
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ANKARA İLİNDE ÇATI TİPİ BİR GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİNİN TASARIMI, SİMÜLASYONU VE EKONOMİK ANALİZİ

Ahmet Berat KAHRAMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KASIM 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- 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 çalışmasında 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.

Ahmet Berat KAHRAMAN

14/11/2022

ANKARA İLİNDE ÇATI TİPİ BİR GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİNİN TASARIMI, SİMÜLASYONU VE EKONOMİK ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet Berat KAHRAMAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2022

ÖZET

Bu tez çalışması güneş enerjisi santrallerinin, tasarımı, performansı, ekonomik ve çevresel getirilerinin incelenmesi amacıyla hazırlanmıştır. Ankara ilinde kurulacak bir güneş enerjisi santralinin fizibilitesi, 3 boyutlu tasarımı, gölgelenme analizi, elektriksel sistem tasarımı ve ekonomik hesapları yapılmıştır. Tasarım, bulunduğu yerleşkenin iç elektrik ihtiyacını karşılayabilecek nitelikte çatı tipi bir santral olarak planlanmıştır. On-Grid bir tasarım olması sayesinde ihtiyaç fazlası enerjinin şebeke işletmecisine satışını gerçekleştirebilecektir. PVsyst çıktılarından elde edilen üretim öngörüleri, güncel elektrik fiyatları ve Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği kullanılarak projenin gelir kalemleri hesaplanmıştır. Gider kalemleri olarak da ilk yatırım maliyeti ve operasyonel giderler alınmış ve ekonomik analiz yapılmıştır. Yapılan ekonomik analiz sonucunda 25 yıllık ömrü olan projenin kendini 4 seneden kısa bir süre içerisinde ödediği ve ekonomik açıdan uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sistemin ilk yılında 4 516 239 kWh Güneş ışınımını % 16,54 verim oranı ile 747,42 MWh elektrik enerjisine dönüştüreceği hesaplanmıştır. Ekonomik getirilerinin yanı sıra ölü alan durumundaki fabrika çatılarının verimli şekilde değerlendirilebileceği, bir doğalgaz santraline oranla 7 460,72 tCO_2'in salınımına engel olunabileceği sonucuna varılmıştır.

Bilim Kodu	:	92802
Anahtar Kelimeler	:	Güneş enerjisi sistemleri, fotovoltaik sistem tasarımı, PVsyst simülasyonu, lisanssız enerji santralleri, ekonomik analiz
Sayfa Adedi	:	79
Danışman	:	Doç. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ

DESIGN, SIMULATION AND ECONOMIC ANALYSIS OF ROOFTOP SOLAR POWER PLANT IN ANKARA REGION

(M. Sc. Thesis)

Ahmet Berat KAHRAMAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2022

ABSTRACT

This thesis study has been prepared to examine the design, performance, economic and environmental benefits of solar power plants. Feasibility, 3D design, shading analysis, electrical system design and economic calculations of a solar power plant to be established in Ankara have been made. The design is planned as a roof-type power plant that can meet the internal electricity needs of the campus. Thanks to its On-Grid design, it will be able to sell the surplus energy to the grid operator. The revenue items of the project were calculated by using the generation forecasts obtained from the PVsyst outputs, current electricity prices and the Unlicensed Electricity Generation Regulation in the Electricity Market. Initial investment cost and operational expenses were taken as expense items and an economic analysis was made. As a result of the economic analysis, it was concluded that the project, which has a life of 25 years, pays for itself in less than 4 years and is economically viable. It has been calculated that in the first year of the system, 4 516 239 kWh of solar radiation will be converted into 747,42 MWh electrical energy with an efficiency rate of 16,54%. In addition to the economic benefits, it has been concluded that factory roofs can be used efficiently and the emission of 7 460,72 tCO2 can be prevented compared to a natural gas power plant.

Science Code	:	92802
Key Words	:	Solar power systems, photovoltaic system design, PVsyst simulation, unlicensed power plants, economic analysis
Page Number	:	79
Supervisor	:	Assist. Prof. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca beni yönlendiren saygı değer danışmanım Doç. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ'ye, yüksek lisans eğitimimi başarıyla tamamlayabilmem için bana destek ve imkan sağlayan kurumum Türkiye Elektromekanik Sanayi ailesine ve desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen kıymetli aileme teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xii

HARİTALARIN LİSTESİ xiv

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 7

3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER 11

3.1. Fotovoltaik Hücre Teknolojileri 11

3.1.1. 1. Nesil – kristal silisyum hücreler (c-Si) 13

3.1.2. 2. Nesil – ince film hücreler 13

3.1.3. 3. Nesil hücreler 14

3.2. Fotovoltaik Sistem Bileşenleri 15

3.2.1. Fotovoltaik panel 15

3.2.2. İnverter 16

3.2.3. Bağlantı ekipmanları (kablo ve konnektör) 19

3.2.4. Trafo (transformatör) 20

3.2.5. Şalt ekipmanları 21

3.2.6. Konstrüksiyon malzemeleri 22

3.2.7. Fotovoltaik sistem tasarım ve analiz programları 22

Sayfa

3.3. Fotovoltaik Sistem Çeşitleri 23
3.3.1. Şebekeden bağımsız sistemler (off-grid sistemler) 23
3.3.2. Şebeke bağlantılı sistemler (on-grid sistemler) 25
3.4. Fotovoltaik Sistem Verimini Etkileyen Faktörler 26
3.4.1. Güneşin hareketleri 27
3.4.2. Gölgelenme 27
3.4.3. Ortam sıcaklığı 27
3.4.4. Sistem Kayıpları 27
4. TEORİK ANALİZ 29
4.1. Sıcaklığın Fotovoltaik Panellerin Akım-Gerilim Değerleri Üzerine Etkisi 29
4.2. İletken Üzerindeki Gerilim Düşümü 29
4.3. İletken Üzerindeki Güç Kaybı 30
4.4. Net Bugünkü Değer 30
4.5. Geri Ödeme Süresi 31
4.6. İç Karlılık Oranı 31
4.7. Levelized Cost of Energy (LCOE) 31
5. MATERYAL VE METOT 33
5.1. Proje Konumuna Ait Özellikler 33
5.2. Fotovoltaik Kurulum İçin Kullanılacak Binanın Durumu 36
5.3. Elektriksel Altyapı 37
5.4. Yerleşkenin Elektrik Enerjisi Tüketim Verileri 38
5.5. Fotovoltaik Panel 40
5.6. İnverter 40
5.7. DC Kablo 41
5.8. AC Kablo 41
5.9. PVsyst Programı Üzerinde Sistemin Tasarlanması 42

Sayfa

5.10. Elektriksel Hesaplamalar ve Ekipmanların Seçimi 50
5.10.1. Fotovoltaik panel dizi (string)-sıra (array) hesaplamaları 51
5.10.2. DC kabloların hesaplamaları 55
5.10.3. AC kabloların hesaplamaları 56
5.10.4. GES şalt panosu ekipmanlarının seçimi 59
6. BULGULAR VE TARTIŞMA 61
6.1. Üretim Öngörülerinin Değerlendirilmesi 62
6.2. Proje Gelir ve Gider Kalemleri 64
6.2.1. İlk yatırım maliyeti 64
6.2.2. Tasarruf edilen ve ihtiyaç fazlası enerjinin satışından elde edilen getiri .. 65
6.2.3. Operasyonel giderler 68
6.3. Ekonomik Analiz Yöntemleri ile Projenin Değerlendirilmesi 70
6.3.1. Projenin net bugünkü değer yöntemiyle incelenmesi 70
6.3.2. Projenin geri ödeme süresinin belirlenmesi 71
6.3.3. Projenin iç karlılık oranının belirlenmesi 72
6.3.4. Üretilen enerjinin LCOE hesabı 72
7. SONUÇ 73
KAYNAKLAR 75

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 1.1. 1985-2020 yılları aylık ortalama günlük güneşlenme süresi 3

Çizelge 1.2. Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre gelişimi 5

Çizelge 1.3. 2020 yılında işletmeye giren/çıkan üretim tesisleri 6

Çizelge 5.1. Fotovoltaik sistem kurulacak alanın köşe koordinatları 36

Çizelge 5.2. Yerleşkenin yıllık iç tüketim giderleri ve son dört yılın ortalaması 39

Çizelge 5.3. Fotovoltaik panele ait özellikler 40

Çizelge 5.4. İnvertere ait özellikler 41

Çizelge 5.5. Fotovoltaik panel-inverter arasında kullanılacak kabloya ait özellikler 41

Çizelge 5.6. İnverter-GES panosu arasında kullanılacak kabloya ait özellikler 42

Çizelge 5.7. GES panosu-trafo ana dağıtım panosu arasında kullanılacak kabloya ait özellikler 42

Çizelge 5.8. Bakır baraların özelliklerini gösteren tablo 60

Çizelge 6.1. Sistemin öngörülen aylık ve yıllık üretim verileri 63

Çizelge 6.2. Degredasyon kaybı ile sistemin yılık üretim değerleri 64

Çizelge 6.3. İlk yatırım maliyeti içerisindeki başlıca harcama kalemleri 65

Çizelge 6.4. Proje ömrü boyunca üretilen enerjinin kullanımı 66

Çizelge 6.5. 2014-2022 yılları arasında elektrik fiyatlarındaki artış 67

Çizelge 6.6. Proje ömrü boyunca tasarruf edilen enerjiden elde edilen gelir 67

Çizelge 6.7. Proje ömrü boyunca enerji satışından elde edilecek getiri 68

Çizelge 6.8. Proje operasyonel gider kalemleri 69

Çizelge 6.9. Proje ömrü boyunca operasyonel giderler 69

Çizelge 6.10. Proje gelirlerinin net bugünkü değer yöntemiyle hesaplanması 70

Çizelge 6.11. Proje giderlerinin net bugünkü değer yöntemiyle hesaplanması 71

Çizelge 7.1. Proje ekonomik değerlendirmesinin sonuçları 73

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre gelişimi 4

Şekil 3.1. Fotovoltaik pillerin yapıldıkları malzemelere göre sınıflandırılması 12

Şekil 3.2. Fotovoltaik pillerin birbirleri ile seri veya paralel bağlantısı 15

Şekil 3.3. Fotovoltaik pillerin a) seri bağlantıda akım gerilim değerlerindeki değişim grafiği b) paralel bağlantıda akım gerilim değerlerindeki değişim grafiği 16

Şekil 3.4. Fotovotaik sistemlerin sınıflandırılması 23

Şekil 3.5. Tipik off-grid fotovoltaik sistem bileşenleri 24

Şekil 3.6. Tipik on-grid fotovoltaik sistem bileşenleri 26

Şekil 5.1. Ankara güneşlenme süreleri (saat) 34

Şekil 5.2. Ankara Global Radrasyon Değerleri (kWh/m^2-gün) 34

Şekil 6.1. Günlük ortalama üretim ve kayıp değerlerinin aylık bazda gösterimi 63

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. Monokristal ve polikristal hücre örneği 13

Resim 3.2. İnce film fotovoltaik panel örneği 14

Resim 3.3. Boyar maddeli fotovoltaik panel örneği 14

Resim 3.4. Mikro inverter 17

Resim 3.5. Dizi (string) inverter 18

Resim 3.6. Merkezi inverter 18

Resim 3.7. a) Solar kablo b) MC4 konnektör 20

Resim 5.1. Fotovoltaik sistem kurulacak alanın röperli kroki görüntüsü 36

Resim 5.2. Fabrika binası çatıları 37

Resim 5.3. Bağlantı yapılacak dağıtım trafosunun görseli 38

Resim 5.4. PVsyst programı tasarım ana menü ara yüzü 43

Resim 5.5. PVsyst programı proje konum seçimi ara yüzü 43

Resim 5.6. Proje konumunun PVsyst programı içerisindeki meteorolojik verileri 44

Resim 5.7. PVsyst programı yön belirleme sekmesinin görseli 45

Resim 5.8. PVsyst programı sistem sekmesi 46

Resim 5.9. PVsyst programı detaylı kayıplar sekmesi 47

Resim 5.10. Proje konumunun PVsyst programındaki Güneş hareket grafiği 47

Resim 5.11. Tasarım menüsünde bir fotovoltaik panel dizisinin oluşturulması 48

Resim 5.12. 3 boyutlu tasarımda panel yerleşiminin kuş bakışı görüntüsü 49

Resim 5.13. PVsyst programında 3 boyutlu tasarımın gölgelenme analizi 49

Resim 5.14. 21 Aralık gününe göre yapılan PVsyst gölgelenme analizinin sonuçları ... 50

Resim 6.1. Sistemin genel tek hat şeması 61

Resim **Sayfa**

Resim 6.2. GES şalt panosu bağlantı şeması 61

Resim 6.3. Bir array ve inverterin bağlantı şeması 62

HARİTALARIN LİSTESİ

Harita **Sayfa**

Harita 1.1. Dünya güneş enerjisi potansiyeli haritası 2

Harita 1.2. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli haritası 3

Harita 5.1. Ankara güneş enerjisi potansiyeli atlası..... 33

Harita 5.2. Proje lokasyonu ve parsel bilgisi 35

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
%e	Gerilim düşümü
°C	Santigrat derece
A	Amper
B_t	t sıralı dönemdeki gider
C_t	t sıralı dönemdeki gelir
Hz	Hertz
$I_{30\ °C\ AC\ kablo}$	AC kablonun 30 °C'de taşıma kapasitesi
$I_{60\ °C\ DC\ kablo}$	DC kablonun 60 °C'de taşıma kapasitesi
$I_{85\ °C\ MP}$	Panelin 85 °C'de maksimum güç akımı
$I_{85\ °C\ SC}$	Panelin 85 °C'de kısa devre akımı
$I_{AC\ GES}$	Santralin toplam AC akımı
$I_{max\ AC\ kablo}$	AC kablonun maksimum taşıma kapasitesi
$I_{max\ DC\ kablo}$	DC kablonun maksimum taşıma kapasitesi
$I_{MP\ inverter}$	İnverterin maksimum giriş akımı
$I_{OC\ inverter}$	İnverterin maksimum kısa devre akımı
$I_{SC\ panel}$	Panelin kısa devre akımı
I_{STC}	Panelin standart test koşullarındaki akımı
I_X	Panelin X sıcaklıktaki akımı
i	Faiz oranı
k	Öziletkenlik
l	Kablo uzunluğu
N	Projenin dönem sayısı
N_t	t sıralı dönemdeki para akışı
P	Güç
$P_{AC\ GES}$	Santralin toplam AC gücü
P_l	Güç kaybı
$P_{max\ inverter}$	İnverter maksimum gücü

Simgeler	Açıklamalar
$P_{max\ sıra}$	Panel sırası maksimum gücü
S	Kablo kesiti
t	Dönem sıra numarası
T	Sıcaklık
T_{STC}	Panelin standart test koşullarındaki çalışma sıcaklığı
T_X	Panelin X sıcaklığı
V	Volt
$V_{-40\ °C\ MP}$	Panelin -40 °C'de maksimum güç gerilimi
$V_{-40\ °C\ OC}$	Panelin -40 °C'de açık devre gerilimi
$V_{85\ °C\ MP}$	Panelin 85 °C'de maksimum güç gerilimi
$V_{85\ °C\ OC}$	Panelin 85 °C'de açık devre gerilimi
VA	Volt amper
$V_{AC\ inverter}$	İnverterin çıkış gerilimi
$V_{NO\ inverter\ max}$	İnverterin maksimum giriş gerilimi
$V_{NO\ inverter\ min}$	İnverterin minimum giriş gerilimi
$V_{OC\ inverter\ max}$	İnverterin maksimum açık devre gerilimi
$V_{OC\ inverter\ min}$	İnverterin minimum açık devre gerilimi
V_{STC}	Panelin standart test koşullarındaki gerilimi
V_X	Panelin X sıcaklıktaki gerilimi
W	Watt
Wh	Watt saat
Wp	Watt peak
α	Akım sıcaklık katsayısı
β	Gerilim sıcaklık katsayısı
γ	Güç sıcaklık katsayısı

Kısaltmalar	Açıklamalar
AC	Alternatif Akım
a-Si	Amorf Silisyum
CdTe	Kadminyum Tellür

Kısaltmalar	Açıklamalar
CIGS	Bakır İndiyum Galyum Diselenür
CIS	Bakır İndiyum Selenür
CO_2	Karbondioksit
c-Si	Kristal Silisyum
DC	Doğru Akım
DM	Dağıtım Merkezi
DSSC	Boyar Madde
EÜAŞ	Elektrik Üretim Anonim Şirketi
GaAs	Galyum Arsenür
GEPA	Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası
GES	Güneş Enerjisi Santrali
GÖS	Geri Ödeme Süresi
İYM	İlk Yatırım Maliyeti
LCOE	Levelized Cost of Energy
mc-Si	Polikristal Silisyum
MPPT	Maximum Power Point Tracker
NBD	Net Bugünkü Değer
PV	Fotovoltaik
Sc-Si	Monokristal Silisyum
STC	Standart Test Koşulları
TC	Türkiye Cumhuriyeti
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TEMSAN	Türkiye Elektromekanik Sanayi Anonim Şirketi
TEP	Ton Eşdeğer Petrol
TM	Trafo Merkezi
TOG	Toplam Operasyonel Giderler
TÜM	Toplam Üretim Miktarı
UV	Ultraviyole
YEKA	Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları

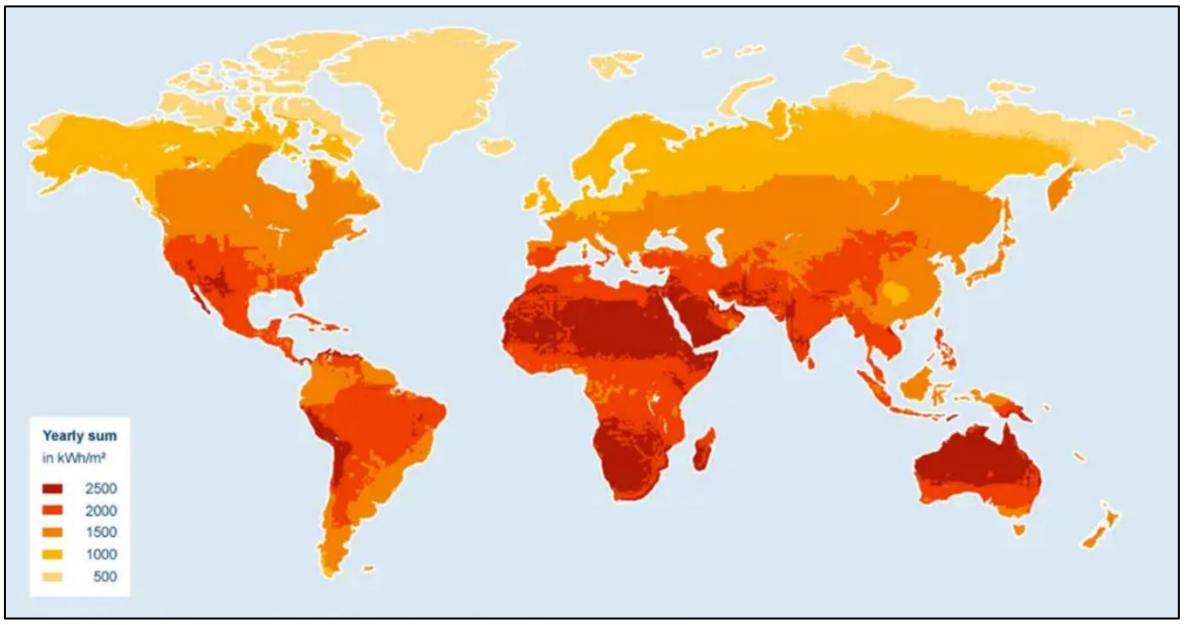
1. GİRİŞ

Dünya genelinde gelişen teknoloji ve nüfus artışı sebebi ile enerjiye olan talep her geçen gün artış göstermektedir. İnsanlar, buharlı makinaların icadından itibaren enerji ihtiyacının büyük kısmını fosil yakıtlardan sağlamaktadır. Ancak fosil yakıt kullanımının sebep olduğu karbon emisyonu, hava kirliliğinin artması ve iklim değişikliği günümüzde insanlığı alternatif enerji kaynakları arayışına itmiştir. Söz konusu enerji talebinin giderilmesi, aynı zamanda çevreye zarar verici etkisinin olmaması sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarını en uygun enerji kaynağı olarak göstermekte ve kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Yenilenebilir enerji, Güneş ve atmosferik olaylar var oldukça bitmeyecek enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir [1]. Yenilenebilir enerji kaynakları güneş, rüzgâr, biokütle, jeotermal, hidrolik ve dalga enerjisi olarak sınıflandırılır ancak tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının temelini güneş enerjisi oluşturmaktadır.

Güneş, Dünya'nın yaklaşık 110 katı büyüklüğünde, 1,4 milyon km çapında orta büyüklükte bir yıldızdır. Güneşte meydana gelen füzyon tepkimeleri sırasında hidrojen atomları helyum atomlarına dönüşürken bir miktar enerji üretilir. Isı ve ışık olarak üretilen bu enerji temiz ve tükenmez enerji olarak kabul edilir. Güneş yüzeyindeki enerjinin tamamı Dünya yüzeyinde gözlemlenemez. Ortaya çıkan enerjinin % 50'lik bir kısmı Dünya ile Güneş arasındaki 149,6 milyon km'lik uzaklıktan dolayı Dünya atmosferine ulaşamaz. Atmosfere ulaşan enerjinin ise sadece % 20'lik kısmı atmosfer tabakalarını geçerek Dünya yüzeyine ulaşabilir, % 30'luk kısmı atmosferdeki katmanlardan geçemez ya da geri yansır. Yüzeye ulaşan % 20'lik toplam enerjinin 10^7 GW'lık kısmı ışık kaynağını oluşturur. Güneş sisteminin yaklaşık 5 milyar yıl var olacağı ve enerji kaynağı olmaya devam devam edeceği düşünülmektedir. Güneş'ten gelen ısı enerjisi güneş kollektörleri ve toplayıcıları kullanılarak ısı ve elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Işık enerjisi ise taşıdığı fotonlar aracılığıyla fotovoltaik piller üzerinde elektrik üretiminde kullanılmaktadır. [1, 2]. Fotovoltaik paneller, güneşten gelen fotonların panel üzerindeki hücrelere çarpması ve içerisindeki elektronların atomlarından ayrılıp hareketlenerek devrede akması ile elektrik üretir. Herhangi hareketli parça içermeyen statik sistemler olmaları sebebiyle işletme bakım maliyetlerinin düşük olması, küçük bileşenlerden oluşmaları sebebiyle kolay ölçeklendirilebilir olması güneş enerjisini diğer yenilenebilir enerji kaynakları arasında öne çıkaran özellikleridir.

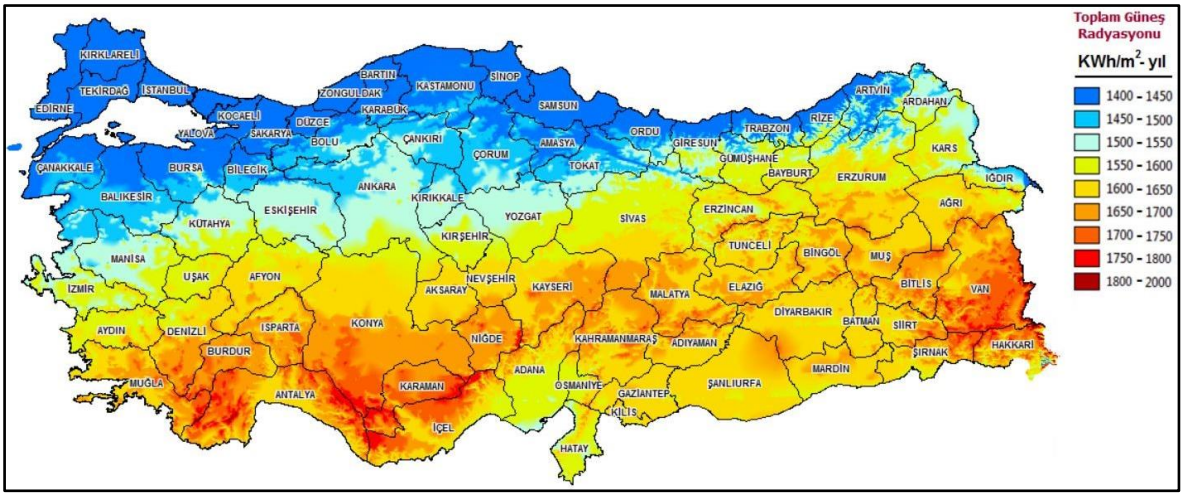
Güneş enerjisi potansiyeli ülkelerin sahip oldukları matematiksel konumun bir sonucudur. Ekvator paraleli üzerindeki veya yakınındaki ülkeler en yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip ülkeler iken Ekvator'dan uzak ülkeler düşük güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Türkiye, birçok dünya ülkesi ile karşılaştırıldığında konumu sebebi ile güneş enerjisi ortalaması bakımından yüksek değerleri olan alanlara sahiptir. İspanya, İtalya ve Yunanistan ile birlikte Avrupa'daki en yüksek güneş enerji potansiyeline sahip bölgelerden bir tanesidir.



Harita 1.1. Dünya güneş enerjisi potansiyeli haritası [3]

Ülkemiz, güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre daha avantajlı durumda olmasının yanı sıra, ısıl güneş enerjisi üretimi ve kullanımı açısından Çin, ABD ve Japonya'dan sonra dünya dördüncüsüdür [4].

Kendi ülke sınırları içerisinde incelendiğinde ise Akdeniz bölgesi, Güneydoğu Anadolu bölgesi ve İç Anadolu bölgesinin güney kesiminin fotovoltaik sistemler için en uygun bölgeler olduğu görülmektedir. Güneş enerji ortalamasının en düşük olduğu Karadeniz ve Marmara bölgelerinde dahi 1 400-1 500 kWh/m^2-yıl değerlerinde güneş enerjisi potansiyeli olması Türkiye'nin ne kadar büyük bir güneş enerjisi potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Aşağıda bu dağılımı gösteren Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) verilmiştir [5].



Harita 1.2. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli haritası [5]

Güneş enerjisi potansiyelini etkileyen en önemli unsurlardan bir tanesi güneşlenme süresidir. Türkiye'deki güneşlenme süreleri matematiksel konum sebebi ile Kuzey yönünde gidildikçe azalmaktadır. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü verilerine göre ülke genelinde güneşlenme süresinin en yüksek olduğu dönem yaz ayları, en düşük olduğu dönem ise kış aylarıdır.

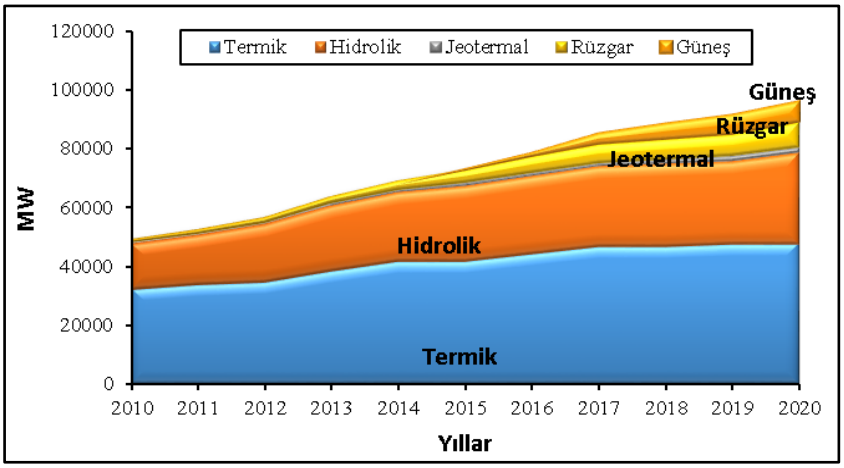
Çizelge 1.1. 1985-2020 yılları aylık ortalama günlük güneşlenme süresi [6]

Aylar	Güneşlenme Süresi (Saat)
Ocak	3,6
Şubat	4,1
Mart	5,1
Nisan	6,9
Mayıs	6,9
Haziran	7,4
Temmuz	7,9
Ağustos	6,5
Eylül	7,0
Ekim	7,3
Kasım	5,2
Aralık	3,8

Ülkelerin siyasi ve ekonomik ilişkilerinin temelinde yüzyıllardır enerji konusu yatmaktadır. Ülkelerin kendi refah ve kalkınmalarını sürdürebilmeleri için her geçen gün artan enerji ihtiyacını karşılamaları gerekmektedir. Ülkemiz stratejik konumu nedeniyle enerji konusunda birçok ülkeye göre avantajlı konumda olmasına rağmen sahip olduğu enerji kaynakları göz önünde bulundurulduğunda kendi kendine yetebilen bir ülke olmadığı görülmektedir. Bununla birlikte ülkemiz bu stratejik konumu kullanarak son yıllardaki

ekonomik büyümesine eş değer bir şekilde dünya enerji piyasasında en hızlı büyüyen ülkelerden biri haline gelmiştir [7].

