



**T.C.
AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AMASYA İLİ KOŞULLARINDA 1 MWP KURULU GÜCÜNDE
YÜZER TİP VE ARAZİ TİPİ ENERJİ SANTRALLERİNİN
KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ABDULLAH TOKUL

AĞUSTOS 2021

ABDULLAH TOKUL	YENİLENEBİLİR ENERJİ VE UYGULAMALARI	AĞUSTOS 2021
-----------------------	---	---------------------

**AMASYA İLİ KOŞULLARINDA 1 MWP KURULU GÜCÜNDE YÜZER TİP
VE ARAZİ TİPİ ENERJİ SANTRALLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI
ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU**

Abdullah TOKUL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
YENİLENEBİLİR ENERJİ VE UYGULAMALARI ANABİLİM DALI**

Danışman

Doç. Dr. Meryem EVECEN

**AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2021

Abdullah TOKUL tarafından hazırlanan “Amasya İli Koşullarında 1 MWp Kurulu Gücünde Yüzer Tip ve Arazi Tipi Enerji Santrallerinin Karşılaştırmalı Analizi Ve Optimizasyonu” adlı bitirme projesi aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / ~~OY ÇOKLUĞU~~ ile Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yenilenebilir Enerji ve Uygulamaları Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Meryem EVECEN

Fizik Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Proje olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum~~.

Başkan: Doç. Dr. Ünal KURT

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Proje olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum~~.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Nazile YILANKIRKAN

Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Proje olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum~~.

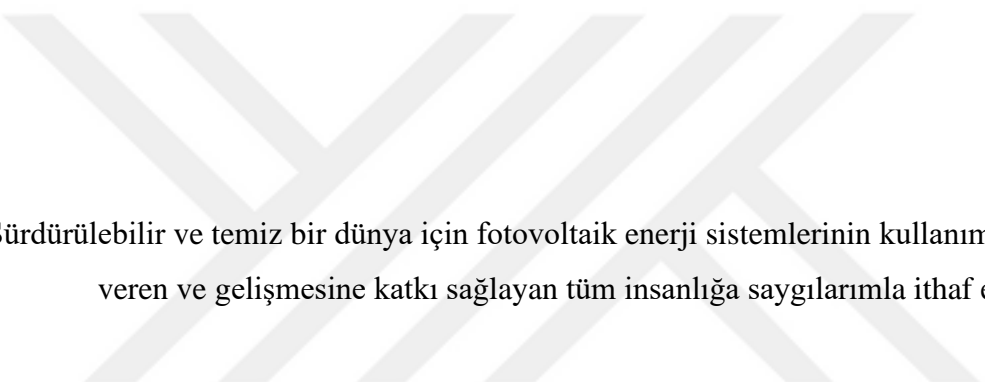
Tez Savunma Tarihi: 05/08/2021

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ümit YILDIRIM

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



Sürdürülebilir ve temiz bir dünya için fotovoltaik enerji sistemlerinin kullanımına önem veren ve gelişmesine katkı sağlayan tüm insanlığa saygılarımla ithaf ediyorum.

ETİK BEYANI

Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Abdullah TOKUL

..../..../2021

AMASYA İLİ KOŞULLARINDA 1 MWP KURULU GÜCÜNDE YÜZER TİP VE
ARAZİ TİPİ ENERJİ SANTRALLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ VE
OPTİMİZASYONU
(Yüksek Lisans Tezi)

Abdullah TOKUL

AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2021

ÖZET

İnsanlığın en temel ihtiyaçlarından biri olan enerji, 21. Yüzyıl dünyasında konfor amaçlı kullanımın da artmasıyla daha fazla ihtiyaç haline gelmiştir. Fosil yakıt rezervlerinin azalması ve fosil yakıt kullanımının doğaya vermiş olduğu zararlar, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmenin önemini artırmıştır. Bu amaçla, yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisi hem ülkemizde hem dünyada enerji üretmek için kullanılan önemli bir kaynak haline gelmiştir.

Bu çalışmada öncelikle güneş enerjisinin oluşum ve dünyamıza ulaşım sürecine teorik olarak değinilmiş, enerji üretimindeki önemine vurgu yapılmıştır. Ülkemizin güneş radyasyonu potansiyeli değerlendirilerek fotovoltaik tesis kurulum modellerinden hangilerinin ülkemizde nasıl bir fayda sağlayacağı ele alınmıştır. Fotovoltaik tesisi oluşturan teknolojiler incelenerek bu teknolojilerin, güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesi esnasındaki fonksiyonları hakkında bilgi verilmiştir.

Fotovoltaik tesislerin kurulum tiplerine göre sınıflandırmaları yapılarak arazi tipi ve yüzer tip fotovoltaik tesislerin avantaj ve dezavantajları üzerinde durulmuştur. Yüzer tip fotovoltaik enerji üretim tesisi örneği olarak 1 MWp kurulu güce ve sabit montaj yapısına sahip solar tesis tasarlanmış ve kurulum lokasyonu olarak Amasya ili Suluova ilçesi Tersakan çayı üzerinde bulunan ve 63 000 000 m³ su hacmine ve 5,93 km² yüzey alanına sahip Yedikır Barajı belirlenmiştir. Fotovoltaik tesis fizibilitesi için oldukça ideal bir simülasyon yazılımı olan PV*SOL yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen teknik tasarım ve analizler ile, tesisin verimine direkt etki eden solar panel tilt açısı, azimut açısı, yatay-dikey konumlandırma şekli, kristal yapısı ve evirici yapısı mukayeseli olarak incelenmiş ve lokasyon koşullarına göre optimum verim elde edilecek şekilde yüzer tip fotovoltaik tesis tasarımı yapılmıştır. Fotovoltaik tesisi oluşturan donanımlar yerli üretim ürünlerden oluşturularak maliyet analizi gerçekleştirilmiş, böylece Türkiye ekonomisine de katkı sağlayacak bir enerji üretim tesisi planlanmıştır.

Sayfa Adedi : 150
Anahtar Kelimeler : Fotovoltaik Enerji Tesisi, Yüzer Tip Fotovoltaik Enerji Tesisi
Danışman : Doç. Dr. Meryem EVECEN

COMPARATIVE ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF FLOATING AND LAND
TYPE POWER PLANTS WITH 1 MWP INSTALLED CAPACITY IN AMASYA
CONDITIONS

(M. Sc. Thesis)

Abdullah TOKUL

AMASYA UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2021

ABSTRACT

Energy, which is one of the most basic needs of humanity, is becoming more and more needed with the use of comfort for the 21st century world. The decrease in fossil fuel reserves and the harm caused by fossil fuel use have increased the importance of turning to renewable energy sources. For this purpose, solar energy which one of the renewable energy sources, has become an important resource used to produce energy both in our country and in the world.

In this study, firstly, the formation of solar energy and the transportation process to our world are mentioned theoretically and the importance of energy production is emphasized. By evaluating the solar radiation potential of our country, which of the photovoltaic plant installation models will be benefited in our country. The technologies that make up the photovoltaic plant are examined and information is given about the functions of these technologies while obtaining electrical energy from solar energy.

The advantages and disadvantages of land type and floating type photovoltaic plants are emphasized by classifying photovoltaic plants according to their installation types. As an example of floating photovoltaic power generation facility, a solar plant with an installed power of 1 MWp and a fixed mounting structure was designed and the Yedikır Dam has been determined as installation location, which located on the Tersakan stream in the Suluova district of Amasya, with a water volume of 63 000 000 m³ and a surface area of 5,93 km². With the technical design and analysis performed using PV * SOL software, which is an ideal simulation software for photovoltaic plant feasibility, the solar panel tilt angle, azimuth angle, horizontal-vertical positioning shape, crystal structure and inverter structure, which directly affect the efficiency of the plant, have been comparatively examined and Floating type photovoltaic plant was designed to obtain optimum efficiency according to location conditions. Photovoltaic plant constituting the hardware cost analysis was performed by creating products from domestic production, so there is a planned power plant will contribute to Turkey's economy.

PageNumber : 150
KeyWords : Photovoltaic Energy Plant, Floating Type Photovoltaic Energy Plant
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Meryem EVECEN

ÖN SÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu tez konusunu bana veren, çalışmalarım boyunca destekleyen, yönlendiren ve yazımı sırasında bana zaman ayırarak yardımını esirgemeyen tez danışmanım sayın Doç. Dr. Meryem EVECEN hocama teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca tez dönemi boyunca benden desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Fatma Begüm TOKUL'a ve çok sevdiğim oğlum Kerem Taha TOKUL'a teşekkür ederim.

Abdullah TOKUL

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ ve TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
RESİMLER DİZİNİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. ENERJİ KAYNAKLARI VE ENERJİ ÇEŞİTLERİ.....	4
2.1. Yenilenemeyen Enerji Kaynakları	4
2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları	5
2.2.1. Hidrolik enerji.....	5
2.2.2. Jeotermal enerji.....	5
2.2.3. Rüzgâr enerjisi	6
2.2.4. Biokütle enerjisi	6
2.2.5. Dalga enerjisi	6
2.2.6. Hidrojen enerjisi.....	7
2.2.7. Güneş enerjisi.....	7
3. GÜNEŞ ENERJİSİ.....	9
3.1. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli.....	10
4. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER.....	13
4.1. Fotovoltaik Hücre Teknolojisi Tarihçesi.....	13

	Sayfa
4.2. Fotovoltaik Hücrenin Çalışma Prensibi	14
4.3. Fotovoltaik Hücre Teknolojisi	15
4.3.1. Monokristal yapıli hücreler.....	16
4.3.2. Polikristal yapıli hücreler.....	17
4.3.3. Amorf silisyum ince film hücreleri.....	17
4.3.4. Bakır indiyum diselenid ince film hücreleri	18
4.3.5. Kadmiyum tellür ince film hücreleri.....	18
4.3.6. Nano dokulu fotovoltaik hücreler	19
4.4. Fotovoltaik Sistem Bileşenleri	20
4.4.1. Fotovoltaik panel	20
4.4.2. Solar evirici (inverter).....	24
4.4.3. Batarya (akü).....	28
4.4.4. Şarj kontrol cihazı (regülatör).....	31
4.4.5. Elektriksel bağlantı elemanları	33
4.5. Kullanım Amacına Göre Fotovoltaik Tesis Türleri	36
4.5.1. Şebeke bağlantılı (on-grid) FV tesisler	37
4.5.2. Ada tipi (off-grid) FV tesisler	38
4.5.3. Hibrit fotovoltaik tesisler	40
4.6. Kurulum Şekillerine Göre Fotovoltaik Tesis Türleri	41
4.6.1. Konut tipi fotovoltaik tesis.....	41
4.6.2. Arazi tipi fotovoltaik tesis.....	43
4.6.3. Kanal üstü tip fotovoltaik tesis	46
4.6.4. Yüzer tip fotovoltaik tesis.....	48
4.7. Yüzer Tip ve Arazi Tipi Fotovoltaik Tesislerin Karşılaştırılması.....	56

	Sayfa
5. YÜZER TİP FOTOVOLTAİK ENERJİ ÜRETİM TESİSİ TASARIMI	58
5.1. Yedikır Barajı İklimsel Koşulları ve Güneş Enerjisi Potansiyeli.....	59
5.2. Yüzer Tip Fotovoltaik Tesis Örneği Teknik Analiz Altyapısı.....	62
5.2.1. Yüzer tip FV tesis örneğinde kullanılan solar panellerin yapısı	63
5.2.2. Yüzer tip FV tesis örneğinde kullanılan solar eviricilerin yapısı	71
5.2.3. Yüzer tip FV tesis örneğinin kablaj ve şalt malzeme yapısı.....	74
5.2.4. Yüzer tip FV tesis örneğinde kullanılan yüzdürücü sistem yapısı.....	78
5.2.5. Tesisin teknik ve finansal analizinde kullanılan simülasyon yazılımları.	84
6. YÜZER TİP FV ENERJİ ÜRETİM TESİSİ ÖRNEĞİ TEKNİK ANALİZİ	95
6.1. Yüzer Tip FV Tesisin İdeal Tilt Açısı Teknik Analizi.....	96
6.2. Yüzer Tip FV Tesisin İdeal Azimut Açısı Teknik Analizi	99
6.3. Yüzer Tip FV Tesisde Solar Panel Konumlandırma Şekli Teknik Analizi	102
6.4. Yüzer Tip FV Tesisde Solar Panel Kristal Yapısı Bakımında Teknik Analizi	105
6.5. Yüzer Tip FV Tesisin Evirici Yapısı Bakımından Teknik Analizi.....	110
6.6. Yüzer Tip FV Tesisin Otomasyon ve Scada Yapısı Bakımından Analizi	113
7. YÜZER TİP FV ENERJİ ÜRETİM TESİSİ ÖRNEĞİ MALİYET ANALİZİ	119
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	124
KAYNAKLAR	127
ÖZGEÇMİŞ	130

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Kullanım amacına göre fotovoltaik tesis türleri şeması	36
Çizelge 5.1. Tesiste kullanılan fotovoltaik panellerin mekanik özellikleri.	66
Çizelge 5.2. Tesiste kullanılan fotovoltaik panellerin elektriksel özellikleri.....	67
Çizelge 5.3. Fotovoltaik tesiste kullanılan solar eviricinin mekanik ve elektriksel özellikleri.	73
Çizelge 5.4. Tesiste kullanılan kabloların teknik özellikleri.....	75
Çizelge 6.1. Solar panel kristal yapısına göre enerji üretim analizi için oluşturulan tesis yapısı.....	106
Çizelge 6.2. Solar panel kristal yapısına göre enerji üretim analizlerinin sonuç verileri.	107
Çizelge 6.3. Eviriciye göre teknik analizi yapılan tesiste mukayese edilen evirici özellikleri.	110
Çizelge 6.4. Evirici seçimine göre tesisin enerji üretim performansını gösteren analiz sonuçları.....	112
Çizelge 7.1. Yüzer tip fotovoltaik tesis örneğinin yerli ve ithal maliyet bileşenleri tablosu.	120
Çizelge 7.2. Yüzer tip fotovoltaik tesis örneğinin 25 yıllık üretim ve gelir analizi tablosu.	122
Çizelge 8.1. Suluova ilçesinin sektörlere göre 2019 yılı elektrik tüketimi ve tesiste üretilen enerjinin tüketimi karşılama oranı.	125

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Güneşten gelen ışınımın dünyaya etkisi	9
Şekil 3.2. Dünya güneş radyasyonu potansiyeli atlası (Suri, 2020).....	10
Şekil 3.3. Güneş enerjisi potansiyel atlası (Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, 2020)	11
Şekil 3.4. Türkiye güneşlenme süreleri.....	11
Şekil 3.5. Türkiye global radyasyon değerleri (KWh/m ² -gün)	12
Şekil 4.1. Fotovoltaik hücre çalışma prensibi	14
Şekil 4.2. Fotovoltaik hücre türleri	15
Şekil 4.3. Hücre üretim aşamaları diyagramı.....	16
Şekil 4.4. Kristal yapıli silisyum hücrelerinin görünüşü.....	17
Şekil 4.5. Galyum katkıli bakır indiyum diselenid ince film şerit görüntüsü	18
Şekil 4.6. Organik fotovoltaik hücre yapısı ve çalışma prensibi diyagramı	20
Şekil 4.7. Fotovoltaik panel yapısı.....	21
Şekil 4.8. Kristal yapıli FV panelin sıcaklığa bağıli I-V grafiğı	22
Şekil 4.9. Kristal yapıli FV panelin ışınıma bağıli I-V grafiğı	22
Şekil 4.10. Örnek fotovoltaik panel çalışma karakteristiğı grafiğı	23
Şekil 4.11. Fotovoltaik panel eşdeğer devresi	24
Şekil 4.12. Monofaze ve trifaze eviriciler ile FV tesis şebeke bağlantı şeması.....	25
Şekil 4.13. Mikro evirici bağlantı şeması	26
Şekil 4.14. Dizi evirici bağlantı şeması	27
Şekil 4.15. Merkezi evirici bağlantı şeması	27
Şekil 4.16. OpzS akü iç yapısı	29
Şekil 4.17. Kurşun-asit akü çalışma prensibi şeması.....	30

Şekil	Sayfa
Şekil 4.18. Lityum iyon akü çalışma prensibi şeması.....	31
Şekil 4.19. On-Off solar şarj regülatörü devre yapısı diyagramı.....	32
Şekil 4.20. Solar şarj regülatörü bağlantı şeması.....	33
Şekil 4.21. Şebeke bağlantılı örnek tesis şeması.....	37
Şekil 4.22. Şebekeden ayrık (ada tipi) örnek tesis şeması	38
Şekil 4.23. Hibrit fotovoltaik tesis örnek şeması	40
Şekil 4.24. Konut tipi fotovoltaik tesislerde panel montaj çeşitleri.....	42
Şekil 4.25. Yüzer FV tesisin bileşenlerini gösteren şema.....	50
Şekil 4.26. FV tesis için HDPE yüzdürücü duba ve aksamı	51
Şekil 4.27. Yüzer FV tesisin demirleme sistemi.....	52
Şekil 5.1. Yedikır Barajı ve yüzer tip fotovoltaik tesis uygulamasının planlanan konumunu gösteren uydu görüntüsü.....	58
Şekil 5.2. Yedikır Barajı aylık bazda ortalama günlük güneşlenme süresi ve güneş radyasyonu miktarı.....	59
Şekil 5.3. Yedikır Barajı günlük ortalama güneş radyasyonu miktarı. (M.G.M. Atmosfer Modelleri Şube Müdürlüğü, 2021)	60
Şekil 5.4. Yedikır Barajı aylık bazda ortalama sıcaklık ve rüzgâr hızı miktarları.....	61
Şekil 5.5. Yedikır Barajı aylık bazda en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri.	61
Şekil 5.6. 1 MWp kurulu güce sahip yüzer tip fotovoltaik tesisin kuşbakışı simülasyon görüntüsü.	63
Şekil 5.7. Fotovoltaik panellerin taşıyıcı duba sistemi üzerindeki montaj görüntüsü. ..	64
Şekil 5.8. Yüzer tip FV tesisi oluşturan solar panel dizilerinin gölge oluşumuna göre konumlandırma ölçüleri.....	65
Şekil 5.9. Tesiste kullanılan fotovoltaik modüllerin I_{sc} , V_{oc} ve P_{max} değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi.....	67
Şekil 5.10. Tesiste kullanılan fotovoltaik panellerin 25 ⁰ C sabit sıcaklıkta farklı ışınım değerlerine göre karakteristik akım-gerilim eğrisi.....	68

Şekil	Sayfa
Şekil 5.11. Tesiste kullanılan fotovoltaik panellerin 25 °C sabit sıcaklıkta farklı ışınım değerlerine göre karakteristik güç-gerilim eğrisi.....	69
Şekil 5.12. Tesiste kullanılan fotovoltaik panellerin 1000 W/m ² sabit ışınımında farklı sıcaklık değerlerine göre karakteristik akım-gerilim eğrisi	69
Şekil 5.13. Tesiste kullanılan fotovoltaik panellerin 1000 W/m ² sabit ışınımında farklı sıcaklık değerlerine göre karakteristik güç-gerilim eğrisi	70
Şekil 5.14. Tesiste kullanılan solar eviricinin kapasite kullanım oranına göre verim oranı karakteristik eğrisi.	72
Şekil 5.15. Fotovoltaik tesisi oluşturan donanımların tek hat bağlantı şeması.....	74
Şekil 5.16. Tesiste kullanılan trafo köşkü iç tasarımı.	76
Şekil 5.17. Tesiste kullanılan trafo köşkü dış görünüş kesitleri.	77
Şekil 5.18. Tesiste kullanılan yüzdürücü sistem dubası ve bileşenleri.	78
Şekil 5.19. LLDPE dubalar ile Autocad uygulamasında oluşturulan yüzer fotovoltaik tesisin plan kesit görünüşü.	79
Şekil 5.20. Taşıyıcı duba sistemine irtibatlanan metal profillerle oluşturulmuş iskelet yapısından örnek görüntü.....	80
Şekil 5.21. Solar First Energy firmasına ait sf-tgw01 model yüzdürücü sistem bileşenleri ve bağlantı şekli.....	80
Şekil 5.22. SF-TGW01 model yüzdürücü sistemin montaj aparatları görüntüsü.	81
Şekil 5.23. SF-TGW01 model yüzdürücü sistem bağlantı kutusu, kablo kanal ve sabitleme sistemi örnek görüntüsü.....	82
Şekil 5.24. HDPE dubalar ile Autocad uygulamasında oluşturulan yüzer fotovoltaik tesisin plan kesit görünüşü.	83
Şekil 5.25. Yüzer tip fotovoltaik tesisin demirleme montaj sistemi detayı.	84
Şekil 5.26. PV*SOL yazılımının tesis tasarım başlangıç arayüzü görüntüsü.....	85
Şekil 5.27. Analizi gerçekleştirilen yüzer tip fotovoltaik tesisin modül montaj planı arayüz görüntüsü.	86
Şekil 5.28. PV*SOL yazılımında eviriciye solar dizilerin dağılımı ve gölge analizi arayüzünden bir kesit.	87

Şekil	Sayfa
Şekil 5.29. PV*SOL yazılımının kablo planı arayüzünde oluşturduğu tek hat şeması örnek görüntüsü.	88
Şekil 5.30. PVsyst yazılımının tesis tasarım başlangıç arayüzü görüntüsü.	90
Şekil 5.31. PVsyst yazılımının simülasyon detay paneli arayüz görüntüsü.	91
Şekil 5.32. Fotovoltaik tesise ait tek hat şeması ve yüzdürücü sistemin tasarlandığı AutoCAD 2017 sürümü arayüz görüntüsü.	93
Şekil 6.1. PV*SOL yazılımında mukayeseli analizler için sabit olarak oluşturulan dizi bağlantı şeması.	96
Şekil 6.2. Eğim açısına göre solar paneller üzerine düşen toplam ışınlam miktarları simülasyon sonuç grafiği.	97
Şekil 6.3. Solar panellerde eğim açısına göre oluşan kısmi gölge ve düşük ışık tabanlı enerji kayıpları simülasyon sonuç grafiği.	98
Şekil 6.4. Solar panellerde eğim açısına göre yıllık net elektrik enerjisi üretim miktarı simülasyon sonuç grafiği.	99
Şekil 6.5. Tesisin azimut açısına göre solar panellerden elde edilen anma enerjisi simülasyon sonuç grafiği.	100
Şekil 6.6. Solar panellerde azimut açısına göre oluşan kısmi gölge tabanlı enerji kaybı simülasyon sonuç grafiği.	101
Şekil 6.7. Solar panellerde azimut açısına göre oluşan ve kısmi gölge haricindeki toplam enerji kaybı simülasyon sonuç grafiği.	101
Şekil 6.8. Fotovoltaik tesisin azimut açısına göre yıllık net elektrik enerjisi üretim miktarı simülasyon sonuç grafiği.	102
Şekil 6.9. Solar panel konumlandırma şekline göre simule edilen tesisin panel dizilim kesit görünüşleri.	103
Şekil 6.10. Solar panellerin yatay ve dikey konumlandırılmasından kaynaklanan yıllık kısmi gölge kaybı analiz sonuçları grafiği.	104
Şekil 6.11. Solar panellerin yatay ve dikey konumlandırılmasının yıllık üretilen net enerji miktarı üzerindeki etkisini gösteren analiz sonuçları grafiği.	105
Şekil 6.12. Evirici seçimine göre tesisin enerji üretim performansı üzerindeki etkisini gösteren analiz sonuçları grafiği.	113
Şekil 6.13. RTU panosu bileşenleri ve pano iç tasarımı örneği.	114

Şekil	Sayfa
Şekil 6.14. Elektrik dağıtım şirketi scada sistemi için tesiste kurulması gereken RTU altyapısının bağlantı şeması.	115
Şekil 6.15. Fotovoltaik tesis merkezi otomasyon altyapısı ana şeması.	116
Şekil 6.16. Scada yazılımı enerji üretim verilerine ait örnek ekran görüntüsü.....	117
Şekil 7.1. Yüzer tip fotovoltaik tesis örneğinin RETScreen yazılımı ile gerçekleştirilen maliyet analizi arayüz görüntüsü.....	119
Şekil 7.2. RetScreen uygulaması sera gazı emisyonu analizi	123



RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. MC4 konnektör görüntüleri	34
Resim 4.2. DC sigorta ve parafudr örnek görüntüleri.....	35
Resim 4.3. Fotovoltaik tesis verilerini uzaktan izleme sistemi ekran görüntüsü.....	35
Resim 4.4. 650 adet fotovoltaik panel ile kaplanmış Los Angeles Lisesi	43
Resim 4.5. Sabit tip FV panel konstrüksiyonu	44
Resim 4.6. Tek eksen kontrollü FV panel konstrüksiyonu.....	45
Resim 4.7. Çift eksen kontrollü FV panel konstrüksiyonu.....	45
Resim 4.8. Hindistan'daki 10 MW kurulu gücünde kanal üstü FV tesis görüntüsü.....	47
Resim 4.9. Şanlıurfa'da kurulan 160 kWp kurulu gücünde kanal üstü FV tesis görüntüsü.....	48
Resim 4.10. Yüzer FV panellerden merkezi evirici köşküne giden DC kablo tesisatı örneği	53
Resim 4.11. HDPE duba üzerine monte edilen panel sistemi örnek görüntüsü	54
Resim 4.12. Yüzer FV tesisinde kullanılan merkezi evirici görüntüsü	55
Resim 4.13. Yüzer FV tesisinde kullanılan dizi evirici görüntüsü	55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklama
GES	Güneş enerji santrali
FV	Fotovoltaik
TEP	Ton eşdeğer petrol
EMO	Elektrik Mühendisleri Odası
TWh	Terawat saat
GW	Gigawat
GWh	Gigawat saat
kWh	Kilowat saat
MW	Megawat
MWh	Megawat saat
m²	Metre kare
MPPT	Maksimum güç noktası izleyicisi
CO₂	Karbondioksit.
W/m²	Metrekareye düşen güç.
Max	Maksimum
YEKDEM	Yenilenebilir Enerji Destekleme Mekanizması
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi.
RTU	Remote Terminal Unit (Uzak Terminal Birimi)
IED	Intelligent Electronic Device (Akıllı Elektronik Cihaz)

1. GİRİŞ

Dünyada ve ülkemizde artan nüfus, teknoloji ve sanayide yaşanan gelişmeler nedeniyle enerjiye duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bir ülkenin enerji tüketimi o ülkenin kalkınma seviyesini gösterir. Artan ihtiyaç karşısında kendi enerjisini kendi kaynaklarından temin edemeyen ülkeler bu enerjileri satın alma yöntemine gitmektedir. Bu noktada enerjide dışa bağımlılık söz konusu olmaktadır. Hızlı kalkınma ve refah düzeyinin artması için ülkeler enerjiye daha kolay ve daha ucuz yollardan ulaşmak istemektedir. Dünyada yaşanan savaşların ana nedeni enerjiyi elde etme çabasıdır.

Ülkelerin sanayileşme ve kalkınma yatırımları sonucunda dünya enerji üretim ve tüketim seviyesi, bununla birlikte elektrik üretim ve tüketim oranları her geçen yıl artış göstermektedir. Özellikle gelişmekte olan ve gelişmemiş ülkelerin hayata geçirdikleri kalkınma hamlelerinin bir sonucu olarak elektrik üretim ve tüketim oranlarının artışı sürdürmesi beklenmektedir. Enerji tüketiminde ilk sırada yer alan Çin'i bu alanda ABD, Rusya, Hindistan ve Japonya takip etmektedir. 2018 yıl sonu verilerine göre dünya genelinde üretilen elektriğin, yaklaşık %27'si Çin, %25'i ise ABD tarafından tüketilmektedir. Elektrik enerjisi üretimi açısından bakıldığında ise dünyada üretilen toplam elektrik enerjisinin %26,6'sı Çin'de, %25,2'si ise Amerika'da üretildiği gözlemlenmektedir.

Ülkelerin elektrik enerjisi üretirken yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak üretmiş oldukları enerji yüzde olarak değerlendirildiğinde, 2018 yılı sonu itibari ile dünyanın tamamında üretilen elektrik enerjisinin %25'inin yenilenebilir enerji kaynaklarında elde edildiği tespit edilmektedir. Bu oranın içerisinde bazı ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanım açısından diğer ülkelere örnek teşkil etmektedirler. Norveç ürettiği elektrik enerjisinin %97,8'ini, Yeni Zelanda %83,1'ini, Brezilya %82,5'ini yenilenebilir enerji kaynaklarından elde etmektedir.

Türkiye açısından enerji üretim ve tüketim verileri ele alınacak olursa, 148 MTEP toplam enerji tüketimi ve bunun içerisinde 252 TWh elektrik enerjisi tüketimi ile dünya enerji tüketiminin binde 10'una sahiptir. Aynı zamanda 303 TWh elektrik enerjisi üretimi ile dünya enerji üretiminin yaklaşık binde 11'ine sahiptir. Üretilen bu elektrik enerjisinin

yaklaşık %32,4'ü ise yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edildiği görülmektedir (Electricity Domestic Consumption, 2020).

Türkiye orta kuşak ülkeleri arasında yer alması münasebetiyle, yenilenebilir enerji kaynakları açısından oldukça avantajlı bir ülkedir. Özellikle güneşten gelen radyasyon ışınım değerlerinin, Türkiye'de diğer birçok ülkeye kıyasla ortalamanın üzerinde olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte güneşlenme süreleri de oldukça yüksektir. Güneş enerji santralleri için önemli olan bu iki özellik, Türkiye'de güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretmek üzere yatırım yapılmasını elverişli hale getirmektedir.

Fotovoltaik güneş enerjisi, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, biyokütle, jeotermal, hidroelektrik gibi alt kategorilere ayrılan yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji üretimi yapan tesis bakımından liderlik yapan ülke, ABD Enerji Bakanlığı tarafından hazırlanan 2018 raporuna göre yaklaşık 700 GW ile en fazla kurulu güce sahip olan Çin'dir. Onu takip ülkeler ise yaklaşık 250 GW kurulu güç ile ikinci sırada ABD, 135 GW kurulu güç ile üçüncü sırada Brezilya, yaklaşık 120 GW kurulu güç ile dördüncü sırada Almanya ve 117 GW kurulu güç ile beşinci sırada Hindistan'dır.

Her ülke kendi altyapısına ve gelişim potansiyeline göre enerji politikalarını geliştirdiği için sadece fotovoltaik enerji üretim tesisleri açısından sıralamayı ele alacak olursak, yine Çin ilk sırada yer almakta ve onu sırasıyla Japonya, ABD, Almanya ve Hindistan takip etmektedir (U.S. Department Of Energy, 2020).

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde elektrik enerjisi üretiminde kullanılan fotovoltaik enerji tesislerinin Türkiye'de ki toplam kurulu gücü 2020 yıl sonu itibariyle 7 GW'a ulaşarak 11 TWh elektrik üretimi ile toplam 45,3 TWh'lik elektrik üretiminin %24'ü solar enerji ile gerçekleştirilmektedir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2020).

Türkiye, coğrafi konumu sebebiyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre daha avantajlı konumdadır. Ülkemizde ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi metrekarede 2630 saat (günlük ortalama 7,2 saat), ortalama toplam ışınım şiddeti metrekarede yılda 1642 kWh (günlük ortalama 4,5 kWh) olarak tespit edilmiştir.

Standart güneş enerji santrallerine göre yüzer tip fotovoltaik enerji santralleri daha verimli ve avantajlıdır. Özellikle tarımsal ve yapısal kullanım için yetersiz alana sahip Asya ülkelerinde 2006'dan sonra ilk denemelerine başlanan yüzer tip fotovoltaik (FV) tesisler daha sonra Avrupa ülkelerinde ve Amerika'da da ilgi görmüştür.

Dünya'da 2019 yılı sonu verilerine göre kurulan toplam 250 MW'lık yüzer güneş enerji santrallerinin 120 MW'ına sahip olan Çin yüzer GES konusunda en büyük paya sahiptir. Türkiye ise toplam 250 kWp kurulu güçle henüz yüzer GES konusunda başlangıç aşamasında olmasına rağmen bu konuda birçok akademik çalışma mevcuttur (Ateş, Yılmaz, & Gülgen, 2020) (Özaltın & Binark, 2021) (Dai, ve diğerleri, 2020) (Sahu, Yadav, & Sudhakar, 2016) (Keskin, Martin, & Boran, 2019) (Kim, Yoon, Choi, & Choi, 2016) (Hasar, 2016) (Şençiçek, 2017) (Temiz & Javani, 2020). Türkiye'nin sahip olduğu göl-baraj yüzeyinin fazla oluşu su yüzeyinin fotovoltaik tesis olarak değerlendirilmesinde son derece önemlidir. Bu çalışma ile yüzer FV sistem tasarımı gerçekleştirilmiş ve verimliliği incelenmiştir.

2. ENERJİ KAYNAKLARI VE ENERJİ ÇEŞİTLERİ

Enerji kaynakları kullanım şekillerine göre Yenilenemeyen Enerji Kaynakları ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları olmak üzere ikiye ayrılır.

2.1. Yenilenemeyen Enerji Kaynakları

Konvansiyonel enerji ya da fosil yakıtlar olarak da isimlendirilen yenilenemeyen enerji kaynakları bir kez kullanıldıktan sonra tükenen enerjidir. Günümüzde enerji ihtiyacının %75'i fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Ölen canlı organizmaların milyonlarca yıl kaya ve toprak altında oksijensiz kalması ile oluşan fosil yakıtlar; kömür, doğalgaz, petrol gibi yakıtlardan oluşmaktadır. Fosil yakıtların yakın gelecekte tükenecek olması, çevreye verdikleri zararları nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi ve ihtiyacı arttırmıştır.

1900'lü yılların sonlarından itibaren etkisi gitgide artan küresel ısınma ve iklim değişikliği, başta gelişmiş ülkeler olmak üzere tüm dünyanın ilgisini çevre kirliliği ve fosil yakıtlardan elde edilen enerji konularına yöneltti. Bu duruma paralel olarak 1997'de Kyoto Protokolüyle, çevre temizliği ve sürdürülebilirliğinin önemi hem gelişmekte olan ülkeler hem de gelişmiş ülkeler tarafından kabul edildi. Bu protokole göre, sera gazı emisyonu 2008-2012 yılları arasında 1990 yılı seviyesine göre %5,2 azaltılması hedeflendi. Ayrıca, protokol sera gazlarını, özellikle de karbondioksit emisyonlarını küresel ısınmanın başlıca nedenleri olarak görmüş, karbondioksit emisyonlarının bilinen en kirlenici gaz olduğunu ve dünya genelindeki sera gazlarının %58,8'inden sorumlu olduğunu belirtmiştir. Bununla birlikte protokol, iklim değişikliğine ve artmakta olan enerji talebine en önemli çözümlerden biri olarak yenilenebilir enerji kaynaklarına işaret etmiştir (IEA, 2011) (Çetin & Sezen, 2018). Ancak 2018 enerji tüketim verileri ile karbon salınımı verileri mukayese edildiğinde 1990 yılına göre karbon salınımında henüz %2'lik bir düşüş yaşandığı tespit edilmektedir.

Yenilenemeyen Enerji Kaynakları, fosil kaynaklı ve çekirdek kaynaklı olmak üzere iki ana başlık halinde ele alınır. Kömür, doğalgaz ve petrol fosil kaynaklı yenilenemeyen enerji

kaynaklarıdır. Uranyum ve Toryum ise nükleer enerji diye tabir edilen çekirdek kaynaklı yenilenemeyen enerji kaynaklarıdır.

2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji doğada sürekli olarak var olan tükenmeyen enerji kaynaklarıdır. Dünyada yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları; hidrolik enerji, jeotermal enerji, rüzgâr enerjisi, biyokütle enerjisi, dalga enerjisi, hidrojen enerjisi ve güneş enerjisidir.

2.2.1. Hidrolik enerji

Suyun belli bir hıza kavuşturularak santral türbinlerine çarptırılması sonucu suyun potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye çevrilmesi sağlanarak elektrik enerjisi üretimine hidrolik enerji denir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan hidrolik enerjinin en yaygın kullanım şekli nehirler üzerinde barajlar inşa ederek suyu büyük rezervuarlarda biriktirmek ve suyun potansiyel enerjisinden yararlanarak elektrik enerjisi üretmektir. Bunun için hidroelektrik santrallerden faydalanılır.

2019 yılı itibarıyla dünyanın toplam hidrolik kurulu gücü 1150 GW olup kurulu gücü en yüksek olan ülkeler sırasıyla; Çin, Brezilya, Kanada ve ABD'dir. Hidroelektrik enerji üretim kapasitesi olarak Çin dünyanın %28'ine, Brezilya %9'una, Kanada ve ABD %7'sine ve Türkiye %3'üne sahiptir. Dünya toplam enerji üretiminin yaklaşık %20'si hidroelektrik enerji tesisleri aracılığı ile üretilmektedir.

2.2.2. Jeotermal enerji

Yer altı sularındaki mevcut sıcak su ve buhardan elde edilen enerjidir. Jeotermal enerji, yerkürenin iç ısısıdır. Bu ısı, merkezdeki sıcak bölgeden yeryüzüne doğru yayılarak elektrik enerjisi üretimi, evlerin ısıtılması, kışın kaldırımlarda biriken karların eritilmesi, gibi birçok amaç için kullanılabilir.

2019 yılı itibarıyla dünyanın toplam jeotermal enerji kurulu gücü 14 GW olup kurulu gücü en yüksek olan ülkeler sırasıyla; Amerika (2,5 GW), Endonezya (2,1 GW), Filipinler (1,8

GW) ve Türkiye (1,5 GW)'dir. Jeotermal enerji kapasitesini 2019 yılında %32 artıran Türkiye jeotermal enerjiye en çok yatırım yapan ülke oldu.

2.2.3. Rüzgâr enerjisi

Rüzgârın gücünü kullanan rüzgâr türbinlerinin, rüzgardaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra elektrik enerjisine çevirmesi ile üretilen enerjidir. En önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgâr enerjisi, güneş radyasyonunun yer yüzeylerini farklı ısıtmasından kaynaklanır. Yer yüzeylerinin farklı ısınması, havanın sıcaklığının, neminin ve basıncının farklı olmasına, bu basınç farkları havanın hareketine neden olur. Yüksek basınçtan alçak basınca doğru olan hava hareketi de rüzgârı oluşturur. Rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretimi rüzgâr türbinleriyle gerçekleştirilmektedir.

2019 yılı itibarıyla dünyanın toplam rüzgâr enerjisi kurulu gücü 651 GW olup kurulu gücü en yüksek olan ülkeler sırasıyla; 236 GW ile Çin, 108 GW ile ABD, 62 GW ile Almanya, 37 GW ile Hindistan şeklindedir.

2.2.4. Biokütle enerjisi

Bitkisel ve hayvansal atıklardan üretilen enerjidir. Biokütle enerji kaynakları, içerisinde karbonhidrat bileşikleri olan bitkisel ve hayvansal kökenli tüm maddelerdir. Biokütle enerji kaynakları kullanılarak, biyoetanol, biyodizel ve biyogaz olmak üzere üç temel yakıt elde edilebilmektedir.

2019 yılı itibarıyla dünyanın toplam biokütle enerjisi kurulu gücü 139 GW olup kurulu gücü en yüksek olan ülkeler sırasıyla; Çin (22,5 GW), Brezilya (15 GW), Hindistan (10,2 GW), Almanya, İngiltere, İsveç ve Japonya'dır. Dünya genelinde yıllık olarak toplam 591 TWh biyoelektrik enerjisi üretilmektedir.

2.2.5. Dalga enerjisi

Okyanus ve denizlerde oluşan dalgaların gücünden yararlanarak elde edilen enerjidir. Dalga enerjisi, yenilenebilir enerji pazarının en küçük payını temsil etmektedir. Dalga enerjisinin

kaynak potansiyeli çok büyük olmasına rağmen, teknolojiler hala gelişimin ilk aşamalarındadır.

2019 yılı itibarıyla dünyanın toplam dalga enerjisi kurulu gücü henüz 535 MW'a ulaşmıştır. Fransa'daki 240 MW La Rance istasyonu (1966'da kurulu) ve Kore Cumhuriyeti'ndeki 254 MW Sihwa tesisi (2011) toplam kurulu kapasitenin %90'ından fazlasını temsil etmektedirler.

2.2.6. Hidrojen enerjisi

Güneş'te oluşan termonükleer tepkimelerin yakıtı hidrojen olup, evrenin temel enerji kaynağıdır. Hidrojen en küçük atomdur ve periyodik tablodaki ilk elementtir. Yeryüzündeki hidrojen su molekülünde, canlılarda ve fosil maddelerde bulunur. Hidrojen bilinen tüm yakıtlar içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahiptir. 1 kg hidrojen 2,1 kg doğal gaz veya 2,8 kg petrolün sahip olduğu enerjiye sahiptir. Ancak birim enerji başına hacmi yüksektir. Hidrojenden enerji elde edilmesi esnasında su buharı dışında çevreyi kirletici ve sera etkisini artırıcı hiçbir gaz ve zararlı kimyasal madde üretimi söz konusu değildir. Günümüzde hidrojenden yakma ve yakıt pili olmak üzere iki yöntemle enerji elde edilebilmektedir. 2018 yılı küresel yakıt pili kapasitesi 803,1 MW'a ulaşmış olup bunun büyük bir kısmı taşıtlarda ulaşım amaçlı kullanılmaktadır. Ancak mevcut koşullarda hidrojenin diğer yakıtlardan yaklaşık üç kat pahalı olduğu bilinmekte ve yaygın bir enerji kaynağı olarak kullanımının hidrojen üretiminde maliyeti düşüren teknolojik gelişmelere bağlı olacağı öngörülmektedir.

2.2.7. Güneş enerjisi

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreciyle açığa çıkan ışıma enerjisidir. Güneş enerjisinden güneş kolektörleri, güneş santralleri ve güneş pilleri (fotovoltaik piller) olmak üzere üç şekilde yararlanılmaktadır. Güneş kolektörleri genelde sıcak su temininde kullanılmaktadır. 2019 yılı dünya güneş kolektörü kapasitesi 479 GWt olup 148 GWt'lık kapasiteye sahip olan Çin dünya güneş kolektörü enerjisinin yaklaşık %70'ine hakimdir (BP Statistical Review of World Energy 2020., 2020).

Ayrıca elektrik enerjisi üretiminde kullanılan dünya toplam güneş pili (fotovoltaik pil) kapasitesi 2019 yılı itibariyle 627 GW olup kapasitesi yüksek olan ülkeler; Çin (204,7 GW), ABD (76 GW), Japonya (63 GW), Almanya (49 GW) ve Hindistan (42,8 GW)'dir. Türkiye yaklaşık 6 GW fotovoltaik kurulu güç ile 15. sırada yer almaktadır (Renewables 2020 Global Status Report, 2020).

Türkiye, coğrafi konumu sebebiyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre daha avantajlı konumdadır. Türkiye 110 gün gibi yüksek bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir ve gerekli yatırımların yapılması halinde Türkiye, günde birim metrekaresinden 1100 kWh'lik güneş enerjisi üretebilir.

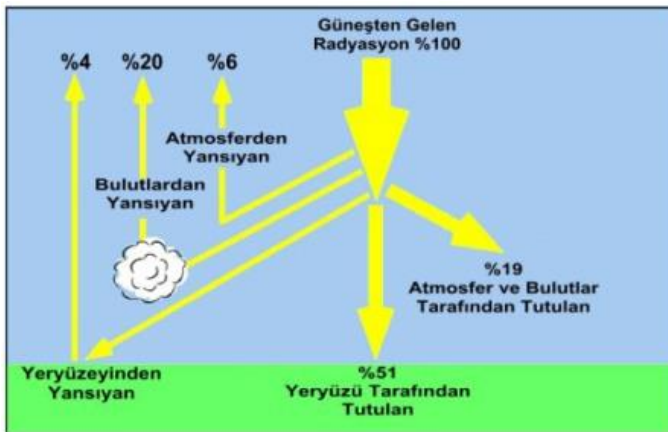


3. GÜNEŞ ENERJİSİ

Güneş sisteminin merkezinde yer alan, $6\,955 \times 10^5$ km yarıçapı ile dünyanın yaklaşık 110 katı büyüklüğünde olan ve dünyadan yaklaşık 150 000 000 km uzaklıkta bulunan güneş, dünyamızın da içinde bulunduğu tüm güneş sisteminin ısı ve ışık kaynağıdır.

Güneşin sahip olduğu enerji, bünyesinde gerçekleşen füzyon reaksiyonları neticesinde oluşmaktadır. İki atom çekirdeğinin birleşerek başka bir atom çekirdeği oluşturmasına füzyon reaksiyonu denmektedir. Güneşin bünyesinde %72 oranında bulunan hidrojen atomlarının birleşmesi ile helyum ve beraberinde çok büyük miktarda enerji açığa çıkar. Güneşin yaklaşık %26'sı Helyum'dur. Helyum'un oluşumu sırasında bir miktar kütle kaybı oluşur. Bu kütle kaybı oluşan enerjiye eşittir ve Einstein $\Delta E = \Delta m c^2$ formülü ile bu enerjiyi tarif etmektedir. Burada ΔE enerjiyi, Δm kütleyle ve c sembolü ile ışık hızını ifade etmektedir.

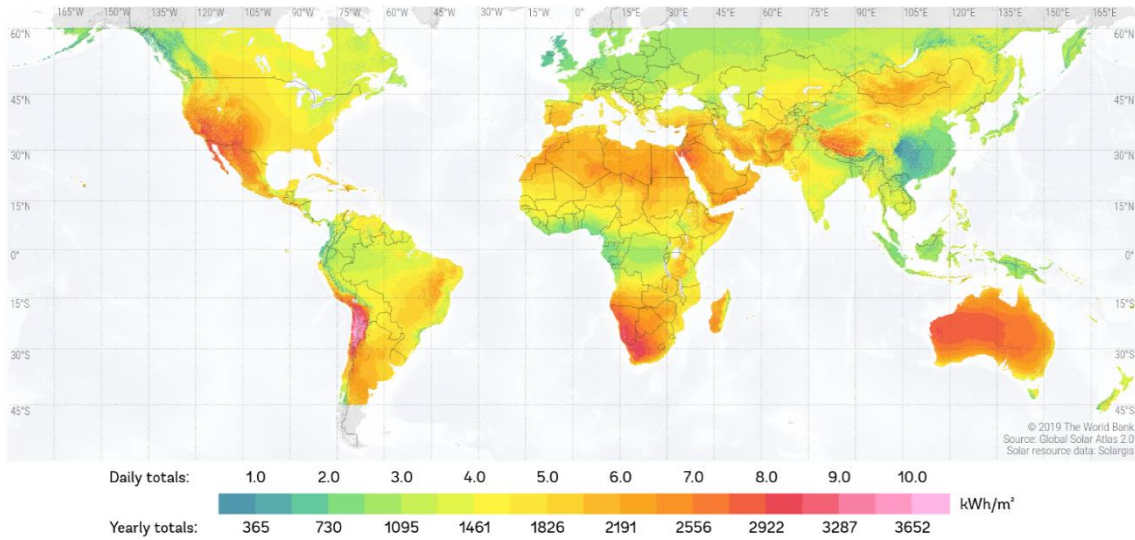
Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin şiddeti, yaklaşık olarak 1370 W/m^2 değerindedir, ancak yeryüzüne ulaşan miktarı atmosferden dolayı $0-1100 \text{ W/m}^2$ değerleri arasında değişim gösterir. Atmosferdeki soğurulmalar ve yansımalar, su buharı, bulutlar ve hava kirliliği, enlem-boylam değişimleri gibi nedenlerle güneş radyasyonunun yaklaşık %70'i yeryüzüne ulaşmaktadır.



