



T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2 MW GÜÇTE BİR GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİ TASARIMI VE
ANALİZİ; ARDANUÇ ÖRNEKLEMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Cenk Batur GÜZEL

Danışman
Doç. Dr. Murat TÖREN

RİZE
2025

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında, Doç. Dr. Murat TÖREN danışmanlığında, Cenk Batur GÜZEL tarafından hazırlanan *2 MW Güçte Bir Güneş Enerji Santrali Tasarımı ve Analizi; Ardanuç Örneklemesi* adlı bu tez çalışması, 08/01/2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliğiyle/~~oy çokluğuyla~~ başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Ünvanı, Adı SOYADI	İmza
Başkan	: Doç. Dr. Hasan EROĞLU	
Üye	: Doç. Dr. Rıdvan DEMİR	
Üye	: Doç. Dr. Murat TÖREN	

ETİK BEYAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “2 MW Güçte Bir Güneş Enerji Santrali Tasarımı ve Analizi; Ardanuç Örnekleme” adlı tez, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılacak bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.

08/01/2025

Cenk Batur GÜZEL

ÖN SÖZ

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak hazırladığım bu çalışmada 2 MW Güçte Bir Güneş Enerji Santrali Tasarımı ve Analizi; Ardanuç Örnekleme üzerine çalışmalarda bulundum.

Tezimin her aşamasında her türlü yardımını ve birikimini esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Murat TÖREN hocama teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen ilk öğretmenim babam Şemsi GÜZEL ve annem Fikriye GÜZEL'e teşekkür ederim.

Çalışmamın her anında kendilerinden esirgediğim ilgi ve zamana rağmen bana destek ve sevgilerini esirgemeyen değerli eşim Medine GÜZEL'e, değerli evlatlarım Çağan Aras GÜZEL ve Sezin GÜZEL'e , kardeşim Mert Umur GÜZEL'e, bu çalışmamda bana katkısı bulunan herkese çok teşekkür ederim.

Cenk Batur GÜZEL

RİZE/2025

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	I
ETİK BEYAN	II
ÖN SÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET	VII
ABSTRACT.....	VIII
KISALTMALAR	IX
TABLolar LİSTESİ.....	X
ŞEKİLLER LİSTESİ	XI
GİRİŞ	13
1.FOTOVOLTAİK MODÜL TEMELLERİ	24
1.1. Fotovoltaik Modüller	24
1.2. P-N Yarıiletken.....	24
1.3. Fotovoltaik	26
1.4. Fotovoltaik Doldurma Faktörü.....	29
1.5. Fotovoltaik Verimliliği	29
1.6. Fotovoltaik Teknolojileri.....	30
1.6.1. Monokristal.....	30
1.6.2. Polikristal Silikon	31
1.6.3. İnce Film Tabaka	32
1.6.4. Çoklu Yarıiletken Bileşimi	33
1.7. Tek Hücreden Fotovoltaik Modülüne	34
2. FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMİ.....	36
2.1. Fotovoltaik Güç Sistemleri Türleri	36
2.1.1. Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemi.....	36
2.1.2. Bağımsız Fotovoltaik Sistemi.....	37
2.1.3. Hibrit Fotovoltaik Sistemi	38
2.2. Evirici.....	39
2.3. Fotovoltaik Modüllerinin Farklı Yerleşimleri	39
3. TÜRKİYE'DEKİ FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİ İÇİN GEREKSİNİMLER VE TARİFELER	42
3.1. Fotovoltaik Sisteminin Şebeke Etkisi	42

3.1.1. Aşırı Gerilim.....	42
3.1.2. Gerilim Dengesizliği	42
3.1.3. Harmonikler.....	43
3.1.4. İstenmeyen Ada	43
3.1.5. Sistemler Arası Arızanın Bağlantı Kesme Süresi	43
3.1.6. Frekans Dalgalanması	43
3.1.7. Mevcut Karşı Önlemler	44
3.2. Türkiye'nin Teknik Gereksinimleri.....	44
3.2.1. Nominal Frekans	44
3.2.2. Gerilim Nominal Değeri ve Kabul Edilebilir Aralık	44
3.2.3. Gerilim Harmonikleri	45
3.2.4. Faz-Faz Dengesizliği	45
3.2.5. Koruma Cihazı.....	45
3.2.6. Güç Faktörü Gereksinimi	45
3.3. Türkiye'nin Mevzuat Gereklilikleri.....	45
3.4. Türkiye Tarifeleri	46
4. ŞEBEKEYE BAĞLI FOTOVOLTAİK SİSTEM BOYUTLANDIRMASI	47
4.1. Coğrafi Konumu.....	47
4.2. Güneş Kaynağı	48
4.3. Meteorolojik Veriler	50
4.4. Bileşen Seçimi.....	50
4.4.1. Fotovoltaik Modülleri.....	51
4.4.2. Eviriciler	53
4.4.3. Sistemin ve Diğer Elektrikli Bileşenlerin Montajı	55
4.5. Sistemin Boyutlandırılması.....	55
4.5.1. Güneş Enerji Santralinin Güç Boyutlarının Hesaplanması	55
4.5.2. Gerilim Seviyelerinin Hesaplanması	58
5. ŞEBEKEYE BAĞLI FOTOVOLTAİK SİSTEMİNİN SİMÜLASYONU.....	67
5.1 PV*SOL Programı	67
5.1.1. Proje Tasarımı.....	67
5.1.2. Kullanıcı Ara Yüzü	68
5.1.3. Proje Verileri.....	69
5.1.4. Sistem Türü, İklim ve Şebeke.....	69
5.1.5. 3D Tasarım	70

5.1.6. Kablolar	71
5.1.7. Planlar ve Parça Listesi	72
5.1.8. Finansal Analiz	73
5.1.9. Simülasyon Sonuçlar Bölümü	73
5.1.10. Simülasyon Sunumu	74
5.2. PV*SOL Programı Simülasyon Sonuçları	75
6. SONUÇ	84
KAYNAKÇA	86



Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ana Bilim Dalı : Elektrik Elektronik Mühendisliği
Tez Türü : Yüksek Lisans Tezi
Danışman : Doç.Dr. Murat TÖREN
Hazırlayan : Cenk Batur GÜZEL
Yıl : 2025
Sayfa Sayısı : 90

ÖZET

**2 MW GÜÇTE BİR GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİ TASARIMI VE ANALİZİ;
ARDANUÇ ÖRNEKLEMESİ**

Bu tezin temel amacı, fotovoltaik teknolojileri kullanarak Artvin ili için güneş enerjisinden elde edilecek enerji kazanımının hesaplanması ve ülkemize olan katkısıdır. İlk bölüm Fotovoltaik temellerini ve yapılarını anlatmıştır. İkinci bölüm, fotovoltaik güç sistemlerini ve fotovoltaik sistem çeşitlerini açıklamaktadır. Üçüncü bölüm Türkiye'nin teknik ve yasal gerekliliklerini sunarken, fotovoltaik sistem kurmak için yasaları ve tarifeleri açıklamaktadır. Dördüncü bölüm, Artvin'in coğrafi durumunu ve meteorolojik verilerini, bölgenin yıl boyunca güneş ışınımını ve ortam sıcaklığını içerir. Sistemin boyutlandırılması ve hesaplaması yapılmıştır. Farklı fotovoltaik sistemlerin bileşen seçimini yapılmıştır. Sistemler için en doğru modül ve eviricilerin seçimi için dikkatli bir çalışma yapılmıştır. Son kısım, farklı fotovoltaik sistemlerinin boyutlandırılmasını ve simülasyonunu gösterir. Bu bölümde her sistem için gerekli modül ve evirici sayısı, toplam gerekli alan ve ekonomik analiz sunulmuştur. Farklı fotovoltaik sistemlerinin simülasyonu PVSOL yazılımı tarafından yapılmıştır. Bu yazılım, yıl boyunca küresel güneş ışınımı, yaygın ışınım ve ortam sıcaklığı dâhil olmak üzere geniş bir meteorolojik veri tabanına sahiptir. Ayrıca, çeşitli üreticilerin güneş enerjisi bileşenlerinin bir veri tabanı bulunmaktadır. Farklı fotovoltaik sistemlerinin sonuçlarının analizinden sonra, bu sistem için hangi teknolojinin tercih edileceğini görmek mümkün olmuştur. İlk olarak, güneş enerjisinden elde edilen enerjinin hesaplamaları ve her bir fotovoltaik sisteminin geri ödemesi dâhil olmak üzere, hangi hücre teknolojisinin finansal olarak en uygun olacağını görmek için ekonomik bir analiz yapılmıştır. Sonuçların analizinden sonra monokristal teknolojisi diğerlerine göre üstünlük göstermiştir. Yani polikristal teknolojisi ile öz tüketimli şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemin kurulumu, yatırımın geri dönüşünü daha hızlı sağlamak ve diğer fotovoltaik sistemlere göre daha düşük fiyat ve daha yüksek getiri ile elektrik üretmektedir.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik Modül, Enerji, Elektrik, Yenilenebilir Enerji, Güneş Enerji Santrali, Güneş Radyasyonu.

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies

Department : Electrical Electronics Engineering
Thesis Type : Master Thesis
Supervisor : Asst. Prof. Dr. Murat TÖREN
Author : Cenk Batur GÜZEL
Year : 2025
Pages : 90

ABSTRACT

DESIGN AND ANALYSIS OF A 2 MW SOLAR POWER PLANT; ARDANUC SAMPLING

The main purpose of this thesis is to calculate the energy gain to be obtained from solar energy for Artvin province using photovoltaic technologies and its contribution to our country. The first section describes the basics and structures of photovoltaic modules. The second section describes photovoltaic power systems and types of photovoltaic systems. The third section presents the technical and legal requirements of Turkey and explains the laws and tariffs for installing a photovoltaic system. The fourth part contains the geographical situation and meteorological data of Artvin, the solar radiation and the ambient temperature of the region throughout the year. The system has been dimensioned and calculated. The component selection of different photovoltaic systems has been made. A careful study has been carried out for the selection of the most correct modules and inverters for the systems. The last part shows the sizing and simulation of different photovoltaic systems. In this section, the number of modules and inverters required for each system, the total required area and economic analysis are presented. The simulation of different photovoltaic systems was carried out by PVSOL software. This software has an extensive meteorological database, including global solar radiation, widespread radiation and ambient temperature throughout the year. In addition, there is a database of solar energy components from various manufacturers. After analyzing the results of different photovoltaic systems, it was possible to see which technology would be preferred for this system. First, an economic analysis was conducted to see which cell technology would be most financially viable, including calculations of the energy derived from solar energy and the payback of each photovoltaic system. After the analysis of the results, monocrystalline technology has shown superiority over others. In other words, the installation of a self-consuming grid-connected photovoltaic system with monocrystalline technology will provide a faster return on investment and generates electricity at a lower price and higher return than other photovoltaic systems.

Key Words: PV Modül, Electricity, Renewable Energy, Solar Power Plant, Solar Radiation, Energy.

KISALTMALAR

AC	:	Alternatif Akım
AM	:	Hava Kütlesi
A-Si	:	Amorf Silikon
CIS	:	Bakır İndiyum Selenit
CB	:	İletim Bandı
CoG	:	Üretim Maliyeti
DC	:	Doğru Akım
DVR	:	Dinamik Gerilim Düzeltici
FF	:	Doldurma Faktörü
GES	:	Güneş Enerji Santrali
KwH	:	Kilowatt Saat
MPP	:	Maksimum Güç Noktası
MWh	:	Megawatt Saat
PCS	:	Güç Koşullandırma Sistemi
PV	:	Photovoltaik
STATCOM	:	Statik Senkron Kompansatör
STP	:	Standart Test Koşulları
SVC	:	Statik Var Kompansatör
TEİAŞ	:	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TVR	:	Tristör Gerilim Regülatörü
VB	:	Enerji Bandı

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Farklı yüzeyler için albedo değerleri.....	23
Tablo 2. Artvin'in coğrafi özelliği	48
Tablo 3. Polikristal fotovoltaik modülünün temel özellikleri ve maliyeti.....	52
Tablo 4. Monokristal fotovoltaik modülünün temel özellikleri ve maliyeti	53
Tablo 5. Evirici ana özellikleri ve maliyeti	54
Tablo 6. Fotovoltaik sistem kurulumunun ve elektrik bileşenlerinin maliyeti.....	55
Tablo 7. Modüllerin maksimum çıkış devresi gerilimi	58
Tablo 8. Tüm modüllerin minimum çıkış gerilimi	59
Tablo 9. Modüllerin maksimum akımı	60
Tablo 10. Dizi başına maksimum fotovoltaik modül sayısı	61
Tablo 11. Dizi başına minimum fotovoltaik modül sayısı	61
Tablo 12. Dizi başına optimum fotovoltaik modül sayısı	62
Tablo 13. Dizi gerilimleri	63
Tablo 14. Evirici başına minimum dizi sayısı	64
Tablo 15. Evirici başına maksimum dizi sayısı.....	64
Tablo 16. Evirici başına optimum dizi sayısı	65
Tablo 17. Tüm sistem için gerekli toplam modül sayısı.....	65
Tablo 18. 1.modül alanı enerji sonuçları	77
Tablo 19. 2.modül alanı enerji sonuçları	78
Tablo 20. Sistemin kazanç ve kayıpları.....	78
Tablo 21. Finansal analiz ve kazanç	79
Tablo 22. Üretilen enerji ve tasarruf miktarı	80

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Güneş radyasyonunun spektrum dağılımı	21
Şekil 2. Güneşin göreceli konumu.....	22
Şekil 3. P-N bileşimi olgusu	25
Şekil 4. Diyot IV eğrisi.....	26
Şekil 5. Yüke bağlı ideal bir fotovoltaiik eşdeğer devresi	27
Şekil 6. Gerçek bir fotovoltaiik eşdeğer devresi.....	28
Şekil 7. Bir fotovoltaiik I-V eğrisi	28
Şekil 8. Sıcaklık ile modülünün IV eğrisinin değişimi.....	29
Şekil 9. Bir fotovoltaiik hücre	34
Şekil 10. Fotovoltaiik hücrelerin bağlanması	35
Şekil 11. Şebekeye bağlı fotovoltaiik sistemi.....	37
Şekil 12. Bağımsız fotovoltaiik sistemi	38
Şekil 13. Hibrit sistem	39
Şekil 14. Çatı üstü panel	40
Şekil 15. Tek yönlü fotovoltaiik panelleri	40
Şekil 16. Güneş izleyicili fotovoltaiik panelleri	41
Şekil 17. Artvin'in genel görüntüsü.....	47
Şekil 18. Türkiye topraklarında yıllık güneş ışıınımı	48
Şekil 19. Artvin topraklarında yıllık güneş ışıınımı.....	49
Şekil 20. Ardauç global radyasyon değerleri.....	49
Şekil 21. Ardauç güneşlenme süreleri	50
Şekil 22. Ardauç fotovoltaiik tipi-alan-üretilebilecek enerji	51
Şekil 23. Güç faktörüne bağlı olarak ac aktif güç	56
Şekil 24. Fotovoltaiik dizisi gücünün NPR'ye bağımlılığı	57
Şekil 26. PV*SOL program ara yüzü genel görünümü	68
Şekil 27. PV*SOL proje verileri ara yüzü	69
Şekil 28. Sistem türü, iklim ve şebeke ara yüzü	70
Şekil 29. Panel yerleşimi 3D görüntüsü	71
Şekil 30. PV*SOL kablolar ara yüzü.....	72
Şekil 31. PV*SOL planlar ve parçalar ara yüzü	72

Şekil 32. PV*SOL finansal analiz sayfası	73
Şekil 33. PV*SOL sonuç ara yüzü	74
Şekil 34. PV*SOL sunum ara yüzü	74
Şekil 35. 1. modül alanı	76
Şekil 36. 2. modül alanı	76
Şekil 37. Sistemin ufuk çizgisi	77
Şekil 38. Polikristal fotovoltaiik enerji akış grafiği	80
Şekil 39. Monokristal fotovoltaiik paneli enerji akış grafiği	81
Şekil 40. Monokristal fotovoltaiik paneli aylık üretim ve tasarruf grafiği	82
Şekil 41. Polikristal fotovoltaiik paneli aylık üretim ve tasarruf grafiği	82



GİRİŞ

Güneş enerjisi, Dünya'nın enerji gereksinimlerini karşılamak için büyük bir potansiyele sahiptir. Güneşten her yıl Dünya'ya ulaşan enerji miktarı, insanların tüm enerji ihtiyaçlarını karşılayacak kadar yüksektir. Bu potansiyel, güneş enerjisinin sürdürülebilir ve temiz bir enerji kaynağı olarak kullanılmasını teşvik etmektedir.

Türkiye, güneş enerjisi potansiyeli yüksek bir ülkedir. Coğrafi konumu nedeniyle, yıllık güneşlenme süresi oldukça uzun ve güneş ışığı yoğundur. Bu durum, güneş enerjisi üretimi için önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli, genellikle megawatt saat (MWh) veya kilovat saat (kWh) cinsinden ifade edilir. Ülkemizde yapılan araştırmalara göre, Türkiye'nin yıllık ortalama güneş enerjisi potansiyeli 1.500 kWh/m² ile 2.200 kWh/m² arasında değişmektedir. Bu değerler, güneş enerjisi sistemlerinin etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Türkiye, güneş enerjisi potansiyelini kullanmak için birçok önlem almış ve teşvikler sunmuştur. Güneş enerjisi alanında yatırımları teşvik etmek amacıyla ülkemizde çeşitli teşvik mekanizmaları ve destekler bulunmaktadır. Bu teşvikler arasında, güneş enerjisi üretimi için alım garantisi (feed-in tariff), devlet destekli alım programları, vergi indirimleri ve finansman imkanları yer almaktadır.

Son yıllarda, Türkiye'de güneş enerji santralleri hızla yaygınlaşmış ve büyük ölçekli projeler gerçekleştirilmiştir. Özellikle Güneydoğu Anadolu Bölgesi, güneş enerjisi potansiyeli açısından öne çıkmaktadır. Ayrıca, bireysel ve ticari kullanımlar için çatı üstü fotovoltaik modüller de giderek popüler hale gelmektedir.

Ancak, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelini tam anlamıyla kullanabilmesi için daha fazla yatırım ve teknolojik gelişim gerekmektedir. İleri teknolojilerin kullanımı, maliyetlerin düşmesi ve enerji altyapısının güçlendirilmesi, güneş enerjisi üretiminin artmasını sağlayacaktır. Özetlemek gerekirse, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli yüksektir ve bu potansiyeli değerlendirmek için devlet teşvikleri ve yatırımlar yapılmaktadır. Güneş enerjisi sektöründeki gelişmelerle birlikte, güneş enerjisinden elektrik üretiminde önemli bir artış beklenmektedir.

Artvin, Türkiye'nin kuzeydoğusunda yer alan bir ilimizdir. Coğrafi konumu ve iklim özellikleri göz önüne alındığında, güneş enerjisi potansiyeli konusunda bazı belirlemeler yapabiliriz. Artvin, Karadeniz Bölgesi'nde bulunması nedeniyle diğer bölgelere kıyasla daha fazla yağış alır ve bulutlu gün sayısı genellikle yüksektir. Bu durum, güneş ışığının yoğunluğunu ve süresini etkileyebilir. Bulutlu günlerde güneş ışığı miktarı azalabilir ve dolayısıyla güneş enerjisi üretimi üzerinde etkisi olabilir. Ancak, bu durum güneş enerjisi üretim potansiyelini tamamen ortadan kaldırmaz. Artvin'de hala önemli bir güneş enerjisi potansiyeli bulunmaktadır. Güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırmak ve güneş enerjisinden maksimum fayda sağlamak için teknolojik gelişmeler, optimizasyon ve doğru yer seçimi gibi faktörler önemlidir.

Artvin'de güneş enerjisi potansiyelinin daha ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmesi için yerel iklim verileri, güneşlenme süresi, ortalama güneş ışığı yoğunluğu ve güneş radyasyonu gibi parametrelerin detaylı analizinin yapılması gerekmektedir. Bu analizler, Artvin'de güneş enerjisi sistemlerinin kurulumu ve verimliliği için daha kesin bilgiler sağlayacaktır. Sonuç olarak, Artvin'de güneş enerjisi potansiyelinin bulutlu günlerin etkisiyle kısıtlanabileceği, ancak yine de güneş enerjisi sistemlerinin kurulabileceği ve güneş enerjisinden faydalanmanın mümkün olduğu söylenebilir. Güneş enerjisi sistemleri için detaylı bir yerel analiz yapılması, potansiyeli daha iyi anlamak ve projeleri optimize etmek için önemlidir.

Güneş enerjisi çeşitli teknolojiler aracılığıyla kullanılabilir. Güneş panelleri güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürürken, güneş termal sistemler güneş enerjisini ısıya dönüştürerek elektrik veya sıcak su üretir. Fotovoltaik sistemler evlerde, işletmelerde ve büyük ölçekli enerji santrallerinde kullanılırken, güneş termal sistemler genellikle sıcak su üretimi veya ısıtma/soğutma amaçlarıyla kullanılır.

Güneş enerjisi birçok avantaja sahiptir. Bunların başında çevre dostu olması gelir. Güneş enerjisi üretimi sırasında sera gazı salınımı veya hava kirliliği oluşmaz. Ayrıca güneş enerjisi kaynağı sınırsızdır ve her yerde mevcuttur. Güneş enerjisi aynı zamanda enerji maliyetlerini düşürme potansiyeline sahiptir ve enerji bağımsızlığını sağlayabilir.

Güneş enerjisi üretimi bazı zorluklarla karşılaşabilir. Güneş enerjisi, güneş ışığına ve iklim koşullarına bağımlıdır, bu nedenle enerji üretimi dalgalanabilir. Ayrıca güneş panellerinin ve güneş termal sistemlerin maliyeti yüksek olabilir. Bununla

birlikte, teknolojik gelişmeler ve devlet teşvikleri bu zorlukları azaltmaya yardımcı olmaktadır.

Mohanty vd. (2016) fotovoltaik teknolojisi üzerine yaptıkları çalışmalarında, şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemlerinin uzak kırsal alanlarda olmak üzere farklı bölgeler için çok yönlülüğe ve esnekliğe sahip olduğundan bahsetmişlerdir. Birçok alanda çok çeşitli uygulamalar için şebekeden bağımsız fotovoltaik tabanlı sistem kurmak için geleneksel olarak basit tasarımlar kullanılırken, artık şebekeden bağımsız solar fotovoltaik hibrit sistemi için akıllı bir tasarım yaklaşımı uyarlamanın mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Yük gereksinimlerine ve bunların elektriksel özelliklerine ve sahaya özgü mevcut enerji kaynaklarına bağlı olarak bir dizi şebekeden bağımsız sistem yapılandırması mümkündür. Şebekeden bağımsız sistem tasarımının genel amacı, makul bir fiyata maksimum verimlilik, güvenilirlik ve esneklik sağlayacak şekilde olmalıdır. Bu bölümde, üç temel fotovoltaik sistemi, yani bağımsız, şebekeye bağlı ve hibrit sistemler kısaca açıklanmaktadır. Bu sistemler, farklı yük profillerini ve mevcut güneş ışınımlarını dikkate alır. Daha sonra bu sistemlerin boyutlandırılması ve tasarımına ilişkin sistematik bir yaklaşım sunulmuştur. Fotovoltaik bileşenlerinin seçimi ve sistem boyutlandırması için yönergeler sağlanmıştır. Pil enerjisi depolama, şebekeden bağımsız fotovoltaik sisteminin önemli bileşenidir. Yük ve fotovoltaik çıkış değişimleri nedeniyle, pil enerji depolaması sık sık şarj ve deşarj olacaktır. Bu nedenle, bir fotovoltaik sisteminde kullanılan pil türü, bir otomobil uygulamasındakiyle aynı değildir. Pil seçimi için ayrıntılı yönergeler de sağlanmıştır. Şu anda, dünya çapındaki fotovoltaik sistemlerinin çoğu maksimum güç noktalarında çalışmakta ve ağdaki enerji yönetimine etkin bir şekilde katkıda bulunmamaktadır. Düzgün bir şekilde yönetilip kontrol edilmediği takdirde, şebeke dışı sistemde büyük ölçekli fotovoltaik jeneratörlerinin konuşlandırılması, şebekede gerilim dalgalanmaları, frekans sapmaları, güç kalitesi sorunları, arıza akımlarında ve koruma ayarlarında değişiklikler ve şebekede tıkanıklık gibi problemler yaratabilir. Bu sorunlara olası bir çözüm, aktif jeneratör kavramıdır. Aktif jeneratör çok esnek olacak ve geleneksel bir jeneratör sisteminde olduğu gibi güç dağıtımını yönetebilecek. Bu aktif jeneratör, uygun güç koşullandırma cihazlarıyla enerji depolama teknolojilerinin kombinasyonuna sahip fotovoltaik dizisini içermektedir. Fotovoltaik dizisi çıkışı hava durumuna bağlıdır ve bu nedenle fotovoltaik güç çıkışı tahmin edilebilirliği, şebekeden bağımsız sistemin

operasyonel planlaması için önemlidir. Pek çok fotovoltaik sistemi güç durum cihazı üreticisi, geleneksel elektrik santrali gibi enerji depolama pilleri ile koordineli olarak fotovoltaik sisteminden güç sağlamak için çalışabilen yeni tip eviriciler tasarlamakta ve geliştirmektedir.

Mohanty ve Gujar (2016) yaptıkları çalışmalarında, bileşen seçimi, fotovoltaik sistem tasarımı ve kurulumunun en önemli görevlerinden biri olmasına rağmen, genellikle göz ardı edilir ve düşünce sürecine zayıf bir şekilde entegre edilir. Bu özel hususa özel dikkat gösterilmeli ve yükleyici arasında farkındalık yaratılmalıdır. Bu bölüm, solar PV tabanlı şebeke dışı uygulamada kullanılan bileşenlerin uygun seçimi için benimsenmesi gereken kılavuzlar, metodoloji ve yaklaşımlarla ilgilenmektedir. Bu yaklaşımlar, son teknoloji sistem tasarımının yanı sıra saha deneyimine ve bu sektördeki yazarlar tarafından yürütülen kapsamlı araştırma çalışmalarına dayanarak geliştirilmiştir. Okuyucuların güneş fotovoltaik sisteminin performansını önemli ölçüde etkileyebilecek her bir bileşenin önemini anlamalarına yardımcı olacaktır. Ayrıca, şebeke dışı uygulamalar için solar PV bileşenlerinin doğru seçiminde uygulayıcılara ve tasarımcılara rehberlik edecektir.

