



T.C.  
EGE ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü



**ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ HİBRİT YENİLENEBİLİR  
ENERJİ SİSTEMLERİNİN  
TEKNO-EKONOMİK OPTİMİZASYONU**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Yiğit ERSAN**

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

İzmir  
2024



T.C.  
EGE ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü

**ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ HİBRİT YENİLENEBİLİR  
ENERJİ SİSTEMLERİNİN  
TEKNO-EKONOMİK OPTİMİZASYONU**

Yiğit ERSAN

Danışman: Doç. Dr. Koray ÜLGEN

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı  
Enerji Teknolojisi Yüksek Lisans Programı

İzmir  
2024



Yiğit Ersan tarafından yüksek lisans tezi olarak sunulan “ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ HİBRİT YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİNİN TEKNO-EKONOMİK OPTİMİZASYONU” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 29.11.2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

**Jüri üyeleri**

**İmza**

**Jüri Başkanı :** Doç. Dr. Koray ÜLGEN

**Raportör Üye :** Prof. Dr. Hayati OLGUN

**Üye :** Doç. Dr. Ali Murat ATEŞ



**EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ HİBRİT YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİNİN TEKNO-EKONOMİK OPTİMİZASYONU” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarımı ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

29/11/2024

İmzası

Yiğit ERSAN



## ÖZET

# ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ HİBRİT YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİNİN TEKNO-EKONOMİK OPTİMİZASYONU

ERSAN, Yiğit

Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Koray ÜLGEN

2024, 101 Sayfa

Günümüzde tüm ülkeler, fosil yakıtlara olan bağımlılıklarını azaltarak ve fotovoltaik güneş ve rüzgar enerjisi gibi daha fazla yenilenebilir kaynakları hayata geçirerek 2050 yılına kadar %100 yenilenebilir enerji kullanımını yaygın hale getirmeye çalışmaktadır. Bu nedenle bu soruna bir çözüm, güneş ve rüzgar hibrit enerji sistemlerini kurmaktır. Şebekeden bağımsız fotovoltaik güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi sistemleri dünya çapında nispeten daha büyük ölçekte kullanılmaktadır. Bu enerji sistemleri mevsimsel oldukları için sürekli olarak yükü besleyecek enerji kaynağı sağlayamazlar. Dolayısıyla, yük taleplerini karşılamak adına bu sistemlerin her biri için enerji depolama sistemleri gerekli olacaktır. Genellikle depolama sistemi pahalıdır ve yenilenebilir enerji sistemleri ile entegrasyonun uygun maliyetli olabilmesi için boyutun mümkün olan en aza indirilmesi gerekir. Enerji depolama gereksinimlerini azaltmak için hibrit güç sistemi kullanılabilir. Yeterli güneş ışığına ve rüzgar hızına sahip belirli bir yerin yük talebini karşılamak için güneş ve rüzgar sistemi yoluyla güç üretimini birleştiren hibrit bir yenilenebilir enerji sistemi kurulur.

Bu çalışma, İzmir’de bir yerleşim yerine ait fotovoltaik güneş ve rüzgar enerjili hibrit sistemi uygulama potansiyelini araştırma amacıyla yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı, yerleşim bölgesinde bir fotovoltaik güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi hibrit sistemi kurmanın ekonomik, teknolojik ve çevresel olarak karlı olup olmadığını incelemektir. Amaç, aynı zamanda çevresel olarak sürdürülebilir olan bir güneş ve rüzgar hibrit sisteminin en ekonomik optimal boyutunu bulmaktır.

Fotovoltaik güneş ve rüzgar enerjisi hibrit sistemi ile ilgili bir literatür çalışması derlenerek HOMER optimizasyon programında bir optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyon için, Fotovoltaik güneş ve rüzgar enerjisi maliyetleri ve yerleşim bölgesinin enerji tüketimi için veriler toplanmıştır. Ardından HOMER yazılımı, FV güneş ve rüzgar enerjisi hibrit sisteminin optimum boyutunu önermiştir. Simulasyonda, net bugünkü değer, geri ödeme yöntemi ve getiri oranı gibi ekonomik yöntemler kullanılmıştır. Sonuç, 96,7 PV ve 12 kW rüzgar gücünden oluşan, 306.928,03 ABD Doları NŞM ve ayrıca %20,6 dahili oran ile karlı bir yatırımla sonuçlanan optimum bir boyut gösterdi. Ayrıca, yerleşim bölgesi için yenilenebilir fraksiyon %100 idi. Ekonomik sonuçların ötesinde göstermiştir, optimum boyut için sonucu değiştirmeyen bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Hibrit sistemin optimum boyutunun ekonomik olarak karlı olduğu ve Türkiye’nin kısa vadeye kadar %100 yenilenebilir enerji hedefine uygun olacağı sonucuna varılmıştır. Ancak, sonuç karlı bir yatırım gösterse bile, yatırım maliyetleri yüksektir, bu da demektir ki sadece bazı bölgeler bir güneş ve rüzgar hibrit sistemi yatırımını karşılayabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Yenilenebilir enerji, hibrit sistemler, HOMER, optimizasyon, fotovoltaik güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, depolama

## ABSTRACT

# TECHNO-ECONOMIC OPTIMIZATION FOR OFF-GRID HYBRID RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

ERSAN, Yiğit

The Graduate School of Natural and Applied Science of  
Ege University  
The Degree of Master of Science in Solar Energy

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Koray ÜLGEN

2024, 101 Pages

Today, all countries are trying to popularize the use of 100% renewable energy by 2050 by reducing their dependence on fossil fuels and introducing more renewable sources such as photovoltaic solar and wind energy. Therefore, one solution to this problem is to install solar and wind hybrid energy systems. Off-grid photovoltaic solar and wind power systems are being introduced worldwide on a relatively large scale. Since these energy systems are seasonal, they cannot provide an energy source to feed the load continuously. Therefore, energy storage systems will be required for each of these systems to meet load demands. Usually the storage system is expensive and the size must be minimized as much as possible for the renewable energy system to be cost effective. A hybrid power system can be used to reduce energy storage requirements. To meet the load demand of a particular location with sufficient sunlight and wind speed, a hybrid renewable energy system is installed that combines power generation through the solar and wind system.

This study investigates the potential of applying a photovoltaic solar and wind powered hybrid system in a residential area in İzmir. The aim of this study is to examine whether it is economically, technologically and environmentally profitable to install a solar and wind power hybrid

system in a residential area. The aim is to find the most economical optimal size of a solar and wind hybrid system that is also environmentally sustainable.

A literature study on the photovoltaic solar and wind energy hybrid system was compiled and an optimization was made in the HOMER optimization program. For optimization, data were collected for Photovoltaic solar and wind energy costs and the energy consumption of the residential area. The HOMER software then suggested the optimum size of the PV solar and wind hybrid system. In the simulation, economic methods such as net present value, repayment method and rate of return were used. The results showed an optimal size of 96.7 PV and 12 kW wind power, resulting in a profitable investment with a NPV of \$306,928.03 and an internal rate of return of 20.6% . In addition, the renewable fraction for the settlement was 100% . Beyond the economic results, a sensitivity analysis was performed that did not change the result for the optimal size. It can be concluded that the optimal size of the hybrid system is economically profitable and is in line with Turkey's goal of 100% renewable energy in the short term. However, even though the results show a profitable investment, the investment costs are high, which means that only some regions can afford to invest in a solar and wind hybrid system.

**Keywords:** Renewable energy, hybrid systems, HOMER, optimization, photovoltaic solar energy, wind energy, storage

## ÖNSÖZ

Lisans eğitimim devam ederken yaptığım yaz stajında hedeflediğim yenilenebilir enerji alanında çalışma hayatımda 6. yılım tamamlanmıştır. Bu alanda aldığım lisans üstü eğitimi de iş deneyimimi perçinlemiştir.

Sürdürülebilir kalkınma zorunluluğu ve temiz enerji çözümlerinin küresel arayışıyla tanımlanan bir çağda, hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin araştırılması ve entegrasyonu, çevresel kaygıları azaltırken sürekli artan enerji talebini karşılamak için çok önemli bir yol olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin tasarımı, optimizasyonu ve uygulanmasındaki zorlukların ve fırsatların kapsamlı bir analizini yapmaktır. Mevcut literatürün, önceki çalışmaların ve yenilikçi metodolojilerin bir sentezi yoluyla araştırma, karar alma süreçlerine, ve sürdürülebilir enerji altyapısının geliştirilmesine bilgi verebilecek katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Bu çalışma, dünyayı daha sürdürülebilir ve dayanıklı bir enerji geleceğine yönlendirmeye kararlı araştırmacıların, mühendislerin ve politika yapıcıların kolektif adanmışlığının bir kanıtıdır. Bu tezde de güneş ve rüzgar enerjisinin birbirini tamamlar nitelikte olduğuna, şebekenin olmadığı kırsal bölgelerde üretilen yerde tüketilme mantığı ile depolamalı bir hibrit enerji sistemi tasarlanmıştır. Bu tezde şebekenin olmadığı bir yerleşke için hibrit enerji sistemi, teknolojik ve ekonomik olarak incelenmiştir.

Yiğit ERSAN

İzmir-2024



# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

KABUL VE ONAY SAYFASI .....	i
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI .....	iii
ÖZET .....	v
ABSTRACT .....	vii
ÖNSÖZ .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xiii
TABLolar DİZİNİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xvi
Bölüm 1. GİRİŞ .....	1
1.1. Literatür Taraması .....	2
Bölüm 2. HİBRİT YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ .....	7
2.1. Fotovoltaik Güneş Enerjisi .....	8
2.1.1. Fotovoltaik Güneş Hücreleri .....	11
2.1.1.1. Monokristal Silikon Hücreler .....	12
2.1.1.2. Polikristal Silikon Hücreler .....	15
2.1.1.3. Silikon Ribon .....	15
2.1.1.4. İnce Film Hücreler .....	16
2.1.1.5. HIT Hücreler .....	17
2.1.2. FV Modüller .....	17
2.1.2.1. FV Modül Parametreleri .....	19
2.1.2.2. Kısmi Gölgeleme ve By-Pass Diyotlar .....	20
2.1.2.3. FV Modüllerin Bileşenleri .....	22
2.1.3. Maximum Güç Noktası Takibi (MPPT) .....	24
2.1.4. Eviriciler .....	26
2.1.4.1. Merkezi Eviriciler .....	27
2.1.4.2. Dizi Eviriciler .....	28
2.1.5. Türkiye’de Fotovoltaik Güneş Enerjisi Potansiyeli .....	29
2.2. Rüzgar Enerjisi .....	29
2.2.1. Rüzgar Türbini .....	31
2.2.1.1. Yatay Eksenli ve Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri .....	33
2.2.1.2. Rüzgara Karşı ve Rüzgar Yönündeki Rüzgar Türbinleri .....	36
2.2.1.3. Rüzgar Türbini Kapasitesi .....	36
2.2.1.4. Kara ve Deniz Aşırı Rüzgar Türbinleri .....	38
2.2.1.5. Doğrudan Tahrikli ve Dişli Tahrikli Rüzgar Türbinleri .....	38
2.2.1.6. Şebeke Bağlı ve Şebekeden Bağımsız Rüzgar Türbinleri .....	39
2.2.2. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Potansiyeli .....	39
2.3. Enerji Depolama Sistemi .....	41
2.3.1. Dönüştürülebilir Enerji Depolama .....	43

2.3.1.1.	Bataryalar .....	43
2.3.1.2.	Pompaalı Depolamalı Hidroelektrik .....	44
2.3.1.3.	Volanlar .....	45
2.3.1.4.	Sıkıştırılmış Hava .....	45
2.3.1.5.	Hidrojen .....	46
2.3.2.	Nihai Depolama .....	46
2.3.2.1.	Termal Enerji .....	46
2.3.2.2.	Pompalanan Su .....	46
2.3.2.3.	Saf Su .....	47
<b>Bölüm 3. FV GÜNEş ENERJİSİ - RÜZGAR ENERJİSİ HİBRİT ENERJİ SİSTEMİ:</b>		
<b>YERLEşİM BÖLGESİ ÖRNEĞİ .....</b>		<b>48</b>
3.1.	Yerleşim Bölgesinin Elektrik Tüketimi ve Yük Profili .....	48
3.2.	Bölge Enerji Potansiyelleri .....	49
3.2.1.	FV Güneş Enerjisi Potansiyeli .....	49
3.2.2.	Rüzgar Enerjisi Potansiyeli .....	53
<b>Bölüm 4. HİBRİT YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEM ANALİZİ .....</b>		
<b>4.1. HOMER Yazılımı .....</b>		<b>54</b>
4.1.1.	Hassasiyet Analizi .....	56
4.1.2.	Optimizasyon .....	57
4.1.3.	Simulasyon .....	58
4.1.4.	Ekonomik Modelleme .....	59
<b>4.2. HOMER ile Sistem Tasarımı .....</b>		<b>62</b>
4.2.1.	Yükün Modellenmesi .....	62
4.2.2.	Fotovoltaik Güneş Enerji Kaynağı .....	63
4.2.3.	Rüzgar Enerjisi Kaynağı .....	63
4.2.4.	Sıcaklık Verileri .....	64
4.2.5.	Rüzgar Türbini Seçimi .....	64
4.2.6.	Fotovoltaik Modül Seçimi .....	66
4.2.7.	Depolama Sistemi Seçimi .....	73
4.2.8.	Konvertör Seçimi .....	75
4.3.	Simulasyon Sonuçları Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti (LCOE) .....	75
4.4.	Optimizasyon Ayarları .....	76
<b>Bölüm 5. BULGULAR VE TARTIşMA .....</b>		
<b>5.1. Simulasyon Modelinin Tartışılması .....</b>		<b>83</b>
5.1.1.	Optimum Sistem için Nakit Akışı ve Maliyet Tablo Özetleri .....	84
5.1.2.	Üretim Değerleri .....	85
5.1.3.	Rüzgar Enerjisi Sonuçları .....	86
5.1.4.	Üretim Değerleri .....	86
5.1.5.	FV Güneş Enerjisi Sonuçları .....	88
5.1.6.	Depolama Sistemi Sonuçları .....	88
5.1.7.	Konvertör Sonuçları .....	90
<b>Bölüm 6. SONUÇ VE GÖRÜNÜM .....</b>		
<b>KAYNAKLAR .....</b>		<b>94</b>
<b>TEşEKKÜR .....</b>		<b>101</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1.	Bir yük için önerilen, şebekeden bağımsız HYES'in şematik gösterimi (Fazelpour ve ark., 2014) .....	7
Şekil 2.2.	Değerlik bandı, bant aralığı (boşluk) ve iletim bandı: yalıtkan, iletken ve yarı iletken. ....	9
Şekil 2.3.	Fotovoltaik hücre. ....	10
Şekil 2.4.	Czochralski yöntemine sahip bir silikon güneş hücresinin şematik enine kesit görünümü. ....	13
Şekil 2.5.	Gömülü plakalara sahip bir UNSW güneş hücresinin şematik enine kesit görünümü. ....	14
Şekil 2.6.	Bir PERL güneş hücresinin şematik enine kesit görünümü. ....	14
Şekil 2.7.	HIT güneş hücresinin şematik kesit görünüşü .....	18
Şekil 2.8.	(a) FV hücre (b) FV modül (c) FV dizisi (d) Seri FV dizi .....	18
Şekil 2.9.	(a) Üç güneş hücresinin seri bağlantısı ve (b) klasik bir ön metal ızgaraya sahip hücreler için böyle bir seri bağlantının gerçekleştirilmesi. (c) Üç güneş hücresinin paralel bağlantısı. (d) Seri ve paralel bağlı güneş hücrelerinin I-V eğrileri. ....	19
Şekil 2.10.	(a) seri bağlı 36 güneş hücresinden ve (b) her biri paralel bağlı 18 güneş hücresinden oluşan bir FV modül. ....	19
Şekil 2.11.	(a) biri kısmen gölgeli olan altı güneş hücresi dizisi, (b) bu dizinin I-V eğrisi (c) Baypas diyotları, kısmi gölgeleme sorununu çözebilir .....	22
Şekil 2.12.	Tipik bir c-Si PV modülünün bileşenleri .....	23
Şekil 2.13.	Artan sıcaklık T'nin veya ışınım GM'nin I-V eğrisi üzerindeki etkisi .....	24
Şekil 2.14.	I-V eğrisi ve ilgili P-V eğrisi. Maksimum güç noktası (MPP) belirtilir .....	25
Şekil 2.15.	Farklı sistem mimarsine sahip eviriciler. ....	27
Şekil 2.16.	Farklı büyüklüklere sahip rüzgar türbinleri .....	32

Şekil 2.17. Birkaç tipik dikey eksenli rüzgar türbini türü: (a) Darrius; (b) Savonius; (c) Solarwind™ (Blueenergy, 1999); (d) Sarmal (Naskali ve ark., 2008); (e) Noguchi (Noguchi, 2006); (f) Maglev (Thomas, 2007); (g) Cochrane (Cochrane, 2006).	37
Şekil 2.18. Türkiye’deki rüzgar enerjisinin toplam kurulu gücü (EIGM,2022)	41
Şekil 2.19. Şebekeden bağımsız depolamalı bir HYES’in şematik gösterimi	43
Şekil 2.20. Li-ion bir bataryanın şarj çevrim grafiği (Qadrdan ve ark., 2018))	45
Şekil 3.1. : Yerleşim bölgesinin konumu	48
Şekil 3.2. Yerleşim Bölgesine ait Aylara Göre Saatlik Yük Profili	49
Şekil 3.3. Yerleşim Bölgesine Ait Günlük Yük Profili	50
Şekil 3.4. Yerleşim bölgesi için aylara göre günlük ortalama yatay ışınım ve berraklık indeksi	52
Şekil 3.5. Yerleşim bölgesi için aylara göre ortalama rüzgar hızı	53
Şekil 4.1. HOMER’in şematik gösterimi	56
Şekil 4.2. Simülasyon, optimizasyon ve duyarlılık analizi arasındaki kavramsal ilişki	56
Şekil 4.3. Yerleşkenin rüzgar gülü grafiği	64
Şekil 4.4. Yerleşke için Ortalama Sıcaklık Verileri NASA (2023)	65
Şekil 4.5. Seçilen rüzgar türbininin güç eğrisi	67
Şekil 4.6. Karadaki rüzgar projelerinin toplam kurulu maliyetleri ve küresel ağırlıklı ortalama, 1984-2022 (IRENA, 2022)	68
Şekil 5.1. Hibrit Sistem Çalışma Senaryosu	77
Şekil 5.2. Hibrit sistem ve yalnızca güneş enerjisi kullanımı için karşılaştırmalı nakit akış tablosu	81
Şekil 5.3. Hibrit sistem ve yalnızca güneş enerjisi kullanımı için karşılaştırmalı nakit akış tablosu	82
Şekil 5.4. Optimum Sistem için Bileşen Bazında Net Şimdiki Maliyetler	84
Şekil 5.5. Optimum Sistem için Nakit Akış Şeması	85
Şekil 5.6. Sistem Bileşenlerinin Aylık Üretim Değerleri	86
Şekil 5.7. Rüzgar Enerjisi için Güç Çıkış Yoğunluğu	88
Şekil 5.8. FV Güneş Enerjisi için Güç Çıkış Yoğunluğu	89
Şekil 5.9. Şarj Durumu (aylık)	90

## TABLULAR DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. Türkiye'nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli (MGM, 2023) .....	30
Tablo 2.2. Türkiye'nin bölgelere göre aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süreleri (MGM, 2023) .....	30
Tablo 2.3. Dikey ve yatay eksenli rüzgar türbinlerinin farkları .....	35
Tablo 2.4. Türkiye'nin çeşitli bölgelerdeki rüzgar enerjisi potansiyeli (Kızıltug, 2002) ..	40
Tablo 3.1. Yerleşim Bölgesine ait aylık tüketim verileri .....	49
Tablo 3.2. Yatay yüzeye düşen ortalama günlük ay bazında toplam ışınım (GHI) (a) ve Yerleşim bölgesi için Berraklık İndeksi (Clearness Index)(b) .....	51
Tablo 3.3. Yerleşim bölgesi için ortalama rüzgar hızı verileri .....	53
Tablo 4.1. Ortalama Sıcaklık karşılaştırması .....	64
Tablo 4.2. Rüzgar türbinine ait parametreler (Bergey, 2023) .....	65
Tablo 4.3. Seçilen FV modüle ait elektriksel spesifikasyonlar (SIRIUS, 2022) .....	70
Tablo 4.4. Seçilen FV modüle ait mekanik spesifikasyonlar (SIRIUS, 2022) .....	70
Tablo 4.5. FV Modül kabul edilen kayıp değerleri yüzdesel tablosu .....	73
Tablo 4.6. Türkiye'deki yıllara sair GES maliyetleri (Arazi fiyatı dahil edilmemiştir. Türkiye'de büyük ölçekli iş yapan müteahhit firmalardan alınan yaklaşık fiyatlardır.) .....	73
Tablo 4.7. Seçilen pilin özellikleri .....	74
Tablo 4.8. Seçilen konvertörün özellikleri .....	75
Tablo 5.1. HOMER Simulasyon sonuçları .....	78
Tablo 5.2. FV+depolama, rüzgar+depolama sistem sonuçları .....	79
Tablo 5.3. Optimum Sistem için Net Şimdiki Maliyet Analizi .....	85
Tablo 5.4. Sistem Bileşenlerinin Yıllık Üretim Değerleri .....	86
Tablo 5.5. Rüzgar Türbinine ait Veriler .....	87
Tablo 5.6. FV Güneş Enerji sistemine ait Veriler .....	88
Tablo 5.7. FV Güneş Enerji sistemine ait Veriler .....	90
Tablo 5.8. Konvertör Sistemine ait veriler .....	91

## SİMGELER VE KISALTMALAR

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
\$	Amerikan Doları
$\alpha$	Optik Emme Katsayısı
$\mu$	Hareketlilik katsayısı
$\eta_{inv}$	İnverter verimliliği
$\rho$	Havanın yoğunluğu
$\tau$	Işık soğurma bölgesindeki azınlık taşıyıcıların yaşam süresi
$a - Si/\mu c - Si$	Mikroamorf Silikon
A	Amper
A	Rotor süpürme alanı
Ah	AmperSaat
C°	Santigrat
$C_{rep}$	Bileşenin değiştirme/yenileme maliyeti
$C_p$	Güç katsayısı
$c_{ann, tot}$	Toplam yıllık maliyet
Cd	Kadmiyum
CdTe	Kadmiyum Tellür
CIGS	Bakır, İndiyum ve Galyumdiselenid
CIS	Bakır İndiyum Selenid
CNPC	Toplam net bugünkü maliyet
CRF	Sermaye geri kazanım faktörü
$E_{def}$	Sistemin yıllık hizmet verdiği ertelenebilir yük

$E_{grid,sales}$	Şebekeye satılan elektrik
$E_{prim}$	Sistemin yıllık hizmet verdiği birincil yük
$E_t$	t Yılındaki elektrik üretimi
$eV$	Elektronvolt
$EVA$	Etilen-Vinil-Asetat
$F_t$	t yılındaki yakıt giderleri
$Ga$	Galyum
$H$	Hidrojen
$He$	Helyum
$I_{mp}$	Maksimum güç akımı
$I_{sc}$	Kısa devre akımı
$I_t$	t yılındaki yatırım harcamaları
$i$	Yıllık reel faiz oranı
$km$	Kilometre
$kW$	KiloWatt
$kWh$	KiloWattSaat
$kWp$	kiloWattPeak
$L$	Azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğu
$L$	Litre
$LEC$	Ortalama ömür boyu seviyelendirilmiş elektrik üretim maliyeti
$m$	Metre
$m^2$	Metrekare

$M_t$	t yılındaki işletme ve bakım giderleri
$mm$	Milimetre
$MW$	MegaWatt
$N$	Yıl sayısı
$n$	Sistem ömrü
$P$	Güç
$P_{inv}$	Dönüştürücünün güç değeri
$P_{mp}$	Maksimum güç
$P_{peak}$	Tepe yük talebi
$PET$	Polietilen Tereftalat
$PVF$	Polivinil Florür
$r$	İndirim oranı
$R_{comp}$	Bileşenin yaşam süresi
$R_{rem}$	Bileşenin kalan ömrü
$R_{proj}$	Proje ömrü
$s$	Saniye
$S$	Hurda değeri
$U$	Rüzgar hızı
$V$	Volt
$V_{mpp}$	Devre çalışma gerilimi
$V_{oc}$	Açık devre gerilimi
$W_p$	WattPeak

**Kısaltmalar****Açıklama**

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AC	Alternatif Akım
BEDS	Bataryalı Enerji Depolama Sistemi
DC	Doğru Akım
EFG	Edge Defined Film Fed Growth
EIGM	Enerji İşleri Genel Müdürlüğü
FV	Fotovoltaik
GES	Güneş Enerji Santrali
GHI	Küresel Yatay Işınım
HIT	Heterojunction with Intrinsic Thin layer
HOMER	Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources
HYES	Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemleri
IRENA	International Renewable Energy Agency
LCOE	Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (Levelised Cost of Energy)
Li-ion	Lityum-iyon
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NREL	National Renewable Energy Laboratory
NŞM / NPC	Net Şimdiki Maliyet

PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition
PERF	Passivated Emitter Rear Floating Junction
PERL	Passivated Emitter Rear Locally Diffused
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
SD	Sürdürülebilir Kalkınma
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim A.Ş.



## 1. GİRİŞ

Günümüzde, bir ülkenin kalkınması için enerji en önemli rol oynayan unsurlardandır. Ülkenin refahının, büyümesinin ve ekonomisinin de çok önemli bir parçasıdır.

Sanayi Devrimi ile birlikte kullanımına başlanan ve şu anda da halen aktif olarak kullanılan enerji üretim kaynaklarından olan kömür, petrol ve doğalgaz endüstriyel, tarımsal, evsel ve ticari amaçlı kullanım için gereklidir (Khare ve ark., 2016). Petrol, doğalgaz, diğer gazlar ve fosil yakıtlardan enerji üretmenin bir çok yöntemi bulunmaktadır. Lakin, bu kaynaklar çevresel tahribat yarattığı için kullanım sınırlamaları vardır. Ayrıca bu kaynaklar sınırlı ve tükenbilir kaynaklardır. Bu zararlı kaynakların yanmasıyla ortaya çıkan iklim değişikliği ve çevre kirliliği tehdidi, insanlığın en büyük sorunlarından biridir (Nordin ve Rahman, 2019).

Kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil yakıtla dayalı enerji üretimi sürdürülebilir olmayıp aynı zamanda atmosferde sera gazlarının birikmesine ve küresel ısınmaya neden olmaktadır. Ayrıca, dünyadaki artan nüfus ve enerji talebindeki hızlanma güvenilir, sonsuz ve uygun maliyetli bir alternatif gerektirmektedir (El-Houari ve ark., 2019). Bu minvalde, sürekli artan küresel enerji tüketimini ve karbon emisyon üretimini azaltmak için yenilenebilir (güneş, rüzgar, hidrojen, biyokütle, hidroelektrik) enerji kaynaklarının kullanılması gereklidir. Bu enerji kaynakları, temiz, sürekli kendini yenileyen, çevre dostu ve sınırlama gerektirmeyen enerji kaynaklarıdır.

Yenilenebilir enerji, artan enerji gereksinimini karşılamak için önemli potansiyele sahiptir. Özellikle son elli yılda yaşanan petrol krizleri, araştırmacıları yeni teknolojilere sahip yenilenebilir enerji kaynaklarının verimliliğini artırmak için birçok araştırmaya itmiştir (Prabhakant ve ark., 2010).

Yukarıda belirtildiği gibi birçok yenilenebilir enerji kaynağı vardır, ancak rüzgar ve FV güneş enerjisi en öne çıkanıdır. Çünkü yenilenebilir enerji kaynağı denilince ilk akla gelen kaynaklardan olan rüzgar ve FV güneş enerjisi, iyi bilinen ve dünyanın her yerinde yaygın olarak kullanılan bir enerji kaynağıdır. Rüzgar ve FV güneşin tek bir enerji kaynağı olarak kullanılması, iklim değişikliği, mevsim değişikliği, gece-gündüz farkı, yağış, güneş ışınımı, rüzgar hızı değişimi nedenlerinden dolayı tamamen güvenilir, emre amade ve sürekli değildir (Saidur ve ark.,

2011). Benzer şekilde, her belirli lokasyonda, yenilenebilir enerji teknolojilerinin uygulanması kapsamlı bir kaynak değerlendirmesi gerektirir.

Güneş ışınımlarının daha etkili olduğu gündüz saatlerinde FV sistemin elektrik üreteceği, ancak gece saatlerinde güneş ışınımı olmadığı için, yeterli rüzgar hızı varsa rüzgar türbini sistemi yük talebini karşılamak için enerji üretecektir (Sinha ve Chandel, 2015). Bu hibrit sistemde FV güneş enerjisi, rüzgar enerjisi eksikliğini telafi edebilir ve bu da şebeke istikrarı sorununun üstesinden gelmek için enerji çıkışı dalgalanmasını azaltabilir (Miglietta ve ark., 2017). Yani yenilenebilir enerji kaynaklarının hibrit bir enerji sisteminde kullanımının birçok olumlu sonucu vardır. Yenilenebilir hibrit enerji sistemleri yüksek kapasitelerde kurulup enerji üretilmeyen, şebekenin ulaşmadığı koşullarda da depolama yapması sağlanabilmektedir (Engin, 2010).

Hibrit rüzgar FV güneş sisteminin optimum kullanımını yakalamak ve sistemi daha stabil ve güvenilir hale getirmek için birçok araştırmacı, farklı kombinasyonlar kullanmıştır. Rüzgar-FVgüneş, dizel jeneratör/rüzgar/FV güneş, rüzgar/dizel jeneratör ve FV güneş/dizel jeneratör gibi çok çeşitli kaynakların kombinasyonunu hibrit enerji sistemi olarak kullanmışlardır (Sinha ve Chandel, 2015).

Son yıllarda gelişen ve gelişmekte olan malzeme teknolojileri sayesinde sistem maliyetleri büyük ölçüde düşmüştür. 2009 yılında FV Güneş Enerji Santrali (GES'i) oluşturan maliyetlerin %75'i FV modül iken; bu oran günümüzde %60-65'lerdedir (Energytrend, 2022). Aralık 2022 itibari ile FV modül fiyatları 0,435 \$/W ile 0,365 \$/W arasında değişmektedir (ortalama 0.40 \$/W). Bu FV modül fiyatları 2009'da 3 \$/W idi. Şebekeden bağımsız küçük ölçekli (1 kW) bir rüzgar türbinin maliyeti 10000-15000 \$ arasında değişmektedir.

## 1.1. Literatür Taraması

Bir yerleşim yerinde konutların ihtiyaç duyduğu yükleri karşılayabilmek adına enerji, kısmen ya da tamamıyla yeterli potansiyel olması durumunda hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinden karşılanabilir. FV-rüzgar, FV-dizel jeneratör, FV-rüzgar-dizel jeneratör gibi enerji kaynaklarının bir arada kullanıldığı hibrit enerji sistemleri uygulamaları vardır. Bu uygulamalarda, sistemin teknik ve ekonomik fizibilite açısından değerlendirilmesi en çok incelenen konulardandır. Bu

bağlamda, sistemlerin boyutlandırılması ve tasarımı sistem kurulumundan önce yapılmaktadır. Bu alanda çeşitli araştırmacılar tarafından yürütülen birçok çalışma ve araştırma bulunmaktadır.

Li ve arkadaşları (Li ve ark., 2009), farklı batarya depolamalı, şebekeden bağımsız bir FV sisteminin modellenmesini ve optimizasyonunu tanımlamıştır. Şangay'da. FV-yakıt hücresi-batarya konfigürasyonunun en düşük maliyetli ve en yüksek maliyetli sistem olduğu sonucuna varılmıştır.

Demirören ve Yılmaz tarafından Gökçeada'nın elektrik ihtiyacı analiz edilmiştir (Demiroren ve Yılmaz, 2010). HOMER yazılımı, hibrit yenilenebilir enerji sisteminin optimum konfigürasyonunu değerlendirmek için kullanılmıştır. Çalışmadan, Gökçeada için rüzgâr enerjisi sistemine ilişkin enerji maliyetlerinin daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı zamanda, yedek güç için bataryalar yerine şebeke bağlantısının kullanımıyla NŞM (Net Şimdiki Maliyet) daha da azalmaktadır. Buna göre, rüzgâr enerjisi sistemi, özellikle şebekeye satış yapılabilmesi durumunda, Gökçeada için avantajlıdır. FV modüllerinin ve bataryaların maliyetleri çok yüksek olduğu için, FV sistemleri henüz ekonomik değildir. Sonuç olarak, elektrik enerjisi gereksiniminin rüzgâr enerjisi ile karşılanması Gökçeada için uygun bir yatırım olacağına sonucuna varılmıştır.

Ajlan ve arkadaşları, Yemen'de küçük bir kasabanın elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanması konusu üzerine araştırma yapmıştır (Ajlan ve ark., 2017) . Beş farklı senaryo ile hibrit sistem kombinasyonları karşılaştırılmış ve optimum sistem tasarımı bulunmuştur. 0,137 \$/kWh NŞM değeri ile FV/Rüzgar/Dizel/Batarya sisteminin en uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Karakoulidis ve arkadaşları (Karakoulidis ve ark., 2011) Yunanistan'ın Kavala kentinde bulunan bir laboratuvarın elektrik enerji ihtiyacını karşılamak için FV/Dizel/Batarya sistemi üzerine çalışma yapmıştır. Çalışma sonucunda, FV/Dizel/Batarya o bölge için en uygun hibrit model olarak belirlenmiştir.

Halabi ve arkadaşları (Halabi ve ark., 2017) HOMER yazılımını kullanarak, Malezya iklim koşullarında FV/Dizel/Pil sistemlerinin farklı senaryolarını analiz etmiştir. FV/Dizel/Pil senaryosu teknik açıdan diğer tüm senaryolarla karşılaştırıldığında en iyi performansı göstermesinin yanısıra 24 saat enerji erişimini de desteklemektedir. Bu arada, şebekeden bağımsız dizel jeneratör sistemi en iyi ekonomik senaryoyu göstermektedir. Ancak %100 yenilenebilir enerji

senaryosu en iyi sistem olarak kabul edilmektedir.

Panapakis ve arkadaşları (Panapakidis ve ark., 2012) Yunanistan'ın farklı yerleşim yerleri için dört farklı hibrit enerji kombinasyonunu incelemiştir (FV/Dizel, FV/Rüzgar, Rüzgar/Dizel ve Rüzgar/Yakıt hücresi). Çalışma sonucu rüzgar hızının ortalama 3m/s olduğu bir bölge için en iyi senaryonun FV/Dizel kombinasyonu olduğu sonucuna varılmıştır.

Mbaka ve arkadaşları (Mbaka ve ark., 2010) günlük yükü 7.08 kWh olan bir konut için, FV/dizel, şebekeden bağımsız FV, şebekeden bağımsız dizel jeneratör sistemleri için karşılaştırılmalı bir çalışma yapmıştır. Çalışma sonucunda, FV/dizel hibrit sistemin Kuzey Kamerun bölgesi için daha ekonomik olduğu ortaya çıkmıştır.

Baneshi ve arkadaşları (Baneshi ve Hadianfard, 2016) İran'ın güneyindeki konut olmayan büyük tüketimlere sahip bir tüketici için dizel/FV/rüzgar/batarya hibrit enerji sistemin teknolojik parametreleri üzerine çalışma yapmıştır. Çalışma sonucunda, şebekeden bağımsız sistemler için elektrik maliyeti 9,3-12,6 ¢/kWh ve yenilenebilir enerjinin yüzdesel olarak %0-43 olduğu görülmüştür. Fotovoltaik (FV) modül, rüzgar türbini ve pil kapasitesi sırasıyla 1000 kW, 0-600 kW ve 1300 kWh olarak seçilmiştir. Aynı boyutlarda FV modül, rüzgar türbini ve pil seçilip şebekeye bağlı sistemler için elektrik maliyetinin 5,7-8,4 ¢/kWh ve yenilenebilir enerjinin yüzdesel olarak %0-53 olduğu görülmüştür.

Girma (Girma, 2014) bir FV/dizel hibrit enerji sistemi üzerine çalışmıştır. Dizel jeneratör, güneş ışınımının az olduğu günlerde yedek olarak kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, FV/dizel/batarya hibrit enerji kombinasyonunun ilk yatırım maliyetinin şebekeden bağımsız bir dizel jeneratöre göre daha yüksek çıktığı görülmüştür. Hibrit enerji sistemi senaryosunda FV güneş, üretimin %95'ini karşılamaktadır. Ayrıca, FV/dizel/batarya hibrit sisteminin yatırım geri dönüş süresi yaklaşık 2 yıl olmuştur (enerji maliyetinin 0,468 \$/kWh olduğu durum için).

Bilir ve Yıldırım (Bilir ve Yıldırım, 2018) bir konut için FV/rüzgar hibrit enerji sistem performansını Avrupa'nın beş farklı bölgesinde modellemiş ve analiz etmiştir. Çalışma sonucu, Madrid, Paris, İzmir, Helsinki ve Budapeşte için basit geri ödeme süresi sırasıyla 7, 13,6, 16,7, 16,8 ve 25,5 yıl olmuştur.