Şekil 3.1. Güneşten gelen ışınımın dünyaya etkisi

Dünya'nın birincil enerji ihtiyacı yaklaşık $170\,000 \text{ TWh/Yıl}$ dır. Güneş her yıl $2\,500\,000 \text{ TWh}$ enerji sunarak bize toplam ihtiyacımızın yaklaşık 15 katını sunmaktadır. Bitmez

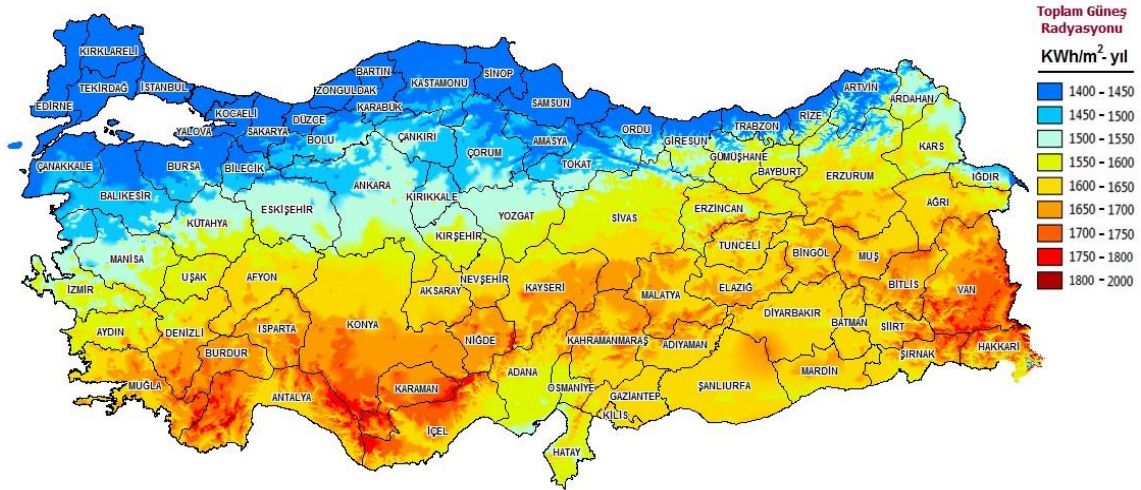
tükenmez bir enerji kaynağı olan güneşten üretilen enerji yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Aşağıdaki şekilde dünyada en çok güneş ışınımı alan bölgeler gösterilmiştir. Güneş kuşağı olarak adlandırılan bu bölgelerde, İspanya, İtalya, Yunanistan, İsrail, Suriye, Mısır, Suudi Arabistan, Libya, Cezayir, Fas, İran, Pakistan, Çin, Japonya, Amerika, Meksika, Güney Afrika ve Avustralya gibi ülkeler yer almaktadır. Güneş kuşağında yer almamasına rağmen dünyadaki bazı ülkeler de yenilenebilir enerji kaynakları yatırımlarına hız vermiştir. Dönencelerle kutup daireleri arasında yer alan Türkiye, İtalya, Portekiz, Fransa, Almanya, Japonya, ABD, Çin gibi orta kuşak ülkeleri yenilenebilir enerji kaynaklarına önemli ölçüde yatırım yapan başlıca ülkelerdir.



Şekil 3.2. Dünya güneş radyasyonu potansiyeli atlası (Suri, 2020)

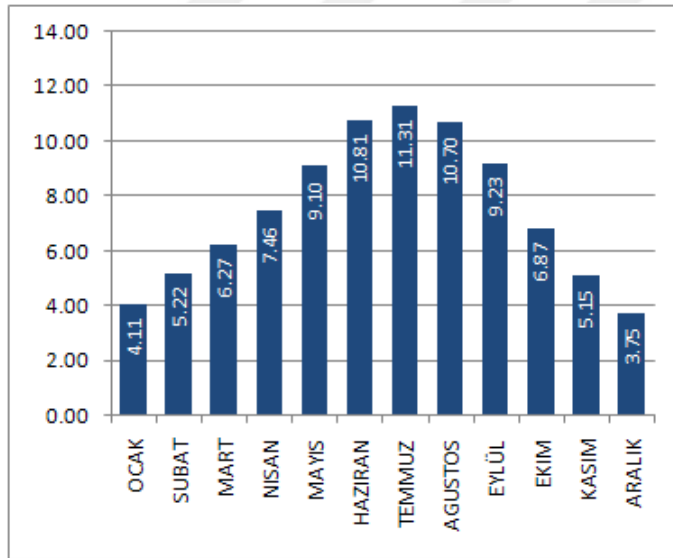
3.1. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli

Konumu itibarıyla ülkemiz yıllık aldığı güneş ışınları açısından oldukça avantajlıdır. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığınca hazırlanan, Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre, yıllık toplam güneşlenme süresi 2741 saat (günlük ortalama 7,5 saat), yıllık toplam gelen güneş enerjisi 1527 kWh/m² yıl (günlük ortalama 4,18 kWh/m²gün) olduğu tespit edilmiştir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2020).



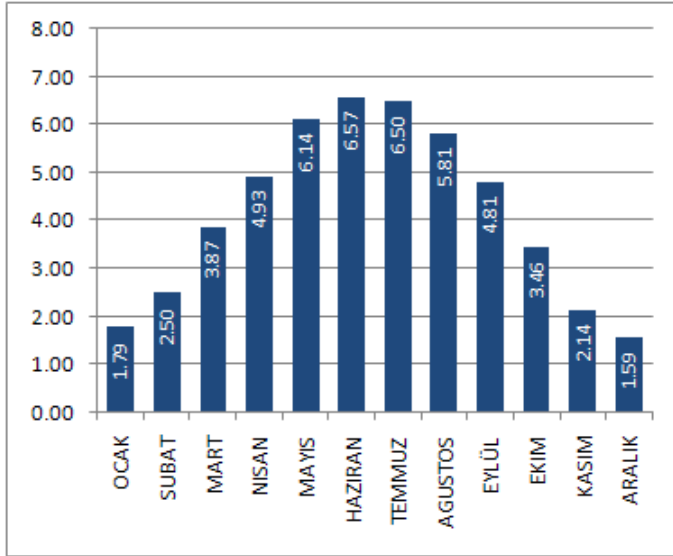
Şekil 3.3. Güneş enerjisi potansiyel atlası (Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, 2020)

Türkiye güneşlenme süreleri tablosunu incelediğimizde günde yaklaşık 11,5 saat güneşlenme süresi ile temmuz ayı en çok güneş radyasyonunun yaşandığı, dolayısı ile en çok enerji üretiminin yapılacağı ay olmaktadır. En az enerji üretiminin gerçekleşeceği ay ise günde yaklaşık 3 saat 45dk güneşlenme süresi olan aralık ayı olmaktadır.



Şekil 3.4. Türkiye güneşlenme süreleri

Aylara göre güneş radyasyonu değerleri ele alındığında Türkiye'de en çok ışınımın yaşandığı ay, m²'ye düşen günlük 6,57 kWh radyasyon değeri ile en çok radyasyona sahip olan Haziran ayıdır. En az ışınımın yaşandığı ay ise m²'ye düşen günlük 1,59 kWh radyasyon değeri ile Aralık ayıdır.



Şekil 3.5. Türkiye global radyasyon değerleri (KWh/m²-gün)

Türkiye’de 2020 yılında işletmedeki güneş enerji santrallerinin üretim kapasitesi, 5 883,4 MW’ı lisanssız, 174,76 MW da lisanslı olmak üzere toplamda güneş enerjisi kurulu gücümüz 6 058,16 MW’a ulaşmıştır. Ülkemizdeki toplam elektrik üretimi içerisindeki güneş enerjisi payı da 10,9 TWh ile %6,63’a yükselmiştir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2020).

4. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

Fotovoltaik enerji sistemleri güneşten gelen fotonların fotovoltaik etki özelliğine sahip malzemelerle doğru akıma, oluşan bu doğru akımı da eviriciler vasıtasıyla alternatif akıma çeviren enerji üretim sistemleridir. Işık akımının etkisi altındaki iki farklı tip (n ve p tipi) yarı iletken tabakanın arasındaki potansiyel farkın (gerilim) oluşması olayına fotovoltaik etki denilmektedir. Fotovoltaik sözcüğü, Yunanca ışık anlamına gelen “photos” ve ilk pilin mucidi Alessandro Volta’dan gelen “voltaic” sözcüklerinin birleşmesinden gelmektedir. Dolayısıyla fotovoltaik terimi ışıktan elektrik üretimi anlamına gelmektedir.

Kullanım alanlarına göre fotovoltaik sistemler on-grid(şebeke bağlantılı) veya off-grid(şebekeden bağımsız) olmak üzere iki kısma ayrılır. On-grid sistemler daha az maliyetli, sistem ömrü açısından daha sağlıklıdır. Eviricinin çıkışından elde edilen AC akım direkt olarak tüketime sunulabildiği gibi üretim fazlası enerji, dağıtım şirketi ile mahsuplaşma yöntemi uygulanarak şebekeye de verilebilir. Off-grid sistemler ise sınırlı kapasitede ihtiyacı karşılamak üzere tasarlanıp adeta bir jeneratör gibi kullanılmaktadır. Bu sistemlerde depolama önem kazanmaktadır. Üretimin fazla olduğu saatlerde enerji akü sistemi ile depolanarak enerji üretiminin olmadığı saatlerde kullanılması gerekmektedir.

4.1. Fotovoltaik Hücre Teknolojisi Tarihçesi

İlk kez 1839 yılında Fransız fizikçi Alexander Edmond Becquerel, elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemleyerek fotovoltaik olayını bulmuştur.

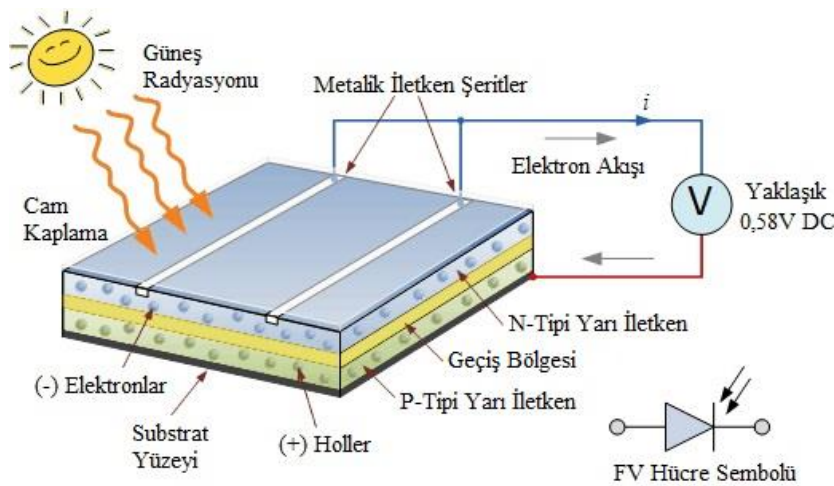
1873’te Willoughby Smith selenyum içerisindeki foto iletkenliği keşfetti ve bu çalışma ilk fotovoltaik düzenek olarak tarihe geçti. 1883’te Charles Fritts isimli bilim adamı %1 verimli fotovoltaik hücreyi geliştirdi. 1946’da dünyada ilk olarak Russell Ohl modern fotovoltaik güneş panelinin patentini aldı. 1954’te Bell Laboratuvarlarında %6 verimli silisyum fotovoltaik hücreler yapıldı. Hoffman Elektronik firması kademeli olarak 1960’lara kadar %14 verimle çalışabilen fotovoltaik silisyum hücreleri geliştirmeyi başardı.

1970'lerde yaşanan enerji krizi ardından yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının önemi artmıştır. 1980'li yıllardan itibaren fotovoltaik enerji sistemleri dünyanın farklı bölgelerinde devreye alınmaya başlamıştır. 2000'li yıllara gelindiğinde ortaya çıkan küresel ısınma ve karbondioksit emisyon problemleri güneş enerjisinin önünü açmış, bu sayede güneş enerjisi endüstrisi hızla yükselmiştir. Fotovoltaik hücrelerde önemli verim artışları sağlanmıştır. (Korkmaz, 2015)

Günümüzde PV hücrelerin verimleri kristal silisyum (c-Si) hücrelerde %27,6'lara, ince film hücrelerde de %20,4'lere kadar çıkmıştır.

4.2. Fotovoltaik Hücrenin Çalışma Prensibi

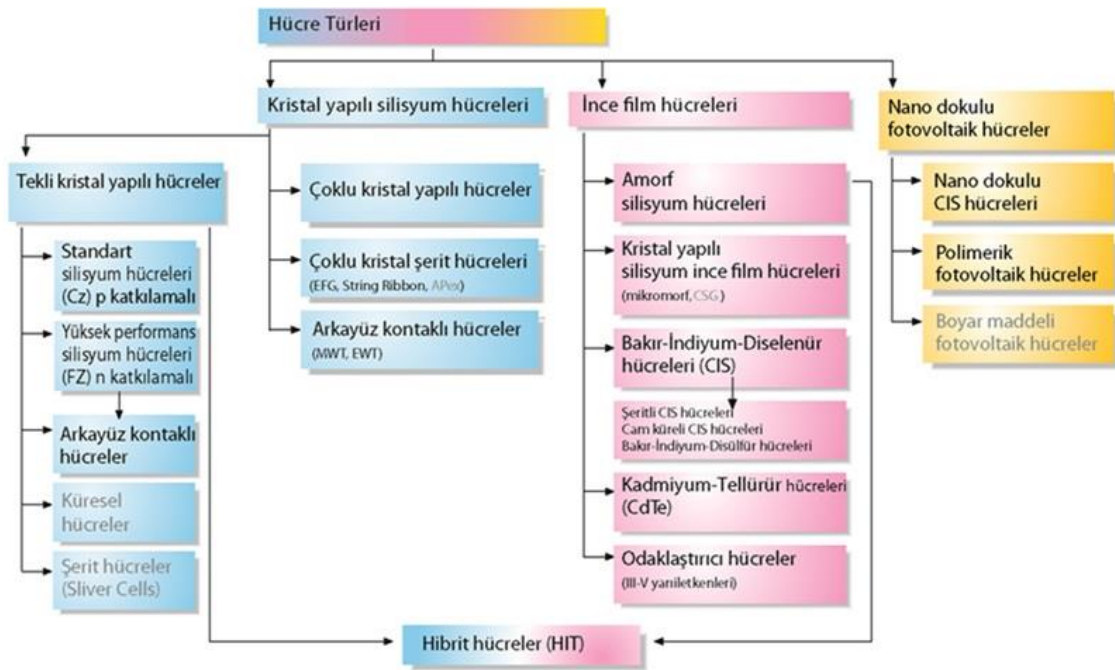
Kristal-silikon teknolojisi fotovoltaik hücre üretiminde en çok rağbet gören teknoloji durumundadır. Fotovoltaik hücreler n ve p tipi yarı iletken malzemelerin birleşiminden meydana gelir. N ve P tipi yarı iletkenler bir araya getirildiklerinde birleşim bölgesinde yükten arındırılmış yasak enerji aralığı oluştururlar. Oluşan bu yapının kutuplarına voltaj uygulandığında elektronlar yasak enerji aralığını geçerek akım oluşturmaya başlarlar. Fotovoltaik hücrede bu voltaj vazifesini güneş fotonları görmektedir. Fotonlara maruz kalan elektronlar serbest kalmaya ve n-tipi yarı iletkenin olduğu bölgeye doğru akmaya başlar. Oluşan boşluklar ise p-tipi yarıiletkenin olduğu bölgeye ilerleyerek voltajın oluşmasını sağlarlar. Bu devre bir yük üzerinden tamamlandığında ise akım akmaya başlar. Burada fotonların direkt olarak üzerine düştüğü tabaka n-tipi yarı iletken tabakadır.



Şekil 4.1. Fotovoltaik hücre çalışma prensibi

4.3. Fotovoltaik Hücre Teknolojisi

Fotovoltaik hücreler gelişen teknoloji, malzeme bilgisi ve akademik çalışmalar neticesinde farklı yapısal özelliklere sahip olarak üretilebilmektedirler. Yapısal özellikleri nedeniyle fotovoltaik hücre teknolojileri üç ayrı gruba bölünmektedir. Bunlardan ilki, 1.Nesil fotovoltaik hücreler olarak da isimlendirilebileceğimiz yaygın kullanıma sahip kristal yapı silisyum hücreleridir. İkincisi, 2.Nesil fotovoltaik hücre türü olarak isimlendirilen ince film hücreleridir ve son olarak 3.Nesil fotovoltaik hücre türü olarak nano dokulu fotovoltaik hücreler şeklinde sınıflandırılır.



Şekil 4.2. Fotovoltaik hücre türleri

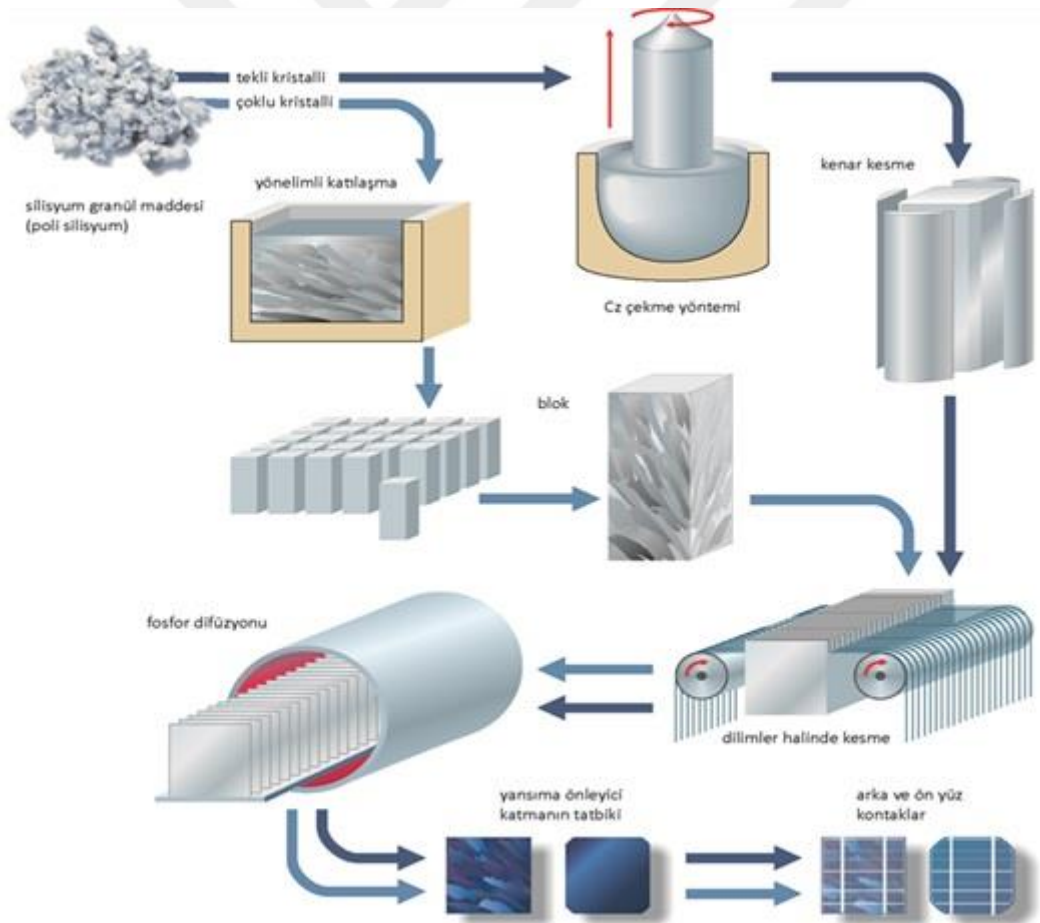
Birinci nesil fotovoltaik hücreler yaklaşık $200\mu\text{m}$ 'lik dilimler halinde birbirlerine lehimlenen kristal silisyum hücrelerdir. Saflık derecelerine göre mono-kristalin ve polikristalin olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

İkinci nesil fotovoltaik hücreler birkaç mikrometre kalınlığındaki hücre katmanlarının termal buharlaştırma yöntemiyle modülün ön camına uygulandığı ince katmanlı hücrelerdir. Kristal yapıda değildirler ve silisyum hücrelere göre çok daha fazla ışığı absorbe edebilmektedir.

Henüz geliştirilme aşamasında olan üçüncü nesil fotovoltaik hücreler birkaç nanometre büyüklüğünde modüller halinde üretilip birleştirilerek panel oluşturulur.

4.3.1. Monokristal yapıli hücreler

Tekli kristal yapıdaki silisyum hücresi “Czochralski”, “Ribbon” ya da “Float-zone” metodu ile önce büyütülerek 200 mikron kalınlıkta wafer denilen ince tabakalar halinde kesilir. Bu dilimler üzerine fosfor atomları eklenerek n-tipi katman ve bor atomları eklenerek p tipi katman oluşturulur. Kontaklar oluşturulduktan sonra 150 mm kalınlığında bir yansıma önleyici tabaka ile kaplama yapılır. Bu tabaka sayesinde silisyum, üzerine düşen ışınımın üçte birine yakın kısmını absorbe edebilir.



Şekil 4.3. Hücre üretim aşamaları diyagramı

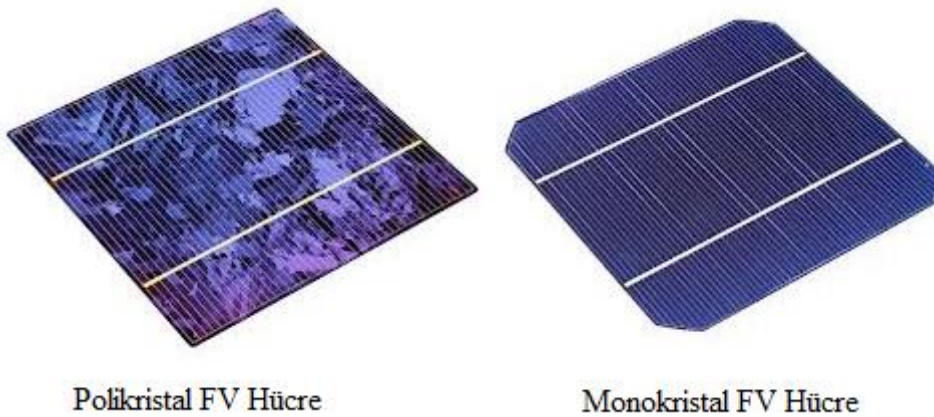
Monokristal fotovoltaik hücreler, kristal hücre çeşitlerinin en verimli ve en kalitelisidir. Günümüz teknolojisinde, laboratuvar koşullarına göre tekli kristal hücreler yaklaşık %30

enerji dönüşüm verimliliğine sahiptir. Ticari uygulamalarda ise üreticiye göre %20 – %25 arasında değişmektedir.

Monokristal silisyum fotovoltaik hücrelerin üretimleri teknik açıdan daha zor ve üretim süreleri daha uzun olduğundan dolayı bu tür fotovoltaik hücrelerin maliyetleri, diğer hücre çeşitlerine göre daha yüksektir.

4.3.2. Polikristal yapılı hücreler

Genellikle artık kristallerin eritilip soğutulması ile polikristal blok elde edilir, monokristal üretimine göre daha az ısı işlem gördüğünden atomik yapı homojen değildir. Polikristal fotovoltaik hücre üretim maliyeti, monokristal hücrelere göre daha düşüktür. Üretim ve ulaşılabilirliğinin kolay, verimlilik/maliyet oranının monokristal hücrelere göre daha yüksek oluşu sebebi ile polikristal paneller %70'lik pazar payı ile en çok kullanılan solar panel tipidir. Verimleri ticari uygulamalarda %18-20 aralığındadır.



Polikristal FV Hücre

Monokristal FV Hücre

Şekil 4.4. Kristal yapı silisyum hücrelerinin görünüşü

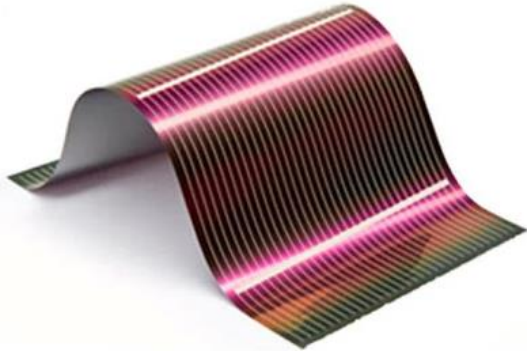
4.3.3. Amorf silisyum ince film hücreleri

Kristal yapıya sahip olmayan amorf silisyum hücreleri, plazma tortulaştırılması gibi tortulaşma tekniği ile üretilirler. Silisyum ile %5-12 oranlarında hidrojenin birleşimi ile amorf silisyum elde edilir. Bu sayede silisyum atomları ince bir filme dökülerek ‘ince film’ fotovoltaik paneller oluşturmak mümkün olabilmektedir. Önemli bir sorun olarak güneş ışığının hücre yüzeyine temasından itibaren Staebler-Wronski etkisi denilen çürüme faaliyeti başlamaktadır, bu da amorf silisyum hücre tipinin gelişmesine yönelik beklentileri

zayıflatmaktadır. Şu ana kadar %13,4 ile en yüksek laboratuvar verimlilik değerine ulaşılmıştır. Panel verimleri ise %8 civarındadır. Ancak ucuz olmaları ve kurulum kolaylıkları yönüyle tercih edilmektedirler. Güç ihtiyacı az olan cihazlar için oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Hidrojen seyreltme yönteminin geliştirilmesi ile verimlerinin artırılması planlanmaktadır (Ünal, 2006).

4.3.4. Bakır indiyum diselenid ince film hücreleri

Bakır İndiyum Diselenid (CIS), $CuInSe_2$ şeklinde ifade edilen bir bileşiktir ve çok yüksek soğurma katsayısına sahip olup 1 μm kalınlığındaki ilk katmanında gelen güneş ışınımı %99'unu soğurur. Bu pillerin yasak enerji aralığı 1,02-1,68 eV değerlerindedir. CIS malzemesine galyum elementi katılarak %20 civarında çok yüksek verim almak mümkündür. Bununla birlikte dayanıklı olması ve esnek malzemeler üzerinde kullanılabilmesi gibi avantajları mevcuttur.



Şekil 4.5. Galyum katkılı bakır indiyum diselenid ince film şerit görüntüsü

4.3.5. Kadmiyum tellür ince film hücreleri

Kadmiyum tellür ($CdTe$), periyodik cetvelin ikinci grubunda bulunmakta olan kadmiyum (Cd) elementi ile altıncı grubunda bulunan tellür (Te) elementinin birleşimiyle ortaya çıkmaktadır. $CdTe$, ince film PV ürünler için ideale yakın bir malzemedir. Özellikle ışığı soğurma katsayısı oldukça yüksektir. Bu birleşimin yasak enerji aralığı oda sıcaklığında $E_g = 1,5$ eV'dir ve bu değer güneş spektrumundan maksimum dönüşüm elde etmek için gerekli olan değere çok yakındır. Optik bant aralığının güneş enerjisi dönüşümü için çok uygun olduğu gibi ince film üretim yöntemleri de çok kolaydır. Birkaç $100^{\circ}C$ de alt katman ısısı durağan hale gelmektedir. $450-600^{\circ}C$ alt katman ısısında yüksek kaliteli

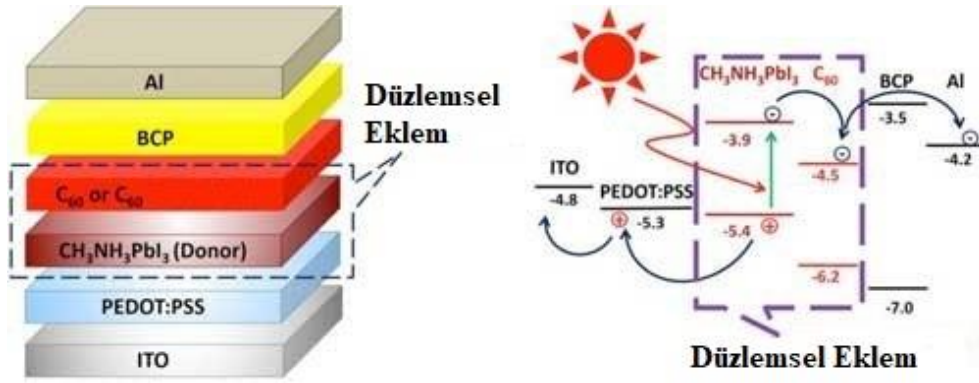
malzeme üretimi 1 mikrometre/dk' dan daha yüksek hızlarda yapılabilmektedir. Bunun nedeni malzemenin hatalara ve çekirdek boyutlarına sağladığı toleranstır. En son 2014 yılında %21,5 hücre verimliliğine ulaşılarak rekor kırılmıştır. Doğada kadmiyum elementinin saf halde bulunmaması ve işlenirken kadmiyum klorit ($CdCl_2$) bileşiği gibi zararlı bir bileşik halinde işlenmesi, dünyada tellür kaynaklarının sınırlı olması bu hücre teknolojisinin gelişmesini yavaşlatmaktadır.

4.3.6. Nano dokulu fotovoltaik hücreler

Nanofotovoltaik güneş pilleri, nano-mikro kristal yapıda yüksek verimli güneş hücrelerini kapsamaktadır. Nano dokulu CIS (bakır indiyum diselenid) hücreleri, organik ve polimerik fotovoltaik hücreler, boyar maddeli (DSSC) fotovoltaik hücreler bu kapsamda değerlendirilmektedir.

Boya duyarlaştırıcılı güneş hücreleri (DSSC), düşük maliyetli PV sistemlerdir. Graetzel hücresi olarak da bilinen bu hücreler, ilk olarak 1988 yılında M. Graetzel ve Brian O'Regan tarafından UC Berkley'de keşfedilmiş ve sonrasında 1991 yılında aynı kişiler tarafından geliştirilmiştir. Yapılan bu çalışma 2010 yılında Millenium Teknoloji ödülüne layık görülmüştür (Akar, 2016).

Polimerler, monomer denem çok sayıda basit birimlerin birbirlerine eklenmesiyle oluşur. Polimerik malzemeler bant yapılarından dolayı elektriksel yalıtkan maddeler olarak bilinmekteyken bazı araştırmalar bir polimer olan poliasetilenin metal gibi iletken hale getirilebileceğini göstermektedir. Günümüzde iletken polimerler güneş pillerinde, OLED'lerde, çeşitli sensörlerde, transistörlerde ve diğer elektronik cihazlarda kullanılmaktadır. Ayrıca polimer esaslı güneş pilleri düşük maliyetli, daha az toksik olan üretim metotları sunmakta ve geniş alanlı, hafif, esnek panellerin üretimine olanak sağlamaktadır.



Şekil 4.6. Organik fotovoltaik hücre yapısı ve çalışma prensibi diyagramı

Şekil 4.6’da organik FV hücre teknolojisinde geleceğe dair umut olarak görülen perovskit güneş pili katmanları ve yarı iletkenlerdeki p-n eklem vazifesi gören donör-acceptor eklemine gerçekleşen eksiton oluşumu görülmektedir.

Polimer güneş pillerinin son zamanlarda güç dönüşüm verimliliğinin %6 civarında olduğu bilinmektedir. Organik güneş pillerinde ise verim henüz %10 civarındadır.

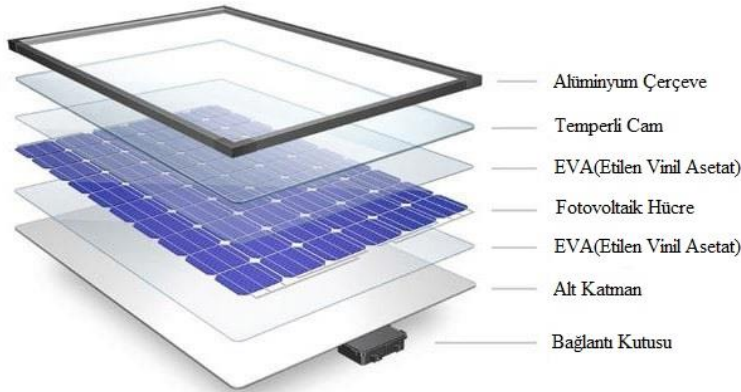
4.4. Fotovoltaik Sistem Bileşenleri

Fotovoltaik sistemlerin on-grid veya off-grid bağlantı şekline göre, çatı tipi, arazi tipi veya yüzer tip montaj şekline göre bazı donanımları farklılık gösterse de büyük bir kısmı ortak niteliktedir. FV paneller, panel taşıyıcı sistemi, elektriksel bağlantı ekipmanları ve evirici fotovoltaik tesisin ana unsurlarıdır. Bunlara ilave olarak enerji depolanmak istenirse batarya grubu ve şarj kontrol ünitesi de sisteme entegre edilmelidir. Fotovoltaik enerji tesisleri nispeten düşük bakım ihtiyacı ve birçok sistem bileşeninin uzun ömrü nedeniyle yenilenebilir enerji seçenekleri arasında popüler bir seçimdir. Hareketli parçalar olmadığından mekanik arıza ihtimalinin çok düşük olması, mücbir sebepler dışında çoğu güneş enerjisi sistemi 30 yıl veya daha fazla elektrik üretmeye devam edecektir.

4.4.1. Fotovoltaik panel

Fotovoltaik hücrelerin seri ve paralel bağlanması ve dış etkenlere karşı korumalı çerçeve içine yerleştirilmesi ile panel oluşur. Daha açık ifadeyle fotovoltaik panel, en dışta alüminyum çerçeve, temperli cam, fotovoltaik hücreleri bir arada tutan EVA (Etilen Vinil

Asetat), hücreler ile birlikte metal bağlantılardan ve panelin arkasında tedlar film tabakasından meydana gelmektedir.

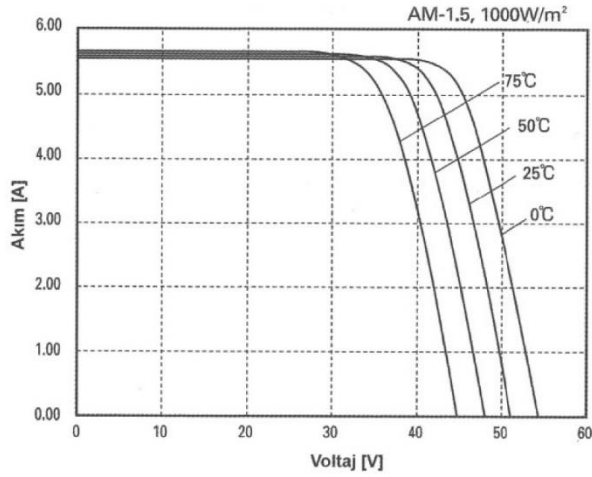


Şekil 4.7. Fotovoltaik panel yapısı

Fotovoltaik (FV) güneş panelleri güneş enerji santrallerinin en önemli parçalarından biridir. Fotovoltaik güneş panelleri güneşten aldıkları enerjiyi yapıldıkları yarıiletken malzeme sayesinde elektrik enerjisine çeviren elemanlara denmektedir. Büyük miktarlarda elektrik üretmek için paneller birbirine seri ya da paralel bağlanarak fotovoltaik dizisini oluştururlar.

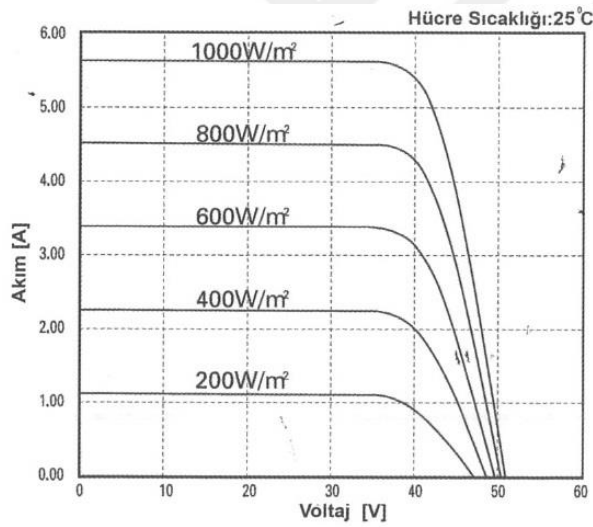
Panellerin üretimi tamamlandığında verimlerinin hesap edilebilmesi için standart test koşullarında (STC) teste tabi tutulurlar. Bu koşullar TS EN60904 veya IEC 60904 standartlarına göre, modül yüzeyine dik düşen radyasyon 1000 W/m^2 değerinde olmalı, panel sıcaklığı 25°C ve hava kütle katsayısı 1,5 olmalıdır.

Sıcaklık ve ışınım değerlerine göre fotovoltaik panel akım-gerilim değerleri dolayısı ile çıkış gücü değişmektedir. Sıcaklık değeri panelin hücre yapısına göre değişmekle birlikte her panel tipinin eşik sıcaklık değeri bulunmakta ve sıcaklığın bu eşik değeri aşması durumunda panel verimi olumsuz yönde etkilenmektedir (Hasar, 2016).



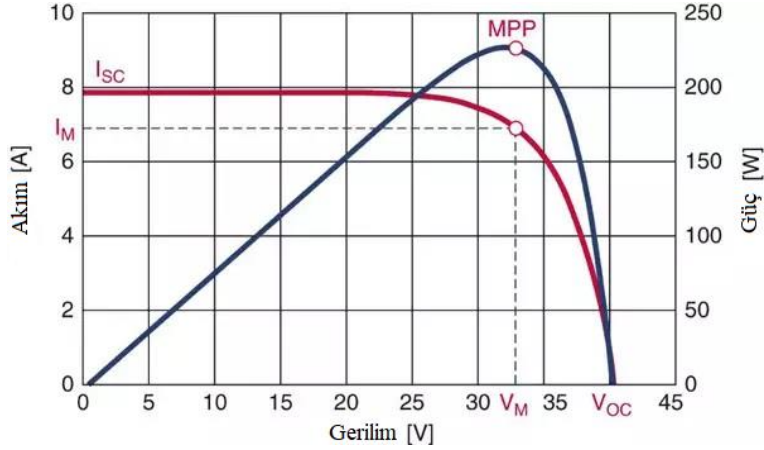
Şekil 4.8. Kristal yapılı FV panelin sıcaklığa bağlı I-V grafiği

Sıcaklığı 25⁰C’de sabitlediğimizde ışınım değeri 1000 W/m²,nin altına düşüğe üretilen akım azalır ve buna bağlı olarak panel çıkış gücü de azalmış olur.



Şekil 4.9. Kristal yapılı FV panelin ışınımına bağlı I-V grafiği

Fotovoltaik enerji tesisi kurulumunda ideal güç/m² değerini yakalamak için solar panel etiket değerlerindeki bakılması gereken parametreleri bilmek gerekir. P_{MPP} şeklinde sembol ile gösterilen değer, standart test koşullarında panel maksimum anma gücünü ifade eder. Birimi W_P olan bu parametre maksimum akım ve maksimum gerilimde panel çıkışından alınacak olan gücü göstermektedir.



Şekil 4.10. Örnek fotovoltaik panel çalışma karakteristiği grafiği

MPP noktasındaki gerilimi ifade etmek için V_{MPP} sembolü kullanılır ve birimi V (volt)'tur. Aynı şekilde MPP noktasındaki akımı ifade etmek için I_{MPP} sembolü kullanılır ve birim olarak A(amper) kullanılır. I_{SC} olarak sembolize edilen ve A(amper) birimi ile ölçülen kısa devre akımı, FV panelin çıkış terminallerinin kısa devre edilmesi durumunda oluşan akımdır. Solar panelden alınabilecek maksimum akım değeridir. V_{oc} olarak sembolize edilen ve V(volt) birimi ile ölçülen açık devre gerilimidir. FV panelin çıkış terminalleri arasından yük bağlanmadan alınan gerilim değeridir.

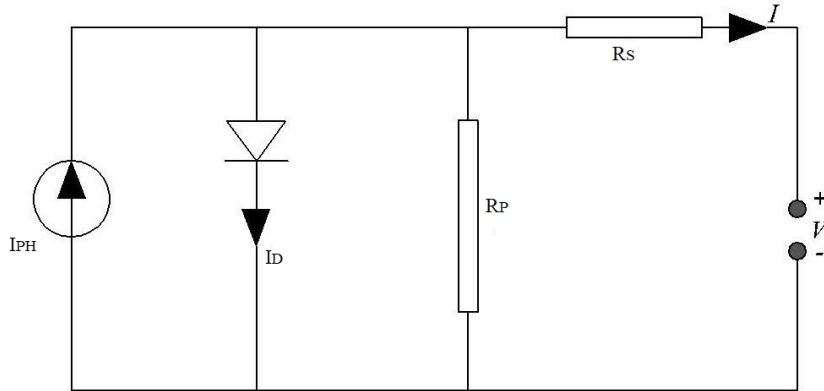
FV panel etiketinde her zaman belirtilmeyen ancak bilinmesi gereken verim ve doluluk faktörü parametreleri de incelenmesi gerekmektedir. Verim, solar panelden elde edilen gücün güneşten alınan ışınım enerjisine oranı ile hesaplanır. Formülü;

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{A \cdot E} = \frac{I_{MPP} \cdot V_{MPP}}{A \cdot E} \text{ Şeklindedir.}$$

Bir fotovoltaik modülün belli bir ışınım altında akımların eksi, gerilimlerin pozitif olduğu bölgede hesaplanan en büyük MPP gücü değerinin açık devre gerilimi ile kısa devre akımı çarpımına oranı doluluk faktörü olarak tanımlanır. FF sembolü ile ifade edilen doluluk faktörü genellikle bir fotovoltaik panelin elektrik üretim kalitesini belirtmek için kullanılır. Formülü;

$$FF = \frac{P_{MPP}}{I_{SC} \cdot V_{OC}} = \frac{I_{MPP} \cdot V_{MPP}}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \text{ Şeklindedir.}$$

Fotovoltaik paneli, doğrultucu bir diyota paralel bağlanmış bir akım kaynağı olarak düşünürsek, Şekil 4.11’de gösterilen fotovoltaik hücrenin eşdeğer şemasına göre, (I) toplam çıkış akımını, (I_{PH}) güneş ışınlarından elde edilen toplam akımı ve buna seri olarak bağlı direnç (R_S) çıkış akımına karşı gösterilen toplam iç direnci, R_p ise kaçak akımları temsil eden paralel direnci temsil etmektedir.



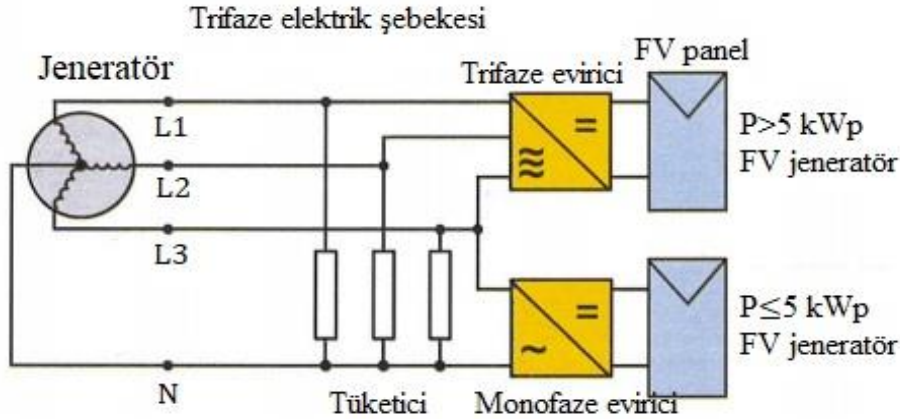
Şekil 4.11. Fotovoltaik panel eşdeğer devresi

Fotovoltaik panellerinin verimine etki eden çevresel etkenler ciddi kayıplara neden olmaktadır. Güneş radyasyonu panele ulaştığında ön yüzdeki kontaklar nedeniyle oluşan gölgelenme ve yansımaya etkisi sonucu ışığın %3’ü, uzun dalga boylu radyasyonun fazla düşük enerjili fotonları nedeniyle %20’si, kısa dalga boylu radyasyonun fazla foton enerjisi nedeniyle %30’u, hücre içerisinde gerçekleşen rekombinasyon nedeniyle %8’i, üretilen enerjinin tüketim bölgesine ulaşana kadar gerçekleşen gerilim düşüşleri nedeniyle %20’si kaybedilmektedir. Dolayısıyla güneşten alınan enerjinin elektrik enerjisine dönüşümü hususunda tesis verimi %19’larda gerçekleşmektedir (Şençiçek, 2017).

4.4.2. Solar evirici (inverter)

Fotovoltaik evirici, FV jeneratör ile alternatif akım şebekesi arasındaki bağlantıyı kuran bileşendir. Başlıca görevi, FV paneller tarafından üretilen doğru akımı alternatif akıma çevirmektir. Bunu yaparken, şebekeye beslenen gerilim, şebekenin frekansına ve gerilim şiddetine uygun hale getirilmelidir. Genel olarak şebeke bağlantılı eviriciler mikro, dizi ve merkezi eviriciler olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır.

Kapasiteleri 5 kWp'e kadar olan FV tesislerde çoğunlukla tek fazlı eviriciler kullanılır. Daha büyük tesislerde üç fazlı yani trifaze eviriciler kullanılır. Trifaze eviricilerde yük simetrik olarak üç faza dağıtıldığı, daha basit bir devre düzeni söz konusudur. Bu şekilde beslenen elektrik enerjisinin şebeke kriterlerine uygunluğu ve aynı zamanda yüksek bir verim oranı elde edilir.



Şekil 4.12. Monofaze ve trifaze eviriciler ile FV tesis şebeke bağlantı şeması

Eviriciler yapısal olarak trafolu ve trafosuz eviriciler olmak üzere iki kısma ayrılır. Trafolu eviriciler de kendi içerisinde düşük frekanslı ve yüksek frekanslı eviriciler olmak üzere iki tipte üretilmektedirler.

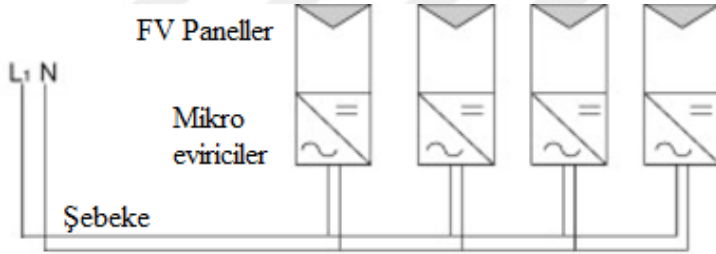
50 Hz ile çalışan düşük frekanslı eviricilerde doğru akım devresi transformatörün manyetik alanı üzerinden alternatif akım devresinden ayrılmıştır. Transformatör ile gerçekleştirilen fiziksel ayırma sayesinde FV jeneratör insan için tehlike teşkil etmeyen, ekstra düşük gerilimli tasarlanabilir. Ayrıca bu gerilimlerde FV jeneratör kasasının işlevi koruma amaçlı topraklanmasına gerek yoktur. Transformatör aynı zamanda elektromanyetik girişimi de düşürür.

Çalışma frekansı 100 Hz civarında olan yüksek frekanslı transformatörlerde doğru gerilim, bir yüksek frekans köprüsü ile yüksek frekanslı bir alternatif gerilime dönüştürülür ve bu gerilim sonra yüksek frekanslı trafo ile 230 V'luk şebeke gerilimine çevrilir. Sonrasında gerilim 50 Hz köprüsü ile şebekeye uygun frekansa ayarlanır.

Transformatörsüz eviricilerle çok yüksek verimler elde edilebilmektedir. Bu nedenle bu cihaz türü tüm güç sınıflarında gittikçe en çok tercih edilen cihazlar olmaktadır. Ayrıca bu cihazların ebatları, ağırlığı ve maliyeti daha düşüktür. Ancak bu evirici modellerinde doğru akım/alternatif akım devrelerinin fiziksel olarak ayrılmamış olması nedeniyle, elektriksel güvenlik alt yapısının daha gelişmiş düzeyde olması gerekmektedir.

Mikro eviriciler

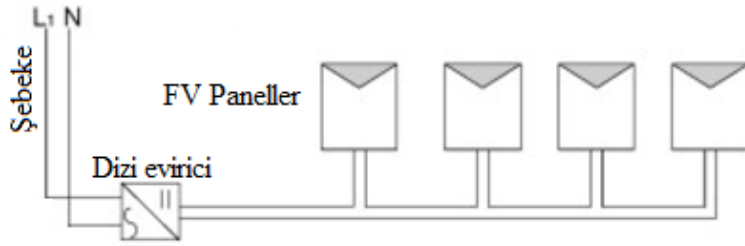
Günümüz şartlarında çok talep görmese de sistem veriminin yüksek olmasının istendiği tesislerde mikro eviriciler tercih edilmektedir. Mikro eviriciler bir veya iki panel bağlantısı ile 200-400 W arasında güç çıkışı verebilen evirici modelidir. Her panele bir evirici bağlandığı için gölgelenme veya aşırı ısınma nedeniyle bir panelde yaşanan teknik sorunun tüm diziyi etkilemesinin önüne geçilmiş olur. Dolayısıyla sistem verimi merkezi evirici kullanılan sistemlere nazaran daha yüksektir. Ayrıca her bir FV panelden gelen DC enerji mikro eviriciye getirildiğinden her bir FV modülün üretim değerlerini izleme imkânı doğmaktadır.



Şekil 4.13. Mikro evirici bağlantı şeması

Dizi eviricileri

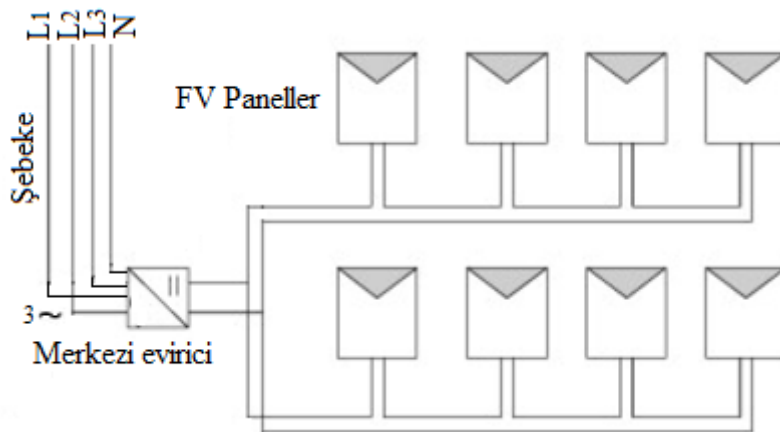
Dizi eviricilerin doğru akım giriş kapasitesine göre oluşturulan seri bağlı solar panel dizisine hitap eden evirici modelidir. Panellerin kendi aralarında seri bağlantısı yapıldıktan sonra en sondaki ve en baştaki panelden DC kablo ile dizinin toplamda üretmiş olduğu akım dizi eviricisine taşınır. Böylece her bir FV dizinin üretim değerlerini izleme imkânı doğar. DC kablo boyu kısalmır ve AC kablo boyu uzar, böylelikle kablo kayıpları azalır. Eviriciden kaynaklanan sorunlarda ilgili diziyeye ait üretim durduğunda diğer diziler üretime devam edeceği için üretim kaybı nispeten azaltılmış olur. Dizi eviricilerin güçleri 2-66 kW arasında değişim göstermektedir. Dizi eviricilerin verimi %98 civarındadır.



