



**MARMARA ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**MARMARA ÜNİVERSİTESİ GÖZTEPE**  
**KAMPÜSÜ İÇİN HİBRİT ENERJİ**  
**SİSTEMLERİNİN TEKNO-EKONOMİK VE**  
**ÇEVRESEL AÇIDAN İNCELENMESİ**

---

---

ERCAN AYKUT

**DOKTORA TEZİ**

Elektrik Eğitimi

Anabilim Dalı

Elektrik Eğitimi Programı

**DANIŞMAN**

Doç. Dr. Ümit K. TERZİ

İSTANBUL, 2019



**MARMARA ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**MARMARA ÜNİVERSİTESİ GÖZTEPE**  
**KAMPÜSÜ İÇİN HİBRİT ENERJİ**  
**SİSTEMLERİNİN TEKNO-EKONOMİK VE**  
**ÇEVRESEL AÇIDAN İNCELENMESİ**

---

---

ERCAN AYKUT

(722308001)

**DOKTORA TEZİ**

Elektrik Eğitimi

Anabilim Dalı

Elektrik Eğitimi Programı

**DANIŞMAN**

Doç. Dr. Ümit K. TERZİ

İSTANBUL, 2019

# MARMARA ÜNİVERSİTESİ

## FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Öğrencisi Ercan AYKUT'un "Marmara Üniversitesi için Hibrit Enerji Sistemlerinin Tekno-ekonomik ve Çevresel Etkenler Bakımından İncelenmesi" başlıklı tez çalışması, 10/07/2019 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

### Jüri Üyeleri

Doç.Dr. Ümit Kemalettin TERZİ  
Marmara Üniversitesi

(Danışman)



Prof.Dr. B. Koray TUNÇALP  
Haliç Üniversitesi

(Üye)



Dr. Öğr. Üyesi Ulvi BAŞPINAR  
Marmara Üniversitesi

(Üye)



Doç.Dr. Nazmi EKREN  
Marmara Üniversitesi

(Üye)



Doç.Dr. Tahir Çetin AKINCI  
İstanbul Teknik Üniversitesi

(Üye)



### ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 10.07/2019 tarih ve 2019/14-02 sayılı kararı ile Ercan AYKUT'un Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı Elektrik Eğitimi Programında Doktora derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Bülent EKİCİ



## **ÖNSÖZ**

Tez çalışmamın tüm aşamalarında bilgi, deneyim ve yardımlarını esirgemeyen, olumlu teşvikleri ile çalışma motivasyonumu sürekli arttıran, birlikte çalışmaktan onur duyduğum danışman hocam Doç.Dr. Ümit Kemalettin TERZİ'ye, tez süresince gösterdiği ilgi ve desteklerinden dolayı Dr. Öğretim Üyesi Nazmi EKREN'e, emeklerinin karşılığını ödeyemeyeceğim annem başta olmak üzere tüm aileme, gösterdiği sabır ve özveriden dolayı eşim Zehra AYKUT'a ve çocuklarım Tarık, Sare ve Hale AYKUT'a teşekkürlerimi sunarım.

**Haziran 2019**

**Ercan AYKUT**

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET .....	v
ABSTRACT .....	vi
YENİLİK BEYANI.....	vii
SEMBOLLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xi
ŞEKİLLER .....	xii
TABLO LİSTESİ .....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Hibrit Enerji Sistemi.....	2
1.2 Tezin Amacı ...	3
1.3 Literatür Araştırması.....	4
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	10
2.1 Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi .....	10
2.2 Rüzgar Datalarının Analizi.....	10
2.2.1 Rüzgar data analizi için istatistiksel modeller .....	12
2.2.1.1. Weibull Dağılımı .....	12
2.2.1.2 Grafik Metodu .....	16
2.2.2 Rüzgar hızının yükseklikle değişimi .....	17
2.2.3 Rüzgar gücünün yükseklikle değişimi.....	17
2.2.4 Rüzgar Karakteristiğinde Kapasite Faktörü, Güç ve Enerji Yoğunluğu .....	18
2.2.5 Rüzgar Güç Performansının Değerlendirilmesi .....	20
2.3 Güneşten Elektrik Elde Etme Teknolojileri .....	21
2.3.1. Güneş Enerjisi Isı Teknolojileri Ve Uygulamaları .....	23
2.3.2 Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi ve Uygulamaları.....	27
2.3.2.1. Fotovoltaik Sistemler.....	27
2.3.2.2 Güneş Hücrelerin Yapısı ve Çalışma Biçimi.....	27
2.3.2.3 Güneş Takibi Yapan Sistemler .....	32
2.4 Biokütle Enerji Teknolojileri.....	33
2.5 Biokütle Enerjisinin Kaynakları .....	35
2.5.1 Enerji Elde Edilen Bitkiler .....	36
2.6 Biokütle Oluşum Süreçleri .....	36

2.6.1 Termokimyasal İşlemler .....	38
2.7 Biyoyakıtlar ..	42
2.7.1 Biyogaz Teknolojisi.....	45
2.7.2 Biyogaz Üretim Tesisleri.....	47
2.8 Doğrultucu ve Eviriciler .....	49
2.9 Homer Yazılımının Tanıtılması.....	50
2.10 Hibrit Güç Üretim Sistemlerinin Modellenmesi .....	60
2.10.1 Yükün Modellenmesi .....	61
2.10.2 Enerji Kaynaklarının Modellenmesi.....	65
2.10.2.1 Rüzgar Enerji Kaynağı .....	65
2.10.2.2. Güneş Enerji Kaynağı.....	68
2.10.2.3 Biokütle Enerji Kaynağı .....	70
2.10.3 Güç Üretim Sistemi Bileşenlerinin Modellenmesi.....	72
2.10.3.1 Rüzgar Türbini Modeli .....	72
2.10.3.2 PV Panel Modeli.....	76
2.10.3.3 Inverter Modeli .....	78
2.10.3.4 Şebeke Modeli .....	79
2.10.3.5 Biogaz Jeneratörü Modeli.....	79
2.11 Kyoto Protokolü ve Emisyonların Azaltılması.....	79
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	81
3.1 Şebeke Bağlantılı Rüzgar/Güneş/Biokütle Hibrit Güç Üretim Sistemi .....	81
3.1.1 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş/Biokütle Hibrit Güç Üretim Sisteminin Ekonomik Açıdan İncelenmesi.....	83
3.1.2 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş/Biokütle Hibrit Güç Üretim Sisteminin Çevresel Açıdan İncelenmesi .....	85
3.2 Şebeke Bağlantılı Rüzgar Güneş Hibrit Güç Üretim Sistemi.....	86
3.2.1 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş Hibrit Güç Üretim Sisteminin Ekonomik Açıdan İncelenmesi .....	87
3.2.2 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş Hibrit Güç Üretim Sisteminin Çevresel Açıdan İncelenmesi .....	89
3.3 Şebeke Bağlantılı Rüzgar Biokütle Hibrit Güç Üretim Sistemi .....	90
3.3.1 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Biokütle Hibrit Güç Üretim Sisteminin Ekonomik Açıdan İncelenmesi .....	91
3.3.2 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Biokütle Hibrit Güç Üretim Sisteminin Çevresel Açıdan İncelenmesi .....	93
3.4 Şebeke Bağlantılı Güneş Biokütle Hibrit Güç Üretim Sistemi .....	94
3.4.1 Şebeke bağlantılı Güneş/Biokütle Hibrit Güç Üretim Sisteminin Ekonomik	

Açıdan İncelenmesi .....	95
3.4.2 Şebeke bağlantılı Güneş/Biyokütle Hibrit Güç Üretim Sisteminin Çevresel Açıdan İncelenmesi .....	97
3.5 Marmara Üniversitesi Göztepe Kampüsü Hibrit Güç Üretim Sisteminin Hassasiyet Analizi ..	100
4. SONUÇLAR.....	104
KAYNAKLAR.....	106
ÖZGEÇMİŞ.....	114

## **ÖZET**

### **MARMARA ÜNİVERSİTESİ GÖZTEPE KAMPÜSÜ İÇİN HİBRİT ENERJİ SİSTEMLERİNİN TEKNO-EKONOMİK VE ÇEVRESEL AÇIDAN İNCELENMESİ**

Günümüzde teknolojinin gelişmesine paralel olarak elektrik enerjisi tüketimi de hızla artmaktadır. Bu enerji talebini karşılayabilmek için enerjinin verimli kullanılması çok önemlidir. Artan yakıt fiyatları, enerji ihtiyacı, kirlenme ve sera gazı salınımı nedeniyle çevre dostu yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı hızla artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli oldukça yüksek olduğu için ülkemizde de jeotermal, rüzgar, güneş, biokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı artış göstermektedir.

Bu tez çalışması kapsamında enerji ihtiyacının konvansiyonel enerji kaynakları ile karşılanan Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesi için yenilenebilir enerji kaynakları temelli bir hibrit güç üretim sistemi önerilmiştir. İstanbul'un Kadıköy ilçesine bağlı olan Göztepe mevkiine ait yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli enerji kaynakları türünde detaylı olarak analiz edilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları potansiyelleri detaylı olarak irdelendiğinde rüzgar, güneş ve biokütle enerji kaynakları ile yerleşkenin enerji ihtiyacının karşılanabileceği yapılan potansiyel değerlendirme analizleri ile ön görülmüştür. Yerleşkenin enerji ihtiyacını karşılayacak optimum hibrit yenilenebilir enerji kaynaklarının ve en uygun hibrit güç üretim konfigürasyonların belirlenmesinde Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarında geliştirilmiş ve güvenilirliği ispatlanmış olan HOMER yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. HOMER yazılımı ile yerleşkenin enerji ihtiyacını karşılayacak tüm hibrit güç üretim senaryoları detaylı olarak analiz edilmiştir. Birim enerji maliyetini dikkate alarak en optimum güç üretim sistemi belirlenmiştir. Aynı zamanda her bir hibrit güç üretim sistemi için bugünkü toplam net maliyet, başlangıç maliyeti ve bakım onarım maliyeti gibi diğer ekonomik parametreler yanında CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> gibi sera gazı emisyonlarını içeren çevresel parametreler de incelenmiştir.