Gul vd. (2016) yaptıkları çalışmalarında, tasarımcının fotovoltaik sisteminin performansını değerlendirmek için ihtiyaç duyacağı adımlar hakkında ayrıntılı bir tartışma sunmaktadır. Gerçek kurulumlara ilişkin dört örnek olay incelemesi sunmaktadır. Gelen güneş radyasyonu, fotovoltaik hücre sıcaklığı, fotovoltaik modüllerinden kaynaklanan termal kayıplar ve bunların ölçülen verimliliği ile ilgili ayrıntılı ölçümler hakkında materyal sağlanmaktadır. Böylece, son ölçülen veri setini kullanarak modelleme prosedürlerinin doğruluğunu değerlendirmek mümkündür.

Ranaweera vd.(2016) yaptıkları çalışmada, kırsal elektrifikasyon için şebekeden bağımsız hibrit yenilenebilir enerjiye dayalı güç sisteminin, şebeke elektriğinin uygulanabilir olmadığı alanlar için çekici bir çözüm haline geldiğinden bahsetmişlerdir. Kaynakların mevcudiyetine bağlı olarak, şebekeden bağımsız bir hibrit enerji sisteminde tek bir enerji kaynağı veya bir enerji depolama sistemi dahil olmak üzere birkaç kaynağın birleşimi kullanılır. Sri Lanka'nın Siyambalanduwa bölgesindeki kırsal bir topluluğa elektrik sağlamak için tasarlanmış, yenilenebilir kaynaklara dayalı, şebekeden bağımsız bir hibrit enerji sisteminin optimum boyutlandırılmasına ilişkin bir çalışma sunulmuştur. Hibrit sistemlerin ilk 10 yıl

şebekeden bağımsız çalışması ve sonraki 10 yıl şebeke bağlantılı çalışması dikkate alınarak projenin enerji maliyet analizi de yapılmıştır. Hibrit sistemin şebekeden bağımsız veya şebekeye bağlı modda çalıştırılıp çalıştırılmadığına bakılmaksızın ekonomik olarak uygun olduğu ifade edilmiştir.

Baghdadi vd. (2018) yaptıkları çalışmada Fas'ın Tetouan eyaletindeki şebekeye bağlı 5.94 kWp gücündeki bir fotovoltaik sistemini, PVsyst programını kullanarak üç fotovoltaik teknolojisinin (amorf, mono-kristal ve poli-kristal) karşılaştırılmalı performans analizini sunmuşlardır. 2016 yılı boyunca toplanan verilere dayanarak üç teknolojiye elde edilen enerjiyi ve nihai verimi değerlendirmişlerdir. Elde edilen sonuçlarla, her bir teknolojinin simüle edilmiş nihai veriminin, yılın tüm aylarında referans verimini yakından takip ettiğini göstermişlerdir ve mono-kristal teknolojiyi diğer fotovoltaik teknolojiler ile karşılaştırdıklarında daha fazla enerji ürettiğini gözlemlemişlerdir.

Khan vd. (2020) çalışmalarında Pakistan'daki Lahore Yönetim Bilimleri Üniversitesi'nde konumlandırılmış, poli-kristal ve ince film ile tasarlanmış 42 kWp gücünde fotovoltaik sistemin elektrik üretimini aynı çevresel koşullarda (ışınım, sıcaklık, yağış ve toz) PV*SOL programı ile simüle ederek değerlendirmişlerdir ve simüle edilmiş sonuçları bir yıllık ölçülen gerçek veriler ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, ince filmin yıllık enerji üretiminin poli-kristalden daha yüksek olduğunu ve ince filmin performans oranı açısından daha iyi bir seçim olduğunu göstermiştir. Maliyet analizi ele alındığında, poli-kristal panelin düşük elektrik maliyeti ile Pakistan'da daha uygulanabilir bir ticari çözüm haline getirildiği gözlemlenmiştir. Poli-kristal sisteminin uygulanması için gereken alan, ince film tabanlı sistemlerden önemli ölçüde daha düşüktür ve bu da alan kısıtlamaları olan alanlar için daha iyi bir çözüm haline gelmiştir.

Luqman vd. (2023) yaptıkları çalışmalarında, Nijerya'nın kuzeydoğusunda kurulacak olan 1 MW'lık güneş enerji santralinin tekno-ekonomik analizi yapılmış ve 1 MW'lık güneş enerji santralinin çevresel etkisi değerlendirilmiştir. Araştırma sonucunda yıllık 5,74 kWh/m² güneş ışınımı ile maksimum yıllık enerji üretiminin 1.550,98 MWh olacağı tahmin edilmiştir. Projenin karlılığı ve ekonomik sürdürülebilirliği incelendiğinde , %11,9 oranında iyi bir iç getiri belirlenmiştir. Önerilen güneş enerji santralinin basit geri ödeme süresi 11,4 yıl olarak

hesaplanmıştır. Maksimum sera gazı (GHG) emisyon azaltımının 61,7 hektarlık ormanın emici karbon emisyonu değerine eşdeğer olduğu görülmüştür.

Chong vd. (2024) yaptıkları çalışmada, Çin'de fotovoltaik enerji üretiminin sistem seviyelendirilmiş elektrik maliyetine dayalı maliyet muhasebesi ve ekonomik rekabetçilik değerlendirmesi hakkında detaylı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, Çin'in fotovoltaik ekonomik performansı S-LCOE perspektifinden araştırılmış ve iki soruyu yanıtlanmaya çalışılmıştır. Sübvansiyonlar olmadan, Çin'in mevcut fotovoltaik jeneratörleri genel olarak geleneksel kömürle çalışan elektrik jeneratörleriyle rekabet edebilir mi? Bu ne kadar mümkün? Yeni inşa edilen fotovoltaik jeneratörlerinin S-LCOE'si gelecekte nasıl gelişecek? Bölgesel farklılıklar nelerdir? Çin'in fotovoltaik üretiminin geleneksel enerji biçimlerine karşı ekonomik rekabet gücü eyalet düzeyinde değerlendirilmiş ve tüm fotovoltaik sistemi için S-LCOE eşitliğine ulaşma süresi bölgesel bölünmeye dayalı olarak tahmin edilmiştir. Sonuç olarak Çin'in fotovoltaik projelerinin S-LCOE'sinin son 12 yılda düşüş eğilimi gösterdiği anlaşılmıştır.

Huda vd. (2024) yaptıkları çalışmada, Endonezya'da yaygın olarak kullanılan iki fotovoltaik sistemin, konutsal fotovoltaik ve çiftlik tabanlı fotovoltaik sistemlerinin tekno-ekonomik analizini sağlamayı amaçlamışlardır. Çalışma, PVsyst programı tarafından simülasyon kullanılarak potansiyel güç çıkışının hesaplanmasını, ekonomik hesaplamaları ve hassasiyet testini içermektedir. Sonuç, ortalama Küresel Yatay Işınımın 4,8 kWh/m² olduğunu ve konuma ve mevsimlere bağlı olarak dalgalandığını göstermiştir. Ekonomik analiz, her iki fotovoltaik sisteminin de karlı yatırımlar ve daha az riskli projeler olduğunu ortaya çıkarmıştır. Daha ileri ekonomik analizler, fotovoltaik sisteminin farklı boyutlarının ekonomik kârlılık açısından rekabetçi olmadığını, ancak geri ödeme döneminin yıllık kâra ve yatırım büyüklüğüne bağlı olduğunu doğrulamıştır. Bu bulgular, Endonezya'da fotovoltaik teknolojilerine yatırım yapmanın her finansal kökene sahip insanlara nasıl fayda sağlayabileceği konusunda genel bir bakış sunmuştur.

Saeidavi vd. (2024) yaptıkları çalışmada İran'ın Tebriz ve Ahvaz şehirlerindeki iklim koşulları altında 21 kW'lık şebekeye bağlı fotovoltaik enerji santralinin performansını simüle etmişlerdir. Ortam sıcaklığının, toz birikiminin ve gelen güneş ışınımının fotovoltaik santralının çıkış gücü, performans oranı, çeşitli kayıplar ve karbondioksit emisyon azaltımları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar sistemin

güç çıkışının Ahvaz ve Tebriz'de sırasıyla yıllık 34,82 MWh ve 35,27 MWh olduğunu göstermiştir. Ayrıca Ahvaz'daki fotovoltaik sisteminin yıllık performans oranı %78,1 iken Tebriz'deki tesiste bu değer %85,8 olarak tespit edilmiştir. Fotovoltaik santralinin sıcaklığa bağlı kayıpları da Ahvaz'da %12,94, Tebriz'de ise %6,45 olarak elde edilmiştir. Ahvaz ve Tebriz'de bu tür güneş enerjisi santrallerinin geliştirilmesinin sırasıyla yıllık 15.406 ve 16.117 karbondioksit emisyon tasarrufu sağlayabileceği tespit edilmiştir. Simülasyon sonuçları gelecekteki büyük ölçekli fotovoltaik tesislerine uygulanabileceğini göstermiştir.

Türkiye'nin kullandığı enerjinin çoğu fosil kaynaklardan sağlanmaktadır. Enerji üretiminde sırası ile en büyük pay kömür, petrol ve doğal gaz gibi yenilenemeyen kaynaklardır. Küçük bir kısmı ise yenilenebilir enerjiden sağlanmaktadır.

Türkiye'nin 2024 yılı kasım ayı sonu itibarıyla kurulu gücü 115.144 MW'a ulaşmıştır. Kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı; %28'i hidrolik enerji, %21,4'ü doğal gaz, %19'u kömür, %10,9'u rüzgâr, %16,8'i güneş, %1,5'i jeotermal ve %2,3'ü ise diğer kaynaklardan elde edilmektedir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024).

Enerjiye büyük ölçüde bağımlı olan dünya ekonomisi için elektrik enerjisi üretiminde, fosil yakıtların sınırlı ve maliyetlerin yüksek olması, sera gazı emisyonlarının azaltılması ihtiyacı ile birlikte yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı çekici hale gelmiştir. Dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli büyük olup gelecek yıllarda artan enerji talebinde yenilenebilir enerji kaynakları payının, akıllı teknolojilerle ve güç elektroniği sayesinde artacağı öngörülmektedir. 2035 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi içerisindeki payının %31, ulaşımında %6, ve ısıtmada ise %14 olarak gerçekleşmesi beklenmektedir (Ellabban et al., 2014).

Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminde önemli çaba sarf etmektedir ve bu konuda devlet desteği sağlamakta ve yatırımlar yapmaktadır. 12. kalkınma planı doğrultusunda 2030 yılı itibarıyla toplam enerji üretimi içerisinde yenilenebilir enerji üretim payının % 70, 2040 yılı itibarıyla %100 olması hedeflenmektedir.

2024 yılı Ocak ayı sonu itibarıyla Türkiye’de Kurulu güç 107.271 MW’a ulaşmıştır. Kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı; %29,8’i hidrolik enerji, %23,7’si doğal gaz, %20,3’ü kömür, %11,1’i rüzgâr, %11’i güneş, %1,6’sı jeotermal ve %2,5’i ise diğer kaynaklar şeklindedir. Elektrik enerjisi üretim santrali sayısı, 2024 yılı Ocak ayı sonu itibarıyla 15.959’a (Lisanssız santraller dâhil) yükselmiştir. Mevcut santrallerin 760 adedi hidroelektrik, 68 adedi kömür, 365 adedi rüzgâr, 63 adedi jeotermal, 357 adedi doğal gaz, 13.872 adedi güneş, 474 adedi ise diğer kaynaklı santrallerdir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024).

Güneş enerjisi, geri kalan yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla Türkiye’de en büyük potansiyele sahiptir. Son yıllarda fotovoltaik panel fiyatlarının önemli ölçüde düşmesiyle birlikte fotovoltaik sistemleri kurulumunda ve güneş enerjisinden elektrik üretiminde artış yaşanmaktadır. Elektrik üretmek ve bunu Türkiye şebekesine entegre etmek için şebekeye bağlı bir fotovoltaik sistemi kurmak istenildiğinde, Türkiye Elektrik Kurumu (TEİAŞ), elektriği tedarik fiyatından daha yüksek bir fiyata satın almaktadır.

Bu çalışmanın amacı, Artvin ili Ardanuç ilçesinde 2 MW’lık şebeke bağlantılı bir PV sistemini farklı panellerle karşılaştırarak optimal değerli bir sistem tasarlamak ve PV sistemi için güneş enerjisinden elde edilecek kazanç analizi yapmaktır.

Güneş Radyasyonu

Güneş radyasyonu, güneşten Dünya’ya gelen elektromanyetik radyasyonun genel adıdır. Bu radyasyonun büyük bir kısmı görünür spektrum içindedir, bu nedenle güneş radyasyonu güneş ışığı olarak da adlandırılır. Fiziksel olarak, güneş radyasyonu, aşağıdakileri içeren bir spektrumdaki elektromanyetik radyasyondur: ultraviyole ışık, görünür spektrum ve kızılötesi. Güneş ışınımının farklı dalga boyları arasındaki spektral dağılımı, sıcaklığı yaklaşık 6000 Kelvin olan bir kara cismin yaydığı ışınımın dağılımına karşılık gelir. Kara cisim, enerjiyi yansıtmadan tüm ışımanın geçmesine izin veren ve ışımanın tamamını soğuran ideal bir cisimdir. Diğer bir deyişle, tüm dalga boyları için mükemmel bir soğurucu ve radyasyon yayıcıdır (Kearney AT, 2010).

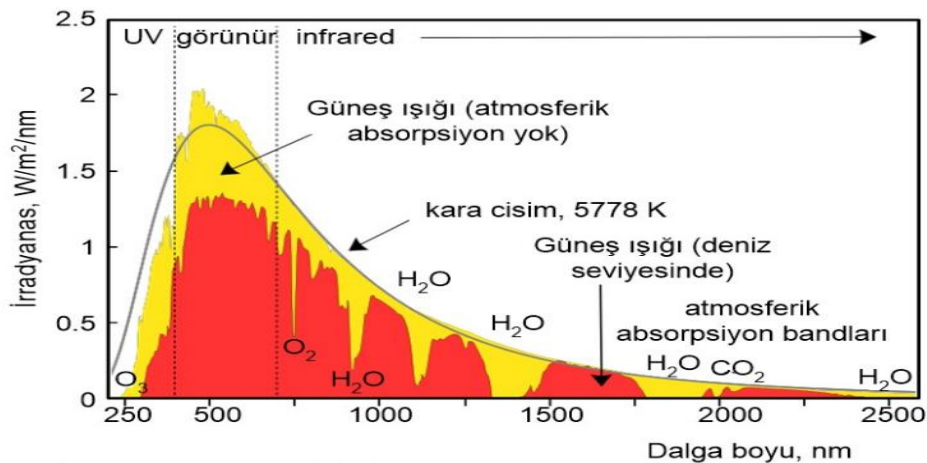
Güneş radyasyonunun yoğunluğu (ışırma), birim alan başına enerji emisyonunun yüzey hızı birimi başına alınan anlık güç radyasyonudur, birim olarak ölçülür: metrekare başına watt (W/m^2). Radyasyon enerjisi, belirli bir süre boyunca

belirli bir yüzey alanında alınan güneş radyasyonu enerjisinin bir ölçüsüdür ve şu birimlerle ölçülür: metrekare başına watt saat (Wh/m^2). Bu nedenle güneş ışıınının yoğunluğunun birim yüzey başına alınan güç ışıını, ışıını enerjisinin ise yüzeyde belirli bir süre boyunca alınan güneş ışıını enerjisi olduğunu söylemek mümkündür (Kearney AT, 2010).

Dünya dışında ve Dünya yüzeyindeki güneş radyasyonu

Dünya tarafından alınan güneşin radyasyon yoğunluğu, emisyon özelliklerinin ve güneşin mesafesinin bir fonksiyonudur. Nükleer füzyon tarafından oluşturulan güneşte üretilen enerji. Bu, yaklaşık 20×10^6 K sıcaklıkta gerçekleşir. Güneş radyasyonunun yoğunluğunun değeri merkezden yüzeye doğru değişir. Bu nedenle, radyasyon akısının değeri güneşten uzaklığın karesi ile zayıflamaktadır. Atmosfer dışında güneşten alınan radyasyon akısının değeri sabittir ve güneş sabiti olarak adlandırılır. Normalde değeri 1367 W/m^2 'dir ve dünyanın güneş etrafındaki yörüngesinin ortalama mesafesindeki atmosfer dışındaki alandaki enerjinin zaman birimi cinsinden ortalama değerini tanımlar (Amy et al., 2019).

Güneş sabitine göre, dünyanın dışındaki radyasyonun yoğunluğu dünya dışı radyasyon olarak adlandırılır. Maksimum görünür dalga boyu aralığı, ultraviyole (UV– ve kızılötesi radyasyon arasında yer alır. Şekil 1, güneş ışıınının spektral dağılımını göstermektedir.



Şekil 1. Güneş radyasyonunun spektrum dağılımı (Beşergil, 2024)

Şekil 1 de atmosferin üzerinde (sarı) ve yüzeyde (kırmızı) güneş ışıını spektrumu; aşırı UV ve X-ışınları üretir (dalga boyu aralığının solunda) ancak

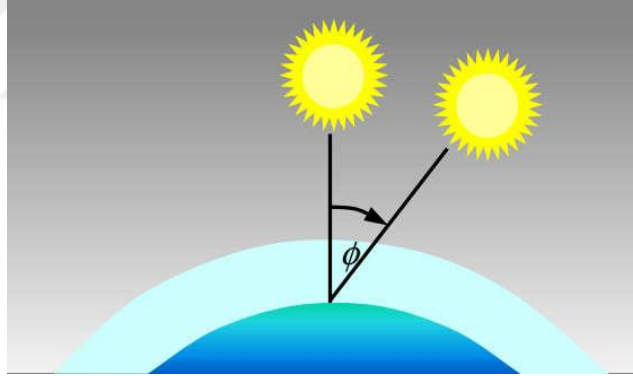
Güneş'in toplam çıkış gücünün (= eğrinin altındaki alan) çok küçük miktarlarını oluşturur. Dünya atmosferine çarpan neredeyse tüm güneş elektromanyetik radyasyonunun spektrumu 100 nm ile yaklaşık 1 mm aralığını kapsar. Dünya yüzeyindeki ışıının standart değeri yaklaşık 1 kW/m²'dir (Beşergil, 2024).

Hava kütlesi

Güneş enerjisi, uzayda 5800 K sıcaklıkta ve dünyaya doğru açıda hesaplanır. Hava kütlesinin değeri, güneş ışıının atmosferden geçtiği optik mesafe ile tanımlanır (Cabeza et al., 2020). Hava kütlesi Denklem (1) eşitliği ile ifade edilir.

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (1)$$

θ , güneşin doğrudan radyasyondaki konumu ile ufka en yakın konumu arasındaki geliş açısıdır. Şekil 2, güneşin göreceli konumunu göstermektedir.



Şekil 2. Güneşin göreceli konumu (AT Kearney, 2010)

Radyasyonun geçtiği mesafe, dünyanın yönü, güneşin konumu, gökyüzünün durumu ve radyasyonun havadaki toz parçacıkları tarafından dağılmasına bağlı kayıplar gibi radyasyonun yoğunluğunu azaltan birçok faktör vardır. Hava kütlesini hesaplamak için kullanılan açının 48,2 derece olduğu bulunmuş, dünya yüzeyine ulaşan etkin radyasyon AM 1.5G ile hesaplanmıştır. Başka bir deyişle, bu koşullar altında güneş ışıının atmosfere olan uzaklığı, gücün ölçüldüğü noktaya dik olarak yerleştirildiğinde olacağı mesafenin 1,5 katıdır (Blanco & Santigosa, 2017).

Işınlama Bileşenleri

Dağınık, doğrudan ve albedo olmak üzere 3 farklı ışınlam türü vardır. Bu üç bileşenin toplamı küresel ışımayı verir

Doğrudan ışınlam, güneşten yüzeye doğru düz bir çizgide hareket eden güneş ışınlamıdır. W/m^2 birimleriyle ölçülür. Bu tür ışıma, fotovoltaiik sistemleri ile ilgili en büyük bileşen ve en önemlisidir.

Yayılan ışınlam, atmosferdeki moleküller ve parçacıklar tarafından saçılan ancak yine de yüzeye ulaşan ışınlardır. W/m^2 birimleriyle ölçülür.

Albedo, bir yüzeyin yansıyan gücünü gösteren bir katsayıdır. Bu katsayı, fotovoltaiik sistemlerinin kurulduğu yüzey tipine bağlıdır. Bu katsayı, fotovoltaiik panellerden alınan gücü etkiler. Albedo katsayısı her zaman 0 ile 1 arasındadır. Yüzey ne kadar beyazsa, albedo değeri o kadar yüksek olur. Ortak yüzeyler için tipik albedo değerleri Tablo 1'de listelenmiştir.

Tablo 1. Farklı yüzeyler için albedo değerleri (AT Kearney, 2010).

Yüzey	Albedo
Okyanus	0.02-0.1
Orman	0.06-0.18
Çimen	0.07-0.25
Toprak	0.10-0.2
Çöl	0.35-0.45
Buz	0.2-0.7
Taze Kar	0.7-0.8

Tablo 1’de verilen albedo değerleri incelendiğinde albedo değerleri farklı yüzeylere göre değişiklik göstermekte olup en düşük albedo değeri okyanus yüzeylerinde en yüksek değerler ise karlı ve buzlu yüzeylerde görülmektedir.

1. FOTOVOLTAİK MODÜL TEMELLERİ

1.1. Fotovoltaik Modüller

Güneş radyasyonu, termal enerji, kimyasal enerji veya elektrik enerjisi gibi çeşitli şekillerde dönüştürülebilir. Bu tez, güneş enerjisinin fotovoltaik modülleri ile elektrik enerjisine dönüştürülmesine odaklanacaktır.

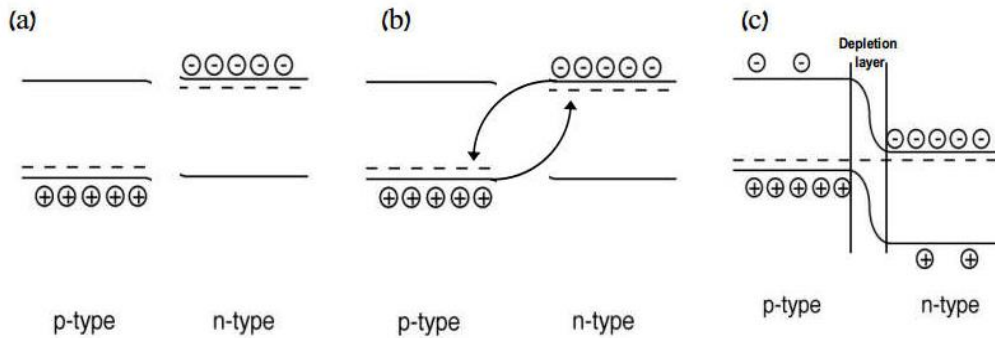
Fotovoltaik cihaz veya diğer bir deyişle güneş pili, anot ve katot arasında iki bağlantı noktasına sahiptir, bu nedenle ışık ışıması (fotonlar) altında gerilim iki nokta arasında kurulur. Bu hücreler, çalışmalarını için fotovoltaik etkiyi kullanır. Bu etki, 1839'da metallerin ışık ışıması altındaki davranışlarını araştıran Edmond Becquerel tarafından keşfedilmiştir (Besarati & Goswami, 2017). 50 yıl sonra 1883'te Charles Fritt, metal ve yarı iletken kombinasyonu ile gerilim ve güneş ışımasını arasında bağımlılık gösteren ilk güneş cihazını üretti. Bu güneş enerjisi cihazı %1 verimlilik göstermiştir. Bu çalışma sonucunda metal ve yarı iletkenlerden oluşan cihazların kullanımı güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için potansiyel malzemeler haline gelmiştir. Daha sonra 1905 yılında Albert Einstein tarafından fotoelektrik etki teorisi geliştirilmiştir (Buie et al., 2003). 1930'da Mott ve Schottky, bir yarı iletkenlerden oluşan bir fotovoltaik teorisi geliştirdiler. 1954 yılında Bell Laboratuvarlarında, silikon yarı iletken temelli güneş enerjisi cihazının ışığa duyarlı olduğu "bilimsel bir kaza" ile keşfedildi. Bu keşif sayesinde 50'li yıllarda silikondan yapılmış güneş enerjisi cihazları ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu hücreler % 6 verimlilik göstermiştir ve şimdi p-n eklemi olarak adlandırılmaktadır. O zamandan bugüne, silikon yarı iletken bazlı güneş pilleri üzerinde yoğun bir şekilde çalışılmış ve bu da verimliliklerinde istikrarlı bir artışa yol açmıştır. 1985 yılında araştırmacılar %20 gibi etkileyici bir verimliliğe ulaşmışlardır. William Shockley ve Hans-Joachim Queisser tarafından tek bir p-n bağlantısı kullanan bir güneş pilinin maksimum verimi %33.7 seviyelerine çıkarılmıştır.

1.2. P-N Yarıiletken

Yarı iletkenler, modern elektroniğin ana bileşenleridir. Her katı, kendisini karakterize eden enerji seviyelerine sahiptir, yarı iletkenlerde değerlik enerji bandı (VB) ile iletim bandı (CB) arasında küçük bir boşluk (E_g) vardır. Düşük sıcaklıkta

değerlik bandı elektronlarla doludur ve iletim bandı boştur, bu nedenle malzeme yalıtılmıştır. Ancak sıcaklık değişiklikleri, harici güç uygulanması veya aydınlatma gibi fiziksel değişikliklerle elektronlar, E_g enerji aralığının üzerinden iletim bandına atlayabilir ve değerlik bandında delikler bırakabilir. Elektronların bu hareketi malzemenin iletken olmasını sağlar. Yarı iletkenlerde Fermi seviyesi denilen bir enerji seviyesi vardır. Bu seviye, bir elektron bulma olasılığını tanımlar.