Şekil 4.14. Dizi evirici bağlantı şeması

Merkezi eviriciler

Merkezi eviriciler büyük ölçekli enerji santralleri ve endüstriyel tesisler için geliştirilmiş evirici modelidir. Her fotovoltaik dizide üretilen DC güç, solar kablolar vasıtasıyla dağıtım kutularına paralel bağlantı olarak getirilir. Dağıtım kutusunda toplanan DC güç, merkezi eviricide AC güce dönüştürülerek şebekeye aktarılır. Merkezi evirici devresi, yüksek verimliliğe ve düşük maliyete sahiptir. Ancak merkezi evirici kullanılan durumlarda evirici girişine bağlanan tüm FV modül dizilerinin tiplerinin ve ortam koşullarının aynı olmasına dikkat edilmelidir. Merkezi sistemde, sistem tek bir eviriciye bağlı olduğu için bu eviricinin arızalanması durumunda tüm sistemin devre dışı kalmasına yol açar. Merkezi eviricilerin güçleri 455-2300 kW arasında değişim göstermektedir. Şebeke için gerekli voltaj seviyesine dönüşüm yapılabilmesi için merkezi eviricilerden sonra trafo kullanılması gerekmektedir. Eğer yüksek gerilim hattına enerji veriliyor ise voltaj 34,5 kV veya 31,5 kV gerilim seviyesine yükseltilmesi gerekir. Trafodan sonra OG koruma hücreleri ile sistem güvenliğinin sağlanması oldukça önemlidir.



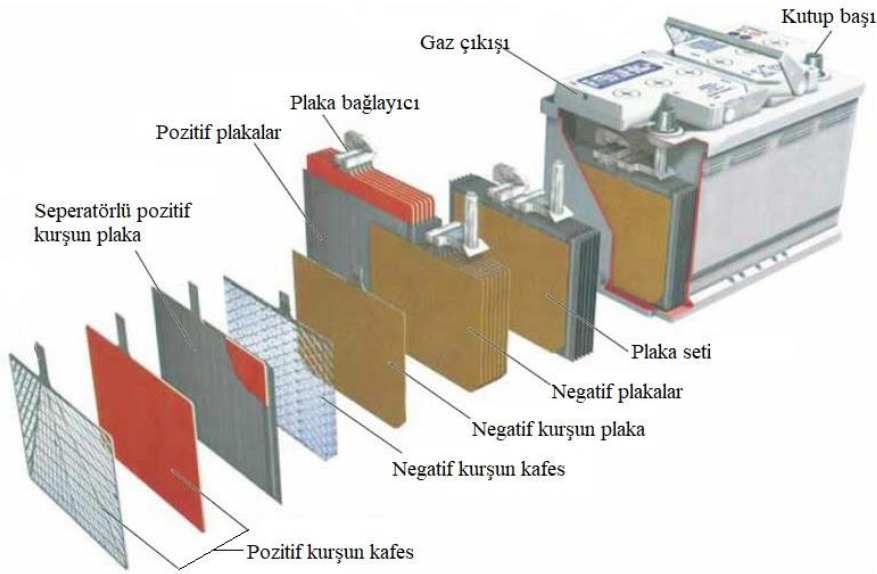
Şekil 4.15. Merkezi evirici bağlantı şeması

Eviricilerde güvenlik maksadıyla adalanma etkisini yok etme özelliği bulunmaktadır. On-grid bir sistemde güneş panelleri üretimde iken şebeke enerjisinin kesilmesi durumunda fotovoltaik tesisin şebekeyi beslemeye devam ediyor olması şebeke güvenliği açısından da tesis güvenliği açısından da istenen bir durum değildir. Evirici şebeke enerjisinin kesildiğini otomatik olarak algılayıp enerji çıkışını engellemeli, fotovoltaik tesisi şebekeden izole ederek ada tipi(off-grid) çalışma moduna geçmelidir.

4.4.3. Batarya (akü)

Elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depo eden, ihtiyaç halinde depolanan enerjiyi elektrik enerjisi olarak kullanıcıya sunan cihazlardır. Fotovoltaik hücreler tarafından üretilen fazla enerjinin depolanarak üretimin olmadığı dönemlerde de enerjinin kesintisiz kullanımını sağlamak için akülere ihtiyaç vardır. Bataryanın şarj-deşarj verimliliği yüksek, ömrünün ise uzun olması gerekir. Sıcaklığa ve olumsuz çevre koşullarına göre dayanıklı olmalıdır. Güneş enerjisi ile üretilen enerjinin depolanmasında OpzS akü ve jel akü tipleri tercih edilmektedir.

OpzS akü teknolojisi adını, Almanca hareketsiz anlamına gelen “Ortfest” ve çelik levha anlamına gelen “Panzerplatte” kelimelerinin baş harflerinden almaktadır. S harfi ise elektrolit olarak kullanılan sülfürik asitin saf su ile karışımından oluşan sıvıyı temsil etmektedir. Bir akü teknolojisinde bulunan pozitif ve negatif plakalar OpzS akülerinde de mevcuttur. Pozitif plakalar kurşun-antimon alaşımından belirli sayıdaki çubuklar ile bunları birbirine irtibatlandıran baradan oluşur. Her tüp yuvası kurşun çubuklarla iyi temas edecek şekilde aktif madde ile doldurulur. Formasyon şarjında aktif madde sıkı bir katı haline gelip, tüp çeperi ve kurşun çubuklarla bir bütün haline gelir. Elektrolit aktif madde içinde ve tüpler arasında rahat hareket eder. Negatif plakalar da aynı şekilde kurşun-antimon alaşımından ızgara şeklinde basınçlı aktif madde sıvanmış olarak üretilirler.

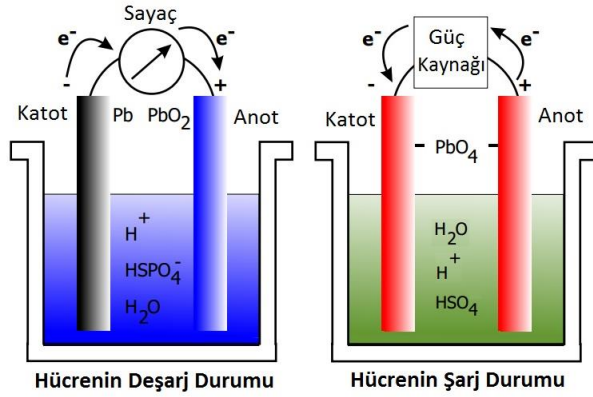


Şekil 4.16. OpzS akü iç yapısı

Pozitif plakalar ile negatif plakalar arasında kısa devreyi önlemek için mikro gözenekli seperatörler yerleştirilir. Elektrolit olarak ise sülfürik asit-saf su karışımından oluşan tam şarj durumunda 20°C 'de yaklaşık $1,20-1,25 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluğunda sıvı kullanılmaktadır. Sahip olduğu buşonlar vasıtasıyla akümülatör içerisinde kimyasal tepkimeden kaynaklı oluşan oksijen ve hidrojenin rahatça dışarı çıkması sağlanırken asitin dışarı sızmasını engelleyerek hücre içerisine geri gönderilmesini sağlar. Sağlımlıkları, uzun tasarım ömürleri ve yüksek operasyonel güvenlikleri nedeniyle, güneş ve rüzgâr enerjisi istasyonlarında kullanımı yaygındır.

Solar sistemlerde kullanılan diğer bir akü tipi ise VRLA (Valve Regulated Lead Acid) diye de adlandırılan jel akü tipidir. Bu akülerin temel özelliği asit taşması olayının olmamasıdır. Gaz oluşumu yok denecek kadar azdır. Bu yüzden çok güvenlidir ve rafta bekleme ömürleri çok daha uzundur. Fotovoltaik dizilerden düzensiz gelen şarj girişi, pilleri tam olarak şarj etmek için yetersizdir. Güneşsiz günlerde piller boşalır ve tam şarj olamaz. Bu durum akülerin ömrünü azaltmaktadır. Normal kurşun asit aküler sıcaklığın da etkisiyle sülfatlama, tabakalaşma, korozyon ve aktif madde sızmasından dolayı arızalanır. Bir Jel VRLA (Valf Ayarlı Kurşun Asit) bataryasında, elektrolit dökülmeyen tiksotropik jel formundadır. Kimyasal olarak jel aküler sulu akülerle neredeyse aynıdır fakat aralarındaki fark kurşun plakalarda antimon, kalsiyum ile yer değiştirmiştir ve gazın tekrar birleşimi meydana gelebilmektedir. Geleneksel kurşun asit akü hücrelerinde, hidrojen, oksijen ve

gaz akışına katılan sülfürik asit damlacıklarının havalandırılması nedeniyle su hücreden kaybolur, bu nedenle elektrolitin muhafaza edilmesi için düzenli akü kontrollerine ve periyodik su doldurma işlemlerine ihtiyaç vardır. Sülfürik asitin silis buharı ile karıştırılmasından elde edilen jel, aküden elektrolit buharlaşmasını, dökülmesini ve paslanma problemlerini ortadan kaldırır. Dolayısıyla bakım gerektirmemektedir.



Şekil 4.17. Kurşun-asit akü çalışma prensibi şeması

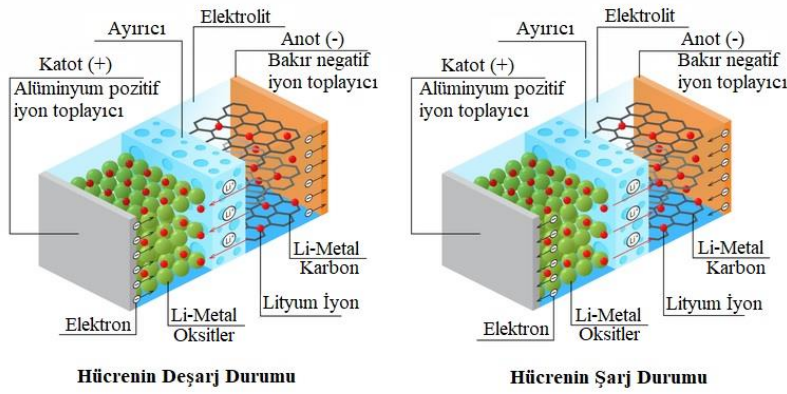
VRLA jel akülerde pozitif plakada oluşan oksijen jelin içerisinde bulunan “mikro-çatlak”lar sayesinde kolaylıkla saf kurşundan yapılmış olan negatif plakaya ulaşır. Oluşan bu oksijen negatif plakanın kurşun metal yüzeyinin üzerinde emilir ve hidrojenle buluşarak suya dönüşür ve hücre içerisine su olarak tekrar dönüş yapar.

Jel aküler ağır çevresel koşullara özellikle de sıcaklığa ve titreşime dayanıklı bakımsız akülerdir bundan dolayı fotovoltaik tesislerde özellikle tercih edilirler. Hemen şarj edilmeseler dahi derin deşarjdan tamamen geri döndürülebilirler. Günlük çevrimsel kullanım için idealdir (HBL Power Systems Limited, 2020).

Fotovoltaik tesislerde kullanılan batarya teknolojisi olarak bir diğer tür olan lityum iyon akülerin kullanım alanları ve kullanım sıklıkları artmaktadır. Hafif oluşları ve hızlı şarj edilebilme özellikleri sayesinde tercih edilirler. Bu akülerin şarj olma süreleri oldukça kısa, deşarj olma süreleri ise bir o kadar uzundur. Lityum aküler, düzensiz kullanıma uygun olmaları yani istenildiği an, istenilen seviyede şarj / deşarj edilebilmesi, MPPT (Maximum Power Point Tracking) veya derin şarj, yüksek şarj voltajı gibi sistem bileşenleri hatalarına karşı kendini koruma sistemine sahip olması, özellikle çatı uygulamalarında daha düşük ve yüksek sıcaklıklarda stabil ve daha az verim kayıpları sunması, etiket değerleri kapasitesini

tam olarak hizmete sunması gibi faydaları nedeniyle geleneksel akülere nazaran daha avantajlı akülerdir.

Alkali bir metal olan Lityum, 3 olan atom numarası ile periyodik cetvelin Hidrojen ve Helyum' dan sonra en "küçük" atomudur. Bu tip bataryalarda katot "lithiated metal oxide" (LiCoO_2 , LiMnO_4 , LiNO_2 vs) adı verilen maddelerden yapılır ve anot ise karbon grafit maddesinden oluşur. Elektrolit maddesi organik karbonat (PC-Propilen Karbonat, EC-Etilen Karbonat, DMC-Dimetil Karbonat, DEC- Dietil Karbonat) içinde çözülmüş lityum tuzlarından (LiPF_6) oluşur. Şarj sırasında katottaki lityum atomları iyonlaşır ve elektrolit içinden geçerek karbon anoda ulaşır ve birleşir bu sırada elektronunu vererek dış devrede akım oluşturur. Bu süreç deşarjda tersine işler (Aydın & Şahin, 2020).

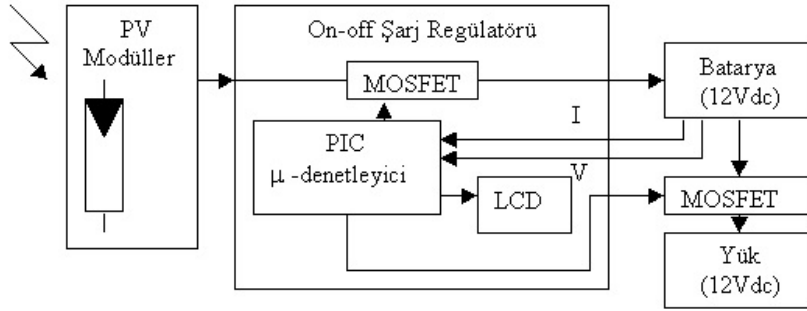


Şekil 4.18. Lityum iyon akü çalışma prensibi şeması

4.4.4. Şarj kontrol cihazı (regülatör)

Şarj regülatörü de denilen kontrol ünitesi, fotovoltaik panelden gelen akımı düzenleyerek aküye iletilmesini sağlayan birimdir. Şarj regülatörleri depolama sisteminin güvenliği için akünün tam dolmasını ve tam deşarj (boşalmasını) olmasını engeller. Kontrol ünitesi seçimi yapılırken regülatörün ihtiyaç duyulan maksimum akıma dayanıklı olmasına ve batarya voltajı ile uyumlu olmasına dikkat edilmelidir. Bunlara ek olarak bir solar şarj regülatörü bazı görüntüleme özelliklerine sahip olmalıdır. Genellikle LCD ekrana sahip olan şarj regülatörleri, anlık olarak batarya voltajı, yük akımı, yük gücü ve SOC (State Of Charge-Şarj Durumu)'u gösterme özelliklerini taşımaktadır.

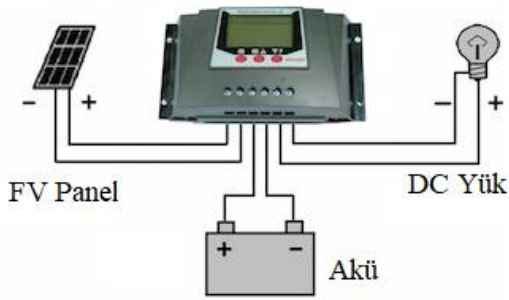
Solar şarj regülatörleri üç farklı yapıda üretilmektedirler. Bunlardan ilki belirli bir gerilime ulaşıldığında güneş panelini röle ya da MOSFET kullanarak on-off yapan ve bir ya da iki kademeye sahip şarj regülatörleridir. Başlangıçta maliyet avantajı sağlıyor görünse de, uzun süreli performansta akünün ömrünü kısalttığı için bakım ve yedek malzeme maliyeti daha yüksektir.



Şekil 4.19. On-Off solar şarj regülatörü devre yapısı diyagramı

İkinci tür solar şarj regülatörü ise, üç kademeli darbe genlik modülasyonu teknolojisi ile çalışan regülatör modelidir. PWM (Pulse Width Modulation) şarj regülatörü sürekli olarak akünün durumunu kontrol etmekte ve duruma göre aküye gönderdiği voltajın süresini ve periyodunu ayarlayabilmektedir. PWM teknolojisi yapmış olduğu anahtarlama sayesinde panellerden düzenli voltaj gelmesi zorunluluğunu ortadan kaldırır. Bu sayede şarj regülatörü, panel ve batarya gerilimini takip ederek uygun darbe genişliğini ve frekansını belirleyerek aküleri şarj eder.

Diğer solar şarj regülatörü modeli ise MPPT (Maksimum güç noktası takibi) özelliğine sahip regülatörlerdir. Bu voltaj regülatörleri çok büyük akü kapasitesine sahip sistemlerde tercih edilmektedir. Verimlilikleri %94-%98 arasında olan bu voltaj regülatörleri PWM şarj regülatörlerine göre panelden alınan enerjide %30'a kadar daha yüksek verim sağlamaktadır (Baş, 2016).



Şekil 4.20. Solar şarj regülatörü bağlantı şeması

Solar şarj regülatörlerinin ters akım koruması, düşük voltaj koruması, ışıklandırma kontrolü gibi özellikleri vardır. Panellerde fotovoltaik üretimin olmadığı saatlerde ters akım koruması sayesinde panellerin aküleri boşaltması engellenir. Akülere bağlı olan DC yüklerin daha önce ayarlanan belirli bir voltaj değerinin altına düşmesi durumunda regülatörün düşük voltaj koruması özelliği devreye girerek akımın kesilmesini sağlar ve akülerin boşalması engellenir. Şarj regülatörü üzerinden istenilen saatlerde DC aydınlatma fonksiyonunun kullanılabilmesi için ayarlanabilir ışıklandırma kontrolü özelliği mevcuttur.

4.4.5. Elektriksel bağlantı elemanları

Fotovoltaik enerji tesislerinde kullanılmak üzere özel olarak geliştirilen, FV panellerde üretilen elektrik enerjisinin en az kayıpla şebekeye iletilmesini amaçlayan kablo ve şalt malzemeler üretilmiştir. Sistemin geneli düşünüldüğünde kablo kayıplarının %1'in altında olması hedeflenmelidir. Kayıpların bu sınır içerisinde kalması için kablo kesiti ve uzunluklarının doğru hesaplanması gerekmektedir. Kabloda meydana gelen kayıpların hesaplanabilmesi için;

$$P = I^2 \cdot R$$

Formülü kullanılır. Burada I kablunun taşıyacağı akımı, R ise kablunun direncini ifade etmektedir. Kablo direncini hesaplamak için ise;

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

Formülü kullanılır. Formülde ρ kablo içerisindeki iletkenin iletkenlik katsayısını, l kablonun uzunluğunu ve A iletkenin kesitini ifade etmektedir.

Solar Kablo seçerken dikkate alınması gereken birçok husus vardır. Bunlardan en önemlileri kablonun EN 60364-7-712 nolu standarda uygun olması, aşırı soğuk havalara ve aşırı sıcak havalara karşı dayanıklı olmaları, yangına dayanıklı olmaları ve mekanik etkilere karşı dayanıklı olmalarıdır. Ayrıca UV ışınlarına dayanımı olan, esnek çift izolasyonlu kılıf sistemine sahip olmalıdır. İletken yapısı elektrolitik bakır olmalıdır. Solar panellerden alınan enerjinin en az kayıpla eviricilere ulaşması için panel-evirici arasındaki DC akım mesafesinin olabildiğince kısa tutulması gerekmektedir.

DC kabloların diğer donanımlara girişlerini veya birbirleri ile irtibatlarını oldukça kolaylaştırarak iletkenlerin birbirlerine sağlıklı temasını sağlamak için MC4 konnektörleri kullanılmaktadır. Bu MC4 konnektörler kendi içerisinde kilit özelliğine sahip olmakla birlikte su ve toz geçirmez yapıdadırlar.



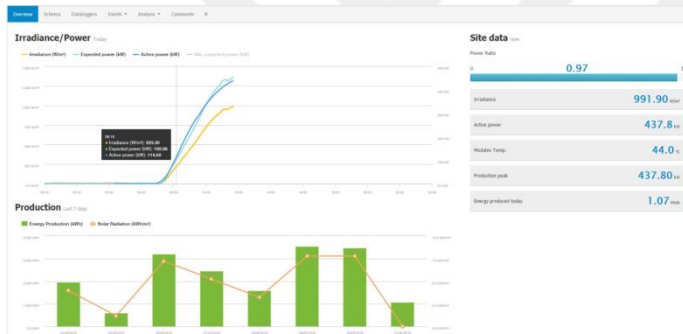
Resim 4.1. MC4 konnektör görüntüleri

Solar tesiste oluşabilecek can ve mal kayıplarının önlenmesi ve elektriksel bir hatada sistemin hasar görmesinin engellenmesi için bazı koruyucu ekipmanlar kullanılmalıdır. Bu maksatla FV dizileri korumak için panel çıkışlarının pozitif ve negatif uçlarına ayrı ayrı DC otomatik sigortalar monte edilmektedir. Yüksek gerilim dalgalanmalarından ve yıldırım gibi atmosferik olaylardan tesisi korumak için EN 62305-2 standardına uygun DC parafudrlar kullanılmalıdır. Hatlarda oluşacak ani yüksek akım diğer donanımlara ulaşmadan parafudr aracılığıyla topraklanmış olacaktır. AC tarafın güvenliğini sağlamak için bu şalt malzemelerin alternatif akıma uygun modelleri, aynı şekilde AC taraf tesisatında da bulunması gerekmektedir (Özgün, 2018).



Resim 4.2. DC sigorta ve parafudr örnek görüntüleri

Fotovoltaik tesislerde bulunması gereken önemli bir husus da üretilen enerji verilerinin otomatik olarak izlenerek kayıt altına alınmasıdır. Santrali oluşturan ve doğrudan üretime katkı yapan ve teknik özellikleri bilinen güneş paneli, evirici, ışınım sensörü ve sıcaklık sensörü verilerinin beklenen ve gerçekleşen değerlerinin karşılaştırılması, sistemin kendi içerisinde karşılaştırılması yapılarak, sistem işletmecisine gerekli durumlarda önem seviyesine göre uyarı ya da hata mesajlarının otomatik gönderilmesi sağlanmalıdır.



Resim 4.3. Fotovoltaik tesis verilerini uzaktan izleme sistemi ekran görüntüsü

Özellikle yeni sürüm eviriciler aracılığıyla, panellerden gelen DC voltaj değerlerini, toplam çalışma süresini ve saatlik enerji üretim verilerini, karbon salınımı azaltım bilgileri ve hata kayıtları gibi birçok veriyi okunabilmektedir. Bu bilgiler bir bilgisayarda depolanabileceği gibi gelişmiş yazılımlar vasıtasıyla web üzerinden uzaktan takip sistemiyle de izlenebilir.

Solar enerji sistemleri tesislerinde üretilen elektrik enerjisi on-grid sistemle şebeke enerjisi ile senkronize edilmiş ise üretilen enerji ile şebekeye verilen enerjinin ayrı ayrı hesaplanması ve daha sonra mahsuplaşma işleminde kullanımı için çift yönlü sayaç kullanılması gerekmektedir. Tesisin büyüklüğüne göre şebeke bağlantı tipinde de farklılıklar olabileceği için çift yönlü sayaçlar tek fazlı veya üç fazlı olarak üretilmektedirler. Çift yönlü sayaçlar sahip oldukları haberleşme modülleri vasıtasıyla

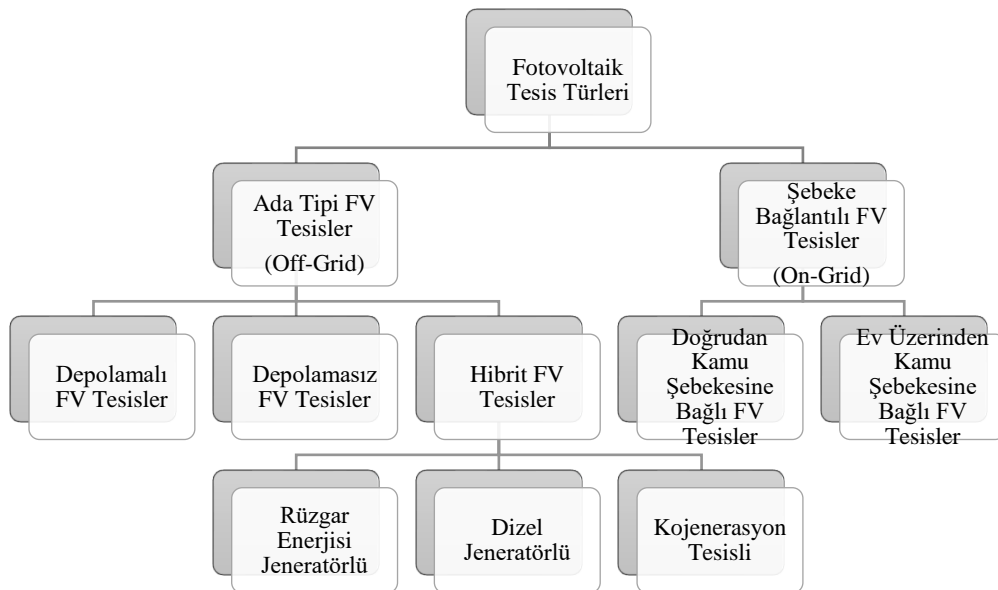
enerji üretim ve tüketim verilerini hem enerji dağıtım şirketine hem tesis yöneticisine uzaktan takip sistemi üzerinden bildirebilmektedirler (Ersoy, 2017).

4.5. Kullanım Amacına Göre Fotovoltaik Tesis Türleri

Fotovoltaik enerji tesisleri, kuruluş amacına göre ada sistemleri(off-grid) ve şebeke bağlantılı(on-grid) sistemler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Ada tipi fotovoltaik enerji tesislerinin kurulum güçleri, tüketim enerji ihtiyacına göre ayarlanır. Fotovoltaik enerjinin tüketimden fazla olan üretim kısmı için genellikle depolayıcılar(aküler) kullanılır. Ada tipi fotovoltaik tesis olarak kabul edilen, bir rüzgâr ya da dizel jeneratörü gibi başka bir elektrik kaynağıyla destekli tesis türlerine ise fotovoltaik-hibrit tesisi denmektedir.

Şebeke bağlantılı(on-grid) sistemlerde, üretilen fazla enerji depolama sistemine değil de elektrik şebekesine transfer edilir. Dünya çapındaki FV tesislerin çoğu şebeke bağlantılı tesisler olarak işletilmektedir. Ülkelerin yerli enerji yatırımını teşvikleri nedeniyle üretilen elektriğin doğrudan şebekeye satılması, on-grid FV tesis sahipleri için ciddi bir mali kaynak ve tesis kurulum giderlerinin kısa sürede amorti edilmesini sağlayan avantajlı bir imkân olmaktadır. Dünyadaki FV tesislerin %90'ı kadarı şebeke bağlantılı olarak kurulan tesislerdir.

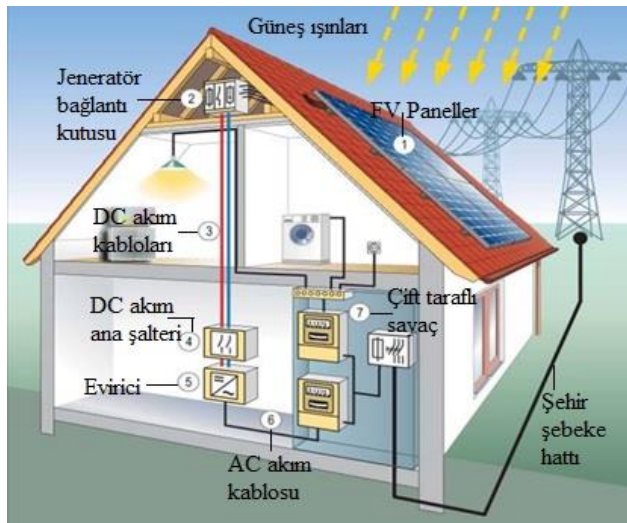
Çizelge 4.1. Kullanım amacına göre fotovoltaik tesis türleri şeması



4.5.1. Şebeke bağlantılı (on-grid) FV tesisler

Dünya genelinde kurulan fotovoltaik tesislerin büyük bir kısmı şebeke bağlantılı tesislerdir. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IREA)'na göre, 2019 yıl sonu itibariyle küresel şebekeye bağlı güneş enerji santrali kurulu gücü 580,1 GW' a ulaştı. Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler, üretilen elektriğin akülerde depolanması yerine üretim yerinde tüketilmesi prensibine dayalı çalışmaktadır. Atmosferden gelen güneş ışınlarının solar modüller üzerine temas etmesi ile DC elektrik enerjisi üretilir. Üretilen enerji yüksek çevrim gücü olan, şebekeye bağlanabilen eviriciler ile şehir şebeke sistemine transfer edilir. Böylelikle panellerden üretilen enerji doğrudan şebeke sistemine gönderilmiş olur. Bir FV tesis, genel olarak aşağıdaki şu bileşenlerden oluşur; FV jeneratör (seri veya paralel bağlı birden fazla FV modül) ve montaj çerçevesi, jeneratör bağlantı kutusu (güvenlik teknolojisi dahil), doğru akım kablo tesisatı, doğru akım ana şalteri, evirici, alternatif akım kablo tesisatı, elektrik dağıtım için elektrik giriş ve besleme saatleri ile tüketici bağlantısının bulunduğu sayaç dolabı.

Şebeke bağlantılı sistemler eviricilerin kontrolleri ile şebekenin özelliklerine uygun olarak çalışırlar. Ülkelerin şebekeleri için belirledikleri voltaj, frekans ve harmonik seviyeleri evirici üzerinden ayarlanarak daha güvenli ve standartlaşmış bir elektrik üretim sistemi kurulmuş olur. Şebeke enerjisinin kesilmesi durumunda da adalanma etkisinin oluşmasını engellemek için evirici milisaniyeler içerisinde enerji çıkışını keserek şebeke güvenliğini sağlayacaktır.

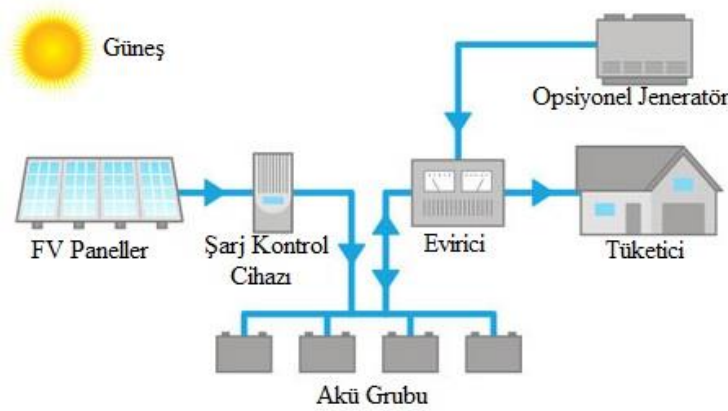


Şekil 4.21. Şebeke bağlantılı örnek tesis şeması

On-grid solar sistemlerin avantajlarını değerlendirecek olursak öncelikle sistemde akü gibi depolama birimleri kullanılmayacağı için depolama için ayrıca bir maliyet oluşmayacaktır. Aynı zamanda sisteme yakın yerlerde tüketim olacağı ve depolama olmadığından enerji çevrimi daha az olacağı için enerji kaybı minimum düzeye inecektir. Üretilen enerji şebekeye bağlı olduğu için aynı zamanda üretilen enerji tüketimi karşılayamadığında şebeke devreye girecek ve enerji kesintisi oluşmayacaktır. Sistem tasarımı yapılırken, yükün tamamını karşılanması gibi bir zorunluluk olmadığı için istenilen miktara ya da alana göre tasarım yapılabilme esnekliğine sahiptir. Alan yeterli olduğu takdirde sistem kurulu gücü arttırılabilmektedir.

4.5.2. Ada tipi (off-grid) FV tesisler

Şebekeden ayrı sistemler olarak da isimlendirilen ada tipi (off-grid) tesisler, fotovoltaik teknolojisinin ilk ekonomik kullanım alanları olmuştur. Toplu enerji şebekesi üzerinden elektrik tedarikinin mümkün olmadığı, ekonomik açıdan anlamlı olmadığı ya da istenmediği her yerde, fotovoltaik ada sistemleri düşük maliyetli olarak kurulabilmektedir. Ada tipi tesislerde, enerji üretimi ile tüketimi farklı zamanlarda gerçekleşeceği için aradaki bu zaman farkının giderilmesi için enerji depolayıcılarına ihtiyaç vardır. Bu amaca uygun enerji depolayıcıları akülerdir. Ancak aküler kullanıldığında, bunların korunması, temin edilmesi ve kullanım ömrünün uzatılması için akım kontrol ünitesi olarak uygun bir şarj regülatörünün kullanımı kaçınılmazdır. Dolayısıyla sistemi oluşturan temel bileşenler, güneş paneli, akü, şarj regülatörü, inverter ve tüketicidir.



Şekil 4.22. Şebekeden ayrı (ada tipi) örnek tesis şeması

Off-grid sistemin kurulumundan önce tüketim gücü hesabının yapılması çok önemlidir. Tüketim cihazlarının güçleri, günde ne kadar süre çalışacakları detaylı olarak hesaplanıp toplam enerji ihtiyacının ne kadar olacağı belirlenmelidir.

Sistem tasarımı yapılırken uygun güçte evirici seçimi önemlidir. Kullanılacak cihazlara göre anlık çekilen enerji miktarına uygun gerilim ve güçte evirici hesaplanmalıdır. Seçilecek eviricide dikkat edilecek en önemli husus kullanılan cihazların (özellikle motorlu aletlerin) demaraj akımını kaldıracak güçte olmasıdır. Demaraj akımı nominal akımın hemen hemen 3-4 katına kadar çıkabilmektedir. İnverter beslemesi cihazın özelliklerine göre bu akımı kaldırabilecek güçte olmalıdır.

Özellikle açık arazi üzerine yapılacak olan off-grid fotovoltaik tesisin yaklaşık %20 verimini artırmak için tracker sistemi kullanılabilir. Tracker sistemi güneşi gün içerisinde takip ederek tek ya da çift eksenli olarak solar panellerin azimut açısını güneş ışınlarından optimum düzeyde fayda sağlayacak şekilde ayarlayan izleme sistemidir.

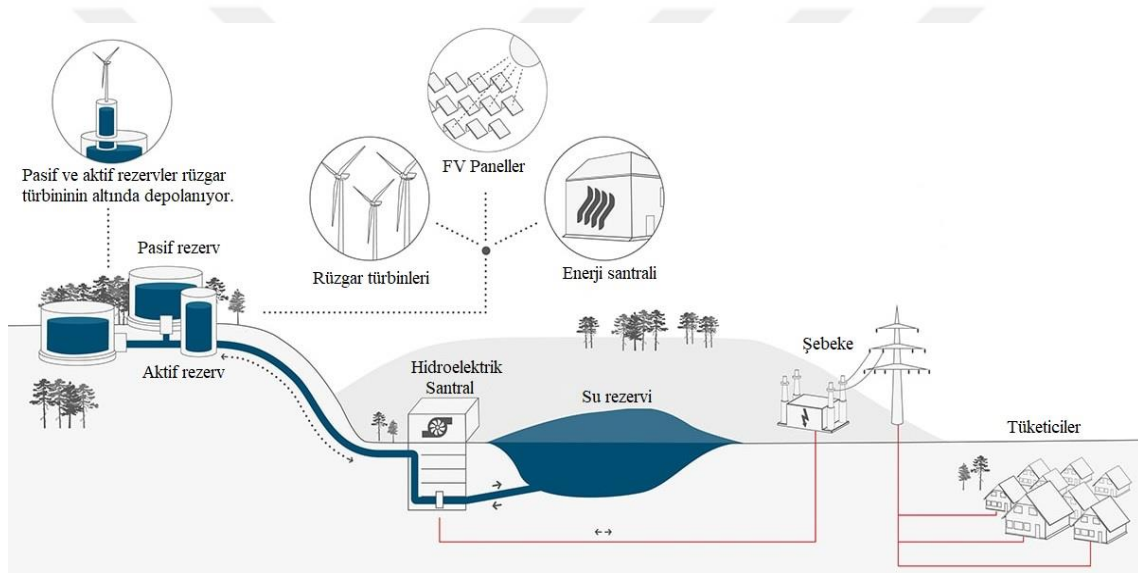
Akü grupları bu sistemde sıcaktan, rutubetten, tozdan ve gürültüden uzak tutulacak şekilde muhafaza edilmelidir. Çünkü on-grid sistemlerde evirici panellerden gelen DC akımı AC akıma dönüştürürken, off-grid sistemde aküden gelen DC akımı talebe göre yine DC' ye ya da AC akıma çevrim yapmaktadır.

Enerjinin DC olarak taşınması esnasında, mesafe arttıkça kaybedilen enerji miktarı oldukça önemli miktarlara ulaşabilmektedir. Bu nedenle güneş paneli-akü-evirici arasındaki mesafe minimum olmalıdır.

Tesis kurulum maliyetlerini amorti etme süresinin uzun olması nedeniyle, elektrik enerjisi ulaşımının olmadığı veya zor olduğu bölgelerde tercih edildiklerinden, ada tipi fotovoltaik tesisler dünya genelinde pek yaygınlık kazanamamıştır. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IREA)'na göre, 2019 yılsonu itibariyle küresel şebekeden bağımsız olan güneş enerji santrali kurulu gücü 3,4 GW' a ulaşabilmiştir.

4.5.3. Hibrit fotovoltaik tesisler

Fosil kaynaklı yakıtların tükenebilir olması ve yüksek fiyatlarından dolayı, yenilenebilir yakıtların ise enerji üretim performanslarının iklim değişikliklerine bağlı olmasından dolayı hibrit tesisler verimli ve sürekli enerji üretimi için en iyi yoldur. Hibrit sistemlerle bir enerji kaynağının üstünlüğü ile diğer kaynağın zayıf yanları kapatılabilir. Temel ilke birbirini besleyen ve tamamlayan bir sistem oluşturulabilmesidir. Bu sistemler genelde güneş, rüzgâr, dizel jeneratör, hidroelektrik ve hidrojen enerjisi teknolojilerinden birkaçını kullanarak oluşturulabilir. Kojenerasyon teknolojisiyle de hibrit sistemler kurulabilir. Kojenerasyon teknolojisiyle çalışmaya en uygun hibrit sistemi güneş enerjisi sistemleridir.



Şekil 4.23. Hibrit fotovoltaik tesis örnek şeması

Hibrid sistemler genellikle yıl boyunca en iyi performansın alınabileceği enerji üretim tesisleridir. Fotovoltaik sistemlerden kuru ve uzun güneşli yaz günlerinde en yüksek performans alınırken, rüzgâr enerjisi ve hidroelektrik enerjisi ise yağışlı ve rüzgârlı dönemlerde en iyi performans alınabilir. Dünya’da bu tür tesislerin kurulumu henüz birkaç yıllık maziye sahipken Türkiye’de de Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), 1 Temmuz 2020 itibarıyla yürürlüğe girmek üzere birden fazla kaynaktan (hibrit) üretim yapılan elektrik santrallerinin lisans süreçlerine ilişkin mevzuat esaslarını belirledi.

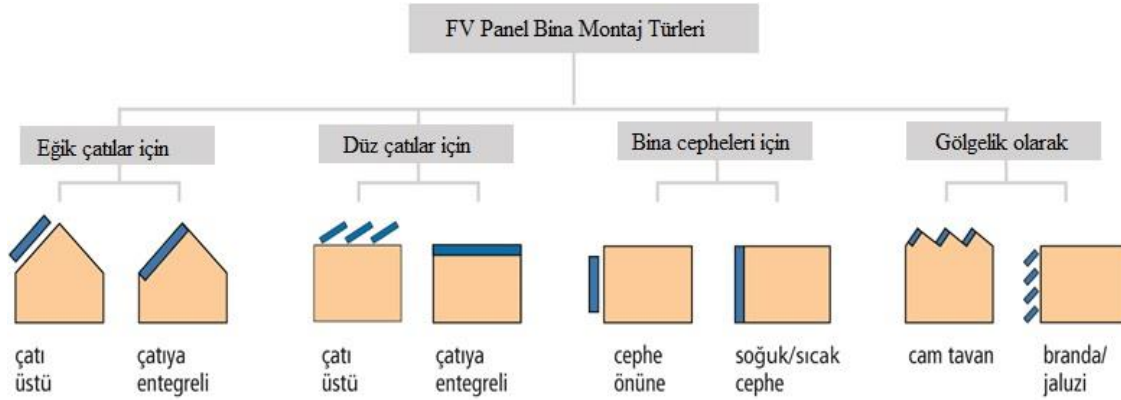
4.6. Kurulum Şekillerine Göre Fotovoltaik Tesis Türleri

Fotovoltaik enerji tesisleri kurulum şekillerine göre beş ana başlığa ayrılmaktadır. Bunlar sırasıyla çatı tipi, arazi tipi, kanal üstü tip, yüzer tip ve açık deniz tipi fotovoltaik enerji santralleridir. Bu tesis türlerinden herhangi biri kurulacak olduğunda saha fizibilitesi yapılmak zorundadır. Saha araştırmalarından elde edilen bilgiler, kurulum maliyetlerinin hesaplanması, sistem tasarımları ve genel kurulumun planlanması için tüketici talepleri ile birlikte değerlendirilmek zorundadır. Genel olarak saha fizibilitesi, FV diziler için yerin uygunluğu, iklimsel koşullar, lokasyonun gölgelenme durumu, montaj yöntemi, sistem çevre bileşenlerinin (kablolama ve şalt malzemeler) nereye konuşlandırılacağı, fotovoltaik tesisin mevcut elektrik sistemlerine bağlantı şekli gibi konuları kapsar.

4.6.1. Konut tipi fotovoltaik tesis

FV modüllerin bina çatısına veya yüzeyine uygulanan modeline konut tipi veya çatı tipi fotovoltaik enerji tesisi denilmektedir ve FV paneller bugün her yapıya uygulanabilmektedirler. Konut tipi solar enerji dışında çatı üzeri uygulamalar özellikle organize sanayi bölgelerinde, depolama alanlarında, tarım ve hayvancılık tesislerinde, büyük ticari yapılarda yani alışveriş merkezleri, oteller, hastaneler, akaryakıt istasyonları gibi oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptir.

Konut tipi fotovoltaik tesis planlanırken, bina topraklama tesisat planı incelenmeli kurulacak olan FV tesise göre topraklama güçlendirmeleri yapılmalıdır. Mevcut yapının yıldırımdan korunma ile ilgili risklerinin artmış olması muhtemeldir, paratoner sistemi güçlendirilmelidir. Mevcut yapıya ek olarak gelen kar yükü, rüzgâr yükü ve GES sisteminin kendi ağırlığından kaynaklı yük artışları hesap edilmeli, inşaat mühendisinden onaylı statik rapor alınmalıdır.



Şekil 4.24. Konut tipi fotovoltaik tesislerde panel montaj çeşitleri

Düz çatı tipi fotovoltaik panel montajı, konut veya ticari binaların çatısına güneş panellerinin en basit kurulum yöntemidir. Düz çatı güneş enerji sistemi kurulumu, FV tesisin güneşe maksimum düzeyde maruz kalmasını sağlamak için güneş panellerini belirli bir açıda yönlendirmede hareket kabiliyeti sağlar. Güneş panelleri şu üç teknikten herhangi biri kullanılarak çatı üzerine montajı yapılır; düşük düzeyde rüzgâr alan bölgelerde kullanımı mümkün olan ve güneş panellerini çatıya civatalamak yerine, panelleri taşıyan konstrüksiyonun ayaklarına beton kalıp ağırlıklar kullanılabilir. İkinci teknik olarak, mekanik bağlantı modeli olarak bilinen güneş panellerinin metal kirişler kullanılarak çatıya monte edilmesi yönetimi kullanılabilir. Metal konstrüksiyon, rüzgârlı bölgelerde dahi güneş enerjisi dizi konumlarını koruyabilir. Üçüncü teknik olarak hibrit montaj modeli olarak adlandırılan hem ağırlık ayaklar hem metal konstrüksiyon kullanılabilir (Sayın & Koç, 2011).

Eğik çatılarda ise çatının iskelet yapısına entegre edilen FV modüllerin altında su yalıtımı yapılmak zorundadır. Eğimli olması nedeniyle verimlilikleri yüksektir ama soğuk iklimlerde kar yüküne uygun hesaplamalar yapılması gerekmektedir.

Bina cephelerine yapılan FV tesislerde panellerin sisteme getireceği yük hesaplanmalı, panellerin periyodik temizlikleri düşünülmeli, tesisin verimini etkilemeyecek şekilde cephe su yalıtımı yapılmalı, yapının araziye konuşlandırılmasında tesisin kurulacağı cephede en az gölge oluşacak şekilde konumlandırma yapılmalı ve bina estetiği düşünülmelidir.

Güneş kırıcı olarak da planlanan FV tesisler kurulabilir. Bu maksatla kurulan fotovoltaik tesisler hem güneş enerjisini toplamak hem de mekâna giren ışığın kontrolünü sağlamak

açısından verimli bir kullanıma sahiptir. Binaya sonradan entegre olabilen bu paneller için ek bir konstrüksiyon gereklidir.



Resim 4.4. 650 adet fotovoltaik panel ile kaplanmış Los Angeles Lisesi

10 Mayıs 2019 tarihinde Resmî Gazete 'de yayımlanarak yürürlüğe giren Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği ile Türkiye'de lisanssız üretim sınırı konut tipi FV tesisler için yukarı çekilmiş oldu. Güneş enerjisine dayalı üretim tesislerinin sadece çatı ve cephe uygulaması olarak gerçekleştirilenlerine yönelik, mesken aboneleri için 10 kW, tüm işletmeler ve kamu kurumlarına 5 MW'a kadar ürettikleri enerjinin öz tüketim fazlasının satılabilmesinin önü açıldı (Enerji ve Çevre Dergisi, 2019).

4.6.2. Arazi tipi fotovoltaik tesis

Arazi tipi fotovoltaik tesis kurulumları genellikle ticari amaçla gerçekleştirildikleri için lisanslı ve lisanssız fotovoltaik tesisler olarak iki kısma ayrılırlar. Kurulu gücü 1 MW ve altında olan santraller lisanssız, 1 MW'tan büyük tesisler için lisanslı fotovoltaik tesisler denilmektedir. Her iki tür fotovoltaik tesisin kurulum öncesinde yapılması gereken fizibilite çalışması aynıdır. Öncelikle arazinin en az 6 aylık güneşlenme raporu çıkartılmalıdır. Arazinin güneşe eğimli olup olmadığı ve arazide yapılması gereken düzenleme ve hafriyat işleri hesap edilmelidir. Arazinin DSİ sulama programı içerisinde olmaması gerekmektedir. Tarımsal arazi statüsü taşımamalıdır, bazı bölgelerde zeminde 50 cm yüksekliğinde toprak olup olmadığına bakılırken bazı bölgelerde 20 cm yüksekliğinde toprak olup olmadığına bakılmaktadır. Civarında ekili arsa olup olmadığı belirleyici etkenler arasındadır. Arazide gölgeleme yapacak nesnelerin (ağaç, direk vs.) gölge

hesaplamaları yapılmalıdır. Arazinin etrafında taş kırma ocakları, asfalt şantiyeleri, toprak zemin anayol güzergâhı gibi tozlanma yapacak bir ortamın olmaması gerekmektedir. Bölgenin iklimsel koşulları ve bakım giderleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Lisanslı ile lisanssız fotovoltaik tesis kurulumu arasındaki en önemli fark şebekeye bağlantı noktasıdır. Lisanslı elektrik üretiminde yasal olarak tesise dahil edilecek trafo köşkü vasıtasıyla şebeke iletim barasına bağlanırken lisanssız üretimde trafo gerektirmeden dağıtım barasına bağlanabilmektedir.

Güneş paneli konstrüksiyon sistemleri, yapılarda tüm taşıyıcı sistemleri çelikten ve alüminyumdan üretilen geniş açıklıklara ve yüksekliğe ihtiyaç duyulan mekânlarda kullanılan çelik yapı sistemidir. Geçmişte sadece alüminyum kullanılmakta idi, ancak sağlamlıkları ve uzun ömürleri nedeniyle galvanizli çelikten yapılmış konstrüksiyonlar kullanımda ağırlık kazanmaya başlamıştır. Her iki malzeme birlikte kullanılırsa kontak korozyonu söz konusu olabilir. Bu da alüminyum profillerin epoksi kaplanmasıyla veya plastik ara elemanlar kullanılarak önlenir.

Hareket kabiliyetine göre konstrüksiyonlar sabit tip, tek eksenli ve çift eksenli olmak üzere üçe ayrılır. Sabit tip konstrüksiyonlar, montajının yapıldığı pozisyonu korudukları için güneş ışınlarından optimum verim alınacak açı ve pozisyonda montajı yapılır.