Türkiye, TEİAŞ verilerine göre 2006 yılında 40 564,8 MW toplam kurulu güce sahipken, elektrik tüketimini artıran sanayi atılımlarıyla artmaya devam etmiştir. Kesintisiz bir şekilde artışına devam eden kurulu güç miktarı 2020 yılına gelindiğinde 2006 yılındaki seviyesinin % 237'sine, yani 95 890,6 MW toplam kurulu güce ulaşmıştır [8]. Bu süre zarfı boyunca yenilenebilir enerji konusunda farkındalığın artması ve alternatif enerji kaynaklarına yönelimin popüler hale gelmesi, ülkemizdeki yenilenebilir enerji sistemlerine dayalı üretim santrallerinin artışını beraberinde getirmiştir.



Şekil 1.1. Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre gelişimi [9]

Yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimi ülkemiz için yabancı bir kelime değildir. Türkiye'deki enerji sektörü tarihi incelendiğinde, yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan hidroelektrik santrallerin ülkemizde köklü bir geçmişe ve kurulu güç oranında büyük bir paya sahip olduğu görülmektedir. Anadolu topraklarının sahip olduğu dağlık ve engebeli arazi yapısı hidroelektrik enerjisi potansiyelinin yüksek olmasını sağladığı için bu teknoloji 20. yüzyılın ortalarında ülkemizde geniş yer edinmeye başlamıştır. Diğer yenilenebilir enerji üretim metotları olan hidrolik, jeotermal, rüzgâr ve güneş ise 21. yüzyıl itibari ile önem kazanmaya başlamıştır.

Çizelge 1.2. Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre gelişimi [9]

Birim: MW

	Termik	Hidrolik	Jeotermal	Rüzgar	Güneş	Toplam
2010	32 278,5	15 831,2	94,2	1 320,2	0,0	49 524,1
%	65,18	31,97	0,19	2,67	-	100,00
2020	47 793,7	30 983,9	1 613,2	8 832,4	6 667,4	95 890,6
%	49,84	32,31	1,68	9,21	6,95	100,00

Fotovoltaik sistem maliyetlerinin azalması ve bir takım devlet teşviklerinin yürürlüğe girmesi sayesinde fotovoltaik sistem çalışmaları ülkemizde büyük hız kazanmış ve güneş enerjisi, elektrik enerjisi üretiminde pay sahibi haline gelmiştir. TEİAŞ verilerine göre ülkemizde ilk güneş enerji santrallerinin 2014 yılında devreye alınmaya başlandığı görülmektedir [8]. Devreye alınmaya başlandığı günden bu yana hızla sayıları artan güneş enerji santralleri 2020 yılı itibari ile toplam 6 667,4 MW kurulu güce ulaşmış ve ülke toplam kurulu gücümüzün % 6,95'lik kısmını oluşturmuştur. Ülkemizde 2020 yılında işletmeye alınan toplam 5 597,4 MW kurulu gücün 672,2 MW kısmını güneş enerjisi santralleri oluşturmaktadır. Bu artışın yanı sıra hiçbir güneş enerjisi santrali işletmeden çıkartılmamıştır [10]. Bu verilere bakıldığında; 2020 yılında ülkemizde kurulan güneş enerjisi santrallerinin, kurulan tüm enerji santrallerinin % 12 kısmını oluşturduğu görülmektedir. Bu oran güneş enerjisi santrallerinin kurulmaya başlandığı 2014 yılından beri ulaşılmış en yüksek oran olmak ile birlikte Türkiye'de güneş enerjisine olan ilginin her geçen yıl arttığının ve artmaya devam edeceğinin sinyallerini vermektedir. Günümüzde yarışmaları devam eden YEKA projeleri, kurulumları devam eden lisanssız elektrik üretim santralleri ve başlanan fotovoltaik panel üretimi bu varsayımı desteklemektedir.

Günümüzde fotovoltaik sistemler, ekipman maliyetlerinin düşmesi ve getirilen yasal düzenlemeler ile birlikte artık sadece enerji üretim amaçlı tesisler olarak görülmemekte, özellikle güneş enerjisi potansiyelinin yüksek olduğu bölgelerdeki geniş çatı alanı olan işletmeler için enerji verimliliği uygulamaları haline gelmektedir. Nüfus artışı sebebi ile elektrik tüketiminin artması iletim ve dağıtım şebekelerinde aşırı yüklenmelere, ek bakım maliyetlerine ve elektrik kesintilerine sebebiyet verebilmektedir. Üretim yerinde tüketim metodu yaygınlaştırılarak, iletim ve dağıtım şebekelerindeki bu artıştan kaynaklanabilecek ek maliyetlerin önüne geçebileceği düşünülmektedir.

Çizelge 1.3. 2020 yılında işletmeye giren/çıkan üretim tesisleri [10]

	KURULUŞ ADI	KURULU GÜÇ (MW)	ÜRETİM KAPASİTESİ (GWh)	
			Ortalama	Güvenilir
İŞLETMEYE ALINAN	TERMİK TOPLAM	1 068,8	7 481,7	7 481,7
	SERBEST ÜRETİM ŞİRKETLERİ	366,8	2 567,3	2 567,3
	EÜAŞ	620,0	4 340,0	4 340,0
	LİSANSSIZ	82,1	574,4	574,4
	RÜZGAR TOPLAM	1 252,3	4 383,2	1 878,5
	SERBEST ÜRETİM ŞİRKETLERİ	1 242,1	4 347,5	1 863,2
	EÜAŞ	10,2	35,7	15,3
	JEOTERMAL TOPLAM	121,5	947,9	947,9
	SERBEST ÜRETİM ŞİRKETLERİ	121,5	947,9	947,9
	HİDROLİK TOPLAM	2 482,5	8 688,7	6 206,2
	SERBEST ÜRETİM ŞİRKETLERİ	1 273,9	4 458,6	3 184,7
	EÜAŞ	1 208,6	4 230,1	3 021,5
	GÜNEŞ TOPLAM	672,2	1 075,6	537,8
	SERBEST ÜRETİM ŞİRKETLERİ	240,1	384,2	192,1
	LİSANSSIZ	432,1	691,4	345,7
	TOPLAM	5.597,4	22 577,1	17 052,1
İŞLETMEDEN ÇIKAN	TERMİK TOPLAM	-938,1	-6 566,6	-6 566,6
	SERBEST ÜRETİM ŞİRKETLERİ	-318,1	-2 226,6	-2 226,6
	LİSANSSIZ	0,0	0,0	0,0
	YİD	-620,0	-4 340,0	-4 340,0
	RÜZGAR TOPLAM	-11,1	-38,9	-16,7
	SERBEST ÜRETİM ŞİRKETLERİ	-0,9	-3,2	-1,4
	YİD	-10,2	-35,7	-15,3
	HİDROLİK TOPLAM	-1,6	-5,5	-4,0
	EÜAŞ	-1,6	-5,5	-4,0
	JEOTERMAL TOPLAM	-23,0	-179,6	-179,6
	SERBEST ÜRETİM ŞİRKETLERİ	-23,0	-179,6	-179,6
	TOPLAM	-973,8	-6 790,7	-6 766,9
	GENEL TOPLAM	4 623,6	15 786,4	10 285,2

Bu çalışma ile Türkiye Elektromekanik Sanayi A.Ş. Ankara yerleşkesinin fabrika binası çatılarının verimli bir şekilde kullanılması hedeflenmektedir. Yerleşkenin yıllık elektrik iç enerji ihtiyacını karşılayacak ve üretilen ihtiyaç fazlası elektriğin şebeke işletmecisine satışını yaparak gelir elde edebilecek nitelikte bir çatı güneş enerjisi santralinin tasarımı, projelendirilmesi, performans analizi ve finansal değerlendirilmesi yapılması amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu çalışmada, fotovoltaik sistemlerin kurulumları, tasarım süreçleri, mühendislik hesaplamaları, verimlerini etkileyen faktörler üzerine bir literatür taraması yapılmış ve konu ile ilgili yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

Ismael A. I., yaptığı çalışmada güneş pillerinin yapısı, sınıflandırılması, N-P yapıları hakkında detaylı bilgi vermiştir. Elektrik enerjisine erişimde sorun yaşayan bölgeler başta olmak üzere şebeke bağlantısı olmayan konutların kullanabileceği off-grid, depolamalı bir güneş enerjisi uygulamasını analiz etmiş, maliyet analizini yapmış ve bu uygulamaların geleceği adına yorumlarda bulunmuştur [11].

Alkan S., çalışmasında doğu-batı yönelimli bir güneş enerjisi santralinin tasarım, simülasyon ve uygulama süreçlerini anlatmıştır. Çalışmasında özellikle birim alandan maksimum seviyede verim elde etmek üzerine yoğunlaşmıştır. Birden farklı simülasyon programlarının verilerini kullanarak doğu-batı yönelimli sistemlerin avantaj ve dezavantajlarını ön plana çıkarmıştır. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Hidayet Türkoğlu Spor Kompleksi üzerinde bir fizibilite çalışması yapılmıştır. Gerçekleştirilen sisteme ait toplam maliyet ve amortisman süresi hesaplanmıştır [1].

Tekkale G., yaptığı çalışmada Türkiye'nin farklı yerlerinde yapılacak arazi tipi lisanssız güneş enerjisi santrali yatırımlarının teknik ve finansal analizini yapmıştır. Üretime devam eden üç güneş enerjisi santralinin tasarımları PVsyst çıktıları ile kıyaslanarak program verilerinin doğruluğu test edilmiştir. Sekiz il arasında yapılan karşılaştırma sonucunda Şanlıurfa ili inceleme içindeki en verimli bölge olarak tespit edilmiş ve bölgede yapılacak yatırım üzerine finans kuruluşlarından alınabilecek kredi imkanları değerlendirilmiştir. Maliyet analizinde enerji birim maliyeti, amortisman süresi, iç verim oranı ve net bugünkü değer hesapları kullanılmıştır. Sonuç kısmında da yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve teşvikler hakkında önerilerde bulunulmuştur [7].

Akar A., yaptığı çalışmada Ankara ili Haymana ilçesindeki 1 150 kWp kurulu güce sahip bir güneş enerjisi üretim santralinin ilk yatırım maliyetini, geri dönüş süresini, sistem performansını ve performansa etki eden etkenleri incelemiştir. Santralde kullanılan güneş

panelinin Matlab Simulink modeli oluşturularak farklı ışınımlar altında akım, gerilim ve güç değerlerinde yaşanan değişimler gözlemlenmiştir. Sistemin kurulacağı bölge ve içereceği ekipmanlarının seçim kriterleri detaylı şekilde analiz edilmiştir. Mali analizlerde 2014 Kasım ayından itibaren sistemin bir yıllık gerçek elektrik üretim verileri kullanılmıştır [12].

Sağlam E., çalışmasında fotovoltaik sistemlerin kurulum aşamalarını inceleme altına almıştır. Özellikle güneş enerji santrallerinin altyapılarının kurulması hakkında detaylı bilgiler sunmaktadır. Kabul süreçleri ve mahsuplaşmalar hakkında bilgiler verilmiştir. Adana, Osmaniye, Niğde, Mersin ve Konya illerinde kurulmuş güneş enerjisi üretim santrallerinin gerçek üretim verileri simülasyon verileri ile kıyaslanmış, simülasyon programının doğruluk oranları incelenmiştir [13].

Özek E., yaptığı çalışmada Güneş enerjisi sistemlerinin peyzaj mimarisi uygulamalarında değerlendirilmesine yönelik bir yaklaşımı geliştirmeyi amaçlamıştır. Peyzaj mimarlığında fotovoltaik sistemlerin kullanımına dair bilgiler verilmiştir. Güneş enerjisi ile çalışan aydınlatma sistemlerinin uygulama teknikleri değerlendirilmiştir. Söz konusu dış mekan uygulamalarının Dünya'daki ve Türkiye'deki örnekleri verilmiştir. Yalova-Termal Yolu üzerinde bulunan, koruma altındaki çınar ağaçlarının aydınlatmasında fotovoltaik sistemlerin kullanılabilirliği incelenmiş ve kullanılabilecek yeşil enerjili tasarımlar için önerilerde bulunulmuştur [14].

Karamanav, M., güneş enerjisi ve pilleri hakkında yer açıdan detaylı bir çalışma ortaya koymuştur. Güneş pillerinin tarihsel gelişimi, maddesel yapısı, çalışma prensibi, çeşitleri, kullanım alanları ve çalışmasını etkileyen çevresel faktörler üzerinde durulmuştur. Foto açısal etkiyi gözlemleyen deneysel bir çalışma yapılmıştır. Yapılan bu deneysel çalışma sonucunda ışık açısına bağlı olarak güneş pilinin akım ve gerilimindeki değişimlerin grafikleri hazırlanmıştır. Yenilenebilir enerjinin kullanımı ve gelecek için alınan önlemler hakkında genel bir değerlendirme yapılmıştır [15].

Sayın S., yenilenebilir enerjinin ülkemiz inşaat sektöründe kullanımının önemi ve yapılarda güneş enerjisinden yararlanma olanakları üzerine bir çalışma yapmıştır. Mimari yapıların tükettikleri enerjiye ve çevrenin kirlenmesine olan etkilerine değinilmiştir. Yapıların kendi enerjisini üretebilen birer sisteme dönüşmeleri adına fotovoltaik sistemler başta olmak üzere yenilenebilir enerji üretim sistemlerinin kullanımını incelemektedir. Yapılarda güneş

enerjisinden pasif ve aktif şekilde yararlanma yolları detaylı olarak incelenmekte ve uygulama yolları örnek çizim ve fotoğraflarla açıklanmaktadır [16].

Duran F., çalışmasında fotovoltaik/termal (PV/T) bir sistem elde etmeyi amaçlamıştır. Yapılan deneysel çalışmada, fotovoltaik panelin arka yüzeyine yerleştirilen borular içerisinden geçirilen su yardımıyla panel yüzeyinde soğutma sağlanmaktadır. Paneldeki ısıyı alarak sıcaklığı artan su, bir depo içerisinde dolaştırılarak bünyesindeki ısıyı depodaki suya aktarmaktadır. Bu sayede güneş enerjisinden elektrik üretimi esnasında panel sıcaklığının artması sonucu azalan elektriksel verim, panelin su ile soğutulmasıyla artırılmaktadır. Soğutma işlemiyle sistemin veriminde ne kadar miktarda bir artış elde edilebildiğinin tespit edilebilmesi ve her iki sistemin karşılaştırılabilmesi için aynı özelliklere sahip soğutma yapılmayan bir fotovoltaik (PV) panel kullanılarak eş zamanlı deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre sistemin soğutulmasıyla elektrik üretiminde yaklaşık % 35'lik güç artışı ve % 7'lik bir verim artışı elde edilmiştir [17].

Gündüz M. S., çalışmasında Kütahya ili, Simav ilçesindeki toplam 2 376 kWp kurulu güce sahip Günser ve Simen güneş enerjisi üretim santrallerinin teknik ve ekonomik analizini yapmıştır. Santrallerin üretim verilerini simüle etmek için PVsyst V 6.6.8 Demo yazılımı kullanılmıştır. Daha sonra simülasyon verileri gerçek üretim verileri ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak Pvsyst simülasyon verilerinin doğruluk oranı % 89,42 olarak bulunmuştur [18].

Girgin M. H., yaptığı çalışma kapsamında Karaman ilinde kurulması planlanan 5 MW gücünde 36 farklı fotovoltaik sistemin teknik ve ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Dört farklı meteorolojik kaynak verisinden yararlanılarak altı panel çeşidi, iki inverter çeşidi ve üç farklı altyapı için enerji üretim verileri incelenmiştir. 36 farklı sistemin her biri için YEK yasa tasarısına göre ekonomik analizler yapılmıştır. Ekonomik analizlerde geri ödeme süresi ve iç karlılık oranı yöntemleri kullanılmış ve en uygun sistem seçilmiştir [19].

Koçak M. E., çalışmasında İstanbul ili, Büyükçekmece ilçesi mevkiinde kurulması planlanan bir güneş enerjisi santralinin tasarımını yapmıştır. Dört farklı güneş paneli ve iki farklı evirici modeli ile yapılan sekiz farklı tasarım değerlendirilmiştir. Tasarım ve simülasyon için PV*SOL programı, meteorolojik veriler için Meteonorm verileri kullanılmıştır. İç karlılık oranı ve geri ödeme süresi hesap yöntemleri kullanılarak en uygun sistem belirlenmiştir [20].

Öncin F., yaptığı tez kapsamında çatı tipi güneş enerji santralleri konusundaki belirsizlikleri aydınlatmaya, diğer ülkelerde çatı uygulamalarının nasıl yapıldığı, kullanılan iş güvenliği tedbirlerinin mevzuatlara nasıl dâhil edildiği ve bu tedbirlerin nasıl uygulandığını örneklerle açıklanmaya çalışmıştır. Ülkemizdeki mevcut yasal mevzuatlarda 10 kW altı olarak geçen, ev tipi çatı güneş enerji santralleri kurulumları incelenmiştir. Doğru projelendirme, ekipman seçimi ve kurulumun nasıl yapılması gerektiği ayrıntılı olarak incelenmiştir. Güneş enerjisi santrallerinde olması gereken uyarı levhaları ve etiketlemeler görseller ile açıklanmıştır [21].

Atalay Ayran Z., çalışmasında Kütahya ili, İnköy mahallesi mevkiinde, Şehzade Park içerisinde yer alan 336 kWp güce sahip güneş enerji santralinin tasarımını ve bu sistemin ekonomik analizini anlatmıştır. Şehzade Park GES tasarımı için PVsyst programı kullanılmıştır. Programda elde edilen simülasyon verileri ile bir yıllık gerçek üretim verileri karşılaştırılmıştır. Kütahya ilinde yapılması planlanan 500 kWe güce sahip Evliya Çelebi GES için PVsyst V6.78 programı ile bir tasarım yapılmış ve yıllık üretim verileri analiz edilmiştir [22].

3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

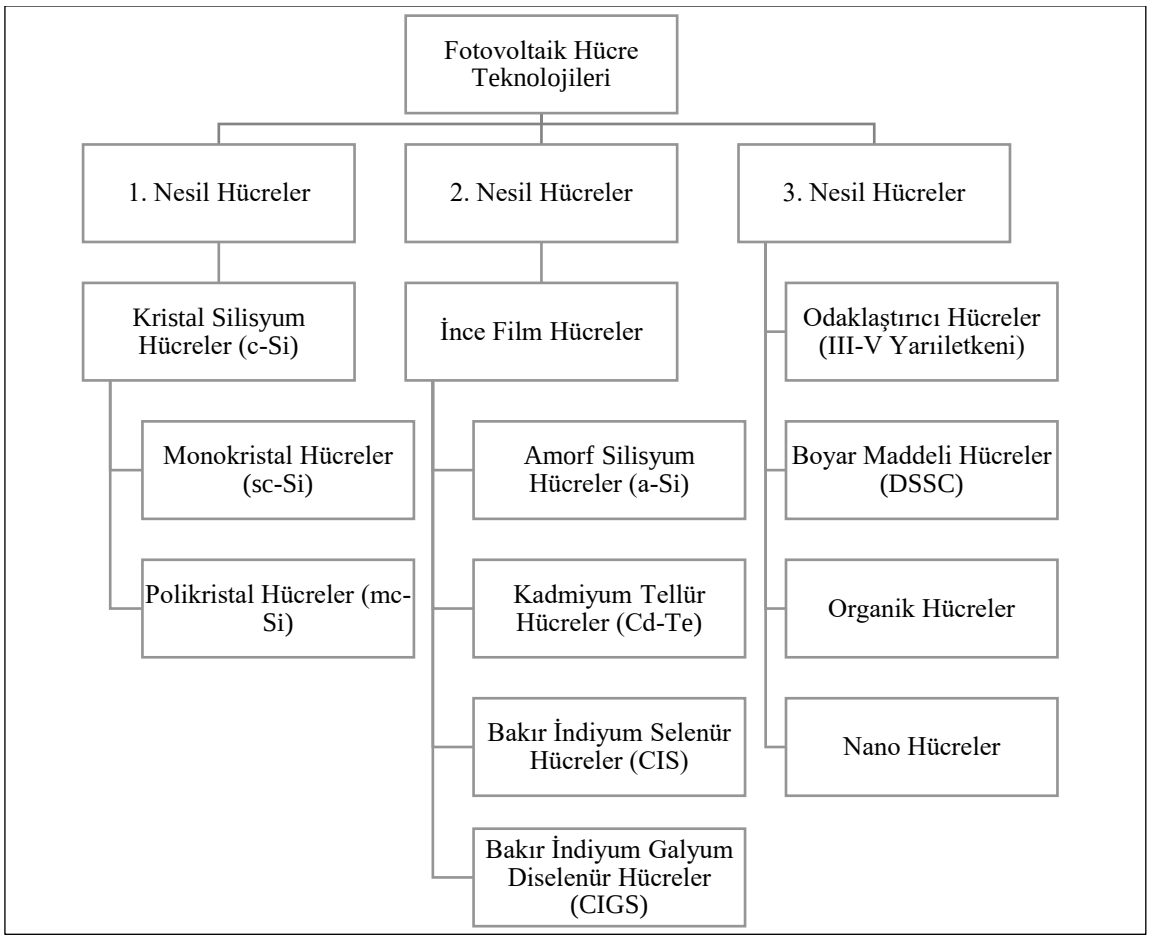
Fotovoltaik ismi Yunanca'da ışık anlamına gelen 'Phos' ile pili icat eden ve elektrik gerilim birimi Volt'a adını veren İtalyan fizikçi Alessandro Volta'nın 'Voltaic' kelimelerinin bir araya gelmesinden meydana gelmiştir. Konu ile ilgili ilk çalışma 1839 yılında 19 yaşındaki fizikçi Alexandre Edmond Becquerel'in, iki metal elektrotunun iletken bir sıvı içerisindeki elektrik iletiminin ışığa maruz kaldığında daha fazla arttığını keşfetmesidir. Bu keşif fotovoltaik sistemler için başlangıç noktası olmuştur [13]. Yıllar içerisinde William Grylls, Richard Evans Day ve Charles Fritts gibi bilim insanlarının çalışmaları ile gelişmeye devam eden fotovoltaik teknolojisi henüz önemli bir kaynak olmaya hazır değildir. 1905 yılında Albert Einstein 'photoelectric effect' adında, fotovoltaik etkisini detaylı bir şekilde ifade ettiği bir makale yayınlamıştır. Bu makale ile 1921 yılında Nobel ödülü almaya hak kazanmıştır. 1954 yılında Daryl Chapin, Calvin Fuller ve Gerald Pearson Bell Telefon Laboratuvarında ilk defa elektrikli bir ekipmanı çalıştırabilecek fotovoltaik pili icat etmişlerdir. İcat edilen bu pil % 4 verimlilik ile çalışmaktadır [13]. Kat edilen bu önemli ilerlemeye rağmen fotovoltaik teknolojisi hala yaygın kullanıma uygun değildir. 1970'li yıllarda yaşanan enerji krizinin ardından, alternatif enerji arayışının artması fotovoltaik teknolojilerin önemli bir kaynak haline gelmesinin önünü açmıştır. Günden güne sahip olduğu teknoloji ve verimlilik oranı gelişen fotovoltaik sistemlerin 21. yüzyılın başlarında kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Günümüzde özellikle elektrik enerjisi üretiminde kendilerine önemli bir yer edinmiştir.

3.1. Fotovoltaik Hücre Teknolojileri

Güneş pilleri fotovoltaik sistemlerde enerji üretilmesini sağlayan, sistemin yapı taşını oluşturan elemanlardır. Yüzeylerine gelen güneş ışığını fotovoltaik ilkeye dayalı olarak doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren maddelerdir. Başlıca hammaddesi, transistör, diyot gibi elektronik malzemelerin yapımında kullanılan yarıiletkenlerdir. Yapısında n-tipi ve p-tipi olarak adlandırılan iki yarıiletken katman bulunur. Bu katmanlar eriyik haldeki yarıiletken maddelerin içerlerine farklı tipte atomların kontrollü bir şekilde eklenmesiyle oluşturulur. Oluşturulan katmanın n-tipi veya p-tipi olması eklenen atomun özelliklerine göre değişir. N-tipi katmanda elektronlar çoğunluktadır, p-tipi katmanda elektron boşlukları çoğunluktadır [15]. Güneşten gelen fotonlar n-tipi katmanın üzerine çarptığında, n-tipi

katmandan p-tipi katmana elektron akışı olur. Bu akışın yük üzerine aktarılması ile doğru akım elde edilir [14, 23]. Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen güneş pillerinin alanları genellikle 100 cm^2 civarında, kalınlıkları ise 0,2-0,4 mm arasındadır. Güneş pillerinin bildiğimiz pillerden en büyük farkı daha uzun ömürlü olmalarıdır. Bir güneş pili yaklaşık 20-25 yıl ömre sahiptir [11].

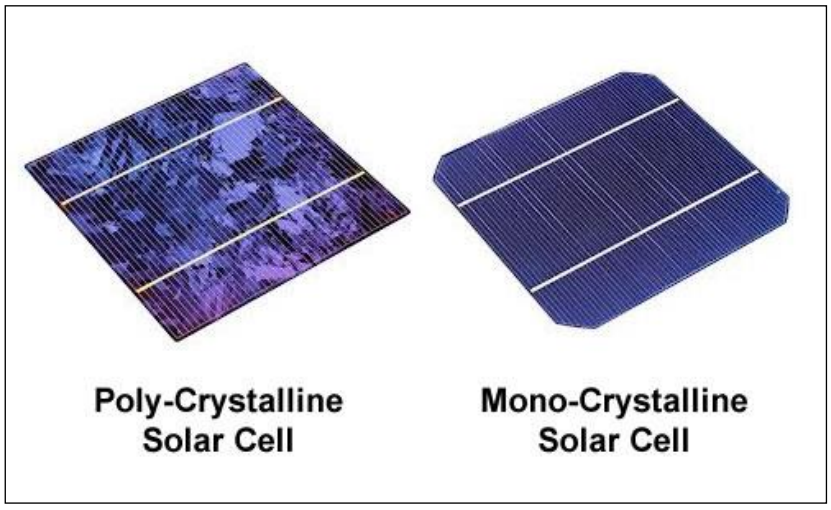
Fotovoltaik pillerin sahip oldukları özellikler yapıldıkları maddeye göre farklılık göstermektedir. Üretimi için en kullanışlı maddeler kristal silisyum, galyum arsenür (GaAs) ve kadmiyum tellür (CdTe) malzemesidir. Yapımında kullanılan yarı iletken malzemenin türü haricinde, hücrenin yüzeyine gelen güneş ışığından en yüksek verimi almak ve birim alandan azami elektrik enerjisi üretmek adına bugüne dek farklı hücre mimarileri (dizayn) geliştirilmiş olup, bu gelişim her geçen gün devam etmektedir. Fotovoltaik pillerin nesillerine ve yapılarına göre sınıflandırması Şekil 3.1'de gösterilmiştir [24].



Şekil 3.1. Fotovoltaik pillerin yapıldıkları malzemelere göre sınıflandırılması

3.1.1. 1. Nesil – kristal silisyum hücreler (c-Si)

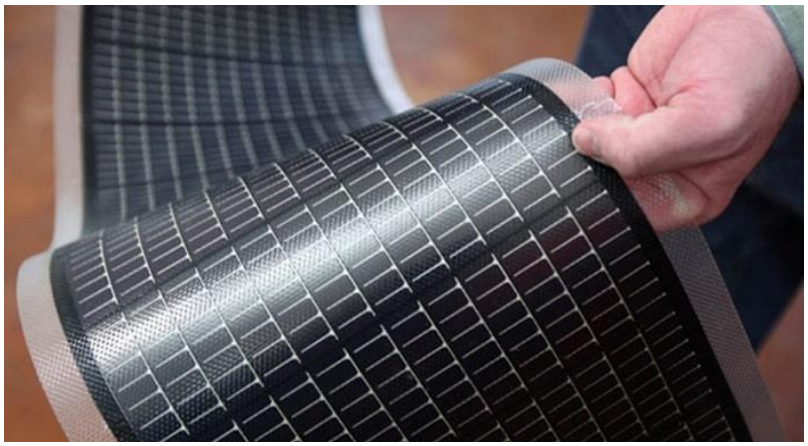
Hammaddeleri, periyodik tablonun 14. elementi olan silisyumdur. Gelişmiş üretim teknolojisi ve ekonomik avantajları sebebiyle en çok tercih edilen fotovoltaik hücre çeşididir. Üretim sürecindeki döküm halinin saflık derecesine göre monokristal ve polikristal olarak ikiye ayrılır. Üretildiği malzemenin saflık derecesi verim değerleri üzerindeki en büyük belirleyici etkendir. Monokristal hücrelerin saflık derecesi polikristal hücrelerden daha yüksek olduğu için verim değerleri de daha yüksektir. Mevcut monokristal hücreler ortalama % 21, polikristal hücreler ortalama % 16 verime sahiptir. Monokristal hücreler tek renkli homojen bir yapıya sahipken, polikristal hücreler boşluklu kristal bir yapıdadır. Bu özellikleriyle görsel olarak birbirlerinden ayırt edilebilirler [25, 15].