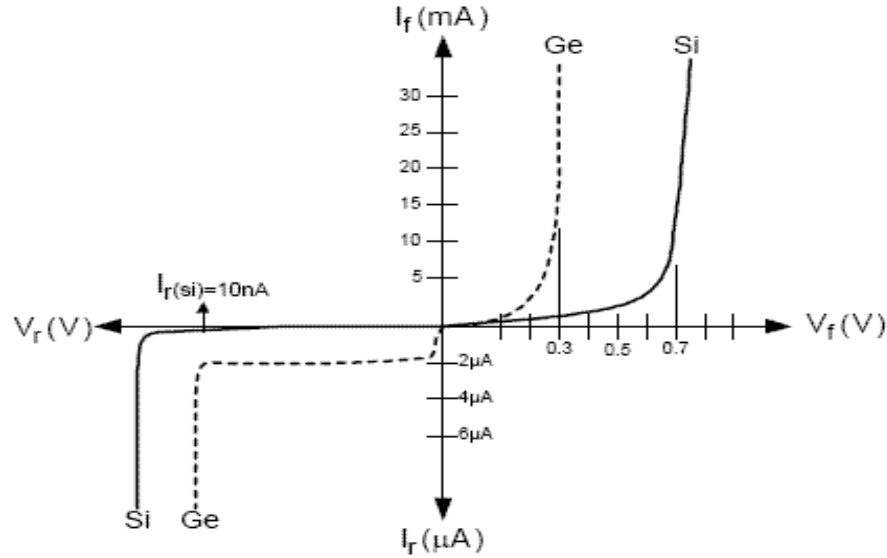
Genellikle p-n bağlantısı, bir yarı iletken p-tipi ve n-tipi malzeme arasındaki bir sınırdır. N-tipi, çok sayıda elektronun bulunduğu bölgedir ve p-tipi, çok sayıda deliğin bulunduğu bir bölgedir. Yarı iletken az miktarda kirletici madde kattığımızda onun Fermi seviyesini (E_f) etkileyebiliriz. Fazladan elektronlu doping atomları, Fermi seviyesinin iletim bandına (n-tipi) doğru hareket etmesine neden olur ve bu da yarıiletkenin kristal yapısında serbest elektronların varlığına yol açar. Benzer şekilde, fazladan deliğe sahip atomların dopingi, Fermi seviyesini değerlik bandına (p-tipi) doğru hareket ettirecektir. İki malzeme bağlandığında, dengeye ulaşmak için elektrik yüklerini eşitleme eğilimi olacak ve Fermi seviyesi düzelecektir. Başka bir deyişle, difüzyon akımı oluşturulacaktır. Elektronların n tarafından p tarafına ve deliklerin p tarafından n tarafına doğru hareket edecektir (Chaves, 2017). Bu akım nedeniyle, elektriksel nötrlük ihlal edilecektir. Yük aktarımı, yüklü alanlarda serbest elektrik yüklerinin olmaması durumuna yol açar ve tükenme katmanı oluşturulur. Bu elektrik yükü katmanı, difüzyon akımına karşı bir elektrik alanı oluşturur (Elliott, 2012). Şekil 3 yarıiletken olgusunu göstermektedir.



Şekil 3. P-N bileşimi olgusu (Fritsch et al., 2015)

Bağlantıyı bağlamadan önce her iki taraf da nötrdür. Bağlanırken, elektronlar ve delikler, denge ve Fermi seviyesinin hizalanmasına kadar difüzyon akımı boyunca hareket eder. Sonuç olarak, bir elektrik alanının olduğu temas (bağlantı) alanına yakın bir tükenme bölgesi oluşur. Tükenme bölgesinin dışında difüzyon akımının zıt yöndeki hareketi nedeniyle elektrik alanı sıfır olur. (a) farklı bir dopinge sahip bir yarı iletkenin enerji yapısını, (b) p-n eklemine bant bükülmesini, (c) elektrik yükünün ayrılma sürecini göstermektedir (Fritsch et al., 2015).

p-n eklemine davranışı üstel davranıştır ve matematiksel işlemi diyot denkleminde ve Şekil 4 de gösterilen $I - V$ eğrisine yol açar.



Şekil 4. Diyot IV eğrisi (Fritsch et al., 2015)

Şekil 4’de silisyum ve germanyum diyotların akım-gerilim karakteristik eğrileri verilmiştir. Görüldüğü gibi germanyum diyotların I_r sızıntı akımı silisyum diyotlara göre çok daha büyüktür. Germanyum diyotların V_f öngerilimleri 0.3V silisyum diyotların ise 0.7V civarındadır.

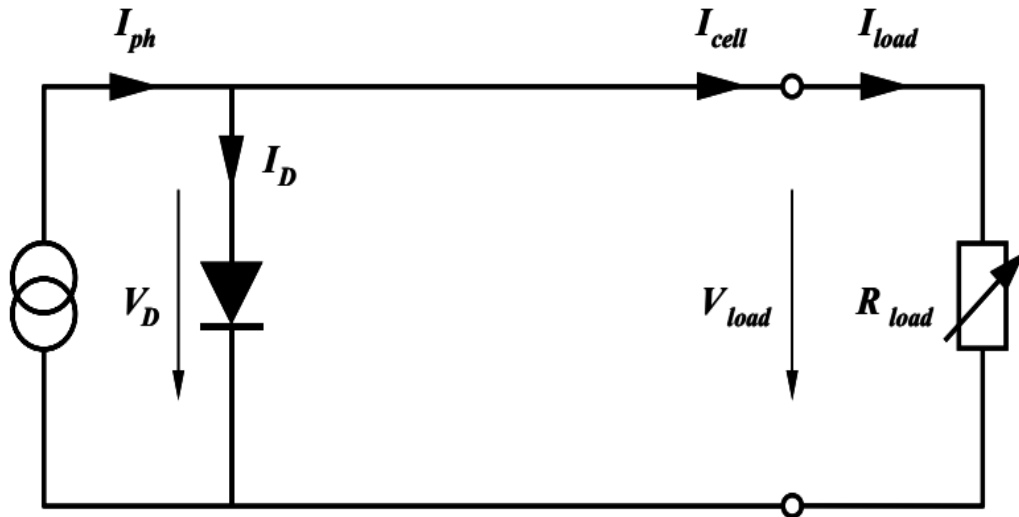
1.3. Fotovoltaik

Fotovoltaik üzerine düşen ışık yansiyabilir, emilebilir veya iletilebilir. Işığın büyük bir kısmı yansır, bu da yansıma kayıplarına yol açar. Yansıma kayıplarını azaltmak için fotovoltaik her zaman yansıma yapmayan bir kaplamaya sahiptir.

Aydınlatma sırasında, E_g 'ye eşit veya daha büyük enerjiye sahip fotonlar (ışık kuantumları), elektronları değerlik bandından iletim bandına uyaracaktır. Güneş enerjisini elektriğe dönüştürmek için rekombinasyon adı verilen bir işlemle elektron deliğe çökmeden önce elektronu ve deliği ayırmak gerekir. Elektron-delik çifti, bağlantı içinde veya difüzyon mesafesi olarak adlandırılan bağlantıdan kısa bir mesafede üretilir. Bu çift, bileşimde mevcut olan yerleşik elektrik alanı ile ayrılacaktır. Yerleşik elektrik alanı, elektronların akışını n-tipi yarı iletken ve delikleri p-tipi yarı iletken yönlerdir.

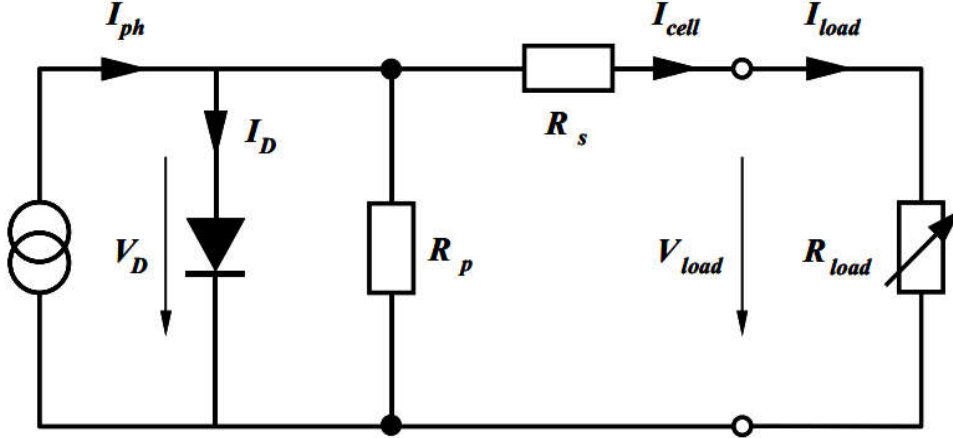
Bu şekilde, her yarı iletkenindeki azınlık taşıyıcılar (p tipi yarı iletkenindeki elektronlar ve n tipi yarı iletkenindeki delikler) elde edilen elektrik akımına katkıda bulunanlardır. Hücre verimliliği, azınlık taşıyıcıların yeniden birleşene kadar yaratıldıkları tarafta hareket etme yeteneğine bağlıdır. Bu durum, kontaminasyonların veya kusurların etkisi altında rekombinasyon olasılığını azaltmak için yarı iletkenin yüksek saflık seviyesine olan ihtiyacı göstermektedir (Garcia et al., 2008).

Daha önce de açıklandığı gibi, fotovoltaik üzerindeki aydınlatma yük oluşturur ve akımın bağlı bir yüke akmasını sağlar. Ek olarak, fotovoltaikte üretilen fotoakım (I_{ph}) vardır. Fotovoltaikin devresi, p-n bağlantısından üretilen diyot ve radyasyonun yoğunluğuna bağlı olan fotoakım kaynağından oluşur (Garcia et al., 2008). Yüke bağlı İdeal Bir Fotovoltaik Eşdeğer Devresi, Şekil 5'de açıklanmıştır.



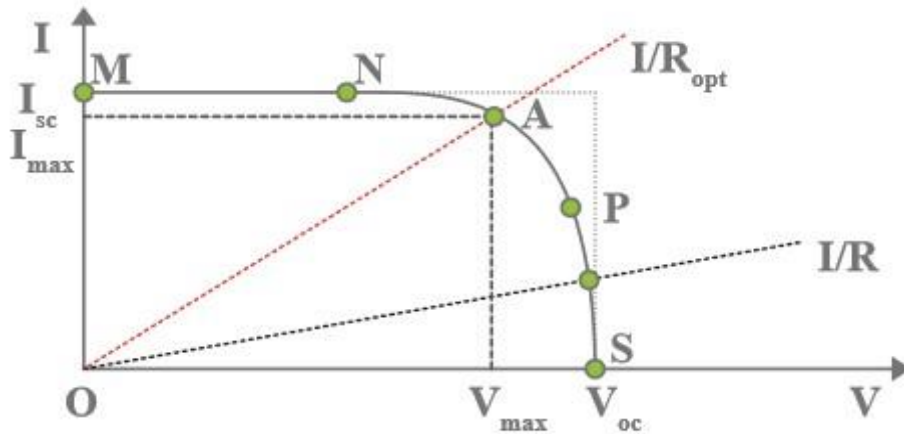
Şekil 5. Yüke bağlı ideal bir fotovoltaik eşdeğer devresi (Garcia et al., 2008)

Gerçek bir fotovoltaik hücrenin içinde iki direnç vardır. Biri seri (R_s) ve diğeri paralel (R_p). Seri direnç silikon gofretle ilgilidir ve metalik kontakları ve bağlantıların direncini temsil eder. Paralel direnç, p-n bağlantısının kaçak akımlarından kaynaklanır (Garcia et al., 2008). Şekil 6, gerçek bir fotovoltaik eşdeğer devresini göstermektedir.



Şekil 6. Gerçek bir fotovoltaik eşdeğer devresi (Garcia et al., 2008)

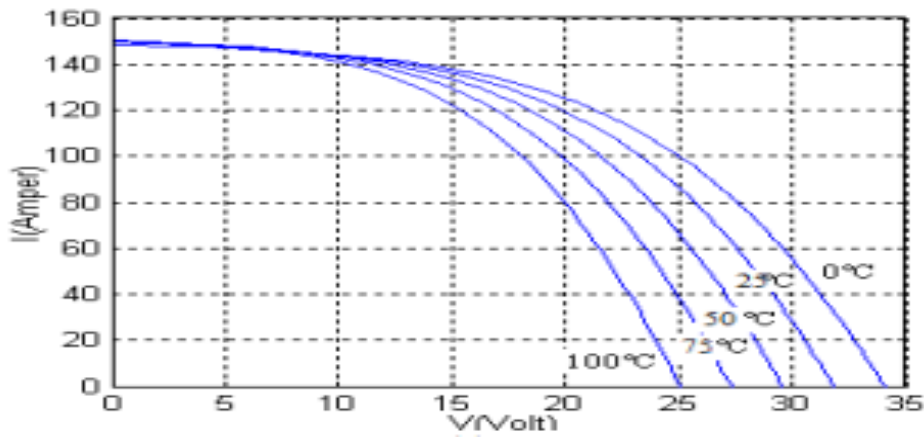
Fotovoltaik çıkış karakteristikleri I-V eğrisi ile karakterize edilir. I-V eğrisi 1000 W/m^2 güç ve 25°C sıcaklık değeri içindir. Çevresel koşul değiştiğinde, I-V eğrisi etkilenir. I-V eğrisinde üç önemli ilgi noktası vardır: maksimum güç noktası (MPP), açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımı (I_{sc}). Fotovoltaik maksimum güç noktası, fotovoltaikin çalışma koşullarında üretebildiği maksimum güçtür. Fotovoltaik açık devre gerilimi maksimum gerilimdir, değeri hücreden yük ve akım geçmediği zaman elde edilebilir. Şekil 7, Fotovoltaik I-V eğrisini göstermektedir.



Şekil 7. Bir fotovoltaik I-V eğrisi (Şahin & Okumuş, 2013)

Şekil 7’deki eğride omik bir yük için yük karakteristiği doğrusal olarak $I/V=1/R$ ’nin eğimi olarak bulunabilir. Yüke aktarılan gücün sadece dirence bağlı olduğu söylenebilir. Buna göre şayet R yükü çok küçükse fotovoltaik M-N aralığında bir akım kaynağı olarak kısa devre akımına yakın bir akım değerinde çalışacaktır. Şayet R yükü oldukça büyük değerdeyse bu durumda da fotovoltaik eğrinin P-S aralığında sabit bir gerilim kaynağı olarak açık devre gerilimine yakın bir gerilim değerinde çalışacaktır (Şahin & Okumuş, 2013).

Şekil 8, bir fotovoltaik I-V eğrisinin sıcaklıkla değişimini göstermektedir. Sıcaklık arttığında maksimum güç düşer, bu da fotovoltaik performansını düşürür.



Şekil 8. Sıcaklık ile modülünün IV eğrisinin değişimi (Şahin & Okumuş, 2013)

1.4. Fotovoltaik Doldurma Faktörü

Doldurma faktörü (FF), fotovoltaik kalitesini ölçmek için kullanılan önemli bir fotovoltaik özelliğidir. Doldurma faktörü, IV eğrisine oturabilecek en büyük dikdörtgenin alanıdır. Doldurma faktörünün tanımı, fotovoltaik maksimum gücünün V_{oc} ve I_{sc} çarpımına oranıdır. Doldurma faktörünün değeri her zaman 1’den küçüktür. Daha büyük doldurma faktörü fotovoltaikin daha iyi çalışmasına yol açacaktır (Good et al., 2016).

1.5. Fotovoltaik Verimliliği

Fotovoltaikin verimliliği, fotovoltaikin performansını kontrol etmek ve diğeriyle karşılaştırmak için en yaygın parametredir. Fotovoltaik verimi, fotovoltaikin çıkış enerjisinin güneşten gelen giriş enerjisine oranıdır (P_{in}). Güneş pilinin

verimliliği, güneş ışığının spektral dağılımı ve hücre sıcaklığı gibi değişkenlerin sayısına bağlıdır. Verimliliği ölçmek için standart test koşulları (STP) oluşturulmuştur. Verimlilik, 25 °C sıcaklıktaki bir laboratuarda ve güneş pilinde metrekare başına 1.000 watt'lık bir yoğunluğa sahip bir ışık kaynağı kullanılarak ölçülür (Gordon, 2001)

1.6. Fotovoltaik Teknolojileri

Fotovoltaik modüller sistemin en önemli parçasıdır. Fotovoltaik hücreler güneşten aldıkları enerjiyle elektrik üreten yarı iletken malzemelerden üretilmişlerdir. Kalınlıkları mikrometreyle ölçülecek kadar ince olan bu hücrelerin boyutları genelde kare, dikdörtgen veya dairesel olup alanları 100 cm² civarındadır. Tek bir fotovoltaik hücreden elde edilen enerji oldukça azdır. Bu nedenle hücreler seri veya paralel bağlanarak modülleri, modüller de birleşerek panelleri oluştururlar. Büyük miktarlarda elektrik üretmek için paneller de birbirine bağlanarak solar fotovoltaik dizisini meydana getirirler (Sayin & Koç, 2011).

Güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürmek için mevcut birkaç güneş pili teknolojisi vardır. Güç üreten uygulamalar için, ticari olarak temin edilebilen teknolojiler ağırlıklı olarak silikon bazlıdır ve kristal silikon veya ince film olarak kategorize edilebilir. Her birinin farklı çalışma özellikleri, dönüştürme verimliliği ve maliyeti vardır (Gul et al., 2016).

1.6.1. Monokristal

Monokristal fotovoltaik uzun yıllardır en popüler seçim olmuştur. Güneşten elektrik üretmenin en eski, en verimli ve en güvenilir yolları arasındadırlar. Monokristal güneş pilleri, silindirik şeklinde olan silikon külçelerden yapılmıştır. Tek bir monokristal fotovoltaikin performansını optimize etmek ve maliyetlerini düşürmek için, monokristal güneş panellerine karakteristik görünümünü veren şey olan silikon gofretleri yapmak için silindirik külçelerden dört taraf kesilir (Grigoriev & Corsi, 2017).

Avantajları:

- Verimlilikleri yüksektir. % 20-25 aralığındadır.
- Verimlilikleri yüksek olduğundan daha az alana ihtiyaç duyarlar.
- Daha uzun kullanım ömrüne sahiptirler.
- Sıcak iklimlerde verimli kullanılabilirler.
- Yüksek ısı ve sıcak hava koşullarında daha iyi performans gösterirler.

Dezavantajları:

- Maliyeti yüksektir.
- Daha hassas bir yapıya sahiptir.
- Soğuk iklimlerde verimleri düşmektedir.

1.6.2. Polikristal Silikon

Çok kristalli güneş pilleri, tek kristal silisyum yapıları ile benzer özellikler gösterir. Ancak, kristal yapılarla orantılı olarak damarların boyutları küçüldükçe, malzemenin elektriksel özellikleri de olumsuz etkilenir ve bu da verimin tek kristalli yapıya kıyasla daha düşük olmasına yol açar. Bununla birlikte, çok kristalli üretim teknikleri daha düşük maliyetlerle üretilbildiği için, güneş enerjisi santrallerinde daha yaygın olarak tercih edilmektedir.

Avantajları:

- Maliyeti daha düşüktür.
- İmalatı sırasında daha az silikon israfı yaşanır.
- Daha düşük ısı toleransına sahiptirler.

Dezavantajları:

- Verimlilikleri düşüktür. %14-16 aralığındadır.
- Daha çok alana ihtiyaç duyarlar.
- Daha düşük bir silikon saflığına ve daha az düzgün bir görünüme sahiptir. Monokristal fotovoltaiik modüllerinden biraz daha düşük ısı toleransına sahiptirler.

1.6.3. İnce Film Tabaka

Bir substrat üzerine bir veya birkaç ince fotovoltatik malzeme katmanı yerleştirmek, ince film güneş pillerinin üretiminin temel özüdür. İnce film fotovoltatik hücreler (TFPV) olarak da bilinirler. Farklı tipteki ince film güneş pilleri, fotovoltatik malzemenin alt tabaka üzerine çökmesine göre kategorize edilebilir, örneğin: bakır indiyum selenit (CIS) ve amorf silikon (a-Si). Teknolojiye bağlı olarak, ince film modül prototipleri %7-13 arasında verimliliğe ulaşmış ve üretim modülleri yaklaşık % 9 oranında çalışmaktadır. Gelecekteki modül verimliliklerinin yaklaşık %10-16'ya yaklaşması beklenmektedir (Heller, 2017).

Bakır İndiyum Selenit (BDT):

Bakır indiyum selenit ince film fotovoltatik, ince bir CuInSe_2 tabakası ile yapılır. Düz cam veya esnek metal bir desteğe sahiptir. CIS hücreleri %14'e varan verimliliğe sahiptir.

Avantajları:

- Enerji kullanımı, büyüyen büyük kristallere göre daha düşüktür.
- CIS güneş pilleri, silikon güneş pillerinden daha iyi ısı direncine sahiptir.

Dezavantajları:

- Daha az verimlidir.
- Maliyeti çok yüksektir.

Amorf Silikon (A-Si):

1980'lerde ince film teknolojisinin en iyi malzemesi olan amorf silisyum, o yıllarda %10 verim sınırını aşmıştır. Yapılan laboratuvar çalışmalarıyla verim %15 dolayına kadar da çıkmıştır. Pratikte verim oranının %7 dolaylarına kadar düşmesi bu pillerin büyük ölçekli enerji üretimlerinin dışında kalmasına sebep olmuştur. Amorf silisyum pilleri, yaşanan bu sorunlar nedeniyle küçük cihazların çalıştırılmasında (Saat pilleri, hesap makinesi vb.) kullanılmaktadır. (Sönmezoğlu et al., 2012)

Avantajları:

- Seri üretimi basittir.
- Kristal bazlı güneş pillerinden daha ucuzdur.
- Homojen görünüşleri daha düzenli görünmelerini sağlar.
- Yüksek sıcaklıklar ve gölgeleme, fotovoltaik modülü performansı üzerinde daha az etkiye sahiptir.

Dezavantajları:

- Çoğu konut için genel olarak pek kullanışlı değildir.
- Çok fazla alana ihtiyaç duyarlar.
- İnce film güneş pilleri, monokristal ve polikristal güneş pillerinden daha hızlı bozulma eğilimindedir.
- Maliyetleri yüksektir.

1.6.4. Çoklu Yarıiletken Bileşimi

Çok eklemli güneş pilleri, farklı yarı iletken malzemelerden birden fazla p-n bağlantısına sahiptir. Çok eklemli fotovoltaikin bu yapısının daha fazla güneş spektrumu kullanmasına izin verilir. Başka bir deyişle, farklı malzemeler nedeniyle fotovoltaik çok çeşitli dalga boylarını emebilir.

Çok eklemli fotovoltaikin iki p-n bağlantısından dört p-n bağlantısına kadar birkaç modeli vardır. Teorik olarak bağlantı sayısında bir sınırlama yoktur ancak günümüzde çok bağlantılı bir fotovoltaikte maksimum bağlantı sayısı dörttür. Daha geniş dalga boyu aralığı nedeniyle daha fazla bağlantıya sahip çok eklemli fotovoltaik daha verimli olacaktır. Verimleri yaklaşık % 46'ya ulaşabilir.

Avantajları:

- Diğer güneş pillerine kıyasla çok yüksek verimliliğe sahiptir.
- Geniş dalga boylarını absorbe etme olanağına sahiptir.
- Az alana ihtiyaç duyarlar.

Dezavantajları:

- Diğer güneş pilleri teknolojilerine kıyasla oldukça pahalıdır.
- Kullanılan malzemeler ve üretim süreci karmaşıktır.

Bu bölümde anlatılan tüm teknolojiler sistemin boyutlandırılması için seçilecek ve sistem için ekonomik ve teknik olarak aralarında bir karşılaştırma yapacaktır.

1.7. Tek Hücreden Fotovoltaik Modülüne

Farklı iki tip yarı iletken yapının birleştirilmesi ile bir elektriksel alan oluşturulması esasına dayalı bir yapı olan fotovoltaik hücreler, üzerlerine düşen fotonun taşıdığı enerjinin elektron tarafından yutulması neticesinde elektrik akımı üreten enerji dönüşüm araçlarıdır (Çelik & Koç, 2020). Şekil 9 bir fotovoltaik hücrenin genel yapısını göstermektedir.

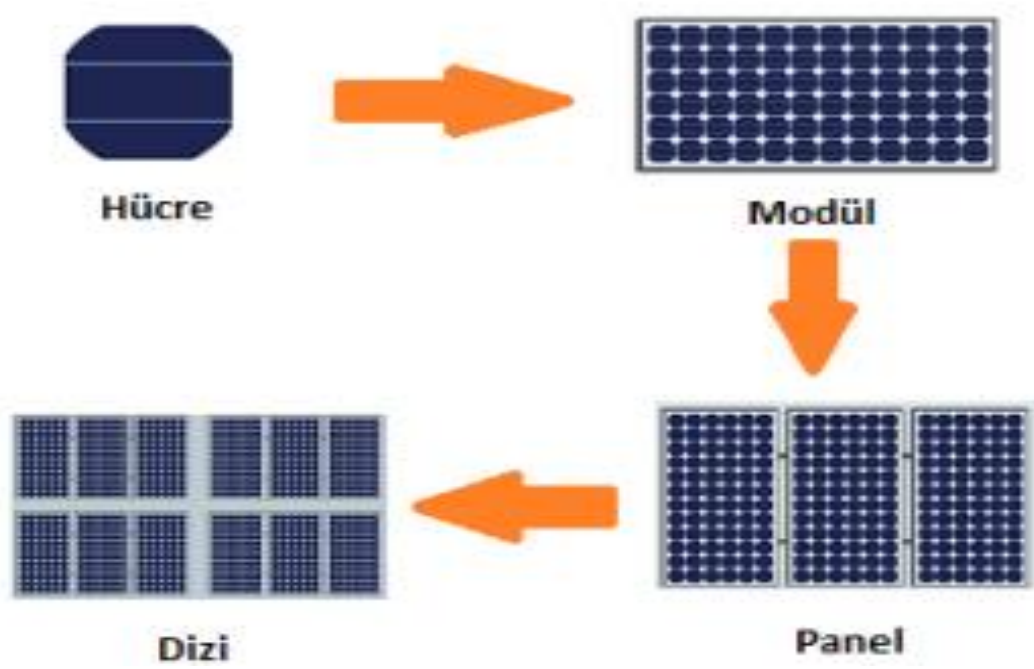


Şekil 9. Bir fotovoltaik hücre (Çelik & Koç, 2020)

Şekil 9 da görülen Silisyum tabanlı fotovoltaik hücreler, yarı iletken özellik gösteren silisyum malzeme üzerine, iletken çubuklar ve daha ince parmaklar yerleştirilerek üretilir. Bu hücrelerin üretim gücü, üzerinden geçen akımla orantılı olarak değişir. Akımın artırılması için fotovoltaik yapıda bulunan elektron ve boşluk sayılarının çoğaltılması gereklidir. Bu da, hücrenin yüzey alanının artırılmasıyla mümkün olur.

