylül). *EMO ENERJİ* sayı-3, s.110-111.
- [68] **Kadırgan, F.** (2008). Güneş Enerjisi Teknolojileri, İTÜ'de Yapılan Çalışmalar ve Binalarda Uygulamaları, *VIII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, s.245-250.
- [69] **Doğan, H.** (2014). *Fotovoltaik Güneş Pilleri*. (Yüksek lisans tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [70] **Kaplan, Z.** (2012). *Fotovoltaik Sistem Tasarımı*. (Yüksek lisans tezi). Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [71] **Keskinel, S.** (2015). *Enerji Verimliliği Kapsamında Binalarda Fotovoltaik Güç Sistemlerinin Uygulamalı Analizi*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [72] **Url-2** <<https://www.solarmarket.com.au/buying-tips/choosing-the-right-system/solar-panel-technologies/>>, erişim tarihi 23.04.2018.
- [73] **Url-3** <<https://phys.org/news/2011-11-sharp-solar-cell-worlds-highest.html>>, erişim tarihi 23.04.2018.

- [74] **Url-4** <<https://phys.org/news/2011-11-sharp-solar-cell-worlds-highest.html>>, erişim tarihi 23.04.2018.
- [75] **Cura, D.** (2015). *Evaluation Of The Technical And Economic Aspects Of Solar Photovoltaic Plants Which Were Built Under Different Climate Conditions And Feed-in Tariff Zones*. (Yüksek lisans tezi). Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [76] **Url-5** <<https://ohioline.osu.edu/factsheet/AEX-652-11>>, erişim tarihi 23.04.2018.
- [77] **Sayın, S. ve Koç, İ.** (2011). Güneş Enerjisinden Aktif Olarak Yararlanmada Kullanılan Fotovoltaik (PV) Sistemler ve Yapılarda Kullanım Biçimleri. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c.26, s.3, 89-106.
- [78] **Url-6** <<http://www.gunessistemleri.com/aku.php>>, erişim tarihi 23.04.2018.
- [79] **Kıyanççek, E.** (2013). *Fotovoltaik Sistemlerin Boyutlandırılması için PVS² Paket Programının Gerçekleştirilmesi*. (Yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [80] **Url-7** <www.karpazklima.com/muhendislik/>, erişim tarihi 23.04.2018.
- [81] **Url-8** <https://www.banggood.com/MPT-7210A-Aluminum-Alloy-MPPT-Solar-Panel-Charge-Controller-with-LCD-Display-p-1056572.html?cur_warehouse=CN>, erişim tarihi 23.04.2018.
- [82] **Yücel, Y.** (2016). *Güneş Enerjisinden Yararlanmak Amacı ile Fotovoltaik Sistemlerin Binalarda Kullanımı*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Arel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [83] **Url-9** <<http://www.tritec-energy.com/en/reference-cases/1016-flat-roof-installation-sparkasse-hanauerland-kehl/>>, erişim tarihi 28.04.2018.
- [84] **Url-10** <www.tesla.com/solarroof>, erişim tarihi 23.04.2018.
- [85] **Bushong, S.** (2012). Under The Roof: How Households Decide To Install PV. *Solar Power World*. Erişim 28.04.2018, <<https://www.solarpowerworldonline.com/2012/08/under-the-roof-how-households-decide-to-install-pv/>>.
- [86] **Şelari, O.** (2013). Certificazione di qualità per i pannelli fotovoltaici DERBISOLAR a-Si. *Agricoltura news*. Erişim 28.04.2018, <<http://www.agricolturanews.it/certificazione-di-qualita-per-i-pannelli-fotovoltaici-derbisolari-a-si>>.
- [87] **Url-11** <<http://www.intrinsicpower.co.uk/>>, erişim tarihi 20.04.2018.
- [88] **Url-12** <<http://www.romag.co.uk/latest/news/bipv-explained/>>, erişim tarihi 28.04.2018.
- [89] **Url-13** <<http://www.issol.eu/pro/photo-3-3-2/>>, erişim tarihi 28.04.2018.
- [90] **Url-14** <<http://www.kolumbus.fi/solpros/ekoviikki.htm>>, erişim tarihi 28.04.2018.
- [91] **Url-15** <http://www.solarbuildingtech.com/Office_S_Solar_PV_Remodeling/Office_Side_Walk_Solar_Sunshade/office_side_walk_solar_sunshade.htm>, erişim tarihi 28.04.2018.