Mamaghani ve arkadaşları (Mamaghani ve ark., 2016) kırsal elektrik üretimi için Kolombiya’da farklı iklim koşullarına sahip üç köy için şebekeden bağımsız FV/rüzgar/dizel jeneratör uygulamasını analiz etmiştir. Bölgeler, “Kolombiya’nın geleneksel olmayan enerji kaynakları için 2011-2030 kalkınma planına göre seçilmiştir. İlk olarak, farklı rüzgar türbini, FV ve dizel jeneratör kombinasyonları modellenmiş ve en verimli ve uygun maliyetli olanı belirlemek için her bölge için optimizasyon yapılmıştır. HOMER yazılımı, ekonomik göstergeler olarak net şimdiki maliyet, ilk yatırım maliyeti ve enerji maliyetini hesaba katarak, önerilen hibrit sistemlerin tekno-ekonomik fizibilitesini gerçekleştirmek için kullanılmıştır

Shaahid ve arkadaşları (Shaahid ve Elhadidy, 2008) aylık ortalama güneş ışınımının yüksek olduğu Suudi Arabistan’da elektrik kesintisinin yaşandığı durumlarda, konut uygulamaları için FV güç sistemlerinin konuşlandırılması için çalışma yapmıştır. HOMER yazılımı ile yapılan simülasyon sonuçları, 4 kW FV sistem ile 10 kW dizel sistem ve 3 saatlik depolama kapasitesine sahip bir pilden oluşan hibrit sistem için FV kesrinin %22 olduğunu göstermektedir. Yukarıdaki hibrit FV-dizel-batarya sisteminden enerji üretme maliyetinin 0,179 \$/kWh olduğu bulunmuştur (dizel yakıt fiyatının 0,1 \$/L olduğu varsayılarak). Çalışma, belirli bir hibrit FV-dizel konfigürasyonu için, FV kapasitesindeki artışla birlikte dizel jeneratörlerin çalışma saatlerinin azaldığını göstermektedir. Belirli bir FV-dizel hibrit sistemi için, dizel çalışma süresindeki azalmanın pil depolamanın dahil edilmesiyle daha da arttığı bulunmuştur. Hibrit PV-dizel-akü sistemi (4 kW FV, 10 kW dizel sistem, 3 saat depolama) kullanılarak elde edilen yakıt tasarrufu yüzdesi %19’dur. Hibrit sistem (4 kW FV, 10 kW dizel sistem, 3 saat pil, %22 FV kesri) kullanılarak karbon emisyonlarındaki azalma yüzdesi yalnızca dizel senaryosuna göre %19’dur. Daha da önemlisi, yukarıdaki hibrit sistemin kullanılmasıyla yaklaşık 2 ton/yıl karbon emisyonunun yerel atmosfere karışması önlenir.

Mahmud ve arkadaşları (Mahmud ve ark., 2013) St. Martin Adası’nda bir bölge için kullanılacak hibrit enerji sistemi modeli üzerine HOMER yazılımı kullanarak maliyet analizi optimizasyonu yapmıştır. Çalışma sonuçları olarak, dizel yakıtın maliyeti her geçen gün artmaktadır. Öte yandan yenilenemeyen enerji kaynaklarının miktarı her geçen gün azalmaktadır. Günümüzde enerji üretim kaynağı olarak sadece motorini kullanmak mümkün değildir. Hibrit enerji üretim sistemi bu konuda uygulanabilir ve optimize edilmiş bir çözüm olabilir. Bu çalışmada, bir FV-dizel-rüzgar-batarya hibrit enerji üretim sistemi en uygun çözüm olarak bulunmuştur.

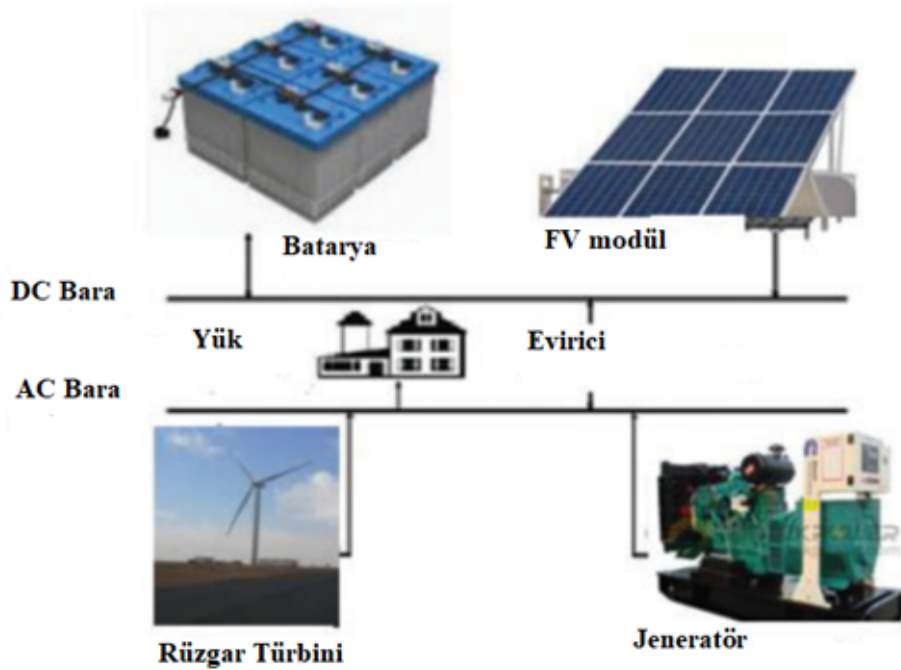
Yukarıdaki literatür çalışmalarına bakıldığında, çoğu çalışmanın belirlenen alanlar için fizibilite çalışması yapmak, optimum tasarımı bulmak ve sistemin tekno-ekonomik açıdan güvenilirliğini incelemek için yapıldığı gözlemlenmiştir. Genel olarak, hibrit enerji sistemlerinin tekil sistemlere göre daha yüksek güvenilirlik seviyesinde ve daha düşük LCOE sunduğu bulunmuştur.



## 2. HİBRİT YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ

Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıt kaynaklarına karşı verimli alternatifler haline gelmiştir. Ancak bu kaynaklar, yerel yüklerin tek tek karşılanmasında kullanıldığında, süreksiz ve kararsız olmaları nedeniyle; yüksek yatırım maliyetleri ve düşük arz güvenliği gibi birçok sorun yaratmaktadır. Bu sorunları çözmek için yeni bir konsept, yani hibrit yenilenebilir enerji sistemleri ortaya çıkmıştır (Erdinc ve Uzunoglu, 2012).

Hibrit yenilenebilir enerji sistemleri yükü şebekeye bağlı ya da şebekeden bağımsız beslemesine göre ikiye ayrılır. Hibrit yenilenebilir enerji sistemleri uzak ve kırsal alanlarda şebekeden bağımsız olarak kullanılır. Bu modda, yenilenebilir enerji kaynaklarının kararsız yapısı gereği, geleneksel enerji kaynakları ile birlikte veya enerji depolama için yedek kaynak olarak kullanılabilir. Ya da yenilenebilir kaynakların üretiminin yükü karşılamaya yetmediği dönemlerde yükün kalan kısmı yedek kaynaklardan karşılanabilmektedir.



**Şekil 2.1.** Bir yük için önerilen, şebekeden bağımsız HYES'in şematik gösterimi (Fazelpour ve ark., 2014)

Öte yandan, hibrit yenilenebilir enerji sistemleri fazladan üretim kapasitesine sahip olduğunda, üretilen fazla enerji depolama amacıyla kullanılabilir. Bu nedenle, bu sistemler şebe-

keden bağımsız çalışırken tekil yenilenebilir enerji sistemlerinden daha fazla güvenilirliğe sahiptir. Hibrit yenilenebilir enerji sistemleri üniversitelerde, hastanelerde, fabrikalarda, şehirlerde şebekeye bağlı kullanılmaktadır. Eğer sistemde depolama var ise, şebeke elektrik fiyatları düşük olduğunda, hibrit yenilenebilir enerji sistemleri yükün üretimini şebekeden karşılayıp enerji depolarını yenilenebilir kaynaklarla şarj etmektedir. Daha sonra şebeke elektrik fiyatlarının yüksek olduğu dönemlerde hibrit yenilenebilir enerji sistemi kendi üretimi ile yükü karşılayıp ve fazla elektrik enerjisini şebekeye satabilmektedir. Bu nedenle, hibrit yenilenebilir enerji sistemi, örneğin yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranını artırmak, Seviyelendirilmiş Enerji Maliyetini (LCoE) düşürmek, sera gazı emisyonunu azaltmak ve uzak ve kırsal alanlardaki insanlar için elektriğe erişim sağlamak gibi bazı avantajlar sağlar. Bu avantajlar, ekonomik, çevresel ve sosyal yönler dahil olmak üzere sürdürülebilir kalkınmanın (SD) üç kriterini de karşılamaktadır.

Bu tez çalışmasında fotovoltaik güneş enerjisi ve rüzgar enerjisinin kullanıldığı hibrit yenilenebilir enerji sistemi ele alınacağından bu iki kaynak incelenmiştir.

## 2.1. Fotovoltaik Güneş Enerjisi

Fotovoltaik güneş enerjisi (FV), son yıllarda en çok büyüyen endüstrilerden biridir. Bu hızı sürdürebilmek için malzeme kullanımı ve dolayısıyla malzemeyi üretmek için kullanılan enerji tüketimi artmaktadır. Teknolojilerin yanı sıra hücrelerin verimliliğini artırmak için de yeni çalışmalar devam etmektedir (Jäger-Waldau, 2006; Parida ve ark., 2011; Razykov ve ark., 2011).

Çeşitli kaynaklar tarafından fotovoltaik güneş enerjisi ile ilgili olarak literatüre sunulan tanımların ortak terimleri olduğu görülmektedir: “elektrik”, “güneş radyasyonu”, “doğrudan üretim”, “dönüşüm”. Bu nedenle, fotovoltaik güneş enerjisi kavramı olarak şu tanımları benimseyebiliriz: güneş ışınımının direkt olarak FV hücreler ile dönüştürülmesinden elde edilen elektrik.

Güneş ışınımının elektriğe dönüşümü, ilk kez 1839’da Becquerel tarafından gözlemlenen fotovoltaik etki sayesinde gerçekleşmiştir (Parida ve ark., 2011; Razykov ve ark., 2011; Hosenuzzaman ve ark., 2015; El Chaar ve ark., 2011). Bu etki, iki enerji bandı sunan, yarı iletkenler olarak bilinen malzemelerde meydana gelir, bunlardan birinde elektronların varlığına izin verilir (değerlik bandı) ve diğerinde bunların varlığı yoktur, yani bant tamamen “boş” (iletim bandı),

bkz. Şekil 2.2 Daha yaygın olarak kullanılan yarı iletken malzeme, dünyada en çok bulunan ikinci element olan silikondur.



**Şekil 2.2.** Değerlik bandı, bant aralığı (boşluk) ve iletim bandı: yalıtkan, iletken ve yarı iletken.

Atomları, komşularına bağlanan ve bir kristal ağ oluşturan dört elektrona sahip olmasıyla karakterize edilir.

Güneş ışığının fotovoltaik etki üzerindeki işlevi, en dıştaki elektrona, malzemede valans bandından iletkenlik bandına hareket etmesini mümkün kılmak için bir miktar enerji sağlamak ve böylece elektrik üretmektir.

Hemen hemen tüm fotovoltaik bileşenler, bir fotovoltaik yoluyla geliştirilen bir yarı iletken bir P-N bağlantısı içerir. Bu ürünler ayrıca fotovoltaik hücreler veya fotovoltaik modüller olarak da bilinir (Goetzberger ve ark., 2003). Şekil 2.3’de tipik bir güneş hücresi gösterilmektedir. P-N bağlantısı, hücrenin ana kısmıdır ve burada ışık alan kısım N-tipi malzemedir, bunun altındaki kısım ise P-tipi malzemedir.

Fotovoltaik güneş enerjisinin başlıca avantaj ve dezavantajları şunlardır:

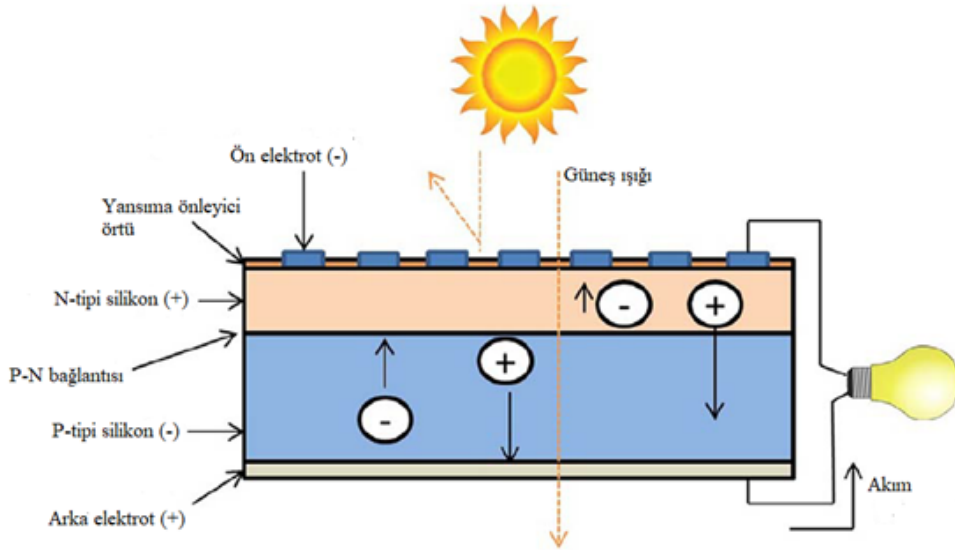
#### **Avantajları:**

- Doğa dostu
- Hareketli parçasının olmaması
- Gürültüsüz olması
- Emisyon olmaması
- Yakıt ve su kullanılmaması
- Asgari bakım gereksinimi olması

- Uzun ömürlü olması (30 yıla kadar)
- Her yerde kullanılabilmesi
- Bulutlu havalarda dahi üretim yapılabilmesi
- Modüler veya özel tasarım enerji, vattan gigavat seviyesine kadar her türlü uygulama için santral tasarlanabilmesi

### Dezavantajları:

- Güneş olmadan çalışmaması
- Düşük bakım maliyetlerini ve yakıt maliyetlerinin olmamasını gölgede bırakan yüksek ilk yatırım maliyetleri olması
- Büyük güçlü uygulamalar için çok fazla boş alan gerekmesi
- FV enerji doğru akım üretir. Şebekeden bağımsız uygulamalarda özel DC-DC dönüşüm cihazları veya DC-AC eviriciler gerekir, piller batarya gibi enerji depolaması gerekir.



Şekil 2.3. Fotovoltaik hücre.

Fosil yakıt kullananlar gibi geleneksel elektrik üretim kaynaklarına kıyasla fotovoltaik teknoloji, bu kaynakların üretim sırasında neden olduğu iklim değişikliği, küresel ısınma, hava kirliliği, asit yağmurları vb. gibi ciddi çevre sorunlarını beraberinde getirmemektedir. Fosil yakıtlara göre bir diğer avantajı da güneş enerjisinin çıkarılması, rafine edilmesi veya yüke yakın olan üretim sahasına taşınması gerekmemesidir. Bununla birlikte, yaşam döngüsü boyunca büyük miktarda enerji tüketir ve bazı aşamalarda (diğerlerinin yanı sıra fotovoltaik hücrelerin üretim

süreci, fotovoltaik modüllerin montajı ve malzemenin taşınması) bazı sera gazları yayar (Pai ve ark., 2004; Nishimura ve ark., 2010).

Yasal mevzuatlar çerçevesinde, fotovoltaik enerji üretim santralleri, bir yıldan daha kısa sürede, oldukça fazla elektrik üretme potansiyeline sahiptir. Çevresel etkileri minimum düzeyde olduğundan, fotovoltaik sistemler yüksek derecede kirlenici sistemlerin aksine uzun vadeli değerlendirme gerektiren ön çalışmalara olan ihtiyacı da ortadan kaldırır (Silveira ve ark., 2013).

Büyük ölçekli fotovoltaik uygulama, hem su üzerine hem de araziye kurulan fotovoltaik tesisler aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Değerli arazileri ve suyu korumak için okyanuslar, göller, rezervuarlar, sulama havuzları, atık su arıtma tesisleri, balık çiftlikleri, barajlar ve kanallar gibi su kütlelerine fotovoltaik güneş sistemleri kurmak çekici bir seçenek olabilir. Yüzer tip fotovoltaik güneş enerji santralleri, güneş ışığını azaltacak daha az engel, uygun enerji verimliliği ve FV modüllerin altında daha düşük sıcaklıklardan dolayı daha yüksek enerji üretim verimliliği dahil olmak üzere, yüzeydeki güneş enerji santrallerine kıyasla çok sayıda avantaja sahiptir. Ek olarak, güneş enerjisi santrali su ortamına fayda sağlar çünkü tesisin gölgelenmesi suyun aşırı buharlaşmasını önler, yosun gelişimini sınırlar ve potansiyel olarak su kalitesini iyileştirir (Sahu ve ark., 2016).

Çölde fotovoltaik tesislerin kurulumu, yüksek düzeyde güneş radyasyonu nedeniyle fotovoltaik güneş enerjisinin kullanımı için en uygun yerlerden biri olabilir. Örneğin, Şili'deki Atacama çölü, ülkenin kuzeyinde sürdürülebilir elektrik arzının devam etmesine ve elektrik fiyatlarının dengelenmesine katkıda bulunabilen önemli bir bölgedir. Bu nedenle Atacama çölü, Şili madencilik endüstrisine fayda sağlayan uygun bir seçenektir (Fuentealba ve ark., 2015; Parrado ve ark., 2016).

### **2.1.1. Fotovoltaik Güneş Hücreleri**

Fotovoltaik hücreler, güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürür. Bazı malzemelerin ışığa maruz kaldığında elektrik akımı ürettiği fotovoltaik etkiden faydalanarak çalışırlar. Bu hücreler temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağı sunarak fosil yakıtlara olan bağımlılığımızı azaltır.

Teknolojideki gelişmeler sayesinde fotovoltaik hücreler daha verimli ve uygun fiyatlı hale gelmektedir. Gelecek bölümlerde fotovoltaik hücrelerin çeşitlerinden bahsedilecektir.

### 2.1.1.1. Monokristal Silikon Hücreler

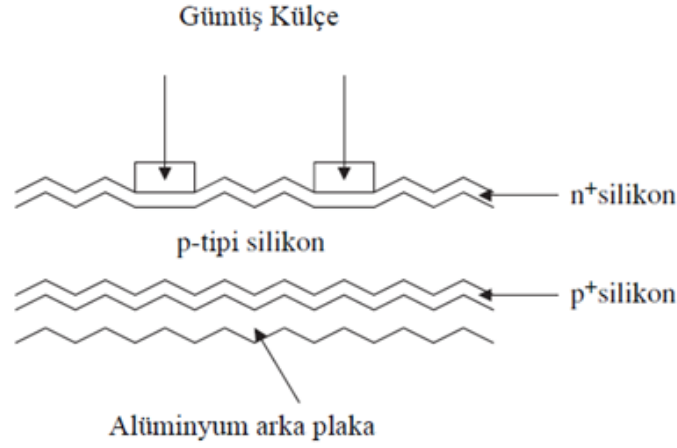
Silikon, oda sıcaklığında yaklaşık 1,1 eV dolaylı enerji bant aralığına sahiptir. Dolaylı enerji bant aralığı, düşük bir optik emme katsayısı,  $\alpha \approx 100\text{cm}^{-1}$  ile sonuçlanır ve bu gelen ışığın çoğunu emmek için silikonun birkaç yüz mikron kalınlığında ( $\gg 1/\alpha$ ) olması gerektiği anlamına gelir. Işık tarafından üretilen elektron deliği çiftleri, eğer fotoakıma katkıda bulunacaklarsa, kavşağın tükenme bölgesindeki elektrik alanına ulaşmak için bu mesafeye kadar yayılabilir olmalıdır (Doping konsantrasyonlarını düşürerek  $w$ 'yi birkaç mikrondan daha fazla artırmak, seri direncini, hücre verimliliğini ciddi şekilde düşürdüğü noktaya kadar artırmak pahasına olur). Taşıyıcıların bağlantı bölgesine yayılma yeteneği şu şekilde ölçülür: azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğu, "L" temel yarı iletken teorisi şunu gösterir:

$$L \propto \sqrt{\mu\tau} \quad (2.1)$$

Burada,  $\mu$  hareketlilik ve  $\tau$  ışık soğurma bölgesindeki azınlık taşıyıcıların yaşam süresidir (Green ve ark., 2005). Hem  $\mu$  hem de  $\tau$ , malzeme saflığına ve kristalliğe karşı çok hassas olduğundan, verimli hücreler ancak besleme stoğu yeterince safsa ve kristal kusurlarının yoğunlukları en aza indirilmişse üretilebilir. Pratikte, hücreleri ("güneş dereceli silikon") yapmak için gereken saflığın, mikroelektronik endüstrisi için gerekenden daha az katı olduğu ve aslında bugüne kadar üretilen çoğu FV hücresinin, daha büyük mikroelektronik endüstrisi tarafından sağlanan silikону kullandığı bulunmuştur.

Geçmişte üretime hakim olan geleneksel silikon güneş hücresi yapısının kesitsel bir görünümü Şekil 2.4'de verilmiştir. Bor katkılı p-tipi monokristal silikon tabaka, Czochralski yöntemi ve p-n bağlantısı kullanılarak büyütülmüş bir silikon topundan ve tabakaya fosfor katışıklarının difüze edilmesiyle oluşturulan p-n bağlantısından kesilir.

N-tipi yüzeyde hem elektrik iletimi yapmak hem de ışığın bağlantı bölgesine iletilmesini sağlamak için serigraf baskılı gümüş kontak parmakları kullanılmaktadır (Ralph, 1975). Arka p-tipi



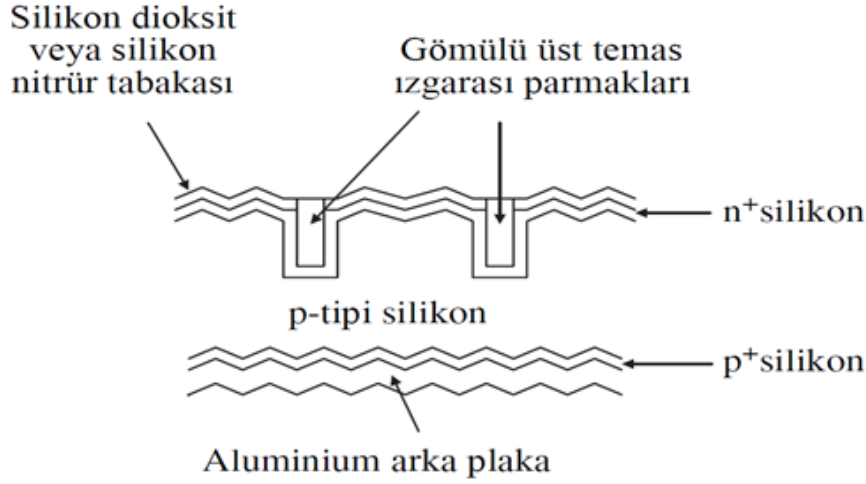
**Şekil 2.4.** Czochralski yöntemine sahip bir silikon güneş hücresinin şematik enine kesit görünümü.

yüzeyde temas sağlamak için alüminyum macun kullanılmaktadır. Bu, temas direncini azaltmak ve azınlık taşıyıcılarını bağlantı noktasına doğru yansıtan bir arka yüzey alanı sağlamak için hücrenin arkasına bir p+ katkılı bölge eklemek üzere tavlanır (Mandelkorn ve Maneck, 1972). Hücre yüzeyi, silikon içindeki ışığın yol uzunluğunu artırmak için yansımayı en aza indirecek ve ışığı yüksek kırılma açılarına kırarak şekilde dokuludur.

New South Wales Üniversitesi'nden (UNSW) Green ve arkadaşları, serigrafi baskı kontaktörleri kullanmanın yüksek bir cezası olduğuna dikkat çekmiştir (Green, 1985). Yüksek gölgeleme kayıpları, serigrafi baskılı gümüş ızgaraların saf gümüşe kıyasla yüksek direnci (3 kat daha yüksek), ızgara ile silikon arasındaki yüksek temas direnci ve zayıf en boy oranı, tümü hücre verimliliğini yaklaşık %14'e düşürür. Bu, temas noktalarının ya fotolitografi ya da lazer kazıma kullanılarak tanımlandığı güneş hücreleri geliştirmelerine yol açtı (Green, 1994). Tipik bir "UNSW hücre yapısı" Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Gösterilen tasarım için silikonun yüzeyi, hücrenin ön yüzeyini ve lazer kazıma kullanılarak kesime temas etmek için olukları pasifleştirmek için oksitlenmiştir. Bu gömülü temas tasarımında, temas metalleri, nikel, bakır ve ardından gümüş, akımsız yöntemler kullanılarak biriktirilir.

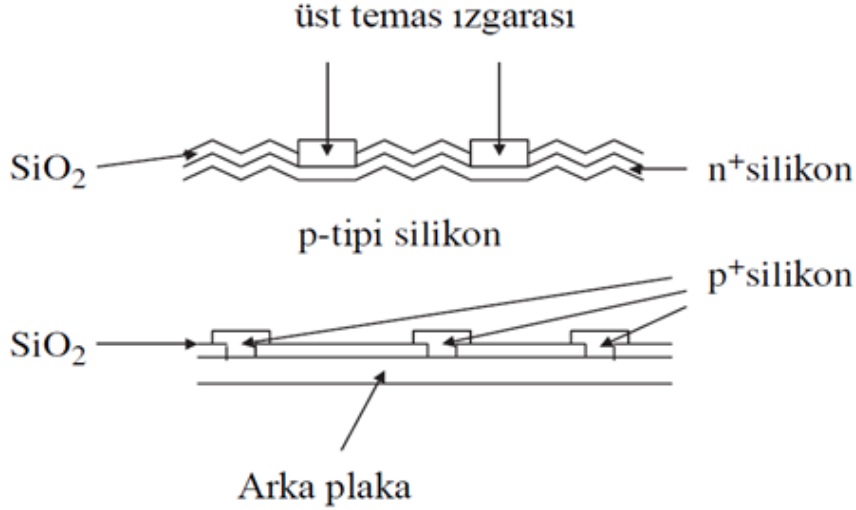
Geliştirilmiş tasarım, açık devre voltajını düşürmeden, hücrenin kısa dalga boyu yanıtını iyileştirerek, hücrenin yüzeyinde daha sık fosfor katkısına izin verir.

Daha gelişmiş bir tasarım, Şekil 2.6'da gösterilen PERL ("passivated emitter rear locally diffused") güneş hücresinin tasarımıdır. Bu yöntemde, hücrenin arka yüzeyi oksitlenir ve daha sonra p+ bölgeleri lokalize alanlarda oluşturulur. Silikon dioksit, hücrenin arka yüzeyini pasif-



Şekil 2.5. Gömülü plakalara sahip bir UNSW güneş hücresinin şematik enine kesit görünümü.

leştirebilir ve ayrıca ışığı hücre geri yansıtma için tek başına alüminyum arka temas ve p<sup>+</sup> bölgelerine göre çok daha etkilidir. Bu hücre tasarımı, şu anda kristalin silikon için > %25 verimliliğe sahip küçük alanlı hücreler ve > %21 verimliliğe sahip modüller ile sonuçlanmıştır (Zhao ve ark., 1995). Biraz değiştirilmiş bir tasarım, PERF (passivated emitter rear floating junction) hücresidir. Bu genellikle uzay uygulamaları için kullanılır (Green, 2001).



Şekil 2.6. Bir PERL güneş hücresinin şematik enine kesit görünümü.

Hücre verimliliğini sınırlayan faktörlerin son araştırmalarında, silikonun bor ile dopinginin, p-tipi silikondaki azınlık taşıyıcı ömrünün hafif indüklenmiş bir bozulmasına ve dolayısıyla yüksek performanslı hücrelerin verimliliğinde bir düşüşe yol açan bir kusuru indüklediği bulunmuştur (yaklaşık %1 – 2). Bu problemden kaçınmanın bir yolu, Czochralski tarafından yetiştirilen p-tipi waferlara katkı yapmak için bor yerine galyum kullanmaktır. Deneyler, galyumun boron

için oldukça ümit verici bir alternatif katkı maddesi olduğunu doğrulayan Ga-katkılı waferlar kullanılarak üretilen hücrelerde ışık kaynaklı bozunmanın olmadığını göstermiştir (Baba, 1995).

### **2.1.1.2. Polikristal Silikon Hücreler**

Bu teknikte, erimiş silikon bir kaba dökülür ve daha sonra soğumaya bırakılır, bu da kabın altından yukarıya doğru büyüyen büyük sütunlu tanelere (tipik olarak 0.3 mm çap) sahip silikon külçeler ile sonuçlanır (Ghosh ve ark., 2004). Taneler o kadar büyüktür ki, katılaşmış bloktan kesilen waferlar boyunca uzanırlar. Hücre işleme sırasında hidrojenin dahil edilmesi, oluşan hücrelerde tane sınırlarının pasifleştirilmesinde önemli bir rol oynar. Bu, en uygun şekilde, bu süreçte hidrojen kullanıldığından, silikon dioksit yerine üst yalıtım tabakası olarak silikon nitrürü biriktirmek için PECVD (plasma enhanced chemical vapour deposition) kullanılarak gerçekleştirilir. Czochralski yöntemine göre polikristal büyüme kullanmanın avantajları arasında daha düşük sermaye maliyetleri, daha yüksek verim, kullanılan silikon besleme stoğunun kalitesine karşı daha az hassasiyet ve hücrelerin kare veya dikdörtgen şekli nedeniyle bir modül yapmak için hücrelerin daha yüksek paketleme yoğunluğu yer alır. Çok kristalli silikon kullanılarak yapılan en iyi modüller genellikle monokristalli silikondan %2-3 daha az verimliliğe sahiptir ve kristalin silikon hücrelerin üretiminin yaklaşık %80'ine mal olur. Çok kristal silikon modüllerin estetik görünümü de genellikle mimarlar tarafından mono kristal silikon muadillerinden daha çekici olarak kabul edilir.

### **2.1.1.3. Silikon Ribon**

EFG ("edge defined film fed growth") yöntemiyle, bir grafit boya erimiş silikona daldırılır ve silikon, kılcal hareketle boya içindeki boşluğa yükselir; daha sonra boyadan kendi kendini destekleyen 2-D bir silikon tabakası çekmek mümkündür (Eyer ve ark., 1990).

Alternatif olarak "dendritik ağ büyüme süreci" kullanılabilir (Rosenblum ve arkadaşları, 2002). Erimiş silikona iki dendrit yerleştirilir ve eriyikten hızla çekildiğinde aralarında ince bir silikon tabakası tutulur ve hızla katılaşır. İkinci yöntem, daha yakın zamanda, süreç kontrolünü

çok daha kolay hale getirdiği için, dendritler yerine iki grafit dizinin kullanıldığı "şerit ribon yöntemine" dönüşmüştür (Wallace ve ark., 1997).

#### 2.1.1.4. İnce Film Hücreler

Maliyet düşürme arayışında ince film güneş hücreleri üzerine araştırma yapma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. İnce film güneş hücreleri, aynı miktarda güneş ışığını emmek için üretilen yarı iletkenlerden çok daha az malzeme gerektirir (kristal güneş hücrelerinden %99'a kadar daha az malzeme) (Gangopadhyay ve ark., 2013). Bu teknolojinin kullanımı, yüksek esnekliği, kolay kurulumu, yaklaşık %12'lik dağıtık ışık verimi ve 25 yıllık hizmet ömrü nedeniyle son yıllarda artmıştır (Mundo-Hernández ve ark., 2014). Ana yaklaşımlar, şekilsiz silikon hücrelere (a-Si) dayanmaktadır; Mikroamorf silikon (a-Si / $\mu$ c-Si); Kadmiyum tellür (CdTe); Bakır indiyum selenid (CIS) ve bakır, indiyum ve galyumdiselenid (CIGS).

Üretim yöntemleri, bilgisayar monitörleri, cep telefonları ve televizyonlar için düz panel monitörlerin üretiminde kullanılan yöntemler benzemektedir. İnce bir fotoaktif film, cam veya şeffaf bir film olabilen bir alt tabaka üzerine biriktirilir. Daha sonra film, hücreler halinde yapılandırılır. Kristal modüllerin aksine, ince film modülleri tek adımda üretilir. İnce film sistemleri genellikle kristal silikon sistemlerinden daha ucuza üretilir, ancak önemli ölçüde daha düşük verimlilik oranlarına sahiptir. Ortalama olarak, ince film hücreleri güneş radyasyonunun %5 ila %13'ünü elektriğe dönüştürürken, kristal silikon hücreler için bu oran %11-20'dir. Bununla birlikte, ince filmler nispeten yeni olduklarından, teknolojik gelişme için daha büyük fırsatlar sunabilirler (Gangopadhyay ve ark., 2013).

Bu teknoloji, silikon atomlarının birbirleriyle rasgele yerleştirilmesi gerçeğiyle kristal silikondan ayrılır. Atomik yapıdaki bu rastgelelik, malzemenin elektronik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve daha büyük bir boşluğa (1.7 eV) neden olurken, kristal silisyumunki 1.1 eV'dir (El Chaar ve ark., 2011).

Diğer bir konfigürasyon, amorf ve mikrokristal olmak üzere iki farklı silikon türünü üst üste tek bir hücrede birleştiren mikroamorf silikon hücrelerdir; burada üst katman, daha kısa olanı dönüştüren ultra ince bir a-Si katmanından oluşur. Görünür güneş spektrumunun dalga boyları

ve alt katman, daha uzun dalga boylarını dönüştürmede en etkili olan mikrokristalin silikona sahiptir. Bu, hücre yapısına ve katmanların kalınlığına bağlı olarak amorf silikon hücrelerden yaklaşık %8-9 daha yüksek verimlilik kazanımlarıyla sonuçlanır (El Chaar ve ark., 2011; Aberle, 2009).

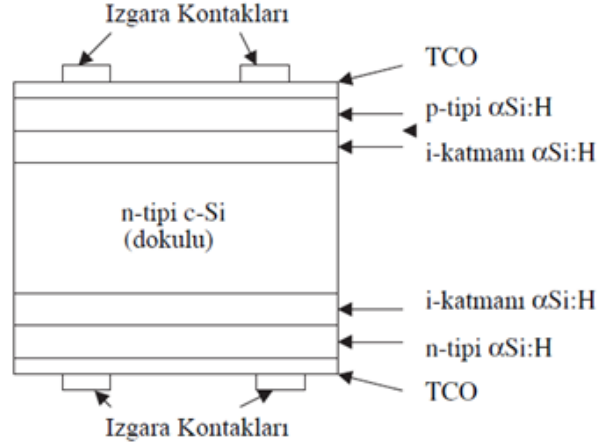
Düşük maliyetli ve yüksek verimli üretim için en umut verici yaklaşımlardan biri, kadmiyum tellür kullanımını içerir. CdTe'nin, ince film hücreler için en umut verici fotovoltaik malzemelerden biri olan güneş spektrumunun yüksek absorpsiyon katsayısı ile ideal boşluğa (1.45 eV) sahip olduğu bilinmektedir. Ancak kadmiyumun (Cd) toksisitesi ve bu malzemenin kullanımına bağlı çevresel sorunlar bu teknoloji için sorun teşkil etmektedir. Bu nedenle, dünyanın en büyük fotovoltaik güneş modülü üreticilerinden biri olan First Solar, maliyeti düşürme kapasitesine sahip işleminin verimliliği nedeniyle ince filmler alanında son derece popüler olan, devre dışı bırakılmış FV hücreleri için bir geri dönüşüm programı başlatmıştır. Diğer potansiyel sorun, hammadde kıtlığına yol açabilen ve böylece modüllerin maliyetini etkileyebilen Te (Tellür'ün) mevcudiyetidir (Hosenuzzaman ve ark., 2015; El Chaar ve ark., 2011; Aberle, 2009; Schock, 1996; Diehl ve ark., 2005).

### **2.1.1.5. HIT Hücreler**

HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) yeni geliştirilen bir FV hücresidir (Kawamoto, 2001). Bu hücrede şekilsiz silikon katmanları, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi, dokulu bir tek kristal silikon levhanın her iki yüzü üzerine biriktirilir.

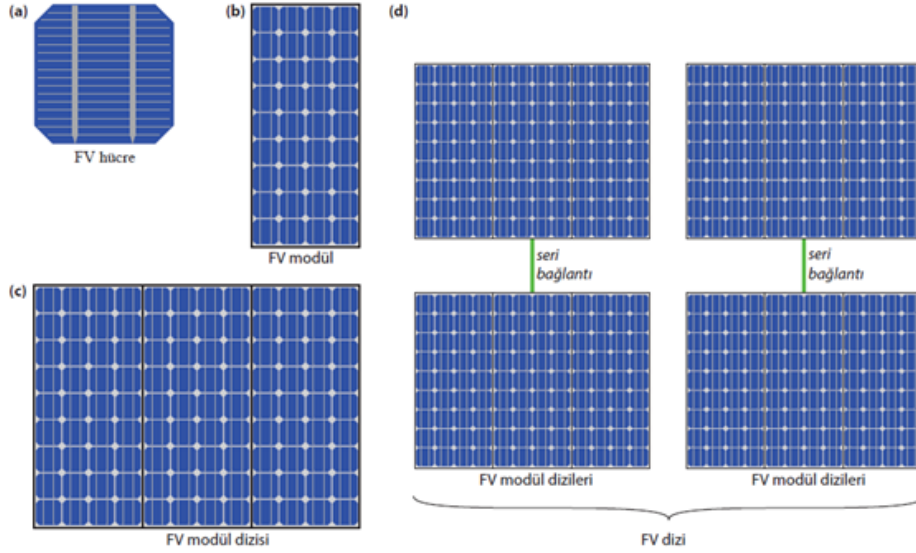
### **2.1.2. FV Modüller**

Bir güneş hücresi, güneş radyasyonunun içerdiği enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilir. Güneş hücresinin sınırlı boyutu nedeniyle, pratik olmayan sabit akım-gerilim koşullarında yalnızca sınırlı miktarda güç sağlanır. Çalışmaları için belirli bir gerilim ve/veya akım gerektiren cihazlarda güneş elektriğini kullanmak için, FV modül olarak da adlandırılan bir güneş (solar) paneli oluşturmak için birkaç güneş hücresinin birbirine bağlanması gerekir. Büyük ölçekli gü-



Şekil 2.7. HIT güneş hücresinin şematik kesit görünüşü

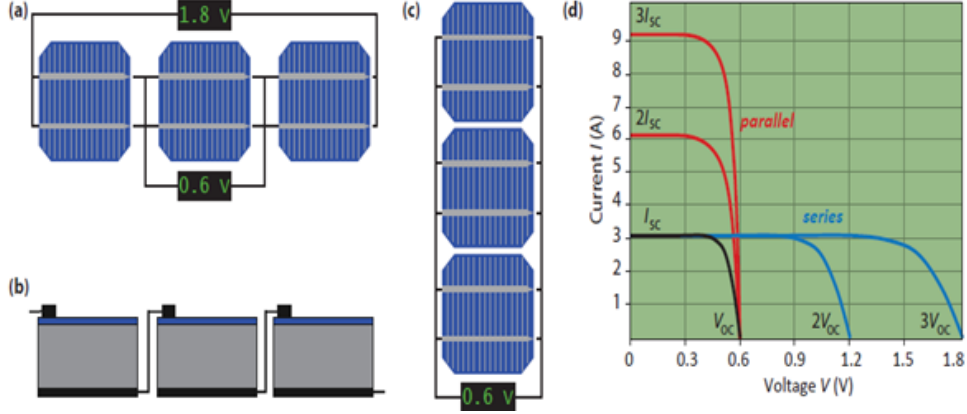
neş enerjisi üretimi için FV modüller bir güneş dizisine (array) bağlanır.