Normalde güneş pilleri tek başına kullanılmaz. Bunun yerine, daha yüksek güç değerleri elde etmek için hücreler bir modüle bağlanır. Güneş modülü, güneş pillerinin tek bir üniteye birleştirilmesidir. Güneş pilleri seri bağlanır. Birkaç paralel zincirin

bağlanması güneş modülünü oluşturur. Modül içerisindeki hücreler koruyucu malzeme ile kaplanmış, alüminyum çerçeveli ve şeffaf cam ile kaplanmıştır. Güneş modülü, onlarca yıl boyunca etkin bir şekilde çalıştırılabilecek şekilde inşa edilmiştir. Panel yağmura, rüzgara ve doluya dayanıklıdır. Bu modüller, farklı güç aralıklarında çeşitli uygulamalar sağlamak için dizi yapısına bağlanır (IRENA, 2020). Şekil 10 fotovoltaik hücrelerin bağlantısını göstermektedir.



Şekil 10. Fotovoltaik hücrelerin bağlanması (Çelik & Koç, 2020)

Şekil 10 incelendiğinde güneş pilleri birbirlerine bağlanarak modüller, modüller birbirlerine bağlanarak paneller, panellerde birbirlerine bağlanarak diziler elde edildiği görülmektedir.

2. FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMİ

2.1. Fotovoltaik Güç Sistemleri Türleri

Fotovoltaik güç sistemleri, normalde yerel ve büyük ölçekli sistemler olmak üzere çeşitli uygulamalar için tasarlanmıştır. Bu tez, şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemine odaklanacaktır. Üç tip fotovoltaik güç sistemi vardır:

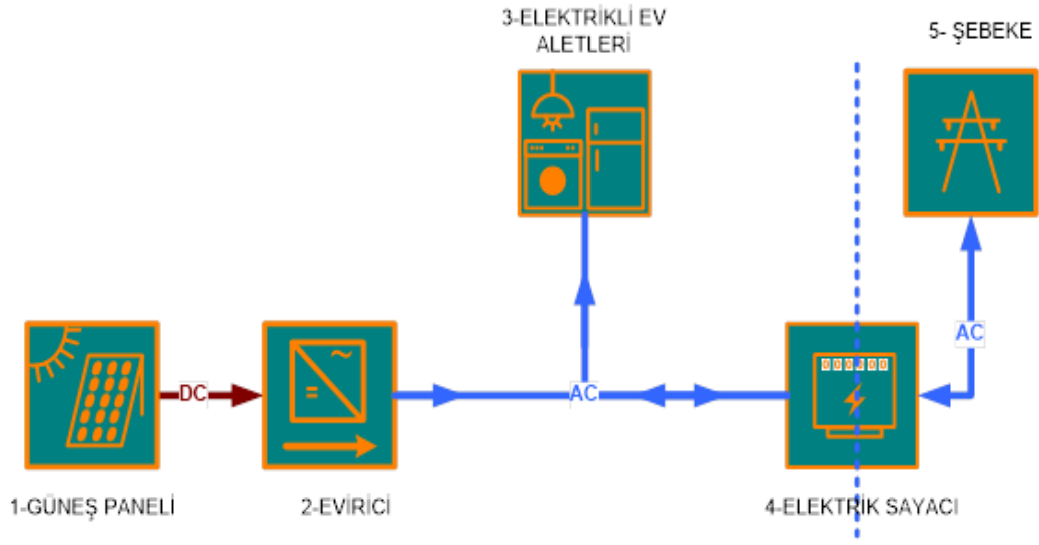
- Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemi
- Bağımsız fotovoltaik sistemi
- Hibrit fotovoltaik sistemi

2.1.1. Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemi

Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemi, doğrudan elektrik şebekesine bağlı oldukları için bu isme sahiptir. DC elektriği, fotovoltaik dizisi tarafından üretilir ve kablolarla eviriciye akar. Evirici, elektriği DC'den AC'ye dönüştürür. Eviricinin dönüştürdüğü AC elektrik, sistemin bağlı olduğu şebeke ile uyumludur. Yani şebekenin frekansına ve gerilimine uygundur. Bu nedenle bu eviricilere senkron eviriciler denir. Daha sonra AC tarafından üretilen elektrik eviriciden şebekeye akar.

Şebekeye bağlı sistemler günümüzde en popüler güneş enerjisi sistemleridir. Pillerin gereksiz olması nedeniyle en ucuz sistemlerdir ve en az bakım gerektirirler. Bu durumda elektrik şebekesi sistemin pilleridir.

Şebeke bağlantılı sistemlerin dezavantajları da vardır, en büyük dezavantajı şebeke arızalarına karşı hassas olmalarıdır. Bu, şebeke düştüğünde sistemin etkileneceği anlamına gelir. Ayrıca güneş zamanında, şebekede bir sorun olduğunda fotovoltaik sistemi kapanabilir. Şekil 11, şebeke bağlantılı sistemin yapısını göstermektedir.



Şekil 11. Şebekeye bağlı fotovoltaiik sistemi (Enerjiye, 2024)

Şekil 11’de bulunan sistemde Güneş Paneli, güneş enerjisini DC elektrığe çevirmekte, DC elektrik enerjisi, AC elektrığe (220V, 50Hz) çevrilmek üzere Eviricilere iletilmekte, AC elektrik evirici tarafından üretilmektedir. Güneş enerjisi ile üretilen elektrığın ihtiyacı karşılayamaması durumunda, enerji farkı Şebekeden alınmakta, enerjinin ihtiyaçtan fazla olması durumunda, ihtiyaç fazlası ana şebekeye iletilmektedir. Şebekeye enerji vermek ve alma durumu için çift yönlü Elektrik Sayaçları (bi-directional counter) kullanılmaktadır (Enerjiye, 2024).

2.1.2. Bağımsız Fotovoltaiik Sistemi

Bağımsız fotovoltaiik sistemleri bağımsız çalışır ve genellikle elektrik şebekesinin gelmediği veya şebekeye erişim için bağlantı ücretlerinin alternatifine kıyasla çok pahalı olduğu uzak bölgelerde kullanılır. Bağımsız fotovoltaiik sistemleri elektrik şebekesine bağlı değildir. DC elektrığı fotovoltaiik dizisi tarafından üretilir, pillerde depolanır ve DC yükünü sağlar. Üretilen DC gücü, ev elektrığı sağlamak veya ticari kullanımlar için AC gücüne de dönüştürülür.

Bağımsız güç sistemleri, uzak köyler ve uzak geçici projelerin elektrifikasyonu için en iyisidir. Ayrıca, bu sistemler özellikle elektriklerini sadece dizel jeneratörler ile üreten uzak kırsal alanlarda kullanılabilir ve güvenilir elektrik kaynağı sağlar. Bu sistemlerin en büyük avantajı, üretilen elektrığın akülere gitmesi ve gün boyunca fazla

olan elektriğin gece boyunca ihtiyaç duyulan elektriği sağlamasıdır. Şekil 12, bağımsız fotovoltaiik sisteminin yapısını göstermektedir.

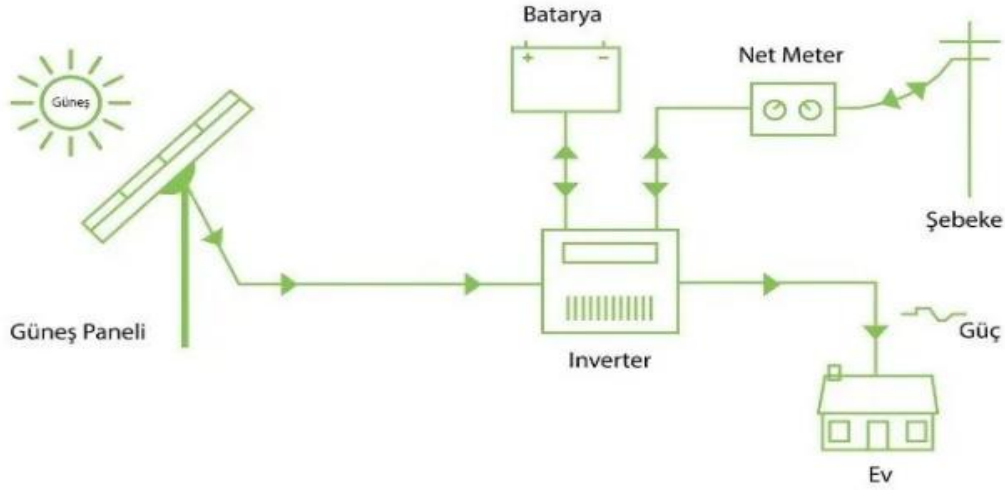


Şekil 12. Bağımsız fotovoltaiik sistemi (Enerjiye, 2024)

Şekil 12’de bulunan sistemde Güneş Paneli, güneş enerjisini DC elektriğe çevirmekte, AC elektrik evirici tarafından üretilmektedir. Üretilen AC enerji elektrikli ev aletlerinde kullanılmaktadır.

2.1.3. Hibrit Fotovoltaiik Sistemi

Hibrit solar sistemler şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı sistemlerin birleşimidir ve her iki sisteminde avantajlarını tüketiciye sunar. Bu sistemler on-grid sistemler gibi şebekeye bağlı olup, ayrıca şebekeden bağımsız sistemler gibi bataryaya sahiptirler. Böylelikle sistem, güneşten ürettiği fazla enerjiyi depolamak amacıyla hibrit evirici sayesinde bataryaya iletir. Sistem içerisinde bataryalar olduğu için elektrik kesildiğinde, bataryalar devreye girerek sistemi beslemeye devam eder. Kısacası bu sistemler elektrik kesintisinden etkilenmez (Helios, 2024). Şekil 13, bir hibrit sistemin yapısını göstermektedir.



Şekil 13. Hibrit sistem (Enerjiye, 2024)

Şekil 13 detaylı incelendiğinde güneş panelleri tarafından üretilen DC elektrik, AC elektriğe dönüşmesi için bir hibrit eviriciden geçer. Evirici enerjiyi, kullanılacak alete veya depolanması için bataryaya gönderir. İhtiyaç durumuna göre üretilen enerji veya depolanan enerji kullanılır ve böylelikle şebekeye bağımlılığı ortadan kaldırır.

2.2. Evirici

Eviriciler, herhangi bir şebekeye bağlı fotovoltaik sisteminde kullanılır. Evirici, fotovoltaik modülünde üretilen DC akımını elektrik şebekesine iletmek için AC'ye dönüştürür. Evirici seçimi, sistemin DC girişine ve AC çıkışına bağlı olacaktır. Evirici seçmek için güç, gerilim değişimleri ve frekans gibi tüm AC yük gereksinimlerinin dikkate alınması gerekir. Evirici seçimi, fotovoltaik sisteminin performansını ve güvenilirliğini etkiler (Kısakürek vd., 2022).

2.3. Fotovoltaik Modüllerinin Farklı Yerleşimleri

Fotovoltaik panellerin birkaç tür yerleşimi vardır. En yaygın olanı çatı üstü yerleşimidir. Bu düzenleme ile fotovoltaik panellerinin yönü tüm paneller için aynıdır. Panellerin yönü de konuma bağlıdır. Bu düzenleme daha çok mevcut alanın oldukça önemli olduğu durumlarda kullanılır ve küçük ölçekli özel kullanıcılar için de en ucuz düzenlemedir. Şekil 14 çatı üstü yerleşimi göstermektedir.



Şekil 14. Çatı üstü panel (Kutscher vd., 2010)

Açık alanlar veya çöller gibi kullanılabilir alan sorununun olmadığı uzak bölgelerde, güneş çiftliklerinde tek yönlü fotovoltaik modülleri kullanılır. Fotovoltaik modülü, eğim açısı ile yerleştirildiğinde, günün tamamında güneşten maksimum fayda sağlar. Fotovoltaik modülünün açısı, konuma bağlıdır. Şekil 15, tek yönlü fotovoltaik panellerini göstermektedir.



Şekil 15. Tek yönlü fotovoltaik panelleri (Aydınlatma, 2024)

Güneş enerjisinden gün boyu verimli bir şekilde yararlanabilmek için sabit sistemlerin güneşe doğru yönlendirilmesi gereklidir ve bu durum enerji verimliliğini

artırmaktadır. Güneş takip sistemleri, bu verimliliği daha da iyileştirerek, güneşten sağlanan enerji kullanım süresini tüm gün boyunca uzatmaktadır. Takip sistemleri sayesinde kaybolan enerji tekrar sisteme dahil edilerek verimlilik artırılabilir. Güneş takip sistemleri, izleme ekseni ve kontrol yöntemlerine göre farklılık gösterir. Şekil 16, güneş izleyicili fotovoltaik panellerini göstermektedir.



Şekil 16. Güneş izleyicili fotovoltaik panelleri (Aydınlatma, 2024)

Bu tezde sistem kurulumu için kullanılabilir alan sorunu bulunmamaktadır. Bu nedenle, fotovoltaik modüllerinin yerleşimi, Şekilde 16 da görüldüğü gibi tüm modüller için tek yönlü olarak tasarlanmıştır.

3. TÜRKİYE'DEKİ FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİ İÇİN GEREKSİNİMLER VE TARİFELER

Bu bölüm, şebekeye bağlı fotovoltaik sisteminde şebekede meydana gelebilecek etkiler ve bir fotovoltaik sistemin Türkiye şebekesine bağlamanın teknik gerekliliklerini açıklamaktadır. Ayrıca, Türkiye'de bir fotovoltaik sistemi kurmak için mevzuat gereklilikleri ve tarifeler bulunmaktadır.

3.1. Fotovoltaik Sisteminin Şebeke Etkisi

Yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle fotovoltaik sistemleri, daha önemli enerji kaynakları haline gelmiş ve önemli ölçüde ticari ilgi görmüştür. Bununla birlikte, büyük fotovoltaik sistemlerinin elektrik şebekelerine bağlanması, dağıtım şebekeleri için çeşitli operasyonel sorunlara neden olabilir. Bu sorunların ciddiyeti, doğrudan fotovoltaik penetrasyon yüzdesine ve kurulumun coğrafyasına bağlıdır. Bu nedenle, büyük şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemlerinin dağıtım ağları üzerindeki olası etkisinin bilinmesi, gerçek zamanlı ve pratik uygulamalardan önce uygun çözümler sağlayabilir (Boretti, 2018).

3.1.1. Aşırı Gerilim

Fotovoltaik sistemleri genellikle güneş enerjisini tam olarak kullanmak için birim güç faktörüne yakın çalışacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu durumda, fotovoltaik sistemi sadece şebekeye aktif güç enjekte eder ve bu da sistemin reaktif güç akışını değiştirebilir. Bu nedenle, reaktif güç eksikliği nedeniyle baraların gerilimleri artabilir. Üretilen aşırı gerilim, hem şebeke hem de müşteri taraflarının çalışması üzerinde olumsuz etkilere sebep olabilmektedir.

3.1.2. Gerilim Dengesizliği

Gerilim dengesizliği, üç fazlı bir sistemde her faz geriliminin genliğinin farklı olduğu veya faz farkının tam olarak 120° olmadığı bir durumdur. Üç fazlı devrenin her fazındaki fotovoltaik sistemlerinden yük veya güç kaynağındaki fark, dağıtım hattındaki fazlar arasında gerilim dengesizliğine neden olabilir. Gerilim dengesizliği, üç fazlı senkron makinelerde frekansın iki katı ve geriye doğru manyetik alan ile akım

üretecek ve jeneratörler üzerinde rotorların sıcaklık artışı, gürültü ve titreşim gibi olumsuz etkileri olacaktır. Endüksiyon makineleri ve güç elektroniği cihazları üzerinde de etkisi olacaktır.

3.1.3. Harmonikler

Harmonik bozulma, FV sistemlerde DC akımı AC akıma çeviren güç çeviricilerinin kullanılmasından dolayı oluşabilecek ciddi bir güç kalitesi sorunudur. Üretilen harmonikler, paralel ve seri rezonanslara, kapasitör banklarında ve transformatörlerde aşırı ısınmaya ve güç sistemlerinin güvenilirliğini azaltabilecek koruma cihazlarının hatalı çalışmasına neden olabilmektedir.

3.1.4. İstenmeyen Ada

İstenmeyen ada oluşturma, belirli bir ağ içindeki fotovoltaik sistemlerinin, herhangi bir nedenle (örneğin, elektrik sorunu) ana şebekeden ayrıldıktan sonra bile yüke güç sağlamaya devam ettiği bir elektrik olgusudur. Bir şebekenin ana şebekeden bağlantısı kesildiğinde, şebekedeki fotovoltaik sistemleri, gerilim, frekans ve şebeke empedansındaki anormal güç kalitesini tespit etmek ve şebekeden hemen ayrılmak için tasarlanmıştır. Ancak, fotovoltaik sistemlerinden üretilen güç ile yükte tüketilen güç tesadüfen aynı ise, fotovoltaik sistemleri istenmeyen adalamayı tespit edemeyebilir ve güç sağlamaya devam etmektedir.

3.1.5. Sistemler Arası Arızanın Bağlantı Kesme Süresi

Transformatör kutusunda yüksek gerilim sargısı ve alçak gerilim sargısı birbirinden izole edilmiştir. Ancak, trafoya yıldırım gibi anormal bir gerilim girerse, yalıtım bozulması meydana gelebilir. Buna sistemler arası arıza denir. Ağda sistemler arası bir arıza meydana geldiğinde, enerji santralleri çalışmayı durdurmalı ve şebeke ağından ayrılmalıdır. Ancak, fotovoltaik sistemleri, trafo merkezi kesiciyi açana ve istenmeyen ada oluşturma işlemi gerçekleşene kadar olayı algılayamamaktadır.

3.1.6. Frekans Dalgalanması

Frekans, güç kalitesindeki en önemli faktörlerden biridir. Üretilen ve tüketilen güç arasındaki herhangi bir dengesizlik, frekans dalgalanmasına neden olabilir.

fotovoltaik sistemlerinin küçük boyutu, diğer yenilenebilir enerji bazlı kaynaklara kıyasla frekans dalgalanmasının ihmal edilebilir olmasına neden olur. Ancak, fotovoltaik sistemlerinin penetrasyon seviyelerinin artmasıyla bu sorun daha ciddi hale gelebilir. Frekans dalgalanması elektro motorlarda sargı hızını değiştirebilir ve jeneratörlere zarar verebilir. Ani gerilim değişimi, kısa devre kapasitesi, DC ofseti ve güç koşullandırma sisteminden gelen aktif sinyallerin etkisi gibi bazı başka potansiyel etkiler de vardır. Ancak fotovoltaik enerji santrali için küçüktür veya iyi anlaşılmamıştır.

3.1.7. Mevcut Karşı Önlemler

Her sorun için, şebeke, talep ve fotovoltaik açısından etkileri çözmek ve faydaları artırmak için çeşitli karşı önlemler ve teknolojiler mevcuttur. Bu bölümde, mevcut karşı önlemler tanımlanmıştır. Bir fotovoltaik santralının şebekeye yapabileceği bu etkiler nedeniyle, elektriğin güvenliğini ve kalitesini sağlamak için istikrarlı bir elektrik şebekesini çalıştırmak için bazı yardımcı ekipmanlara ihtiyaç vardır. Bu nedenle, bu ekipmanın veya sağlanan hizmetlerin maliyeti fotovoltaik santral tarafından entegrasyon ücreti olarak ödenmektedir.

3.2. Türkiye'nin Teknik Gereksinimleri

Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ), Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) ve Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi (TEDAŞ) tarafından elektrik üretilmekte, dağıtılmakta, altyapı çalışmaları yapılmakta ve elektriğin tüm teknik gereksinimleri belirlenmektedir.

3.2.1. Nominal Frekans

Türkiye iletim sisteminin nominal frekansı 50 Hz'dir. İletim Hizmet Sağlayıcısı (TSP), normal şebeke çalışması sırasında bunu 49.9 ve 50.1 Hz sınırları içinde tutmalıdır.

3.2.2. Gerilim Nominal Değeri ve Kabul Edilebilir Aralık

Türkiye'deki nominal gerilim 230/400 V 3 fazlıdır. Türkiye kodu “normal gerilim aralığını” nominal değerin $\pm\%5$ 'i olarak tanımlar. Başka bir deyişle, gerilim

sürekli olarak bu aralıkta yer alabilir. Bununla birlikte, istisnai gerilim değişimi durumunda, gerilim, nominal değer civarında $\pm\%10$ aralığında olabilir, ancak bu süre 30 dakikadan fazla olamaz.

3.2.3. Gerilim Harmonikleri

Fotovoltaik santral tarafından uygulanan gerilim harmonikleri, hiçbir harmonik %1'den büyük olmayacak şekilde, %1,5'lik bir toplam harmonik bozulmayı aşmamalıdır. Fotovoltaik santral tarafından kabul edilen akım harmonikleri %1-1,5'i geçmemelidir.

3.2.4. Faz-Faz Dengesizliği

Bağlantı noktasındaki faz-faz dengesizliği %1'i geçmemelidir.

3.2.5. Koruma Cihazı

Bir Kullanıcı ile İletim Sistemi arasındaki her Bağlantı, Bağlantı Noktasında ilgili Bağlantı Anlaşmasında belirtilen kısa devre akımlarını kesebilen uygun bir izolasyon cihazı (TSP tarafından belirlendiği üzere izolasyon anahtarı veya devre kesici) ile kontrol edilmelidir. Santralde bir arıza olması durumunda 120 ms'den daha kısa sürede şebekeden ayrılmalıdır.

3.2.6. Güç Faktörü Gereksinimi

Tüm Üretim Üniteleri, Bağlantı Anlaşmasında TSP tarafından aksi açıkça kararlaştırılmadıkça, Üretim Ünitesi terminallerinde %85 Güç Faktörü gecikmesi ve %95 Güç Faktörü önde gelen limitleri arasındaki herhangi bir noktada nominal Aktif Güç çıkışı sağlayabilmelidir.

3.3. Türkiye'nin Mevzuat Gereklilikleri

Fotovoltaik modül teknolojisinde elektrik üretmek isteyen 1 MW altındaki tesisin lisans alması gerekmemektedir. İl Özel İdareleri ve kamu kuruluşlarınca kurulan 2 MW altındaki tesisin lisans alması gerekmemektedir. Türkiye'nin tüm mevzuat gereklilikleri EPDK tarafından çıkarılan Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliğinde belirlenmiştir.

3.4. Türkiye Tarifeleri

Türkiye'de elektrik tüketim tarifiesi Türkiye Elektrik Kurumu tarafından belirlenir. Tarife 1/1/2024 tarihinden itibaren geçerlidir. Katma değer vergisi (KDV) dâhil tarife, 240 kWh enerji için 1,50 TL, 240 kWh üzerinde ise 2,25 TL birim fiyattan hesaplama yapılmaktadır.

Yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretim tarifiesi Türkiye Elektrik Kurumu tarafından belirlenir. TEİAŞ/TEDAŞ, güneş enerjisinden üretilen ve şebekeye verilen elektriği satın almaktadır. Yenilenebilir Enerji Destekleme Mekanizması (YEKDEM) kapsamında uygulanacak elektrik alım fiyat fiyatları ve yerli aksam destek fiyatları Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPIAŞ) tarafından açıklanmaktadır.

EPIAŞ tarafından yayınlanan ve 1 Mart 2024 tarihinden itibaren uygulanmaya başlayan elektrik alım fiyatları 163,45 kr/kWh ve yerli aksam destek fiyatları 44,41 TL kr/kWh olarak belirlenmiştir.

4. ŞEBEKEYE BAĞLI FOTOVOLTAİK SİSTEM BOYUTLANDIRMASI

Son bölümdeki teknik ve mevzuat gerekliliklerini ve ayrıca Türkiye tarifelerini anladıktan sonra, bir sonraki adım, fotovoltaik sisteminin seçilen konumu hakkında bir çalışma yapmak, gerekli bileşenleri seçmek ve fotovoltaik sistemini boyutlandırmaktır.

4.1. Coğrafi Konumu

Artvin, Doğu Karadeniz Bölümü'nün en doğusunda bulunan ve Gürcistan ile sınırı bulunan bir şehirdir. 7.393 kilometre kare yüz ölçümüne sahip Artvin ilinin komşu illeri olarak doğu sınırında Ardahan, güneyinde Erzurum, batısında ise Rize bulunmaktadır. Kuzeyde Karadeniz kıyılarına sınırı olan şehrin kuzeybatı sınırı Türkiye'yi Gürcistan'a bağlayan sınırlar ile çevrilmiştir. İlin denizden yüksekliği 345 m'dir (Artvin Valiliği, 2024). Şekil 17'de Artvin ilinin genel görüntüsü görülmektedir.



