İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

YÜZER VE ARAZİ KURULUMU FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN TEKNİK VE EKONOMİK AÇIDAN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hakan ŞENÇİÇEK

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

ARALIK 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

YÜZER VE ARAZİ KURULUMU FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN TEKNİK VE EKONOMİK AÇIDAN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hakan ŞENÇİÇEK
(301121045)

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Önder GÜLER

ARALIK 2017

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301121045 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hakan ŞENÇİÇEK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "YÜZER VE ARAZİ KURULUMU FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN TEKNİK VE EKONOMİK AÇIDAN İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Önder GÜLER** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Doç. Dr. Ozan ERDİNÇ** Yıldız Teknik Üniversitesi	.....
	Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU İstanbul Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 17 Kasım 2017
Savunma Tarihi : 11 Aralık 2017

ÖNSÖZ

Endüstrileşme ve kentleşme ile birlikte enerji ihtiyacı günden güne artış göstermektedir. Artan bu ihtiyacın enerji arzının çeşitlilik ilkesi doğrultusunda karşılanabilmesi için, yaygın olarak kullanılan fosil yakıttan enerji üreten santrallere ek olarak yenilenebilir kaynaklardan enerji üreten santrallere ihtiyaç giderek artmaktadır.

Bu yüksek lisans tezinde, yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisi alanında çalışmalar yürütülmüş olup, "Yüzer ve Arazi Kurulumu Fotovoltaik Sistemlerin Teknik ve Ekonomik Açıdan İncelenmesi" konusu ele alınmıştır.

Çalışmam süresince desteğini benden esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Önder Güler'e ve beni böyle bir çalışmaya teşvik ederek, çalışmam boyunca değerli vakitlerini bana ayıran Barış Arıcı ve Temiz Yaratıcı Teknolojiler ekibine çok teşekkür ederim...

Aralık 2017

Hakan Şençiçek
Elektronik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
SEMBOLLER ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
2. GÜNEŞ ENERJİSİ **3**
2.1 Fotovoltaik Sistemlerin Tarihsel Gelişimi 3
2.2 Dünya'da Fotovoltaik Sistemler 5
2.3 Türkiye'de Fotovoltaik Sistemler 8
2.4 Fotovoltaik Sistem Teşvik Modelleri 13
2.4.1 Düzenleyici Politikalar 13
2.4.2 Mali Teşvikler ve Kamu Finansmanı 15
3. FOTOVOLTAİK SİSTEMİ OLUŞTURAN ÖĞELER **17**
3.1 Fotovoltaik Panel 17
3.1.1 Solar Hücresine Göre Fotovoltaik Panel Tipleri 18
3.1.1.1 Kristal Silisyum 18
3.1.1.2 İnce Film 21
3.1.1.3 Diğer Tipler 21
3.1.2 Fotovoltaik Modül Elektriksel Özellikleri 22
3.2 Panel Taşıyıcı Sistem 23
3.3 Elektriksel Bağlantı 23
3.4 Solar Evirici 24
3.4.1 Merkezi Evirici 26
3.4.2 Dizi Evirici 27
3.4.3 Mikro Evirici 28
3.4.4 Merkezi ve Dizi Eviricilerin Karşılaştırılması 29
3.4.5 Eviricilerde Verimlilik ve Elektriksel Özellikler 31
3.5 Batarya (Opsiyonel) 34
3.6 Şarj Kontrol Ünitesi (Opsiyonel) 35
3.7 Fotovoltaik Sistemlerde Enerji Döngüsü 35
3.8 Fotovoltaik Sistemlerin Kurulum Tipleri 37
3.8.1 Arazi Tipi Fotovoltaik Sistemler 38
3.8.2 Çatı Üstü Fotovoltaik Sistemler 38
3.8.3 Kanal Üstü Fotovoltaik Sistemler 39
3.8.4 Açık Deniz Fotovoltaik Sistemleri 40
3.8.5 Yüzer Fotovoltaik Sistemler 40

3.9 Fotovoltaik Sistemlerin Kurulum Tiplerine Göre Avantaj ve Dezavantajları.. 41
4. YÜZER FOTOVOLTAİK SİSTEMLER 45
4.1 Yüzer Fotovoltaik Sistemleri Oluşturan Öğeler 45
4.1.1 Yüzdürücü Sistem (Duba) 45
4.1.1.1 Panel Taşıyıcı Duba 46
4.1.1.2 Yürüme Yolu Dubası 47
4.1.1.3 Diğer Duba Türleri 48
4.1.2 Sabitleme Sistemi 48
4.1.3 Elektriksel Bağlantı 49
4.1.3.1 Yüzdürme 49
4.1.3.2 Suyun Altından Geçirme 50
4.1.3.3 Diğer Taşıma Türleri 50
4.1.4 Diğer 50
4.2 Temel Tasarım Faktörleri 50
4.2.1 Rezervuarın/Göletin Düzeni 50
4.2.2 Yüzdürücü Sistem Tasarımı 51
4.2.3 Yüzer Fotovoltaik Sistemin Yönü 51
4.3 Yüzer Fotovoltaik Sistemlerin Türkiye'deki Potansiyeli 51
4.4 Yüzer ve Kara Kurulumu Fotovoltaik Sistemlerin Karşılaştırılması 53
4.4.1 Avantajları 53
4.4.2 Zorlukları / Sorunlar 54
4.4.3 Maliyetleri 55
5. İZLEME SİSTEMİ TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ 57
5.1 Sistemde Kullanılan Malzemelerin Seçimi ve Görevleri 57
5.1.1 İzleme 57
5.1.2 Üretim 59
5.1.3 Haberleşme 59
5.2 Üretim Datasının Analizi 60
5.2.1 Datanın Üretimi 60
5.2.2 Datanın Toplanması 61
5.2.3 Datanın Aktarımı ve Biriktirilmesi 62
5.2.4 Raporlama 63
5.3 Kullanıcı Arayüzü (Scada) 63
5.3.1 Server Tarafı 64
5.3.2 Kullanıcı Tarafı 64
6. FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN TEKNİK VE FİNANSAL ANALİZİ 67
6.1 Fotovoltaik Sistem Simülasyon Yazılımı 67
6.2 Teknik Analiz 69
6.2.1 Arazi Tipi FV Sistemler ile Simülasyon Verilerinin Karşılaştırılması 69
6.2.1.1 FV sistem lokasyonu ve güneş enerjisi potansiyeli 69
6.2.1.2 Fotovoltaik sistem tasarımı 71
6.2.1.3 Teknik analiz 77
6.2.2 Yüzer ve Arazi Tipi Fotovoltaik Sistemlerin Enerji Üretimi Analizi 83
6.2.2.1 FV Sistem Lokasyonu ve Güneş Enerjisi Potansiyeli 83
6.2.2.2 Teknik Analiz 87
6.3 Finansal Analiz 93
7. SONUÇ 103
KAYNAKLAR 107
EKLER 109
ÖZGEÇMİŞ 117

KISALTMALAR

FV **:** Fotovoltaik
GEPA **:** Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası
IRENA **:** International Renewable Energy Agency
STK **:** Standart Test Koşullarında

SEMBOLLER

a, b : Anahtarlama elemanlarının doluluk oranı
E_{pv} : FV hücrenin standart koşullarda ürettiği enerji
E_{L1} : Şarj denetleyici çıkışındaki enerji
E_{L2} : Yüke verilen enerji
$E_{üretim\text{-}yıl}$: Yıllık enerji üretimi
H : Işınım
I_m : En yüksek güç noktasında FV panel akımı
I_{pv} : FV hücrenin ürettiği net akım
n_M : Modül düzeltme katsayısı
P_L : Yük gücü
P_{vm} : Fotovoltaik hücre gücü
t : Zaman
V_d : DC giriş gerilimi
V_o : DC çıkış gerilimi
η_{pv} : Fotovoltaik çevrim enerji verimi
η_S : Bağlantı, kablo ve sistem bileşen kayıplarını içeren verim
η_A : Akü verimi
η_{inv} : Evirici verimi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Büyük ölçekli küresel FV pazarlarında çatı üstü kurulum kapasitelerinin, toplam kapasiteye oranı. 12
Çizelge 3.1: FV hücre tipine göre FV panel verimlilikleri ve kW'lık kapasite başına kapladıkları alan. 18
Çizelge 3.2: Eviricinin a ve b anahtarlama parametreleri. 25
Çizelge 3.3: Tek fazlı tam köprü eviricinin çalışması. 26
Çizelge 3.4: Merkezi ve dizi eviricilerin toplam sistem maliyetlerine göre karşılaştırılması. 29
Çizelge 3.5: Merkezi ve dizi eviricilerin toplam enerji üretimlerine göre karşılaştırılması. 30
Çizelge 3.6: Schneider Electric firmasının CL-60E model, 66 kW çıkış gücüne sahip dizi tipi solar eviricisine ait elektriksel özellikler. 33
Çizelge 3.7: Kurulum tiplerine göre FV sistemlerin avantaj ve dezavantajları. 41
Çizelge 4.1: Türkiye'deki barajların kullanım türlerine göre kurulabilir kapasite potansiyeli. 52
Çizelge 4.2: Türkiye'deki göllerin türlerine göre kurulabilir kapasite potansiyeli. .. 52
Çizelge 5.1: Solar evirici üzerinden PLC'ye alınan veri listesi. 61
Çizelge 6.1: Jinko firmasının JKM265P model FV paneline ait elektriksel değerler. 72
Çizelge 6.2: ABB firmasının TRIO-2x.x-TL-OUTD model solar eviricilerine ait elektriksel değerler. 74
Çizelge 6.3: 2017 yılı Haziran – Ekim ayları arasındaki günlük ortalama ışınım miktarı (H). 79
Çizelge 6.4: Arazi tipi FV sistemden toplanan deneysel veri ile PVsyst simülasyon yazılımından gelen verinin karşılaştırılması. 83
Çizelge 6.5: Yingli firmasının JL250P-29B model FV paneline ait elektriksel değerler. 86
Çizelge 6.6: Yingli firmasının JL250P-29B model FV panellirinde kullanılan STC ve NOCT ifadelerin açıklaması. 87
Çizelge 6.7: Bölgeye özel PVsyst doğrulama katsayısının İçel ili Mut ilçesinde bulunan FV sistem verim analizinde kullanılması. 93
Çizelge 6.8: 1 MWp kapasiye sahip yüzer ve arazi tipi FV sistemler için maliyet karşılaştırması. 95
Çizelge 6.9: Örnek arazi tipi FV sistem tarafından üretilen yıllık enerji üretimi. 97
Çizelge 6.10: 1 MW'lık arazi tipi FV sistem için 25 yıllık gelir, yatırım ve nakit durumu tablosu. 98
Çizelge 6.11: Örnek yüzer FV sistem tarafından üretilen yıllık enerji üretimi. 100
Çizelge 6.12: 1 MW'lık yüzer FV sistem için 25 yıllık gelir, yatırım ve nakit durumu tablosu. 101

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Dünya'da 2000 – 2016 yılları arasındaki FV kurulu kapasite miktarları.... 5
Şekil 2.2: Dünya'da 2001 – 2016 yılları arasındaki FV kapasite artış miktarları. 5
Şekil 2.3: 2016 yılı verilerine göre en büyük kurulu FV kapasitesine sahip ülkeler... 6
Şekil 2.4: Dünya'da 2009 – 2016 yılları arasında gerçekleşen ve 2017 – 2025 yılları arasında gerçekleşmesi öngörülen FV sistem maliyet kırılımları..... 7
Şekil 2.5: Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası [GEPA]..... 9
Şekil 2.6: Türkiye'nin aylara göre global radyasyon değerleri (kWh/m^2-gün) ve ortalama güneşlenme süreleri (saat). 9
Şekil 2.7: Türkiye'de FV panel tipine göre birim alanda üretilebilecek yıllık enerji miktarları (kWh/yıl)..... 10
Şekil 2.8: Türkiye'nin 2016 yılı Ocak ayı itibari ile lisanssız FV kurulu gücü ve santral sayısı..... 10
Şekil 2.9: Türkiye'nin 2017 yılı Ocak ayı itibari ile lisanssız FV kurulu gücü ve santral sayısı..... 11
Şekil 3.1: Fotovoltaik hücrelerin fotovoltaik modülü, FV modüllerin FV panelleri, FV panellerin de FV dizilerini oluşturması. 17
Şekil 3.2: Kristal Silisyum Solar Hücre Yapısı. 19
Şekil 3.3: Kristal Silisyum Solar Hücre İçin Yatırım Geri Dönüş Süreleri..... 20
Şekil 3.4: FV hücrelerde Akım-Gerilim eğrisinin sıcaklığa bağlı değişimi. 22
Şekil 3.5: Panel taşıyıcı sistem örnekleri..... 23
Şekil 3.6: Gerilim kaynaklı bir fazlı tam dalga köprü evirici devresi. 24
Şekil 3.7: Kare dalga uygulanarak yapılan anahtarlama ile çıkış gerilim ve akım dalga formları..... 25
Şekil 3.8: Merkezi tip solar evirici örneği. 27
Şekil 3.9: Dizi tipi solar evirici örneği..... 28
Şekil 3.10: Merkezi ve dizi eviriciler ile örnek bir fotovoltaik sistem tasarımı. 30
Şekil 3.11: Maksimum güç noktasının belirlenmesi, I-U ve P-U grafikleri (mountain-climb algorithm). 31
Şekil 3.12: MPPT'li evirici sistemi. 32
Şekil 3.13: Maksimum güç noktası takip algoritması. 32
Şekil 3.14: Fotovoltaik sistemde üretilen enerjiyi depo eden bataryalar..... 34
Şekil 3.15: Fotovoltaik sistemde enerji döngüsü..... 35
Şekil 3.16: FV sistemlerde üretimden tüketime enerji döngüsü..... 36
Şekil 3.17: Arazi kurulumu fotovoltaik sistem örneği. 37
Şekil 3.18: Arazi kurulumu fotovoltaik sistem örneği. 38
Şekil 3.19: Çatı üstü fotovoltaik sistem örneği..... 39
Şekil 3.20: Kanal üstü fotovoltaik sistem örneği..... 39
Şekil 3.21: Açık deniz fotovoltaik sistem örneği. 40
Şekil 3.22: Yüzer fotovoltaik sistem örneği. 41
Şekil 4.1: Gerçek bir yüzer FV sistemden yüzdürücü sistem tasarımı örneği..... 46

Şekil 4.2: Panel taşıyıcı duba, yürüme yolu dubası ve FV panelden oluşan yüzdürücü sistem örneği. 46
Şekil 4.3: Yüzer FV sistemler için tasarlanan panel taşıyıcı duba örneği. 47
Şekil 4.4: Yüzer FV sistemler için tasarlanan yürüme yolu dubası örneği. 47
Şekil 4.5: Solar evirici ve elektrik ekipmanlarının yüzdürüldüğü sistem örneği. 48
Şekil 4.6: Yüzer FV sistemler için tasarlanan duba sabitleme sistemi örneği. 49
Şekil 5.1: Yüzer FV sisteme gelen ışınımı ölçüm referans hücre. 58
Şekil 5.2: FV panele bağlanan sıcaklık sensörlerinin yerleşimi. 60
Şekil 5.3: Yüzer fotovoltaik sistemde kullanılan izleme sistemi panosu. 62
Şekil 5.4: Scada'nın server tarafı arayüzü – 1. 63
Şekil 5.5: Scada'nın server tarafı arayüzü – 2. 64
Şekil 5.6: Scada'nın kullanıcı tarafı arayüzü – 1, Sıcaklık – Zaman grafiği. 65
Şekil 5.7: Scada'nın kullanıcı tarafı arayüzü – 2, Güç – Zaman grafiği. 65
Şekil 5.8: Scada'nın kullanıcı tarafı arayüzü – 3, Gerilim – Zaman grafiğini dışa fotoğraf dosyası aktarma. 66
Şekil 5.9: Scada'nın kullanıcı tarafı arayüzü – 4, Işınım – Zaman grafiğini dışa fotoğraf dosyası aktarma. 66
Şekil 6.1: PVsyst simülasyon yazılımı kullanıcı arayüzü. 68
Şekil 6.2: Konya İli Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası [GEPA]. 70
Şekil 6.3: Konya ili Selçuklu ilçesinin aylara göre global radyasyon değerleri (kWh/m^2-gün) ve ortalama güneşlenme süreleri (saat). 70
Şekil 6.4: Konya ili Selçuklu ilçesinde FV panel tipine göre birim alanda üretilebilecek yıllık enerji miktarları (kWh/yıl). 70
Şekil 6.5: Jinko firmasının JKM265P model fotovoltaik paneline ait Verimlik – Yıl grafiği. 73
Şekil 6.6: Jinko firmasının JKM265P model fotovoltaik paneline ait Gerilim – Akım, Gerilim – Güç ve Hücre sıcaklığı – I_{sc}, V_{oc}, Pmax grafikleri. 73
Şekil 6.7: ABB firmasının TRIO-2x.x-TL-OUTD model solar eviricilerine ait Çıkış gücü – Verimlilik grafiği. 75
Şekil 6.8: 2017 yılı Haziran – Ekim ayları arasındaki günlük ortalama ortam ve panel sıcaklıkları (T_{ortam}, T_{panel}) grafiği. 78
Şekil 6.9: 2017 yılı Haziran – Ekim ayları arasındaki günlük ortalama ışınım miktarı (H) grafiği. 78
Şekil 6.10: 2017 yılı Haziran ayı günlük ortalama ortam sıcaklığı (T_{ortam}), panel sıcaklığı (T_{panel}) ve ışınım miktarı (H) ilişkisi grafiği. 80
Şekil 6.11: 2017 yılı Temmuz ayı günlük ortalama ortam sıcaklığı (T_{ortam}), panel sıcaklığı (T_{panel}) ve ışınım miktarı (H) ilişkisi. 80
Şekil 6.12: 2017 yılı Ağustos ayı günlük ortalama ortam sıcaklığı (T_{ortam}), panel sıcaklığı (T_{panel}) ve ışınım miktarı (H) ilişkisi grafiği. 81
Şekil 6.13: 2017 yılı Eylül ayı günlük ortalama ortam sıcaklığı (T_{ortam}), panel sıcaklığı (T_{panel}) ve ışınım miktarı (H) ilişkisi. 81
Şekil 6.14: 2017 yılı Ekim ayı günlük ortalama ortam sıcaklığı (T_{ortam}), panel sıcaklığı (T_{panel}) ve ışınım miktarı (H) ilişkisi. 82
Şekil 6.15: 2017 yılı Haziran – Ekim ayları arasındaki aylık toplam enerji üretim miktarı (E_{toplam}) grafiği. 82
Şekil 6.16: İçel ili güneş enerjisi potansiyeli atlası [GEPA]. 84
Şekil 6.17: İçel ili Mut ilçesinin aylara göre global radyasyon değerleri (kWh/m^2-gün) ve ortalama güneşlenme süreleri (saat). 84
Şekil 6.18: İçel ili Mut ilçesinde FV panel tipine göre birim alanda üretilebilecek yıllık enerji miktarı (kWh/yıl) grafiği. 84

Şekil 6.19: İçel ili Mut ilçesinde bulunan yüzer fotovoltaik sistemin genel görünüşü. 85
Şekil 6.20: Yüzer FV sistem yerleşim planı. 89
Şekil 6.21: 2017 yılı Eylül – Ekim ayları arasındaki günlük ortalama ortam ve panel sıcaklıkları (T_{ortam}, T_{panel}) grafiği. 90
Şekil 6.22: 2017 yılı Eylül – Ekim ayları arasındaki günlük ortalama ışınım miktarı (H) grafiği. 90
Şekil 6.23: 2017 yılı Eylül ayı günlük ortalama ortam sıcaklığı (T_{ortam}), panel sıcaklığı (T_{panel}) ve ışınım miktarı (H) ilişkisi. 91
Şekil 6.24: 2017 yılı Ekim ayı günlük ortalama ortam sıcaklığı (T_{ortam}), panel sıcaklığı (T_{panel}) ve ışınım miktarı (H) ilişkisi grafiği. 91
Şekil 6.25: Konya'da bulunan kara kurulumu FV sistem ile İçel'de bulunan yüzer FV sistemin kuş uçuşu uzaklığı. 92
Şekil 6.26: Örnek arazi tipi FV sistem için PVSOL simülasyon yazılımı tarafından üretilen yıllık enerji üretim analizi. 96
Şekil 6.27: Örnek arazi tipi FV sistem için PVSOL simülasyon yazılımı tarafından üretilen yıllık enerji üretim analizi. 99

YÜZER VE ARAZİ KURULUMU FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN TEKNİK VE EKONOMİK AÇIDAN İNCELENMESİ

ÖZET

Enerji; temel ihtiyaçların karşılanmasında, tüm faaliyetlerin gerçekleşmesinde, insanın yaşam süresinin uzatılmasında, hayat standartlarının yükseltilmesinde ve varoluşun devam ettirilmesinde birinci derecede önemli gereksinim olarak kabul edilmektedir. Dünya'da enerji kullanımı günden güne artış göstermektedir. Sürekli olarak artan talep, arz güvenliğini riske düşürmekte ve artık yalnızca işletmelerin değil, dünyanın sürdürülebilirliğini bile tehdit eder hale gelmiştir.

Enerji yatırımları, stratejik ve ticari olmak üzere iki önemli kriter göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmektedir. Stratejik olarak bakıldığında enerji politikasının sürdürülebilir oluşu, enerjide çeşitliliğin sağlanabilmesi ve çevreci bir politikanın izlenmesi devletlerin enerji politikalarında oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Ticari boyutta ise yapılacak olan yatırımın, ticari olarak ilgi çekici olması yatırımcılar için oldukça önemlidir. Günümüzde FV sistemlerden enerji üretimi, bu iki kriteri de sağlayarak hem devletler hem de yatırımcı özel sektör için öncelikli yatırım sahası haline gelmiştir.

FV sistemler içerisinde arazi tipi sistemler, günümüzde kurulu bulunan ve yakın gelecekte kurulması planlanan FV sistem kapasiteleri incelendiğinde açık ara en büyük orana sahiptir. FV sistemlerin hem stratejik hem de ticari öneminin artması ile birlikte arazi tipine ek yeni FV sistem uygulama alanları ortaya çıkmaktadır. Bu uygulama türleri içerisinde, arazi tipi sistemlere tamamlayıcı olması sebebi ile yüzer FV sistemler ön plana çıkmaktadır.

Yüzer FV sistemler, arazi tipi sistemler ile aynı temel enerji üretim prensibine dayanmaktadır. Sistemde kullanılan FV paneller, solar eviriciler ve elektriksel ekipmanlar her iki sistemde de aynıdır. Bu iki sistemi birbirinden ayıran temel farklılık sistemlerin üzerine kurulduğu alandır. Arazi tipi sistemler arazi üzerine monte edilirken, yüzer sistemler ise göletler üzerinde bulunan yüzdürücü ekipmanlar üzerine monte edilmektedirler. Yüzer sistemlerde, çalışma sahasındaki ortam koşulları sebebi ile yüzer sistemi arazi tipi sistemden ayıran özel bir yüzdürücü sistem tasarımına ihtiyaç duyulmaktadır.

Yüzer sistemlerin göletler üzerine kurulması yatırımcılara, arazi tipi sistemlerdeki enerji üretimine ek olarak; arazileri kullanmaması sebebi ile arazi ve buharlaşmayı engellemesi sebebi ile su tasarrufu sağlamaktadır. Bu sebeplerden dolayı yüzer sistemler, arazi tipi sistemlerden sonra ikinci en yaygın kullanılan FV sistem uygulama türüdür.

Yüzer sistem teknolojisinin arazi tipi sistemlere göre daha yeni oluşu ve ortam koşullarının daha fazla değişkenlik göstermesi sebebi ile günümüzde kullanılan simülasyon yazılımlarının yüzer FV sistemler için özelleşmiş bir versiyonu bulunmamaktadır. Bu sebeple arazi tipi FV sistemler için yapılan enerji üretim

analizleri, yüzer sistemler için bu kadar isabetli ve kolay şekilde gerçekleştirilememektedir. Bunun için bu tez çalışması kapsamında, çeşitli yaklaşımlar ile konu ele alınmaktadır.

Bu çalışmalar kapsamında, Konya ili Selçuklu ilçesinde bulunan 120 kW'lık kurulu kapasiteye sahip arazi tipi FV sistemden alınan ölçüm verileri ile simülasyon yazılımından, aynı kurulu güce ve aynı sistem bileşenlerine sahip sistem için elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmadan elde edilen veriler doğrultusunda Konya ve civar bölgeler için PVsyst simülasyon yazılımı için doğrulama katsayısı belirlenmiştir.

Bu doğrulama katsayısı, birbirine lokasyon olarak yakın ve ortam koşulları (ışınım, ortam sıcaklığı, vb. gibi) olarak benzer İçel ili Mut ilçesindeki 10 kW'lık kurulu kapasiteye sahip FV sistem için PVsyst simülasyon yazılımından elde edilen arazi tipi FV sistem verilerini, arazi tipi sistemden alınan ölçüm verisine çevirmek için kullanılmıştır.

Doğrulanarak ölçüm verisine çevrilen 10 kW'lık kurulu güce sahip arazi tipi FV sisteme ait bu simülasyon verileri, aynı lokasyon ve dolayısı ile benzer ortam koşullarındaki (ışınım, ortam sıcaklığı, vb. gibi) 10 kW'lık kurulu güce sahip yüzer FV sistemden alınan veriler ile karşılaştırılmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar, yüzer ve arazi tipi FV sistemleri teknik açıdan incelemek için kullanılmaktadır.

İçel ili Mut ilçesinde gerçekleştirilen teknik inceleme sonuçlarına göre yüzer FV sistem enerji üretiminin, arazi tipi sistemlere göre %0,8 daha fazla olduğu görülmektedir. Bu veriden yola çıkarak bu tez çalışması kapsamında kullanılan yüzer sistem tasarımına sahip bir yüzer FV sistemden üretilen enerjinin, arazi tipi sistem ile yaklaşık olarak aynı olduğu kabul edilebilmektedir.

Teknik incelemeye ek olarak 1 MW ölçeğindeki bir FV sistem için benzer ortam koşullarına sahip yüzer ve arazi tipi FV sistemlerin ekonomik incelemesini bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Arazi tipi sistemlerde, lokasyon değişiminden kaynaklanan maliyet farklılıkları çok az olmasına rağmen arazi maliyeti, sistemin kurulacağı lokasyona bağlı olarak büyük farklılıklar gösterebilmektedir. Bu çalışma kapsamında arazi maliyeti, Türkiye'de FV sistem kurulumuna uygun, en düşük arazi maliyeti olan 4,3 $/m2 baz alınarak gerçekleştirilmiştir. Maliyet analizi incelenirken arazi maliyetinin, sistemin kurulması planlanan lokasyon merkezileştikçe yükseleceği göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu sebepten daha merkezi yerlere gidildikçe artan arazi maliyetleri sebebi ile yüzer FV sistem maliyetleri, arazi tipi sistemlere göre daha uygun hale gelmektedir.

Ekonomik incelemeden elde edilen veriler ışığında, İstanbul ili Büyükçekmece ilçesi için 1 MW'lık kurulu güce sahip yüzer ve arazi tipi FV sistem için ekonomik karşılaştırması çıkırılmıştır. Bu incelemede aynı lokasyon için yüzer FV sistem maliyetinin, arazi tipi sisteme göre %9 daha fazla, yatırım geri dönüş süresinin ise yaklaşık 1 yıl daha uzun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Literatürde, yüzer ve arazi tipi FV sistemleri teknik ve finansal açıdan inceleyen birkaç çalışma bulunsa da, bu iki tip sistemi sayısal olarak karşılaştırabilen çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Tez çalışmasında yapılan incelemeler ile birlikte, dünya üzerindeki en önemli kaynak olan enerjinin verimli ve çevreci kullanılmasının sağlanması amaçlanmaktadır. Enerji ile ilgili yapılan araştırmalar, yine sınırlı kaynak olması açısından oldukça önemli olan su ve arazi ihtiyacı konuları ile de ilişkilendirilmektedir.

TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF FLOATING AND GROUND MOUNTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

SUMMARY

Energy has been one of the driving factors and fundamental requirements of economic and social development throughout human history. With the industrial revolution, energy has been crucial in our daily lives, causing a rapid increase in energy need day by day. Governments need to meet this growing energy demand by producing energy with uninterrupted, reliable, clean and inexpensive ways. They are paying more attention to various renewable energy power plants increasingly, as well as commonly used fossil-fueled power plants. Solar energy, which is examined in this thesis, is one of the most valued and considered types of renewable energy sources, as the production costs are gradually decreasing due to the progress in technology.

An energy investment is decided by considering two important criteria; strategic accuracy and commercial value. Strategically, the sustainable formation of energy policy, the enrichment of energy and the monitoring of an environmental policy are very important for the governments. At the commercial level, the investment to be made is of great commercial importance to investors. Today, it is observed that energy production from renewable resources have provided these two criteria; it became the primary investment field for both the government and the private sector. Within the scope of this thesis, studies on energy production from solar energy - a sub-type of energy production from renewable sources - have been carried out.

Overland photovoltaic systems which are currently established and planned to be established in the near future have by far the largest capacity in all PV industry. In these systems, various simulation softwares are being used with the aim of analyzing the economic benefit before the investment decision is made. The amount of energy production for the desired period of time is calculated by entering the location (latitude-longitude), environmental conditions (such as radiation, temperature, etc.) and data of the components used in the system (PV panel, solar inverter, etc.). With the help of this simulation, rate of the investment return can also be calculated.

With the increase in both strategic and commercial importance of photovoltaic systems, new PV system application areas are emerging in addition to overland PV systems. Among these areas, floating photovoltaic systems come to the forefront since they are a subsidiary of overland PV systems. The idea of floating photovoltaic systems on the water has come to mind in order to remove the relative need for land; as well as saving water to help the environment. In this regard, after the first prototypes were made, a large number of floating solar energy plants were installed, some of which were taken into operation to generate energy.

Floating PV systems have the same basic energy production principle as overland photovoltaic systems. The photovoltaic panels, solar inverters and electrical equipment that is used are the same in both systems. The main difference between the two systems is the area on which they are installed. While land-based systems are assembled on the

land, floating systems are installed on floating equipment on the ponds. Due to the environmental conditions in site, for floating photovoltaic systems, there is need of a special design flotation system which separates the floating PV system from the overland photovoltaic system.

Installation of floating solar systems on ponds causes water saving by preventing water evaporation, in addition to energy production. Because of this outcome, floating systems are the second most commonly used type of photovoltaic system applications after overland systems.

Because of the variant environmental conditions, currently there isn't a specialized version of a simulation software that is being used for floating solar systems in the world. That is the main reason why it's not as easy and accurate to analyze energy production of a floating photovoltaic system as an overland photovoltaic system. Hence, within this thesis study, various approaches are discussed.

Due to the basic advantages mentioned above, in addition to traditional overland photovoltaic systems, there is a need to deeply examine the advantages of floating photovoltaic systems. In this thesis study, floating photovoltaic systems are investigated from the technical and economical point of view, in comparison with overland systems.

Within the scope of these study, the energy production data of a 120 kW capacity overland photovoltaic system in Selcuklu district of Konya (a city in Central Anatolia Region) was compared with the data conducted from the simulation software that has the same power capacity and system components. In accordance with the data from this comparison, a 98,7% verification coefficient was identified, which was suitable for a photovoltaic systems software in Konya region.

Mut district in Icel and Selcuklu district in Konya are close in location (160 km apart) and they have similar environmental conditions. Hence, the verification coefficient mentioned above was used to transform data collected from the photovoltaic system in Mut district, which has a 10 kW capacity, to measurement data. So, the 10 kW installed capacity simulation data which was verified and transformed into measurement data, is being compared to the data collected from a similar location and environment conditions of floating and overland photovoltaic systems (which also has 10 kW installed capacity). These results are used for the technical research of floating and overland photovoltaic systems. The total data of September and October obtained from the photovoltaic system simulation software, which is 3116 kWh, is multiplied by the 98.7% verification coefficient for Konya and the surrounding regions. As a result of this approach, the sum of simulation software production data validated for September and October is 3076 kWh.

According to the technical research that was conducted in Mut district of Icel, it was concluded that the total energy production of the 3101 kWh floating photovoltaic system in September and October was 0.8% more than the 3076 kWh overland photovoltaic system, at the same time period. Based on this data, it's concluded that the floating photovoltaic system that was used in this study and overland photovoltaic system are approximately equal in terms of energy production.

When comparing floating and overland photovoltaic systems in South Korea, although the energy production efficiencies of floating photovoltaic systems are 11% higher than the overland systems, when we look at the reasons for not reaching this conclusion technically, we see;

- Since the tilt angle of the floating PV panels of in İçel is higher than the system investigated in South Korea, the PV panels can not reach the sufficient parallel level to the water and can not be cooled sufficiently by saturation.
- The environment and panel temperatures do not rise sufficiently since the measurement time interval is September - October. When the comparison will be repeated in higher temperatures such as July and August, the floating PV system will increase the energy production efficiency.
- Research on evaporation is not carried out within the context of this study. However, due to the fact that the system is located on the water, when the environment temperature and the amount of radiation rises, it is observed that the radiation reaching the floating PV system was decreasing when going through the water vapor.
- The panel temperatures for the floating PV systems are lower than the panel temperatures in the overland type PV systems, hence the energy losses due to panel temperature decrease.
- It is predicted that the energy production will be lower due to the vapor and therefore the energy production will be higher due to panel cooling. These two conditions have approximately the same effect for the system, that's why the energy production efficiency of the system is constant.

It can be considered that 0.8% energy production efficiency difference between floating and overland PV systems can be the result of the measuring instrument sensitivity. In addition to the technical research, an economical research for 1 MW photovoltaic capacity system was also conducted for floating and overland photovoltaic systems in this thesis.

In overland photovoltaic systems, land costs may vary widely depending on the location where the system is to be installed, although the cost differences due to location change are minimal. Keeping in mind that the average land expenditure for installing a photovoltaic system in Turkey is 4.3 $/m2, it is more profitable to install floating photovoltaic systems; especially if one wants to install an overland photovoltaic system in the more centralized parts in Turkey. As a result, the floating photovoltaic system costs are more convenient than overland photovoltaic systems due to the increased land costs in central locations.

In consideration of the economic research, the economic aspect was compared between two photovoltaic systems that have the same 1 MW capacity; one floating and the other overland, which were installed in Buyukcekmece district in Istanbul. In this research, it was concluded that the floating PV system cost of 1359 k$ for the same location, is 9% higher than that of the 1245 k$ overland system. Furthermore, the investment return period for the overland PV systems is close to 8 years, whereas the this period is almost 9 years in floating PV systems.

In addition to the amount of investment and return periods, since floating PV systems cover the surface of the lakes and dam lakes the floating PV system also provides water gain as well as energy production gain as the evaporation of the lake water is prevented. The amount of evaporation decrease is not included in the scope of this study, so the exact amount is not known. It is predicted that the water problem, which is expected to become a bigger problem in the coming years, will increase the importance and price of water. Therefore, it is foreseen that the main benefit of the floating systems in the near future is not the energy production, but the water gain.

Even though, there are many studies that compare the technical and economic aspects of floating and overland photovoltaic systems, there is limited information on quantitative comparison between these two systems. In addition to the studies carried out in the thesis, it is aimed to provide efficient and environmentally friendly use of energy which is the most important resource on the world. Energy-related research is also associated with water and land needs, which is also very important in terms of the limited resources we have in the world.

1. GİRİŞ

Enerji, insanlık tarihi boyunca ekonomik ve sosyal gelişimin sürükleyici unsuru ve temel gereksinimlerinden biri olmuştur. Sanayi devrimiyle birlikte enerji günlük yaşamımızın değişmez öğelerden biri haline geldiğinden, enerji ihtiyacı da günden güne artış göstermektedir. Devletler artan bu enerji ihtiyacını enerjiyi kesintisiz, güvenilir, temiz ve ucuz yollardan bularak karşılamak durumundadırlar.

Enerji politikalarının stratejik kriterlerinden olan çeşitlilik kriterini sağlayabilmek için devletler, yaygın olarak kullanılan fosil yakıtlı enerji santrallerinin yanı sıra yenilenebilir kaynaklı enerji santrallerine de giderek daha fazla önem vermektedir. Bu çalışmada yer verilen güneş enerjisi, teknolojisi ilerlerken üretim maliyetlerinin giderek düşmesi sebebi ile ilgi çekici yenilenebilir enerji türlerinin başında gelmektedir.

Güneş enerjisine ilgi artış göstermesine rağmen geleneksel arazi tipi fotovoltaik sistemler, üzerine kurulduğu arazi sebebi ile hem çevreye duyarlılık hem de yatırım maliyeti açısından sorgulanmaktadır. Arazi ihtiyacını göreceli olarak ortadan kaldırabilmek için fotovoltaik sistemleri su üzerinde yüzdürme fikri gündeme gelmiştir. Bu konuda ilk prototip çalışmaları yapılmasının ardından sayıca artan miktarda yüzer güneş enerjisi santralinin kurulumuna başlanmış, bir kısmı ise devreye alınarak enerji üretir hale gelmiştir.

Bu çalışma kapsamında, Bölüm 2'de FV sistemlerinin gelişimi, güncel durumu ve teşvik politikalarından, Bölüm 3'de FV sistemi oluşturan öğelerden ve FV sistem tiplerinden, Bölüm 4'de ise bu tez çalışmasında ayrıntılı olarak incelenecek olan yüzer FV sistemler ile ilgili ayrıntılı bilgiye yer verilmiştir. Bu bölümde yüzer FV sistemi oluşturan öğelerden, temel tasarım faktörlerinden, bu sistemlerin Türkiye'deki potansiyelinden ve arazi kurulumuna göre temel avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Bölüm 5'te prototip bir yüzer FV sistemden veriler toplamak için gerçekleştirilen izleme sistemi tasarım ve gerçeklemesi ile ilgili bilgiler paylaşılmaktadır.

Kara kurulumu FV sistem için oluşturulan simülasyon verileri ile karşılaştırması gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 6'da, Bölüm 5'de ayrıntılarına değinilen izleme sisteminden alınan veriler ve PVsyst simülasyon yazılımında alınan veriler incelenmektedir. Bu inceleme doğrultusunda FV sistemlerin iki türü olan yüzer ve arazi tipi FV sistemlerinin enerji üretim verimlerinin karşılaştırılmasına yer verilmiştir.

Son bölüm olan Bölüm 7'de ise elde edilen sonuçlar, teknik ve finansal olmak üzere 2 farklı alanda karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve irdelenmiştir. Sonuçların değerlendirilmesi sonucu yüzer FV sistemlerinin enerji üretim verimlilikleri hakkında önemli bilgilere ulaşılmıştır.

2. GÜNEŞ ENERJİSİ

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci (hidrojen gazının helyuma dönüşmesi) ile açığa çıkan ışıma enerjisidir. Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin şiddeti, yaklaşık olarak 1370 W/m² değerindedir, ancak yeryüzüne ulaşan miktarı atmosferden dolayı 0-1100 W/m² değerleri arasında değişim gösterir [1]. Bu enerjinin dünyaya gelen küçük bir bölümü dahi, insanlığın mevcut enerji tüketiminden kat kat fazladır. Güneş enerjisinden yararlanma konusundaki çalışmalar özellikle 1970'lerden sonra hız kazanmıştır. Güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından azalma göstermiş, çevresel olarak temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir.

Bu tez çalışmasında, güneş enerjisinden elektrik elde etmek için kullanılan fotovoltaik sistemler incelenecektir. Fotovoltaik sistemler, güneş ışığından gelen enerji parçacıklarını elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Bu sistemlerde fotovoltaik paneller, fotovoltaik panellerin içerisinden ise yüksek adetlerde fotovoltaik hücreler kullanılmaktadır [1].

2.1 Fotovoltaik Sistemlerin Tarihsel Gelişimi

Fotovoltaik sözcüğü, Yunanca ışık anlamına gelen “photos” ve elektriğin öncüsü Alessandro Volta’dan gelen “voltaic” sözcüklerinin birleşmesinden gelmektedir. İlk kez 1839 yılında Becquerel, elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğu gözlemleyerek fotovoltaik olayını bulmuştur. Katılarda benzer bir olay ilk olarak selenyum kristalleri üzerinde 1876 yılında G.W. Adams ve R.E. Day tarafından gösterilmiştir. Bunu izleyen yıllarda çalışmalar bakır oksit ve selenyuma dayalı foto diyotların, yaygın olarak fotoğrafçılık alanında ışık metrelerinde kullanılmasını beraberinde getirmiştir. 1914 yılında fotovoltaik diyotların verimliliği %1 değerine ulaşmış ise de gerçek anlamda güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik diyotlar ilk kez 1954 yılında silikon kristali üzerine gerçekleştirilmiştir. Fotovoltaik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edilen bu tarihi izleyen yıllarda araştırmalar ve ilk

tasarımlar, uzay araçlarında kullanılacak güç sistemleri için yapılmıştır. Fotovoltaik güç sistemleri 1960'ların başından beri uzay çalışmaları için güvenilir bir kaynak olmayı sürdürmektedir [2].

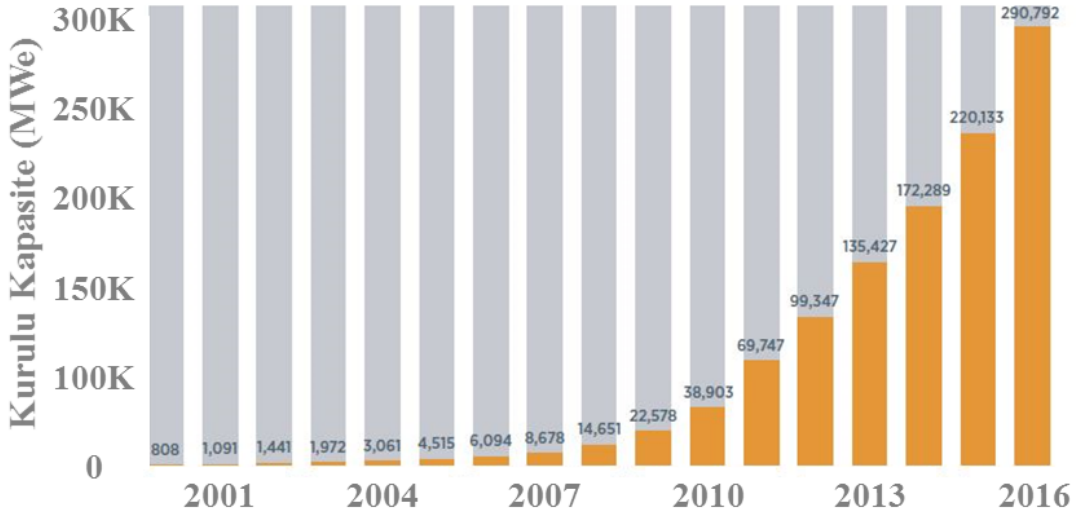
Güneş pillerinin yeryüzünde de elektriksel güç sistemi olarak kullanılabilmesine yönelik araştırma ve geliştirme çabaları 1954'ler de başlamış olmasına karşın, gerçek anlamda ilgi 1973 yılındaki "1. petrol bunalımı"nı izleyen yıllarda olmuştur. Amerika' da, Avrupa'da, Japonya'da büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırma ve geliştirme projeleri başlatılmıştır. Bir yandan uzay çalışmalarında kendini ispatlamış silikon kristaline dayalı güneş pillerinin verimliliğini artırma çabaları ve diğer yandan alternatif olmak üzere çok daha az yarı iletken malzemeye gerek duyulan ve bu neden ile daha ucuza üretilebilecek ince film güneş pilleri üzerindeki çalışmalara hız verilmiştir.

1975'ten sonraki ilk 15 yılda özellikle uzay programları için silikon güneş pillerinin kapasitesi ortalama olarak yılda 100 kW civarındaydı. Bu rakam 1986 yılında, yıllık 28,6 MW'a ulaştı.

Güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirme, basit, çevre dostu olan fotovoltaik sistemlerin araştırılması ve geliştirilmesi, maliyetinin düşürülerek yaygınlaştırılması misyonu uzun yıllar üniversitelerin yüklendiği ve yürüttüğü bir görev olmuş ve bu nedenle kamuoyunda hep laboratuarda kalan bir çalışma olarak değerlendirilmiştir. Ancak son yirmi yılda dünya genelinde çevre konusunda duyarlılığın artmasına bağlı olarak kamuoyundan gelen baskı, çok uluslu büyük şirketleri fosile dayalı olmayan yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları konusunda çalışmalar yapmaya zorlamışlardır. Büyük şirketlerin devreye girmesiyle fotovoltaik piller konusundaki teknolojik gelişmeler ve güç sistemlerine artan talep ve buna bağlı olarak büyüyen üretim kapasitesi, maliyetlerin hızla düşmesini de beraberinde getirmiştir. Yakın geçmişe kadar alışıla gelmiş elektrik enerjisi üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında çok pahalı olarak değerlendirilen fotovoltaik güç sistemleri, artık günümüzde güç üretimine katkı sağlayabilecek sistemler olarak değerlendirilmektedir. Özellikle elektrik enerjisi üretiminde hesaba katılmayan ve görünmeyen maliyet olarak değerlendirilebilecek sosyal maliyet göz önüne alındığında FV sistemler, fosil yakıta dayalı sistemlerden daha ekonomik olarak değerlendirilebilmektedir.