- [92] **Yılmaz, A.** <<http://www.enerjiatlasi.com/gunes/kayseri-ciftlik-gunes-enerjisi-sentrali.html>>, erişim tarihi 20.04.2018.
- [93] **Url-16** <<http://www.aladdinsolar.com/pvsystems.html>>, erişim tarihi 28.04.2018
- [94] **Url-17** <<http://www.linklightsolar.com/project-off-grid.html>>, erişim tarihi 03.04.2018
- [95] **Url-18** <<http://www.solarkonzept.eu/shsdetails.htm>>, erişim tarihi 20.04.2018.
- [96] **Url-19** <<http://www.tciecos.com/about/?116.html>>, erişim tarihi 20.04.2018.
- [97] **Url-20** <<http://sinovoltaics.com/learning-center/consumers/solar-hybrid-system-vs-grid-tied-vs-standalone-choose/>>, erişim tarihi 20.04.2018.
- [98] **NASA.** Erişim 28.04.2018, <<https://data.giss.nasa.gov/ar5/srmonlat.html>>.
- [99] **Siddiqui, R. ve Bajpai, U.** (2012). Deviation in the Performance of Solar Module under Climatic Parameter as Ambient Temperature and Wind Velocity in Composite Climate. *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol.2, No.3.
- [100] **Url-21** <www.alternative-energy-tutorials.com/solar-power/pv-panel.html>, erişim tarihi 28.04.2018.
- [101] **Klise, G. T. ve Stein, J. S.** (2009). *Models Used to Assess the Performance of Photovoltaic Systems*. (No. SAND2009-8258). Sandia National Laboratories, New Mexico.
- [102] **Url-22** <<http://photovoltaic-software.com/>>, erişim tarihi 20.04.2018.
- [103] **Url-23** <<https://www.valentin-software.com/>>, erişim tarihi 20.04.2018.
- [104] **Url-24** <<http://ye-em.com/>>, erişim tarihi 20.04.2018.
- [105] **Url-25** <<http://help.valentin-software.com/pvsol/en/>>, erişim tarihi 28.04.2018.
- [106] **Url-26** <http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/shining/page12_fig.html>, erişim tarihi 28.04.2018.
- [107] **Davies, J. A. ve Hay, J. E.** (1980). Calculation of the Solar Radiation Incident on an Inclined Surface. *First Canadian Solar Radiation Data Workshop*, 32-58.
- [108] **Reindl, D. T., Beckman, W. A. ve Duffie, J. A.** (1990). Diffuse Fraction Correlations. *Solar Energy*, Vol.45, No.1, 1-7.
- [109] **Url-27** <<http://www.enerji.itu.edu.tr/>>, erişim tarihi 15.04.2018.
- [110] **Url-28** <<https://yandex.com.tr/harita/>>, erişim tarihi 28.04.2018.
- [111] **Url-29** <<http://aimenerji.com/adres-bilgileri.aspx>>, erişim tarihi 28.04.2018.
- [112] **Solarturk.** *Poly serisi ürün özellikleri.* (Teknik veri broşürü). Erişim 30.04.2018, <<http://www.solarturk.com.tr/uploads/ST-ANATOLIA-datasheet-2017.pdf>>
- [113] **Siemens.** (2010). *Sinvert PVM Operating Instructions.* (Kullanım kılavuzu)
- [114] **Url-30** <<https://www.cclcomponents.com/sma-solar-sunny-island-8-0kw-48v-inverter-charger-with-wlan-communication>>, erişim tarihi 28.04.2018.

- [115] **Url-31** <[http://www.batteriesdirect.com.au/shop/product/23646/ngs6021415hs0c-\(a602/1415\).html](http://www.batteriesdirect.com.au/shop/product/23646/ngs6021415hs0c-(a602/1415).html)>, erişim tarihi 28.04.2018.
- [116] **Ekici, S. ve Koprü, M. A.** (2017). Investigation of PV System Cable Losses. *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol.7, No.2, 807-815.
- [117] **Uyar, F.** (2016, 25 Mart). 500 kW Güneş Enerji Santrali Kurulumu ve Maliyeti. *Enerji Beş Temiz Enerji Portalı*. Erişim 20.04.2018, <<http://www.enerjibes.com/gunes-enerji-santrali-kurulumu-maliyeti/>>
- [118] **Url-32** <http://www.secondsol.com/handelsplatz/marktplatz_anzeige,13673,pvm-13.htm>, erişim tarihi 01.05.2018.
- [119] **Url-33** <<http://www.sauleselektines.lt/lt/products/solar-inverters>>, erişim tarihi 01.05.2018.
- [120] **Url-34** <<http://www.aquayachting.com/wp-content/uploads/2018/01/Sonnenschein-SOLAR-Ak%C3%BC.pdf>>, erişim tarihi 01.05.2018.
- [121] **Url-35** <<http://humartas.com.tr/1-mw-lisanssiz-ges-projeleri/>>, erişim tarihi 01.05.2018.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mustafa Ceylan
Doğum Tarihi ve Yeri : 1982 - İstanbul
E-posta : mustafaceylan82@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2009, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- İstanbul Gedik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi (2012-devam ediyor).
- Akuameksis Ltd. Şti.'nde TÜBİTAK 1512 projesi kapsamında araştırmacı (2014).