Şekil 17. Artvin'in genel görüntüsü (Artvin Valiliği, 2024)

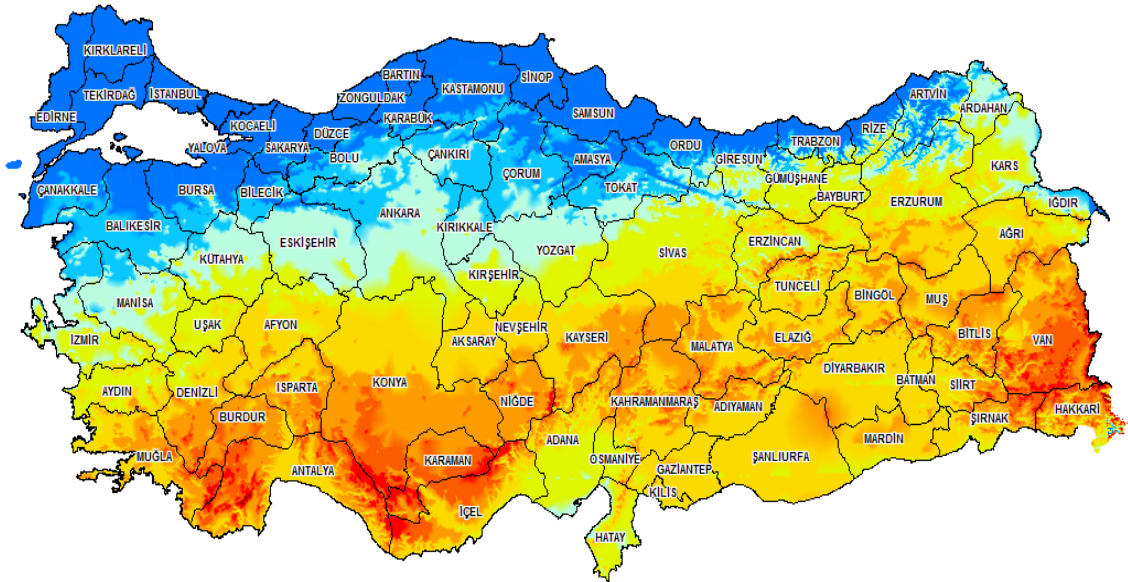
Güneş Enerji Santrali Artvin İli Ardanuç İlçesi Naldöken Köyü 104 ada 20, 26 ve 32 parseller ile Yolüstü Köyü 149 ada 2 parseller üzerinde kurulacaktır. Tablo 2 seçilen köyün coğrafi özelliklerini göstermektedir.

Tablo 2. Artvin'in coğrafi özelliği

Artvin	Konum
Enlem	41° 07'
Boylam	42° 00'
Rakım	345 m

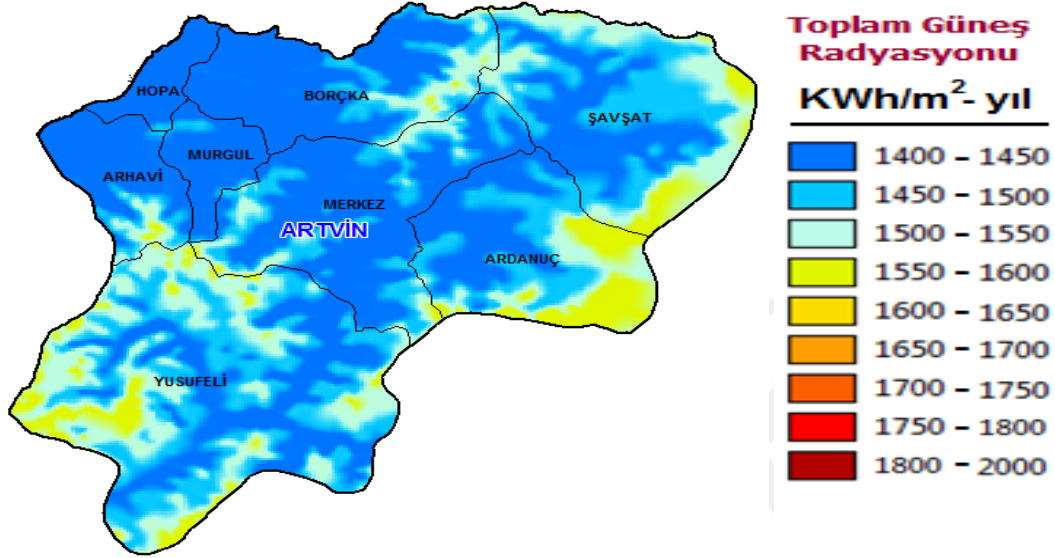
4.2. Güneş Kaynağı

Türkiye toprakları, ortalama yaklaşık 2.400 kWh/m²'lik, bol ve yüksek yıllık güneş radyasyon oranlarına sahiptir. Artvin ilinde hakim hava yazın sıcaktır, sıcaklık gündüzleri yaklaşık 30°C veya daha fazladır ve kışın sıcaklıklar yaklaşık 10°C'dir. Yıllık ışınlama 1500-1700 kWh/m²'dir, bu alandaki bağıl nem yaklaşık % 40'tır (Mohanty, Muneer, vd., 2016). Şekil 18, Türkiye topraklarının doğrudan normal ısınlamasını (DNI) göstermektedir



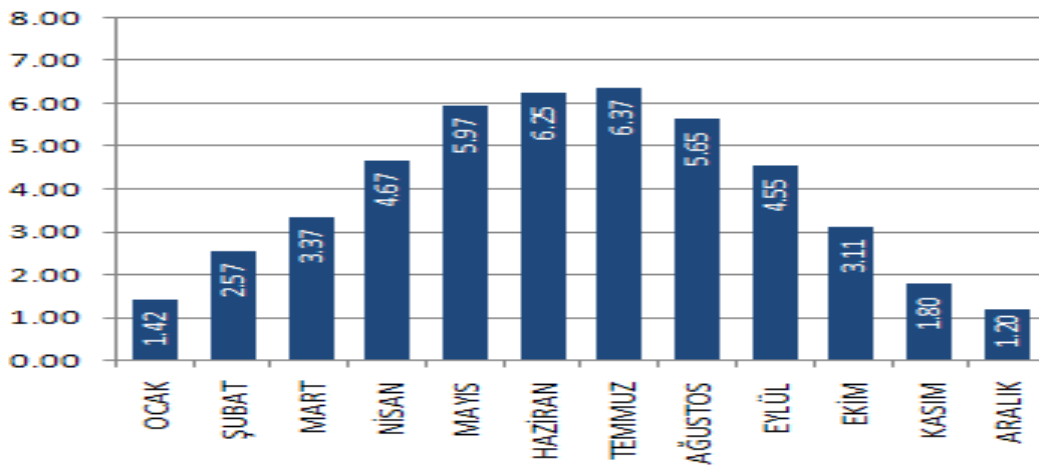
Şekil 18. Türkiye topraklarında yıllık güneş ışınlamı (GEPA, 2024)

Şekil 18 incelendiğinde ışıınım değeri en düşük olan bölgelerin Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesi olduğu, ışıınım değeri en iyi olan bölgelerin Doğu Akdeniz ve Doğu Anadolu Bölgeleri olduğu görülmektedir. Şekil 19, Artvin topraklarının yıllık güneş ışıınımını göstermektedir.



Şekil 19. Artvin topraklarında yıllık güneş ışıınımı (GEPA, 2024)

Şekil 19 incelendiğinde ışıınım değeri en iyi olan ilçelerin Ardanuç, Şaşat ve Yusufeli ilçelerinde olduğu görülmektedir. Şekil 20, Ardanuç ilçesinin Radyasyon değeri göstermektedir.

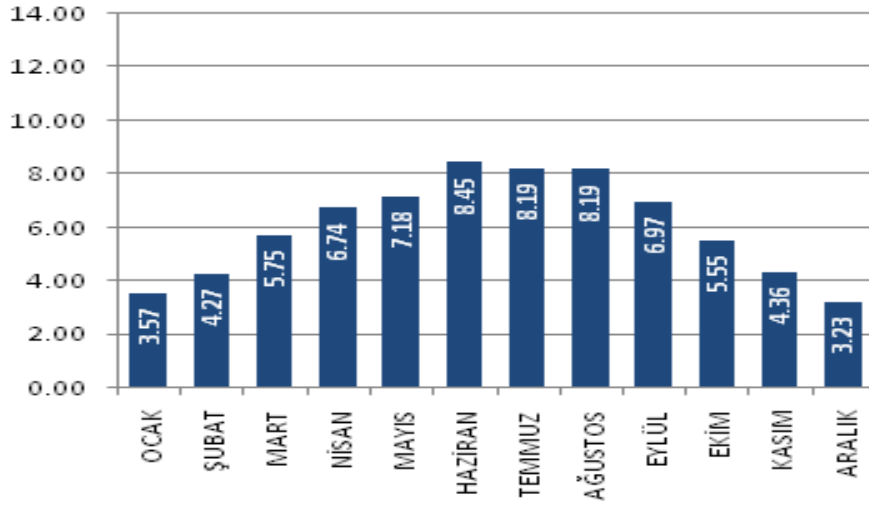


Şekil 20. Ardanuç global radyasyon değeri (KWh/m²-gün) (GEPA, 2024)

Şekil 20 incelendiğinde Ardanuç ilçesinin en yüksek global radyasyon değerine Temmuz ayında ulaştığı, en düşük değere Aralık ayında düştüğü görülmektedir.

4.3. Meteorolojik Veriler

Bu tezde kullanılan hava durumu verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınmıştır. Şekil 21 Ardanuç ilçesinin güneşlenme sürelerini göstermektedir.



Şekil 21. Ardanuç güneşlenme süreleri (Saat) (GEPA, 2024)

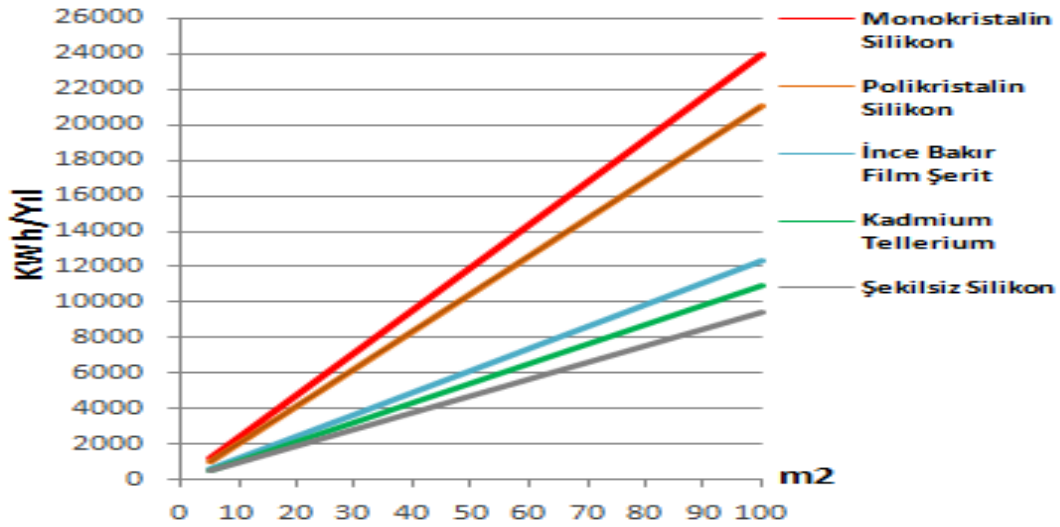
Şekil 21 incelendiğinde Ardanuç ilçesinin en yüksek güneşlenme süresine Haziran ayında ulaştığı, en düşük güneşlenme süresinin Aralık ayında gerçekleştiği görülmektedir.

4.4. Bileşen Seçimi

Tezin finansal açıdan cazip hale getirilmesi için sisteme uygun bileşenlerin eklenmesi gerekmektedir. Doğru seçim, finansal analiz kabiliyetine, kanıtlanmış kaliteye ve proje ömrü boyunca garantiye sahip olmak için tüm bileşenlerin rekabetçi fiyatlara sahip olması gerektiği anlamına gelmektedir. Ayrıca, tüm bileşenler analiz edilmeli ve birbirleriyle eşleştirilmelidir. Bu nedenle bileşenlerin maliyetlerini, kalitelerini ve kullanım ömürlerini keşfetmek için fotovoltaik modül pazarını incelemeye ihtiyaç vardır.

4.4.1. Fotovoltaik Modülleri

Fotovoltaik modül piyasasını inceledikten sonra, tez için beş seçenek seçilmiştir. Bu tezde Polikristal, Monokristal, İnce film CIS, İnce film amorf silikon ve Multi-junction fotovoltaik incelenmiştir. Seçilen modüller, teknolojiye bağlı olarak Uluslararası Elektroteknik Komisyonu standartlarını karşılamaktadır. Ek olarak, seçilen bu modüller finansal açıdan caziptir ve en düşük maliyete sahiptir. Şekil 22 Ardanuç ilçesinde fotovoltaik Tipine göre üretilebilecek Enerjiyi göstermektedir.



Şekil 22. Ardanuç fotovoltaik tipi-alan-üretilebilecek enerji (GEPA, 2024)

Şekil 22 incelendiğinde Ardanuç ilçesinde en yüksek enerji üretiminin Monokristal panel ve Polikristal panel ile yapılabileceği görülmektedir. Bu nedenle Monokristal ve Polikristal panellerin hesaplaması ve simülasyonu yapılacaktır.

4.4.1.1. Polikristal Modül

Bu tez için seçilen Polikristal fotovoltaik modülü üreticisi Canadian Solar dır. Bu üretici, dünyadaki en büyük fotovoltaik üreticilerinden biridir ve makul fiyata yüksek kalitede ürün sağlamaktadır. Seçilen modül HiKu5 CS3Y435-460P modelidir, 450 W nominal güce, % 19,1 verimliliğe ve 156 polikristal hücre silikona sahiptir. Bu modüller arasındaki sıkı ve pozitif güç toleranslarına göre seçilmiştir, bu gerçek kayıpları en aza indirecek ve sistem veriminde iyileşmeye yol açacaktır. Tablo 3 seçilen modülün temel özelliklerini göstermektedir.

Tablo 3. Polikristal fotovoltaik modülünün temel özellikleri ve maliyeti

Üretici Firma	Canadian Solar	
Modeli	HiKu5 CS3Y435-460P	
Ülke	Kanada	
Tip	Polikristal	
Fiyat	57 Euro	
Ürün Garantisi	12 Yıl	
	Standart Test Koşulları	Normal Çalışma Koşulları
Maksimum Güç (Pmax)	450 Wp	324 Wp
Maksimum Güçteki Voltaj (Vmpp)	42.4 V	38.9 V
Maksimum Güçte Akım (Impp)	10.62 A	8.33 A
Açık Devre Voltajı (Voc)	51.6 V	47.9 V
Kısa Devre Akımı (Isc)	11.28 A	8.98 A
Panel Verimliliği	19,10 %	
Sıcaklık	42±3 °C	
Çalışma Sıcaklık Aralığı	-40~85 °C	
Pmax Sıcaklık Katsayısı	-0,36 %/°C	
Organik Bileşikler Sıcaklık Katsayısı	-0,28 %/°C	
Isc Sıcaklık Katsayısı	0,05 %/°C	
Maksimum Sistem Voltajı	1500V	
Seri Sigorta Değeri	20A	
Panel Boyutu (Y/G/D)	2284x1048x35 mm	
Ağırlık	26,3 kilo	
Cam Türü	Sertleştirilmiş	
Cam Kalınlığı	3,2 mm	
Çerçeve Türü	Eloksallı Alüminyum	
Bağlantı Kutusu Koruma Sınıfı	IP68	
Bağlayıcı Türü	MC4	
Kablo Kesiti	4mm 2	

4.4.1.2. Monokristal Modül

Bu tez için seçilen monokristal modül, JA Solar Technology üreticisine aittir. Bu üreticinin ürünleri tüm uluslararası standartları karşılamaktadır. Bu seçim, düşük maliyet ve yüksek verimlilik verilerine dayanmaktadır. Seçilen modül, 450 W nominal güce ve % 20,30 verimliliğe sahip JAM72S20-450/MR modelidir. Ürün 15 Yıl %90,3 Çıkış Gücü, 25 Yıl %84,8 Çıkış Gücü garantisi sunmaktadır. Tablo 4, seçilen modülün ana özelliklerini ve maliyetini göstermektedir.

Tablo 4. Monokristal fotovoltaik modülünün temel özellikleri ve maliyeti

Üretici Firma	JA SOLAR	
Modeli	JAM72S20-450/MR	
Ülke	Çin	
Tip	Monokristal	
Fiyat	52 Euro	
Ürün Garantis	12 Yıl	
	Standart Test Koşulları	Normal Çalışma Koşulları
Maksimum Güç (Pmax)	450 Wp	340 Wp
Maksimum Güçteki Voltaj (Vmpp)	41,52V	39.19V
Maksimum Güçte Akım (Impp)	10.84A	8.68A
Açık Devre Voltajı (Voc)	49,7 V	46,9 V
Kısa Devre Akımı (Isc)	11.36 A	9.25A
Panel Verimliliği	20,30 %	
Sıcaklık	45±2 °C	
Çalışma Sıcaklık Aralığı	-40~85 °C	
Pmax Sıcaklık Katsayısı	-0,35 %/°C	
Organik Bileşikler Sıcaklık Katsayısı	-0,272 %/°C	
Isc Sıcaklık Katsayısı	0,044 %/°C	
Maksimum Sistem Voltajı	1500V	
Seri Sigorta Değeri	20A	
Panel Boyutu (Y/G/D)	2112x1052x35 mm	
Ağırlık	24,5 kilo	
Cam Türü	Sertleştirilmiş	
Cam Kalınlığı	3,2 mm	
Çerçeve Türü	Eloksallı Alüminyum	
Bağlantı Kutusu Koruma Sınıfı	IP68	
Bağlayıcı Türü	MC4	
Kablo Kesiti	4mm 2	

4.4.2. Eviriciler

Sisteme uygun bir evirici seçmek için, Türkiye'deki şebekenin gerekli koşulları ve evirici pazarı detaylı olarak incelenmiştir. Detaylı inceleme sonucu, Alman üretici Huawei Technologies tarafından üretilen , 1000 kW gücünde Huawei SUN-2000-100KTL-M1 100kW Üç Faz evirici seçilmiştir. Huawei SUN-2000-100KTL-M1 100kW Üç Faz evirici yüksek güç yoğunluğuna sahiptir. Akıllı, verimli, emniyetli Huawei SUN-2000-100KTL-M1 100kW Üç Faz evirici düşük maliyetlerle yüksek

kazanç sağlar. Zor iklim şartlarında çalışabilecek şekilde üretilmiştir. Seçilen evirici Türkiye şebeke kodu gereksinimlerine ve yüksek verimliliğine uygunluğa dayanmaktadır. Tablo 5, seçilen eviricinin ana karakteristiğini ve maliyetini göstermektedir.

Tablo 5. Evirici ana özellikleri ve maliyeti

Üretici Firma	Huawei Technologies
Modeli	SUN-2000-100KTL-M1
Ülke	Almanya
Güç	110 kW
Fiyat	304 Euro
Giriş Verileri(DC)	
Maksimum DC Voltajı	1100V
Min. DC Voltajı Besleme Girişini Başlatmak İçin	200V
Maksimum DC Akımı	260A
MPP(T) Voltaj Aralığı	200~1000V
MPP İzleyicilerinin Sayısı	10
DC Girişleri	20
Bağlayıcılar	MC4
Çıktı Verileri (AC)	
Maksimum AC Gücü	110 kW
Nominal AC Gücü	100 kilovat
Nominal AC Voltajı	380, 400, 480V
Sıklık	50, 60 Hz
Güç Faktörü (cosθ)	0,8
Bozulma (THD)	< %3
Maksimum Verimlilik	98,80%
Euro Verimliliği	98,60%
Genel Veriler	
Boyutlar (Y/G/D)	700x1035x365 mm
Ağırlık	90 kilo
Gece Güç Tüketimi	< 3,5 W
Çalışma Sıcaklığı	-25 ~ +60 °C
Transformatör	Trafosuz
Koruma Sınıfı	IP66
Nem	0-100 %
Soğutma	Fan
Maksimum Yükseklik	4000 metre
Arayüz	Kablosuz ağ

4.4.3. Sistemin ve Diğer Elektrikli Bileşenlerin Montajı

Eksiksiz bir sisteme sahip olmak için, sistemin montajını, kablolar, bağlantı kutuları vb. gibi diğer gerekli bileşenleri de hesaba katmak gerekmektedir. Bu nedenle, kurulum ve gerekli bileşenler için Türkiye 'deki ortalama maliyeti tahmin etmek için yerel şirketlerle iletişime geçilerek ortalama maliyetler hesaplanmıştır. Tablo 6 tahmini maliyetleri göstermektedir.

Tablo 6. Fotovoltaik sistem kurulumunun ve elektrik bileşenlerinin maliyeti

Sistemin Kurulumu	
Sistem Türü	Nominal Güç Başına Maliyet
Polikristal	0,125 Euro Wp
Monokristal	0,115 Euro Wp
Operasyon ve Bakım	0,02 Euro
Kablolar,ve Elektrik Bileşenleri	1 %

4.5. Sistemin Boyutlandırılması

Bu bölümde, bu tezin fotovoltaik sistemini tasarlamak için adım adım hesaplama yapılacaktır. Bu nedenle, aşağıdaki prosedürü takip etmek gerekli olacaktır:

- Güç boyutlarının hesaplanması.
- AC aktif gücün belirlenmesi.
- Eviricinin DC giriş gücünün belirlenmesi.
- Nominal güç oranının tanımı.
- Gerilim boyutlarının hesaplanması.
- Modül seviyesinde gerilim boyutlarının hesaplanması.

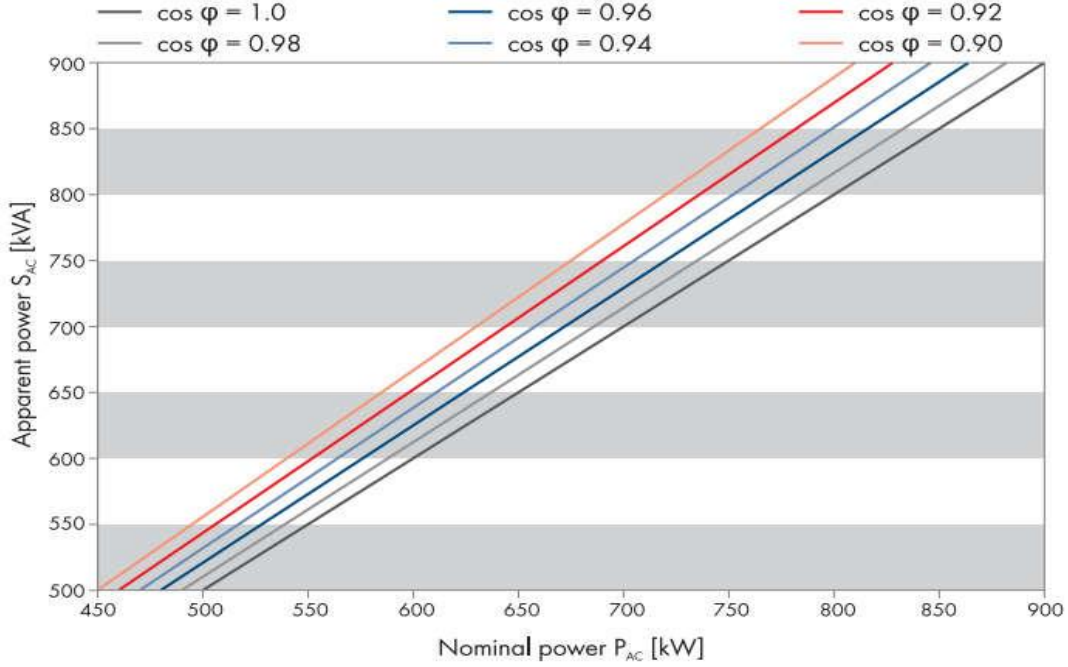
Dizi seviyesinde gerilim boyutlarının hesaplanması prosedürü monokristal ve polikristal panel için yapılacaktır.

4.5.1. Güneş Enerji Santralinin Güç Boyutlarının Hesaplanması

4.5.1.1. AC Aktif Gücün Belirlenmesi

AC aktif güç, optimum hava koşullarında şebekeye gönderilen gücü gösterir. Bu, planlanan çıkış AC gücüne (3 MW), güç faktörüne ($\cos \phi$), eviricinin görünen

gücüne ve şebekenin AC gerilimine bağlıdır. Şekil 23, AC aktif gücünün güç faktörüne bağımlılığını göstermektedir.



Şekil 23. Güç faktörüne bağlı olarak ac aktif güç

Şekil 23 incelendiğinde AC aktif gücün eviricinin görünen gücü ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. Bu güç Denklem (2) ile hesaplanmaktadır. Burada P_{AC} , AC aktif gücü S_{AC} , eviricinin görünen gücünü ifade etmektedir.

$$P_{AC} = S_{AC} \cdot \cos \phi_{0,9}^1 \quad (2)$$

$$P_{AC} = 1000 \cdot 1 = 1000 \text{ kW} \quad (3)$$

4.5.1.2. Eviricinin DC Giriş Gücünün Belirlenmesi

Eviricinin DC giriş gücü, şebekeye gönderilecek istenen AC gücünü alabilmesi için eviriciye girmesi gereken güçtür. Hesaplamada, eviricinin veriminin fotovoltaiik gerilimlerinden etkilendiğini bilmek önemlidir. Bu güç Denklem (4) ile hesaplanmaktadır.