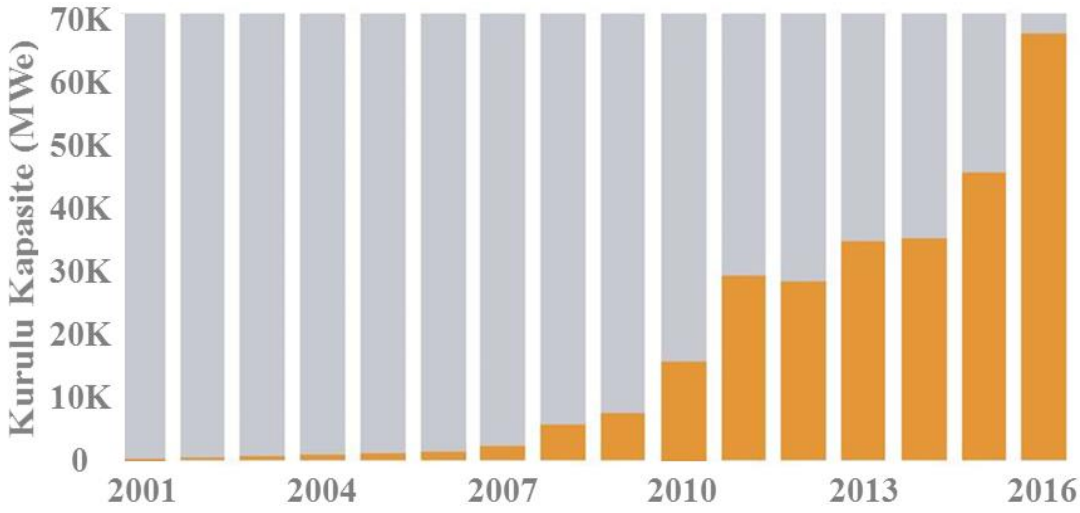
2.2 Dünya'da Fotovoltaik Sistemler

2010 yılında 38,9 GWe olan dünya üzerindeki FV kurulu kapasitesi, 2016 yılına gelindiğinde 290,8 GWe'ye ulaşmıştır. Bu da geçen 6 yılda, 7 kattan fazla kurulu güç anlamına gelmektedir. Dünya'da 2000 – 2016 yılları arasındaki FV kurulu kapasitesi ve FV kapasite artış miktarları Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de verilmektedir [3].



Şekil 2.1: Dünya'da 2000 – 2016 yılları arasındaki FV kurulu kapasite miktarları.

2015 yılında, dünya genelinde FV sistemlerden elektrik üretimi, toplam yenilenebilir enerji kaynaklarından eletrik üretiminin %30'una ulaşmıştır. Buna ek olarak 2015 yılında yapılan enerji yatırımlarının %50'sinin FV üzerine yapılıyor olması da bu teknolojinin yakın gelecekte ne denli hızla artacağının bir habercisidir.

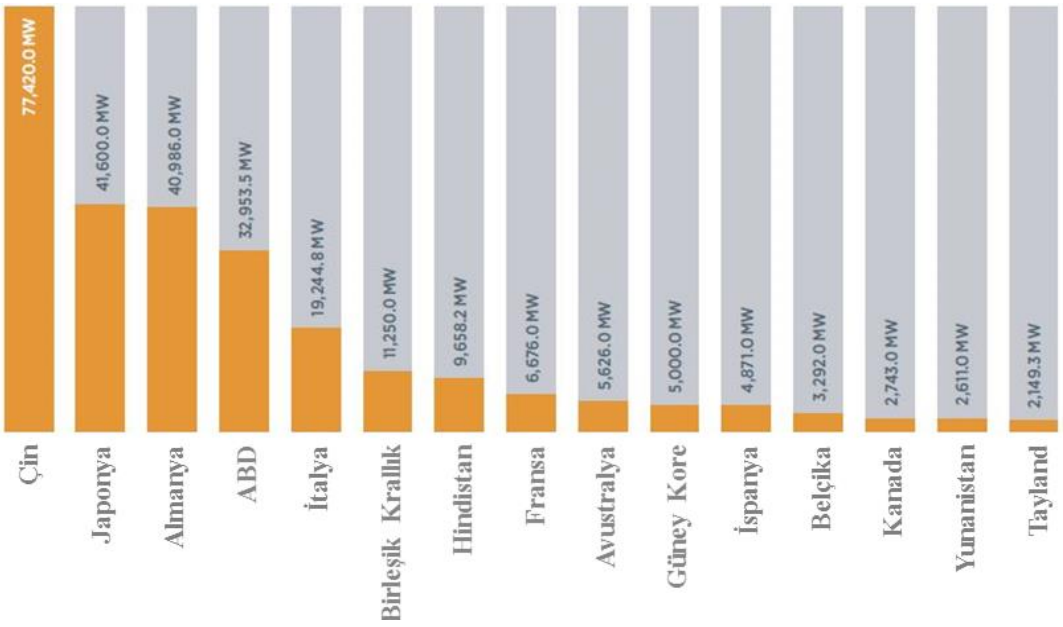


Şekil 2.2: Dünya'da 2001 – 2016 yılları arasındaki FV kapasite artış miktarları.

2011 yılında yalnızca 10 ülke 1 GWe'den fazla FV kurulu kapasitesine sahipken, bu rakam 2016 yılı itibari ile 27'ye yükselmiştir. 10 GWe kurulu kapasite seviyesi için bakıldığında 2011 yılında 2 olan ülke sayısı, 2016 yılı itibari ile ise 7'ye yükselmiştir. Yalnızca bu artışlar bile küresel FV pazarındaki büyümenin ne denli hızlı gerçekleştiğini göstermektedir. FV kurulu kapasitesinin yüzdesel olarak bu denli hızlı artış göstermesinin temel sebepleri;

- Kendinden önceki yıllardaki baz rakamların düşük olması
- Dünya'daki elektrik ihtiyacının hızla artması ve bu ihtiyaca cevap vermek için emre amade enerji kaynakların kurulumuna devam edilmesi
- FV sistem bileşen maliyetlerinin düşüşü
- Hem şebeke bağlı hem de şebekeden ayrı çalışabilmesi ve ihtiyaç duyulan kapasite artışının hızlıca gerçekleştirilebilmesi gibi sebeplere dayandırılabilmektedir.

FV sistemlerin, teknolojisi bakımından ölçeklenebilir yapısı sayesinde yalnızca gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler tarafından değil, az gelişmiş ülkeler tarafından da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu enerji türü, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde enerji çeşitliliğin sağlanması için kullanılırken, az gelişmiş ülkelerde ise aydınlatma amaçlı olarak kullanılmaktadır. En büyük kurulu FV gücüne sahip 15 ülke Şekil 2.3Şekil 2.3:'de verilmektedir [2].



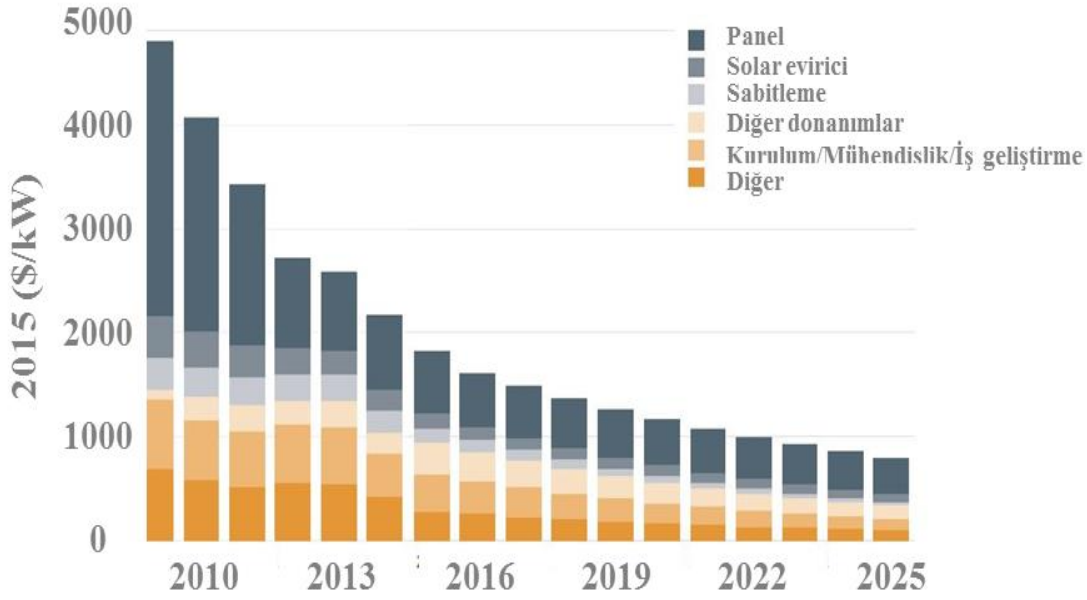
Şekil 2.3: 2016 yılı verilerine göre en büyük kurulu FV kapasitesine sahip ülkeler.

FV sistemler, kurulu güce göre diğer enerji kaynaklarına göre daha geri planda kalsa da İtalya (%7,8), Yunanistan (%6,5), Almanya (%6,4) başta olmak üzere bazı ülkelerde toplam kurulu güç içerisinde önemli bir yere sahiptir.

FV sistemlerin kurulu kapasiteye katkısının yanı sıra büyük bir çevresel etkisi de söz konusudur. Mevcut kurulu kapasite sebebi ile küresel ölçekte yıllık 200-300 milyon tonluk CO_2 emisyon salınımı engellenmektedir. Ölçeği anlayabilmek adına bir örnek vermek gerekirse bu rakam, 2014 yılında Arjantin'in yapmış olduğu CO_2 salınımına eşit miktardadır.

Geçtiğimiz yıllarda hızla düşen ürün ve kurulum maliyetleri ve devletlerin teşvik politikaları ile birlikte kurulumlar hız kazanmaktadır. Bu da üretim ölçeğini arttırarak, fiyatların ölçek ekonomisi ve yeni teknolojik gelişmeler sayesinde daha da düşmesini sağlamaktadır. Düşen fiyatlar, kapasite artışını, dolayısı ile üretim miktarı artışını tetiklemektedir. Artan üretim miktarı ise ölçek ekonomisi ile üretim maliyetlerinin daha da düşmesine sebep olmaktadır. Bu da kendi içerisinde bir döngü oluşturmaktadır.

Şekil 2.4'te görülebileceği üzere dünya genelinde 2009 – 2016 yılları arasında, FV sistemi oluşturan alt malzemelerin maliyetlerinde önemli ölçüde düşüşler yaşanmıştır. Aynı grafik baz alınarak 2017 yılı ve sonrasındaki 10 yıllık dönemde de bu maliyet düşüşlerinin devam edileceği öngörülmektedir.



Şekil 2.4: Dünya'da 2009 – 2016 yılları arasında gerçekleşen ve 2017 – 2025 yılları arasında gerçekleşmesi öngörülen FV sistem maliyet kırılımları.

FV sistem bileşenlerindeki maliyet düşüşlerinin FV sistemlerin yaygınlaşmasındaki en öncelikli kaldıraç olduğu düşünüldüğünde, öngörülen dramatik maliyet düşüşleri ile birlikte FV sistemlerin kurulum kapasitesi artışlarının daha da hızlanacağı öngörülmektedir.

Şebeke ölçeğindeki FV sistemlerde ise toplam kurulum maliyetine ait küresel ortalaması 2015 yılında yaklaşık 1,8 $/W'dır. Bu rakamın 2025 yılına kadar yaklaşık %57'lik düşüş ile yaklaşık 0,8 $/W'a ulaşabileceği tahmin edilmektedir. Maliyet etkenlerindeki belirsizlik göz önüne alındığında, 2015 yılı rakamlarına göre %43 – %65 arasında düşüş olacağı öngörülmektedir. Geçmişe baktığımızda FV sistem maliyet düşüşlerinin büyük bir kısmının FV panel maliyet düşüşleri ile doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir. Günümüzdeki 0,5 $/W – 0,7 $/W aralığındaki modül fiyatlarının yakın gelecekte düşeceği, FV sistem kurulumları çok daha avantajlı hale geleceği ve kurulu kapasitenin daha da hızlı artacağı öngörülmektedir.

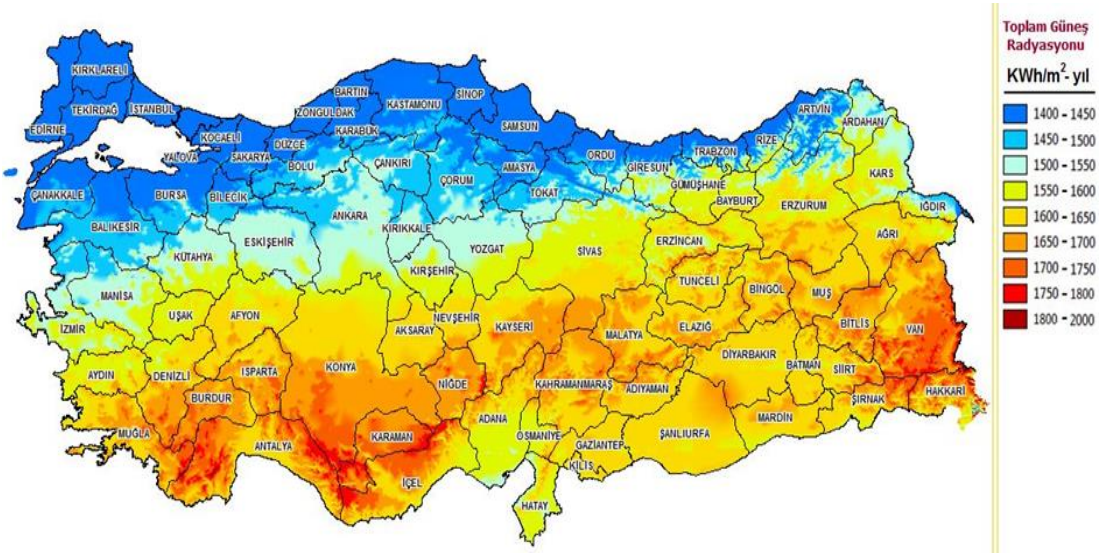
Almanya, Avustralya, Danimarka, İspanya, İtalya, ABD'nin bir kısmı ve bazı ada ülkeleri başta olmak üzere küçük boyutlarda dağıtık FV sistemler kurmak, hali hazırda şebekeden enerji alımına göre daha uygun maliyetli olabilmektedir. Özellikle şebeke bağımsız sistemlerde en uygun maliyetli elektrik üretim sistemi genellikle FV sistemler olmaktadır. Bu sebepten çatı uygulamaları gibi küçük uygulamalarının yanı sıra, küçük ölçekli şebekeler ve büyük ölçekli elektrik üretim santralleri de kurulmaya devam edecektir.

Bunlara ek olarak FV pazarındaki yeni iş modelleri, lokal girişimcileri destekleyerek, gelişmiş ülkelerin yanı sıra gelişmekte olan ülkelerin de bu konuda hız kazanmasında oldukça önemli bir rol oynamaktadır.

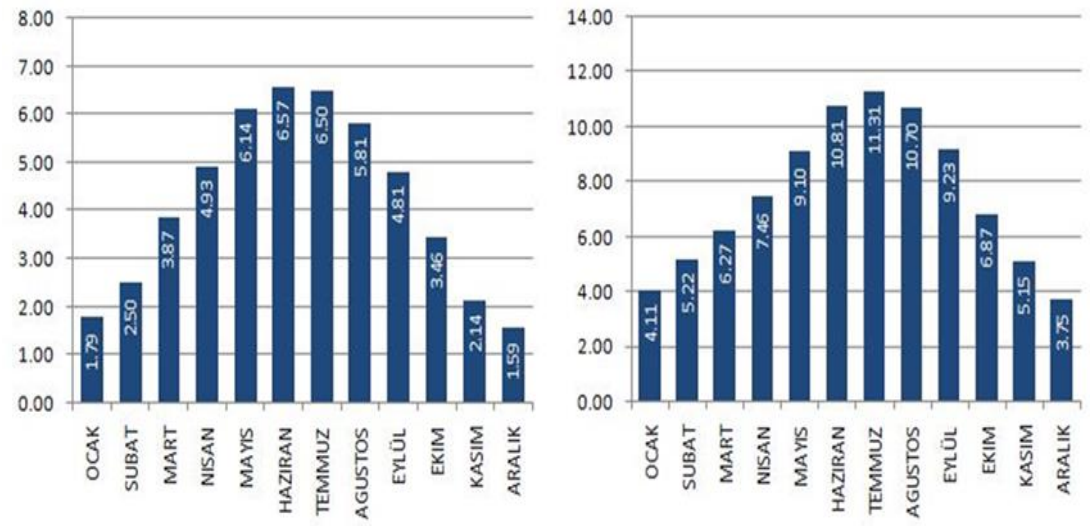
2.3 Türkiye'de Fotovoltaik Sistemler

Türkiye, 781.000 km^2 yüzey alanıyla, dünya üzerinde 36° – 42° kuzey enlemleri ve 26° – 45° doğu boylamları arasında bulunmaktadır. Elektrik İşleri Etüd İdaresi (EİE) ve Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) tarafından 1985 – 2006 yılları arasında ölçülen güneşlenme süresi ve ışınım şiddeti verilerinden yararlanarak Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) oluşturulmuştur. Bu atlasa göre Türkiye'nin, yıllık toplam gelen güneş enerjisi miktarının 1527 kWh/m^2-yıl ve yıllık toplam güneşlenme süresinin 2737 saat olduğu tespit edilmiştir. Günlük olarak

baktığımızda bu rakamlar 4,2 kWh/m²'lik güneş enerjisi gücüne ve 7,5 saatlik güneşlenme süresine denk gelmektedir. Bu da Türkiye'de, yılda 114 tam günün güneşli geçmesi ile eşit olmaktadır. Türkiye'nin aylara göre global ışınım değerleri, güneşlenme süreleri ve FV panel tipine göre birim alanda üretilebilecek yıllık enerji miktarlarına ait grafikler Şekil 2.5, Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'de verilmektedir [4].

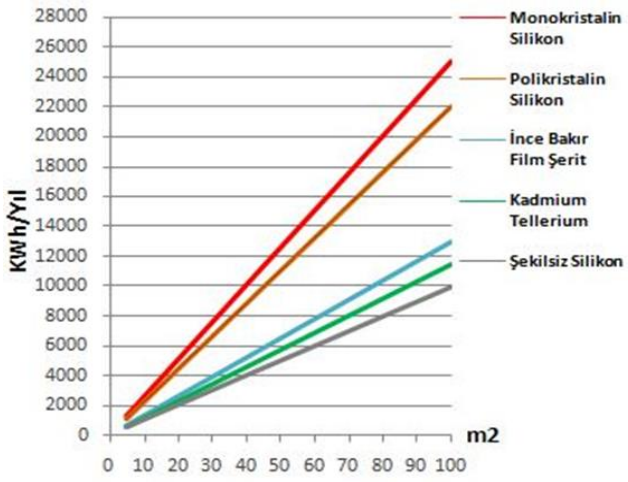


Şekil 2.5: Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası [GEPA].



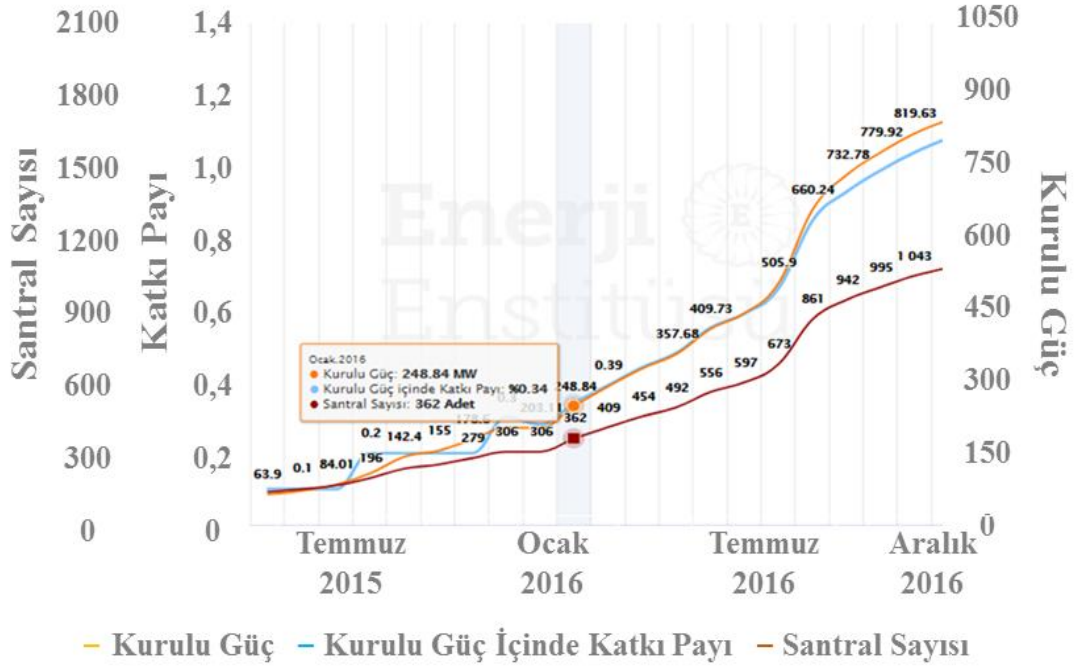
Şekil 2.6: Türkiye'nin aylara göre global radyasyon değerleri (kWh/m^2-gün) ve ortalama güneşlenme süreleri (saat).

Bu değerlere göre Türkiye'nin en çok ve en az güneş enerjisi üretilecek ayları sırası ile Temmuz ve Aralık olmaktadır. Bölgeler arasında ise en çok güneş enerjisi potansiyeli olan bölgelerin başında Güneydoğu Anadolu Bölgesi ve Akdeniz Bölgesi gelmektedir.



Şekil 2.7: Türkiye'de FV panel tipine göre birim alanda üretilebilecek yıllık enerji miktarları (kWh/yıl).

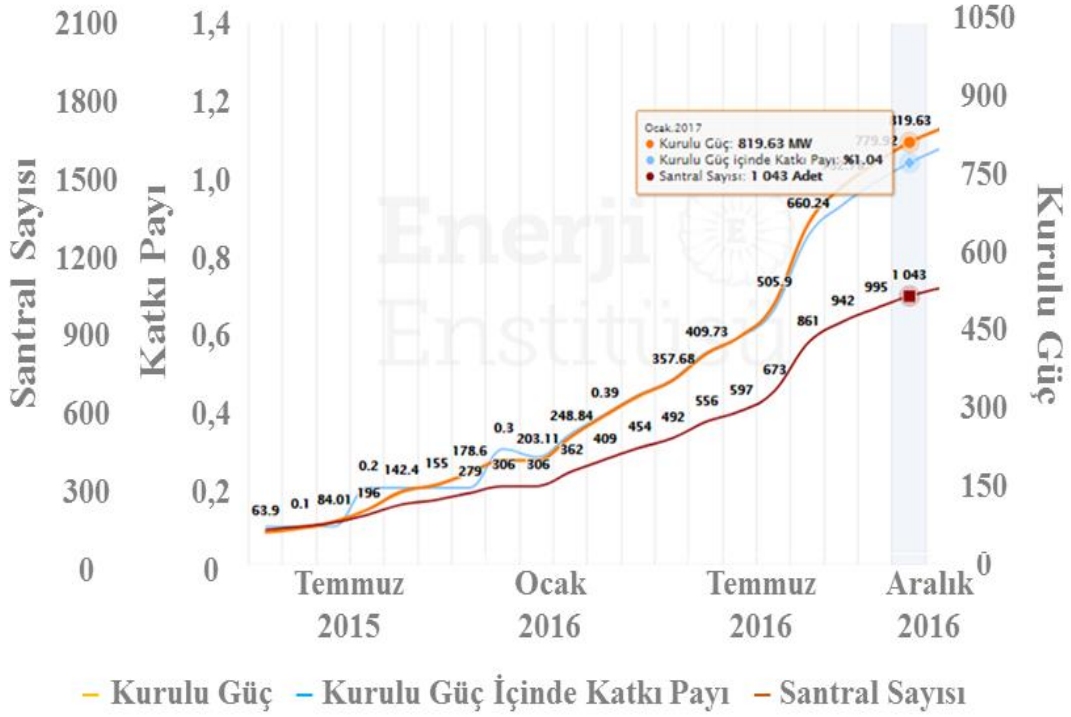
Türkiye, güneş enerjisi potansiyeli ve bu potansiyelin bölgelere göre dağılımı yönünden, her türlü güneş enerjisi uygulamalarına müsait bir ülke sayılabilir. Topoğrafyanın, yerleşim yerlerinin ve tarım vb. alanların dağılımı ve ulaşım gibi kısıtlayıcı faktörlerin, bu alanın ancak %1'inin kullanılmasına imkan sağlayacağı kabul edildiğinde, Türkiye için güneş enerjisi gerçek kullanma alanı yaklaşık 7,8 milyon m^2 olmaktadır. Şekil 2.8'de 2016 yılı, Şekil 2.9'da ise 2017 yılı Ocak ayı itibari ile kurulu FV kapasiteleri gösterilmektedir.



Şekil 2.8: Türkiye'nin 2016 yılı Ocak ayı itibari ile lisanssız FV kurulu gücü ve santral sayısı.

2016 ve 2017 yıllarına ait Ocak ayı kurulu FV kapasite verileri karşılaştırıldığında, 1 yıl içerisinde Türkiye'nin FV kurulu gücünün 249 MWe'dan 820 MWe'a, lisanssız FV santral sayısının ise 362'den 1043'e yükseldiği görülmektedir. 2 adet lisanslı FV santrali ile birlikte Türkiye'nin toplam kurulu gücü 833 MWe'a ulaşmıştır [5].

Bu hızlı artışa rağmen 2017 yılı Ocak ayı verisine göre FV santrallerin toplam kurulu gücü, Türkiye'nin toplam kurulu gücünün ancak %1'ini oluşturabilmektedir. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin, dünya potansiyelinin %1,2'si olduğu düşünüldüğünde Türkiye'nin FV alanında atması gereken adımları olduğu ortadadır.



Şekil 2.9: Türkiye'nin 2017 yılı Ocak ayı itibari ile lisanssız FV kurulu gücü ve santral sayısı.

Türkiye'de tüketilen enerjinin yaklaşık %73'ü dış kaynaklı olup, enerjide dışa bağımlılığımız her geçen gün artmaktadır. Bu bağımlılığın en çarpıcı göstergesi elektrik enerjisi üretiminde kullanılan doğalgaz miktarıdır. Dünya elektrik üretiminde doğalgazın payı yaklaşık %20 iken, bu oran 2017 yılı Temmuz sonu verilerine göre Türkiye'de yaklaşık %33'dür [1]. Türkiye'nin elektrik enerjisi üretiminde kullanılabilecek başta güneş olmak üzere hidrolik, jeotermal, rüzgar ve biyogaz gibi önemli miktarda yenilenebilir enerji kaynağı potansiyeli göz önüne alınarak Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam üretim içerisindeki payının 2023

yılında en az %30 olması hedeflenmektedir [6]. Ülkemizde %30 olarak belirlenen bu hedef, Avrupa Birliği ülkelerinde 2020'de %20 olarak belirlenmiştir [7].

Güneş'ten elektrik elde edilmesi konusunda ise İtalya (%7,8), Yunanistan (%6,5), Almanya (%6,4) gibi Avrupalı ülkelerin başı çektiği düşünüldüğünde Türkiye'nin bu konudaki yatırımlarına devam etmesi gerektiği görülmektedir.

Türkiye'nin koyduğu %30'luk hedefi yerine getirdiğini ya da bu hedefe yaklaştığını öngördüğümüzde, enerjide fosil yakıtlara ve dışa bağımlılık azaltılabileceği gibi iletim ve dağıtım kayıpları da aşağılara çekilebilecektir.

Dünya'daki FV sistemler konusunda önemli ülkeleri incelediğimizde, kurulu FV kapasitelerinin önemli bir bölümün çatı üstü FV sistem kurulumlardan geldiğini görmekteyiz. Buna ek olarak bu pazarlarda, FV pazarının ağırlıklı olarak çatı üstü kurulumlar ile başladığını, daha sonra büyük ölçekli sistemlere geçişler yapıldığı görülmektedir.

Çizelge 2.1'de küresel çapta büyük ölçekli FV pazarlarındaki çatı üstü kurulum kapasiteleri ve bu kapasitenin toplam kapasiteye oranı görülmektedir.

Çizelge 2.1 : Büyük ölçekli küresel FV pazarlarında çatı üstü kurulum kapasitelerinin, toplam kapasiteye oranı.

Ülke	Kurulu FV Kapasite (GW)	Çatı Üstü Kurulu FV Kapasitesi (GW)	Çatı Üstü Kurulu Kapasite Oranı (%)
Almanya	38	22,8	60
Japonya	24	8,4	35
ABD	20	8,0	40
Avustralya	4	3,2	80
Toplam	86	42,4	49

Örnek olarak; 2016 yılı itibari ile 9 GW'lık kurulu kapasitesi bulunan, 4 GW'lık FV kapasite artış yatırımı devam eden ve dünyadaki yedinci en büyük FV kurulu kapasitesine sahip ülke olan Hindistan'ın 2022 yılı FV politikası incelenebilir.

Hindistan 2022 yılına kadar mevcut kurulu FV kapasitesini 11'e katlayarak 100 GW'lık kurulu FV kapasitesine ulaşmayı amaçlamaktadır.

Hindistan, yapmayı planladığı bu yatırımları çatı üstü kurulum ve büyük ölçekli kurulumlar olarak iki ana gruba ayırmaktadır. 2022 yılında kadar ulaşmak istediği 100

GW'lık kurulu FV kapasitesi içerisinde 60 GW'lık büyük ölçekli projelerin ve 40 GW'lık da çatı üstü kurulum FV kapasitesinin olmasını hedeflemektedir.

Böylelikle ülke enerji potikasında yalnızca büyük ölçekli santral yatırımcıları olan kurumsal müşterileri değil, aynı zamanda çatısına kurulum yapmak isteyebilecek bireysel müşterileri de bu politikaya dahil etmiş olmaktadır. Ek olarak çatı üstü FV sistem kurulumları ile enerjinin üretildiği yerde kullanılmasını teşvik etmektedir. İletimde kullanılan sistem elemanlarını büyütmeden daha büyük kurulu kapasiteye ulaşma ve iletimde meydana gelen kayıpları minimize etme avantajı yakalamaktadır.

Bunu sağlayabilmek için Hindistan, ticari olmayan çatı üstü FV kurulumlarına, kurulumun %30'u kadar teşvik uygulamaktadır.

Türkiye'de ise bu konu henüz öncelikli konular arasında yer almadığından enerji ile ilgili eylem planları içerisinde yer almamaktadır. Sahadaki uygulamalara baktığımızda ise birkaç münferit örnek dışında çatı üstü FV sistem kurulumları henüz hız kazanmış durumda olmadığı görülmektedir.

2.4 Fotovoltaik Sistem Teşvik Modelleri

Enerji politikaları gereği ülkelerin FV sistemlere ilgisi giderek artmaktadır. 2000'li yıllarda yüksek gelir seviyesindeki ülkelerde başlayan yenilenebilir enerjiden üretim yapma trendi, günümüzde üst orta hatta alt orta gelir seviyesindeki ülkelere de sıçramış durumdadır. Durum böyle iken ülkeler, yatırımcının ilgisini geleneksel enerji üretim sistemlerinden, yenilenebilir enerji sistemlerine kaydırabilmek için çeşitli teşvik modelleri kullanmaktadırlar.

Sıklıkla kullanılan yenilenebilir enerji teşvik modelleri; düzenleyici politikalar ile mali teşvikler ve kamu finansmanı olarak iki ana başlıkta incelenmektedir [8].

2.4.1 Düzenleyici Politikalar

Küresel çapta başlıca kullanılan düzenli politikalar türleri: Alım garantisi/prim ödemesi ve net ölçümdür.

a. Alım Garantisi (Feed-in Tariffs (FiT))

Yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanmayı teşvik etmek için planlanmış bir teşvik mekanizmasıdır. Alım garantisi adı verilen bu teşvik yöntemi ile kamuya ait elektrik şirketleri, desteklenen yenilenebilir kaynaklarından üretilen elektriği, üretim

maliyetini karşılanmasına destek olmak amacı ile piyasa fiyatının üzerinde satın almaktadırlar. Bu sistemde desteklenen yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektriğe, şebekede önceliğe verilmektedir.

Bu destek türünde üreticiler, genel olarak ürettikleri elektrik için 10 – 15 yıl gibi uzun dönemli anlaşma imzalamaktadırlar. Bu enstrümanlar, yenilenebilir enerjiden elektrik üretiminin gelişmesine olanak tanımakta ve yatırımcıların yatırımlarından makul bir geri dönüş almasını sağlamaktadır.

Alım garantisi, yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretmenin, geleneksel sistemlerden elektrik üretme ile ekonomik olarak rekabet edebilir seviyeye gelene kadar, yenilenebilir kaynaklarının hayatını sürdürebilmesi için uygulanan desteklerin başında gelmektedir.

Alım garantisi uygulayan ülkelere örnek olarak Türkiye'yi verebiliriz. Türkiye, yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektriğe 13,3 $ cent/kWh fiyat tarifesi üzerinden alım garantisi uygulamaktadır.

b. Mahsuplaşma (Net metering)

FV sistem tarafından üretilip şebekeye aktarılan elektrik, bu yapıya uygun cihazlar ile ölçülerek alış ve satış olmak üzere iki yönlü olarak hesaplanmaktadır. Şebekeye yapılan satış miktarı, şebekeden yapılan alış miktarından düşük ise aradaki alış – satış farkı kadar kullanım birim fiyat ile çarpılarak faturalanmakta, yüksek ise aradaki satış – alış farkı kadar kullanım yine aynı birim fiyat ile çarpılarak sistemden alacaklı duruma gelinmektedir. Bu yöntemde, sistemden alım yapılan birim fiyat ile sisteme satış yapılan birim fiyat sabit tutulmaktadır.

Bu teşvik programı ile;

- Atıl kapasitenin bu yöntem ile değerlendirilmesini sağlayarak verimliliği arttırılmaktadır.
- İhtiyaç duyulan elektrik ihtiyacının yakındaki kaynak tarafından karşılanmasını sağlayarak potansiyel iletim kayıpları azaltılmaktadır.
- Yeni yatırımlar için sayıca fazla olan küçük ölçekli yatırımcılar motive edilmektedir.

En yüksek kurulu FV kapasitesine sahip beş ülkenin dördünde (Japonya, Almanya, ABD ve İtalya) bu teşvik programı uygulanmaktadır.

2.4.2 Mali Teşvikler ve Kamu Finansmanı

a. Yatırım Teşvikleri (Investment Subsidies)

Yatırımcının, yatırımda oluşabilecek dezavantajlarını azaltmak yada ortadan kaldırmak için yatırımcıya mali avantaj sağlayan teşvik yöntemidir. Yatırımın bir kısmının yatırımcıya geri ödenmesi ya da normal ticari kredi koşullarından daha iyi koşullar ile finansman sağlanması gibi direk yollar ile yapılabildiği gibi vergi veya gümrük muafiyeti gibi dolaylı yollar ile de teşvik sağlanabilmektedir.

Ortak yatırım teşvik programları olmakla beraber ülkenin enerji politikası ile doğrudan ilişkili olarak ülkeden ülkeye büyük değişiklikler gösterebilmektedir.

Yatırım Teşvikleri

Bu teşvik türünde devlet, yatırımın belli bir oranı kadar hibe sağlayarak ya da hızlandırmış amortisman gibi finansal argümanlar kullanarak yatırımcının üzerindeki yükü azaltmakta ve böylece ülkeye daha fazla FV sistem yatırımı çekmeyi amaçlamaktadır.

Örnek olarak; Hindistan, daha fazla FV sistem yatırımını ülkeye çekebilmek için hızlandırılmış amortisman teşviği sağlayan onlarca ülkeden biridir.

Hükümet Destekli Kredi

Bu teşvik türünde devlet veya devlet destekli uluslar arası kuruluşlar, yatırım geri dönüş süresini kısaltılabilmesi ve yatırımcıya daha kolay bir ödeme planı sunulması için normal ticari kredilerden daha cazip ödeme koşullarında krediler sağlamaktadır.

Örnek olarak; Almanya devleti tarafında başlatılan KfW Programları, Almanya'da FV sistem yatırımı yapacak olan yatırımcılara fon desteği sağlamaktadır.

Vergi Muafiyetleri

Bu teşvik türünde devlet, FV sistem yatırımcılarını teşvik etmek için, FV sistem kurulumu, işletimi ve bu sistemlerden üretilen elektriğin satışından oluşan vergilerde yatırımcılara çeşitli avantajlar sağlamaktadır.

Örnek olarak; Çin devleti, Çin devlet sınırları içerisinde FV sistem yatırımı yapan şirketlere kurumlar vergisi ve KDV avantajı sunmaktadır.

Gümrük Muafiyetleri

Bu teşvik türünde devlet, güneş paneli gibi donanımların ithalat ve ihracatından kaynaklanan gümrük vergilerine muafiyet uygulayabilmektedirler. Yatırımcının

ödemekle hükümlü olduğu bu vergilerin, devletin onayı ile ödenmemesi de firmalara sağlanan teşvikler arasında yer almaktadır.

Örnek olarak; Hindistan, kurulu FV kapasitesini hızlıca arttırmak istemektedir. Bunun için FV sistem yatırımı yapan yatırımcılara vergi ve gümrük muafiyetleri uygulamaktadır.

b. Güneşten Yenilenebilir Enerji Üretim Kredisi (Solar Renewable Energy Credits (SREC)

Güneşten üretilen elektrik teşvik fiyatını belirlemek için bir pazar mekanizması kurulmuştur. Bu mekanizmada üreticiye, yenilenebilir enerji üretim veya tüketim hedefi belirlenmiştir. Bu belirlenen hedef rakamlar üzerinde dağıtım şirketi, yenilenebilir kaynaktan üretilen bu elektriği satın almak ile yükümlüdür. Aksi takdirde para cezası ile karşı karşıya kalır.

Üretici, üretilen her 1000 kWh elektrik için 1 SREC alır. SREC'leri, elektrik fiyatına göre değişim gösteren bir sanal para birimi olarak düşünebiliriz. Dolayısı ile üretici, yenilenebilir kaynaktan yaptığı her 1000 kWh karşılığında, elektrik ödemesine ek olarak ödüllendirimiş olur.

FV sistemlerin uygun arazi maliyetine sahip yerlere kurulabilmesi sebebi ile SREC sistemi teoride en ucuz yenilenebilir enerjiyi sunar. SREC'lerin fiyatının zamanla değişebilmesi sebebi ile değerli evrak gibi el değiştirerek kullanılabilmektedir.

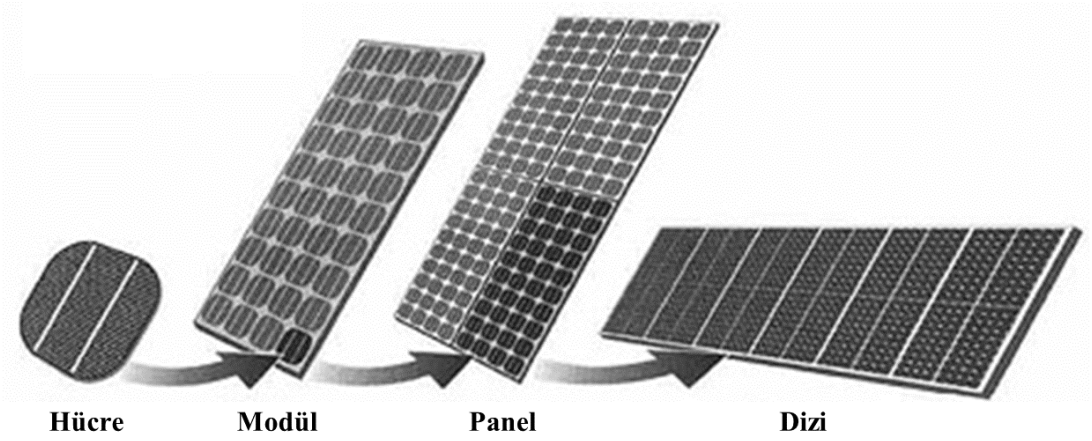
Örnek olarak; bu teşvik türü ABD'de oldukça aktif kullanılmaktadır.

3. FOTOVOLTAİK SİSTEMİ OLUŞTURAN ÖĞELER

FV sistemi oluşturan öğeler, FV panel, panel taşıyıcı sistem, elektriksel bağlantı ve solar evirici olmak üzere 4 ana başlık altında toplanmaktadır. Sistemin şebekeden bağımsız olarak kurulabilmesi için, sistemi oluşturan yukarıdaki ana öğelere ek olarak opsiyonel olarak batarya ve şarj kontrol ünitesi kullanılabilmektedir. Tüm projelerde kullanılmamasına karşın bu ekipmana ait teknik detaylara da aşağıda yer verilmektedir.

3.1 Fotovoltaik Panel

FV panel, güneşten gelen ışınımı doğrudan elektrik akımına dönüştüren bir araçtır. Yarı iletken bir diyot olarak çalışan güneş hücresi, güneş ışığının taşıdığı enerjiyi iç fotoelektrik reaksiyondan faydalanarak doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür. Tek bir FV hücreden elde edilen enerji oldukça azdır. Bu nedenle hücreler seri veya paralel bağlanarak modülleri, modüller de birleşerek panelleri oluştururlar. Büyük miktarlarda elektrik üretmek için paneller de birbirine bağlanarak FV dizisini meydana getirirler. Solar hücreden, FV diziye kadar olan yapı Şekil 3.1'deki gibidir.



Şekil 3.1: Fotovoltaik hücrelerin fotovoltaik modülü, FV modüllerin FV panelleri, FV panellerin de FV dizilerini oluşturması.

FV hücrelerde elektrik üreten diğer cihazların aksine hareketli parçalar olmadığından teorik ömürleri sonsuzdur.

3.1.1 Solar Hücresine Göre Fotovoltaik Panel Tipleri

Solar hücresinin performansı, güneş ışığını elektriğe döndürmedeki verimi ile ölçülür. Tipik bir ticari FV modülün verimi %16,5 civarındadır. Başka deyişle güneş modülüne gelen her güneş ışınının yaklaşık olarak 1/6'sı elektriğe dönüştürülür. Hali hazırda FV hücre üreticilerinin en önemli amacı FV hücre birim maliyetlerini düşürürken, modül verimlerinin arttırılmasıdır. FV hücrelerine göre panel verimlilikleri ve kW'lık kapasite başına kapladıkları alan toplu olarak Çizelge 3.1'de verilmiştir [1].

Çizelge 3.1: FV hücre tipine göre FV panel verimlilikleri ve kW'lık kapasite başına kapladıkları alan.

Hücre Tipi Ailesi	Hücre Tipi	Modül Verimliliği (%)	kW Başına Gereken Alan (m^2)
Kristal Silisyum	Tekli kristal	13-19	7
	Çoklu kristal	11-15	8
İnce Film	Amorf Silisyum	4-8	15
	Kadmiyum Tellurid	10-11	9
	Bakır İndiyum Galyum Diselenid	7-11	10

Fotovoltaik hücreleri 3 temel teknoloji alanında incelenebilir [12]. Bunlar;

1. Kristal silisyum
2. İnce film
3. Diğerleri (Çok eklemli, Organik, Boya duyarlı)

3.1.1.1 Kristal Silisyum

Yeryüzünde en çok bulunan mineral silisyum dioksittir (SiO_2). Fotovoltaik piller için saf silisyum üretimi SiO_2'in silis veya kum formundaki halini bulmakla başlar. Demir, alüminyum ve diğer metallerde az miktarda silis bulunur.

SiO_2 kömür formundaki C ile tepkimeye sokulur ve 1500 – 2000 °C'lik ark fırınlarında ısıtılır [11].

$SiO_2 + C \rightarrow Si + CO_2$

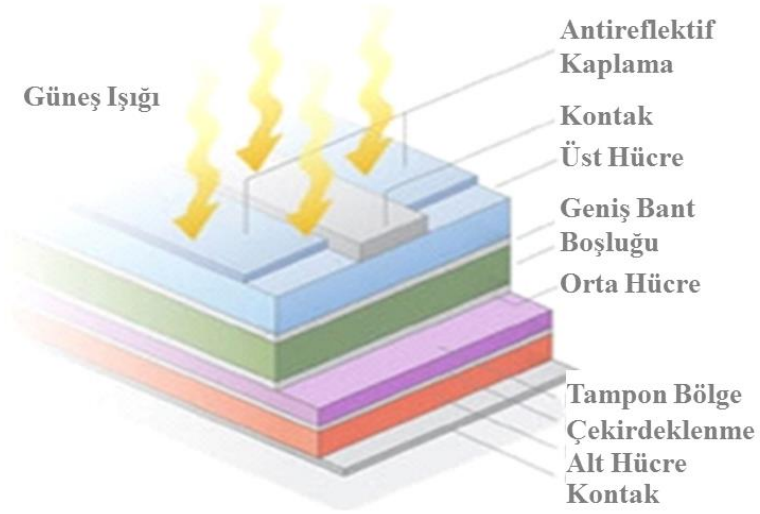
Bu işlem sonucunda %98 saflıkta silisyum elde edilir. Ancak bu saflık düzeyini de arttırmak için 300 °C'de hidroklorürle tepkimeye sokulur.