**Haziran 2019**

**Ercan AYKUT**

## **ABSTRACT**

### **TECHNO-ECONOMICAL AND ENVIRONMENTAL ASSESMENT OF HYBRID ENERGY SYSTEMS FOR MARMARA UNIVERSITY**

Nowadays, parallel to the advance in technology, electric energy consumption is increasing rapidly. In order to supply the energy demand, it is significant to use energy efficiently. Due to the increasing fuel price, energy need, environmental pollution and emission of greenhouse gas, the use of renewable energy sources is growing. Because of the potential of renewable energy is high in Turkey, renewable energy sources such as geothermal, wind, solar and biomass are used to generate electrical energy in many districts. In the content of this thesis study, an optimum renewable energy based hybrid power generation system is proposed for Marmara University Goztepe Campus whose energy is normally supplied by conventional energy resources. In the study, the potential of renewable energy is analyzed in detail by means of the renewable sources. According to the analysis it is clear that the energy need of the Goztepe campus can be supplied by wind, solar and biomass resources. HOMER software which is developed by the American National Renewable Energy Laboratory is used to determine the optimum hybrid renewable power generation system and its configurations. All of the hybrid renewable power generation system sceneries supplying the energy demand of the campus is investigated in detail. Considering the unit energy cost, the optimum systems is determined. Meanwhile, besides the economical parameters such as net present cost, initial cost and maintenance cost, environmental parameters including greenhouse gas emissions such as CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> is examined for each hybrid renewable power generation system.

**Haziran 2019**

**Ercan AYKUT**

## YENİLİK BEYANI

Göztepe Yerleşkesi civarında Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğüne ait rüzgar ölçüm istasyonundan alınan 2015-2017 yıllarına ait rüzgar hızı verileri elde edilmiştir. Saatlik rüzgar hızı verileri frekans – sıklık verilerine dönüştürülerek rüzgar potansiyel belirleme çalışmalarında kullanılan Weibull ve Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonları ile ilgili gerekli hesaplamalar hem analitik hem de MATLAB yazılımı ile detaylı analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda Göztepe Yerleşkesinin ortalama rüzgar hız değerleri (olasılık ve analitik temelli) ve Y erleşkenin birim rüzgar gücü ve enerji yoğunlukları  $W/m^2$  cinsinden belirlenmiştir. Seçilecek ya da kullanılması olası rüzgar türbinlerinin güç performans eğrileri elde edilmiş ve bu türbinlerin mevcut rüzgar hız değerleri ile ne kadar güç üretebildikleri ve her bir türbinin kapasite faktörleri MATLAB yazılımı ile hesaplanmıştır. Göztepe Yerleşkesinin enerji talebine göre 1500kW gücünde beş farklı model rüzgar türbini arasından en uygun olanı diğer bir deyişle kapasite faktörü en yüksek değerde olan seçilmiştir. Dolayısıyla Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesi için en uygun (optimum) rüzgar türbini belirlenmiştir. Ayrıca MATLAB Curve Fitting Toolbox kullanılarak Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonunun en optimum k ve c parametreleri belirlenmiştir. En yüksek kapasite faktörüne sahip olan rüzgar türbini yerleşkenin rüzgar enerji kaynağı olarak belirlenmiştir. Daha sonra rüzgâr türbininin teknik özellikleri ile ilgili veriler HOMER yazılımında kullanılacak şekilde ilgili matematiksel formlara dönüştürülmüştür. Güneş radyasyon verileri Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından ölçülen değerler ile HOMER yazılımının kullandığı formata dönüştürülmüştür. Ayrıca HOMER enlem ve boylam koordinatlarına Graham ve Hollands tarafından geliştirilen Graham algoritmasını kullanarak da güneş radyasyon verilerini aylık ortalama olarak elde etmektedir. Bu çalışmada YEGM'den alınan veriler ile HOMER yazılımdan elde edilen güneş radyasyon değerlerinin karşılaştırılması da yapılmıştır. Aralarında kayda değer bir farkın olmadığı ve HOMER yazılımından alınan verilerin güvenilir olduğu ve kullanılabileceği görülmektedir. Biokütle ham maddesi olan büyükbaş hayvan atığı hesaplamaları yapılarak gerçek zamanlı olarak çiftliklerden toplanacak olan ortalama atık miktarları günlük yaklaşık 10 ton olduğu belirlenmiş ve elde edilen biyogaz miktarı  $2000m^3$  olarak hesaplanmıştır. Bu enerjiyi sağlayacak en uygun biokütle enerji

Üretim sistemi belirlenmiştir. HOMER yazılımına biokütle kaynağını günlük 50 ton olarak veri girişi yapılmıştır. Enerji talebinin yüksek değerlerde olmasından dolayı enerjinin srekliğinin sağlanması ve her daim enerjiye erişim için sistemde şebeke unsuru da dikkate alınmıştır. Literatürde yukarıda bahsedilen yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak bir niversite yerleşkesinin enerji ihtiyaının karşılandığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Çoğunlukla literatürde rüzgar ve güneş temelli g üretim sistemlerinin yoğun bir şekilde kullanıldığı çalışmalar karşımıza çıkmaktadır. Gerçek zamanlı veriler ile bir yerleşkenin enerji ihtiyaının karşılandığı ve biokütle, rüzgar ve güneş kaynağının birlikte kullanıldığı bir çalışmaya tezin detaylı literatür araştırması yaparken rastlanılmamıştır. Dolayısıyla, tez çalışmasının literatüre bu alanda bir katkı sağladığı da görülmektedir. Bu tez çalışması özgünlük bakımından bir fizibilite çalışması olup l ve gereksiz yatırımın önüne geçilmesine doğrudan katkı sağlamaktadır. Kamu kaynaklarının etkin ve verimli kullanılmasına olanak sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasını farklı kılan bir diğer unsur ise çevresel açıdan da bir analiz içermesidir. 2009 yılında Kyoto Protokolü'ne taraf olan Türkiye'nin 2008-2012 yıllarını kapsayan birinci yükümlülük döneminde herhangi bir sayısallaştırılmış salım sınırlama veya azaltma yükümlülüğü bulunmamaktaydı. Fakat günümüzde bu durumun tersi söz konusudur. Tez çalışmasının önemli bir bölümünü oluşturan çevresel etkilerin incelenmesi başlığında bu durum değerlendirilmiş ve elde edilen emisyon değerleri detaylı olarak sunulmuştur. Her bir hibrit güç üretim sistemi türüne göre emisyon değerleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu bağlamda da literatüre ayrı bir katkı sağlamaktadır.

**Haziran 2019**

**Doç. Dr. Ümit Kemalettin TERZİ**

**Ercan AYKUT**

## SEMBOLLER

- $c$  :Weibull skala faktörü
- $CP$  :Kapasite faktörü
- $C_{rep}$  :Elemanın yenileme maliyeti (\$)
- $CRF$  :Anaparayı geri kazanma faktörü
- $COE$  :Birim enerji maliyeti (\$/kWh)
- $C_{NPC}$  :Toplam bugünkü net maliyet (\$)
- $C_{ann,tot}$  :Toplam yıllık maliyeti (\$/yıl)
- $E_{def}$  :Yıl başına ertelenebilir toplam yük miktarı (kWh/yıl)
- $E_{grid,sales}$  :Şebekeye satılan yıl başına enerji miktarı (kWh/yıl)
- $E_{prim}$  :Yıl başına toplam yük miktarı (kWh/yıl)
- $f_i$  :Frekansı
- $f(V)$  :Olasılık yoğunluk fonksiyonu
- $h_{ist}$  :İstenilen yükseklik değeri (m)
- $h_{ref}$  :Rüzgar hızının ölçüldüğü referans yükseklik değeri (m)
- $i$  :Reel faiz oranı (%)
- $k$  :Weibull şekil faktörü
- $n$  :Rüzgar hız veri sayısı
- $P$  :Herhangi bir hub yükseklikteki güç yoğunluğunun değeri ( $W/m^2$ )
- $P_{ref}$  :Referans noktadaki güç yoğunluğu değeri( $W/m^2$ )
- $P_{eR}$  :Elektriksel anma gücü (kW)
- $R_{comp}$  :Elemanın yaşam süresi (yıl)
- $R_{proj}$  :proje ömrü (yıl)
- $R_{rem}$  :Elemanın kalan ömrü (yıl)

- S** :Hurda değeri (\$)
- V** :Rüzgar hızı (m/s)
- V<sub>c</sub>** :Rüzgar türbininin üretime geçebilmesi için gereken rüzgar hızı (m/s)
- V<sub>F</sub>** :Rüzgar türbinini korumak için durdurulması gereken rüzgar hızı (m/s)
- V<sub>i</sub>** :Ele alınan rüzgar hızı aralığının orta değeri(m/s)
- V<sub>ist</sub>** :Değeri bulunmak istenilen yükseklikteki rüzgar hızı (m/s)
- V<sub>m</sub>** :Ortalama rüzgar hızı(m/s)
- V<sub>MaxE</sub>** :Maksimum enerji taşıyan rüzgar hızı(m/s)
- V<sub>MP</sub>** :En çok sıklıkla esen rüzgar hızı(m/s)
- V<sub>R</sub>** :Rüzgar türbininin anma rüzgar hızı (m/s)
- V<sub>ref</sub>** :10m yükseklikteki referans rüzgar hızı (m/s)
- x** :Değişken dönüştürme işlemi
- $\mu_2'$**  :Popülasyonun ikinci hassas nokta momenti
- $\sigma_v$**  :Standart sapma
- Ln** :Gamma fonksiyonu
- CO** :Karbon monoksit
- CO<sub>2</sub>** :Karbon dioksit
- H<sub>2</sub>** :Hidrojen
- N<sub>2</sub>** : Azot
- CH<sub>4</sub>** :Metan

## **KISALTMALAR**

<b>AC</b>	:Alternatif Akım
<b>COE</b>	:Birim Enerji Maliyeti
<b>DC</b>	:Doğru Akım
<b>HOMER</b>	:Çoklu Enerji Kaynaklarının Hibrit Optimizasyonu
<b>M.Ö.</b>	:Milattan Önce
<b>NPC</b>	:Bugünkü Toplam Net Maliyet
<b>NREL</b>	:Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
<b>PV</b>	:Fotovoltaik
<b>EJ</b>	:Eksa Joule
<b>SCWG</b>	:Biokütlenin Süper Kritik Suda Gazlaştırılması
<b>LPG</b>	:Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
<b>YEGM</b>	:Yenilenebilir Enerji Genel Merkezi
<b>BMİDÇ</b>	: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çalıştayı