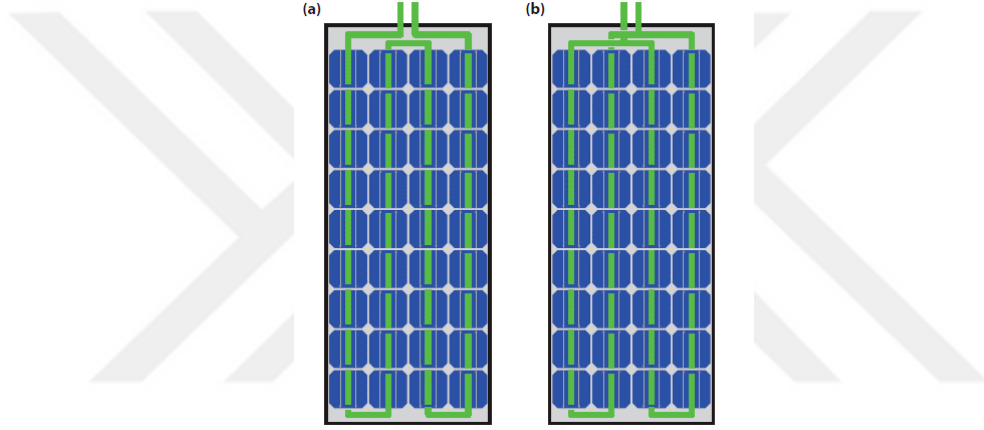
Şekil 2.8. (a) FV hücre (b) FV modül (c) FV dizisi (d) Seri FV dizi

Seri bağlantıda gerilimler toplanır. Örneğin, bir hücrenin açık devre voltajı 0,6 V'a eşitse, üç hücreden oluşan bir dizi 1,8 V'luk bir açık devre voltajı verecektir. Seri bağlı hücreler için akım toplanmaz, ancak her bir güneş hücresindeki akım tarafından belirlenir. Bu nedenle, bir güneş hücresi dizisindeki toplam akım, tek bir güneş hücresi tarafından üretilen akıma eşittir.

Şekil 2.9 (d), seri bağlı güneş pillerinin I-V eğrisini göstermektedir. İki güneş hücresi seri bağlanırsa, akım aynı kalırken gerilimler toplanır. Ortaya çıkan açık devre voltajı, tek hücrenin iki katıdır. Üç güneş hücresi seri bağlanırsa, açık devre voltajı üç kat artarken, akım hala tek bir güneş hücresinininkine kadardır.



**Şekil 2.9.** (a) Üç güneş hücresinin seri bağlantısı ve (b) klasik bir ön metal ızgaraya sahip hücreler için böyle bir seri bağlantının gerçekleştirilmesi. (c) Üç güneş hücresinin paralel bağlantısı. (d) Seri ve paralel bağlı güneş hücrelerinin I-V eğrileri.



**Şekil 2.10.** (a) seri bağlı 36 güneş hücresinden ve (b) her biri paralel bağlı 18 güneş hücresinden oluşan bir FV modül.

Paralel bağlı üç güneş hücresini gösteren Şekil 2.9(c)'de gösterildiği gibi güneş hücreleri paralel bağlanabilmektedir. Hücreler paralel bağlanırsa, güneş hücrelerinin akımları toplanırken gerilim tüm güneş hücrelerinde aynıdır.

Şekil 2.10 (a), seri bağlı 36 güneş hücresi içeren tipik bir FV modülü göstermektedir. Tek bağlantılı bir güneş pilinin kısa devre akımı 5A ve açık devre gerilimi 0,6 V ise, toplam modülün çıkışı  $V_{oc} = 36 \times 0,6V = 21,6V$  ve  $I_{sc} = 5A$  olacaktır. 18 seri bağlı hücreden oluşan iki dizi, Şekil 2.9 (b)'de gösterildiği gibi paralel bağlanırsa, modülün çıkışı  $V_{oc} = 18 \times 0,6V = 10,8V$  ve  $I_{sc} = 2 \times 5A = 10A$  olacaktır. Genel olarak, seri bağlı m özdeş hücre ve paralel bağlı n özdeş hücreden oluşan bir modülün I-V karakteristikleri için gerilim m faktörü ile çarpılırken akım n faktörü ile çarpılır. Modern FV modülleri, direnç kayıplarını en aza indirmek için genellikle hepsi seri olarak bağlanan 60 (10 x 6), 72 (9 x 8), 96 (12 x 8), 144 (12 x 12) güneş hücresi içerir.

### 2.1.2.1. FV Modül Parametreleri

Bir FV modül için, güneş hücrelerine benzer bir dizi parametre tanımlanabilir. En yaygın parametreler *açık devre gerilimi Voc, kısa devre akımı Isc*'dir. Modül seviyesinde, *açıklık alanı verimliliği* ile *modül verimliliği* arasında ayırım yapmalıyız. Açıklık alanı, yalnızca FV- aktif bölümlerin alanı olarak tanımlanır. Toplam modül alanı, açıklık alanı artı ara bağlantılardan ve modülün kenarlarından oluşan ölü alan olarak verilir. Açıklık alanı verimliliği, modül verimliliğinden daha büyüktür.

Bir FV modülün verimliliğini belirlemek, gerilim ve akımı belirlemekten daha zordur. Hücreler, direnç kayıplarına neden olan ara bağlantılar kullanılarak birbirine bağlanır. Ayrıca, birbirine bağlı hücrelerde küçük uyumsuzluklar olabilir. Örneğin  $m \times n$  hücre birbirine bağlıysa, seri bağlı  $m$  hücre dizisindeki en düşük akıma sahip hücre modül akımını belirler. Benzer şekilde paralel bağlı  $n$  dizide en düşük gerilime sahip dizi modül gerilimini belirler. Tek tek hücreler arasındaki uyumsuzluğun nedeni, üretim sürecinde ortaya çıkan homojensizliklerdir. Bu nedenle, pratikte FV modül, ideal olarak eşleştirilmiş ve birbirine bağlı güneş hücrelerinden beklenenden biraz daha az performans gösterir. Performanstaki bu kayıp, modül düzeyinde daha düşük bir dolurma faktörü ve verimlilik anlamına gelir. Modül boyunca ısıtım sabit değilse veya modül eşit olmayan bir şekilde ısınırsa, modül performansı daha da düşer.

Modül üreticileri tarafından sağlanan veri sayfalarında genellikle hücre ve modül performansı arasındaki farklardan bahsedilir. Örneğin, bir Elin Sirius ELNSM72M-540-HC-HV modülünün veri sayfası hücre düzeyinde %22,6'lık bir verimlilik sağlarken modül düzeyinde yalnızca %20,89 'luk bir verimlilik sağlar. Verimliliği artırmak için güneş hücresi düzeyinde yapılan tüm teknolojik gelişmelere rağmen, sağlıklı bir FV modül verimi sağlamak için FV sistemleri düzeyinde hala çok şey yapılmalıdır. Bir FV sisteminin performansı için sadece modül performansı değil, aynı zamanda FV sisteminin verimi de önemlidir.

### 2.1.2.2. Kısmi Gölgeleme ve By-Pass Diyotlar

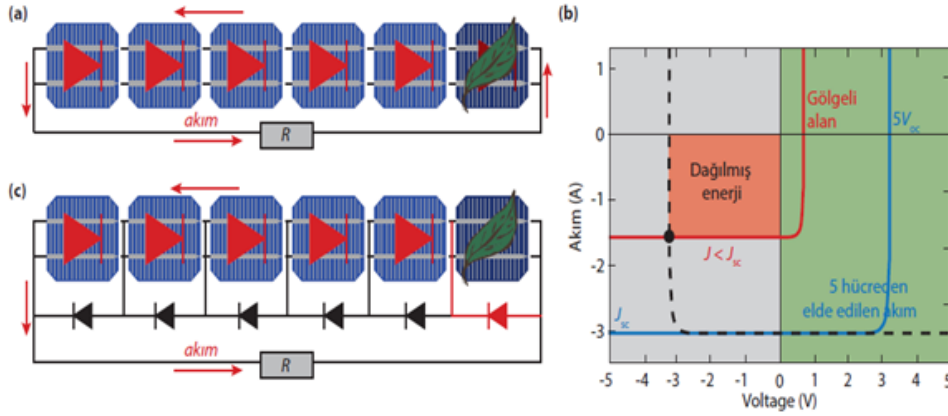
FV modüllere entegre bypass diyotları bulunur. Bu tür diyotların kullanılmasının nedenini anlamak için, Şekil 2.11 (a)'da gösterildiği gibi modülleri kısmen gölgelenebilecekleri koşullarda ele alınmalıdır. Gölge, bir ağaç, baca veya komşu bir bina gibi yakındaki bir nesneden olabilir. Ayrıca ağaçtan düşen bir yapraktan da kaynaklanabilir. Kısmi gölgeleme, güneş modülünün çıkışı için önemli sonuçlar doğurabilir. Bunu anlamak için, modüldeki bir güneş hücresinin büyük bir kısmının gölgeli olduğu durum ele alınmıştır. Basitlik için, altı hücrenin hepsinin seri olarak bağlandığını varsayıyoruz. Bu, gölgeli hücrede üretilen akımın önemli ölçüde azaldığı anlamına gelir. Bir seri bağlantıda akım, en düşük akımı üreten hücre tarafından sınırlandırılır, böylece bu hücre, modül boyunca akan maksimum akımı belirler.

Şekil 2.11 (b)'de beş gölgesiz güneş hücresinin ve gölgeli güneş hücresinin teorik I-V eğrisi gösterilmektedir. Hücreler sabit bir R yüküne bağlıysa, üretilen düşük akım nedeniyle modül boyunca gerilim düşmektedir. Bununla birlikte, beş gölgesiz güneş hücresi, yüksek gerilim üretmeye zorlandığından, gölgeli güneş hücresi üzerinde bir ters polarizasyon kaynağı gibi davranırlar. Şekil 2.11 (b)'deki kesikli çizgi, gölgeli hücreye uygulanan ters öngerilim yükünü temsil etmektedir; bu, beş hücrenin I-V eğrisidir ve dikey eksen boyunca 0 V'a eşit yansıtılmaktadır. Bu nedenle, gölgeli güneş hücresi üretim yapamaz, enerji verir, ancak enerjiyi dağıtmaya başlar ve ısınır. Sıcaklık o kadar kritik bir seviyeye yükselebilir ki, kapsülleme malzemesi çatlar veya diğer malzemeler aşınır. Ayrıca, yüksek sıcaklıklar genellikle FV çıkışının üretiminin de azalmasına neden olur.

Kısmi gölgelemeden kaynaklanan bu sorunlar, Şekil 2.11 (c)'de gösterildiği gibi modüle baypas diyotları dahil edilerek önlenmektedir. Diyot negatif gerilim altında akımı bloke eder, ancak pozitif gerilim altında akımı iletir. Hiçbir hücre gölgeli değilse, baypas diyotlarından akım geçmez. Bununla birlikte, bir hücre (kısmen) gölgeliyse, diğer hücrelerden gelen polarlama nedeniyle baypas diyonu üzerinden akım geçmeye başlar. Sonuç olarak, akım gölgeli hücre etrafında akabilir ve modül yine de gölgesiz tek bir güneş hücresininkine eşit akım üretebilmektedir.

Paralel bağlı hücreler için kısmi gölgeleme daha az sorundur, çünkü diğer hücrelerde üretilen akımların gölgeli hücreden geçmesi gerekmez. Ancak, paralel bağlı 36 hücreden oluşan bir mo-

dül, çok düşük gerilim ile (yaklaşık 0,6 V) birlikte çok yüksek akımlara (100 A'nın üzerinde) sahiptir. Bu nedenle, hücreleri seri olarak birleştirmek ve baypas diyotları kullanmak çok daha iyi bir seçenektir.



Şekil 2.11. (a) biri kısmen gölgeli olan altı güneş hücresi dizisi, (b) bu dizinin I-V eğrisi (c) Baypas diyotları, kısmi gölgeleme sorununu çözebilir

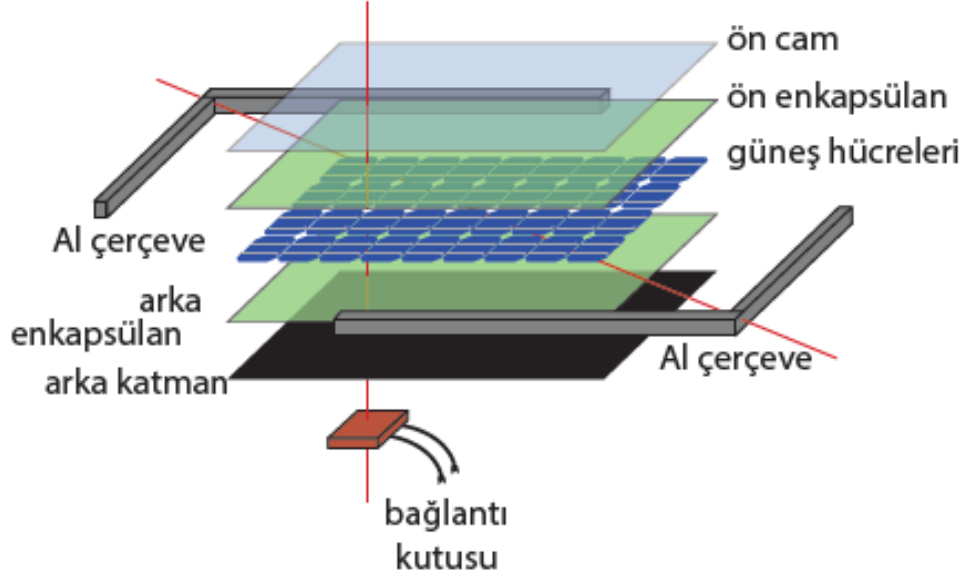
### 2.1.2.3. FV Modüllerin Bileşenleri

Bir FV modülün 25 yıl veya daha uzun bir kullanım ömrüne sahip olabilmesi için çeşitli etkilere dayanması gerekir. Uzun bir ömür sağlamak için, bir FV modülün yapıldığı bileşenlerin iyi seçilmesi gerekir. Şekil 2.12, olağan bir kristalin silikon FV modülün tipik bileşenlerini göstermektedir. Katmanlar, üreticiye bağlı olarak farklı malzemelerden oluşabilir. Ana bileşenler:

*Soda Kireç Cam:* Gelen ışık için şeffaf olurken mekanik stabilite sağlayan birkaç milimetre kalınlığa sahip soda-kireç camı. Camın düşük demir içeriğine sahip olması önemlidir çünkü demir, camda ışığın emilmesine yol açarak kayıplara yol açabilir. Ayrıca camın darbelere karşı direncini artırmak için temperlenmesi gerekir.

Güneş hücreleri, iki *enkapsülan* tabakası arasına sıkıştırılmıştır. En yaygın malzeme, termoplastik bir polimer (plastik) olan *etilen-vinil-asetattır* (EVA). Bu, ısıtıldığında şekle girdiği, ancak bu değişikliklerin tersine çevrilebileceği anlamına gelir.

*Arka tabaka,* nem ve diğer streslere karşı bir bariyer görevi görür. Üreticiye bağlı olarak, başka bir cam levha veya kompozit bir polimer levha olabilir. Sıklıkla kullanılan bir malzeme



Şekil 2.12. Tipik bir c-Si PV modülünün bileşenleri

kombinasyonu PVF-polyester-PVF'dir; burada PVF, *polivinil florür* anlamına gelir. PVF, buharlar için düşük bir geçirgenliğe sahiptir ve hava koşullarına karşı çok dirençlidir. Tipik bir polyester, *polietilen tereftalattır* (PET).

Mekanik stabiliteyi artırmak için tüm modülün etrafına genellikle alüminyumdan yapılmış bir çerçeve konur.

Genellikle modülün arkasına bir bağlantı kutusu yerleştirilir. İçinde güneş hücresine elektrik bağlantıları, modülü FV sisteminin diğer bileşenlerine bağlamak için kullanılan kablolar ile bağlanır.

Modül üretimi sırasındaki en önemli adımlardan biri, EVA'nın enkapsülan olarak kullanıldığı durum için açıklanan *laminasyondur* (Tobías ve ark., 2003). Laminasyon için, ön cam, kapsülleyiciler, birbirine bağlı güneş hücreleri ve arka tabakadan oluşan yığın tamamı, yaklaşık 120°C olan EVA'nın erime noktasının üzerinde ısıtılan bir laminatörde bir araya getirilir. Bu işlem, modül yığını içinden hava, nem ve diğer gazların çıkarılmasını sağlamak için vakumla gerçekleştirilir. Birkaç dakika sonra EVA eridiğinde basınç uygulanır ve sıcaklık yaklaşık 150°C'ye yükseltilir. Daha sonra, sertleştirme işlemi başlar, yani EVA tabakasında bulunan bir sertleştirme maddesi EVA zincirlerini çapraz bağlamaya başlar, bu da EVA molekülleri arasında enine bağların oluştuğu anlamına gelmektedir.

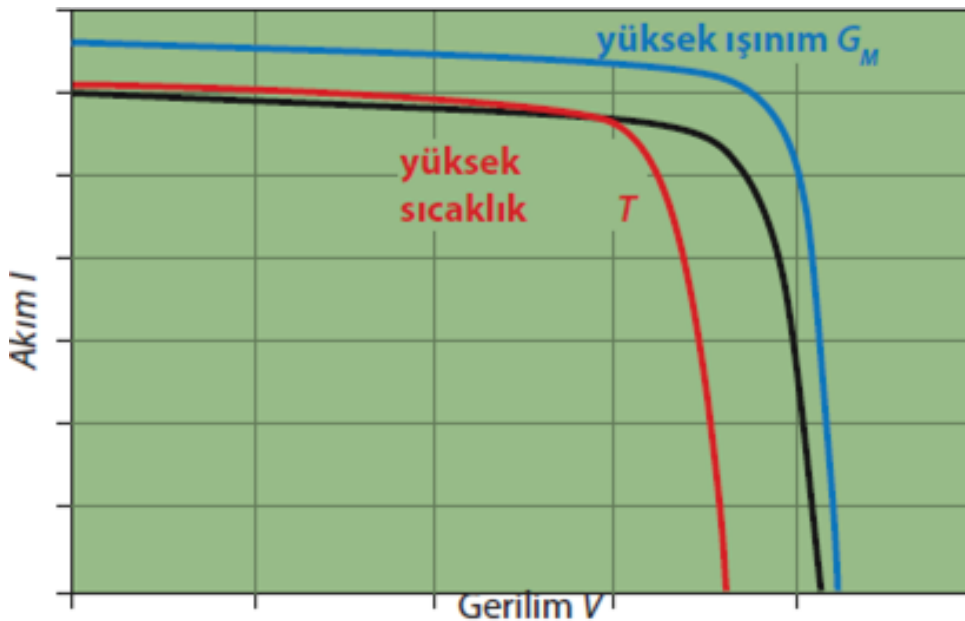
Işığın güneş hücresine girmeden önce geçtiği katmanların seçimi de optik açıdan çok önemlidir. Bu katmanların artan bir kırılma indeksi varsa, yansıma önleyici kaplama görevi görürler ve böylece güneş hücresinde birleşen ve sonunda emilen ışık miktarını artırabilirler, bu da güneş hücresi tarafından üretilen akımı artırır.

### 2.1.3. Maximum Güç Noktası Takibi (MPPT)

Maksimum güç noktası izleme (MPPT) kavramını, FV Sistemler için çok özeldir ve dolayısıyla fotovoltaik alanına çok özel bir güç elektroniği uygulaması getirir. MPPT kavramı FV modül/dizi seviyesinde izlenebilmektedir.

Işık altındaki bir güneş hücresinin davranışı bir I-V eğrisi ile karakterize edilebilmektedir. Birkaç güneş hücresini seri veya paralel olarak birbirine bağlamak yalnızca toplam gerilimi ve/veya akımı artırır, ancak I-V eğrisinin şeklini değiştirmez. Bu nedenle, MPPT kavramını anlamak için bir güneş hücresinin I-V eğrisini dikkate almak yeterlidir. I-V eğrisi, ışınım üzerindeki modül sıcaklığına bağlıdır. Örneğin, artan bir ışınım,

Şekil 2.13’de gösterildiği gibi, artan bir akıma ve gerilime yol açar. Aynı şekil, artan bir sıcaklığın gerilim üzerinde zararlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

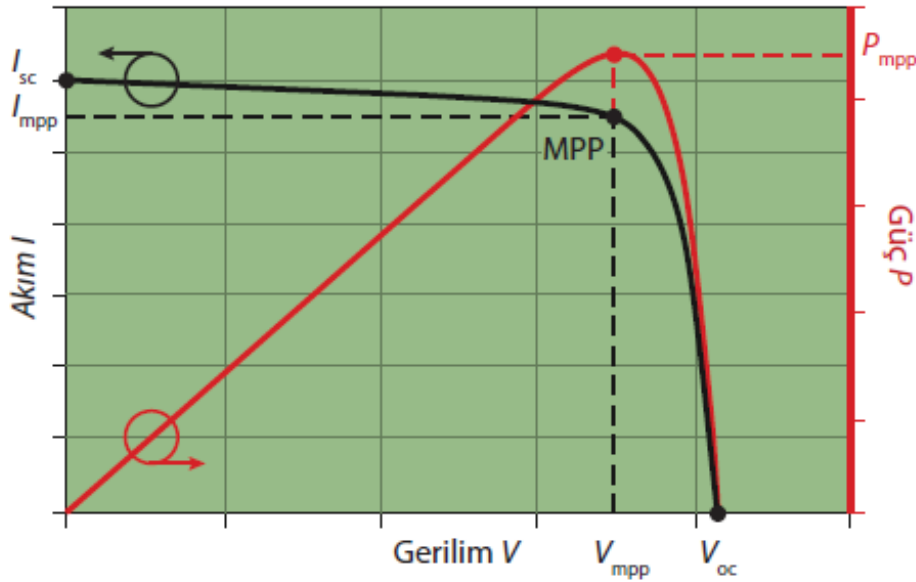


Şekil 2.13. Artan sıcaklık T'nin veya ışınım GM'nin I-V eğrisi üzerindeki etkisi

Belirli bir ışınım ve sıcaklık için çalışma noktası, I-V eğrisi üzerinde yer alan benzersiz bir (I, V) çiftine karşılık gelir. Bu çalışma noktasındaki güç çıkışı şu şekilde verilir:

$$P = I \times V \quad (2.2)$$

Çalışma noktası (I, V), Şekil 2.14’de gösterilen güç-gerilim (P-V) eğrisi üzerindeki bir noktaya karşılık gelir. Belirli bir ışınım ve sıcaklıkta en yüksek güç çıkışını üretmek için, çalışma noktası, maksimum güç noktası (MPP) olarak adlandırılan (P-V) eğrisinin maksimumuna karşılık gelmelidir.



Şekil 2.14. I-V eğrisi ve ilgili P-V eğrisi. Maksimum güç noktası (MPP) belirtilir

Bir FV modülü (veya dizisi) doğrudan bir elektrik yüküne bağlıysa, çalışma noktası bu yük tarafından belirlenir. Modülden maksimum güç almak için, modülü maksimum güç noktasında çalışmaya zorlamak zorunludur. Modülü MPP’de çalışmaya zorlamanın en basit yolu, FV modülünün gerilimini MPP’deki gerilimde ( $V_{mpp}$  olarak adlandırılır) olmaya zorlamak veya akımı MPP’deki akımda ( $I_{mpp}$  olarak adlandırılır) olacak şekilde düzenlemektir.

Ancak, MPP ortam koşullarına bağlıdır. Işınım veya sıcaklık değişirse, I-V ve P-V özellikleri de değişecek ve dolayısıyla MPP’nin konumu değişecektir. Bu nedenle, ortam koşullarındaki değişikliklerden sonra çalışma noktasının MPP’de olacak şekilde ayarlanabilmesi için I-V eğrisindeki değişikliklerin sürekli olarak izlenmesi gerekir.

Bu işleme Maksimum Güç Noktası İzleme veya MPPT denir. Bu işlemi gerçekleştiren cihazlara MPP izleyici adı verilir. Tüm MPPT algoritmaları,  $V_{MPP}$  bulunana kadar gerilimi bulmaya ve ayarlamaya dayanmaktadır.

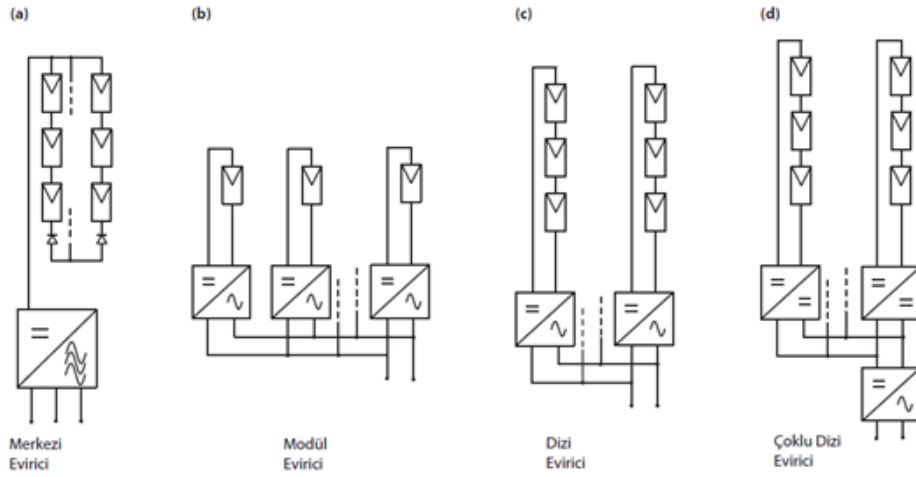
#### 2.1.4. Eviriciler

FV sistemler ile ilişkili bir teknoloji, güç elektroniği dönüştürücüsüdür. İdeal bir FV dönüştürücü, FV panelden maksimum gücü çekmeli ve bunu yük tarafına sağlamalıdır. Şebeke bağlantılı sistemlerde bu, akımdaki minimum harmonik içerikle ve bire yakın bir güç faktöründe yapılmalıdır. Şebekeden bağımsız sistemler için çıkış gerilimi de istenen değere ayarlanmalıdır.

Sistem mimarisi, FV modüllerin birbirine nasıl bağlanacağını ve şebeke ile arayüzün nasıl kurulacağını belirler. Belirli bir FV tesiste bu sistem mimarilerinden hangisinin kullanılacağı, tesisin ortamı (tesisın yerleşim bölgesi bir ortamda mı yoksa açık bir alanda mı yer aldığı), ölçeklenebilirlik, maliyetler vb. gibi birçok faktöre bağlıdır. Şekil 2.15’de farklı sistem mimarileri verilmiştir. Farklı mimarilerin avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Genel olarak solar eviriciler aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır (Falk ve ark., 2009):

- Eviriciler oldukça verimli olmalıdır, çünkü güneş enerjisi sisteminin sahibi, şebekeye/yüke teslim edilecek mutlak mümkün olan maksimum üretilen enerjiye ihtiyaç duyar.
- FV modül ile toprak arasındaki potansiyele ilişkin özel talepler (FV modülü tipine bağlı olarak).
- Aktif ada algılama özelliği gibi özel güvenlik özellikleri.
- Hat akımlarının harmonikleri için alt limitler. Şebekeye bağlı hem kaynakların hem de yüklerin harmonik limitleri düzenlendiği için bu gereklilik çoğu ülkede kanunla zorunlu kılınmıştır.
- Çoğu durumda, güneş enerjisi sistemi dış mekana kurulacaktır ve eviricilerin sıcaklık ve nem koşullarıyla ilgili belirli spesifikasyonlara uyması gerekir, örn. IP 54.
- Yüksek ortam sıcaklıklarına dayanıklı olmalıdır.
- Sessiz çalışma.



**Şekil 2.15.** Farklı sistem mimarsine sahip eviriciler.

Tek fazlı ve üç fazlı inverterler arasında ayırım yapılmalıdır. Düşük güçler için, küçük konut FV sistemlerinde yaygın olduğundan, tek fazlı eviriciler kullanılır. Şebekenin bir fazına bağlanırlar. Daha yüksek güçler için, şebekenin tüm fazlarına bağlı üç fazlı eviriciler kullanılır. Bir faza yüksek bir güç verilirse, üç faz boyunca akan akımlar çok asimetrik hale gelir ve bu da elektrik şebekesinde birçok soruna yol açar.

Evirici terimi genellikle iki farklı kavram için kullanılmaktadır. Birincisi, DC-AC dönüşümünü gerçekleştiren elektronik yapı taşı olan asıl evirici için kullanılmaktadır. İkinci olarak, evirici terimi, üreticiler tarafından üretilen ve günümüzde genellikle bir MPP izleyici, bir DC-DC dönüştürücü, bir DC-AC dönüştürücü ve muhtemelen ayrıca bir pilin şarj kontrol cihazını içeren toplam birim için de kullanılmaktadır.

#### 2.1.4.1. Merkezi Eviriciler

Merkezi eviriciler FV sistemlerde kullanılan bir mimaridir. Burada, FV modüller artan bir sistem gerilimine yol açan diziler halinde bağlanır. Daha sonra birçok dizi, bir merkezi eviriciye bağlı bir FV dizisi oluşturarak paralel olarak bağlanır. Evirici, üç fazlı bir eviricinin tasvir edildiği Şekil 2.15 (a)'da gösterildiği gibi maksimum güç noktası takibi ve güç dönüşümü gerçekleştirir. Bu konfigürasyon çoğunlukla çok büyük ölçekli FV sistemlerde genellikle üç fazdır (Araújo ve ark., 2009).

Birçok farklı evirici topolojisi, üç fazlı evirici olarak kullanılır. Bazen tek bir DC'den üç faza ünite olarak düzenlenirler, ancak bazen her biri 120 derecelik bir faz kaymasıyla çalışan üç ayrı DC'den AC'ye tek fazlı üniteler olarak düzenlenirler. Böyle bir merkezi konfigürasyonda tüm FV modlarının tek bir dizide bağlanması, en düşük spesifik maliyeti (kurulu gücün kWp başına maliyeti) sunar. Merkezi eviriciler yalnızca birkaç bileşen kullandıkları için çok güvenilirler, bu da onları büyük ölçekli FV enerji santrallerinde tercih edilen seçenek haline getirir.

Basit yapıda olmalarına ve düşük özgül maliyetlerine rağmen, merkezi eviriciler aşağıdaki dezavantajlara sahiptir:

1. Sistemin düzeni nedeniyle, DC kablolama kullanılarak büyük miktarda güç önemli mesafeler boyunca taşınır. Hatalı DC akımlarının kesilmesi zor olduğundan bu durum güvenlik sorunlarına neden olabilir. DC kablolamada kalın yalıtım ve özel devre kesiciler gibi maliyeti artırabilecek özel önlemler alınmalıdır.
2. Tüm diziler aynı maksimum güç noktasında çalışır, bu da modüllerde uyumsuzluk kayıplarına yol açar. Bu önemli bir dezavantajdır. Uyumsuzluk kayıpları, dizinin bölümlerinin eskimesi ve kısmen gölgelenmesiyle daha da artar. Farklı diziler arasındaki uyumsuzluk, genel sistem çıktısını önemli ölçüde azaltabilir.
3. Sistemin düşük esnekliği ve genişletilebilirliği. Sistem tasarımı çok esnek değildir.
4. Dizilerdeki akım dolaşımını önlemek için her bir diziyeye seri olarak bağlanan dizi diyotlarındaki güç kayıpları.

#### **2.1.4.2. Dizi Eviriciler**

Şekil 2.15 (c)'de gösterildiği gibi dizi inverter, merkezi ve modüle entegre evirici konseptlerinin avantajlarını küçük ödüneşimlerle birleştirir.

Topolojinin bir dezavantajı, merkezi evirici mimarisinde olduğu gibi, yüksek DC geriliminin özel bir değerlendirme gerektirmesidir. Burada bu konu daha da önemlidir çünkü dizi eviriciler genellikle evlere veya ofis binalarına, belirlenmiş destek yapısı veya artırılmış güvenlik gereksinimleri olmadan kurulur. Genel olarak, modüller ve evirici arasındaki ara bağlantıları

gerçekleştirmek için kalifiye bir elemana ihtiyaç vardır. Sistemin korunması ayrıca, uygun DC kablolanması üzerinde durularak özel bir değerlendirme gerektirir.

Dizinin kısmi gölgelenmesi sistemin genel verimliliğini etkilese de, her dizi bağımsız olarak kendi MPP'sinde çalıştırılabilir. Ayrıca hiçbir dizi paralel bağlanmadığından, birçok paralel dizili FV dizilerinde olduğu gibi seri diyotlara gerek yoktur. Bu durum, bu diyotlarla ilişkili kayıpları azaltır. Bununla birlikte, dizi içinde eşit olmayan akım ve güç paylaşımı nedeniyle bir dizi içinde sıcak nokta (hot spot) oluşması riski yine de vardır.

### 2.1.5. Türkiye’de Fotovoltaik Güneş Enerjisi Potansiyeli

Türkiye’nin önemli bir bölümü güneş enerjisinden yararlanmaya uygundur. Türkiye 36° ile 42° kuzey enlemleri arasındadır. Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyeli 1,3 milyar ton petrole eşdeğerdir. Güneş ısı kapasitesi yaklaşık 2640 saat/yıl ve yıllık güneş yoğunluğu 3,6 kWh/m<sup>2</sup>.gün’dür.

2022 Kasım ayı sonu itibarıyla Türkiye’deki kurulu gücün 9.139 MW’lık kısmı güneş enerjisi santrallerinden karşılanmaktadır (TEİAŞ, 2022).

TEİAŞ’ın aylık olarak yayınladığı kurulu güç raporuna göre, 2022 Kasım ayında elektrik üretim kurulu gücü bir önceki aya göre 1.260,3 MW artış ile 103.541,2 MW değerine ulaşmıştır.

Türkiye’deki lisanssız GES sayısı 9.270 adede ulaşırken lisanslı santral dahil toplam GES adedi 38 adet artış ile 9.308 olarak belirlenmiştir. Türkiye’de toplam 11.382 adet elektrik üretim santrali bulunmaktadır.

1937 yılında kurulan Meteoroloji Genel Müdürlüğü, ülkedeki tüm meteorolojik veri ve bilgileri sağlayan tek yasal kuruluştur (MGM, 2023). Tablo 2.1’de verildiği üzere Türkiye’nin yıllık ortalama toplam güneşlenme süresinin 2640 saat ve yıllık ortalama güneş ışınımının 1.311 kWh/m<sup>2</sup> yıl (3,6 kWh/m<sup>2</sup> gün) olduğu sonucuna varılmıştır. Tablo 2.2’de güneş potansiyeli açısından Türkiye’nin bölgeleri belirtilmiştir. Güneydoğu Anadolu Bölgesi Türkiye’nin en çok güneş enerji potansiyeline sahip bölgelerin başında gelmektedir.

**Tablo 2.1.** Türkiye'nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli (MGM, 2023)

Aylar	Aylık ortalama güneş radyasyonu (kWh/m <sup>2</sup> )	Güneşlenme Süresi (saat/ay)
Ocak	51,75	103
Şubat	63,27	115
Mart	96,65	165
Nisan	122,23	197
Mayıs	153,86	273
Haziran	168,75	325
Temmuz	175,35	365
Ağustos	158,4	343
Eylül	123,8	280
Ekim	89,9	214
Kasım	60,82	157
Aralık	46,87	103
Toplam	1311,68	2640

**Tablo 2.2.** Türkiye'nin bölgelere göre aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süreleri (MGM, 2023)

Türkiye'nin Bölgeleri	Aylık ortalama güneş radyasyonu (kWh/m <sup>2</sup> )	Güneşlenme Süresi (saat/ay)
Güneydoğu Anadolu	1460	2993
Akdeniz	1390	2956
Doğu Anadolu	1365	2664
İç Anadolu	1314	2628
Ege	1304	2738
Marmara	1168	2409
Karadeniz	1120	1971

## 2.2. Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisi, çekirdeğinde hidrojenin (H) helyuma (He) nükleer füzyonu ile üretilen güneş enerjisinin dönüştürülmüş bir şeklidir.  $H \rightarrow He$  füzyon süreci, güneşten uzaya her yönde ısı ve elektromanyetik radyasyon akımları yaratır. Güneş radyasyonunun sadece küçük bir bölümü dünya tarafından yakalansa da, dünyanın tüm enerji ihtiyacının tamamını neredeyse karşılamaktadır.