Resim 3.1. Monokristal ve polikristal hücre örneği [26]

3.1.2. 2. Nesil – ince film hücreler

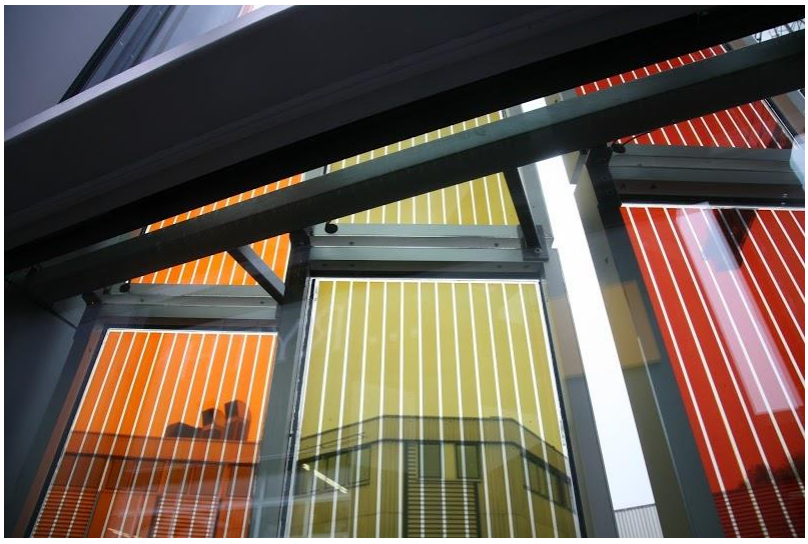
İnce film hücreler, yarıiletken malzemelerin geniş yüzeyler üzerine kaplanmasıyla oluşmaktadır. Amorf silisyum (a-Si), kadmiyum tellür (CdTe), bakır indiyum selenüe (CIS) ve bakır indiyum galyum diselenür (CIGS) kullanılarak üretilen çeşitleri bulunmaktadır. Verimlilikleri % 18'e kadar varan çeşitleri olmasına rağmen üretim performanslarını uzun süre koruyamamaktadırlar. Verimlilik ve maliyet açısından diğer teknolojilerden geri kalmaktadırlar. Ancak çeşitli iklim koşullarında yüksek ısı toleransına sahip olmaları, gölgelenmeye maruz kaldıklarında oluşan güç kayıplarını gölge alanında kısıtlı tutabilmeleri onları bazı kullanım alanlarında öne çıkarmaktadır [12, 16].



Resim 3.2. İnce film fotovoltaik panel örneği [27]

3.1.3. 3. Nesil hücreler

Son yıllarda incelenmeye başlanmış laboratuvar ortamında ileri teknoloji prosesler kullanılarak üretilen Fotovoltaik hücre neslidir. Bu nesil içerisinde en öne çıkan hücre tipi 1970'li yıllarda araştırma sürecine başlanan Galyum arsenit (GaAs) hücrelerdir. Galyum arsenit (GaAs) malzemesi ve diğer yarıiletken maddeler birlikte kullanılarak üretilen GaAs hücrelerinde % 30 verim elde edilmektedir [28, 17]. Maliyetleri çok yüksek olan bu hücreler sadece uzay projelerinde kullanılmaktadır. Boyar maddeli hücreler (DSSC), organik yapılı hücreler, nano yapılı hücreler diğer 3. nesil hücreleri arasındadır. Henüz araştırma ve geliştirme aşamasında oldukları için sektörel uygulama alanları yok denecek kadar azdır [12, 28, 16].



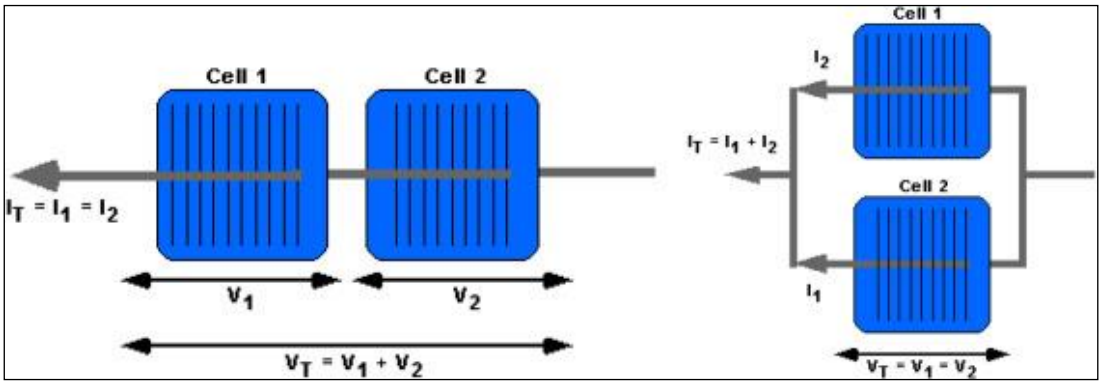
Resim 3.3. Boyar maddeli fotovoltaik panel örneği [29]

3.2. Fotovoltaik Sistem Bileşenleri

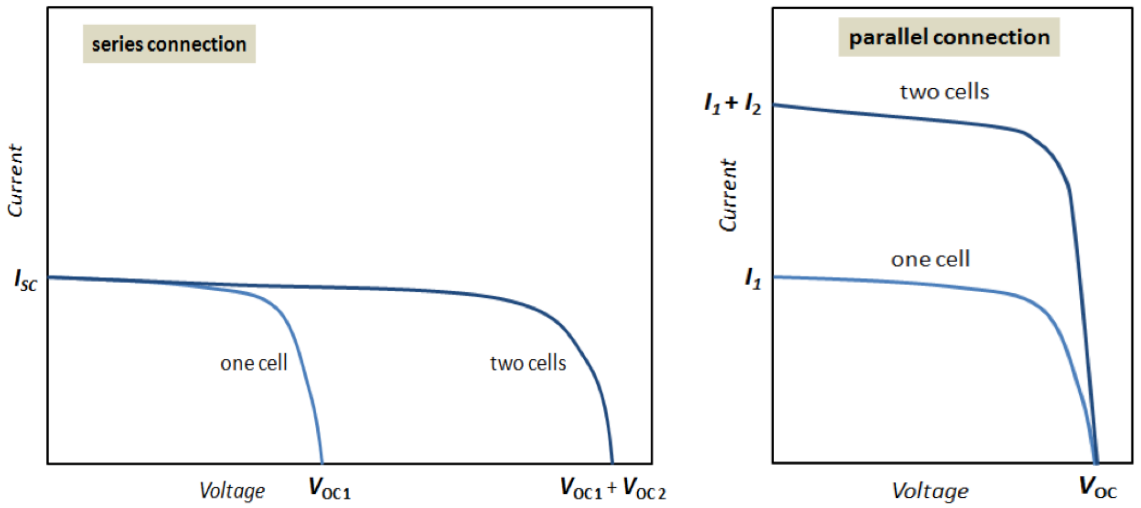
Elektrik enerjisini cihazların tüketebileceği şekilde elde edebilmek için fotovoltaik hücreler veya paneller tek başına yeterli değillerdir. Üretilen elektriğin kullanılabilmek için uygun forma dönüştürülmesi, gerilim seviyesinin ve frekans değerinin standart çalışma koşullarına ayarlanması ve minimum güç kaybı ile taşınması gerekmektedir. Bu görevleri yerine getiren ekipmanlarda fotovoltaik sistemin bir parçasıdır. Bir fotovoltaik sistem tasarımı yapılırken mühendislik açısından dikkatle değerlendirilmeleri ve ihtiyaca uygun seçilmeleri gerekmektedir.

3.2.1. Fotovoltaik panel

Güneşten gelen enerjiyi DC elektrik enerjisine dönüştürmeye yarayan güneş pilleri, güç çıkış değerlerinin çok düşük olmaları sebebi ile tek başlarına kullanılmaya uygun değillerdir. Elektrik devre teorisine göre; birden fazla güneş pilinin birbirine seri olarak bağlanması devre çıkışındaki gerilimi artırmak, birden fazla güneş pilinin birbirine paralel olarak bağlanması ise devre çıkışındaki akım şiddetini artırmak için kullanılır. Bu nedenle, güneş pilleri daha yüksek güç çıkışı elde etmek amacı ile birbirlerine seri ve paralel olarak bağlanırlar.



Şekil 3.2. Fotovoltaik pillerin birbirleri ile seri veya paralel bağlantısı [30]



Şekil 3.3. Fotovoltaik pillerin a) seri bağlantıda akım gerilim değerlerindeki değişim grafiği b) paralel bağlantıda akım gerilim değerlerindeki değişim grafiği [31]

Güneş pillerinin birbirine bağlanması ile elde edilen bu yapı, alüminyum çerçeve, yalıtım malzemesi, temperli cam ve bağlantı ekipmanları ile birleştirilerek güneş panellerini (fotovoltaik panelleri) oluşturur. Günümüzdeki en yaygın kullanımı 60-72 adet güneş pilinin birbirine seri bağlanması ile elde edilen yapıdır. Verimleri, standart test koşullarında 1 m^2 alanda ürettikleri güç üzerinden ölçülür. En yaygın fotovoltaik panel çeşidi olan kristal silisyum panellerinin verimi % 15-25 seviyelerindedir. Verim değeri % 40'lara varan güneş paneli teknolojileri olsa da henüz ekonomik açıdan uygulanabilir değillerdir, sadece yüksek nitelikli projelerde kullanılırlar.

3.2.2. İnverter

İnverterler girişlerine bağlanan DC elektrik enerjisini istenilen gerilim, güç ve frekans değerinde AC elektrik enerjisine çeviren elektriksel güç dönüştürme elemanları olarak bilinir. Birçok kullanım alanı olan inverterlerin kare dalga ve tam sinüs olmak üzere iki ana çeşidi bulunmaktadır. Tam sinüs inverterler saf sinüs dalgasına çok yakın gerilim sağlayabildiği için hassas yüklerin beslenmesinde kullanılır. Kare dalga inverterler ise ısıtma, aydınlatma ve kamp ekipmanları gibi yüksek hassasiyet gerektirmeyen sistemlerde kullanılır.

Güneş enerjisinden elektrik üretimi sistemlerinde daha fazla verim ve stabil çalışma elde edilebilmesi için yüksek kalitede ve birçok özelliği bulunan tam sinüs inverterler kullanılmaktadır. Panellerin en fazla gücü ürettikleri noktayı takip eden maksimum güç noktası izleyicileri (MPPT) ile donatılırlar. Tam sinüs inverterlerin verimleri % 90'ın üzerinde, çalışma frekansları ise 50 - 60 Hz olarak değişmektedir. Fotovoltaik sistemlerde kullanılan inverterler şebeke bağlantısı bulunup bulunmamasına göre on-grid ve off-grid inverterler olarak sınıflandırılır.



Resim 3.4. Mikro inverter [32]

Off-grid inverterlerin şebekenin bulunmadığı lokasyonlarda, depolamalı sistemler ile kullanımı yaygındır. Akülerde depolanan DC gerilimi AC gerilime dönüştürmek için kullanılırlar. On-grid inverterler, fotovoltaik panellerde üretilen DC gerilimin doğrudan AC gerilime dönüştürülerek tüketildiği veya şebekeye verildiği sistemlerde kullanılır. Şebeke bağlantılı inverterler mikro, merkezi ve dizi (string) inverterler olarak üçe ayrılır.



Resim 3.5. Dizi (string) inverter [33]

Bu üç inverter çeşidi arasındaki en büyük fark boyutlarıdır. Mikro inverterler her fotovoltaik panel arkasına ayrı ayrı monte edilen inverterlerdir. Gölgelenmenin yüksek olduğu bölgelerde kullanılmak üzere tasarlanmışlardır. Panellerden birinin üzerinde oluşan gölge veya arıza sebepli kayıp diğer panellerin üretimini etkilemez. Dizi (string) inverterler ortalama 20-30 fotovoltaik panelin bağlantısının yapılabildiği inverterlerdir, ana sistemin parçalara ayrılmasına bu sayede daha modüler olmasına katkı sağlarlar. Merkezi inverterler ise bazı modellerine 1000'den fazla fotovoltaik panelin bağlanabildiği günümüzde kullanılan en büyük inverter çeşididir.



Resim 3.6. Merkezi inverter [34]

3.2.3. Bağlantı ekipmanları (kablo ve konnektör)

Güneş enerjisi elektrik üretim sistemlerinde AC kablo, DC kablo ve sinyal kabloları olmak üzere üç tip kablo kullanımı görülür. DC kablolar fotovoltaik sistem uygulamalarında kullanılmak üzere kullanılan özel kablolardır, solar kablolar olarak bilinirler. Fotovoltaik panellerin kendi aralarında seri veya paralel bağlanmasında ve fotovoltaik panel gruplarının inverter veya şarj kontrol cihazlarına bağlanmasında kullanılır. Güneş enerjisi elektrik üretim sistemlerinde kırmızı renkli solar kablo, fotovoltaik panellerden gelen pozitif (+) enerjiyi taşır. Siyah renkli kablo negatif (-) enerjiyi taşır. Yaklaşık 25 yıllık ömrü olan güneş enerjisi elektrik üretim santrallerinde açık ortam şartlarında kullanıldıkları için dış etkenlere en çok maruz kalan kablolardır. Bu sebeple oldukça dayanıklı olarak üretilen solar kabloların özellikleri şöyledir [35].

- 25 yıl kullanım ömürleri vardır.
- Çalışma gerilimleri yüksektir (AC: 1kV, DC: 1.5kV).
- Yüksek sıcaklık ve soğuğa karşı dirençlidirler (-40 °C – 90 °C).
- Yanmaya karşı dirençlidirler.
- Güneşten gelen UV ışınlarına karşı dayanıklıdırlar.
- Mekanik etkilere karşı oldukça dayanıklıdırlar.

İnverterlerde dönüştürülen AC akım sistemin geri kalanında AC kablolar aracılığıyla taşınır. Sistemdeki AC ve DC tüm kablolar gerilim düşümü hesapları ve akım taşıma kapasiteleri gözden geçirilerek seçilir. Sistemin izleme, görüntüleme ve haberleşmesine ait sinyal kabloları herhangi bir spesifik özellik gerektirmez. Endüstriyel saha şartlarına uyumlu seçilmeleri yeterlidir.



a) b)

Resim 3.7. a) Solar kablo b) MC4 konnektör

Konnektörler solar kabloların birbirleri ile veya fotovoltaik paneller ile bağlantısını sağlamak için kullanılan bağlantı ekipmanlarıdır. Akım bu bağlantı ekipmanı üzerinden kablodan kabloya aktarılır. Sistemin verimli çalışması adına en önemli bağlantı ekipmanlarından birisidir. Solar kablolarda aranan dayanıklılık şartları konnektörler için de geçerlidir. Günümüzde sık kullanılan çeşidi MC4 konnektördür.

3.2.4. Trafo (transformatör)

Trafolar, alternatif akım devrelerinde elektromanyetik indüksiyon ile devreler arasında enerji aktarımını sağlayan cihazlardır. Fotovoltaik sistemlerde gerilim yükseltici/alçaltıcı veya ölçü trafosu olarak kullanılırlar.

Fotovoltaik panellerde DC formda üretilen elektrik enerjisi inverterler aracılığıyla AC forma dönüştürülür. Ancak AC forma dönüştürülmesi standart sistemlerde kullanım için yeterli değildir, uygun gerilim seviyesine yükseltilmesi gerekmektedir. Şebeke bağlantılı sistemlerde alçak gerilimde üretilen elektriğin orta veya yüksek gerilim seviyesine yükseltilmesi güç trafoları ile yapılır. Akım ve gerilim seviyesinin yüksek olduğu yerlerde ölçüm yapılabilmesi için yüksek akım ve gerilim değerlerini ölçü aletlerinin ölçebileceği seviyelere düşüren ölçü trafoları kullanılır.

3.2.5. Şalt ekipmanları

Her elektriksel güç sisteminde olduğu gibi fotovoltaik sistemlerde de ortam ve sistem güvenliğini, kontrolünü ve denetimini sağlaması için kullanılan şalt ekipmanları bulunur.

Elektrik Sayacı

Elektrik enerjisi üreten veya tüketen devrelerde üretilen veya tüketilen enerjiyi tespit etmek için kullanılan cihazlara elektik sayacı denir. Tek yönlü ve çift yönlü çeşitleri bulunur. Şebeke bağlantılı sistemlerde iki yönlü bir enerji akışı olacağından çift yönlü sayaç kullanılması zorunludur.

Kaçak Akım Koruma Rölesi

Elektrikli cihazlardaki enerjili parçaların yalıtımlarının bozulduğu yerlerde cihaz gövdesinde ortaya çıkan akımdır. Elektrik devresinde ortaya çıkan bu kaçak akımın tespitini yapan ve açma yaparak cinsine göre devreyi veya insanı koruyan ekipmana kaçak akım koruma rölesi denir. Görevini, devreye giren ve çıkan akımın eşitliğini düzenli sürekli kontrol ederek yapar.

Termik Manyetik Şalter

Termik manyetik şalterler elektrik enerjisini açma kapama için kullanılan alçak gerilim devre kesme elemanlarıdır. Devre kesme özelliğinin yanı sıra, termik ve manyetik olarak açma yaparak kendinden sonraki ekipmanları ve iletkenleri korur. Kompakt şalter olarak da adlandırılır.

Sigorta

Elektrikli cihazların ve devrelerinin aşırı akımdan zarar görmesini engellemek için kullanılan pasif devre koruma elemanıdır. Sigortanın çalışma prensibi, içerisindeki iletkenden geçen akımın neden olduğu sıcaklığa dayalıdır.

Parafudr

Yıldırım darbelerinin veya şebekede oluşan anlık aşırı gerilim yükselmelerine karşı elektrik devrelerini koruyan koruma elemanına parafudr denir. Parafudrlar diğer koruma elemanlarından farklı olarak devreye paralel bağlanırlar. Normal çalışma şartlarında bir özellik gösterirken, yüksek gerilim ile karşılaştığında iletken görevi görerek yüksek gerilimin toprağa iletilmesini sağlar.

3.2.6. Konstrüksiyon malzemeleri

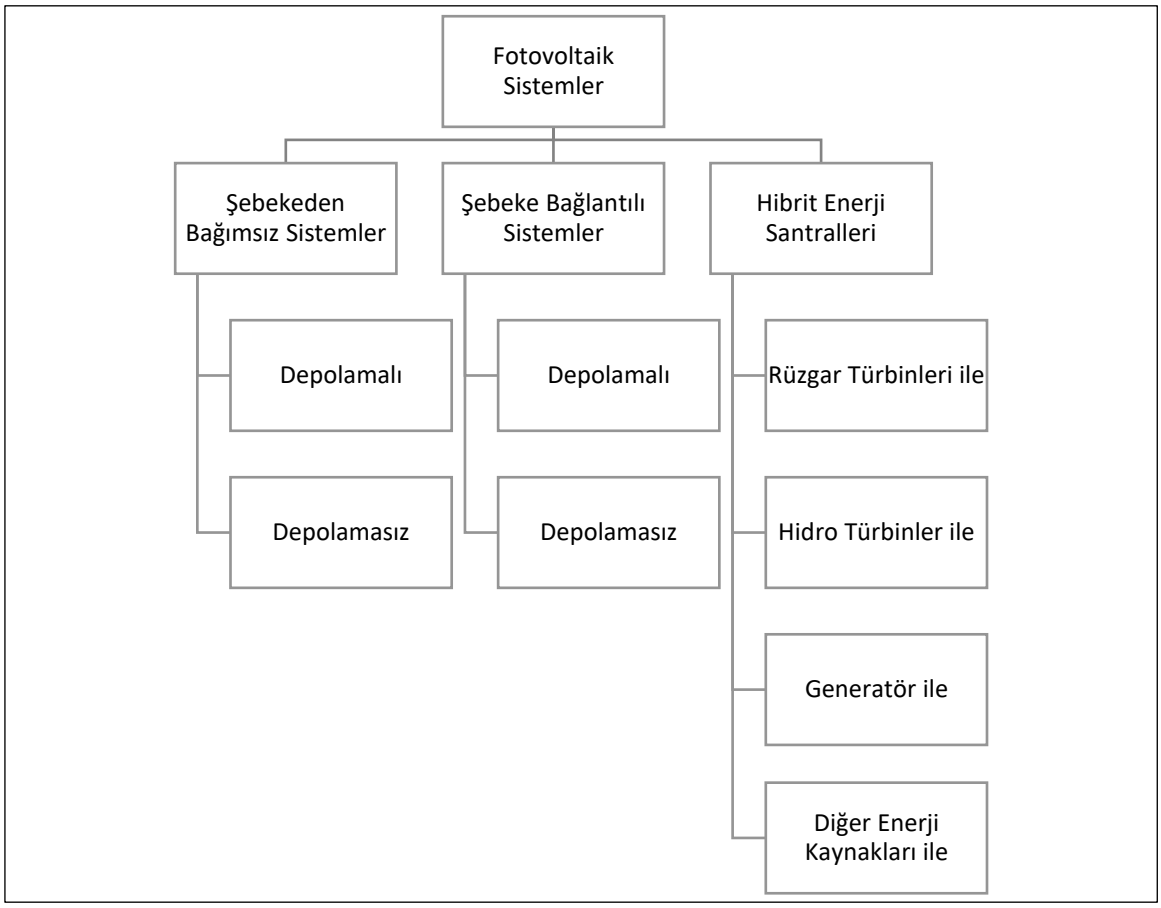
Fotovoltaik sistemler açık alanlara inşa edilen sistemler oldukları için rüzgar, kar, deprem yüklerine ve yağışlı hava koşullarına uygun olmak zorundadır. Bu sebeple dayanaklı bir altyapıya sahip olmalı ve yer ile bağlantıları sağlam yapılmalıdır. Bu altyapı çelik ve alüminyum malzemelerden üretilmiş konstrüksiyon sistemleri sağlanır. Konstrüksiyon sistemleri basitçe, üzerinde bağlantı aparatları içeren profillerden oluşur. Yer tipi güneş enerji santrallerinde konstrüksiyonların yer ile bağlantısı beton dökülerek veya kazık çakılarak yapılırken, çatı tipi santrallerde raylı, contalı sistemler ile yapılır.

3.2.7. Fotovoltaik sistem tasarım ve analiz programları

Fotovoltaik sistem verimini artırmak ve performansını daha uzun süre koruyabilecek hale getirmek oldukça önemlidir. Sistem verimlerinin artması için kullanılan malzemelerin özellikleri ve teknolojileri büyük önem arz etmektedir. İstenilen üretimi sağlamak adına kullanılan malzemenin yanı sıra iyi bir mühendislik çalışması yapılması gerekmektedir. Mühendislik çalışmasında sistem kurulumuna dair önce tüm verilerin iyi analiz edilmesi önemlidir. Çok miktarda verinin insan eliyle analiz edilmesi hem uzun hem de hata ihtimali yüksek bir süreçtir. Bu sebeple tasarımcıların ve araştırmacıların kullanabilmesi adına tasarım programları geliştirilmiştir. Tasarım programları panel özellikleri, inverter özellikleri, dizi hesapları, panel dağılımı, panel açıları, gölgelenme hesapları, meteorolojik veriler, güneş ışınımı değerleri gibi birçok değişkeni kullanarak üretim ve performans öngörüsü alınmasını sağlar. En yaygın kullanılan tasarım programlarına PVsyst, PV*SOL ve Helios'u örnek gösterebiliriz.

3.3. Fotovoltaik Sistem Çeşitleri

Fotovoltaik sistemler genellikle içerdikleri bileşenlere, tüketicilere veya diğer enerji kaynaklarına bağlantılarına, fonksiyonel kullanımlarına göre sınıflandırılır. Ana sınıflandırma şekli şebekeye bağlı olup olmamalarına göre yapılır. Depolama sistemi içerip içermemelerine göre de kendi içlerinde sınıflandırılırlar. Ayrıca birden fazla elektrik üretim metodu kullanılarak tasarlanan bir hibrit enerji santralinin bir parçası olarak da dizayn edilebilirler [36].

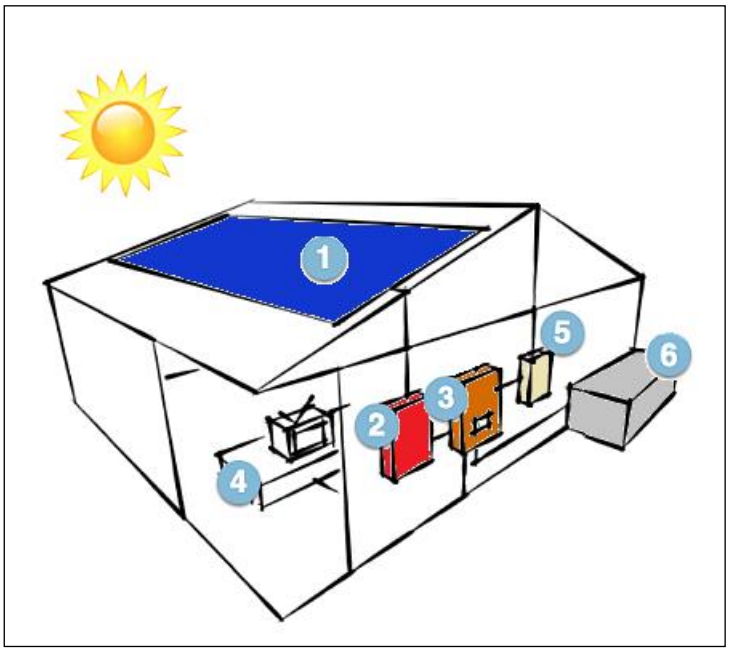


Şekil 3.4**.** Fotovotaik sistemlerin sınıflandırılması

3.3.1. Şebekeden bağımsız sistemler (off-grid sistemler)

Elektrik şebekesi üzerinden elektrik tedarikinin mümkün olmadığı yerlerde, hiçbir dış bağlantı olmadan kurulan sistemler şebekeden bağımsız sistemler olarak adlandırılır. Gün içerisinde Güneş'ten gelen ışınların yoğunluğu değişken olduğu için şebekeden bağımsız sistemler düzenli şekilde elektrik üretimi yapamazlar. Bu şekilde kullanılmaları çoğu tüketici

için uygun değildir. Bu sebeple şebekeden bağımsız sistemlerin büyük kısmı depolama sistemi içerir. Depolama sistemi, fotovoltaik panellerde üretilen elektriği anlık olarak tüketilemediği durumlarda şarj kontrol ünitesi aracılığıyla içerisindeki akümülatörler içerisinde muhafaza eder. Bu sayede fotovoltaik panellerde elektrik üretiminin olmadığı güneşsiz saatlerde dahi sisteme bağlı cihazlara enerji sağlarlar. Öyle ki, şebekeden bağımsız sistemler bulundukları ortam şartları iyi analiz edildikleri ve doğru tasarlandıkları takdirde ömürlerini doldurana kadar kesintisiz bir güç kaynağı olarak kullanılabilirler. Günümüzde elektrik depolama teknolojilerinin yeterli ilerlemeyi kat etmemiş olmaları sebebiyle maliyetleri çok yüksektir. Bu yüzden şebekeden bağımsız sistemler büyük çaplı uygulamalarda tercih edilmezler. Konut tipi iç tüketimler, kamp ekipmanları, araçlar ve uzay araştırmaları başlıca kullanım alanlarıdır.



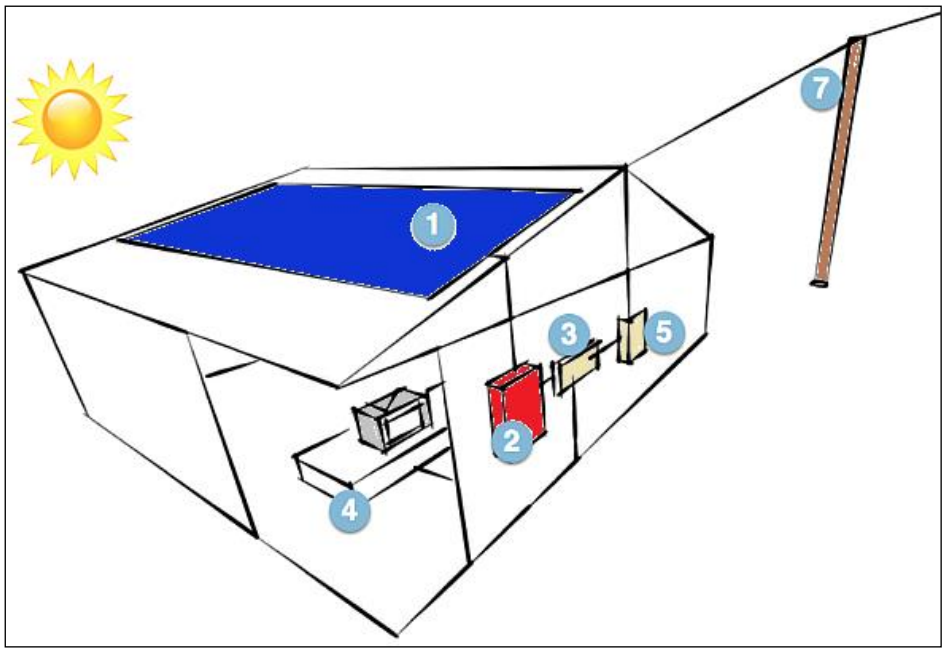
Şekil 3.5. Tipik off-grid fotovoltaik sistem bileşenleri [37]

Tipik bir off-grid fotovoltaik sistem şu bileşenlerden oluşmaktadır.