## ŞEKİLLER

Şekil 2. 1 Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu .....	14
Şekil 2. 2 Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu .....	15
Şekil 2. 3 Farklı şekil faktörleri için Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu .....	16
Şekil 2. 4 Güneş Enerjisinden Direkt ve Endirekt Elektrik Üretme Yöntemleri.....	23
Şekil 2. 5 Düzlemsel Güneş Kolektörlerinin Yapısı.....	24
Şekil 2. 6 Ürün Kurutma ve Seralar .....	25
Şekil 2. 7 İki eksenli olarak güneşi takip eden, güneş enerjisinden elektrik üretimi sistemi.....	26
Şekil 2. 8 Güneş Hücrelerinin Yapısı .....	28
Şekil 2. 9 PN Eklem Oluşumu.....	28
Şekil 2. 10 Fotovoltaik Hücrelerin Birleşmesi .....	29
Şekil 2. 11 PV Sistemin Çalışması .....	30
Şekil 2. 12 Şebekeden bağımsız PV güç üretim sistemleri .....	31
Şekil 2. 13 Şebekeye bağlı PV güç üretim sistemleri.....	32
Şekil 2. 14 Tek eksenli PV takip sistemi .....	33
Şekil 2. 15 İki eksenli PV takip sistemi.....	33
Şekil 2. 16 Biokütle Kaynakları, Dönüşüm İşlemleri Ve Oluşan Biyoyakıtlar.....	37
Şekil 2. 17 Piroliz ve ürünleri .....	40
Şekil 2. 18 Isıtma hızına dayalı piroliz çeşitleri .....	41
Şekil 2. 19 Biyoyakıtların şematik olarak sınıflandırılması .....	43
Şekil 2. 20 Komateryal kullanan bir tarımsal biyogaz tesisi şeması .....	45
Şekil 2. 21 Biyogaz üretim sisteminin elemanları.....	48
Şekil 2. 22 HOMER yazılımının üç temel görevinin şematik gösterimi.....	52
Şekil 2. 23 Hidro/Rüzgar/Dizel/Batarya Hibrit Güç Üretim Sistemi .....	53
Şekil 2. 24 Termal Yüklü Rüzgar/Dizel/Batarya Hibrit Güç Üretim Sistemi .....	53
Şekil 2. 25 PV/Yakıt Hücresi Güç Üretim Sistemi .....	54
Şekil 2. 26 Rüzgar/Dizel/Yakıt Hücresi/Batarya Hibrit Güç Üretim Sistemi .....	54
Şekil 2. 27 Rüzgar/dizel/batarya hibrit güç üretim sistemi .....	56
Şekil 2. 28 Sistem konfigürasyonlarına ait örnek optimizasyon çıktıları.....	58
Şekil 2. 29 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sistemi blok diyagramı .....	61
Şekil 2. 30 Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesine ait yerleşim planı .....	62
Şekil 2. 31 Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesine ait Google Earth Uydu Görüntüsü .....	63
Şekil 2. 32 Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesine ait günlük yük talebi .....	64
Şekil 2. 33 Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesinin 2017 yılı enerji tüketiminin mevsimsel durumu.....	65
Şekil 2. 34 Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesi Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu .....	67
Şekil 2. 35 Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesi kümülatif yoğunluk fonksiyonu .....	67
Şekil 2. 36 10m ve 50m yükseklikteki aylık ortalama rüzgar hız değerleri .....	68
Şekil 2. 37 Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesine ait HOMER'dan alınan güneş radyasyonu ve açıklık indeksi değerleri [78].....	69
Şekil 2. 38 Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesine ait YEGM'den alınan güneş radyasyonu değerleri [98].....	70

Şekil 2. 39 Göztepe yerleşkesi için kullanılacak biokütle miktarı .....	72
Şekil 2. 40 Nordex 1500kW rüzgar türbini güç karakteristiği[82].....	73
Şekil 2. 41 Suzlon S82 1500kW rüzgar türbini güç karakteristiği[83] .....	73
Şekil 2. 42 Goldwind GW 87/1500kW rüzgar türbini güç karakteristiği[84] .....	74
Şekil 2. 43 NEG Micon 1500kW rüzgar türbini güç karakteristiği[85] .....	74
Şekil 2. 44 GE 1500kW rüzgar türbini güç karakteristiği[86] .....	75
Şekil 3. 1 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sistemi blok diyagramı.....	82
Şekil 3. 2 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sistemine ait Aylara Göre Ortalama Elektrik Üretimi .....	83
Şekil 3. 3 Rüzgar/Güneş/Biokütle hibrit sistemi bileşenlerinin nakit akış özeti .....	84
Şekil 3. 4 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş hibrit güç üretim sistemi blok diyagramı ...	86
Şekil 3. 5 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş hibrit güç üretim sisteminin Aylık Ortalama Elektrik Üretimi.....	87
Şekil 3. 6 Rüzgar/Güneş hibrit güç sistemi bileşenlerinin nakit akış özeti .....	88
Şekil 3. 7 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Biokütle hibrit güç üretim sistemi blok diyagramı	90
Şekil 3. 8 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Biokütle hibrit güç üretim sisteminin Aylık Ortalama Elektrik Üretimi .....	91
Şekil 3. 9 Rüzgar/Biokütle hibrit sistemi bileşenlerinin nakit akış özeti.....	92
Şekil 3. 10 Şebeke bağlantılı Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sistemi blok diyagramı	94
Şekil 3. 11 Şebeke bağlantılı Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sisteminin Aylık Ortalama Elektrik Üretimi .....	95
Şekil 3. 12 Güneş/Biokütle hibrit sistemi bileşenlerinin nakit akış özeti.....	96
Şekil 3. 13 Rüzgar hızı ve güneş radyasyon değerlerinin değişimine göre elde edilen optimum hibrit güç üretim sistemleri .....	103

## TABLO LİSTESİ

Tablo 2. 1 Enerji üretiminde kullanılabilir biokütle kaynakları .....	35
Tablo 2. 2 Termokimyasal yöntemlerin çalışma şartları, oluşan ürünler ve kullanım alanları .....	42
Tablo 2. 3 Farklı sistem konfigürasyonu içeren durum.....	57
Tablo 2. 4 2014 - 2015 yıllarına ait rüzgar hız değerleri ve esme sıklıkları.....	65
Tablo 2. 5 2017 yılı Trakya Bölgesi hayvan sayıları.....	71
Tablo 2. 6 Göztepe Yerleşkesi için seçilen türbin tipleri ve kapasite faktörleri.....	76
Tablo 2. 7 PV panel tipleri teknik özellikleri .....	77
Tablo 3. 1 Nakit akışının bileşenlerin maliyetlerine göre analizi.....	84
Tablo 3. 2 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sisteminde şebekenin enerji değişimi .....	85
Tablo 3. 3 Nakit akışının bileşenlerin maliyetlerine göre analizi.....	88
Tablo 3. 4 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş hibrit güç üretim sisteminde şebekenin enerji değişimi .....	89
Tablo 3. 5 Nakit akışının bileşenlerin maliyetlerine göre analizi.....	92
Tablo 3. 6 Şebeke bağlantılı Rüzgar/ Biokütle hibrit güç üretim sisteminde şebekenin enerji değişimi .....	93
Tablo 3. 7 Nakit akışının bileşenlerin maliyetlerine göre analizi.....	96
Tablo 3. 8 Şebeke bağlantılı Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sisteminde şebekenin enerji değişimi .....	97
Tablo 3. 9 Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesi için 4.72m/s ve 4.028kWh/m <sup>2</sup> /d ortalama değerlerinde optimum güç üretim sistemleri ve konfigürasyonları.....	99
Tablo 3. 10 Hassasiyet değerleri.....	100
Tablo 3. 11 Farklı rüzgar hızı ve güneş radyasyon değerlerinde optimum hibrit güç üretim sistemleri ve konfigürasyonları.....	101

## 1. GİRİŞ

Son dönemlerde dünyada ham petrolde yaşanan krizin de etkisiyle, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde alternatif enerji kaynaklarının araştırılması kullanımı yaygınlaşmıştır. Biokütle, rüzgar, güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretilmesi üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarından görüldüğü üzere yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi günümüzde nükleer santraller ile yarışacak durumdadır. Nükleer enerji üzerine yapılan araştırma veya geliştirme, ağırlıklı olarak atıklarının depolanması konusuna odaklanırken, biokütle, rüzgar ve güneşten elektrik enerjisi üretilmesi her geçen gün artmakta, hem çevre sağlığını ve hem de insan sağlığını olumsuz etkilememesi sebebiyle tüm dünyada kullanımı hızlı bir şekilde artmaya ve birçok alanda uygulanmaya başlamıştır. Avantajlarından biri de ekolojik dengeye herhangi bir olumsuz etkisinin olmaması ve çevre dostu olmasıdır. Bu kaynaklar, zaman içinde tükenmeden ve azalmadan var olmaya devam ederler. Bunun yanında doğal gaz, petrol ve kömür gibi geleneksel kaynaklar tükenmesi muhtemel enerji kaynaklarıdır ve her gün gittikçe azalmaktadır. Yakın bir gelecekte dünyadaki ham petrol kaynaklarının ve aynı şekilde nükleer enerjinin temel kaynağı olan toryum ve uranyumun da belli bir zaman içinde tükeneceği iddia edilmektedir. Hem uranyum hem de toryum birer stratejik madde oldukları için, savaş durumunda veya siyasi menfaatler doğrultusunda bu maddelere ambargo uygulanabilir veya kısıtlama getirilebilir. Bundan dolayı, nükleer enerji dışa bağımlı bir enerji türüdür. Bu durum biokütle, rüzgar ve güneş için geçerli değildir. Türkiye'nin kullanımında olan temel enerji kaynakları, petrol, linyit, odun, kömür, doğal gaz, jeotermik ve hidroelektrik olarak gözükmektedir. Türkiye, ana iki maddesi kendi üretimi olmak koşulu ile toplam enerji ihtiyacının yaklaşık olarak %48'ini sağlayabilmektedir. Fosil yakıtlar bakımından fakir bir ülke olan Türkiye, kalan ihtiyacını karşılayabilmek için her yıl milyarlarca dolarlık ithalat yapmak zorunda kalmaktadır. Doğrudan üretilmiş elektriği ya da doğal gaz, petrol ve yüksek kalitede kömürü, elektrik üretebilmek için satın almaktadır. Yurdumuzda, en çok kullanılan yenilenebilir enerji biçimi olarak, hidroelektrik enerji ve küçük ölçekli su ısıtmaya yarayan güneş kolektörleri sayılabilir. Doğrudan güneş ve rüzgardan elektrik enerjisi üretimi küçük ölçektir. Dünya genelinde elektrik enerjisinin büyük bir kısmı hidroelektrik, termik (buhar, dizel, kömür) ve nükleer santrallerden sağlanmaktadır[1].