Rüzgar enerjisi, yenilenebilir enerji üretiminin ana akım enerji kaynağı olma yolundadır. Dünya enerji pazarında da rüzgardan enerji üretimi oldukça fazladır. Önde gelen bir enerji teknolojisi olarak, rüzgar enerjisinin teknik olgunluğu ve dağıtım hızı, elektrik sistemine entegre edilebilecek rüzgar yüzdesi için pratik bir üst sınır olmadığı gerçeğiyle birlikte kabul edilmek-

tedir (Zervos, 2009). Dünyanın aldığı toplam güneş enerjisinin yaklaşık olarak  $1,8 \times 10^{11}$  MW olduğu tahmin edilmektedir. Bu güneş enerjisi girdisinin yalnızca %2'si ( $3,6 \times 10^9$  MW) rüzgar enerjisine dönüştürülür ve rüzgar enerjisinin yaklaşık %35'i dünya yüzeyinin 1000 m yakınında dağılmaktadır (Nelson, 2009). Bu nedenle, diğer enerji türlerine dönüştürülebilen mevcut rüzgar gücü yaklaşık olarak  $1,26 \times 10^9$  MW'tır. Geleneksel enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında, rüzgar enerjisinin bazı avantajları vardır. Zararlı gazlar yayan fosil yakıtların ve radyoaktif atıklar üreten nükleer enerjinin aksine, rüzgar enerjisi temiz ve çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Tükenmez ve bedava bir enerji kaynağı olarak dünyanın çoğu bölgesinde bol miktarda bulunur. Ayrıca, rüzgar enerjisinin daha yaygın kullanımı, bu yüzyılda tüketilecek fosil yakıtlara olan talebin azaltılmasına yardımcı olacaktır.

### 2.2.1. Rüzgar Türbini

Bir rüzgar türbini, rüzgarın kinetik enerjisini mekanik enerjiye ve ardından elektrik enerjisine dönüştüren bir enerji dönüştürücü makinedir. Son otuz yılda, modern teknolojik gelişmelerle birlikte rüzgar türbini tasarımında dikkate değer ilerlemeler sağlanmıştır. Aerodinamik, yapısal dinamikler ve mikrometeorolojideki ilerlemelerin, rüzgar türbinlerinin enerji veriminde yıllık %5'lik bir artışa katkıda bulunabileceği tahmin edilmektedir (Shikha ve ark., 2003).

Rüzgar enerjisi gücünü en üst düzeye çıkarmak, türbin maliyetini en aza indirmek ve türbin verimliliğini ve güvenilirliğini artırmak için çeşitli rüzgar türbini konseptleri geliştirilmiş ve inşa edilmiştir.

Bir rüzgar türbininden elde edilen güç çıkışı iyi bilinen ifade ile verilir:

$$P = \frac{1}{2} C_P \rho A U^3 \quad (2.3)$$

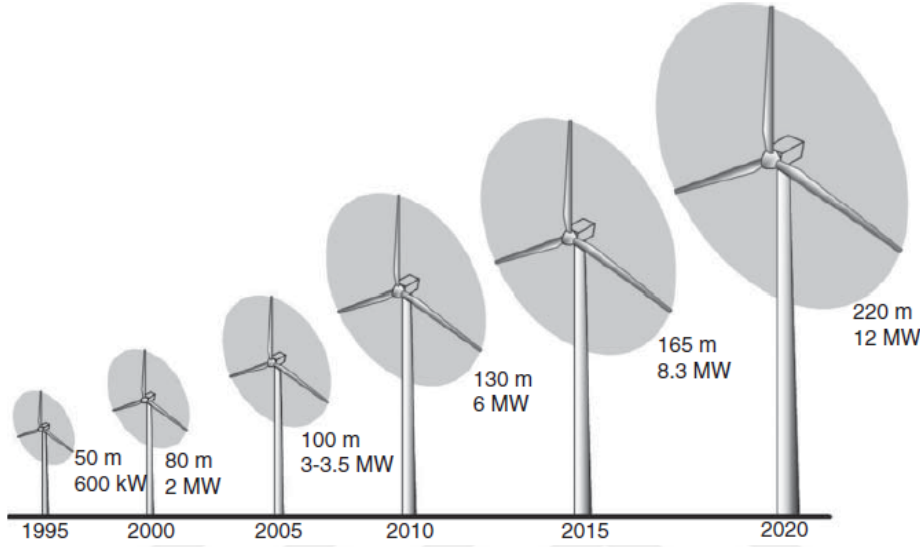
$\rho$  : havanın yoğunluğu ( $1.25 \text{ kg/m}^3$ )

$C_p$  : güç katsayısı

$A$  : rotor süpürme alanı

$U$  : rüzgar hızı

Güç katsayısındaki artımlı iyileştirmeler, rotorun ayrıntılı tasarım değişiklikleriyle sürekli olarak aranır ve değişken hızda çalıştırılarak, bir dizi rüzgar hızı boyunca maksimum güç katsayısını korumak mümkündür. Ancak, bu önlemler güç çıkışında yalnızca ılımlı bir artış sağlayacaktır. Çıkış gücündeki büyük artışlar ancak rotorun süpürülen alanını artırarak veya rüzgar türbinlerini daha yüksek rüzgar hızlarına yerleştirerek elde edilebilir.



Şekil 2.16. Farklı büyüklüklere sahip rüzgar türbinleri

Bu nedenle son 25 yılda, ticari olarak temin edilebilen rüzgar türbinlerinin rotor çapında 40 m'den 170 m'ye kadar sürekli bir artış olmuştur (Şekil 2.16). Rotor çapının üçe katlanması, güç çıkışında dokuz kat artışa yol açar. Rüzgar hızının etkisi, rüzgar hızının iki katına çıkarak güçte sekiz kat artışa yol açmasıyla daha da belirgindir. Bu nedenle, rüzgar çiftliklerinin en yüksek rüzgar hızlarının olduğu alanlarda geliştirilmesini ve türbinlerin rüzgar çiftlikleri içinde optimum şekilde konumlandırılmasını sağlamak için önemli çabalar sarf edilmiştir. Bazı ülkelerde, görece az rüzgar hızları ile, rüzgar hızının yükseklikle artmasından kaynaklı çok yüksek kuleler kullanılmaktadır.

Geçmişte, çeşitli boyutlardaki rüzgar türbinlerinin tüm üretim, kurulum ve işletme maliyetlerini elde edilen gelire karşı dengeleyerek bir rüzgar türbininin optimum boyutunu belirlemek için bir dizi çalışma yapılmıştır (Molly ve ark., 1993). Bununla birlikte, daha yeni çalışmalar, en düşük birim enerji maliyetinin 150 m çapa yaklaşan rotorlarla elde edildiğini göstermektedir, ancak bazı sahalarda çevresel etki nedeniyle daha küçük türbinler tercih edilebilmektedir. Daha büyük türbinler bile, her bir türbinin temel betonu ve kablolama maliyetlerinin yüksek olduğu ve çok büyük kanatların fabrikadan sahaya doğrudan gemi ile taşınabildiği açık denizde en düşük

enerji maliyetini sağlar.

Elektrik üreten tüm modern rüzgar türbinleri, rotoru hareket ettirmek için kanatlardan elde edilen kaldırma kuvvetini kullanılmaktadır. Gerekli dişli kutusu oranını azaltmak için rotorun yüksek bir dönme hızı arzu edilmektedir. Bu durum, düşük sağlamlıkta bir rotora (kanat alanının rotor süpürme alanına oranı) yol açmaktadır. Düşük sağlamlığa sahip rotor etkili bir enerji yoğunlaştırıcı görevi görmektedir. Bu sebeple bir rüzgar türbininin ömrü boyunca üreteceği enerji, türbinin üretimi ve kurulumu için kullanılanlardan çok daha fazladır. 3 MW'lık bir rüzgar türbininin enerji dengesi analizi; üretimi, işletimi, nakliyesi, sökülmesi ve bertaraf edilmesi için kullanılan benzer miktarda enerji üretmek için beklenen ortalama sürenin altı ila yedi ay olduğunu göstermiştir (European Wind Energy Association, 2009). Açık deniz rüzgar türbinleri için de benzer bir süre hesaplanmıştır. Açık denizde daha yüksek ortalama rüzgar hızları ve dolayısıyla daha fazla enerji çıkışı, daha yüksek rüzgar santrali maliyetlerini ve inşaat ve işletme sırasında harcanan enerjiyi telafi eder.

2000 yılına kadar dünyada kurulu rüzgar türbini üretim kapasitesi o kadar düşüktü ki üretimi, elektrik İletim Sistemi Operatörleri tarafından sadece enerji sağlayan ancak güç sisteminin işleminde ve kararlılığının korunmasında hiçbir rol oynamayan negatif yük olarak görülüyordu. O zamandan beri, rüzgar üretim kapasitesinin büyük ölçüde artmasıyla birlikte, güç sisteminin çalışmasına katkıda bulunmak için türbinlere ihtiyaç duyulmaktadır. Performans gereksinimleri, İletim Sistemi Operatörleri tarafından yayınlanan Şebeke Kodları aracılığıyla tanımlanır (Roberts, 2018). Uyumluluk zorunludur ve ağa bağlantıya izin verilmeden önce şebekeye uyumlu kod olup olmadığı kanıtlanmalıdır. Danimarka konseptini kullanan basit sabit hızlı endüksiyon jeneratörleri ile Şebeke Kodu gerekliliklerine uyum sağlamak zordur ve bu düzenlemeler, değişken hızlı jeneratörlerin kullanımı için önemli bir itici güç olmuştur.

Rüzgar türbinleri, türbin jeneratör konfigürasyonuna, türbin rotoruna göre hava akış yoluna, türbin kapasitesine, jeneratör çalıştırma düzenine, güç kaynağı moduna ve türbin kurulumunun konumuna göre sınıflandırılabilir.

### 2.2.1.1. Yatay Eksenli ve Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri

Rotor kanatları, dönen ekseninin konfigürasyonu olarak düşünüldüğünde, rüzgar türbinleri yatay eksenli ve dikey eksenli türbinler olarak sınıflandırılabilir. Günümüzde çoğu ticari rüzgar türbini, kanatların dönen ekseninin rüzgar akımına paralel olduğu yatay eksenli tipe aittir. Bu tür rüzgar türbinlerinin avantajları arasında yüksek türbin verimliliği, yüksek güç yoğunluğu, düşük rüzgar hızları ve birim güç çıkışı başına düşük maliyet yer alır.

Birkaç tipik dikey eksenli rüzgar türbini, Şekil 2.17’de gösterilmektedir. Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin kanatları, yere dik olan dikey eksenlerine göre döner. Dikey eksenli rüzgar türbininin önemli bir avantajı, türbinin herhangi bir yönden rüzgarı kabul edebilmesi ve dolayısıyla sapma kontrolüne ihtiyaç duymamasıdır. Rüzgar jeneratörü, dişli kutusu ve diğer ana türbin bileşenleri yere kurulabileceğinden, rüzgar kulesi tasarımını ve inşasını büyük ölçüde basitleştirir ve sonuç olarak türbin maliyetini düşürür. Bununla birlikte, dikey eksenli rüzgar türbinleri, başlatma sırasında kanatları döndürmek için harici bir enerji kaynağı kullanmalıdır. Rüzgar türbininin eksenini yerde yalnızca bir uça desteklediğinden, maksimum pratik yüksekliği bu nedenle sınırlıdır. Düşük rüzgar enerjisi verimliliği nedeniyle, dikey eksenli rüzgar türbinleri bugün rüzgar türbinlerinin sadece küçük bir yüzdesini oluşturmaktadır.

Dönme ekseninin hava akımı akışına paralel olduğu rüzgar türbini tipi, yatay eksenli rüzgar türbini olarak bilinir. Yatay eksenli rüzgar türbini, rüzgar türbinlerinin en başarılısı olup, dünya çapında en yaygın şekilde kullanılmaktadır. Yatay eksenli türbin dünyanın farklı yerlerinde ağırlıklı olarak ticari amaçlı elektrik üretiminde kullanılmaktadır.

**Tablo 2.3.** Dikey ve yatay eksenli rüzgar türbinlerinin farkları

<b>Farkın Nedeni</b>	<b>Yatay Eksenli Rüzgar Türbini</b>	<b>Dikey Eksenli Rüzgar Türbini</b>
Rüzgar akışına göre dönme eksen	Rüzgar akımına paraleldir.	Rüzgar akışına diktir.
Jeneratörün yeri	Kulenin tepesine monte edilir.	Jeneratör yere monte edilir.
Dişli kutusunun yeri	Kulenin tepesine monte edilir.	Kulenin alt kısmına monte edilir.
Sapma mekanizması ihtiyacı	Türbini rüzgar yönünde yönlendirmek için sapma mekanizmasına ihtiyaç vardır.	Her yönden aldığı için sapma mekanizmasına ihtiyaç duymaz.
Kendiliğinden başlatma	Kendi kendine çalışmaya başlar.	Başlatma mekanizmasına ihtiyaç vardır.
Tasarım ve kurulum	Tasarımı ve kurulumu görece karmaşıktır.	Tasarımı ve kurulumu nispeten basittir.
Kanatların çalışma alanı	Kanadın çalışması için geniş alan gerektirir.	Kanadın çalışması için küçük bir alana ihtiyaç duyar.
Rüzgar yönüne bağımlılık	Çalışması rüzgar yönüne bağlıdır.	Her yönden rüzgar aldığı için çalışması rüzgar yönünden bağımsızdır.
Yerden yükseklik	Yerden yüksekliği fazladır.	Yerden nispeten alçak bir mesafeye kurulur.
Motor bölmesi ihtiyacı	Kulenin tepesine ağır bir motor bölümü monte edilir.	Motor bölümüne gerek yoktur.
Güç katsayısı	Yüksek güç katsayısına sahiptir.	Düşük güç katsayısına sahiptir.
Gürültü üretimi	Çalışması gürültülüdür.	Nispeten daha az gürültü üretir.
Verimlilik	İdeal verimliliği %50 ila %60 civarındadır.	İdeal verimliliği genellikle %70'in üzerindedir.
Kuşlar için tehlike	Kuşlar için yüksek tehlikeye neden olur.	Kuşlar için daha az tehlike oluşturur.
Maliyet	Karmaşık tasarım ve kurulumlarından dolayı daha yüksek maliyetlidir.	Tasarımı ve kurulumu oldukça basit olması nedeniyle daha ucuzdur.

Yatay eksenli rüzgar türbinleri rüzgar hızında nispeten düşük kesime ve yüksek güç katsayısına sahiptir. Bununla birlikte, yatay eksenli rüzgar türbininin tasarımı nispeten daha karmaşık ve maliyetlidir çünkü kulenin tepesine yerleştirilen bir dişli kutusu ve bir elektrik jeneratörü gerektirir.

Yatay eksenli bir rüzgar türbinini oluşturan ana bileşenler şunlardır: türbin kanatları, göbek, dişli kutusu, jeneratör, kule, motor bölümü, sapma kontrolü (türbinin rüzgar yönünde yönlendirme için). Hem yatay hem de dikey eksenli rüzgar türbinleri, bir elektrik jeneratörünü çalıştırmak için rüzgarın kinetik enerjisini kullanır, ancak aralarındaki farklar Tablo 2.3 vurgulanmıştır.

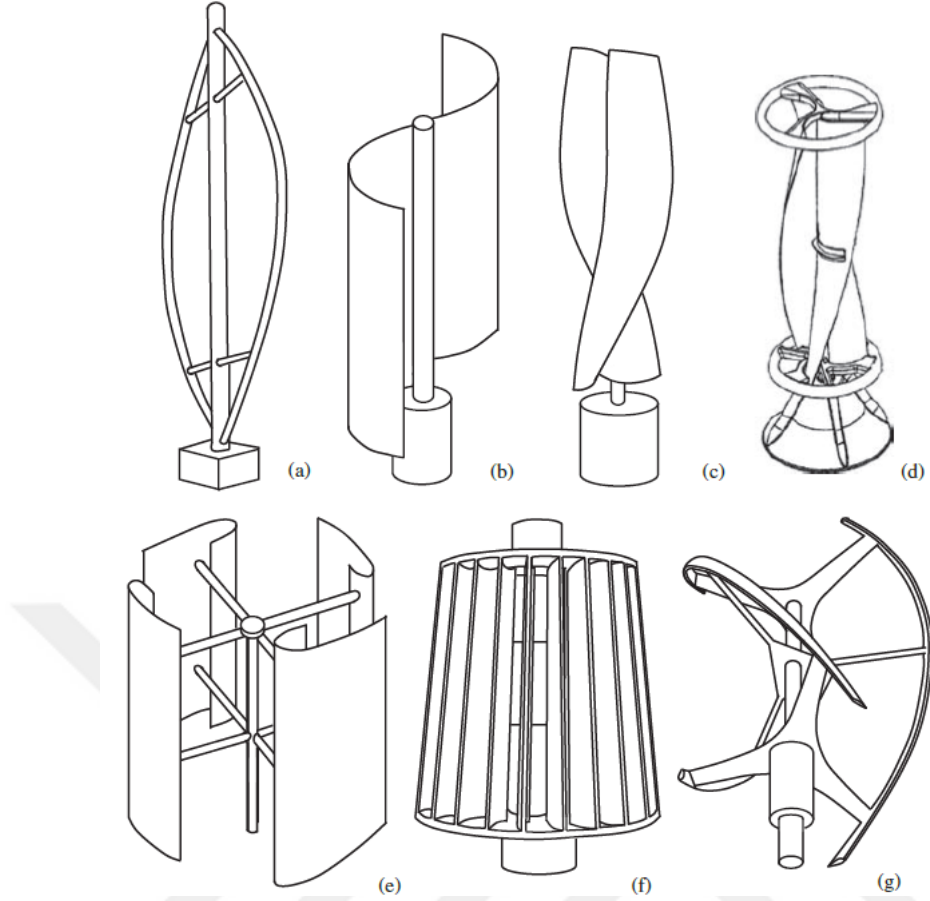
### **2.2.1.2. Rüzgara Karşı ve Rüzgar Yönündeki Rüzgar Türbinleri**

Rüzgar akış yönüne göre rüzgar rotorunun konfigürasyonuna bağlı olarak, yatay eksenli rüzgar türbinleri ayrıca rüzgara karşı ve rüzgar yönündeki rüzgar türbinleri olarak sınıflandırılabilir. Günümüzde kullanılan yatay eksenli rüzgar türbinlerinin çoğu, rüzgar rotorlarının rüzgara dönük olduğu rüzgara karşı türbinlerdir. Rüzgara karşı tasarımların ana avantajı, rüzgar rüzgar kulesi ve motor bölümü içinden geçerken akış alanının bozulmasını önlemektir.

Rüzgar akış yönündeki bir türbin için, rüzgar önce makine dairesi ve kuleden sonra rotor kanatlarından esmektedir. Bu konfigürasyon, rotor kanatlarının kule darbesi dikkate alınmadan daha esnek hale getirilmesini sağlamaktadır. Ek olarak, kararsız akış alanı daha fazla aerodinamik kayıplara neden olabilir ve türbin üzerinde daha fazla yorulma yükü oluşturabilir. Ayrıca, rüzgar yönündeki bir rüzgar türbinindeki kanatlar daha yüksek ani veya çok yüksek gürültü üretebilir.

### **2.2.1.3. Rüzgar Türbini Kapasitesi**

Rüzgar türbinleri, nominal kapasitelerine göre bir dizi geniş kategoriye ayrılabilir: mikro, küçük, orta, büyük ve ultra büyük rüzgar türbinleri. Mikro rüzgar türbinlerinin sınırlı bir tanımını mevcut olmasa da, ancak gücü birkaç kilovattan az olan bir türbinin mikro rüzgar türbini olarak kategorize edilebileceği kabul edilmektedir (European Wind Energy Association, 2009).



**Şekil 2.17.** Birkaç tipik dikey eksenli rüzgar türbini türü: (a) Darrius; (b) Savonius; (c) Solarwind™ (Blueenergy, 1999); (d) Sarmal (Naskali ve ark., 2008); (e) Noguchi (Noguchi, 2006); (f) Maglev (Thomas, 2007); (g) Cochrane (Cochrane, 2006).

Mikro rüzgar türbinleri, özellikle elektrik şebekesinin bulunmadığı yerlerde uygundur. Sokak aydınlatması, su pompalama ve özellikle gelişmekte olan ülkelerde uzak kırsal bölgelerde yaşayanlar için yapı bazında kullanılabilirler. Mikro rüzgar türbinleri nispeten düşük başlangıç hızlarına ihtiyaç duyduklarından ve orta rüzgar hızlarında çalıştıklarından, rüzgar kaynaklarından tam olarak faydalanmak ve rüzgar enerjisi üretiminin mevcudiyetini büyük ölçüde artırmak için dünyanın birçok yerinde yaygın olarak kurulabilirler.

Küçük rüzgar türbinleri genellikle çıkış gücü 100 kW'tan az olan türbinleri ifade eder (Doran, 2008). Küçük rüzgar türbinleri, kırsal bölgelerde konutlarda, çiftliklerde ve su pompa istasyonları, telekom siteleri vb. gibi diğer bireysel uzak uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Dağıtılmış küçük rüzgar türbinleri, iletim hatlarının kapasitesini artırma ihtiyacını geciktirirken veya ortadan kaldırırken, bölgelerdeki elektrik arzını artırabilir.

Orta rüzgar türbinleri, 100 kW ile 1 MW arasında değişen güç değerlerine sahiptir. Bu tür rüzgar türbinleri, köy elektriği, hibrit sistemler, dağıtılmış güç, rüzgar santralleri vb. için şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız sistemler olarak kullanılabilir.

1 MW ile 10 MW arasında olan rüzgar türbinleri, büyük rüzgar türbinleri olarak sınıflandırılabilir. Son yıllarda, Büyük rüzgar türbinleri, uluslararası rüzgar enerjisi pazarının ana akımı haline gelmiştir. Rüzgar santrallerinin çoğunda, özellikle açık deniz rüzgar santrallerinde, şu anda büyük rüzgar türbinleri kullanılmaktadır.

Ultra büyük rüzgar türbinleri, kapasitesi 10 MW'tan fazla olan rüzgar türbinlerine atıfta bulunur. Bu tür rüzgar türbini, araştırma ve geliştirmenin henüz ilk aşamalarında.

#### **2.2.1.4. Kara ve Deniz Aşırı Rüzgar Türbinleri**

Karadaki rüzgar türbinlerinin gelişimi uzun bir geçmişe dayanmaktadır. Daha düşük temel beton maliyeti, elektrik şebekesi ağıyla daha kolay entegrasyon, kule inşasında ve türbin kurulumunda daha düşük maliyet ve işletme ve bakım için daha kolay erişim dahil olmak üzere kara türbinlerinin bir dizi avantajı vardır.

Deniz aşırı rüzgar türbinleri, rüzgar gücü yoğunluğu ve sürekliliği açısından, mükemmel açık deniz rüzgar kaynağı nedeniyle 1990'lardan beri karadakinden daha hızlı gelişmiştir. Açık denizde kurulu bir rüzgar türbini, karada kurulu aynı türbine kıyasla her yıl daha yüksek güç çıkışı sağlayabilir ve daha fazla saat çalışabilir. Ek olarak, açık deniz sahalarında, kara sahalarına göre çevresel kısıtlamalar daha gevşektir. Örneğin, türbin gürültüsü artık açık deniz rüzgar türbinleri için bir sorun değildir.

#### **2.2.1.5. Doğrudan Tahrikli ve Dişli Tahrikli Rüzgar Türbinleri**

Bir rüzgar jeneratörü sistemindeki aktarma organlarının durumuna göre, rüzgar türbinleri doğrudan tahrikli veya dişli tahrikli gruplar olarak sınıflandırılabilir. Daha yüksek bir güç çıkışı elde etmek için jeneratör rotorunun dönme hızını artırmak için, normal dişli tahrikli bir rüzgar türbini

tipik olarak dönme hızını bıçak rotorunun düşük hızlı milinden almak ve onu hızlı bir dönüşe dönüştürmek için çok kademeli bir dişli kutusu kullanır. Dişli jeneratör sistemlerinin avantajları arasında daha düşük maliyet ve daha küçük boyut ve ağırlık sayılabilir. Bununla birlikte, dişli kutusunun kullanılması rüzgar türbini güvenilirliğini önemli ölçüde azaltabilir ve türbin gürültü seviyesini ve mekanik kayıpları artırabilir.

Jeneratör sisteminden çok kademeli dişli kutusu çıkarılarak, jeneratör mili doğrudan bıçak rotoruna bağlanır. Bu nedenle, doğrudan tahrik konsepti enerji verimliliği, güvenilirlik ve tasarım kolaylığı açısından daha üstündür.

### **2.2.1.6. Şebeke Bağlı ve Şebekeden Bağımsız Rüzgar Türbinleri**

Rüzgar türbinleri şebeke bağlı veya şebekeden bağımsız uygulamalar için kullanılabilir. Çoğu orta ölçekli ve neredeyse tüm büyük boyutlu rüzgar türbinleri, şebekeye bağlı uygulamalarda kullanılmaktadır. Şebekeye bağlı rüzgar türbini sistemlerinin bariz avantajlarından biri, enerji depolamaya ihtiyaç olmamasıdır.

Aksine, küçük rüzgar türbinlerinin çoğu konutlar, çiftlikler, telekomünikasyon ve diğer uygulamalar için kullanıldığından şebekeden bağımsızdır. Bununla birlikte, kesintili bir güç kaynağı olarak, şebekeden bağımsız rüzgar türbinlerinden üretilen rüzgar enerjisi, çok az uyarı ile kısa bir süre içinde önemli ölçüde değişebilir. Sonuç olarak, şebekeden bağımsız rüzgar türbinleri, rüzgar enerjisi arzının kararlılığını iyileştirmek için genellikle bataryalar, dizel jeneratörler ve fotovoltaik sistemler ile birlikte hibrit enerji sistemi olarak kullanılır.

### **2.2.2. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Potansiyeli**

Türkiye’nin yıllık rüzgar potansiyeli çok büyük olup, ülkenin mevcut elektrik tüketiminin yaklaşık iki katı kadardır. Türkiye’nin teknik rüzgar enerjisi potansiyeli 88.000 MW, ekonomik rüzgar enerjisi potansiyeli ise yaklaşık 10.000 MW’tır. Devlet Elektrik Etüt Kurulu raporlarına göre Türkiye’nin rüzgar enerjisi potansiyeli yaklaşık 120 milyar kWh olarak tahmin edilmektedir. Çalışmalar, Türkiye’nin toplam rüzgar enerjisi potansiyelinin mevcut termik ve hidrolik

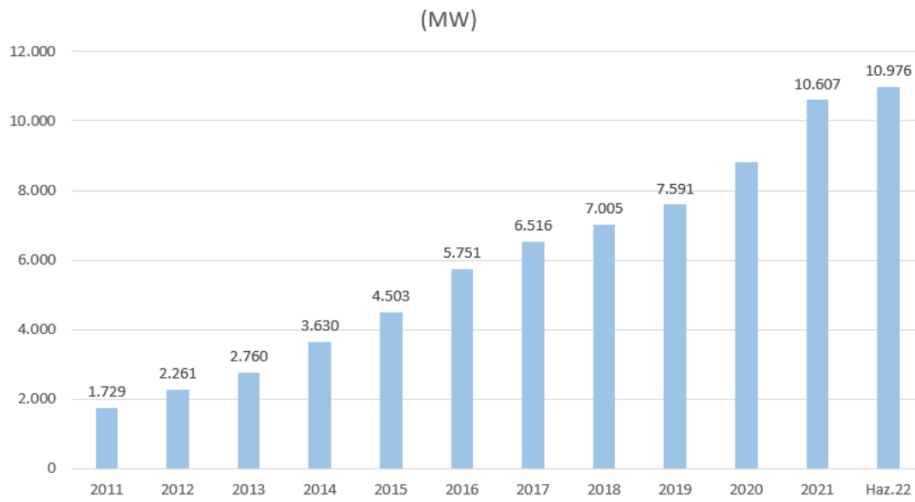
enerji üretiminden daha yüksek olduğunu göstermiştir (Oğulata, 2003; Balat, 2008; Hepbasli ve Ozgener, 2004; Ozgur, 2008). Türkiye'nin çeşitli bölgelerine ait yıllık ortalama rüzgar hızı ve yıllık ortalama rüzgar enerjisi yoğunluğu bölgesel bazda Tablo 2.4'de gösterilmektedir. Ülkenin yedi bölgesi ile karşılaştırıldığında rüzgar enerjisi yoğunlukları Marmara, Ege ve Güneydoğu Anadolu'da daha yüksek görünmektedir. Rüzgar hızları bu nedenle bu üç bölgede daha yüksektir. Yıllık ortalama rüzgar hızları Doğu Anadolu bölgesinde 2,12 m/s ile Marmara bölgesinde 3,29 m/s arasında değişmektedir. Devlet Meteoroloji Etütleri Genel Müdürlüğü verilerine göre Türkiye'nin yıllık ortalama rüzgar hızı 2,58 m/s ve rüzgar gücü yoğunluğu  $25,82W/m^2$ 'dir. Rüzgar enerjisi uygulamaları için en cazip bölgeler Marmara, Güneydoğu Anadolu ve Ege bölgeleridir. Bu bölgelerin çoğunda rüzgar hızı 3 m/s'yi geçtiği için bu bölgeler rüzgar enerjisi üretimi için oldukça uygundur. Bölgelerin ortalama değerleri ile birlikte, bu bölgelerdeki bazı odak rüzgar potansiyelleri Tablo 2.4'de listelenmiştir (Kızıltug, 2002). Bu inceleme sonucunda yurdun birçok yerinin rüzgar enerjisi sistemlerine uygun potansiyele sahip olduğu görülmüştür. Edirne, İstanbul, Çanakkale, Balıkesir, Bandırma, Manisa, Muğla, Aydın, Osmaniye, Antakya, Mardin, Siverek, Sinop gibi birçok bölgede rüzgar enerjisi ile elektrik üretilebileceğini kanıtlayan birçok araştırma yapılmıştır. Marmara Denizi'nin güney kıyıları, Ege kıyıları, Akdeniz kıyıları ve Güneydoğu Anadolu'nun Mardin ve Siverek bölgeleri en umut verici yerler olarak görülmüştür.

**Tablo 2.4.** Türkiye'nin çeşitli bölgelerdeki rüzgar enerjisi potansiyeli (Kızıltug, 2002)

<b>Türkiye'nin Bölgeleri</b>	<b>Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)</b>	<b>Yıllık Ortalama Rüzgar Yoğunluğu (<math>W/m^2</math>)</b>
Marmara	3,29	51,91
Ege	2,65	23,47
Akdeniz	2,45	21,36
İç Anadolu	2,46	20,14
Karadeniz	2,38	20,31
Doğu Anadolu	2,12	13,19
Güneydoğu Anadolu	2,69	29,33
Ortalama	2,58	25,82

Türkiye'de rüzgar enerjisi uygulaması 2000'li yıllardan itibaren başlamış ve aynı dönemde hem ilgili sanayi hem de teknoloji gelişmiştir. Türkiye'nin rüzgar enerjisi işletmeciliğine ilişkin durumuna bakıldığında, Türkiye'nin 1990'lar öncesi potansiyelini kullanmakta oldukça başarısız olduğu görülmektedir. 21. yüzyılın başından itibaren, yenilenebilir enerjinin ulusal enerji stratejisindeki önemli rolü, özellikle 2005 yılında yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektriğe tarife desteği getiren "Türkiye Yenilenebilir Enerji Kanun" ile desteklenmiştir. Bu yasanın ardından

rüzgar türbininin birim kapasitesi kilovattan multimegavata çıkmış ve Türkiye’de rüzgar enerjisi kullanımını hızlandırmıştır. 2006 yılından bu yana, Türk hükümeti rüzgar enerjisi uygulamasını teşvik etmek için bir dizi politika yapmıştır. Sonuç olarak, rüzgar enerjisi endüstrisi ve rüzgar santrallerinin inşaatı, 2022 yılında teknoloji gelişimini daha da hızlandıran hızlı bir gelişme göstermiştir (Şekil 2.18). Gelişmekte olan bir ülke olarak Türkiye’nin modernleşme sürecinde ülke ekonomisi, enerji ve çevre dengesini koruması çok önemlidir. Elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynağının değerlendirilmesi, hem enerji arz güvenliği hem de çevresel kaygılar açısından Türkiye için önemli bir olgudur.



**Şekil 2.18.** Türkiye’deki rüzgar enerjisinin toplam kurulu gücü (EIGM,2022)

Türkiye, Avrupa ve Asya’nın en rüzgarlı yerlerinden biridir; ve yerli yenilenebilir potansiyellerini diğer Avrupa ülkelerinden daha hızlı ve çok düşük maliyetlerle, fosil veya nükleer yaklaşımları sürdürürken olduğundan çok daha düşük maliyetle kullanarak fosil yakıtlara olan bağımlılığını çok hızlı bir şekilde azaltabilir. Makul bir uzun vadeli kalkınma planı yapmak için, Türk Hükümeti 2005 yılında ulusal rüzgar kaynağı araştırma ve değerlendirmesine başlamıştır. Hükümet “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Üretimi Amaçlı Kullanılmasına Dair Kanun”u kabul etmiştir. Ayrıca, 10 Mayıs 2005 tarihinde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Üretimi Amaçlı Kullanılmasına Dair Kanun yani Yenilenebilir Enerji Kanunu kabul edilmiştir (Resmi Gazete, 2005). Yenilenebilir Enerji Kanunu’nun temel amacı, rüzgar, güneş, jeotermal ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimi amacıyla kullanımını teşvik etmek ve yaygınlaştırmaktır. Yenilenebilir Enerji Kanunu, yenilenebilir enerji kaynakları için yalnızca birkaç yetersiz teşvik belirtmiş ve bazı ek arazi kullanım ilkeleri getirmiştir.

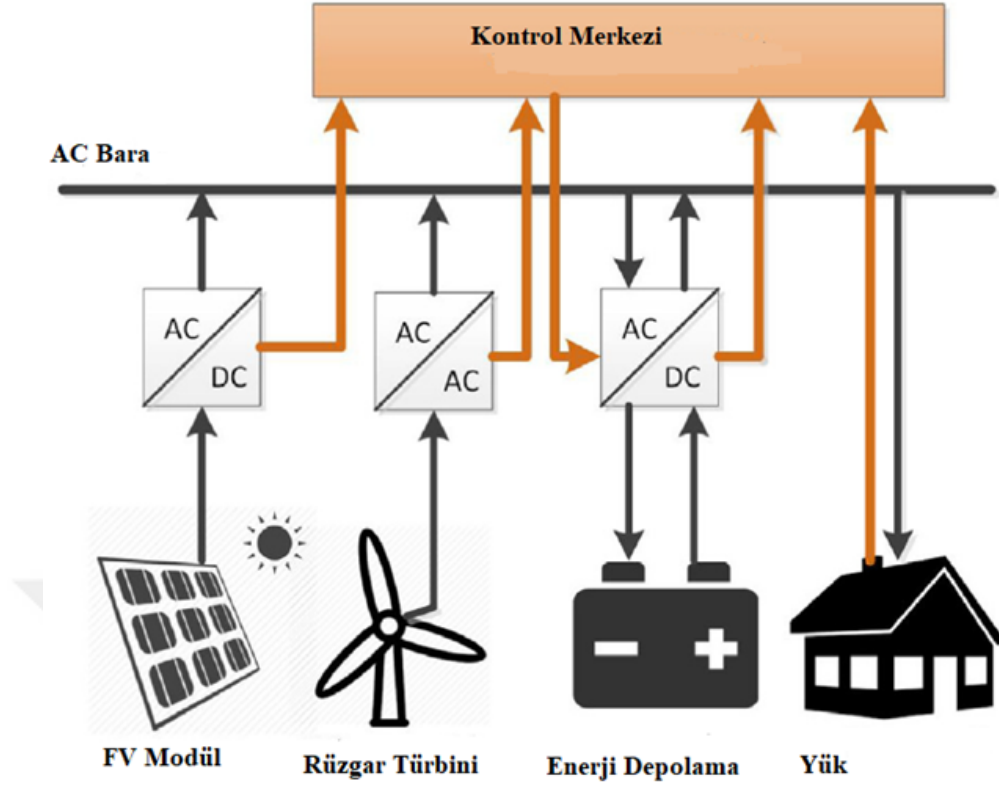
### 2.3. Enerji Depolama Sistemi

Yerleşim yerlerine uzak bölgelerde elektrik tüketimi genellikle çok düşüktür. Geçmişte, dizel jeneratörler gibi fosil yakıtlı jeneratörler, bu alanlarda güç sağlamak için yoğun bir şekilde kullanılmıştır. Bununla birlikte, jeneratörler için artan yakıt maliyeti, yenilenebilir enerji teknolojilerinin azalan maliyeti ve çevresel kaygılar, uzak alan güç kaynağı için çekici bir çözüm olarak şebekeden bağımsız hibrit yenilenebilir enerji sisteminin kullanımına yol açmıştır.

Bağımsız HYES genellikle tek veya çeşitli yenilenemeyen ve yenilenebilir enerji kaynaklarını içerir, örneğin dizel jeneratörler, FV, rüzgar türbinleri veya diğerleri. Tüm bağımsız hibrit sistemler, beslemenin güvenilirliğini ve sürekliliğini sağlamak için bir çeşit yedek güç kaynağı gerektirir. Çoğu durumda bu, bir dizel jeneratör veya bir tür enerji depolama sistemi tarafından sağlanır. Şebekeden bağımsız bir HYES'in temel yapısı, Şekil 2.19'de gösterilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları güneş ve rüzgar enerjisidir ve enerji depolama sistemi, talepteki herhangi bir eksikliği karşılamak için yardımcı bileşen olarak kullanılır. Kontrol merkezi, her bileşenin çalışma durumunu alır ve ardından çalışma gereksinimlerini karşılamak için pilin nasıl çalışacağına ilişkin komutları iletir.