- Fotovoltaik panel
- İnverter
- Şarj kontrol ünitesi
- Tüketici
- Bağlantı ekipmanları
- Akümülatör

3.3.2. Şebeke bağlantılı sistemler (on-grid sistemler)

Şebeke bağlantılı sistemler, panellerde üretilen DC gerilimi inverterler aracılığıyla AC gerilime dönüştürerek doğrudan tüketime veya yerel şebekeye veren fotovoltaik sistemlerdir. En belirgin özellikleri yerel elektrik şebekesine bağlı olmalarıdır. Dünya genelindeki güneş enerjisi uygulamalarının büyük kısmını şebeke bağlantılı sistemler oluşturmaktadır. Güneş enerjisi üretim santralleri ürettiği elektrik enerjisinin satışını yapabilmek üzere şebeke bağlantılı sistemler olarak inşa edilirler. Büyük endüstriyel tesislerin veya konutların iç elektrik ihtiyacını karşılamak üzere de inşa edilebilen şebeke bağlantılı sistemlerin tüketici için en büyük avantajı; elektrik üretiminin olmadığı güneşsiz zaman aralıklarında ihtiyaçlarını şebekeden karşılayabilmeleri ve bu sayede yüksek maliyetli depolama sistemlerine ihtiyaç duymamalarıdır. İç ihtiyaç için kurulan şebeke bağlantılı sistemler ülkemizdeki düzenlemeler dahilinde ihtiyaç fazlası elektrik enerjisinin yerel şebeke işletmecisine satışını gerçekleştirebilirler.



Şekil 3.6. Tipik on-grid fotovoltaik sistem bileşenleri [37]

Tipik bir şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem şu bileşenlerden oluşmaktadır:

- Fotovoltaik panel
- İnverter
- Bağlantı ekipmanları
- Tüketici
- Sayaç
- Trafo/Şebeke

3.4. Fotovoltaik Sistem Verimini Etkileyen Faktörler

Fotovoltaik sistemde seçilen bileşenlerin sadece üretim değerleri optimum sistem seçimine karar vermek için yeterli değildir. Üretim verilerinin yanı sıra, sistemin performansının ve kayıplarının da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu doğrultuda güneş enerjisi santralinin genel performansını etkileyen faktörleri aşağıda belirtilen başlıklar altında toplayabiliriz.

3.4.1. Güneşin hareketleri

Fotovoltaik paneller ne kadar uzun süre ve ne kadar dik bir açı ile Güneş ışınımına maruz kalırsa, üreteceği elektrik enerjisi o kadar artacaktır. Bu sebeple Güneşin yıl boyunca izleyeceği yol sistemin üretim verimini etkileyecektir.

3.4.2. Gölgelenme

Güneşlenme süresi doğrudan güneş ışınımına maruz kalmayla orantılıdır. Bu doğrultuda proje alanında ve çevresinde oluşabilecek gölgelenmelerden kaçınılmalıdır. Tek bir güneş panelinin gölgelenmeden etkilenmesinde dahi, dizilerdeki paneller birbirlerine seri olarak bağlantı sağladığından ötürü tüm panel dizisinin performansı düşecektir.

3.4.3. Ortam sıcaklığı

Güneş panellerinin ürettiği enerji her ne kadar güneş ışınına maruz kalma ile doğru orantılıysa da, bu bileşenlerin belirli bir çalışma sıcaklığı aralığı bulunmaktadır. Bu sebepten ötürü, belirli olan çalışma sıcaklığı aralığı dışına çıkılması durumunda sistem performansı etkilenecek ve verim düşecektir.

3.4.4. Sistem Kayıpları

Seçilen inverter ve fotovoltaik panel verimleri ile kablolarda oluşan kayıplar sistem performansını etkileyecektir. Bunun için, tasarlanan sisteme uygun inverter ve fotovoltaik paneller azami verimde seçilmelidir. Kablo mesafelerinin de kısa tutularak, gerilim düşümlerinin azaltılması tasarım esnasında hesaba katılmalıdır.

4. TEORİK ANALİZ

4.1. Sıcaklığın Fotovoltaik Panellerin Akım-Gerilim Değerleri Üzerine Etkisi

Neredeyse her elektrikli cihazda olduğu gibi fotovoltaik panellerde de sıcaklığın verime negatif bir etkisi bulunmaktadır. Fotovoltaik paneller Güneş'ten gelen ışınımı elektrik enerjisine dönüştürdüğü için doğrudan Güneş'e maruz bırakılarak yüksek verim almaya çalışılır. Ancak bu durumun sonuçlarından bir tanesi de panellerin özellikle de yaz aylarında aşırı derecede ısınmasıdır. Bu sebeple, sıcaklığın fotovoltaik paneller üzerine olan etkisi güneş enerjisi sistemi tasarım sürecinde incelenmesi gereken hususlardan bir tanesidir. Sıcaklığın artması fotovoltaik paneller üzerindeki gerilimde düşüşe, akımda ise artışa sebep olmaktadır. Sıcaklığın düşmesi durumunda ise tam tersi bir etkiye sebep olmaktadır. Sıcaklığın fotovoltaik panellerin akım ve gerilim değerlerine olan etkisini hesaplamak için kullanılan eşitlikler aşağıda gösterildiği şekildedir. Eşitliklerde kullanılan STC (standart test şartları) değerleri ve katsayılara fotovoltaik panelle ait ürün dokümanların erişilmektedir.

Sıcaklığın gerilim üzerine etkisinin hesabı;

$$V_X = V_{STC} \times [1 + \beta \times (T_X - T_{STC}) \div 100] \tag{4.1}$$

Sıcaklığın akım üzerine etkisinin hesabı;

$$I_X = I_{STC} \times [1 + \alpha \times (T_X - T_{STC}) \div 100] \tag{4.2}$$

4.2. İletken Üzerindeki Gerilim Düşümü

Üzerinden akım geçen her iletken akıma karşı bir direnç gösterir. Bu direnç iletkenin başlangıcı ve sonu arasındaki gerilimin farklı olmasına sebep olur. Bu fark gerilim düşümü olarak adlandırılır.

Tek fazlı sistemlerde gerilim düşümü hesabı;

$$\text{Gerilim düşümü (\%e)} = \frac{2 \times 100 \times \text{Kablo uzunluğu (l)} \times \text{Güç (P)}}{\text{Öziletkenlik (k)} \times \text{Kablo kesiti (S)} \times \text{Gerilim (V)}^2} \tag{4.3}$$

Üç fazlı sistemlerde gerilim düşümü hesabı;

$$\text{Gerilim düşümü (\%e)} = \frac{100 \times \text{Kablo uzunluğu (l)} \times \text{Güç (P)}}{\text{Öziletkenlik (k)} \times \text{Kablo kesiti (S)} \times \text{Gerilim (V)}^2} \tag{4.4}$$

4.3. İletken Üzerindeki Güç Kaybı

Üzerinden akım geçen iletkenler üzerinde ısınmadan kaynaklı güç kayıpları oluşur. Bu kayıp iletkenden geçen akımın karesi ve iletken direnci ile doğru orantılıdır.

Tek fazlı sistemlerde güç kaybı;

$$\text{Güç kaybı } (P_l) = \frac{2 \times I^2 \times \text{Kablo uzunluğu (l)}}{\text{Öziletkenlik (k)} \times \text{Kablo kesiti (S)}} \tag{4.5}$$

Üç fazlı sistemlerde güç kaybı;

$$\text{Güç kaybı } (P_l) = \frac{3 \times I^2 \times \text{Kablo uzunluğu (l)}}{\text{Öziletkenlik (k)} \times \text{Kablo kesiti (S)}} \tag{4.6}$$

4.4. Net Bugünkü Değer

Projenin ilerideki yıllarda elde ettiği gelir kalemlerinin belirli bir faiz oranı kullanılarak yatırımın ilk gününe indirgenmesidir. İndirgenen bu gelir ilk yatırım maliyetinden çıkartılarak yatırımın karlı olup olmadığı tespit edilir. Yatırımın karlı olması için sonucun sıfırdan büyük olması gerekmektedir. Tersi durumda yatırım kazançlı değildir [18].

$$\text{NBD} = \sum_{t=0}^{N} \frac{N_t}{(1+i)^t} \tag{4.7}$$

4.5. Geri Ödeme Süresi

Geri ödeme süresi, yatırımın gelirlerinin toplamının giderlerin toplamına eşit olduğu zamana verilen süredir. Amortisman süresi olarak da adlandırılır. Geri ödeme süresi hesaplanırken net bugünkü değer yöntemi kullanılarak indirgenen gelir ve gider rakamları kullanılabilir. Yatırımın kara geçmeye başladığı yıl baz alınarak hesaplamalar yapılır.

$$\text{GÖS} = \text{n. yıl} + \frac{\text{İYM - n. Yıla kadar edilen kar}}{\text{(n+1). Yılda edilen kar}} \tag{4.8}$$

4.6. İç Karlılık Oranı

İç karlılık oranı, yatırım analizlerinde oldukça yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bir yatırımın faydalı ömrü boyunca oluşacak tüm gelir ve gider kalemlerinin toplamlarının net bugünkü değerini birbirine eşitleyen faiz oranı olarak tanımlanır [19].

$$\sum \frac{C_t}{(1+i)^t} = \sum \frac{B_t}{(1+i)^t} \tag{4.9}$$

İç karlılık oranı olarak elde edilen yüzde oran eğer genel faiz oranından daha yüksek ise yatırım karlı olarak kabul edilir.

4.7. Levelized Cost of Energy (LCOE)

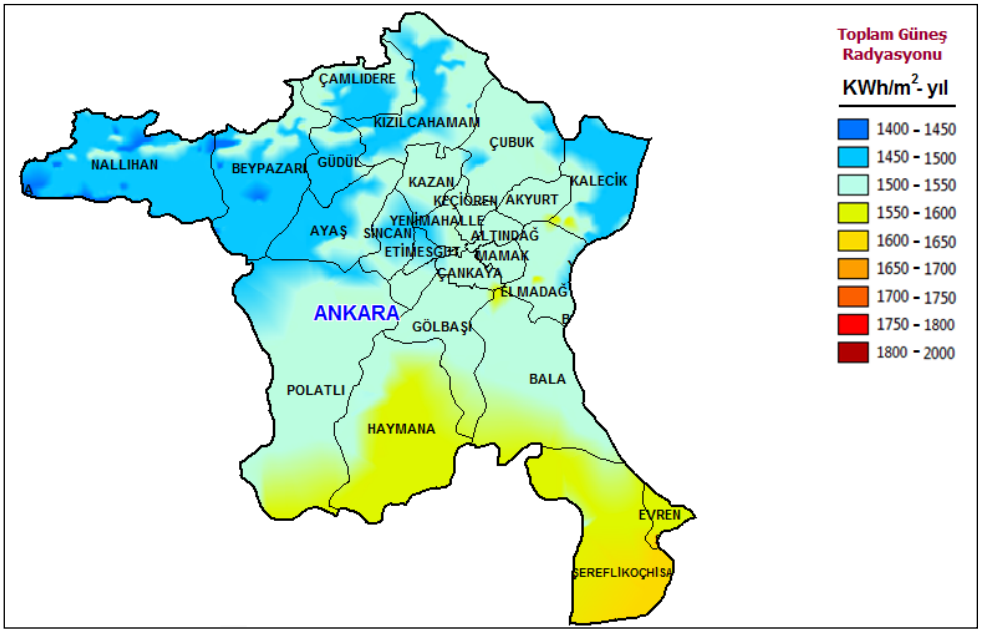
LCOE, enerji santrali yatırımlarına özgü bir ekonomik analiz yöntemidir. Açılımının Türkçe karşılığı “seviyelendirilmiş enerji maliyeti” anlamına gelmektedir. Yöntemin ana amacı yatırım yapılacak santralin üreteceği enerjinin birim maliyetini tespit etmektir. Eğer üretilecek enerjinin birim maliyeti mevcut enerji satın alım maliyetine göre daha düşük ise santral yatırımı karlı olarak kabul edilmektedir.

$$\text{LCOE} = \frac{\text{İYM} + \text{TOG}}{\text{TÜM}} = \frac{\text{İYM} + \sum_{t=0}^{N} \frac{C_t}{(1+i)^t}}{\text{TÜM}} \tag{4.10}$$

5. MATERYAL VE METOT

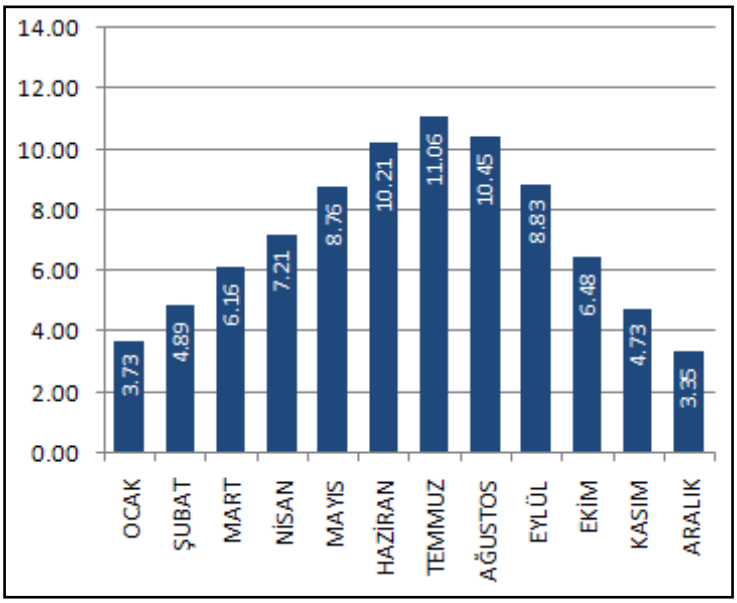
5.1. Proje Konumuna Ait Özellikler

Proje alanı 39°57'25.0"N, 32°46'42.00"E koordinatlarında, Ankara il sınırları içerisinde yer almaktadır. Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası incelendiğinde, Ankara ilindeki 1 m^2 alanın yıllık ışınım miktarı 1450-1550 kWh/m^2-yıl değerleri arasında görülmektedir [5]. Meteoroloji Genel Müdürlüğünün 1927-2020 yılları arasında yaptığı ölçümlere göre yıllık ortalama sıcaklık değeri 12 °C'dir. Görülen en yüksek sıcaklık Temmuz ayında ölçülen 41 °C, görülen en düşük sıcaklık Ocak ayında ölçülen -24,9 °C dir. Yıllık ortalama güneşlenme süresi 6,87 saattir. Güneşlenme süresinin en yüksek olduğu dönem, günlük ortalama 11,3 saat ile Temmuz ayına aittir. En düşük olduğu dönem ise günlük ortalama 2,6 saat ile Aralık ayına aittir [38]. Bölgede karasal iklim özellikleri görülür. Yazları sıcak ve kurak, kışları soğuk ve yağışlı geçer. Karasal iklim sebebiyle gündüz ile gece saatleri arasındaki sıcaklık farkı yüksektir. Yıllık toplam yağış miktarı ortalaması 393,2 mm'dir. Bölge yaklaşık 875 m rakıma sahiptir. 4. derece deprem bölgesi olan bölgede uzun zamandır yüksek şiddette deprem görülmemiştir. Proje için planlanan arazi Ankara ili, Yenimahalle ilçesi, Orman Çiftliği mahallesinde merkezi bir konumda olup ulaşım açısından her türlü imkâna sahiptir.

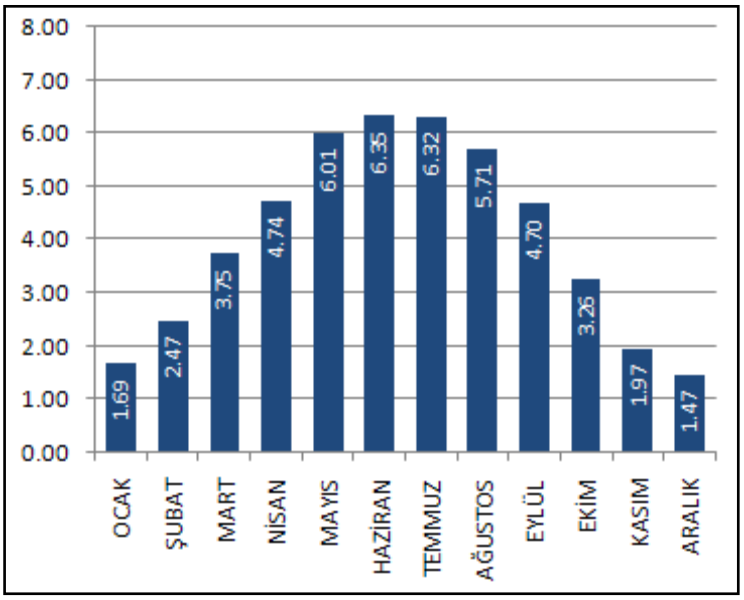


Harita 5.1. Ankara güneş enerjisi potansiyeli atlası [5]

Güneşlenme süreleri ve global radrasyon değerleri fotovoltaik sistemin üretim performansını doğrudan etkilemektedir. Aylık bazda incelendiğinde Ankara ili güneşlenme süreleri ve global radrasyon değerleri en yüksek değerlerine yaz aylarında, en düşük değerlerine kış aylarında ulaşmaktadır. Yaz aylarındaki enerji üretim miktarının ortalamanın üzerinde, kış aylarındaki enerji üretim miktarının ortalamanın altında olması beklenmektedir.



Şekil 5.1. Ankara güneşlenme süreleri (saat) [5]



Şekil 5.2. Ankara Global Radrasyon Değerleri (kWh/m^2-gün) [5]

Proje alanı Ankara ili, Yenimahalle ilçesi, Orman Çiftliği mahallesi, 13249 ada, 4 parsel lokasyonunda bulunmaktadır.



Harita 5.2. Proje lokasyonu ve parsel bilgisi

Arazi Türkiye Elektromekanik Sanayi Anonim Şirketi'ne aittir. Yerleşke Ankara ili, Yenimahalle ilçesi, Orman Çiftliği mahallesinde merkezi bir konumdadır. Arazide hem yer tipi hem de çatı tipi güneş enerjisi santrali uygulaması için uygun alanlar bulunmaktadır. Ancak merkezi bir konumda bulunan değerli bir arazi olduğu için, ekonomik açıdan yer tipi bir güneş enerjisi santrali yapımına uygun değildir. Bu sebeple ekonomik açıdan daha uygun bir seçenek olarak; arazideki mevcut binaların çatı alanları değerlendirilmiştir.

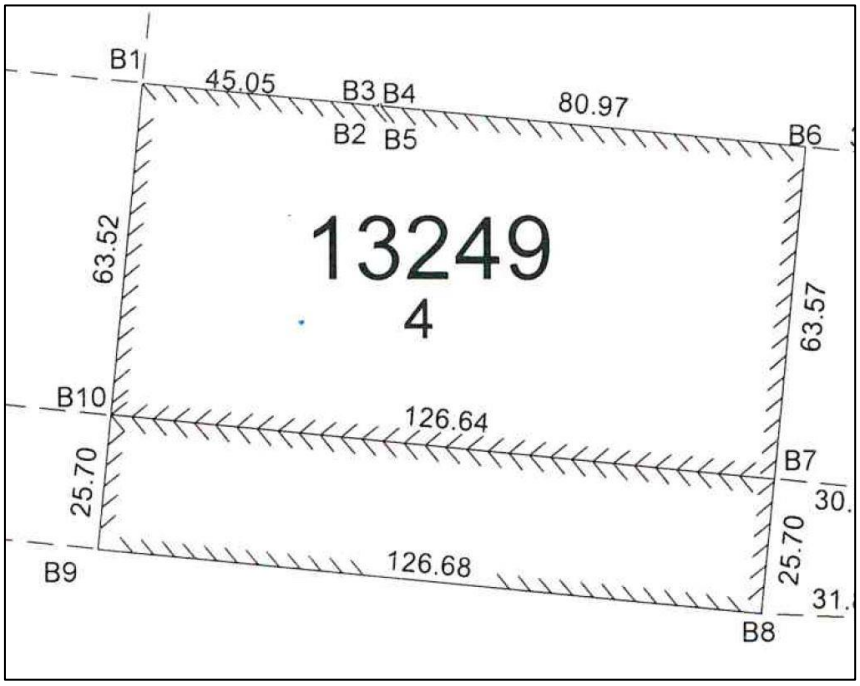
Proje alanındaki binaların uygunluğu göz önünde bulundurulduğunda; tek bir alanda hedeflenen kurulu güce ulaşılabilmesi, bağlantı noktasına yakınlık, çatı alanı üzerinde santral kurulumuna ve santralin verimine olumsuz etki edecek herhangi bir engel olmaması sebebiyle Fabrika Binası çatıları projede kullanılmaya uygun bulunmuştur.

5.2. Fotovoltaik Kurulum İçin Kullanılacak Binanın Durumu

Panel kurulumlarının yapılması planlanan Fabrika Binası 126,68 m genişliğinde, 89,22 m uzunluğunda ve 11,15 m yüksekliğindedir. Toplam 11 302,38 m^2 kapalı alana sahiptir. Bina köşe koordinatları ED-50 formatında aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 5.1**.** Fotovoltaik sistem kurulacak alanın köşe koordinatları

Nokta No	Y	X
B1	481043,72	4423168,39
B6	481169,64	4423156,21
B8	481161,13	4423067,38
B9	481035,09	4423079,63



Resim 5.1. Fotovoltaik sistem kurulacak alanın röperli kroki görüntüsü

Fotovoltaik sistemin kurulacağı binada ilk bakılması gereken parametrelerden bir tanesi binanın azimut açısıdır. Azimut açısı, fotovoltaik panellerin Güney yönüne olan açısını ifade eder. Panellerin yüzeyine düşen ışınımı etkileyen önemli parametrelerden bir tanesidir. Kuzey yarım kürede yer alan bir fotovoltaik sistemin üretim performansı adına en ideal azimut açısı 0°, yani yönünün doğrudan Güney doğrultusunda olmasıdır [39]. Fabrika Binası, azimut açısı 5,5 ° olacak şekilde inşa edilmiştir. Bu açı, maksimum performansın

alınabileceği Güney doğrultusuna oldukça yakındır ve fotovoltaik bir uygulama için oldukça uygundur.

Bina çatısı testere dişli olarak da adlandırılan şet çatı şeklindedir (Resim 5.2). Her bir parçası 14 ° eğime sahip, Güney yönlü yedi parçadan oluşmaktadır. Parçalar 12,6 m uzunluğundadır. Çatıların eğimli yüzeylerinin Güney yönlü olması fotovoltaik sistem kurulumu için ideal bir altyapı oluşturmaktadır. Ancak her çatının arkasındaki çatının bir kısmında gölgelenmeye sebep olacağı öngörülmektedir. PVsyst programında yapılacak üç boyutlu tasarım ve gölgelenme hesaplamalarında dikkat edilmesi gereken bir parametredir.



Resim 5.2. Fabrika binası çatıları

5.3. Elektriksel Altyapı

TEMSAN Ankara Genel Müdürlüğü dağıtım sistemi üzerinden bağlantı sağlamakta olup, yüksek gerilim seviyesinden beslenmektedir. TEİAŞ 8.Bölge Müdürlüğü Ankara'ya bağlı Macunköy TM-3 (154/34,5 kV) transformatör merkezinden 34,5 kV gerilim seviyesinden çıkan Podium DM Fideri ve Podium DM sonrasında Urankent DM F-7 (Vakıflar Bilgi İşlem Fideri) beslemeli hatta, 3x1x95mm^2 XLPE kabloya girdi-çıktı şeklinde irtibatlı TR-3683 trafo postası üzerinden TEMSAN Ankara Genel Müdürlüğü'ne besleme yapılmaktadır. TEMSAN kurumuna ait bir adet 1.600 kVA transformatör (34,5/0,4 kV), bir adet 1.250 kVA transformatör (34,5/0,4 kV) ve bir adet 630 kVA transformatör (34,5/0,4 kV) belirtilen fider üzerinden enerji almaktadır. 1.600 kVA transformatör Hidro Türbin Test Merkezi, 1.250 kVA transformatör Fabrika Binası ve 630 kVA transformatör Depo ve Sevkiyat Binası içerisinde yer almaktadır.

Yerleşke dağıtım sistemine kendine ait transformatör ve şalt ekipmanı üzerinden bağlantı sağlandığı için, proje kapsamında trafo ve yüksek gerilim şalt yatırımına ihtiyaç

duyulmamaktadır. Sistem bağlantısı yerleşkedeki mevcut transformatörlerden biri üzerinden yapılacaktır. Elektriksel kayıpları ve maliyeti mümkün olan en düşük seviyede tutmak adına en yakın trafonun seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca seçilen transformatörün güneş enerjisi üretim tesisinin AC çıkış gücü seviyesinde, yeterli kapasiteye sahip olması gerekmektedir.



Resim 5.3. Bağlantı yapılacak dağıtım trafosunun görseli

Kurulması planlanan güneş enerjisinden elektrik üretim tesisinin bağlantısının; kurulum adına değerlendirilecek olan Fabrika Binası içerisinde yer alan 1.250 kVA transformatör (0,4 kV-AG Bara) üzerinden yapılması planlanmıştır.

5.4. Yerleşkenin Elektrik Enerjisi Tüketim Verileri

Güneş enerjisi santralinde üretilen elektrik enerjisinin bir kısmının şebeke işletmecisine satışı yapılırken, bir kısmı yerleşke içerisinde tüketilecektir. Yerleşkede tüketilecek kısmın tespiti, yerleşkeye ait elektrik faturalarındaki ham tüketim değerleri incelenerek yapılmıştır. Yerleşkenin yıllık ortalama tüketimini belirlemek için son dört yılına ait veriler toplanmıştır.

Çizelge 5.2. Yerleşkenin yıllık iç tüketim giderleri ve son dört yılın ortalaması

	2018 (kWh/Ay)	2019 (kWh/Ay)	2020 (kWh/Ay)	2021 (kWh/Ay)	Ortalama (kWh/Ay)
Ocak	34 003,89	33 815,52	35 500,50	18 754,20	30 518,53
Şubat	23 415,84	25 521,03	31 128,66	15 226,92	23 823,11
Mart	19 008,81	27 680,04	18 124,92	28 532,88	23 336,66
Nisan	14 806,71	21 254,76	7 578,27	19 244,79	15 721,13
Mayıs	13 481,91	12 405,51	4 069,62	8 201,34	9 539,60
Haziran	11 770,02	7 826,67	9 199,08	7 834,95	9 157,68
Temmuz	15 827,22	12 523,50	14 531,40	9 784,89	13 166,75
Ağustos	14 216,76	12 024,63	14 516,91	12 225,42	13 245,93
Eylül	15 642,99	14 877,09	11 693,43	13 403,25	13 904,19
Ekim	13 622,67	20 789,01	15 158,61	16 806,33	16 594,16
Kasım	23 515,20	24 736,50	16 518,60	22 391,19	21 790,37
Aralık	28 924,11	-	18 112,50	-	23 518,31
				Toplam	214 316,42 kWh/yıl

Elektrik tüketim verileri incelendiğinde aylar ve mevsimler arasında dengesiz bir dağılım görülürken yıllık toplam tüketim değerleri birbirlerine benzerlik göstermektedir. İncelenen zaman aralığındaki yıllık tüketim değerlerinin ortalaması alındığında; yerleşkenin yıllık iç elektrik enerji ihtiyacının yaklaşık olarak 214 316,42 kWh/yıl olduğu görülmektedir. Yerleşkede yapımı devam eden Ar-Ge merkezinin tamamlanması ve hidro türbin test istasyonunun devreye alınması ile elektrik tüketiminde yaklaşık olarak yıllık 380 000 kWh/yıl artış olacağı öngörülmektedir. Planlanan bu yatırımlar ile birlikte yerleşke elektrik iç tüketimi yıllık 594 316,42 kWh/yıl dolaylarına ulaşacaktır. Bu miktar, santralde üretilen elektrik enerjisinin yerleşke iç tüketiminde kullanılacak olan kısmını oluşturmaktadır. Tezin amacına uygun olması adına, güneş enerji santralinin yıllık minimum bu üretim değerine ulaşacak büyüklükte tasarlanması gerekmektedir.

5.5. Fotovoltaik Panel

Sistemde CW Enerji marka, CWT315 60PM model güneş paneli kullanılmıştır. Performans-maliyet oranlarının yüksek olması sebebi ile endüstriyel uygulamalarda en çok görülen kristal silisyum panel teknolojileri tasarımda kullanılmak üzere değerlendirmeye alınmıştır. Mevcut çatı alanından yüksek verim elde etmek amacı ile monokristal silisyum paneller tercih edilmiştir. Tercih edilen fotovoltaik panele ait elektriksel veriler Çizelge 5.3'de verilmiştir, tasarım aşamasındaki hesaplamalar için bu veriler kullanılacaktır. Veriler, fotovoltaik paneller için uluslararası standart test koşulları olan 25 °C hücre sıcaklığı ve 1000 W/m^2 ışınım altında yapılmaktadır.