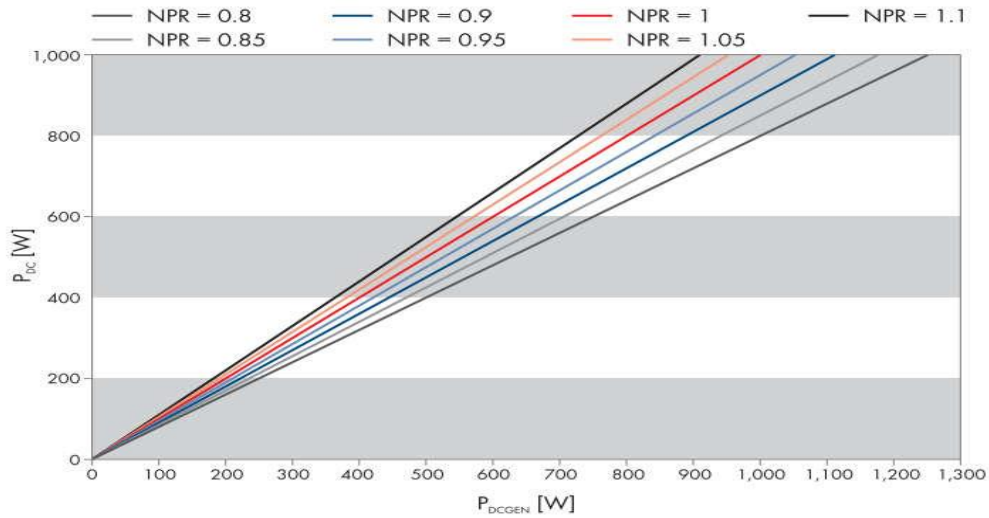
$$P_{DC} = \frac{P_{AC}}{\eta} \quad (4)$$

Bu denklemde P_{DC} , eviricinin DC gücünü, P_{AC} , eviricinin AC aktif gücünü, η , eviricinin verimliliğini ifade etmektedir.

$$P_{DC} = \frac{1000}{0.984} = 1016 \text{ kW} \quad (5)$$

4.5.1.3. Nominal Güç Oranının Tanımı

Fotovoltaik dizisi, gücüyle ilgili olarak evirici ile koordine edilmelidir. Bu nedenle nominal güç oranını (NPR) hesaplamak gerekir. NPR'nin hesaplanmasında aşırı boyutlandırma ($P_{DC} < P_{DC,GEN}$) veya yetersiz boyutlandırma ($P_{DC} > P_{DC,GEN}$) ile ilgili kararsızlık görünür. Yıllık güneş ışınlamına göre karar verilir. Bir eviriciyi aşırı büyütmenin ana nedeni, düşük koşullarda güç çıkışını maksimize etmektir. Şekil 24, NPR'ye bağlı fotovoltaik dizisi gücünü göstermektedir.



Şekil 24. Fotovoltaik dizisi gücünün NPR'ye bağlılığı

Şekil 24 incelendiğinde nominal güç oranı düştükçe fotovoltaik dizi gücü azaldığı görülmektedir. Nominal güç oranı (NPR) Denklem (6) ile ifade edilmektedir.

$$NPR = \frac{P_{DC}}{P_{DC,GEN}} \quad (6)$$

Bu denklemde P_{DC} , eviricinin DC gücünü, $P_{DC,GEN}$, fotovoltaik dizi gücünü ifade etmektedir.

NPR'yi hesaplamak için fotovoltaiik dizi gücünü bilmek gerekir. Önceki açıklamaya bağılı olarak, eviriciyi aşırı büyötmeye gerek yoktur. Bu nedenle, fotovoltaiik dizi gücünün P_{DC} 'den daha büyük olacağını varsaymak mümkündür. Bu nedenle $P_{DC,GEN} = 1050$ kW olduğunu varsaymak mümkündür.

$$NPR = \frac{1016}{1050} = 0,9676 = 96,76\% \quad (7)$$

4.5.2. Gerilim Seviyelerinin Hesaplanması

4.5.2.1. Fotovoltaiik Modöl Seviyesi

İlk adım, maksimum açık devre gerilimini hesaplamaktır. Açık devre geriliminin en yüksek değeri düşük sıcaklıklarda olacaktır. Bunu hesaplamak için, mahalde beklenebilecek daha düşük sıcaklık ve her modölün sıcaklık katsayısının dikkate alınması gerekecektir. Hava durumunu inceledikten sonra, modöl çalışması sırasında en düşük sıcaklık 15 °C'ye ulaşabilmektedir. Bu bölümde tüm modüller için maksimum açık devre geriliminin hesaplanması yapılacaktır. Maksimum fotovoltaiik modöl gerilimi Denklem (8) ile hesaplanmaktadır.

$$V_{max,oc} = V_{oc} \cdot \left(1 + \frac{(T_{Low,a} - 25^{\circ}\text{C})\beta_{Voc}}{100}\right) \quad (8)$$

Bu denklem de $V_{max,oc}$, Maksimum fotovoltaiik modöl gerilimini, V_{oc} , Modölün açık devre gerilimini, $T_{Low,a}$, minimum sıcaklığı, β_{Voc} , Modölün sıcaklık katsayısını ifade etmektedir. Tüm modüller için Denklem (8) ile yapılan hesaplama ile Tablo 7’de gösterilen maksimum devre gerilimleri elde edilmiştir.

Tablo 7. Modüllerin maksimum çıkış devresi gerilimi

Sistem Türü	V_{oc}	β_{Voc}	$T_{Low,a}$	$V_{max,oc}$
Polikristal	51.6 V	-0.28 °C	15 °C	53.04 V
Monokristal	49.7 V	-0.272 °C	15 °C	51.09 V

Tablo 7’de gösterilen değerler incelendiğinde beklenen minimum sıcaklıkta Modülün açık devre gerilimini polikristal panelde daha yüksek olduğu görülmektedir.

Bir sonraki adım, minimum açık devre gerilimini hesaplamaktır. Açık devre geriliminin en düşük değeri yüksek sıcaklıklarda olacaktır. Bunu hesaplamak için, mahalde beklenebilecek en yüksek sıcaklığı ve her modülün sıcaklık katsayısını hesaba katmak gerekecektir. Hava durumunu inceledikten sonra, en yüksek sıcaklık 50 °C’ye ulaşabilir. Minimum fotovoltaiik modül gerilimi Denklem (9) ile hesaplanmaktadır.

$$V_{min,oc} = V_{MPP} \cdot \left(1 + \frac{(T_{max,a} - 25^{\circ}\text{C})\beta_{VMPP}}{100}\right) \quad (9)$$

Bu denklem de $V_{min,oc}$ Minimum fotovoltaiik modülü gerilimini, V_{MPP} fotovoltaiik modülünün maksimum güçteki gerilimini, $T_{max,a}$ beklenen maksimum sıcaklığı, β_{VMPP} Modülün sıcaklık katsayısını ifade etmektedir. Tüm modüller için Denklem (9) ile yapılan hesaplama sonucu Tablo 8’de gösterilen minimum çıkış gerilimleri elde edilmiştir.

Tablo 8. Tüm modüllerin minimum çıkış gerilimi

Sistem Türü	V_{MPP}	β_{VMPP}	$T_{max,a}$	$V_{min,oc}$
Polikristal	42,4 V	-0.36 °C	50°C	38.58 V
Monokristal	41,52 V	-0.35 °C	50 °C	37.89 V

Tablo 8’de gösterilen değerler incelendiğinde beklenen maksimum sıcaklıkta minimum çıkış geriliminin monokristal fotovoltaiik panelinde daha yüksek olduğu görülmektedir.

Fotovoltaiik modül seviyesi için son adım, maksimum fotovoltaiik modül akımını hesaplamaktır. Fotovoltaiik modül akımının en yüksek değeri yüksek sıcaklıklardadır. Bunu hesaplamak için, mahalde beklenebilecek en yüksek sıcaklığı ve her modülün sıcaklık katsayısını hesaba katmak gerekecektir. Maksimum fotovoltaiik modül akımı Denklem (10) ile hesaplanmaktadır.

$$I_{max,DC} = I_{SC} \cdot \left(1 + \frac{(T_{max,a} - 25^{\circ}\text{C})\alpha}{100}\right) \quad (10)$$

Bu denklem de $I_{max,DC}$ Maksimum fotovoltaiik modül akımını, I_{SC} fotovoltaiik modülünün kısa devre akımını, $T_{max,a}$ beklenen maksimum sıcaklığı, α Modülün sıcaklık katsayısını ifade etmektedir. Tüm modüller için Denklem (10) ile yapılan hesaplama sonucu Tablo 9’da gösterilen tüm modüllerin maksimum fotovoltaiik modülü akımları elde edilmiştir.

Tablo 9. Modüllerin maksimum akımı

Sistem Türü	I_{SC}	α	$T_{max,a}$	$I_{max,DC}$
Polikristal	11.28 A	0.05 °C	50°C	11.42 A
Monokristal	11.36 A	0.044°C	50 °C	11.48 A

Tablo 13’de gösterilen değerler incelendiğinde beklenen maksimum sıcaklıkta fotovoltaiik modülü akım değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir.

4.5.2.2. Dizi Seviyesi

İlk adım, dizi başına maksimum fotovoltaiik modülü sayısını hesaplamaktır. Dizi, dizinin geriliminin her zaman eviricinin maksimum giriş geriliminin altında olmasını sağlayan fotovoltaiik modüllerinin sayısından oluşmalıdır. Dizideki gerilimin evirici giriş geriliminin üzerine çıkması durumunda, gecikmeli başlatma ve eviricide hasar meydana gelir ve bunlar da verim kayıplarına yol açar. Bu nedenle, dizideki maksimum gerilim, fotovoltaiik modüllerinin izin verilen maksimum geriliminin üzerine çıkmamalıdır. Dizi başına maksimum fotovoltaiik modülü sayısı Denklem (11) ile ifade edilmektedir.

$$N_{max,string} \leq \frac{V_{DC,max,inv}}{V_{max,oc}} \quad (11)$$

Bu denklemde $N_{max,string}$ dizi başına maksimum fotovoltaiik modülü sayısını, $V_{DC,max,inv}$ eviricinin maksimum giriş gerilimini, $V_{max,oc}$ fotovoltaiik

modülünün maksimum gerilimini ifade etmektedir. $V_{max,oc}$ 1000 V olarak kabul edilmektedir. Tüm modüller için Denklem (11) ile yapılan hesaplama sonucu Tablo 10'da gösterilen tüm dizi başına maksimum fotovoltaiik modül sayısı elde edilmiştir.

Tablo 10. Dizi başına maksimum fotovoltaiik modül sayısı

Sistem Türü	$V_{DC,max,inv}$	$V_{max,oc}$	$N_{max,string}$
Polikristal	53.04 V	1500V	28
Monokristal	51.09 V	1500V	29

Tablo 10'da gösterilen değerler incelendiğinde beklenen maksimum gerilimde dizi başına maksimum fotovoltaiik modül sayısının monokristal modül sayısından daha yüksek olduğu görülmektedir.

Sonraki adım, dizi başına minimum fotovoltaiik modül sayısını hesaplamaktır. Dizin minimum geriliminin her zaman eviricinin minimum MPP geriliminin üzerinde olmasını sağlamak için dizideki minimum modül sayısını bilmek önemlidir. Dizi gerilimi, eviricinin minimum MPP geriliminin altına düşerse verim kayıpları oluşur. Dizi başına minimum modül sayısı Denklem (12) ile hesaplanmaktadır.

$$N_{min,string} \geq \frac{V_{DC,MPP,min,inv}}{V_{min,oc}} \quad (12)$$

Bu denklemde $N_{min,string}$ dizi başına minimum fotovoltaiik modül sayısını, $V_{DC,MPP,min,inv}$ sürücünün minimum MPP gerilimini, $V_{min,oc}$ fotovoltaiik modülünün minimum gerilimini ifade etmektedir. $V_{DC,MPP,min,inv}$ 596 V olarak kabul edilmektedir. Tüm modüller için Denklem (12) ile yapılan hesaplama sonucu Tablo 11'de gösterilen dizi başına minimum fotovoltaiik modül sayıları elde edilmiştir.

Tablo 11. Dizi başına minimum fotovoltaiik modül sayısı

Sistem Türü	$V_{DC,MPP,}$	$V_{min,oc}$	$N_{min,string}$
Polikristal	596 V	38.58 V	15
Monokristal	596 V	37.19 V	16

Tablo 11’de gösterilen değerler incelendiğinde beklenen sürücünün minimum geriliminde dizi başına minimum fotovoltaiik modül sayısı polikristal fotovoltaiik panelinin sahip olduğu görülmektedir.

Dizi başına maksimum ve minimum modül sayısı hesaplandıktan sonra, dizi başına optimum modül sayısını hesaplamak gerekir. Bu sayı, dizi başına minimum sayısından az olmamalı ve dizi başına maksimum modül sayısının üzerine çıkmamalıdır. Dizi başına optimum fotovoltaiik modül sayısı Denklem (13) ile formülize edilmektedir.

$$N_{min,string} \leq N_{string} \leq N_{max,string} \quad (13)$$

Bu denklemde $N_{min,string}$ dizi başına minimum fotovoltaiik modül sayısını, $N_{max,string}$ dizi başına maksimum fotovoltaiik modül sayısını, N_{string} dizi başına optimum fotovoltaiik modül sayısını ifade etmektedir. Tablo 12 dizi başına optimum fotovoltaiik modül sayısını göstermektedir.

Tablo 12. Dizi başına optimum fotovoltaiik modül sayısı

Sistem Türü	N_{string}
Polikristal	27
Monokristal	28

Tablo 12’de gösterilen değerler incelendiğinde dizi başına optimum fotovoltaiik modül sayısının en yüksek Monokristal fotovoltaiikde olduğu görülmektedir.

Dizi başına optimum modül sayısı belirlendikten sonra, dizi gerilimlerinin şartlara uygun olup olmadığı kontrol edilmelidir. Başka bir deyişle, dizinin maksimum geriliminin, sürücünün maksimum giriş geriliminin üzerinde olmadığı ve dizinin minimum geriliminin, sürücünün minimum MPP geriliminin üzerinde olup olmadığı kontrol edilmelidir. Dizi gerilimleri Denklem (14) ve Denklem (15) ile kontrol edilmektedir.

$$V_{DC,max,string} = N_{string} \cdot V_{max,oc} < V_{DC,max,inv} \quad (14)$$

$$V_{DC,min,string} = N_{string} \cdot V_{min,oc} < V_{DC,MPP,min,inv} \quad (15)$$

Bu denklemde $V_{DC,max,string}$ dizinin maksimum gerilimini, N_{string} dizi başına optimum fotovoltaik modül sayısı, $V_{max,oc}$ dizinin maksimum gerilimini, $V_{DC,max,inv}$ eviricinin maksimum giriş gerilimini, $V_{DC,min,string}$ dizinin minimum gerilimini, $V_{min,oc}$ fotovoltaik modülünün minimum gerilimini, $V_{DC,MPP,min,inv}$ Sürücünün minimum MPP gerilimini ifade etmektedir.

$N_{max,string}$ dizi başına maksimum fotovoltaik modül sayısı, N_{string} dizi başına optimum fotovoltaik modül sayısı ifade etmektedir. Tablo 13 dizi gerilimlerini göstermektedir.

Tablo 13. Dizi gerilimleri

Sistem Türü	N_{string}	$V_{max,oc}$	$V_{min,oc}$	$V_{DC,max,string}$	$V_{DC,min,string}$
Polikristal	27	53.04 V	38.58 V	1432.08 V	1041.61 V
Monokristal	28	51.09 V	37.19 V	1430.52 V	1041.32 V

Tablo 13'te gösterilen değerler incelendiğinde dizi başına optimum fotovoltaik modül sayısına göre dizi gerilimlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

Yapılan incelemeden, gerilimin tüm modüller için limitleri aşmadığını görmek mümkündür. Artık evirici başına optimum dizi sayısını hesaplamak mümkün olacaktır. Bunun için önce minimum dizi sayısı, sonra maksimum dizi sayısı hesaplanmalı ve daha sonra evirici başına optimum dizi sayısını bulmak mümkün olacaktır. Evirici başına minimum dizi sayısı Denklem (16) ile formülize edilmektedir.

$$n_{min,string} \geq \frac{P_{DC,GEN}}{P_{max,mod} N_{string}} \quad (16)$$

Bu denklemde $n_{min,string}$ minimum dizi sayısını, $P_{DC,GEN}$ dizinin gücünü, $P_{max,mod}$ fotovoltaik modülünün maksimum gücünü, N_{string} dizi başına optimum fotovoltaik modül sayısını ifade etmektedir. $P_{DC,GEN}$ 1050 kW olup, Tablo 14 evirici başına minimum dizi sayısını göstermektedir.

Tablo 14. Evirici başına minimum dizi sayısı

Sistem Türü	$P_{DC,GEN}$	$P_{max,mod}$	N_{string}	$n_{min,string}$
Polikristal	1050 kW	450 W	27	86
Monokristal	1050 kW	450 W	28	83

Tablo 14’de gösterilen değerler incelendiğinde dizi gücüne göre evirici başına minimum dizi sayısının en az Monokristal fotovoltaiğe olduğu görülmektedir. Evirici başına maksimum dizi sayısı Denklem (17) ile formülize edilmektedir.

$$n_{max,string} \leq \frac{I_{DC,max,inv}}{I_{DC,max,string}} \quad (17)$$

Bu denklemde $n_{max,string}$ maksimum dizi sayısını, $I_{DC,max,inv}$ sürücünün maksimum giriş akımını, $I_{DC,max,string}$ dizinin maksimum akımını, ifade etmektedir. , $I_{DC,max,string}$ 1635 A olup, Tablo 15 evirici başına maksimum dizi sayısını göstermektedir.

Tablo 15. Evirici başına maksimum dizi sayısı

Sistem Türü	$I_{DC,max,string}$	$I_{DC,max,inv}$	$n_{max,string}$
Polikristal	11.42 A	1635 A	143
Monokristal	11.48 A	1635 A	142

Tablo 15’de gösterilen değerler incelendiğinde dizi akımına göre evirici başına minimum dizi sayısının Monokristal ve Polikristal sistemlerde birbirine yakın olduğu görülmektedir. Evirici başına optimum dizi sayısı Denklem (18) ile formülize edilmektedir.

$$n_{min,string} \leq n_{string} \leq n_{max,string} \quad (18)$$

Bu denklemde $n_{max,string}$ maksimum dizi sayısını, $n_{min,string}$ minimum dizi sayısını, n_{string} optimum dizi sayısını ifade etmektedir. Tablo 16 evirici başına optimum dizi sayısını göstermektedir.

Tablo 16. Evirici başına optimum dizi sayısı

Sistem Türü	$n_{min,string}$	$n_{max,string}$	n_{string}
Polikristal	86	143	101
Monokristal	83	142	95

Tablo 16’da gösterilen değerler incelendiğinde evirici başına optimum dizi sayısının en az Monokristal fotovoltaik modüllerde olduğu görülmektedir.

Tüm hesaplamalar yapıldıktan sonra, bu tez için gerekli modül ve evirici sayısını bilmek mümkündür. Her evirici şebekeye 1050 kw iletir, sistemin planlanan gücü 2000 kW’dır. Bu nedenle 2 adet eviriciye ihtiyaç duyulacaktır. Tüm sistem için gerekli modül sayısı Denklem (19) ile hesaplanmaktadır.

$$N_{module} = N_{string} \cdot n_{string} \cdot N_{inverter} \quad (19)$$

Tablo 17 Denklem (19) ile hesaplanan tüm sistem için gerekli modül sayısını göstermektedir.

Tablo 17. Tüm sistem için gerekli toplam modül sayısı

Sistem Türü	N_{string}	n_{string}	$N_{inverter}$	N_{module}
Polikristal	27	101	2	5454
Monokristal	28	95	2	5320

Tablo 17’de gösterilen değerler incelendiğinde tüm sistemler için toplam modül sayısının en az monokristal sistemlerde en yüksek ince film CIS sistemlerde olduğu görülmektedir.

Boyutlandırmanın tüm adımlarından sonra, sistem için gerekli evirici sayısını, evirici başına dizileri, dizi başına modülleri ve tüm sistem için toplam modül sayısını bilmek mümkündür. Bu hesaplamalar ile sistemin toplam yatırım maliyetini ve ihtiyaç duyulan toplam alanı değerlendirmek mümkündür. Yıllık fotovoltaik dizisi enerji üretimi Denklem (20) ile, yıllık AC enerji üretimi Denklem (21) ile hesaplanmaktadır. Bu denklemlerde E_{DC} yıllık fotovoltaik dizisi enerji üretimini, E_{yearly} yıllık ışınlanmayı, $P_{DC,GEN}$ fotovoltaik dizi gücünü, N_{inv} evirici sayısını, E_{AC} yıllık

fotovoltaik dizisi AC enerji üretimini ifade etmektedir. $P_{DC,GEN}$ 1050 kW, E_{yearly} $1015 \frac{kW}{m^2}$ değerlerine eşittir. Denklem (20) ve Denklem (21) de değerler yerine konularak yıllık enerji üretimleri hesaplanır.

$$E_{DC} = \frac{E_{yearly} \cdot P_{DC,GEN} \cdot N_{inv}}{1 \frac{kW}{m^2}} \quad (20)$$

$$E_{DC} = \frac{1015 \frac{kW}{m^2} \cdot 1050 \cdot 3}{1 \frac{kW}{m^2}} = 3197250 \frac{kWh}{m^2}$$

$$E_{AC} = E_{DC} \cdot n_{inv} \quad (21)$$

$$E_{AC} = 3197250 \cdot 0.984 = 3146094 \frac{kWh}{m^2}$$

5. ŞEBEKEYE BAĞLI FOTOVOLTAİK SİSTEMİNİN SİMÜLASYONU

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan simülasyon programı tanıtılmış, fotovoltaik sistemlerinin boyutları gösterilmiş ve çıktılar verilmiştir. Boyutlandırmanın doğru olduğunu fark etmek ve daha doğru sonuçlar alabilmek için farklı fotovoltaik sistemlerinin boyutlandırma ve simülasyonunun yazılım tarafından da yapılması gerekmektedir. Tezin şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemlerinin simülasyonları PV*SOL yazılımı ile yapılmıştır. Bu yazılım, Valentin Software GmbH tarafından geliştirilmiştir.

5.1 PV*SOL Programı

Güneş enerji sistemlerinin tasarımı ve simülasyonu için kullanılan PVSOL, fotovoltaik sistemlerin cihazlar, batarya sistemleri ve elektrikli araçlarla entegre bir şekilde tasarlanması ve optimize edilmesi amacıyla geliştirilmiş dinamik bir yazılımdır. Bu program, projelerin detaylı raporlamasını, yıllık verim tahminlerini, fizibilite analizlerini sunar ve bileşen verilerini düzenli olarak günceller. Kullanıcılara modülleri manuel veya otomatik olarak yerleştirme, tesisin 2 boyutlu görünümünü oluşturma ve On-Grid sistemlerde tüketici bazında enerji tüketimi hesaplama imkânı tanır.

Ayrıca, dünya genelinde 8.000'den fazla konuma ait verilerle çalışabilir, 10 dakikalık zaman dilimlerinde gölgelenme simülasyonu yapabilir ve modül-evirici bağlantı seçenekleri sunar. Çeşitli bina ve çatı tiplerine uygun modül yerleşimi ile gölgelenmeye bağlı optimizasyon seçenekleri de sağlar (SolarAcademy, 2024).

5.1.1. Proje Tasarımı

Bu çalışmada, kesin bir analiz yapabilmek için Proje tasarımı bölümü ve Artvin'in iklim verilerinin içe aktarılması için Veri Tabanı bölümü kullanılmıştır.

Proje tasarımı 7 adımdan oluşmaktadır:

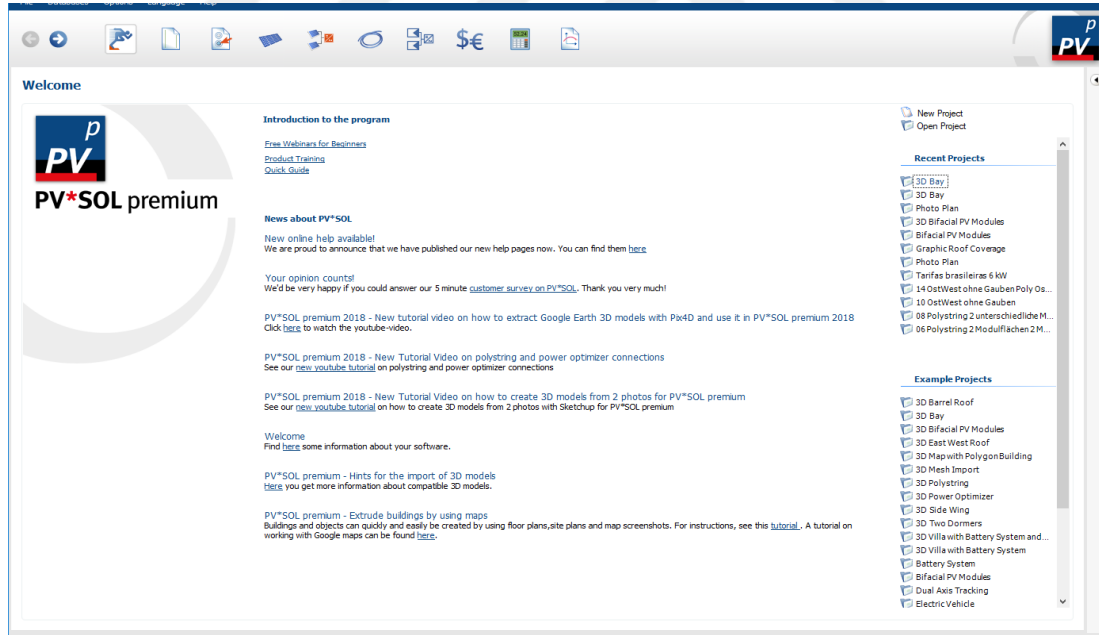
- Proje verilerinin girişi,
- Sistem tipini, iklim parametreleri (sıcaklık, ışıınım, albedo) verilerinin girişi ,
- 3D Tasarım

- Kablo verilerinin girişi,
- Planlar ve Parça Listesi,
- Finansal Analiz,
- Simölasyon, ve rapor düzenlenmesi.

PV*SOL yazılımını tüm sistemler için kullandıktan ve konum verileri, bileşen verileri ve ekonomik veriler girildikten sonra simölasyon yapılabilir ve her bir fotovoltaiik sisteminin sonuçlarını alınabilir. Alınan sonuçlar ile Artvin'de kurulum için sistem arasında karşılaştırma yapmak mümkün olacaktır.