$Si + HCl_3 \rightarrow SiHCl_3 + H_2$ kaynama noktası çok düşüktür.

Daha sonra 1100 °C de 200-300 saat boyunca H_2 ile tepkimeye sokulur ve saf silisyum elde edilir.

$SiHCl_3 + H_2$ Si+3HCl

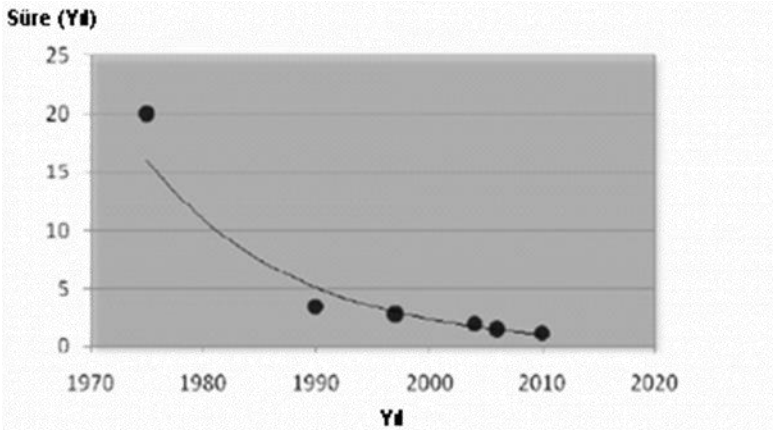
Kristal silisyum Şekil 3.2'deki FV hücre yapısında da görüldüğü gibi FV modül, sandviç gibi üst üste eklenmiş katmanlardan oluşur. Bu katmalar; Cam/kapsül levha/hücreler/kapsül levha/arka plaka olarak sıralanmaktadır. Gelen ışığın dış yüzeyindeki cam tarafından soğrulmasını engellemek amacıyla cam düşük demir içerir, mekanik zorluklara karşı kimyasal ya da termal olarak temperlenerek dayanıklılık kazanması sağlanır. Kapsül levha cam üzerine lamine edilebilen şeffaf bir polimerdir. En sık kullanılan kapsüller, polivinil büteril yada etil vinil asetattır. Arka plaka için, birçok materyaller kullanılır. Bunlardan bazıları; İyonize alüminyum, cam, mylar veya tedlar gibi polimerlerdir [12].



Şekil 3.2: Kristal Silisyum Solar Hücre Yapısı.

Bu tip hücrelerden üretilen kristal silisyum FV paneller yaklaşık olarak 30 – 35 yıllık bir kullanım ömrüne sahiptir. Bu teknik ömürlerinin 25 yıllık süresi sonunda panel verimliliği yaklaşık olarak %80'e inmesine rağmen solar paneller enerji üretimine devam etmektedir.

Kristal silisyum FV modüllerin üretilmesi için harcanan geri kazanım süresi yıllar geçtikçe düşmektedir. Günümüzde bu geri kazanım süresi çoklu kristal yapıdaki silisyum hücreler için daha azdır ve 0,5 – 1,4 yıl arasında değişmektedir. Kristal silisyum FV modül için yıllara göre yatırım geri dönüş sürelerine ait grafik Şekil 3.3Şekil 3.3:'te verilmiştir.



Şekil 3.3: Kristal Silisyum Solar Hücre İçin Yatırım Geri Dönüş Süreleri.

Kristal silisyum hücre tipi günümüzde %91'lik pazar payı ile açık ara en yaygın kullanılan fotovoltaik hücre tipidir. Kristal silisyum FV hücreler, tekli ve çoklu silisyum kristal solar hücreleri olmak üzere 2 ana gruba ayrılmaktadır [12].

Tekli Kristal (Mono Kristal) Silisyum Hücresi

Tekli (mono) kristal solar hücreleri silisyum dilimlerinden yapılır. Silisyum atomları tekli (homojen) kristal yapıya sahip olup, bütün atomlar aynı yönde sıralıdır. Tekli kristal yapıdaki silisyum hücresi "Czochralski geliştirme teknolojisi" adı verilen yöntemle eriyik saf silisyumun saatte birkaç santimetre çekilmesiyle oluşturulur.

Tekli kristal solar hücreleri, kristal hücre çeşitlerinin en verimlisi ve en kalitelisidir. Tekli kristal hücreler diğer hücre tiplere göre %2 oranında daha az yer kaplar. Bu da alan başına düşen enerji üretiminin, dolayısı ile veriminin diğer panel tiplerine göre daha yüksek olmasını sağlar. Günümüz teknolojik seviyesinde, labaratuvar koşullarına göre tekli kristal hücreler %26,7 enerji dönüşüm verimliliğine sahiptir. Ticari uygulamalarda ise üreticiye göre %16,8 – %20,4 arasında değişmektedir.

Tekli kristal silisyum solar hücrelerinin üretimleri teknik açısından daha zor ve üretim süresi daha uzun olduğundan dolayı bu tip solar hücrelerin maliyetleri, diğer solar hücre çeşitlerine göre daha yüksektir. Bu sebeple çoğunlukla uzun vadeli kullanımlar için tekli kristal paneller tercih edilir. Tekli kristal silisyum hücre tipi günümüzde %21'lik pazar payına sahiptir [13].

Çoklu Kristal (Poli Kristal) Silisyum Hücresi

Koyu lacivert renge sahip çoklu kristal hücresi, erimiş silisyumun yüzeye dökülmesi ile elde eldilir. Çoklu kristal yapıdaki solar hücrelerinde malzeme birçok tekli kristalden oluşur ve atomik yapı homojen değildir.

Günümüz teknolojik seviyesinde, labaratuvar koşullarına göre çoklu kristal hücreler %21,9 enerji dönüşüm verimliliğine sahiptir. Ticari uygulamalarda ise üreticiye göre %15 – %18 arasında değişmektedir. Çoklu kristal yapıdaki solar hücrelerin verimliliği tekli kristal yapıdaki güneş hücrelerine göre daha düşük, CIS solar hücrelerine göre ise daha yüksektir.

Çoklu kristal solar hücre üretim maliyeti, tekli kristal solar hücrelerine göre daha düşüktür. Üretiminin ve ulaşılabilirliğinin kolay, verimlilik/maliyet oranının tekli kristal solar hücrelere göre daha yüksek oluşu sebebi ile çoklu kristal solar paneller %70'lik pazar payı ile en çok kullanılan solar panel tipidir [13].

3.1.1.2 İnce Film

Kristal yapıya sahip olmayan bu solar hücre tipi, plazma tortulaştırılması gibi tortulaşma tekniği ile imal edilirler. Bu hücre tipine kristal yapıda olmayan anlamına gelen amorf da denilmektedir. Cam, paslanmaz çelik ya da plastik gibi düşük maliyetli bir destek malzemesinin üzerine ışığa duyarlı malzemenin son derece ince tabakalar halinde biriktirilmesiyle imal edilmektedir.

Işık tutma oranı yüksek olan ince film paneller günümüz teknolojik seviyesinde, labaratuvar koşullarına göre %21,7 enerji dönüşüm verimliliğine sahiptir. Ticari uygulamalarda ise üreticiye göre %10 – %15 arasında değişmektedir [13].

Daha düşük üretim maliyetlerine rağmen enerji üretim verimliliklerinin düşük olması sebebi ile diğer solar hücre tiplerine kıyasla çok daha az kullanılırlar. Bu hücre tipi günümüzde %9'luk pazar payı ile kristal silisyum solar hücrelerin ardından ikinci en yaygın kullanılan solar hücre tipidir. İnce film teknolojisi kendi içerisinde amorf silisyum, kadmiyum tellurid, bakır indiyum galyum diselenid (CIGS) ve bakır-çinko-kalay-sülfoselenit (CZTSSe) olmak üzere 4 gruba ayrılmaktadır.

3.1.1.3 Diğer Tipler

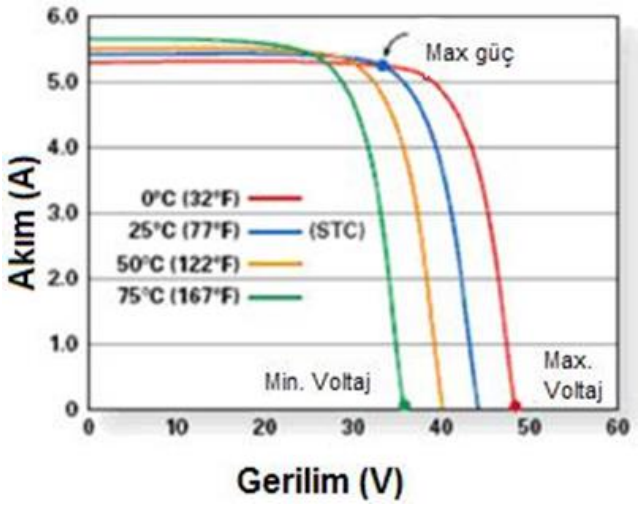
Günümüzde birçok yeni solar hücre teknolojisi geliştirilmekte ve geliştirilen bu teknolojiler hızla ticari olmaktadır. Diğer solar hücre teknolojilerine örnek olarak, hücre içerisinde bir lens kullanılmasıyla güneş ışığına odaklanarak çalışan yoğunlaştırılmış solar hücreler ve ince film hücrelere benzer uygulama alanlarına ile benzer esnekliklerine sahip olan esnek solar hücreler verilebilir. Yaygın olan kullanılan diğer solar hücre tipleri; çok eklemli, organik ve boya duyarlıdır.

3.1.2 Fotovoltaik Modül Elektriksel Özellikleri

FV sistem boyutlandırılmasında, kullanılan FV modüle ait bilinmesi gereken elektriksel özellikler kısa devre akımı, açık devre gerilimi ve verimdir.

- **Kısa devre akımı;** FV modülün gün ışığı altında, çıkış terminallerinin kısa devre edilmesi durumudur. FV modülden alınabilecek maksimum akım değeridir. Kısa devre akımı aşırı akım koruma cihazlarının boyutlandırılması açısından önemlidir [13].
- **Açık devre gerilimi;** FV modülün gün ışığı altında, yüke bağlanmadan ürettiği maksimum gerilimdir. FV modülden alınabilecek maksimum gerilim değeridir.

Dış ortam sıcaklığı düştükçe açık devre gerilimi yükseleceğinden evirici seçimi yapılırken en düşük dış ortam sıcaklığına göre seçim yapılması gerekmektedir. Şekil 3.4Şekil 3.4:'te STK'da 45 V çıkışı olan bir FV modüle ait geriliminin, 0°C'de, 50 V'a yükseldiği görülmektedir. STK; Hava kütlesinin 1,5, sıcaklığın 25°C, ışınımın 1000 W/m^2 olduğu ortamdır [14].



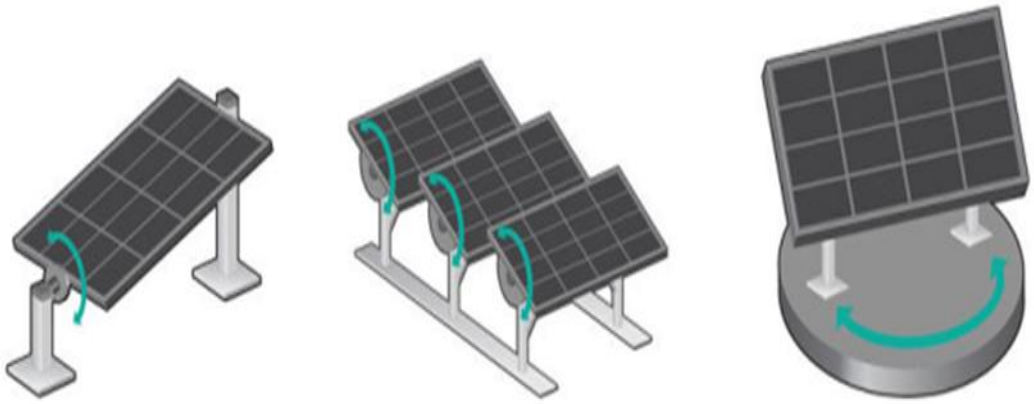
Şekil 3.4: FV hücrelerde Akım-Gerilim eğrisinin sıcaklığa bağlı değişimi.

- **Verim;** İki FV modülün karşılaştırılması esnasında kullanılan parametrelerden biridir. FV modülden elde edilen enerjinin, FV modülün güneşten aldığı enerjiye oranıdır. FV modüllerde verim, gelen ışığın yoğunluğuna ve modül sıcaklığına bağlıdır. Verim testleri STK'da yapılır.

FV sistem boyutlandırılmasında, kullanılan FV panele ait bilinmesi gereken elektriksel özellikler, FV panelin veri sayfasında (datasheet) bulunmaktadır.

3.2 Panel Taşıyıcı Sistem

Solar panelin üzerine kurulduğu sabitleme sistemidir. Solar paneller, bu sistem üzerine monte edilerek solar panellerin, uygun azimut ve tilt açılarında kalması sağlanmaktadır. Bu sistem sabit olabileceği gibi, güneş takibi yapabilmesi için hareketli olarak da tasarlanabilmektedir. Güneş takibi yapan panel taşıyıcı sistemler, sabit açılı sistemlere göre daha yüksek ilk kurulum maliyetine sahiptir. Ek olarak sistemdeki hareketli parça sayısının artması ile sistem kompleksitesi ve arıza ihtimali artmakta, bu durum sistemin enerji üretim süresinin devamlılığı açısından risk oluşturmaktadır. Buna karşın güneş takibi yapan sistemlerde, solar ışınımdan daha fazla yararlanılabilindiği için mevcut kapasite ile daha fazla elektrik üretebilme ihtimali oluşmaktadır. Şekil 3.5'te çeşitli panel taşıyıcı türlerine ait örnekler verilmiştir.



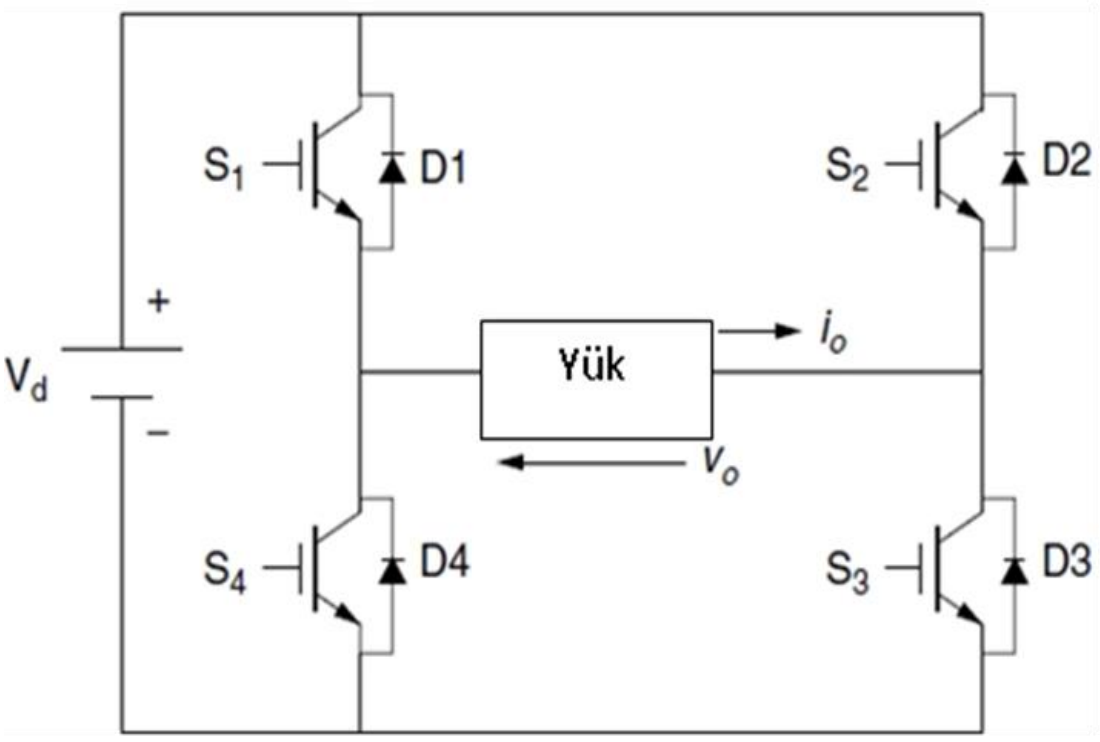
Şekil 3.5: Panel taşıyıcı sistem örnekleri.

3.3 Elektriksel Bağlantı

Solar paneller tarafından üretilen DC gerilime sahip elektriğin solar eviricilere taşınması için kablo ve konnektörler kullanılmaktadır. FV sistem, kurulu olduğu süre boyunca açık alanda suya ve toza maruz kalabileceği için sahada kullanılan konnektörlerin koruma sınıfı, arazi tipi FV sistemlerinde de olduğu gibi IP67 tercih edilmektedir. Koruma sınıfının yüksek seçilmesine ek olarak kablolar, kablo kanalları içerisinden ya da kurulum yapılan zeminin altından geçirilerek ekstra koruma sağlanabilmektedir. FV sistemde kullanılan diğer ekipmanlarda olduğu gibi elektriksel bağlantı için kullanılan malzemeler de 25-30 yıllık FV system ömrünü kapsayacak şekilde malzeme seçimleri gerçekleştirilmektedir.

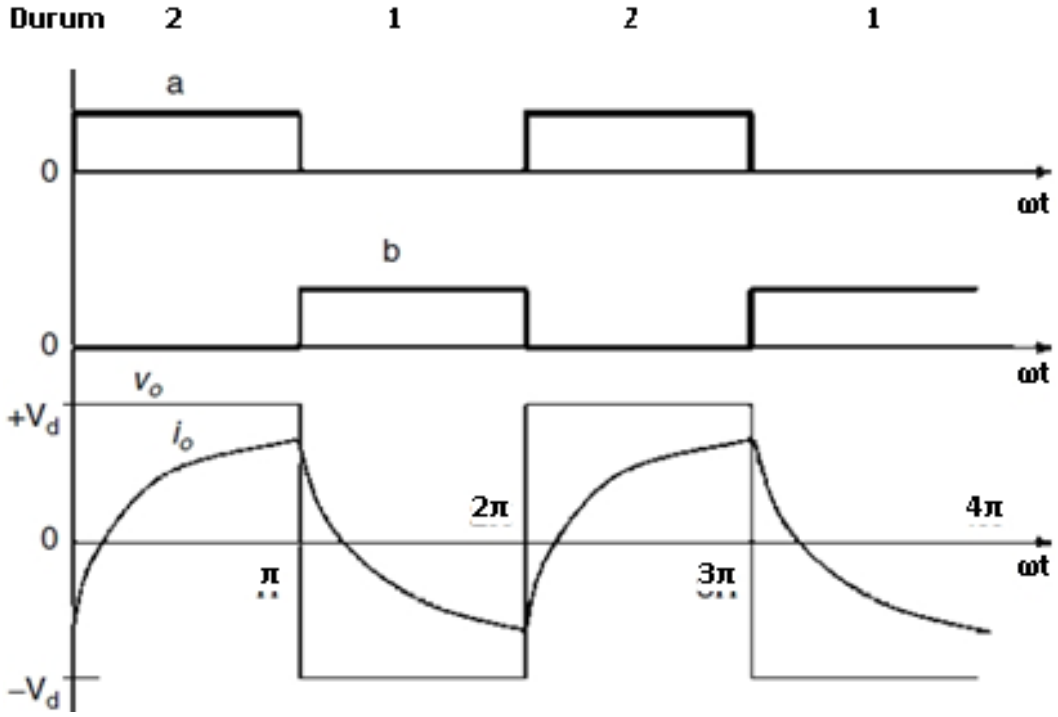
3.4 Solar Evirici

Evirici, doğru akımı (DC) alternatif akıma (AC) çeviren elektriksel bir güç çeviricisidir. Eviriciler, AC-DC doğrultucuların yaptığı işin tersini yaparak DC gücü istenilen gerilim, güç ve frekansta AC güce çevirirler. Solar eviriciler ise FV sistem projelerinde kullanılmak üzere özelleştirilmiş eviricilerdir. Solar eviriciler, FV panellerden sağlanan DC gücün, istenen gerilim, güç ve frekanstaki AC güce çevirmekte kullanılan güç elektroniği devreleridir. Solar eviricinin temel görevleri; ürettiği alternatif akımdaki bozulmaların düşük seviyelerde olması ve istenilen genlik ve frekansta alternatif güç sağlamasıdır. Solar eviriciler çıkış gerilimine göre bir veya üç fazlı olabilmektedir. Solar eviricilerde anahtarlama elemanı olarak, solar eviricinin kalbi diyebileceğimiz IGBT (Insulated Gate, Bipolar, Transistor) kullanılmaktadır. IGBT, elektronik devre elemanını sürerken mosfet gibi (voltaj kontrollü), iş yaparken bipolar transistör (yüksek akım) gibi davranır. Şekil 3.6'da tek fazlı tam köprü gerilim kaynaklı evirici devresi gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Gerilim kaynaklı bir fazlı tam dalga köprü evirici devresi.

Tek fazlı gerilim kaynaklı eviriciye kare dalga uygulanarak yapılan anahtarlama ile elde edilen çıkış gerilim ve akım dalga grafikleri Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Kare dalga uygulanarak yapılan anahtarlama ile çıkış gerilim ve akım dalga formları.

Çizelge 3.2'de eviricinin anahtarlama parametreleri olan a ve b tanımlanmıştır.

Çizelge 3.2: Eviricinin a ve b anahtarlama parametreleri.

Anahtarlama Değişkeni	İletimde (On)	Kesimde (Off)	Durum
A	S_1	S_4	1
	S_4	S_1	0
B	S_2	S_3	1
	S_3	S_2	0

Tek fazlı tam köprü eviricinin çıkış gerilimi denklem 3.1'de verildiği gibi;

$$V_0 = (a - b) \times V_d \qquad (3.1)$$

şeklindedir. Kullanılan semboller ve açıklamaları aşağıdaki gibidir.

a, b : Anahtarlama elemanlarının doluluk oranı

V_d : DC giriş gerilimi

V_o : DC çıkış gerilimi

Bu evirici yapısında 2^2 olmak üzere 4 farklı durum vardır.

Çizelge 3.3'te tek fazlı tam köprü eviricinin çalışma durumları verilmiştir.

Çizelge 3.3: Tek fazlı tam köprü eviricinin çalışması.

İletimdeki anahtarlar	Çıkış gücü	Durum
S_1 ve S_3	$+V_d$	2
S_2 ve S_3	$-V_d$	1
S_1 ve S_2	0	0
S_3 ve S_4	0	3

Yenilenebilir enerji kaynaklarınından enerji üretiminin artmasıyla beraber, bu kaynaklardan elde edilen enerjinin kullanıma uygun hale getirilerek tüketiciye sunulabilmesi amacıyla eviricilerin kullanım alanları da hızla genişlemektedir. Bununla birlikte, FV sistem yatırımlarının FV panelden sonra en büyük gider kalemlerinden birinin solar evirici olması sebebi ile solar evirici seçimi daha da önemli hale gelmektedir.

FV sistemlerde kullanılan solar eviriciler, merkezi ve dizi eviriciler olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Bu iki ana gruba ek olarak henüz geliştirme aşamasında olan mikro evirici teknolojisi de bulunmaktadır.

3.4.1 Merkezi Evirici

FV sistemde merkezi evirici kullanırken, her panel dizisinden üretilen DC güç, kablolar aracılığı ile diğer diziler ile paralel bağlanmalarını sağlayan dağıtım kutusuna bağlanır. Dağıtım kutusunda toplanan DC güç, merkezi invetörde AC güce dönüştürülerek şebekeye aktarılır.

Merkezi evirici devresi, yüksek verimliliğe ve düşük maliyete sahiptir. Ancak aşağıdaki durumlar evirici sisteminde merkezi evirici kullanılan FV sistem verimini düşürebilmektedir;

- Farklı model ve tiplerden FV modüllerin bir arada kullanılması
- Farklı kirlilik derecelerinde yada farklı açılarda yerleştirilmiş modüllerin bir arada kullanılmasından kaynaklanan modül uyuşmazlığı sorunları
- Kısmi gölgelenme
- Kısmi sıcaklık farklılıkları

Bu nedenle merkezi evirici kullanılan durumlarda evirici girişine bağlanan tüm FV modül dizilerinin tiplerinin, yerleştirme açılarının, ortam sıcaklıklarının, kirlilik düzeylerinin aynı olmasına dikkat edilmelidir.

Merkezi sistemde, sistem tek bir eviriciye bağlı olduğu için bu eviricinin arızalanması durumunda tüm sistemin devre dışı kalmasına yol açar. Bu nedenle sistemin güvenilebilirliği ve sürdürülebilirliği sınırlıdır.

Merkezi eviricinin çıkışından AG şebekeye olan kablo uzunluğu düşük olduğu için AC kablo kayıpları azdır. Buna karşılık eğer fotovoltaik dizi gerilimi yüksek ise DC kablo kayıpları da azaldığı için toplam kablo kayıpları en düşük evirici yapısının yüksek DC girişli merkezi evirici sistemi olduğu söylenebilir. Buna karşılık modül dizilerini birleştiren diyotlar nedeniyle merkezi evirici yapısında diyot kayıpları mevcuttur.

Merkezi eviricilerin güçleri 455 – 2300 kW arasında değişim göstermektedir. İstenen ölçekte fotovoltaik sistem oluşturmak için merkezi eviriciler yanyana bağlanarak sistem tasarımı gerçekleştirilir. Verimleri ise %98,5'a kadar ulaşabilmektedir. Şekil 3.8'de örnek bir merkezi evirici gösterilmiştir [16].



Şekil 3.8: Merkezi tip solar evirici örneği.

3.4.2 Dizi Evirici

FV sistemde dizi evirici kullanırken FV sistem dizilere bölünür. Her bir FV diziden gelen DC güç, dizi eviriciye gelir. Böylece her bir FV modül dizisinin kendisine ait bir maksimum güç izleme devresi olmaktadır. Dizi evirici teknolojisi modüller arası yanlış eşleşmeyi azaltarak, kısmi gölgelenme, kısmi sıcaklık farkları, modül açı farkları ve kirlilik derecelerinden kaynaklanan kayıpları düşürmektedir.

Dizi eviricilerde diyot olmadığı için diyot kayıpları yoktur. DC kablo boyu kısalır ve AC kablo boyu uzar, FV dizi geriliminin yüksek olduğu uygulamalarda kablo kayıpları merkezi eviriciye oranla daha azdır.

Dizi eviricilerin güçleri 2 – 66 kW arasında değişim göstermektedir. İstenen ölçekte fotovoltaik sistem oluşturmak için dizi eviriciler yanyana bağlanarak sistem tasarımı gerçekleştirilir. Verimleri ise merkezi eviriciler ile benzer olarak %98,5'a kadar ulaşabilmektedir. Şekil 3.9'da örnek bir dizi evirici gösterilmiştir [17].



Şekil 3.9: Dizi tipi solar evirici örneği.

3.4.3 Mikro Evirici

FV sistemde mikro evirici kullanırken FV sistem, FV panellere bölünür. Her bir FV panelden gelen DC güç mikro eviriciye gelir. Böylece her bir FV panelin kendisine ait bir maksimum güç izleme devresi olmaktadır. Mikro evirici teknolojisi FV paneller arasındaki yanlış eşleşme ihtimalini ortadan kaldırarak, kısmi gölgelenme, kısmi sıcaklık farkları, modül açı farkları ve kirlilik derecelerinden kaynaklanan kayıpları minimize etmektedir.

Mikro eviriciler, iç yapı olarak dizi eviriciler ile benzerlik gösterirler. Evirici pazarında teknolojisi ile yeni olan bu evirici tipi henüz geliştirme aşamasında olup, ticari uygulamalarda kullanılmamaktadır.

Dizi eviricilerin güçleri 250 – 270 W arasında değişim göstermektedir. İstenen ölçekte FV sistem oluşturmak her bir panele bir mikro evirici bağlanarak sistem tasarımı gerçekleştirilir.

3.4.4 Merkezi ve Dizi Eviricilerin Karşılaştırılması

Mevcut kurulu büyük ölçekli FV sistemlerde merkezi eviriciler kullanılmasına rağmen yeni yapılan ya da yapılması planlanan küçük ve orta ölçekli FV sistem projelerinde dizi eviriciler tercih edilmekte, büyük ölçekli projelerde ise merkezi ve dizi eviricili sistemler arasında büyük bir rekabet yaşanmaktadır. Bu konunun temel sebebini anlamak için merkezi eviriciler ile dizi eviricilerin karşılaştırmasına bakmak gerekmektedir. Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'teki tablolarda merkezi ve dizi eviriciler, toplam sistem maliyeti ve toplam enerji üretimi bakımından karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırmalardan da anlaşılacağı üzere, merkezi ve dizi eviriciler birbirleri ile kıyaslandığında birçok açıdan avantajlı ve dezavantajlı durumdadırlar. Bu sebeple, merkezi evirici ya da dizi evirici kullanmak daha iyidir demek yerine projeye özel evirici tipi seçimi yapmak bu konudaki en doğru yaklaşım olmaktadır. Buna ek olarak, sistem maliyeti açısından invetör tipi seçimi gerçekleştirildiğinde yapılacak değişikliğin evirici maliyetlerininin yanı sıra farklı maliyetler ortaya çıkaracağının da göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Toplam Sistem Maliyeti ve Enerji Üretimi

Merkezi ve dizi eviriciler, Çizelge 3.4'te toplam sistem maliyetine göre karşılaştırılmıştır. Avantaj ve dezavantajları aşağıdaki tablodaki gibidir.

Çizelge 3.4: Merkezi ve dizi eviricilerin toplam sistem maliyetlerine göre karşılaştırılması.

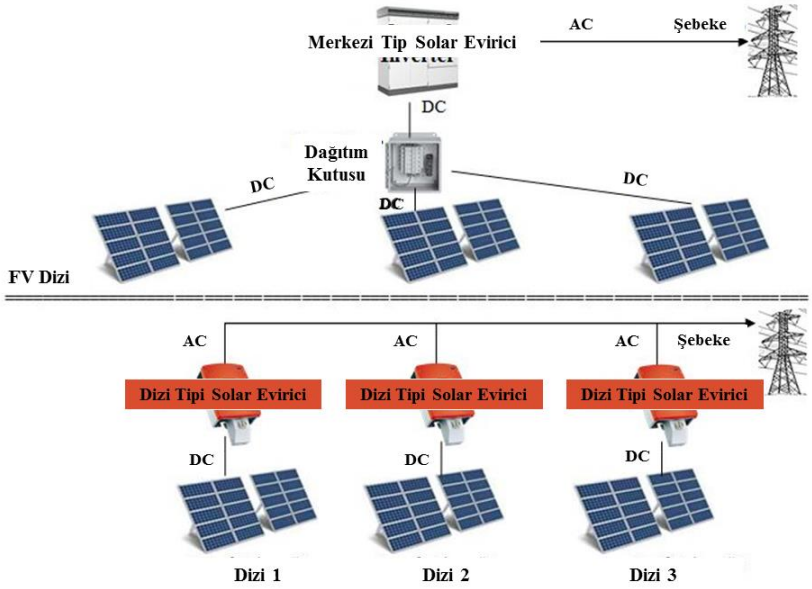
Evirici Tipleri	Avantajlar	Dezavantajlar
Merkezi Evirici	➢ DC güç maliyeti daha düşüktür ➢ Komponent bağlantısı daha azdır	➢ Kurulum maliyeti daha yüksektir ➢ DC kablolama ve birleştirici maliyeti daha yüksektir ➢ Evirici ayak izi (kurulum alanı) daha geniştir
Dizi Evirici	➢ Sistem maliyet dengesi daha düşüktür ➢ Bakım maliyetleri daha düşüktür (Örn: Fan veya hava filtresi yok) ➢ Sistem tasarımı daha basit ve modülerdir; sınırlı evirici pedi boşlukları için idealdir	➢ Yüksek birim DC güç maliyeti ➢ Daha fazla komponent bağlantısı ➢ Eviricileri monte etmek için daha fazla alan gerekir

Merkezi ve dizi eviriciler, Çizelge 3.5'te toplam enerji üretim miktarlarına göre karşılaştırılmıştır. Avantaj ve dezavantajları aşağıdaki tablodaki gibidir.

Çizelge 3.5: Merkezi ve dizi eviricilerin toplam enerji üretimlerine göre karşılaştırılması.

Evirici Tipleri	Avantajlar	Dezavantajlar
Merkezi Evirici	➢ Üretimin diziler boyunca sabit olduğu büyük ölçekli sistemler için idealdir ➢ Kanıtlanmış saha güvenilirliği sağlar	➢ Farklı dizilim açıları ve/veya yönelimlerinin olduğu sistemler için daha az esneklik imkanı sağlar ➢ Sistem üretim performansı, sistemin en düşük performanslı noktasına göre hesaplanır
Dizi Evirici	➢ Farklı dizilim açıları ve/veya yönelimlirinin olduğu sistemler için daha esnek tasarım imkanı sağlar ➢ Bir eviricide meydana gelebilecek olası bir arızadan daha az sayıda evirici etkilenir	➢ Daha yeni olduğundan saha koşullarında daha az test edilmiştir

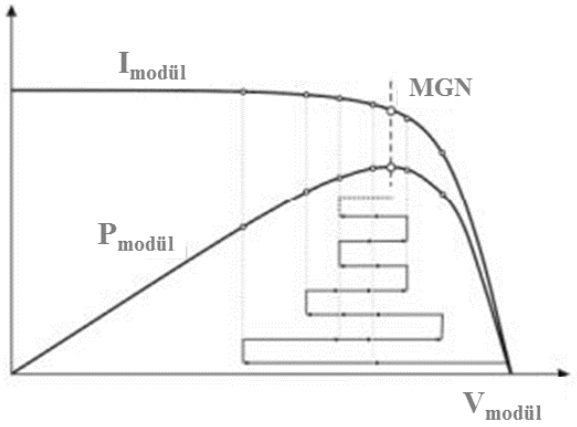
Merkezi ve dizi eviriciler toplam enerji üretimi açısından karşılaştırıldığında, dizi eviriciler bakım, yıkama ve gölgelenme konularında merkezi eviricilere göre daha yüksek verime sahiptirler. Fakat bu fark, toplam enerji üretimi ile kıyaslandığında oldukça küçük olduğu için ihmal edilebilir seviyelerdedir. Dolayısı ile teorik sistem tasarımı hesapları yapılırken merkezi ve dizi eviricilerin enerji üretim miktarları eşit kabul edilmektedir. Örnek bir FV sistemin merkezi ve dizi eviriciler ile yapılan sistem tasarımı Şekil 3.10'da belirtilmiştir.



Şekil 3.10: Merkezi ve dizi eviriciler ile örnek bir fotovoltaik sistem tasarımı.

3.4.5 Eviricilerde Verimlilik ve Elektriksel Özellikler

FV panel dönüşüm verimleri çok düşük olduğundan FV hücrelerin maksimum güç noktasında (MPP – Maximum Power Point) çalışması çok önemlidir. FV hücrelerin Şekil 3.11'deki akım-gerilim eğrisine baktığımızda, maksimum güç noktasında, gücün, gerilime göre kısmi türevinin sıfır olduğunu görürüz.



Şekil 3.11: Maksimum güç noktasının belirlenmesi, I-U ve P-U grafikleri (mountain-climb algorithm).

Bu türev analitik olarak;

$$P \approx I * V \tag{3.2}$$

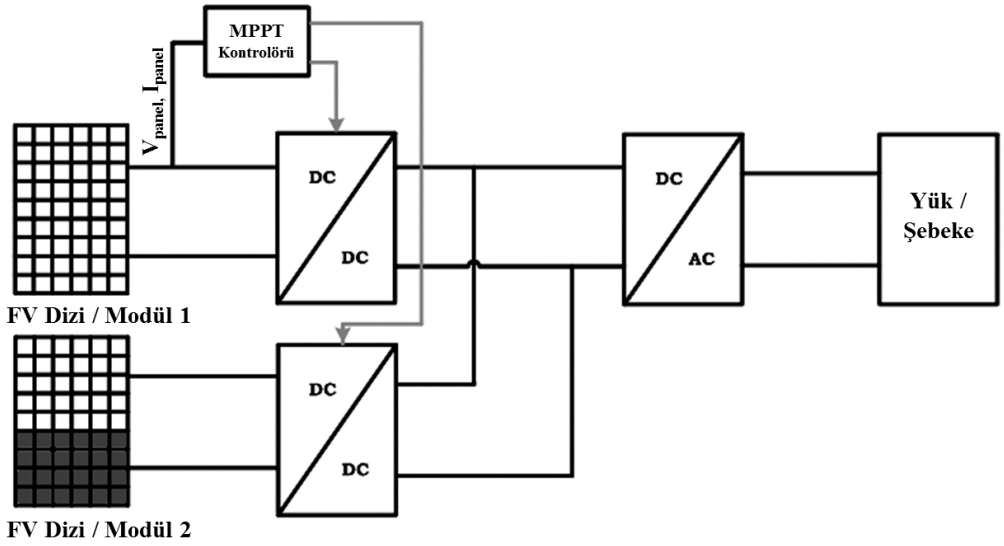
$$\frac{dP}{dV} = V * \frac{dI}{dV} + I \rightarrow dP = V * dI + I * dV \tag{3.3}$$

şeklinde ifade edebilmektedir. Maksimum güç noktasında çalışıldığı zaman $dP = 0$ olur. Eğer $dP > 0$ ise maksimum güç noktası daha düşük bir gerilim değerinde, $dP < 0$ ise daha büyük bir gerilim değerindedir [19].

Evirici, maksimum güç noktası takip (MPPT – Maximum Power Point Tracker) özelliği ile ışınıma ve sıcaklığa bağlı olarak sürekli değişen maksimum güç noktasını bularak mevcut FV sistemden en verimli şekilde yararlanılmasını sağlamaktadır.

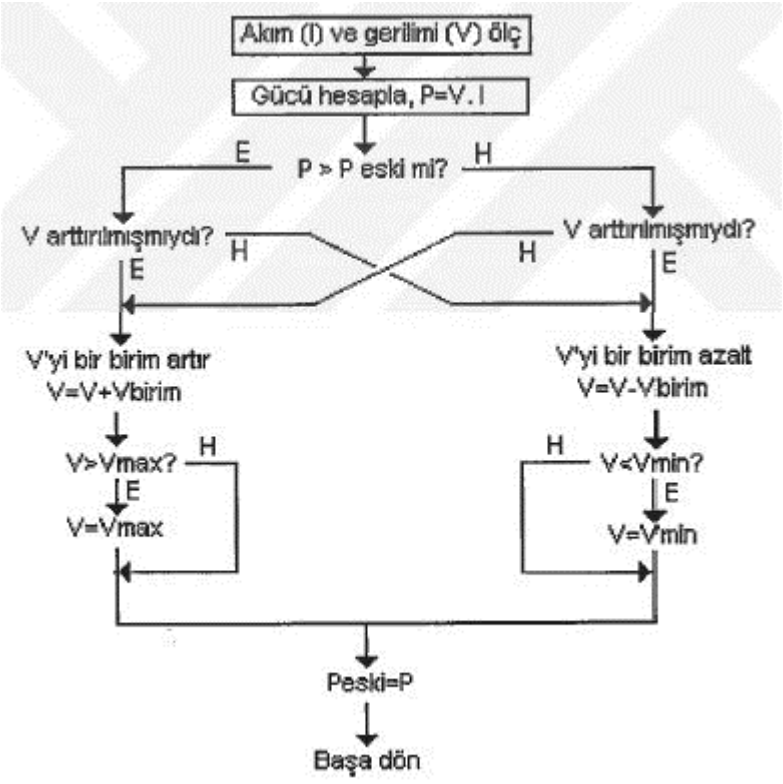
Maksimum güç noktasını takip etmek için, denklem 3.2 ve denklem 3.3 ile anlatılan yönteme ek olarak çeşitli yöntem araştırmaları yapılmıştır. Bu konudaki en kolay ve hızlı algoritma iterasyon temeline dayanan maksimum güç noktası bulma yöntemidir. Bu yöntemde, FV hücrenin gerilimi ve akımı sürekli ölçülerek bir önceki değerler ile karşılatırılmakta ve iterasyon yapılarak maksimum güç noktasına yakınlaşılmaya çalışılmaktadır. Işınım şiddetinde değişimler meydana geldiğinde ise sistem aynı şekilde maksimum noktayı bulmak için iterasyonlar yapmaktadır.

Maksimum güç noktasının bulunması için izlenmesi gereken Akım-Gerilim ve Güç-Gerilim grafikleri Şekil 3.12'de verilmiştir [19].



Şekil 3.12: MPPT'li evirici sistemi.

Şekil 3.12'de görülebildiği üzere FV panelden aldığı I_{panel} ve V_{panel} verilerinden yararlanarak sistemin güç üretiminin en yüksek olacağı hesaplayarak, mevcut sistemden maksimum güç çıkışı almayı sağlamaktadır. Eviricide kullanılan maksimum güç noktası takip algoritması Şekil 3.13'te verilmiştir [19].



Şekil 3.13: Maksimum güç noktası takip algoritması.

FV sistem boyutlandırılmasında kullanılan eviriciye ait bilinmesi gereken elektriksel özellikler DC giriş gerilimi (MPPT başına ve toplam), DC giriş akımı (giriş ve MPPT başına), dizi giriş sayısı (MPPT başına), evirici gücü ve verimidir. Bu özellikler, FV panelin veri sayfasında (datasheet) bulunmaktadır. Örnek bir solar evirici için bu bilgilerin yer aldığı veri sayfası Çizelge 3.6'da gösterilmiştir [16].

Çizelge 3.6: Schneider Electric firmasının CL-60E model, 66 kW çıkış gücüne sahip dizi tipi solar eviricisine ait elektriksel özellikler.

Teknik Özellikler	CL-60E (IEC standardı)
DC Bölüm	
Maksimum giriş gerilimi	1000 V
Maksimum güç noktası takibi için güç aralığı	570 – 850 V
Nominal AC gerilim için DC gerilim aralığı	570 – 950 V
Nominal AC gerilimde, başlangıç gerilimi	620 V
Kısa devre akımı	140 A
Maksimum nominal akım	120 A
Maksimum güç noktası takip adedi	1
Maksimum güç noktası başına maksimum giriş adedi	14
DC konnektör tipi / Maksimum giriş akımı	MC4 / 12 A
Sigorta adedi (dahili)	14 çift
DC siviç	Evet
AC Bölüm	
Maksimum çıkış gücü	66 kW
Maksimum sürekli güç (nominal AC gerilimde)	66 kVA
Nominal çıkış gerilimi	400 V
AC çalışma voltajı	310 – 480 V
Nominal frekans / Frankans aralığı	50 Hz ve 60 Hz / ±5 Hz
Maksimum sürekli çıkış akımı	96 A
Güç faktörü	0,8
THD (maksimum güçte)	< %3
AC terminal	Vidalı tip terminal / AL ya da CU tipi kablo ile uyumlu
AC bağlantı kesme	Dahili değil
Genel Özellikler	
Maksimum tepe verimliliği	%98,7
Euro ya da CEC verimliliği	%98,5
Güç tüketimi (gece süresince)	< 1 W

Eviriciler, güneşten gelen ışınımın yoğunluğuna göre günün farklı saatlerinde ve farklı mevsimlerde kısmi yük altında çalışmaktadırlar. Sonuç olarak, güneş serisi planlanırken veya bir eviriciyi diğeri ile karşılatırırken maksimum verimlilik çok fazla şey ifade etmemektedir. Maksimum verimlilik, eviricinin en verimli olduğu nokta, geniş bir güç aralığı boyunca yüksek verimlilikten daha az önemlidir. Bunun için "European efficiency" oluşturulmuştur.

Denklem 3.4'de görüldüğü gibi European efficiency çeşitli kısmi yükler altında çeşitli verimlilik değerini hesaba katmaktadır. Amaç, Orta Avrupa'da yaygın olan güneş ışıma durumlarında eviricileri birbirleri ile kıyaslayabilmektir. [20]

$$0{,}03 * \eta_{\%5} + 0{,}06 * \eta_{\%10} + 0{,}13 * \eta_{\%20} + 0.1 * \eta_{\%30} + 0{,}48 * \eta_{\%50} + 0{,}2 * \eta_{\%100} \quad (3.4)$$

Denklem 3.4'de $\eta_{\%5}, \eta_{\%10}, \eta_{\%20}, \eta_{\%30}, \eta_{\%50}$ tam yükün %5, %10, %20, %30, %50'sinde etkinliğidir.

Solar eviricileri en yüksek verim oranlarına tam yükte ve tam yükün %5 - %10 üstünde ulaşmaktadırlar. Bu oran, kurulu FV modül gücünün toplam evirici gücüne oranıdır. Dolayısıyla; bir solar evirici maksimum DC giriş gücünden daha düşük bir yükte yüklendiğinde verim düşümüne uğramakta, bunun sonucunda enerji üretim değerleri düşmektedir.

3.5 Batarya (Opsiyonel)

Elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depo eden ve istenildiğinde depolanan bu enerjiyi elektrik enerjisi olarak veren cihazlardır. Güneş enerjisi ile üretilen enerjinin depolanmasında OpzS akü, jel akü ve kuru akü gibi akü tipleri kullanılmaktadır. FV sistemde üretilen enerjiyi depo eden bataryalar Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14: Fotovoltaik sistemde üretilen enerjiyi depo eden bataryalar.