Çizelge 5.3. Fotovoltaik panele ait özellikler

		Sembol	Değer
Maksimum Güç		$P_{max\ panel}$	315 Wp
Maksimum Güç Gerilimi		$V_{MP\ panel}$	33,55 V
Maksimum Güç Akımı		$I_{MP\ panel}$	9,41 A
Açık Devre Gerilimi		$V_{OC\ panel}$	40,73 V
Kısa Devre Akımı		$I_{SC\ panel}$	10,05 A
Maksimum Sistem Anma Gerilimi			1000 VDC
Çalışma Sıcaklık Aralığı		T_{panel}	-40 °C ~ +85 °C
Sıcaklık Katsayıları	Güç	γ	-0,36 %/°C
	Gerilim	β	-0,27 %/°C
	Akım	α	+0,40 %/°C

5.6. İnverter

Sistemde KACO marka, blueplanet 50.0 TL3 model dizi tipi inverter kullanılmıştır. Yüksek verim değeri elde etmek için trafosuz yapıda tercih edilmiştir. Doğru akım tarafında kendinden Tip 1+2 parafudrlu seçildiği için herhangi bir koruma ekipmanına ihtiyaç duymamaktadır. Kullanılması planlanan invertere ait elektriksel veriler Çizelge 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.4. İnvertere ait özellikler

	Sembol	Değer
Maksimum Giriş Gücü	$P_{max\ inverter}$	70 000 W
Giriş Gerilimi Aralığı	$V_{NO\ inverter}$	580 – 900 V
Açık Devre Maksimum Gerilimi	$V_{OC\ inverter}$	580 – 1100 V
Maksimum Giriş Akımı	$I_{MP\ inverter}$	90 A
Maksimum Kısa Devre Akımı	$I_{OC\ inverter}$	190 A
MPPT Giriş Sayısı		10
Maksimum Çıkış Gücü	$P_{AC\ inverter}$	50 000 VA
Çıkış Gerilimi	$V_{AC\ inverter}$	400 V (3/N/PE)
Frekans Değeri		50/60 Hz
Akım Değeri	$I_{AC\ inverter}$	3x72.2 A
Maksimum Akım Değeri		3x76.0 A
Maksimum Montaj Yüksekliği		3000 m
Çalışma Sıcaklığı		-20 °C ~ +60 °C
Verim		% 98,1

5.7. DC Kablo

Sistemde fotovoltaik paneller ve inverterler arasında elektriksel bağlantıyı sağlamak için PRYSMIAN marka, H1Z2Z2-K model solar kablo kullanılmıştır. Güneş enerjisi sistemlerinde kullanılan fotovoltaik kabloların gereksinimlerinin ve karakteristik özelliklerinin belirlendiği EN 50618 standardına uygundur. Bu çalışma kapsamında planlanan kablo kanallarında, kablo tavalarında, sıva altı ve sıva üstü kurulumlar için uygundur.

Çizelge 5.5. Fotovoltaik panel-inverter arasında kullanılacak kabloya ait özellikler

Damar Sayısı ve Kesiti	Kablo Çapı	60 °C Ortam Sıcaklığında Yüzeyde Akım Taşıma Kapasitesi ($I_{60°C\ DC\ kablo}$)	Çalışma Sıcaklığı	DC Gerilim Seviyesi
1x6 mm^2	6,0 mm	67 A	-40 °C ~ +90 °C	1500 V

5.8. AC Kablo

Sistemin alternatif gerilim kısmında PRYSMIAN marka, N2XH model kablolar kullanılmıştır. İnverter-GES panosu ve GES panosu-trafo ana dağıtım panosu arasındaki taşıma akım ve gerilim değerleri birbirinden farklı olduğu için farklı özellikte kablolar tercih edilmiştir. İnverter-GES panosu arasında 5x35 mm^2 N2XH kablo kullanılırken, GES panosu-trafo ana dağıtım panosu arasında 1x150 mm^2 N2XH kablo çiftli şekilde

kullanılmıştır. Kullanılan kablolara ait elektriksel özellikler Çizelge 5.6 ve Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.6. İnverter-GES panosu arasında kullanılacak kabloya ait özellikler

Damar Sayısı ve Kesiti	Kablo Çapı	30 °C Ortam Sıcaklığında Satıh Üzerinde Akım Taşıma Kapasitesi ($I_{30\ °C\ AC\ kablo}$)	Maksimum Çalışma Sıcaklığı	DC Gerilim Seviyesi
5x35 mm^2	28 mm	158 A	+90 °C	0,6/1 kV

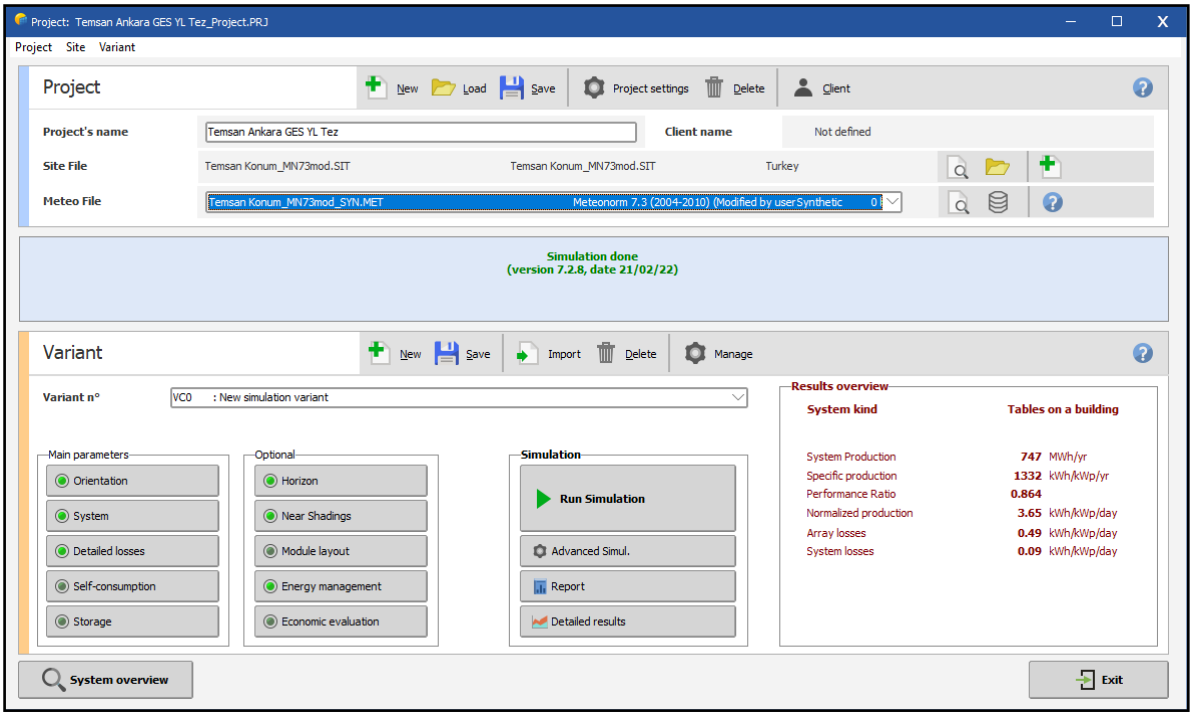
Çizelge 5.7. GES panosu-trafo ana dağıtım panosu arasında kullanılacak kabloya ait özellikler

Damar Sayısı ve Kesiti	Kablo Çapı	30 °C Ortam Sıcaklığında Satıh Üzerinde Akım Taşıma Kapasitesi ($I_{30\ °C\ AC\ kablo}$)	Maksimum Çalışma Sıcaklığı	DC Gerilim Seviyesi
1x150 mm^2	20 mm	444 A	+90 °C	0,6/1 kV

5.9. PVsyst Programı Üzerinde Sistemin Tasarlanması

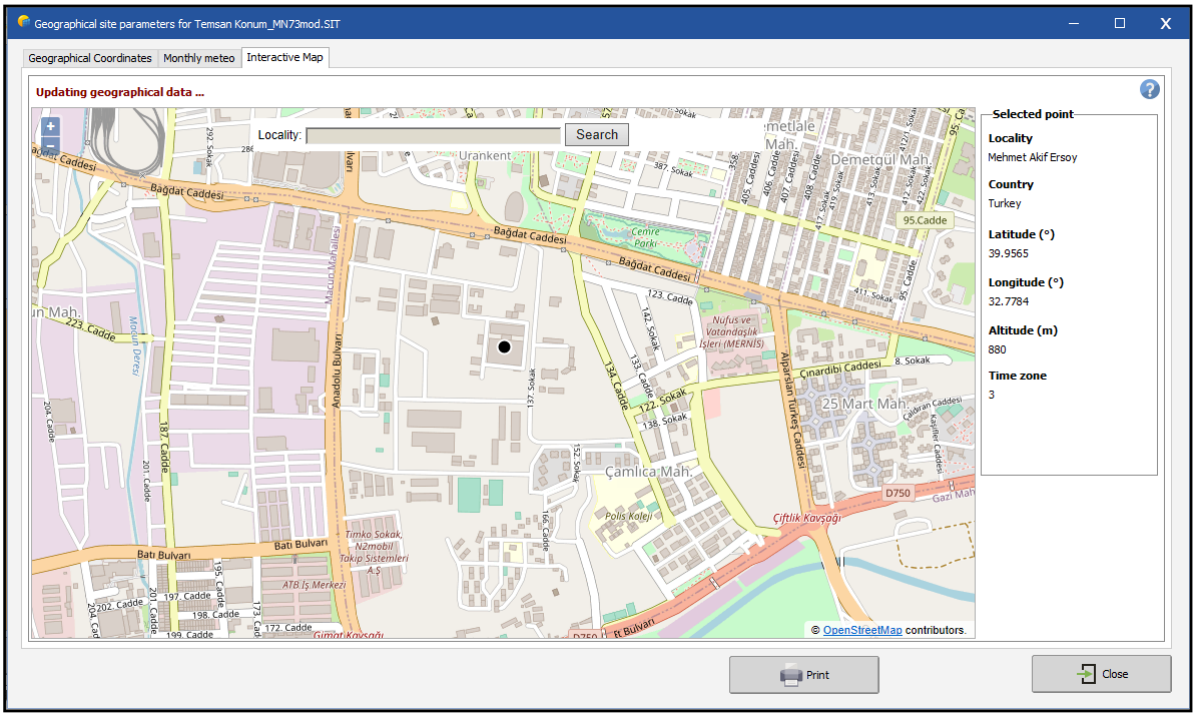
Yerkürenin her bölgenin güneşlenme süreleri ve global radrasyon seviyesi sene boyunca değişkenlik gösterir. Yaşanan bu değişkenlik yıl boyunca fotovoltaik panellerin üretim performanslarını doğrudan etkiler. Bu sebeple güneş enerjisi santrali tasarımı yapılırken günlük, haftalık veya aylık bazda verilere dayanarak hesaplama yapmak gerçeğe yakın bir sonuç almak için doğru yöntem olmayacaktır. Dünya, Güneş etrafındaki hareketini bir tam yılda tamamladığı için Güneş'in Dünya üzerindeki ilerleyişi senelik bir döngü içerisindedir. Bu döngü fotovoltaik panellerin üzerine düşen açı ve üretim performansları ile doğrudan ilişkilidir. Bu sebeple tasarım yapılırken, yıllık bazda veriler göz önüne alınmıştır.

Sistemin üç boyutlu tasarım ve gölgelenme analizi PVsyst Version 7.2.8 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Programın proje dosyası oluşturulduktan sonraki karşılaşılan ana menü ara yüzü Resim 5.4'te gösterilmiştir. Proje dosyası oluşturulurken sistem üretim noktası ile tüketim noktası aynı şebekeye bağlı (on-grid) olarak seçilmiştir.

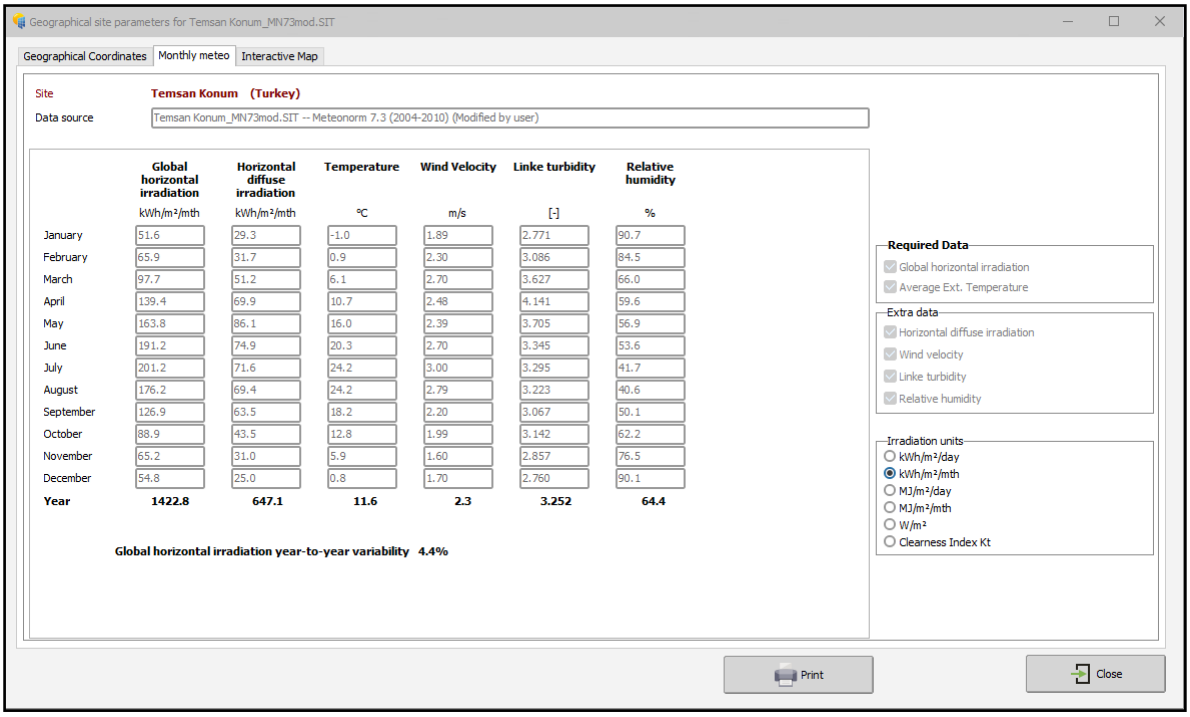


Resim 5.4. PVsyst programı tasarım ana menü ara yüzü

Tasarıma proje konumunun harita üzerinde seçilmesi ile başlanır. Proje ile ilgili sadece doğru konumun seçilmesi yeterlidir. Program, seçilen konuma ait meteorolojik verileri kendi sistemi içerisindeki Meteonorm veri tabanı üzerinden tamamlamaktadır.

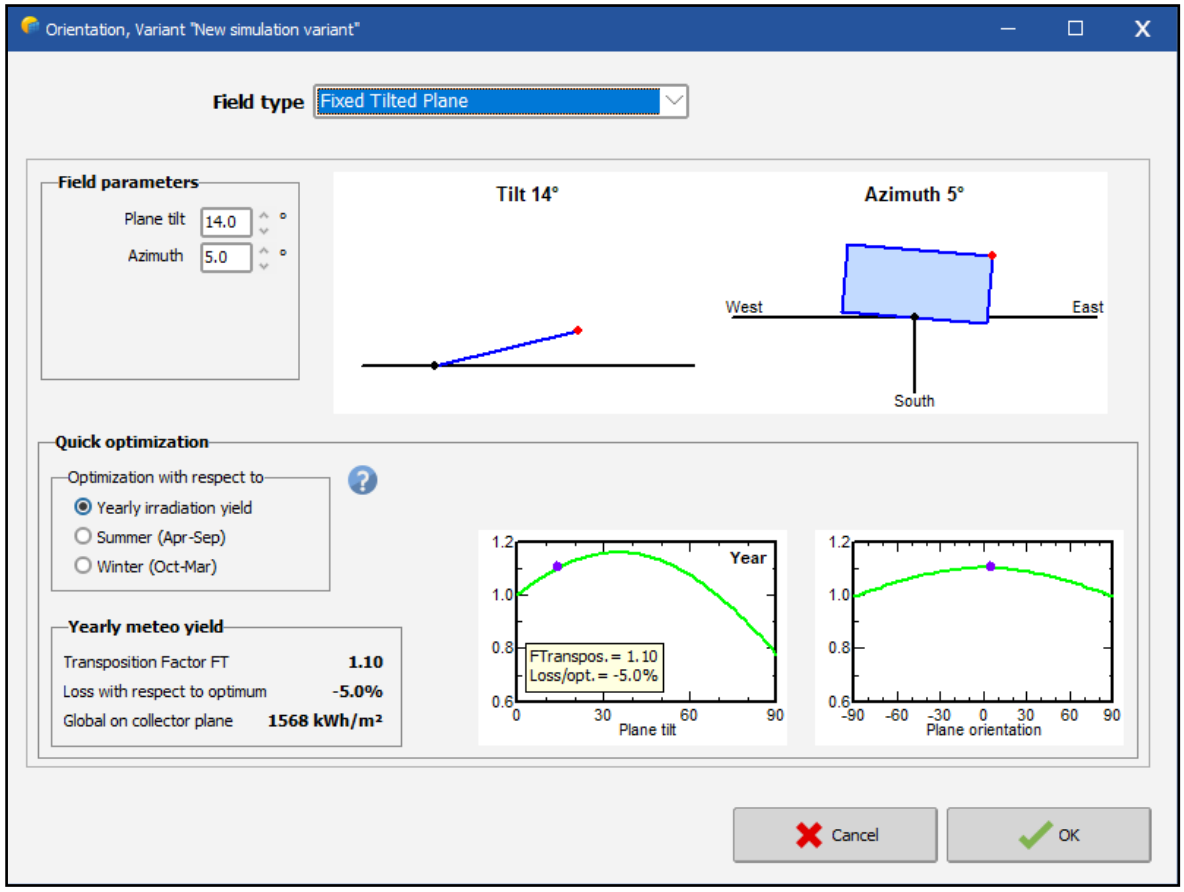


Resim 5.5. PVsyst programı proje konum seçimi ara yüzü



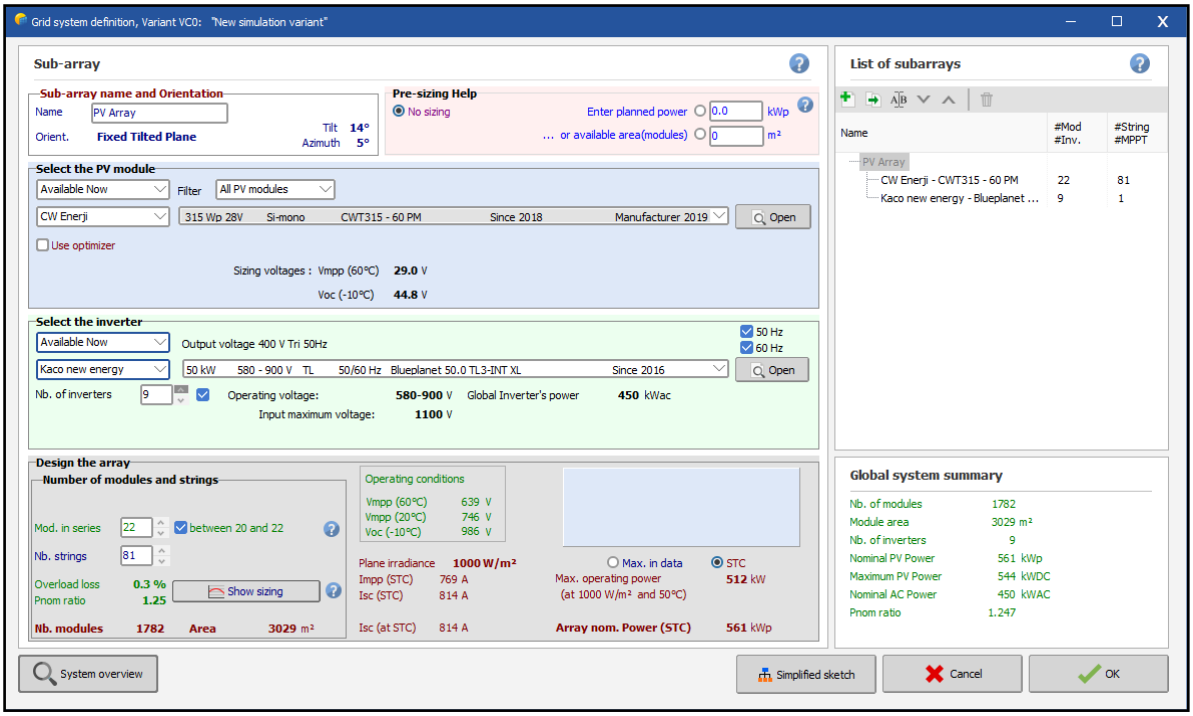
Resim 5.6. Proje konumunun PVsyst programı içerisindeki meteorolojik verileri

Yön belirleme (orientation) sekmesi altındaki saha parametreleri (field parameters) başlığına fotovoltaik panellerin planlanan montaj şekilleri (field type), azimuth açısı (azimuth), eğim açısı (plane tilt) girilir. Bu tez kapsamında azimut açısı ve eğim açısı olarak kurulum yapılması planlanan binanın özellikleri kullanılmıştır. Çatıya paralel sabit konstrüksiyon üzerine kurulum yapılacağı için montaj şekli sabit eğimli yüzey (fixed tilted plane) olarak seçilmiştir. Kullanıcının en iyi sonucu elde etmesine yardımcı olmak için optimizasyon (optimization) başlığı bulunmaktadır. Bu başlık içerisinde; panellerin seçilen özellikler altında maruz kalacağı ışınım değeri ve optimum performanstan ne kadar uzak oldukları gösterilmektedir. Tez kapsamında yapılan tasarım ile optimum tasarım arasında % 5'lik bir verim kaybı vardır. Ancak kurulum bina çatılarına yapılacağından dolayı ilgili açılarda değişiklik yapılamamaktadır.



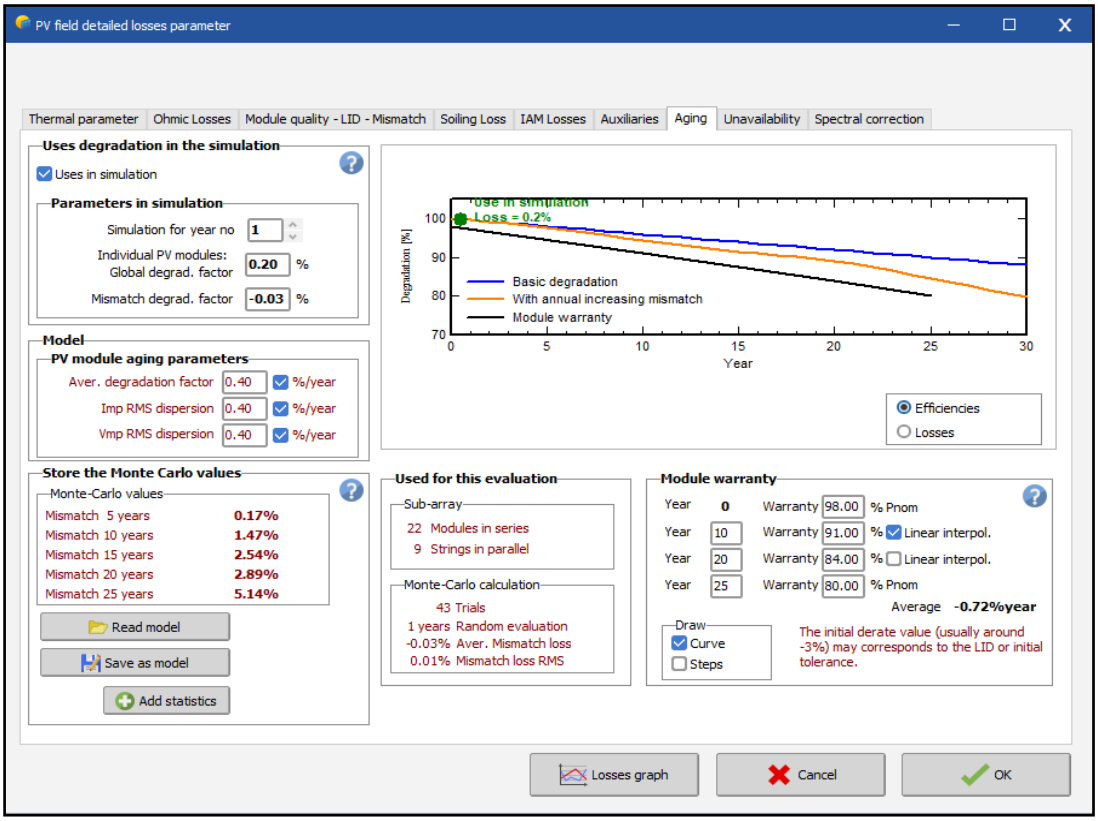
Resim 5.7. PVsyst programı yön belirleme sekmesinin görseli

Sistem (system) sekmesi altında fotovoltaik sistemin en önemli iki bileşeni olan panel ve inverter tercihi yapılır. Program veri tabanında piyasadaki neredeyse her panel ve inverter bulunduğu gibi tercihen özelliklerini kullanıcının kendisinin belirleyeceği bir ekipmanda kullanılabilmektedir. Bu tez kapsamında panel olarak CW Enerji marka, CWT315-60PM; inverter olarak KACO marka, Blueplanet 50.0TL3 tercih edilmiştir. Program seçilen panel-inverter çiftinin birbirleri ile olan elektriksel uyumluluklarını her açıdan incelemekte ve uygun panel dizilimlerini kullanıcıya sunmaktadır. Bu tez kapsamındaki bileşen sayısı, bileşenlerin özellikleri, fotovoltaik kurulum için kullanılması gereken alan, toplam güç değeri, akım değeri, gerilim değeri, panel-inverter kombinasyonunun gösterildiği arayüz ekranı Resim 5.8'de verilmiştir. Bu incelemede kullanılan yöntemler tezin sonraki başlıklarında detaylı şekilde gösterilecektir. PVsyst programı resimde de de görülebileceği üzere herhangi bir hata mesajı vermemiştir.



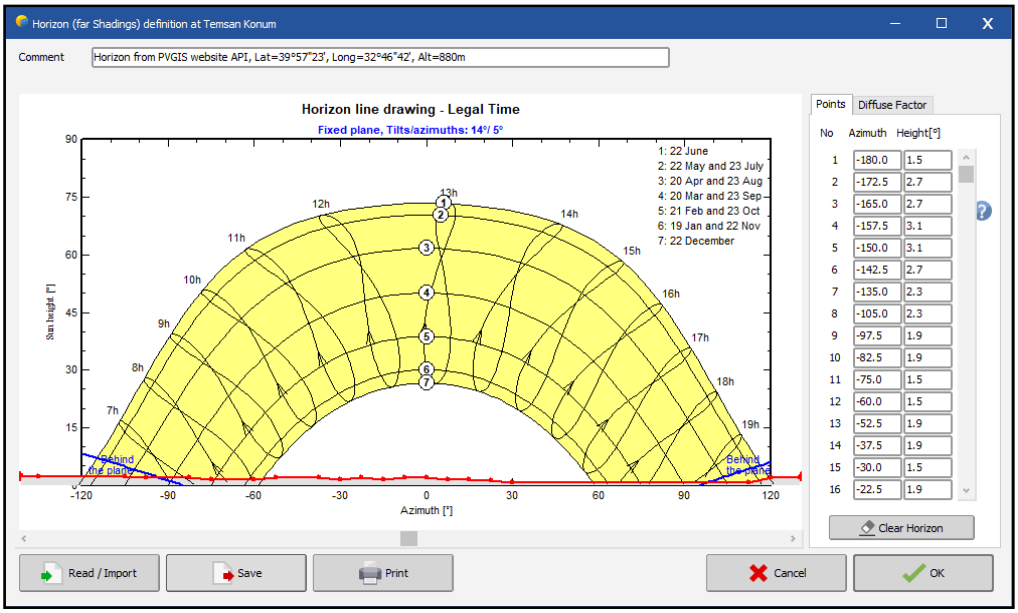
Resim 5.8. PVsyst programı sistem sekmesi

Detaylı kayıplar (detailed losses) sekmesi altında sistemin uğrayacağı kayıplar öngörülür. Sistemin uğrayacağı en büyük kayıp, fotovoltaik panellerin eskimesinden dolayı oluşacak degredasyon kayıplarıdır. Resim 5.9'da sistemin tahmin edilen degredasyon kayıpları görülmektedir. Fotovoltaik panele ait teknik bilgi dokümanında panellerin ilk sene minimum % 97, ilk 12 sene minimum % 90 ve ilk 25 sene minimum % 80 verim değerine sahip olacağı taahhüt edilmektedir. Bu bilgi modül garantisi (modüle warranty) başlığı altında girildiğinde, panellerin ilk yılında % 2 verim kaybı ile başladığı ve geri kalan yıllarda % 0,7 degredasyona uğrayacağı tahmin edilmiştir. Sistemin uğrayacağı diğer elektriksel kayıplar tezin devamında formülasyonlar ile hesaplanacaktır.