5.1.2. Kullanıcı Ara Yüzü

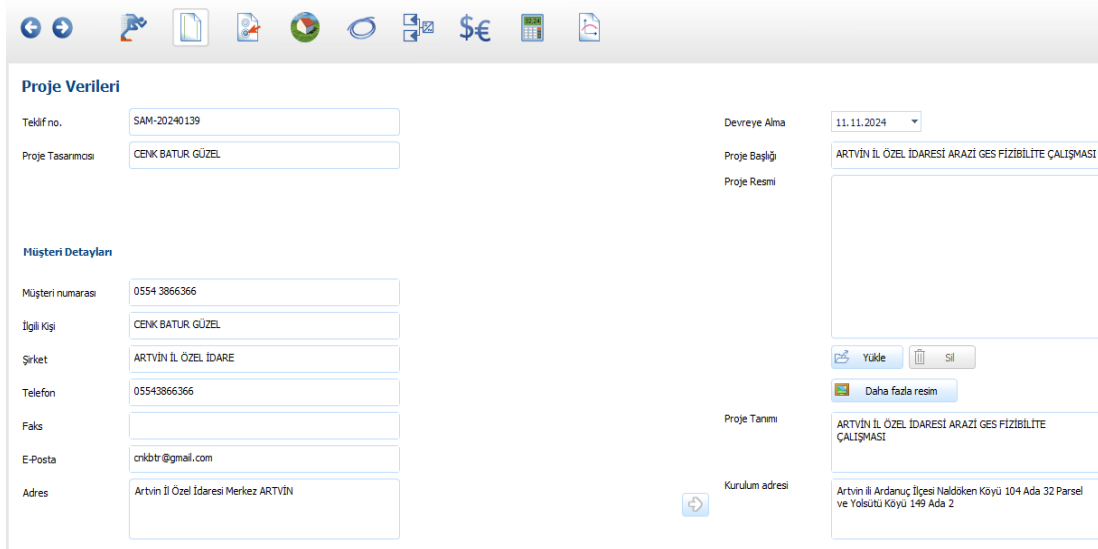
Program başlatıldıktan sonra Şekil 26'da PV*SOL Programı Ara Yüz ekranı görölmektedir. PVSOL uygulamasının ara yüz ekranında, programa giriş, ürün eğitimi, hızlı rehber, yeni proje, proje aç, son projeler ve veri tabanında kayıtlı örnek projeler ekranı bulunmaktadır.



Şekil 25. PV*SOL program ara yüzü genel görünümü

5.1.3. Proje Verileri

Artvin ili Ardanuç İlçesi Naldöken Köyü 104 Ada 32 Parsel ve Yolsütü Köyü 149 Ada 2 Parselde kurulacak olan santralinin tasarımı PV*SOL 2024 versiyonunda yapılmıştır. Şekil 27’de PV*SOL Proje Verileri ara yüzü görülmektedir.



Şekil 26. PV*SOL proje verileri ara yüzü

Şekil 27’de görülen PV*SOL Proje verileri ara yüzünden teklif numarası, proje tasarımcısı, proje devreye alma tarihi, proje başlığı, müşteri tanımı ve müşteriye ait detaylı bilgiler girilmektedir.

5.1.4. Sistem Türü, İklim ve Şebeke

Sistem türü, iklim ve şebeke ekranında sistemin konumu, otomatik iklim bilgileri sistemin şebeke özellikleri girilmektedir.

Ek Türü sekmesinde sistemin şebekeden bağımsız veya şebekeye bağlı olup olmadığı seçilmektedir. Tasarım türü sekmesinde sistem için 3 boyutlu tasarım kullanılıp kullanılmayacağı seçilmektedir. İklim verileri sekmesinden sistemin kurulacağı konum seçilmekte ve yazılım MeteoSyn uygulamasından güneş radyasyon ve iklim verilerini otomatik olarak almaktadır. Simülasyon zaman adımı sekmesinden 1 saat ve 1 dakika seçenekleri seçilebilmektedir. 1 saat sekmesi daha hızlı simülasyon, 1 dakika ise daha hassas simülasyon imkanı sunmaktadır. AC Şebekesi sekmesinde sistemin faz ve nötr arasındaki gerilimi, faz sayısı, faz kayması, besleme kontrolü ve

besleme verileri seçilmektedir. Şekil 28’de PV*SOL Sistem Türü, İklim ve Şebeke ara yüzü gösterilmiştir.

Sistem Türü, İklim ve Şebeke

Ek türü
3D, Öz tüketimli şebekeye bağlı PV sistemi

Tasarım Türü
3D Tasarım kullan

İklim verileri
Ülke: Turkey
Konum: Yoluştı (1991-2010, Meteororm 7.3(i))

Enlem	41° 9' 0" (41,15°)	Küresel ışınlamaların yıllık toplamı	1395 kWh/m ²
Boylam	42° 3' 16" (42,05°)	Yıllık Ortalama Sıcaklık	13,1 °C
Saat Dilimi	UTC+3		
Zaman dilimi	1991 - 2010		
Kaynak	Meteororm 7.3(i)		

[Simülasyon parametreleri](#)

Simülasyonun zaman adımı
1 Saat (daha hızlı simülasyon)
1 Dakika (daha hassas simülasyon)

AC Şebekesi
Giriş Ya...

Gerilim (N+L1)	230 V
Faz Adeti	3-fazlı
cos φ	1
Maksimum Güç Sınırlaması	Hayır

Şekil 27. Sistem türü, iklim ve şebeke ara yüzü

Bu tezde 3D şebekeye bağlı öz tüketimli fotovoltaik sistem türü seçilmiş ve 3D tasarım yapılmıştır. Simülasyon zaman adımı daha hızlı olması için 1Saat seçilmiştir. Enlem 41,15 ° Boylam 42,05 ° saat +3 ve kaynak Meteororm 7.3(i) seçilmiştir. Bu verilere göre küresel ışınlamaların yıllık toplamı 1395kwh/m² ve yıllık ortalama sıcaklık 13,1 °C olarak tespit edilmiştir. Sistemin giriş gerilimi 230 V, faz adedi 3 ve maksimum güç sınırlaması bulunmamaktadır.

5.1.5. 3D Tasarım

Tasarıma başladığımız, panel yerleşimi yaptığımız ekrandır. 2D ve 3D olarak tasarım yapmak mümkündür. Panellerin yerleştirileceği alan aktifleştirilerek arazi görüntüsü üzerinde, nesne görünümü, modül ekleme, modül montajı, modül konfigürasyon, kablo planı ayarları yapılmaktadır. Fotovoltaik Sisteminin genel

görünümü, kapsanan alan bilgileri, tasarımda kullanılan fotovoltaik modüllerinin sayısı, evirici sayısı, fotovoltaik jenaratör çıkışı bu bölümde tespit edilir.

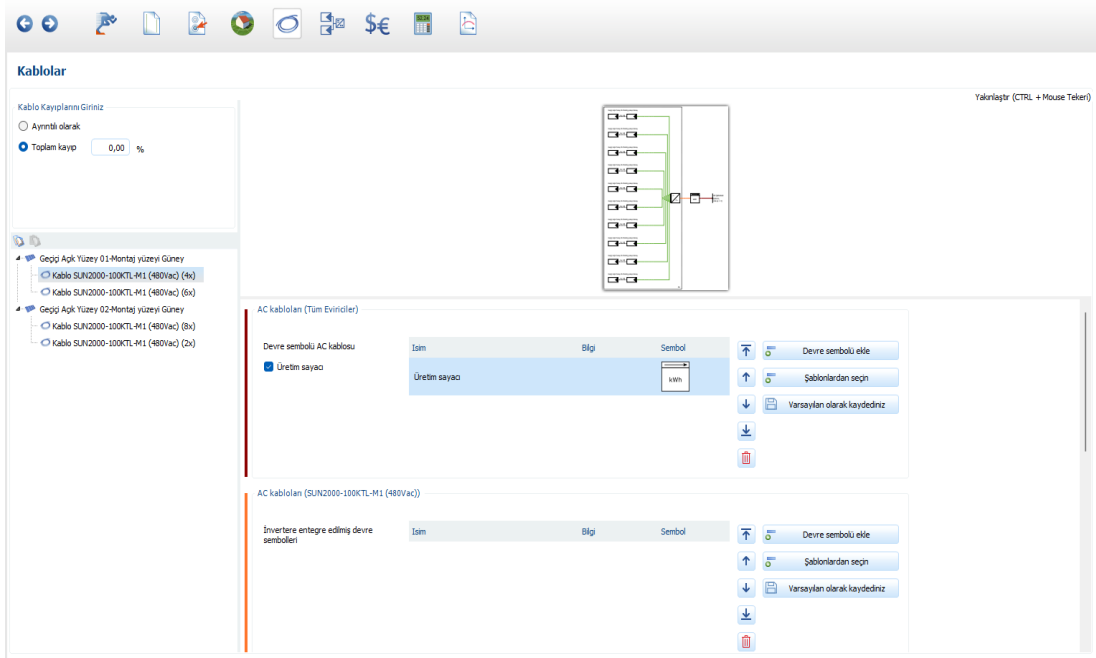
Sistem üzerinden öncelikli olarak panel yerleştirilecek alan aktif edilir, veri tabanında mevcut bulunan 21.000 adet modülden biri veya manuel olarak eklenen modül seçilerek tasarım yapılmaktadır. Optimum modül sayısının belirlenmesi, kurulum tipi, izleme türü, eğim, modül yüzeyinin pusula yönüne göre konumlandırılması ve ek parametre ayarları bu ekranda yapılmaktadır. Kullanılacak panel seçildikten sonra sistem tarafından otomatik panel yerleşimi yapılmaktadır. Panellerin yerleşimi manuel olarak da yapılabilir. Evirici sayfasından kullanılacak evirici ve bağlantı şekli seçilir. Şekil 29’da proje ile ilgili tasarımlar ve ayarlar yapıldıktan sonra 3 boyutlu panel yerleşimi görülmektedir.



Şekil 28. Panel yerleşimi 3D görüntüsü

5.1.6. Kablolar

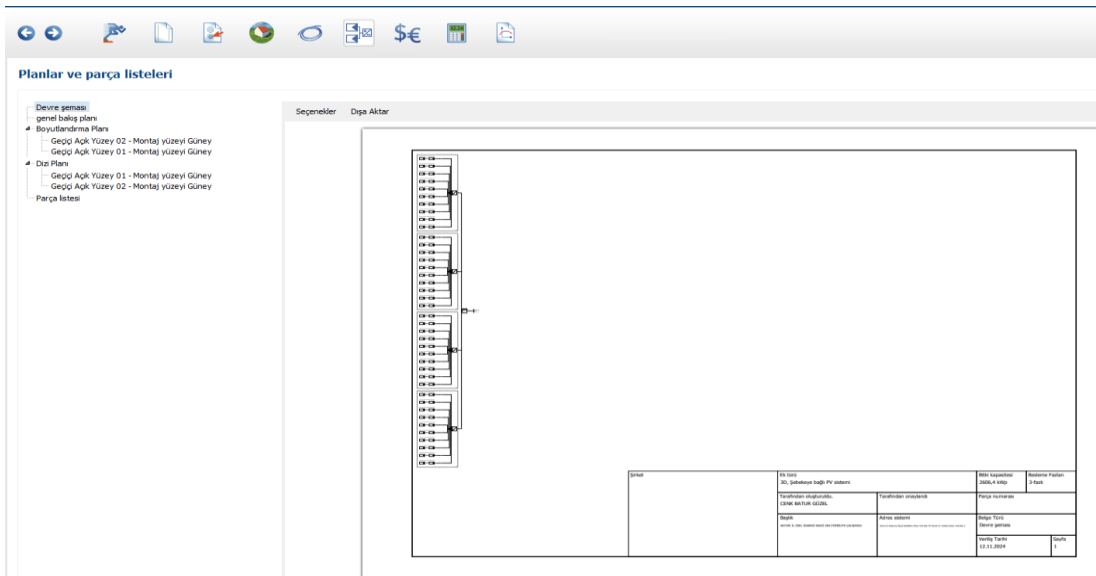
Tasarımın büyük çoğunluğu çizim bölümünde yapıldıktan sonra kablo planı ara yüzüne geçilmektedir. Bu ekran da kullanılacak kabloların özellikleri, metrajları ve koruma elemanları tanımlanmaktadır. PV*SOL programı seçilen panellerin, eviricilerin konumuna, sayaca ve tasarıma uygun olarak kablolamayı otomatik olarak yapmaktadır. Kablo yerleşimi manuel olarak da yapılabilir. Şekil 30’da PV*SOL kablolar ara yüzü gösterilmiştir.



Şekil 29. PV*SOL kablolar ara yüzü

5.1.7. Planlar ve Parça Listesi

Tüm teknik çizimler ve planlar bu ara yüz de görüntülenir. Bu menüde şematik devre şeması, ölçü planı, dize diyagramı ve parça listesi görüntülenebilir ve farklı formatlarda dışa aktarılabilir. Şekil 31’de planlar ve parçalar ara yüzü gösterilmiştir.



Şekil 30. PV*SOL planlar ve parçalar ara yüzü

5.1.8. Finansal Analiz

Finansal Analiz ara yüzü ekranında ekonomik verimlilik hesaplanabilmesi için gerekli olan maliyetler, sübvansiyonlar, elektrik tarifeleri, ekonomik veriler ve teşvik ile ilgili veriler girilmektedir. Şekil 32’de finansal analiz ara yüzü gösterilmiştir.

Finansal Analiz

Ekonomik Parametreler

Finansal Analiz Parametreleri

Düzenle

Değerlendirme Dönemi: 20 Yıllar, Anaparaya uygulanacak faiz: 0 %, Yatırım Maliyeti: 600000000 €

Enerji Dergesi / Şebekeyi Besleme Kavramı: Tam besleme

Doğrudan Üçüncü Kişilere Satılan Elektrik Fiyatı: 0,0000 €/kWh

[Finansal edilebilirlik tahmini verim seçime çalıştır \(PS0 / PS0\)](#)

Tevvik Miktarı

Uygulanan besleme tarifeleri

Şebeke Beslemesinin Geçerliliği = Operasyon Başlangıcı ☐

Bilgi	Tarife Adı	Geçerlilik başlangıcı	Geçerlilik sonu	Eylem
1	EEG 2020 (Januar) - Gebäudeanlage	08.02.2024	31.12.2044	Düzenle Sil
1	EEG 2020 - Umlage auf Eigenverbrauch - Alle Anlagenarten	08.02.2024	7.02.2044	Düzenle Sil

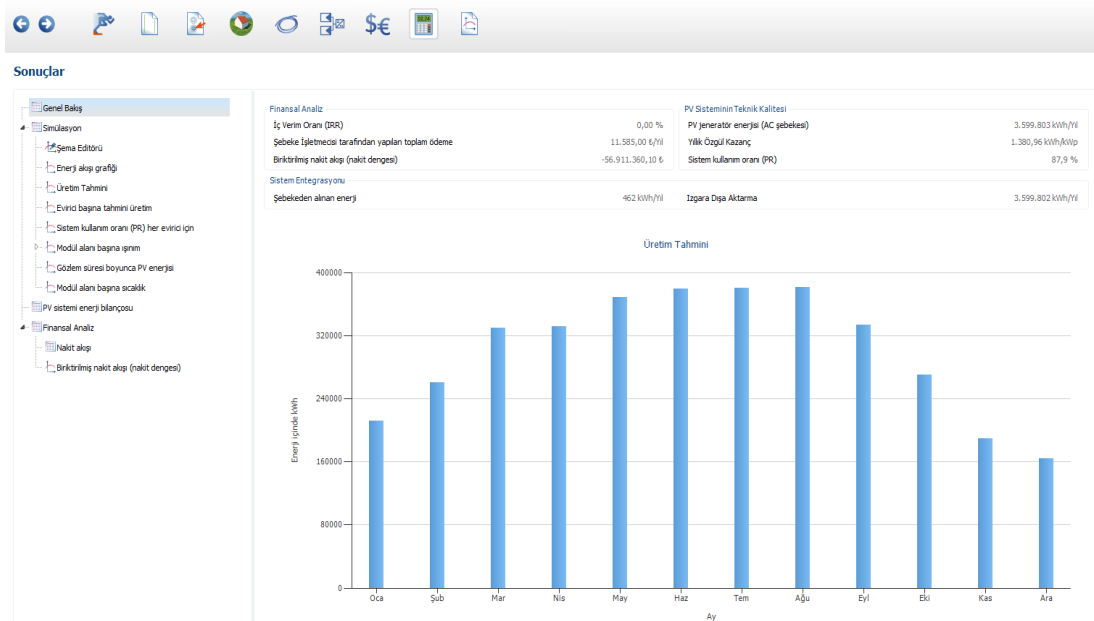
Tevvik Miktarı için Enflasyon Oranı: 0,0 %/Yıl

Kişisel Tüketim Tarifesi için Enflasyon Oranı: 0,0 %/Yıl

Şekil 31. PV*SOL finansal analiz sayfası

5.1.9. Simülasyon Sonuçlar Bölümü

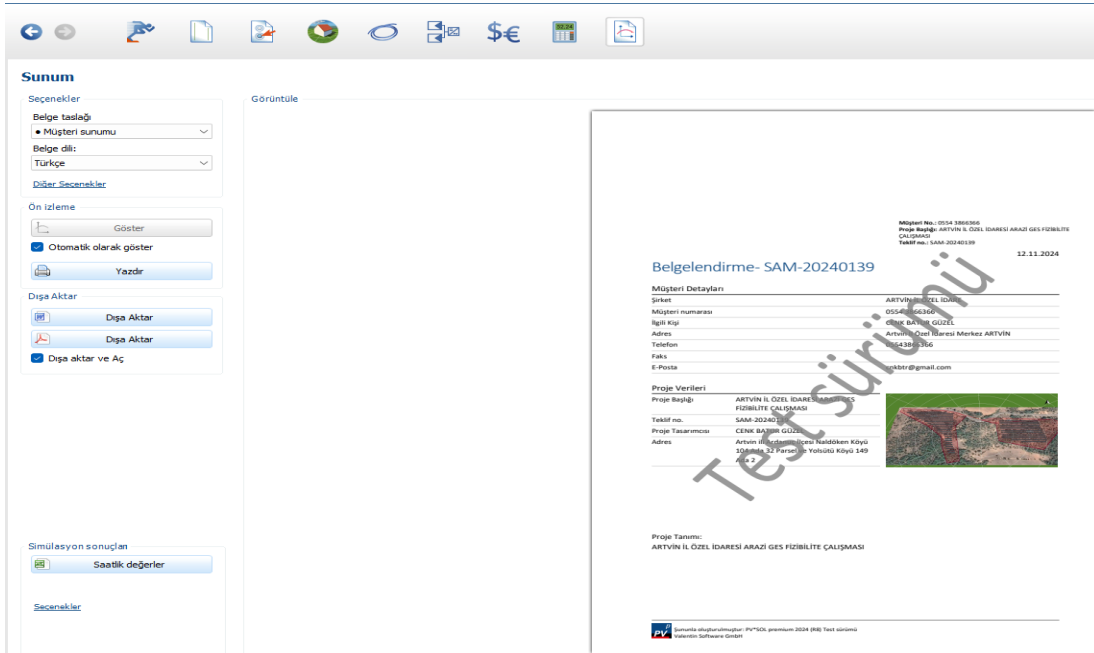
Tasarımı tamamlanan tesise ait simülasyon yapıldıktan sonra verilerin elde edildiği ara yüz sonuç bölümüdür. Şema editörü, enerji akış grafiği, üretim tahmini, evirici başına üretim miktarı, her evirici için sistemin kullanım oranı, modül alanı başına ışıınım, gözlem süresi boyunca fotovoltaik enerjisi, modül alanı başına sıcaklık, fotovoltaik sistemi enerji bilanço analizi, finansal analiz, nakit akışı ve nakit dengesi ile ilgili sistemin verileri elde edilir. Şekil 33’de sonuçlar ara yüzü gösterilmiştir.



Şekil 32. PV*SOL sonuç ara yüzü

5.1.10. Simülasyon Sunumu

Tasarım simülasyon sonuç verileri sunum ekranında farklı dillerde PDF veya DOC dosyası olarak dışa aktarılabilir. Şekil 34’de sunum ekranı görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 33. PV*SOL sunum ara yüzü

5.2. PV*SOL Programı Simülasyon Sonuçları

Artvin İli Ardanuç İlçesi Naldöken Köyü 104 ada 20, 26 ve 32 parseller ile Yolüstü Köyü 149 ada 2 parseller üzerinde kurulması planlanan 2 MW kurulu gücünde, şebeke bağlantılı (on-grid) öz tüketimli güneş enerji santralinin simülasyonu PV*SOL programı aracılığıyla yapılmıştır. Simülasyon sonuçları saatlik, günlük, aylık ve yıllık sonuçlar olarak raporlanmaktadır. Girilen verilere göre elde edilen enerji, kullanılan alan, kullanılacak panel sayısı, maliyet analizi, maliyetin karşılanma süresi bulunmuştur.

Güneş enerji santrali 104 ada 20 ve 26 parselde 1. modül alanı ve 104 ada 32 ve 149 ada 2 parsel üzerinde 2. modül alanı olarak tasarlanmıştır. Hesaplamalar ve incelemeler sonucunda elde edilen veriler ışığında 450 W güç değerine sahip Monokristal ve Polikristal paneller kullanılmasının uygun olduğu değerlendirilmiştir. JA Solar firmasının ürettiği JAM72S20-450/MR Monokristal ve Canadian Solar firmasının ürettiği HiKu5 CS3Y435-460P Polikristal fotovoltaik paneli kullanılarak PV*SOL programında simülasyon yapılmıştır.

Simülasyonda fotovoltaik modüllerinin uygunluğu inceleneceğinden sadece modüller değiştirilmiş, iki simülasyonda da fotovoltaik modülleri aynı eğim, aynı açı, aynı mesafeler aynı dizi sayısı, aynı panel sayısında yerleştirilmiş ve Huawei Technologies firmasına ait SUN-2000-100KTL-M1 model evirici eşit sayıda kullanılmıştır.

1. Modül alanında 15 modül sıra dizesinde 2426 adet 450 W fotovoltaik modülü 25° eğim ile güney yönünde 180 ° açı ile 6185,6 m² alana yerleştirilmiştir. 10 adet SUN-2000-100KTL-M1 model evirici kullanılmıştır. Şekil 35'te 1. modül alanı gösterilmiştir.



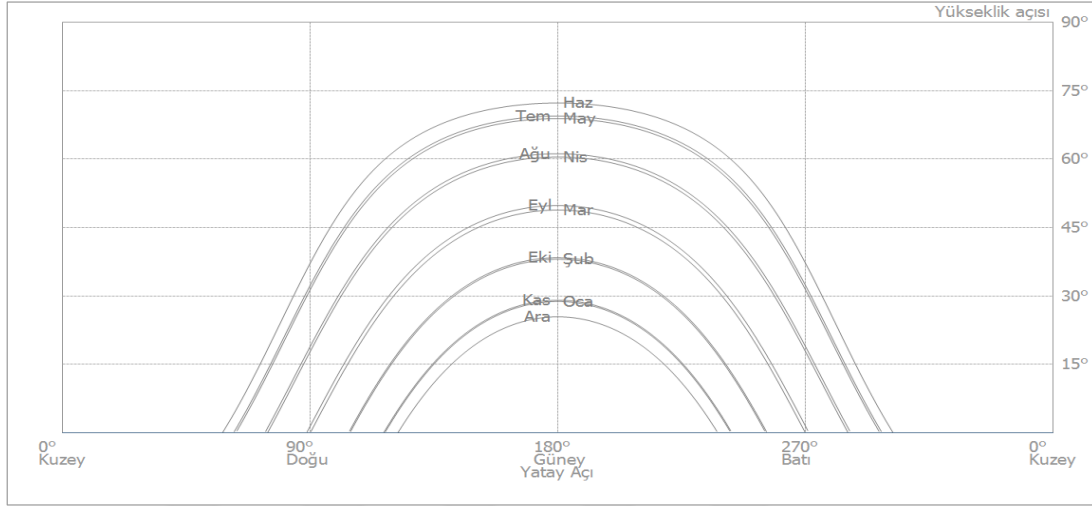
Şekil 34. 1. modül alanı

2. modül alanında 12 modül sıra dizesinde 2868 adet 450 W fotovoltaik modülü 25° eğimli güney yönünde 180 ° açılı ile 6683,2 m² alana yerleştirilmiştir. 9 adet SUN-2000-100KTL-M1 model evirici kullanılmıştır. Şekil 36'da 2. modül alanı gösterilmiştir.



Şekil 35. 2. modül alanı

Gölge unsurları da ele alındıktan sonra güneş enerjisi santralinde kullanılan panellerin yıllık olarak güneşe göre konumunu gösterir çizgiye ufuk çizgisi denmektedir. Şekil 37’de sistemin ufuk çizgisi gösterilmektedir.