Resim 4.5. Sabit tip FV panel konstrüksiyonu

Tek eksen kontrollü konstrüksiyon sisteminde panel sadece tek eksenle hareket etmektedir ve bu sistem ile tesisin üretim verimliliğini yaklaşık %20-25 oranlarında arttırmak

mümkündür. Tek eksenli kontrol sistemlerinde eksen doğu-batı hattı üzerinde olup panel kuzey-güney doğrultusunda hareket edebilir. Resim 4.6'da Güney Afrika'da bulunan Nelson Mandela Üniversitesi tarafından kurulumu gerçekleştirilen 1MW kurulu gücündeki tek eksen kontrollü fotovoltaik tesis görüntüsü sunulmaktadır.



Resim 4.6. Tek eksen kontrollü FV panel konstrüksiyonu

İki eksenli kontrol sistemlerinde ise eksenlerden biri azimut eksenini, diğeri ise zenith ekseninde hareket etmektedir. İki eksenli kontrol sistemi ile panel verimliliği %30-40 oranlarında iyileştirilebilmektedir. Azimuth eksenini panelin doğu-batı hattındaki hareketinin, zenith eksenini ise panelin yüksekliğinin ayarlandığı eksenlerdir. Resim 4.7'de İspanya Granada'da bulunan 50 MW kurulu gücündeki çift eksen kontrollü fotovoltaik tesis görüntüsü sunulmaktadır.



Resim 4.7. Çift eksen kontrollü FV panel konstrüksiyonu

Panel taşıyıcısı metal profillerin mukavemet hesapları rüzgâr basıncında eğilmeye, burkulmaya, kırılmaya ve kar vs. ile çökmeye, zaman içindeki korozyona (oksitlenme vb) erken yorulmaya, yaşlanmaya karşı dayanıklılık kriterleri eksiksiz yerine getirilmeli ve bunların hesapları doğru yapılmalıdır. Rüzgâr gücünün panel yüzeyinde oluşturduğu F kuvveti 90⁰C'lik yüzeyde;

$$F = \rho \cdot V^2 \cdot A$$

Formülü ile hesaplanır. Burada ρ hava yoğunluğunu, V rüzgâr hızını ve A panel yüzey alanını ifade etmektedir. Paneller azimut açısı nedeniyle yere yaklaşık 30⁰C eğimli monte edildikleri için;

$$F = \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot \sin 30$$

Formülü ile panellere gelen rüzgâr yükü hesaplanmış olacaktır.

4.6.3. Kanal üstü tip fotovoltaik tesis

Çevre dostu elektrik enerjisi üretimi olarak kabul edilen fotovoltaik enerji sistemlerinin içerisinde sağladığı faydalar açısından ilk sıralarda yer alabilecek tesis türü, sulama kanalları üzerine kurulacak olan fotovoltaik enerji üretim tesisidir. Su kanalları üzerine kurulan güneş enerji sistemleri, diğer sistemlere göre pek çok avantaja sahiptir. Öncelikle, daha ideal değerlendirilebilecek olan araziler fotovoltaik tesis kurulumu için işgal edilmemektedir. Diğer yandan kanal üzerine kurulan fotovoltaik paneller, kanal içerisindeki suyun güneşe maruz kalması engelledikleri için buharlaşmayı azaltacağından suyun kayba uğramadan kanal içerisinde ilerlemesini sağlayacaktır. Ayrıca fotovoltaik panellerin ortam sıcaklığı azaldıkça daha verimli çalıştıkları bilinmektedir. Kanal içerisinde geçen suyun fotovoltaik panellere soğutucu etkisi nedeniyle paneller daha verimli üretim yapacaklardır.

Sulama kanalı üzerine kurulan fotovoltaik tesislerin taşıyıcı konstrüksiyonu çelik iskelet yapısında imal edilip konstrüksiyon ayakları, beton kaide ayaklar vasıtasıyla kanal kenarlarındaki toprak zemine sabitlenir. Sabit sistem üretim tesisi kurulacak ise lokasyonun azimut açısı belirlenerek panellerin ideal güneş açısına göre çelik konstrüksiyon hazırlanır ve üzerine paneller sabitlenir. Tek eksenli güneş takip sistemine

sahip tesis kurulacak ise yatay kirişler monte edildikten sonra paneller takip donanımı ile birlikte kirişlerin üzerine montelenir.

Hindistan 2014'te BM Genel Sekreteri Ban Ki-Moon'un da açılışını yaptığı 10 MWp'lik bir proje gerçekleştirerek kanal üstü fotovoltaik tesisin dünyadaki öncüsü oldu. 3,6 km uzunluğa sahip Vadodara şehri sulama kanalının üzerine yaklaşık 33 816 adet fotovoltaik panel ile kaplayarak 16 hektar alana kurulabilecek olan 10 MW kurulu gücünde solar tesis kanal üstü olarak kurulmuş oldu. Hindistan'da Yeni ve Yenilenebilir Enerji Bakanlığı (MNRE)'nin da destekleri ile kanal üstü fotovoltaik tesislerin kurulu gücü günümüzde 100 MW'a ulaşmış durumdadır. Resim 4.8'de Hindistan'ın Gujarat eyaletine bağlı Vadodara ilinde sulama kanalı üzerine kurulan 10 MW kurulu gücündeki fotovoltaik tesis görüntüsü sunulmaktadır (Hemetsberger, Schmela, & Chianetta, 2019).



Resim 4.8. Hindistan'daki 10 MW kurulu gücünde kanal üstü FV tesis görüntüsü

Türkiye'de de 2017 yılında "Güneş Pili Sulama Kanalı Pilot Projesi" kapsamında GAP Tarımsal Araştırma Enstitüsü (GAPTAEM) tarafından Güneydoğu Anadolu Projesi Bölge Kalkınma İdaresinin (GAP BKİ) desteğiyle Şanlıurfa'da 160 kWp kurulu gücünde Resim 4.9'da görüntüsü sunulan ilk kanal üstü fotovoltaik tesis kurulumu gerçekleştirildi. Tesis 56 adet ünite ve her bir üniteye 11 adet 260 Wp'lik fotovoltaik panelden, toplamda ise 616 adet solar panelden oluşmaktadır.



Resim 4.9. Şanlıurfa’da kurulan 160 kWp kurulu gücünde kanal üstü FV tesis görüntüsü

4.6.4. Yüzer tip fotovoltaik tesis

Yüzer tip fotovoltaik enerji santralleri, standart güneş enerji santrali ile yüzen platform sisteminin birleşiminden oluşmaktadır. Özellikle tarımsal ve yapısal kullanım için yetersiz alana sahip Asya ülkelerinde 2006’dan sonra ilk denemelerine başlanan yüzer tip fotovoltaik tesisler daha sonra Avrupa ülkelerinde ve Amerika’da da ilgi görmüştür.

İlk olarak 2007 yılında Japonya Aichi’de yer alan bir Hidroelektrik Barajına 20 kW kurulu gücünde bir yüzer fotovoltaik sistem kuruldu. İkinci tesis olarak 2008’de ABD’nin Kaliforniya eyaletinde bir şarap imalathanesindeki yapay göletin üzerine SPG Solar Şirketi tarafından 200 kW gücünde fotovoltaik sistem kuruldu. Bu iki tesisten sonra dünyada farklı coğrafyalarda farklı iklimlerde farklı amaçlarla bilinen yirminin üzerinde Yüzer Fotovoltaik Sistem kurulmuştur. Şu ana kadar resmî kabulü yapılmış ve şebekeye elektrik beslemeye başlamış en büyük yüzer GES, Çin’de, eskiden kömür üretim bölgesi olan Anhui’de CECEP şirketi tarafından kurulan toplam 70 MW kurulu gücündeki yüzer güneş enerji tesisidir.

Dünya’da 2019 yılı sonu verilerine göre kurulan toplam 250 MW’lık yüzer güneş enerji santrallerinin 120 MW’ına sahip olan Çin yüzer GES konusunda en büyük paya sahiptir. Onu yaklaşık 86 MW kurulu güçle Japonya takip etmektedir. Türkiye ise toplam 250 kWp kurulu güçle henüz yüzer GES konusunda başlangıç aşamasındadır.

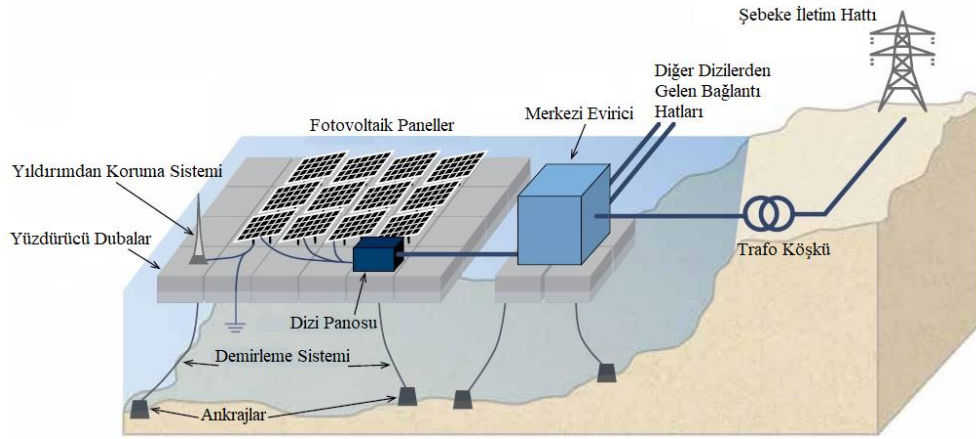
Yüzer fotovoltaik tesislerin Türkiye'deki potansiyeli

2018 sonu itibariyle Türkiye'de toplam 8 182 km² yüzey alanına sahip 46 adet doğal göl, toplam 2 609 km² yüzey alanına sahip 13 adet yapay göl bulunmaktadır. Toplam baraj sayısı 821 adet olup yüzey alanlarının toplamı yaklaşık 16 000 km² dir. Toplam gölet sayısı ise 512'dir. Ülkemizde son zamanlarda bu göl ve göletlerin bazılarında yüzer tip fotovoltaik enerji santrali planlaması yapılmakta olduğu akademik çalışmalara yansımaktadır (Özaltın & Binark, 2021) (Ateş, Yılmaz, & Gülgen, 2020).

Günümüz teknolojisi ve piyasa verilerine göre 270 Wp'lık standart bir polikristalin FV panel kullanılarak yüzer FV sistem tasarımı gerçekleştirildiğinde, yaklaşık olarak 11 000 m²'lik araziye 1 MW'lık yüzer FV sistem kurulumu gerçekleştirilebilmektedir. Türkiye'nin sahip olduğu yaklaşık toplam 26 000 km²'lik göl-baraj yüzeyinin %1'i olan 2 600 km² su yüzeyi fotovoltaik tesis olarak değerlendirildiğinde yaklaşık 236 GW kurulu gücünde tesis elde edilmiş olur. Bu da Türkiye'nin 2020 yılında sahip olduğu santrallerin kurulu gücünün iki katına denk gelmektedir (Enerji İşleri Genel Müdürlüğü Yatırımlar Dairesi Başkanlığı, 2020).

Yüzer tip fotovoltaik tesis bileşenleri

Yüzer tip fotovoltaik enerji tesisi, on-grid yapıya 1 MW kurulu gücün üzerinde kapasiteye sahipse öncelikle yüzdürücü bir sisteme, yüzen bu sistemi sabitlemek için demirleme sistemi, solar panel ünitelerine, sualtı kablolarına ve şebekeye bağlantı yapılabilmesi için evirici ve trafo merkezine sahip olmalıdır. Şekil 4.25'te on-grid sisteme sahip yüzer tip fotovoltaik tesisin bileşenlerini gösteren temsili şema sunulmaktadır.



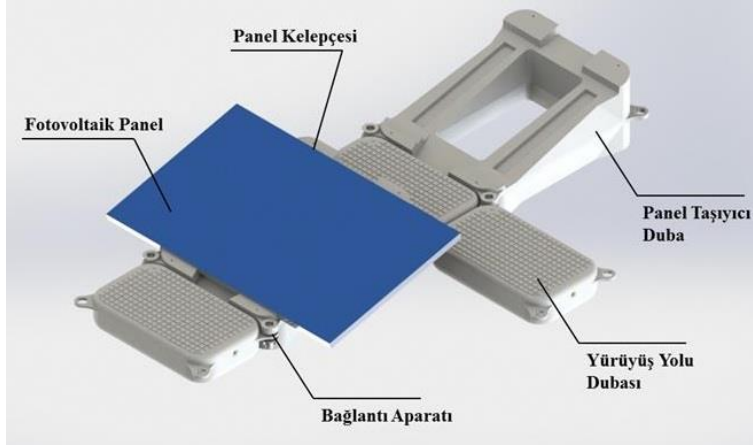
Şekil 4.25. Yüzer FV tesisin bileşenlerini gösteren şema

Yüzdürücü sistem (duba)

Dubalar, suyun üzerinde yüzdürmeyi ve yük taşımayı sağlayan sistemlerdir. Yüzen FV sistemlerde kullanılan mekanik ve elektriksel bileşenler bu yüzdürücü sistemler üzerine monte edilirler. Kullanım tiplerine göre panel taşıyıcı duba ve yürüme yolu dubası olarak iki ana gruba ayrılırlar. Yüzer fotovoltaik tesislerin modülleri için temel malzemeler plastik şamandıra elemanları ve paslanmaz çelik malzemelerden oluşur. Plastik yapılar LUPOLEN 5261Z veya PEAD ile yapılır, bunlar deniz ve askeri alanlarda iskelelerin inşası için kullanılan malzemelerdir. PEAD malzemesinin maliyeti yüksektir.

Diğer malzemelerin dezavantajları ve maliyet faktörleri nedeniyle HDPE (High Density Polyethylene) malzemesi yüzen güneş sistemleri için en yaygın kullanılan malzeme konumundadır.

Yüksek yoğunluklu polietilen malzemeden üretilen dubalar ultraviyole ışınlarına ve korozyona karşı dayanıklıdır. Yaklaşık 210 km/h rüzgâr etkisine karşı dayanıklı olan HDPE dubalar 40 yıldan fazla kullanım ömrüne sahiptir.



Şekil 4.26. FV tesis için HDPE yüzdürücü duba ve aksamı

HDPE, petrolden elde edilen, molekül kütlesi 150 000-400 000 civarında bir polimer olan, yüksek yoğunluklu polietilen malzemedir. Yüksek yoğunluklu olması nedeniyle suya ve kimyasal maddelere karşı direnci diğer polietilenlere göre daha yüksektir. Yüksek yoğunluklu polietilen, darbelere karşı dayanıklı, kolay üretilebilen özelliğe sahip bir malzemedir. Mekanik özellikleri çok iyi olup, özellikle darbe ve çekme dayanımları yüksektir. Çekme dayanımı 225-350 kg /cm² civarındadır. Sıcaklık dayanımı 100 °C'nin üzerindedir (Dai, ve diğerleri, 2020).

Kir ve pas tutmaz, bununla birlikte toksik madde içermez ve temizlenmesi çok kolaydır. Koruyucu bir kaplamaya ihtiyaç duyulmaz. Çelik, alüminyum veya kompozit malzemelere göre daha kolay montaj yapılır, ağır ekipmana ihtiyaç duyulmaz. HDPE malzemelerin geri dönüşümü mümkündür.

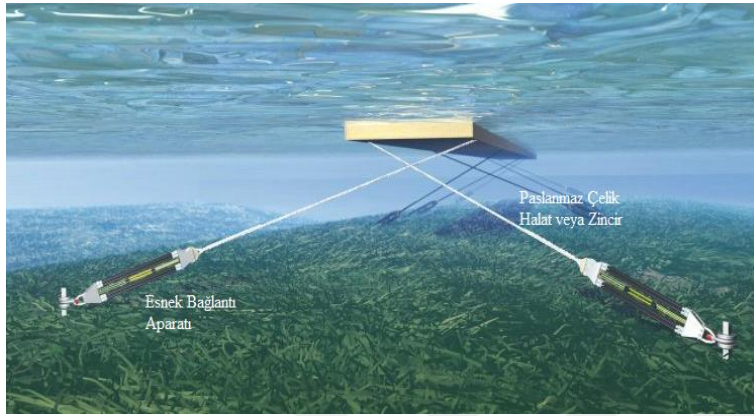
Yüzdürücü duba sistemi kurulurken, fotovoltaik panel boyutları ve eğim açısı, kurulacak ünite sayısı, gölge etkilerini önlemek için panel sıraları arasındaki mesafe ve operasyonel bakımı kolaylaştırmak için erişim yolları hassasiyetle analiz edilmelidir (Kim, Yoon, Choi, & Choi, 2016).

Demirleme sistemi

Demirleme, yüzen bir yapının sabitlenebileceği sürekli yapıyı ifade eder. Yüzen fotovoltaik tesisin su üzerindeki serbest dolaşımını önlemek için bir kayaya veya zemine sabitlenmesi gerekmektedir. Ağırlık bağlanan halat ya da zincirin ucundaki ağırlığın suyun

dibine oturturulması prensibine dayanan sabitleme yöntemi, en yaygın kullanılan sabitleme yöntemidir.

Su seviyesi değişiminin etkisini minimize etmek için sabitleme halat ya da zincirlerindeki gerilimin azaltılması için Şekil 4.27’de sunulduğu gibi esnek bağlantı elemanları kullanılabilir.



Şekil 4.27. Yüzer FV tesisin demirleme sistemi

Kablolama sistemi

Açık hava kullanımları nedeniyle, güneş kabloları spesifik olarak UV ışınlarına ve aşırı yüksek sıcaklık dalgalanmalarına karşı dayanıklı olacak şekilde ve hava koşullarından etkilenmeyen malzemeden yapılmış olmalıdır. Yüzer fotovoltaik panellerde üretilen elektriğin taşındığı kablolar ve haberleşme kablolarının yüzer sistemden karadaki elektrik panosuna ya da elektrik odasına taşınması için HDPE borular kullanılarak yüzdürme sistemi uygulanır. Resim 4.10’da yüzer FV panellerden merkezi evirici köşküne giden DC kabloların HDPE borular içerisinde yüzdürücü dubalar vasıtasıyla taşındığını gösteren örnek tesis görüntüsü sunulmaktadır.



Resim 4.10. Yüzer FV panellerden merkezi evirici köşküne giden DC kablo tesisatı örneği

Aynı zamanda FV paneller tarafından üretilen DC gerilime sahip elektriğin solar eviriciye taşınması için IP67 koruma sınıfına sahip kablo ve konnektörler kullanılmalıdır (Bulut, Kaplanoğlu, & Geylani, 2018).

Fotovoltaik panel sistemi

Yüzer fotovoltaik tesisler için standart kristal yapılı(monokristal/polikristal) hücre teknolojisine sahip FV paneller kullanılmıştır. Ancak deniz üzerine kurulan FV tesislerde, tuzlu su uzun vadede panel yüzeylerine tuz sisi yapacağı için panel çerçeve yapılarında daha dayanıklı malzemeler kullanılması gerekebilir. İlk yüzer FV tesislerde yüzdürücü sistem olarak HDPE borular kullanıldığı için arazi tipi FV tesislerde olduğu gibi çelik konstruksiyon üzerine panel montajı yapılmakta idi. Ancak gelişen duba teknolojisi ile Resim 4.11’da olduğu gibi panellerin direk olarak HDPE duba üzerine monte edilebileceği mekanizmalar üretilmiştir.



Resim 4.11. HDPE duba üzerine monte edilen panel sistemi örnek görüntüsü

Fotovoltaik paneller normalde 80°C sıcaklığa dayanabilecek şekilde üretilmektedirler ancak her elektronik cihazda olduğu gibi ortam sıcaklığı belirli bir sıcaklık değerinin üzerine çıktığında solar panellerin de çalışma performansları düşmektedir. Yüzer FV tesislerde panellerin altında bulunan su kütlesi soğutma vazifesi göreceği için paneller verim kaybı yaşamadan gün boyu çalışabilecektir.

Elektriksel bağlantı ekipmanları

Yüzer fotovoltaik sistemlerde ortak olarak bulunan elektriksel bağlantı ekipmanları solar evirici, akü grupları ve şarj regülatörleridir. Yüzer tip FV jeneratör ve alternatif akım şebekesi arasındaki bağlantıyı kuran bileşendir. Solar eviriciler, FV panellerden sağlanan DC gücün, istenen gerilim, güç ve frekanstaki AC güce çevirmekte kullanılan güç elektroniği devreleridir. Yüzer FV sistemlerde kullanılan solar eviriciler, merkezi, dizi ve mikro eviriciler olarak üç ana gruba ayrılmaktadır.

Merkezi evirici kullanıldığında her panel dizisinde üretilen DC güç, solar kablolar vasıtasıyla dağıtım kutularına paralel bağlantı olarak getirilir. Dağıtım kutusunda toplanan DC güç, merkezi inverterde AC güce dönüştürülerek şebekeye aktarılır. Merkezi evirici devresi, yüksek verimliliğe ve düşük maliyete sahiptir. Ancak merkezi evirici kullanılan durumlarda evirici girişine bağlanan tüm FV modül dizilerinin tiplerinin ve ortam koşullarının aynı olmasına dikkat edilmelidir. Merkezi sistemde, sistem tek bir eviriciye bağlı olduğu için bu eviricinin arızalanması durumunda tüm sistemin devre dışı kalmasına

yol açar. Resim 4.12’de Çin’in Anhui kentinde 40 MW kurulu güce sahip yüzer FV tesisinde kullanılan merkezi eviricilerin görüntüsü örnek olarak sunulmaktadır.



Resim 4.12. Yüzer FV tesisinde kullanılan merkezi evirici görüntüsü

Dizi eviricilerin yüzer FV tesislerinde kullanımı ise her bir FV diziden gelen DC güç, dizi eviriciye gelir. Böylece her bir FV modül dizisinin üretim değerlerini izleme imkânı doğmaktadır. DC kablo boyu kısalmış ve AC kablo boyu uzar, böylelikle kablo kayıpları azalır. Eviriciden kaynaklanan sorunlarda ilgili diziyeye ait üretim durduğunda diğer diziler üretime devam edeceği için üretim kaybı minimize edilmiş olur. Resim 4.13’te Singapur’da kurulan 100 kWp kurulu gücündeki yüzer FV tesiste kullanılan dizi eviricileri görüntüsü sunulmaktadır.



Resim 4.13. Yüzer FV tesisinde kullanılan dizi evirici görüntüsü

Mikro eviricilerin yüzer FV tesislerde kullanılmış örneği olmasa da mikro eviricilerde her bir FV panelden gelen DC enerji mikro eviriciye getirilir. Böylece her bir FV modülün üretim değerlerini izleme imkânı doğmaktadır. Mikro eviricilerin görevi FV paneller arasındaki yanlış eşleşme ihtimalini ortadan kaldırarak, kısmi gölgelenme, kısmi sıcaklık

farkları, modül aç farkları ve kirlilik derecelerinden kaynaklanan kayıpları minimize etmektedir.

Fotovoltaik hücreler tarafından üretilen fazla enerjinin depolanarak üretimin olmadığı dönemlerde de enerjinin kesintisiz kullanımını sağlamak için akülere ihtiyaç vardır. Yüzer tip FV tesis tarafından üretilen enerjinin depolanmasında OpzS akü ve jel akü tipleri tercih edilmektedir.

Yüzer FV tesislerde yine arazi tipi FV tesislerde kullanılan şarj regülatörleri tercih edilir. Şarj regülatörü, fotovoltaik panelden gelen akımı düzenleyerek aküye iletilmesini sağlayan birimdir. Şarj regülatörleri akünün tam dolmasını ve tam deşarj (boşalmasını) olmasını engeller. Şarj kontrol ünitesi seçimi yapılırken regülatörün ihtiyaç duyulan maksimum akıma dayanıklı olmasına ve batarya voltajı ile uyumlu olmasına dikkat edilmelidir.

4.7. Yüzer Tip ve Arazi Tipi Fotovoltaik Tesislerin Karşılaştırılması

Panel verimliliği açısından yüzer tip ve arazi tipi tesisler karşılaştırıldığında suyun buharlaşmasından kaynaklanan serinletici faktör, yüzer tip FV tesisteki panellerin daha düşük sıcaklıklarda çalışmasını sağlamakta ve panel verimliliğinin karadaki GES kurulumlarına göre yıllık %15 daha fazla olmasını sağlamaktadır. Tüm su rezervuarlarına kurulabilen yüzer GES sistemleri arazi gereksinimine ihtiyaç duymamaktadır. Dolayısıyla arazi tesviyesi ve konstrüksiyon kurulumu gibi maliyetleri de ortadan kaldırmaktadır.

Yüzer tip fotovoltaik tesislerde paneller suyun yüzeyinde bir gölge yarattığından kurulu olduğu alanda buharlaşmayı %60 civarında azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca FV paneller, suyun üzerinde yer kurulumlarına göre daha az toz barındırdığı için toz etkisi azalacağından panelin verimi artacak, bakım maliyetleri düşecektir (Sahu, Yadav, & Sudhakar, 2016).

Kısıtlı ve verimli arazileri olan ülkeler için GES kurulumuna ayrılacak toprağın tarım, madencilik, turizm gibi aktiviteler için kullanılmasını ve aynı zamanda pasif durumdaki su yüzeylerinin üretken konuma getirilmesini sağlayacaktır. Yüzer tip FV tesisler özellikle içme suyu rezervuarlarına kurulacak olan yüzer fotovoltaik tesisler fotosentezi azaltacağından alg oluşumunu engelleyecek ve suyun kalitesini artıracaktır. Yüzer tip FV

tesisler ağır malzemeler olmadan kurulabildiğinden, montajı kısmen daha kolaydır. Dolayısıyla montaj maliyetleri arazi tipi FV tesis kurulumlarına nazaran daha düşüktür.

Dezavantaj olarak yüzer tip fotovoltaik tesislerin kurulum maliyeti, arazi tipi FV tesislerin kurulum maliyetlerinden %10 daha fazladır. Fosil yakıtlı enerji üretim tesisleri ile kıyaslandığında ise yüzer tip fotovoltaik tesiste üretilen enerji fosil yakıtlı tesiste üretilen enerjiden günümüz maliyeti ile yaklaşık on kat daha maliyetlidir. Ayrıca yüzer tip fotovoltaik tesislerin ekolojik dengeye etkileri bazı sivil toplum kuruluşları tarafından takip edilmekte, güneş ışınlarının suya ulaşması engellediğinden suda yaşayan yosun ve hayvan çeşitliliğini azalacağı ve buharlaşmanın azalmasıyla atmosferin olumsuz yönde etkileneceği ileri sürülmektedir.

5. YÜZER TİP FOTOVOLTAİK ENERJİ ÜRETİM TESİSİ TASARIMI

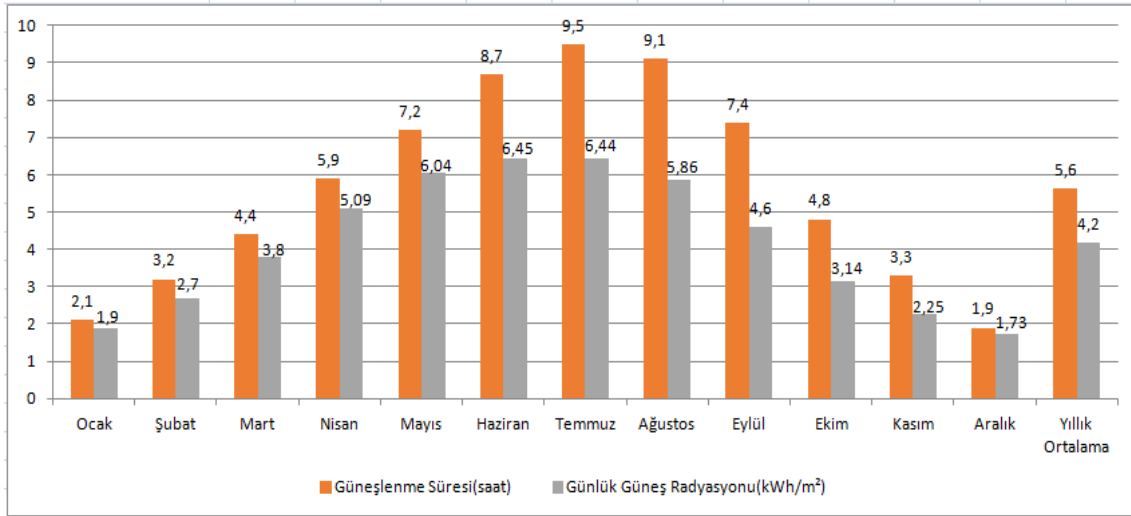
Teknik ve finansal analizini gerçekleştireceğimiz yüzer tip fotovoltaik enerji tesisinin uygulama alanı olarak Amasya ili Suluova ilçesi Tersakan çayı üzerinde bulunan ve 63 000 000 m³ su hacmine ve 5,93 km² yüzey alanına sahip Yedikır Barajı belirlenmiştir. Tesisin kurulum lokasyonu 40° 47' kuzey enlemi 35° 34' doğu boylamlarında olup montaj alanı olarak 210 m uzunluk, 62 m genişlik olmak üzere 13 000 m²'lik su yüzey alanını kaplamaktadır. Dolayısıyla göl yüzey alanının yaklaşık %0,22'lik kısmına sahip olarak gölün doğal yapısına ve barındırdığı canlı çeşitliliğine zarar vermeyecek düzeydedir. Yüzey alanı bakımından, birçok ülkede özellikle ekolojik öneme sahip göletlerin yüzeylerini kaplama sınırı olarak uygulanan %1'lik yüzey alanı kullanma sınırına ulaşmamaktadır. Şekil 5.1'de teknik analizini gerçekleştireceğimiz fotovoltaik tesisin yerleşim alanı olan Yedikır Barajı'nın PV*SOL yazılımı kullanılarak elde edilen uydu görüntüsü ve tesisin kapladığı alanı ve bu alanın baraj içerisindeki konumunu gösteren kuşbakışı yerleşim planı sunulmaktadır. Tesisin yerleşim alanı olarak barajın kuzeydoğu bölgesinin tercih edilmesinde iki neden söz konusudur. Öncelikli amaç güney cephesinin açık alan olmasını sağlayarak güneyden gelecek olan güneş radyasyonundan tesisin tam olarak istifade etmesini sağlamak, gölge oluşumuna sebep olacak herhangi bir nesne bulunmasını engellemek. İkinci amaç ise üretilen enerjinin yerel şebekeye transferini kolaylaştırmak ve enerji nakil hattı maliyetini minimize etmek için bölgesel elektrik dağıtım şirketinin mevcut trafo altyapısına tesisin yakın olmasını sağlamaktır.



Şekil 5.1. Yedikır Barajı ve yüzer tip fotovoltaik tesis uygulamasının planlanan konumunu gösteren uydu görüntüsü.

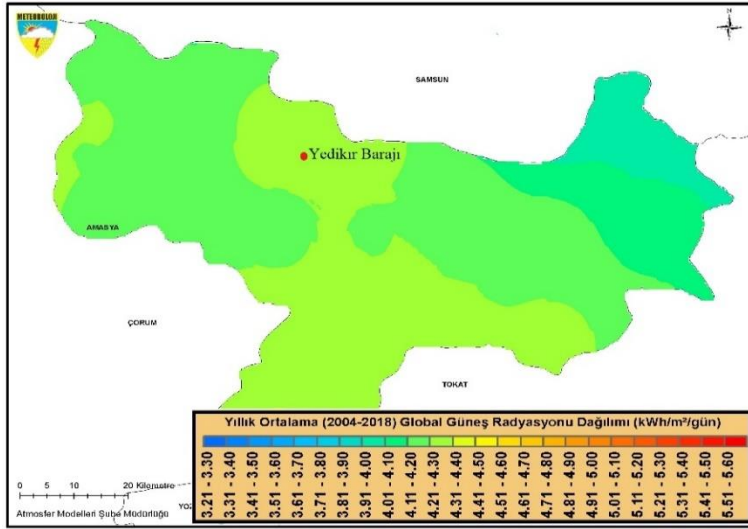
5.1. Yedikır Barajı İklimsel Koşulları ve Güneş Enerjisi Potansiyeli

Yedikır Barajı'nın güneş radyasyonu potansiyeli olarak Meteonorm veri tabanı ölçüm değerlerine göre yıllık toplam alınan güneş enerjisi miktarı $1\,424\text{ kWh/m}^2$ 'dir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün yayınlamış olduğu güneşlenme süreleri çizelgesine göre bölgenin günlük ortalama güneşlenme süresi yaklaşık 5,6 saattir. Aylık bazda incelendiğinde ise güneşlenme süresinin temmuz ayında pik yaparak 9,5 saat/gün olduğu belirlenmektedir. Şekil 5.2'de sunulan Yedikır Barajı aylık bazda ortalama günlük güneşlenme süresi ve güneş radyasyonu miktarı verilerine göre, temmuz ayında günlük ortalama güneş radyasyonu ise $6,44\text{ kWh/m}^2$ ye ulaşmakta, dolayısıyla yıl içerisinde en fazla fotovoltaik enerji üretilen ay temmuz ayı olmaktadır. Aynı şekilde aralık ayı verilerini incelediğimizde ise 1,9 saatlik ortalama günlük güneşlenme süresi ve $1,73\text{ kWh/m}^2$ 'lik günlük ortalama güneş radyasyonu ile toplamda 53 kWh/m^2 'lik fotovoltaik enerji potansiyeli ile en az üretim potansiyeline sahip ay aralık ayı olmaktadır.



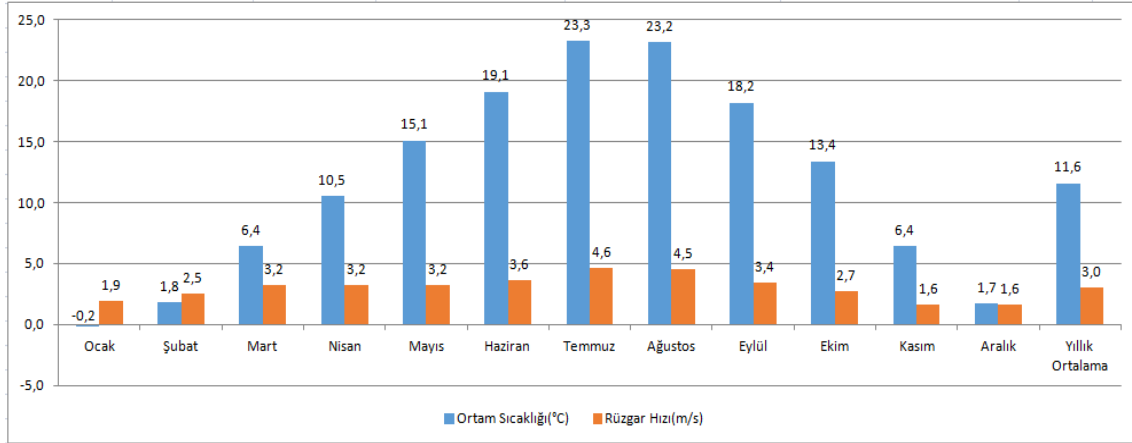
Şekil 5.2. Yedikır Barajı aylık bazda ortalama günlük güneşlenme süresi ve güneş radyasyonu miktarı.

Şekil 5.3'te Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün yıllık bazda günlük ortalama güneş radyasyonu dağılımı verileri incelendiğinde Yedikır Barajı lokasyonunun yaklaşık olarak günlük $4,2\text{ kWh/m}^2$ radyasyon değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu da tesisin, $4,48\text{ kWh/m}^2/\text{gün}$ olan Türkiye yıllık radyasyon ortalamasına oldukça yakın güneş radyasyonu miktarına sahip olduğunu göstermektedir.



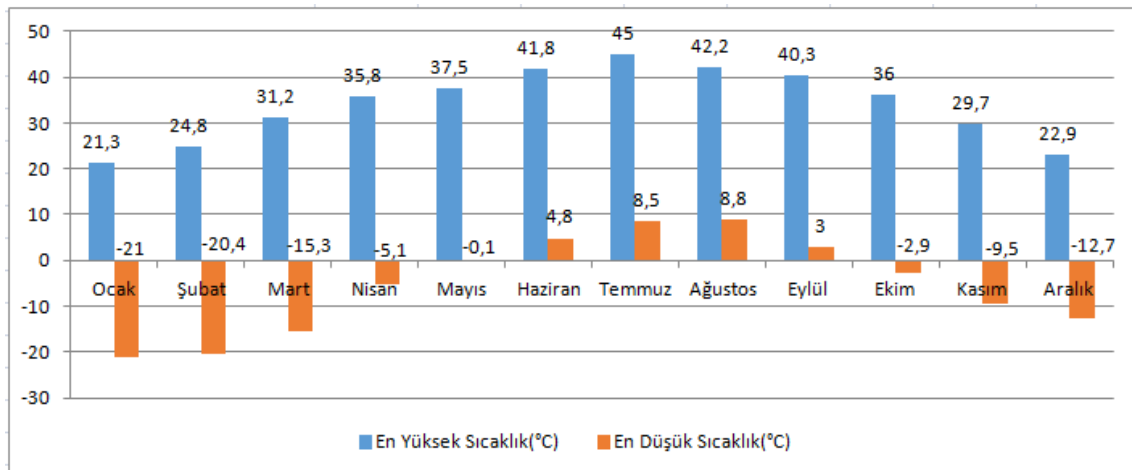
Şekil 5.3. Yedikır Barajı günlük ortalama güneş radyasyonu miktarı. (M.G.M. Atmosfer Modelleri Şube Müdürlüğü, 2021)

Kurulumu gerçekleştirilecek olan fotovoltaik tesisin performansını direkt olarak etkileyecek unsurlardan bir diğeri ise kurulumun gerçekleştirileceği ortamın sıcaklık değerleridir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün verilerine göre Amasya ili yıllık ortalama sıcaklık değeri 13,5 °C'dir, ancak lokasyon bazında incelediğimizde Meteoronorm veri tabanı ölçüm değerlerine göre Yedikır Barajı lokasyonunun yıllık ortalama sıcaklık değeri 11,6 °C'dir. Şekil 5.4'te sunulan fotovoltaik tesisin simule edildiği alanda mevcut ortalama sıcaklık ve rüzgâr değerlerini incelediğimizde, 23,3 °C aylık ortalama sıcaklık değeri ve 4,6 m/s rüzgâr değeri ile temmuz ayı sıcaklığın ve rüzgârın en yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Özellikle ortam sıcaklığının yükselmesi panel verimini olumsuz etkileyeceğinden panel sıcaklığını düşüren su yüzeyi, rüzgâr hızı gibi koşullar tesisin enerji üretim verimine olumlu katkı sağlamaktadır.



Şekil 5.4. Yedikır Barajı aylık bazda ortalama sıcaklık ve rüzgâr hızı miktarları

Aynı şekilde Şekil 5.5'teki tesis lokasyonuna ait en yüksek sıcaklık değerlerine bakıldığında özellikle haziran, temmuz, ağustos, eylül aylarında ortam sıcaklığının 40 °C'lerin üzerine çıktığı görülmektedir. Temmuz ayında ise 45 °C ile en yüksek sıcaklık seviyesini görmektedir. En düşük ortam sıcaklığı ise -21 °C ile ocak ayında görülmektedir. Fotovoltaik panellerin özellikle P_{max} /Sıcaklık katsayılarını belirten performans tabloları dikkatli incelenmesi gerekmektedir. Panel verimlerinin, standart test koşulu sıcaklığı olan ve %100 performans değeri olarak kabul edilen 25 °C'nin altında veya üstünde birim santigrat derecede yüzdelik oran olarak olumlu ya da olumsuz yönde nasıl etkilendiği fotovoltaik panelin elektriksel karakteristik grafiğinde gösterilmektedir.



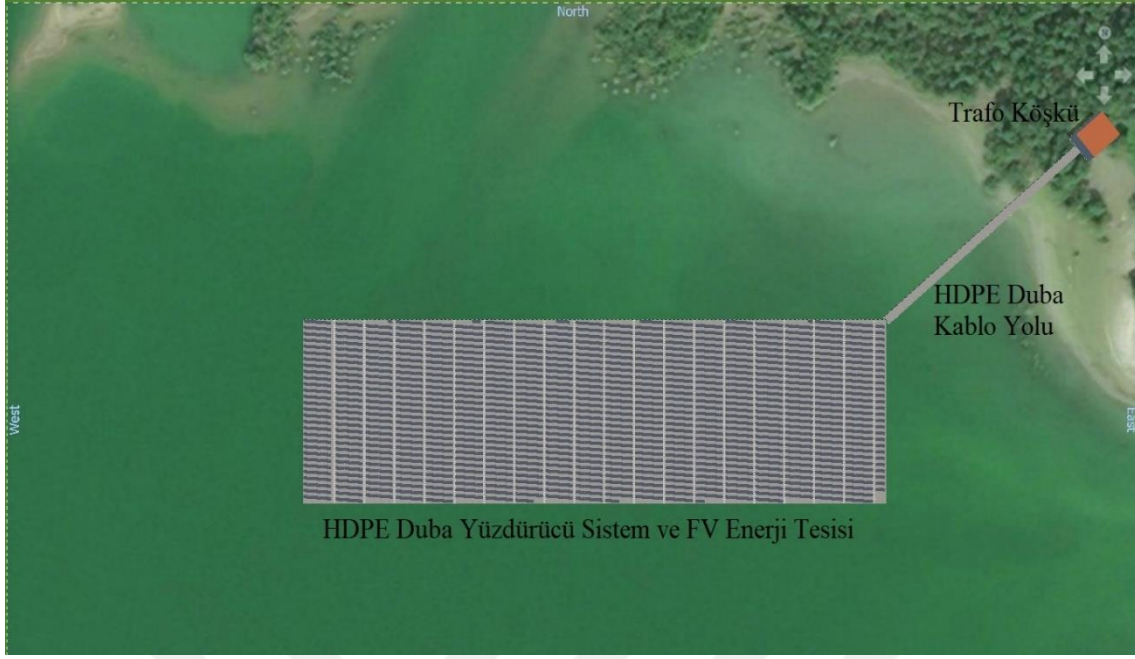
Şekil 5.5. Yedikır Barajı aylık bazda en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri.

5.2. Yüzer Tip Fotovoltaik Tesis Örneği Teknik Analiz Altyapısı

Amasya ili Suluova ilçesi Tersakan çayı üzerinde bulunan ve 5,93 km² yüzey alanına sahip Yedikır Barajı'nın kuzeydoğu bölgesinde 13 000 m²'lik su yüzey alanını kaplayan yüzer tip fotovoltaik enerji üretim tesisinin kurulu gücü 1 MWp olarak belirlenmiştir. Bu kurulu gücün belirlenmesinde, elektrik piyasasında lisanssız elektrik üretim yönetmeliğinin yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elektrik üretimi gerçekleştirilecek tesisler için üst sınır olarak kabul edilen 1 MWp kurulu güç kapasitesini tam olarak değerlendirme çabası etkili olmuştur.

Fotovoltaik tesisin tasarımı PV*SOL yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup tesisat bakımından teknik detayların oluşturulması ve enerji üretim analizleri bu yazılım vasıtasıyla simüle edilmiştir. Şekil 5.6'da PV*SOL yazılımı kullanılarak oluşturulan 1 MWp kurulu güce sahip yüzer tip fotovoltaik tesisin kuşbakışı simülasyon görüntüsü sunulmaktadır. Aylık ve günlük olarak ortam sıcaklık ve ışınım değerleri gibi lokasyona ait koşulların detayları için PVSyst yazılımı kullanılmıştır. Tesisin kurulum maliyetini ve fayda/maliyet analizini yapmak için ise RETScreen yazılımından yararlanılmıştır.

Tesisin oluşumunda yer alacak donanımsal bileşenler için mümkün olduğunca yerli üretim ürünler tercih edilmiştir. Bu doğrultuda tesiste kullanılan fotovoltaik panel olarak, ülkemizde önemli bir solar pazara sahip CW Enerji Müh. Ticaret ve San. Ltd. Şti.'ne ait CWT-300-60M model adı ile üretmiş olduğu monokristal yapıda 300 W nominal çıkış gücüne sahip modüller kullanılmıştır.



Şekil 5.6. 1 MWp kurulu güce sahip yüzer tip fotovoltaik tesisin kuşbakışı simülasyon görüntüsü.

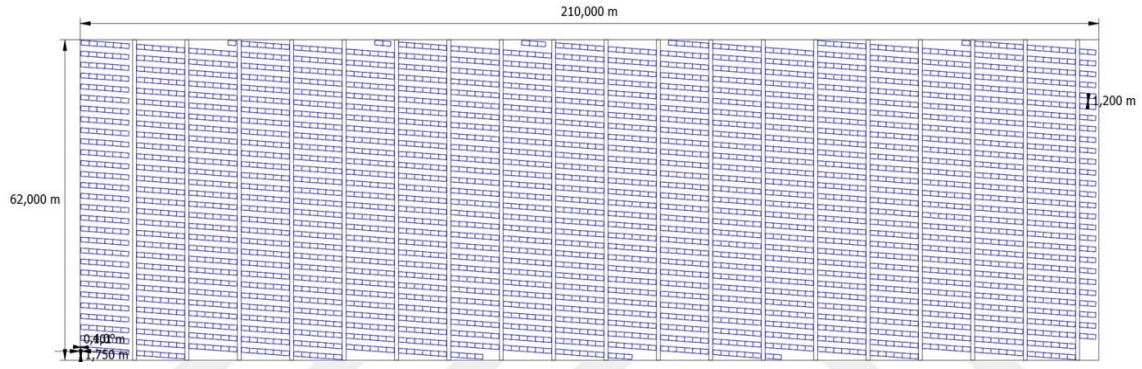
Bir fotovoltaik enerji tesisinde tesis verimini etkileyen en önemli ikinci donanım ise solar eviricilerdir. Simule ettiğimiz tesiste kullanılacak eviriciler için yerli üretim ürünler, ülkemizde henüz yeni pazar gücüne kavuşmakta olduğundan PV*SOL yazılımı veritabanında bulunan evirici listesinde yer alamamışlardır. Dolayısı ile tesis enerji üretim analizleri yapılırken evirici olarak Schneider Electric firmasına ait Conext CL25000E model adı ile üretilmiş olan trafolu tip 25 kW nominal çıkış gücüne sahip eviriciler kullanılmıştır. Sistemin finansal analizini yaparken ise yine aynı sayıda ve aynı nominal çıkış gücüne sahip tek yerli ürün olan Solarkol Enerji San. ve Tic. A.Ş.'nin üretimi olan TI-25 model adına sahip eviriciler değerlendirilmiştir.

Solar kablo alt yapısının finansal analizinde yerli ürün kablolar olarak Hes Kablo A.Ş.'ne ait PV1 – F model adına sahip LSFOH izoleli, tek damarlı kablolar baz alınmıştır.

5.2.1. Yüzer tip FV tesis örneğinde kullanılan solar panellerin yapısı

Toplam kurulu gücü 1 MWp olan fotovoltaik enerji üretim tesisinin modül yapısını oluştururken, verimlerinin yüksek olması, teknolojik imkanların artması ile birlikte üretim standartlarının kolaylaşması ve buna bağlı olarak birim maliyetlerinin makul seviyelerde olması nedeniyle monokristal yapıya sahip 300 Wp nominal çıkış gücünde fotovoltaik

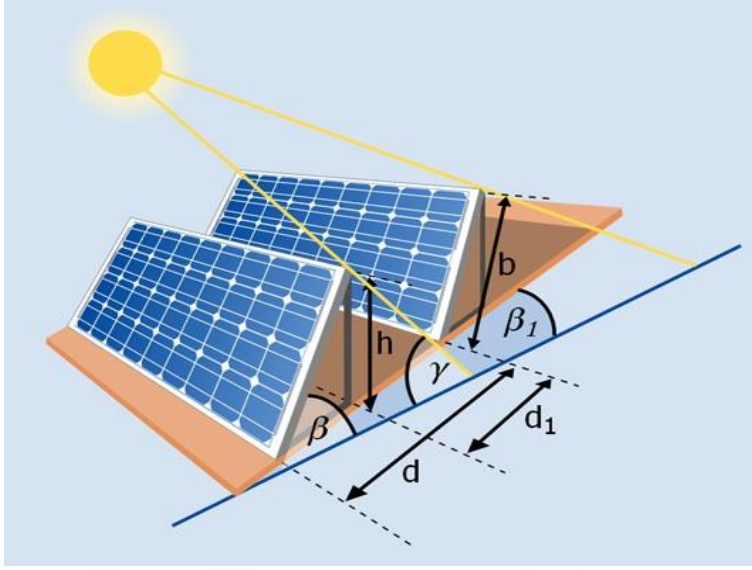
paneller tercih edilmiştir. CW Enerji Müh. Ticaret ve San. Ltd. Şti.'ne ait CWT-300-60M model ürünleri kullanılarak oluşturulan tesiste horizontal(yatay) konumlandırma ile 3 333 adet modül kullanılmıştır. Taşıyıcı konstrüksiyona tek sıra montaj yöntemi tercih edilen tesiste 62 m genişlik ve 210 m uzunluktaki alana aralarında 1,2 m yaklaşma mesafesi olacak şekilde toplam 29 sıra solar panel dizilimi oluşturulmuştur. Tesisin taşıyıcı duba sistemi üzerinde doğu-batı istikametinde 10 m aralıklarla 80 cm genişliğinde bakım yolları oluşturulmuştur. Bakım yolları sayesinde teknik personelin kuzey-güney istikametindeki ulaşımı kolaylaştırılmış olmaktadır. Şekil 5.7'de fotovoltaik panellerin taşıyıcı duba sistemi üzerindeki yerleşim planı sunulmaktadır.