Bataryalı enerji depolama sistemini şebekeden bağımsız bir HYES'te kullanmanın temel amacı, güç kaynağının sürekliliğini sağlamak için yenilenebilir enerji üretimi ile elektrik talebi arasındaki dengesizliği eşleştirmektir. Bu bağlamda, şebekeden bağımsız HYES'teki dizel jeneratörlerin işlevleri kısmen veya tamamen yenilenebilir enerji ve BEDS ile değiştirilebilir. Optimum pil depolama boyutunu belirlemek için tercih edilen net bir yöntem veya kriter yoktur. Bu boyuttaki sistemlerde, optimum depolama boyutuna bakıldığında, kriterlerin ya bağımsız HYES'in güvenilirliği (Alex ve ark., 2014) ve kararlılığı (Aghamohammadi ve Abdolahinia, 2013) gibi teknik yönlerine ya da kendi sermaye maliyeti, örneğin daha küçük bir pil boyutu seçerek (Dragičević ve ark., 2014) gibi çalışmalar pilin sermaye maliyetini amaç fonksiyonuna dahil eder), işletim maliyeti (Abbey ve Joós, 2008) veya yıllık maliyetleri (Luo ve ark., 2014). İncelenen önceki çalışmalardan, optimum pil boyutunun da doğal olarak yenilenebilir sistemlerin boyutuna bağlı olduğu görülmüştür.

Temelde, dönüştürülebilir ve nihai kullanım olmak üzere iki tür enerji depolama yöntemi vardır. Dönüştürülebilir depolama, kolayca tekrar elektriğe dönüştürülebilen depolamadır. Son



Şekil 2.19. Şebekeden bağımsız depolamalı bir HYES'in şematik gösterimi

kullanım depolaması, belirli bir son kullanım gereksinimine uygulanabilir, ancak hemen uygulanamayabilir veyahut tekrar elektriğe dönüştürülebilir.

### 2.3.1. Dönüştürülebilir Enerji Depolama

Çok sayıda dönüştürülebilir depolama yöntemi vardır, ancak bunlardan yalnızca birkaçı hibrit enerji sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Dönüştürülebilir depolamanın en yaygın kullanılan biçimi bataryadır (pildir). Daha az kullanılan, ancak sıklıkla tartışılan formlar arasında pompalanan hidroelektrik, volanlar, basınçlı hava ve hidrojen bulunur.

#### 2.3.1.1. Bataryalar

Bataryalar, hibrit enerji sistemleri için en yaygın kullanılan dönüştürülebilir depolama şeklidir. Hem kısa süreli hem de uzun süreli depolama için üretilmiştir. Bir dizi batarya türü ge-

liştirilmiştir. Hibrit uygulamalar için en yaygın akümülatör tipi kurşun asit bataryasıdır. Nikel kadmiyum da ara sıra kullanılmıştır.

Hibrit enerji sistemleri söz konusu olduğunda, bataryaların beş önemli performans özelliği vardır: (1) gerilim, (2) enerji depolama kapasitesi, (3) şarj/deşarj oranları, (4) verimlilik ve (5) pil ömrü. Bataryalar doğası gereği doğru akım üretir. Gerçek terminal gerilimi üç faktöre bağlı olacaktır: (1) şarj durumu, (2) pilin şarj edilip edilmediği ve (3) şarj veyadeşarj oranı.

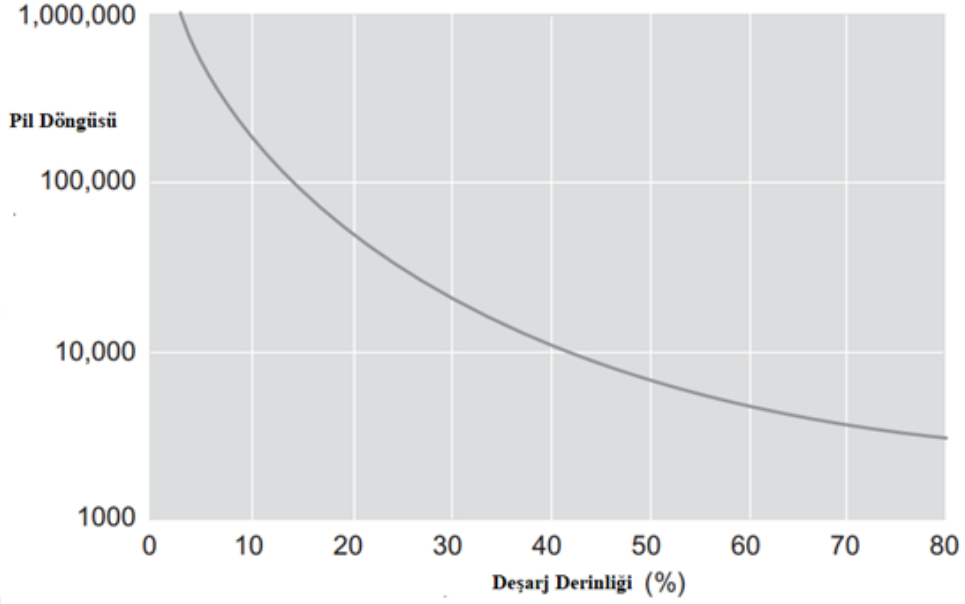
Enerji depolama kapasitesi, öncelikle batarya geriliminin tutabileceği ve sonra geri getirebileceği şarj miktarının bir fonksiyonudur. Şarj, geçerli zaman birimleriyle ölçülür (Amper-saat). Belirli bir zamanda bir pilde depolanan şarj miktarı genellikle pilin tam durumuna göre "şarj durumu" (SOC) terimiyle tanımlanır. Boşaltma ve belirli bir seviyeye kadar şarj etme (normalde tamamen dolu) bir döngü olarak adlandırılır. Bir pilin tutabileceği toplam şarj miktarı, öncelikle yapımında kullanılan malzeme miktarının bir fonksiyonudur.

Batarya kapasitesi normalde belirli birdeşarj oranına göre belirtilir. Bunun nedeni, pillerin görünen kapasitesinin aslında şarj vedeşarj hızına göre farklılık göstermesidir. Daha yüksek oranlar, daha küçük görünen kapasitelerle sonuçlanır. Enerji depolama yöntemi olarak bataryalar %100 verimli değildir. Yani, şarjda geri kazanılabilecek olandan daha fazla enerji harcanır. Genel verimlilikler tipik olarak %50 ile %80 aralığındadır.

Bataryaların önemli bir özelliği kullanım ömürleridir. Deneyimler, bataryaları kullanma sürecinin, sonunda batarya artık kullanışlı olmayana kadar depolama kapasitelerini fiilen azalttığını göstermiştir. Batarya ömründeki önemli faktörler, döngü sayısı ve döngülerdekideşarj derinliğidir. Batarya tipine bağlı olarak, bir bataryanın maruz kalabileceği derin döngü sayısı birkaç binden yüzlerce hatta onlarca döngüye kadar değişir. Tipik bir Li-ion bataryanın çevrim ömrü, Şekil 2.20'da gösterilmektedir.

### **2.3.1.2. Pompalı Depolamalı Hidroelektrik**

Bazı hibrit enerji sistemlerinde uygulanan dönüştürülebilir depolamanın bir biçimi pompalı depolamadır. Bu durumda, su alçak kottaki bir rezervuardan daha yüksek kottaki bir rezervu-



Şekil 2.20. Li-ion bir bataryanın şarj çevrim grafiği (Qadrda ve ark., 2018)

ara pompalanır. Depolanabilecek enerji miktarı, rezervuarın boyutunun ve yükseklik farkının bir fonksiyonudur. Depolamanın genel verimliliği, pompaların ve türbinlerin (aynı cihazlar olabilir) verimliliğinin ve iki rezervuarı birbirine bağlayan borulardaki hidrolik kayıpların bir fonksiyonudur. Pompalı depolamanın kullanımı, bu tür tesislerin makul bir fiyata kurulabileceği sahaların olmaması nedeniyle sınırlıdır.

### 2.3.1.3. Volanlar

Volanlar, hibrit bir sistemde enerji depolamak için kullanılabilir. Bir volan enerji depolama sistemi şu bileşenlerden oluşmaktadır. (1) volanın kendisi, (2) genellikle sürtünme kayıplarını en aza indirmek için boşaltılan bir mahfaza, (3) tekerleği hızlandırmak ve yavaşlatmak için değişken hızlı bir motor/jeneratör ve (4) bir güç elektroniği dönüştürücü. Tekerlek maksimum hızına kadar hızlandırıldığında enerji emilir ve tekerlek biraz daha düşük bir hıza düşürüldüğünde serbest bırakılır. Volanlar tipik olarak nispeten küçük miktarlarda enerji depolar, ancak enerjiyi yüksek oranlarda emebilir veya serbest bırakabilirler. Böylece hibrit güç sistemlerinde kısa süreli güç dalgalanmalarını (saniyeler veya dakikalar mertebesinde) yumuşatmak için kullanılabilirler ve sistem kontrolünü kolaylaştırabilirler.

#### **2.3.1.4. Sıkıştırılmış Hava**

Hibrit sistemlerde depolama için basınçlı hava kullanılabilir ve bazı deneysel prototipler yapılmıştır. Bununla birlikte, verimlilik nispeten düşüktür ve bu depolama yöntemi yaygın olarak kullanılmamıştır.

#### **2.3.1.5. Hidrojen**

Hidrojen, elektrik üretimi için yenilenebilir bir enerji kaynağı kullanılarak suyun elektrolizi ile üretilir. Hidrojen süresiz olarak depolanabilir ve daha sonra tekrar elektrik üretmek için bir içten yanmalı motorda/jeneratörde veya bir yakıt hücresinde kullanılabilir. Bu depolama yöntemi çok fazla potansiyele sahip gibi görünse de yine de oldukça pahalıdır.

### **2.3.2. Nihai Depolama**

Nihai depolama, dönüştürülebilir depolamanın aksine, mevcut olduğunda elektrik kullanılarak bazı ürünlerin üretildiği durumu ifade eder. Ürün daha sonra depolanır ve ihtiyaç duyulduğunda kullanıma sunulur. Yük yönetimi şemaları genellikle bir miktar son kullanım depolaması içerir.

#### **2.3.2.1. Termal Enerji**

Yaygın bir nihai depolama biçimi, çoğunlukla sıcak su biçiminde olan termal enerjidir. Sıcak su, alan ısıtma uygulamaları, kullanım sıcak suyu, yüzme havuzları vb. için kullanılabilir. Sıcak su, yalıtımlı su tanklarında nispeten ucuz bir şekilde saklanabilir. Su depolarının nihai kullanıma göre konumuna bağlı olarak, depolamanın verimliliği oldukça yüksek olabilir.

### 2.3.2.2. Pompalanan Su

Pompalanan su, başka bir nihai depolama şeklidir. Bu depolama şekli, yel değirmenleri ile birlikte uzun bir kullanım geçmişine sahiptir. Bu uygulamada, herhangi bir kullanım amacı için su, gerektiğinde boşaltılabileceği, genellikle yükseltilmiş bir rezervuar veya depolama tankına pompalanır. Depolama yükseltildiğinde, su kullanım noktasına yerçekimi ile akabilir, bu nedenle harici olarak üretilen enerjinin başka bir girdisine gerek yoktur.

### 2.3.2.3. Saf Su

Nihai depolamanın daha az yaygın olan başka bir biçimi, tuzlu veya tatlı olmayan sudan saf suyun üretilmesi ve ardından depolanmasıdır. Proses girişindeki suyun kalitesine bağlı olarak saf su elde etmek için ultrafiltrasyon, ters osmoz veya buhar sıkıştırımlı buharlaştırma kullanılabilir. Bunların tümünde enerji yoğunudur, bu nedenle depolamanın örtülü enerji yoğunluğu yüksektir.

### 3. FV GÜNEŞ ENERJİSİ - RÜZGAR ENERJİSİ HİBRİT ENERJİ SİSTEMİ: YERLEŞİM BÖLGESİ ÖRNEĞİ

Bu bölümde analizi yapılacak hibrit enerji sisteminin bölgesel verileri incelenmiştir. Yerleşke, 42 adet bağımsız konuttan oluşmaktadır. Yerleşke nüfusu 105 ile 130 kişi arasında değişmektedir. Yerleşkenin, en yakın ilçeye (Bornova) olan uzaklığı 13,7 km'dir.



Şekil 3.1. : Yerleşim bölgesinin konumu

#### 3.1. Yerleşim Bölgesinin Elektrik Tüketimi ve Yük Profili

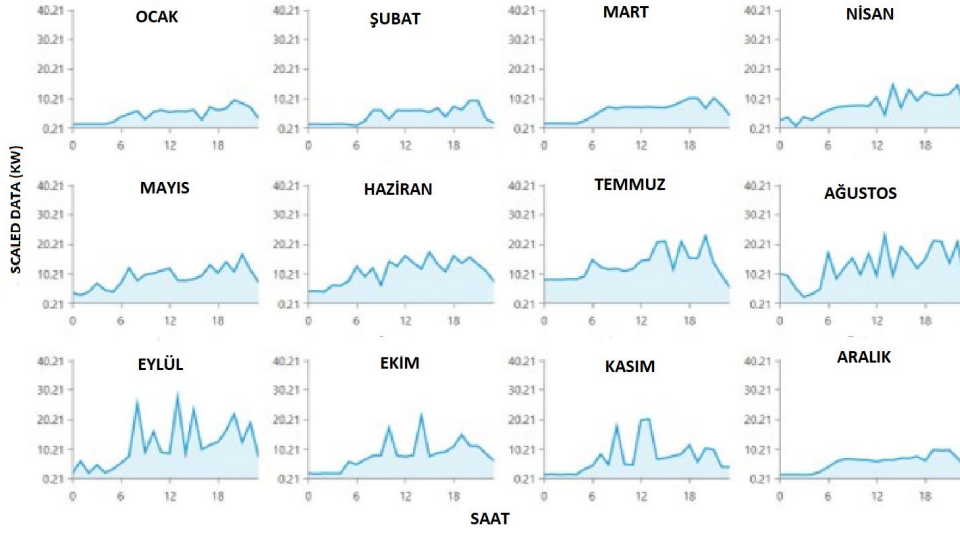
Bölgenin 2022 yılı elektrik tüketim verileri yerleşke yönetiminden temin edilmiş olup, Tablo 3.1'de gösterilmiştir. Bu veriler HOMER'a yüklenmiştir. 2022 yılına ait toplam elektrik tüketimi 74.298,02 kWh'tir. Tüketim alışkanlıkları değerlendirildiğinde, yaz aylarındaki tüketimin ilkbahar ve sonbahar aylarına kıyasla yaklaşık iki kat fazla olduğu görülmektedir. Elektrik tüketiminin yanısıra modelleme yapılırken yük profilinin de modellenmesi gereklidir. Bölgenin elektrik tüketimi merkezi olarak tek sayaç ile ilişkilendirilip süzme sayaçlar ile binalara dağıtılarak ölçülmesi sebebiyle saatlik ya da günlük yük verileri ve bina ölçeğinde tüketim verileri yer almamaktadır. Bu bağlamda, günlük tüketim alışkanlığı için literatürdeki benzer çalışmalar göz önünde bulundurularak HOMER'ın örnek yük profillerinden birisi seçilmiş, girilen değerler

HOMER sayesinde boyutlandırılmıştır. Şekil 3.2 ve 3.3’de gösterilmiştir.

Yükü besleyen FV güneş ve rüzgar enerjisi kaynaklarının kararsız olması nedeni ile yük profili, bu kaynaklardan enerji üretilmezken oldukça önemlidir. Yük profili ile depolama sisteminin kapasitesi doğrudan ilişkilendirilmektedir.

**Tablo 3.1.** Yerleşim Bölgesine ait aylık tüketim verileri

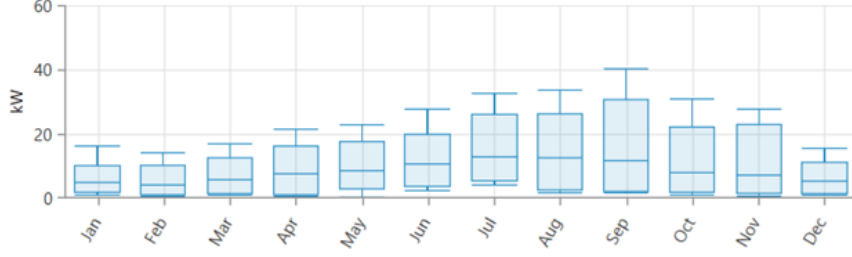
Aylar	Tüketim (kWh)	Toplam Pay
Ocak	3686, 54	5%
Şubat	3450, 23	5%
Mart	4490, 02	6%
Nisan	5860, 66	7%
Mayıs	6711, 40	9%
Haziran	7940, 25	11%
Temmuz	9452, 67	13%
Ağustos	8885, 81	12%
Eylül	8223, 83	11%
Ekim	6049, 71	8%
Kasım	5388, 02	7%
Aralık	4159, 18	6%
Toplam	74298, 02	100%



**Şekil 3.2.** Yerleşim Bölgesine ait Aylara Göre Saatlik Yük Profili

### 3.2. Bölge Enerji Potansiyelleri

Bu bölümde bölgedeki rüzgar ve FV güneş enerji potansiyelleri incelenmiştir.



Şekil 3.3. Yerleşim Bölgesine Ait Günlük Yük Profili

### 3.2.1. FV Güneş Enerjisi Potansiyeli

HOMER, fotovoltaik modül çıktısını hesaplamak için Küresel Yatay Işınım ve Berraklık İndeksi (Clearness Index) kullanır. Küresel Yatay Işınım (GHI), yatay bir yüzey üzerine düşen toplam güneş ışınımı miktarıdır. Berraklık indeksi, atmosferin berraklığının bir ölçüsüdür. Dünya yüzeyine çarpmak için atmosfer yoluyla iletilen güneş radyasyonunun fraksiyonudur. Yüzey radyasyonunun dünya dışı radyasyona bölümü olarak tanımlanan, 0 ile 1 arasında boyutsuz bir sayıdır. Berraklık indeksi açık, güneşli koşullarda yüksek, bulutlu koşullarda düşük bir değere sahiptir.

Berraklık indeksi anlık, saatlik veya aylık olarak tanımlanabilir. HOMER'in solar parametre girdileri penceresindeki berraklık indeksi değerleri aylık ortalama değerlerdir.

Tablo 3.2'de HOMER tarafından kullanılan Meteonorm V8 (Meteonorm, 2022), NASA (NASA, 2023) ve PVGIS TMY (PVGIS, 2023) verilerin Küresel Yatay Işınım ve Berraklık İndeksi sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada NASA veri tabanlı verilerin kullanımına karar verilmiştir. Buna göre bölge için, küresel yatay ışınım ve berraklık indeksi grafikleri aşağıda Şekil 3.4'te verilmiştir.

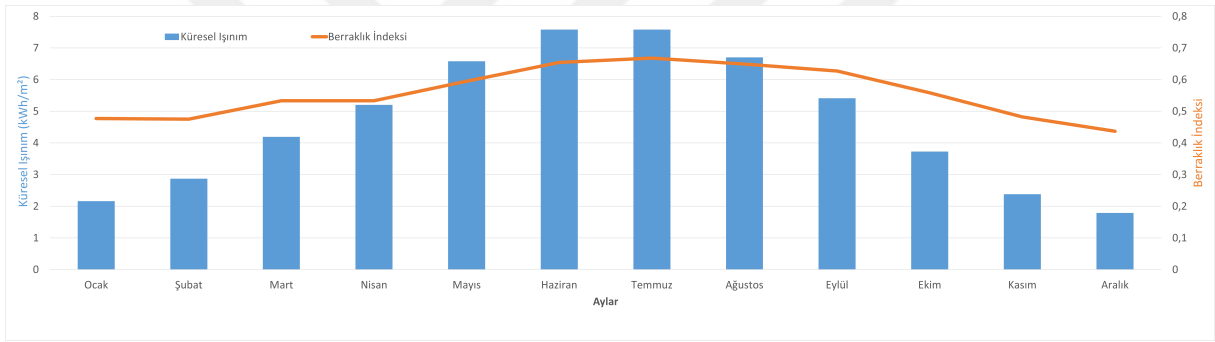
**Tablo 3.2.** Yatay yüzeye düşen ortalama günlük ay bazında toplam ışınım (GHI) (a) ve Yerleşim bölgesi için Berraklık İndeksi (Clearness Index)(b)

**a- Küresel Yatay Işınım ( $kWh/m^2$ )**

Aylar	Meteonorm 8.0 (2005-2013)	NASA SSE (1983-2005)	PVGIS TMY
Ocak	2,16	2,16	2,03
Şubat	2,77	2,87	3,09
Mart	4,21	4,19	3,88
Nisan	5,59	5,20	5,60
Mayıs	6,85	6,58	6,29
Haziran	7,70	7,58	7,08
Temmuz	7,80	7,58	8,04
Ağustos	7,00	6,70	7,43
Eylül	5,61	5,41	5,23
Ekim	3,87	3,73	4,09
Kasım	2,57	2,38	2,68
Aralık	1,87	1,79	1,67
Ortalama	4,83	5,17	4,76

**b- Berraklık İndeksi**

Aylar	Meteonorm 8.0 (2005-2013)	NASA SSE (1983-2005)	PVGIS TMY
Ocak	0,477	0,477	0,465
Şubat	0,461	0,475	0,527
Mart	0,538	0,533	0,513
Nisan	0,575	0,533	0,577
Mayıs	0,622	0,595	0,577
Haziran	0,669	0,654	0,615
Temmuz	0,689	0,668	0,693
Ağustos	0,679	0,649	0,708
Eylül	0,654	0,627	0,632
Ekim	0,578	0,558	0,595
Kasım	0,520	0,482	0,57
Aralık	0,457	0,437	0,459
Ortalama	0,576	0,581	0,597



**Şekil 3.4.** Yerleşim bölgesi için aylara göre günlük ortalama yatay ışınım ve berraklık indeksi

### 3.2.2. Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Rüzgar hızının belirlenmesi için farklı kaynaklar incelenmiştir. Üç farklı kaynaktan elde edilen veriler ile 50 metre yükseklikteki ortalama rüzgar hızı değerleri Tablo 3.3'te incelenmiştir.

**Tablo 3.3.** Yerleşim bölgesi için ortalama rüzgar hızı verileri

<b>Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)</b>			
<b>Aylar</b>	<b>Meteonorm 8.0 (2005-2013)</b>	<b>NASA SSE (1983-2005)</b>	<b>PVGIS TMY</b>
Ocak	3,18	6,01	1,72
Şubat	3,30	6,30	1,26
Mart	3,30	5,87	1,76
Nisan	3,01	5,18	1,92
Mayıs	2,99	4,94	1,43
Haziran	3,69	5,53	1,56
Temmuz	4,49	6,86	2,09
Ağustos	4,29	6,66	2,19
Eylül	3,40	5,65	1,75
Ekim	2,99	5,60	1,55
Kasım	2,69	5,63	1,28
Aralık	2,89	6,07	1,71
<b>Ortalama</b>	<b>3,4</b>	<b>5,86</b>	<b>4,82</b>

Tabloya göre elde edilen verilerde birtakım farklılıklar görülmektedir. Çalışmada NASA verilerinin kullanımına karar verilmiştir (NASA, 2023). Yerleşim bölgesi için kullanılan ortalama rüzgar hızı verileri Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.5.** Yerleşim bölgesi için aylara göre ortalama rüzgar hızı

## 4. HİBRİT YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEM ANALİZİ

Yenilenebilir enerji bağlamında hibrit sistem, enerji talebini verimli ve güvenilir bir şekilde karşılamak için birden fazla enerji kaynağını ve depolama teknolojisini entegre eden bir kurulumu ifade eder.

Hibrit sistemin amacı, sistem performansını optimize etmek, güvenilirliği artırmak ve maliyetleri azaltmak için her enerji kaynağının güçlü yönlerinden yararlanmaktır.

Günümüzün sürdürülebilir enerji çözümleri arayışında, rüzgar ve güneş enerjisi kombinasyonu umut verici bir ikili olarak öne çıkmaktadır. Rüzgar enerjisi hareket eden havanın gücünden yararlanırken, güneş enerjisi güneş ışığını yakalayıp hem temiz hem de yenilenebilir elektrik kaynakları sunar. Böylece karbon emisyonlarını azaltırken ve iklim değişikliğiyle mücadele ederken, dünyanın artan enerji ihtiyaçlarını karşılanmaya yardımcı olabilecek tamamlayıcı ve güvenilir bir yenilenebilir enerji kombinasyonu oluşturur.

### 4.1. HOMER Yazılımı

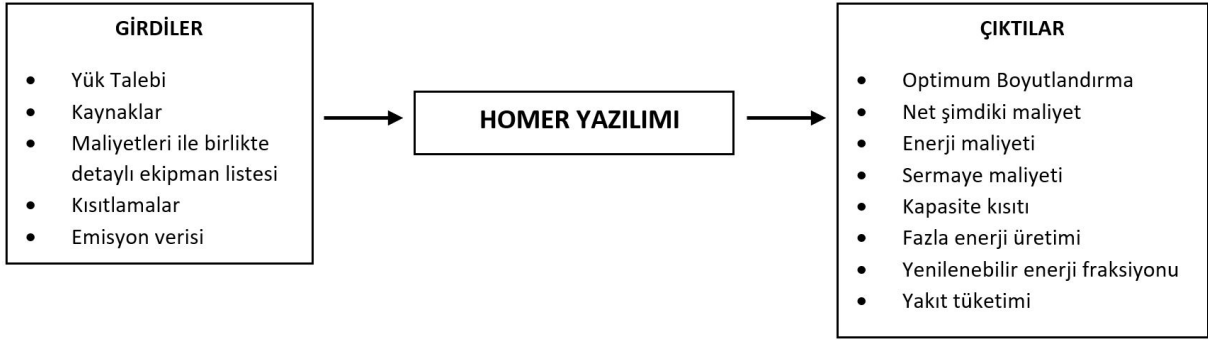
Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER), en yaygın kullanılan, ücretsiz (deneme süresi boyunca) olarak kullanılabilen ve kullanıcı dostu bir yazılımdır. Yazılım, birkaç olası sistem konfigürasyonunda hızlı ön fizibilite, optimizasyon ve hassasiyet analizi yapmak için uygundur. ABD National Renewable Energy Laboratory (NREL) HOMER'ı 1993 yılında hem şebekeye bağlı hem de şebekeden bağımsız sistemler için geliştirmiştir ve yayımlandığı tarihten itibaren HOMER 190'dan fazla ülkede 250000'den fazla kullanıcıya sahiptir (HOMER, 2023). HOMER, programlama dili olarak Visual C++ ile bilgisayar platformu olarak Windows'u kullanır. Bu yazılım tarafından güneş fotovoltaik sistemi için HDKR (Hay, Davies, Klucher ve Reindl) anizotropik modeli kullanılmıştır. HOMER, farklı sistem konfigürasyonlarını simüle etmek için çeşitli teknoloji seçenekleri, bileşen maliyetleri, kaynak mevcudiyeti, üretici verileri vb. gibi girdileri kullanır ve net mevcut maliyete göre sıralanmış uygulanabilir konfigürasyonların bir listesi olarak sonuçlar üretir. Bu yazılım bir sistemi yılda 8760 saat

simüle edebilir. HOMER ayrıca simülasyon sonuçlarını, konfigürasyonları karşılaştırmaya ve ekonomik ve teknik değerlerine göre değerlendirmeye yardımcı olan çok çeşitli tablo ve grafiklerde görüntüleme imkanı sağlar. Yükü karşılamak için en düşük maliyetli kaynakla yük hizmet politikaları belirleyebilir. HOMER, ekonomik parametrelere dayalı olarak çeşitli sistemlerin tasarımını önerebilir. HOMER simülasyonu ile yapılan tablolar ve grafikler de dışa aktarılabilir. HOMER, literatürde hibrit yenilenebilir enerji sistemi optimizasyonu ve çeşitli vaka çalışmaları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 4.1, HOMER'in şematik bir temsilini vermektedir.

Yenilenebilir hibrit enerji sistemleri kesintili güç çıkışları, mevsimsel güç değişiklikleri ve yük talebine her an karşılık verememe sebeplerinden ötürü sistem karmaşıklığına sebep olabilir. HOMER yazılımı, bu zorlukların üstesinden gelmek için tasarlanmıştır. HOMER, hem elektrik hem de termal yüklere hizmet veren FV dizileri, rüzgar türbinleri, hidro güç, biyokütle gücü, içten yanmalı motor jeneratörleri, mikro türbinler, yakıt hücreleri, piller ve hidrojen depolamanın herhangi bir kombinasyonunu içeren şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı yenilenebilir hibrit enerji sistemlerini simüle ve optimize eder.

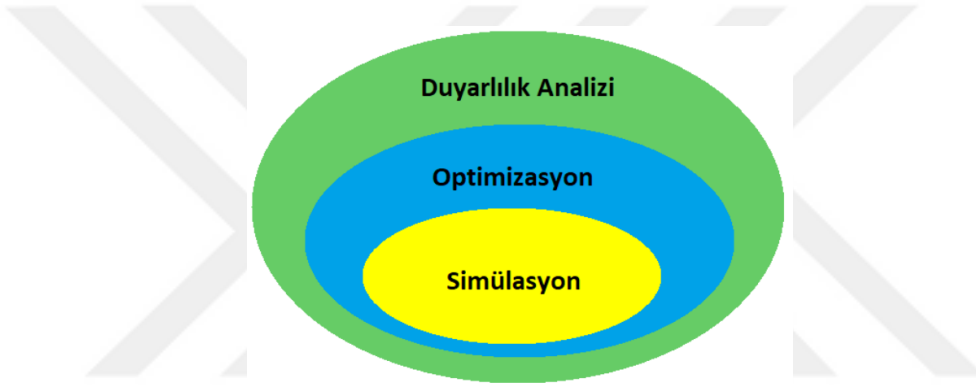
Simülasyonlar, en az 1 dakikalık sürelerden oluşan zaman adımını kullanarak bir yıllık bir zaman dilimini dikkate alır. Bu simülasyonları işleme hızı, binlerce kombinasyonun değerlendirilmesine izin verir. Bu saatlik simülasyon ayrıca bir sistemin ortalama aylık performansını değerlendiren istatistiksel modellere göre gelişmiş doğruluk sağlar. HOMER ayrıca dizel jeneratörlerin kısmi yük verimliliğini de modeller. Bu, tam kapasitede çalışmadığı zaman bir jeneratörün daha düşük verimliliğini daha doğru bir şekilde simüle eder. Yazılımı kullanan kişiye her koşul altında analiz yapmasına ve girdi değişkenlerindeki belirsizliğin veya değişikliklerin etkilerini araştırmasına yardımcı olabilecek duyarlılık analizleri gerçekleştirir. Simülasyonları çalıştırdıktan sonra HOMER, uygulanabilir durumları artan net mevcut (veya yaşam döngüsü) maliyetine göre sıralar. Bu maliyet, başlangıç, bileşen değiştirme, işletme, bakım ve yakıt maliyetlerinin bugünkü değeridir. HOMER, her sistem türü için en düşük net mevcut maliyete sahip olan olarak tanımlanan optimum sistem konfigürasyonunu listeler. HOMER'in hassasiyet analizi, yakıt fiyatı, yük boyutu, güvenilirlik gereksinimi ve kaynak kalitesi gibi kullanıcı tanımlı faktörler değiştikçe bu optimizasyonu tekrarlar.

Şekil 4.2 simülasyon, optimizasyon ve hassasiyet analizi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Optimizasyon ovali, tek bir optimizasyonun çoklu simülasyonlardan oluştuğu gerçeğini temsil



Şekil 4.1. HOMER'in şematik gösterimi

etmek için simülasyon ovalini çevreler. Benzer şekilde, duyarlılık analizi ovali, optimizasyon ovalini kapsar çünkü tek bir duyarlılık analizi birden çok optimizasyondan oluşur.



Şekil 4.2. Simülasyon, optimizasyon ve duyarlılık analizi arasındaki kavramsal ilişki

#### 4.1.1. Hassasiyet Analizi

HOMER yazılımı sayesinde, belirli bir giriş değişken için birden çok değer girerek bir hassasiyet analizi gerçekleştirilebilmektedir. HOMER, optimizasyon sürecini değişkenin her değeri için tekrarlamakta ve sonuçların nasıl etkilendiğini görmeyi sağlamaktadır. Birden çok değer belirlenen giriş değişkenine hassasiyet değişkeni denmektedir. HOMER, kullanıcılarına diledikleri kadar hassasiyet değişkeni tanımlamaya olanak sağlar.

Tek bir hassasiyet değişkeni varsa, bir hassasiyet analizi tek boyutlu olarak adlandırılabilir. İki hassasiyet değişkeni varsa, bu iki boyutlu bir hassasiyet analizidir. HOMER'in en güçlü grafik yetenekleri, iki veya daha fazla boyutun hassasiyet analizlerinin sonuçlarını gösterir.

Belirli bir girdi değişkeni için birden çok değer girerek bir hassasiyet analizi gerçekleştirilmesinin birkaç nedeni vardır. Örneğin, bir değişkenin tam değeri bilinmeyebilir. Bir değer aralığı belirleyerek, o değişkenin ne kadar önemli olduğunu ve değerine bağlı olarak sonucun nasıl değiştiği belirlenebilmektedir. Bir diğer deyişle, çıktılarının o değişkendeki değişikliklere ne kadar "hassas" olduğu belirlenebilmektedir.

Örneğin, bir rüzgar-dizel sisteminin ön analizini yapan bir tasarımcı, üç değişken hakkında kararsızdır: yıllık ortalama rüzgar hızı, projenin ömrü boyunca ortalama yakıt fiyatı ve faiz oranı. Sistemin enerji maliyetinin bu üç değişkene duyarlılığını belirlemek için tasarımcı HOMER kullanarak bir duyarlılık analizi gerçekleştirir. Rüzgar hızı için yaptığı en iyi tahmin 6 m/s'dir; yakıt fiyatı için 0,50\$/L; ve iskonto oranı için, %8. Her bir değişken için, her birinin belirsizlik aralığını kapsayan birden çok değer girer (Beklenen Enflasyon Oranı için "%0" girerek, Nominal İndirim Oranı girişi doğrudan Gerçek İndirim Oranına eşlenir). Sonuç olarak, tasarımcı, rüzgar hızınının daha doğru bir tahminini elde etmek için daha fazla zaman ve para yatırmayı seçer(HOMER, 2023).

Hassasiyet analizi yapılmasının bir diğer nedeni de tek bir analizi birden fazla tesiste uygulanabilir kılmaktır. Örneğin, altı telekomünikasyon tesisinde yapılacak mikro yenilenebilir enerji sistemleri tasarımı için, sahalar birçok açıdan benziyorsa ancak bir bölgeden diğerine rüzgar hızında bazı farklılıklar varsa, uygun aralığa yayılan birkaç rüzgar hızı belirlenebilmektedir. Bu durumda, altı hibrit sistemin tümünü tasarlamak için tek bir analiz yeterlidir. Böyle bir analizin sonuçları, en düşük rüzgar hızına sahip saha için bir FV/batarya/jeneratör hibrit sistemini önerebilir. Daha yüksek rüzgar hızlarına sahip sahalar için rüzgar/FV/batarya/jeneratör hibrit sistemini ve en yüksek rüzgar hızı rüzgar/batarya/jeneratör sistemini önerebilir (HOMER, 2023).

#### 4.1.2. Optimizasyon

HOMER'in sağladığı optimizasyon sonuçları, seçilen hassasiyet durumu için tüm uygun simülasyonları listelemektedir. Optimizasyon sonuçları, net mevcut maliyete göre sıralanmaktadır. Kullanıcının girdiği parametrelere göre sistem ihtiyacını en düşük maliyet ile karşılayan sistem optimum sistem olarak listenin en üstünde yer almaktadır. HOMER, sistem tiplerinin

tüm olası kombinasyonlarını tek seferde incelemekte ve ardından sistemleri, tercih edilen optimizasyon değişkenine göre sıralamaktadır.

### 4.1.3. Simulasyon

HOMER'in temel yeteneği, bir mikro güç sisteminin uzun vadeli çalışmasını simüle etmektir. Üst düzey yetenekleri, optimizasyonu ve hassasiyet analizi, bu simülasyon kabiliyetine dayanır. Simülasyon süreci, belirli bir sistem yapılandırmasının, belirli boyutlardaki sistem bileşenlerinin bir kombinasyonunun ve bu bileşenlerin birlikte nasıl çalıştığını tanımlayan bir işletim stratejisinin, belirli bir ortamda uzun bir süre boyunca nasıl davranacağını belirler.

HOMER, bir FV dizisi, bir veya daha fazla rüzgar türbini, bir nehir tipi hidro türbin ve üç adede kadar jeneratör, bir pil bankası, bir ac-dc dönüştürücünün herhangi bir kombinasyonunu içeren çok çeşitli mikro güç sistemi konfigürasyonlarını simüle edebilir. Sistem, şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız olabilir. AC ve DC elektrik yüklerine ve bir termal yüke hizmet edebilir. Simülasyon süreci iki amaca hizmet eder. İlk olarak, sistemin uygulanabilir olup olmadığını belirler. HOMER, sistemin elektrik ve termal yüklere yeterince hizmet verebilmesi ve kullanıcı tarafından dayatılan diğer kısıtlamaları karşılaması durumunda uygulanabilir olduğunu düşünür. İkinci olarak, sistemin ömrü boyunca kurulum ve çalıştırmanın toplam maliyeti olan sistemin yaşam döngüsü maliyetini tahmin eder. Kullanım ömrü maliyeti, çeşitli sistem konfigürasyonlarının ekonomikliğini karşılaştırmak için uygun bir ölçüdür. Bu tür karşılaştırmalar, optimizasyon sürecinin temelidir.