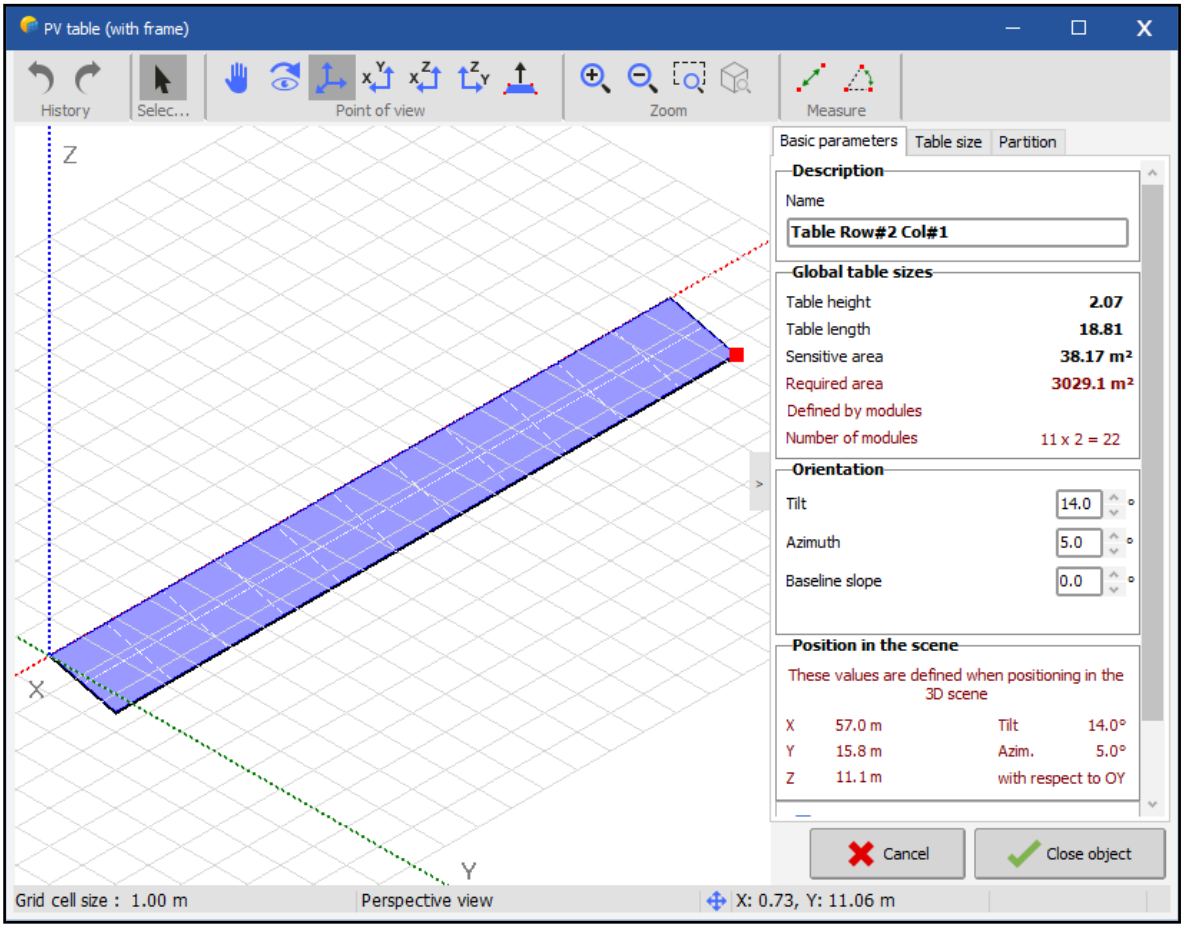
Resim 5.9. PVsyst programı detaylı kayıplar sekmesi

Güneş geometrisi ve hareketi yazılım içerisindeki Meteonorm 7.3 verileri üzerinden elde edilmiştir. Sistemin bulunduğu konuma göre Güneş'in yıl içerisinde sahip olduğu azimut açısını ve Güneş'in eğim açısını gösteren grafik Resim 5.10'da verilmiştir.

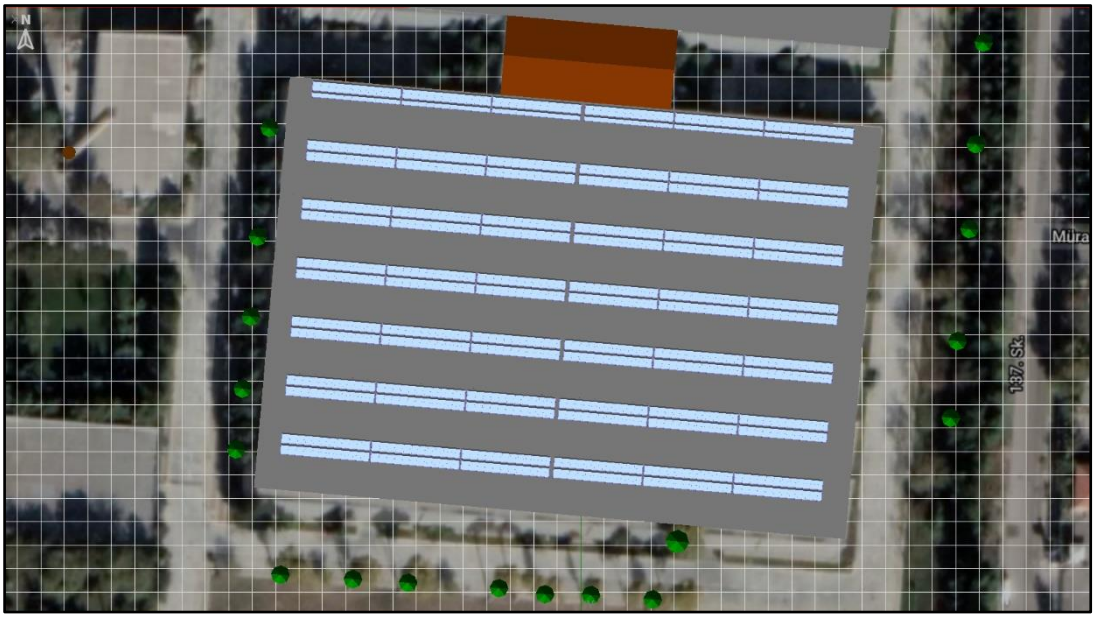


Resim 5.10. Proje konumunun PVsyst programındaki Güneş hareket grafiği

Mevcut proje alanını en verimli şekilde değerlendirmek için 60 hücreli monokristal panel tercih edilmiştir. Panel yerleşimi tüm çatı alanına homojen şekilde yapılmıştır. Paneller, öndeki çatı parçasının sebep olacağı gölgelenmeden en az derecede etkilenmeleri için çatıların üst kısımlarına yakın yerleştirilmiştir. Her bir panel enine 1 007 mm, boyuna 1 668 mm uzunluğa sahiptir. Montaj ve bakım çalışmaları sırasında kısıtlayıcı olmaması ve kullanım kolaylığı sağlaması adına çatının yüksek ucunun 10 cm altında yerleşim yapılmıştır. Yerleşim, çatının sağından ve solundan 4 m boşluk bırakılarak ortalanmıştır. Her sırada ortadaki panel grupları arasında insan geçişi için 75 cm boşluk bırakılmıştır. Paneller üst üste 2, yan yana 11 panel gelecek şekilde 22'li gruplar halinde yerleştirilmiştir. Sistemde toplam 81 adet fotovoltaik panel grubu kullanılmıştır. Paneller tüm çatıda toplam 3 029 m^2 alanı kaplamaktadır.

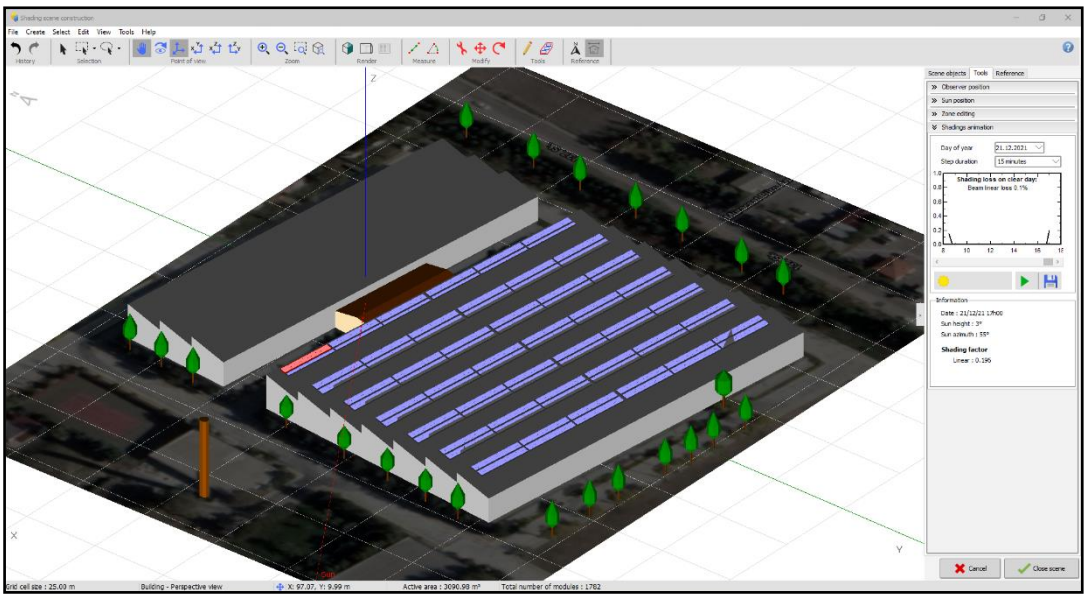


Resim 5.11. Tasarım menüsünde bir fotovoltaik panel dizisinin oluşturulması

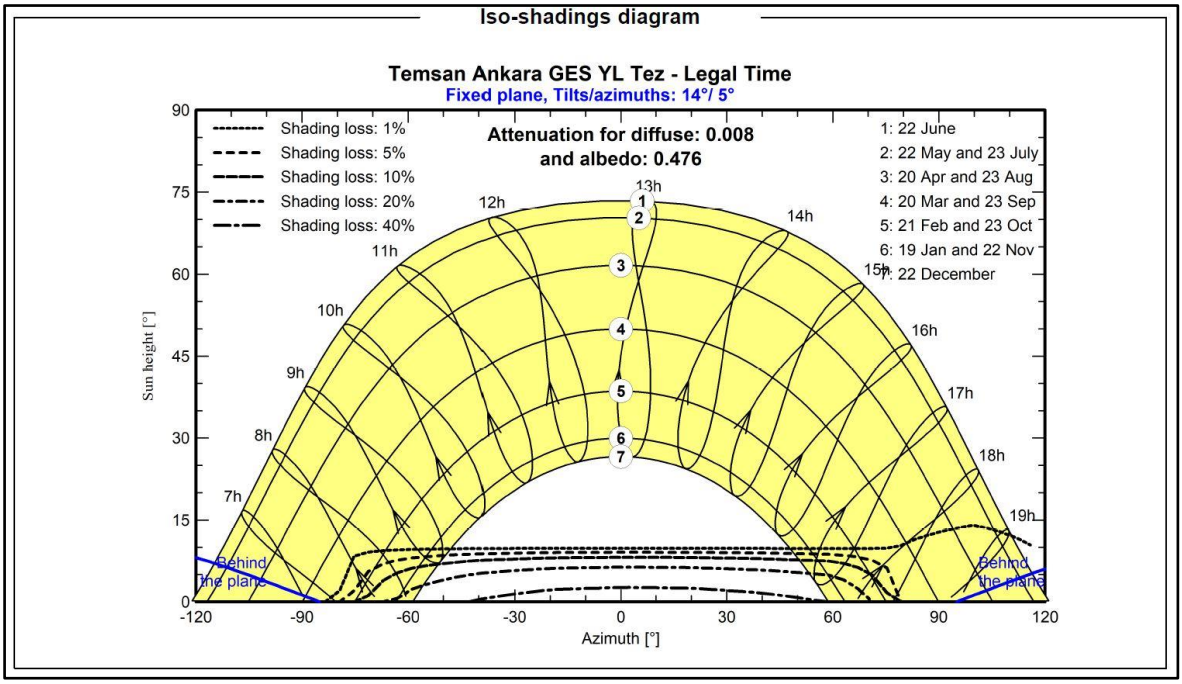


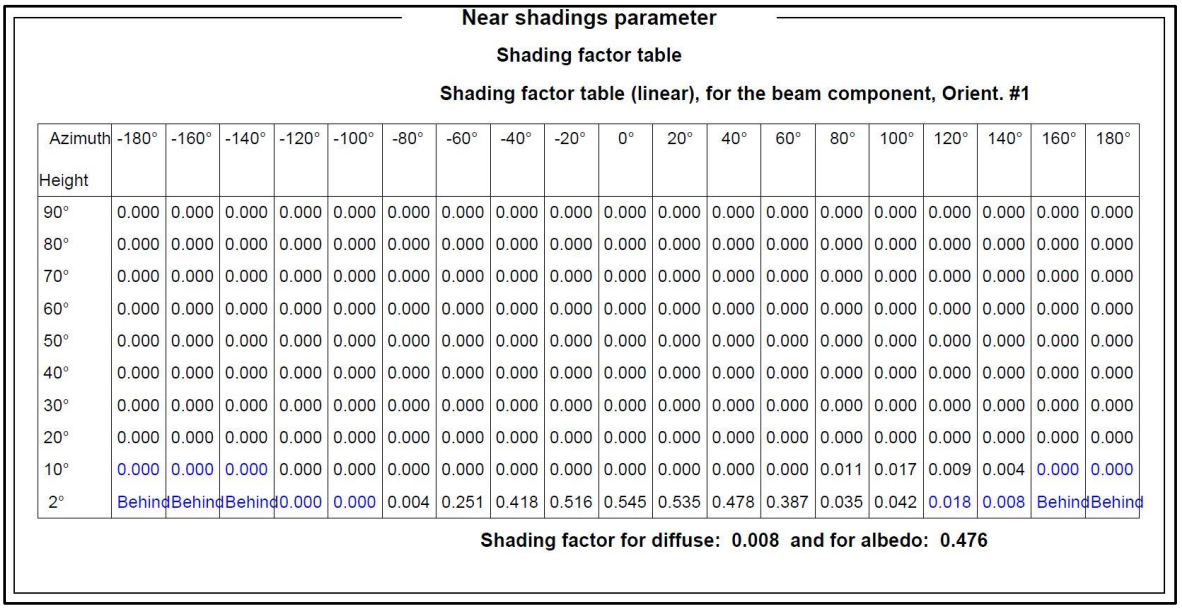
Resim 5.12. 3 boyutlu tasarımda panel yerleşiminin kuş bakışı görüntüsü

Gölgelenme analizi yapılırken gölgelenmeden etkilenecek alanları en net şekilde tespit etmek ve gölgelenmeden en az etkilenecek şekilde yerleşim yapmak adına, yıl içerisinde Güneş ışınlarının en eğimli olduğu 21 Aralık günü tercih edilmiştir. Arayüzün analiz anındaki ekran görüntüsü Resim 5.13'de verilmiştir. Binanın çevresinde gölgelenmeye sebebiyet verecek herhangi bir yapı bulunmamaktadır. PVsyst yazılımı üzerinde yapılan üç boyutlu gölgelenme simülasyonuna göre fotovoltaik paneller yıl içerisinde gölgelenmeden neredeyse hiç etkilenmeyecektir.



Resim 5.13**.** PVsyst programında 3 boyutlu tasarımın gölgelenme analizi





Near shadings parameter

Shading factor table

Shading factor table (linear), for the beam component, Orient. #1

Azimuth / Height	-180°	-160°	-140°	-120°	-100°	-80°	-60°	-40°	-20°	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°
90°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
80°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
70°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
60°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
40°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.017	0.009	0.004	0.000	0.000
2°	Behind	Behind	Behind	0.000	0.000	0.004	0.251	0.418	0.516	0.545	0.535	0.478	0.387	0.035	0.042	0.018	0.008	Behind	Behind

Shading factor for diffuse: 0.008 and for albedo: 0.476

Resim 5.14. 21 Aralık gününe göre yapılan PVsyst gölgelenme analizinin sonuçları

5.10. Elektriksel Hesaplamalar ve Ekipmanların Seçimi

Fotovoltaik sistemlerde elektriksel hesaplamalar panel-inverter arasında bir kombinasyon oluşturmasını, sistem için uygun iletkenlerin belirlenmesini ve şalt ekipmanlarının seçilmesini kapsar.

Fotovoltaik panellerin birbirlerine seri şekilde bağlanması toplam sistem geriliminin artmasına yol açarken, panelleri birbirleri ile paralel şekilde bağlamak toplam sistem akımının artmasına yol açar. Birbirleri ile seri şekilde bağlanan paneller, dizileri (string) meydana getirir. Panel dizileri birbirlerine paralel şekilde bağlanarak panel sıralarını (array) oluşturur. Oluşturulan bu yapılara ait akım, gerilim ve güç değerlerinin monte edildikleri inverterin akım, gerilim ve güç sınırları içerisinde olması gerekmektedir. Bu aralığın üstüne çıkmak inverterin yanmasına kadar varabilen zararlara, aralığın altında kalmak ise inverter performansında ciddi düşüşlere yol açabilir. Ayrıca fotovoltaik panellerin sadece standart test şartları (STC) baz alınarak seçilmesi yeterli değildir. Sistem yıllar boyu bulanacağı konumda farklı hava şartlarına ve sıcaklığa maruz kalacaktır. Sıcaklık fotovoltaik panellerin sağladığı akım ve gerilim üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve hesaba katılması gerekmektedir. Sıcaklığın artması fotovoltaik paneller üzerindeki gerilim ve güçte düşüşe, akımda ise artışa sebep olmaktadır. Sıcaklığın düşmesi durumunda ise tam tersi bir etkiye sebep olmaktadır.

Kablo seçimi yapılırken gerilim düşümü, akım taşıma kapasitesi ve güç kaybı hesapları göz önüne alınır. Uzun ve ince kesitli iletkenlerin kullanıldığında gerilim düşümü ve güç kaybı gibi sistem verimini olumsuz yönde etkileyen sonuçlar ile karşılaşılır. Bir iletkenden akım taşıma kapasitesinin üzerinde bir miktarda akım geçirilmesi iletkenin aşırı ısınmasına ve dışındaki yalıtım malzemesini eritip yangın çıkarmasına dahi sebep olabilir. Bu sebeple iletken seçimi yapılırken mühendislik hesapları yapılarak iletkenin cinsi ve kesiti belirlenmelidir.

Elektriksel sistemler tasarlanırken hem montaj hem de işletme kolaylığı sağlaması amacı ile mümkün olduğunca aynı özellikte iletkenler kullanılır ve bir standart elde edilmeye çalışılır. Bu sebeple aynı özelliğe sahip birden fazla paralel bağlantının bulunduğu bir tesisatta kablo seçimi yapılırken en yüksek metraja göre hesap yapılır. Hesaplar sonucunda kullanılması uygun bulunan kablo kesiti paralelindeki tüm bağlantıların kesiti olarak kullanılır.

5.10.1. Fotovoltaik panel dizi (string)-sıra (array) hesaplamaları

Her bir dizide seri şekilde bulunabilecek fotovoltaik panel sayısı, panellerin maksimum ve minimum gerilimleri incelenerek belirlenir. Panellerin maksimum ve minimum gerilim değerlerini tespit etmek adına, sahip oldukları en düşük ve en yüksek çalışma sıcaklıkları

olan -40 °C ve 85 °C ‘deki durumları incelenmiştir. Panellerin açık devre gerilimleri ve maksimum güç gerilimlerindeki sıcaklığa bağlı değişimler Eş. 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

Fotovoltaik panellerin -40 °C ‘deki açık devre gerilimi hesabı;

$V_{-40\,°C\,OC} = 40{,}73 \times [1 + -0{,}27 \times (-40 - 25) \div 100]$
$V_{-40\,°C\,OC} = 47{,}87\ V$

Fotovoltaik panellerin 85 °C ‘deki açık devre gerilimi hesabı;

$V_{85\,°C\,OC} = 40{,}73 \times [1 + -0{,}27 \times (85 - 25) \div 100]$
$V_{85\,°C\,OC} = 34{,}13\ V$

Fotovoltaik panellerin -40 °C ‘deki maksimum güç gerilimi hesabı;

$V_{-40\,°C\,MP} = 33{,}55 \times [1 + -0{,}27 \times (-40 - 25) \div 100]$
$V_{-40\,°C\,MP} = 39{,}43\ V$

Fotovoltaik panellerin 85 °C ‘deki maksimum güç gerilimi hesabı;

$V_{85\,°C\,MP} = 33{,}55 \times [1 + -0{,}27 \times (85 - 25) \div 100]$
$V_{85\,°C\,MP} = 28{,}11\ V$

Elde edilen -40 °C ‘deki açık devre ve maksimum güç gerilimleri fotovoltaik panellerin ulaşacağı en yüksek çalışma gerilimleridir. Bu gerilim değerleri inverterlerin açık devre ve maksimum güç üst gerilim sınırlarına bölünerek, diziye bağlanabilecek maksimum panel sayısı tespit edilir.

$N_{max} = V_{OC\ inverter\ max} \div V_{-40\,°C\,OC}$
$N_{max} = 1100 \div 47{,}87$
$N_{max} = 22{,}97$

$N_{max} = V_{NO\ inverter\ max} \div V_{-40\ ℃\ MP}$

$N_{max} = 900 \div 39,43$

$N_{max} = 22,82$

Her bir dizide seri şekilde bağlanabilecek maksimum panel sayısı 22 olarak bulunmuştur.

85 °C ‘deki açık devre ve maksimum güç gerilimleri fotovoltaik panellerin çalışma anında görülebilecek en düşük gerilim değerleridir. Bu gerilim değerleri inverterlerin açık devre ve maksimum güç alt gerilim sınırlarına bölünerek, diziye bağlanabilecek minimum panel sayısı tespit edilir.

$N_{min} = V_{OC\ inverter\ min} \div V_{85\ ℃\ OC}$

$N_{min} = 580 \div 34,13$

$N_{min} = 16,99$

$N_{min} = V_{NO\ inverter\ min} \div V_{85\ ℃\ MP}$

$N_{min} = 580 \div 28,11$

$N_{min} = 20,63$

Her bir dizide seri şekilde bağlanabilecek minimum panel sayısı 21 olarak bulunmuştur.

Sistemin, her bir dizisinde 22 adet fotovoltaik panelin seri bağlanması uygun bulunmuştur. Her bir inverterde paralel şekilde bağlanabilecek dizi sayısı, dizilerin ve inverterlerin maksimum akım kapasiteleri incelenerek belirlenir. Dizilerin maksimum akım değerlerini tespit etmek adına, tasarımda kullanılan fotovoltaik panellerin en yüksek çalışma sıcaklığı olan 85 °C‘deki durumları incelenmiştir. Her bir invertere 9 adet dizinin paralel şekilde bağlandığı düşünülmüştür. Dizilerin maksimum güç ve kısa devre akımlarındaki sıcaklığa bağlı değişimler Eş. 4.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

Fotovoltaik panellerin 85 °C ‘deki maksimum güç akımı hesabı;

$I_{85\ °C\ MP} = (9 \times 9{,}41) \times [1 + 0{,}040 \times (85 - 25) \div 100]$

$I_{85\ °C\ MP} = 86{,}72\ A$

$I_{85\ °C\ MP} = 86{,}72\ A < I_{MP\ inverter} = 90\ A$ (Maksimum güç akımı uygundur.)

Fotovoltaik panellerin 85 °C ‘deki kısa devre akımı hesabı;

$I_{85\ °C\ SC} = (9 \times 10{,}05) \times [1 + 0{,}040 \times (85 - 25) \div 100]$

$I_{85\ °C\ SC} = 92{,}62\ A$

$I_{85\ °C\ SC} = 92{,}62\ A < I_{OC\ inverter} = 190\ A$ (Kısa devre akımı uygundur.)

Yapılan hesaplamalar sonucunda sistemde kullanılacak fotovoltaik panel dizilerinin 22 panelden oluşacağı, panel sıralarının ise 9 panel dizisinden oluşacağı uygun bulunmuştur. Her bir panel sırası bir invertere bağlanacaktır. Bir invertere bağlanacak toplam güç aşağıda gösterildiği şekilde hesaplanmıştır.

$P_{max\ sıra} = P_{max\ panel} \times$ Bir dizideki panel sayısı $\times$ Bir sıradaki dizi sayısı

$P_{max\ sıra} = 315 \times 22 \times 9$

$P_{max\ sıra} = 62\ 370\ W$

$P_{max\ sıra} = 62\ 370\ W < P_{max\ inverter} = 70\ 000\ W$ (Panel sırası maksimum gücü uygundur.)

Kurulacak sistemin DC/AC yüklenme oranı şu şekilde bulunur;

$$DC/AC\ \text{Oranı} = \frac{\text{Inverter DC giriş gücü}}{\text{Inverter AC çıkış gücü}}$$

$$DC/AC\ \text{Oranı} = \frac{62\ 370}{50\ 000}$$

$$DC/AC\ \text{Oranı} = 1{,}247$$

5.10.2. DC kabloların hesaplamaları

Fotovoltaik paneller ve inverterler arasında bağlantıyı sağlayacak olan solar kablolar, sistemdeki gerilim düşümü % 1'in altında olacak şekilde seçilmiştir. Yerleşim planına göre inverter grubuna en uzakta bulunan fotovoltaik panel dizisinin metrajı 124 metredir. Özellikleri verilen (Bkz. Çizelge 5.5) 6 mm^2 kesite sahip bakır iletkenli, tek damarlı solar kablonun istenilen koşulları sağlayacağı düşünülerek değerlendirmeye alınmıştır.

Kablonun taşıyacağı gerilim tek fazlı DC olduğu için gerilim düşümünün hesaplanmasında Eş. 4.3 kullanılmıştır.

$$\text{Gerilim düşümü (\%e)} = \frac{2 \times 100 \times 124\ \text{m} \times 6\ 930\ \text{W}}{56\ \text{m}/\Omega\text{mm}^2 \times 6\ \text{mm}^2 \times (738{,}1\ \text{V})^2}$$

Gerilim düşümü (%e) = 0,9388 < 1

6 mm^2 kesitli solar kablo istenilen gerilim düşümü değerini sağlamaktadır.

Gerilimin tek fazlı DC olması sebebi ile kablonun sebep olacağı güç kaybının hesabı Eş. 4.5 kullanılarak yapılmıştır. Her bir fotovoltaik panel dizisi için talep edilen güç kaybı en fazla % 1 'dir.

$$\text{Güç kaybı } (P_l) = \frac{2 \times (9{,}41\ \text{A})^2 \times 124\ \text{m}}{56\ \text{m}/\Omega\text{mm}^2 \times 6\ \text{mm}^2}$$

Güç kaybı (P_l) = 65,35 W

6 mm^2 kesitli solar kablo kullanılması bir dizide 65,35 W güç kaybına sebep olmaktadır. Hesaplanan 65,35 W toplam dizi gücünün % 0,94 'üne karşılık gelmektedir. Bu güç kaybı sistem için kabul edilebilir düzeydedir.

Seçilen solar kablonun akım taşıma kapasitesi 67 A 'dir (Bkz. Çizelge 5.5). Ancak kablonun sistemde sorunsuz şekilde çalışacağından emin olunması için düzeltme ve sıcaklık faktörlerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu faktörler için Elektrik Mühendisleri Odası'nın yayınladığı Elektrik Tesisleri Genel Teknik Şartnamesi ve Uygulama Esasları kitabında verilen kabloların düzeltme ve sıcaklık faktörü katsayısı tabloları (Tablo A.14 ve

Tablo A.17) kullanılmıştır. Düzeltme faktörleri tablosuna göre, sık şekilde kablo tavası içerisinde döşenmiş 20'den fazla kablo için düzeltme katsayısı 0,38'dir. Sıcaklık faktörleri tablosu incelendiğinde ise, 60 °C ortam sıcaklığında sıcaklık faktörü katsayısı 0,71'dir. Bu katsayılara göre kablonun taşıma kapasitesi aşağıda gösterildiği şekilde hesaplanmıştır [40].

$I_{max\ DC\ kablo} = I_{60\ ^{\circ}C\ DC\ kablo} \times$ Düzeltme faktörü $\times$ Sıcaklık faktörü
$I_{max\ DC\ kablo} = 67 \times 0,38 \times 0,71$
$I_{max\ DC\ kablo} = 18,07$ A

Sistem güvenliği adına, hesaplanan kablo akım taşıma kapasitesinin fotovoltaik panelin standart test koşullarındaki kısa devre akımının % 125 'inden daha fazla olması gerekmektedir.