Şekil 36. Sistemin ufuk çizgisi

1.modül alanı başına enerji sonuçları incelendiğinde 1.Montaj yüzeyinde fotovoltaiik jeneratör çıkış güçleri aynı olmasına rağmen monokristal fotovoltaiik modülünün jeneratör çıkış gücü ve yıllık kazanç gücünün daha fazla olduğu görülmektedir. Sistem kullanım oranı Monokristal fotovoltaiikde % 4,10 daha fazladır. Tablo 18’de modül alanı başına enerji sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 18. 1.modül alanı enerji sonuçları

Fotovoltaik Paneli	JAM72S20-450/MR	CS3Y 450P
	Monokristal	Polikristal
Fotovoltaik jeneratör çıkışı	1091,7 kWp	1091,7 kWp
Fotovoltaik jeneratör yüzeyi	5390,15 m ²	5725,59 m ²
Modüle Düşen Toplam Işınım	1541,86 kWh/m ²	1498,23 kWh/m ²
Yansımaz Küresel Radyasyon	1571,61 kWh/m ²	1571,61 kWh/m ²
Sistem kullanım oranı (PR)	87,24 %	83,14 %
Fotovoltaik jeneratör enerjisi	1497006,37 kWh/Yıl	1427396,88 kWh/Yıl
Yıllık Özgül Kazanç	1371,26 kWh/kWp	1307,5 kWh/kWp

2.modül alanı başına enerji sonuçları incelendiğinde 1.Montaj yüzeyinde fotovoltaiik jeneratör çıkış güçleri aynı olmasına rağmen monokristal fotovoltaiik Modülünün fotovoltaiik jeneratör çıkış gücü ve yıllık özgül kazanç gücünün daha fazla olduğu görülmektedir. Sistem kullanım oranı Monokristal fotovoltaiikte polikristal fotovoltaiike göre % 4,4 daha fazladır. Tablo 19’da modül alanı başına enerji sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 19. 2.modül alanı enerji sonuçları

Fotovoltaiik Paneli	JAM72S20-450/MR Monokristal	CS3Y 450P Polikristal
Fotovoltaiik jeneratör çıkışı	1290,6 kWp	1290,6 kWp
Fotovoltaiik jeneratör yüzeyi	6372,19 m ²	6768,76 m ²
Modüle Düşen Toplam Işınım	1541,86 kWh/m ²	1498,23 kWh/m ²
Yansımaz Küresel Radyasyonu	1571,61 kWh/m ²	1571,61 kWh/m ²
Sistem kullanım oranı (PR)	86,77 %	82,37 %
Fotovoltaiik jeneratör enerjisi	1760354,66 kWh/Yıl	1671808,42 kWh/Yıl
Yıllık Özgül Kazanç	1363,98 kWh/kWp	1295,37 kWh/kWp

Monokristal fotovoltaiik iç verim oranı %44,53 ile polikristal fotovoltaiik modülünden %4 daha fazladır. Gölgelemenmeden dolayı kazanç kaybı monokristal modülde daha az olup, daha fazla CO₂ emisyonu salınımı önlemesi dolayısı ile daha çevre dostudur. Tablo 20’de sistem kazanç ve kayıpları ve finansal durum gösterilmiştir.

Tablo 20. Sistemin kazanç ve kayıpları

	JAM72S20-450/MR Monokristal	CS3Y 450P Polikristal
Gölgelemeden oluşan kazanç kaybı	3,60%	6,90%
Önlenen CO ₂ emisyonu	1.538.483 kg/yıl	1.456.413 kg/yıl
İç Verim Oranı	44,53%	40,53%
Bekleme Konumundaki Tüketim	444 kWh/Yıl	455 kWh/Yıl

GES kurulumu için 50000000 TL yatırım yapılması gerekmektedir. Kurulan Elektrik üretim maliyeti monokristal modül için 0,7637 TL/kWh, polikristal modül için 0,8068 TL/kWh olarak hesaplanmıştır. Monokristal modül kullanılarak kurulan GES 3,9 yılda kendisini amorti ederken, polikristal modül kullanılarak kullanılan GES kendisini 6,4 yılda amorti etmektedir. Tablo 21’de finansal analiz ve kazanç değerleri gösterilmiştir.

Tablo 21. Finansal analiz ve kazanç

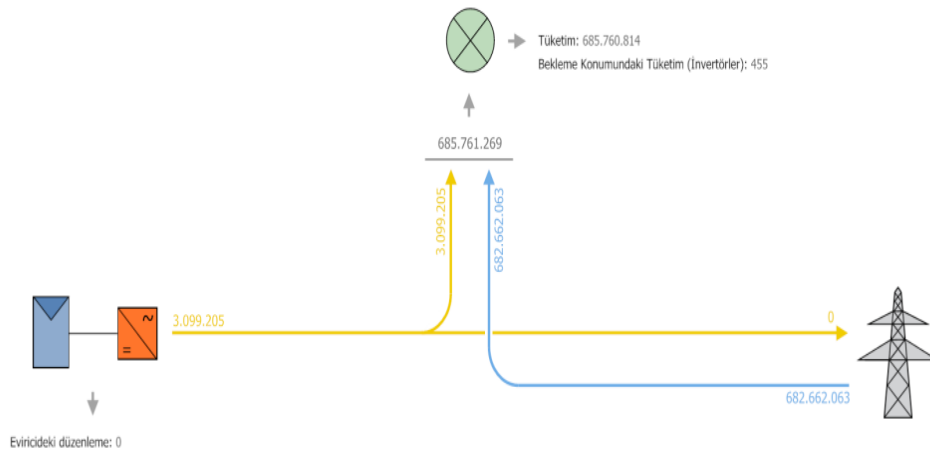
	JAM72S20-450/MR	CS3Y 450P
	Monokristal	Polikristal
Enerji Fiyatı	2,79 TL/kWh	2,79 TL/kWh
Fazla enerjinin ücretlendirilmesi	2,05 TL/kWh	2,05 TL/kWh
Enerji Fiyatı Enflasyon Oranı	25%	25%
Amortisman Süresi (Yıl)	3,9	6,4
Elektrik üretim maliyeti	0,7637 TL/kWh	0,8068 TL/kWh
Yıllık Tasarruf	9.132.698,43 TL	8.005.514,40 TL

Monokristal ve Polikristal fotovoltaik paneli ile tasarlanan güneş enerji santralinin yıllık enerji üretimini ve tasarrufunun aylara göre verileri tespit edilmiştir. Tablo 22’de simülasyon sonucu elde edilen yıllık enerji miktarı ve tasarruf verileri gösterilmiştir.

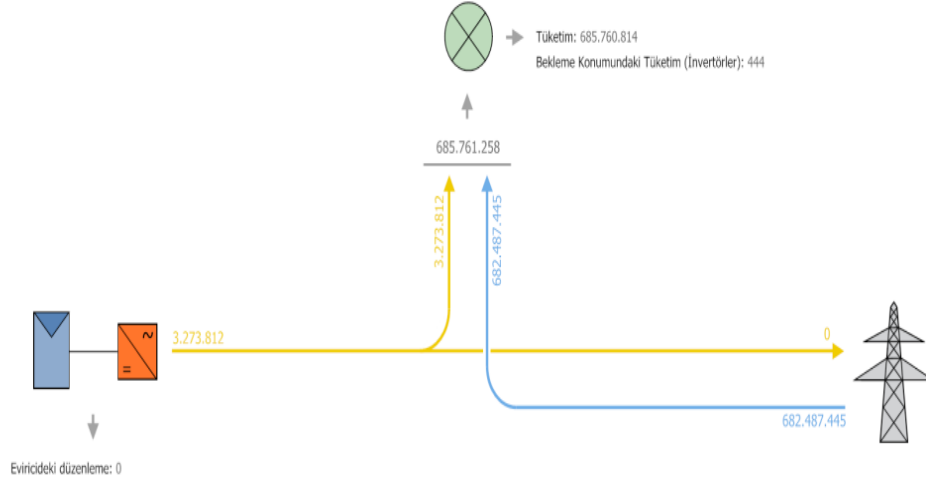
Tablo 22. Üretilen enerji ve tasarruf miktarı

Ay	Enerji Üretimi (kw/h) Yıllık		Tasarruf (TL)	
	Polikristal	Monokristal	Polikristal	Monokristal
Ocak	160710	191398	448380	534001
Şubat	211997	236482	591471	659785
Mart	292309	299186	815543	834729
Nisan	295888	302457	825528	843854
Mayıs	327951	335422	914984	935828
Haziran	337299	345536	941065	964045
Temmuz	338095	346425	943285	966525
Ağustos	339837	347673	948145	970008
Eylül	297092	303961	828888	848052
Ekim	229923	245126	641484	683903
Kasım	146514	171321	408773	477985
Aralık	121136	148381	337969	413982
Toplam	3098751	3273369	8645514	9132698

Polikristal fotovoltaik panelin simülasyon sonucu enerji akış diyagramı Şekil 38’de gösterilmiştir. Yıllık 3.099.205 kWh enerji üretilirken, bekleme konumunda mevcut 19 adet evirici şebekeden 455 kWh enerji tüketim gerçekleştirmektedir.

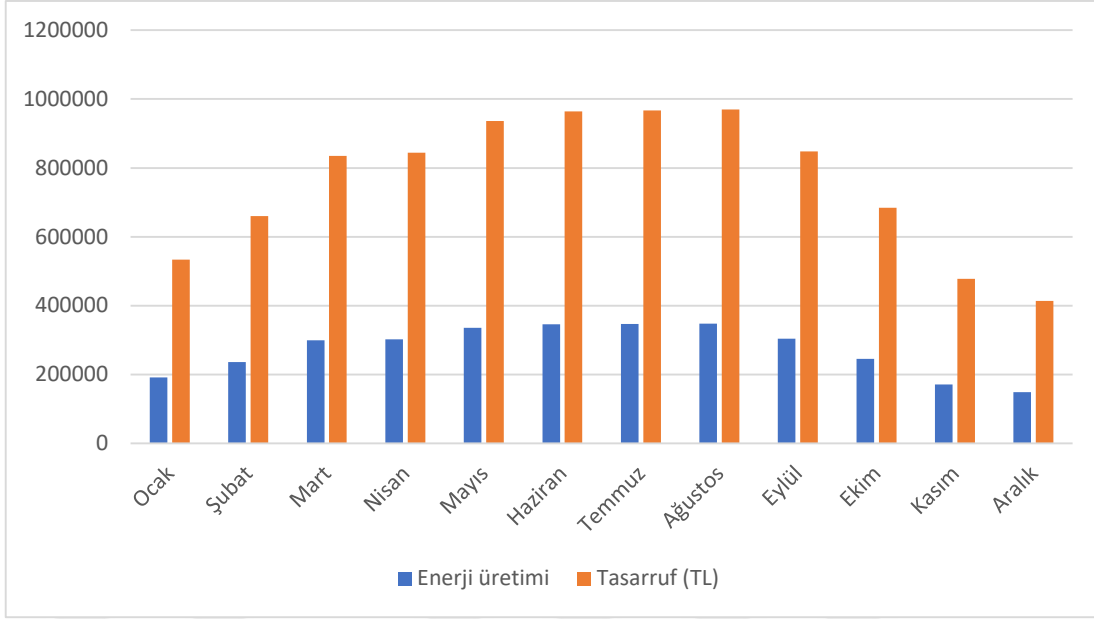
**Şekil 37.** Polikristal fotovoltaik enerji akış grafiği

Monokristal fotovoltaik panelin simülasyon sonucu enerji akış diyagramı Şekil 39'da gösterilmiştir. Yıllık 3.273.812 kWh enerji üretilirken, bekleme konumunda mevcut 19 adet evirici şebekeden 444 kWh enerji tüketim gerçekleştirmektedir.



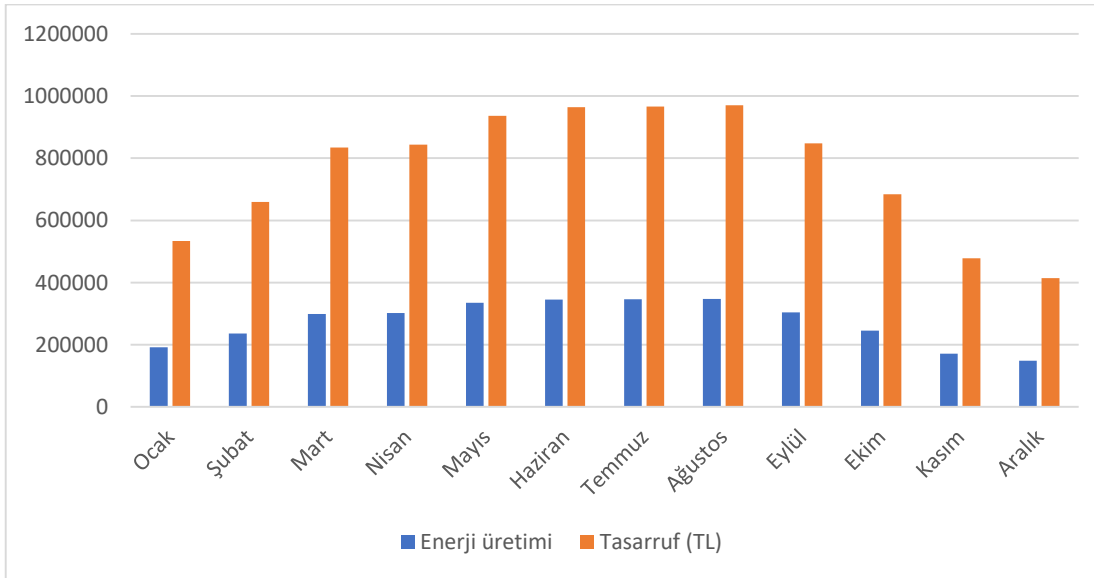
Şekil 38. Monokristal fotovoltaik paneli enerji akış grafiği

Monokristal fotovoltaik panellerini ile tasarlanan güneş enerji santralinin simülasyon sonucu yıllık üretilen enerji miktarının aylık dağılımı Şekil 40'da gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde en fazla üretimin Mayıs, Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında gerçekleştiği, en az üretimin ise Kasım ve Aralık ayın da gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 39. Monokristal fotovoltaik paneli aylık üretim ve tasarruf grafiği

Polikristal fotovoltaik panellerini ile tasarlanan güneş enerji santralinin simülasyon sonucu yıllık üretilen enerji miktarının aylık dağılımı Şekil 41’de gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde de en fazla üretimin Mayıs, Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında gerçekleştiği, en az üretimin ise Kasım ve Aralık ayın da gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 40. Polikristal fotovoltaik paneli aylık üretim ve tasarruf grafiği

Biriktirilmiş nakit akışı dengesi grafiği incelendiğin de monokristal fotovoltaiik kullanılarak tasarlanan güneş enerji santrali kurulumu için yapılan 50000000 TL yatırımın 3,9 yıl sonunda amorti edildiği, polikristal fotovoltaiik kullanılarak tasarlanan güneş enerji santrali kurulumu için yapılan 50000000 TL yatırımın 6,4 yıl sonunda amorti edildiği görülmektedir.



6. SONUÇ

Güneş enerjisi, sürdürülebilir kalkınma ve enerji dönüşümünde kritik bir rol üstlenmektedir. Güneş enerjisinin 2050 yılında dünyanın en büyük enerji kaynağı olması beklenmektedir. Ülkemizin mevcut konumu ve günlük güneşlenme süresi de dikkate alındığında güneş enerjisinin kısa sürede daha önemli hale gelmesi kaçınılmazdır. Bu tez, çevresel ve ekonomik katkılarıyla dikkat çeken 2 MW'lık bir güneş enerji santralini tasarımı ve analizine odaklanır. Çalışma, Artvin ili Ardanuç ilçesinde bir güneş enerji santralini kurulabilirliğini ve bu santralden elde edilecek enerji verimini değerlendirmeyi hedeflemektedir.

Bu tez çalışmasında Karadeniz bölgesinde bulunan Artvin ili Ardanuç ilçesinde Artvin İl Özel İdaresi tarafından yaptırılması planlanan güneş enerji santralini analizi yapılmıştır. Ardanuç ilçesi Artvin il sınırları içerisinde bulunsun da iklimsel olarak Karasal iklim ve Akdeniz iklimi karışımı iklim görülmektedir. Yazları sıcak ve kurak, kışları ise daha ılık, Karadeniz bölgesine göre daha az yağışlı bir iklim görülmektedir.

Bu tezin analizleri ve simülasyonu PV*SOL simülasyon programları kullanılarak yapılmıştır. 27 modül sıra dizisinde 5292 adet 450 W fotovoltaiik modülü 25° eğim ile güney yönünde 180 ° açı ile 12.868,8 m² alana yerleştirilmiştir. 19 adet inverter kullanılmıştır. Artvin ilinin yıllık güneş radyasyonunun Türkiye ortalamasının altında olması, arazinin engebeli olması, yıllık yağış miktarının yüksek olması bu bölgede daha önce güneş enerji santrali kurulmamasının temel sebebidir. Ardanuç ilçesinde yapılmaya başlanan güneş enerji santrali Artvin ilinin ilk güneş enerji santrali olma özelliğini taşımaktadır.

Artvin ilinde yapılması için planlanan güneş enerji santrali için ilk başvuru işlemi 28.01.2022 tarihinde yapılmış olup, işlemlerin tamamlanması, iznin çıkması ve imar planının hazırlanması sonucunda 25.03.2024 tarihinde 50.138.002,35 TL yaklaşık maliyet hesaplanmıştır. Ekonomik sebepler nedeni ile güneş enerji santralini iki aşamada tamamlanmasına karar verilerek 6683,2 m² alana sahip 2. modül alanına 1 MW GES kurulmasına karar verilmiştir. 2.modül alanına kurulacak GES için 25.038.774,35 TL yaklaşık maliyet hesaplanmıştır. GES teslim tarihi 17.08.2025 olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada, Artvin ili Ardanuç ilçesi için tasarlanan 2 MW kapasiteli güneş enerji santralinin ekonomik ve teknik analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyonlar ve hesaplamalar sonucunda, monokristal fotovoltaik panellerin bölgeye uygunluğu ve yüksek enerji üretim kapasitesi ile öne çıktığı görülmüştür. Ayrıca, güneş enerjisi santralinin çevresel etkileri değerlendirilmiş ve yenilenebilir enerji kaynaklarının bölgedeki enerji talebini karşılamada önemli bir çözüm sunduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, güneş enerjisi santrallerinin sürdürülebilir enerji politikaları çerçevesinde bölgesel ekonomiye katkı sağlayacağı ve enerji bağımsızlığını destekleyeceği tespit edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, gelecekteki projelere referans olabilecek nitelikte veriler sunmaktadır.

KAYNAKÇA

- Ali, H., & Khan, H. A. (2020). Techno-economic evaluation of two 42 kWp polycrystalline-Si and CIS thin-film based PV rooftop systems in Pakistan. *Renewable Energy*, 152, 347–357. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.12.144>
- Amy, C., Seyf, H. R., Steiner, M. A., Friedman, D. J., & Henry, A. (2019). Thermal energy grid storage using multi-junction photovoltaics. *Energy & Environmental Science*, 12(1), 334–343. <https://doi.org/10.1039/C8EE02341G>
- Artvin Valiliği. (2024). *Coğrafi Durum*. <http://www.artvin.gov.tr/cografi-durum>
- Aydınlatma. (2024). *Güneş Paneli (Solar Panel) Açısı Nasıl Hesaplanır? - Aydınlatma Portalı*. <https://www.aydinlatma.org/gunes-paneli-solar-panel-acisi-nasil-hesaplanir.html>
- Baghdadi, I., Yaakoubi, A. El, Attari, K., Leemrani, Z., & Asselman, A. (2018). Performance investigation of a PV system connected to the grid. *Procedia Manufacturing*, 22, 667–674. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2018.03.096>
- Besarati, S. M., & Goswami, D. Y. (2017). Supercritical CO₂ and other advanced power cycles for concentrating solar thermal (CST) systems. *Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology*, 157–178. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100516-3.00008-3>
- Beşergil, B. (2024). *Güneş Işığı (sunlight)*. <http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/gunes-isg-sunlight.html>
- Blanco, M., & Santigosa, L. R. (2017). Advances in concentrating solar thermal research and technology. In *Woodhead Publishing Series in Energy* (1st ed.). WOODHEAD PUBL LTD.
- Boretti, A. (2018). Concentrated solar power plants capacity factors: A review. *Nonlinear Approaches in Engineering Applications: Energy, Vibrations, and Modern Applications*, 41–62. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69480-1_2
- Buie, D., Monger, A. G., & Dey, C. J. (2003). Sunshape distributions for terrestrial solar simulations. *Solar Energy*, 74(2), 113–122. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00125-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00125-7)
- Cabeza, L. F., Martorell, I., Miró, L., Fernández, A. I., & Barreneche, C. (2020). Introduction to thermal energy storage systems. *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*, 1–33. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819885-8.00001-2>
- Çelik, A. N., & Koç, F. (2020). Polikristal Tür bir PV Panelin I-V Karakteristiğinin Analitik Modellenmesi ve Deneysel Doğrulanması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8, 2491–2515. <https://doi.org/10.29130/dubited.789691>

- Chaves, J. (2017). Introduction to Nonimaging Optics, Second Edition. *Introduction to Nonimaging Optics, Second Edition*, 1–764. <https://doi.org/10.1201/B18785>
- Chong, S., Wu, J., & Chang, I. S. (2024). Cost accounting and economic competitiveness evaluation of photovoltaic power generation in China — based on the system levelized cost of electricity. *Renewable Energy*, 222, 119940. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2024.119940>
- Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 748–764. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.07.113>
- Elliott, D. G. (2012). Direct current liquid-metal magnetohydrodynamic power generation. *Https://Doi.Org/10.2514/3.3499*, 4(4), 627–634. <https://doi.org/10.2514/3.3499>
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024). *Elektrik - T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>
- Enerjiye. (2024). *Şebeke Bağlantılı (On-Grid) Güneş Enerji Sistemleri – Enerjiye*. <https://enerjiye.com/sebeke-baglantili-on-grid-gunes-enerji-sistemleri/>
- Fritsch, A., Flesch, J., Geza, V., Singer, C., Uhlig, R., & Hoffschmidt, B. (2015). Conceptual Study of Central Receiver Systems with Liquid Metals as Efficient Heat Transfer Fluids. *Energy Procedia*, 69, 644–653. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.03.074>
- Garcia, P., Ferriere, A., & Bezan, J. J. (2008). Codes for solar flux calculation dedicated to central receiver system applications: A comparative review. *Solar Energy*, 82(3), 189–197. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2007.08.004>
- GEPA. (2024). *TÜRKİYE GÜNEŞLENME POTANSİYELİ ATLASI*. <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/>
- Good, P., Cooper, T., Querci, M., Wiik, N., Ambrosetti, G., & Steinfeld, A. (2016). Spectral reflectance, transmittance, and angular scattering of materials for solar concentrators. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 144, 509–522. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2015.09.057>
- Gordon, J. M. (2001). Solar energy: the state of the art: ISES position papers. *International Solar Energy Society*.
- Grigoriev, V., & Corsi, C. (2017). Unified algorithm of cone optics to compute solar flux on central receiver. *AIP Conference Proceedings*, 1850(1), 30021. <https://doi.org/10.1063/1.4984364/616557>
- Gul, M., Kotak, Y., & Muneer, T. (2016). Review on recent trend of solar photovoltaic technology. *Energy Exploration and Exploitation*, 34(4), 485–526. <https://doi.org/10.1177/0144598716650552/ASSET/IMAGES/LARGE/10.11>

- Helios. (2024). *Hibrit Sistemler*. <https://www.heliossolar.com.tr/tr/hibrit-sistemler>
- Heller, P. (2017). The Performance of Concentrated Solar Power (CSP) Systems: Analysis, Measurement and Assessment. *The Performance of Concentrated Solar Power (CSP) Systems: Analysis, Measurement and Assessment*, 1–290. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03695-7>
- Huda, A., Kurniawan, I., Purba, K. F., Ichwani, R., Aryansyah, & Fionasari, R. (2024). Techno-economic assessment of residential and farm-based photovoltaic systems. *Renewable Energy*, 222, 119886. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2023.119886>
- IRENA. (2020). *Renewable Power Generation Costs in 2019*.
- Kearney AT. (2010). Solar Thermal Electricity 2025 Clean electricity on demand: attractive STE cost stabilize energy production. *ESTELLA*.
- Kutscher, C., Mehos, M., Turchi, C., Glatzmaier, G., & Moss, T. (2010). *Line-Focus Solar Power Plant Cost Reduction Plan (Milestone Report)*. <https://doi.org/10.2172/1001434>
- Luqman, R., Kehinde Issa, A. J., Owolabi, A. B., Yakub, A. O., Same, N. N., Yasin, N., Kavagic, M., Suh, D., & Huh, J. S. (2023). Assessing the viability of a grid-connected PV power plant in Mubi, Adamawa State, Nigeria. *Frontiers in Energy Research*, 11. <https://doi.org/10.3389/FENRG.2023.1205646>
- Mehos, M., Turchi, C., Vidal, J., Wagner, M., Ma, Z., Ho, C., Kolb, W., Andracka, C., & Kruizenga, A. (2017). Concentrating Solar Power Gen3 Demonstration Roadmap. *NREL/TP-5500-67464*, 1–140. <https://doi.org/10.2172/1338899>
- Mohanty, P., & Gujar, M. (2016). PV component selection for off-grid applications. *Green Energy and Technology*, 196, 85–106. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14663-8_4/COVER
- Mohanty, P., Muneer, T., Gago, E. J., & Kotak, Y. (2016). Solar radiation fundamentals and PV system components. *Green Energy and Technology*, 196, 7–47. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14663-8_2
- Mohanty, P., Sharma, K. R., Gujar, M., Kolhe, M., & Azmi, A. N. (2016). PV system design for off-grid applications. *Green Energy and Technology*, 196, 49–83. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14663-8_3
- Murat KISAKÜREK, S., Yazar, S., & Author, C. (2022). FOTOVOLTAİK İNVERTERLER İLE REAKTİF GÜÇ OPTİMİZASYONU. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(Özel Sayı), 106–112. <https://doi.org/10.17780/KSUJES.1162849>
- Ranaweera, I., Kolhe, M. L., & Gunawardana, B. (2016). Hybrid energy system for

- rural electrification in sri lanka: Design study. *Green Energy and Technology*, 196, 165–184. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14663-8_7
- Saeidavi, A., Kiani, M. K. D., & Mashhour, E. (2024). Performance and CO2 emission evaluation of a grid-connected photovoltaic system at two different climates. *International Journal of Global Warming*, 32(1), 102–118. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2024.135359>
- Şahin, M. E., & Okumuş, H. İ. (2013). Güneş Pili Modülünün Matlab/Simulink ile Modellenmesi ve Simülasyonu Modeling and Simulation of Solar Cell Module in Matlab/Simulink. *Cilt*, 3, 17–25.
- Sayin, S., & Koç, İ. (2011). GÜNEŞ ENERJİSİNDEN AKTİF OLARAK YARARLANMADA KULLANILAN FOTOVOLTAİK (PV) SİSTEMLER VE YAPILARDA KULLANIM BİÇİMLERİ. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 26(3), 89–106. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sujest/issue/23235/248069>
- SolarAcademy. (2024). *SolarAcademy – Güneş enerjisi endüstrisi için sosyal bilgi platformu*. <https://solaracademy.com/>
- Sönmezoğlu, S., Koç, M., & Akin, S. (2012). İnce film üretim teknikleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(5), 389–401.