HOMER, bir yıl boyunca çalışmasının saatlik zaman serisi simülasyonunu gerçekleştirerek belirli bir sistem konfigürasyonunu modeller. HOMER, mevcut yenilenebilir gücü hesaplayarak, elektrik yüküyle karşılaştırarak ve fazlalık zamanlarda fazla yenilenebilir güçle ne yapılacağına veya en iyi nasıl üretileceğine (veya şebekeden satın alınacağına) karar vererek, her seferinde bir saat yılı adım adım ilerletir. HOMER, bir yıllık hesaplamaları tamamladığında, sistemin hizmet edilen toplam elektrik talebinin oranı, yenilenebilir kaynaklar tarafından üretilen gücün oranı veya belirli kirleticilerin emisyonları gibi kullanıcı tarafından getirilen kısıtlamaları karşılayıp karşılamadığını belirler. HOMER ayrıca yıllık yakıt tüketimi, yıllık jeneratör çalışma saatleri,

beklenen pil ömrü veya şebekeden yıllık olarak satın alınan güç miktarı gibi sistemin kullanım ömrü maliyetini hesaplamak için gereken miktarları da hesaplar.

HOMER'in sistemin yaşam döngüsü maliyetini temsil etmek için kullandığı miktar, toplam net şimdiki maliyettir (NPC). Bu tek değer, proje ömrü boyunca ortaya çıkan tüm maliyetleri ve gelirleri içerir ve gelecekteki nakit akışları bugüne indirgenir. Toplam net bugünkü maliyet, sistem bileşenlerinin ilk sermaye maliyetini, proje ömrü içinde meydana gelen herhangi bir bileşen değiştirme maliyetini, bakım ve yakıt maliyetini ve şebekeden güç satın alma maliyetini içerir. Şebekeye güç satışından elde edilen herhangi bir gelir, toplam NPC'yi azaltır. Birçok mikro güç sistemi türü için, sistemin davranışını kabul edilebilir bir doğrulukla modellemek için bir saatlik bir zaman adımı gereklidir.

#### 4.1.4. Ekonomik Modelleme

Ekonomi, hem HOMER'in toplam net şimdiki maliyeti en aza indirecek şekilde sistemi çalıştırdığı simülasyon sürecinde hem de en düşük toplam net mevcut maliyete sahip sistem konfigürasyonunu aradığı optimizasyon sürecinde ayrılmaz bir rol oynar. Bu bölüm, yaşam döngüsü maliyetinin farklı sistem konfigürasyonlarının ekonomisini karşılaştırmak için neden uygun ölçü olduğunu, HOMER'in neden toplam net bugünkü maliyeti ekonomik değer olarak kullandığını ve HOMER'in toplam net bugünkü maliyeti nasıl hesapladığını açıklamaktadır. Yenilenebilir ve geleneksel yenilenemeyen enerji kaynakları tipik olarak önemli ölçüde farklı maliyet özelliklerine sahiptir. Yenilenebilir kaynaklar, yüksek ilk sermaye maliyetlerine ve düşük işletme maliyetlerine sahip olma eğilimindeyken, geleneksel yenilenemeyen kaynaklar, düşük sermaye ve yüksek işletme maliyetlerine sahip olma eğilimindedir. HOMER, optimizasyon sürecinde, değişen miktarlarda yenilenebilir ve yenilenemeyen enerji kaynakları içeren çok çeşitli sistem konfigürasyonlarının ekonomisini sıklıkla karşılaştırmaktadır.

Optimum karşılaştırmayı yapabilmek için hem sermaye hem de işletme maliyetlerini hesaba katılmalıdır. Yaşam döngüsü maliyet analizi, sistemin yaşam süresi içinde meydana gelen tüm maliyetleri dahil ederek bunu yapar. HOMER, bir sistemin yaşam döngüsü maliyetini temsil etmek için toplam net şimdiki maliyeti (NPC) kullanır. Toplam NPC, proje ömrü içinde meydana gelen tüm maliyetleri ve gelirleri, iskonto oranı kullanılarak gelecekteki nakit akışlarının

bugüne indirgenmesiyle bugünkü kur cinsinden tek bir götürü tutara yoğunlaştırır. Modeller iskonto oranını ve proje ömrünü belirtir. NPC, ilk yatırım maliyetlerini, bileşen değiştirmelerini/yenilemelerini, bakımı, yakıtı, şebekeden enerji satın alma maliyetini ve kirletici emisyonlardan kaynaklanan cezalar gibi çeşitli maliyetleri içerir. Gelirler, şebekeye satış gücünden elde edilen gelire ek olarak proje ömrünün sonunda oluşan herhangi bir kurtarma değerini içerir. NPC ile maliyetler pozitif ve gelirler negatiftir. Bu, net bugünkü değer tersidir. Sonuç olarak, net bugünkü maliyet, net bugünkü değerden yalnızca işaret olarak farklıdır.

HOMER, tüm fiyatların proje ömrü boyunca aynı oranda arttığını varsayar. Bu varsayımla, gelecekteki nakit akışlarını bugüne iskonto ederken nominal faiz oranı yerine reel (enflasyona göre düzeltilmiş) faiz oranı kullanılarak enflasyon analizden çıkarılabilir. Dolayısıyla HOMER kullanıcısı, kabaca nominal faiz oranı eksi enflasyon oranına eşit olan reel faiz oranını girer. HOMER'daki tüm maliyetler gerçek maliyetlerdir.

Bir bileşenin değiştirme/yenileme maliyeti, birkaç nedenden dolayı ilk sermaye maliyetinden farklı olabilir. Örneğin, bir modelleyici, bir rüzgar türbini motor bölümünün 15 yıl sonra değiştirilmesi gerekeceğini, ancak kule ve temelin proje ömrü boyunca dayanacağını varsayabilir. Bu durumda, değiştirme maliyeti, ilk sermaye maliyetinden önemli ölçüde daha az olacaktır. Leasing acenteleri veya satın alma programları, bir PV dizisinin ilk sermaye maliyetinin bir kısmını veya tamamını karşılayabilir, ancak değiştirme maliyetinin hiçbirini karşılamayabilir. Bu durumda, yenileme maliyeti ilk yatırım maliyetinden daha yüksek olabilir. Mevcut bir dizel sistemin yenilenmesi analiz edilirken, dizel motorun ilk yatırım maliyeti sıfır olur, ancak yenileme maliyeti olmaz. Proje ömrünün sonunda her bir bileşenin hurda değerini hesaplamak için HOMER şu denklemi kullanır:

$$S = C_{rep} \frac{R_{rem}}{R_{comp}} \quad (4.1)$$

burada  $S$  hurda değeri,  $C_{rep}$  bileşenin değiştirme/yenileme maliyeti,  $R_{rem}$  bileşenin kalan ömrü ve  $R_{comp}$  bileşenin yaşam süresidir. Örneğin, proje ömrü 20 yılsa ve PV dizi ömrü de 20 yılsa, kalan ömrü olmadığı için proje ömrünün sonunda PV dizisinin kurtarma değeri sıfır olacaktır. Öte yandan, PV dizi ömrü 30 yıl ise, 20 yıllık proje ömrü sonunda kurtarma değeri yenileme maliyetinin üçte biri olacaktır.

HOMER, bileşenin yıllık maliyetini bulmak için her bir bileşen için sermaye, değiştirme, bakım ve yakıt maliyetleri ile hurda değeri ve diğer maliyet veya gelirleri birleştirir. Bu, proje ömrü boyunca her yıl meydana gelmesi durumunda, proje ömrü boyunca o bileşenle ilişkili tüm bireysel maliyetlerin ve gelirlerinkine eşdeğer bir net bugünkü maliyet sağlayacağı varsayımsal yıllık maliyettir. HOMER, sistemin yıllık toplam maliyetini bulmak için her bir bileşenin yıllık maliyetlerini ve kirlenici emisyon cezaları gibi çeşitli maliyetleri toplar. Bu değer önemlidir, çünkü HOMER bunu sistemin iki temel ekonomik değerini hesaplamak için kullanır: toplam net şimdiki maliyet ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti.

HOMER, toplam net bugünkü maliyeti hesaplamak için aşağıdaki denklemi kullanır:

$$C_{NPC} = \frac{c_{ann,tot}}{CRF_{i,R_{proj}}} \quad (4.2)$$

burada  $c_{ann,tot}$  toplam yıllık maliyet,  $i$  yıllık reel faiz oranı (iskonto oranı),  $R_{proj}$  proje ömrü ve  $CRF()$  aşağıdaki denklemle verilen sermaye geri kazanım faktörüdür.

$$CRF(i, N) = \frac{i + (1 + i)^N}{i + (1 + i)^N - 1} \quad (4.3)$$

burada  $i$  yıllık reel faiz oranı ve  $N$  yıl sayısıdır.

HOMER, seviyelendirilmiş enerji maliyetini hesaplamak için aşağıdaki denklemi kullanır:

$$COE = \frac{c_{ann,tot}}{E_{prim} + E_{def} + E_{grid,sales}} \quad (4.4)$$

burada  $c_{ann,tot}$  yıllık toplam maliyet,  $E_{prim}$  ve  $E_{def}$  sırasıyla sistemin yıllık hizmet verdiği birincil ve ertelenebilir yükün toplam miktarları ve  $E_{grid,sales}$  yılda şebekeye satılan enerji miktarıdır. Denklem 4.4'teki payda, sistemin yılda ürettiği toplam faydalı enerji miktarının bir ifadesidir. Dolayısıyla seviyelendirilmiş enerji maliyeti, sistem tarafından üretilen faydalı elektrik enerjisinin kilovatsaat başına ortalama maliyetidir. Seviyelendirilmiş enerji maliyeti, genellikle farklı sistemlerin maliyetlerini karşılaştırmak için uygun bir ölçü olsa da, HOMER birincil ekonomik liyakat rakamı olarak bunun yerine toplam NPC'yi kullanır. Örneğin, optimizasyon sürecinde HOMER, sistem konfigürasyonlarını seviyelendirilmiş enerji maliyeti yerine NPC'ye göre sıralar. Bunun nedeni, enerjinin seviyelendirilmiş maliyetinin tanımının, toplam NPC'nin

tanımının tartışılmayacak şekilde tartışmalı olmasıdır. HOMER'in seviyelendirilmiş enerji maliyeti için kullandığı formül geliştirilirken, toplam elektrik talebi yerine sistemin fiilen hizmet ettiği elektrik yükü miktarına bölmeye karar verilmiştir; bu, kullanıcı karşılanmamış bir miktar yüke izin verirse farklı olabilmektedir.

## 4.2. HOMER ile Sistem Tasarımı

Çoklu Enerji Kaynaklarının Hibrit Optimizasyonu anlamına gelen HOMER yazılımı, tasarım ve optimizasyonda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yazılım, farklı boyutlardaki çeşitli sistem konfigürasyonları için bir ön fizibilite testinin yürütülmesini ve istenen enerji sistemleri için çeşitli konfigürasyon ve hassasiyet analizlerinin yapılmasını kolaylaştırır.

HOMER ile sistem tasarımı yapılırken yükler, enerji kaynakları, sistem bileşenleri dikkate alınır ve incelenir. Simulasyonun kesin sonuç vermesi adına bu veriler programa hatasız girilmelidir.

### 4.2.1. Yükün Modellenmesi

HOMER için toplam elektrik ihtiyacından daha fazla önem arz eden girdi yük profilidir. Yerleşim bölgesinin yük ihtiyacını, aydınlatmalar, iklimlendirme sistemleri, beyaz eşyalar, elektronik cihazlar oluşturmaktadır.

Yerleşim bölgesinin elektrik tüketiminin belirlenmesi için yerleşke yönetiminden bilgi alınmış 2022 yılına ait toplam elektrik tüketimi verileri Tablo 3.1'de gösterilmiştir. Çalışmada, bölgenin elektrik tüketimi merkezi olarak tek sayaç ile ilişkilendirilip süzme sayaçlar ile binalara dağıtılarak ölçülmesi sebebiyle saatlik ya da günlük yük verileri tek bir hane üzerinden örnekleme yapılarak ilerlenmiştir. Bu bağlamda bu veriler için yerleşkenin yıllık tüketim verileri, literatürdeki geçmiş çalışmalar göz önünde bulundurularak HOMER yazılımının yük profilleri arasından seçilmiş ve girdi değerlerine uygun biçimde yazılım tarafından boyutlandırılmıştır.

Ayın farklı günleri arasındaki yük değişkenliğini temsil etmek için HOMER, programı varsayılan değer olan %10'a ayarlanan günlük rastgele değişkenliği tanımlar. Bu simülasyon yapılırken günlük yükün aydan aya değişmesi için rastgele değişkenlik ayarlanmıştır. Benzer şekilde, rastgele zaman adımı değişkenliği de bir ayın belirli bir günündeki yük değişikliklerini dikkate alacak şekilde tanımlanmıştır. Bu simülasyonun zaman adımı, simülasyonlardaki enerji dengesinin doğru zaman ayarının yapılmasını sağlamak için HOMER tarafından önerilen varsayılan değer olan 60 dakikaya ayarlanmıştır. Her zaman adımı için varyasyon aralığı, HOMER'ın varsayılan ayarlarına göre yükün %20'sine ayarlanmıştır. Bu verilere dayanarak HOMER tarafından günlük ortalama 859,01 kWh'lik ölçekli yıllık güç talebi hesaplandı.

#### **4.2.2. Fotovoltaik Güneş Enerji Kaynağı**

HOMER, gerçek bir ölçüm değeri olmayan durumlarda seçili konum için veritabanındaki yatay güneş ışınlamı ( $\text{kWh/m}^2$ ) ve berraklık indeksini kullanmaktadır.

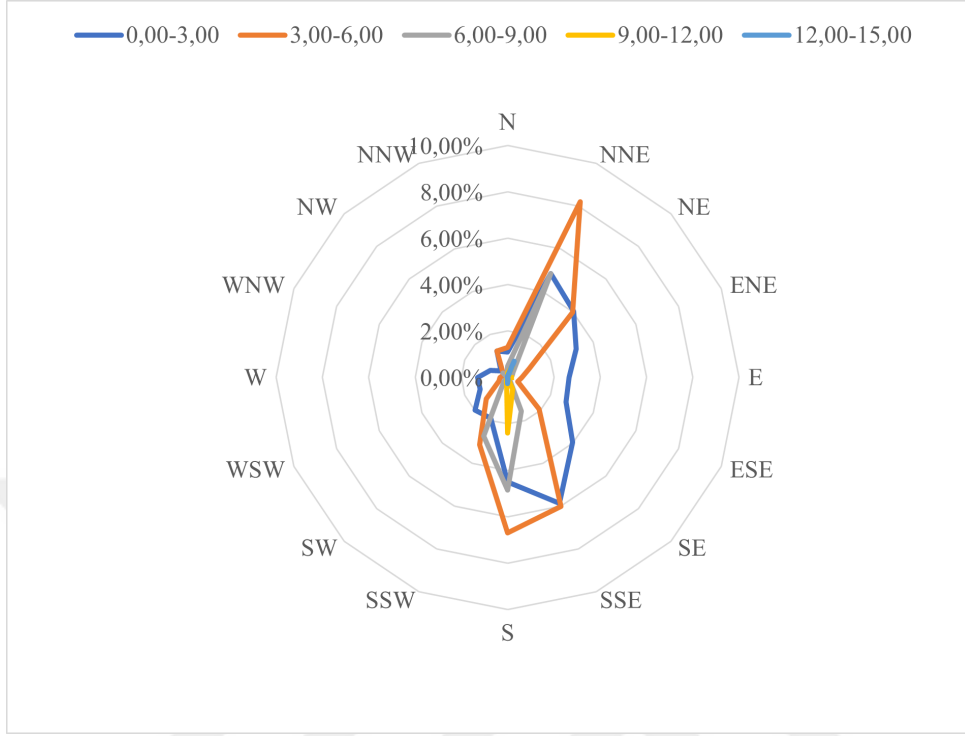
HOMER'ın içerisinde yer alan NASA veritabanı ile yerleşkenin ışınlam ve berraklık indeksi verileri Tablo 3.2'de verilmiştir.

#### **4.2.3. Rüzgar Enerjisi Kaynağı**

Bu sistem tasarımında, bir önceki bölümde (3.2.2) belirtilen rüzgar enerjisi verileri kullanılmıştır. Bunun yanısıra ölçüm yüksekliği, Weibull katsayısı, pürüzlülük katsayısı da simülasyon esnasında HOMER'a işlenmiştir.

3.2.2 başlığındaki çeşitli kaynaklardan alınan aylık rüzgar hızı ortalamaları ile yıllık ortalama rüzgar hızının 5.86 m/s olduğu görülmüştür. Rüzgar hızı ortalama değeri, HOMER'ın duyarlılık analizi değişkenlerindedir. Farklı yıllık rüzgar hızı ortalamaları girilebilir ve sistemin bu değişkene duyarlılığı sonuçlar üzerinden incelenebilir. 3.2.2 başlığında verilen rüzgar hızı verisinin edinildiği veri tabanındaki hata olasılıkları ele alınarak 5.86 m/s haricinde 3 m/s ve 4 m/s ortalamalar da değerlendirmeye dahil edilmiştir. Bu değerlendirmelere ilave olarak, yerleşkedeki rüzgarın karakteristik özellikleri kapsamında hakim rüzgar yönü de incelenmiştir. Bu maksatla

rüzgar hızı verileri kullanılarak oluşturulan rüzgar gülü, Şekil 4.3'te gösterilip, hakim rüzgar yönünün kuzeydoğu olduğu tespit edilmiştir.



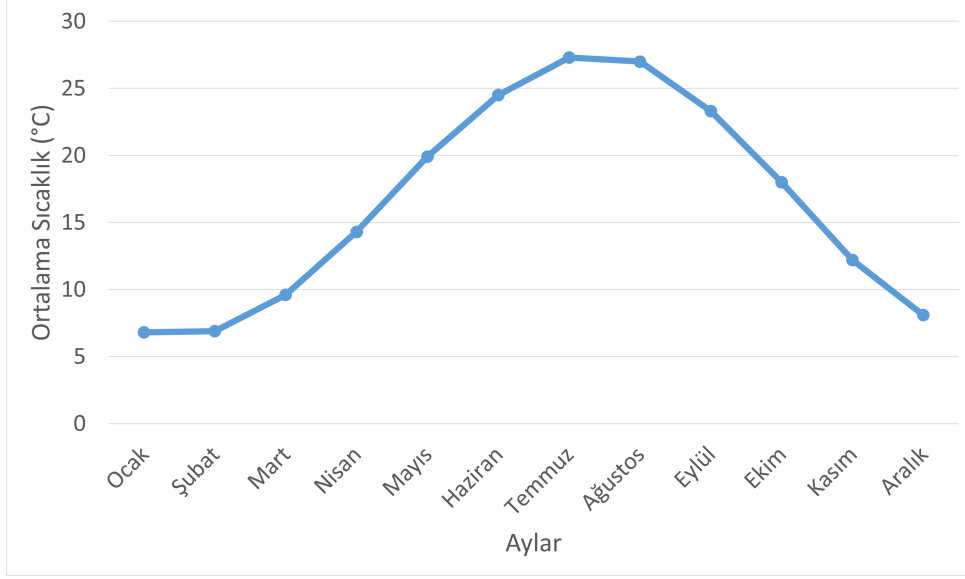
Şekil 4.3. Yerleşkenin rüzgar gülü grafiği

#### 4.2.4. Sıcaklık Verileri

Rüzgar ve FV güneş enerji sistemlerinin performansı incelenirken ortam sıcaklığı önemli bir parametredir. MGM'den alınan 1938 – 2022 arasındaki verilere göre İzmir için yıllık ortalama sıcaklık değeri  $17.9^{\circ}C$ 'dir (MGM, 2023). Tablo 4.1'de MGM ve NASA'nın yanı sıra Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) verisine de yer verilmiştir (PVGIS, 2023). Simulasyon yapılırken verilerde sapma olmaması adına Şekil 4.4'de verilen NASA verileri dikkate alınmıştır.

Tablo 4.1. Ortalama Sıcaklık karşılaştırması

Veri Kaynağı	Ortalama Sıcaklık ( $^{\circ}C$ )	Ölçüm
MGM	17,9	1938-2022
PVGIS TMY	14,8	2007-2016
NASA	16,5	1984-2014



Şekil 4.4. Yerleşke için Ortalama Sıcaklık Verileri NASA (2023)

#### 4.2.5. Rüzgar Türbini Seçimi

Bergey Excel 6 kW türbinleri bu analiz için iki nedenden dolayı seçilmiştir (Bergey, 2023). Birinci neden, bu türbinlerin kapasitesinin çok yüksek olmamasıdır. Bu durum türbin miktarının optimizasyonu için iyi olanaklar sağlamaktadır (Türbin başına daha düşük kapasite, yazılımın optimum rüzgar kapasitesine daha hassas bir şekilde uyum sağlamasına olanak tanır). Bergey Excel 6 türbin parametreleri Tablo 4.2 ile gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Rüzgar türbinine ait parametreler (Bergey, 2023)

Model	Kapasite (kW)	İlk Yatırım Maliyeti (\$)	Değişim Maliyeti (\$)	İşletme ve Bakım Maliyeti (\$/yıl)
Bergey Excel 6	6	7650	7650	480

Bu türbin, mikro şebeke uygulamaları için geliştirilmiştir. Günümüzde büyük rüzgar enerjisi santrallerinde kullanılan türbin güçleri son olarak 16 MW olsa bile yerleşim bölgesi için bu büyüklükte bir türbin kullanılması anlamlı olmayacaktır. HOMER algoritmasında sistem kapasitesi ne kadar düşük ise çözünürlük o kadar artacaktır. Bu sebeple türbin gücü düşük seçilmiştir. Bu nedenle sistem gücündeki güç değişim kademesi birimi, MW yerine çözünürlüğü daha yüksek olan kW mertebesinde olacaktır. Bu da optimizasyon işlemi sonucunun, optimum rüzgar türbini kapasitesine daha çok yaklaşmasını sağlamaktadır.

Dağıtık enerji sistemlerinde, sistemi parçalı kurgulamak herhangi bir arıza durumunda avantaj yaratmaktadır. Bu sebep ile de daha küçük güçte bir rüzgar türbini seçilmiştir.

Öte yandan, sağlanan kapasiteye göre cazip bir kule yüksekliği aralığı (18-49 m) sunar (Bergey, 2023). Bu analiz için kule yüksekliği olarak 35 m'lik orta değer seçilmiştir. Veri sayfasında veya üretici web sitesinde herhangi bir bilgi verilmediğinden kullanım ömrü 20 yıl olarak kabul edilmiştir.

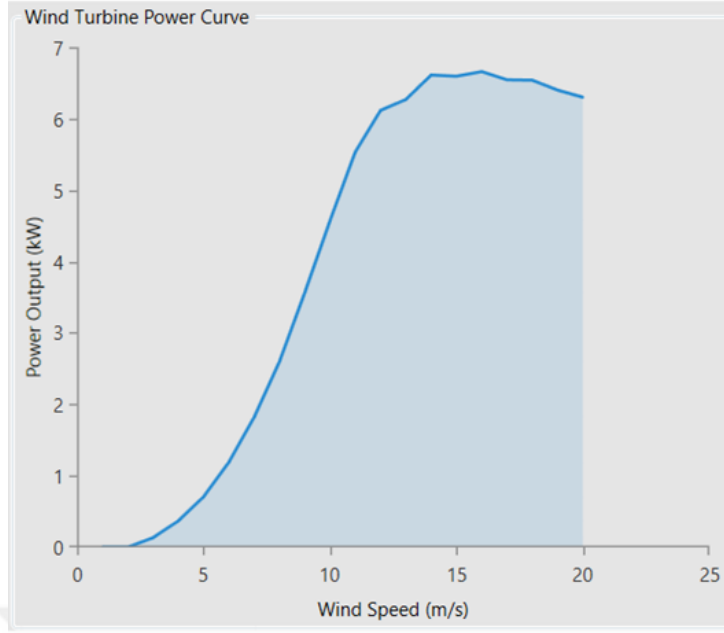
Şekil 4.5'te gösterilen rüzgar türbininin güç eğrisi, mevcut rüzgar hızına göre seçilen türbinin elde edebileceği güç çıkışını temsil eder. Bu analiz için HOMER tarafından bu türbin tasarımı için sağlanan güç eğrisi seçilmiştir.

Rüzgar enerjisi alt sisteminin, sistemin AC barasına bağlı olduğu varsayılmıştır. Rüzgar enerjisi piyasasında mevcut bileşen fiyatlarının geniş aralığı ve projeler için kullanılan önceki bileşenler hakkında bilgi eksikliği nedeniyle, rüzgar enerjisi alt sistemi maliyeti (şebeke bağlantı maliyetleri dahil) IRENA'nın hazırladığı "Renewable Power Generation Costs in 2022". tarafından hazırlanan rapora göre, IRENA Yenilenebilir Maliyet Veri Tabanından alınan verilere göre, 1984 ile 2022 arasında, karadaki rüzgar projelerinin küresel ağırlıklı ortalama toplam kurulu maliyeti %74 oranında düşerek 5.496 \$/kW'dan 1.274 \$/kW'a düşmüştür (Şekil 4.6) (IRENA, 2022). Bu bilgiler doğrultusunda, 6 kW türbin için sistem maliyeti 1.275 \$/kW, yenileme maliyeti 1.275 \$/kW ve işletme bakım maliyeti yıllık 480 \$ olarak ele alınmıştır .

#### **4.2.6. Fotovoltaik Modül Seçimi**

Fotovoltaik modüllerin maliyetleri toplam maliyetin çoğunluğunu oluşturduğundan sistem için uygun fotovoltaik modülün seçimi son derece önemlidir.

Yenilenebilir enerji kaynakları ve elektrik talebi belirlendikten sonra sistemin bileşenleri seçilmeli ve önceden boyutlandırılmalıdır. Güneş fotovoltaik santrali, güneş fotovoltaik dizilerini ve güneş enerjisi tesisi invertörünü içerecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 4.5. Seçilen rüzgar türbininin güç eğrisi

FV modül seçimi yapılırken modülün mekanik, elektriksel, finansal özelliklerine dikkat edilmelidir. Ayrıca aşağıdaki hususlara da dikkat edilmelidir. Verimlilik: Modülün verimliliği, güneş ışığını elektriğe dönüştürme kabiliyetini ifade eder. Daha yüksek verimlilik, daha fazla enerji üretebilir demektir. Yüksek verimliliğe sahip modüller tercih edilebilir.

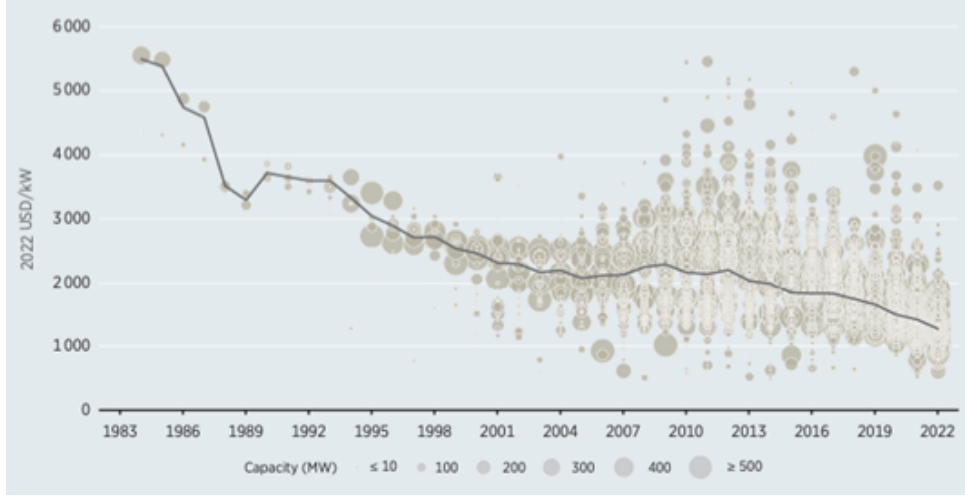
Dayanıklılık ve Kalite: Modülün yapısal dayanıklılığı önemlidir. Sert rüzgarlara, yağmura ve karlı hava koşullarına karşı dirençli olmalıdır. Kaliteli ve dayanıklı malzemelerden üretilmiş modüller uzun ömürlü olabilir.

Marka ve Üretici: Tanınmış ve güvenilir üreticilerden modül satın almak, ürünün kalitesi ve garanti süresi açısından önemlidir. Bilinen markalar genellikle daha iyi destek ve garanti sağlar.

Güç Kapasitesi: Modülün güç çıkışı, ne kadar enerji üretebileceğini belirler. İhtiyacınız olan enerji miktarına göre uygun kapasitede bir modül seçmek önemlidir.

Maliyet ve Performans: Modülün maliyeti, sahip olduğu özelliklerle ve performansla dengelenmelidir. Düşük maliyetli modüller genellikle daha düşük verimlilik veya kısa ömür gibi bazı dezavantajlarla gelebilir.

Kurulum ve Entegrasyon Kolaylığı: Seçtiğiniz modülün kurulumu ve sistemle uyumu da önemlidir. Bazı modüller, kolay entegrasyon veya kurulum sağlayan özelliklere sahip olabilir.



**Şekil 4.6.** Karadaki rüzgar projelerinin toplam kurulu maliyetleri ve küresel ağırlıklı ortalama, 1984-2022 (IRENA, 2022)

Tüm bu kriterler dikkate alındığında çalışmada Monokristal hücreye ve Half-cell hücre teknolojisine sahip 144 hücreli FV modül kullanılmıştır.

Yerleşim bölgesindeki çatılar Güneş Enerji Santrali kurulumuna uygun olmadığından arazi tipi GES yapılması öngörülmüştür. Kurulacak santralin en önemli bileşenlerinden olan FV modül ise güncel teknolojide sıklıkla kullanılan 545 Wp çıkış gücünde seçilmiştir.

HOMER yazılımı kendi kütüphanesinde tanımlı olarak birçok FV modül çeşidini hazır olarak kullanıcılarına sunmaktadır. Bu çalışmada, tercih edilen modül, HOMER kütüphanesinde bulunmayıp broşür değerlerine uygun olarak kütüphaneye dışarıdan eklenmiştir. Çalışmada kullanılan modül, Elin Enerji tarafından üretilen Sirius marka ELNSM72M-HC-HV Serisi 144 hücre MONOPERC fotovoltaik modüldür (SIRIUS, 2022).

Seçilen FV modül, MONOPERC hücre ve half-cell teknolojisine sahiptir. PERC, fotovoltaik modüllerde kullanılan güneş hücre teknolojisinde önemli bir ilerleme olan Passivated Emitter and Rear Cell (PERC) teknolojisini temsil eder. Hücrenin arka tarafına bir pasifleştirme katmanı ekleyerek güneş hücrelerinin verimliliğini artırır.

PERC teknolojisinin temel özellikleri şunları içermektedir. Pasifleştirme, geliştirilmiş ışık emilimi, daha yüksek verimlilik.

Pasifleştirme katmanı, fotovoltaik hücrenin arka tarafındaki elektron rekombinasyonunun azaltılmasına yardımcı olarak daha fazla elektronun toplanıp elektrik üretimi için kullanılmasına olanak tanır. Geliştirilmiş ışık emilimi, PERC hücreleri genellikle arka tarafa eklenen yansıtıcı bir katmana sahiptir ve bu katman, hücreden geçen fotonları daha fazla emilim için aktif bölgeye geri yönlendirir.

PERC teknolojisi, rekombinasyondan kaynaklanan enerji kaybını azaltarak fotovoltaik hücrelerin genel verimliliğini artırabilir ve daha fazla güneş ışığını elektriğe dönüştürmelerine olanak tanır.

PERC teknolojisi, üretim sürecinde büyük değişiklikler gerektirmeden fotovoltaik hücrelerin verimliliğini artırma ve FV modüllerin performansını artırmanın uygun maliyetli bir yolu haline getirme yeteneği nedeniyle güneş enerjisi endüstrisinde giderek daha popüler hale gelmiştir.

Çalışmada kullanılan FV modüle ait elektriksel ve mekanik spesifikasyonlar Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'da gösterilmiştir. Bu modülün maksimum sistem gerilimi 1500 V'tur. Bu sayede daha uzun modül dizileri yapmaya olanak sağlamaktadır. Bu da daha az konnektör, daha az kablo ve kurulum için daha az işçilik maliyeti anlamına gelmektedir. Aynı zamanda malzeme maliyetlerinin de azalmasını sağlamaktadır.

Daha yüksek gerilime sahip sistemler daha düşük akıma maruz kalır, bu da kablolarda ve konnektörlerde direnç kayıplarının azalmasına neden olur. Bu, sistemdeki genel güç kaybını ve kablo kayıplarını azaltır.

Daha yüksek gerilimde çalışmak akım seviyelerini düşürebilir, potansiyel olarak elektrik arki riskini azaltabilir ve kurulum personeli ile bakım personeli için güvenliği artırabilir.

Seçilen modülün verimliliği %21.1'dir. Ancak, FV modül verimliliği tek başına bir anlam ifade etmemektedir. Bir FV sistemin toplam verimliliği, modül verimliliğinin yanı sıra inverter verimliliği, sistem tasarımı, yerel iklim koşulları ve güneş ışığına maruz kalma süresi gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörlerin hepsi bir araya gelerek bir FV sisteminin genel verimliliğini belirler.

**Tablo 4.3.** Seçilen FV modüle ait elektriksel spesifikasyonlar (SIRIUS, 2022)

STC Maksimum Güç (Pmp)	545
Açık Devre Gerilimi (Voc)	49,75
Kısa Devre Akımı (Isc)	13,93
Maksimum Güç Gerilimi (Vmp)	41,8
Maksimum Güç Akımı (Imp)	13,04
STC Modül Verimi ( $\eta_m$ )	21,1
Güç Toleransı (W)	0, +4,99 W
Maksimum Sistem Gerilimi	1500V DC
Maksimum Seri Sigorta Değeri	25 A

**Tablo 4.4.** Seçilen FV modüle ait mekanik spesifikasyonlar (SIRIUS, 2022)

Dış Boyutlar	2279 x 1134 x 35 mm
Ağırlık	27 kg
Solar Hücreler	PERC Mono Kristal (144 adet)
Ön Cam	3.2 mm AR kaplamalı tamperli cam
Çerçeve	Eloksallı Alüminyum Alaşım
Bağlantı Kutusu	IP68, 3 diyotlu
Çıkış Kabloları	4.0mm <sup>2</sup> , 250 mm(+)/350 mm(-)
Mekanik Dayanım	Ön taraf 5400 Pa / Arka taraf 2400 Pa

FV modüllerinin eğim açısı ve oryantasyonu da sistem verimliliğini etkileyen faktörlerdendir. Montaj teknikleri, arazi topoğrafyası ve iklim koşulları, FV tesislerinin optimum eğim açısını belirlemek için dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir. Eğim açısı ve yönelimi, güneşin hareketini veya konumunu takip ederek sürekli değişiklikler yaşayacak şekilde yapıldığında, güneş takibi denilen şeye sahip oluruz. Güneş takibi, güneşi takip etmek için kullanılan eksenlerin sayısına ve yönüne göre sınıflandırılabilir. Tek eksenli takip, güneşin konumunu yaklaşık olarak takip edecek şekilde bir eksen döndüren bir güneş takip sistemidir. Bu, sabit yüzeylere göre önemli performans kazanımları sağlar. Çift eksenli takip, güneşin konumunu tam olarak takip etmek için iki eksenli bağımsız olarak döndürür. Bu, alınan güneş enerjisi miktarını daha da maksimuma çıkarır, ancak tek eksenli takipteki kazanç, sabit yüzeyler üzerindeki tek eksenli takibin kazancından daha küçüktür. Takip cihazlarının kurulumu pahalı ve karmaşık olması dolayısıyla FV tesisleri genellikle sabit eğimle kurulmaktadır.

Sabit FV sistemler daha az bakım gerektirir ve uygun maliyetlidir; FV'nin takibi ise hareketli parçalar nedeniyle daha fazla bakım gerektirir ve kurulum pahalı olabilir. Bu çalışma sabit eğimli FV'ye odaklanmaktadır. PV sistemlerinin performansına en büyük katkı güneş ışınımıdır. Genellikle yüksek güneş ışınımı daha iyi FV performansı anlamına gelir. Bir FV modülün optimum performansı, üzerine gelen güneş ışınımının miktarına bağlıdır. Maksimum güneş ışınımı alabil-

mek için, FV modülün güneş ışınlarının panele dikey olarak ulaşacağı şekilde eğilmesi gerekir. Genel durumlarda, FV'nin eğim açısının veya eğim açılarının bölgenin enlemine ayarlanması küresel olarak kabul edilebilir (Bakirci, 2012). Eğim açısı yüksek olan sistemler kış aylarında, eğim açısı düşük olan sistemler ise yaz aylarında daha yüksek performans göstermektedir.

Kuzey yarım küredeki bir bölge için, maksimum güneş ışınımı toplanması için yüzey yönelimi güneye doğru ayarlanmalıdır. Yüksek eğim açıları aynı zamanda FV yüzeylerindeki toz birikiminin kısa sürede kolayca düşeceği anlamına da gelmektedir. Fotovoltaik enerji verimini azaltabilecek diğer faktörler arasında nem, ultraviyole radyasyon, nem girişi ve termal döngü yer alır (Quintana ve ark., 2002).

FV Dizisi yönelimi (oryantasyonu), FV dizilerinin güneşe göre yönünü, konumunu ve açısını ifade eder. FV sisteminin yönelimi, bir FV sisteminin erişebileceği güneş ışınımı miktarını artırır veya azaltır. Dizi yönelimini tanımlamak için iki ana açı kullanılır: eğim açısı ve azimut açısı (yönelim). Eğim açısı yatay ve dizi yüzeyi arasındaki dikey açıdır. Enerji ihtiyacına bağlı olarak dizi, eğim açısı değiştirilerek yaz veya kış kazanımı için optimize edilebilir. Yön, bir referans yönü ile bir dizi yüzeyinin baktığı yön arasındaki yatay açıdır. FV modüllerin yönünün bir ölçüsüdür. Referans yönü genellikle kuzey veya güneydir. Sabit montajlar için yönlendirme genellikle güneye doğrudur.

Bu çalışmada HOMER seçilen koordinat bilgilerine göre FV modül açısını  $38.51^\circ$  olarak belirlemiştir.