## 1.1 Hibrit Enerji Sistemi

Dünyanın birçok bölgesinde yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi miktarı talep edilen gücü karşılayacak büyüklükte değildir. Alternatif enerji kaynaklarını kullanarak elektrik enerjisi üreten sistemler çoğunlukla termik santraller tarafından desteklenmektedir. Diğer taraftan rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, akarsu enerjisi vb. gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisinin elde edilebilirliği insan kontrolünün dışındaki faktörlere bağlıdır. Bu nedenle, yenilenebilir enerji sistemleri klasik enerji kaynakları veya elektrik enerjisi depolama üniteleri tarafından desteklenerek elektrik enerjisinin sürekliliği sağlanır. Son zamanlarda yapılan araştırmalar neticesinde alternatif enerji kaynakları kullanılarak tüketicilerin elektrik enerjisi talepleri yeterli ölçüde karşılanamayacağından dolayı klasik ham enerji kaynakları (doğalgaz, petrol, kömür, vb.) ve yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgar, güneş, akarsu enerjisi, biokütle, jeotermal, hidrojen, vb.) birleşiminden ortaya hibrit güç üretim sistemi ortaya çıkmaktadır. Bu şekilde sistem güvenilirliğini artıracığı ve enerjinin sürekliliğini sağlayacağı kanısına varıldığı görülmektedir[2]. Hibrit güç üretim sistemi; en az iki ve daha fazla ham enerji kaynağından enerji üretimini gerçekleştiren sistemlerin ve paralel olarak birbirlerine katkıda bulunan ünitelerdir. Hibrit güç üretim sistemi adı verilen bu enerji üretim ünitelerinden en fazla rüzgar-güneş, rüzgar-dizel, rüzgar-gaz, rüzgar-mikro hidroelektrik generatörleri yaygın olarak kullanılmaktadır[3]. Elektrik dağıtım şebekesinden uzak olan küçük yerleşim birimlerinde elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanması durumunda genellikle rüzgar-güneş hibrit güç üretim sistemlerine daha çok gereksinim duyulmaktadır. Orta ölçekli sanayi sitelerinde ve yerleşim birimlerinde elektrik enerjisi ihtiyacı, rüzgar- mikro hidroelektrik üretim üniteleri ile sağlanırken enerjinin devamını sağlamak amacıyla da dizel jeneratörlerden faydalanılmaktadır. Hibrit güç üretim sistemleri genellikle yenilenebilir enerji kaynakları ile konvansiyonel enerji kaynaklarının birleşiminden meydana geldiği bir önceki paragrafta ayrıntılı bir şekilde ifade edilmiştir. Bu gibi güç üretim ünitelerinde iki önemli nokta öne çıkmaktadır. Bunlardan birincisi; konvansiyonel üretim teknikleri nedeni ile daha yüksek emisyon, ikincisi ise yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji yakalama maliyetinin yüksek olmasıdır. Bu dezavantajların yanı sıra diğer bir önemli problem de ilk kurulum maliyetini minimumda, güvenilirliği maksimumda tutacak boyutlandırmanın yapılması gerekliliğidir[4]. Dünya genelinde sayıları oldukça fazla olan küçük kasaba ve köyler,

şehir merkezinden uzak birçok yerleşim birimleri, çiftçiler, küçük ölçekli sanayi işletmeleri ve buna benzer birçok yerleşim birimi elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılan elektrik güç üretim sistemlerinden yoksun durumdadırlar[2]. Bu nedenle; hibrit güç üretim sistemleri elektrik dağıtım şebekesinden oldukça uzakta bulunan küçük ve orta ölçekli tüketicilerin elektrik enerjisi taleplerine karşılık vermek amacıyla tasarlanmış, dünyada birçok uygulamaları bulunmaktadır. Hibrit güç üretim sistemi kurulum aşamasında iken, bölgenin sahip olduğu alternatif enerji kaynaklarının kapasitesinin öncelikli olarak belirlenmesi gerekir. Elde edilecek enerji kapasiteleri yıllık, aylık ve günlük olarak belirlenmelidir. Hibrit güç üretim sistemi, güç elektroniği ara yüzeyi sayesinde şebekeye bağlı veya şebekeden yalıtılmış biçimde işletilmesi için tasarlanırlar. Güç elektroniği ara yüzeyi gerilim, frekans, güç gibi hibrit güç üretim sistemi parametrelerini arzu edilen değerde korumak amacıyla tasarlanırlar. Hibrit güç üretim sisteminden elde edilen enerjinin kaliteli, güvenli ve sürdürülebilir olabilmesi için bugüne kadar yapılan çalışmalarda bazı kontrol yöntemleri incelenmiştir. Daha önceki yapılan çalışmalarda hibrit güç üretim sistemini oluşturan her bir üretim ünitesinden (rüzgar türbini, güneş panelleri ve mikro hidroelektrik) elde edilen gücün veya gerilimin arzu edilen genlikte ve frekansta olması için bazı kontrol metotları (klasik kontrol yöntemler, oransal integral kontrol, bulanık mantık kontrol yöntemi, v.b.) kullanılmıştır. Hibrit güç üretim sisteminin kontrolünde iki önemli husus vardır. Bunlar;

- Hibrit güç üretim sisteminde istenilen çıkış geriliminin, frekansının ve güç sistemi kararlılığının sürekliliğini denetim altına almak amacıyla yapılan dinamik kontrol,
- Güç sistemi işletimini daha iyi düzeye çıkarmak amacıyla tüketicilere farklı enerji kaynaklarından akan enerji akışını dengede tutmak için güç sistemi bileşenlerinin en iyi kombinasyon seçimini gerçekleştiren işletme stratejisidir.

## **1.2 Tezin Amacı**

Tezin amacı Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesinin enerji ihtiyacının hibrit yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak karşılanmasıdır. Güneş, rüzgar ve biokütleden oluşan hibrit sistem sayesinde enerjiye harcanan giderin ve çevreye salınan kirliliğin azaltılması amaçlanmıştır. Tezin analiz kısmını oluşturan hibrit sistem modelleri tek tek incelenmiştir. Analizlerde kullanılmak üzere rüzgar hızı verisi, güneş radyasyonu verisi,

Marmara Üniversitesi Göztepe Kampüsüne ait 2015-2017 yılları arası saatlik yük verileri ve Marmara Bölgesindeki hayvan çiftliklerinden büyükbaş hayvan dışkısı sayısal verileri tedarik edilmiştir. Ayrıca analizlerde kullanılmak üzere hibrit sistem bileşenlerine (rüzgar türbini, biyogaz jeneratörü, dönüştürücü vb.) ait büyüklük, miktar ve maliyet verileri belirlenmiştir. Bütün veriler elde edildikten sonra HOMER yazılımıyla Marmara Üniversitesi Göztepe Kampüsü için muhtemel hibrit sistem modelleri ortaya çıkarılmış ve birim enerji maliyeti, toplam bugünkü net maliyet, yenilenebilir oran açılarından en optimum hibrit sistem belirlenmiştir. Bu optimum hibrit sistemin konfigürasyonları belirlenip sistemin çevresel parametrelerini teşkil eden CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub> ve NH<sub>3</sub> gibi bileşenlerin değerleri hesaplanmıştır. Son olarak hassasiyet analizi yapılarak rüzgar hızı, güneş radyasyon değeri vb. parametrelerin değişimi durumunda hangi sistemin optimum olduğu kararlaştırılmıştır.

### **1.3 Literatür Araştırması**

Magarappanavar ve Koti BEC Basaveshwar Mühendislik Fakültesi kampüsünün enerji ihtiyacını karşılamak için rüzgar/güneş/dizel hibrit güç üretim sisteminin optimizasyonu HOMER yazılımını kullanarak simülasyon modelini gerçekleştirmişlerdir. Hibrit sistem bileşenlerinin boyutlarını optimize etmeyi, üretilen elektrik enerjisinin fazlasını ve karşılanamayan elektrik yükünü minimize etmeyi ve maliyeti düşürmeyi amaçlamışlardır[5]. Olatomiwa ve ark., Nijerya'da cep telefonu baz istasyonunun enerji ihtiyacı için güneş/rüzgar hibrit sisteminin tekno-ekonomik analizini yapmışlardır. Sistemin modellenmesinde, simülasyonunda ve tekno-ekonomik değerlendirmesinde HOMER yazılımını kullanmışlardır. Mevcut baz istasyonunun enerjisi sadece dizel jeneratörler karşılanmakta iken PV/rüzgar/Dizel//batarya ve PV/dizel/batarya olmak üzere iki farklı optimal hibrit sistem modeli ile karşılanmasını planlamışlardır. Bu iki optimal sistemi geleneksel olarak ifade edilen dizel jeneratör sistemi ile karşılatırmışlardır. Ekonomik açıdan en uygun hibrit sistem 10kW PV panel, 5.5kW Dizel jeneratör 64 adet Trojan L16P bataryadan oluşan PV/dizel/batarya hibrit sistem olduğu belirtilmiştir. Bu sistemin bugünkü net maliyetinin 69.811\$ ve birim enerji maliyetinin ise 0,409\$ olduğunu tespit etmişlerdir. PV/dizel/batarya sisteminin dizel sisteme göre yılda 16,4 ton CO<sub>2</sub> emisyonunda azalma sağlayacağını hesaplamışlardır[6] Benzer şekilde Mokheimer ve ark., şebekeden bağımsız güneş/rüzgar/batarya hibrit sisteminin