3.6 Şarj Kontrol Ünitesi (Opsiyonel)

Şarj kontrol ünitesinin temel görevi bir yandan aküleri şarj ederken, diğer taraftan da olası aşırı şart ve deşarjlardan aküyü korumaktır. Şarj kontrol ünitesinin elektroniği çok hassastır ve istikrarlı bir FV sistemin çalışmasını garanti altına almak için çok önemlidir.

3.7 Fotovoltaik Sistemlerde Enerji Döngüsü

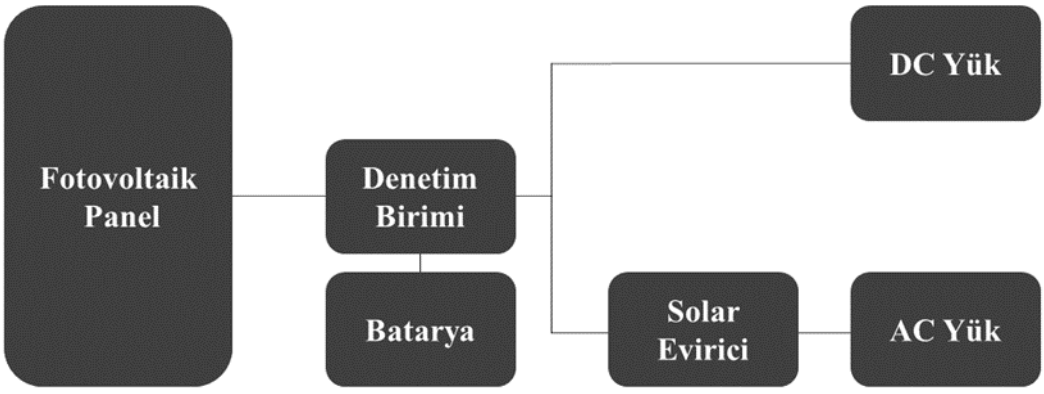
FV sistemlerde, güneşten gelen ışınım ile başlayan ve üretilen enerjinin kullanılmasında sonlanan bir döngü söz konusudur. Bu döngü, fonksiyonlarına göre 3 bölüme ayrılmaktadır [20].

Birinci bölüm, Güneşten gelen ışınımın elektrik enerjisine çevirilmesi içeren gruptur. Fotovoltaik panel bu bölümde bulunmaktadır.

İkinci bölüm, Birinci grupta üretilen elektrik enerjisinin üçüncü grupta tüketilmesine kadar olan kısmı içeren bölümdür. Evirici, akü ve şarj kontrol devresi (varsa) ve kablolar bu bölümde bulunmaktadır.

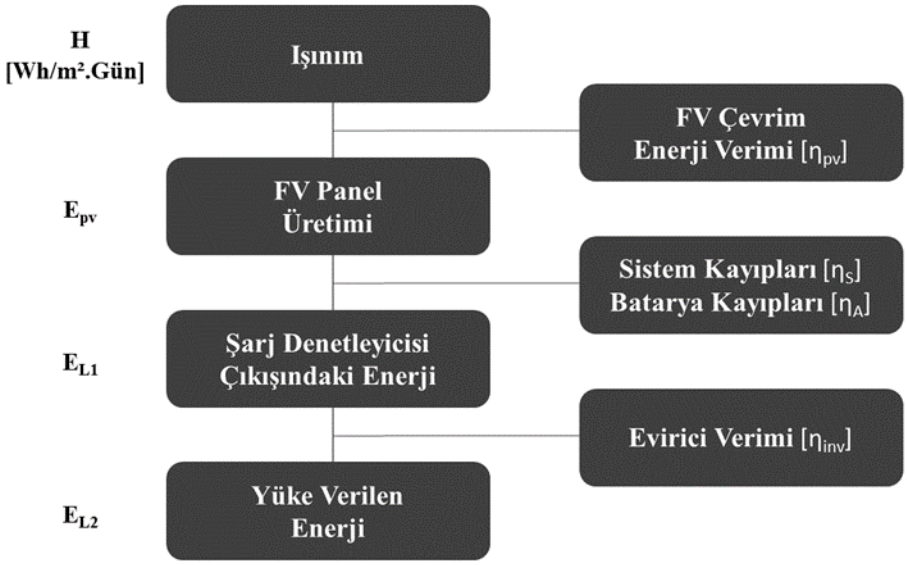
Üçüncü bölüm, Birinci grupta üretilen elektrik enerjisinin kullanıldığı bölümdür. Elektrikle çalışan ekipmanlar bu bölümde bulunmaktadır.

Şekil 3.15'te FV sistem enerji döngüsü gösterilmiştir.



Şekil 3.15: Fotovoltaik sistemde enerji döngüsü.

Şekil 3.16'da FV sistemlerin ışınımdan başlayarak enerjinin üretilmesine kadar olan enerji döngüsü verilmektedir. Buna göre;



Şekil 3.16: FV sistemlerde üretimden tüketime enerji döngüsü.

H [Wh/m².Gün] : Işınım

P_{vm} [W] : Fotovoltaik hücre gücü

A [m²] : Fotovoltaik hücre alanı

η_{pv} : Fotovoltaik çevrim enerji verimi

E_{pv} : Alanı [m²] iken, FV hücrenin standart koşullarda ürettiği enerji

$E_{pv} = P_{pv}.(H/1000) = \eta_{pv}.A.H$ olacaktır. (3.5)

E_{L1} : Şarj denetleyici çıkışındaki enerji

η_A : Akü verimi

η_S : Bağlantı, kablo ve sistem bileşen kayıplarını içeren verim

E_{pv} : Fotovoltaik hücre enerji üretimi

Akü kayıpları, şarj denetleyici, kablo ve diğer bileşenlerde oluşan sistem kayıplarıyla birlikte şarj denetleyici çıkışındaki enerji;

$E_{L1} = \eta_A.\eta_S.E_{pv}$ (3.6)

E_{L2} : Yüke Verilen Enerji

η_{inv} : Evirici Verimi

Evirici verimi hesaba katıldığında yüke verilen enerji denklem 3.7'deki gibi olmaktadır.

$E_{L2} = \eta_{inv}.E_{L1}$ (3.7)

Yukarıda hesabı yapılmış olan FV sistem enerji akışını baz alarak yapılan FV sistem akım akışı;

I_{pv} : Fotovoltaik hücrenin ürettiği net akım

n_M : Modül düzeltme katsayısı (derate factor) : Modülün çalışma ortamında nominal çalışma değerlerinden kaymasını dikkate almak amacıyla yapılan bir indirgeme katsayısıdır

I_m : En yüksek güç noktasında fotovoltaik modül akımı

$I_{pv} = n_p.n_m.I_m$ (3.8)

Gelen güneş ışınımı H [Wh/m²]. Gün iken güneşlenme saati denen tepe ışınım gelme süresi bu değerin 1000 W/m²'ye bölünmesiyle bulunacağından, güneş pilinin ürettiği enerji [Ah] olarak;

$E_{pv} = I_{pv}.(H/1000)$ [Ah/gün]'dür.

E_L : Yüke verilen enerji

$E_L = \eta_A.\eta_S.\eta_{inv}.E_{pv}$ [Ah/gün] (3.9)

t : Bu enerji ile yükün çalışabilme süresi

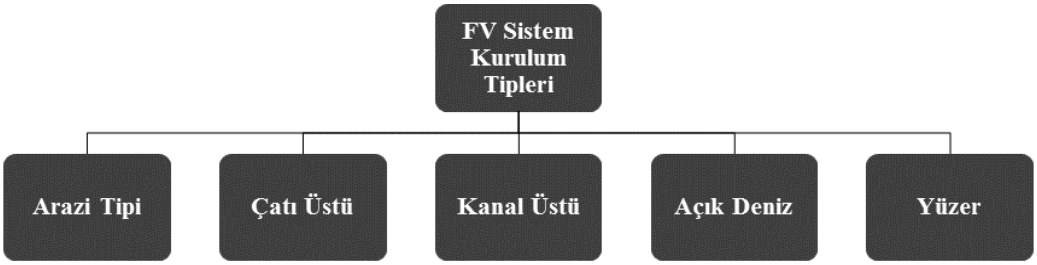
P_L : Yük gücü

V : Sistem gerilimi

$t = E_L/(P_L/V)$ saat olacaktır. (3.10)

3.8 Fotovoltaik Sistemlerin Kurulum Tipleri

FV sistemler Şekil 3.17'de görülebileceği üzere kurulum tiplerine göre beş tipe ayrılmaktadır [21]. Bunlar:



Şekil 3.17: Arazi kurulumu fotovoltaik sistem örneği.

3.8.1 Arazi Tipi Fotovoltaik Sistemler

Arazi tipi FV sistemler genel olarak geniş, şebeke ölçeğinde FV sistemlerde kullanılır. Bu FV sistem tiplerinde paneller, Şekil 3.18'de görülebileceği üzere yere monte edilmiş olan konstrüksiyonlar üzerine monte edilirler.

Arazi tipi FV sistemlerde montaj tipleri aşağıdaki gibidir:

- Sabitleyici sistemin doğrudan yere monte edildiği sistemler
- Sabitleyici sistemin beton döşeme ya da dökme beton üzerine direk tutturulduğu sistemler
- Konstrüksiyon üzerine kurulan sistemler

Bu tip montaj sistemlerinde zeminin kazılmasına gerek duyulmadığından en sık kullanılan sabitleme yöntemidir. Kazma gerektirmediğinden, kazmanın mümkün olmadığı ya da zor olduğu alanlar için çok uygundur. Bu tip sabitleyici sistemler ile, panel ya da panel dizisinin yerinin değiştirilmesi oldukça kolaydır.



Şekil 3.18: Arazi kurulumu fotovoltaik sistem örneği.

3.8.2 Çatı Üstü Fotovoltaik Sistemler

Çatı üstü FV sistemler, FV panellerin evlerin ya da ticari binaların çatılarına kurulduğu sistemlerdir. Bu tip sistemler, arazi tipi sistemlerde de olduğu gibi FV panel, solar evirici, sabitleyici sistem, kablo ve diğer aksesuarlardan oluşur.

Bu tip sistemler genellikle, arazi tipi sistemlere göre kurulu güç ve üretim miktarına açısından oldukça küçüktürler. Evler üzerine kurulan çatı üstü FV sistemler genellikle

5-20 kW'lık kurulu güce sahip iken, ticari binalardaki çatı kurulumu sistemlerin kurulu gücü 100 kW civarındadır. Örnek bir çatı üstü FV sistem Şekil 3.19'da verilmiştir.



Şekil 3.19: Çatı üstü fotovoltaik sistem örneği.

3.8.3 Kanal Üstü Fotovoltaik Sistemler

Geleneksel arazi tipi FV sistemler, kurulum için oldukça geniş bir araziye ihtiyaç duyarlar. FV sistem kurulumlarında bu ihtiyacın ortadan kaldırılması için kanalların üstleri sabitleyici sistemler ile kaplanarak, kanal üstü FV sistem kurulumu gerçekleştirilir.

Bir yandan FV sistem kurulumu için arazi ihtiyacı karşılanırken, diğer yandan da görsel açıdan Şekil 3.20'deki gibi güzel örnekler oluşturulmaktadır.



Şekil 3.20: Kanal üstü fotovoltaik sistem örneği.

3.8.4 Açık Deniz Fotovoltaik Sistemleri

Okyanuslar, dünyamızın %70'lik kısmını olduşturmaktadırlar. Kapladıkları bu alan sebebi ile büyük bir güneş enerjisinden elektrik üretimi potansiyelini bünyelerinde barındırırlar. Bu enerjinin kullanılması için karanın, okyanus ve ya denizler ile buluştuğu noktalara açık deniz FV sistemler kurularak bu potansiyel elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Örnek bir açık deniz FV sistem Şekil 3.21'de verilmiştir.



Şekil 3.21: Açık deniz fotovoltaik sistem örneği.

3.8.5 Yüzer Fotovoltaik Sistemler

Kanal üstü ve açık deniz FV sistemlerinin temel amacı olan arazi ihtiyacının azaltılması, yüzer FV sistemlerin temel amacını oluşturmaktadır. Bu tip projeler Japonya, Singapur, Kore, Filipinler gibi kara yüz ölçümü küçük ada ülkeler için oldukça önemli durum olmanın yanı sıra, Amerika, Avustralya, Brezilya, Hindistan ve İtalya gibi ülkeler tarafından da oldukça ilgi duyulmaktadır. İlgi duyan bu ülkeler başta olmak üzere, yüzen FV sistemler ile ilgili akademik çalışmaların son zamanda artış göstermektedir. Buna rağmen yüzen FV sistemlerin ticari uygulamaları oldukça sınırlıdır. Bu çalışma kapsamında yüzer FV sistemlere daha ayrıntılı olarak bahsedilecek ve bu konuda analizler gerçekleştirilecektir. Örnek bir yüzer FV sistem Şekil 3.22'de verilmiştir.



Şekil 3.22: Yüzer fotovoltaik sistem örneği.

3.9 Fotovoltaik Sistemlerin Kurulum Tiplerine Göre Avantaj ve Dezavantajları

FV sistemlerin kurulum tiplerine göre avantaj ve dezavantajları Çizelge 3.7'de yer almaktadır [21].

Çizelge 3.7: Kurulum tiplerine göre FV sistemlerin avantaj ve dezavantajları.

Kurulum Tipi	Avantajlar	Dezavantajlar
Arazi Tipi	➢ Daha büyük bir alanda ve az maliyetle güneş takip sistemi kurulumu ➢ Manuel olarak mevsimlik eğim ayarı yapılabilir bir tesis ➢ Kırsal bölgelerdeki çatı üstü alanına nazaran daha büyük alanlara kurulabilen bir sistem ➢ Panellerin temizliği ve bakımı daha kolaydır ➢ Çatı ve sistem arasında bir bağ olmadığından çatı garantisinin geçersiz olmasını engeller	➢ Genelde şehirlerde bunun için yeterli toprak bulunamıyor ➢ Doğal afetlere dayanabilecek sağlam bir sistem için güçlü bir temel inşa edilmesi gerekiyor ➢ Mühendislik ve inşaat iş yükü diğerlerinden fazla olduğundan inşa süresi diğerlerinden daha uzundur
Çatı Üstü	➢ Estetik görüntü: Paneller çatı ile uyumlu, kolayca monte edilebiliyor ➢ Alan optimizasyonu: Yerde bu amaç için ayrılacak toprak alanına gerek olmaz ➢ Sağlamlaştırma: Güneş panelleri çatıyı hava koşulları sebebiyle eskimeden korur. Bu da mülkün ömrünü uzatır ➢ Hız: Yer kurulumuna göre daha kolay ve hızlı kurulum imkanı mevcuttur	➢ Çatılarda baca, ağaç, havalandırma borusu, anten gibi engeller bulunduğundan paneller üzerinden gölgeden kaynaklı verim düşüklüğü ➢ İhtiyaç olan kapasite için çatı alanının ve şeklinin yetersiz kalması ➢ Güneye bakan çatı alanının az olmasının verimi etkilemesi ➢ İnşa sırasında iş yükünün fazla olması

Çizelge 3.7 (devam): Kurulum tiplerine göre FV sistemlerin avantaj ve dezavantajları.

Kurulum Tipi	Avantajlar	Dezavantajlar
Kanal Üstü	➢ Değerli ve maliyetli toprağın bu amaç için kullanılmaması ➢ Kanaldaki suyun buharlaşmasını önlemesi. Yer kurulumuna göre paneller daha az ısındığından güç üretiminde verim artmaktadır ➢ Panellerin servis ömrü ve enerji kazanımında artış	➢ Projeye uygun kanal bulmada yaşanan zorluk ➢ Kanal ve nehir kullanmanın sosyo – ekonomik ve politik konulara etkisi ➢ Modüller için zor ve uzun süren yapıların kurulması ➢ Konum sebebiyle bakımda yaşanan zorluk ➢ Ağaçların yaptığı gölge: Erozyonu önledikleri için bu ağaçların kesilememesi ➢ Bu kanalları suya kurmak kuşların ıslak alanlara erişimini engellemektedir ➢ Diğerlerine göre daha maliyetli yapısal ve tasarımsal stratejilere ihtiyaç duyulması ➢ Üretilen gücün tahliyesi için uzun kablo yolları kurulduğunda kablo maliyetindeki artış olması ➢ Kurulan sistem korunaklı bir alana inşa edilmediğinden güvenlik endişesi doğurmaktadır
Açık Deniz	➢ Aynı m^2'de bir yer kurulumuna göre, güneş panellerinin suyla direk teması sayesinde, daha yüksek elektrik üretimi için güneş panelinin negatif faktörü (%/K) kullanılabilir ➢ Panel sıcaklığı azaldığından panelin verimliliği artar ➢ Sıcak havalarda, güç üretirken altındaki suyun buharlaşmasını engeller ➢ Gün boyu güneş ışınlarından yararlanabilmenin avantajını kullanır	➢ Güneş panellerinin yapı taşlarından biri, yüksek maliyetli ve zehirli cadmium chloride olduğu için bu durum hem panellerin fiyatını hem de üretim sürecini etkilemektedir. Yapılan araştırmalara göre deniz suyu, bu zararlı madde yerine kullanılabilecek magnezyum chloride içermektedir ➢ Paneller su geçirmez yapılmaktadır ➢ Paneller, su üzerinde yüzebilmeleri için daha hafif materyallerden üretilmektedir; bu da maliyeti arttırmaktadır ➢ Panelleri bir birine bağlamak ve bakımını yapmak bu tip sistem için sorun yaratabilmektedir

Çizelge 3.7 (devam): Kurulum tiplerine göre FV sistemlerin avantaj ve dezavantajları.

Kurulum Tipi	Avantajlar	Dezavantajlar
Yüzer	➢ Su üzerinde güneş ışınının yansıması ve suyun buharlaşmasından kaynaklanan serinletici faktör, panellerin yer kurulumuna göre daha düşük sıcaklıklarda çalışmasını sağlar; bu da panelin verimliliğini arttırır ➢ Paneller suyun yüzeyinde bir gölge yarattığından buharlaşma azalır ➢ Azalan fotosentez ve alg üremesin sayesinde suyun kalitesinde artışa sebep olur ➢ Paneller, suyun üzerinde yer kurulumlarına göre daha az toz barındıran ortamlarda çalışır; bu da toz etkisini azaltır ➢ Maliyetli toprakların kullanımını azalttığından bu toprağın tarım, madencilik, turizm gibi aktiviteler için kullanılmasını; bu sayede normalde gelir getirmeyen su yüzeylerini ticari güneş paneli sistemlerine çevirir	➢ Sistem; suyun yükselmesi, fırtına, dalga, kasırga ve tsunami gibi doğal afetlerden zarar görmeye daha elverişlidir ➢ Kullanılan metalin korozyona uğraması sebebiyle sistemin ömrü kısalmaktadır ➢ Suyun derinliklerine giden güneş ışınlarını engellediğinden suda yaşayan yosun ve hayvan çeşitliliğini azaltması ➢ Panelin üzerindeki az nem oranı ve ısının sonucu negatif ısıl kaymanın verimliliği azaltması ➢ Göl veya nehir kenarlarına günlük olarak biriken çamurun temizlik süreci ➢ Seçilen alana göre balıkçılık veya ulaşım aktivitelerinin etkilenmesi

4. YÜZER FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

Yüzer FV sistemler, kara üzerine kurulan FV sistemlerin yüzdürücü bir yüzey yardımı ile su üzerine kurulan FV sistemlere dönüştürülmesi temeline dayanan bir teknolojidir. Uzun yıllardır kullanılan arazi tipi FV sistemler ile aynı prensibe dayanmaktadır. Bu teknoloji ile bir yandan FV sistemlerden enerji üretirken, bir diğer yandan da değerli arazileri kullanmak yerine dünyanın %70'ini kaplayan su yüzeyi kullanılarak karaların daha verimli kullanılması hedeflenmektedir. Rezervuar/göl yüzeyini yüzdürücü sistemler ile örtme prensibine dayalı bir teknoloji olduğundan buharlaşmayı azaltması gibi temel bir avantaja sahiptir.

FV sistemlerin enerji üretim verimini düşüren unsurlardan biri, panel sıcaklıklarının malzeme veri dosyasındaki panelin optimum sıcaklığından yüksek oluşudur. Güney Kore'de yapılan bir araştırmaya göre rezervuar/göl üzerine kurulan sistem, paneller ile panellerden daha soğuk olan rezervuar/göl arasında ısı transferi gerçekleştirerek panellerin soğumasına sağlamaktadır. Eğer Güney Kore'de yapılan testler sonucu ortayan konan bu teori doğru ise, yüzer FV sistemler arazi tipi FV sistemlere göre daha yüksek enerji üretim verimliliğine sahip olduğu söylenebilmektedir [22].

Yüzer FV sistemler, arazi tipi FV sistemlerinde kullanılan donanıma ek olarak panellerin su üzerinde taşınabilmesi için yüzdürücü sistem, sistemin sürüklenmesini ve kendi etrafında dönmesini engellemek için sabitleme sistemi ve yüzer sistemden üretilen elektriğin karaya taşınması için gereken özel elektriksel bağlantıyı içermektedir.

4.1 Yüzer Fotovoltaik Sistemleri Oluşturan Öğeler

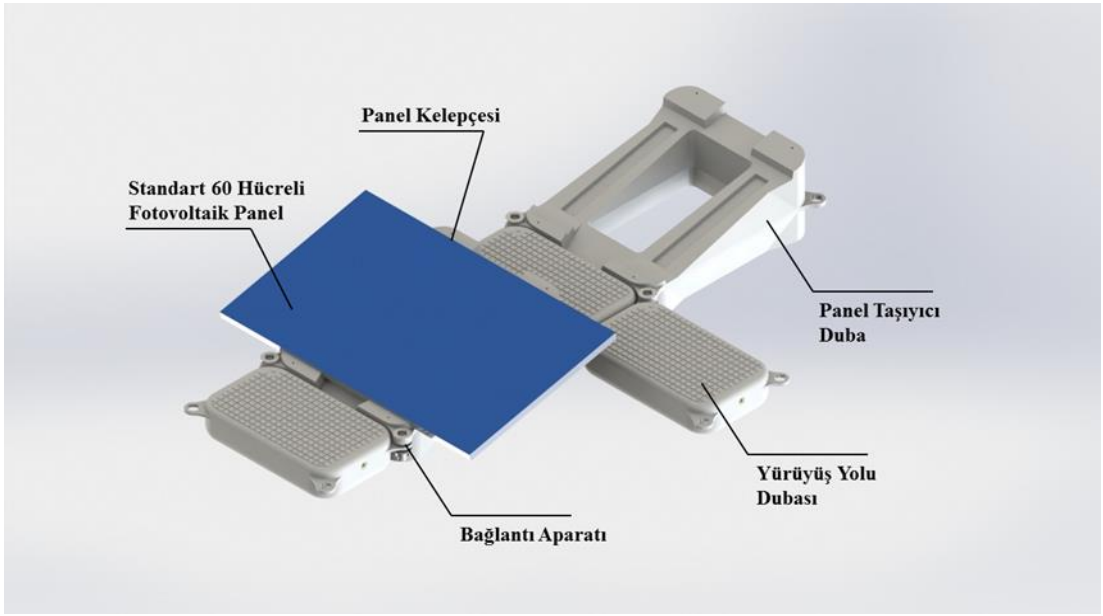
4.1.1 Yüzdürücü Sistem (Duba)

Dubalar, suyun üzerinde yüzdürmeyi ve yük taşımayı sağlayan sistemlerdir. Yüzen FV sistemlerde kullanılan mekanik ve elektriksel komponentler bu yüzdürücü sistemler üzerine monte edilirler. Aktif enerji üretimi gerçekleştiren bir yüzer FV sistemden alınan bir yüzdürücü sistem örneği Şekil 4.1'de verilmektedir.



Şekil 4.1: Gerçek bir yüzer FV sistemden yüzdürücü sistem tasarımı örneği.

Kullanım tiplerine göre panel taşıyıcı duba ve yürüme yolu dubası olarak iki ana gruba ayrılırlar. Bu sistemler bağlantı aparatları ile bir araya gelerek Şekil 4.2'deki yüzdürücü sistemi meydana getirirler. Küçük ölçekli sistemlerde tek bir yüzdürücü sistem, hem panel taşıma hem de yürüme yolu işlevlerini yerine getirecek şekilde tasarlanabilmektedir.

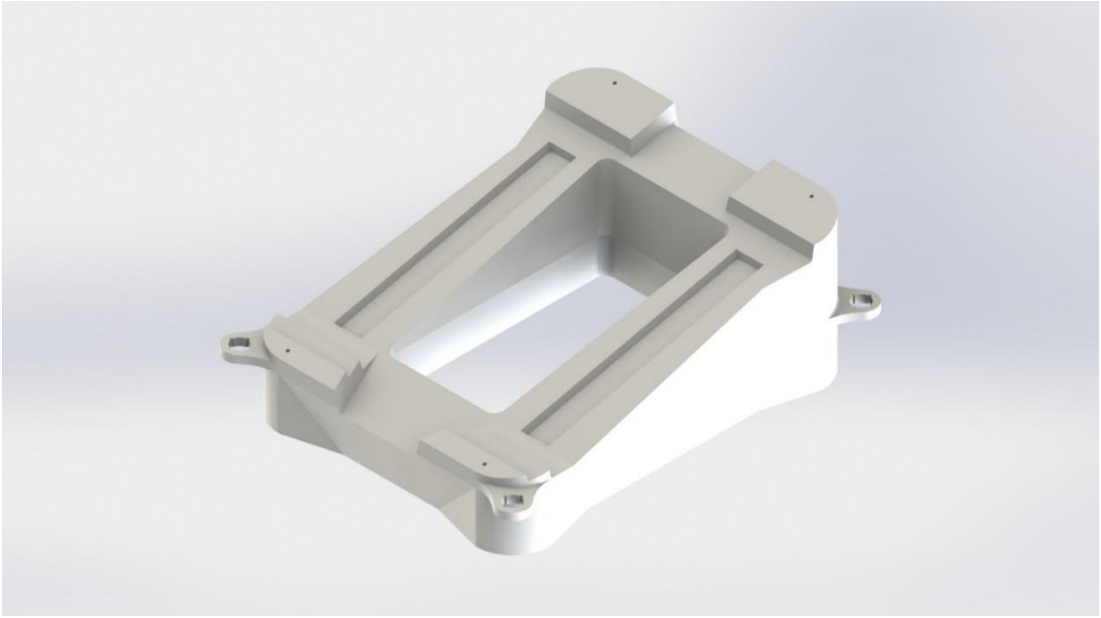


Şekil 4.2: Panel taşıyıcı duba, yürüme yolu dubası ve FV panelden oluşan yüzdürücü sistem örneği.

4.1.1.1 Panel Taşıyıcı Duba

Solar panellerin ya da solar panalleri taşıyan sabitleme sistemlerinin üzerine kurulduğu yüzdürücü sistemdir. Solar paneller, kara kurulumuna benzer şekilde panel taşıyıcı dubalar üzerine kurulan sabitleme ekipmanları yardımı ile taşıyıcı sisteme sabitlenebildiği gibi, arada herhangi bir aktarım ekipmanı kullanılmaksızın, direk

olarak özel tasarlanmış panel taşıyıcı dubalar üzerine de monte edilebilirler. Yüzer FV sistemler için tesarlanan örnek bir panel taşıyıcı duba Şekil 4.3'teki gibidir.



Şekil 4.3: Yüzer FV sistemler için tasarlanan panel taşıyıcı duba örneği.

4.1.1.2 Yürüme Yolu Dubası

Yüzen FV sistemin kurulum, bakım, temizlik gibi hizmetlerinin sağlanması için görevli kişilerin suyun üzerinde durabilmesini sağlayan yüzdürücü sistemdir. Yüzer FV sistemler için tesarlanan örnek bir yürüme yolu dubası Şekil 4.4'teki gibidir.



Şekil 4.4: Yüzer FV sistemler için tasarlanan yürüme yolu dubası örneği.

4.1.1.3 Diğer Duba Türleri

Yüzer FV sistemlerin öneminin ve önemine paralel olarak kapasitelerinin artması ile birlikte firmalar solar evirici, trafo, elektrik panosu gibi elektrik dönüşüm ve koruma sistemlerini de yüzdürme denemelerine başlamışlardır. Bu gibi sistemlerde, bu yükleri kaldıracak özel duba tiplerinin kullanılması gerekmektedir. Solar evirici ve elektrik ekipmanlarının yüzdürüldüğü örnek bir sistemin görüntüsü Şekil 4.5'te verilmektedir.



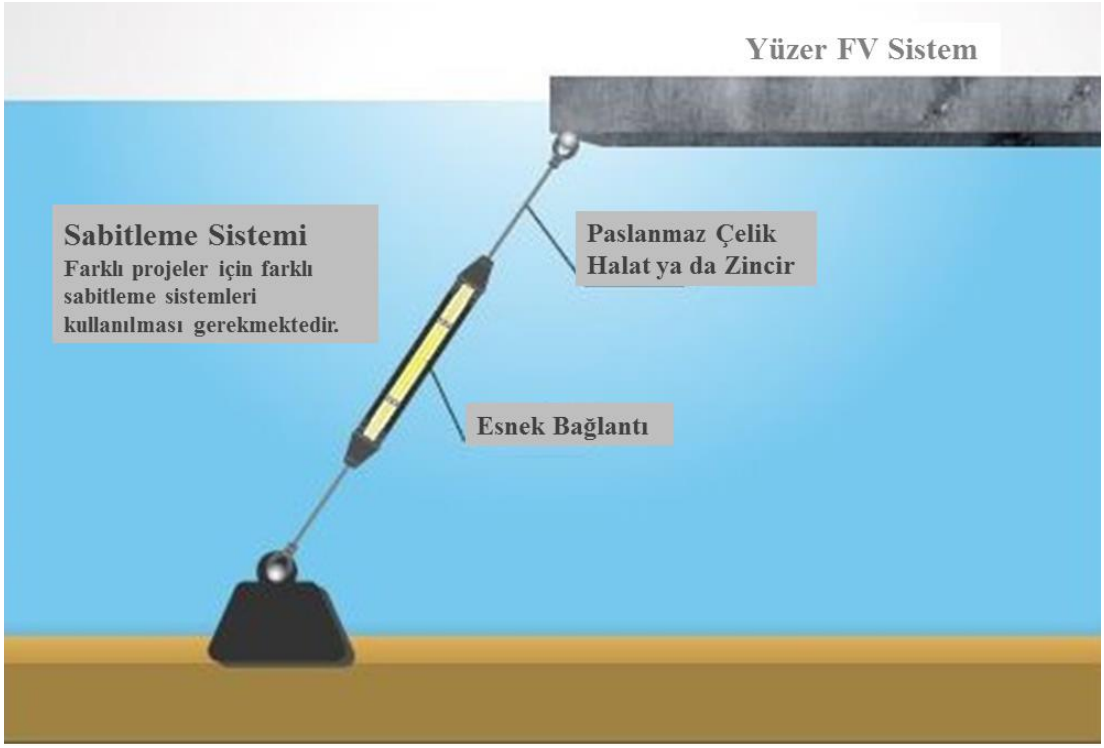
Şekil 4.5: Solar evirici ve elektrik ekipmanlarının yüzdürüldüğü sistem örneği.

Bu tip bir çalışma, Çin Halk Cumhuriyeti'nde devreye alınan 40 MW'lık dünyanın en büyük kapasiteye sahip yüzer FV sistemde uygulanmıştır. Bu büyük ölçekli projede yalnızca FV panellerin değil, solar evirici, trafo gibi ekipmanların da özel dubalar ile yüzdürülecek şekilde sistem tasarımı ve devreye alınması gerçekleştirilmiştir.

4.1.2 Sabitleme Sistemi

Sabitleme sistemi, yüzer sistemin kayması ya da kendi etrafında dönmesi gibi istenmeyen durumların mümkün olduğunca bertaraf edilmesi için kullanılan sistemdir. Yüzer FV sistemi sabitlemek için projeye özel farklı yöntemler kullanılabilir. Ağırlık bağlanan halat ya da zincirin ucundaki ağırlığın suyun dibine oturtturulması prensibine dayanan sabitleme yöntemi, en yaygın kullanılan sabitleme yöntemidir. Bu yöntem, yüzer FV sistemin dört köşesi için de uygulanarak sistemdeki istenmeyen hareketlerin mümkün olduğunca bertaraf edilir.

Daha gelişmiş sabitleme sistemlerinde, su seviyesi değişimi etkisini mimimize etmek için halat ya da zincirdeki gerilimin azaltılması için Şekil 4.6'daki gibi esnek bağlantı elemanları kullanılabilir.



Şekil 4.6: Yüzer FV sistemler için tasarlanan duba sabitleme sistemi örneği.

4.1.3 Elektriksel Bağlantı

FV paneller tarafından üretilen DC gerilime sahip elektriğin solar eviriciye taşınması için kablo ve konnektörler kullanılmatadır. Bu DC gerilime sahip elektriğin solar eviriciye taşınması kara kurulumu fotovoltaik sistemler ile temel olarak benzerlik gösterse de, ortam koşullarının özel oluşu sebebi ile bu konu da ayrı bir önem kazanmaktadır. Sahada kullanılan konnektörlerin koruma sınıfı, arazi tipi FV sistemlerde de olduğu gibi IP67'dir.

Üretilen elektriğin taşındığı kablolar ve haberleşme kablolarının yüzer sistemden karadaki elektrik panosuna ya da elektrik odasına taşınması için iki ana yöntem izlenmektedir.

4.1.3.1 Yüzdürme

Yüzen santralin mantığı ile benzer mantıkta yüzme özelliğine sahip, su geçirmez ve güneşe dayanıklı polietilen (HDPE) borular kullanılır. Boruların iki ucu, su almayacak

şekilde muhafaza edilerek sabitlenir. Yüzer FV sistemden gelen elektrik iletim ve haberleşme kabloları bu borular içerisinden geçirilerek eviricilere ulaştırılır.

Elektrik iletim ve haberleşme kabloları su geçirmez bir sistem içerisinden geçiriliyor olsalar dahi, bu iletimde işleminde suya dayanıklı özel kablolar tercih edilir.

4.1.3.2 Suyun Altından Geçirme

Yüzdürme yönteminde kullanılan yönteme benzer olmakla birlikte, bu yöntemde yüzer FV sistemden gelen elektrik iletim ve haberleşme kabloları zeminin altından geçirilen borular içerisinden geçirilerek eviricilere ulaştırılır.

Bu yöntemde kazı maliyetlerinin yüksek oluşu sebebi ile bu yöntem büyük ölçekli projeler dışında tercih edilmemektedir.

4.1.3.3 Diğer Taşıma Türleri

Daha önce bahsedildiği üzere üretim kapasitesinin büyümesi ile birlikte yüzen evirici, trafo ve elektrik panoları gündeme gelmekte ve bu sistemleri denemelerine başlanmaktadır.

Proje ne kadar yüzer de olsa, üretilen elektriğin tüketileceği yer karada olduğu sürece yukarıdaki elektrik ve haberleşme iletim yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir.

Yüzer FV sistem tasarımı oldukça modüler olduğundan bu iki yöntem kullanılarak sistemden sisteme ya da sistemden karaya iletim gerçekleştirilebilir.

4.1.4 Diğer

Yüzer FV sistemde kullanılan FV panel, solar evirici, elektriksel kontrol ve koruma ekipmanları gibi malzemeler kara kurulumunda kullanılan malzemeler ile aynıdır.

4.2 Temel Tasarım Faktörleri

4.2.1 Rezervuarın/Göletin Düzeni

Rezervuarı/göleti mümkün olduğunca en verimli halde kullanmak için, kurulum yapılacak lokasyona göre tasarım oluşturmak önemli hale gelmektedir. Özellikle kurulum ölçeği büyüdükçe ve/veya kurulum yapılacak rezervuar/gölet alanı küçüldükçe yüzer FV sistemlerde bu konu daha da ön plana çıkmaktadır. Bu alanı en verimli şekilde kullanmak için mümkünse kurulum yapılacak yüzer FV sistemin 3

boyutlu çizimi, rezervuarın/göletin 3 boyutlu çizimi içerisine yerleştirilerek sistem yerleşimi simüle edilmesi gerekmektedir.

4.2.2 Yüzdürücü Sistem Tasarımı

Yüzdürücü sistem tasarımının, elektrik üretimi maksimize edilirken buharlaşmanın minimize edileceği şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Elektrik üretimin maksimize edilebilmesi için, tilt açısı, güneşlenme süresi ve panel ölçüleri göz önünde bulundurularak kurulum yapılacak alan ve kapasite gibi sistem kısıtlarına uygun yüzdürücü sistem tasarımı yapılması gerekmektedir.

Buharlaşmanın minimize edilebilmesi için yüzdürücü sistem tasarımının maksimum yüzey alanın kaplanacak şekilde yapılması gerekmektedir [23].

4.2.3 Yüzer Fotovoltaik Sistemin Yönü

Türkiye, Kuzey Yarım Küre'de, 36-42 derece kuzey enlemleriyle 26-45 derece doğu boylamları arasında yer almaktadır. Kurulan fotovoltaik sistemden en iyi verimi alabilmek için, sistemin mümkün olduğunca güneye dik olması gerekmektedir. Tasarımsal kısıtlamalar sebebi ile ideal durum sağlanamasa bile yüzer FV sistem, mümkün olduğunca ideal yön ile dik yapacak şekide tasarlanmalıdır [23].

4.3 Yüzer Fotovoltaik Sistemlerin Türkiye'deki Potansiyeli

Türkiye'de 595 adet baraj ve 45 adet göl bulunmaktadır [24]. Bu barajları, Çizelge 4.1'de görülebileceği gibi kullanım türüne göre filtrelediğimizde, yüzer FV sistem kurulabilecek en büyük potansiyelin sulama amaçlı barajlarda olduğu görülmektedir.

Bu göller ve baraj göllerine ait yüzölçümü, yüzer FV kurulabilir alan ve kapasite bilgileri Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de verilmektedir.

Pazarda standart olarak kullanılan 265 Wp'lık standart bir polikristal FV panel kullanılarak bir yüzer FV sistem tasarımı gerçekleştirildiğinde, yaklaşık olarak 11000 m^2'lik araziye 1 MW'lık yüzer FV sistem kurulumu gerçekleştirilebilmektedir.

Örneğin Sapanca Gölü 47 km^2'lik yüz ölçümüne sahiptir. Sapanca gölü yüzey alanının %1'lik kısmına yüzer FV sistem kurulumu yapılarak 43 MW'lık yüzer FV sistem kurulumu yapılabilir.

Bu hesap, Türkiye'deki potansiyel baraj gölü alanlarının %1'lik kısmı için genişletildiğinde toplamda 19820 MW'lık potansiyel yüzer FV sistem kapasitesi olduğu hesaplanmaktadır.

Çizelge 4.1: Türkiye'deki barajların kullanım türlerine göre kurulabilir kapasite potansiyeli.

Baraj Türü	Normal Su Kotunda Göl Alanı (km^2)	Kurulabilir Alan - %1 (km^2)	Kurulabilir Kapasite (MW)
Enerji	1963	19,6	1785
İçme Suyu	1288	12,9	1171
Sulama	10196	102,0	9269
Toplam	**13447**	**134**	**12225**

Çizelge 4.2: Türkiye'deki göllerin türlerine göre kurulabilir kapasite potansiyeli.

Göl Türü	Yüzölçümü (km^2)	Kurulabilir Alan - %1 (km^2)	Kurulabilir Kapasite (MW)
Acı su	369	3,7	335
Sodalı su	3726	37,3	3387
Tatlı su	2700	27,0	2455
Tuzlu su	1560	15,6	1418
Toplam	**8355**	**83,5**	**7595**

Bu kadar büyük ölçekli kullanılabilir baraj gölü ve göl yüzey alanına sahip bir ülke olarak, bu enerji türünden enerji elde etmek, enerjide dışa bağlılığı azaltmanın yanı sıra elektrik arzının çeşitlendirilmesi ve böylelikle enerji ihtiyacının daha güvenilir yollardan sağlanması anlamına da gelmektedir.

Yalnızca belediyelerin kullandığı baraj göllerine yüzer FV sistem kurulumu yapıldığı düşünüldüğünde dahi oldukça büyük bi ekonomik iyileştirme sağlanabilmektedir.

Ülkemizi de içine alan Orta Doğu coğrafyasında orta geleceğin önemli konularından biri haline gelen sulama ve içme suyu temini konusu da yüzer FV sistem konusunun kapsamı içerisinde yer almaktadır. Tüm bu potansiyel enerji kapasitesine ek olarak, yüzer sistemlerin buharlaşmayı engellediği hesaplandığında bu sistemlerin gerekliliği bir kat daha artmaktadır.

4.4 Yüzer ve Kara Kurulumu Fotovoltaik Sistemlerin Karşılaştırılması

4.4.1 Avantajları

- Yüzer FV panelleri, enerji verimliliği açısından alışılagelmiş güneş enerjisi panellerine göre daha avantajlıdır. Yüzer FV panellerin güç üretim verimliliği, panellerin alt kısmının daha düşük sıcaklıkta olması sebebiyle, kara üzerindeki FV panellerden daha fazladır.
- Gölge etkisi, yosun üremesindeki azalma, su yüzeyi üzerinde oluşan doğal yansıma, su yüzeyinin daha az gün ışığına maruz kalması ve düşük su sıcaklığının yüzer FV sistem performansına pozitif etkisi vardır.
- Yüzer FV paneller, suyun sıcaklığını düşürerek ve hava ile etkileşime giren su yüzeyini azaltarak, doğal göl ve su birikintilerindeki buharlaşmayı %33, insan yapımı tesislerde ise buharlaşmayı %50 azaltır [21].
- Tarım, madencilik, turizm gibi yer yüzündeki toprakları kullanmaya ihtiyaç duyan aktivitelere zemin hazırlar. Ek olarak başka türlü herhangi bir gelir yaratma ihtimali olmayan su yüzeylerini, ticari FV sistemlere çevirir. Teknolojisi sayesinde kullanılacak alanın ve enerji üretim maliyetini azaltmaya yardımcı olur.
- Yüzer FV sistemler, hidroelektrik santral barajlarını, endüstriyel göletleri, taş ve maden ocağı havzalarını, tarımsal sulama havuzlarını ve atıksu arıtım tesisi göletlerini birer solar enerji santraline dönüştürür.
- Yüzer FV sistemler, aynı piyasada satılan solar panellerin kullanıldığı çatı ve yer kurulumları ile maliyette rekabet halindedir.
- Birçok ülkede yüzer FV panel kurulumları, yer kurulumları gibi devlet yardımları, fon ve teşvik programlarına uygundur.
- Panellerin temizliği için (ek olarak verimliliği için) gerekli olan su, kullanıma hazır olarak ortamda bulunur.
- Yüzen sistem ağır malzemeler olmadan kurulabildiğinden, montajı kısmen daha kolaydır. Aynı zamanda montaj süresi daha azdır; bunun getirisi olarak montaj maliyetleri daha düşüktür.

4.4.2 Zorlukları / Sorunlar

Yüzer FV panel montajındaki zorlukların başında, suyun yüzeyinde kalmaya uygun ve doğanın gücüne karşı direnmesi gereken sistem dizaynı gelir.

Yüzer FV sistemlerde karşılaşılan bazı sorunları aşağıdaki gibidir.

- Nem oranının yüksek oluşu sebebi ile FV paneli oluşturan modüllerin enerji üretim performansları nemden etkilenebilmektedir.
- Doğal afetler ve paslanma gibi bozucu etkenler sebebiyle yüzer sistemin dayanıklılığı azalabilir.
- Üretilen elektrik enerjisini, su yüzeyinden karaya transfer etmenin getirdiği bir güvenlik sorunu vardır.
- Yüzer FV sistemler; suyun kalitesi, değişen su derinliği ve sıcaklıklar, akıntı, buharlaşma, balık, yosun ve diğer canlılar gibi çevresel koşullarla baş etmek durumundadır.
- Yüzer FV sistemler, sel, tufan, dalga ve rüzgar gibi sebeplerle hızlı ve ani hareketlere maruz kalabilir. FV paneller doğanın gücüne karşı direnmek durumundadır.
- Yüzer FV sistem pazarındaki büyümenin önündeki en büyük engeller ilk montaj maliyeti ve düzenli bakım maliyetinin yüksek olmasıdır.
- İlk yıllarında, fosil yakıtlarla enerji üretimine kıyasla fotovoltaik sistemler ile enerji üretmek 10 kat daha maliyetlidir.
- Denizlerdeki medcezirlerin solar panellerinin konumunu sürekli değiştirmesi sebebiyle deniz üzerine kurulum yapmak oldukça zordur.
- Denizler üzerindeki rüzgar hızı da yüzer fotovoltaik panellerin verimliliğini azaltan etmenlerden biridir.
- Yüzer FV sistemin konumunu ve yönünü sabit tutmaya yarayan yön kontrol sabitleme sistemlerine ihtiyaç vardır. Bunun da sebebi, yön değişiminin panel verimliliğini olumsuz etkilemesidir.
- Rüzgar, dalga ve diğer dış güçler sebebiyle yüzer fotovoltaik sistemlerde stres ve titreşim sorunları daha yaygındır. Titreşim modüller arasında mikro çatlak

oluşumuna yol açabilir; bu da elektrik üretiminde ve dayanıklılıkta azalmaya sebep olur.