$I_{max\ DC\ kablo} = 18,07\ A > 1,25 \times I_{SC\ panel} = 10,05\ A$
18,07 > 12,56 (Seçilen solar kablonun akım taşıma kapasitesi uygundur)

5.10.3. AC kabloların hesaplamaları

AC kabloların hesapları aynı DC kablolarda olduğu şekilde gerilim düşümü, güç kaybı ve akım taşıma kapasiteleri göz önüne alınarak yapılır. AC iletkenler inverter-GES şalt panosu ve GES şalt panosu-trafo ana dağıtım panosu arasında bağlantı sağlamak için kullanılacaktır. Farklı akım ve gerilim seviyelerine sahip oldukları için her iki iletkenin hesapları ayrı başlıklar altında yapılacaktır. AC kablolar, sistemdeki gerilim düşümü % 1 'in altında olacak şekilde seçilmiştir. Her iki kısım için istenilen güç kaybı maksimum % 1 'dir.

<u>İnverter-GES şalt panosu arasında kullanılan AC kabloların hesapları</u>

Yerleşim planına göre inverter grubu ve GES şalt panosu arasındaki en uzun metraj 12 m olarak ölçülmüştür. Özellikleri verilen (Bkz. Çizelge 5.6) 35 mm^2 kesite sahip N2XH kablonun istenilen koşulları sağlayacağı düşünülerek hesaplamalarda kullanılmıştır.

Kablonun taşıyacağı gerilimin üç fazlı AC olması sebebi ile gerilim düşümü hesabı için Eş. 4.4 kullanılmıştır.

$$\text{Gerilim düşümü (\%e)} = \frac{100 \times 12\ \text{m} \times 50\,000\ \text{W}}{56\ \text{m}/\Omega\text{mm}^2 \times 35\ \text{mm}^2 \times 400^2}$$

Gerilim düşümü (%e) = 0,1913 < 1

35 mm^2 kesitli bakır iletken ile yapılan eşitlik istenilen değerin altında bir gerilim düşümü değeri vermektedir.

İletkenin sebep olacağı güç kaybı hesabı için Eş. 4.6 kullanılmıştır.

$$\text{Güç kaybı } (P_l) = \frac{3 \times (72{,}2\ \text{A})^2 \times 12\ \text{m}}{56\ \text{m}/\Omega\text{mm}^2 \times 35\ \text{mm}^2}$$

Güç kaybı (P_l) = 95,74 W

35 mm^2 kesitli bakır iletken kullanılması sistemdeki her bir inverterde 95,74 W güç kaybına sebep olmaktadır. Hesaplanan 95,74 W bir inverterin gücünün % 0,19 ‘una eşittir. Bu güç kaybı, sistem için kabul edilebilir sınırlar içerisindedir.

Seçilen kablonun akım taşıma kapasitesi 158 A’dir (Bkz. Çizelge 5.6). Elektrik Tesisleri Genel Teknik Şartnamesi ve Uygulama Esasları kitabında verilen düzeltme faktörü tablosuna göre, kablo tavası içerisinde tek tabakada döşenmiş 9 kablo için düzeltme katsayısı 0,72 ’dir. Sıcaklık faktörleri tablosuna göre ise, 35 °C ortam sıcaklığında sıcaklık faktörü katsayısı 0,94 ‘dür. Bu katsayılar dikkate alınarak kablonun taşıma kapasitesi aşağıda gösterildiği şekilde hesaplanmıştır [38].

$I_{\text{max AC kablo}} = I_{30\ ^\circ\text{C AC kablo}} \times$ Düzeltme faktörü × Sıcaklık faktörü

$I_{\text{max AC kablo}} = 158 \times 0{,}72 \times 0{,}94$

$I_{\text{max AC kablo}} = 106{,}93$

$I_{\text{max AC kablo}} = 106{,}93 > I_{\text{AC inverter}} = 72{,}2$ (Seçilen 5x35 mm^2 kesite sahip bakır iletkenli N2XH kablonun akım taşıma kapasitesi uygundur)

GES şalt panosu-trafo ana dağıtım panosu arasında kullanılan AC kabloların hesapları

Yerleşim planına göre GES şalt panosu ve trafo ana dağıtım panosu arası 10 m olarak ölçülmüştür. Özellikleri verilen (Bkz. Çizelge 5.7) 150 mm^2 kesite sahip N2XH kablo, çiftli şekilde kullanılacaktır. 300 mm^2 kesitli bakır iletkenin istenilen koşulları sağlayacağı düşünülerek hesaplamalar yapılmıştır.

Kablonun taşıyacağı gerilimin üç fazlı AC olması sebebi ile gerilim düşümü hesabı için Eş. 4.4 kullanılmıştır.

$$\text{Gerilim düşümü (\%e)} = \frac{100 \times 10\ \text{m} \times 450\ 000\ \text{W}}{56\ \text{m}/\Omega\text{mm}^2 \times 300\ \text{mm}^2 \times 400^2}$$

Gerilim düşümü (%e) = 0,1674 < 1

300 mm^2 kesitli bakır iletken ile yapılan eşitlik istenilen değerin altında bir gerilim düşümü değeri vermektedir.

Güç kaybı hesabı için sistemin akım değerinin bilinmesi gerekmektedir ve şu şekilde hesaplanır;

$$I_{AC\ GES} = \frac{P_{AC\ GES}}{V_{AC\ GES} \times \cos\varphi \times \sqrt{3}}$$

$$I_{AC\ GES} = \frac{450\ 000\ \text{W}}{400 \times 1 \times \sqrt{3}}$$

$I_{AC\ GES}$ = 649,51 A

İletkenin sebep olacağı güç kaybı hesabı Eş. 4.6 kullanılarak yapılmıştır.

$$\text{Güç kaybı } (P_l) = \frac{3 \times (649{,}51)^2 \times 10\ \text{m}}{56\ \text{m}/\Omega\text{mm}^2 \times 300\ \text{mm}^2}$$

Güç kaybı (P_l) = 753,32 W

300 mm^2 kesite sahip bakır iletken kullanılması sistemde 753,32 W güç kaybına sebep olmaktadır. Hesaplanan 753,32 W sistemin toplam gücünün % 0,16 ‘sına eşittir. Bu güç kaybı, sistem için kabul edilebilir sınırlar içerisindedir.

Bağlantı 8 adet 150 mm^2 kesite sahip bakır iletkenli N2XH kablo kullanılarak 4x(2x1x150 mm^2) yapısında olacaktır. Özellikleri verilen (Bkz. Çizelge 5.7) 150 mm^2 kesite sahip bakır iletkenli N2XH kablonun akım taşıma kapasitesi 444 A ‘dir.

Elektrik Mühendisleri Odası’nın yayınladığı Elektrik Tesisleri Genel Teknik Şartnamesi ve Uygulama Esasları kitabında verilen düzeltme faktörü tablosuna göre, kablo tavası içerisinde tek tabaka döşenmiş 2 kablo için düzeltme katsayısı 0,88 ’dir. Verilen sıcaklık faktörleri tablosuna göre ise, 35 °C ortam sıcaklığında sıcaklık faktörü katsayısı 0,94 ‘dir. Bu katsayılar kullanılarak kablonun taşıma kapasitesi aşağıda gösterildiği şekilde hesaplanmıştır [38].

$I_{max\ AC\ kablo} = I_{30\ °C\ AC\ kablo} \times$ Düzeltme faktörü × Sıcaklık faktörü × İletken sayısı
$I_{max\ AC\ kablo} = 444 \times 0{,}94 \times 0{,}88 \times 2$
$I_{max\ AC\ kablo} = 734{,}55$

$I_{max\ AC\ kablo} = 734{,}55 > I_{AC\ GES} = 649{,}51$ (Seçilen 4x(2x1x150 mm^2) kesite sahip bakır iletkenli N2XH kablo kullanım için uygundur)

5.10.4. GES şalt panosu ekipmanlarının seçimi

Sistemde kullanılacak tüm şalt ekipmanları işletme kolaylığı sağlaması açısından aynı şalt panosu içerisinde toplanmıştır. GES şalt panosunda bulunacak ekipmanlar sistemin koruma, kontrol görevini sağlamak için sistem akım, gerilim ve güç değerlerine uygun şekilde seçilmiştir.

Yerleşkenin şebeke bağlantısının yapıldığı güç hücresindeki tek yönlü elektrik sayacı çift yönlü sayaç ile değiştirilecektir. Ayrıca sistemin ürettiği enerjinin miktarını ve kalitesini ölçmek için GES şalt panosunun içerisinde enerji analizörü ve tek yönlü sayaç bulunacaktır. Enerji analizörü ve tek yönlü sayacın enerjiye bağlantısı 3x750/5 akım trafosu ile

sağlanacaktır. İnverterler ve bara arasında AC çıkış akımlarına uygun 4x80 Amper / 36 kA termik manyetik şalter ve 4x80 Amper 300 mA kaçak akım koruma rölesi bulunacaktır. Bara çıkışında sistemi yıldırım darbelerinden ve iç aşırısı gerilim yükselmelerinden korumak için parafudr Tip 1+2 parafudr bulunacaktır. Pano çıkışında tüm sisteme anahtarlama elemanı görevi yapması için acil stop butonu bağlantılı 4x800 Amper / 50 kA termik manyetik şalter kullanılacaktır.

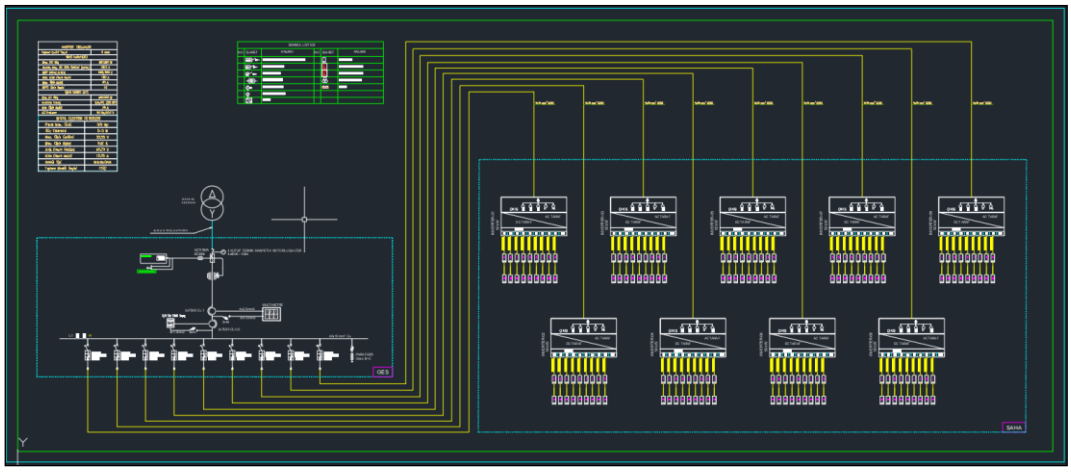
İnvertörlerden gelen AC akım GES şalt panosundaki bara üzerinde toplanır. Baranın sistemin tüm çalışma akımını taşıyacak şekilde seçilmesi gerekmektedir. Çizelge 5.8'de çeşitli boyutlardaki baraların sürekli yüklenme akımları verilmiştir. Sistemin nominal akım değeri olarak hesaplanan 649,51 A için 40x10 çıplak bakır bara tercih edilmiştir.

Çizelge 5.8. Bakır baraların özelliklerini gösteren tablo [41]

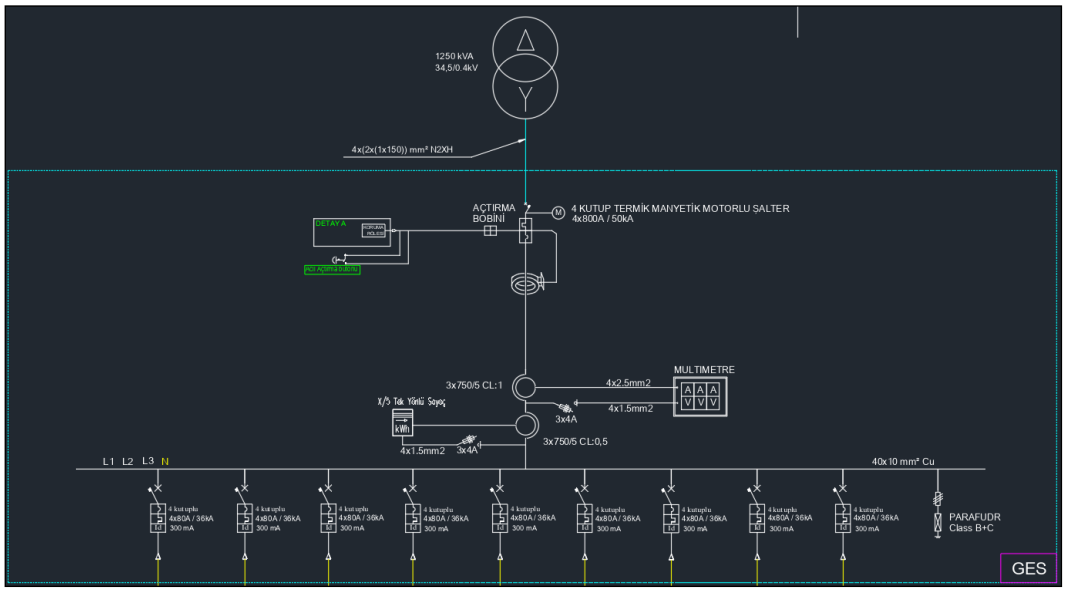
ÇEVRE SICAKLIĞI: 25 ºC ISINMA: 30 ºC										
Boyutlar mm	Kesit mm^2	Ağırlık kg/m	DEVAMLI YÜKLEME AKIMI (A) – 50 Hz. A.C.							
			BOYALI BARA ADEDİ				ÇIPLAK BARA ADEDİ			
			I	II	III	IIII	I	II	III	IIII
12X2	24	0,21	125	250	-	-	110	220	-	-
15X2	30	0,27	155	270	-	-	140	240	-	-
15X3	45	0,40	185	330	-	-	170	300	-	-
20X2	40	0,36	205	350	-	-	185	315	-	-
20X3	60	0,54	245	425	-	-	220	380	-	-
20X5	100	0,89	325	550	-	-	290	495	-	-
25X3	75	0,67	300	510	-	-	270	460	-	-
25X5	125	1,12	385	670	-	-	350	600	-	-
30X3	90	0,80	350	600	-	-	315	540	-	-
30X5	150	1,34	450	780	-	-	400	700	-	-
40X3	120	1,07	460	780	-	-	420	710	-	-
40X5	200	1,78	600	1 000	-	-	520	900	-	-
40X10	400	3,56	835	1 500	2 060	2 800	750	1 350	1 850	2 500
50X5	250	2,23	720	1 200	1 750	2 300	630	1 100	1 500	2 100
50X10	500	4,45	1 025	1 800	2 450	3 330	920	1 620	2 200	3 000
60X5	300	2,67	825	1 400	1 980	2 650	750	1 300	1 740	2 400
60X10	600	5,34	1 200	2 100	2 800	3 800	1 100	1 860	2 500	3 400
80X5	400	3,56	1 060	1 800	2 450	3 300	950	1 650	2 200	2 900
80X10	800	7,12	1 540	2 600	3 300	4 600	1 400	2 300	3 100	4 200
100X5	500	4,45	1 310	2 200	2 950	3 800	1 100	2 000	2 600	3 400
100X10	1 000	8,90	1 880	3 100	4 000	5 400	1 700	2 700	3 600	4 800
120X10	1 200	10,68	2 200	3 500	4 600	6 100	2 000	3 200	4 200	5 500
160X10	1 600	14,24	2 880	4 400	5 800	7 800	2 600	3 900	5 200	7 000

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

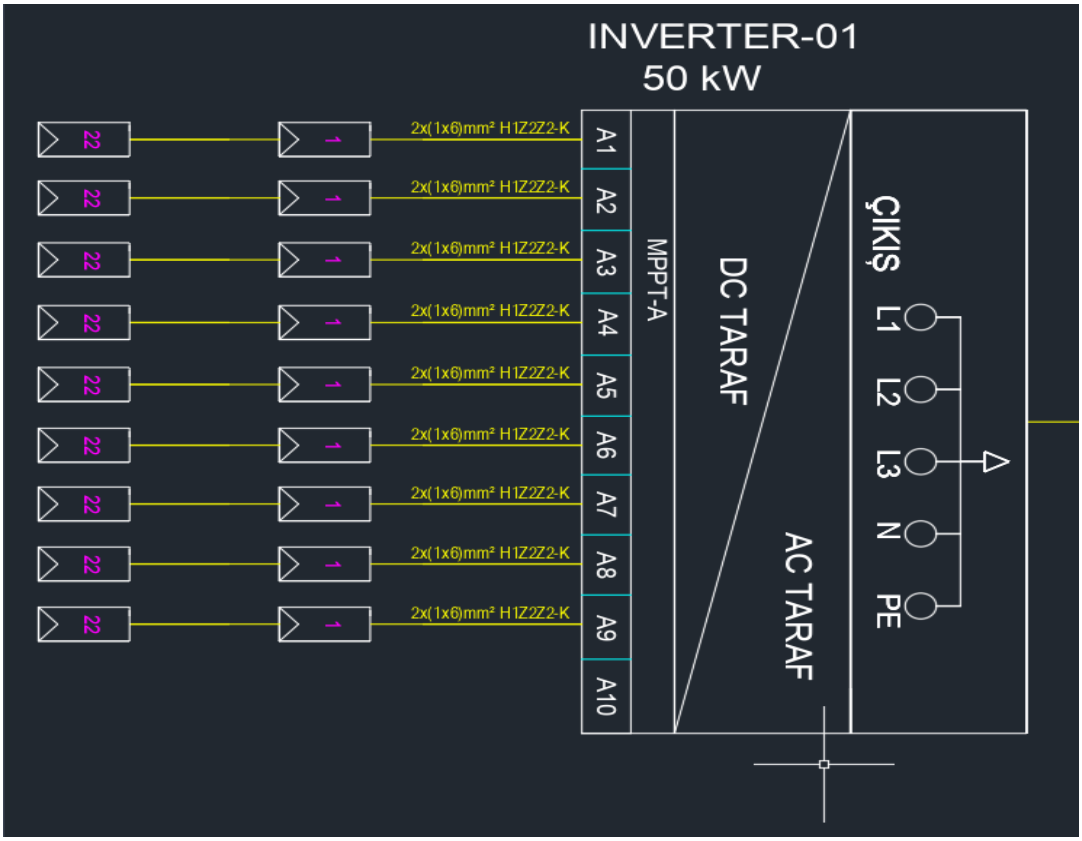
Fotovoltaik panel montajı yapılacak alan, tasarımda yapılan hesaplamalar ve iç elektrik tüketim değerleri göz önüne alınarak sistemi oluşturacak toplam sayı belirlenmiştir. Sistem toplamda 9 adet inverter ve 1 782 adet fotovoltaik panelden oluşacaktır. Her dizi (string) 22 adet panelin birbirine seri şekilde bağlanmasından, her sıra (array) 9 panel dizisinin paralel bağlanmasından oluşacaktır. Sistemin toplam DC kurulu gücü 561 330 Wp, AC çıkış gücü 450 000 W olacaktır. Oluşturulan sisteme ait detay ve genel tek hat çizimleri Resim 6.1, Resim 6.2 ve Resim 6.3'de verilmiştir.



Resim 6.1. Sistemin genel tek hat şeması



Resim 6.2. GES şalt panosu bağlantı şeması



Resim 6.3. Bir array ve inverterin bağlantı şeması

6.1. Üretim Öngörülerinin Değerlendirilmesi

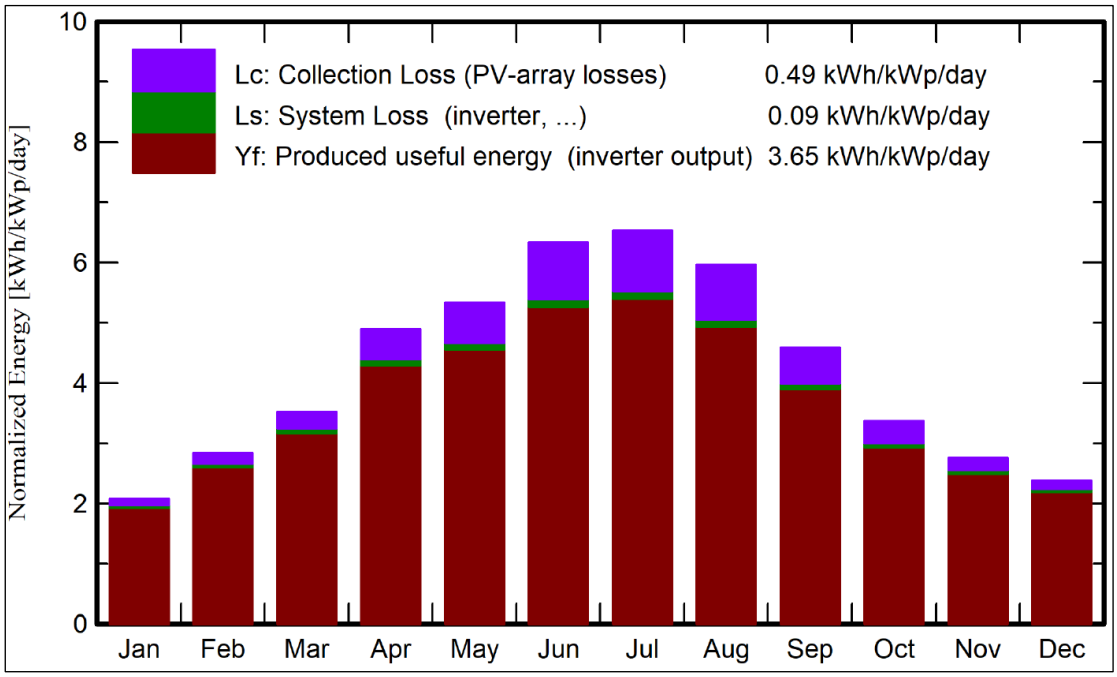
Sistemin yıllık spesifik üretim değeri 1 332 kWh/kWp/yıl'dır ve yılda yaklaşık 747,4 MWh/yıl elektrik enerjisi üretecektir. Ancak bu değerler sistemin birinci yılı için geçerli simülasyon değerleridir. Sistemdeki ekipmanlar zamanla eskimeye uğrayacağı için üretim değeri her geçen yıl düşecektir. Bu düşüşe degredasyon adı verilir ve bu sistemde yıllık % 0,7 olarak alınmıştır.

Kurulacak 3 029 m^2 fotovoltaik alan üzerinde metrekareye düşen yıllık toplam 1 491 kWh/m^2 ışınımın % 18,58'ini kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. Elde edilen yıllık 839,11 MWh elektrik enerjisi, fotovoltaik paneller üzerindeki ısınma, degredasyon kayıpları, uyuşmazlık kayıpları ve DC iletkenlerdeki omik kayıplar sebebi ile 765,39 MWh düşmektedir. Bu miktar inverterin verim oranı ve AC iletkenlerdeki omik kayıplar sebebi ile 747,42 MWh olarak kullanıma verilmektedir. PVsyst'e göre fotovoltaik panellerin Güneş ışınımını elektrik enerjisine dönüştürme oranı hariç tutulduğunda, sistemin ortalama performansının %86,4 olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.1. Sistemin öngörülen aylık ve yıllık üretim verileri

	GlobEff (kWh/m²)	TAmb (°C)	EArray (MWh)	EGrid (MWh)	PR (%)
Ocak	62,0	-0,95	34,48	33,65	0,930
Şubat	76,7	0,93	41,99	40,97	0,918
Mart	105,7	6,08	56,55	55,20	0,900
Nisan	142,2	10,66	74,13	72,36	0,878
Mayıs	159,9	15,95	81,26	79,36	0,855
Haziran	184,0	20,30	90,86	88,73	0,833
Temmuz	196,5	24,20	96,22	94,01	0,827
Ağustos	179,9	24,18	87,94	85,90	0,828
Eylül	133,2	18,24	67,28	65,74	0,850
Ekim	101,0	12,75	52,43	51,19	0,873
Kasım	79,5	5,89	43,12	42,13	0,906
Aralık	70,7	0,84	39,13	38,19	0,921
Yıllık	1 491,4	11,65	765,39	747,42	0,864

Güneş ışınlarının daha düşük eğim açısında geldiği yaz aylarında günlük üretim değerlerinin artmasına rağmen sistemdeki kayıpların arttığı görülmektedir (Bkz. Çizelge 6.1). Bu kayıp sıcaklık ortalamalarının yükselmesinden kaynaklanmaktadır. Ankara ilindeki sıcaklık ortalamaları aşırı derecede yükselmemesine rağmen sistemin DC gerilim tarafı çatı üzerinde, direk olarak Güneş ışınlarına ve çevresel faktörlere maruz kalmaktadır. Bu sebeple fotovoltaik paneller ve DC iletkenler üzerindeki kayıplar bu dönem içerisinde en yüksek seviyelerine ulaşmaktadır.



Şekil 6.1. Günlük ortalama üretim ve kayıp değerlerinin aylık bazda gösterimi

Degredasyonun sebep olacağı verim kaybı ile sistemin ömrü boyunca yapacağı üretim yıllık bazda Çizelge 6.2'de gösterildiği şekilde olacaktır.

Çizelge 6.2. Degredasyon kaybı ile sistemin yılık üretim değerleri

Yıl	Verim Oranı	Üretim Miktarı (MWh)
1	100,0%	747,42
2	98,0%	732,47
3	97,3%	727,24
4	96,6%	722,01
5	95,9%	716,78
6	95,2%	711,54
7	94,5%	706,31
8	93,8%	701,08
9	93,1%	695,85
10	92,4%	690,62
11	91,7%	685,38
12	91,0%	680,15
13	90,3%	674,92
14	89,6%	669,69
15	88,9%	664,46
16	88,2%	659,22
17	87,5%	653,99
18	86,8%	648,76
19	86,1%	643,53
20	85,4%	638,30
21	84,7%	633,06
22	84,0%	627,83
23	83,3%	622,60
24	82,6%	617,37
25	81,9%	612,14

6.2. Proje Gelir ve Gider Kalemleri

Kurulan güneş enerjisi elektrik üretim tesisinin gider kalemlerini sistemin ilk yatırım maliyeti ve sistemin operasyonel giderleri (bakım, onarım ve izleme giderleri) oluşturmaktadır. Ana gelir kaynağı ise, 25 senelik proje ömrü boyunca tasarruf edilen ve ihtiyaç fazlası enerjinin satışından elde edilen gelirlerdir. Hurda bedeli değerlendirmeye alınmamıştır.

6.2.1. İlk yatırım maliyeti

Sistemi oluşturan malzeme kalemleri ve fiyatları Çizelge 6.3'de gösterilmiştir. Proje toplam maliyeti 299 865,85 Euro, kurulu güç başına maliyet 0,53 €/Wp'dir. Tasarımda

transformatör ihtiyacı olmadığı, binanın mevcut transformatörü kullanılacağı için maliyet ortalama güneş enerjisi santrali maliyetinin altında görünmektedir. Malzeme fiyatları Euro cinsinden alınmış olup hesaplamalar yapılırken 18,1474 ₺/€ kur oranı ile dönüştürülecektir.

Çizelge 6.3. İlk yatırım maliyeti içerisindeki başlıca harcama kalemleri

Malzeme/Ürün Cinsi	Birim	Miktar	Fiyat (€)
315 Wp Monokristal PERC Güneş Paneli	Adet	1 782	186 476,64
50 kW Dizi İnverter	Adet	9	20 828,00
Taşıyıcı Sistem (Konstrüksiyon)	Set	1	19 920,00
GES Şalt Panosu	Adet	1	5 354,44
SCADA Sistemi	Set	1	6 920,00
DC Konnektör	Adet	200	920,00
1x6 mm^2 Solar Kablo	Metre	5 900	7 159,52
5x35 mm^2 N2XH Kablo	Metre	72	1 071,36
1x150 mm^2 N2XH Kablo	Metre	80	1 912,64
Elektrik Sarf Malzemesi	Set	1	4 853,28
Mekanik Sarf Malzemesi	Set	1	6 906,77
Topraklama Sistemi	Set	1	5 961,48
Elektrik ve Mekanik Montaj	Set	1	20 068,76
Geçici Kabul ve Denetim Hizmetleri	Set	1	9 512,96
Başvuru ve Yasal İzin Süreci	Set	1	3 000,00
Anahtar Teslim Toplam Fiyat			299 865,85

6.2.2. Tasarruf edilen ve ihtiyaç fazlası enerjinin satışından elde edilen getiri

Yapılan fizibilite çalışması sonucunda, sistemde üretilen enerjinin 594 316,42 kWh/yıl'lık kısmının iç elektrik tüketiminde değerlendirileceği, geriye kalan kısmın ise şebeke işletmecisine satışının yapılacağı öngörülmektedir. Üretilen enerjinin büyük kısmının şebeke işletmecisine satışı üzerinden gelir elde etmek için kullanılmasındansa iç tüketimde ihtiyacında kullanılması istenen bir sonuçtur. Çünkü tasarruf edilen elektrik enerjisi, vergiler ve yasal ücretlendirmelere tabi birim fiyat üzerinden hesaplanıyor iken; şebeke işletmecisine satış, ham elektrik birim fiyatı üzerinden hesaplanmaktadır. Ayrıca şebeke işletmecisine satıştan hat kullanım bedeli tahsis edilmektedir.