boyutlandırılması, optimizasyonu için MATLAB yazılımını kullanarak hesaplamalı bir model geliştirmişlerdir. PV, rüzgar gücü, batarya ve dizel jeneratörün matematiksel modelini geliştirmişlerdir. Bu modeller kullanılarak farklı konfigürasyonlar için performans analizlerini yapmışlar ve optimal boyutları belirlemişlerdir. Suudi Arabistan Krallığının doğu bölgesinde bulunan Dhahran şehrinin rüzgar ve güneş verileri kullanılarak güneş/rüzgar/batarya temelli hibrit sistemin HOMER yazılımı ile elde edilen sonuçlar ile MATLAB'den elde edilen sonuçları karşılaştırmışlar ve geliştirdikleri MATLAB modelinin geçerliliğini ispatlamışlardır[7]. Khan ve Iqbal, Newfoundland-Kanada'da enerji taşıyıcı olarak hidrojenli hibrit enerji sistemlerinin kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Farklı türlerde konvansiyonel ve yenilenebilir enerji kaynaklarını, enerji depolama metotlarını ve uygulanabilirliklerini maliyetleri ve performansları bakımından değerlendirmişlerdir. Hibrit sistem boyutlandırılmasında ve optimizasyonunda HOMER'ı kullanmışlardır. Dizel fiyatı, rüzgar hızı, yakıt hücresi maliyeti ve güneş radyasyonu parametrelerini kullanarak hassasiyet analizi yapmışlardır. Günlük 25kW'lık enerji tüketimi olan şebekeden uzak bir ev için hibrit sistem önermişlerdir. Bu ev için en uygun hibrit sistemin rüzgar/dizel/batarya olduğunu ifade etmişlerdir. Fakat yakıt hücresi maliyetinin %15 azaltılması sonucunda rüzgar/yakıt hücresi hibrit sistemin en iyi seçim haline gelebileceğini belirtmişlerdir[8]. Liu ve ark. Avusturalya'da konut ağırlıklı bir yerleşim yerinin elektriğini karşılamak için PV/rüzgar/Biokütle/batarya hibrit güç üretim sistemi için yapılabirlik analizi (fizibilite) gerçekleştirmişlerdir. 200kWh/günlük yüke sahip olan bir sistemi çevresel ve ekonomik açıdan analiz etmişlerdir. Çalışmada sistem maliyeti, enerji birim maliyeti, emisyonlar ve sera etkisi gibi maliyetler hesaplanmıştır. Aylık ve günlük rüzgar hızı ve güneş radyasyonu verileri Avusturalya'nın altı farklı bölgesi için RetScreen yazılımı kullanılarak elde etmişlerdir. Elde edilen verilerin kullanılarak HOMER yazılımı ile hibrit güç üretim sistemini simüle etmişlerdir[9]. Maklad PV/rüzgar/Biokütle/batarya hibrit yenilenebilir enerji sistemi önermiştir. Avusturalya Armidale'de bulunan kentsel konut yapıları için tasarlanan şebekeden bağımsız hibrit yenilenebilir enerji sisteminin boyutlandırılması için optimizasyon prosedürleri belirlemiş ve yorumlamıştır[10]. Pradhan ve ark. ortalama güneş radyasyonu, biokütle miktarı ve ortalama rüzgar hızı verilerini dikkate alarak ve simülasyon çalışmalarında HOMER yazılımı kullanarak PV/rüzgar/biokütle hibrit enerji üretim sisteminin performansını değerlendirmişlerdir. Şehir şebekesinden uzakta bir

yerin şebekeden bağımsız hibrit PV/rüzgâr/Biokütle üretim biriminin performans değerlendirmesi için simülasyon sonuçlarını irdelemişlerdir[11]. Dinçsoy, şebeke bağlantılı hibrit sistemlerde dizel jeneratör kullanılmasının ilk yatırım maliyetleri ile geri ödeme süreleri ile ilgili analizleri yapmak için HOMER programını kullanmıştır. Yaptığı çalışmanın sonucunda rüzgâr ve güneşten oluşan hibrit sistemde şebeke bağlantısı yerine jeneratör kullanılması durumunda ilk yatırım maliyetinin 4-5 kat arttığını, geri ödeme süresinin 5-8 kat arttığını belirtmektedir. İlk yatırım maliyetinin yüksekliği ve geri dönüşüm süresinin uzunluğu sebebiyle, dizel jeneratör içeren sistemlerin uygulanmasının uygun olmadığını belirtmektedir[12]. Engin çalışmasında, seçilen pilot bölgede batarya destekli PV - Rüzgâr hibrit sistemin kullanılabilirliğini incelemiştir. Sistemin tasarımı ve analizi için HOMER programından faydalanmıştır. Seçilen pilot bölgenin rüzgâr hızı, güneş radyasyon değerleri ve sıcaklık değerlerini programa girerek yaptığı analizler sonucunda, PV-rüzgâr sisteminin enerji üretimi için uygun olmadığını belirtmiştir. Bunun nedeni olarak; üretilen enerjinin maliyetinin 0.85\$/kWh olduğunu ve şebekeden satın alınanın ise 0.10 -0.12 \$/kWh aralığında olduğunu göstermiştir[13]. Fazelpour ve ark., İran'ın Kish adasında orta ölçekli bir otel için şebekeden bağımsız hibrit sistemin fizibilitesini incelemişlerdir. Ekonomik açıdan optimizasyonu için HOMER yazılımını kullanmışlardır. Yenilenebilir ve konvansiyonel enerji kaynaklarını maliyet ve verim açısından karşılatırmışlardır. Dizel/Batarya, Rüzgâr/Dizel/Batarya, PV/Rüzgâr/Dizel/Batarya, PV/Dizel/Batarya olmak üzere dört farklı hibrit sistemlerin fizibilitesini değerlendirmişlerdir. Bahsedilen lokasyondaki 125 odalı otelin toplam yıllık elektrik enerji tüketimi 2.628.000 kWh ve pik yükü ise 620kW olduğunu belirtmişlerdir. Bu otelinin enerji ihtiyacının karşılanmasında dört farklı hibrit sistemden ekonomik parametreler açısından en uygun olanın Rüzgâr/Dizel/Batarya hibrit sistem olduğu sonucuna varmışlardır. Bu sistemin 5 adet 20kW Generic rüzgâr türbini, 600kW dizel generatör ve 35 adet bataryadan oluştuğunu ve sistemin bugünkü toplam maliyetinin 7.236.000\$ ve birim enerji maliyetinin ise 0,318\$/kWh olduğunu hesaplamışlardır[14-15]. Varshney ve ark. Narendra Nagar Bloğunda bulunan 209 köy'ün enerji ihtiyacını PV, küçük ölçekli HES, biyogaz, dizel ve batarya bileşenlerinin çeşitli konfigürasyonlarından oluşan hibrit sistem ile karşılamayı planlamaktadırlar. Sistemin boyutlandırılmasında LINDO yazılımını kullanmışlardır. En uygun hibrit sistem olarak PV/mikro HES/Biogaz/Dizel/Batarya sistemini tespit etmişlerdir. Yıllık toplam optimum maliyet ve

birim enerji maliyeti sırasıyla 2.395.115,327Rs ve 6,23 Rs/kWh elde etmişlerdir. Aynı konfigürasyonun parametrelerini HOMER yazılımını kullanarak yıllık toplam optimum maliyeti 5.647.100 Rs ve birim enerji maliyetin 9,6Rs/kWh olarak hesaplamışlardır[16]. Lal ve Laturi Fiji adalarındaki şehir şebekesinden uzak bir yer için Rüzgar/PV/Dizel/Batarya temelli hibrit güç sisteminin fizibilitesini gerçekleştirmişlerdir. Hibrit sistemin optimizasyonu için HOMER yazılımını kullanmışlardır. Bugünkü toplam maliyet ve birim enerji maliyeti açısından optimal hibrit sistem konfigürasyonunu belirlemişlerdir. %10 yıllık kapasite kesintisine izin verilmesi durumunda enerji ihtiyacının tamamının yenilenebilir enerji tabanlı konfigürasyon (Rüzgar/PV/Batarya) ile karşılanabildiğini fakat kapasite kesintisine izin verilmediği durumda dizel jeneratör kullanımının gerekli olduğunu ortaya koymuşlardır. Ek olarak, yenilenebilir enerji bileşenlerinin kullanılmasının sera gazı emisyonlarının azalmasına ve karbon ticaretine katkı sağlayacağını belirtmişlerdir[17]. Maherchandani ve ark., uzak bölgelerin enerji ihtiyacını karşılamak için şebekeden bağımsız Biokütle/PV/Rüzgar bileşenlerinden oluşan hibrit sistemi ekonomik açıdan incelemişlerdir. Ana enerji kaynağı olarak yüksek verimliliği ve etkin maliyetli olması bakımından biokütle jeneratörünü kullanmışlardır. Optimum hibrit sistemin Biokütle/PV/Rüzgar/Batarya olduğunu belirlemişlerdir. Udaipur (Rajasthan) yakınlarındaki küçük ölçekli bir sanayi kuruluşunun günlük toplam yükünün 5.826 kWh, birim enerji maliyetinin 0,037\$/kWh veya 1,85Rs/kWh olduğunu ifade etmişlerdir. Enerji ihtiyacının şebekeden karşılandığında enerjinin birim maliyetinin 4,5Rs/kWh olduğu düşünüldüğünde, hibrit sistem kullanılarak birim enerji maliyetinde %58,8 azalma olacağını hesaplamışlardır[18].

Demirören ve Yılmaz Türkiye'nin en büyük adası olan Gökçeada'nın enerji ihtiyacını yenilenebilir enerji kaynakları ile nasıl karşılanabileceğinin analizini yapmışlardır. Hibrit ve hibrit olmayan yenilenebilir enerji sistemlerinin optimum sistem konfigürasyonu için HOMER yazılımını kullanmışlardır. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla ilgili daha önceki yapılmış çalışmalarda yıllık ortalama değerlere göre maliyet analizi yapıldığını ifade etmişlerdir fakat kendi çalışmalarında HOMER yazılımını kullanarak yıl içinde değişen rüzgar, güneş ve elektrik yükü değerleri kullanılarak gerçeğe en yakın sonuç aldıklarını ifade etmişlerdir. Rüzgar türbinleri, PV paneller, batarya ve yardımcı araçlar içeren farklı senaryolar dikkate alınarak tasarlanan sistemleri modellemişlerdir. Yedek güç olarak şebeke bağlantısı veya dizel jeneratör de modellenmiştir. Gökçeada'nın yenilenebilir

enerji sistemini oluşturan bileşenlerin değerlerini simülasyonla belirlemişlerdir. Enerji kaynağından üretilen enerji yükten daha fazla olduğu durumda oluşan fazla enerjinin, şebekeye satılabileceğini ve birim enerji maliyetinin azaltılabileceğini ifade etmişlerdir[19]. Johnson ve ark., şebekeden bağımsız küçük bir evin PV-Batarya, PV-Jeneratör- Batarya, ve sadece jeneratör olmak üzere üç güç sistemi mimarisini karşılaştırmışlardır. Akşamları mevcut olan yük PV sisteme uygun olmadığı gibi küçük yükler de jeneratörlere uygun değildir. Gücün mevcudiyeti ve güç maliyeti arasındaki ilişkiyi detaylı olarak değerlendirmişlerdir. Sadece jeneratörün ve hibrit sistemin bugünkü net maliyetinin yıllık karşılanamayan yük miktarındaki değişimden etkilenmediğini belirtmişlerdir. Çalışmalarındaki iç aydınlatma yükü için PV/Batarya mimarisi karşılanmayan yük izni %1 ve fazlası olacak şekilde en düşük maliyeti sağladığı görülmüştür[20]. Nema ve Dutta Hindistan'ın batısında Kolkata'da bulunan ve dizel jeneratör ile enerji ihtiyacı karşılanan Teknik kolej için önerilen hibrit enerji sisteminin optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Hibrit sistem için Kolkata'ya (Boylam 88°22' ve Enlem 22°34') ait güneş radyasyon verileri, saatlik rüzgar hızları ve teknik kolejin yük tüketim değerleri HOMER yazılımı kullanılarak hibrit sistemin optimizasyonunu modellemişlerdir. Teknik kolej için hibrit enerji sisteminin detaylı hipotezini analiz etmek için aşağıdaki aşamalar özetlemişlerdir. Bunlar;

- i. 2011 yılı için kolejin elektrik faturaları,
- ii. Yılın her ayına ait yük verilerinin incelenmesi,
- iii. Maksimum, minimum ve ortalama yük talebi,
- iv. HOMER yazılımda güneş datalarının tanıtılması,
- v. Hibrit modelin tasarlanması.