- Yüzer FV sistemlerin toplumda kabul edilebilmesi için halkın ve ilgili organizasyonların konuya bağlılığını arttırma gibi erken planlamalara ihtiyaç vardır.

4.4.3 Maliyetleri

Yüzer FV sistemleri destekleyen iskeletin maliyeti, toplam proje maliyetinin %25'ini oluştururken, bu tutar çoğu zaman aynı yüzölçümde bir toprak alımı ve hazırlığının maliyetinden daha azdır. Toprak üzerine yapılan güneş enerjisi sistemlerinde, kısmen daha yüksek bir alan, inşaat ve depreme dayanıklılık maliyeti ortaya çıkar. Operasyon ve bakım maliyetleri de yer kurulumlarına göre daha düşüktür; çünkü parçaların temizliği için ihtiyaç olan su ortamda hazır olarak bulunur ve parçaların aşırı ısınma ihtimali daha azdır. Yüzer FV sistemler, denizler yerine göl ve diğer su rezervleri gibi tatlı su kaynakları üzerine kurulduğundan, tuzlu suyun yaratacağı paslanma sorunu da ortadan kalkmış olur. Ek olarak, sistemin dengesini sağlayan ekipman genellikle kıyıya kurulduğundan erişmek kolaydır. Yüzer FV sistemler daha az gölgeye maruz kaldığından; üzerinde oluşabilecek bitki örtüsünü temizlemek için ek bir bakıma ihtiyaç duymaz.

Yüzer FV sistem kurulum maliyeti ile ilgili ayrıntılı bilgiye Bölüm 5.2'de yer verilmiştir.

5. İZLEME SİSTEMİ TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ

5.1 Sistemde Kullanılan Malzemelerin Seçimi ve Görevleri

İzleme sistemde kullanılan malzemeler, yüzer FV sistemde kullanıldığı temel işlevlerine göre izleme, üretim ve haberleşme olarak 3 ana grupta incelenmektedir.

5.1.1 İzleme

- PLC

Sahadan gelen izleme ve üretim datalarının toplanması ve OPC server aracılığı ile scada sistemine aktarılması için kullanılmaktadır. Bu çalışmada, izleme sisteminin tasarımı için gerekli olan fiziksel haberleşme katmanı Ethernet olarak belirlenmiş olup, Modbus TCP üzerinden haberleşme gerçekleştirilmektedir.

- Analog giriş kartı

Referans hücreden gelen analog ışınım miktarı verisini PLC ile haberleştirmek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada, ışınım miktarını ölçmek için kullanılan referans hücreden gelen analog verinin anlamlandırılabilmesi için 1 adet ek analog giriş modülü kullanılmaktadır.

- Sıcaklık giriş kartı

Sıcaklık sensörlerinden gelen panel, ortam ve elektrik panosu sıcaklıklarına ait analog verileri PLC ile haberleştirmek için 8 adet ek sıcaklık girişi kullanılmaktadır. Bu çalışmada ortam, elektrik panosu ve panel sıcaklıklarını ölçmek için kullanılan K tipi termokupllardan gelen analog verinin anlamlandırılabilmesi için 1 adet ek analog giriş modülü kullanılmaktadır.

- Panel, ortam ve elektrik panosu sıcaklık sensörleri (K Tipi, 2 x 0,5 mm² Tek telli; Teflon + Teflon)

Panel sıcaklık sensörleri: Sistemin birinci sutününda, birinci [1x1] ve üçüncü [3x1] panellerin arasında bulunmaktadır. Bölüm 5.2.1 ’de ayrıntılı olarak anlatıldığı üzere

her bir FV panelin 3 farklı noktasında bulunan sıcaklık değerleri ölçülmekte ve bu veriler analog olarak PLC'ye aktarılmaktadır.

Ortam ve elektrik panosu sıcaklık sensörleri: Ortam ve elektrik panosuna ait sıcaklık değerlerinin ölçülmesi ve verilerin analog olarak PLC'ye aktarılmasını için kullanılmaktadır.

- Işınım sensörü

Sistemin üçüncü sütununda, birinci satırında [3x1] bulunan panele yapılan bir uzatma ile paneller ile aynı tilt açısında monte edilerek panellerdeki ışınım miktarının ölçülmesi ve verilerin analog olarak PLC'ye aktarılmasını için kullanılmaktadır. Bu çalışmada, ışınımı ölçmek için pironometre sistemlerine kıyasla maliyet avantajı sebebi ile referans hücre kullanılmaktadır.

Yüzer FV sistemde kullanılan referans hücre Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1: Yüzer FV sisteme gelen ışınımı ölçüm referans hücre.

- Endüstriyel modem

PLC'de toplanan verilerin bulut sunuculardaki scada yazılımına aktarılabilmesi ve PLC programında yapılacak değişiklikler için PLC'ye uzaktan bağlantı yapılabilmesi için sahadaki sistem ile bulut sunucu arasında VPN oluşturulması gerekmektedir. Aynı zamanda saha koşulları evden farklı olduğundan ev tipi VPN yapabilme kabiliyeti olan bir modem yerine VPN kabiliyeti olan endüstriyel modem kullanılmaktadır. Bu

çalışmada, sistemin bulunduğu bölgeye yakın bir internet bağlantısı olmaması sebebi ile 3G'yi destekleyen, sim kartlı bir endüstriyel modem modeli tercih edilmiştir.

- Bulut sunucu

Scada sisteminin üzerinde koşması için kullanılmaktadır. Sistemde kullanılan scada'nın özelliği gereği Windows işletim sistemine ve MySQL veritabanına sahiptir.

Bu çalışmada kullanılan yazılım ve veritabanlarının performans ihtiyacını karşılamak üzere 4 çekirdek, 8 GB bellek ve 250 GB disk alanine sahip bir bulut sunucu tercih edilmiştir.

- Scada

PLC tarafından toplanan anlık dataların PLC dışında bir kaynakta biriktirilmesi, kayıt edilmesi ve istenilen şekilde raporlanması için kullanılmaktadır. Bu çalışmada diğer scada'lara kıyasla trend oluşturmada daha esnek ve maliyet olarak daha uygun olan bir scada tercih edilmiştir.

5.1.2 Üretim

- Solar evirici

Sistemin üretmiş olduğu DC gerilimi, AC gerilime çevirmek ve bu çevrimi yaparken üretilen AC gerilim frekansının şebeke frekansına getirilmesi için kullanılmaktadır. Bu çalışmada diğer bilinen markalara göre maliyet avantajı sağlaması ve sistem boyutu sebebi ile küresel bir solar evirici üreticisinin 20,0 kW'lık dizi tipi solar evicisi kullanılmaktadır.

- Fotovoltaik panel

Güneşten gelen ışınım ile DC gerilime sahip elektrik üretilmesi için kullanılmaktadır. Bu çalışmada pazarda kolayca bulunabilen ve küresel rakiplerine göre fiyat avantajı sağlayan bir FV panel üretisinin 250 Wp'lik FV panelleri kullanılmaktadır.

5.1.3 Haberleşme

Aşağıdaki şekilde blok diyagramı gösterilen projede; PLC ile solar evirici arasındaki haberleşme modbus TCP haberleşme protokolü ile, Scada ile PLC arasındaki haberleşme OPC server üzerinden gerçekleştirilmektedir.

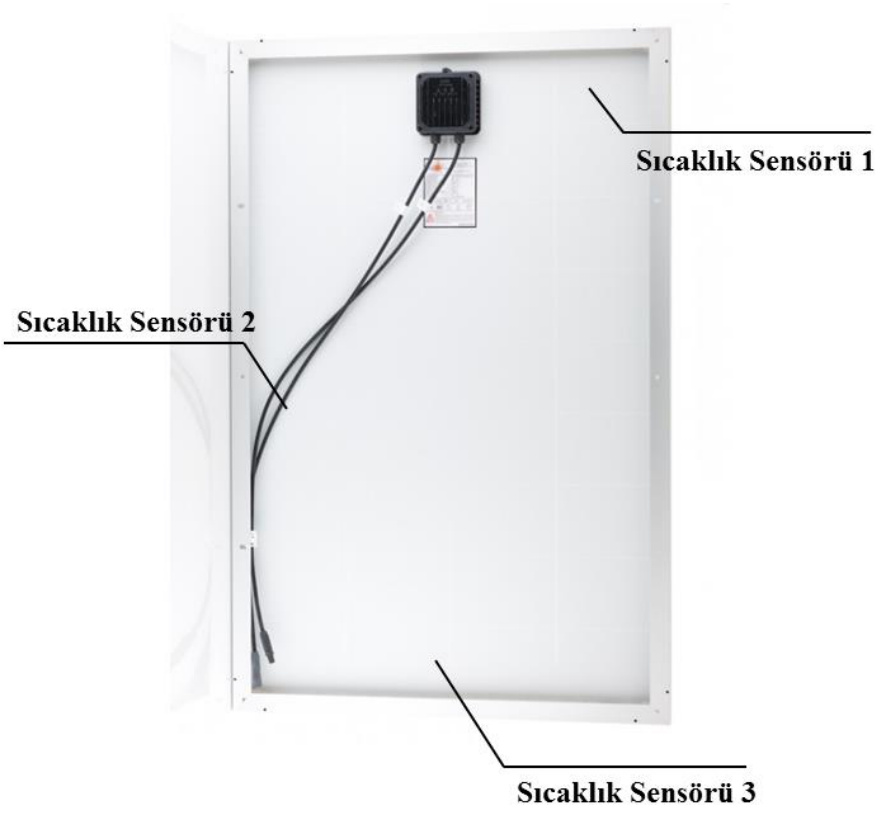
5.2 Üretim Datasının Analizi

Yüzer FV sisteme yöneltilecek soruların cevaplayabilmek için öncelikle sistemi dinlemek ve bu dinlemeden oluşan dataları tarih ve zaman damgası ile kayıt altında tutmak gerekmektedir.

Yüzer FV sistemin analizi için gerekli olan datanın toplanmasından, analizinin yapılmasına kadar süren tüm sürecin incelendiği bölümdür. Bu bölümde ele alınan süreç, sistem ölçeğinden bağımsızdır. Yani en küçük ölçekli sistemden, en büyük ölçekli sisteme kadar aynıdır.

5.2.1 Datanın Üretimi

Şekil 5.2'de verilmiş olan yüzer FV sistemin birinci sütununda, birinci [1x1] ve üçüncü [3x1] satırındaki panellerin arkasında, panel başına 3 adet K tipi sıcaklık sensörü bulunmaktadır. Doğru sıcaklık verisinin alınabilmesi için panel sıcaklık sensörleri, panellere Şekil 5.2'deki gibi yerleştirilmektedir. Aynı panel üzerinde, 3 farklı noktada bulunan panel sıcaklık ölçümünün ortalaması alınarak ilgili panele ait anlık ortalama panel sıcaklığı (℃) hesaplanmaktadır.



Şekil 5.2: FV panele bağlanan sıcaklık sensörlerinin yerleşimi.

Yüzer FV sistemin üçüncü satır, birinci sutün [3x1] ve ikinci sütundaki [3x2] paneller arasında izleme sisteminin elektrik panosu bulunmaktadır. 1 adedi bu panonun aşağısında, ortam sıcaklığını (℃) ölçmek için, 1 adedi pano içerisinde pano sıcaklığını (℃) ölçmek için olmak üzere toplamda 2 adet K tipi sıcaklık sensörü kullanılmaktadır. Sistemde kullanılan panel, ortam ve pano sıcaklık sensörlerinden hiçbirinin güneşle direk teması bulunmamaktadır.

Yüzer FV sistemin üçünsü satır, birinci sutününda [3x1] bulunan panel ile aynı tilt açısı ile monte edilen 1 adet referans hücre bulunmaktadır. Bu referans hücre ile panellere düşen ışınım miktarı (W/m^2) ölçülmektedir. Bu referans hücrenin montajı herhangi bir panele gölge düşürmeyecek şekilde gerçekleştirilmiştir.

Yüzer FV sistemde kullanılan solar eviricinin özelliği gereği, üretim ile ilgili verilerin tutulduğu dahili bir hafıza alanı bulunmaktadır.

5.2.2 Datanın Toplanması

PLC'ye takılan ek modül kartları ile; Panel sıcaklığını ölçmek için kullanılan 6 adet sensörden gelen analog sıcaklık verileri, ortam ve pano sıcaklığını ölçmek için kullanılan birer adet sensörden gelen analog sıcaklık verileri ve ışınım miktarını ölçmek için kullanılan referans hücreden gelen analog veriler PLC'nin anlamlandırabileceği hale getirilmiş olur.

İzleme sisteminde kullanılan PLC'de dahili olarak bulunan Modbus ya da Modbus TCP haberleşme protokolleri, aynı protokolü destekleyen cihazlar ile haberleşilmesine olanak sağlamaktadır. Yüzer FV sistemde bulanan solar eviricinin hafıza alanından alınmak istenen veriler, veri tipi seçilerek ilgili data Modbus ya da Modbus TCP haberleşmeleri üzerinden PLC'ye toplanabilmektedir. Solar evirici üzerinden PLC'ye alınan veriler Çizelge 5.1'deki gibidir.

Çizelge 5.1: Solar evirici üzerinden PLC'ye alınan veri listesi.

Alınan Veri Türü	Açıklama
Şebeke frekansı ($F_{Şebeke}$)	Solar eviricinin ürettiği elektriğin şebekeye verildiği frenkansı göstermektedir.
Güç ($P_{Üretilen} - P_{Şebeke}$)	Solar eviriciye gelen ve solar eviricinin üreterek şebekeye verdiği elektriğin güçlerini göstermektedir.
Gerilim ($V_{Üretilen} - V_{Şebeke}$)	Solar eviriciye gelen ve solar eviricinin üreterek şebekeye verdiği elektriğin gerilimini göstermektedir.
Enerji üretim miktarı (E_{Toplam})	Solar eviricinin bugüne kadar yapmış olduğu enerji üretimini göstermektedir.

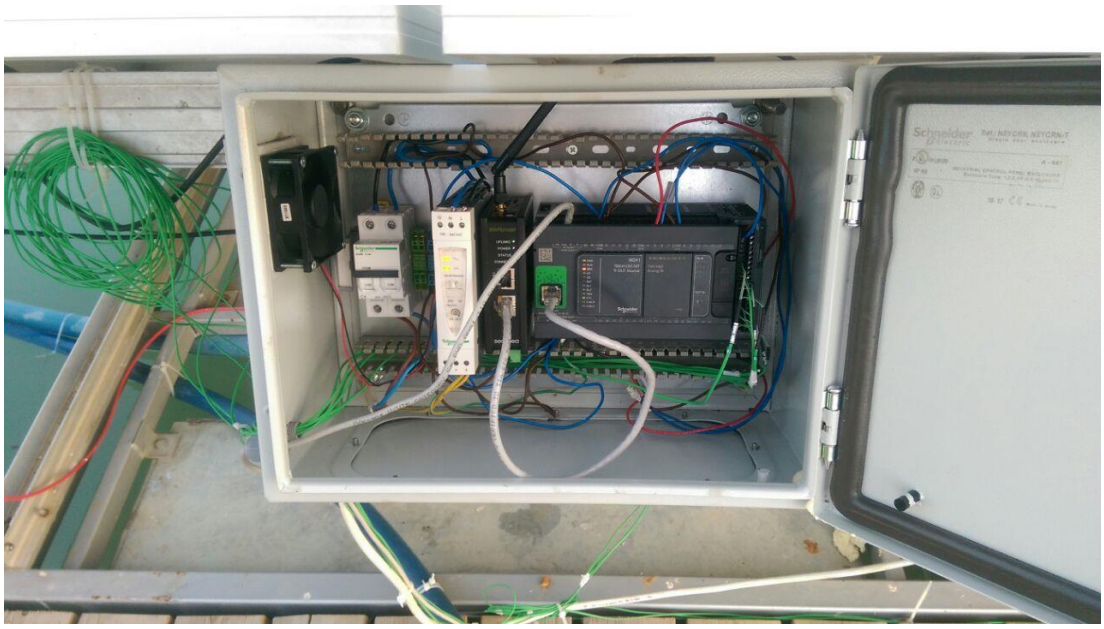
PLC üzerinden ulaşılabilir olan tüm bu sensor ve solar evirici verileri, Schneider Electric'e ait SoMachine isimli PLC yazılım programı ile doğru data tipleri seçilerek izlenebilir durumdadır.

5.2.3 Datanın Aktarımı ve Biriktirilmesi

İzleme sisteminde PLC tarafından toplanan anlık dataların PLC dışında bir kaynakta biriktirilmesi, kayıt edilmesi ve istenilen şekilde raporlanması için scada kullanılmaktadır. Bu sistemde scada'nın kurulu olduğu bilgisayar ya da sunucu ile PLC'nin aynı ağda olması gerekmektedir. Yüzer FV sistemdeki saha şartlarının zorlu oluşu sebebi ile sahada bir bilgisayar ya da sunucu bulundurmaktansa bulut sunucu hizmeti alarak bu sunucu izleminin sanallaştırılması hedeflenmiştir.

Bu karar, sahadaki PLC ile Microsoft'un herhangi bir veri merkezinde bulunan bulut sunucuyu aynı ağda gösterme ihtiyacını doğurmuştur. Bu ihtiyacın giderilmesi için sahadaki PLC'nin bulunduğu ağ ile bulut sunucunun bulunduğu ağlar arasında VPN oluşturulması gerekmektedir. Aynı zamanda saha koşulları ev koşullarından farklı olduğundan ev tipi VPN yapabilme kabiliyeti olan bir modem yerine VPN kabiliyeti olan bir endüstriyel modem kullanılmaktadır.

Solar evirici ve sensorlerden alınan tüm bilgiler scada aracılığı ile kayıt edilmekte ve istenilen şekilde raporlanabilmektektedir. Yüzer FV sistemden gerekli verilerin toplanması için kullanılan izleme sistemi panosu Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3: Yüzer fotovoltaik sistemde kullanılan izleme sistemi panosu.

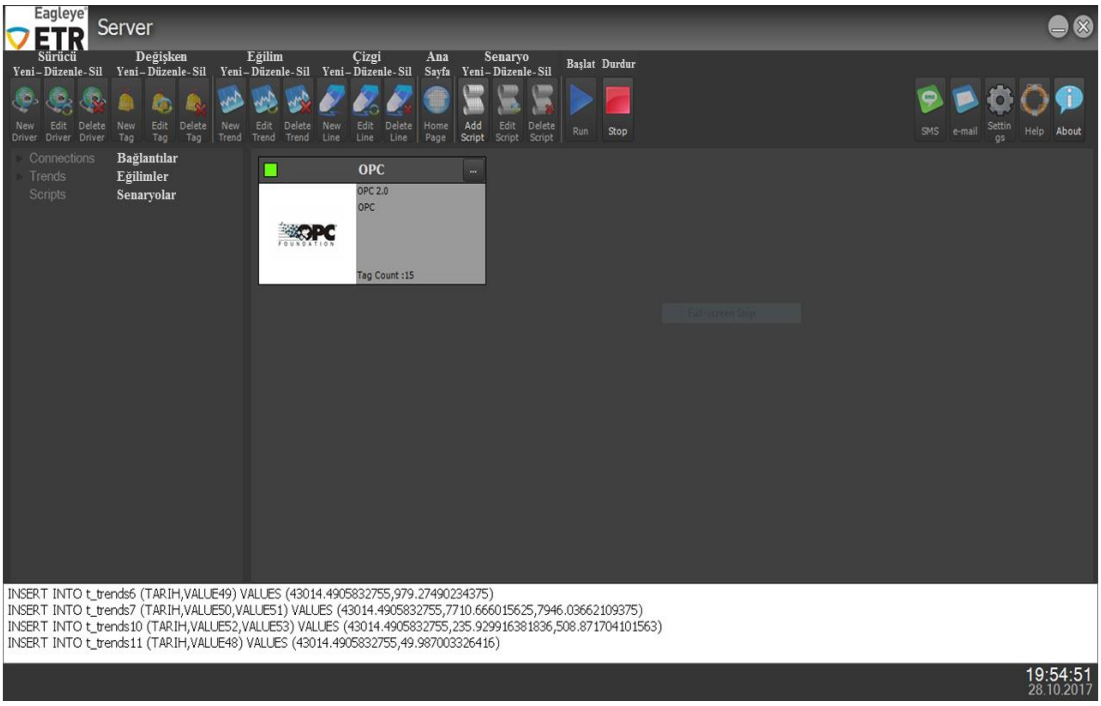
5.2.4 Raporlama

Scada üzerinde kayıt edilen FV sisteme ait datalar, Şekil 5.6'dan de görülebileceği gibi kullanılan scada üzerinden istenilen tarih ve saat aralıklarına göre raporlanabilmektedir. Raporlanan datalar, yine scada üzerinde bulunan kullanıcı arayüzü aracılığı ile grafik olarak çizdirilebilmektedir.

FV sistemin belirli bir zaman aralığına ait grafikler, scada'nın özelliği sayesinde fotoğraf, excel ya da matlab dosyası olarak çıktı üretebilmektedir. Böylece, dataların analizi için scada'ya bağlı kalma zorunluluğu ortadan kalkmaktadır. Analizi yapacak kişiler, daha hakim oldukları bir platform üzerinde sistem analizini gerçekleştirebilmektedir. Yukarıda özellikleri bahsedilen scada arayüzü, Şekil 5.4'de gösterilmektedir.

5.3 Kullanıcı Arayüzü (Scada)

Scada'da, sistem tasarımının yapıldığı server tarafı ve kullanıcıların hazır raporlara ulaşabildiği taraf olan kullanıcı tarafı olmak üzere iki farklı bölüme ait iki farklı arayüz bulunmaktadır. Sistemin çalışma durumu, sistemde bulunan tag sayısının ve sistemden gelen anlık değerlerin kontrol edilecebileceği scada'nın server tarafına ait kullanıcı arayüzü Şekil 5.4'te gösterilmektedir.

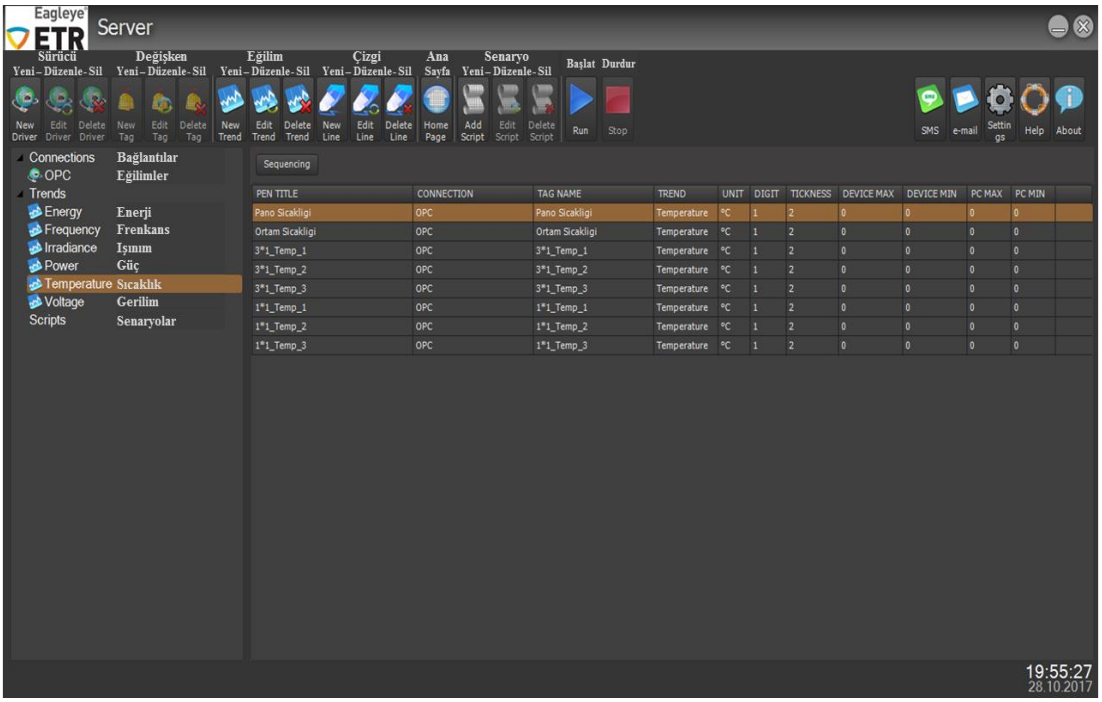


Şekil 5.4: Scada'nın server tarafı arayüzü – 1.

5.3.1 Server Tarafı

Scada'nın çalışması ve istenen raporları üretmesi için sistem tasarımının yapıldığı bölümdür. Bu bölümde driver, trend, tag ve line tanımlamalarının yanı sıra, bu değişkenlere ait ayarlar da yine scada'nın bu bölümünde gerçekleştirilmektedir.

Oluşturulacak grafiklere ait eksenlerin minimum – maksimum değerlerinden, virgülden sonra kaç haneye kadar değerlerin raporda yer alacağına kadar olan rapor ayrıntıları bu bölümde tasarlanmaktadır. Trendlerin, trendlere bağlı taglerin ve bu taglerin ayrıntılarının ayarlandığı scada'nın server tarafının kullanıcı arayüzü Şekil 5.5'te gösterilmektedir.

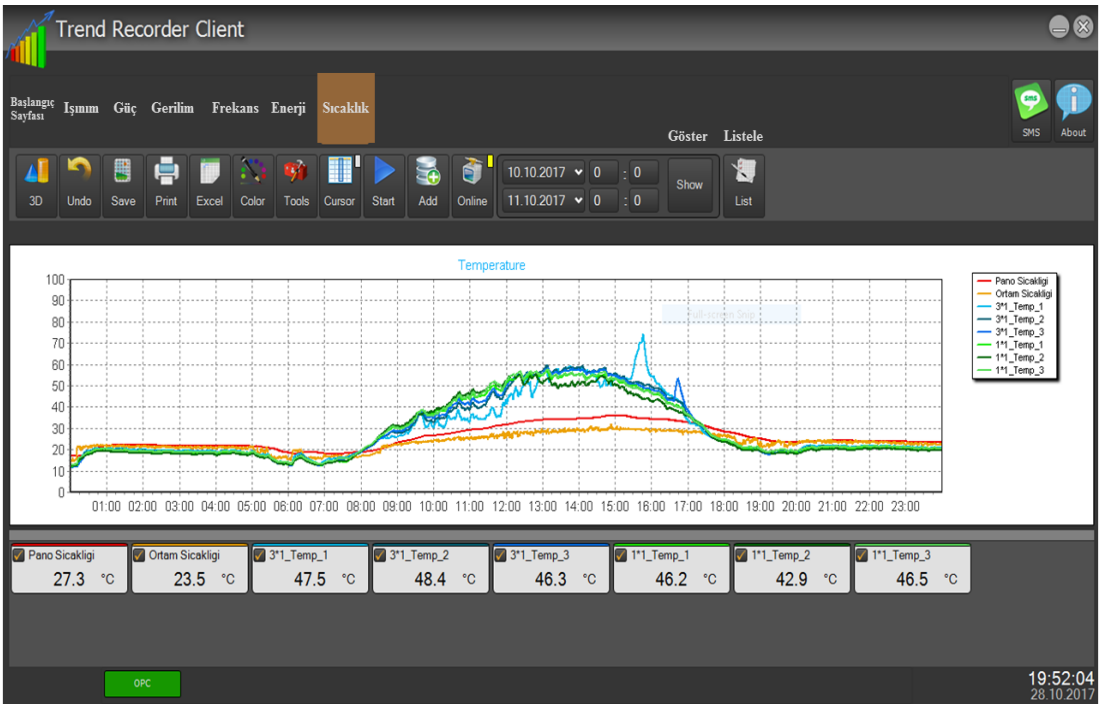


Şekil 5.5: Scada'nın server tarafı arayüzü – 2.

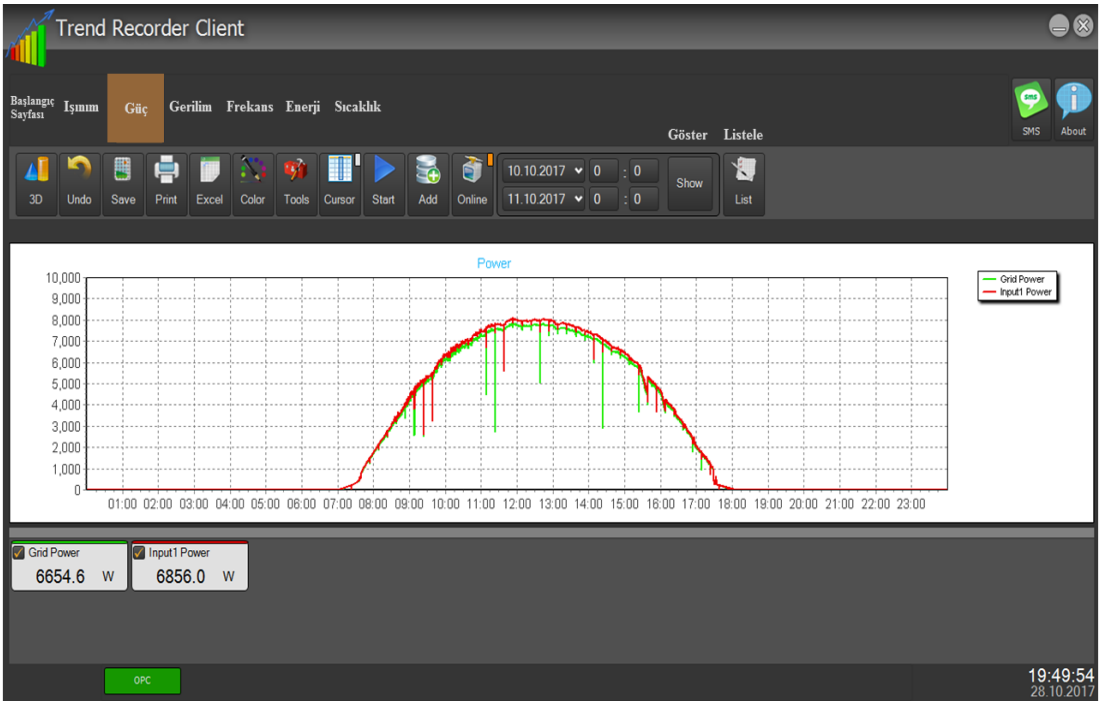
5.3.2 Kullanıcı Tarafı

Scada'nın kullanıcıya dönük kısmıdır. Server tarafında hazırlanan raporlar, bu bölümde çalıştırılarak veritabanında kayıt edilen datalar grafik haline dönüştürülür. Bu bölümde kullanıcı yetkilendirmesi oldukça kısıtlı olsa da kullanıcı, istediği trendi ve zaman aralığını (tarih ve saat) seçerek raporu çalıştırabilir.

Scada'nın kullanıcı tarafında, FV sistemin belirli bir zaman aralığına ait sıcaklık – zaman ve güç – zaman grafiklerinin gösterildiği kullanıcı arayüzleri Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de verilmektedir.



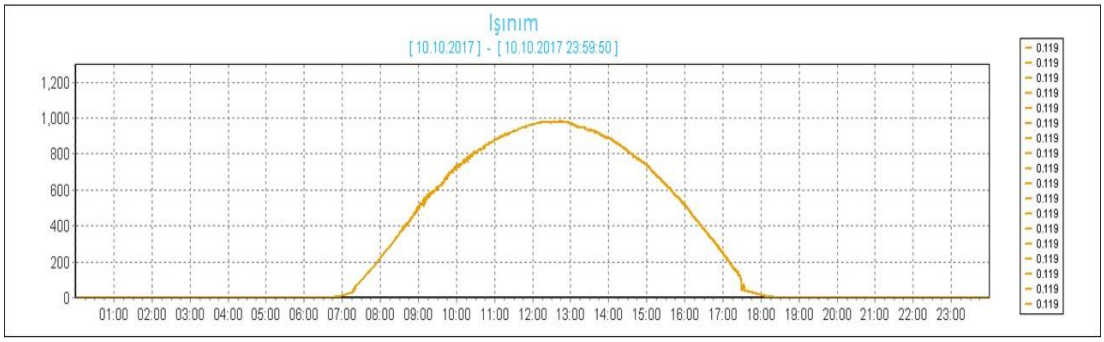
Şekil 5.6: Scada'nın kullanıcı tarafı arayüzü – 1, Sıcaklık – Zaman grafiği.



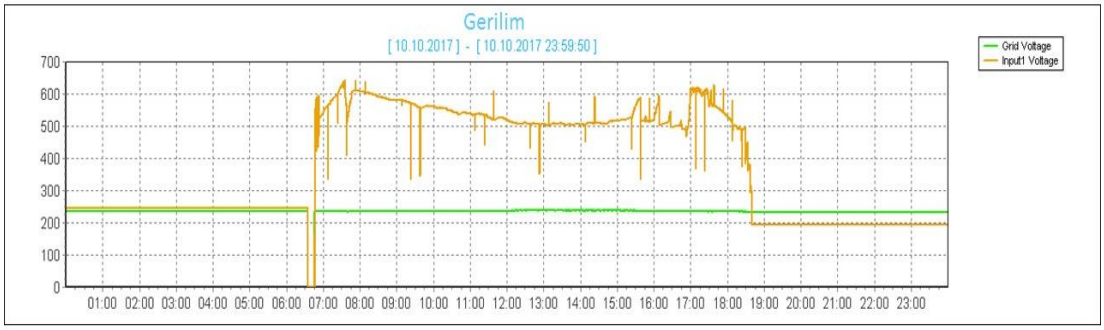
Şekil 5.7: Scada'nın kullanıcı tarafı arayüzü – 2, Güç – Zaman grafiği.

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de görülebileceği üzere kullanıcı tarafındaki kullanıcı arayüzünde kullanıcı, raporları anlık olarak görebilmenin yanı sıra grafik ve grafiği oluşturan dataları matlab, excel ya da fotoğraf formatında dışarıya aktarabilmektedir. Böylece, dataların analizi için scada'ya bağlı kalma zorunluluğu ortadan kalkmaktadır. Analizi yapacak kişiler, daha hakim oldukları bir platform üzerinde sistem analizini

gerçekleştirebilmektedir. Scada'nın kullanıcı tarafında, FV sistemin belirli bir zaman aralığına ait, fotoğraf dosyası olarak dışarıya aktarılmış gerilim – zaman ve ışınım – zaman grafikleri Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da gösterilmektedir.



Şekil 5.8: Scada'nın kullanıcı tarafı arayüzü – 3, Gerilim – Zaman grafiğini dışa fotoğraf dosyası aktarma.



Şekil 5.9: Scada'nın kullanıcı tarafı arayüzü – 4, Işınım – Zaman grafiğini dışa fotoğraf dosyası aktarma.

6. FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN TEKNİK VE FİNANSAL ANALİZİ

FV sistemlerin ekonomik analizin yapılabilmesi için öncelikle enerji üretim analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bu analizlerin yapılabilmesi için, ölçüm yapılarak elde edilen gerçek verilere ek olarak gerçeğe yakın simülasyon verilerine de ihtiyaç duyulmaktadır.

Enerji üretimi ile ilgili çalışmalar yapılırken hassasiyetin mümkün olduğunca arttırılabilmesi için dünya üzerinde en yaygın kullanılan ve finans kuruluşlarının da kredilendirme yaparken hesaplama sonuçlarından yararlandığı simülasyon yazılımı olan PVsyst yazılımı kullanılmaktadır. PVsyst yazılımına ek olarak meteorolojik veriler için bu çalışma kapsamında sahadaki ölçüm istasyonuna en yakın verilerin elde edildiği PVGIS yazılımından elde edilen veriler kullanılmaktadır. Bu tez çalışması hesaplamalarında kullanılan PVsyst ve PVGIS yazılımları ile ilgili ayrıntılı bilgi Bölüm 6.1'dedir.

6.1 Fotovoltaik Sistem Simülasyon Yazılımı

Bu çalışmada gerekli olan simülasyon verilerine hesaplayabilmek için Bölüm 5'de de kısaca değinildiği üzere PVsyst simülasyon yazılımı kullanılmaktadır.

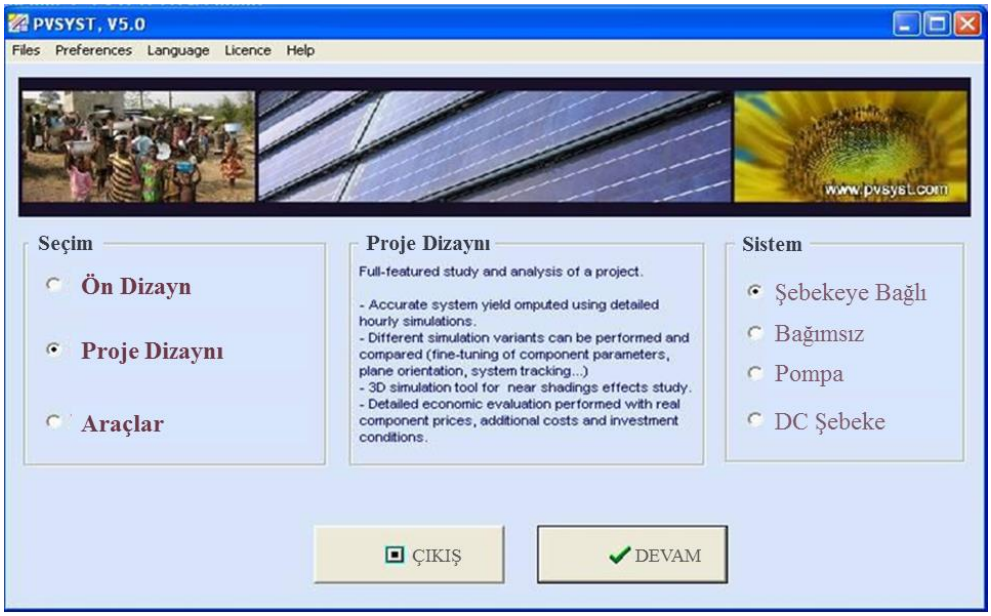
PVsyst yazılımı, İsviçre'deki Cenevre Üniversitesi tarafından geliştirilmiş bir simülasyon yazılımıdır. PVsyst yazılımı ile FV sistemler için boyutlandırma, simülasyon ve veri analizi yapılabilmektedir. Bu yazılım, mimar, mühendis ve araştırmacılar için araçlar içermektedir. PVsyst programı ile şebekeye entegre sistemlerin modellemesi yapılabildiği gibi şebekeden uzak sistemlerin de modellemesi yapılabilmektedir.

PVsyst yazılımı, simülasyon yazılımları içerisinde bankalar tarafından kabul edilen ender programlardan biri olarak tanımlanmaktadır. Bu yazılımın programlanmasında C programlama dili kullanılmıştır. PVsyst yazılımı hesaplamalarını gerçekleştirirken birçok farklı tür veriyi göz önüne almaktadır. Bu veri türleri aşağıdaki gibidir:

- Meteorolojik veriler

- Bölge kirlilik oranları (Kum fırtınası, çamur yağmuru vb.)
- Ayrıntılı güneş ışınım değerleri
- Gölgelenme analizleri
- Yer yansıma oranları (Albedo)
- Yerleşim planları
- Güneş paneli yönü ve açısı
- Güneş panelinin özellikleri
- Güneş panellerinin yıllık güç düşümü oranları
- Eviricilerin özellikleri
- Kablo mesafeleri
- Bağlantı noktası sayısı
- Şebeke özellikleri

PVsyst simülasyon yazılımının kullanıcı ara yüzü Şekil 6.1'de gösterilmektedir.



Şekil 6.1: PVsyst simülasyon yazılımı kullanıcı arayüzü.

Bu detayların birçoğu yazılımın kendi içinde yer alan dahili kütüphanesinden çağrılabileceği gibi harici verileri içe aktararak, dışarıdan kaynak kullanımı da mümkündür.

PVsyst yazılımında FV sistem tasarımı yapabilmek için gerekli olan güneş enerjisi potansiyeli, sıcaklık ve diğer meteorolojik verileri lokasyon bazlı olarak sağlayan kaynak PVGIS yazılımıdır. PVGIS'ten alınan verilerin PVsyst yazılımı üzerinde işlenmesi ile bir FV sistemin günlük, aylık ve yıllık olarak üreteceği enerji miktarı hesaplanabilir. PVsyst yazılımı, FV sistemler için en yaygın olarak kullanılan analiz programı olmasına ek olarak, aynı zamanda en güvenilir FV sistem simülasyon yazılımıdır. Buna rağmen bu çalışmada, lokasyon bazlı olarak daha spesifik veriler üretmek amacı ile PVsyst yazılımının ürettiği datalar Konya ve çevresindeki bölge için doğrulanarak PVsyst'in bu bölgeye özel düzeltmesi gerçekleştirilecektir. Ek olarak bu bölgeye özel PVsyst yazılımı için doğrultma katsayısı oluşturulacaktır.

6.2 Teknik Analiz

Çalışma kapsamında analiz edilecek sistemler aşağıdaki gibidir. Bunlar:

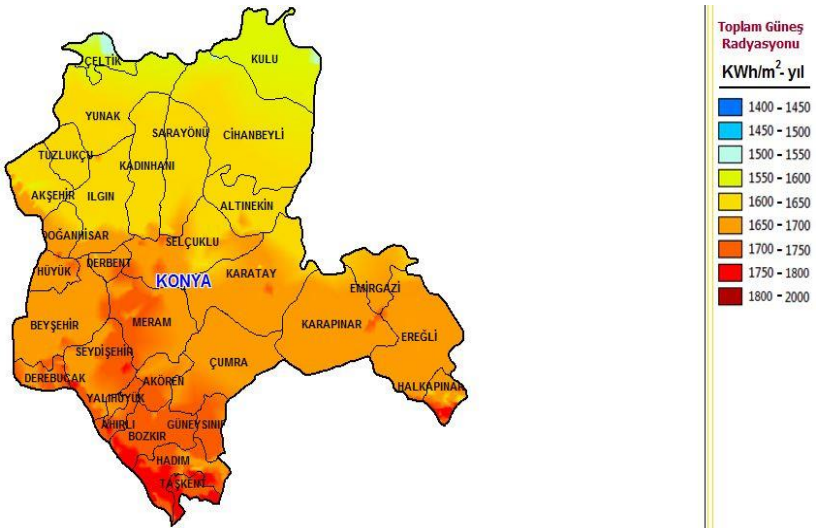
1. Konya ili Şelçuklu ilçesinde bulunan 82 kW'lık çatı üstü FV sistem ile yine aynı lokasyona ait simülasyon verilerinin karşılaştırılması
2. İçel ili Mut ilçesinde bulunan 10 kW'lık yüzer FV sistem ile yine aynı lokasyona ait gerçeklenmiş simülasyon verilerinin karşılaştırılması

6.2.1 Arazi Tipi FV Sistemler ile Simülasyon Verilerinin Karşılaştırılması

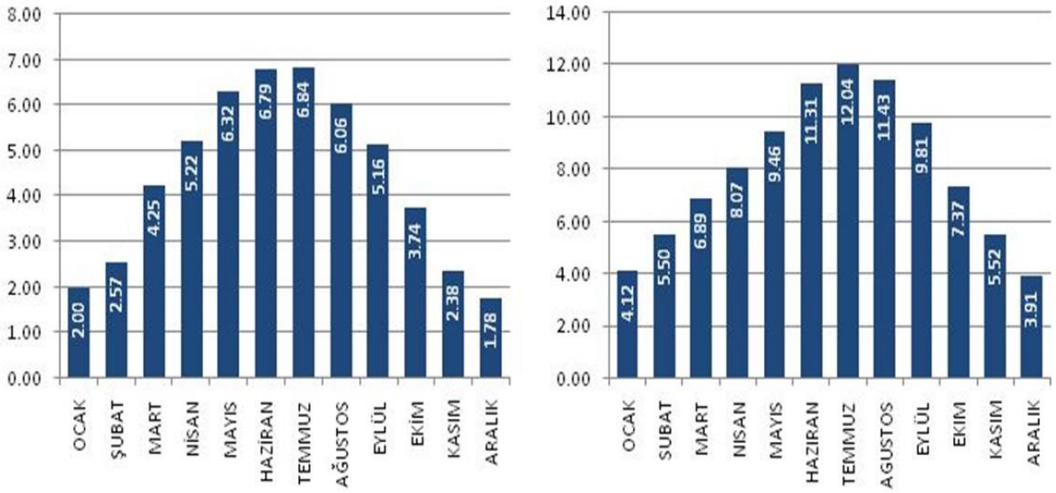
6.2.1.1 FV sistem lokasyonu ve güneş enerjisi potansiyeli

Kara kurulumu FV sistemden gerçek veri almak için kullanılan FV sistem lokasyonu Konya ili Selçuklu ilçesi sınırları içerisinde bulunmaktadır.