Şekil 5.7. Fotovoltaik panellerin taşıyıcı duba sistemi üzerindeki montaj görüntüsü.

Tesisi oluşturan solar panellerin Çizelge 5.1'de sunulan mekanik özelliklerine bağlı olarak kaplamış olduğu alan, diğer bir ifade ile fotovoltaik enerji üretimi gerçekleştiren net yüzey alanı $5\,463,3\text{ m}^2$ 'dir. Bu da toplam tesis alanının %42'sinin fotovoltaik paneller tarafından kullanıldığını göstermektedir.

Fotovoltaik panel dizilerinin kuzey-güney ekseninde oluşturmuş olduğu toplam 29 adet sıranın aralarında bulunması gereken 1,2 m'lik yaklaşma mesafesini belirlerken, gün içerisinde panellerin birbirleri üzerine düşürecekleri gölgenin minimum seviyede olması amaçlanmıştır. Şekil 5.8'de sunulduğu üzere 24° tilt açısı (β) ile yatay konumlandırılan panellerin etiket değerine göre en ölçüsü (b) 99,5 cm idi, kuzey cepheye bakan kenarlarının yerden yüksekliği (h) 40,6 cm olmakta ve tek panel sırasının oluşturmuş olduğu derinlik (d-d₁) 90,9 cm olarak yazılım tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 5.8. Yüzer tip FV tesisi oluşturan solar panel dizilerinin gölge oluşumuna göre konumlandırma ölçüleri.

Kuzey-güney ekseninde iki panel arası yaklaşma mesafesi (d_1) yazılım tarafından h 'ın yaklaşık iki katı olarak belirlenerek 83,8 cm hesaplanmıştır. Ancak panellerin birbirine üzerine düşüreceği gölgenin etkisini azaltmak için, tesis alanının da müsait olması nedeniyle sıralar arası mesafe 1,2 m olacak şekilde yazılıma manüel değer girilmiştir. Dolayısı ile bir sıra genişliği (d) toplam 2,109 m olmaktadır. Zemin eğimi (β_1) olarak tesisin kurulduğu taşıyıcı sistemin düz zemin oluşturduğu için “0” dır. Gün içerisinde güneşin panelin montaj şekline göre üst kenarından taşarak panelin kuzey cephesinde zemine düşüş yaptığı açı (γ) sürekli değişmekle beraber simülasyonun lokasyona göre 21 Aralık tarihi için saat 12.00’da kabul ettiği açı $25,77^\circ$ dir. Bu nedenle herhangi bir lokasyonda, bir fotovoltaik enerji üretim tesisi projelendirilirken, solar panel yerleşimi, lokasyonun güneşlenme süresi ve açısına göre bir simülasyon programı yardımıyla analiz edilerek gölgeleme kayıpları minimize edildikten sonra tasarım yapılması oldukça önemlidir.

Solar panel olarak IP67 koruma sınıfına sahip 3,5 cm kalınlığında 1,65 m uzunluğunda ve 1 m genişliğinde 18 kg ağırlığa ve %18,3 verime sahip monokristal fotovoltaik paneller kullanılmıştır. Çizelge 5.1’de tesiste kullanılan fotovoltaik panellerin mekanik özellikleri sunulmaktadır. Solar panellerin her biri toplam 60 adet hücreye sahip olmakla birlikte 3 adet diyot kullanılarak 20 şer adet seri hücrelerden oluşan 3 ayrı grup halinde üretilmiştir. Bunun en önemli faydası ise kısmi gölge veya kirlilik altındaki çalışma esnasında

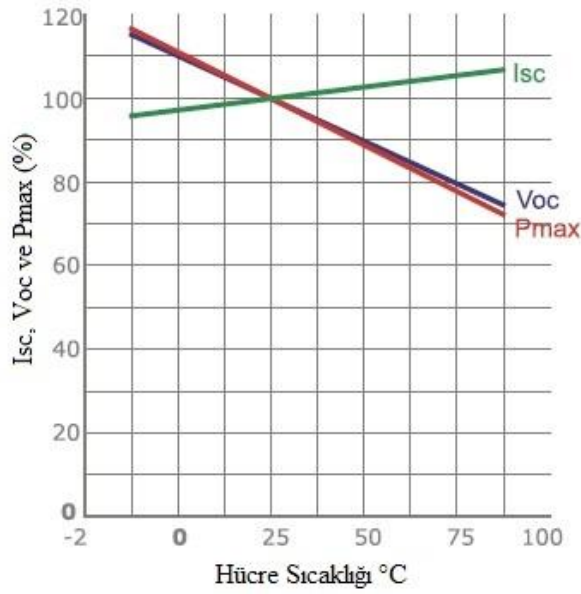
oluşabilecek hotspot sorununda hücrenin bulunduğu 20'lik seri iptal olmakta, diğer 40 adet hücre ise enerji üretimine devam etmektedir.

Fotovoltaik panellerin taşıyıcı duba sistemine yapmış olduğu yük bakımından incelediğimizde ise, her bir panel 18 kg ağırlığında olup toplamda sadece panel ağırlığı olarak taşıyıcı sistem 60 ton yük taşımaktadır.

Çizelge 5.1. Tesiste kullanılan fotovoltaik panellerin mekanik özellikleri.

Hücre Boyutu	156,75 mm x 156,75 mm
Hücre Sayısı	60
Diyot Sayısı	3
Ağırlık	18 kg
Panel Boyutu	1.648 x 995 x 35 mm
Maks. Rüzgâr/Kar Yüğü Dayanımı	2400/5400 Pa
Sınıfı	IP67

Modüllerin elektriksel özelliklerini belirten etiket değerleri belirlenirken üretici, standart test koşulları (STC) olan 1000 W/m² güneş ışınımı, 1,5 atmosfer kütlesi (AM), 25°C hücre sıcaklığı ve nominal test koşulları (NOCT) olan 800 W/m² güneş ışınımı, 20°C ortam sıcaklığı, 1 m/s rüzgâr hızı koşullarında panelleri teste tabi tutarak oluşturduğunu belirtmektedir. Tüm paneller için ölçüm belirsizliği %3'tür. Bu test sonuçlarına göre panellerin verimlerini önemli ölçüde etkileyen sıcaklık katsayısının maksimum güce etkisi-%0,38/°C olarak belirlenmiştir. Yani panel sıcaklığının 25°C'nin üzerine çıktığı her santigrat derecede panelin enerji üretim gücü %0,38 düşmektedir.



Şekil 5.9. Tesiste kullanılan fotovoltaik modüllerin Isc, Voc ve Pmax değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi.

Şekil 5.9'de Tesiste kullanılan fotovoltaik modülün katalogunda belirtilen ve hücre sıcaklığının kısa devre akımı, açık devre gerilimi ve maksimum güç üzerindeki etkileri görülmektedir. Bundan dolayı ortam sıcaklığının yükseldiği yaz aylarında tesisin su yüzeyinde olması nedeniyle oluşacak doğal soğutucu etki, üretim performansını olumlu yönde etkileyecektir.

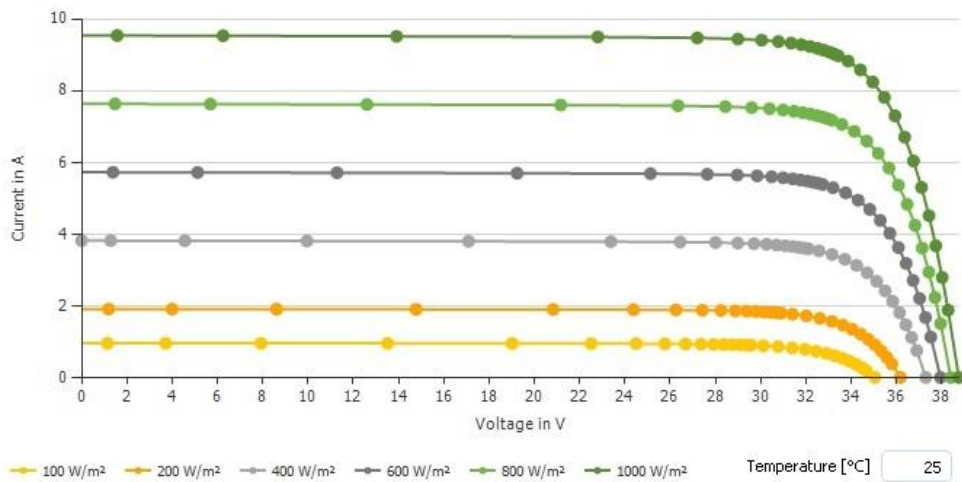
Çizelge 5.2. Tesiste kullanılan fotovoltaik panellerin elektriksel özellikleri.

Model Adı	CWT300-60M
Maksimum Güç (Pmax)	300 Wp
Modül Verimliliği	18,30
Maksimum Güç Gerilimi (Vmp)	33,42 V
Maksimum Güç Akımı (Imp)	9,02 A
Açık Devre Gerilimi (Voc)	38,95 V
Kısa Devre Akımı (Isc)	9,54 A
Güç Toleransı	0~+5W
Maksimum Sistem Anma Gerilimi	1000 V DC
Çalışma Sıcaklık Aralığı	-40 ~ +85°C

Enerji üretim verimliliği bakımından 18,30 verimlilik ile oldukça ideal bir verime sahip olan CWT-300-60M model solar paneller maksimum güç gerilimi (Vmp) olarak 33,42 V,

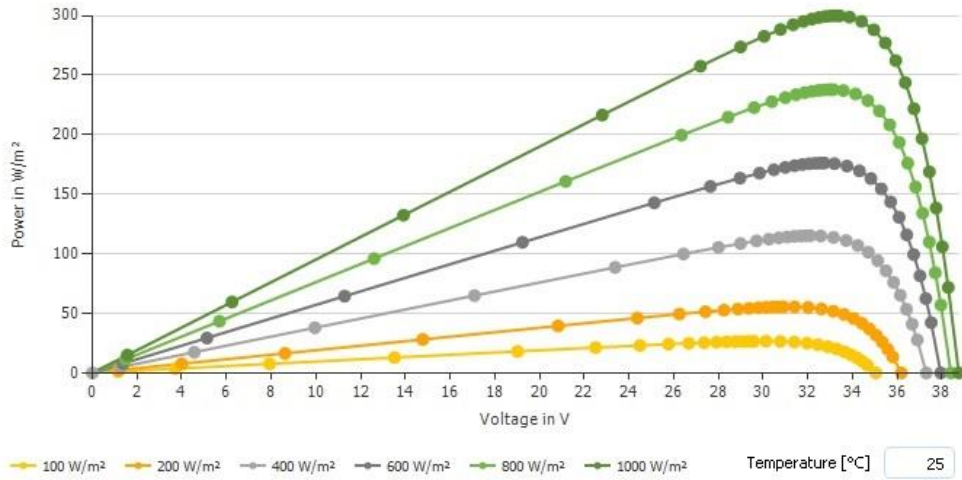
maksimum güç akımı (I_{mp}) olarak 9,02 A akım üretme kapasitesindedir. Dolayısı ile panelin maksimum güç (P_{mp}) kapasitesi 301,4 W değerlerini bulmaktadır. Çizelge 5.2’de tesiste kullanılan fotovoltaik panellerin elektriksel özellikleri sunulmaktadır.

Fotovoltaik panellerin üretim sonrası test sonuçları incelendiğinde, 25 °C hava sıcaklığında m^2 ye 1 kWh güneş radyasyonu alındığı vakitlerde bir panel maksimum 9,02 A akım üretmekte ve 33,42 V gerilime sahip olmaktadır. Şekil 5.9’da sunulan akım-gerilim grafiğinde maksimum akım ve maksimum gerilimin olduğu maksimum güç noktası görülmektedir. Gün içerisinde alınacak farklı ışınım değerlerinde panelden elde edilecek akım ve gerilimi göstermek açısından, sıcaklık sabitken m^2 ye düşen 100 W, 200 W, 400 W, 600 W ve 800 W ışınım miktarlarında maksimum güç noktasının ışınım şiddeti ile doğru orantılı olarak azaldığı grafikleştirilmiştir. Özellikle düşük ışık düzeyi olarak kabul edilen 200 W/ m^2 ışınımında maksimum akımın 2 A, maksimum gerilimin de 33 V seviyelerinde olduğu gözlemlenmektedir.



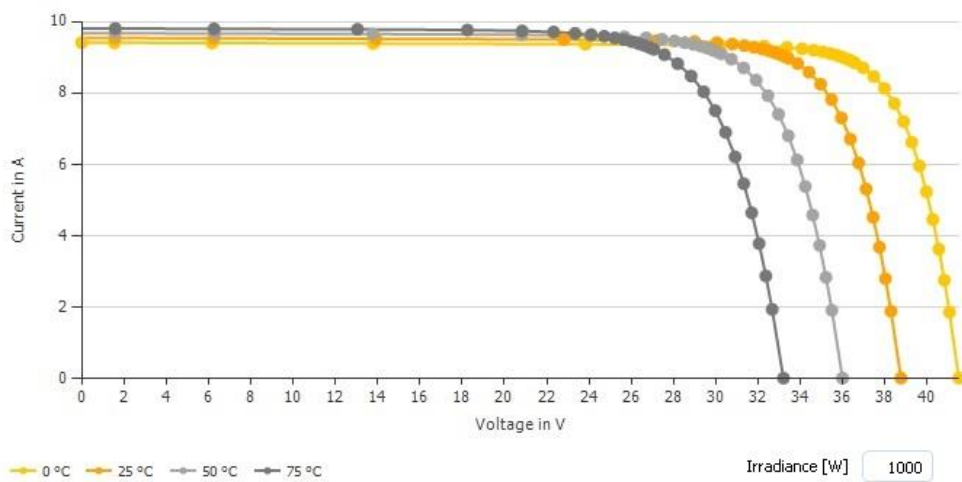
Şekil 5.10. Tesiste kullanılan fotovoltaik panellerin 25°C sabit sıcaklıkta farklı ışınım değerlerine göre karakteristik akım-gerilim eğrisi

Sıcaklık 25°C de sabit iken farklı ışınım değerlerinde panelin maksimum güç noktasının değişimini sunan Şekil 5.10’da ışınım miktarı test koşulu olan 1000 W/ m^2 iken elde edilen gücün 300 Wp, ışınım miktarı düşük ışık düzeyi olan 200 W/ m^2 iken panelden alınan gücün 60 Wp civarında olduğu grafiksel olarak sunulmaktadır.



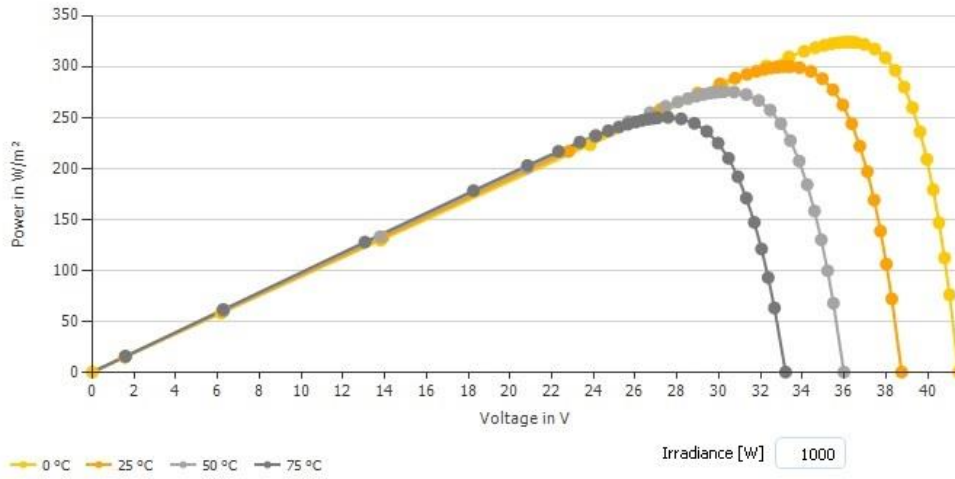
Şekil 5.11. Tesiste kullanılan fotovoltaik panellerin 25 °C sabit sıcaklıkta farklı ışınım değerlerine göre karakteristik güç-gerilim eğrisi

Işınım değerini 1000 W/m² de sabit tutarak farklı panel sıcaklığı koşullarında elde edilen akım ve gerilim değerlerini sunan Şekil 5.11'deki grafik incelendiğinde özellikle sıcaklığın 75 °C'ye yükseldiği durumlarda elde edilen akımın kısa devre akım değerine yaklaştığı görülmektedir. Ortam sıcaklığı 0 °C'ye yaklaşırken panel veriminin pozitif yönde etkilendiği ancak maksimum güç noktasındaki gerilim değerinin açık devre gerilim değerine yaklaştığı gözlemlenmektedir.



Şekil 5.12. Tesiste kullanılan fotovoltaik panellerin 1000 W/m² sabit ışınımında farklı sıcaklık değerlerine göre karakteristik akım-gerilim eğrisi

Fotovoltaik panelin aldığı ışınım değerini 1000 W/m^2 'de sabit tutarak ortam sıcaklığı $25 \text{ }^\circ\text{C}$ yapıldığında panelin nominal güç değeri olan 300 Wp değeri elde edilmektedir. Şekil 5.12'de sunulduğu üzere ortam sıcaklığının $0 \text{ }^\circ\text{C}$ olduğu durumlarda panelin ürettiği gücün 320 Wp değerlerine çıktığı, ortam sıcaklığının $75 \text{ }^\circ\text{C}$ olduğu durumlarda ise 250 Wp değerlerine gerilediği görülmektedir.



Şekil 5.13. Tesiste kullanılan fotovoltaik panellerin 1000 W/m^2 sabit ışınımında farklı sıcaklık değerlerine göre karakteristik güç-gerilim eğrisi

Modül sıcaklık değerleri olarak bu sınır değerlerden daha ilerisinde ise panel güvenlik sisteminin devreye girerek enerji üretimini durdurması söz konusudur, aksi takdirde paneller zarar görecektir, ürünlerin onarımı veya değişimi gerekecektir.

Fotovoltaik hücrelerin kalite göstergesi olan ve önemli teknik parametreleri arasında yer alan doluluk faktörü (FF), normal kristal yapıları fotovoltaik hücrelerde $0,75$ ile $0,85$ arasında bir değere sahipken amorf yapıları fotovoltaik hücrelerde bu oran $0,5$ ile $0,7$ arasındadır. Doluluk faktörü MPP gücünün kısa devre akımı ile açık devre geriliminin çarpımı ile elde edilen güce oranlanmasıdır ve aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$FF = \frac{I_{MP} * U_{MP}}{I_{SC} * U_{OC}}$$

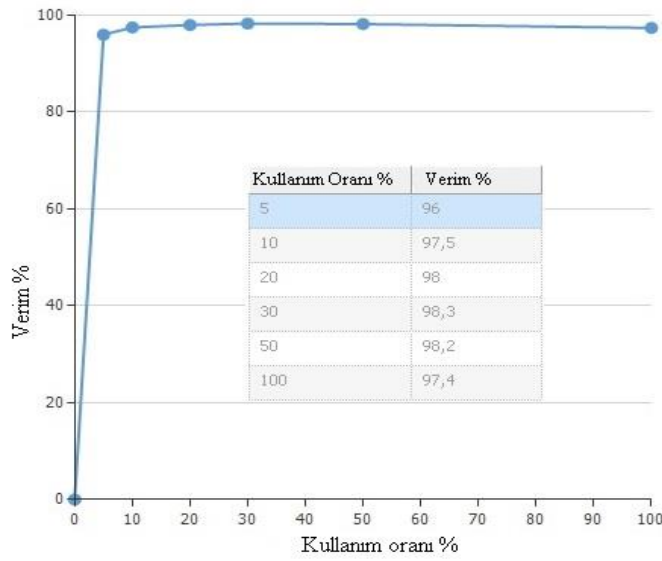
Bu denklem ile tesiste kullanılan fotovoltaik panelin doluluk oranı hesaplandığında ise;

$$FF = \frac{9,02 * 33,42}{9,54 * 38,95} = \%81,13$$

oranında ideal bir doluluk faktörüne sahip olduğu görülmektedir.

5.2.2. Yüzer tip FV tesis örneğinde kullanılan solar eviricilerin yapısı

Bir fotovoltaik enerji üretim tesisinin performansını direkt olarak etkileyen donanımlardan bir tanesi de solar panellerde üretilen DC akımı nakledilmeye ve kullanılmaya daha uygun form olan AC akıma dönüştüren solar eviricilerdir. Yüksek kurulu güce sahip fotovoltaik tesislerde kullanılan eviricilerin enerji kayıplarını minimize etmek için dizi tipi olması ve verimlerinin yüksek olması gerekmektedir. Bu kapsamda ülkemizde yerli üretim olarak piyasada yer alan ve dizi evirici üreten tek firma olan Solarkol Enerji San. ve Tic. A.Ş'nin TI-25 model adı ile üretmiş olduğu %97,5 verime ve 25 kW nominal çıkış gücüne sahip trafosuz tip solar eviricisi henüz PV*SOL veritabanında yer almadığı için tesisin kurulum maliyeti hesaplanırken değerlendirilmiştir. Tesisin enerji üretim analizini gerçekleştirirken ise yine ülkemizde distribütörü ve elektrik şalt malzemeleri üretim fabrikası bulunan, PV*SOL veritabanında da yer alan Schneider Electric firmasına ait Conext CL25000E model adı ile üretilmiş olan trafolu tip ortalama %97,5 verime ve 25 kW nominal çıkış gücüne sahip eviriciler tercih edilmiştir. Solar eviricilerin gün içerisinde üretilen enerjiyi dönüştürme işlemindeki verimleri toplam kapasitelerinin kullanım oranına göre değiştiği bilinmekte ve Şekil 5.13'te Conext CL25000E model eviriciye ait verim değişim karakteristik eğrisi sunulmaktadır. Bu eğriye göre tesiste kullanılmış olan bu eviricinin %5 kapasiteyle çalıştığında verimi %96 olmakta, %100 kapasiteyle çalıştığında ise %97,4 verimle çalıştığı görülmektedir.



Şekil 5.14. Tesiste kullanılan solar eviricinin kapasite kullanım oranına göre verim oranı karakteristik eğrisi.

Maksimum güç noktası izleyicisi (MPPT) olarak toplam iki adet paralel girişe sahip olan solar eviricinin girişlerine bağlanabilecek seri ve paralel solar panel adetleri, Çizelge 5.3'te sunulan evirici etiket değerlerine göre MPPT'nin maksimum akım ve gerilim taşıma kapasitesine uygun olarak diziler arası çalışma uyumunun da en ideal şekilde sağlanacağı dizilim baz alınarak belirlenmektedir.

Schneider Electric firmasına ait Conext CL25000E model evirici ile tasarımı gerçekleştirilen yüzer tip fotovoltaik tesisin dizileri oluşturulurken, iki MPPT girişi bulunan eviricinin birinci girişine her biri bünyesinde 21 adet 300 Wp nominal güce sahip solar panel barındıran 3 dizi, ikinci girişine ise her biri bünyesinde 19 adet 300 Wp nominal güce sahip solar panel barındıran 2 dizi bağlantısı yapılmıştır. Toplamda 33 adet 25 kW nominal çıkış gücüne sahip evirici kullanılan tesiste genel güç dağılım planı şu şekildedir;

1.MPPT girişi bir dizisinde 21 adet panel bulunduğu dizi gücü: $21 \times 300 = 6\,300$ Wp dir,

1.MPPT girişine üç dizi bağlantısı yapıldığı için MPPT gücü: $3 \times 6\,300 = 18\,900$ Wp olur,

2.MPPT girişi bir dizisinde 19 adet panel bulunduğu dizi gücü: $19 \times 300 = 5\,700$ Wp dir,

2.MPPT girişine iki dizi bağlantısı yapıldığı için MPPT gücü: $2 \times 5.700 = 11\,400$ Wp olur,

böylece 1 adet eviriciye giriş yapılan toplam nominal güç: $18\,900\text{ Wp} + 11\,400\text{ Wp} = 30\,300\text{ Wp}$ olmakta ve Çizelge 5.3'te sunulan evirici maksimum DC çıkış gücü $31\,800\text{ Wp}$ değeri aşılmadığı görülmektedir.

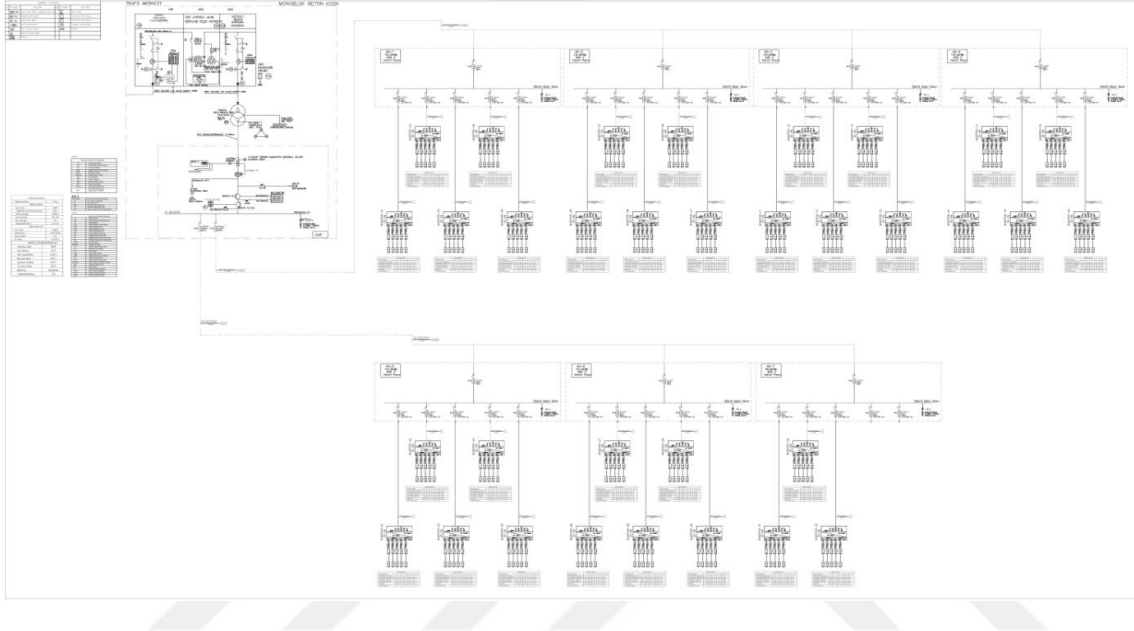
Çizelge 5.3. Fotovoltaik tesiste kullanılan solar eviricinin mekanik ve elektriksel özellikleri.

Solar Evirici Modeli	Conext CL25000E
DC Bölüm	
Nominal çıkış gücü	26,5 kW
Maksimum çıkış gücü	31,80 kW
Maksimum giriş gerilimi	1000 V
Nominal DC giriş voltajı	610 V
Maksimum giriş akımı	62 A
Maksimum güç noktası takip adedi	2
Maksimum güç noktası başına maksimum giriş adedi	4
Maksimum güç noktası başına maksimum güç	15,9 kW
AC Bölüm	
Nominal çıkış gücü	25 kW
Maksimum görünür güç	25 kVA
Nominal çıkış voltajı	230 / 400 V
Maksimum çıkış akımı	40 A
Çıkış frekansı	50 / 60 Hz
Toplam harmonik bozulma (THD)	< %3
Maksimum kullanımda verim	%97,5
Bağlantı kutusu ile birlikte toplam ağırlık	61 kg
Şebeke bağlantı tipi	3Faz + Toprak
Sınıfı	IP65

Bir eviriciye bağlanan toplam solar panel sayısı ise $(3 \times 21) + (2 \times 19) = 101$ adet olmakta ve toplam $3\,333$ adet solar panel ile 1 MWp kurulu güce sahip olan tesisin üretmiş olduğu DC güç, toplam 33 adet 25 kW 'lık evirici ile AC güce dönüştürülmektedir. Eviricilerin taşıyıcı duba sistemine getirdiği yük ise AG panoları ile birlikte toplam 2 ton olmaktadır.

5.2.3. Yüzer tip FV tesis örneğinin kablaj ve şalt malzeme yapısı

AutoCAD uygulaması aracılığı ile trafo köşkünden solar panele kadar, tesiste yer alan donanımların irtibatını, genel bağlantı ekipmanlarını ve eviriciler üzerindeki yük dağılımlarını gösteren tek hat şeması hazırlanmıştır.



Şekil 5.15. Fotovoltaik tesisi oluşturan donanımların tek hat bağlantı şeması.

Simule edilen tesiste üretilen ve şebekeye aktarılabacak olan enerjiyi şebeke koşullarına uygun hale getirmek için müstakil 1 000 kVA kurulu gücünde trafo köşğü kullanılmıştır. Şekil 5.14'te sunulan tek hat şemasında da görüldüğü üzere ölçüm hücrelerine çift taraflı elektronik sayaç monte edilerek, On-Grid özelliğindeki fotovoltaik enerji üretim tesisinde elde edilen elektriğin kWh cinsinden şebekeye aktarılan kısmının hesaplanması sağlanacaktır.

1 000 kVA kurulu gücündeki trafo köşğünden yaklaşık 100 m mesafedeki her biri 151,5 kWp güç kapasitesinde AG-(1-4) GES panolarına besleme hattı olarak 4 adet 4x185 mm² NAYY kablo kullanılmış olup 4x1 250 A Termik Manyetik Şalter kullanılarak çıkış sağlanmıştır. AG-1-4 panolarına giriş yaparken yine 4x400 A TMS tercih edilmiş ve her bir evirici panosuna dağılımlar 4x63 A TMS ile sağlanmıştır. Aynı zamanda her bir evirici besleme hattı 300 mA'lık kaçak akım rölesi ile koruma altına alınmıştır.

Aynı şekilde 4x1.000 A TMS ile trafo köşkünden çıkış yapan ikinci hat, 2 adet 4x185 mm² ve 1 adet 4x70 mm² NAYY kablo ile AG-(5-7) panolarını beslemektedir. AG-7 panosu toplam 3 adet eviriciye hitap ettiği için kurulu gücü 90,9 kWp gücündedir ve 4x300 A TMS ile kontrol edilmektedir.

AG-(1-7) ana dağıtım panolarının trafo köşküne yakın olması planlandığı için tesis alanının kuzey cephesindeki son konstrüksiyonun arkasında yer alacağından, tesisin orta sırasında yer alan eviricilerin besleme hatları 5x25 mm² NYY kablo ile sağlanmaktadır. Tesisin arka cephesinde yer alan evirici panoları AG dağıtım panolarına yakın olacağından besleme hatları 5x16 mm² NYY kablo ile sağlanmaktadır.

Solar eviriciler ile MPPT girişlerine irtibatlanan fotovoltaik panel dizileri arasında ise 2x6 mm² PV1-F solar kablolar kullanılmıştır. Solar panellerden oluşan dizilerin yapısı, her biri 21 adet seri bağlı modül bulunduran 99 adet dizi ve her biri 19 adet seri bağlı modül bulunduran 66 adet diziden oluşmaktadır.

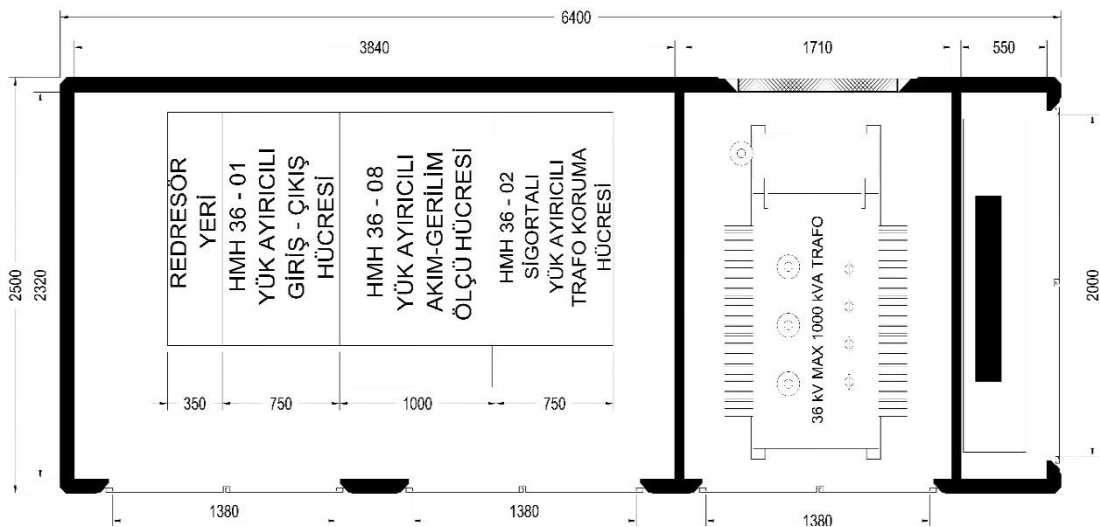
Çizelge 5.4. Tesiste kullanılan kabloların teknik özellikleri.

Kablo Cinsi	Kablo Kesiti (mm ²)	Maksimum Çalışma Sıcaklığı (°C)	Dış Çap (mm)	Net Ağırlık (kg/m)	İletken Direnci (ohm/km)	Akım Taşıma Kapasitesi- Toprakta- 20 °C (A)	Akım Taşıma Kapasitesi- Havada- 30 °C (A)
NAYY	4x185	70	59	4,9	0.164	308	289
NAYY	4x70	70	38.5	2,05	0.443	176	158
NYY	1x16	70	10,0	0,215	1.15	127	103
NYY	1x25	70	11,5	0,320	0.727	163	137
NYY	4x16	70	21,5	1,05	1,15	98	80
NYY	4x25	70	26	1,55	0.727	128	106
PV1 – F (LSFOH izole)	4	120	5,4	0,065	-	-	55 (60 °C)
PV1 – F (LSFOH izole)	6	120	6,8	0,090	-	-	70 (60 °C)

Toplam 165 diziden oluşan tesisin her bir dizisi ortalama 50 m 2x6 mm² PV1-F solar kablo ile eviricilere giriş yapmakta, toplamda ise 8.250 m 2x6 mm² PV1-F solar kablo kullanılmaktadır.

Eviricilerden AG-(1-7) alternatif akım panolarına kadar olan kısımlarda ise 20 adet eviriciden irtibatlı olduğu AG panosuna her biri 20 m olmak üzere toplam 400 m 5x25 mm² NYY kablo kullanılmıştır. Diğer 13 adet eviriciden irtibatlı olduğu AG panosuna her biri 10 m olmak üzere toplam 130 m 5x16 mm² NYY kablo bağlantısı yapılmaktadır.

Alçak gerilim panolarından trafo köşküne kadar olan mesafede toplam 600 m 4x185 mm² NAYY, 100 m de 4x70 mm² NAYY kablo montajı yapılarak tesisin kablo altyapısı tamamlanmıştır. Yerli üretim kablo imalatında ülkemizde önemli bir paya sahip olan HES Kablo A.Ş.'nin ürünleri baz alınarak Çizelge 5.4'te sunulan verilere göre tesiste kullanılan kablaj sisteminin taşıyıcı duba sistemine getirmiş olduğu yük hesaplandığında toplam 5,5 ton kablo ağırlığı getirmektedir.



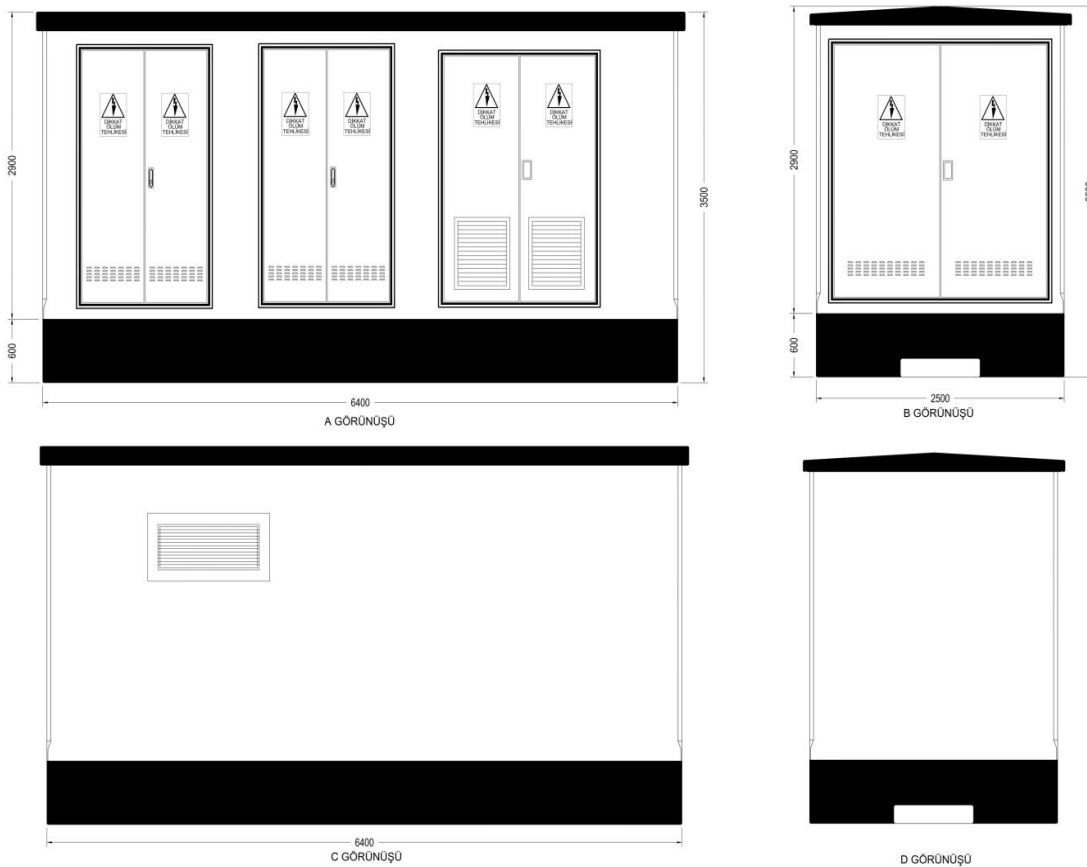
Şekil 5.16. Tesiste kullanılan trafo köşkü iç tasarımı.

Tesiste üretilen enerjinin şebeke dağıtım ağına transferini gerçekleştirmek üzere fotovoltaik panel alanının kuzey batısında toprak alan üzerine kurulması planlanan trafo beton köşkü ve iç donanımı olarak yerli üretim yapan Ulusoy Elektrik A.Ş.'ye ait UBET serisi B64 model beton köşk tercih edilmiştir. Şekil 5.15'te sunulduğu üzere trafo beton köşkü içerisinde Ulusoy Elektrik A.Ş.'nin üretimi olarak 1 adet HMH 36-01 model yük ayırıcılı giriş-çıkış hücresi bulunmaktadır. Aynı bölümde çift taraflı sayacın da bulunduğu

1 adet HMH 36-08 model yük ayırıcılı akım-gerilim ölçü hücresi ve 1 adet HMH 36-02 model sigortalı yük ayırıcılı trafo koruma hücresi yer almaktadır.

Ayrıca trafo iç donanımında bulunan motorlu kesici ve ayırıcıların enerji beslemesi için redresör grubu bulunmaktadır. Beton köşkün trafo hücresinde ise Ulusoy Elektrik A.Ş.'nin 1 adet hermetik tip 1000 KVA kurulu gücünde Ecodesign model trafosu kullanılmıştır.

Trafo köşkünün kabin yapısı olarak BS-35 betondan üretilen duvarları ve 2 mm kalınlığında sac giriş kapakları ile IP 23 D koruma sınıfına sahip, 6,4 m uzunluk 2,5 m genişliği ile 16 m² yer kaplayan 3,5 m yüksekliğinde betonarme yapıdır. Şekil 5.16'da tesiste kullanılan trafo köşkünün dört farklı cephesinden detay ölçüleri ile görünüş kesitleri sunulmuştur. DC ve AC alçak gerilim toplama panoları olarak Eva Elektromekanik A.Ş.'nin ürünleri kullanılmıştır.



Şekil 5.17. Tesiste kullanılan trafo köşkü dış görünüş kesitleri.

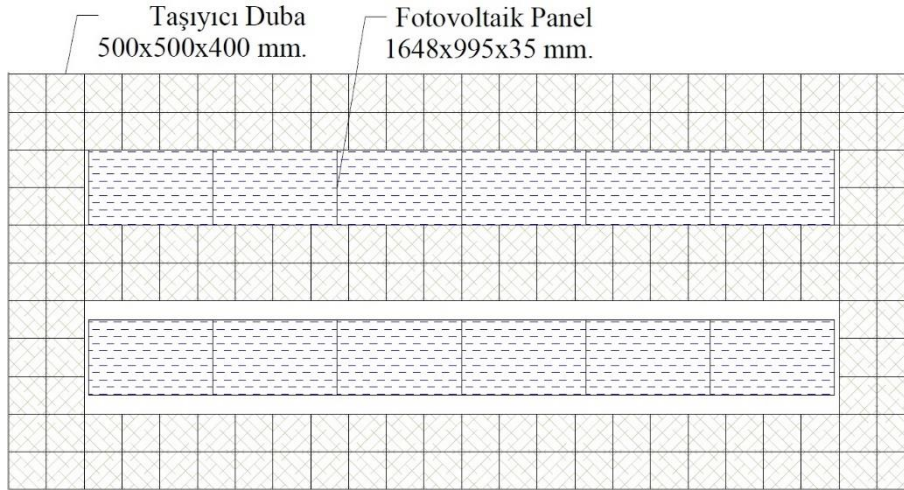
5.2.4. Yüzer tip FV tesis örneğinde kullanılan yüzdürücü sistem yapısı

Yüzer tip fotovoltaik enerji üretim tesisini oluşturan donanımların su yüzeyinde kalmasını sağlayan ve tesis ömrünü direkt olarak etkileyen önemli diğer bir bileşen ise yüzdürücü duba sistemidir. Bu çalışmada tasarımı gerçekleştirilen 1 MWp kurulu gücündeki yüzer tip güneş enerji santralinde yüzdürücü sistem olarak, ülkemizde polietilen duba üretimi yapan iki firmadan biri olan Polidaş Polietilen Mamülleri Kimya San. Ve Tic. Ltd. Şti.'ne ait dubalar kullanılmış ve böylece tesisin yüzdürücü sisteminin de yerli üretim olması amaçlanmıştır. Şekil 5.17'de fotovoltaik tesisin su yüzeyinde kalmasını sağlayan duba sisteminin temel bileşenlerinin görselleri sunulmuştur.



Şekil 5.18. Tesiste kullanılan yüzdürücü sistem dubası ve bileşenleri.

UV stabilizerli lineer düşük yoğunlukta polietilen (LLDPE-Linear low-density polyethylene) hammadde kullanarak üretilen duba ve bileşenleri malzeme yapısı gereği yüksek çekme dayanımı, darbe ve delinme direncine sahiptir. Bakteri üretmedikleri, yosun tutmadıkları, güneş ışınlarından etkilenmedikleri ve tek parça halinde üretildikleri için bakım gerektirmezler. Geri dönüşümleri mümkün olduğu için çevre dostu üründür.



Şekil 5.19. LLDPE dubalar ile Autocad uygulamasında oluşturulan yüzer fotovoltaik tesisin plan kesit görünüşü.

Tasarlanan yüzdürücü sistemi oluşturan LLDPE dubaların birim kenar ölçüleri 50 cm x 50 cm olup yüksekliği 40 cm' dir. Her biri 6,3 kg ağırlığa sahip olan dubaların yük taşıma kapasitesi 350 kg/m²'dir. Tesisin jeneratör alanı olan 13 000 m²'lik su yüzeyi ve trafo köşküne kadar giden 190 m²'lik kablo yolunu kaplamak için bu dubalardan toplam 29 184 adet kullanılması gerekmektedir. Duba montaj bileşeni olarak ise 26 448 adet manşon seti ve 15 246 adet orta kilit montajı yapılmalıdır. Yüzdürücü sistem olarak kullanılan lineer düşük yoğunlukta polietilen dubaların su yüzeyine getirmiş oldukları toplam ağırlık 183,9 ton olmaktadır.

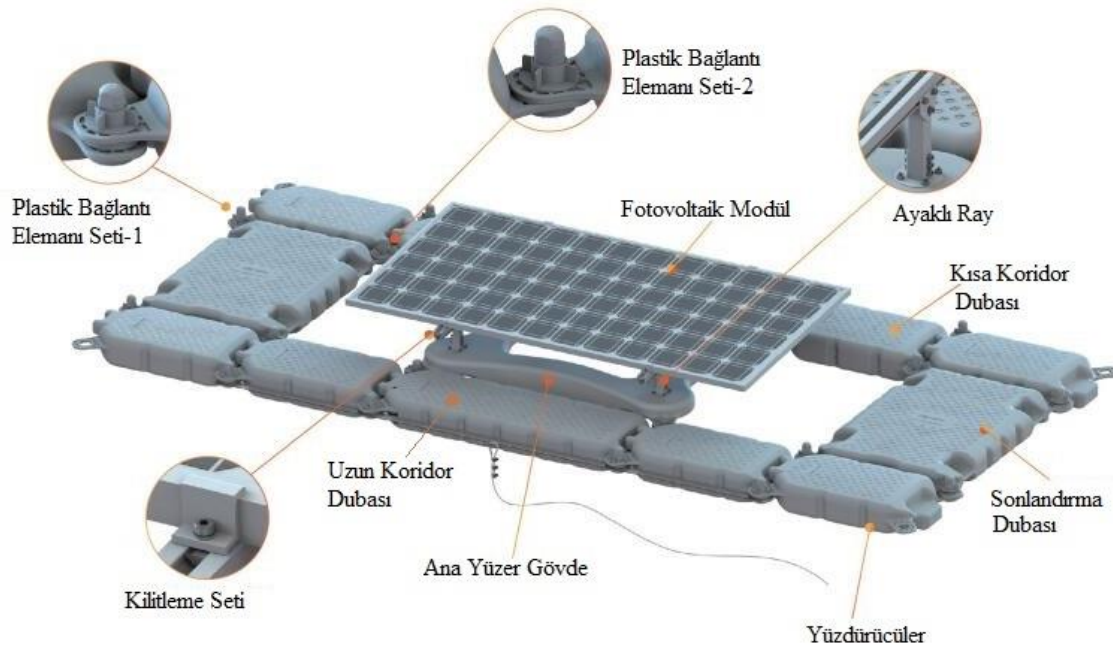
Autocad yazılımı kullanılarak tesisin tamamının iki boyutlu planı hazırlandığında, fotovoltaik jeneratör kısmının 214,5 m uzunluk ve 66 m genişlikte yani 14 157 m² alanı kaplayarak tamamlandığı tespit edilmiştir. Şekil 5.18'de Autocad uygulamasında 50x50x40 cm ebatlarında lineer düşük yoğunluklu polietilen dubalar ile hazırlanan yüzer fotovoltaik tesisin plan kesit görünüşü sunulmaktadır.

Şekil 5.19'da montaj şeklinden küçük bir kesit sunulan tesiste, fotovoltaik panellerin 24⁰ eğimli olarak taşıyıcı dubalar ile sağlam mesnet bağlantısı oluşturabilmeleri için metal profiller kullanılmalıdır. Statik yapısı kuvvetli ve nemli ortama karşı dayanıklı panel taşıyıcı kaide oluşturmak için 40x40x2 mm ölçülerinde 2,31 kg/mt ağırlığa sahip daldırma galvanizli metal profillerden toplam 27 890 m kullanılması gerekmektedir. Metal konstrüksiyon olarak taşıyıcı duba sistemine getirilen toplam yük ise 64,5 ton olmaktadır.



Şekil 5.20. Taşıyıcı duba sistemine irtibatlanan metal profillerle oluşturulmuş iskelet yapısından örnek görüntü.

Yüzer tip fotovoltaik tesisler için şu an bazı ülkelerde yüzdürücü sistem olarak yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE-high density polyethylene) malzeme kullanılarak üretilen, solar paneller için özel hazneye veya düzeneğe sahip profesyonel ürünler üretilmektedir. Bu çalışmada tasarımı ve teknik analizi gerçekleştirilen yüzer tip fotovoltaik tesisin yüzdürücü sistemine alternatif olarak, Çin'in Fujian eyaletine bağlı Xiamen kentinde solar tesis donanımlarının üretimini yapmakta olan Solar First Energy Technology Co. Ltd. firmasının ürünleri ile alt yapı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Firmanın SF-TGW01 model adı ile yüksek yoğunluklu polietilen malzemeden üretmiş olduğu solar dubalar dört ana unsurdan oluşmaktadır.