Bu sistem geleneksel dizel jeneratöre göre daha maliyet etkin ve çevre dostudur. Yakıt maliyeti geleneksel dizel jeneratörlere göre yaklaşık 70% - 80% azaltıldığı ve çevreye salınan CO2 ve diğer zararlı gazların emisyonunun da azaldığını tespit etmişlerdir[21]. Dalton ve ark.,100 yataklı büyük ölçekli bir turizm işletmesi için şebekeden bağımsız yenilenebilir enerji sisteminin fizibilite analizini yapmışlardır. Analizde Avustralya Queensland'in sahil bölgesindeki bir otelin yük datalarını kullanmışlardır. Değerlendirme kriteri olarak geri ödeme zamanı, yenilenebilir faktör ve bugünkü net maliyet baz alınmıştır. Turizm sektöründe yenilenebilir enerji kaynakları uygulamalarının az olması

ve büyük otellerde kullanımı ile ilgili çalışmaların olmaması nedeniyle bu sektörde yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin şekilde kullanımı yoktur. Bu çalışmada sadece dizel jeneratör, yenilenebilir enerji sistemleri ve yenilenebilir enerji/dizel hibrit teknolojileri karşılaştırmak için yenilenebilir enerji sistemleri değerlendirme araçlarından HOMER ve HYBRIDS yazılımlarını kullanmışlardır. HOMER saatlik yük verisini kullanırken HYBRIDS her ay için ortalama günlük enerji talebini kullanır. Sonuçlara göre bugünkü net maliyetin en uygun olduğu durum %76 yenilenebilir oranla Dizel/yenilenebilir enerji sistemi modelidir. Sadece dizel jeneratörle karşılaştırıldığında bugünkü net maliyet ve sera gazı emisyonları sırasıyla %50 %65 oranında azaldığını ifade etmişlerdir. Sistemin geri ödeme zamanını 4.3 yıl olarak hesaplamışlardır[22].

## **2. MATERYAL VE YÖNTEM**

### **2.1 Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi**

Rüzgar enerjisinden yararlanmak üzerine yapılan çalışmaların temelinde potansiyel belirleme çalışmaları bulunmaktadır. Rüzgardan elektrik enerjisi üretimine yönelik yapılan çalışmalarda ayrıntılı rüzgar potansiyel değerlendirme çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, ilk aşamada rüzgardan enerji üretimine elverişli olabilecek bölgelere rüzgar ölçüm istasyonları kurulmaktadır. Rüzgar ölçüm istasyonlarından rüzgar hız ve yön verileri belirli zaman aralıklarında ölçülerek, düşük güçlü mikro işlemci kontrollü veri toplama sistemli veri kaydediciler ile veriler toplanmaktadır. Ölçümler genellikle 10m, 20m ya da 30m yükseklikte alınmakta ve veriler birer saatlik ya da 10 dakikalık periyotlarla toplanmaktadır. Toplanan veriler yazılım programı kullanılarak işlenmekte ve arşivlenmektedir. Rüzgar ölçüm verilerine anlam kazandırmak için istatistiksel modeller kullanılmaktadır. Rüzgar verilerinin istatistiksel analizinde hız zaman serisi yerine frekans dağılımının kullanılması daha çok tercih edilmektedir. Frekans dağılımının istatistiksel analizler için daha güvenilir sonuçlar verdiği literatürde yapılan çalışmalar sonucunda ispatlanmıştır.

### **2.2 Rüzgar Datalarının Analizi**

Bir alanın rüzgar enerjisi potansiyelini tahmin etmek için o bölgeden elde edilen rüzgar datalarının doğru bir şekilde toplanması, yorumlanması ve analiz edilmesi gerekir. Ele alınacak bölgeye yakın meteoroloji istasyonundan alınan uzun süreli rüzgar datası ön değerlendirme için kullanılabilir. Bu datanın, potansiyelini belirlemek istediğimiz alanın rüzgar profilini temsil etmek için dikkatli bir şekilde analiz edilmesi gerekir. Ölçüm alınan alanda kaydedilen rüzgar karakteristiği verileri beş yılda yaklaşık %10 değişim göstermektedir. Bu değişimin sebepleri yıllık mevsimsel değişimler, yağış oranları ve diğer etkiler olarak ifade edilmektedir[23,24]

Modern rüzgar ölçüm sistemleri belli zaman aralıklarında ortalama hız değerlerini vermektedir. Birçok rüzgar analiz yazılımında daha çok on dakika zaman aralığı esas alınarak ortalama rüzgar hız datası kaydedilir. On dakika zaman aralığının üzeri bir aralık kullanılmak isteniyorsa, yazılım bu doğrultuda ayarlamaya imkan tanımaktadır. Bu kısa dönem rüzgar datası, birtakım modeller ve yazılımlar yardımıyla rüzgarın sahip olduğu

enerjiyi doğru bir şekilde tahmin etmek için gruplandırılır ve analiz edilir. Bu data ilgilenilen zaman aralığına göre gruplandırılır. Örneğin, farklı saatlerdeki mevcut enerjiyi tahmin etmek için, rüzgar dataları saatlik bazda gruplandırılır. Ayrıca, rüzgar dataları günlük, aylık ve yıllık bazda da sınıflandırılabilir.

Belirli bir alanda rüzgar karakteristiğini belirleyen en önemli bilgilerden biri ortalama rüzgar hızıdır. Ortalama rüzgar hızı ifadesi denklem (2.1)'de görülmektedir.

$$V_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad \text{denklem (2.1)}$$

Burada  $V_i$  rüzgar hızı (m/s)  $n$  rüzgar hız veri sayısıdır. Fakat daha hassas sonuç almak isteniyorsa bu durumda rüzgar enerjisi hesaplamaları için ortalama hız hesaplanırken, her bir hız değerinin küpü hesaba katılmaktadır [23].

$$V_m = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i^3 \right)^{1/3} \quad \text{denklem (2.2)}$$

Rüzgar potansiyelini değerlendirmede, belli bir sürede alınan ortalama rüzgar datası haricinde önemli kritik faktörlerden bir diğeri de rüzgar datasının dağılımıdır. Aynı ortalama rüzgar hız değerine sahip, iki alanda kurulan rüzgar türbinleri hız dağılımlarının farklı olmasından dolayı tamamıyla farklı enerji çıkışına sahip olmaktadır. Belli bir rüzgar veri setindeki değişken hızlar için bir başka ölçü de standart sapmadır. Standart sapma ( $\sigma_v$ ), her bir hızın ortalama değerden sapmasını verir.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - V_m)^2}{n}} \quad \text{denklem (2.3)}$$

Standart sapmanın düşük değerleri veri setinin düzgün dağılmış olduğunu göstermektedir. Standart sapma denklem (2.3)'de ifade edilmiştir. Standart sapma önemli bir kavramdır ve rüzgâr hızlarındaki dalgalanmaları tanımlamak amacıyla kullanılır. Rüzgâr hız verilerinin standart sapması 0 ile 3 m/s arasında olmalıdır [25,26]. Rüzgar değişkenliğinin daha iyi anlaşılması için, datalar genellikle gruplandırılır ve frekans dağılımı şeklinde sunulur. Frekans dağılımı belirli bir aralıktaki hızlar için süre bilgisini verir. Frekans dağılımını oluşturmak için rüzgar hız aralığı eşit aralıklara (0-1, 1-2, 2-3) bölünür ve bu aralıktaki rüzgar hızlarının sayısı belirlenir. Hız değeri frekans dağılımı formunda ifade

edildiği durumda ortalama rüzgar hızı ve standart sapma denklem (2.4) ve (2.5)'deki gibi elde edilir.

$$V_m = \left( \frac{\sum_{i=1}^n f_i V_i^3}{\sum_{i=1}^n f_i} \right)^{1/3} \quad \text{denklem (2.4)}$$

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_i (V_i - V_m)^2}{\sum_{i=1}^n f_i}} \quad \text{denklem (2.5)}$$

$f_i$  frekansı,  $V_i$  ele alınan aralığın orta değerini ve  $V_m$ ' de ortalama hızı temsil etmektedir.

## 2.2.1 Rüzgar data analizi için istatistiksel modeller

Literatürde rüzgar dalarının analizinde kullanılan birçok metot bulunmaktadır. Fakat bu metotlardan sadece iki tanesi geçerliliği ve elde edilen sonuçların tutarlılığı açısından rüzgar dalarının analizinde oldukça sık kullanılmaktadır. Bunlar, Weibull ve Rayleigh dağılımlarıdır.