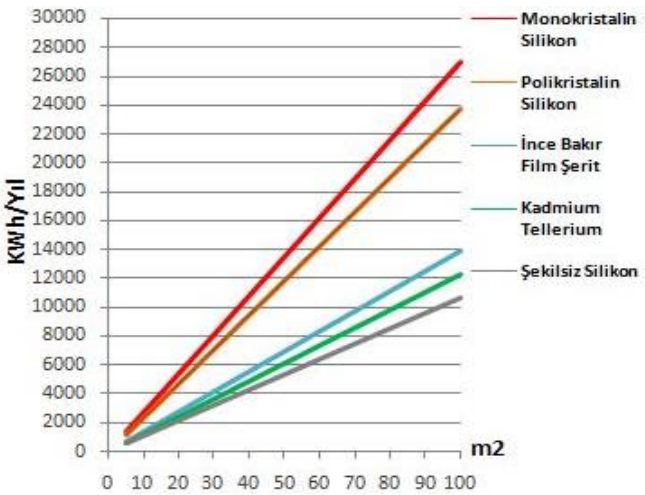
Konya, 41000 km^2 yüzey alanıyla Türkiye'nin yüzölçümü olarak en büyük ilidir. Dünya üzerinde 37° 52' kuzey – 37° 30'doğu boylamlarında bulunmaktadır. GEPA'ya göre Konya'nın, yıllık toplam gelen güneş enerjisi miktarının 1608 kWh/m^2-yıl ve yıllık toplam güneşlenme süresinin 2898 saat olduğu tespit edilmiştir. Günlük olarak baktığımızda bu rakamlar 4,4 kWh/m^2'lik güneş enerjisi gücüne ve 8 saatlik güneşlenme süresine denk gelmektedir. Bu da Konya'da, yılın 121 tam günün güneşli geçmesi ile eşit olmaktadır. Konya ili, Selçuklu ilçesinin aylara göre global radyasyon değerleri, güneşlenme süreleri ve FV panel tipine göre birim alanda üretilebilecek yıllık enerji miktarlarına ait grafikler Şekil 6.2Şekil 6.2:, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te verilmiştir [4].



Şekil 6.2: Konya İli Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası [GEPA].



Şekil 6.3: Konya ili Selçuklu ilçesinin aylara göre global radyasyon değerleri (kWh/m^2-gün) ve ortalama güneşlenme süreleri (saat).



Şekil 6.4: Konya ili Selçuklu ilçesinde FV panel tipine göre birim alanda üretilebilecek yıllık enerji miktarları (kWh/yıl).

Bu değerlere göre Konya'nın en çok ve en az güneş enerjisi üretilecek ayları sırası ile Temmuz ve Aralık olmaktadır.

6.2.1.2 Fotovoltaik sistem tasarımı

Konya ili Selçuklu ilçesinde kurulu bulunan çatı üstü kuruluma sahip FV sistemin kurulu gücü 82 kW'dir. Üretimin yüksek, tüketimin düşük olması durumunda mahsuplaşma yapabilmek için sistem, şebeke bağlantılı olarak tasarlanmıştır.

Sistemin kurulumunun çatı üstüne gerçekleştirilmesi sebebi ile sistemdeki sınırlayıcı unsurların başında kurulum alanı gelmektedir. Çatı yapısı gereği mevcut alana maksimum kapasiteye sahip FV sistem tasarlanmıştır. Sistem tasarımı, PVsyst simülasyon yazılımı kullanılarak gerçekleştirildiği için sisteme ait ayrıntılı bilgi PVsyst simülasyon yazılımının ürettiği proje çıktılarında yer almaktadır. Bu proje çıktıları Şekil A.1'de verilmektedir.

Tasarlanmak istenen sisteme ait aşağıdaki bilgiler girildikten sonra simülasyon yazılımı otomatik olarak bu verileri bir sistem mimarisi içerisine yerleştirmektedir. Simülasyon yazılımına aktarılması istenen veriler;

- Coğrafi lokasyon (enlem – boylam olarak)
- Tilt açısı
- Azimut açısı
- FV panel tipi ve adedi
- Solar evirici tipi ve adedi
- Meteorolojik data (opsiyonel)

Simülasyon yazılımına aktarılan bilgiler doğrultusunda bu FV sisteme ait dizi (dizi başına düşen güç, voltaj ve akım) ve evirici (evirici başına düşen güç, voltaj ve akım) bilgi çıktısı üretmektedir. Bu çıktılara ek olarak Şekil A.1'de görülebileceği üzere bu FV sisteme ait bazı analizler gerçekleştirebilmektedir. Bu analizler;

- Brüt enerji üretimi (aylık ve yıllık periyotlarda)
- Kayıp miktarı
- Net enerji üretimi (aylık ve yıllık periyotlarda)

Şekil A.1'de simülasyon yazılımından alınan çıktılar bulunan bu FV sistem, tasarımda Tilt açısı 15°, Azimut açısı 0° olarak alınmıştır. Bu tasarımın iki öncelikli sebebi vardır. Bunlardan birincisi panellerin güneşi yıl boyunca daha dik açıyla almasını sağlamak, ikincisi ise özellikle rüzgar yüklerinin azaltılmasını sağlayarak yapısal yükleri en aza indirgemektir.

FV sistem tasarımı için gerekli olan malzemeler "Bölüm 3. FV Sistemi Oluşturan Öğeler" başlığı altında verilmiştir. Konya'daki FV sistemin tasarım ayrıntıları, sistemde kullanılan malzemeler ve bu malzemelere ait detaylı özellikler aşağıda verilmiştir.

Fotovoltaik panel

Analizi yapılacak olan 82 kW ölçeğindeki FV sistemde, FV panel seçimi yapılırken bu alanda en yaygın kullanılan FV panel tipi olması, hızlı temini ve uygun maliyetleri sebebi ile polikristal FV paneller tercih edilmiştir. FV panel olarak Jinko firmasının 265 Wp'lik JKM265P model polikristal FV panelleri kullanılmıştır. Bu FV panel modeline ait elektriksel değerler Çizelge 6.1'de, FV panele ait Gerilim – Akım, Gerilim – Güç, Hücre sıcaklığı – Isc, V_{oc}, P_{max} ve Verimlilik – Yıl bilgileri Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'de gösterilmektedir.

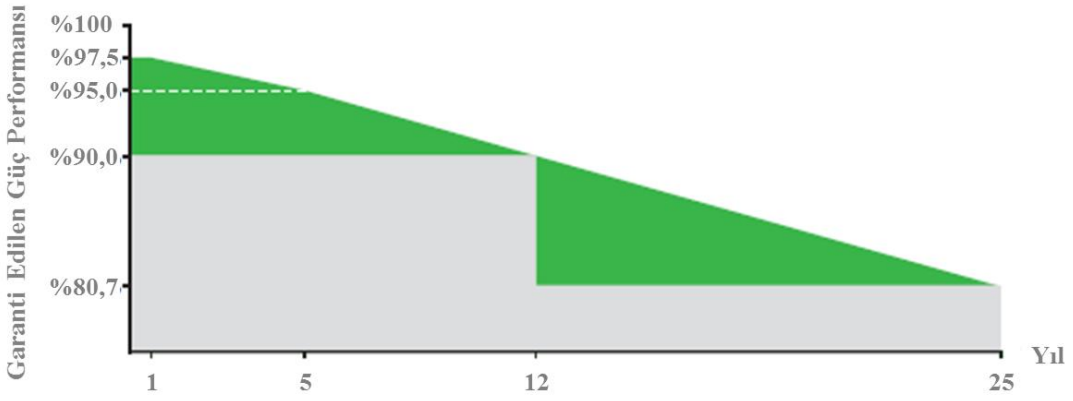
Çizelge 6.1: Jinko firmasının JKM265P model FV paneline ait elektriksel değerler.

Modül Tipi	JKM265P	
	STC	NOCT
Maksimum Güç (P_{max})	265 Wp	197 Wp
Maksimum Gerilim (V_{mp})	31,4 V	29,0 V
Maksimum Akım (I_{mp})	8,44 A	6,78 A
Açık devre Gerilimi (V_{oc})	38,6 V	35,3 V
Kısa Devre Akımı (I_{sc})	9,03 A	7,36 A
Modül Verimi	%16,19	
Maksimum Sistem Gerilimi	1000 VDC (IEC)	
Güç Töleransı	0..+%3	
Sıcaklık Katsayısı (P_{max}'ın)	-%0,41/°C	
Sıcaklık Katsayısı (V_{oc}'nin)	-%0,31/°C	
Sıcaklık Katsayısı (I_{sc}'nin)	-%0,06/°C	
Nominal Hücre Sıcaklığı (NOCT)	45±2°C	
Işınım	1000 W/m^2	800 W/m^2
Maksimum Gerilim (V_{mp})	25°C	20°C
AM	1,5	
Rüzgar Hızı	-	1 m/s
Güç Ölçüm Töleransı	±%3	

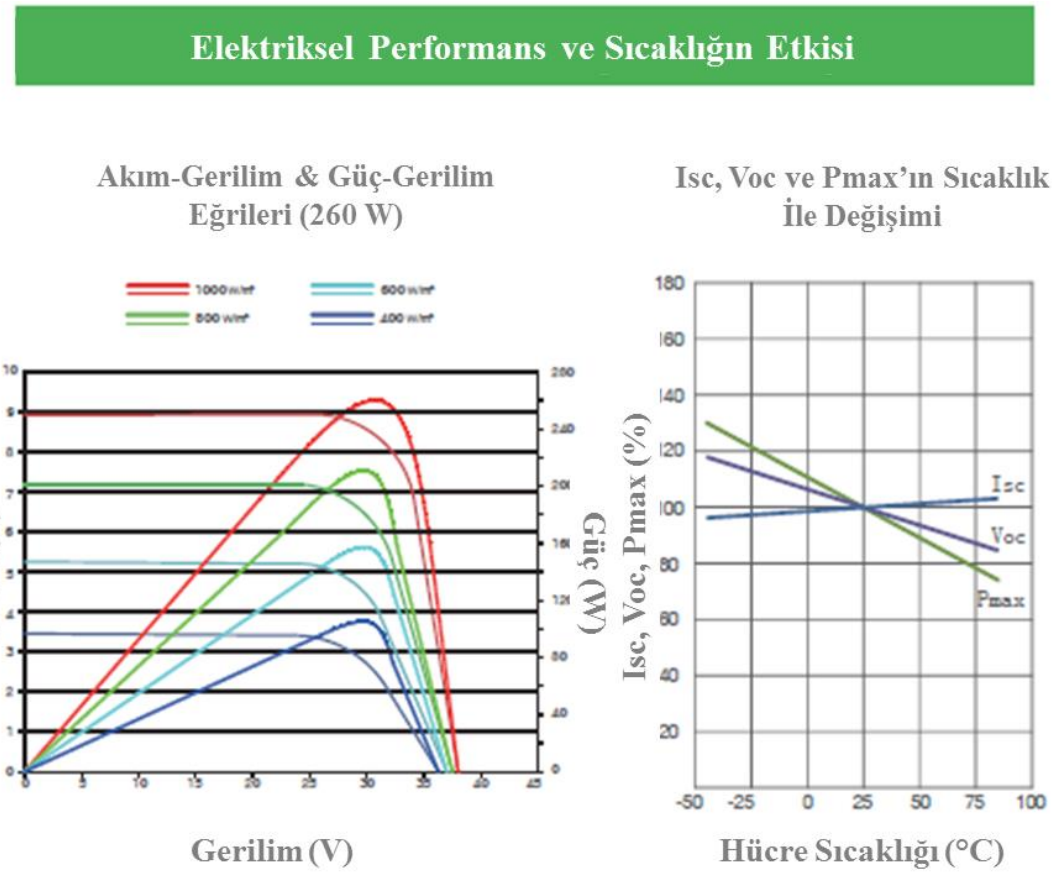
FV sistemde kullanılan FV panel boyutları 1650x992x40mm'dir.

Bu FV sistemde 82 kW ölçeğinde sistem tasarımı gerçekleştirebilmek için 320 adet 265 Wp gücünde FV panel kullanılmıştır.

320 adet x 265 Wp = 84,8 kW



Şekil 6.5: Jinko firmasının JKM265P model fotovoltaik paneline ait Verimlik – Yıl grafiği.



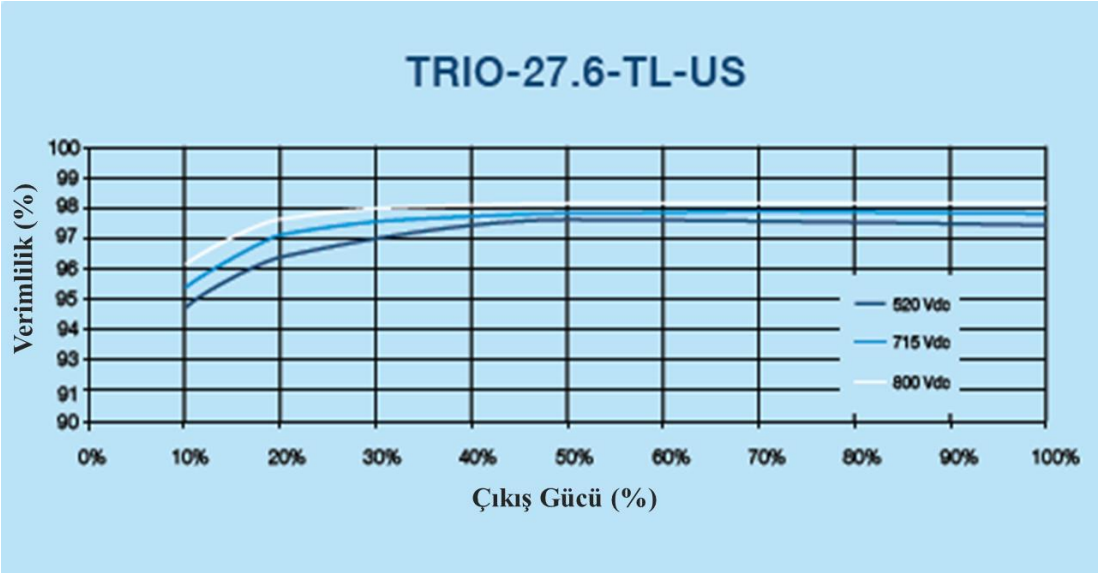
Şekil 6.6: Jinko firmasının JKM265P model fotovoltaik paneline ait Gerilim – Akım, Gerilim – Güç ve Hücre sıcaklığı – I_{sc}, V_{oc}, Pmax grafikleri.

Solar Evirici

Solar evirici seçimi yapılırken sistem kapasitesinin dizi eviricilere uygun oluşu sebebi ile sistem tasarımının solar evirici bölümünde dizi tipi trifaze solar evirici kullanılmıştır. Dizi tipi solar evirici olarak ABB firmasının 27,6 kW'lık nominal güce sahip TRIO-27.6-TL-OUTD model ve 20,0 kW'lık nominal güce sahip TRIO-20,0-TL-OUTD trifaze solar eviricileri kullanılmaktadır. Bu dizi evirici modellerine ait teknik bilgiler Çizelge 6.2Çizelge 6.2:'de ve Şekil 6.7'de gösterilmektedir [18].

Çizelge 6.2: ABB firmasının TRIO-2x.x-TL-OUTD model solar eviricilerine ait elektriksel değerler.

Teknik Özellikler	TRIO-20.0-TL-OUTD	TRIO-27.6-TL-OUTD
DC Bölüm		
Nominal çıkış gücü	20000 W	27600 W
Maksimum çıkış gücü	22000 W	30000 W
Nominal AC gerilim	480 V	
Giriş Bölümü (DC)		
Maksimum güç noktası takip adedi	2	
Maksimum güç noktası başına maksimum giriş adedi	4	
Maksimum güç noktası başına maksimum güç	12000 W	16000 W
Maksimum gerilim (V_{max})	1000 V	
Başlangıç gerilimi (V_{start})	360 V	
Tam güçte maksimum güç takip noktası çalışma gerilim aralığı	450 – 800 V	520 – 800 V
Maksimum güç takip noktası çalışma gerilim aralığı	200 – 950 V	
Maksimum güç noktası başına maksimum akım (I_{dc-max})	25,0 A	30,9 A
Maksimum güç noktası başına maksimum kısa devre akımı (I_{sc-max})	30,0 A	36,0 A
Terminal tipi	Vidalı tip terminal	
Çıkış Bölümü (AC)		
Şebeke bağlantı tipi	3Faz + Toprak	
Nominal çıkış gerilimi	400 V	
Çalışma gerilim aralığı	422 – 528 V	
Ayarlanabilir gerilim aralığı	240 – 552 V	
Nominal şebeke frekansı / Frankans aralığı	60 Hz / ±3 Hz	
Maksimum sürekli çıkış akımı	27,0 A_{RMS}	36,0 A_{RMS}
Hataya geçme akımı	51,4 A_{RMS}	42,7 A_{RMS}
Güç faktörü	> 0,995	
THD (maksimum güçte)	< %3	
Çalışma Performansı		
Maksimum tepe verimliliği	%98,2	
Euro ya da CEC verimliliği	%97,5	



Şekil 6.7: ABB firmasının TRIO-2x.x-TL-OUTD model solar eviricilerine ait Çıkış gücü – Verimlilik grafiği.

Örnek çalışmada kullanılan solar eviricinin teknik özelliği gereği 27,6 kW'lık nominal güce sahip solar eviricide her biri 16 kW'lık güç girişine dayanabilen 2 adet MPPT (maksimum güç noktası takibi) girişi bulunmaktadır. Solar evirici çıkışında ise nominal alınması önerilen çıkış gücü 27,6 kW olup maksimum güç çıkışı (belirli süreye mahsus) 30 kW'dır.

Yukarıda teknik özellikleri verilen solar evirici tipinin maksimum elektriksel dayanımı;

Solar evirici başına DC giriş gücü: 2 adet x 16,0 kW = 32,0 kW

Solar evirici başına AC çıkış gücü: 1 adet x 30,0 kW = 30,0 kW

Sistemin nominal değerleri alındığında;

Solar evirici başına AC çıkış gücü: 1 adet x 27,6 kW = 27,6 kW

Solar evirici başına DC giriş gücünün 32 kW'a kadar çıkabilmesi sebebi ile Çizelge 6.1'de özellikleri belirtilen 265 Wp'lik FV panellerden 120 adete kadar tek bir solar eviriciye bağlanabilmektedir. Böylelikle, bu sistem tasarımı ile 1 adet solar eviriciye bağlanabilen maksimum giriş gücü 31,8 kWp olmaktadır.

DC giriş gücü (solar evirici başına gerçekleşen): 120 adet FV panel x 265 Wp/FV panel = 31,8 kWp

DC giriş gücü: 31,8 kW (gerçekleşen) < 32,0 kW (solar evirici başına maksimum dayanım)

Çizelge 6.2'de görülebileceği üzere her bir MPPT'nin 16 kW'lık maksimum güç girişi kapasitesi olduğundan FV sistemde bulunan 120 adet FV panelden 60 adedi 1. MPPT'ye, 60 adedi ise 2. MPPT'ye bağlanacak şekilde sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Mevcut FV sistem tasarımında her bir MPPT'ye uygulanabilen maksimum giriş gücü;

265 Wp/FV panel x 60 FV panel = 15,9 kWp olmaktadır.

DC giriş gücü: 15,9 kW (gerçekleşen) < 16,0 kW (MPPT başına maksimum dayanım)

Sistem tasarımında kullanılan bir diğer evirici modeli olan 20,0 kW'lık nominal güce sahip solar eviricide her biri 12 kW'lık güç girişine dayanabilen 2 adet MPPT (maksimum güç noktası takibi) girişi bulunmaktadır. Solar evirici çıkışında ise nominal alınması önerilen çıkış gücü 20,0 kW olup maksimum güç çıkışı (belirli süreye mahsus) 22 kW'dır.

Sistemde kullanılan bu eviriciye uygulanan maksimum DC giriş gücü;

265 Wp/FV panel x 80 FV panel = 21,2 kWp

Bu FV sistemde 82 kW ölçeğinde sistem tasarımı gerçekleştirebilmek için 2 adedi 27,6 kW ve 1 adedi 20,0 kW nominal çıkış gücüne sahip olmak üzere toplamda 3 adet dizi tipi solar evirici kullanılmıştır.

Bu sistem tasarımında solar eviricilerin maksimum elektriksel dayanım gösterebildiği;

DC Giriş gücü: (2 adet x 32,0 kW) + (1 adet x 24,0 kW) = 88,0 kW

AC çıkış gücü: (2 adet x 30,0 kW) + (1 adet x 22,0 kW) = 82,0 kW

Sistem tasarımı gerçekleştirilen FV sistemin;

DC Giriş gücü: (2 adet x 31,8 kW) + (1 adet x 21,2 kW) = 84,8 kW

Solar eviricilerin DC giriş gücü kapasitesi (88,0 kW), solar panellerin üretebileceği maksimum DC gücün (84,8 kWp) üzerinde olduğundan sistem tasarımı doğru gerçekleştirilmiştir. Sistemin DC ve AC güç dayanımları için solar evirici tarafında kontrol edilmesi gereken parametreler aşağıdaki gibidir.

DC giriş gücü için;

- Her bir maksimum güç takip noktası için maksimum DC giriş gücü (maximum usable power for each MPPT channel)

- Bağımsız maksimum güç takip noktası sayısı (number of indipendent MPPT channels)

AC çıkış gücü için;

- Maksimum çıkış gücü (maximum output power)

Diğer

Örnek çalışanın yapıldığı FV sistem, şebeke bağlantılı olduğundan bu sistem tasarımında şarj kontrolü ve batarya kullanılmamaktadır.

6.2.1.3 Teknik analiz

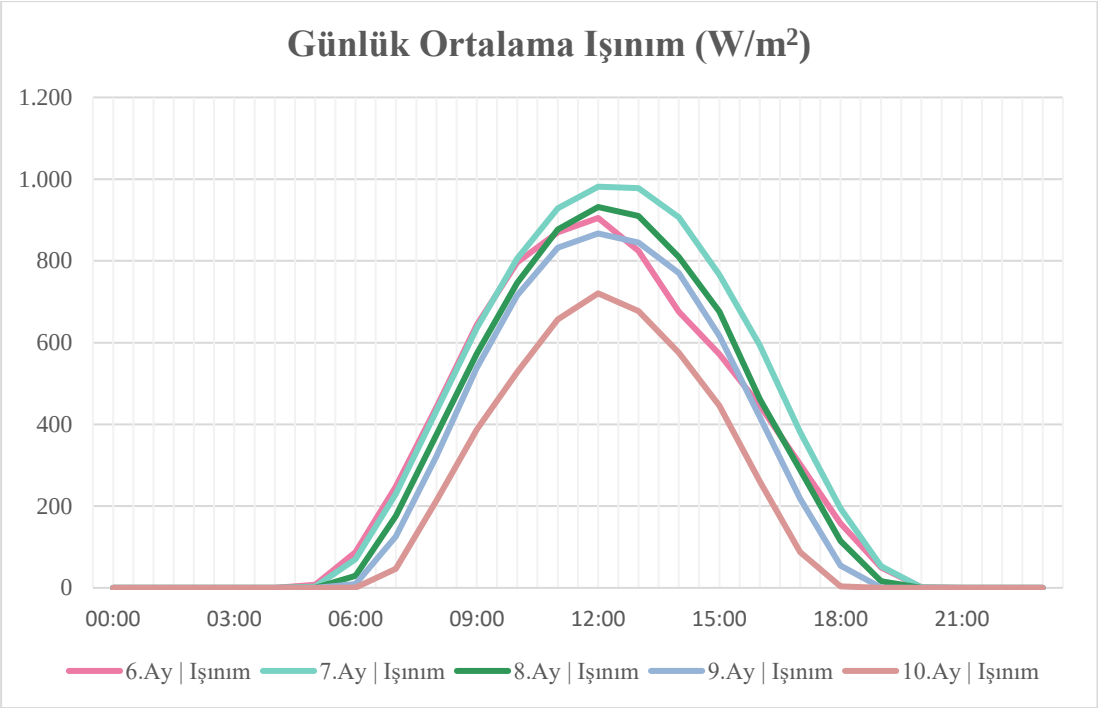
Konya'da kurulu bulunan 82 kW kurulu güce sahip FV sistemin enerji üretimi simülasyon verileri ile karşılaştırmak için öncelikle analizini yapmak istediğimiz, benzer tiplerdeki gerçek dataları toplayarak, grafiğini çizdirmemiz gerekmektedir.

Bunun için FV sistemden dakikalık olarak alınan ortam sıcaklığı ve panel sıcaklığı, ışınım ve enerji üretimlerini toplayarak analizin yapılması gerekmektedir.

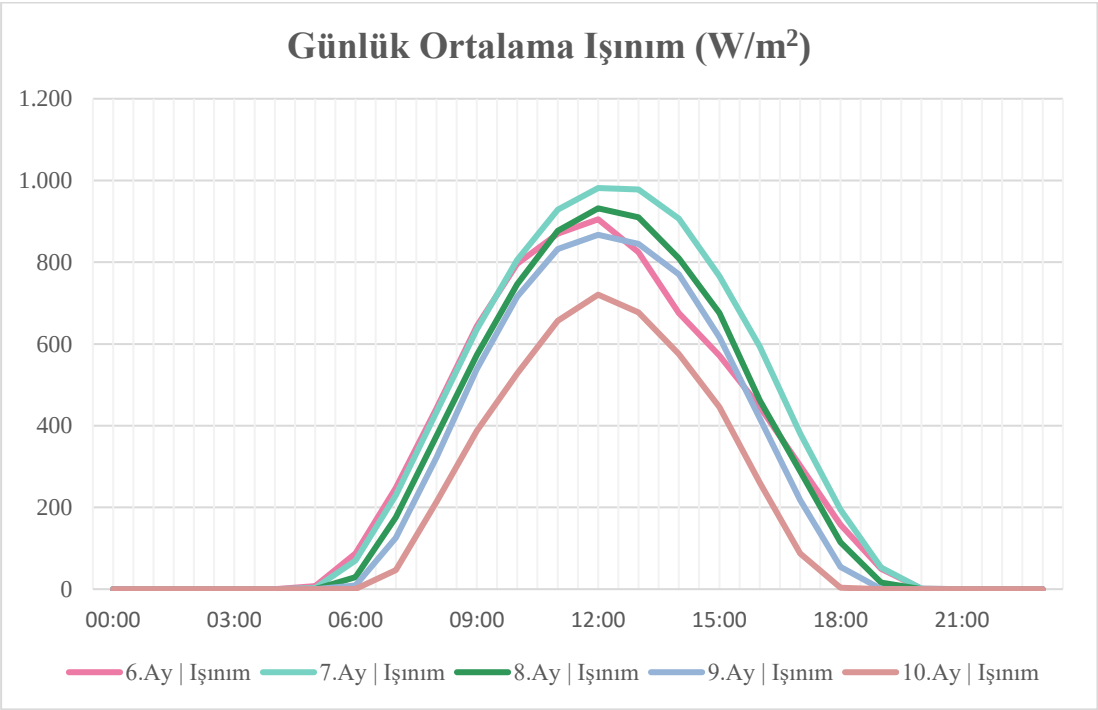
FV sistem enerji üretimde en büyük etkisi olan iki unsur sırası ile ışınım ve sıcaklıktır. Bu sebepten FV sistemden toplanan datalar ile öncelikli olarak yapılacak analizler ışınım ve sıcaklık alanında olmaktadır. Şekil 6.8'de 2017 yılı Haziran – Ekim ayları arasındaki günlük ortalamala ortam ve panel sıcaklıkları, Şekil 6.9'da ise 2017 yılı Haziran – Ekim ayları arasındaki günlük ortalamala ışınım miktarları gösterilmektedir. Bu iki grafik birlikte incelendiğinde ortaya çıkan sonuçlar:

- Panel sıcaklığı, ortam sıcaklığından doğru orantılı olarak etkilenmektedir.
- Panel sıcaklığı, ortam sıcaklığına ek olarak ışınımdan, ışınımın bir fonksiyonu olarak etkilenmektedir.
- Yukarıdaki 2 madde ile paralel olarak ışınımın panel sıcaklığındaki faktörü, ortam sıcaklığına göre çok daha yüksektir.

Çizelge 6.1'deki FV panel elektriksel özellikleri içerisinde de verilmiş olduğu gibi panel sıcaklığının yükselmesi panelin enerji üretimini, dolayısı ile enerji üretim verimliliğini düşürmektedir. Bu bilgilere dayanarak özellikle ortam sıcaklığının ve ışınımın yüksek olduğu yaz aylarında sistemin enerji üretim veriminin sıcaklık kaynaklı kayıplar sebebi ile olması gereken değerlerin altına ineceği öngörülmektedir.



Şekil 6.8: 2017 yılı Haziran – Ekim ayları arasındaki günlük ortalama ortam ve panel sıcaklıkları (T_{ortam}, T_{panel}) grafiği.



Şekil 6.9: 2017 yılı Haziran – Ekim ayları arasındaki günlük ortalama ışınım miktarı (H) grafiği.

Şekil 6.9'da bulunan FV sistemin günlük ortalama ışınım grafiğinin altında kalan alanlar her ay için ayrıca hesaplandığında bu değerlerin Şekil 6.15'deki aylık enerji üretimi ile benzerlik gösterdiği görülmektedir.

Enerji üretim miktarı ile ışınım miktarı arasında doğrudan bir ilişki olup olmadığını belirlemek için;

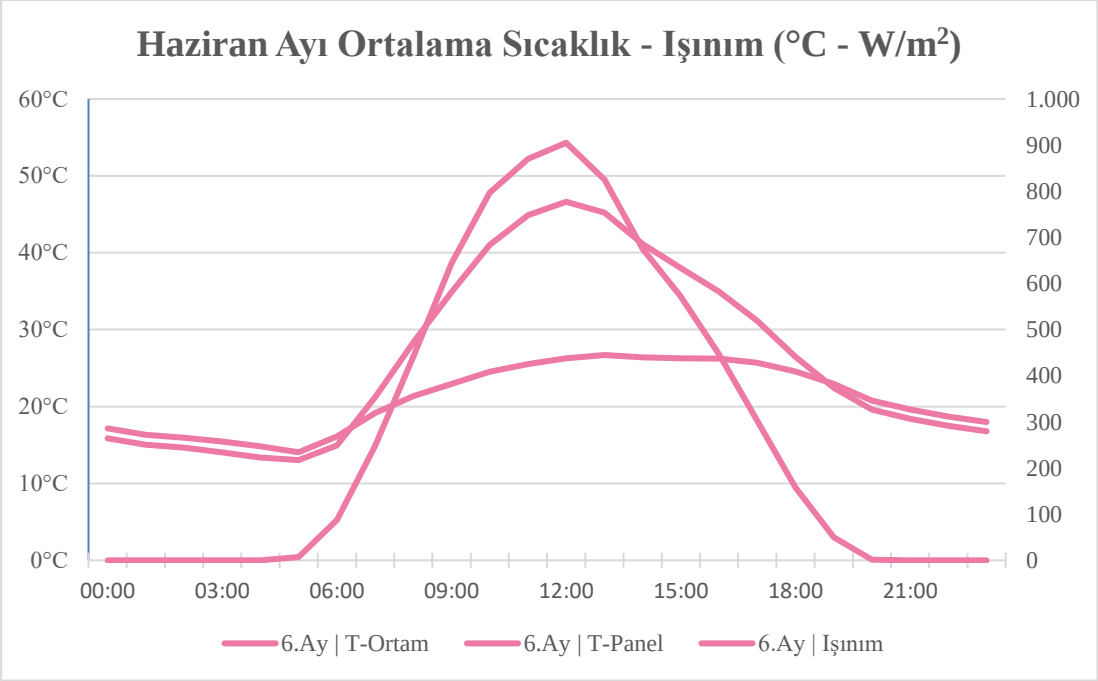
2017 yılı Haziran – Ekim ayları için aylık ortaIama ışınım miktarlarının integrali alınarak bu aylara ait aylık ortalama ışınım miktarını bulunmaktadır. Bu değerler, aylık toplam enerji üretim değerleri ile karşılaştırıldığında sonuç Çizelge 6.3'teki gibidir.

Çizelge 6.3: 2017 yılı Haziran – Ekim ayları arasındaki günlük ortalama ışınım miktarı (H).

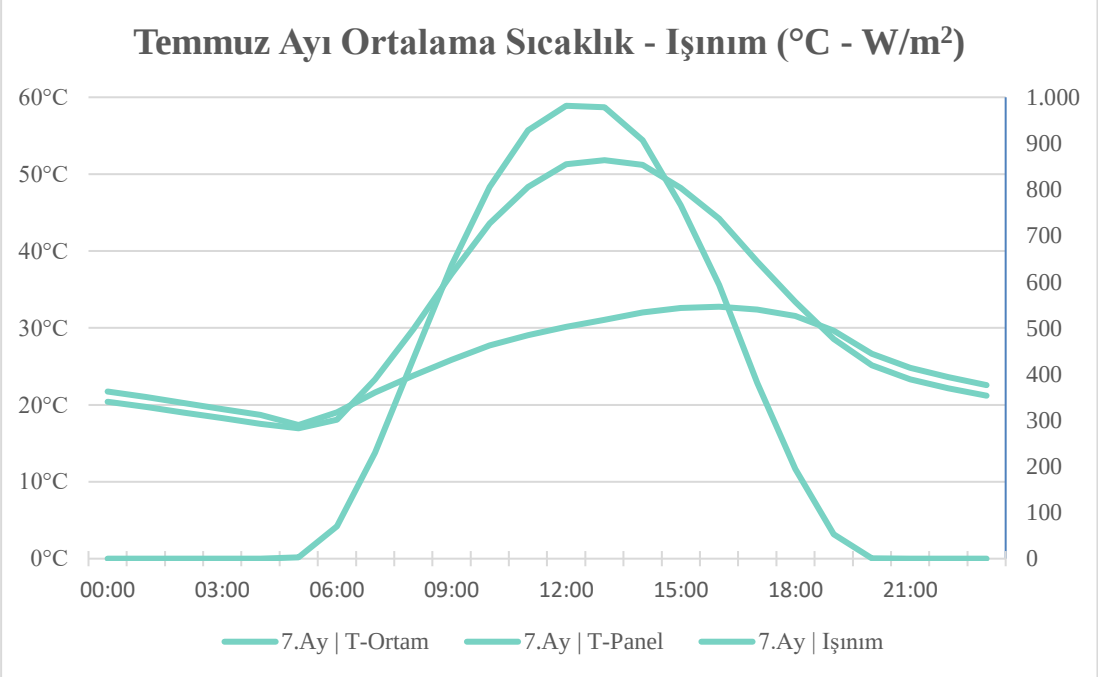
Saat	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim
00:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
01:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
02:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
03:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
04:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
05:00	7,28	2,77	0,00	0,00	0,00
06:00	87,81	70,19	29,60	9,24	0,29
07:00	247,91	229,80	176,09	125,72	46,35
08:00	442,24	433,35	374,81	322,29	213,29
09:00	643,84	635,71	573,16	538,34	387,49
10:00	796,64	805,69	745,89	715,60	527,80
11:00	870,34	928,66	876,95	832,22	656,82
12:00	905,08	981,56	931,90	867,15	720,69
13:00	824,86	978,19	910,27	844,59	677,61
14:00	675,33	906,89	809,54	770,61	575,39
15:00	571,54	765,91	675,49	616,34	445,15
16:00	446,08	593,56	462,06	417,79	260,63
17:00	302,41	380,95	288,76	218,10	87,12
18:00	158,03	194,46	115,12	54,51	3,84
19:00	49,71	53,08	16,23	0,81	0,00
20:00	1,10	0,94	0,00	0,00	0,00
21:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H_{Toplam}	7030,17	7961,72	6985,88	6333,31	4602,47
E_{Toplam}	15016,31	16418,58	15060,94	13025,07	10156,38
E/H Oranı	2,14	2,06	2,16	2,06	2,21

Çizelge 6.3 incelendiğinde; enerji üretiminin, ışınımın bir fonksiyonu ve enerji üretimine etki eden en büyük kalemin ışınım olduğu kanıtlanmış olmaktadır.

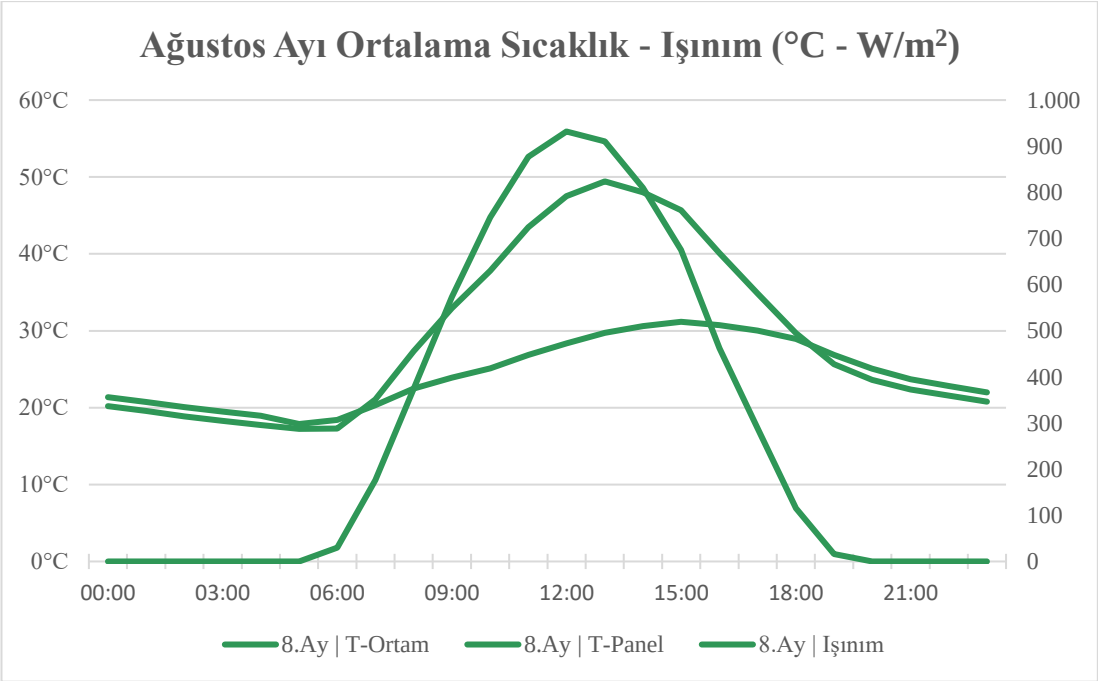
Ortam sıcaklığı ve ışınımın panel sıcaklığı üzerindeki etkisini analiz edebilmek için Konya'daki FV sistemden alınan gerçek ortam sıcaklığı, ışınım ve panel sıcaklığı verileri aylık olarak Şekil 6.10, Şekil 6.11, Şekil 6.12, Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'de incelenmektedir.



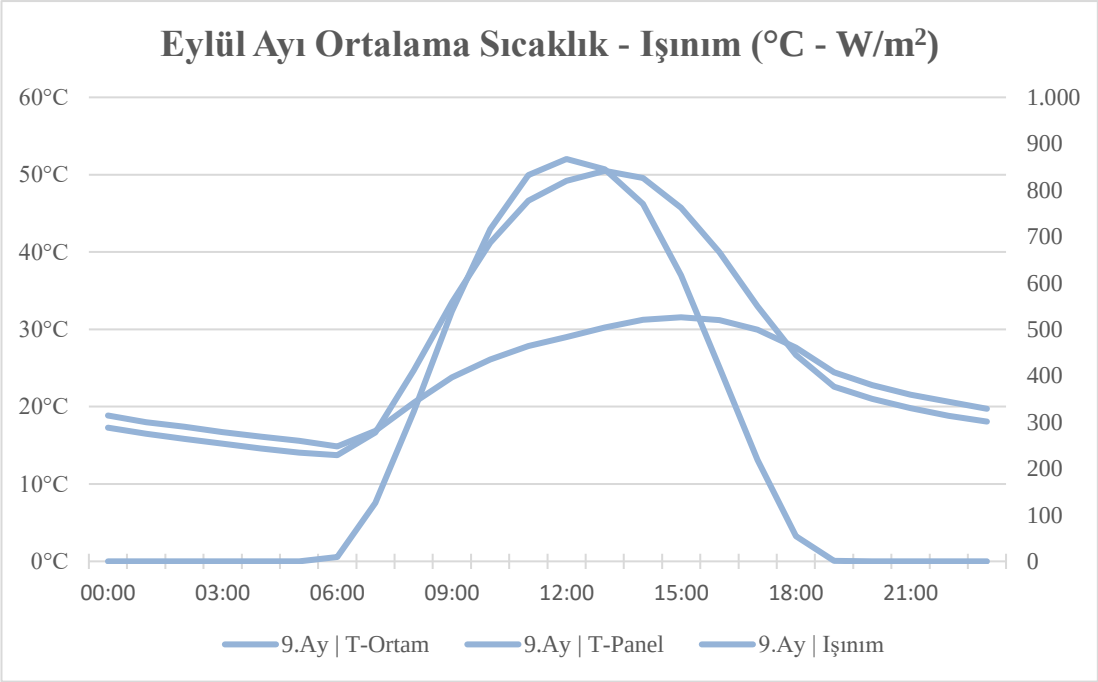
Şekil 6.10: 2017 yılı Haziran ayı günlük ortalama ortam sıcaklığı (T_{ortam}), panel sıcaklığı (T_{panel}) ve ışınım miktarı (H) ilişkisi grafiği.



Şekil 6.11: 2017 yılı Temmuz ayı günlük ortalama ortam sıcaklığı (T_{ortam}), panel sıcaklığı (T_{panel}) ve ışınım miktarı (H) ilişkisi.

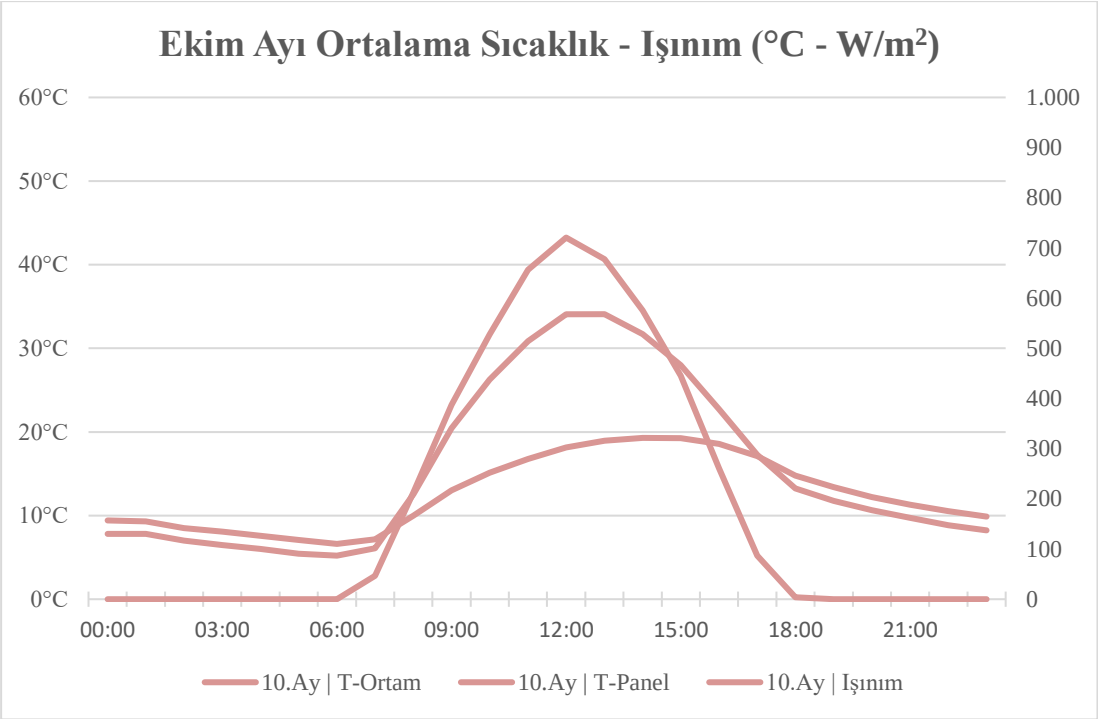


Şekil 6.12: 2017 yılı Ağustos ayı günlük ortalama ortam sıcaklığı (T_{ortam}), panel sıcaklığı (T_{panel}) ve ışınım miktarı (H) ilişkisi grafiği.



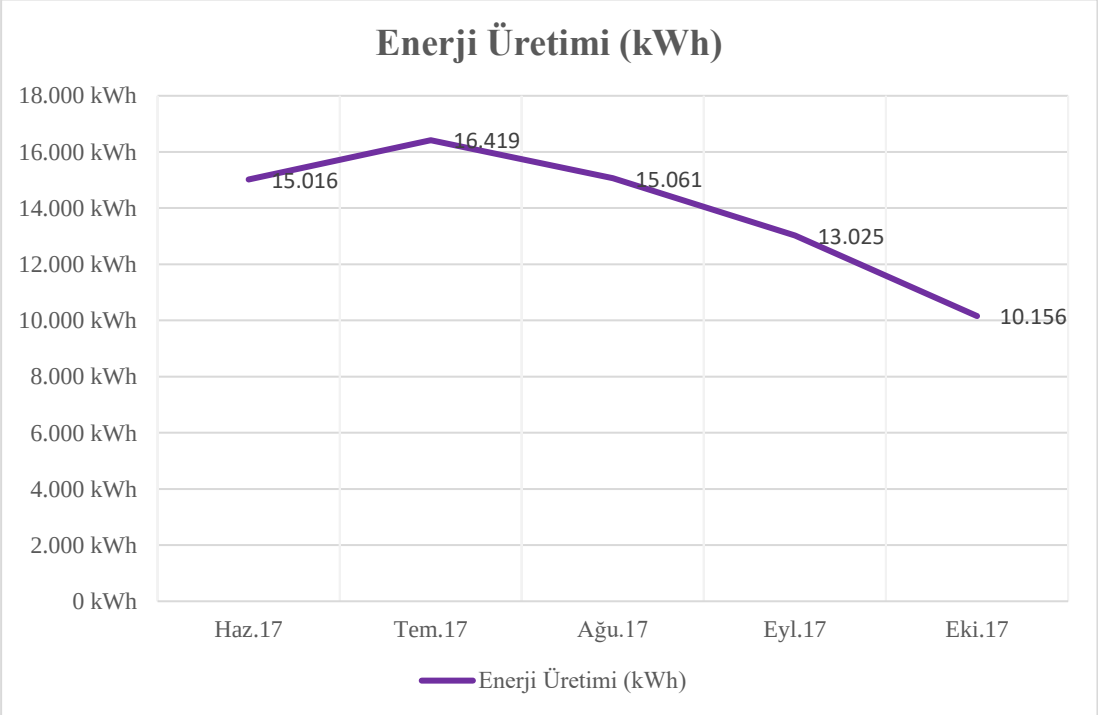
Şekil 6.13: 2017 yılı Eylül ayı günlük ortalama ortam sıcaklığı (T_{ortam}), panel sıcaklığı (T_{panel}) ve ışınım miktarı (H) ilişkisi.