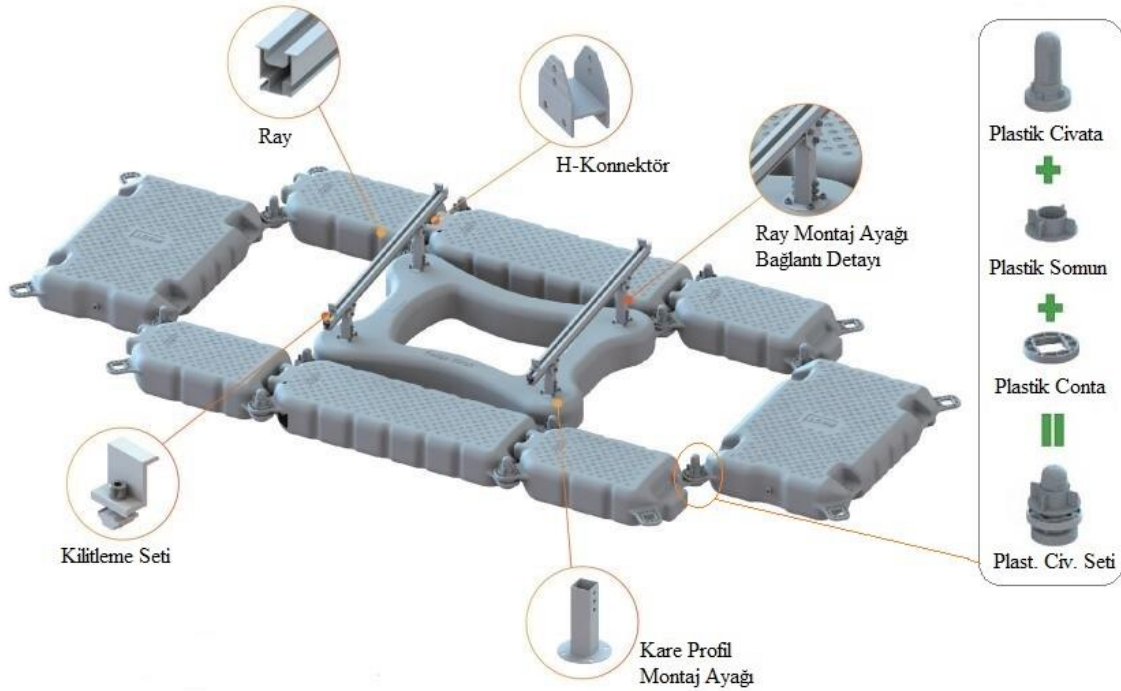


Şekil 5.21. Solar First Energy firmasına ait sf-tgw01 model yüzdürücü sistem bileşenleri ve bağlantı şekli.

Özellik olarak yarım metre yüksekliğe kadar su dalgalarına, 50 m/s rüzgâr hızına, 1 kN/mm² şiddetindeki kar yüküne karşı dayanma ve ortalama 130 kg/m² yük taşıma kapasitesine sahip bu yüzdürücüler, solar paneli taşıyan ana yüzdürücü gövde, geniş koridor, dar koridor ve sonlandırma dubalarından oluşmaktadır. Şekil 5.20’de Solar First Energy firmasının SF-TGW01 model ürün bileşenleri ve bağlantı şekli sunulmaktadır.

Yüzdürücü sistemin en önemli unsuru olan ana yüzdürücü gövde, 1.210x1.020x185 mm ebatlarında ve 3 mm et kalınlığına sahip birim ağırlığı 7,02 kg olan ultraviyole stablizerli hdpe malzemedan üretilmiş donanımdır. Üzerine solar panel montajı yapılabilmesi için ana yüzdürücü gövdeye irtibatlandırılmış, yangın riskine karşı önlem olarak tasarlanan alüminyum malzemedan üretilmiş raylı sistem ayaklar mevcuttur. Şekil 5.21’de sunulan görselde de görüleceği üzere ana yüzdürücü gövde dört köşesinden hdpe plastik civata seti kullanılarak koridor ekipmanlarına irtibatlandırılmaktadır.

Alüminyum raylı montaj ayağının, solar panele gerekli olan 24⁰’lik tilt açısını verebilmek için ön ayakları 12,5 cm, arka ayakları ise 42,3 cm yüksekliğinde tasarlanmış olup panelin yerleşeceği raylar ise kilitleme setine sahiptirler.

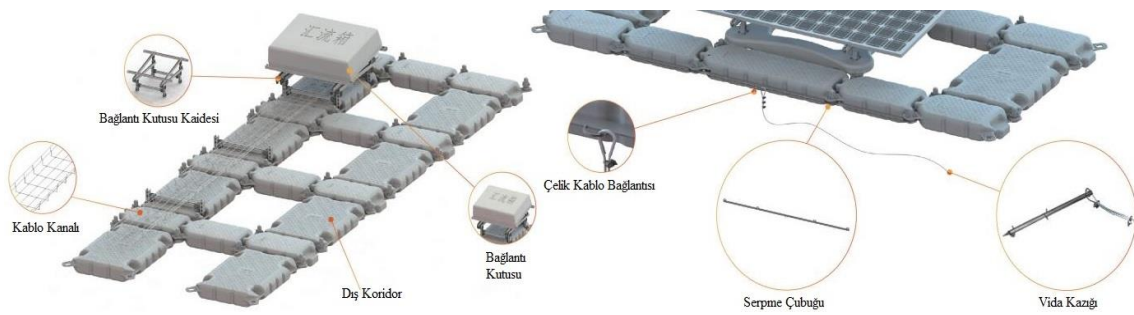


Şekil 5.22. SF-TGW01 model yüzdürücü sistemin montaj aparatları görüntüsü.

Yüzdürücü sistemin diğer bileşeni olan uzun koridor elemanı, 1.210x425x185 mm ebatlarında ve 3 mm et kalınlığına sahip birim ağırlığı 5,02 kg olan ultraviyole stablizerli hdpe malzemeden üretilmiş donanımdır. Solar panel ön ve arka kısımlarındaki koridor elemanı olarak kullanılırlar. Kısa koridor elemanları ise iki farklı ebat olarak yine aynı cins malzemeden 700x425x185 mm ebatlarında ve 550x425x185 mm ebatlarında, 3 mm et kalınlığına sahip birim ağırlığı sırasıyla 3,3 kg ve 2,83 kg şeklinde üretilen donanımlardır.

Sonlandırma ve bakım yolu elemanı olarak kullanılan hdpe dubanın ebatları da 700x1.020x185 mm olup 3 mm et kalınlığına sahip birim ağırlığı 6 kg olan donanımdır. Bu bileşenleri montaj esnasında birbirine sabitlemek amacıyla kullanılan civata seti ise yine hdpe malzemeden üretilmiş 44,5 mm çap ölçüsüne sahip toplam birim ağırlığı 175 g olan, Şekil 5.21’de sunulduğu üzere civata, somun ve contadan oluşan bağlantı elemanıdır.

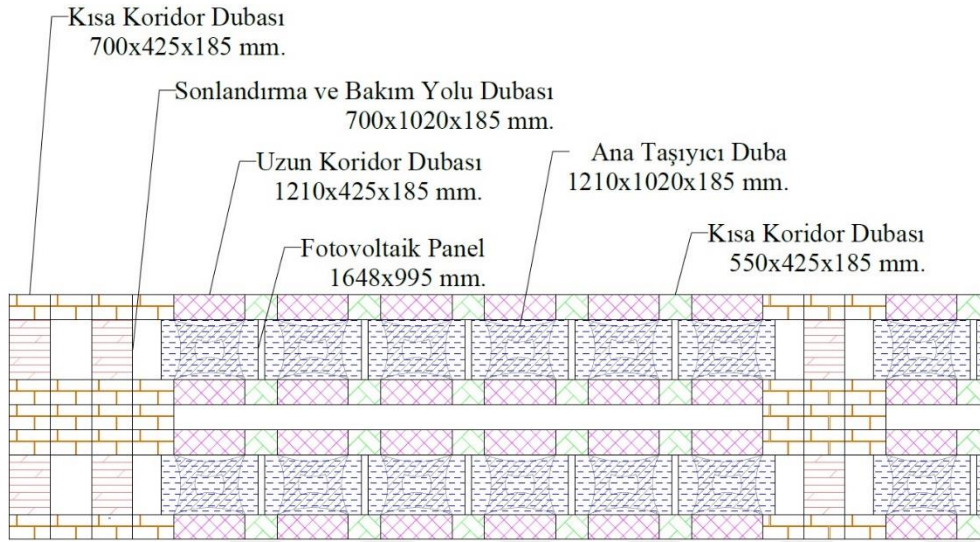
Ayrıca yüzdürücü dubalar üzerine solar panel dizilerinin dc kablolarının buluştuğu bağlantı kutusunun yerleştirilebileceği kaideler, kabloların düzen içerisinde taşınmasını sağlayan ve çevresel unsurlardan zarar görmesini engelleyen kablo kanalı üretilmekte ve montajı yapılabilmektedir. Hdpe dubaların kenarlarında, tesisi kıyıya veya su rezervuarı zeminine sabitlemek amacıyla çelik halat bağlantı kulpları bulunmaktadır. Şekil 5.22’de yüzdürücü sistem bağlantı kutusu, kablo kanal ve sabitleme sistemi bileşenleri ve montaj şekilleri gösterilmektedir.



Şekil 5.23. SF-TGW01 model yüzdürücü sistem bağlantı kutusu, kablo kanal ve sabitleme sistemi örnek görüntüsü.

Autocad yazılımı kullanılarak tesisin tamamının solar sistemler için özel üretim hdpe malzemelere göre iki boyutlu planı hazırlandığında, fotovoltaik jeneratör kısmının 238,6 m uzunluk ve 66,13 m genişlikte yani 15 778 m² alanı kaplayarak tamamlandığı tespit edilmiştir. Ana yüzdürücü gövdeden 3 334 adet, uzun koridor dubasından 6 668 adet, 70

cm'lik kısa koridor dubasından 5 894 adet, 55 cm'lik kısa koridor dubasından 5 538 adet ve sonlandırma dubasından 656 adet kullanılarak tamamlanan yüzer fotovoltaik tesisin Autocad uygulaması ile hazırlanan iki boyutlu planının kesit görünüşü Şekil 5.23'te sunulmaktadır. Hdpe malzemeden üretilen bu ana yüzdürücü unsurların aparatlar hariç olmak üzere su yüzeyine getirmiş oldukları toplam ağırlık 96 ton olmaktadır.



Şekil 5.24. HDPE dubalar ile Autocad uygulamasında oluşturulan yüzer fotovoltaik tesisin plan kesit görünüşü.

Sabitleme sistemi olarak yüzer tip fotovoltaik tesisin yatay eksenlerdeki hareketlilikler için kuzey ve doğu kenarlarından, en yaygın kullanılan Q235 sınıfı çelikten üretilen sıcak daldırma galvanizli zemin vidaları ile kıyıya demirleme yapılması planlanmıştır. Zemin vidaları 1,6 m uzunluğuna, 76 mm boru dış çapına ve 3 mm boru kenar kalınlığına sahip flanşlı demirleme elemanlarıdır. Dikey eksenli hareketlere karşı da güney ve doğu kenarlarından belirli aralıklarla beton ağırlık blokları kullanılmaktadır. Şekil 5.24'te sunulduğu üzere yüzer tip fotovoltaik tesisin sabitleme sistemi, flanşlı zemin vidası, çelik halat ve dubayı kavrayan bağlantı kirişinden oluşmaktadır. Çelik halat yapısı ise çelik özlü bağımsız tel halat çekirdeğine sahip (IWRC-Independent Wire Rope Core) 6x19 AA modelinde yani her biri 19 adet çelik tel bulduran 6 adet çelik tel grubunun bağımsız çelik çekirdek etrafında dairesel dizilimi ile elde edilen halat şeklindedir.



Şekil 5.25. Yüzer tip fotovoltaik tesisin demirleme montaj sistemi detayı.

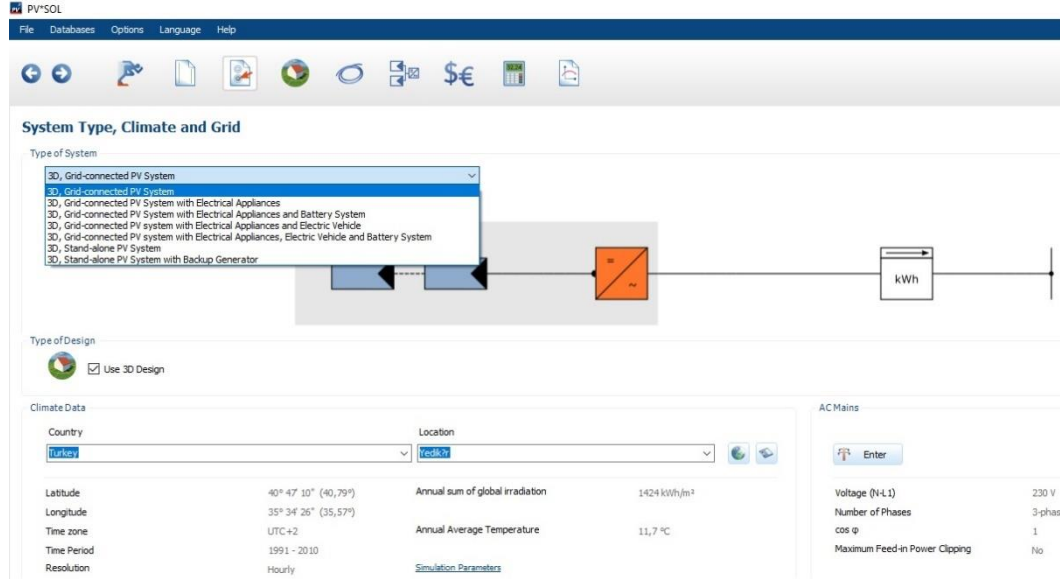
5.2.5. Tesisin teknik ve finansal analizinde kullanılan simülasyon yazılımları

Karşılaştırmalı teknik ve finansal analizleri gerçekleştirilen yüzer tip fotovoltaik tesisin üç boyutlu tasarımı ve enerji üretim analizleri PV*SOL yazılımı kullanılarak, verilerin karşılaştırılması ve finansal analizleri ise PVsyst yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tesisat planı için hazırlanan tek hat şeması ve yüzdürücü sistemde kullanılan ürünlerin ebatlarına göre hazırlanan tesise ait yüzdürücü sistem yerleşim planı AutoCAD yazılımı kullanılarak iki boyutlu çizim modeli ile hazırlanmıştır.

PV*SOL yazılımı, Valentin Software GmbH firmasının 1998 yılında ilk sürümünü üretmiş olduğu fotovoltaik sistemlerin dinamik simülasyonu, tasarımı, verim ve tahmini ekonomik analizlerini gerçekleştiren bir programdır. Valentin Software firmasının kurucusu Dr. Ing. Gerhard Valentin, 1993 yılında ilk yazılım olarak termal güneş sistemlerinin tasarım ve analiz simülasyonu olan T*SOL yazılımını piyasaya sürdü. Bunu 1998 yılında fotovoltaik sistemler için tasarım ve simülasyon yazılımının ilk sürümü olan PV*SOL izledi. Sınırlı sorumlu şirket (Gesellschaft mit beschränkter Haftung-GmbH) modeline sahip olan Valentin Software firmasının kurucusu Dr. Valentin, 2016 yılında emekli olmakla beraber şirketin ana hissedarıdır.

Fotovoltaik tesis tipi olarak şebeke bağlantılı ve şebekeden bağımsız ana başlığı altında toplam yedi farklı modelde tasarım gerçekleştirilebilen PV*SOL yazılımının veri tabanında halihazırda 21 000'den fazla fotovoltaik modül, 5 000'den fazla solar evirici, 2 000'e yakın akü modeli, elektrikli araçlar ve performans optimize ediciler gibi diğer birçok ürünü içermektedir. PV*SOL yazılımında tesis tasarımı Şekil 5.25'te sunulduğu üzere

şebeke bağlantı tipi ve lokasyon verileri seçilerek başlar ve üç boyutlu tasarım yapılabilmeye başlanarak yapılmayacağı belirtilerek detayların oluşturulacağı aşamaya geçilir.



Şekil 5.26. PV*SOL yazılımının tesis tasarım başlangıç arayüzü görüntüsü.

Tesis tasarım başlangıç ekranında simülasyon parametreleri bölümünden tesisin kurulacağı alanın, güneş ışınlarının zemin yüzeyinden yansımaya oranını belirten Albedo katsayısı, tozlanma kayıpları, uyumsuzluk kayıpları gibi çevresel etkilerden kaynaklanan kayıp veya kazançların yıllık veya aylık bazda oransal olarak girişleri yapılır. Simüle edilen yüzer tip fotovoltaik tesis göl yüzeyinde olması nedeniyle Albedo katsayısı %8 olarak programlanmıştır. Ayrıca yazılımın default ayarları olan, Bypass diyotlarındaki voltaj düşümü kayıpları olarak %0,5, solar panellerin eviricilere giriş uyumsuzluk kayıpları olarak %2, ortamın sakin su yüzeyi olması nedeniyle kirlilik kayıpları olarak %0 oranları sabit tutulmuştur.

Daha sonra 3D modelleme bölümüne geçilerek PV*SOL yazılımının harita veri tabanı yardımıyla tesisin kurulacağı lokasyonun görüntüsü fon yaptırılır. Fonun üzerinde tesisin kurulacağı alanın, eğimli bölgeleri, engellenmesi gereken kısımları, sınırları, yakınlarında bulunan gölge oluşturabilecek nesnelere gibi yüzey bilgileri yine yazılımın 3D nesnelere kullanılarak oluşturulur. Simüle edilen yüzer tip fotovoltaik tesis, 40 cm yüksekliğindeki dubalar üzerine konumlandırılacağı için yine bu yükseklikte 210 m x 62 m ebatlarında düz platform kullanılmıştır.

Fotovoltaik tesisin yerleşim planı hazırlandıktan sonra kullanılacak olan solar modül tipi ve dikey veya yatay kullanım şekli belirlenir ve modül montaj arayüzüne geçilerek modüllerin montaj planı hazırlanır. Montaj planı arayüzünde, Şekil 5.26'da sunulduğu üzere ilk kısımda, tek konstrüksiyonda dikey yönde birleşik olarak kaç adet modül yerleştirileceği, modüller arası dikey ve yatayda ne kadar mesafe olacağı, panel alt kenarının yerden yüksekliğinin ne kadar olacağı bilgileri sisteme işlenmiş olur.

The screenshot displays the solar module mounting plan interface with the following parameters:

- Active Module:** CW Enerji Müh. Ticaret ve San. Ltd. Şti. CWT-300-60M 300 W [Horizontal]
- Module Mount:**
 - Number of vertical Modules: 1
 - Module Spacing - horizontal: 0,005 m
 - Module Spacing - vertical: 0,005 m
 - Height of Bottom Edge: 0,100 m
- Orientation:**
 - Mount Angle: 24,00°
 - Orientation to Mounting Surface: 4,00°
- Placing:**
 - Depth of Row: 0,909 m
 - Mounting Support Clearance: 1,200 m
 - Row Spacing: 2,109 m
 - Area Utilization Ratio: 0,472

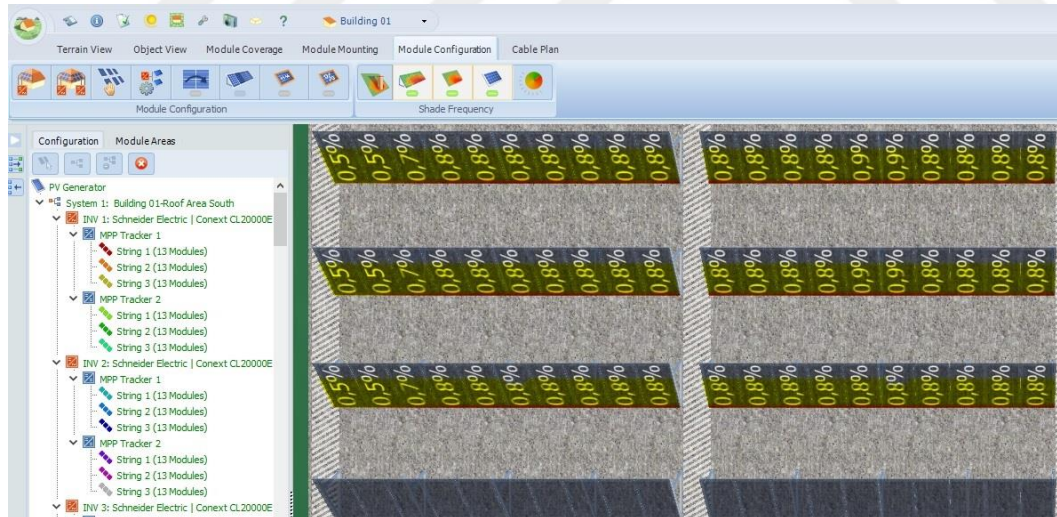
Şekil 5.27. Analizi gerçekleştirilen yüzer tip fotovoltaik tesisin modül montaj planı arayüz görüntüsü.

İkinci kısımda tilt açısı olarak da ifade edilen solar panel montaj açısı ve güneşe bakan cephede doğu-batı istikametinde yapılması gereken azimut açısı değerleri işlenir. Üçüncü kısımda ise solar panel dizileri arasındaki yaklaşma mesafesi belirtilir ve solar paneller birlikte bir sıranın ne kadar mesafe gerektirdiği tespit edilmiş olur.

Tasarımı ve teknik analizi gerçekleştirilen yüzer tip fotovoltaik tesisin, dikey modül dizilimi tek sıra olacak şekilde ve yan yana gelen solar panellerin arasında yatayda 5 mm boşluk bulunan, panel alt kenarının yerden yani yüzdürücü duba yüzeyinden 10 cm yukarıda olacak şekilde konstrüksiyon yapısına sahip olacak şekilde veri girişi yapılmıştır. Solar panel montaj açısı ve azimut açısı olarak ise değişik açılar uygulanarak lokasyonun

enerji üretimi açısından en verimli konum açıları tespit edilmiştir. Kuzey-güney yönünde diziler arasındaki mesafe, tesisin kaplayacağı alan hususunda engelleyici bir durum olmadığı için gölge oluşumunu minimize etmek üzere 1,2 m tercih edilmiş olup bir panel sırası 2,11 m genişliğe sahip olmaktadır. Tesis toplamda 29 sıra panel diziliminden oluştuğundan toplam genişlik 62 m olmaktadır.

Solar panel yerleşim planının hazırlanması ile birlikte tesisin kurulu gücü de net olarak belirlenmiş olmakta ve evirici seçim arayüzüne geçilmektedir. Evirici modelinin seçilmesi ve mppt girişlerinin her birine bağlanması gereken ideal solar panel adetinin planlanması, uyumsuzluk kayıplarını minimize etmek için çok önemlidir. Tesisin enerji üretimi verimine uyumsuzluk kayıplarının etkisini tespit etmek maksadıyla, simule edilen yüzer tip fotovoltaik tesiste diğer parametreler sabit tutularak iki farklı evirici tipi kullanılmış ve analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Bu yönde yapılan tasarımda, Schneider Electric firmasının Conext TL 20000 E model 20 kW güç kapasitesinde trafosuz tip eviricisi ve yine Schneider Electric firmasına ait Conext CL25000E model 25 kW güç kapasitesinde trafolu tip eviricisi kullanılmıştır.

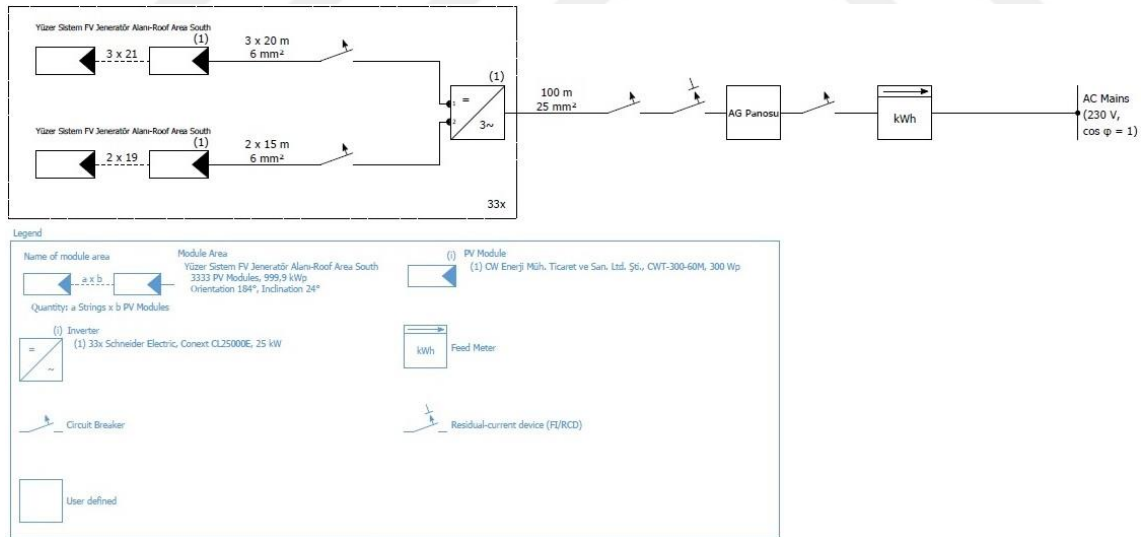


Şekil 5.28. PV*SOL yazılımında eviriciye solar dizilerin dağılımı ve gölge analizi arayüzünden bir kesit.

Evirici planlamasının yapıldığı arayüzde ayrıca gölge analizi yapılabilmekte ve solar paneller üzerine düşen gölge oranları görselleştirilebilmektedir. Gölge analizi yapıldıktan sonra kırmızı tonlama ile belirtilen yüksek gölge düzeyine sahip paneller varsa konumları tekrar düzenlenerek tesisin enerji üretim verimindeki kayıplar azaltılmalıdır. Şekil 5.27’de

PV*SOL yazılımında eviriciye solar dizilerin dağılımı ve gölge analizi arayüzünde gölge kayıplarının minimize edildiği örnek bir kullanıcı arayüz kesiti sunulmaktadır.

Evirici montajı ve gölge analizi tamamlandıktan sonra kullanılacak olan kablaj bağlantı sistemi ve şalt malzeme seçimi arayüzüne geçilir. Fotovoltaik panellerden şebeke dağıtım noktasına kadar kullanılacak olan kablo ve şalt malzeme tipleri ayrıntılı olarak belirtilebilmekte güç kayıpları anlık olarak görüntülenebilmektedir. Kablo tesisatında kaybedilen gücü azaltmak için donanımlar arası mesafenin olabildiğince kısaltılması, evirici ve elektrik panolarının olabildiğince merkezi nitelikte konumlandırılmaları önemlidir. Kablo mesafesi uzadıkça gerilim düşümünü azaltmak için kullanılması gereken kablo çapı artırılması gerekmekte dolayısıyla maliyet yükselmektedir. Doğru akım tarafında da alternatif akım tarafında da kablo tesisatında oluşacak gerilim düşümünün %3'ü geçmemesi gerekir. Teknik analizi gerçekleştirilen yüzer tip fotovoltaik tesiste kablo tesisatındaki toplam güç kaybı %1 civarında olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Şekil 5.28'de kablo ve şalt malzeme planı tamamlandıktan sonra PV*SOL yazılımı tarafından hazırlanan tesis tek hat şeması örneği sunulmaktadır.



Şekil 5.29. PV*SOL yazılımının kablo planı arayüzünde oluşturduğu tek hat şeması örneği görüntüsü.

Tesisin devre planı tamamlandıktan sonra finansal analiz arayüzüne geçilmekte, tesisin maliyet bilgileri ve varsa alınan finansal destek miktarları detaylı olarak girilebilmektedir. Ancak tesisin sadece teknik olarak performans analizi yapılıyorsa bu kısımda default değerler değiştirilmeden raporlama arayüzüne geçilebilir. Son olarak simülasyon

yazılımına verilen bilgiler doğrultusunda oluşturulan tesisin rapor arayüzünde görüntülenen tüm analiz verileri yazıcıdan çıktı alınabilir, daha sonra değerlendirmesi yapılmak üzere Pdf veya Word dökümanı olarak saklanabilir.

PV*SOL de kullanılan verilerin ve elde edilen analiz sonuçlarının karşılaştırmalı teyidinin yapılması ve sağlıklı maliyet analizi yapmak için ikinci simülasyon yazılımı olarak PVsyst programı kullanılmıştır. PVsyst yazılımı, versiyon 5.4'e (Haziran 2011) kadar Cenevre Üniversitesi'nin Çevre Bilimleri Enstitüsü'nde Enerji Grubu'nda Dr. André Mermoud tarafından geliştirilmiş bir İsviçre yazılımıdır.

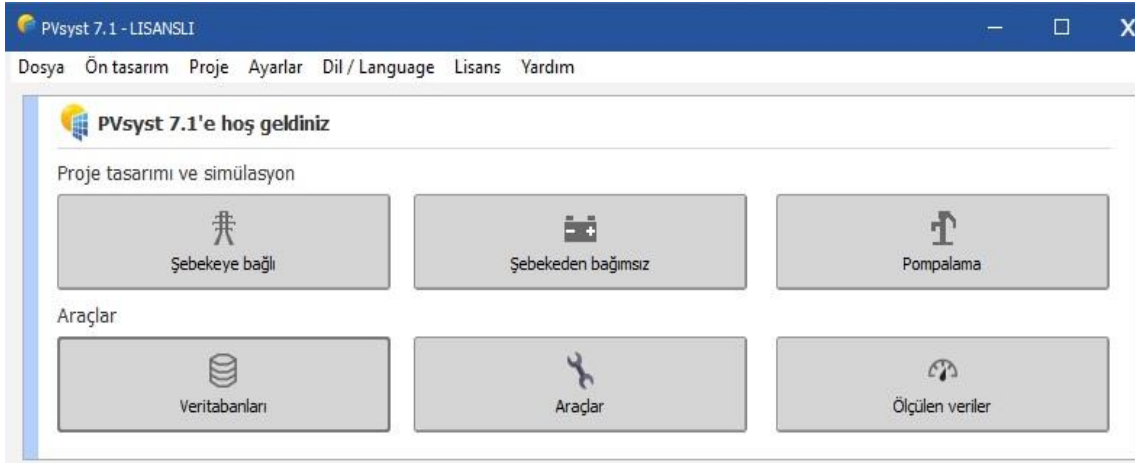
Yazılımın ismini aldığı PVsyst SA şirketi, PVsyst yazılımının yazarı ve fikri mülkiyet sahibi Dr. André Mermoud ve arkadaşı Michel Villoz tarafından kurulmuştur.

Dr. André Mermoud 1992 yılında fotovoltaik sistemlerin incelenmesi ve simülasyonu için PVsyst yazılımını geliştirdi. 3D gölgeleme yapıları, bağımsız fotovoltaik sistemlerin simülasyonu ve hidroelektrik enerji santrallerinde pompalara enerji sağlayan fotovoltaik sistemler için uygulama geliştirerek PVsyst yazılımına entegre etti. Halen kullanıcıların gelişen ihtiyaçlarını ve fotovoltaik endüstrisindeki yenilikleri takip ederek PVsyst yazılımını aktif olarak geliştirmeye devam etmektedir.

Michel Villoz ise Dynatex SA şirketinin direktörlüğünü yapmakla beraber PVsyst SA'da kurum içi fotovoltaik sistemler konusunda eğitimlik yapmakta ve fotovoltaik teknolojisi ile ilgili isteğe bağlı uzmanlık eğitimi vermektedir.

PVsyst SA şirketi, halka açık limited şirketi (Public Limited Company-PLC) tabirinin Fransızca karşılığı olan anonim toplum (Société Anonyme-SA) yapısına sahip olarak yazılımlar üretmeye devam etmektedir.

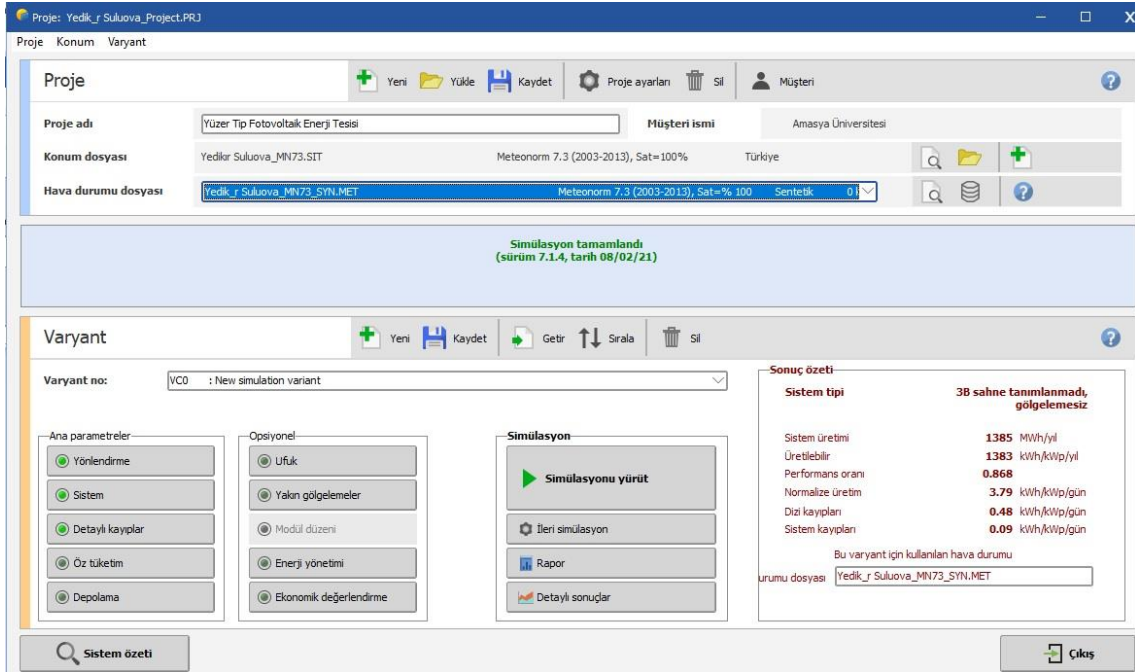
Yüzer tip fotovoltaik tesisin analizleri için PVsyst yazılımının 2021 yılı sürümü olan versiyon 7.1.6'nın eğitim lisansı satın alınmış ve arayüzlerine erişim engeli olmadan kullanılmıştır. 7.1 versiyonu ile yenilikçi bir arayüze sahip olan PVsyst yazılımı başlangıç arayüzünde, Şekil 5.29'da sunulduğu üzere oluşturulacak fotovoltaik tesisin şebeke bağlantı tipi ve konum bilgilerinin seçilmesini kullanıcıdan talep eder.



Şekil 5.30. PVsyst yazılımının tesis tasarım başlangıç arayüzü görüntüsü.

Çalışmada şebeke bağlantılı bir tesis modeli planlandığı için “Şebekeye bağlı” seçeneği seçildiğinde, tesise ait detay verilerinin yazılıma işleneceği ana yönetim arayüzü açılmaktadır. Şekil 5.30’da sunulan simülasyon ana yönetim arayüzünde görüldüğü üzere ilk aşama olarak fotovoltaik tesisin konumuna ait veriler, iklim ve radyasyon verileri yine yazılımın veritabanı aracılığıyla proje dosyasına işlenir.

İkinci aşamada, “Yönlendirme” kısmından tesise ait montaj açıları, “Sistem” kısmından solar panel ve evirici özellikleri, kaç adet kullanılacakları, evirici mppt girişlerine bağlanan dizilerin nasıl oluşturulacağı bilgileri girilmektedir. “Detaylı kayıplar” kısmında simülasyonun default ayarları kontrol edilerek öngörülen veya ayrıca belirtilmesi gereken kayıpların miktarları belirtilir. Tesisin kendisine ait enerji tüketimi söz konusu ise “Öz tüketim” seçeneğinde, üretilen elektrik enerjisinin depolanması söz konusu ise “Depolama” seçeneğinden depolama stratejisi belirlenir. Fotovoltaik paneller üzerinde oluşacak gölge oluşumlarının hesaplanabilmesi için “Yakın gölgelemeler” seçeneğine girilerek iki boyutlu panel dizilim planı hazırlanır. “Enerji yönetimi” arayüzünde şebekeye verilecek olan enerjide ayrıca bir enerji kısıtlaması söz konusu ise gerekli değişiklikler yapılır ya da default ayarlar korunur. Simule edilmeye hazır hale gelen tesisin sisteme işlenen verileri kaydedilerek veri tabanında oluşturulan dosyasına yüklenir ve “Simülasyonu yürüt” butonuna basılarak teknik analiz başlatılır, yıllık bazda oluşan analiz verileri rapor halinde pdf dökümanı olarak kaydedilebilir veya bir yazıcı vasıtasıyla çıktı alınabilir.



Şekil 5.31. PVsyst yazılımının simülasyon detay paneli arayüz görüntüsü.

Simülasyon tamamlandıktan sonra “Ekonomik değerlendirme” seçeneği aktif hale gelir, ekonomik değerlendirme arayüzünde tesise ait kurulum maliyetleri, işletme maliyetleri, finansman bilgileri, şebekeye satışı gerçekleştirilen enerjinin gelir tarifesi bilgileri belirtilerek finansal analiz gerçekleştirilir ve rapor haline getirilir. Son olarak ise yenilenebilir enerji kaynağı kullanarak enerji üreten tesisin önlediği karbon salınımı miktarı olarak doğaya sağladığı faydayı tespit etmek için “karbon dengeleme” arayüzündeki veriler değerlendirilir.

Bir yüzer tip fotovoltaik enerji santrali örneğinin teknik ve mali analizinin gerçekleştirildiği bu çalışmada, tesisin kurulum maliyeti ve yıllara sâri olarak getireceği gelir miktarını analiz etmek, önlenecek karbon salınımı miktarının öngörülmesi amacıyla PVsyst yazılımının “Ekonomik değerlendirme” ve “karbon dengeleme” arayüzlerinden yararlanılmıştır.

Yüzer tip fotovoltaik enerji santrali tasarımı gerçekleştirilirken yararlanılan bir diğer yazılım ise AutoCAD tasarım programının 2017 versiyonudur. AutoCAD yazılımı Autodesk firmasının Aralık 1982’de ilk sürümünü ürettiği ve İngilizce “Automatic” ve “Computer Aided Design” kelimelerinin birleşiminden oluşan AutoCAD ismini vererek kullanıcıların hizmetine sunduğu bir otomatik bilgisayar destekli tasarım yazılımıdır.

AutoCAD ile çizim yapmak, yapılanları daha sonra revizyona sokmak, tasarımınızı gerçeğe dönüştürmeden önce ekranda görmek, çizdiğiniz nesnelere renk atamak, farklı çizgi tipleri kullanmak, farklı desenlerde taramalar gerçekleştirmek, çizimin bir parçasının ya da tümünün yazıcı ya da çiziciden istediğiniz ölçekte çıktısını almak çok daha kolaylaşmaktadır. Teknik resim çizmek için kullanılan ilk vektörel çizim programlarından biridir.

Autodesk 1982 yılında, AutoCAD 'in ilk versiyonlarının ortak mucidi olan John Walker tarafından kurulan ve merkezi Kaliforniya eyaletine bağlı San Rafael kenti olan bilgisayar destekli grafik tasarım konusunda uzmanlaşmış bir yazılım şirkettir. Bugün Autodesk firması 10 000'den fazla çalışanı ile AutoCAD, Civil 3D, Fusion 360, 3ds Max gibi bilinen kapsamlı yazılımların yanında yaklaşık on bir farklı dalda tasarım yazılımları üreten popüler bir yazılım şirkettir.

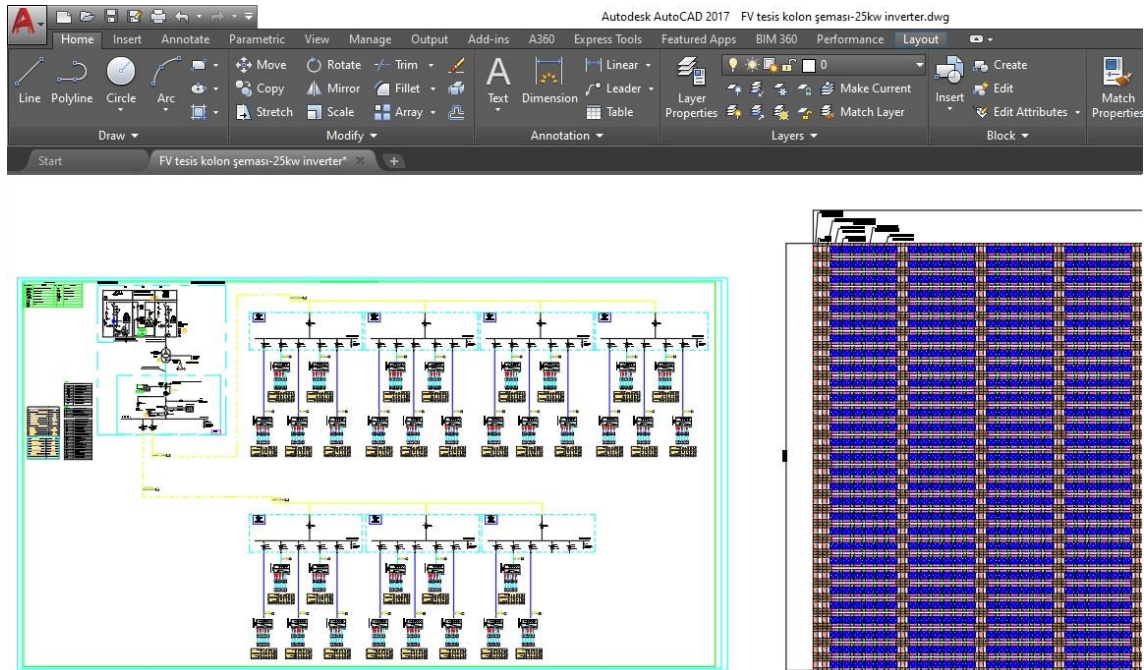
AutoCAD yazılımının ilk sürümü "AutoCAD Version 1.0" ismiyle kullanıcıya sunulmuş ve "AutoCAD versiyon 2.6" dan sonra, versiyon yerine sürüm anlamına gelen "release" tabiri kullanılmaya başlanmıştır. "AutoCAD Release 12" sürümünden itibaren yazılım hem DOS tabanlı hem de WINDOWS tabanlı olarak üretilmeye başlanmış ancak Windows' ta oluşan gelişmeler doğrultusunda "AutoCAD Release 13 "ten sonra DOS tabanlı AutoCAD yazılımlarının üretimi durdurulmuştur. "AutoCAD Release 14" sürümünden sonra çıkan sürümler için Autodesk firması yeni bir isimlendirme şekline giderek ileriye ışık tutmak adına üretildiği yılın bir sonraki yıl tarihini sürüm adı olarak belirlemeye karar vermiş ve Mart 1999'da çıkardığı sürüme "AutoCAD 2000" adını vermiştir. Firma henüz bu isim politikasına devam etmektedir. En son sürümü Mart 2020 tarihinde yayınlayarak "AutoCAD 2021" adı ile kullanıcıların hizmetine sunmuştur.

Çalışmada fotovoltaik tesisin donanımlar arası bağlantı şeklini ve yüzdürücü sistemlerin yerleşim planını tasarlarken AutoCAD yazılımından yararlanılmıştır. Böylelikle tesisi oluşturan tüm donanımların maliyet hesabını çıkarmak için yapılması gereken metraj hesabının kolaylaştırılması sağlanmıştır.

AutoCAD yazılımı ile öncelikle, enerji tesisinde elde edilen elektrik akımının solar panelden orta gerilim trafosuna doğru olan yolculuğunda uğradığı donanımlar ve yollardan temsili irtibatlandırma modeli ile tek hat şeması oluşturulmuştur. Tek hat şeması, tesisin

kurulumundan işletme safhasına değin, montajı gerçekleştiren yüklenici firmadan işletme sahibine ve enerji dağıtım firmasına kadar ilgili tüm teknik personele tesisin krokisi vazifesi gören önemli bir proje dökümanıdır.

Ayrıca yüzdürücü sistem olarak yerli üretim ve ithal ürünler kullanılarak iki farklı modelde tasarlanan tesisin, malzeme ölçülerine ve solar panel yerleşim planına sadık kalarak AutoCAD tasarım programı vasıtasıyla tasarımı gerçekleştirilmiş ve malzeme metrajları hesaplanmıştır. Şekil 5.31’de AutoCAD yazılımında hazırlanan tek hat şeması ve yüzdürücü duba sisteminden bir kesitin gösterildiği AutoCAD 2017 sürümünden arayüz görüntüsü sunulmaktadır.



Şekil 5.32. Fotovoltaik tesise ait tek hat şeması ve yüzdürücü sistemin tasarlandığı AutoCAD 2017 sürümü arayüz görüntüsü.

1 MW_p kurulu güce sahip yüzer tip fotovoltaik tesis örneğinin maliyet analizi, RETScreen Expert yazılımının güncel versiyonu olan Viewer 8.0 sürümü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. RETScreen yazılımı isim olarak “yenilenebilir enerji teknolojileri ekranı” cümlesinin İngilizce karşılığı olan “renewable energy technologies screen” ifadesinin kısaltmasından oluşmaktadır. Bu yazılım yenilenebilir enerji ve kojenerasyon tesislerinin projelendirilmesinde, enerji verimliliği analizi ve fizibilite çalışmalarında ve enerji performans analizi işlemlerinde dünya genelinde yaygın olarak tercih gören bir temiz enerji yönetim yazılımı sistemidir. RETScreen yazılımının ilk versiyonu 30 Nisan 1998’de, RETScreen Expert versiyonu ise 19 Eylül 2016’da kullanıma sunulmuş olup

"izleyici modu" ücretsizdir ve yazılımın tüm fonksiyonları kullanıma açık durumdadır. Ancak kullanıcıların projelerini kaydetmesine, oluşturdukları raporlamaları çıktı almasına izleyici versiyonu müsaade etmemekte, bu fonksiyonların aktif hale getirilebilmesi için lisans alınarak "profesyonel mod" a geçilmesi gerekmektedir. Kanada Doğal Kaynaklar Bakanlığı tarafından geliştirilmiş olan RETScreen, dünya genelinde 600 000'den fazla kullanıcı tarafından Türkçe de dâhil olmak üzere 36 farklı dilde kullanılabilir.



6. YÜZER TIP FV ENERJİ ÜRETİM TESİSİ ÖRNEĞİ TEKNİK ANALİZİ

Çalışmada ilk olarak tilt açısı şeklinde ifade edilen ve tesisin bulunduğu lokasyon koşullarına göre farklılık gösteren, fotovoltaik panelin güneş ışınlarını dik olarak alabildiği ve yer düzlemi ile yapması gereken ideal montaj açısını tespit etmek, açı değişikliklerinde enerji üretim performansının nasıl etkilendiğini mukayese ederek optimum enerji üretim performansını elde etmek amaçlanmıştır.

İkinci olarak, azimut açısı olarak tabir edilen, fotovoltaik panelin veya tesisin kuzey-güney ekseninde yerleşim yönü olarak kuzeye göre yapması gereken ideal montaj açısını tespit etmek, açı değişikliklerinde enerji üretim performansının nasıl etkilendiğini mukayese ederek optimum enerji üretim performansı elde etmek amaçlanmıştır.

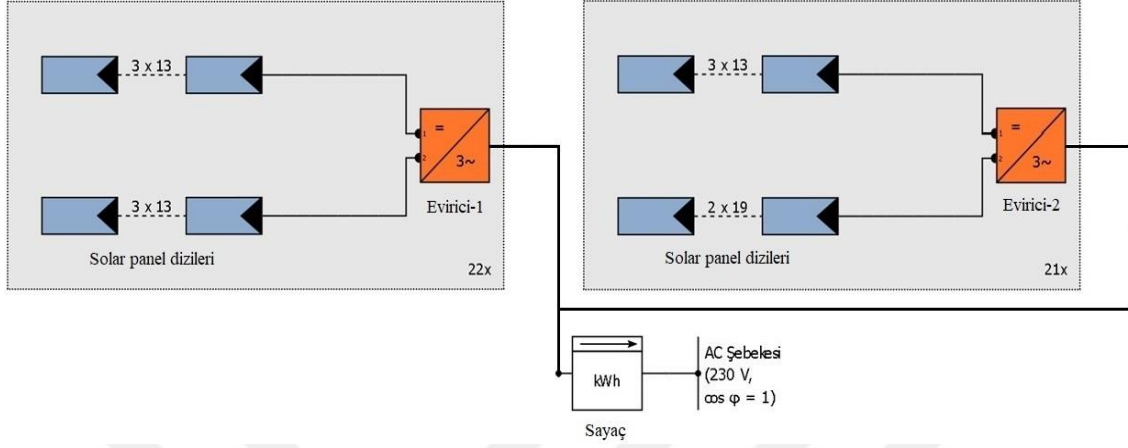
Üçüncü amaç olarak, aynı güç ve teknik parametrelere sahip fotovoltaik enerji tesisini, panel hücreleri özelliği olarak monokristal yapıya sahip paneller ve polikristal yapıya sahip paneller kullanarak oluşturup, tesisin enerji üretim performanslarını mukayeseli olarak analiz etmek amaçlanmıştır.

Dördüncü amaç, evirici seçiminin bir fotovoltaik tesiste oluşabilecek enerji kayıplarından biri olan güç dönüştürme kayıpları üzerindeki etkisi ve güç dönüştürme kayıplarının da tesisten şebekeye verilen toplam enerji miktarı üzerindeki etkisini analiz etmektir.