### 2.2.1.1. Weibull Dağılımı

Weibull dağılımında rüzgar hızındaki değişimler iki fonksiyonla karakterize edilir; olasılık yoğunluk fonksiyonu ve kümülatif dağılım fonksiyonudur. Olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(V)$  belli bir hızdaki rüzgarın esme olasılığını vermekte olup denklem (2.6) ile bulunur.

$$f(V) = \frac{k}{c} \left( \frac{V}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad \text{denklem (2.6)}$$

Burada  $k$  Weibull şekil faktörü ve  $c$  skala faktörüdür. Kümülatif dağılım fonksiyonu, rüzgar  $V$ 'ye eşit ya da daha düşük rüzgar hızlarının esme olasılığını vermektedir. Bu nedenle kümülatif dağılım, olasılık yoğunluk fonksiyonunun integralidir. Denklem (2.7)'de görülmektedir.

$$F(v) = \int_0^a f(V)dV = 1 - e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad \text{denklem (2.7)}$$

Ortalama rüzgar hızı Weibull dağılımı kullanılarak denklem (2.8)'de verilmiştir.

$$V_m = \int_0^{\infty} Vf(V)dV \quad \text{denklem (2.8)}$$

$f(V)$  ifadesi denklem (2.8)'de yerine konulursa, denklem (2.9) elde edilir.

$$V_m = \int_0^{\infty} V \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} dV \quad \text{denklem (2.9)}$$

Denklem (2.9) düzenlenirse denklem (2.10) elde edilir.

$$V_m = k \int_0^{\infty} \left(\frac{V}{c}\right)^k e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} dV \quad \text{denklem (2.10)}$$

Denklem (2.10)'da denklem (2.11)'deki gibi değişken dönüştürme işlemi gerçekleştirilirse, denklem (2.12) elde edilir.

$$x = \left(\frac{V}{c}\right)^k, \quad dV = \frac{c}{k} x^{\left(\frac{1}{k}-1\right)} dx \quad \text{denklem (2.11)}$$

$$V_m = c \int_0^{\infty} e^{-x} x^{\frac{1}{k}} dx \quad \text{denklem (2.12)}$$

Bu ifade denklem (2.13)'de verilen standart Gamma fonksiyonunun genel formudur.

$$\Gamma n = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{n-1} dx \quad \text{denklem (2.13)}$$

Böylece denklem (2.12)'den ortalama hız için denklem (2.14)'deki gibi ifade elde edilir.

$$V_m = c \Gamma \left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad \text{denklem (2.14)}$$

Weibull dağılımı ile rüzgar hızının standart sapması denklem (2.15)'deki gibi ifade edilebilir.

$$\sigma_v = \left(\mu_2' - V_m^2\right)^{1/2} \quad \text{denklem (2.15)}$$

Burada  $\mu_2'$  popülasyonun ikinci hassas nokta momenti olup denklem (2.16)'daki gibi ifade edilir.

$$\mu_2' = \int_0^{\infty} V^2 f(V) dV \quad \text{denklem (2.16)}$$

$f(V)$  ifadesi denklem (2.16)'da yerine yazılırsa, denklem (2.17) elde edilir.

$$\mu_2' = c^2 \int_0^{\infty} e^{-x} x^{2/k} dx \quad \text{denklem (2.17)}$$

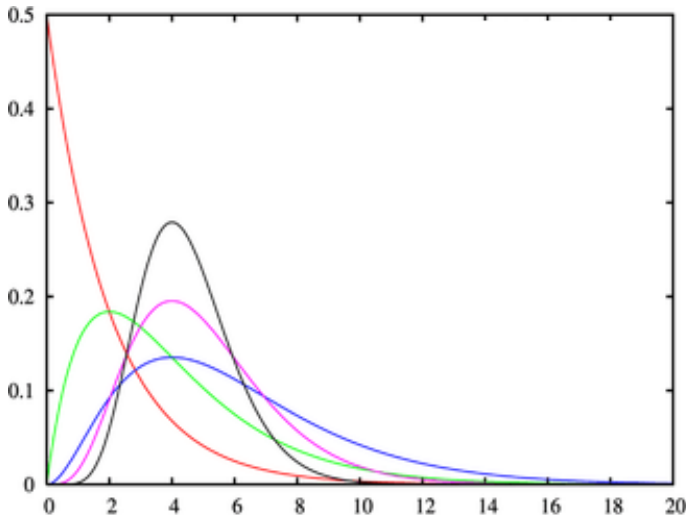
Denklem (2.17) gamma integrali olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\mu_2' = c^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) \quad \text{denklem (2.18)}$$

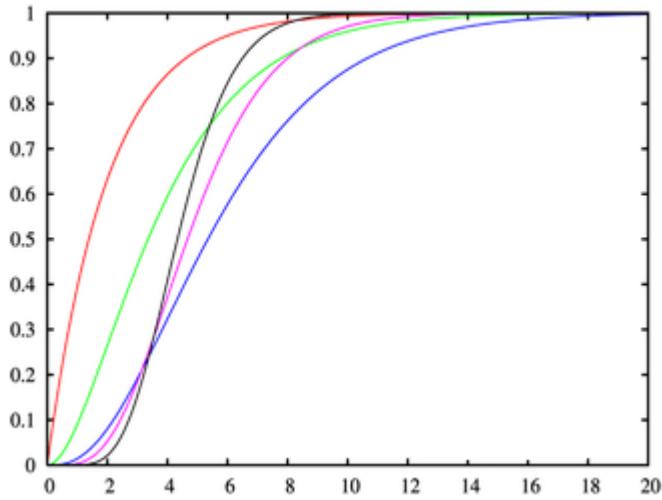
$\mu_2'$  ve  $V_m$  değerleri denklem (2.15)'de yerine koyulursa standart sapma ifadesi denklem (3.19)'daki hali alır.

$$\sigma_V = c \left( \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right)^{1/2} \quad \text{denklem (2.19)}$$

Rüzgar karakteristiğinin Weibull olasılık yoğunluk ve kümülatif dağılım fonksiyonları Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de görülmektedir.



Şekil 2. 1 Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu



**Şekil 2. 2** Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu

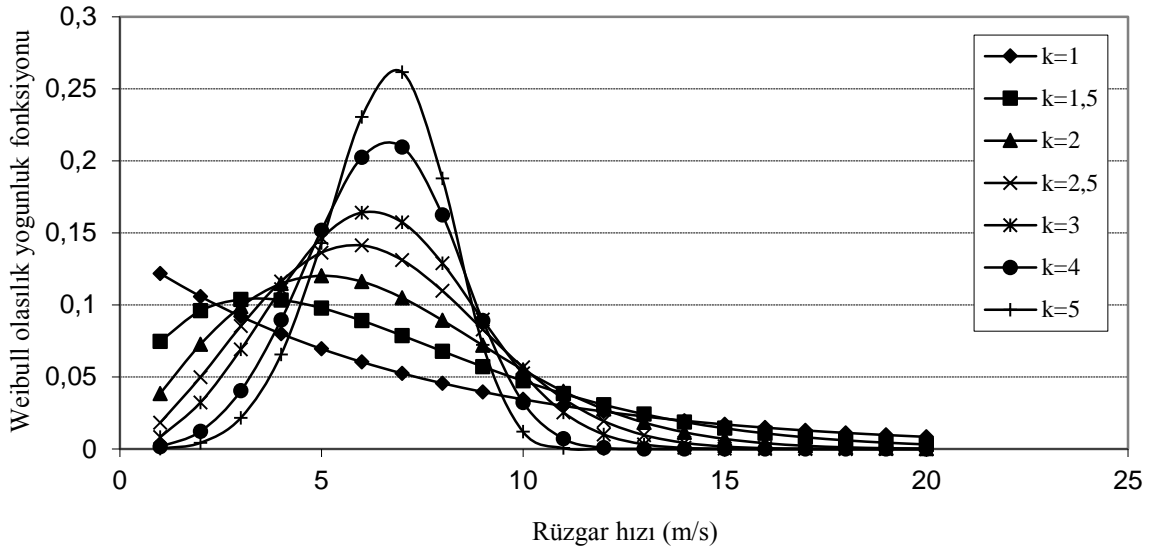
Olasılık yoğunluk eğrisinin maksimum değeri, en muhtemel rüzgar hızı olarak ifade edilen ve rüzgar olasılık dağılımında en çok sıklıkla esen rüzgar hızını temsil etmektedir. En muhtemel rüzgar hızı, maksimum enerji taşıyan rüzgar hızıdır. En muhtemel rüzgar hızı verilen rüzgar olasılık dağılımında en çok sıklıkla esen rüzgar hızını temsil etmekte ve denklem (2.20) ile ifade edilmektedir [27].

$$V_{MP} = c \left( \frac{k-1}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad \text{denklem (2.20)}$$

Maksimum enerji taşıyan rüzgar hızı, rüzgar enerjisinin maksimum miktarını taşıyan rüzgar hızını ifade etmekte ve denklem (2.21)'de görülmektedir.

$$V_{MaxE} = c \left( \frac{k+2}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad \text{denklem (2.21)}$$

Rüzgar karakteristiği denklemlerinde geçen  $k$  ve  $c$  Weibull parametreleridir. Weibull dağılımında rüzgarın en önemli belirleyici faktörü “ $k$ ” şekil faktörüdür. Şekil 2.3’de rüzgarın weibull olasılık yoğunluk fonksiyonunda  $k$ ’nın etkisi görülmektedir. Farklı  $k$  değerlerine göre weibull fonksiyonunun değişimi görülmektedir.



**Şekil 2. 3** Farklı şekil faktörleri için Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu

Weibull dağılımıyla rüzgar karakteristiğini analiz ederken,  $k$  ve  $c$  Weibull parametreleri doğru tahmin edilmek zorundadır. Literatürde  $k$  ve  $c$  parametrelerini belirlemede yaygın olarak kullanılan metotlar mevcuttur. Bu metotlar, grafik metodu, standart sapma metodu, moment metodu, maksimum benzerlik metodu ve enerji faktörü metotlarıdır [28].

### 2.2.1.2 Grafik Metodu

Metotların içinde en yaygın kullanıma sahip olanı grafik metodudur. Hız değer aralıklarına karşılık kümülatif frekans değerleri elde edilir. Dönüşüm aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır.

$$x_i = \ln(v_i) \quad \text{denklem (2.22)}$$

$$y_i = \ln[-\ln(1 - p_i)] \quad \text{denklem (2.23)}$$

$k$  ve  $c$  parametreleri  $y = ax + b$  lineer eşitliğinin sabitleriyle ifade edilebilir.  $k$  ve  $c$  parametreleri denklem (2.24) ve denklem (2.25) ile elde edilmektedir.

$$c = \exp\left(\frac{-a}{b}\right) \quad \text{denklem (2.24)}$$

$$k = b \quad \text{denklem (2.25)}$$

$x_i$  ve  $y_i$  arasındaki ilişki, noktalardan geçirilen  $ax + b$  formunda doğru denkleminde  $a$  ve

b katsayılarını bularak elde edilir. Bu katsayılar dikkate alınarak  $k$  ve  $c$  parametreleri hesaplanır. Elde edilen  $x_i$  ve  $y_i$  değerleri arasındaki ilişkinin grafiği çizilir. Daha sonra elde edilen bu değerlerden  $y=ax+b$  doğru denklemi geçirilir ve doğru denkleminin katsayıları ile  $k$  ve  $c$  parametre değerleri hesaplanır.