FV sistemlerde sistem verimliliğini etkileyen çeşitli kayıp türleri bulunmaktadır. Geliş açısı kaybı (IAM kaybı), geliş etkisi normal geliş koşullarındaki ışınım ile ilgili olarak FV hücrelerinin yüzeyine gerçekten ulaşan ışınımın azalmasına karşılık gelir. Bu azalma esas olarak, geliş açısıyla birlikte artan, cam üzerindeki yansımalarından kaynaklanmaktadır.

İletim kaybı, güneş ışınının her malzeme arayüzünde (hava-cam, cam-EVA, EVA-hücre) yansımaları ve iletilmesinin yanı sıra camdaki bir miktar emilim nedeniyle genel bir olgudur.

Kirlilik kaybı, kir birikmesi ve bunun sistem performansı üzerindeki etkisi, büyük ölçüde sistemin ortamına, yağmur koşullarına vb. bağlı olan bir belirsizliktir.

Orta yağışlı iklimlerde (Avrupa'nın ortası gibi) ve yerleşim bölgelerinde bu genellikle düşüktür ve ihmal edilebilir (%1'den az).

Tarımsal faaliyetin olduğu kırsal ortamlarda bazı mevsimsel faaliyetler sırasında önemli olabilir. Sanayi bölgelerinde, yüzde birkaç mertebesinde göz ardı edilemeyecek etkiler gözlemlenebilir.

Modüllerin çerçevesi boyunca toz birikmesi ve yosun ve likenlerin büyümesi, alt hücrelerde kısmi gölgelemelere neden olur ve daha fazla toz tutma eğilimi gösterir. Üstelik bu kirlilikler yağışlarla giderilememektedir. Bu nedenle düşük eğimlerde mümkün olduğunca çerçevesiz modüllerin kullanılması tavsiye edilmektedir.

Kuş pislikleri genellikle yağmurlu havalarda giderilemediğinden ciddi bir sorun teşkil etmektedir.

Kirlenme kayıpları elbette yağışlara büyük ölçüde bağlıdır. Bu nedenle HOMER, kirlilik kaybı faktörlerinin aylık değerlerde tanımlanmasına olanak sağlar. Simülasyon sırasında kirlenme kaybı ışınım kaybı olarak hesaba katılır.

LID kayıpları, (Light Induced Degradation) monokristal modüller ile güneşe maruz kaldığı ilk saatlerde ortaya çıkan performans kaybıdır. Bu, bazı FV modülü sağlayıcıları tarafından sağlanan nihai fabrika flaş testi verilerine göre gerçek performansı etkileyebilmektedir.

LID kaybı, wafer imalatının kalitesiyle ilgilidir ve %1 ila %3 (veya hatta daha fazla) düzeyinde olabilmektedir.

Bu, Czochralski işlemi sırasında erimiş silikonun içerdiği oksijen izlerinden kaynaklanmaktadır. Işığa maruz kalma etkisi altında, bu pozitif yüklü  $O_2$  dimerleri silikon kafes boyunca yayılabilir ve bor katkılı alıcılarla kompleksler oluşturabilir. Bor-oksijen kompleksleri silikon kafeste kendi enerji seviyelerini oluşturur ve FV etkisi nedeniyle kaybolan elektronları ve delikleri yakalayabilir.

LID etkisi yalnızca geleneksel p tipi bor katkılı waferlarda ortaya çıkar. N-tipi katkılı waferlar kullanan geleneksel olmayan teknolojiler etkilenmez.

Uyumsuzluk kaybı temel olarak bir modül dizisinde (veya hücrelerde) en düşük akımın tüm dizideki akımı yönlendirmesinden kaynaklanmaktadır.

Çalışmada toplam kayıplar, %15,2 olarak değerlendirilmiştir. Tablo 4.5’de bu kayıpların yüzdesel karşılıkları gösterilmektedir.

**Tablo 4.5.** FV Modül kabul edilen kayıp değerleri yüzdesel tablosu

<b>Kayıp Faktörü</b>	<b>Yüzde (%)</b>
IAM Kaybı	2,6
Kirlilik Kaybı	2,2
LID Kaybı	2,0
Missmatch Kaybı	2,0
Kablolama Kaybı (DC&AC)	2,5
Yaşlanma Kaybı	0,5
Gölgelenme Kaybı	3,0
Performans Kaybı	0,8

FV sistem yüklenicileri tüm sisteme 2 yıl garanti verirken bu süreler ürün bazlı değişebilmektedir. FV modüller genellikle 15 yıl ürün garantisi, 25 yıl lineer performans garantisi, eviriciler genellikle 5 yıl ürün garantisi, konstrüksiyon üreticileri genellikle 10 yıl paslanmazlık garantisi, kablo üreticileri genellikle 2 yıl ürün garantisi sağlamaktadır. Bir FV santralin maliyet açısından en önemli parçası FV modüldür. Bu nedenle bir santralin çalışma süresi, FV modül üreticilerinin taahhüt ettiği 25 yıl çalışma süresi üzerinden değerlendirilebilir.

Büyük ölçekli FV santrallerin yapımına ülkemizde 2013 yılında lisanslı santraller ile başlandığundan henüz 25 yılını tamamlamış büyük ölçekli bir güneş enerji santrali bulunmamaktadır. Bu bağlamda, performans taahhüdü ile alakalı doğru bir tespit yapmak bu noktada çok mümkün değildir.

Ülkemizdeki GES maliyetlerinin son üç yıldaki değişimine ait tablo aşağıdaki gibidir.

**Tablo 4.6.** Türkiye’deki yıllara sair GES maliyetleri (Arazi fiyatı dahil edilmemiştir. Türkiye’de büyük ölçekli iş yapan müteahhit firmalardan alınan yaklaşık fiyatlardır.)

<b>Yıllar</b>	<b>İlk Yatırım Maliyeti (USD/kWp)</b>	<b>Değişim (USD/kWp)</b>	<b>Bakım (USD/kWp)</b>
2021	720	720	4,5
2022	680	680	3
2023	540	540	2

#### 4.2.7. Depolama Sistemi Seçimi

Piller, elektriği kimyasal formda depolar ve daha sonra bu depolanan enerji, gerektiğinde sürekli çalışmayı sağlamak için yeniden şarj edilebilir ve yeniden kullanılabilir. Bataryanın uzun ömürlü olması için batarya şarjının %20 içerisinde tutulması çok önemlidir (Framework, 2017). Bu çalışmada kullanılan batarya teknolojisinin özellikleri Tablo 4.7’de sunulmuştur. Çalışmada, optimizasyon hassasiyetini artırmak adına 1 kWh kapasiteli pil kullanılmıştır. Bu sayede her bir artışı kademeli olarak ayırt etmek mümkün olacaktır.

**Tablo 4.7.** Seçilen pilin özellikleri

Nominal voltaj (V)	6
Nominal kapasite (kWh)	1
Nominal kapasite (Ah)	167
Şarj – deşarj verimi (%)	90
Maksimum şarj akımı (A)	167
Maximum deşarj akımı (A)	500
Minimum şarj durumu (%)	20
Ömür (yıl)	15
İlk Yatırım Maliyeti (\$)	550
Değişirme Maliyeti (\$)	550
İşletme ve Bakım Maliyeti (\$/yıl)	20

Li-ion pillerin olumlu özellikleri daha uzun ömür, daha yüksek enerji ve güç yoğunluğudur. Bununla birlikte, Li-ion kimyasının maliyet rekabetçiliğinin hala yüksek olması ve bir ölçüde güvenlik sorunları göstermesi nedeniyle beklenen seviyelere henüz ulaşamamış gözükmektedir. Yakın gelecekte seri üretime geçilecek elektrikli araçların geliştirilmesiyle maliyet ve güvenlik sorunları muhtemelen aşılabacaktır. Li-ion piller, kurşun-asit pillere göre daha çevre dostudur. Enerji yoğunluğu nedeniyle kurşun asitli piller aynı enerji depolama kapasitesine ulaşmak için daha fazla hammadde gerektirir ve bu da daha fazla madencilik nedeniyle çevreyi etkileyebilir. Çalışma çıktısının çevre dostu olması da hedeflendiğinden bu piller tercih edilmiştir.

Li-ion pillerin sürdürülebilirliği ve yenilenebilir enerjide ideal piller olarak gerçek anlamda uygulanmaları, benzersiz teknik özelliklerine rağmen, onların bol miktarda hammadde kullanmasını, geri dönüştürülebilir olmasını gerektirir. Dünyada 1 milyardan fazla arabanın elektrikli araçlarla veya 15 kWh lityum iyon pillerle çalışan şarj edilebilir hibritlerle değiştirilmesi, dünyanın bilinen lityum rezervlerinin %30’unun kullanılması anlamına gelecektir. Bununla birlikte,

lityumun deniz suyunda da sınırsız miktarlarda bulunması ve onu tuzlu sulardan yoğunlaştırmanın geleneksel madencilığe göre daha çevre dostu olması nedeniyle başka kaynaklar da mevcuttur. Lityum üretimi, kurşun asitli pillerde olduğu gibi kısmen geri dönüşüme de dayanabilir. Lityum pil teknolojisinin ayrıca daha düşük karbon ayak izi elde etmesi gerekecektir. (Bu oran şu anda kWh başına yaklaşık 70 kg  $CO_2$ 'dir.)

#### 4.2.8. Konvertör Seçimi

Dönüştürücü, DC ve AC arasındaki enerji akışını korur; burada bir eviriciye veya doğrultucuya eşdeğerdir. Dönüştürücü, FV modülünden ve pil çıkışından gelen DC gücünü AC'ye dönüştürür. Aşırı rüzgar enerjisi üretimi durumunda, bir doğrultucu AC gücünü akü depolama sisteminde depolanmak üzere DC'ye dönüştürür. Tablo 4.8 seçilen konvertörün ekonomik ve teknik verilerini göstermektedir. Dönüştürücülerin güç değeri aşağıdaki denklemden elde edilebilir (Jahangir ve ark., 2019).

$$P_{inv} = \frac{P_{peak}}{\eta_{inv}} \quad (4.5)$$

burada  $P_{peak}$  tepe yük talebidir ve  $\eta_{inv}$  invertör verimliliğidir.

**Tablo 4.8.** Seçilen konvertörün özellikleri

Parametre	Değer
Inverter Verimi (%)	95,8
Doğrultucu Verimi (%)	95,8
İlk Yatırım Maliyeti (\$)	530
Değiştirme Maliyeti (\$)	530
İşletme ve Bakım Maliyeti (\$/yıl)	0
Inverter Ömrü (yıl)	10

#### 4.3. Simulasyon Sonuçları Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti (LCOE)

LCOE, bu çalışmanın model sisteminde kullanıldığı şekliyle güç üretim teknolojilerini karşılaştırmak için yaygın bir ölçümdür. Bir güç üretim teknolojisinin birim elektrik (MWh) başına tam yaşam döngüsü maliyetlerine (sabit ve değişken), genellikle seviyelendirilmiş elektrik

maliyetleri denir. Dizel jeneratör gibi geleneksel güç kaynaklarının enerji fiyatlarının artması eğiliminin aksine, tüm yenilenebilir enerji teknolojilerinin (FV ve rüzgar türbini) seviyelendirilmiş elektrik maliyeti onlarca yıldır sürekli olarak düşmektedir. Bu gelişme, daha ucuz ve daha iyi performans gösteren malzemelerin kullanımı, daha az malzeme tüketimi, daha verimli üretim süreçleri, artan verimlilik ve bileşenlerin otomatik seri üretimi gibi teknolojik yeniliklerden kaynaklanmaktadır. LCOE kavramı aşağıdaki denklemlerle tanımlanabilir (Fraunhofer Institute for Solar Energy System (ISE), 2018; Ocampo, 2009).

$$LEC = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (4.6)$$

- LEC; ortalama ömür boyu seviyelendirilmiş elektrik üretim maliyetidir.
- $I_t$ ; t yılındaki yatırım harcamalarıdır.
- $M_t$  t yılındaki işletme ve bakım giderleridir.
- $F_t$  t yılındaki yakıt giderleridir.
- $E_t$  t yılındaki elektrik üretimidir.
- $r$  indirim oranıdır.
- $n$  sistem ömrüdür.

#### 4.4. Optimizasyon Ayarları

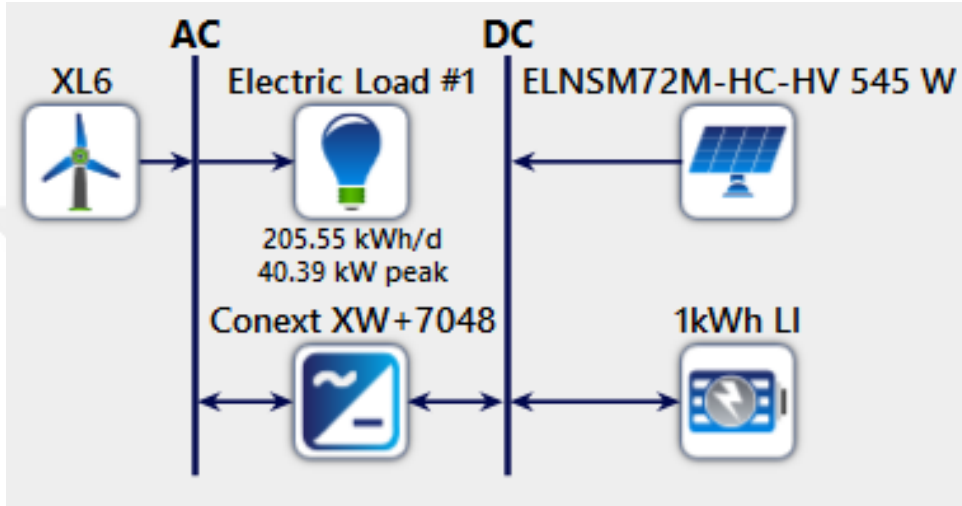
Elektrik yükünün ve üretiminin daha iyi ayarlanması için simülasyonların zaman adımı (HOMER'daki varsayılan 60 dakika yerine) 30 dakikaya ayarlanmıştır.

Optimizasyon başına maksimum simülasyon sayısı 10.000 olarak ayarlanmıştır. Bu, bu değere ulaşıldığında tamamlanmayan simülasyonların atılacağı anlamına gelmektedir. Ancak bu değer artırılması simülasyon süresini oldukça arttırdığından HOMER tarafından verilen varsayılan değer kabul edilmiştir.

Son olarak, sistem tasarım hassasiyeti ve NŞM hassasiyeti, sırasıyla %0,5 ve %1'e ayarlanan maksimum simülasyon hatalarıyla gösterilmiştir.

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde daha önceki bölümlerde bilgileri verilen sistem bileşenlerinin tümünün hibrit enerji sistemi olarak modellenip simülasyon yapıldığı analizin sonuçları gösterilmiştir. Hibrit enerji sistemine ait çalışma senaryosu Şekil 5.1’de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.1. Hibrit Sistem Çalışma Senaryosu

Bu senaryoda görüldüğü üzere FV sistem, depolama sistem DC barasına bağlı olup elektrik yükleri ve rüzgar türbini sistemin AC barasına, bu sistemler arasındaki transfer ise DC ve AC barasına bağlı olan konvertör sayesinde yapılmaktadır. Gerçekleştirilen simülasyonların sonuçları, tartışmalarıyla birlikte aşağıda sunulmaktadır.

Aşağıda, HOMER yazılımında yapılan ilgili hibrit sistem konfigürasyonlarına ait simülasyonlar sonucu oluşan tablo görülmektedir.

Tablo 5.1. en düşük LCOE’den en yükseğe doğru sıralanmıştır. LCOE simülasyon sonuçlarını etkileyen önemli bir parametredir. Tablo incelendiğinde en ekonomik sistemin 1 no’lu sistem olduğu görülmektedir.

Ayrıca, sistemin enerji ihtiyacının yalnızca FV güneş enerjisi+depolama ve rüzgar enerjisi+depolama olarak karşılandığı optimizasyon sonuçlarına ait veriler Tablo 5.2’de verilmiştir.

**Tablo 5.1.** HOMER Simulasyon sonuçları

Sistem Mimar No	FV Sistem Gücü (kW)	Türbin Sayısı	1 kWh Li-Ion Batarya Kapasitesi	Konvertör Gücü (kW)	İlk Yatırım Maliyeti (\$)	LCOE (\$/kWh)	İşletme& Bakım Maliyeti (\$/yıl)	Net Şimdiki Maliyet (\$)	Sistem Yenilenebilirlik Oranı (%)
1	96,7	2	198	35,8	186.689,00	0,316	9.301,00	306.928,00	100
2	96,1	2	199	35,9	187.044,00	0,317	9.338,00	307.758,00	100
3	95,8	3	190	36,7	190.033,00	0,324	9.613,00	314.303,00	100
4	95	3	192	37,3	191.095,00	0,326	9.699,00	316.480,00	100
5	135	1	205	37,1	200.708,00	0,328	9.097,00	318.314,00	100
6	95	3	196	39,2	194.273,00	0,332	9.897,00	322.213,00	100
7	138	1	207	38,5	203.959,00	0,333	9.218,00	323.120,00	100
8	137	2	199	37,2	206.001,00	0,339	9.460,00	328.299,00	100
9	134	2	202	37,6	206.407,00	0,34	9.569,00	330.105,00	100
10	138	2	208	37,7	211.628,00	0,349	9.789,00	338.176,00	100
11	122	1	235	36,8	211.142,00	0,352	10.102,00	341.741,00	100
12	144	4	173	51,2	217.789,00	0,36	10.136,00	348.821,00	100
13	218	-	219	38,3	238.783,00	0,369	9.223,00	358.007,00	100
14	198	-	229	39,9	236.264,00	0,371	9.580,00	360.116,00	100
15	206	4	171	40,7	238.903,00	0,378	9.860,00	366.372,00	100
16	151	3	213	46,4	232.515,00	0,384	10.823,00	372.428,00	100
17	206	5	171	50,8	251.942,00	0,403	10.741,00	390.795,00	100
18	203	-	257	50,8	259.477,00	0,413	10.903,00	400.390,00	100
19	172	6	214	30,5	257.015,00	0,426	12.088,00	413.284,00	100
20	206	7	171	61	272.630,00	0,444	12.184,00	430.138,00	100
21	206	3	257	45,8	281.248,00	0,456	12.437,00	442.031,00	100
22	206	11	171	40,7	292.453,00	0,486	13.797,00	470.810,00	100
23	206	12	171	40,7	300.103,00	0,501	14.359,00	485.729,00	100
24	68,7	11	257	61	288.730,00	0,526	17.139,00	510.292,00	100
25	137	11	257	40,7	308.853,00	0,54	16.639,00	523.961,00	100



**Tablo 5.2.** FV+depolama, rüzgar+depolama sistem sonuçları

<b>Sistem Mimar No</b>	<b>FV Sistem Gücü (kW)</b>	<b>Türbin Sayısı</b>	<b>1 kWh Li-Ion Batarya Sayısı</b>	<b>Konvertör Gücü (kW)</b>	<b>İlk Yatırım Maliyeti (\$)</b>	<b>LCOE (\$/kWh)</b>	<b>İşletme&amp; Bakım Maliyeti (\$/yıl)</b>	<b>Net Şimdiki Maliyet (\$)</b>	<b>Sistem Yenilenebilirlik Oranı (%)</b>	<b>Fazla Üretim (kWh)</b>
1	96,7	2	198	35,8	186.689,00	0,316	9.301,00	306.928,00	100	110.586
405	618	-	257	61	451.780,00	0,626	12.052,00	607.579,00	100	300.174
918	-	105	257	61	976.930,00	1,94	69.861,00	1.088.000,00	100	410.021

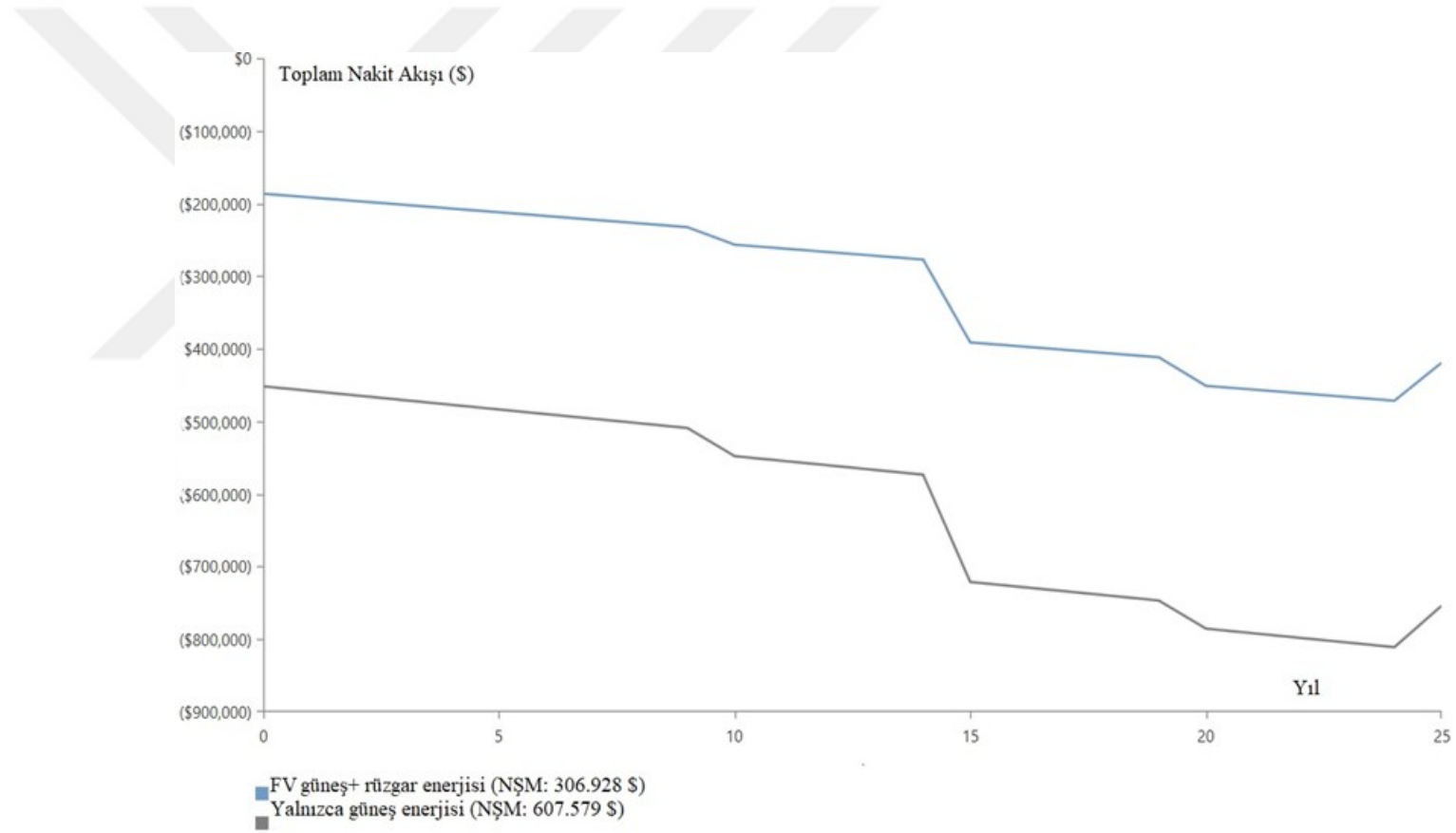
Tablo 5.2’de yer alan veriler, FV güneş enerjisi+rüzgar enerjisi, yalnızca FV güneş enerjisi ve yalnızca rüzgar enerjisinin kullanıldığı sistemleri içermektedir. Bu veriler incelendiğinde yerleşim bölgesinin enerji ihtiyacını karşılayacak en optimum sistemin FV güneş enerjisi ve rüzgar enerjisinin birlikte kullanıldığı hibrit sistem olduğu anlaşılmaktadır. Bu sistemin ilk yatırım maliyeti diğer yenilenebilir kaynaklı sistemlerin tek başına kullanımına kıyasla oldukça düşüktür.

Tezin ana konusu olan hibrit enerji sistemlerinin kullanımını da kanıtlar düzeyinde olan bu optimizasyon sonucu, neden yalnızca FV güneş enerjisi ya da neden yalnızca rüzgar enerjisini tek başına kullanmanın daha uygun olmadığını bir kez daha ispatlamıştır.

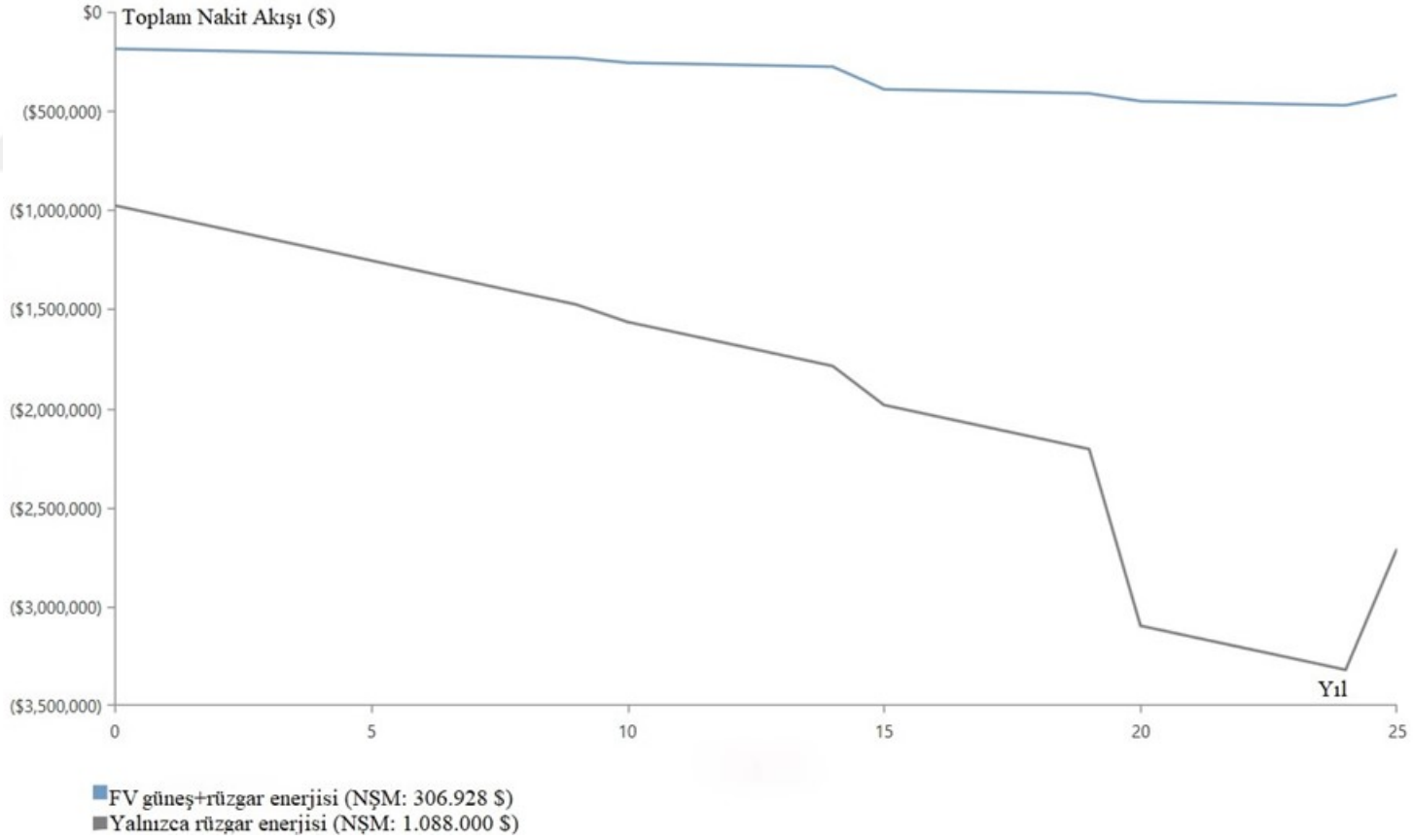
Sistem ihtiyacının, yalnızca FV güneş enerjisinden karşılandığı durumda 618 kW’lık bir FV güneş enerjisi ihtiyacı doğmaktadır. Yalnızca FV güneş enerjisi kullanımı ilk yatırım maliyeti olarak hibrit sisteme göre 2,4 kat daha fazla olduğu, net şimdiki maliyetinin 2 kat fazla olduğu, depolama kapasitesinin 1,3 kat daha fazla olduğu görülmektedir. Sistem ihtiyacının, yalnızca rüzgar enerjisinden karşılandığı durumda 630 kW’lık bir rüzgar enerjisi ihtiyacı doğmaktadır. Yalnızca rüzgar enerjisi kullanımı ilk yatırım maliyeti olarak hibrit sisteme göre 5,2 kat daha fazla olduğu, net şimdiki maliyetinin 3,5 kat fazla olduğu, depolama kapasitesinin 1,3 kat daha fazla olduğu görülmektedir.

Şekil 5.2’de simulasyon sonucu ortaya çıkan FV güneş enerjisi ve rüzgar enerjisinin birlikte kullanıldığı durum ile yalnızca FV güneş enerjisi (618 kW) sisteminin kullanıldığı durum arasında nakit akış karşılaştırma grafiği gösterilmektedir. Şekil 5.3’de ise simulasyon sonucu ortaya çıkan FV güneş enerjisi ve rüzgar enerjisinin birlikte kullanıldığı durum ile yalnızca rüzgar güneş enerjisi (630 kW) sisteminin kullanıldığı durum arasında nakit akış karşılaştırma grafiği gösterilmektedir.

Grafiklerdeki kırılım noktaları, sistemlerde kullanılan her bir parçanın kullanım süresi sonundaki değişim maliyetlerini göstermektedir.



Şekil 5.2. Hibrit sistem ve yalnızca güneş enerjisi kullanımı için karşılaştırmalı nakit akış tablosu



Şekil 5.3. Hibrit sistem ve yalnızca güneş enerjisi kullanımı için karşılaştırmalı nakit akış tablosu

## 5.1. Simulasyon Modelinin Tartışılması

Sunulan model, bu araştırmanın üç amacını yerine getirmiştir: İlk olarak hibrit FV güneş/rüzgar enerjisi sistemlerinin yerleşim bölgesinde kullanımının fizibilitesini, ikinci olarak yalnızca rüzgar enerjisi fizibilitesini, son olarak da yalnızca FV güneş enerjisi ile çalışan sistemi karşılaştırarak analiz edilmiştir.

Ancak bu modelde dikkate alınamayan bazı hususlar vardır. Rüzgar enerjisi üretimini her ay için ortalama rüzgar hızına göre tekdüze kabul eden HOMER, üretilen rüzgar enerjisindeki dalgalanmaları da ihmal etmektedir. Mevcut güç arzı ve talebinin anında eşleştirilmesinin zorluğu nedeniyle rüzgar gücündeki dalgalanmalar da bu sistemlerin şebeke entegrasyonu açısından önemli bir sorundur. Bu projenin simülasyon modeliyle temsil edilemeyen kombine güneş ve rüzgar enerjisi sistemlerinin öneminin nedenlerinden biri de budur.

Yerleşim bölgesi için bir günlük elektrik tüketimi ölçümleri, farklı günler, aylar ve yıllar arasında rastgele yük değişkenliği varsayılarak tipik bir günlük yük olarak alınmıştır. Bu çalışma için yüklerin daha uzun bir ölçümünü gerçekleştirmek mümkün olmasa da, daha doğru bir yük değerlendirmesi için daha büyük bir veri seti veya daha uzun ölçüm süresi tavsiye edilmektedir.

HOMER gelişmiş optimizasyon ile simülasyonlar çalıştırılırken çok yıllık modülün kullanılmaması nedeniyle sistem bileşen parça maliyeti dikkate alınmadı. Gelecekteki analizlerde bileşen boyutlandırma seçeneklerinin kesin olması durumunda, çok yıllık analize olanak sağlamak ve bu tür farklılıkları dikkate almak amacıyla optimizasyon için arama alanı modu kullanılabilir.

Bu projede sürdürülebilirlik tüm boyutlarıyla yerine getirildi. Çevresel açıdan bakıldığında, bu araştırma, enerji üretimi için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmeyi ve şu anda dünya çapında ve özellikle Türkiye’de önemli bir sorun olan enerji santrallerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılmasını kolaylaştırmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, kırsal alanların elektrifikasyonu için şebekeden bağımsız sistemlerinin uygulanmasını artırabilir. Ancak sunulan model hibrit projelerinin yaşam döngüsü sırasındaki çevresel etkilerini dikkate almamaktadır. Örneğin, sistem bileşenlerinin imalatında ortaya çıkan sera gazı emisyonları ve kaynak tüketimi bu modelde dikkate alınmamaktadır. Bu projelerin tüm aşamalarındaki gerçek

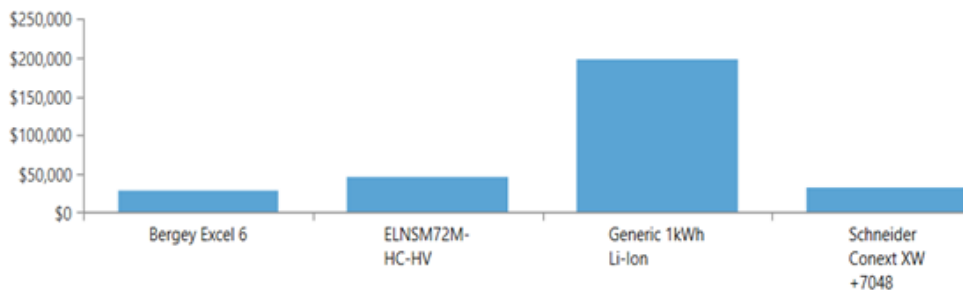
etkisini ölçmek için hibrit sistemin “Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi” yapılmalıdır. Ayrıca, büyük ölçüde fosil yakıtlardan üretilen şebekeden enerji ithalatına bağlı olarak hibrit sistemlerinin dolaylı emisyonları bu araştırmada dikkate alınmamıştır. Ayrıca rüzgar türbinleri gibi yenilenebilir enerji teknolojileri, çevreye fosil yakıtlara göre daha az zarar vermesine rağmen, akustik kirlilik ve görsel etki gibi çevresel sonuçlar doğurmaktadır.

Ekonomik açıdan bakıldığında, eğer projede şebeke olsa idi ve şebekeye bir elektrik satışı olsa idi, proje sermayesinin ve özellikle işletme giderlerinin geri kazanılmasına yardımcı olan şebekeye yapılan enerji satışları sayesinde düzenli bir gelir kaynağı üreterek, projeyi şebekeden bağımsız sistemlere kıyasla daha ekonomik hale getirebilirdi. Son olarak hibrit enerji sistemleri kırsal ve uzak topluluklara güç güvenilirliği sağlayarak sürdürülebilir kalkınmayı teşvik etmeyi amaçlamaktadır. Güç güvenilirliği, küçük işletmelerin ve geçim kaynaklarının başarısı ve iyileştirilmesinin yanı sıra eğitim amaçları için de gereklidir. Hibrit enerji sistemlerinin uygulanması bu alanlara gelişim fırsatları getirerek, uygulamalarını sosyal açıdan sürdürülebilir kılmaktadır.

### 5.1.1. Optimum Sistem için Nakit Akışı ve Maliyet Tablo Özetleri

Bu bölümde, Tablo 5.1’de gösterilen HOMER simulasyon sonuçları içinde en düşük LCOE ve en düşük maliyetini yerine getiren 1 numaralı sistemin sonuçları ele alınacaktır.

Şekil 5.4, optimum sistemin bileşenlerinin net şimdiki maliyet dağılımını göstermektedir.



Şekil 5.4. Optimum Sistem için Bileşen Bazında Net Şimdiki Maliyetler

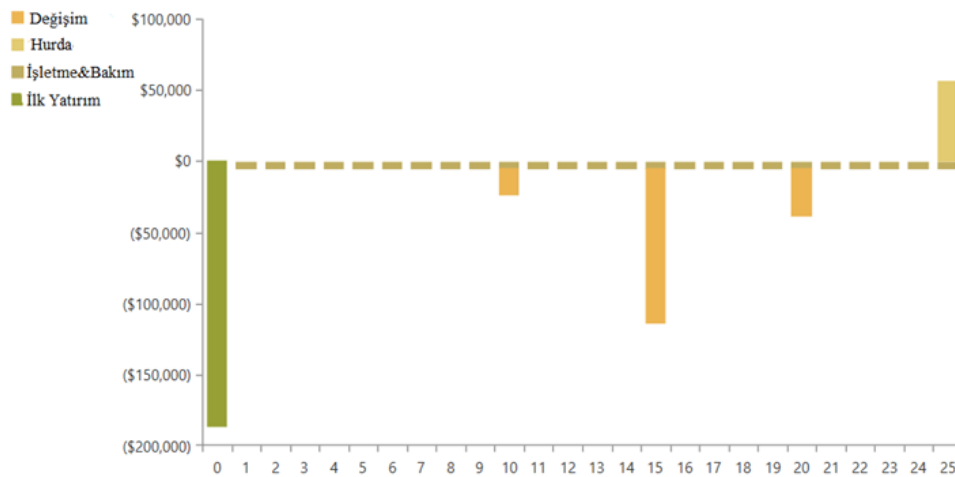
Şekil 5.4’teki net şimdiki maliyet dağılımına göre hibrit sistemin en büyük maliyet bileşeni depolama sistemidir. Şekildeki net şimdiki maliyetlerin bileşen bazında dağılımı Tablo 5.3’te verilmiştir.