Son olarak 1 MWp kurulu güce sahip yüzer tip fotovoltaik enerji üretim tesisinin üretim ve dağıtım kısmını oluşturan bileşenlerini yerli üretim ürünler kullanarak, yüzdürücü sistemi oluşturan bileşenlerde ise yerli üretim ürünler ile Çin menşeli ürünleri karşılaştırma yapacak şekilde tesis kurulum maliyeti analizini gerçekleştirmek amaçlanmıştır.

Amasya ili Suluova ilçesi Yedikır Barajı'nın kuzeydoğu bölgesinde su yüzeyine yüzdürücü sistem vasıtasıyla kurulu gücü 1 MWp olan bir yüzer tip fotovoltaik enerji üretim santrali örneğinin PV*SOL yazılımı kullanılarak analiz edildiği bu çalışmada, öncelikle donanım modelleri belirlenerek tesisin yapısal bileşenleri sabit hale getirilmiş ve lokasyon koşullarına göre solar panellerin montaj açıları yönünden tesisin verim analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler öncesinde tesisi oluşturan donanımlar olarak, 3 333 adet 300 Wp nominal çıkış gücünde CW Enerji Müh. Ticaret ve San. Ltd. Şti.'ne ait CWT-300-

60M model monokristal solar paneller, 43 adet 20 kW nominal çıkış gücünde Schneider Electric firmasına ait Conext TL20000E model eviriciler kullanılmıştır.



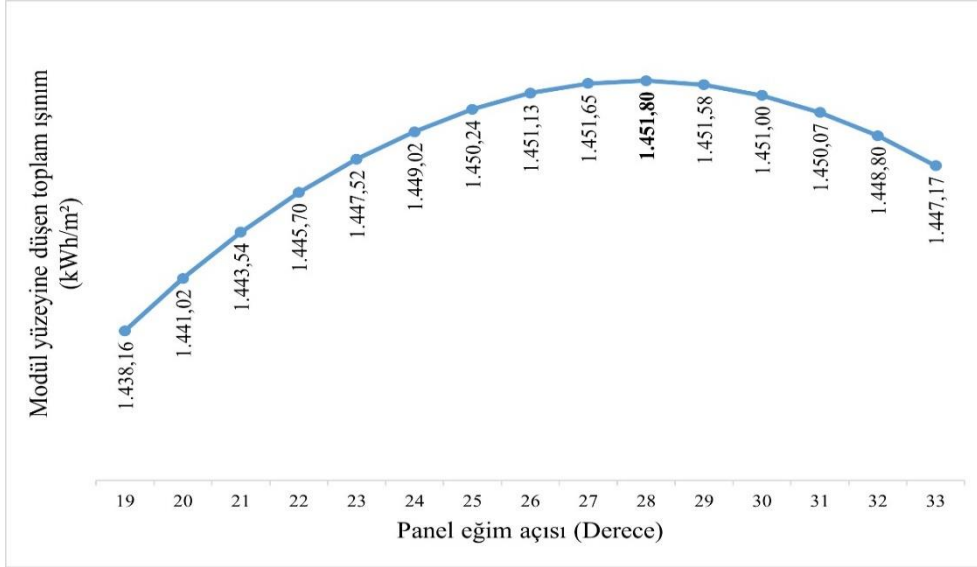
Şekil 6.1. PV*SOL yazılımında mukayeseli analizler için sabit olarak oluşturulan dizi bağlantı şeması.

İki adet mppt girişi ve her mppt girişinde üçer adet alt girişe sahip eviricilerin 22 adetinde her iki mppt girişine de 3x13 modül, 21 adetinde ise birinci mppt girişine 3x13 modül ikinci mppt girişine 2x19 modül bağlantısı yapılarak Şekil 7.1’de sunulduğu üzere dengeli güç dağılımı yapılmaya çalışılmıştır. Solar panellerin yerleşim planı olarak ise 62 m genişlik ve 210 m uzunluktaki alana aralarında 1,2 m yaklaşma mesafesi olacak şekilde toplam 29 sıra solar panel dizilimi oluşturulmuş, modüllerden kaynaklanan kısmi gölge oluşumunu azaltmak için solar paneller tek sıra ve yatay olarak konumlandırılmıştır. Doğu-batı istikametinde yatay olarak kullanılan her 6 adet solar panel bloğunun arasına 80cm genişliğinde bakım yolu mesafesi bırakılmıştır. Tesisin yerleşim yönü ise tam güney olacak şekilde azimut açısı kuzeye göre 180^0 ve güneş radyasyonunun zeminden yansımaya katsayısı olan Albedo katsayısı tesisin su yüzeyinde olması nedeniyle %8 olarak PV*SOL yazılımına uygulanmıştır. Ayrıca kablo tesisatında kaybedilen enerjinin oranının sabit %0,9 olacağı şekilde tesisat yapısı planlanmıştır.

6.1. Yüzer Tip FV Tesisin İdeal Tilt Açısı Teknik Analizi

Yedikır Barajı’nın kuzeydoğusunda baraj yüzeyine 1 MWp kurulu gücünde ve bir üst başlıkta belirtilen şekilde donanım ve yerleşim planına sahip yüzer tip fotovoltaik tesisin üç boyutlu tasarımı PV*SOL yazılımında tamamlandıktan sonra solar modül tilt açısının tesisin yıllık enerji üretim verimliliğine etkisini ve optimum verimin elde edildiği tilt

açısını tespit etmek amacıyla solar panellerin zemin ile yaptığı açı aralığı 19° - 33° olarak belirlenmiştir. Yani solar panellerin 19° ile 33° aralığında her bir tilt açısı değeri için tesisin yıllık enerji üretim durumu PV*SOL yazılımı ile simüle edilerek ayrı ayrı analiz edilmiş ve sonuçları grafiklerle değerlendirilmiştir.

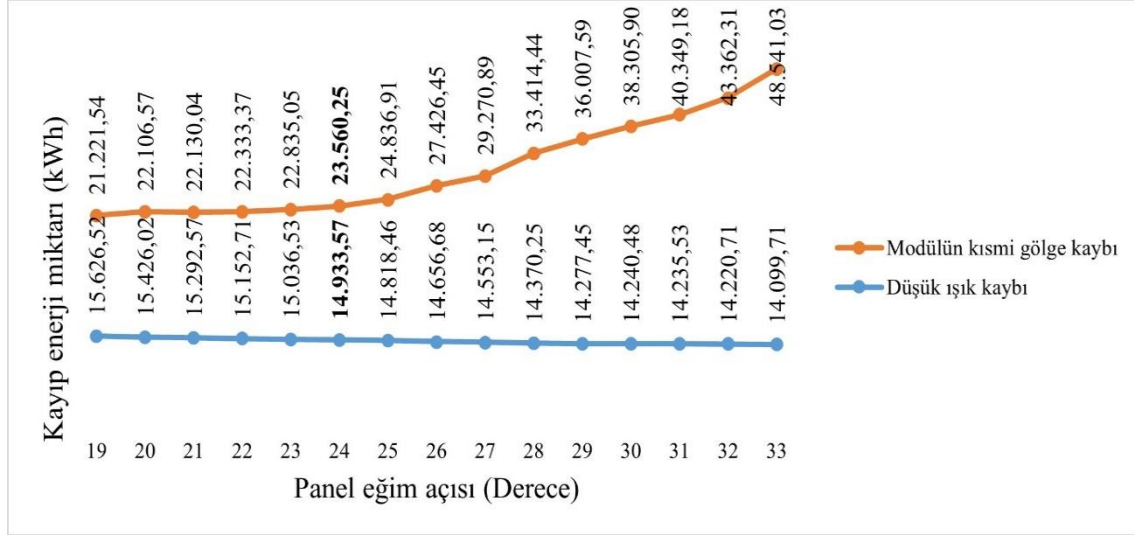


Şekil 6.2. Eğim açısına göre solar paneller üzerine düşen toplam ışınım miktarları simülasyon sonuç grafiği.

PV*SOL yazılımı fotovoltaik tesisin teknik analizini gerçekleştirirken öncelikle lokasyonun koordinat bilgilerine göre solar panel yüzeyine düşecek olan güneş radyasyonu miktarını hesaplamaktadır. Meteoroloji verilerini baz alan yazılım, Yedikır Barajı lokasyonunun yıllık güneş radyasyonu miktarını $1\,423,67\text{ kWh/m}^2$ olarak ölçmekte ve bunun üzerinden standart spektrumdan sapma, modül yüzeyinde yansımaya, modülden bağımsız gölgeleme kayıplarını düşmekte; zemin yansıtma katsayısı (Albedo) ve modül yüzeyinin yerleşim yönü ve eğiminden gelen kazançları kWh/m^2 cinsinden ilave ederek modül yüzeyine düşen toplam ışınım miktarını belirlemektedir. Şekil 7.2’de sunulan tilt açısına göre solar paneller üzerine düşen toplam ışınım miktarları simülasyon sonuç grafiğinde belirtildiği üzere panel yüzeyine düşen maksimum enerji miktarı $1\,451,80\text{ kWh/m}^2$ ile panel eğimi 28° iken oluşmaktadır.

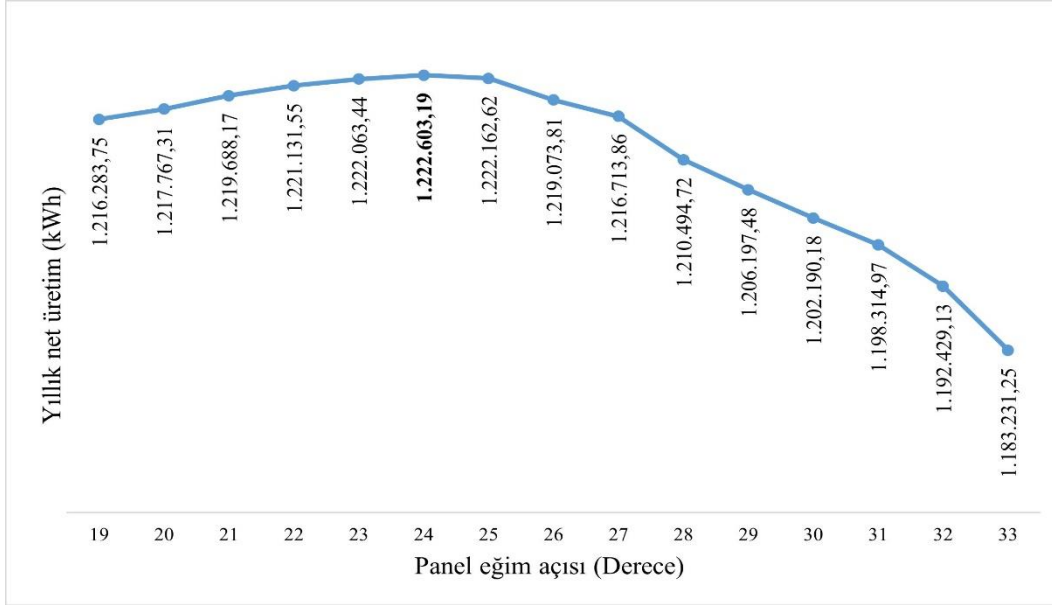
Net olarak enerji üretimine dahil olan yüzey alanı bakımından fotovoltaik panellerin oluşturmuş olduğu solar alan $5\,465,32\text{ m}^2$ olduğu için yıllık kümülatif enerji üretim potansiyeli $7\,934\,555,96\text{ kWh}$ ’dir. Ancak tesiste kullanılan solar modüllerin nominal

verimliliği %18,38 olduğu için bu potansiyelin %81,62'si doğal olarak kaybedilir ve yıllık kümülatif 1 458 664,19 kWh'lik enerji miktarı üzerinden üretim analizine devam edilir.



Şekil 6.3. Solar panellerde eğim açısına göre oluşan kısmi gölge ve düşük ışık tabanlı enerji kayıpları simülasyon sonuç grafiği.

Güneş radyasyonu solar paneller tarafından soğurulduktan sonra enerjinin bir kısmı panel iç donanımında kaybedilir. Modüllerde oluşan kısmi gölgelemeden, modül düşük ışık performanslarından, solar modüllerin test koşullarına göre nominal modül sıcaklığından sapma nedeniyle, diyotlardan ve dizi üretim uyumsuzluklarından kaynaklanan kayıplar tesisin enerji üretim performansını önemli ölçüde olumsuz etkilemektedir. Yapılan teknik analizde Şekil 7.3'te sunulduğu üzere solar modüllerin kısmi gölgeden ve düşük ışık performansından kaynaklanan enerji kayıpları solar panellerin eğim açısına göre kaybettiği enerji miktarının sonucu etkileyici iki unsur olduğu görülmektedir. Diğer parametreler sabit tutularak solar panel eğimi 19⁰'den 33⁰'ye doğru artırılmak suretiyle yapılan teknik analizlerin sonucunda kısmi gölgeden kaynaklanan kayıpların özellikle 24⁰ eğimden sonra büyük farklarla arttığı ve beraberinde düşük ışık nedeniyle yaşanan enerji kayıplarının da küçük farklarla azalma gösterdiği tespit edilmiştir.



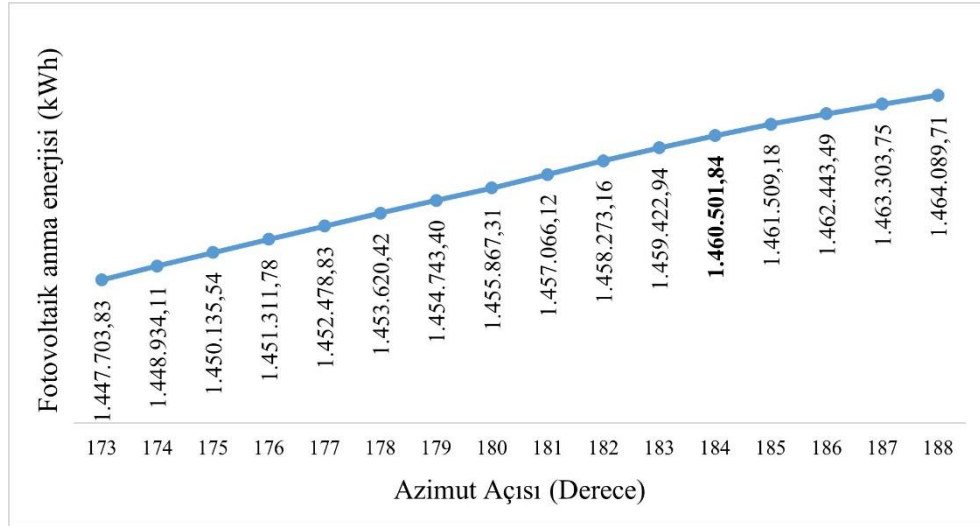
Şekil 6.4. Solar panellerde eğim açısına göre yıllık net elektrik enerjisi üretim miktarı simülasyon sonuç grafiği.

Fotovoltaik panellerde üretilen DC akımın eviricilere ulaşması, eviricilerde DC/AC dönüşümün gerçekleşmesi, AC akımın şebekeye kadar taşınması esnasında oluşan sabit kayıplar da yazılım tarafından analiz sonuçlarına dahil edilerek yıllık net elektrik enerjisi üretim miktarları belirlenmektedir. Şekil 7.4'teki grafikte de sunulduğu üzere solar panellerin tilt açlarına göre yapılan enerji üretim analizlerinin sonuçlarına göre şebekeye verilen 1 220 603,19 kWh'lik enerji ile maksimum enerji üretiminin gerçekleştiği panel eğim açısı 24° olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu analiz ile, maksimum enerji üretiminin sağlandığı 24° eğime sahip solar paneller tarafından fotovoltaik enerji dönüşümüne dahil edilen yıllık 1 455 867,31 kWh'lik enerjinin 235 264,12 kWh'inin tesisat bileşenleri bünyesinde kaybedilmekte olduğu gözlemlenmiştir. Kablo tesisatında oluşan enerji kaybı oranının %0,9 olarak sabit ve ideal olması nedeniyle evirici kısmında oluşan kayıpların azaltılması da oldukça önemlidir.

6.2. Yüzer Tip FV Tesisin İdeal Azimut Açısı Teknik Analizi

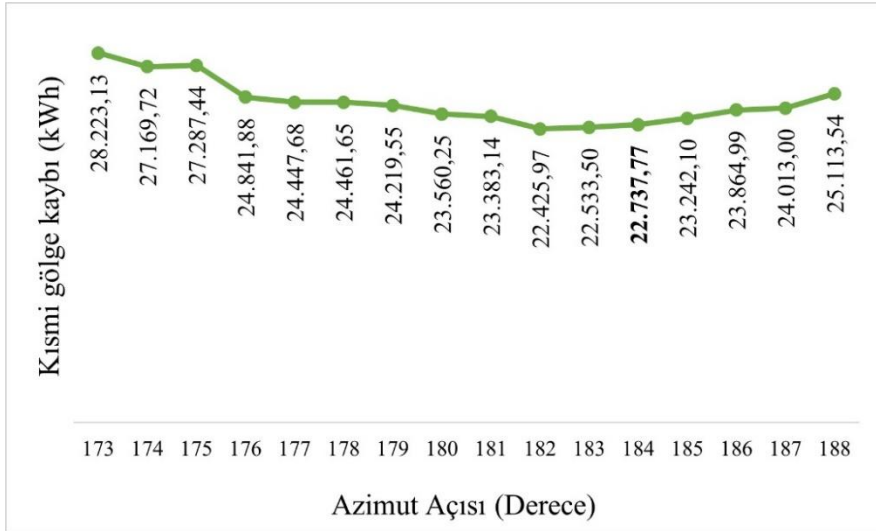
PV*SOL yazılımı ile tasarımı ve teknik analizi gerçekleştirilen 1 MWp kurulu gücündeki örnek yüzer tip fotovoltaik enerji üretim tesisinin, solar panel tilt açısı yönünden yapılan teknik analizde maksimum enerji üretiminin gerçekleştiği 24° panel eğim açısında kullanılan donanımsal yapı ve dizayn yapısı sabit tutularak, güneşe bakış yönünü belirten azimut açısının yıllık enerji üretim verimliliğine etkisini ve optimum verimin elde edildiği

azimut açısının tespit edilmesi amacıyla yatayda kuzeye göre 173^0 ile 188^0 aralığındaki azimut açıları analiz açıları olarak belirlenmiştir. Yani solar panellerin 173^0 ile 188^0 aralığında her bir azimut açısı değeri için tesisin yıllık enerji üretim durumu PV*SOL yazılımı ile simule edilerek ayrı ayrı analiz edilmiş ve sonuçları grafiklerle değerlendirilmiştir.



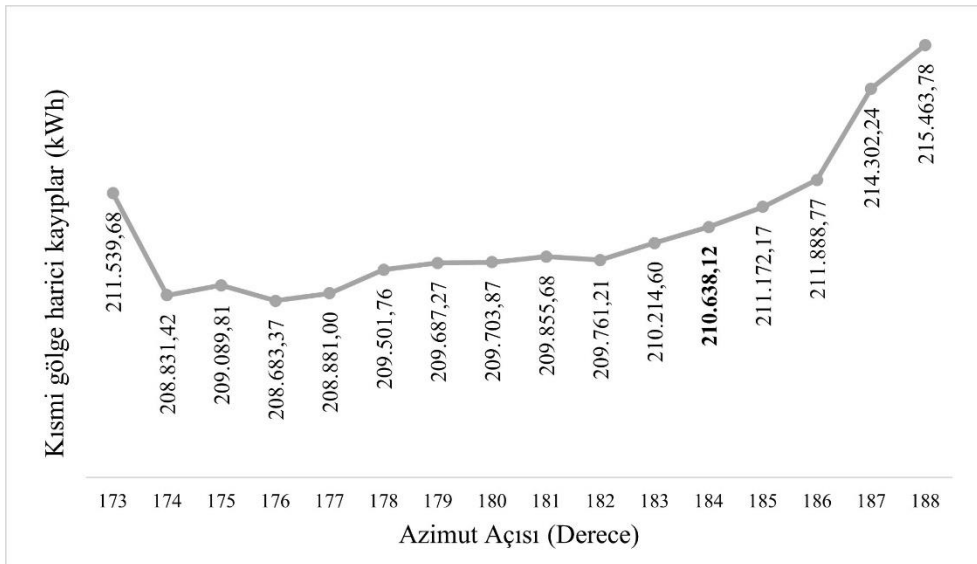
Şekil 6.5. Tesisin azimut açısına göre solar panellerden elde edilen anma enerjisi simülasyon sonuç grafiği.

Tesis lokasyonunun yıllık güneş radyasyonu miktarı $1\ 423,67\ \text{kWh/m}^2$ idi ve PV*SOL yazılımında 173^0 ile 188^0 aralığında her bir azimut açısı için teknik analiz yenilenecek standart spektrumdan sapma, modül yüzeyinde yansımaya ve modülden bağımsız gölgeleme kayıpları; zemin yansıtma katsayısı (Albedo), modül yüzeyinin yerleşim yönü ve eğiminden gelen kazançları tekrar hesaplanmış ve elde edilen fotovoltaik anma güçleri belirlenmiştir. Şekil 7.5'te sunulan tesisin azimut açısına göre oluşan fotovoltaik anma enerjisi simülasyon sonuçları incelendiğinde belirlenen azimut açısı aralığında anma enerjisinin lineere yakın artış gösterdiği tespit edilmiştir.



Şekil 6.6. Solar panellerde azimut açısına göre oluşan kısmi gölge tabanlı enerji kaybı simülasyon sonuç grafiği.

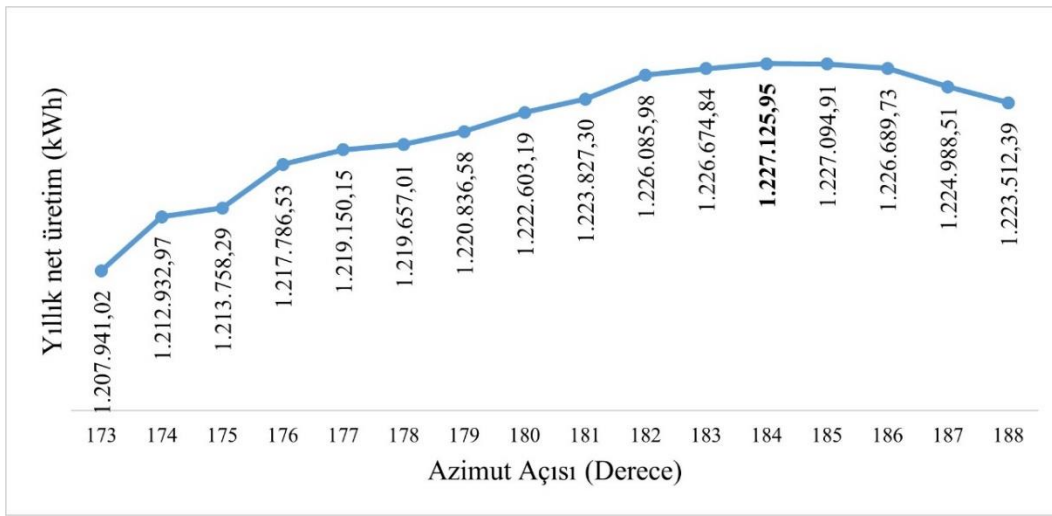
Azimut açısına göre yapılan teknik analizde elde edilen fotovoltaik anma enerjisinin donanımlar bünyesinde uğradığı kayıplar incelendiğinde Şekil 7.6'da da sunulduğu üzere kısmi gölge nedeniyle oluşan enerji kaybının tesis veriminde önemli bir etkiye sahip olduğu ve aynı zamanda Şekil 7.7'de sunulan grafikte birlikte incelendiklerinde diğer kayıplar üzerinde de doğru orantılı bir etkisinin olduğu görülmektedir.



Şekil 6.7. Solar panellerde azimut açısına göre oluşan ve kısmi gölge haricindeki toplam enerji kaybı simülasyon sonuç grafiği.

Şekil 7.6 ve 7.7 birlikte incelendiklerinde tesisin azimut açısı 182° iken enerji kayıplarının minimum seviyeye indiği, 182° 'den uzaklaştıkça enerji kaybının da arttığı

gözlemlenmektedir. Azimut açısına göre tesiste yıllık üretilen net elektrik enerjisi miktarları analiz edildiğinde enerji kayıpları 182° de minimum olmasına rağmen anma enerjisi artışını sürdürdüğünden dolayı yıllık toplam şebekeye verilen enerji miktarı, 184° azimut açısına kadar artışını sürdürmektedir. Şekil 7.8’de sunulan yıllık enerji üretim grafiğinde de görüldüğü üzere 1 MWp kurulu gücünde yüzer tip fotovoltaik tesis örneğinin, solar panellerin eğim açısı 24° ve azimut açısı 184° iken maksimum enerji üretim kapasitesine ulaşarak yıllık 1 227 125,95 kWh elektrik enerjisi ürettiği tespit edilmektedir.



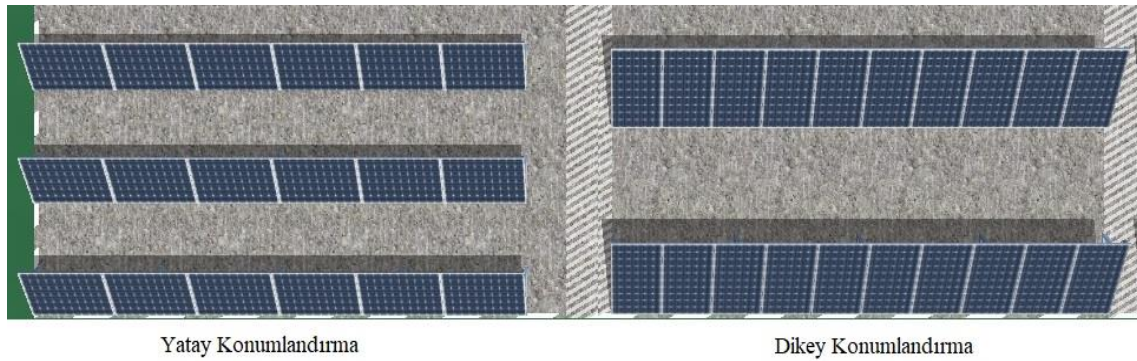
Şekil 6.8. Fotovoltaik tesisin azimut açısına göre yıllık net elektrik enerjisi üretim miktarı simülasyon sonuç grafiği.

6.3. Yüzer Tip FV Tesisde Solar Panel Konumlandırma Şekli Teknik Analizi

Kurulu gücü 1 MWp olan bir yüzer tip fotovoltaik enerji üretim santrali örneğinin PV*SOL yazılımı kullanılarak solar panellerin konumlandırma şekline göre analiz edildiği bu çalışmada, tesisin azimut açısı sabit 180° olacak şekilde donanım olarak 3 333 adet 300 Wp nominal çıkış gücünde CW Enerji Müh. Ticaret ve San. Ltd. Şti.’ne ait CWT-300-60M model monokristal solar paneller ve 43 adet 20 kW nominal çıkış gücünde Schneider Electric firmasına ait Conext CL20000E model eviriciler kullanılmıştır.

Her bir eğim açısı için solar panellerin yatay ve dikey konumlandırma montaj şekline göre enerji üretim analizleri gerçekleştirilen fotovoltaik tesisin yerleşim planı olarak ise yatay konumlandırmada 62m genişlik ve 210 m uzunluktaki alana aralarında 1,2 m yaklaşma

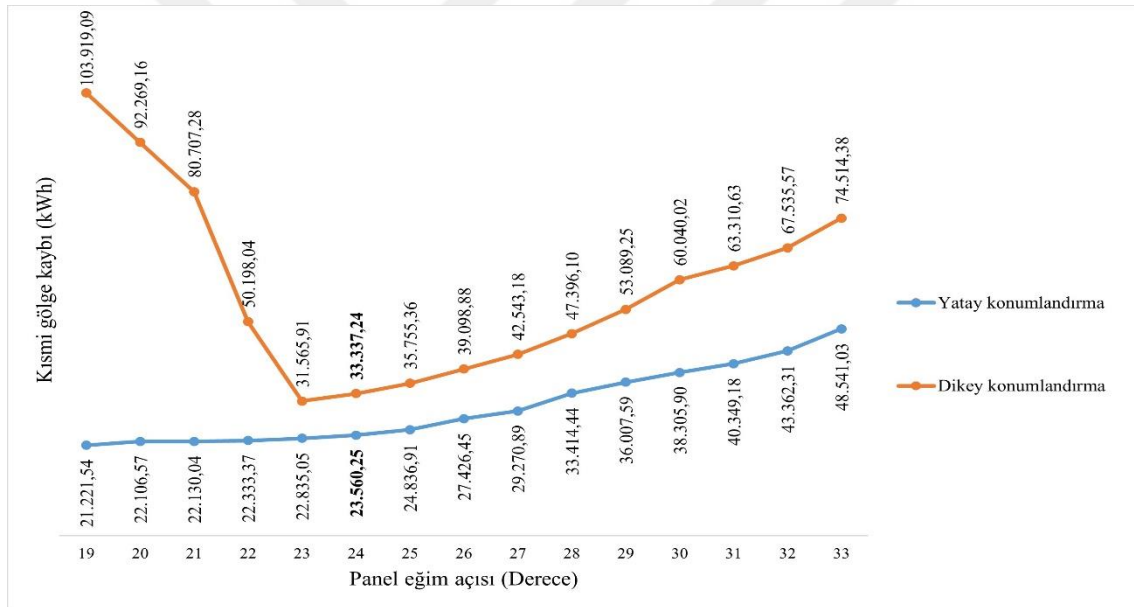
mesafesi olacak şekilde toplam 29 sıra solar panel dizilimi, dikey konumlandırmada 60 m genişlik ve 220 m uzunluktaki alana aralarında 2 m yaklaşma mesafesi olacak şekilde toplam 18 sıra solar panel dizilimi oluşturulmuştur. PV*SOL yazılımının solar panel sıraları arasındaki yaklaşma mesafesi hesaplamasına göre yatay konumlandırmada 0,9 m mesafe yeterli iken kısmi gölge oluşumunu azaltmak amacıyla bu mesafe manuel olarak 1,2 m ye çıkarılmıştı, dikey konumlandırmada da bu oran korunarak 1,7 m yaklaşma mesafesi yeterli iken sıralar arası mesafe manuel olarak 2 m yapılmıştır. Şekil 7.9'da fotovoltaik panellerin konumlandırma şekillerine ve yukarıda bahsedilen tasarım ölçülerine göre simule edilen örnek fotovoltaik tesisin kesit görüntüleri sunulmaktadır.



Şekil 6.9. Solar panel konumlandırma şekline göre simule edilen tesisin panel dizilim kesit görüntüleri.

Doğu-batı istikametinde yatay olarak kullanımda her 6 adet solar panel bloğunun arasına 80cm genişliğinde bakım yolu mesafesi bırakılırken, dikey olarak kullanımda her 10 adet solar panel bloğunun arasına 80 cm genişliğinde bakım yolu boşluğu bırakılmıştır. Güneş radyasyonunun zeminden yansıma katsayısı olan Albedo katsayısı tesisin su yüzeyinde olması nedeniyle her iki tasarım için de %8 olarak uygulanmıştır. Ayrıca her iki montaj şekli içinde kablo tesisatında kaybedilen enerjinin oranının sabit %0,9 olacağı şekilde tesisat yapısı planlanmıştır. Dolayısıyla fotovoltaik tesis örneğinde solar panellerin sadece yatay ve dikey konumlandırmadaki montaj şekillerine göre yıllık üretilen enerjinin analiz edilebilmesi amacıyla tesisi oluşturan diğer parametreler mümkün olduğunca sabit tutulmuştur. Fotovoltaik panel konumlandırma şeklinin yıllık enerji üretim verimliliğine etkisini ve optimum verimin elde edildiği eğim açısını tespit etmek amacıyla panellerin hem yatay konumlandırmada hem dikey konumlandırmada, panel tilt açısı olarak 19° ile 33° arasındaki açılarda ayrı ayrı teknik analizleri gerçekleştirilmiştir.

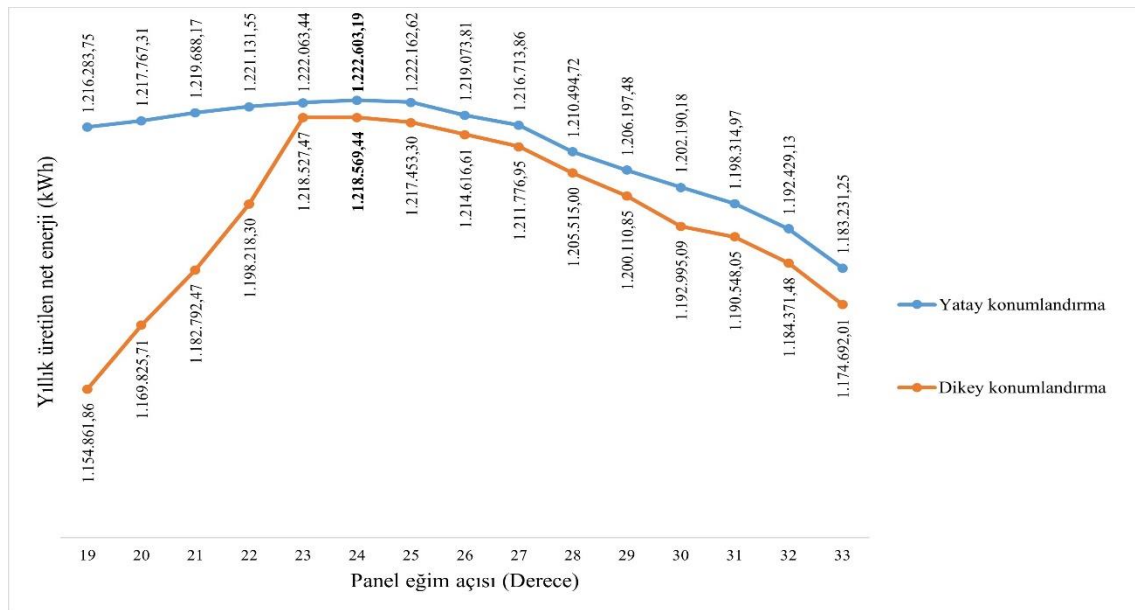
Yapılan teknik analiz sonucunda fotovoltaik tesisin ortam koşullarının aynı olması nedeniyle solar panellerin dikey veya yatay konumlandırılmasının elde edilen fotovoltaik anma enerjisi üzerinde bir etkisinin olmadığı, aynı panel eğim açılarında aynı fotovoltaik anma enerjilerinin elde edildiği fark edilmiştir. Ancak solar panellerin yatay veya dikey konumlandırılmasının modüllerin kısmi gölge kayıpları üzerinde ve dolayısıyla yıllık olarak şebekeye verilen enerji miktarında önemli düzeyde etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Şekil 7.10'da sunulduğu üzere yatay konumlandırmada da dikey konumlandırmada da 24° tilt açısından itibaren kısmi gölge kayıpları büyük farklarla yükselmektedir. Ayrıca dikey konumlandırmada yatay konumlandırmadakine göre daha fazla modüle özgü kısmi gölgeden kaynaklanan enerji kaybı yaşanmaktadır.



Şekil 6.10. Solar panellerin yatay ve dikey konumlandırılmasından kaynaklanan yıllık kısmi gölge kaybı analiz sonuçları grafiği.

Solar panel konumlandırma şekline göre önemli düzeyde etkilenen bir diğer enerji kaybı türü ise modülün düşük ışık performansından kaynaklanan enerji kayıplarıdır. Analiz sonuçları incelendiğinde kısmi gölge kayıpları ile ters orantılı olarak düşük ışık performans kayıplarında yatay konumlandırmada daha fazla enerji kaybı olduğu ancak yine ideal eğim açısı olan 24° de yaşanan düşük ışık performans kaybının her iki panel konumlandırma şeklinde de birbirine çok yakın olduğu, az bir farkla yatay konumlandırmada düşük ışıktaki enerji kaybının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Yıllık bazda şebekeye verilen AC enerji miktarı yönünden analiz sonuçları incelendiğinde, solar panellerin yatay konumlandırılmasında da dikey konumlandırılmasında da 24⁰ panel eğim açısındaki net enerji üretimlerinin yani şebekeye verilen enerji miktarının maksimum olabildiği tespit edilmektedir. Şekil 7.11’de görüldüğü üzere solar panellerin yatay konumlandırılması ile yılda yaklaşık olarak 4 000 kWh daha fazla net enerji üretimi gerçekleştirilerek şebekeye toplamda 1 222 603,19 kWh AC elektrik enerjisi sağlanmaktadır.



Şekil 6.11. Solar panellerin yatay ve dikey konumlandırılmasının yıllık üretilen net enerji miktarı üzerindeki etkisini gösteren analiz sonuçları grafiği.

Dikey konumlandırmada ideal tilt açısından uzaklaştıkça enerji kayıpları büyük farklarla arttığından tesis alanının kısıtlı olduğu durumlarda yatay panel konumlandırma daha uygun bir montaj şekli olmaktadır. Teknik analizi gerçekleştirilen örnek yüzer tip fotovoltaik tesiste her iki konumlandırma şeklinde de her bir konstrüksiyona tek sıra solar panel montajı yapıldığından bir konstrüksiyona çift sıra solar panel montajı yapılması durumunda kısmi gölge kayıpları daha fazla artacağından solar sıraların yaklaşma mesafelerinin de artırılması gerekecektir.

6.4. Yüzer Tip FV Tesisde Solar Panel Kristal Yapısı Bakımında Teknik Analizi

Yüzer tip fotovoltaik tesis örneğinin PV*SOL yazılımı vasıtasıyla simule edilerek teknik analiz edildiği çalışmada, aynı nominal çıkış gücüne sahip fotovoltaik panellerin sadece

hücre yapısı olarak monokristal veya polikristal yapıda olmalarının yıllık enerji üretim verimliliğine etkisini ve optimum verimin elde edildiği hücre yapısını tespit etmek amacıyla mukayeseli yıllık enerji üretim analizi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.1. Solar panel kristal yapısına göre enerji üretim analizi için oluşturulan tesis yapısı.

Firma	CSG PVTech Co.		Solar Europa Ltd.		Mage Solar USA		Solton Power Inc.	
Model	CSG300WM2	CSG300WS2	CHN300-72P	CHN300-72M	MAGE POWERTEC-Plus 300/6-PL	MAGE POWERTEC-Plus 300/6-72MH	SPI-72-300P	SPI-72-300M
Hücre Tipi	Poli kristal	Mono kristal	Poli kristal	Mono kristal	Poli kristal	Mono kristal	Poli kristal	Mono kristal
Nom. Güç	300 Wp							
Hücre Sayısı	72	72	72	72	72	72	72	72
Diyot Sayısı	3	3	6	6	3	3	4	4
Solar Alan	1,94 m ²		1,93 m ²		1,95 m ²	1,94 m ²	1,94 m ²	
Verim	%15,45	%15,46	%15,53	%15,01	%15,40	%15,50	%15,46	%15,45
Teknik Analiz Verileri								
Modül Sayısı	3131	3131	3333	3333	3131	3131	3248	3248
Tesis Gücü	939,3 kWp	939,3 kWp	999,9 kWp	999,9 kWp	939,3 kWp	939,3 kWp	974,4 kWp	974,4 kWp
Tilt Açısı	33°		33°		33°		25°	
Azimet Açısı	180° Güney							
Panel Kon.	Yatay							
Evirici Modeli	Schneider Electric – Conext CL20000E							
Evirici Adeti ve Diziler	41= 26 x (Mpp1-2X19 + Mpp2-2x19) + 15 x (Mpp1-3X13 + Mpp2-2x19)		43= 22 x (Mpp1-3X13 + Mpp2-3x13) + 21 x (Mpp1-3X13 + Mpp2-2x19)		41= 26 x (Mpp1-2X19 + Mpp2-2x19) + 15 x (Mpp1-3X13 + Mpp2-2x19)		42= 28 x (Mpp1-3X13 + Mpp2-2x19) + 14 x (Mpp1-3X13 + Mpp2-3x13)	
Kablo Kaybı	%0,9							

Bu analiz Çizelge 6.1’de teknik özellikleri sunulan ve PV*SOL veritabanında da yer alan dört farklı solar panel üreticisinin panelleri kullanılmak suretiyle gerçekleştirilmiştir.

Teknik analizin gerçekleştirildiği lokasyon olarak Yedikır Barajı su yüzeyi tercih edilmiş olup barajın kuzeydoğusunda 60 m genişlik, 220 m uzunlukta ve 40 cm yükseklikteki yüzdürücü yüzey alanına tek sıra yatay konumlandırılmış solar panellerden diziler arasında aynı yaklaşma mesafesi olacak şekilde tasarım gerçekleştirilmiştir. Tercih edilen solar panel üreticilerinin ülke olarak menşeleri bakımından; CSG PVTech Co. Ltd. firması Çin, Solar Europa Ltd. firması İngiltere, Mage Solar USA ve Solton Power Inc. firmaları Amerika Birleşik Devletleri kökenlidir.

Çizelge 6.2. Solar panel kristal yapısına göre enerji üretim analizlerinin sonuç verileri.

Firma	CSG PVTech Co. Ltd.		Solar Europa Ltd.		Mage Solar USA		Solton Power Inc.	
Model	CSG300WM2	CSG300WS2	CHN300-72P	CHN300-72M	MAGE POWERTEC-Plus 300/6-PL	MAGE POWERTEC-Plus 300/6-72MH	SPI-72-300P	SPI-72-300M
Hücre Tipi	Poli kristal	Mono kristal	Poli kristal	Mono kristal	Poli kristal	Mono kristal	Poli kristal	Mono kristal
FV Anma Enerjisi (kWh)	1 358 689	1 359 015	1 446 274	1 446 291	1 361 392	1 360 010	1 413 051	1 412 580
Düşük Işık Kaybı (kWh)	28 271	30 790	20 565	43 024	42 167	30 732	6 795	28 497
Diğer Kayıplar (kWh)	193 005	193 258	220 554	220 557	195 670	192 027	195 641	194 187
Şebekeye Verilen Enerji (kWh)	1 137 413	1 134 968	1 205 155	1 182 710	1 123 556	1 137 251	1 210 615	1 189 895

Karşılaştırmalı teknik analizi gerçekleştirilen solar panellerin hücre ve diyot sayılarının dahi aynı olmasına özen gösterilmiş, bir firmanın monokristal ve polikristal yapıdaki modüllerinin performans mukayesesinde tesisin bulunduğu ortam koşullarının, tasarımının ve tesisi oluşturan diğer donanımların Çizelge 6.1’de sunulduğu üzere aynı olmasına özen gösterilmiştir. Tesiste kullanılacak olan kablo tesisatındaki enerji kayıplarının dahi %0,9’da sabit kalmasını sağlayacak şekilde analiz gerçekleştirilmiştir.

Yukarıda belirtilen tasarım koşulları ışığında öncelikle CSG PVTech Co. Ltd. firmasının polikristal yapıya sahip CSG300WM2 model isimli solar modülü ile monokristal yapıya sahip CSG300WS2 model isimli solar modülünün performans analizini mukayese etmek amacıyla 3 131 adet 300 Wp nominal çıkış güçlü solar panellerden 939,3 kWp kurulu gücünde fotovoltaik tesis oluşturularak simülasyon başlatılmıştır. Çizelge 6.2’de sunulan sonuç verilerine göre her iki solar panelin de soğurmuş oldukları ve üretime dahil ettikleri fotovoltaik anma enerjileri birbirine oldukça yakın olup polikristal yapıdaki modülün yıllık 326 kWh daha az enerji soğurabildiği ancak polikristal modülün düşük ışık performansının daha iyi olması nedeniyle kaybettiği enerjinin monokristal modüle göre yıllık 2 519 kWh daha az olduğu gözlemlenmektedir. Her iki model solar panelle oluşturulan tesisin düşük ışık performansı dışındaki oluşan diğer enerji kayıplarının birbirine çok yakın olması nedeniyle CSG PVTech Co. Ltd. firmasının polikristal yapıya sahip solar modülünün, aynı güç ve özellikteki monokristal modülüne göre yıllık 2 445 kWh daha fazla enerji üreterek şebekeye aktardığı tespit edilmektedir.

Aynı koşullarda ve aynı yüzey alanına kurulu gücü 999,9 kWp olacak şekilde Solar Europa Ltd. firmasının polikristal yapıya sahip 3 333 adet CHN300-72P model isimli solar modülü ile aynı sayıda monokristal yapıya sahip CHN300-72M model isimli solar modülü kullanılarak oluşturulan fotovoltaik tesisin, enerji üretim simülasyonu yapılarak sonuçları analiz edildiğinde, çok yakın denebilecek şekilde polikristal yapıdaki modülle oluşturulan tesisin yıllık 17 kWh daha az fotovoltaik anma enerjisine sahip olduğu gözlemlenmektedir. Ancak polikristal modülün düşük ışık performansının daha iyi olması nedeniyle kaybettiği enerjinin monokristal modüle göre yıllık 22 459 kWh daha az olduğu, dolayısıyla diğer enerji kayıplarının da birbirinin aynısı denebilecek düzeyde olması nedeniyle Solar Europa Ltd. firmasının polikristal modülleri ile oluşturulan tesisin yıllık 22 445 kWh daha fazla enerji üreterek daha verimli olduğu değerlendirilmektedir.

Benzer şekilde Mage Solar USA firmasının polikristal hücre yapısına sahip Mage Powertec-Plus 300/6-PL model isimli ürünü ve monokristal yapıya sahip Mage Powertec-Plus 300/6-72MH model isimli modülleri kullanılarak oluşturulan 939,3 kWp kurulu gücündeki fotovoltaik enerji üretim tesislerinin PV*SOL performans analizleri incelendiğinde, Çizelge 6.2’de de sunulduğu üzere polikristal yapıya sahip modüllerle oluşturulan tesisin fotovoltaik anma enerjisinin yıllık 1 382 kWh daha fazla olduğu belirlenmektedir. Ancak Mage Solar USA firmasının monokristal yapıya sahip modülleri ile oluşturulan tesisin düşük ışık performansının daha iyi olması nedeniyle kaybettiği enerjinin polikristal modüllü tesise göre yıllık 11 435 kWh daha az olması, diğer enerji kayıplarında da oldukça yakın bir farkla monokristal yapıya sahip modüllerle oluşturulan tesiste yıllık 3 643 kWh daha az enerji kaybı yaşanması nedeniyle Mage Solar USA firmasının monokristal modülleri ile oluşturulan tesisin yıllık 13 695 kWh daha fazla enerji üreterek daha verimli olduğu tespit edilmiştir.

Son olarak Solton Power Inc. firmasının SPI-72-300P model isimli polikristal yapıya sahip solar modülü ile SPI-72-300M model isimli monokristal yapıya sahip solar modülleri kullanılarak oluşturulan fotovoltaik tesisin yine Çizelge 6.1’de belirtilen koşullarda gerçekleştirilen enerji üretim simülasyonu sonucunda, her iki tesis türünde fotovoltaik anma enerjilerinin ve düşük ışık performansı haricindeki enerji kayıplarının birbirine oldukça yakın olması nedeniyle polikristal modüllerle oluşturulan tesisin düşük ışık performansından kaynaklanan enerji kaybının yıllık 21 702 kWh daha az olmasından dolayı şebekeye verdiği elektrik enerjisi yıllık 20 720 kWh daha fazla olmuş, Solton Power Inc. firmasının polikristal yapıdaki modülleri ile oluşturulan tesisin daha verimli olduğu gözlemlenmiştir.

Fotovoltaik tesisin en önemli unsuru olan solar panellerin kristal yapısına göre enerji üretim performanslarının mukayese edildiği bu analiz türünde, Çizelge 6.2’de sunulan analiz sonuçlarına göre aynı hücre ve diyot sayısı, aynı nominal çıkış gücüne sahip ve aynı yerde üretilen solar panellerin enerji üretim performansları açısından monokristal yada polikristal yapıda olmalarının öneminin bulunmadığı, panellerin imalat kalitesi olarak düşük ışık koşullarındaki performanslarının, tesisin total veriminde de belirleyici unsur olduğu tespit edilmiştir.

6.5. Yüzer Tip FV Tesisin Evirici Yapısı Bakımından Teknik Analizi

Bir fotovoltaik tesisin donanımsal bileşeni olarak solar panellerden sonra en önemli unsuru doğru akım-alternatif akım eviricileridir. Fotovoltaik enerji tesislerinde kullanılan ve modül, dizi ve merkezi eviriciler olarak üçe ayrılan solar eviricilerden, PV*SOL yazılımında simüle edilen 1 MWp kurulu gücündeki yüzer tip fotovoltaik tesis örneğinin teknik analizinde, tesis kurulum maliyetinin azaltılması ve olası teknik sorunlar bölgesel hale getirilerek sorun giderilinceye kadar üretilen enerji miktarındaki oluşacak kayıpların minimize edilmesi amacıyla dizi eviriciler kullanılmıştır.

Çizelge 6.3. Eviriciye göre teknik analizi yapılan tesiste mukayese edilen evirici özellikleri.