Gerçekleştirilen analizlerin ortak amacı birim FV sistemden üretilen enerji miktarını ($E_{üretim}$) azaltan öğelerin ve bu öğelere ait etkilerinin tespit edilmesini sağlamaktır. Yukarıdaki analizlerden de görülebileceği üzere panel sıcaklığı; ortam sıcaklığına ek olarak ışınımın bir fonksiyonu olarak artış göstermektedir.



Şekil 6.14: 2017 yılı Ekim ayı günlük ortalama ortam sıcaklığı (T_{ortam}), panel sıcaklığı (T_{panel}) ve ışınım miktarı (H) ilişkisi.

Yukarıda da bahsedildiği üzere yapılan analizlerin çıktısı olması hedeflenen enerji üretimi grafiği, aylık periyotlar halinde Şekil 6.15'de gösterilmektedir.



Şekil 6.15: 2017 yılı Haziran – Ekim ayları arasındaki aylık toplam enerji üretim miktarı (E_{toplam}) grafiği.

Bu grafiği kullanarak, Konya ve civar bölgeler için PVsyst yazılımını doğrulamak ve bu doğrulama için bir katsayı üretmek için bu grafikteki FV sistemden okunan gerçek değerleri simülasyon yazılımının ürettiği değerler ile karşılaştırmak gerekmektedir. Bu karşılaştırma Çizelge 6.4'te gösterilmektedir.

Çizelge 6.4: Arazi tipi FV sistemden toplanan deneysel veri ile PVsyst simülasyon yazılımından gelen verinin karşılaştırılması.

Aylar (2017 yılı)	FV Sistemden Alınan Gerçek Veriler (kWh)	Simülasyon Yazılımından (PVsyst) Alınan Veriler (kWh)	Simülasyon Yazılımı (PVsyst) Doğrulama Katsayısı (%)	Simülasyon Yazılımı (PVsyst) Hata Oranı (%)
Haziran	15016	15154	99,1	-0,9
Temmuz	16419	16053	102,3	2,3
Ağustos	15061	15517	97,1	-2,9
Eylül	13025	13208	98,6	-1,4
Ekim	10156	10633	95,5	-4,5
Toplam	69677	70565	98,7	-1,3

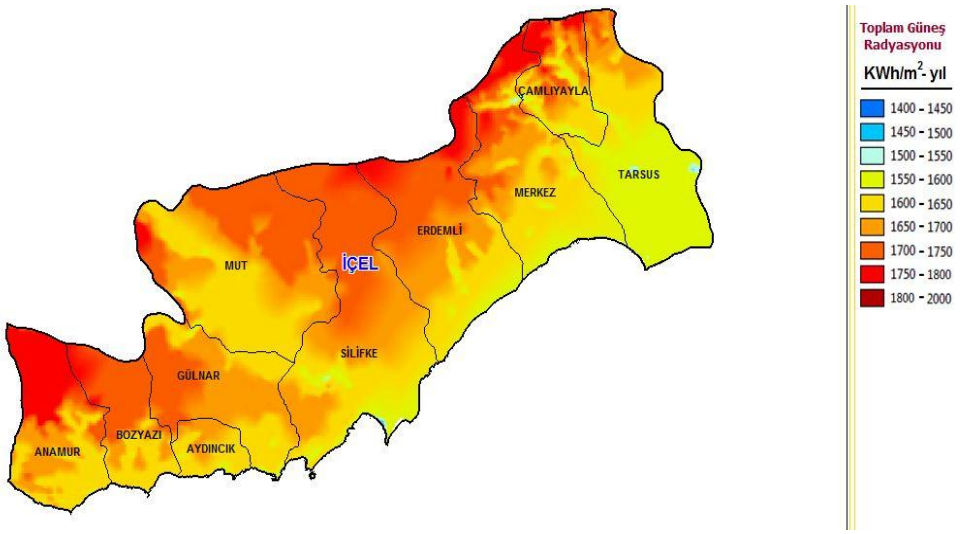
Çizelge 6.4'teki verilere göre Konya ve civar bölgeler için PVsyst simülasyon yazılımının ürettiği dataların doğrulama katsayısı %98,7'dir.

Dolayısı ile Konya ve civarındaki bölgelerde yapılacak olan PVsyst analizlerinde üretilecek olan dataların gerçek üretim verilerine çevrilmesi için bu doğrulama katsayısı ile çarpılması gerekmektedir.

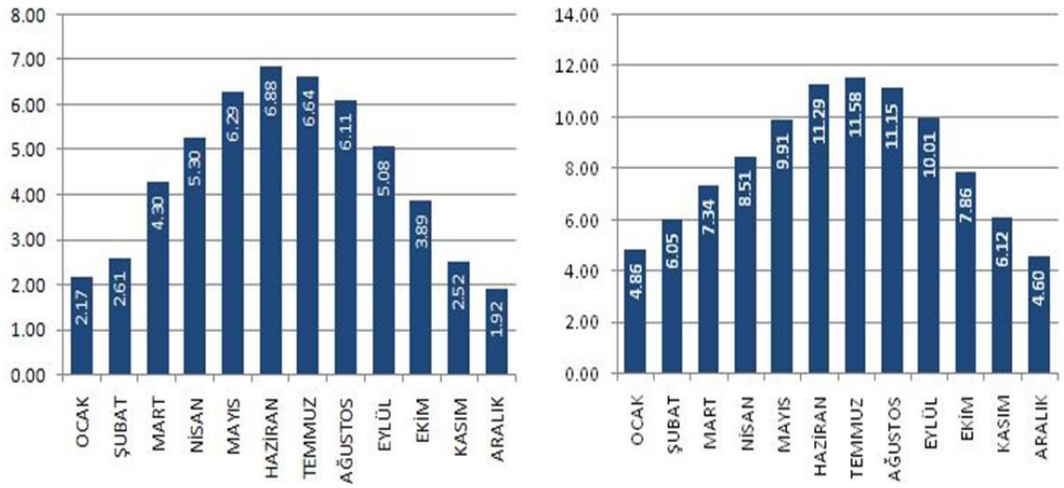
6.2.2 Yüzer ve Arazi Tipi Fotovoltaik Sistemlerin Enerji Üretimi Analizi

6.2.2.1 FV Sistem Lokasyonu ve Güneş Enerjisi Potansiyeli

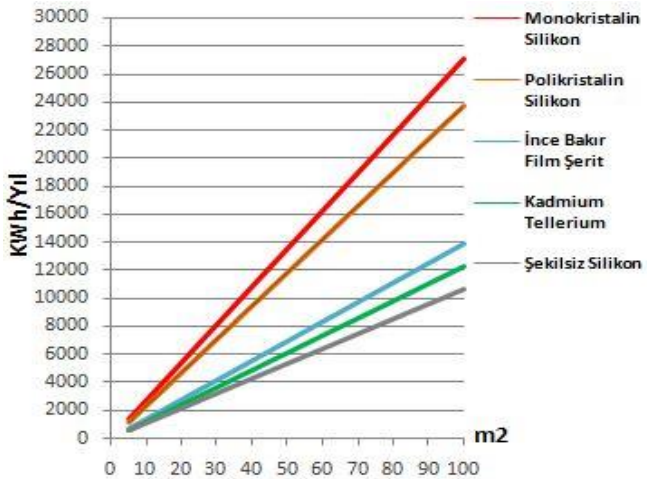
Yüzer FV sistemden gerçek veri almak için kullanılan FV sistem lokasyonu İçel ili Mut ilçesi sınırları içerisinde bulunmaktadır. İçel, 16000 km^2 yüzey alanıyla, dünya üzerinde 36° 48' kuzey – 34° 38'doğu boylamlarında bulunmaktadır. GEPA'ya göre İçel'in, yıllık toplam gelen güneş enerjisi miktarının 1614 kWh/m^2-yıl ve yıllık toplam güneşlenme süresinin 3015 saat olduğu tespit edilmiştir. Günlük olarak baktığımızda bu rakamlar 4,4 kWh/m^2'lik güneş enerjisi gücüne ve 8,3 saatlik güneşlenme süresine denk gelmektedir. Bu da Konya'da, yılın 126 tam günün güneşli geçmesi ile eşit olmaktadır. İçel ili, Mut ilçesinin aylara göre global radyasyon değerleri, güneşlenme süreleri ve FV panel tipine göre birim alanda üretilebilecek yıllık enerji miktarlarına ait grafikler Şekil 6.16, Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'de gösterilmektedir [4].



Şekil 6.16: İçel ili güneş enerjisi potansiyeli atlası [GEPA].



Şekil 6.17: İçel ili Mut ilçesinin aylara göre global radyasyon değerleri (kWh/m^2-gün) ve ortalama güneşlenme süreleri (saat).



Şekil 6.18: İçel ili Mut ilçesinde FV panel tipine göre birim alanda üretilebilecek yıllık enerji miktarı (kWh/yıl) grafiği.

Bu değerlere göre İçel ili Mut ilçesinin en çok ve en az güneş enerjisi üretilecek ayları sırası ile Temmuz ve Aralık olmaktadır.

b. Yüzer FV Sistem Tasarımı

İçel ili Mut ilçesinde bulunan FV sistem, Konya'daki çatı üstü FV sistem ile aynı sebeplerden (üretimin yüksek, tüketimin düşük olması durumunda mahsuplaşma yapabilmek için, vb. gibi) dolayı şebeke bağlantılı olarak tasarlanmıştır.

Sistemin kurulumunun yüzer gerçekleştirilmesi sebebi ile sistemdeki sınırlayıcı unsurların başında kurulum alanı ve yüzdürücü sistem gelmektedir. FV panellerin montajının yüzdürücü sistem üzerine yapılması tasarım konusunda kara kurulumundan farklı tasarımlar yapma gereği ortaya çıkarmıştır.

Panelleri sabitlemek için kullanılan yüzdürücü sistemin maliyetinin kara kurulumu sistemlerinde kullanılan sabitleme sistemlerine oranla yüksek oluşu sebebi ile mevcut kapasiteyi en optimize şekilde kullanmak ve dolayısı ile yatırım maliyetini düşürebilmek amaçlanmaktadır. Bu sebepten sistem tasarımı gerçekleştirilirken birim alana maksimum kapasite kurulumu prensibine dayanarak sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. İçel ili Mut ilçesindeki yüzer FV sistem Şekil 6.19Şekil 6.19:'da verilmiştir.



Şekil 6.19: İçel ili Mut ilçesinde bulunan yüzer fotovoltaik sistemin genel görünüşü.

Tez çalışması kapsamında incelenen İçel ili Mut ilçesi sınırları içerisinde yer alan yüzer FV sistemin tilt açısı, kurulum yapılan bölgenin yıllık enerji üretiminin yaklaşık olarak maksimum olacağı açı olan 30° olarak belirlenmiştir. Tilt açısı da dahil olmak üzere simülasyon yazılımına girilen verilerin bulunduğu ve sistem tasarımının gerçekleştirildiği PVsyst simülasyon yazılımına ait ekran görüntüleri Şekil A.2'de yer almaktadır.

FV Panel

Analizi yapılacak olan 10 kW ölçeğindeki yüzer FV sistemde, FV panel seçimi yapılırken bu alanda en yaygın kullanılan FV panel tipi olması, hızlı temini ve uygun maliyetleri sebebi ile polikristal FV paneller tercih edilmektedir. FV panel olarak Yingli firmasının 250 Wp'lik JL250P-29B model çoklu kristal (polikristal) FV panelleri kullanılmaktadır. Bu FV panel modeline ait elektriksel değerler Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6'daki gösterilmektedir.

Şekil A.2'deki PVsyst simülasyon programı çıktısından da görübileceği üzere İçel ili Mut ilçesinde bulunan yüzer FV sistemde 10 kW ölçeğinde sistem tasarımı gerçekleştirebilmek için 40 adet 250 Wp gücünde FV panel kullanılmıştır. Sistem, birbirine paralel bağlanmış 4 diziden oluşmaktadır. Her bir dizide ise birbirine seri bağlanmış 10 adet FV panel bulunmaktadır.

40 adet FV panel x 250 Wp/FV panel = 10,0 kW

Çizelge 6.5: Yingli firmasının JL250P-29B model FV paneline ait elektriksel değerler.

Modül Tipi	JKM265P	
	STC	NOCT
Maksimum Güç (Pmax)	250 Wp	181 Wp
Maksimum Gerilim (Vmp)	30,4 V	27,6 V
Maksimum Akım (Imp)	8,24 A	6,56 A
Açık devre Gerilimi (Voc)	38,4 V	35,4 V
Kısa Devre Akımı (Isc)	8,79 A	7,12 A
Modül Verimi	%15,3	
Maksimum Sistem Gerilimi	1000 VDC (IEC)	
Güç Töleransı (ΔP_{max})	0..5	
Sıcaklık Katsayısı (Pmax'ın)	-%0,45/°C	
Sıcaklık Katsayısı (Voc'nin)	-%0,33/°C	
Sıcaklık Katsayısı (Isc'nin)	-%0,06/°C	
Nominal Hücre Sıcaklığı (NOCT)	46±2°C	

Çizelge 6.6: Yingli firmasının JL250P-29B model FV panellirinde kullanılan STC ve NOCT ifadelerin açıklaması.

Modül Tipi	JKM265P	
	STC	NOCT
Işınım	1000 W/m2	800 W/m2
Maksimum Gerilim (Vmp)	25°C	20°C
AM	1,5	1,5
Rüzgar Hızı	-	1 m/s
Güç Ölçüm Töleransı	±%3	

Solar Evirici

Solar evirici seçimi yapılırken sistem ölçeğinin küçük olması sebebi ile sistem tasarımının solar evirici bölümünde dizi tipi trifaze solar evirici kullanılmıştır.

Dizi evirici olarak ABB firmasının 20,0 kW'lık nominal güce sahip TRIO-20.0-TL-OUTD model trifaze solar eviricisi kullanılmaktadır. Bu dizi evirici modeline ait teknik bilgiler Çizelge 6.2'de ve Şekil 6.7'de gösterilmektedir.

Teknik özelliği gereği bu solar eviricide her biri 12 kW'lık güç girişine dayanabilen 2 adet MPPT (maksimum güç noktası takibi) girişi bulunmaktadır. Solar evirici çıkışında ise nominal alınması önerilen çıkış gücü 20 kW olup maksimum güç çıkışı (belirli süreye mahsus) 22 kW'dır. Bu özelliği sebebi ile'de özellikleri belirtilen 250Wp'lik FV panellerden 40 adete kadar tek bir solar eviriciye bağlanabilmektedir.

Çizelge 6.2'de görülebileceği üzere her bir MPPT'nin 12 kW'lık maksimum güç girişi kapasitesi olduğundan FV sistemde bulunan 40 adet FV panel de tek bir MPPT'ye bağlanabilmektedir. Bu yüzer FV sistemde giriş sayısı 20 adedi 1.MPPT'ye, 20 adedi ise 2.MPPT'ye bağlanacak şekilde sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Mevcut FV sistem tasarımında her bir MPPT'ye uygulanabilen maksimum güç;

250 Wp/FV panel x 20 FV panel = 5,0 kWp olmaktadır.

Böylelikle, bu sistem tasarımı ile 1 adet solar eviriciye bağlanabilen maksimum güç;

5,0 kWp/MPPT x 2 MPPT = 10,0 kWp olmaktadır.

DC giriş gücü: 10,0 kW (gerçekleşen) < 12,0 kW (MPPT başına maksimum dayanım)

6.2.2.2 Teknik Analiz

FV sistem enerji üretim verimliliğini etkileyen birçok öğe mevcuttur. Tez çalışması kapsamında yüzer ve arazi tipi sistemlerin enerji üretim verimlerinin yanı sıra ışınım

ve sıcaklığın bu sistemlerin enerji üretim verimleri etkisi üzerinde durulmuştur. Yüzer FV sisteminin analizinde de bu konular öncelik alınarak analiz gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 6.2.2.1'nin b başlığında teknik özellikleri verilen yüzer FV sistemin sıcaklık, ışınım ve enerji üretim analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle bu verilerin sistemden doğru olarak toplanabilmesi gerekmektedir. Yüzer FV sistemden ihtiyaç duyulan verilerin toplanması için izlenen yöntemler aşağıdaki gibidir.

Panel ve Ortam Sıcaklıklarının Ölçülmesi

Sistem tasarımında verilmiş olduğu gibi 10 kW ölçeğindeki yüzer FV sistem; birbirine paralel bağlanmış 4 dizi ve her bir dizide bircirine seri bağlanmış 10 adet panelden oluşmaktadır. Bu yüzer FV sistemin panel ve ortam sıcaklıklarını ölçebilmek için;

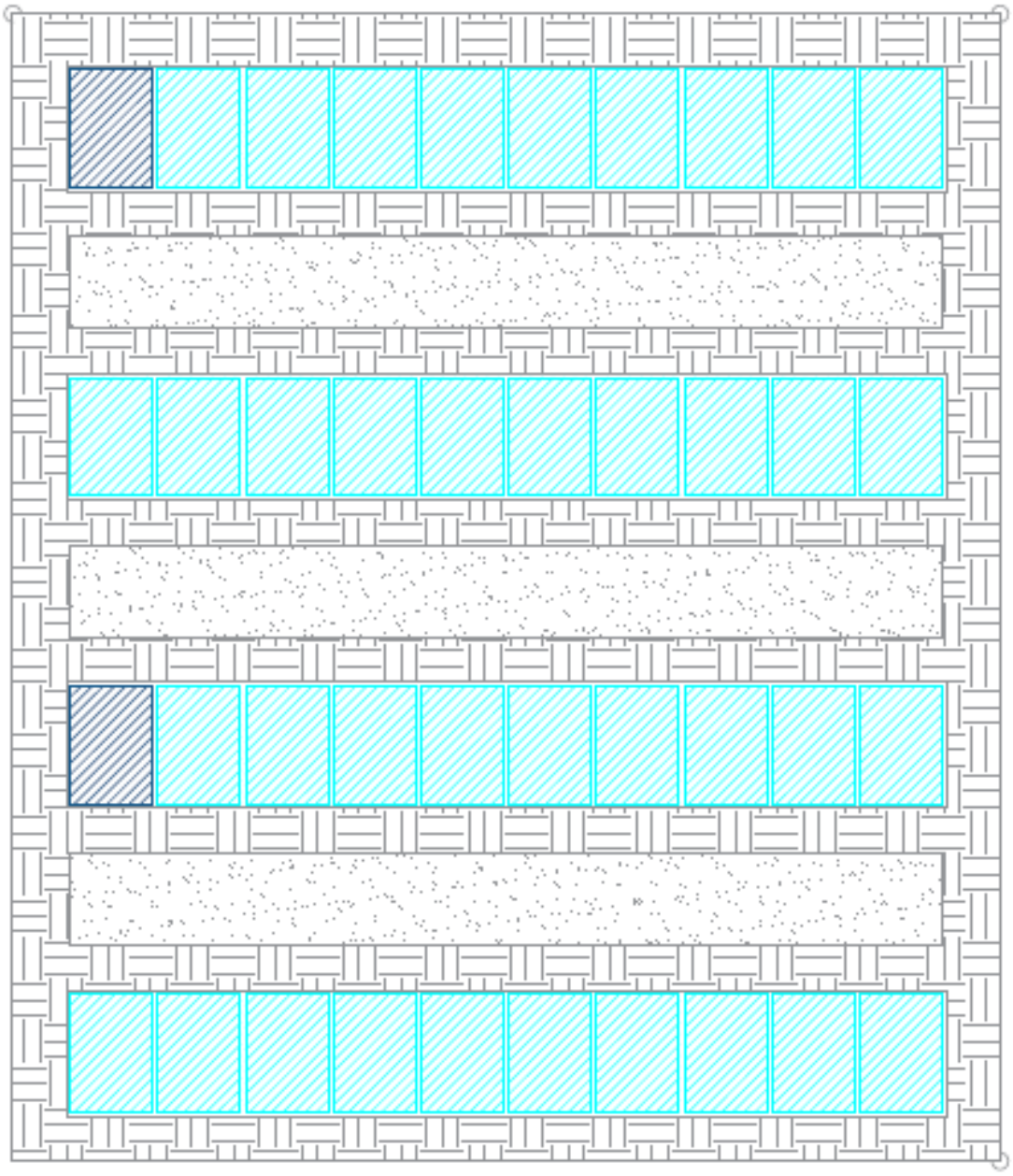
Şekil 6.20'de görüldüğü gibi yüzer FV sistemin birinci sutünundaki, birinci [1x1] ve üçüncü [3x1] sırada yeralan panellerin arkasına, panel başına 3 adet K tipi sıcaklık sensörü bağlanmaktadır. Doğru sıcaklık verisinin alınabilmesi için panel sıcaklık sensörleri, panellere Şekil 5.2Şekil 5.2:'deki gibi yerleştirilmektedir. Aynı panel üzerinde, 3 farklı noktada bulunan panel sıcaklık ölçümünün ortalaması alınarak ilgili panele ait anlık ortalama panel sıcaklığı (℃) hesaplanmaktadır.

Yine Şekil 6.20'de görüldüğü gibi yüzer FV sistemin üçüncü sırasındaki, birinci [3x1] ve ikinci [3x2] panelleri arasında izleme sisteminin elektrik panosu bulunmaktadır. Bu panonun aşağısında, herhangi bir yüzey ile teması olmayan, ortam sıcaklığını (℃) ölçmek için kullanılan 1 adet K tipi sıcaklık sensörü kullanılmaktadır. Panel ve ortam sıcaklık sensörlerinden hiçbirinin güneşle direk teması bulunmamaktadır.

Bu sıcaklık verilerinin toplanmasına ek olarak izleme sisteminin durumunun kontrol edilmesi amacı ile izleme sisteminin elektrik panosu içerisinde 1 adet K tipi sıcaklık sensörü kullanılmaktadır. Bu pano sıcaklık sensörünün, pano sacı ile temasına engel olunarak pano sıcaklığı dışında bir ölçüm yapması engellenmektedir.

Işınımın Ölçülmesi

Şekil 6.20'de görüldüğü gibi yüzer FV sistemde üçüncü sırasındaki, birinci panel [3x1] ile aynı tilt açısı ile monte edilen 1 adet referans hücre bulunmaktadır. Bu referans hücre ile panellere düşen ışınım miktarı (W/m^2) ölçülmektedir. Bu referans hücrenin montajının herhangi bir panele gölge düşürmeyecek şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir.



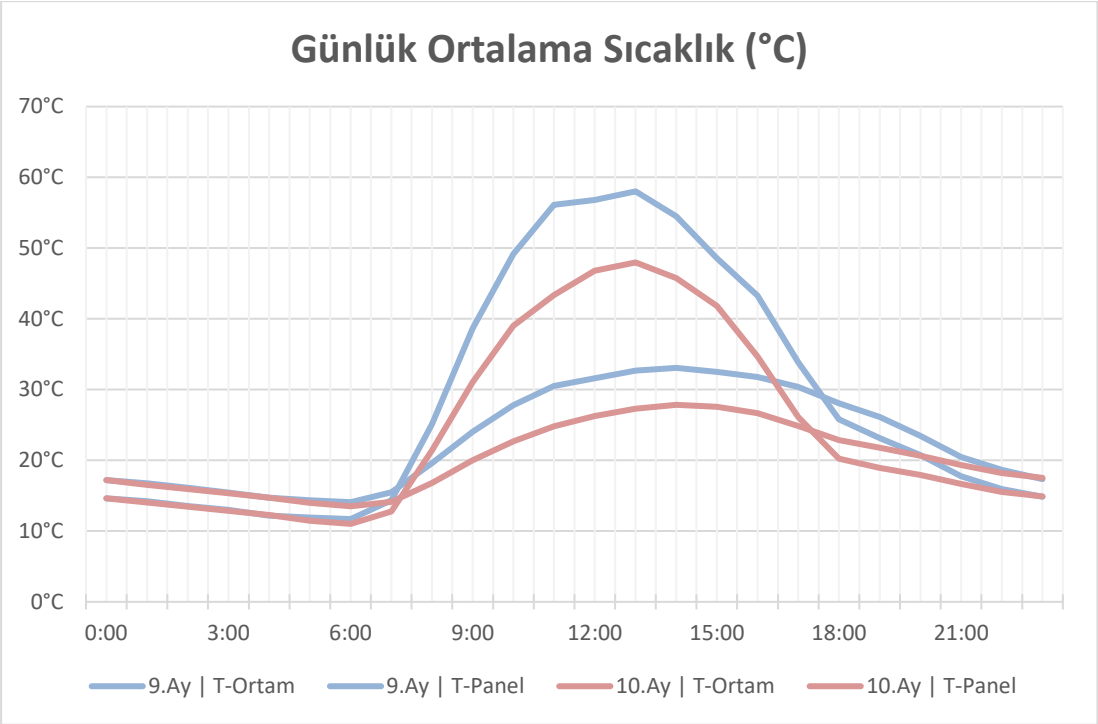
Şekil 6.20: Yüzer FV sistem yerleşim planı.

Enerji Üretimin Ölçülmesi

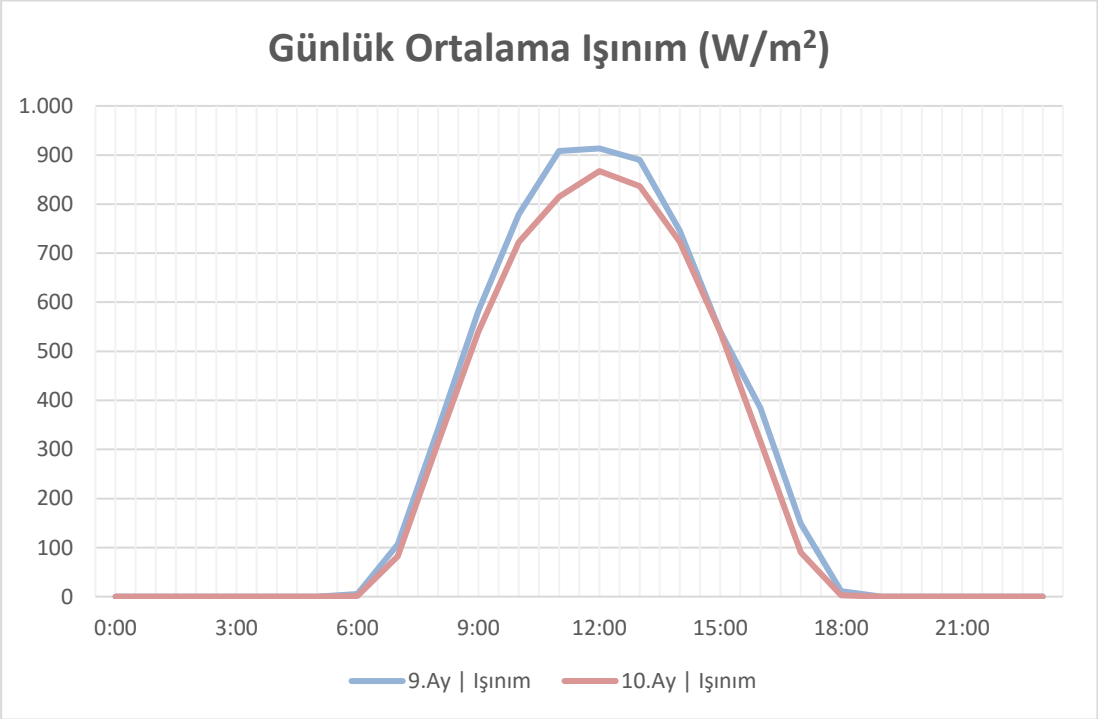
Yüzer FV sistemin enerji üretimi ile ilgili bütün ölçümler sistemde bulunan dizi tipi solar eviriciden alınmaktadır. Solar eviriciden alınan veriler listesi ve açıklamaları ile birlikte Çizelge 5.1'de verilmektedir.

Yüzer FV Sistem Analizi

Yüzer sistemden 2017 yılı Eylül ve Ekim aylarında alınan sıcaklık verileri ile oluşturulan günlük ortalama sıcaklık grafiği Şekil 6.21'de, ışınım verileri ile oluşturulan günlük ortalama ışınım grafiği Şekil 6.22'de gösterilmektedir.

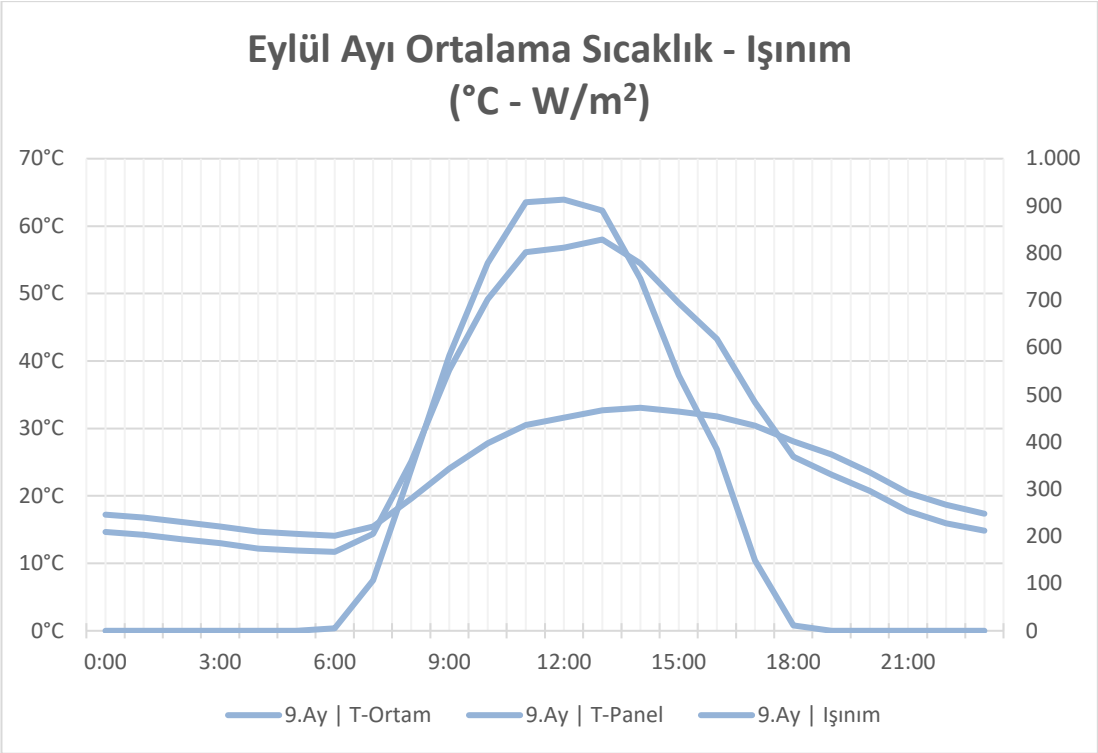


Şekil 6.21: 2017 yılı Eylül – Ekim ayları arasındaki günlük ortalama ortam ve panel sıcaklıkları (T_{ortam}, T_{panel}) grafiği.

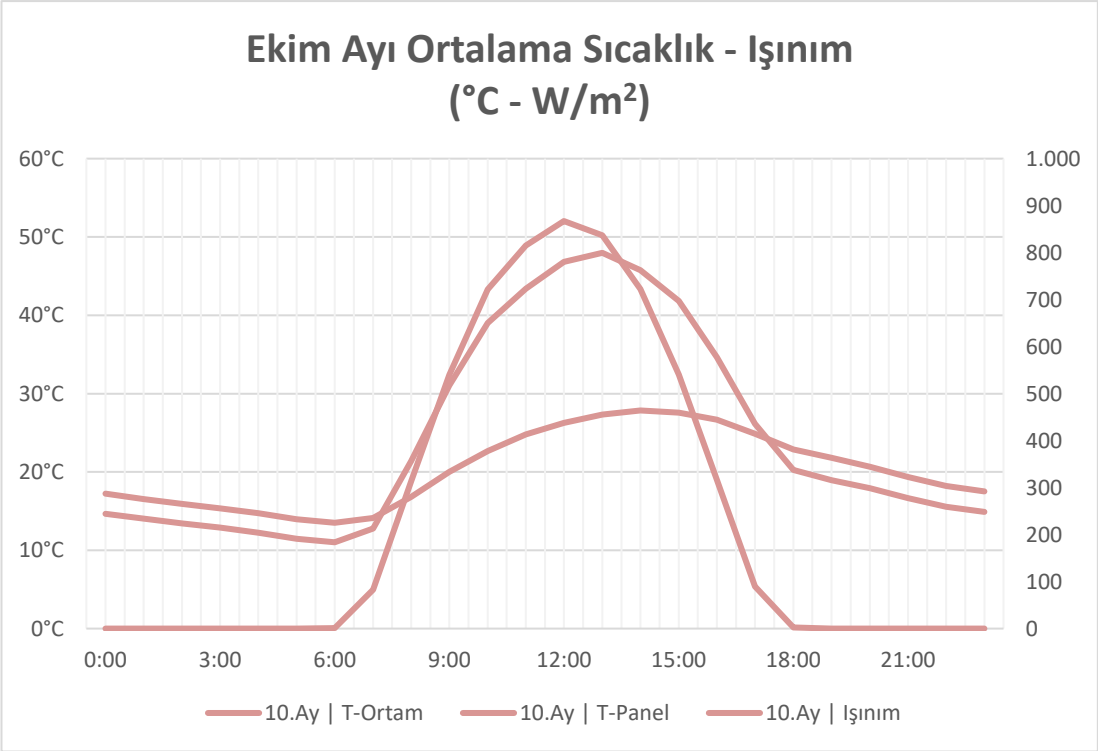


Şekil 6.22: 2017 yılı Eylül – Ekim ayları arasındaki günlük ortalama ışınım miktarı (H) grafiği.

2017 yılı Eylül ve Ekim aylarına ait ortam sıcaklığı (T_{ortam}),, panel sıcaklığı (T_{panel}) ve ışınım (H) ilişkinin aylara göre incelendiği grafikler Şekil 6.23:Şekil 6.23 ve Şekil 6.24'te gösterilmektedir.



Şekil 6.23: 2017 yılı Eylül ayı günlük ortalama ortam sıcaklığı (T_{ortam}), panel sıcaklığı (T_{panel}) ve ışınım miktarı (H) ilişkisi.



Şekil 6.24: 2017 yılı Ekim ayı günlük ortalama ortam sıcaklığı (T_{ortam}), panel sıcaklığı (T_{panel}) ve ışınım miktarı (H) ilişkisi grafiği.

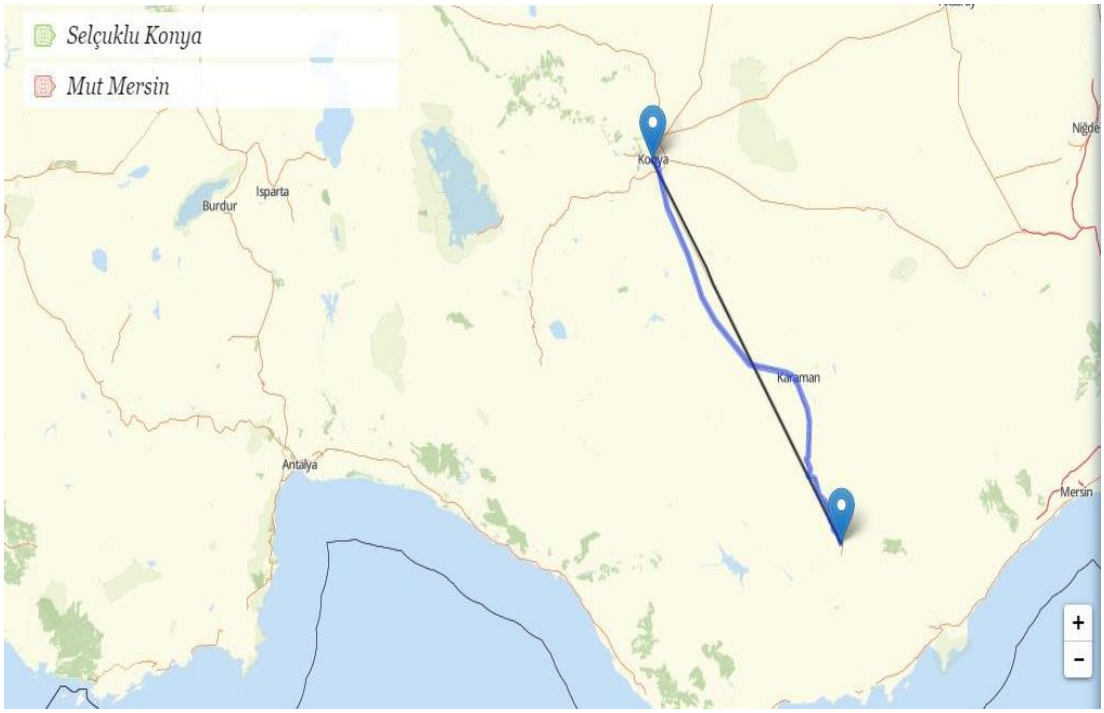
Tezde incelenen yüzer FV sistemi, arazi tipi sistemler ile karşılaştırmak için iki yöntem uygulanabilmektedir. Bunlar;

1. Analizi yapılacak sistem ile benzer ortam (ışınım, sıcaklık, vb. gibi) koşullarına sahip kara kurulumu bir sistemden gerçek veri ölçümü yapmak
2. Simülasyon yazılımından elde edilen değerleri doğrulama katsayı yardımı ile gerçek veriye çevirmek

Yukarıdaki yöntemlerden birinci yöntemin daha kesin sonuçlar vereceği ortada olmakla beraber, Mut'daki sistem için benzer ortam koşullarına sahip kara kurulumu FV sistemden veri almak mümkün olmamaktadır. Bu sebepten dolayı, Mut'daki çalışmada ikinci yöntem izlenmektedir.

Bölüm 5.2.1.'de analizi yapılan Konya ili Selçuklu ilçesindeki sistem ile İçel ili Mut ilçesindeki sistem arasındaki kuş uçumu mesafe yaklaşık olarak 160 km.'dir [26].

İki FV sistem lokasyonu arasındaki mesafe, Şekil 6.25'te görülebilmektedir.



Şekil 6.25: Konya'da bulunan kara kurulumu FV sistem ile İçel'de bulunan yüzer FV sistemin kuş uçuşu uzaklığı.

Birbirlerine coğrafi ve dolayısı ile ortam koşulları olarak benzer FV sistemlere ait değerlerin de birbirleri ile ilişkili olacağı öngörülebilmektedir [22]. Bu yaklaşımdan yola çıkarak aralarında yaklaşık 160 km. bulunan Konya ili Selçuklu ilçesi ile İçel ili Mut ilçesinin benzer ortam koşullarına sahip olduğu kabul edilmektedir. Bu kabul ile birlikte Konya ili Selçuklu ilçesi için hesaplanan PVsyst simülasyon yazılımı doğrulama katsayısı olan %98,7, İçel ili Mut ilçesi için de geçerli olmaktadır.

Yüzer ve arazi tipi FV sistemlerin enerji üretim sonuçlarını analiz edebilmek için Mut için yapılan PVsyst simülasyon sonuçlarını doğrulama katsayısı ile çarparak, Mut ilçesi için gerçek ölçüm değerlerine dönüştürülmüştür. Bu değer, yüzer FV sistemden alınan ölçüm değerleri ile karşılaştırarak yüzer ve arazi tipi FV sistemlerinn enerji üretim analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizin sonuçları Çizelge 6.7'de gösterilmektedir.

Çizelge 6.7: Bölgeye özel PVsyst doğrulama katsayısının İçel ili Mut ilçesinde bulunan FV sistem verim analizinde kullanılması.

Aylar (2017 yılı)	FV Sistemden Alınan Gerçek Veriler (kWh)	Simülasyon Yazılımından (PVsyst) Alınan Veriler (kWh)	Doğrulanan Simülasyon Yazılımı (PVsyst) Verileri (kWh)	Yüzer ve Kara Kurulumu Enerji Üretim Analizi
Eylül	1592	1618	-	-
Ekim	1509	1498	-	-
Toplam	3101	3116	3076	0,8

Çizelge 6.7Çizelge 6.7:'de elde edilen sonuçlara göre İçel ili Mut ilçesinde 2017 yılı Eylül ve Ekim aylarında yapılan analizler sonucunda yüzer ve arazi tipi sistemlerin enerji üretim miktarları arasında %0,8'lik fark olduğu görülmektedir. Bu sistemlerdeki ölçüm hataları göz önüne alındığında kara kurulumu ve yüzer FV sistemlerin enerji üretimlerinin yaklaşık olarak eşit olduğu görülmektedir.

6.3 Finansal Analiz

Ülkelerin enerji yatırımlarında çeşitlik ve yedekliliğin sağlanması başta olmak üzere kısa, orta ve uzun vadeli enerji politikaları oluşturulmaktadır. Makro ölçekte bu politikanın işleyişinin sağlanması takip edilmekte, hedeflerden sapmalar var ise teşvik, gözetim, ek vergi gibi düzeltici değişiklikler ile hedeflere uygun ilerlenmesi sağlanmaktadır.

Makro ölçekten mikro ölçeğe inildiğinde yatırımcının önem verdiği en öncelikli konu yatırımın geri dönüş süresi, nakit akışı ve finansa edilebilirliğidir. Bu sebeple enerji projelerinde en az enerjinin türü kadar finansal boyutu da önemlidir. Bu bölümde yüzer ve arazi tipi FV sistemlerin finansal açıdan kıyıslaması yapılmaktadır.

Bir FV sistemin finansal modellemesi gerçekleştirilirken öncelikle sistem maliyetinde kırılımlara yol açan kapasite kritik noktaları belirlenmektedir.

FV panel, solar evirici, taşıyıcı sistem, vb. gibi maliyet kalemleri FV sistem maliyeti içerisinde yüksek orana sahiptir. Bu malzemelerin ölçek ekonomisi gereği belli adet üzerine çıkıldığında fiyatındaki düşüşler kritik nokta belirlenmesindeki en önemli öğedir.

Kritik nokta hesabından sonra kritik noktalar arasında kalan bölgeler kategorize edilir. Aynı bölge içerisinde bulunan kapasite fiyatları sabit, farklı bölgelerde ise genellikle farklıdır. FV sistem maliyetleri belirli kapasite üzerine çıkıldığında sabit olarak ilerlemektedir.

Kritik nokta ve kapasite bölgeleri oluşturulduktan sonra bu bölgeler için kWp başına maliyet belirlenmektedir. 1 MWp'lik yüzer ve arazi tipi FV sistemler için maliyet karşılaştırması Çizelge 6.8'de gösterilmektedir.

Bu hesaba göre;

- **Sabit maliyet**

FV panel, solar evirici ve bu malzemelere ait işçilik maliyetleri iki FV sistem için de ortak olan maliyet kalemleridir.

- **Yüzer FV sistemin maliyet avantajları**

Yüzer FV sistemler üzerine kurulacakları bir araziye ve dolayısı ile bu arazinin düzenlenmesine ihtiyaç duymadığından bu konuda arazi tipi FV sistemlere göre avantajı bulunmaktadır.

Buna ek olarak baraj gölüne kurulan yüzer FV sistemlerinde barajın yüksek kapasiteye sahip enerji nakil hatları kullanıldığından ek bir enerji nakil hattı maliyeti de oluşmamaktadır. Çizelge 6.8'deki 1 MWp kapasiteli FV sistemlerin karşılaştırılması için yapılan çalışmada bu kalemler arazi tipi FV sistem maliyetinin yaklaşık %23'ünü oluşturmaktadır.

- **Yüzer FV sistemin maliyet dezavantajları**

Yüzer FV sistemler üzerine kurulacak araziye ihtiyaç duymamasına rağmen su üzerine kurulum yapılabilmesi için özel yüzdürücü ve taşıyıcı sistemlerine ihtiyaç duyarlar. Çizelge 6.8'deki 1 MWp kapasiteli FV sistemlerin karşılaştırılması için yapılan çalışmada bu kalemler yüzer FV sistem maliyetinin yaklaşık %42'sini oluşturmaktadır.

Çizelge 6.8: 1 MWp kapasiye sahip yüzer ve arazi tipi FV sistemler için maliyet karşılaştırması.