**Tablo 5.3.** Optimum Sistem için Net Şimdiki Maliyet Analizi

Bileşen	İlk Yatırım Maliyeti (\$)	Değişim Maliyeti (\$)	İşletme&Bakım Maliyeti (\$)	Hurda Değeri (\$)	Toplam NŞM (\$)
Bergey Excel 6	15300.00	4877.75	12410.42	-2748.93	29839.24
ELNSM72M- HC-HV	43501.77	0.00	2499.42	0.00	46001.19
Generic 1kWh Li-Ion	108900.00	46203.42	51192.97	-8695.95	197600.44
Schneider Conext XW+7048	18987.33	16774.12	0.00	-2274.28	33487.16
Sistem	186689.09	67855.29	66102.80	-13719.1	306928.03

HOMER'in sistemin yaşam döngüsü maliyetini temsil etmek için kullandığı miktar, toplam net şimdiki maliyettir (NŞM). Bu tek değer, gelecekteki nakit akışlarının bugüne indirgenmesiyle birlikte proje ömrü boyunca ortaya çıkan tüm gider ve gelirleri içerir. Toplam net şimdiki maliyet, sistem bileşenlerinin başlangıç sermaye maliyetini, proje ömrü içerisinde meydana gelen herhangi bir bileşen değiştirme maliyetini, bakım ve yakıt maliyetini ve şebekeden güç satın alma maliyetini içerir.

Tablo 5.3'te görülen net şimdiki maliyet değerleri ilk yatırım maliyeti, değişim maliyeti, işletme ve bakım maliyeti ve hurda değeridir.

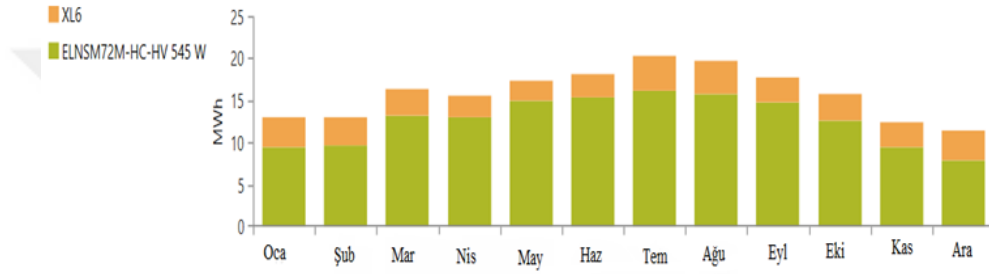
**Şekil 5.5.** Optimum Sistem için Nakit Akış Şeması

### 5.1.2. Üretim Değerleri

Optimum hibrit sistemin FV güneşten, rüzgardan ve toplam ürettiği elektrik değerleri Tablo 5.4'te, aylık olarak üretim değerleri ise Şekil 5.6'da gösterilmiştir.

**Tablo 5.4.** Sistem Bileşenlerinin Yıllık Üretim Değerleri

Üretim Şekli	Üretim Değeri (kWh/yıl)	Üretim Payı (%)
FV Güneş Enerjisi	152296	80,1
Rüzgar Enerjisi	37857	19,9
Toplam	190153	100



**Şekil 5.6.** Sistem Bileşenlerinin Aylık Üretim Değerleri

Sistemde üretilen elektrikten 75019 kWh yerleşim bölgesinin yıllık ihtiyacı için kullanılmıştır. (İhtiyacın tamamı.) 110586 kWh ise fazladan enerji üretilmiştir. Fazla elektrik enerjisi, bir elektrik şebekesinde veya şebekeden bağımsız bir sistemde, mevcut talebi aşan elektrik üretimidir. Bu fazla üretim, hibrit sistemin ürettiği toplam enerjinin %58,2'sine karşılık gelmektedir. Yıl boyunca karşılanamayan elektrik ihtiyacı 7,24 kWh olup bu da toplam elektrik talebinin %0,097'sine karşılık gelmektedir.

### 5.1.3. Rüzgar Enerjisi Sonuçları

Tartışılan optimum hibrit enerji sistemi için toplamda 2 adet Bergey Excel 6, toplam rüzgar türbini gücü ise 12 kW'tır. Rüzgar türbinleri, bu simülasyon için 37857 kWh enerji üretmiştir. Yıllık üretimde, %19,9'luk bir paya sahiptir. Simülasyon sonucu elde edilen rüzgar türbinine ait veriler Tablo 5.4'te daha ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

### 5.1.4. Üretim Değerleri

Optimum hibrit sistemin FV güneşten, rüzgardan ve toplam ürettiği elektrik değerleri Tablo 5.5'te, aylık olarak üretim değerleri ise Şekil 5.6'da gösterilmiştir.

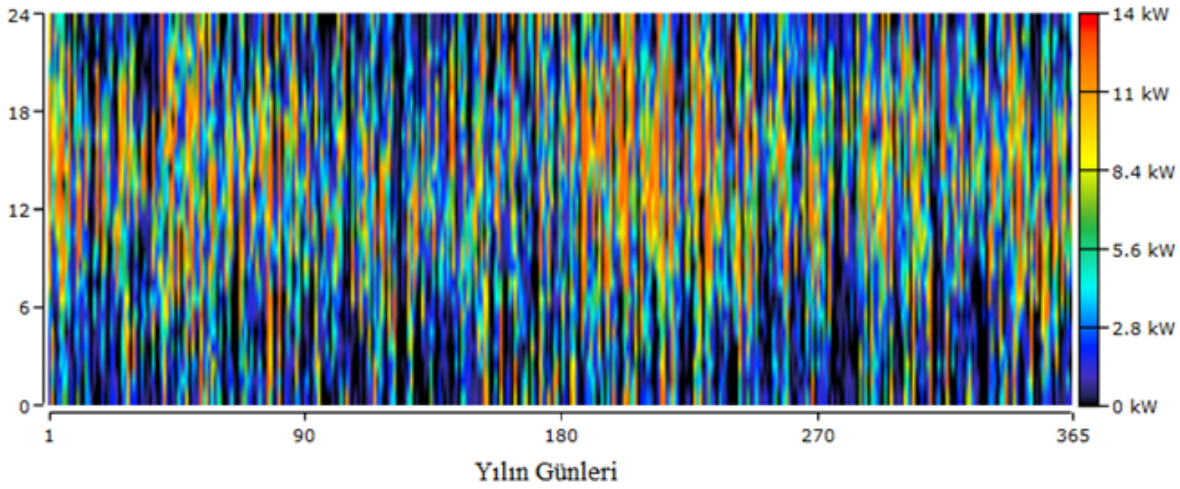
**Tablo 5.5.** Rüzgar Türbinine ait Veriler

Toplam Kurulu Kapasite (kW)	12
Ortalama Çıkış Gücü (kW)	4,32
Kapasite Faktörü (%)	36
Toplam Üretim (kWh/yıl)	37857
Maksimum Çıkış Gücü (kW)	13,3
İşletme Süresi (sa/yıl)	8157
LCOE (\$/kWh)	0,061

Ortalama çıkış gücü rüzgar türbinlerinin yıl boyunca ürettiği ortalama güç seviyesini ifade etmektedir. Kapasite faktörü ise ortalama çıkış gücünün toplam sistem gücüne oranı olup eldeki mevcut kapasitenin kullanım oranını ifade etmektedir. Maksimum çıkış gücü ise rüzgar enerjisi sistemin yıl boyunca eriştiği maksimum güçtür. Bu güç güneş ışınım değerleri ile değişkenlik gösterebilir. Yıllık işletme süresi, rüzgar enerjisi sisteminin yıl boyunca enerji çıkışı sağladığı toplam süreyi ifade etmektedir. Rüzgar enerjisi sistemi için yıllık kW başına üretilen elektrik enerjisi 3154,75 iken FV güneş enerjisi için bu değer 1574'tür. Yerleşim bölgesi için rüzgar türbini aslında iki kata kadar daha verimli çalışmaktadır. Bu durum, bölgenin ışınımının, rüzgar hızına göre daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Eğer bir hassasiyet değişkeni olan rüzgar hızı düşürülür ise sistem verimliliği FV güneş enerjisi ile benzer seviyeye gelebilir.

Lakin, rüzgar enerjisinin bölge için daha efektif olmasına karşın rüzgar türbinlerini FV güneş enerjisi sistemi kurulumu karşısında daha zor kılan bir unsur bulunmaktadır, bu da seviyelendirilmiş elektrik maliyetidir (LCOE). Rüzgar enerjisi sisteminin LCOE değeri, 0,061 \$/kWh iken, güneş enerji sisteminin LCOE değeri 0,0234 \$/kWh'tır. Rüzgar türbinlerinin FV güneş enerjisi sistemlerine göre daha yüksek LCOE'ye sahip olmasının temel sebebi ise işletme bakım ve ilk yatırım maliyetlerinin fazla olmasıdır.

Şekil 5.7 rüzgar türbinlerinin ürettiği enerji yoğunluğunun zamana göre dağılımını göstermektedir. FV güneş enerjisi sisteminine göre çok daha yoğun bir enerji vardır. FV güneş enerji sistemleri, rüzgar enerji sistemlerine göre yük arzını karşılamak adına daha güvenilirdir. Çünkü



Şekil 5.7. Rüzgar Enerjisi için Güç Çıkış Yoğunluğu

FV sistemlerde ana kaynak güneş olduğundan ve rüzgara göre daha tahmin edilebilir bir kaynak olduğundan güneş enerji sistemleri daha güvenilirdir.

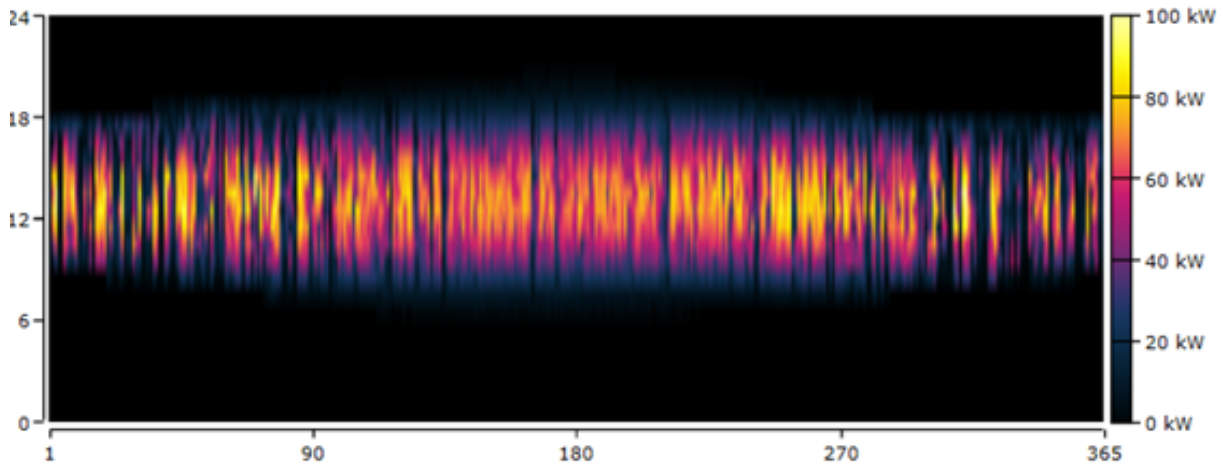
### 5.1.5. FV Güneş Enerjisi Sonuçları

Tartışılan optimum hibrit enerji sistemi için toplam FV güneş enerjisi gücü 96,7 kW'tır. FV güneş enerjisi bu simülasyon için 152296 kWh enerji üretmiştir. Yıllık üretimde, %80,1'lik bir paya sahiptir. Simülasyon sonucu elde edilen FV sisteme ait veriler Tablo 5.6'te daha ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

Tablo 5.6. FV Güneş Enerji sistemine ait Veriler

Toplam Kurulu Kapasite (kW)	96,7
Ortalama Çıkış Gücü (kW)	17,4
Kapasite Faktörü (%)	18
Toplam Üretim (kWh/yıl)	152296
Maksimum Çıkış Gücü (kW)	99,1
İşletme Süresi (sa/yıl)	4388
LCOE (\$/kWh)	0,0234

Şekil 5.8'de sistemin güç çıkış yoğunluk haritası görülmektedir. Bu harita, özellikle üretimin fazla olduğu yaz aylarında daha yoğun bir güç çıkışı olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.8. FV Güneş Enerjisi için Güç Çıkış Yoğunluğu

### 5.1.6. Depolama Sistemi Sonuçları

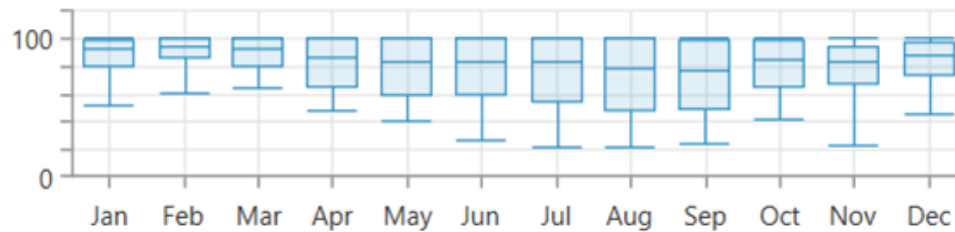
Optimum hibrit enerji sistemi için depolama sistemi hakkındaki simülasyon sonucu ortaya çıkan veriler Tablo 5.7’de verilmiştir. Otonomi süresi, depolama sistemi boyutunun elektrik yüküne oranıdır. Pil aşınma maliyeti, depolama sistemi boyunca enerji çevriminin maliyetidir. Depolama özellikleri depolama ömrünün üretimle sınırlı olduğunu gösteriyorsa HOMER, depolama sisteminin toplam verimi yaşam boyu üretime eşit olduğunda değiştirilmesi gerektiğini varsayar. Bu nedenle, her kWh üretimle birlikte depolama sistemi gerekli değişimine yaklaşır. Bir depolama bileşeninin nominal kapasitesi (veya nominal kapasitesi), tam şarjlı bir durumdan başlayarak belirli bir sabit akımda ondan çekilebilecek enerji miktarıdır. Pilleri derecelendirmek için kullanılan akım, üreticiden üreticiye değişir ancak genellikle 10 saatlik, 20 saatlik veya 100 saatlik orandır. 10 saatlik oran (C10), depolama bileşenini 10 saat sonra boşaltır. Kullanılabilir nominal kapasite, depolamanın minimum şarj durumunun altındaki tüm kapasiteyi hariç tutacak şekilde ayarlanan depolama kapasitesidir. kWh cinsinden ölçülür. Ömür boyu verim, değiştirilmesi gerekmeden önce depolamada dönüştürülebilen toplam enerji miktarıdır. kWh cinsinden ölçülür. Depolama özellikleri, depolama ömrünün üretimle sınırlı olduğunu gösteriyorsa HOMER, bireysel şarj-deşarj döngülerinin derinliğine bakılmaksızın, depolama boyunca sabit miktarda enerji döngüsünden sonra depolama bileşeninin değiştirilmesi gerektiğini varsayar. HOMER, depolama kümesinin ömrünü ve depolama aşınma maliyetini hesaplamak için bu ömür boyu depolama verimini kullanır. Beklenen ömür, depolama sisteminin değiştirilmesi gerekmeden önce dayanacağı yıl sayısıdır. HOMER’da iki bağımsız faktör depolama kümesinin

ömrünü sınırlandırabilir: yaşam boyu üretim ve depolama değişken ömrü. Yani piller ya kullanımdan ya da yaşlılıktan dolayı ölebilir. Yeni bir depolama bileşeni oluşturulduğunda, depolama ömrünün zamanla, üretimle veya her ikisiyle sınırlı olup olmayacağı seçebilmektedir. Enerji girişi, depolamaya yüklenen toplam enerji miktarıdır. Enerji çıkışı, depolamadan boşaltılan toplam enerji miktarıdır. Depolama kapasitesinin tükenmesi, yılın başı ve sonundaki depolama şarj durumu farkıdır. Kayıplar, depolama verimsizliğinden kaynaklanan yıllık enerji kayıplarıdır.

**Tablo 5.7.** FV Güneş Enerji sistemine ait Veriler

Nicelik	Değer
Otonomi Süresi (saat)	18,5
Nominal Depolama Kapasitesi (kWh)	198
Kullanılabilir Depolama Kapasitesi (kWh)	158
Ömür Boyu Verim (kWh)	356062
Yıllık Enerji Girdisi (kWh/yıl)	24986
Yıllık Enerji Çıktısı (kWh/yıl)	22519
Kapasite Tükenmesi (kWh/yıl)	33,5
Kayıplar (kWh/yıl)	2500
Yıllık Verim (kWh/yıl)	23737

Aylara göre şarj seviyesi ortalamalarını gösteren grafik Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Şarj seviyeleri çoğunlukla yüksektir. Pilin maksimum kapasitesi yine pilde depolanmıştır.



**Şekil 5.9.** Şarj Durumu (aylık)

### 5.1.7. Konvertör Sonuçları

Optimum hibrit enerji sistemi için konvertör hakkındaki simülasyon sonucu ortaya çıkan veriler Tablo 5.8'de verilmiştir.

Simülasyon sonucundaki veriler evirici ve doğrultucu kapasitelerinin değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğunu ortaya koymuştur. Sistem için ortalama çıkış güçleri kapasiteye oranla

**Tablo 5.8.** Konvertör Sistemine ait veriler

	<b>Inverter</b>	<b>Rectifier</b>	<b>Units</b>
Kapasite	18,5	34,4	kW
Ortalama Çıkış Gücü	5,13	0,295	kW
Min. Çıkış Gücü	0	0	kW
Maks. Çıkış Gücü	35,8	10,7	kW
Kapasite Faktörü	14,3	0,856	%
Çalışma Süresi	6,701	949	hrs/yr
Enerji Çıkış Miktarı	44,912	2,580	kWh/yr
Enerji Giriş Miktarı	46,881	2,693	kWh/yr
Kayıplar	1,969	113	kWh/yr

düşük kalmıştır, sebebi ise rüzgar türbinlerinin direkt olarak AC barayı beslemesidir. Yani bir doğru akım olmadığı için doğrudan AC ihtiyaç halinde AC yükleri besleyebilmektedir. Bu işlemi, herhangi bir konvertöre ihtiyaç duymadan yapar. Eviriciler, maksimum anlık yükleri karşılamak için tasarlanır. Ancak, bu yükler yıl boyunca nadiren olduğundan, konvertör kapasitesi yüklere göre genel olarak fazla kalır ve kapasite faktörü düşük olur. Enerji çıkış miktarı, evirici için DC kWh/yıl ve doğrultucu için AC kWh/yıl cinsinden konvertöre verilen toplam enerji miktarıdır. Yılda 44912 kWh DC baradan (FV güneş enerjisi) yükü beslemek için alternatif akıma çevrilmiştir ve yükleri beslemek için alternatif akıma çevrilen enerji miktarını ifade etmektedir. Enerji giriş miktarı ise tam tersi olarak AC baradan DC baraya aktarılan enerji miktarını ifade etmektedir. Sistem için konvertöre, yıllık 46881 kWh enerji girişi olmuştur. Evirici ve doğrultucu giriş çıkış miktarları arasındaki fark ise kayıplar olarak işlenmiştir.

## 6. SONUÇ VE GÖRÜNÜM

Bu araştırma, İzmir’de şebekeden bağımsız bir yerleşke için teknik ve ekonomik fizibilitesini değerlendirmiştir. Literatür taraması, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler için çok çeşitli şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı hibrit yenilenebilir enerji sistemleri çalışmalarını kapsamıştır.

Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerine yatırım yapma kararında ekonomik maliyetler ve çevresel faydalar dikkate alınmaktadır. Bu yatırımları teşvik edecek mali teşvikler sağlanacaksa Türkiye’ye özgü en etkin ve verimli politika araçlarının belirlenmesi için daha fazla araştırma yapılması gerekecektir.

Bu araştırmanın bulguları, şebekeden bağımsız bir FV güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi sisteminin şebekeye bağlı sistemlere ekonomik açıdan uygun bir alternatif olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, şebekeden bağımsız sistemlerin, ulusal şebeke bağlantılarına göre daha ucuz bir alternatif olduğunu ortaya koyan önceki uluslararası bulguları desteklediği için önemlidir. Bu, her bir benzersiz konumu ve elektrik yükünü doğru bir şekilde değerlendirmek için vaka çalışmalarının önemini vurgulamaktadır. Ancak bu araştırma, kırsal bölgelerin yenilenebilir teknoloji için iyi bir konumda olduğu konusunda hemfikiridir. Eğer yasal mevzuat düzenlenir ise, kış aylarındaki düşük tüketimde konut talebinin en yüksek olduğu zamanlarda fazla elektriğin şebekeye satılmasına olanak tanıyabilir. Eğer bu mevzuat olmaz ise kırsalda ve şebekenin olmadığı bölgelerdeki yük talepleri fosil yakıtların kullanımını tetikleyecektir.

Şebekeden bağımsız sistemler, önceden mevcut bir şebeke bağlantısı olduğunda gereksiz derecede pahalı bir yatırım olarak göz ardı edildi, hattın yükseltilmesi veya yeni bir şebeke bağlantısı kurulması gibi alternatif seçeneklerin bulunduğu uzak bölgelerde şebekeden bağımsız sistemlerin haklı gösterilebileceği geçmiş çalışmalarda tartışılmıştır. Nispeten daha pahalı olduğuna karar verilmiştir. Bu araştırmanın temel motivasyonu, özellikle Türkiye’nin kırsal ve uzak bölgelerinde elektrik ulaşmayan bölgelerde şebekeden bağımsız sistemlerin kullanımını teşvik etmektir. Ayrıca eğer şebekeye satış imkanı olsaydı bu sistemlerin kullanımının artacağı öngörülmektedir. Ancak Türkiye’de şebekeye geri satış oranları düzenlenmemiştir ve bu durum, oranların ilgili kurum tarafından değiştirilmesi halinde şebekeden bağımsız hibrit sistemlerin

ekonomik sürdürülebilirliğini tehlikeye atabilir. Türkiye’de garantili tarifeler gibi politika araçlarının uygulamaya konulması riski azaltacak ve şebekeden bağımsız sistemler kurmak isteyen yatırımcıya daha fazla uygunluk sağlayacaktır.



## KAYNAKLAR

- Abbey, C. ve Joós, G., 2008, A stochastic optimization approach to rating of energy storage systems in wind-diesel isolated grids, *IEEE Transactions on power systems* (24), 1, 418–426.
- Aberle, A. G., 2009, Thin-film solar cells, *Thin solid films* (517), 17, 4706–4710.
- Aghamohammadi, M. R. ve Abdolahinia, H., 2013, H. a new approach for optimal sizing of battery energy storage system for primary frequency control of islanded microgrid., *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* (54), 325–333.
- Ajlan, A., Tan, C. W., ve Abdilahi, A. M., 2017, Assessment of environmental and economic perspectives for renewable-based hybrid power system in yemen, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (75), 559–570.
- Alex, Z., Clark, A., Cheung, W., Zou, L., ve Kleissl, J., 2014, Minimizing the lead-acid battery bank capacity through a solar pv-wind turbine hybrid system for a high-altitude village in the nepal himalayes, *Energy Procedia* (57), 1516–1525.
- Araújo, S. V., Zacharias, P., ve Mallwitz, R., 2009, Highly efficient single-phase transformerless inverters for grid-connected photovoltaic systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* (57), 9, 3118–3128.
- Baba, T., 1995, Proceedings of 13th european photovoltaic solar energy conference, s. 1708–1711.
- Bakirci, K., 2012, General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (16), 8, 6149–6159.
- Balat, H., 2008, Contribution of green energy sources to electrical power production of turkey: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (12), 6, 1652–1666.
- Baneshi, M. ve Hadianfard, F., 2016, Techno-economic feasibility of hybrid diesel/pv/wind/battery electricity generation systems for non-residential large electricity consumers under southern iran climate conditions, *Energy Conversion and Management* (127), 233–244.
- Bergey, 2023, Bergey excel 6, the wise choice for performance, reliability, and ruggedness.
- Bilir, L. ve Yildirim, N., 2018, Modeling and performance analysis of a hybrid system for a residential application, *Energy* (163), 555–569.

Blueenergy, 1999, Solarwind™ turbine.

Cochrane, R., 2006, Vertical-axis wind turbine with led display, GB Patent 2415750.

Demiroren, A. ve Yilmaz, U., 2010, Analysis of change in electric energy cost with using renewable energy sources in gökceada, turkey: An island example, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (14), 1, 323–333.

Diehl, W., Sittinger, V., ve Szyszka, B., 2005, Thin film solar cell technology in germany, *Surface and coatings technology* (193), 1-3, 329–334.

Doran, A., 2008, Classification of wind turbines.

Dragičević, T., Pandžić, H., Škrlec, D., Kuzle, I., Guerrero, J. M., ve Kirschen, D. S., 2014, Capacity optimization of renewable energy sources and battery storage in an autonomous telecommunication facility, *IEEE Transactions on Sustainable Energy* (5), 4, 1367–1378.

El Chaar, L., El Zein, N., ve others, 2011, Review of photovoltaic technologies, *Renewable and sustainable energy reviews* (15), 5, 2165–2175.

El-Houari, H., Allouhi, A., Rehman, S., Buker, M. S., Kousksou, T., Jamil, A., ve El Amrani, B., 2019, Design, simulation, and economic optimization of an off-grid photovoltaic system for rural electrification, *Energies* (12), 24, 4735.

Energytrend, 2022, Pv price trend.

Engin, M., 2010, Bornova için güneş-rüzgar hibrid enerji üretim sistemi tasarımı.

Erdinc, O. ve Uzunoglu, M., 2012, Optimum design of hybrid renewable energy systems: Overview of different approaches, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (16), 3, 1412–1425.

European Wind Energy Association, 2009, Wind energy-the facts: a guide to the technology, economics and future of wind power, *London: Earthscan*.

Eyer, A., Rauber, A., ve Goetzberger, A., 1990, Silicon sheet materials for solar cells, , *Optoelectronics* (5), 239–257.

Falk, A., Meinhardt, M., ve Wachenfeld, V., 2009, Efficiency and grid compatibility of photovoltaic inverters—state-of-the-art and future trends, In *Proceedings of the European Conference on Power Conversion and Intelligent Motion (PCIM), Nuremberg, Germany*, s. 14–20.

Fazelpour, F., Soltani, N., ve Rosen, M. A., 2014, Feasibility of satisfying electrical energy needs with hybrid systems for a medium-size hotel on kish island, iran, , *Energy* (73), 856–865.

- Framework, U., 2017, 'unctad' framework for sustainable freight transport (unctad sft framework).
- Fraunhofer Institute for Solar Energy System (ISE), 2018, Study: Levelized cost of electricity—renewable energy technologies,
- Fuentealba, E., Ferrada, P., Araya, F., Marzo, A., Parrado, C., ve Portillo, C., 2015, Photovoltaic performance and lcoe comparison at the coastal zone of the atacama desert, chile, , *Energy Conversion and Management* (95), 181–186.
- Gangopadhyay, U., Jana, S., ve Das, S., 2013, State of art of solar photovoltaic technology, In *Conference papers in energy*, volume 2013, s. 1–9, Hindawi Limited.
- Ghosh, M., Bahr, T., ve Muller, A., 2004, Proceedings of 19th european photovoltaic solar energy conference, s. 560–563, Paris.
- Girma, G. Z., 2014, Technical and economic assessment of solar pv/diesel hybrid power system for rural school electrification in ethiopia, *International Journal of Renewable Energy Research* (3), 3, 735–744.
- Goetzberger, A., Hebling, C., ve Schock, H.-W., 2003, Photovoltaic materials, history, status and outlook, *Materials science and engineering: R: Reports* (40), 1, 1–46.
- Green, M., 1985, Proceedings of 18th ieee photovoltaics specialist conference, s. 39, Las Vegas, IEEE.
- Green, M., 1994, Technical digest of the international photovoltaic science and engineering conference (pvsec), s. 391–394.
- Green, M. A., 2001, Third generation photovoltaics: concepts for high efficiency at low cost, , *Proc. Electrochem. Soc* (10), 3.
- Green, M. A., Emery, K., King, D., Igari, S., ve Warta, W., 2005, Progress in photovoltaics, , s. 0888–6.
- Halabi, L. M., Mekhilef, S., Olatomiwa, L., ve Hazelton, J., 2017, Performance analysis of hybrid pv/diesel/battery system using homer: A case study sabah, malaysia, , *Energy conversion and management* (144), 322–339.
- Hepbasli, A. ve Ozgener, O., 2004, A review on the development of wind energy in turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (8), 3, 257–276.
- HOMER, M. N., 2023, About homer energy.
- Hosenuzzaman, M., Rahim, N. A., Selvaraj, J., Hasanuzzaman, M., Malek, A. A., ve Nahar, A., 2015, Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic

- power generation, , *Renewable and sustainable energy reviews* (41), 284–297.
- IRENA, I. R. E. A., 2022, Renewable power generation costs in 2020, *eBook Partnership*.
- Jäger-Waldau, A., 2006, European photovoltaics in world wide comparison, *Journal of non-crystalline solids* (352), 9-20, 1922–1927.
- Jahangir, M. H., Mousavi, S. A., ve Rad, M. A. V., 2019, A techno-economic comparison of a photovoltaic/thermal organic rankine cycle with several renewable hybrid systems for a residential area in rayen, iran, , *Energy Conversion and Management* (195), 244–261.
- Karakoulidis, K., Mavridis, K., Bandekas, D., Adoniadis, P., Potolias, C., ve Vordos, N., 2011, Techno-economic analysis of a stand-alone hybrid photovoltaic-diesel–battery-fuel cell power system, *Renewable Energy* (36), 8, 2238–2244.
- Kawamoto, K., 2001, 12th international photovoltaic science and engineering conference (pvsec-12), s. 289–290, Jeju, Korea.
- Khare, V., Nema, S., ve Baredar, P., 2016, Solar–wind hybrid renewable energy system: A review, , *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (58), 23–33.
- Kızıltug, M., 2002, Wind energy, , s. 1–70.
- Li, C.-H., Zhu, X.-J., Cao, G.-Y., Sui, S., ve Hu, M.-R., 2009, Dynamic modeling and sizing optimization of stand-alone photovoltaic power systems using hybrid energy storage technology, *Renewable energy* (34), 3, 815–826.
- Luo, Y., Shi, L., ve Tu, G., 2014, Optimal sizing and control strategy of isolated grid with wind power and energy storage system, , *Energy Conversion and Management* (80), 407–415.
- Mahmud, N., Hassan, A., ve Rahman, M. S., 2013, Modelling and cost analysis of hybrid energy system for st. martin island using homer, In *2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)*, s. 1–6, IEEE.
- Mamaghani, A. H., Escandon, S. A. A., Najafi, B., Shirazi, A., ve Rinaldi, F., 2016, Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in colombia, , *Renewable Energy* (97), 293–305.
- Mandelkorn, J. ve Maneck, J., 1972, Proceedings of 9th iee photovoltaics specialist conference, s. 66, IEEE, Silver Spring.
- Mbaka, N. E., Mucho, N. J., ve Godpromesse, K., 2010, Economic evaluation of small-scale photovoltaic hybrid systems for mini-grid applications in far north cameroon, *Renewable Energy* (35), 10, 2391–2398.
- Meteonorm, 2022, Meteonorm version 8 updated historic, current and future data.

MGM, 2023, Resmi İstatistikler.

Miglietta, M. M., Huld, T., ve Monforti-Ferrario, F., 2017, Local complementarity of wind and solar energy resources over europe: an assessment study from a meteorological perspective, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* (56), 1, 217–234.

Molly, J., Keuper, A., ve Veltrup, M., 1993, Statistical wec design and cost trends, In *Proceedings of the European Wind Energy Conference*, s. 57–59.

Mundo-Hernández, J., de Celis Alonso, B., Hernández-Álvarez, J., ve de Celis-Carrillo, B., 2014, An overview of solar photovoltaic energy in mexico and germany, , *Renewable and sustainable energy reviews* (31), 639–649.

NASA, 2023, Prediction of worldwide energy resource (power),

Naskali, P. H., MacLean, A., Gray, N. C., Lewis, J. H., ve Newall, A. P., 2008, Helical wind turbine, US Patent 7,344,353.

Nelson, V., 2009, Wind energy: renewable energy and the environment, *CRC press*.

Nishimura, A., Hayashi, Y., Tanaka, K., Hirota, M., Kato, S., Ito, M., Araki, K., ve Hu, E., 2010, Life cycle assessment and evaluation of energy payback time on high-concentration photovoltaic power generation system, *Applied Energy* (87), 9, 2797–2807.

Noguchi, T., 2006, Windmill for wind power generation, US Patent 7,084,523.

Nordin, N. D. ve Rahman, H. A., 2019, Comparison of optimum design, sizing, and economic analysis of standalone photovoltaic/battery without and with hydrogen production systems, , *Renewable Energy* (141), 107–123.

Ocampo, M. T., 2009, How to calculate the levelized cost of energy-a simplified ap-proach, , *Energy Technology Expert* (28).

Oğulata, R. T., 2003, Energy sector and wind energy potential in turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (7), 6, 469–484.

Ozgur, M. A., 2008, Review of turkey's renewable energy potential, *Renewable Energy* (33), 11, 2345–2356.

Pai, M., McCulloch, M., Gorman, J. D., Pai, N., Enanoria, W., Kennedy, G., Tharyan, P., ve Colford Jr, J. M., 2004, Systematic reviews and meta-analyses: an illustrated, step-by-step guide., *The National medical journal of India* (17), 2, 86–95.

Panapakidis, I. P., Sarafianos, D. N., ve Alexiadis, M. C., 2012, Comparative analysis of different grid-independent hybrid power generation systems for a residential load, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (16), 1, 551–563.

- Parida, B., Iniyar, S., ve Goic, R., 2011, A review of solar photovoltaic technologies, *Renewable and sustainable energy reviews* (15), 3, 1625–1636.
- Parrado, C., Girard, A., Simon, F., ve Fuentealba, E., 2016, 2050 lcoe (levelized cost of energy) projection for a hybrid pv (photovoltaic)-csp (concentrated solar power) plant in the atacama desert, chile, , *Energy* (94), 422–430.
- Prabhakant, Agrawal, B., ve Tiwari, G., 2010, Return on capital and earned carbon credit by hybrid solar photovoltaic—wind turbine generators, , *Applied Solar Energy* (46), 33–45.
- PVGIS, 2023, Photovoltaic geographical information system.
- Qardran, M., Jenkins, N., ve Wu, J., 2018, Smart grid and energy storage, In *McEvoy's Handbook of Photovoltaics*, s. 915–928, Elsevier.
- Quintana, M., King, D., McMahon, T., ve Osterwald, C., 2002, Commonly observed degradation in field-aged photovoltaic modules, In *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002.*, s. 1436–1439, IEEE.
- Ralph, E., 1975, Recent advancements in low cost solar cell processing, In *11th Photovoltaic Specialists Conference*, s. 315.
- Razykov, T. M., Ferekides, C. S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, H. S., ve Upadhyaya, H. M., 2011, Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects, *Solar energy* (85), 8, 1580–1608.
- Resmi Gazete, 2005, 5346 nolu yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi Üretimi amaçlı kullanımına ilişkin kanun, 18.05.2005 tarih ve 25819 sayılı Resmi Gazete.
- Roberts, C., 2018, Review of international grid codes, Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Rosenblum, M. ve arkadaşları, 2002, Proceedings of 29th iee photovoltaics specialists conference, s. 58–61, New Orleans.
- Sahu, A., Yadav, N., ve Sudhakar, K., 2016, Floating photovoltaic power plant: A review, , *Renewable and sustainable energy reviews* (66), 815–824.
- Saidur, R., Rahim, N. A., Islam, M. R., ve Solangi, K. H., 2011, Environmental impact of wind energy, *Renewable and sustainable energy reviews* (15), 5, 2423–2430.
- Schock, H., 1996, Thin film photovoltaics, , *Applied Surface Science* (16), 92–606.
- Shaahid, S. ve Elhadidy, M., 2008, Economic analysis of hybrid photovoltaic–diesel–battery power systems for residential loads in hot regions—a step to clean future, *Renewable and sustainable energy reviews* (12), 2, 488–503.

- Shikha, Bhatti, T., ve Kothari, D., 2003, Aspects of technological development of wind turbines, *Journal of Energy Engineering* (129), 3, 81–95.
- Silveira, J. L., Tuna, C. E., ve de Queiroz Lamas, W., 2013, The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in brazil, , *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (20), 133–141.
- Sinha, S. ve Chandel, S., 2015, Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic–wind based hybrid energy systems, , *Renewable and sustainable energy reviews* (50), 755–769.
- SIRIUS, 2022, Elnsm72m-hc-hv serisi, mbb hc monokristalin fotovoltaik modul 540-555w.
- TEİAŞ, 2022, Kasım 2022 kurulu güç raporu.
- Thomas, J., 2007, Colossal magnetic levitation wind turbine proposed, , *Science & Technology, July* (27).
- Tobías, I., del Cañizo, C., ve Alonso, J., 2003, Handbook of photovoltaic science and engineering, chapter 7, s. 255–306, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England.
- Wallace, R., Hanoka, J., Rohatgi, A., ve Crotty, G., 1997, Thin silicon string ribbon, *Solar Energy Materials and Solar Cells* (48), 1-4, 179–186.
- Zervos, A., 2009, Wind power as a mainstream energy source, In *Proc. of the 2009 European Wind Energy Conf.*
- Zhao, J., Wang, A., Altermatt, P., ve Green, M., 1995, Twenty-four percent efficient silicon solar cells with double layer antireflection coatings and reduced resistance loss, *Applied Physics Letters* (66), 26, 3636–3638.

## TEŐEKKÜR

Bu tezi tamamlamak zorluklarla, keşiflerle ve büyümeyle dolu bir yolculuk oldu ve bu çabayı mümkün kılan bir destek ağıyla çevrelenmiş olduğum için minnettarım.

Öncelikle tez danışmanım Doç.Dr. Koray Ülgen'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin içgöröleri, yapıcı geri bildirimleri ve teşvikleri bu çalışmanın yönünü ve kalitesini şekillendirmede etkili oldu.

Bu akademik yolculuğumun inişli çıkışlı zamanlarında bana destek, cesaret ve anlayışlarını hissettiren aileme, Gülay'a ve kuzenim Ömer Altay'a teşekkürlerimi sunarım. Yeteneklerime olan inancınız ve koşulsuz desteğiniz benim gücümün temellerini oluşturdu. Etkiniz çok derin ve yolculuğumda yarattığınız kolektif etki için gerçekten minnettarım

Yiğit ERSAN

İzmir-2024