Evirici Firması	Schneider Electric	Schneider Electric
Evirici Modeli	Conext CL25000E	Conext TL20000E
DC nominal çıkışı(kW)	26,5	20
AC nominal güç(kW)	25	20
Maks. DC güç(kW)	31,8	22
Maks. AC güç(kVA)	25	21
Maks. giriş akımı(A)	62	60
Maks. giriş gerilimi(V)	1000	1000
Nominal DC Gerilimi(V)	610	630
Trafo	Evet	Hayır
Mppt başına maks giriş akımı (A)	31	30
Mppt baş. maks. giriş gücü (kW)	31,8	11
Min. Mppt Gerilimi	430	350
Maks. Mppt Gerilimi	800	800
%20 Kullanımda verim	98	97,8
%100 Kullanımda verim	97,4	97,6

Evirici seçiminin ve eviricilerin maksimum güç noktası girişlerine seri ve paralel bağlanacak olan solar dizilerin uygun kapasitede ve enerji üretim uyumuna göre evirici bağlantılarının yapılmasının tesisin enerji üretim performansına etkisini incelemek ve ideal

evirici modelini belirlemek amacıyla aynı firmaya ait iki farklı modeldeki dizi eviricisi kullanılarak mukayeseli teknik analiz gerçekleştirilmiştir.

Bu teknik analiz için 6. nolu başlıktan itibaren yapılan simülasyonlarda en verimli açılar olarak tespit edilen 240 solar panel tilt açısı ve 1840 azimut açısı tercih edilerek, yerli üretim olması nedeniyle CW Enerji Müh. Ticaret ve San. Ltd. Şti. firmasının üretimi olan CWT-300-60M model isimli monokristal solar panellerinden tek sıra yatay konumlandırma ile 3 333 adet kullanılarak 210 m uzunluk ve 62 m genişliğinde alanı kaplayacak şekilde tesis yapısı oluşturulmuştur.

Solar yüzey alanı olarak 5 465,3 m² alana sahip olan tesiste dizi sıraları arasında kuzey-güney yönündeki yaklaşma mesafesi olarak 1,2 m mesafe bırakılarak, tesisin kapladığı su yüzeyi alanı 13 000 m² olmuştur. Yedikır Barajı iklimsel verileri ve güneş radyasyon değerleri meteonorm veritabanından yüklendikten sonra Albedo katsayısı %8 ve kablo tesisatında oluşacak enerji kaybı oranı %0,9 olacak şekilde ayarlar yapılarak PV*SOL yazılımına tanıtılması gereken sabitler tamamlanmıştır.

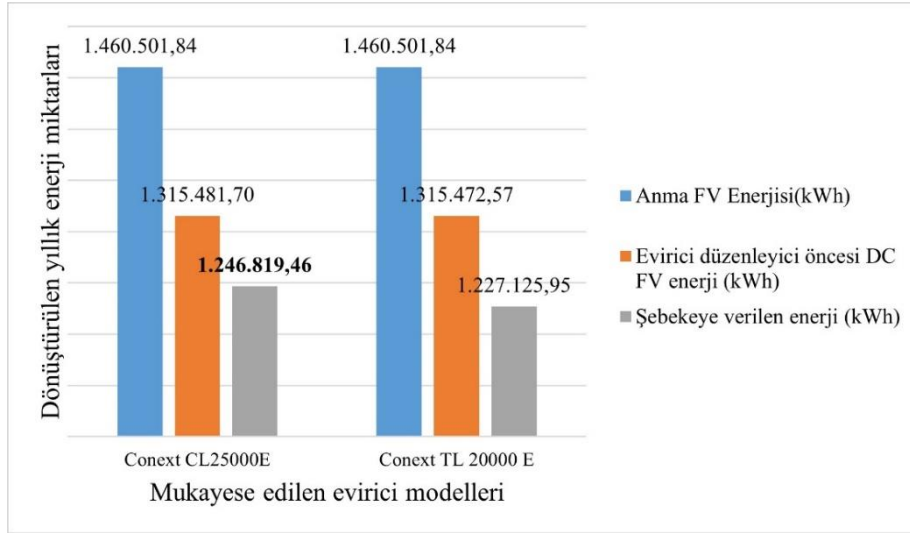
Evirici yapısına göre enerji üretim analizi yapılacak olan 1 MWp kurulu gücündeki yüzer tip fotovoltaik tesis örneğinde, Çizelge 6.3'te özellikleri sunulan Schneider Electric firmasına ait 25 kW AC nominal çıkış gücüne sahip Conext CL25000E model isimli trafolu evirici ile 20 kW AC nominal çıkış gücüne sahip Conext TL20000E model isimli trafosuz evirici kullanılarak mukayeseli teknik analiz yapılmıştır. 25 kW AC nominal çıkış gücüne sahip Conext CL25000E model evirici kullanılarak tesis oluşturulduğunda toplam 33 adet evirici montajı yapılması gerekmekte ve 3 333 adet solar panelden oluşan dizilerin bu eviricilerin Mppt girişlerine ideal dağılım yapısı; Mppt-1 girişine 3 dizi x 21 solar panel ve Mppt-2 girişine 2 dizi x 19 solar panel şeklinde olmaktadır.

Aynı tesis 20 kW AC nominal çıkış gücüne sahip Conext TL20000E model evirici kullanılarak oluşturulduğunda ise toplam 43 adet evirici montajı yapılması gerekmekte ve 3 333 adet solar panelden oluşan dizilerin bu eviricilerin Mppt girişlerine ideal dağılım yapısı; toplam 43 adet eviricinin 22 adeti için Mppt-1 ve Mppt-2 girişine 3 dizi x 13 adet solar panel, kalan 21 adet evirici için Mppt-1 girişine 3 dizi x 13 adet solar panel ve Mppt-2 girişine 2 dizi x 19 adet solar panel şeklinde olmaktadır.

Çizelge 6.4. Evirici seçimine göre tesisin enerji üretim performansını gösteren analiz sonuçları.

Analiz edilen evirici modeli	Conext CL25000E	Conext TL20000E	Farklar
Anma FV Enerjisi(kWh)	1 460 501,84	1 460 501,84	0,00
Evirici düzenleyici öncesi DC FV enerji	1 315 481,70 (kWh)	1 315 472,57 (kWh)	9,13
MPP-gerilim aralığı düzenleme kaybı	677,28 (kWh)	9 412,04 (kWh)	8 734,76
Maks. Güç katsayısı düzenleme kaybı	21 307,54 (kWh)	13 863,92 (kWh)	7 443,62
Giriş ve anma gerilimi düzenleme kaybı	1 176,00 (kWh)	18 647,02 (kWh)	17 471,02
Kayıplar toplamı	23 160,82 (kWh)	41 922,98 (kWh)	18 762,16
Eviriciden kaynaklı diğer kayıplar	45 501,42 (kWh)	46 423,64 (kWh)	922,22
Eviriciden kaynaklı tüm kayıplar	68 662,24 (kWh)	88 346,62 (kWh)	19 684,38
Şebekeye verilen yıllık enerji miktarı	1 246 819,46 (kWh)	1 227 125,95 (kWh)	19 693,51

Yapılan analiz sonucunda her iki tesiste kullanılan fotovoltaik panellerin yapısı, adeti ve yerleşim planı aynı olduğu için yıllık anma fotovoltaik enerjilerinin aynı olduğu ve dolayısıyla solar panellerden eviricilere kadar enerji kayıplarının da aynı olması nedeniyle evirici öncesi yıllık toplam DC fotovoltaik enerji miktarlarının da aynı olduğu Çizelge 6.4'teki analiz sonuçları tablosunda sunulmaktadır. Tesiste kullanılan iki evirici modelinin üç farklı düzenleme kayıpları toplamının tesisin yıllık enerji üretim performansına etki etmekte olduğu, eviricilerin arasındaki mpp-gerilim aralığını, maksimum AC güç katsayısını ve giriş geriliminin anma geriliminden sapmasını düzenleme esnasındaki oluşan toplam 18 762,16 kWh enerji kaybı farkının, yıllık şebekeye verilen enerji miktarları arasındaki farkı belirleyen unsur olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 6.12. Evirici seçimine göre tesisin enerji üretim performansı üzerindeki etkisini gösteren analiz sonuçları grafiği.

Eviriciden kaynaklı diğer enerji kayıplarının her iki evirici modelinde de aynı düzeyde olduğu Tablo 7.4'te görülmekle beraber bu kayıplar da hesaba dahil edildiğinde yıllık üretilen ve şebekeye verilen net enerji miktarı farkının 19 693,51 kWh olduğu tespit edilmektedir. Conext TL20000E model trafosuz tip eviriciler ile oluşturulan tesisten alınan yıllık enerji miktarı 1 227 125,95 kWh iken, Conext CL25000E model trafolu tip 25 kW nominal AC çıkış gücüne sahip eviricilerin kullanıldığı tesisin ürettiği yıllık enerji miktarının 1 246 819,46 kWh olduğu tespit edilmiştir. Şekil 7.12'de diğer donanım ve parametreler aynı iken verimleri aynı güç kapasiteleri farklı iki evirici modeli ile oluşturulan ve PV*SOL yazılımı ile ayrı ayrı simüle edilen iki farklı yüzer tip fotovoltaik enerji üretim tesisinin performans analiz sonuçları grafiği sunulmaktadır.

6.6. Yüzer Tip FV Tesisin Otomasyon ve Scada Yapısı Bakımından Analizi

Teknik ve finansal analizi gerçekleştirilen 1 MWp kurulu güce sahip yüzer tip fotovoltaik enerji santrali, enerji nakil donanımı olarak 3 333 adet solar panel, 33 adet evirici, evirici bağlantı panoları, kablo tesisatı ve trafo merkezinin birleşiminden oluşmaktadır. Yaklaşık 13 dönüm alana yayılan tesisin büyüklüğü ve kullanılan ekipman sayısının fazlalığından dolayı tesiste meydana gelecek herhangi bir teknik sorundan kısa sürede haberdar olunması ve sorun büyümeden müdahale edilebilmesi amacıyla tesis enerji alt yapısının ve ortam koşullarının tesis sahibi veya teknik sorumlusu tarafından izlenebilmesi ve kontrol edilebilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla tesisin fiziki durumunun ve enerji üretim-iletim

anlık değerlerinin belirli donanımlar vasıtasıyla ölçülebilmesi ve verilerin toplanması amacıyla otomasyon sistemi, tesisten okunan verilerin uzak noktadaki merkezi yönetim biriminden tesis sahibi veya teknik sorumlular tarafından izlenebileceği scada yazılım sistemi kurulmalıdır. Ayrıca elektrik piyasasında lisanssız elektrik üretimine ilişkin yönetmeliğin uygulanmasına dair tebliğin 14.maddesine istinaden mevcut TEİAŞ scada sistemine tesisin trafo tesisatı üzerinden Şebeke bağlantı durumu, aktif-reaktif güç, akım-gerilim-frekans ve harmonik bozulma değerlerinin nakledilebilmesi için uzak terminal ünitesi (Remote Terminal Unit - RTU) otomasyon altyapısı tesis edilmelidir.

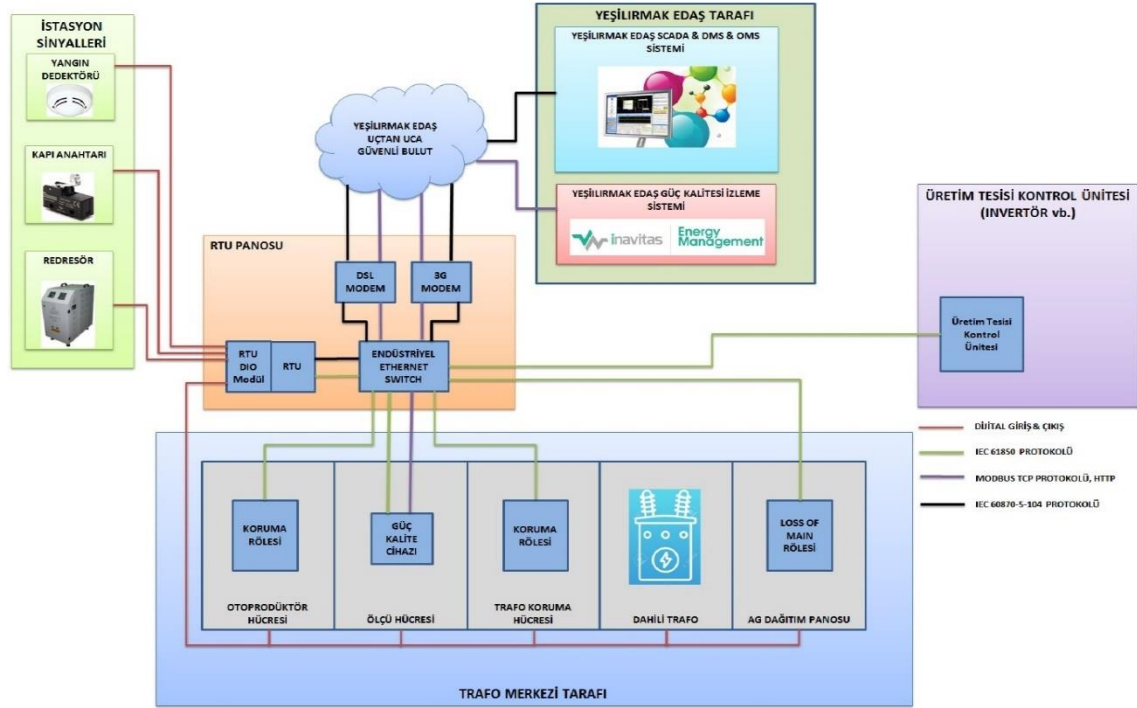
TEİAŞ ve bölgesel elektrik dağıtım Şirketi olan YEDAŞ (Yeşilırmak Elektrik Dağıtım A.Ş.)'ın scada sistemine entegre edilecek olan RTU panosu IEC 60870-5-104 haberleşme protokolüne sahip en az IP65 güvenlik sınıfında, işlemci (Central Processing Unit-CPU), giriş-çıkış (Input/Output-I/O) ve güç kaynağı modüllerinden oluşmaktadır.



Şekil 6.13. RTU panosu bileşenleri ve pano iç tasarımı örneği.

MODBUS TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) haberleşme protokolüne sahip işlemci, giriş-çıkış birimleri aracılığıyla okuduğu analog ve dijital verileri analiz ederek internet altyapısı üzerinden scada yazılımı arayüzüne iletmektedir. Modbus, 1979 yılında Schneider Electric firmasının alt organizasyonu olan Modicon tarafından programlanabilir mantıksal denetleyicilerde kullanılmak üzere geliştirilen bir seri haberleşme protokolüdür. Şekil 7.13'te örnek bir uzak terminal ünitesi panosu iç dizaynı sunulmaktadır. RTU panosunun trafo merkezindeki enerji akış verilerini okuyabilmesi için

trafo hücrelerine analizörler monte edilmesi veya mevcut rölelere sinyal bağlantı hattı çekilmesi gerekmektedir.

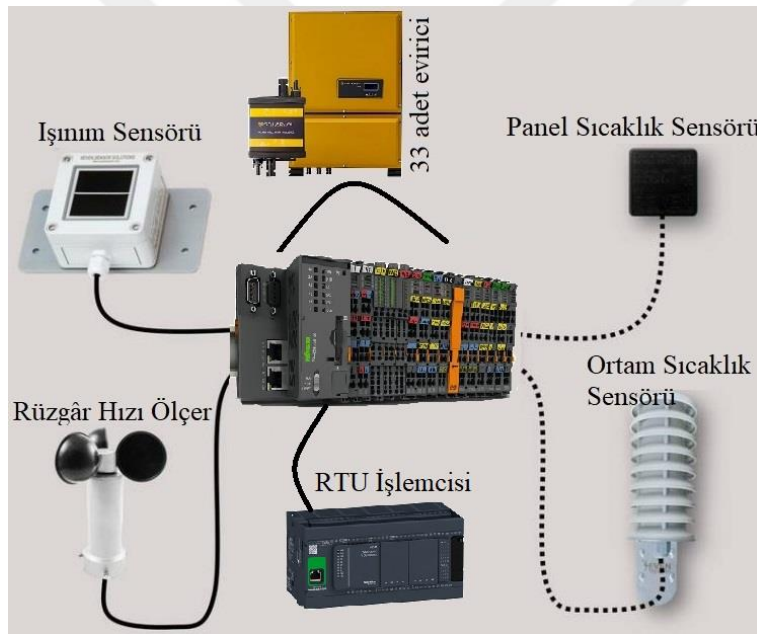


Şekil 6.14. Elektrik dağıtım şirketi scada sistemi için tesiste kurulması gereken RTU altyapısının bağlantı şeması.

Akıllı elektronik cihazlar (Intelligent Electronic Device-IED) olarak tabir edilen röleler aracılığı ile trafo giriş ve koruma hücrelerinden şebekeye verilen veya şebekeden alınan enerjinin akım, gerilim, aktif güç, reaktif güç, görünür güç, demant (15dak. ortalama), güç faktörü, frekans gibi değerleri ölçülerek RTU giriş/çıkış birimlerine ve dolayısıyla işlemcisine iletilmektedir. Aynı şekilde ölçü hücresine monte edilecek olan güç kalitesi ölçüm cihazı da voltajın belirli bir frekansta ideal sinüzoidal dalga formundan sapmasını ve harmonik bozulmalarını detaylı bir şekilde ölçerek TS EN 61000-4-30 standardıyla uyumlu, A sınıfı doğrulukta, en az 24 saat boyunca kaydedebilecek özellikte olması ve bu bilgileri anlık olarak RTU işlemcisine iletebilmesi gerekmektedir. Şebekeye verilen enerjide oluşabilecek sapsmalar ve bozulmalar, şebekeye bağlı elektrikli ekipmanların bozulmasına, kesintiye uğramasına veya hasar görmelerine neden olabilmektedir. Şekil 7.14'te bölgesel elektrik dağıtım şirketinin scada sistemi için fotovoltaik tesiste kurulması gereken RTU altyapısının bağlantı şeması sunulmaktadır.

Bölgesel elektrik dağıtım şirketinin veri izleme sisteminde kullanılan RTU işlemcisinin ikinci bir ethernet portuna sahip olması, aynı enerji verilerinin işletme sahibi veya teknik sorumluları tarafından da izlenebilmesi açısından oldukça önemlidir.

Tesis sahibinin tesisi oluşturan donanımlara, üretilen ve iletilen enerjiye hâkim olabilmesi için elektrik dağıtım şirketine hizmet veren RTU alt yapısını da entegre edeceği, panel sıcaklıklarını, ortam ışıınının ve rüzgâr değerlerini, panel dizilerinden; akım, gerilim, güç ve kapasite bilgilerini, eviriciye gelen toplam DC güç ve dönüştürülerek şebekeye ilettikleri AC güç miktarlarını izleyebileceği merkezi bir otomasyon ve scada sistemi kurulması gerekmektedir.



Şekil 6.15. Fotovoltaik tesis merkezi otomasyon altyapısı ana şeması.

Merkezi otomasyon sistemi, Şekil 7.15'te sunulduğu üzere izleme ve kontrol sistemine dahil edilecek olan tüm analog ve dijital sinyal çıkışlı elektronik cihazların bir merkezi programlanabilir mantıksal denetleyici (Programmable Logic Controller-PLC) yönetiminde buluşturularak, toplanan tüm verilerin operatörün bilgisayar ekranına MODBUS TCP/IP haberleşme alt yapısı ile otomatik olarak aktarıldığı bir tesis yönetim teknolojisidir. 1 MWp kurulu gücündeki yüzer tip fotovoltaik tesis örneğinin otomasyon alt yapısı oluşturulurken mümkün olduğunca yerli üretim donanımlar kullanılmış olup PLC veya işlemci gibi endüstriyel elektronik cihazlar bakımından yerli üretimlerin henüz istenilen özelliklere sahip olmamaları nedeniyle yönetim panoları, yine Türkiye'de üretim

Soft yazılımının günlük ve yıllık enerji üretim miktarlarını gösteren arayüz görüntüleri sunulmuştur.

Scada yazılımının bir fotovoltaik enerji üretim tesisine sağladığı fayda olarak; bakım süresinin azaltılması yoluyla zaman ve iş gücü tasarrufu, demand ve kompanzasyon gibi cezalı durumların önlenmesi, insan hatalarının ortadan kaldırılması, sistemden elde edilen verilerin ve sisteme yapılan müdahaleleri kayıt altına alınması, sahadaki alarmlardan anında haberdar olunması ve alarmların kaydedilmesi, üretimdeki enerji maliyetlerinin hesaplanması, arızalı noktaların önceden tespiti ve önlenmesi, sahadaki ekipmanlar tarafından ölçülen değerlerin aynı anda tek ekranda izlenebilmesi, kayıtlardan grafik ve sayısal rapor alınması, sistemden elde edilen enerjinin kalitesinin takibi gibi birçok fayda sağlamaktadır.

7. YÜZER TİP FV ENERJİ ÜRETİM TESİSİ ÖRNEĞİ MALİYET ANALİZİ

Bir enerji üretim tesisi fizibilitesi hazırlanırken, tesisin bulunduğu ortam ve sahip olduğu donanımsal koşullar neticesindeki oluşan enerji üretim potansiyeli kadar tesisin kurulum maliyet analizi ve bu yatırımın elde edilecek olan gelir ile ne kadar sürede amorti edileceği yani geri kazanılacağı da önemlidir. Enerji tesisinden elde edilecek olan gelirin ne kadar sürede yatırım maliyetini amorti ederek tesisi kâra geçireceği hususundaki fizibilite çalışması, tesisin kurulumu için gerekli olan yatırımın yapılmasına uygun olup olmadığını belirlemektedir. Dolayısıyla bir enerji santralinin maliyet analizi gerçekleştirilirken tüm detaylar göz önünde bulundurulmalı, tüm gelir ve gider kalemleri hesaba dahil edilmelidir. Kurulu gücü 1 MWp olan yüzer tip fotovoltaik enerji üretim santrali örneğinin maliyet analizi gerçekleştirilirken, enerji tesisleri için fizibilite raporu hazırlama yazılımı olan RETScreen Expert yazılımının Viewer 8.0 sürümü kullanılmış olup Şekil 8.1’de yazılımın maliyet analizi arayüz görüntüsü sunulmaktadır.

İlk maliyetler (krediler)	Birim	Miktar	Birim maliyet	Miktar	Miktar	
İlk maliyet			\$			- TRL
Verileri göster						
- Yüzdürücü Sistem	maliyet	1	\$ 675.000	\$ 675.000	5.400.000	TRL
- 300Wp Solar Panel	maliyet	3.333	\$ 200	\$ 666.600	5.332.800	TRL
- 25kW Evirici	maliyet	33	\$ 2.897,726	\$ 95.625	765.000	TRL
- Kablo Tesisatı	maliyet	1	\$ 57.500	\$ 57.500	460.000	TRL
- Kablo Kanalı	maliyet	1	\$ 5.625	\$ 5.625	45.000	TRL
- Trafo Köşkü	maliyet	1	\$ 43.750	\$ 43.750	350.000	TRL
- Otomasyon ve Scada	maliyet	1	\$ 8.750	\$ 8.750	70.000	TRL
- AG Toplama Panoları	maliyet	1	\$ 7.875	\$ 7.875	63.000	TRL
Toplam ilk maliyetler			\$ 1.560.725		12.485.800	TRL

Şekil 7.1. Yüzer tip fotovoltaik tesis örneğinin RETScreen yazılımı ile gerçekleştirilen maliyet analizi arayüz görüntüsü.

Kara tipi fotovoltaik tesislerde arazi temini ile ilgili maliyetler göz ardı edildiğinde yatırım maliyetleri içerisinde en önemli kısım solar panel maliyeti iken yüzer tip fotovoltaik tesiste yer tahsisinden sonraki en önemli kısım yüzdürücü sistem maliyetidir. Teknik ve finansal analizi gerçekleştirilen 1 MWp yüzer tip fotovoltaik tesis örneğinin donanımsal bileşenleri oluşturulurken büyük oranda yerli üretim donanımlar tercih edilmiş ancak kurulum maliyetini önemli ölçüde etkilemesi nedeniyle sadece yüzdürücü duba sistemi olarak Çin menşeli ürünler kullanılmıştır.

Çizelge 7.1. Yüzer tip fotovoltaik tesis örneğinin yerli ve ithal maliyet bileşenleri tablosu.

Tesis Bileşenleri	Yerli		İthal
Yüzdürücü Sistem	Polidaş Ltd.Şti. Duba	LME Demir-Çelik Taşıyıcı Konstrüksiyon	Solarfirst (Çin)
	6 950 000 TL	715 000 TL	Tüm Montaj Bileşenleri Dahil
	7 665 000 TL		5 400 000 TL
Solar Panel	CW Enerji-300Wp-3333 Adet		
	5 332 800 TL		
Evirici	Solarkol A.Ş.-25kW-33 Adet		Schneider Electric- 25kW-33 Adet
	765 000 TL		1 320 000 TL
Kablo Tesisatı	Hes Kablo		
	460 000 TL		
Kablo Kanalı	STS Sac Kablo Kanalı(100x40)		
	45 000 TL		
Trafo Köşkü	Ulusoy Elektrik A.Ş.		
	350 000 TL		
Otomasyon ve Scada	Esso Otomasyon A.Ş.		
	70 000 TL		
AG Toplama Panoları	Eva Elektromekanik A.Ş.		
	63 000 TL		
Genel Toplam	14 750 800 TL		
Çin Menşeli Yüzdürücü Sistem ile Genel Toplam	12 485 800 TL		

Tesis lokasyonu olarak Yedikır Barajı kullanılacağı için devlet teşviki ve yer tahsisi ile kamusal bir yatırım olarak uygulanacak olan yüzer tip enerji tesisi kurulumunun arazi gideri olmayacaktır. Yüzer tip fotovoltaik tesisin önemli unsuru olan yüzdürücü sistemin günümüz koşullarında, yerli üretim dubalar ve demir profiller kullanılarak elde edilen panel taşıyıcı konstrüksiyonun birleşimi ile oluşturulmasının maliyeti, Çin menşeli profesyonel HPDE yüzdürücü sistemin kurulum maliyetine oranla 283 125 \$ daha pahalı olmaktadır.

Yüzer tip fotovoltaik tesis örneğinin evirici bakımından teknik analizini gerçekleştirirken kullanılan Alman menşeli Schneider Electric firmasına ait 25 kW'lık eviriciler yerine aynı güce sahip yerli evirici üreticisi Solarkol A.Ş.'nin ürünleri kullanıldığında 69 375 \$ yatırım tasarrufu sağlanmaktadır. Çizelge 7.1'de sunulan yüzer tip fotovoltaik tesis örneğinin yerli ve ithal maliyet bileşenleri tablosu incelendiğinde tesisin toplam kurulum maliyetinin 12 485 800 TL olduğu, dolar cinsinden karşılığı ise Şekil 8.1'de sunulduğu üzere 1 560 725 \$ olduğu görülmektedir. Bu durumda maliyet kalemleri içerisinde tesisin yerli ürün kullanım oranı ise yaklaşık %57 olmaktadır. Dolayısıyla tesis, 26 Temmuz 2012 tarih ve 28365 sayılı Resmî Gazete'de yayınlanan "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Elektrik Enerjisi Üreten Tesislerde Kullanılan Aksamın Yurt İçinde İmalatı Hakkında Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik" ile en az %55'i yerli aksam olan enerji üretim tesislerinin ek teşvikten faydalanma kapsamına dahil olmaktadır.

Fotovoltaik tesisin en az 25 yıl ömrü olduğu kabul edilerek gerçekleştirilen üretim ve gelir analizinde ise CW Enerji Müh. Ticaret ve San. Ltd. Şti.'ne ait CWT-300-60M model adı ile üretmiş olduğu monokristal yapıda 300 Wp çıkış gücüne sahip solar panellerin test sonuçları grafiğine göre 25 yıl kullanım sonunda veriminin %20 azaldığı bilgisi baz alınmış ve Çizelge 7.2'de sunulduğu üzere üretim ve gelir analizi elde edilmiştir.

Fotovoltaik enerji üretim tesisi örneğinde optimum yıllık enerji üretiminin elde edildiği tasarımı ve teknik analizi sonucu olan 1 246 819,46 kWh'lik enerji üretim miktarı ilk yıl üretimi olarak kabul edilmiş ve solar panellerin her yıl binde 8 oranında verim kaybına uğradığı varsayılarak tesisin 25 yıllık üretim planı hesaplanmıştır. Daha önce yapılmış olan yüzer tip fotovoltaik santraller ile kara tipi fotovoltaik santrallerin verimlerini karşılaştıran akademik çalışmalar, suyun ortam sıcaklığını azaltma etkisi nedeniyle solar panellerin yüzer tip fotovoltaik sistemlerde yaklaşık %10 daha verimli çalıştıklarını göstermektedir.

(Choi, 2014) Bu doğrultuda Çizelge 7.2’de sunulduğu üzere 25 yıllık üretim planına %10’luk ortam soğutma kaynaklı verim artışı dahil edildiğinde yıllık üretim 1 371,5 MWh ile başlayıp 25 yılda 1 131 MWh civarına inmektedir.

Çizelge 7.2. Yüzer tip fotovoltaik tesis örneğinin 25 yıllık üretim ve gelir analizi tablosu.

Yıl	Yıllık Üretim (kWh)	Su Yüzeyi Soğutma Etkisi %10 (kWh)	Yekdem Fiyatı (TL)	Yerli Katkı Fiyatı (TL)	Toplam Birim Fiyat (TL)	Yıllık Gelir (TL)	Kümülatif Gelir (TL)
1	1 246 819,46	1 371 501,41	0,32	0,08	0,40	548 600,56	548 600,56
2	1 236 844,90	1 360 529,39	0,35	0,09	0,43	587 748,70	1 136 349,26
3	1 226 950,15	1 349 645,16	0,37	0,09	0,47	629 690,45	1 766 039,71
4	1 217 134,54	1 338 848,00	0,40	0,10	0,50	674 625,16	2 440 664,86
5	1 207 397,47	1 328 137,21	0,44	0,11	0,54	722 766,41	3 163 431,27
6	1 197 738,29	1 317 512,12	0,47	0,12	0,59	774 343,02	3 937 774,29
7	1 188 156,38	1 306 972,02	0,51	0,13	0,63	829 600,14	4 767 374,42
8	1 178 651,13	1 296 516,24	0,55	0,14	0,69	888 800,40	5 656 174,82
9	1 169 221,92	1 286 144,11	0,59	0,15	0,74	952 225,20	6 608 400,02
10	1 159 868,15	1 275 854,96	0,64	0,16	0,80	1 020 175,99	7 628 576,01
11	1 150 589,20	1 265 648,12	0,69	0,17	0,86	1 092 975,75	8 721 551,76
12	1 141 384,49	1 255 522,94	0,75	0,19	0,93	1 170 970,50	9 892 522,25
13	1 132 253,41	1 245 478,75	0,81	0,20	1,01	1 254 530,95	11 147 053,20
14	1 123 195,38	1 235 514,92	0,87	0,22	1,09	1 344 054,28	12 491 107,48
15	1 114 209,82	1 225 630,80	0,94	0,23	1,17	1 439 965,99	13 931 073,47
16	1 105 296,14	1 215 825,76	1,02	0,25	1,27	1 542 721,97	15 473 795,44
17	1 096 453,77	1 206 099,15	1,10	0,27	1,37	1 652 810,60	17 126 606,04
18	1 087 682,14	1 196 450,36	1,18	0,30	1,48	1 770 755,17	18 897 361,21
19	1 078 980,69	1 186 878,75	1,28	0,32	1,60	1 897 116,26	20 794 477,47
20	1 070 348,84	1 177 383,72	1,38	0,35	1,73	2 032 494,47	22 826 971,95
21	1 061 786,05	1 167 964,65	1,49	0,37	1,86	2 177 533,28	25 004 505,23
22	1 053 291,76	1 158 620,94	1,61	0,40	2,01	2 332 922,06	27 337 427,28
23	1 044 865,43	1 149 351,97	1,74	0,43	2,17	2 499 399,37	29 836 826,66
24	1 036 506,50	1 140 157,15	1,88	0,47	2,35	2 677 756,51	32 514 583,17
25	1 028 214,45	1 131 035,90	2,03	0,51	2,54	2 868 841,22	35 383 424,39

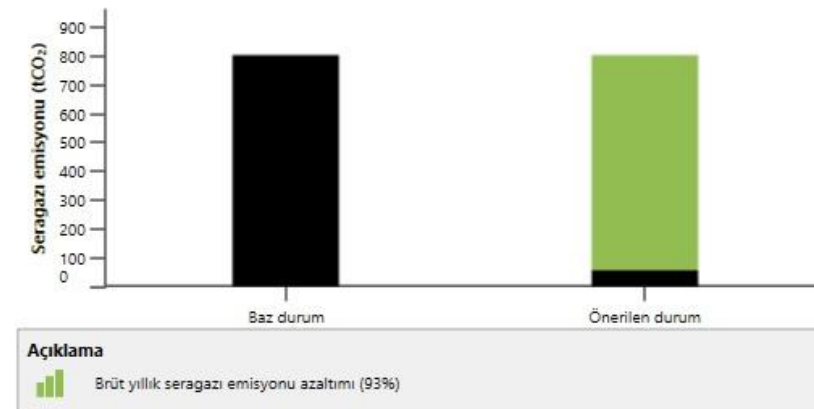
En son 20 Ocak 2021 tarih ve 31380 sayılı Resmi Gazete 'de yayınlanan Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi ile YEK (Yenilenebilir Enerji Kaynak) belgeli üretim tesisleri için belirlenen YEKDEM (Yenilenebilir Enerji Destekleme Mekanizması) fiyatı olan 32 kuruş/kWh ve yerli katkı fiyatı olan 8 kuruş/kWh birim fiyatları ilk yıl şebekeye verilen enerji satış fiyatı olarak belirlenmiş olup her yıl sabit %8 enflasyon oranınca fiyat artışı öngörülmüştür.

Bu fiyat tarifesi ile yapılan gelir analizine göre yatırım maliyeti olan 12 485 800 TL'nin geri kazanımı 14 yılda gerçekleşmekte, 15. yıldan itibaren tesis kâra geçmektedir. 25 yılın sonunda ise fotovoltaik tesisten kümülatif olarak 35 milyon 383 bin 424 TL gelir elde edilmektedir.

Ülkemizde elektrik enerjisi üretiminde kullanılan yakıtlar ağırlıklı olarak fosil yakıtlar olması münasebetiyle, temiz enerji olarak tabir ettiğimiz güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde ederken sera gazı salınımı mukayesesini de yaparak doğaya sağlanan faydayı gelir hesabına dahil etmek gerekmektedir. İşlem marjı denklemi kullanılarak hesaplanan emisyon verilerine göre yıllık ortalama 805,2 ton CO₂ emisyonu yaparak elde edilecek olan elektrik enerjisi, Şekil 8.2'de sunulduğu üzere 1 MWh'lik bir sistemle 56,4 ton CO₂ emisyonu ile elde edilmektedir. Totalde aylık 62,41 ton, yılda ortalama 748,9 ton CO₂ doğaya salınmayarak %93 oranında bir verimle temiz enerji elde edilmekte ve doğanın korunmasına katkı sağlanmaktadır.

Seragazi emisyonu

Baz durum	tCO ₂	805,2
Önerilen durum	tCO ₂	56,4
Brüt yıllık seragazi emisyonu azaltımı	tCO ₂	748,9



Şekil 7.2. RetScreen uygulaması sera gazı emisyonu analizi

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Amasya ili Suluova ilçesi Yedikır Barajı'nın kuzeydoğu bölgesinde su yüzeyine yüzdürücü sistem vasıtasıyla kurulu gücü 1 MWp olan bir yüzer tip fotovoltaik enerji üretim santrali örneğinin simülasyon yazılımları kullanılarak teknik analiz edildiği bu çalışmada öncelikle, tesis konumuna göre değişen solar panel tilt ve azimut açılarının yıllık enerji üretim performansına etkisi incelenmiş ve optimum verimin elde edildiği açılar tespit edilmeye çalışılmıştır. PV*SOL yazılımı kullanılarak yapılan teknik analizlerde Yedikır Barajı lokasyonunda tesisin yıllık enerji üretim performansı bakımından ideal panel tilt açısının 24^0 olduğu, ideal azimut açısı olarak ise tesisin kuzeye göre 184^0 açısı yapılması gerektiği gözlemlenmiştir. Aynı şekilde paneller yatay ve dikey konumlandırma yapılarak üretim performansları değerlendirilmiş ve yatay kullanımın, yüzer tip fotovoltaik tesisin su yüzeyinde rüzgâr ve dalgalanma mukavemeti bakımından daha stabil olması, kapladığı alanın daha az olması ve kısmi gölgenin daha az olması, tesisin enerji üretim performansının artması nedeniyle daha ideal olduğu belirlenmiştir.

Daha sonra diğer parametreler sabit tutularak fotovoltaik tesisin önemli bir unsuru olan solar panellerin kristal yapısı bakımından monokristal ya da polikristal yapıda olmasının tesisin performansına etkisi analiz edilmiştir. Bu analiz yöntemi ile solar panelin üretim kalitesinin göstergesi olan panelin düşük ışık performansının tesisin üretim performansı hususunda belirleyici unsur olduğu gözlemlenmiş, aynı nominal çıkış gücüne sahip monokristal ve polikristal paneller arasında düşük ışık performansı daha iyi olanın veriminin de daha fazla oldu tespit edilmiştir.

Solar dizilerin eviricilerin maksimum güç noktalarına göre ideal dizilimi bakımından teknik analiz gerçekleştirildiğinde ise güç dağılımı konusunda uyumsuzluk kayıplarını minimize edecek şekilde evirici seçimi yapılması gerektiği gözlemlenmiş, 3 333 adet 300 Wp çıkış gücünde monokristal solar paneller 20 kW'lık 43 adet eviricide toplanacak şekilde ideal dizilim ve 25 kW'lık 33 adet eviricide toplanacak şekilde ideal dizilim oluşturularak yapılan analizlerde 25 kW'lık 33 adet eviricili sistemin yıllık yaklaşık 20 000 kW fazla enerji ürettiği görülmüştür.

Yüzer tip fotovoltaik tesis örneğini oluşturan donanımsal bileşenleri mümkün olduğunca yerli üretim olması sağlanarak tesisin hem ülke ekonomisine faydasının artırılması hem de tesisin yasal teşviklerden ve hibelerden yararlanarak kurulum maliyetlerinin azaltılması hedeflenmiştir. Yüzdürücü sistem konusunda tamamen fotovoltaik sistemlere yönelik hdp malzemeden üretilen duba ve taşıyıcı sistemlerin ülkemizde henüz üretilmediği ancak su yüzeyi iskele malzemeleri kullanılarak yüzdürücü sistem yapılabileceği, bunun da maliyeti çok artıracığı tespit edildiği için Çin menşeli profesyonel solar yüzdürücü sistem tercih edilmiştir.

1 MWp kurulu gücündeki yüzer tip fotovoltaik enerji üretim tesisi örneğinin bulunduğu lokasyona sağladığı fayda incelendiğinde yıllık olarak üreteceği yaklaşık 1 370 MWh elektrik enerjisi ile Amasya ili Suluova ilçesinin elektrik tüketimini büyük oranda karşıladığı görülecektir. EPDK (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu)'nun en son 2019 yılı ocak ayında yayınladığı elektrik piyasası sektör raporuna göre Amasya ili faturalanan elektrik tüketim miktarlarından nüfusa oranla elde edilen Suluova ilçesi faturalanan elektrik tüketim miktarları Çizelge 8.1'de sunulmaktadır.

Çizelge 8.1. Suluova ilçesinin sektörlere göre 2019 yılı elektrik tüketimi ve tesiste üretilecek enerjinin tüketimi karşılama oranı.

Tüketim Türü	Faturalanan Yıllık Tüketim (MWh)	Tesiste Üretilecek Yıllık Enerjinin Tüketimi Karşılama Oranı (%)
Aydınlatma	455,22	301
Sanayi işletmesi	1 701,95	80,6
Ticarethane	2 339,15	58,6
Mesken	2 581,57	53,1
Tarımsal sulama	16,88	8 125
Toplam Tüketim	7 094,77	19,3

Yüzer tip fotovoltaik tesiste üretilen elektrik enerjisinin Suluova ilçesi 2019 yılı elektrik tüketim istatistiğine göre yıllık toplam tüketim miktarının %19,3'ünü, sadece sanayi işletmeleri tüketiminin ise %80,6'sını karşılayacağı öngörülmektedir. Tesiste üretilen elektrik enerjisinin sadece mesken abonelerine hitap ettiğini varsaydığımızda ise %53,1 oranında mesken abonelerinin yıllık elektrik tüketimini karşılayacağı hesaplanmaktadır.

Temiz ve ithal edilmeksizin öz kaynaklar kullanılarak elektrik enerjisi temin etme hususunda, ülkemiz ekonomisine sağlayacağımız katkı, tarım arazilerinin enerji üretim tesislerine dönüşmemesi ve doğanın korunması göz önüne alındığında yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etmek üzere yüzer tip güneş enerji santrallerinin yaygınlaşması ve yerli üretim yüzdürücü sistem teknolojisinin geliştirilmesine ağırlık verilmelidir.

Henüz verim olarak %15-20 aralığında olan FV panel teknolojisinin geliştirilmesine gayret gösterilmelidir. Ancak hali hazırda kurulmuş olan tesislerde de panellerin tozlanma, yağış vs. kaynaklı kirlenmelere karşı periyodik bakımlarına önem verilerek üretim performansını kötü etkileyecek unsurlar ortadan kaldırılmalıdır. Sadece tozlanmaya karşı yapılan düzenli temizlik çalışmaları ile yıllık %7 oranında performans artışı sağlandığı daha önceki akademik çalışmalarda tespit edilmiştir.

Sadece resmi olarak gölet, göl, baraj gibi su rezervlerinin %1'lik kısımlarını değerlendirecek şekilde çok muhafazakâr verilerle dahi 400 GW'lık küresel bir potansiyele sahip olan yüzer güneş enerji sistemlerinin hayatımıza ucuz ve yeşil enerji olarak değer katmaya hazır önemli bir alan olduğu aşikârdır. Yapılan çalışmalar doğrudan güneş ışığının azaltılmasının çoğu ortamda su kalitesini arttırdığını ve aynı zamanda suyun buharlaşmasını %60 oranında engelleyerek tarım arazilerinin yanında su kaynaklarının da daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır. G. Kore'de yapılan akademik çalışmalar suyun soğutma etkisi sayesinde kara kurulumuna göre yüzer tip güneş enerji santrallerinden yıllık %10 daha fazla enerji üretimi sağlandığını göstermiştir. %100 geri dönüştürülebilir malzemelerden oluşturulan yüzer tip FV tesislerin doğa dostu olduğu da önemli bir husustur.

Günümüz teknolojisine göre kurulum maliyetleri kıyaslandığında daha özel malzemeler kullanılması dolayısıyla yüzer tip FV sistemler kara tipi FV tesislere göre %10 daha fazla kurulum maliyetine sahiptir. Ticari rekabet koşulları içerisinde kısa sürede bu sorununda aşılacağı tahmin edilmektedir. GES kurulumu yapmak isteyen özel müteşebbislerin karşılaştıkları sorunlardan bir diğeri ise proje onay sürecindeki zorluklar ve prosedür yoğunluğudur. Elektronik belge yönetimi sisteminin geliştirilerek kurumlar arası yazışma ve onay işlemlerinin kolaylaştırılması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Akar, A. (2016, Mayıs). Bir Güneş Enerji Santralının Kurulumu ve Performansının Analizi.
- Ateş, A. M., Yılmaz, O. S., & Gülgen, F. (2020). Using Remote Sensing To Calculate Floating Photovoltaic Technical Potential of a Dam's Surface. *ScienceDirect-Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 1-12.
- Aydın, İ., & Şahin, T. (2020, Haziran). *Batarya Teknolojileri*. Batkon: <http://batkon.com/arge-projeleri.aspx?code=9ff5b74c-3c34-40b4-af9e-5098285b49aa> adresinden alındı
- Baş, H. C. (2016). Fotovoltaik Sistemlerin Performans Değerlendirmesi. Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği.
- BP Statistical Review of World Energy 2020. (2020). *Statistical Review of World Energy 2020/69th Edition*. London: BP p.l.c.
- Bulut, M., Kaplınoğlu, İ., & Geylani, V. (2018). Dünyada Hidro YüzerGes Projelerinin Gelişimi ve Türkiye'deki Potansiyeli. *Güç Sistemleri Konferansı*, (s. 13-18). Ankara.
- 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.
- Çetin, M., & Sezen, S. (2018). Türkiye'de Yenilenebilir Ve Yenilenemeyen Enerji Tüketimi, Ekonomik Büyüme Ve Karbondioksit Salınımı Arasındaki İlişki. *Yönetim ve Ekonomik Araştırmaları Dergisi*, 136-157.
- Dai, J., Zhang, C., Lim, H. V., Ang, K. K., Qian, X., Wong, J. H., . . . Wang, C. L. (2020). Design And Construction of Floating Modular Photovoltaic System For Water Reservoirs. *ScienceDirect-Energy*, 1-15.
- Electricity Domestic Consumption*. (2020, Haziran 20). Enerdata: <https://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html> adresinden alındı
- Enerji İşleri Genel Müdürlüğü Yatırımlar Dairesi Başkanlığı. (2020). *Türkiye Elektrik Yatırımları 2020 Yılı Şubat Ayı Özet Raporu*. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.
- Enerji ve Çevre Dergisi. (2019). Mahsuplaşma Yönetmeliği İle Yeni Bir Dönem Başlıyor. *Enerji ve Çevre Dünyası Dergisi*, 18-19.
- Ersoy, B. (2017). Güneş Santralleri İçin Gerçek Zamanlı Uzaktan İzleme Sistemleri. V. *Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi Bildirileri* (s. 45-52). İzmir: TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası.

- Hasar, Ş. (2016). Güneş Kollektörlerinin Isıl Değişiminin Verimlilik Üzerine Etkileri. Bilecik.
- HBL Power Systems Limited. (2020, Haziran). *Valve Regulated Lead Acid Batteries*. Solar Akademi: <http://www.solar-academy.com/menus/Tubular-Gel-VRLA-valve-regulated-lead-acid-batteries025842.pdf> adresinden alındı
- Hemetsberger, W., Schmela, M., & Chianetta, G. (2019). *Global Market Outlook For Solar Power / 2020 - 2024*. Solar Power Europe.
- Keskin, A., Martin, K., & Boran, K. (2019). Niğde İli Güneş Enerji Santrali Modellemesi ve Performans Parametreleri Değerlendirmesi. *3rd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies* (s. 213-216). Ankara: SETSCI Conference Proceedings.
- Kim, S.-H., Yoon, S.-J., Choi, W., & Choi, K.-B. (2016). Application of Floating Photovoltaic Energy Generation Systems in South Korea. *MDPI-Sustainability*, 1-9.
- Korkmaz, M. S. (2015, Mayıs). Buharlaştırma Kayıplarının Yüzer Fotovoltaik Paneller İle Azaltılması. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- M.G.M. Atmosfer Modelleri Şube Müdürlüğü. (2021, Şubat 01). *Meteoroloji Genel Müdürlüğü*. 1998 - 2021 Meteoroloji Genel Müdürlüğü: https://www.mgm.gov.tr/kurumici/radyasyon_iller.aspx?il=amasya adresinden alındı
- Özaltın, S., & Binark, A. (2021). Eğirdir Gölü Çevresinde Yenilenebilir Enerji Uygulamaları. *İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3(2), 7-17.
- Özgün, H. (2018). *Temel Kavramlar ve Örnek Projelerle Fotovoltaik Güneş Enerjisi Sistemleri*. İstanbul: Günder Yayınları.
- (2020). *Renewables 2020 Global Status Report*. Paris: www.ren21.net.
- Sahu, A., Yadav, N., & Sudhakar, K. (2016). Floating Photovoltaic Power Plant: A review. *ScienceDirect-Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 815-824.
- Sayın, S., & Koç, İ. (2011). Güneş Enerjisinden Aktif Olarak Yararlanmada Kullanılan Fotovoltaik (FV) Sistemler ve Yapılarda Kullanım Biçimleri. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 90-105.
- Suri, M. (2020, Haziran 22). *Maps and Gis Data*. Solargis.com: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/world> adresinden alındı
- Şençiçek, H. (2017, Aralık). Yüzer ve Arazi Kurulumu Fotovoltaik Sistemlerin Teknik Ve Ekonomik Açından İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2020, Haziran 21). *Güneş*. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı/Güneş: <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes> adresinden alındı

Temiz, M., & Javani, N. (2020). Design and Analysis of a Combined Floating Photovoltaic System For Electricity and Hydrogen Production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 3457-3469.

U.S. Department Of Energy. (2020). *2018 Renewable Energy Data Book*. National Renewable Energy Laboratory.

Ünal, O. (2006). Güneş Pilleri. Konya: T.C. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü. (2020, Haziran 20). Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü-Güneş Enerjisi: <http://www.yegm.gov.tr> adresinden alındı



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Abdullah TOKUL

Eğitim Derecesi	Okul/Program	Mezuniyet Yılı
Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi	2008
İş Deneyimi/Yıl	Çalıştığı Yer	Görevi
2009-2010	Amasya Fimar Mermer Maden İnş.	Mühendis
2010-2012	Amasya Türk Telekom İl Müd.	Mühendis
2012-Devam Ediyor	Amasya Üniversitesi	Mühendis