Maliyet Kalemi	Yüzer ($)	Arazi Tipi ($)	Maliyet Farkı ($)
FV Panel	432932	432932	0
Solar Evirici	84597	84597	0
Elektrik Nakil Hattı	0	137359	-137359
Elektrik Malzemesi ve İşçilik	190181	172939	17242
Taşıyıcı Sistem ve İşçilik	574728	186661	388066
Arazi ve Düzenleme	0	153642	-153642
Diğer	76841	76841	0
Toplam	**1359279**	**1244971**	**114308**

Çizelge 6.8'de maliyet analizi yapılan sistemde 1 MWp'lik kapasiteye sahip arazi tipi FV sistem kurulumu için gerekli arazi 20000 m^2'dir. Ek olarak aynı maliyet analizinde İstanbul ili Büyükçekmece ilçesi için arazi maliyeti, Türkiye'de FV sistem kurulumu için hesaplanan ortalama arazi maliyet olan 4,3 $/$m^2$ olarak kabul edilmiştir.

Maliyet analizi yapılan 1 MWp kapasiteye sahip örnek FV sistem için;

n_{dizi} : Dizi sayısı = 33 adet

n_{panel} : FV panel sayısı/Dizi = 120 adet

P_{panel} : FV panel gücü = 265 Wp

P_{sistem} : FV Sistem gücü

$$P_{sistem} = n_{dizi}.n_{panel}.P_{panel} \quad (6.1)$$

Denklem 6.1'de verilen formüle, FV sistem değerleri girildiğinde;

P_{sistem} = 32 [dizi].120 [panel/dizi].265 [Wp/panel] = 1017,6 kWp olmaktadır.

Örnek arazi tipi FV sistem için PVsyst simülasyon yazılımı tarafından üretilen yıllık enerji üretim analizine göre;

Lokasyon: Büyükçekmece/İstanbul

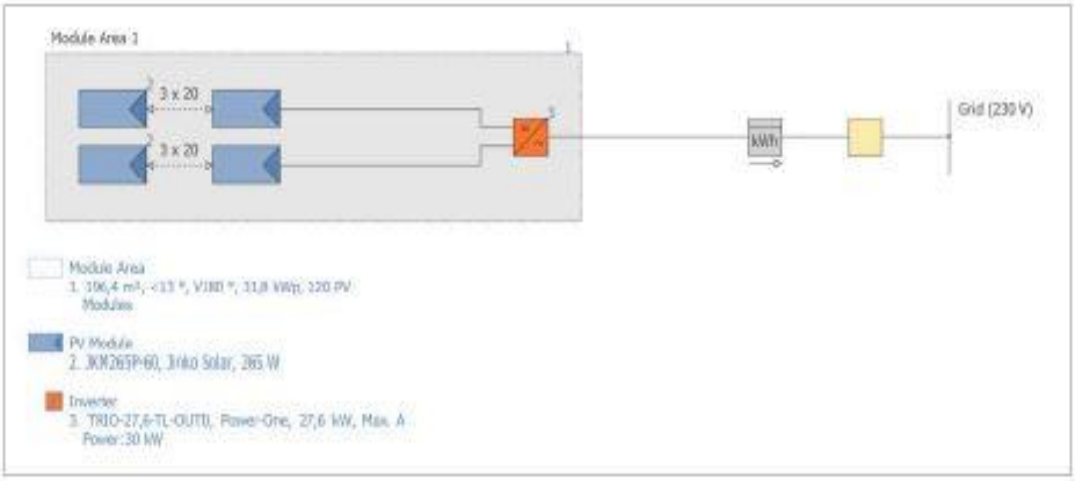
Azimut açısı: 0°

Til açısı: 30°

İstanbul ili Büyükçekmece ilçesindeki en yüksek enerji üretiminin sağlanabilmesi için tilt açısı 30° olarak belirlenmiştir.

Örnek arazi tipi FV sistem ile ilgili enerji üretimi Şekil 6.26'da gösterilmektedir.

Grid Connected PV System - Full Feed-in	
City	
Climate Data	Istanbul/Ataturk Ab
PV Generator Output	31,8 kWp
Generator Surface	196,4 m²
Number of PV Modules	120
Number of Inverter	1



The yield	
Energy produced by PV System (AC)	41.216 kWh
Spec. Annual Yield	1.296,10 kWh/kWp
Performance Ratio (PR)	83,8 %
CO2 Emissions avoided	24.719 kg / year

Your Gain	
Total investment costs	47,700,00 ?
Return on assets	7,64 %
Amortization Period	11,6 Years
Electricity Production Costs	0,08 ?

Şekil 6.26: Örnek arazi tipi FV sistem için PVSOL simülasyon yazılımı tarafından üretilen yıllık enerji üretim analizi.

Şekil 6.26'da verilen bu analiz sonucunda;

Örnek arazi kurulumu FV sistemin yıllık kWh başına enerji üretimi: 1329,28 kWh/kWp'dir.

$E_{üretim\text{-}yıl}$: Yıllık enerji üretimi

$$E_{üretim\text{-}yıl} = P_{sistem}\ [kWp].E_{üretim/birim\ güç}\ [kWh/kWp].n_{Üretim}[\%] \quad (6.2)$$

$E_{üretim\text{-}yıl}$ = 1017,6 [kWp].1329,28 [kWh/kWp] = 1352,7 MWh'tir.

Örnek arazi tipi FV sisteme ait 25 yıllık enerji üretimi Çizelge 6.9'da verilmiştir.

Çizelge 6.9: Örnek arazi tipi FV sistem tarafından üretilen yıllık enerji üretimi.

Yıl	Baz Üretim (MWh/Yıl)	Verim	Gerçek Üretim (MWh/Yıl)
1		97,5%	1.318,9
2		96,9%	1.310,4
3		96,3%	1.302,0
4		95,6%	1.293,5
5		95,0%	1.285,1
6		94,3%	1.275,4
7		93,6%	1.265,7
8		92,9%	1.256,1
9		92,1%	1.246,4
10		91,4%	1.236,8
11		90,7%	1.227,1
12		90,0%	1.217,4
13	1352,70	89,3%	1.207,7
14		88,6%	1.198,1
15		87,9%	1.188,4
16		87,1%	1.178,7
17		86,4%	1.169,0
18		85,7%	1.159,4
19		85,0%	1.149,7
20		84,3%	1.140,0
21		83,6%	1.130,3
22		82,8%	1.120,7
23		82,1%	1.111,0
24		81,4%	1.101,3
25		80,7%	1.091,6
Toplam			**30.180,7**

FV panellerdeki yıla göre enerji üretim verimi düşüşleri sebebi ile FV sistem kapasitesi sabit kalmasına rağmen üretilen enerji miktarı yıl sayısı arttıkça düşüş göstermektedir. İstanbul ili Büyükçekmece ilçesi için örnek arazi tipi FV sistemin yatırım maliyeti, yıllık enerji üretimi, brüt gelir, net gelir ve yıllara göre nakit akış durumu Çizelge 6.10'da gösterilmektedir.

Bu finansal tablo hazırlanırken; devlet teşviği sebebi ile bu sistemden üretilen elektrik enerjisinin 25 yıl boyunca 13,3 $ cent/kWh'ten satılacağı ve örnek arazi tipi FV sistem için bakım gideri, yıllık brüt gelirin %5'i olarak öngörülmüştür. Ek olarak, arazi tipi FV sistemin üzerine kurulacağı arazi maliyeti, Türkiye'de FV sistem kurulumuna uygun en düşük arazi maliyeti üzerinden hesaplanmıştır.

Çizelge 6.10: 1 MW'lık arazi tipi FV sistem için 25 yıllık gelir, yatırım ve nakit durumu tablosu.

Yıl	Yıllık Enerji Üretimi (MWh/Yıl)	Yıllık Gelir (k$/Yıl)	Bakım (k$/Yıl)	Net Gelir (k$/Yıl)	Yatırım (k$)	Durum (k$)
-	-	-	-		1.245,0	-1.245,0
1	1.318,9	175,4	8,8	166,6	-1.078,4	-1.078,4
2	1.310,4	174,3	9,2	165,1	-913,3	-913,3
3	1.302,0	173,2	9,7	163,5	-749,8	-749,8
4	1.293,5	172,0	10,2	161,9	-587,9	-587,9
5	1.285,1	170,9	10,7	160,3	-427,7	-427,7
6	1.275,4	169,6	11,2	158,4	-269,2	-269,2
7	1.265,7	168,3	11,8	156,6	-112,6	-112,6
8	1.256,1	167,1	12,3	154,7	42,1	42,1
9	1.246,4	165,8	13,0	152,8	194,9	194,9
10	1.236,8	164,5	13,6	150,9	345,8	345,8
11	1.227,1	163,2	14,3	148,9	494,7	494,7
12	1.217,4	161,9	15,0	146,9	641,6	641,6
13	1.207,7	160,6	15,8	144,9	786,5	786,5
14	1.198,1	159,3	16,5	142,8	929,3	929,3
15	1.188,4	158,1	17,4	140,7	1.070,0	1.070,0
16	1.178,7	156,8	18,2	138,5	1.208,5	1.208,5
17	1.169,0	155,5	19,1	136,3	1.344,9	1.344,9
18	1.159,4	154,2	20,1	134,1	1.479,0	1.479,0
19	1.149,7	152,9	21,1	131,8	1.610,8	1.610,8
20	1.140,0	151,6	22,2	129,5	1.740,2	1.740,2
21	1.130,3	150,3	23,3	127,1	1.867,3	1.867,3
22	1.120,7	149,0	24,4	124,6	1.991,9	1.991,9
23	1.111,0	147,8	25,7	122,1	2.114,0	2.114,0
24	1.101,3	146,5	26,9	119,5	2.233,5	2.233,5
25	1.091,6	145,2	28,3	116,9	2.350,4	2.350,4

Özetle; İstanbul ili Büyükçekmece ilçesi için yapılan arazi tipi FV sistem kurulum ilk yatırım maliyeti 1245 k$ olup, yatırımın geri dönüş süresi 8 yıla yakındır.

Örnek yüzer FV sistem için PVsyst simülasyon yazılımı tarafından üretilen yıllık enerji üretim analizine göre;

Lokasyon: Büyükçekmece/İstanbul

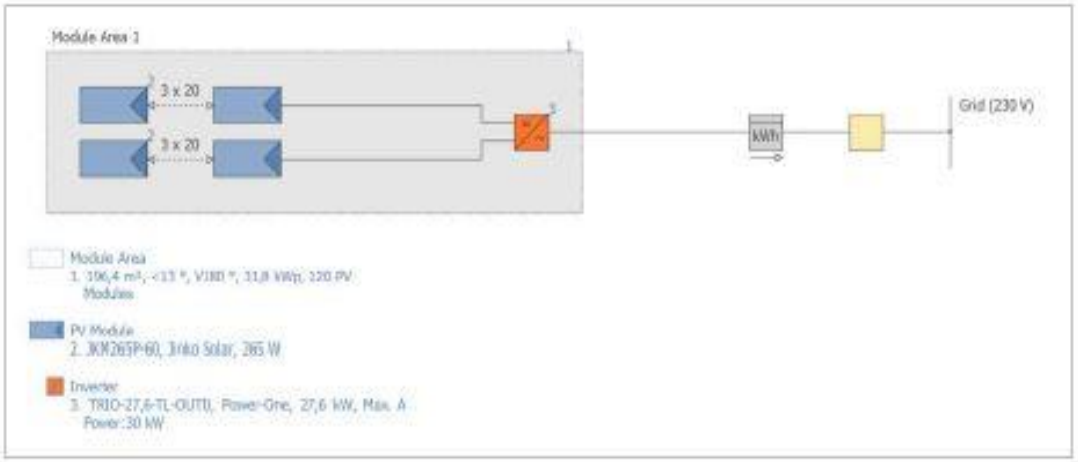
Azimut açısı: 0°

Til açısı: 13°

İçel ili Mut ilçesi'nde en yüksek enerji üretimi için tilt açısının 30° olmasına rağmen, yüzer FV sistem tasarımında panellerin suya mümkün olduğunca paralel konumlandırılabilmesi için tilt açısı 13° olarak belirlenmiştir.

Örnek arazi tipi FV sistem ile ilgili enerji üretim Şekil 6.27'de gösterilmektedir.

Grid Connected PV System - Full Feed-in	
City	
Climate Data	Istanbul/Ataturk Ab
PV Generator Output	31,8 kWp
Generator Surface	196,4 m²
Number of PV Modules	120
Number of Inverter	1



The yield	
Energy produced by PV System (AC)	41.216 kWh
Spec. Annual Yield	1.296,10 kWh/kWp
Performance Ratio (PR)	83,8 %
CO2 Emissions avoided	24.719 kg / year

Your Gain	
Total investment costs	47,700,00 ?
Return on assets	7,64 %
Amortization Period	11,6 Years
Electricity Production Costs	0,08 ?

Şekil 6.27: Örnek arazi tipi FV sistem için PVSOL simülasyon yazılımı tarafından üretilen yıllık enerji üretim analizi.

Şekil 6.27'de verilen bu analiz sonucunda;

Örnek arazi kurulumu FV sistemin yıllık birim enerji üretimi: 1296,1 kWh/kWp'dir.

Çizelge 6.7'de verildiği üzere yüzer FV sisteme ait yıllık enerji üretim miktarı, arazi tipine göre %0,8 daha fazla olmaktadır. Ölçülen bu fark, ölçüm aletlerinin hassasiyetinden kaynaklanabilecek kadar küçük olduğundan bu çalışmada yüzer FV sistem yıllık enerji üretim miktarının, arazi tipi sistemler ile benzer olduğu görülmektedir.

Enerji üretim miktarları aynı olsa da yüzer ve arazi tipi sistemlerin tasarımından kaynaklanan tilt açısı farklılıkları sebebi ile enerji üretim miktarı değişim göstermektedir.

$E_{üretim\text{-}yıl}$ = 1017,6 [kWp] . 1296,1 [kWh/kWp] . %100,8 = 1329,46 MWh'tir.

Yüzer FV sistemlerde, arazi tipi sistemlerde kullanılan panel tipleri kullanıldığından, panel verimlerinin düşmesine bağlı yıllara bağlı enerji düşümü yüzer FV sistemlerde de yaşanmaktadır.

Örnek yüzer FV sisteme ait 25 yıllık enerji üretimi Çizelge 6.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.11: Örnek yüzer FV sistem tarafından üretilen yıllık enerji üretimi.

Yıl	Baz Üretim (MWh/Yıl)	Verim	Gerçek Üretim (MWh/Yıl)
1		97,5%	1.296,2
2		96,9%	1.287,9
3		96,3%	1.279,6
4		95,6%	1.271,3
5		95,0%	1.263,0
6		94,3%	1.253,5
7		93,6%	1.244,0
8		92,9%	1.234,5
9		92,1%	1.225,0
10		91,4%	1.215,5
11		90,7%	1.206,0
12		90,0%	1.196,5
13	1329,46	89,3%	1.187,0
14		88,6%	1.177,5
15		87,9%	1.168,0
16		87,1%	1.158,5
17		86,4%	1.149,0
18		85,7%	1.139,5
19		85,0%	1.129,9
20		84,3%	1.120,4
21		83,6%	1.110,9
22		82,8%	1.101,4
23		82,1%	1.091,9
24		81,4%	1.082,4
25		80,7%	1.072,9
Toplam			**29.662,3**

İstanbul ili Büyükçekmece ilçesi için örnek yüzer tip FV sistemin yatırım maliyeti, yıllık enerji üretimi, brüt gelir, net gelir ve yıllara göre nakit akış durumu Çizelge 6.12Çizelge 6.12:'de gösterilmektedir.

Çizelge 6.12: 1 MW'lık yüzer FV sistem için 25 yıllık gelir, yatırım ve nakit durumu tablosu.

Yıl	Yıllık Enerji Üretimi (MWh/Yıl)	Yıllık Gelir (k$/Yıl)	Bakım (k$/Yıl)	Net Gelir (k$/Yıl)	Yatırım (k$)	Durum (k$)
-	-	-	-	-	1.359,0	-1.359,0
1	1.296,2	172,4	8,6	163,8	-1.195,2	-1.195,2
2	1.287,9	171,3	9,1	162,2	-1.033,0	-1.033,0
3	1.279,6	170,2	9,5	160,7	-872,3	-872,3
4	1.271,3	169,1	10,0	159,1	-713,2	-713,2
5	1.263,0	168,0	10,5	157,5	-555,7	-555,7
6	1.253,5	166,7	11,0	155,7	-400,0	-400,0
7	1.244,0	165,5	11,6	153,9	-246,1	-246,1
8	1.234,5	164,2	12,1	152,1	-94,0	-94,0
9	1.225,0	162,9	12,7	150,2	56,2	56,2
10	1.215,5	161,7	13,4	148,3	204,5	204,5
11	1.206,0	160,4	14,0	146,4	350,8	350,8
12	1.196,5	159,1	14,7	144,4	495,2	495,2
13	1.187,0	157,9	15,5	142,4	637,6	637,6
14	1.177,5	156,6	16,3	140,4	778,0	778,0
15	1.168,0	155,3	17,1	138,3	916,2	916,2
16	1.158,5	154,1	17,9	136,2	1.052,4	1.052,4
17	1.149,0	152,8	18,8	134,0	1.186,4	1.186,4
18	1.139,5	151,5	19,8	131,8	1.318,2	1.318,2
19	1.129,9	150,3	20,7	129,5	1.447,7	1.447,7
20	1.120,4	149,0	21,8	127,2	1.574,9	1.574,9
21	1.110,9	147,8	22,9	124,9	1.699,8	1.699,8
22	1.101,4	146,5	24,0	122,5	1.822,3	1.822,3
23	1.091,9	145,2	25,2	120,0	1.942,3	1.942,3
24	1.082,4	144,0	26,5	117,5	2.059,8	2.059,8
25	1.072,9	142,7	27,8	114,9	2.174,7	2.174,7

Bu finansal tablo hazırlanırken; arazi tipi FV sistemlerde de olduğu gibi devlet teşviği sebebi ile bu sistemden üretilen elektrik enerjisinin 25 yıl boyunca 13,3 $ cent/kWh'ten satılacağı ve örnek yüzer tip FV sistem bakım giderinin, yıllık brüt gelirin %5'i olacağı öngörülmüştür.

Özetle; İstanbul ili Büyükçekmece ilçesi için yapılan yüzer FV sistem kurulum ilk yatırım maliyeti 1359 k$ olup, yatırımın geri dönüş süresi 9 yıla yakındır.

7. SONUÇ

Tez çalışması kapsamında yüzer ve arazi tipi FV sistemler incelenmiş olup, bu FV sistemler ile ilgili teknik ve finansal analizler gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen teknik analizler sonucunda;

Konya ili Selçuklu ilçesinde bulunan arazi tipi FV sistemden alınan gerçek veriler, simülasyon verileri ile karşılaştırılarak Konya ve civar bölge için geçerli bir PVsyst doğrultma katsayısı bulunmuştur. İkinci aşamada PVsyst simülasyon yazılımından İçel ili Mut ilçesi için elde edilen veriler, Konya'daki sistemden alınan doğrulama katsayısı ile gerçek veriye dönüştürülmüştür. Üçüncü aşamada İçel ili Mut ilçesinde bulunan yüzer FV sistemden alınan veriler, ikinci aşamada doğrulanan simülasyon verisi ile karşılaştırılmıştır.

Tüm bu karşılaştırmalar sonucunda İçel'de bulunan yüzer FV sistemin yıllık enerji üretim miktarının, benzer ortam koşullarındaki (ışınım ve ortam sıcaklığı) arazi tipi FV sistemin yıllık enerji üretim miktarı ile yaklaşık olarak eşit olduğu görülmektedir.

Güney Kore'de yapılan yüzer ve arazi tipi FV sistemleri karşılaştıran çalışmada yüzer FV sistemlerin enerji üretim verimlerinin, arazi tipi FV sistemlere kıyasla %11 fazla olmasına rağmen teknik olarak karşılatırdığımız sistemlerde bu değere ulaşamamamızın sebeplerine baktığımızda;

- İçel'deki yüzer FV sistem tilt açısının Güney Kore'de incelenen sisteme göre daha fazla oluşu sebebi ile FV panellerin, suya yeterince paralel seviyeye gelemediğini ve dolayısı ile yeterince soğutulamadığı düşünülmektedir.
- Ölçüm yapılan zaman aralığının Eylül ve Ekim ayları olması sebebi ile ortam ve panel sıcaklıkları yeterince yükselmemektedir. Bu sebeple yapılan karşılaştırmaların Temmuz, Ağustos gibi sıcaklıkların en yüksek olduğu aylarda tekrar edildiğinde yüzer FV sistem enerji üretim verimin daha yükseleceği öngörülmektedir.

- Bu çalışma kapsamında buharlaşma ile ilgili araştırmalar gerçekleştirilmemektedir. Fakat sistemin su üzerinde bulunması sebebi ile özellikle ortam sıcaklığı ve ışınımın yükseldiği zamanlarda yüzer FV sisteme ulaşan ışınım miktarının, su buharı içerisinden geçerken kırılarak azaldığı düşünülmektedir.
- Yüzer FV sistemdeki panel sıcaklıklarının, arazi tipi FV sistemdeki panel sıcaklıklarına oranla daha düşük olduğu, dolayısı ile panel sıcaklığı kaynaklı enerji kayıplarının azaldığı düşünülmektedir.
- Buhar sebebi ile ışınımın, dolayısı ile enerji üretiminin daha düşük, panel soğutması sebebi ile enerji üretiminin daha yüksek olması öngörülmektedir. Bu iki koşulun toplam sistem etkisinin yaklaşık olarak aynı olduğu, bu yüzden de sistemin enerji üretim veriminin sabit kaldığı düşünülmektedir.
- Yüzer ve arazi tipi FV sistem enerji üretim verimleri arasındaki %0,8'lik farkın ölçüm aletlerinin hassasiyetinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Gerçekleştirilen finansal analizler sonucunda;

- Yapılan çalışmada arazi maliyeti, Türkiye'de FV sistem kurulumu için ortalama arazi maliyeti olan 4,3 $\$/m^2$ kabul edildiğinde yüzer FV sistem kurulum maliyetinin, arazi tipi FV sistemlere oranla %9 daha pahalı olduğu görülmektedir. Arazi tipi FV sistemin kurulacağı lokasyona ve dolayısı ile bu lokasyondaki arazi fiyatlarına bağlı olarak bu değer değişim göstermektedir. Arazi fiyatlarının daha yüksek olduğu lokasyonlarda arazi tipi FV sistemler, yüzer sistemlere göre yüksek maliyetli olabilmektedir.
- Yüzer FV sistemlerin ilk yatırım maliyeti, arazi tipi FV sistemlere göre daha yüksek olmasına rağmen geri dönüş süresi olarak benzerlik göstermektedir. Arazi tipinde 8 yıl olan yatırım geri dönüş süresi, yüzer FV sistemde ise 9 yıla yakın olmaktadır.
- Göl ve baraj göllerinin üzerlerinin örtülmesi ile yüzer FV sistem enerji üretim kazancına ek olarak göl suyunun buharlaşması engellendiği için sudan kazanç da sağlanmaktadır. Bu araştırma kapsamında buharlaşma konusu ele alınmadığından, yüzer FV sistemin buharlaşmayı engelleme miktarı bilinmemektedir. Önümüzdeki yıllarda daha büyük sorun haline geleceği öngörülen su probleminin, suyun önemini ve fiyatını yükselteceği

öngörülmektedir. Dolayısı ile yüzer sistemlerin orta gelecekteki esas faydasının enerji üretimi değil su kazancı olacağı öngörülmektedir.

Küreselleşme sebebi ile enerji tüketim ve üretiminin dar kentsel alanlara sıkıştığı düşünüldüğünde kıymetli arazileri kullanmanın yanı sıra yüzer FV sistemlerdeki kurulu kapasitesinin arttırılması ile hem enerji tüketildiği yere yakın yerlerde üretilebilmekte, hem de enerji üretiminde çeşitlilik sağlanabilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **Url-1** <*http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/g_enj_tekno.aspx*>, erişim tarihi: 15 Eylül 2017.

[2] **Graf, R.F.** (1999). Modern dictionary of electronics, Butterworth-Heinemann, A.B.D.

[3] **IRENA** (2017). Boosting Solar PV Markets: The Role Of Quality Infrastructure. Retrieved from: 15.09.2017,

http://www.irena.org/publications/2017/Sep/Boosting-solar-PV-markets-The-role-of-quality-infrastructure

[4] **GEPA** (2017). Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası. Erişim: 15 Eylül 2017,

http://www.eie.gov.tr/mycalculator/default.aspx

[5] **Url-2** <*http://enerjienstitusu.com/turkiye-kurulu-elektrik-enerji-gucu-mw/*>,

erişim tarihi: 15 Eylül 2017.

[6] **T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.** (2015). 2015-2019 Stratejik Planı. Ankara: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı

[7] **Akbaş G. ve Apar A.** (2010). Avrupa 2020 Stratejisi: Akıllı, Sürdürülebilir ve Kapsayıcı Büyüme için Avrupa Stratejisi. Ankara: T.C. Başbakanlık Avrupa Birliği Genel Sekreterliği, Sosyal, Bölgesel ve Yenilikçi Politikalar Başkanlığı Raporu.

[8] **Deloitte** (2014). Türkiye Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı

[9] **KMPG** (2016). Yenilenebilir Enerjiye Yönelik Vergi ve Teşvikler

[10] **AB Proje Geliştirme ve İzleme Müdürlüğü.** (2010). Yenilenebilir Enerji Teşvikleri

[11] **Engin O.** (2007). Silisyum Güneş Pillerinin Elektriksel Karakteristikleri ve Üretim Teknolojisi. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

[12] **Photovoltaics Research and Development.** (2017). Erişim: 04 Eylül 2017,

http://energy.gov/eere/sunshot/photovoltaics-research-and-development

[13] **Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems.** (2017). ISE Photovoltaic Report [PowerPoint slides]. Retrieved from https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf

[14] **Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects and engineers.** (2008). Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, VA: Earthscan

[15] **Url-3** <*https://www.jinkosolar.com/ftp/EN-JKM265P-60(4BB).pdf*>, erişim tarihi: 5 Kasım 2017.

[16] **Url-4** <*https://solar.schneider-electric.com/product/conext-smartgen*>, erişim tarihi: 5 Kasım 2017.

[17] **Url-5** <*https://solar.schneider-electric.com/product/conext-cl-60-string-inverter*>, erişim tarihi: 5 Kasım 2017.

[18] **Url-6** <*https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=BCD.00379&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch*>, erişim tarihi: 5 Kasım 2017.

[19] **Boztepe M.** (2002). İzmir (Bornova) Koşullarında Şebekeye Bağlı Bir Fotovoltaik Enerji Sisteminin Tasarımı ve Denenmesi. (Doktora Tezi). Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir

[20] **Özgöçmen A.** (2007). Güneş Pilleri Kullanarak Elektrik Üretimi. (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

[21] **Sahu A., Yadav N. & Sudhakar K.** (2016). A Floating photovoltaic power plant: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 66, 815–824

[22] **Choi Y. K.** (2014). A study on power generation analysis of floating PV system considering environmental impact, International Journal of Software Engineering and Its Applications, 8 (1), 75–84

[23] **Ferrer-Gisbert C., Ferrán-Gozálvez J. J., Redón-Santafé M., Ferrer-Gisbert P., Sánchez-Romero F. J. & Torregrosa-Solera J. B.** (2013). A new photovoltaic floating cover system for water reservoirs, Renewable Energy, 60, 63-70; Valencia

[24] **Devlet Su İşleri.** (2017) Türkiye'deki Barajlar. Erişim: 25 Eylül 2017, http://www2.dsi.gov.tr/barajlar_albumu/files/assets/basic-html/index.html#1

[25] **PVsyst Simülasyon Yazılımı** (Version 5.2) [Bilgisayar yazılımı]. http://www.pvsyst.com/

[26] **Url-7** <*www.distance.co*>, erişim tarihi: 07 Eylül 2017.

EKLER

EK A: PVsyst simülasyon yazılımında gerçekleştirilen sistem tasarımları

EK A

Grid-Connected System: Simulation parameters

Project :	**Unilever - Konya**			
Geographical Site	**Konya**		**Country**	**Turkey**
Situation	Latitude	37.9°N	Longitude	32.5°E
Time defined as	Legal Time	Time zone UT+2	Altitude	1029 m
	Albedo	0.20		
Meteo data :	Konya from PVGIS, Synthetic Hourly data			
Simulation variant :	**New simulation variant**			
	Simulation date	10/11/15 13h33		
Simulation parameters				
Collector Plane Orientation	Tilt	15°	Azimuth	0°
Horizon	Free Horizon			
Near Shadings	No Shadings			
PV Arrays Characteristics (3 kinds of array defined)				
PV module	Si-poly	Model	**JKM265P-60**	
		Manufacturer	Jinko Solar Co., Ltd.	
Array#1: Number of PV modules		In series	20 modules	In parallel 6 strings
Total number of PV modules		Nb. modules	120	Unit Nom. Power 265 Wp
Array global power		Nominal (STC)	**31.8 kWp**	At operating cond. 28.49 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)		U mpp	566 V	I mpp 50 A
Array#2: Number of PV modules		In series	20 modules	In parallel 4 strings
Total number of PV modules		Nb. modules	80	Unit Nom. Power 265 Wp
Array global power		Nominal (STC)	**21.20 kWp**	At operating cond. 18.99 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)		U mpp	566 V	I mpp 34 A
Array#3: Number of PV modules		In series	20 modules	In parallel 6 strings
Total number of PV modules		Nb. modules	120	Unit Nom. Power 265 Wp
Array global power		Nominal (STC)	**31.8 kWp**	At operating cond. 28.49 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)		U mpp	566 V	I mpp 50 A
Total Arrays global power		Nominal (STC)	**86 kWp**	Total 320 modules
		Module area	**624 m²**	
Array#1 : Inverter		Model	**TRIO-27.6-TL-OUTD-400**	
		Manufacturer	ABB S.p.A.	
Characteristics		Operating Voltage	500-800 V	Unit Nom. Power 28 kW AC
Array#2 : Inverter		Model	**TRIO-20.0-TL-OUTD-400**	
		Manufacturer	ABB S.p.A.	
Characteristics		Operating Voltage	440-800 V	Unit Nom. Power 20 kW AC
Array#3 : Inverter		Model	**TRIO-27.6-TL-OUTD-400**	
		Manufacturer	ABB S.p.A.	
Characteristics		Operating Voltage	500-800 V	Unit Nom. Power 28 kW AC
PV Array loss factors				
Thermal Loss factor		Uc (const)	20.0 W/m²K	Uv (wind) 0.0 W/m²K / m/s
=> Nominal Oper. Coll. Temp. (G=800 W/m², Tamb=20°C, Wind=1 m/s.)				NOCT 56 °C
Wiring Ohmic Loss		Array#1	190 mOhm	Loss Fraction 1.5 % at STC
		Array#2	284 mOhm	Loss Fraction 1.5 % at STC
		Array#3	190 mOhm	Loss Fraction 1.5 % at STC
		Global		Loss Fraction 1.5 % at STC

Şekil A.1: Konya ili Selçuklu ilçesindeki arazi tipi FV sistem için PVsyst simülasyon yazılımında gerçekleştirilen sistem tasarımı.

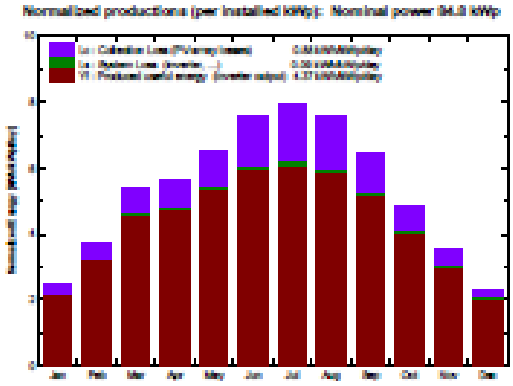
Grid-Connected System: Main results

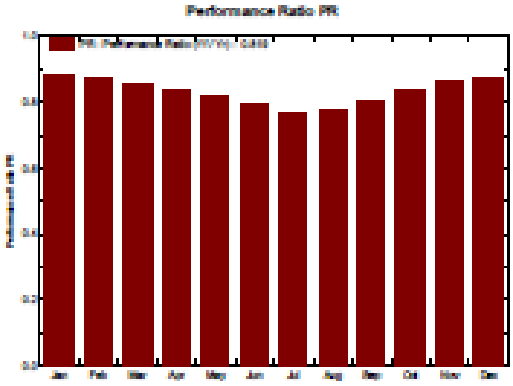
Project : Unilever - Konya

Simulation variant : New simulation variant

Main system parameters	System type	**Grid-Connected**			
PV Field Orientation	tilt	15°	azimuth	0°	
PV modules	Model	JKM265P-60	Pnom	265 Wp	
PV Array	Nb. of modules	320	Pnom total	**84.8 kWp**	
Inverter	Model	TRIO-27.6-TL-OUTD-400	Pnom	27.60 kW ac	
Inverter	Model	TRIO-20.0-TL-OUTD-400	Pnom	20.00 kW ac	
Inverter pack	Nb. of units	3.0	Pnom total	**76.2 kW ac**	
User's needs	Unlimited load (grid)				

Main simulation results				
System Production	**Produced Energy**	**135185 kWh/year**	Specific prod.	1594 kWh/kWp/year
	Performance Ratio PR	81.9 %		





New simulation variant

Balances and main results

	GlobHor	T Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	EffArrR	EffSysR
	kWh/m²	°C	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	%	%
January	63.8	0.70	76.9	73.8	5872	5753	14.57	14.28
February	86.7	2.20	103.2	99.3	7813	7660	14.46	14.18
March	145.7	6.70	165.3	159.8	12240	12006	14.14	13.87
April	181.7	11.10	170.0	164.8	12339	12101	13.96	13.69
May	201.2	16.40	202.9	196.7	14330	14054	13.46	13.22
June	229.6	21.40	226.1	219.3	15460	15154	13.04	12.80
July	246.0	24.80	245.9	238.9	16967	16653	12.71	12.48
August	226.5	24.30	226.2	220.5	15930	15617	12.84	12.60
September	174.0	19.50	184.1	180.1	13466	13208	13.24	12.99
October	125.2	13.50	150.3	144.9	10940	10603	13.77	13.51
November	82.2	7.20	105.2	101.1	7819	7669	14.10	13.81
December	58.3	2.50	72.5	69.3	5494	5384	14.46	14.19
Year	1803.0	12.58	1947.6	1864.5	137940	135185	13.51	13.25

Legends:

GlobHor	Horizontal global irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
T Amb	Ambient Temperature	E_Grid	Energy injected into grid
GlobInc	Global incident in coll. plane	EffArrR	Effic. Eout array / rough area
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings	EffSysR	Effic. Eout system / rough area

Şekil A.1 (devam): Konya ili Selçuklu ilçesindeki arazi tipi FV sistem için PVsyst simülasyon yazılımında gerçekleştirilen sistem tasarımı.

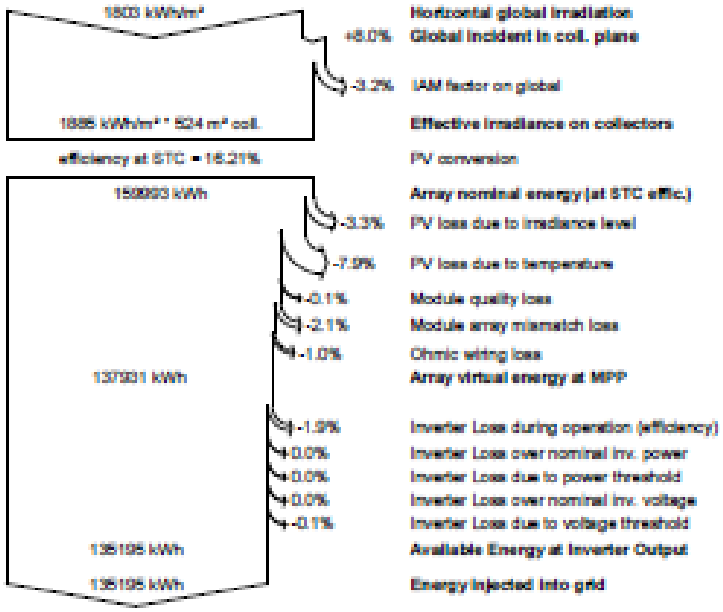
Grid-Connected System: Loss diagram

Project : Unilever - Konya

Simulation variant : New simulation variant

Main system parameters	System type	**Grid-Connected**		
PV Field Orientation	tilt	15°	azimuth	0°
PV modules	Model	JKM265P-60	Pnom	265 Wp
PV Array	Nb. of modules	320	Pnom total	**84.8 kWp**
Inverter	Model	TRIO-27.6-TL-OUTD-400	Pnom	27.60 kW ac
Inverter	Model	TRIO-20.0-TL-OUTD-400	Pnom	20.00 kW ac
Inverter pack	Nb. of units	3.0	Pnom total	**76.2 kW ac**
User's needs	Unlimited load (grid)			

Loss diagram over the whole year



Şekil A.1 (devam): Konya ili Selçuklu ilçesindeki arazi tipi FV sistem için PVsyst simülasyon yazılımında gerçekleştirilen sistem tasarımı.

Grid-Connected System: Simulation parameters

Project :	**Hydrosolar_Azmak**			
Geographical Site	**Azmak HES,Mut,Mersin**		**Country**	**Turkey**
Situation	Latitude	36.6°N	Longitude	33.3°E
Time defined as	Legal Time	Time zone UT+2	Altitude	138 m
	Albedo	0.20		
Meteo data :	Azmak HES,Mut,Mersin, Synthetic Hourly data			
Simulation variant :	**New simulation variant**			
	Simulation date	03/12/14 14h25		

Simulation parameters					
Collector Plane Orientation		Tilt	30°	Azimuth	10°
Horizon	Free Horizon				
Near Shadings	No Shadings				
PV Array Characteristics					
PV module	Si-poly	Model	YL260P-29b		
		Manufacturer	Yingli Green Energy Holding Co. Ltd.		
Number of PV modules		In series	20 modules	In parallel	2 strings
Total number of PV modules		Nb. modules	40	Unit Nom. Power	260 Wp
Array global power		Nominal (STC)	**10.00 kWp**	At operating cond.	8.88 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)		U mpp	546 V	I mpp	16 A
Total area		Module area	**85.3 m²**		
Inverter		Model	**TRIO-20_0-TL-OUTD-S2X-400**		
		Manufacturer	Power-One		
Characteristics		Operating Voltage	175-800 V	Unit Nom. Power	20.0 kW AC
Inverter pack		Number of Inverter	1 units	Total Power	10.0 kW AC
PV Array loss factors					
Thermal Loss factor		Uc (const)	20.0 W/m²K	Uv (wind)	0.0 W/m²K / m/s
=> Nominal Oper. Coll. Temp. (G=800 W/m², Tamb=20°C, Wind=1 m/s.)				NOCT	56 °C
Wiring Ohmic Loss		Global array res.	570 mOhm	Loss Fraction	1.5 % at STC
Module Quality Loss				Loss Fraction	0.0 %
Module Mismatch Losses				Loss Fraction	2.0 % at MPP
Incidence effect, ASHRAE parametrization		IAM =	1 - bo (1/cos i - 1)	bo Parameter	0.05
User's needs :	Unlimited load (grid)				

Evaluation Mode

Şekil A.2: İçel ili Mut ilçesindeki yüzer FV sistem için PVsyst simülasyon yazılımında gerçekleştirilen sistem tasarımı.

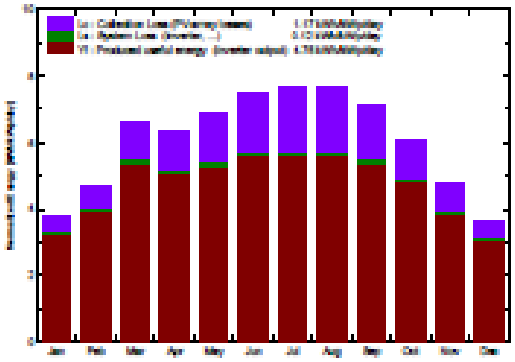
Grid-Connected System: Main results

Project : Hydrosolar_Azmak
Simulation variant : New simulation variant

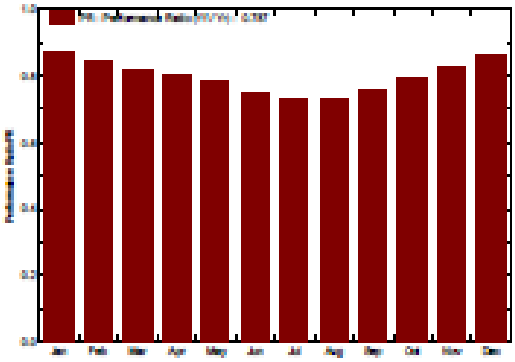
Main system parameters	System type	**Grid-Connected**		
PV Field Orientation	tilt	30°	azimuth	10°
PV modules	Model	YL250P-29b	Pnom	250 Wp
PV Array	Nb. of modules	40	Pnom total	10.00 kWp
Inverter	Model	TRIO-20_0-TL-OUTD-S2X-400	Pnom	20.00 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)			

Main simulation results				
System Production	**Produced Energy**	**17373 kWh/year**	Specific prod.	1737 kWh/kWp/year
	Performance Ratio PR	78.7 %		

Normalized productions (per installed kWp): Nominal power 10.00 kWp



Performance Ratio PR



New simulation variant
Balances and main results

	GlobHor kWh/m²	T Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	EffArrR %	EffSysR %
January	78.4	8.90	117.5	113.9	1041	1018	13.57	13.26
February	96.3	10.50	131.0	127.3	1135	1110	13.26	12.97
March	156.8	14.10	204.6	198.9	1713	1673	12.81	12.52
April	180.3	17.70	189.9	184.4	1561	1524	12.58	12.28
May	222.0	22.20	211.6	205.1	1690	1648	12.23	11.92
June	246.9	27.00	223.8	216.9	1723	1678	11.78	11.47
July	255.4	29.80	236.2	229.0	1782	1734	11.54	11.23
August	232.2	30.10	236.5	229.8	1782	1734	11.53	11.22
September	184.2	26.00	213.4	207.5	1659	1618	11.90	11.60
October	139.8	21.70	188.8	183.8	1534	1498	12.43	12.14
November	93.6	15.70	141.7	137.9	1201	1174	12.97	12.68
December	72.5	11.20	112.0	108.6	986	964	13.47	13.18
Year	1958.5	19.63	2207.0	2143.1	17806	17373	12.35	12.05

Legends: GlobHor Horizontal global irradiation; EArray Effective energy at the output of the array; T Amb Ambient Temperature; E_Grid Energy injected into grid; GlobInc Global incident in coll. plane; EffArrR Effic. Eout array / rough area; GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings; EffSysR Effic. Eout system / rough area

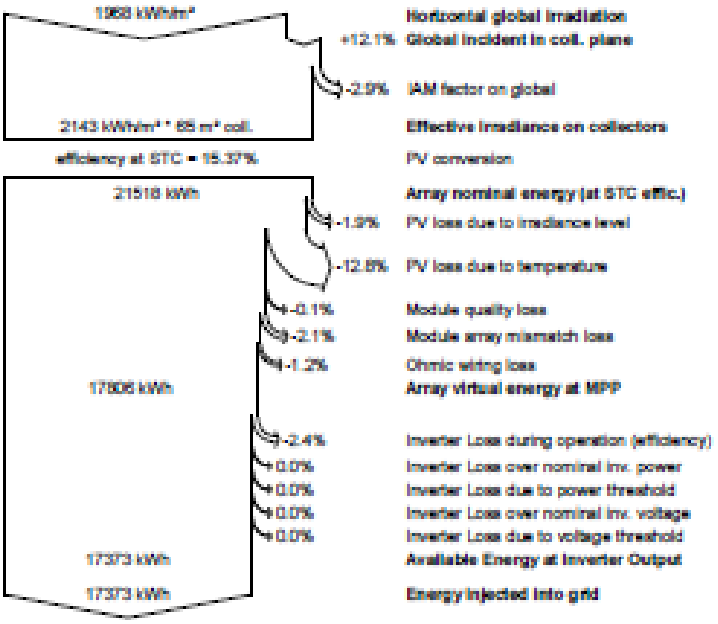
Şekil A.2 (devam): İçel ili Mut ilçesindeki yüzer FV sistem için PVsyst simülasyon yazılımında gerçekleştirilen sistem tasarımı.

Grid-Connected System: Loss diagram

Project :	**Hydrosolar_Azmak**
Simulation variant :	**New simulation variant**

Main system parameters	System type	**Grid-Connected**		
PV Field Orientation	tilt	30°	azimuth	10°
PV modules	Model	YL250P-29b	Pnom	250 Wp
PV Array	Nb. of modules	40	Pnom total	10.00 kWp
Inverter	Model	TRIO-20_0-TL-OUTD-S2X-400	Pnom	20.00 kW ac
User's needs	Unlimited load (grid)			

Loss diagram over the whole year



Şekil A.2 (devam): İçel ili Mut ilçesindeki yüzer FV sistem için PVsyst simülasyon yazılımında gerçekleştirilen sistem tasarımı.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad **:** Hakan Şençiçek

Doğum Tarihi ve Yeri **:** Yalova, 06.08.1989

E-posta **:** hakan.sencicek@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2012, Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2014 – Devam, Schneider Electric, OEM Çözüm Satış Mühendisi
- 2012 – 2014, Compro Bilişim Teknolojileri, Bulut Çözümleri Satış Mühendisi
- 2010 – 2011, Robotmer Robotlu Otomasyon Teknolojileri, Proje Mühendisi