Şebeke bağlantılı olarak tasarlanacak sistem Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği'nde geçen "Madde 5, (1), c)" kapsamında, ürettiği ihtiyaç fazlası elektrik enerjisinin yerel şebeke işletmecisine satışını gerçekleştirebilecektir. Bu satışın ve tasarruf edilen elektriğin getirisi, Elektrik Piyasası Düzenleme Kurumu'nun yayınladığı ve her üç ayda bir güncellediği elektrik tarife tablolarında bulunan ilgili birim fiyatlar üzerinden

yapılacaktır. Yerleşke orta gerilim, tek terimli, perakende tek zamanlı kullanıcı sınıfı içerisinde yer almaktadır.

Satışı yapılacak enerji miktarı, üretilen enerji miktarından iç tüketimde kullanılacak miktar çıkartılarak hesaplanmıştır. İhtiyaç fazlası elektriğin proje ömrüne boyunca yıllara göre dağılımı tabloda gösterildiği şekildedir.

Çizelge 6.4. Proje ömrü boyunca üretilen enerjinin kullanımı

Yıl	Üretilen Enerji Miktarı (MWh/yıl)	İç Tüketimde Kullanılan Enerji Miktarı (MWh/yıl)	Satışı Yapılan Enerji Miktarı (MWh/yıl)
1	747,42	594,32	153,10
2	732,47	594,32	138,16
3	727,24	594,32	132,92
4	722,01	594,32	127,69
5	716,78	594,32	122,46
6	711,54	594,32	117,23
7	706,31	594,32	112,00
8	701,08	594,32	106,76
9	695,85	594,32	101,53
10	690,62	594,32	96,30
11	685,38	594,32	91,07
12	680,15	594,32	85,84
13	674,92	594,32	80,60
14	669,69	594,32	75,37
15	664,46	594,32	70,14
16	659,22	594,32	64,91
17	653,99	594,32	59,68
18	648,76	594,32	54,44
19	643,53	594,32	49,21
20	638,30	594,32	43,98
21	633,06	594,32	38,75
22	627,83	594,32	33,52
23	622,60	594,32	28,28
24	617,37	594,32	23,05
25	612,14	594,32	17,82

Proje ömrü boyunca elde edilecek tasarruf ve ihtiyaç fazlası elektriğin satışı kaynaklı getiriyi en doğru şekilde öngörebilmek adına 2014-2021 yılları arasında elektrik fiyatlarında yaşanan artışlar incelenmiş ve elektrik fiyatının yılda ortalama % 17,93 artışa uğradığı tespit edilmiştir. Elektrik fiyatlarının değerlendirmesi yapılırken proje ömrü boyunca bu artış oranı kullanılmıştır. 2022 senesinde elektrik fiyatlarında yaşanan yüksek artışın sebebi Dünya'da yaşanan politik gerginlikler ve enerji krizi gibi olağandışı olaylardır. Bu sebeple 2022 senesinde yaşanan artış istisna olarak kabul edilmiş ve değerlendirmeye alınmamıştır.

Çizelge 6.5. 2014-2022 yılları arasında elektrik fiyatlarındaki artış

Yıl	Ocak Ayı Birim Elektrik Fiyatı (kr/kWh)	Artış Miktarı
2022	172,9011	160 %
2021	66,5016	12 %
2020	59,1934	32 %
2019	44,7785	58 %
2018	28,3090	9 %
2017	26,0173	0 %
2016	26,0174	5 %
2015	24,8528	9 %
2014	22,7307	-

Tasarruf edilen getirinin hesaplanması

2022 yılı tasarruf edilen enerjinin birim fiyatı olarak; 01.10.2022 tarihli orta gerilim, tek terimli, perakende tek zamanlı kullanıcı nihai elektrik satış fiyatı olan 342,5872 kr/kWh kullanılmıştır. Tesis her sene 594 316,42 kWh/yıl enerjiden tasarruf etmiştir. Degredasyon kayıpları sonucu oluşan verim düşüşü bu miktarı etkilememektedir (Bkz Çizelge 6.2). Proje ömrü boyunca her sene, tasarruf edilen elektrik enerjisinden elde edilen getiri elektrik zamları da hesaba katılarak aşağıda gösterildiği şekilde hesaplanır.

Çizelge 6.6. Proje ömrü boyunca tasarruf edilen enerjiden elde edilen gelir

Yıl	Tasarruf Edilen Enerji Miktarı (MWh)	Tasarruf Edilen Elektrik Birim Fiyatı (kr/kWh)	Gelir (₺/yıl)
1	594,32	342,5872	2 036 051,98
2	594,32	404,0131	2 401 116,10
3	594,32	476,4526	2 831 636,22
4	594,32	561,8806	3 339 348,59
5	594,32	662,6258	3 938 093,80
6	594,32	781,4346	4 644 194,02
7	594,32	921,5458	5 476 898,00
8	594,32	1 086,7790	6 458 905,81
9	594,32	1 281,6384	7 616 987,63
10	594,32	1 511,4362	8 982 713,51
11	594,32	1 782,4367	10 593 314,04
12	594,32	2 102,0276	12 492 695,25
13	594,32	2 478,9212	14 732 635,50
14	594,32	2 923,3917	17 374 197,05
15	594,32	3 447,5559	20 489 390,58
16	594,32	4 065,7026	24 163 138,31
17	594,32	4 794,6831	28 495 589,01
18	594,32	5 654,3698	33 604 848,12
19	594,32	6 668,1983	39 630 197,39
20	594,32	7 863,8063	46 735 891,78
21	594,32	9 273,7867	55 115 637,18
22	594,32	10 936,5767	64 997 870,93
23	594,32	12 897,5049	76 651 989,18
24	594,32	15 210,0275	90 395 690,85
25	594,32	17 937,1854	106 603 638,21

İhtiyaç fazlası enerjinin satışından elde edilen getirinin hesaplanması

2022 yılı ihtiyaç fazlası enerjinin birim satış fiyatı olarak; orta gerilim, tek terimli, perakende tek zamanlı kullanıcı ham tarife fiyatı olan 313,8212 kr/kWh kullanılmıştır. Ayrıca lisanssız elektrik üretim santrallerinde şebekeye veriş yönünde dağıtım bedeli uygulanmaktadır. Bu dağıtım bedeli, tez kapsamındaki işletme için 28,7660 kr/kWh'dir.

İhtiyaç Fazlası Elektriğin Birim Satış Fiyatı = 313,8212 kr/kWh - 28,7660 kr/kWh
İhtiyaç Fazlası Elektriğin Birim Satış Fiyatı = 285,0552 kr/kWh

Çizelge 6.7. Proje ömrü boyunca enerji satışından elde edilecek getiri

Yıl	Satışı Yapılan Enerji Miktarı (MWh/yıl)	İhtiyaç Fazlası Elektrik Birim Satış Fiyatı (kr/kWh)	Yıllık Satış Getirisi (₺/yıl)
1	153,10	285,0552	436 430,91
2	138,16	336,1656	464 431,60
3	132,92	396,4401	526 962,68
4	127,69	467,5218	596 986,62
5	122,46	551,3485	675 180,11
6	117,23	650,2052	762 221,55
7	112,00	766,7870	858 770,04
8	106,76	904,2719	965 436,54
9	101,53	1 066,4079	1 082 745,49
10	96,30	1 257,6148	1 211 084,10
11	91,07	1 483,1052	1 350 636,31
12	85,84	1 749,0259	1 501 297,41
13	80,60	2 062,6263	1 662 564,66
14	75,37	2 432,4552	1 833 397,91
15	70,14	2 868,5944	2 012 043,02
16	64,91	3 382,9334	2 195 809,29
17	59,68	3 989,4933	2 380 789,99
18	54,44	4 704,8095	2 561 512,83
19	49,21	5 548,3818	2 730 504,07
20	43,98	6 543,2067	2 877 746,80
21	38,75	7 716,4037	2 990 009,19
22	33,52	9 099,9548	3 050 013,66
23	28,28	10 731,5767	3 035 411,46
24	23,05	12 655,7485	2 917 519,57
25	17,82	14 924,9242	2 659 767,75

6.2.3. Operasyonel giderler

Tesisin yıllık operasyonel giderleri; rutin bakım ve onarım bedeli, uzaktan izleme sistemi hizmet bedeli, sistem işletim bedeli ve sigorta bedeli olmak üzere 4 kalemde incelenmiştir. Yıldan yıla operasyonel giderler sabit kalmayacak ve bedelleri artış gösterecektir. Bu artışı

öngörmek için elektrik fiyatlarında yaşanan yıllık artış oranı dikkate alınmıştır. Sistem 250 kW üzeri kurulu güce sahip olduğu için şebeke işletmecisine ve görevli tedarik şirketine işletim bedelleri ödenmesi gerekmektedir.

Çizelge 6.8. Proje operasyonel gider kalemleri

Gider Kalemi	Fiyat (₺)
Bakım ve Onarım Bedeli	82 400,00
Uzaktan İzleme Sistemi Hizmet Bedeli	10 000,00
Şebeke İşletmecisi ve Görevli Tedarik Şirketine Ödenen Bedeller	6 512,90
Sigorta Bedeli	32 000,00
Toplam	130 912,90

Çizelge 6.9. Proje ömrü boyunca operasyonel giderler

Yıl	Yıllık Operasyonel Giderler (₺/yıl)
1	130 912,90
2	154 385,58
3	182 066,92
4	214 711,52
5	253 209,29
6	298 609,72
7	352 150,44
8	415 291,01
9	489 752,69
10	577 565,35
11	681 122,82
12	803 248,14
13	947 270,53
14	1 117 116,13
15	1 317 415,06
16	1 553 627,58
17	1 832 193,00
18	2 160 705,21
19	2 548 119,65
20	3 004 997,51
21	3 543 793,56
22	4 179 195,74
23	4 928 525,54
24	5 812 210,17
25	6 854 339,45

6.3. Ekonomik Analiz Yöntemleri ile Projenin Değerlendirilmesi

Bu başlık altında net bugünkü değer, geri ödeme süresi, iç karlılık oranı ve LCOE yöntemleri kullanılarak projenin ekonomik açıdan hesaplamaları yapılmıştır. Euro bazında hazırlanan giderler Türk Lirasına çevrilerek tüm hesaplar Türk Lirası cinsinden yapılmıştır. Yatırım planlamasında herhangi bir kredi veya finansman aracı kullanılmamıştır. Fotovoltaik panel, taşıyıcı sistem ve kablolarda Türkiye menşeili ürünler seçilmiş ve % 18 KDV muafiyetinden yararlanılmıştır.

6.3.1. Projenin net bugünkü değer yöntemiyle incelenmesi

Net bugünkü değer hesabında proje boyunca faiz oranı % 30 olarak öngörülmüştür. Buna göre Eş. 4.7 kullanılarak projenin gelir ve giderlerinin bugünkü değerleri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır.

Çizelge 6.10. Proje gelirlerinin net bugünkü değer yöntemiyle hesaplanması

Yıl	Tasarruf Geliri (₺)	Elektrik Satışı Geliri (₺)	Toplam Gelir (₺)	Faiz Oranı (%)	NBD (₺)
1	2 036 051,98	436 430,91	2 472 482,90	30	1 901 909,92
2	2 401 116,10	464 431,60	2 865 547,70	30	1 695 590,36
3	2 831 636,22	526 962,68	3 358 598,90	30	1 528 720,48
4	3 339 348,59	596 986,62	3 936 335,22	30	1 378 220,38
5	3 938 093,80	675 180,11	4 613 273,90	30	1 242 488,79
6	4 644 194,02	762 221,55	5 406 415,57	30	1 120 080,69
7	5 476 898,00	858 770,04	6 335 668,04	30	1 009 692,08
8	6 458 905,81	965 436,54	7 424 342,35	30	910 146,22
9	7 616 987,63	1 082 745,49	8 699 733,11	30	820 381,31
10	8 982 713,51	1 211 084,10	10 193 797,61	30	739 439,22
11	10 593 314,04	1 350 636,31	11 943 950,35	30	666 455,43
12	12 492 695,25	1 501 297,41	13 993 992,66	30	600 649,91
13	14 732 635,50	1 662 564,66	16 395 200,17	30	541 318,84
14	17 374 197,05	1 833 397,91	19 207 594,96	30	487 827,25
15	20 489 390,58	2 012 043,02	22 501 433,60	30	439 602,25
16	24 163 138,31	2 195 809,29	26 358 947,60	30	396 126,99
17	28 495 589,01	2 380 789,99	30 876 379,01	30	356 935,20
18	33 604 848,12	2 561 512,83	36 166 360,95	30	321 606,24
19	39 630 197,39	2 730 504,07	42 360 701,46	30	289 760,68
20	46 735 891,78	2 877 746,80	49 613 638,59	30	261 056,21
21	55 115 637,18	2 990 009,19	58 105 646,37	30	235 184,09
22	64 997 870,93	3 050 013,66	68 047 884,59	30	211 865,81
23	76 651 989,18	3 035 411,46	79 687 400,64	30	190 850,17
24	90 395 690,85	2 917 519,57	93 313 210,41	30	171 910,61
25	106 603 638,21	2 659 767,75	109 263.405,96	30	154 842,77
			Toplam Gelirin Net Bugünkü Değeri (₺)		17 672 661,89

Çizelge 6.11. Proje giderlerinin net bugünkü değer yöntemiyle hesaplanması

Yıl	Toplam Gider (₺)	Faiz Oranı (%)	NBD (₺)
0	5 441 785,53	-	5 441 785,53
1	130 912,90	30	100 702,23
2	154 385,58	30	91 352,42
3	182 066,92	30	82 870,70
4	214 711,52	30	75 176,47
5	253 209,29	30	68 196,62
6	298 609,72	30	61 864,83
7	352 150,44	30	56 120,92
8	415 291,01	30	50 910,31
9	489 752,69	30	46 183,48
10	577 565,35	30	41 895,52
11	681 122,82	30	38 005,68
12	803 248,14	30	34 477,00
13	947 270,53	30	31 275,95
14	1 117 116,13	30	28 372,09
15	1 317 415,06	30	25 737,85
16	1 553 627,58	30	23 348,19
17	1 832 193,00	30	21 180,40
18	2 160 705,21	30	19 213,88
19	2 548 119,65	30	17 429,95
20	3 004 997,51	30	15 811,65
21	3 543 793,56	30	14 343,60
22	4 179 195,74	30	13 011,85
23	4 928 525,54	30	11 803,75
24	5 812 210,17	30	10 707,81
25	6 854 339,45	30	9 713,64
	Toplam Giderin Net Bugünkü Değeri (₺)		6 431 492,32

Projenin gelir ve giderlerinin net bugünkü değerleri birbirleri ile karşılaştırıldığında projenin 11 241 169,57 ₺ kar elde edileceği görülmektedir.

6.3.2. Projenin geri ödeme süresinin belirlenmesi

Eş. 4.8 kullanılarak hesaplamalar yapıldığında yatırımın kendisini 3,45 senede amorti edeceği öngörülmektedir. Güneş enerjisi santrallarının ömrünün 25 sene olduğu düşünülerek; amortisman süresinden arta kalan yıllarda elde edilen kazanç projeyi ekonomik açıdan uygulanabilir hale getirmektedir.

6.3.3. Projenin iç karlılık oranının belirlenmesi

Projenin iç karlılık oranı hesabı Eş. 4.9 kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplama insan eli ile hesaplanamayacak kadar karmaşık bir matematik işlem içermektedir. Bu sebeple internet yazılımları ve deneme yanılma yolu ile hesaplama yapılmıştır [42]. Projenin iç karlılık oranı % 59,79 olarak bulunmuştur.

6.3.4. Üretilen enerjinin LCOE hesabı

Elde edilen LCOE değerini günümüz elektrik fiyatları ile karşılaştırabilmek adına, LCOE hesabı yapılırken net bugünkü değer yöntemi ile elde edilmiş günümüz maliyetleri kullanılmıştır. Proje ömrü boyunca üretilen enerjinin LCOE değeri Eş. 4.10 kullanılarak hesaplanmış ve 294,9425 kr/kWh olarak bulunmuştur.

7. SONUÇ

Enerji ihtiyacının her geçen gün arttığı ve alternatif kaynakların arandığı dünyada, yenilenebilir enerji kaynakları konusunda bilincin ve uygulamaların artması gerekmektedir. Bu tez kapsamında fotovoltaik uygulamalar hakkında literatüre katkı sağlamak için şebeke bağlantılı, çatı tipi bir güneş enerjisi santrali tasarlanmış ve ekonomik analizi yapılmıştır.

Santralin tasarımı, 3 boyutlu çizimi ve gölgelenme analizinde PVsyst programı; elektriksel ekipmanların seçiminde mühendislik hesaplamaları kullanılmıştır. Mevcut koşullar altında verim kaybını minimuma indirecek güncel ekipmanlar seçilmiştir. Santral ilk senesinde üzerine düşen 4 516 239 kWh Güneş ışınımından 747,42 MWh elektrik enerjisi üretecek ve kullanıma verecektir. Sistemin ortalama verim değeri PVsyst programına göre % 86,4'dür.

Projenin tüm gelir ve giderleri net bugünkü değer hesabı yapılarak karşılaştırıldıklarında, projenin 11 241 169,57 ₺ kar getireceği hesaplanmıştır. 25 yıllık ömür öngörülen projenin geri ödeme süresi 3,45 yıl olarak hesaplanmıştır. Proje ömründen kısa sürede kendisini ödemekte ve kalan yıllarında üreticiye kar sağlamaktadır. Projenin iç karlılık oranı % 59,79 olarak hesaplanmıştır ve gelecekte öngörülen faiz oranı olan % 30'dan yüksektir. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'nun 01.10.2022 tarihli orta gerilim, tek terimli, perakende tek zamanlı kullanıcı sınıfı içerisindeki bir abonenin elektrik birim fiyatı 342,5872 kr/kWh'dir. Aynı abone grubundaki lisanssız bir santralin şebeke işletmecisine satış fiyatı 285,0552 kr/kWh'dir. Tez kapsamında kurulacak enerji üretim santralinin birim enerji maliyeti LCOE hesabı kullanılarak 294,9425 kr/kWh olarak bulunmuştur. Üretilen enerjinin birim maliyeti piyasa alış fiyatından düşük, lisanssız piyasa satış fiyatından yüksektir. Bu veriye göre; santralde tüketim yapmak için üretim yapmanın karlı, satış yapmak için üretim yapmanın ise karsız olduğu sonucuna varılmaktadır. Tez kapsamında yapılan tüm ekonomik analiz yöntemleri projenin ekonomik olarak doğru bir yatırım olacağını göstermektedir.

Çizelge 7.1. Proje ekonomik değerlendirmesinin sonuçları

Yöntem	Çıktı	Yorum	Sonuç
Net Bugünkü Değer	+ 11 241 169,57 ₺	Pozitif Yönde Getiri	Uygundur
İç Karlılık Oranı	% 59,79	Faiz Oranı : % 30	Uygundur
Proje Geri Ödeme Süresi	3,45 yıl	Proje Ömrü: 25 yıl	Uygundur
LCOE	294,9425 kr/kWh	Elektrik Pazar Fiyatı: 342,5872 kr/kWh	Uygundur

Projenin karlı bir yatırım olmasındaki en büyük etkenlerden bir tanesi, proje alanının zaten mevcut bir endüstriyel altyapıya sahip olmasıdır. Hali hazırda bulunan transformatör, topraklama sistemi, paratoner gibi elektriksel altyapı ekipmanlarından tasarruf edilmiştir. Diğer bir nedeni ise fabrika binasının güneş enerjisi uygulaması için çok uygun azimut ve eğim açısında bir çatıya sahip olmasıdır. Ayrıca çatı uygulaması olması zemin inşaatı, beton, konstrüksiyon, tel çit, CCTV ve aydınlatma gibi ek maliyetlerin olmamasını sağlamıştır.

PVsyst programı verilerine göre tez kapsamındaki ekipmanların üretilmesi ve bir araya getirilerek sistemin kurulması toplam 963,75 tCO_2 emisyonuna sebep olmaktadır. Sistem 25 senelik ömrü boyunca toplam 16 882,72 MWh elektrik enerjisi üretecektir. Bu miktarda elektrik enerjisi bir doğalgaz santralinde üretilirse MWh başına 0,499 tCO_2, toplamda 8 424,47 tCO_2 emisyonuna sebep olacaktır. Yani sistemin kullanılmasıyla birlikte bir doğalgaz santraline kıyasla Dünya üzerinde 7 460,72 tCO_2 emisyonuna engel olunacaktır. Bu rakam 13 264 adet ağacın 25 senede yapacağı CO_2 emilimine eşittir [43].

Santralin 16 882,72 MWh'lik enerji üretimi, Enerji Kaynaklarının ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına Dair Yönetmelik'te yayınlanan çevrim katsayılarına göre 1 451,92 TEP'e (ton eşdeğer petrol) eşittir. Bu miktarda bir enerjiyi üretmek için fosil yakıtla çalışan bir santralde 13 199,21 ton Elbistan linyiti, 1 759,89 bin m^3 doğalgaz veya 1 423,44 ton motorin yakılması gerekmektedir [44].

KAYNAKLAR

1. Alkan, S. (2019). *Çatı üzeri doğu-batı yönelimli optimizerli güneş enerji santralinin pilot uygulaması ve güney yönelimli güneş enerji santraline göre üretim değerlendirmesi ve ekonomik analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Arel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

2. İnternet: Ocak, M. E. (2014). *Güneş enerjisinin kaynağı nedir?* Web: https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/gunes-enerjisinin-kaynagi-nedir, Son Erişim Tarihi: 07.02.2022.

3. İnternet: Almerini, A. (2022). *Where is solar power used the most?*. Web: https://www.solarreviews.com/blog/where-is-solar-power-used-the-most, Son Erişim Tarihi: 07.02.2022.

4. Görgün, T. (2009). *Yenilenebilir enerjiler ve teknolojileri*. Ankara: İhracatı Geliştirme Etüd Merkezi, 27-35.

5. İnternet: Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. (1999). *Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyel atlası (GEPA).* Web: https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/, Son Erişim Tarihi: 17.12.2021.

6. İnternet: Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2020). *1985-2020 Yılları aylık ortalama günlük güneşlenme süresi*. Web: https://mgm.gov.tr/FILES/resmi-istatistikler/parametreAnalizi/Turkiye-Gunluk-Guneslenme-Suresi-2020.pdf, Son Erişim Tarihi: 07.02.2022.

7. Tekkale, G. (2018). *Türkiye'nin çeşitli illerinde yapılacak arazi tipi lisanssız güneş enerjisi santrali yatırımlarının teknik ve finansal analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.

8. İnternet: Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (2020). *Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre yıllar itibariyle gelişimi (2006-2020).* Web: https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri, Son Erişim Tarihi: 07.02.2022.

9. İnternet: Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (2020). *Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre gelişimi (2010-2020).* Web: https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri, Son Erişim Tarihi: 07.02.2022.

10. İnternet: Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (2020). *2020 yılında işletmeye giren üretim tesisleri*. Web: https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri, Son Erişim Tarihi: 07.02.2022.

11. Ismael, A. I. (2012). *Monokristal güneş pili sistemlerinde elektrik enerji analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

12. Akar, A. (2016). *Bir güneş enerji santralinin kurulumu ve performansının analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

13. Sağlam, E. (2018). *Fotovoltaik santrallerin kurulum aşamaları ve işletimdeki santrallerin gerçekleşen üretim değerlerinin simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.

14. Özek, E. (2009). *Peyzaj mimarisi uygulamalarında güneş enerjisinin kullanımının değerlendirmesine yönelik bir araştırma ve yalova-termal yolu örneği*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

15. Karamanav, M. (2007). *Güneş enerjisi ve güneş pilleri*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

16. Sayın, S. (2006). *Yenilenebilir enerjinin ülkemiz yapı sektöründe kullanımının önemi ve yapılarda güneş enerjisinden yararlanma olanakları*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

17. Duran, F. (2014). *Pv/t hibrit sistemlerin termodinamik ve performans analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

18. Gündüz, M. S. (2019). *Bir fotovoltaik güneş enerji santralinin tekno-ekonomik analizi; kütahya-simav örneği*. Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.

19. Girgin, M. H. (2011). *Bir fotovoltaik güneş enerjisi santralinin fizibilitesi, karaman bölgesinde 5 mw'lık güneş enerjisi santrali için enerji üretim değerlendirmesi ve ekonomik analizi.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.

20. Koçak, M. E. (2018). *Büyükçekmece ilçesindeki güneş enerji santralinin tasarımı ve ekonomik analizi.* Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

21. Öncin, F. (2018). *Çatı tipi güneş enerji santralleri ve dağıtım tesislerine bağlantı kriterleri*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

22. Atalay Ayran, Z. (2019). *Kütahya ili güneş enerji potansiyelinin araştırılması ve örnek bir güneş enerji santralinin ekonomik analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.

23. Çelik, A. N., Koç, F. (2020). Polikristal tür bir fotovoltaik panelin I-V karakteristiğinin analitik modellenmesi ve deneysel doğrulanması. *Düzce Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8, 2491-2515.

24. International Renewable Energy Agency. (2012). *Solar Photovoltaics. Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, Volume I: Power Sector Issue 4/5*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency Secretariat, 4-12.

25. Sayın, S., Koç, İ. (2011). Güneş enerjisinden aktif olarak yararlanmada kullanılan fotovoltaik (pv) sistemler ve yapılarda kullanım biçimleri. *Selçuk Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(3), 89-106.

26. İnternet: The Solar Future. (2017). *How exactly do solar panels work?*. Web: https://www.thesolarfuture.co.za/2017/12/03/exactly-solar-panels-work/, Son Erişim Tarihi: 07.02.2022.

27. İnternet: Power İnfo Today. (2018). *Hanergy's MiaSole Achieves Flexible Substrate Thin-Film Solar Cell Efficiency of 20.56 Percent.* Web: https://www.powerinfotoday.com/solar-energy/hanergys-miasole-achieves-flexible-substrate-thin-film-solar-cell-efficiency-of-20-56-percent/, Son Erişim Tarihi: 03.03.2022.

28. Kantaroğlu, F. (2010). Fotovoltaik sistemler. *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, 68, 28-34.

29. İnternet: Kretzer, M. (2020). *Dye-sensitized Solar Cells.* Web: https://materiability.com/portfolio/dye-sensitized-solar-cells/, Son Erişim Tarihi: 03.08.2022.

30. Chander, S., Purohit, A., Sharma, A., Nehra, S. P., Dhaka, M. S. (2015). Impact of temperature on performance of series and parallel connected mono-crystalline silicon solar cells. *Elsevier Energy Reports*, 1, 175-180.

31. Kalogirou, S. A. (2009). Solar Energy Engineering: Processes and Systems. *Journal of Power and Energy Engineering*, 3(1), 482-486.

32. İnternet: What Next Now. (2021). *What are the advantages and disadvantages of micro-inverters?*. Web: https://www.whatnextnow.com/home/solar/what-are-the-advantages-and-disadvantages-of-micro-inverters, Son Erişim Tarihi: 20.12.2021.

33. İnternet: Bakhtiari, A. (2019). *Solar inverters*. Web: https://ae-solar.com/solar-inverters/, Son Erişim Tarihi: 20.12.2021.

34. İnternet: Stoker, L. (2020). *KSTAR targets european market following spanish central inverter certification.* Web: https://www.pv-tech.org/kstar-targets-european-market-following-spanish-central-inverter-certificat/, Son Erişim Tarihi: 20.12.2021.

35. İnternet: Öztürk, İ., Aksoy, İ. (2019). *Solar kablo sistemleri, güncel standartlar, malzeme seçimi, uygulamadaki problemler ve çözüm önerileri.* Web: https://www.emo.org.tr/ekler/279810276b9648b_ek.pdf, Son Erişim Tarihi: 07.02.2022.

36. Assadeg, J., Sopian, K., Fudholi, A. (2019). Performance of grid-connected solar photovoltaic power plants in the middle east and north africa. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 9(5), 3375-3383.

37. İnternet: Newkirk, M. (2016). *How solar power works - on-grid, off-grid and hybrid systems*. Web: https://www.cleanenergyreviews.info/blog/2014/5/4/how-solar-works, Son Erişim Tarihi: 20.12.2021.

38. İnternet: Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021). *Ankara iline ait genel istatistik verileri*. Web: https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A&m=ANKARA, Son Erişim Tarihi: 28.12.2021.

39. Aktacir, M. A., Yıldırım, E. (2018). Binaya entegre fotovoltaik sistemlerde azimut ve eğim açısı etkilerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi,* 34(2), 609-620.

40. Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği. (2011). *Elektrik tesisleri genel teknik şartnamesi ve uygulama esasları*. Ankara: Elektrik Mühendisleri Odası, 380-403.

41. Elektrik Mühendisleri Odası İzmir Şube. (1987). *Orta gerilim transformatörlerinin tasarımı*. İzmir: Elektrik Mühendisleri Odası, 123-124.

42. İnternet: Wolfram Alpha Computational Intelligence, Web: https://www.wolframalpha.com, Son Erişim Tarihi: 24.03.2022.

43. International Energy Agency. (2018). *CO_2 emissions from fuel combustion highlights (2018 edition)*. Paris: International Energy Agency Publications, 147-148.

44. Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2020). *Enerji kaynaklarının ve enerjinin kullanımında verimliliğin artırılmasına dair yönetmelik*. Ankara: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 13-14.



Gazili olmak ayrıcalıktır