### 2.2.2 Rüzgar hızının yükseklikle değişimi

Rüzgar hızı yükseklik ile değişim göstermektedir. 10m yükseklikteki hız değeri referans hız değeri ve yükseklik değeri olan 10m ise referans yükseklik olarak ifade edildiğinde, herhangi bir yükseklikteki rüzgar hız değeri belirlenirken denklem (2.26) kullanılır.

$$V_{ist} = V_{ref} \left( \frac{h_{ist}}{h_{ref}} \right)^m \quad \text{denklem (2.26)}$$

Burada  $V_{ref}$ , 10m yükseklikteki referans rüzgar hızını (m/s),  $h_{ref}$  rüzgar hızının ölçüldüğü referans yükseklik değerini,  $V_{ist}$  değeri bulunmak istenilen yükseklikteki rüzgar hız değerini ve  $h_{ist}$  ise istenilen yükseklik değerini ifade etmektedir. Son olarak rüzgar hızının hub yüksekliği ile değişimini veren ifade eşitlik denklem (2.26)'da görülmektedir.  $m$  değeri, yüzey pürüzlülüğüne ve atmosferik kararlılığa bağlıdır. Nümerik olarak  $m$  değeri 0.05-0.5 arasında değişim göstermektedir. Literatürde birçok çalışmada  $m$  değeri 0.14 olarak alınmaktadır [29-32].

### 2.2.3 Rüzgar gücünün yükseklikle değişimi

Güç yoğunluğu denklem (3.36)'nın her iki tarafının küpünün alınması ile denklem (2.27) elde edilir.

$$\left[ \frac{h}{h_{ref}} \right]^{3\alpha} = \left[ \frac{V^3}{V_{ref}^3} \right] \quad \text{denklem (2.27)}$$

Daha sonra eşitliğin her iki tarafı  $\frac{1}{2} \rho$  ile çarpılarak denklem (2.28) elde edilir.

$$\left[ \frac{h}{h_{ref}} \right]^{3\alpha} = \left[ \frac{\frac{1}{2} \rho V^3}{\frac{1}{2} \rho V_{ref}^3} \right] \quad \text{denklem (2.28)}$$

Burada

$P_{ref}$ ,  $\frac{1}{2}\rho V_{ref}^3$  referans noktadaki referans güç yoğunluğu değerini ve  $P$  ise  $\frac{1}{2}\rho V^3$  herhangi bir hub yükseklikteki güç yoğunluğunun değerini temsil etmektedir. Denklem (3.38) yeniden düzenlendiğinde denklem (2.29) elde edilir.

$$\left[ \frac{h}{h_{ref}} \right]^{3\alpha} = \left[ \frac{P}{P_{ref}} \right] \quad \text{denklem (2.29)}$$

Sonuç olarak herhangi bir hub yüksekliğindeki güç yoğunluğu denklem (2.30)'daki gibi elde edilir.

$$P = P_{ref} \cdot \left[ \frac{h}{h_{ref}} \right]^{3\alpha} \quad \text{denklem (2.30)}$$

## 2.2.4 Rüzgar Karakteristiğinde Kapasite Faktörü, Güç ve Enerji Yoğunluğu

Birim alandaki rüzgar gücü, denklem (2.31)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{P(v)}{A} = \frac{1}{2}\rho v^3 \quad \text{denklem (2.31)}$$

Ortalama rüzgar güç yoğunluğunu hesaplamak için ise en genel form denklem (2.32)'de görülmektedir.

$$P_m = \int_0^{\infty} P(v) = f(v)dv \quad \text{denklem (2.32)}$$

Fakat rüzgar hızlarının anlık değerlerinin ( $V^3$ ) küp değeri biliniyorsa, ( $V^3$ )<sub>m</sub> gibi ortalama bir değer hesaplanır. Ortalama rüzgar güç yoğunluğu denklem (2.33)'daki ifade ile elde edilir [55,66].

$$\frac{P_m(V)}{A} = \frac{1}{2}\rho (V^3)_m \quad \text{denklem (2.33)}$$

Denklem (2.8)' den anlık rüzgar hız verilerinin küpleri denklem (2.34)'deki gibi ifade edilebilir.

$$(V^3)_m = \int_0^{\infty} V^3 f(V) dV \quad \text{denklem (2.34)}$$

Denklem (2.34)'ün integrali alınarak weibull fonksiyonu için aşağıdaki denklem (2.35) elde edilir.

$$(V^3)_m = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} (V_m)^3 \quad \text{denklem (2.35)}$$

Denklem (2.14) ve (2.35) denklem (2.33)'de yerine yazılıp gerekli işlemler yapılırsa Weibull ortalama güç yoğunluğu ifadesi elde edilir.

$$\frac{P_w}{A} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad \text{denklem (2.36)}$$

Denklem (2.14)'de k=2 değeri alındığında denklem (2.37) elde edilir.

$$V_m = c \sqrt{\frac{\pi}{4}} \quad \text{denklem (2.37)}$$

Denklem (2.37)'den c terimi çekilir ve k=2 için alınarak weibull 'un özel bir durumu olan Rayleigh güç yoğunluğu modelini temsil eden denklem (2.38) elde edilir.

$$\frac{P_R}{A} = \frac{3}{\pi} \rho v_m^3 \quad \text{denklem (2.38)}$$

Rüzgar güç yoğunluğu bilinen bir alanın rüzgar enerji yoğunluğu, arzu edilen süreç (aylık, yıllık) için denklem (2.39))'teki gibi elde edilir.

$$\frac{E}{A} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(\frac{k+3}{k}\right) T \quad \text{denklem (2.39)}$$

Burada T zamanın periyodu ya da süredir. Aylık ya da yıllık bazda birim enerji hesaplarında T=720 saat , T=8760 saat olarak alınır[33].

## 2.2.5 Rüzgar Güç Performansının Değerlendirilmesi

Bir bölgenin rüzgar dağılımını tanımlamak ve rüzgar enerji dönüşüm sistemi ile rüzgar arasında enerji değişimini analiz etmek için Weibull ve Rayleigh dağılımları yaygın şekilde kullanılır. Rüzgar türbini uygun modeli ile bölgenin gerçek rüzgar frekans dağılımı eşleştirilerek, enerji çıkışı maksimize edilebilir. Bu yüzden bir rüzgar enerji dönüşüm sistemi, sadece bölgeye özgü türbinin üretime geçebilmesi için gerekli olan rüzgar hızı (cut in speed), anma hızı ve rüzgar türbinini korumak için durdurulması gereken rüzgar hızları (cut out speed) tanımlanarak tasarlandığında, maksimum verimde çalışabilir. Fakat bir bölge için rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi tasarlamak oldukça pahalıdır. Bu yüzden genellikle var olan rüzgar türbinleri arasından en iyisi verilen bölge için seçilir. Farklı rüzgar türbinleri farklı güç performans eğrilerine sahiptir. Bu yüzden performansı belirlemek için kullanılan model de farklıdır. Literatürde, rüzgar türbininin elektriksel çıkış gücünü belirlemek için kullanılan model, denklem (2.40)'da görülmektedir [34].

$$P_e = \begin{cases} 0 & (V < V_c) \\ P_{eR} \frac{V^k - V_c^k}{V_R^k - V_c^k} & (V_c \leq V \leq V_R) \\ P_{eR} & (V_R \leq V \leq V_F) \\ 0 & (V > V_F) \end{cases} \quad \text{denklem (2.40)}$$

Burada,

$P_{eR}$  elektriksel anma gücü (kW)

$V_c$  türbinin üretime geçebilmesi için gereken rüzgar hızını (m/s)

$V_R$  nominal rüzgar hızını (m/s)

$V_F$  rüzgar türbinini korumak için durdurulması gereken rüzgar hızını (m/s)

temsil etmektedir.

Üretilen toplam enerjinin hesaplanmasında rüzgar hızına bağlı olarak türbinin ortalama çıkış gücü çok önemlidir. Bir türbinin ortalama çıkış gücü denklem (2.41)'de görülmektedir.

$$P_{e,ave} = P_{eR} \left\{ \frac{e^{-\left[\frac{V_c}{c}\right]^k} - e^{-\left[\frac{V_R}{c}\right]^k}}{\left[\frac{V_R}{c}\right]^k - \left[\frac{V_c}{c}\right]^k} - e^{-\left[\frac{V_F}{c}\right]^k} \right\} \quad \text{denklem (2.41)}$$

Türbin ortalama gücünün belirli bir zaman periyodunda türbin anma gücüne oranı kapasite faktörü olarak tanımlanır. Denklem (2.42)'de kapasite faktörü eşitliği görülmektedir.

$$CP = \frac{P_{e,ave}}{P_{eR}} \quad \text{denklem (2.42)}$$

### 2.3 Güneşten Elektrik Elde Etme Teknolojileri

Güneşin küreye yakın bir şekli vardır bu yüzden enerjisini her yönde eşit olacak şekilde radyasyon yoluyla yaymaktadır[35]. Güneşin radyasyon enerjisi sayesinde atmosferde ve yeryüzünde oluşan biyolojik ve fiziksel etkileşimler yönlendirilir. Güneşin kütlesi  $1.99 \times 10^{30}$  kg iken yüzeyindeki sıcaklık yaklaşık olarak 6000K ve merkezindeki sıcaklık  $8 \times 10^6$  K ile  $40 \times 10^6$  K arasında değişim göstermektedir[36]. Güneş  $1.392 \times 10^6$  km çapa sahiptir ve dünyaya olan uzaklığı yaklaşık  $1.496 \times 10^8$  km olup saniyede yaydığı radyasyon enerjisi yaklaşık  $4 \times 10^{23}$  kW'tır. Güneşten dünyaya yayılan enerji 8 dakika içinde bu mesafeye ulaşır ve yeryüzü, dünyada bir yıl içinde tüketilen toplam enerji değerinde bir enerjiyi güneş ışınlarından elde eder. Güneş enerjisi, çekirdeğinde hidrojen gazının helyuma dönüşmesiyle, diğer bir deyişle, füzyon işlemi sayesinde ortaya çıkar ve bundan dolayı güneş sürekli bir füzyon reaktörüdür. Hidrojen gazı helyuma dönüşürken saniyede  $4 \times 10^6$  ton kütle enerjiye dönüşür ve yaklaşık olarak  $386 \times 10^6$  EJ (Eksa Joule) (1 EJ = 22.7 Milyon ton eşdeğer petrol) değerinde bir enerji radyasyon şeklinde uzaya yayılır. Bu işlemin milyonlarca yıl daha süreceği düşünüldüğünden güneşin dünya için sonsuz bir enerji kaynağı olduğu düşünülmektedir. Atmosfere gelen güneş ışınlarının yaklaşık %17,5'lik kısmı atmosferi ısıtırken yaklaşık %35'lik kısmı yeryüzünden ve bulutlardan yansır ve uzaya geri döner. Kalan %47,5'lik kısım da yeryüzüne düşer ve ısı enerjisine dönüşür. Atmosferin dışındaki güneş enerjisi değeri  $1370 \text{ W/m}^2$  kadar olup yeryüzüne ulaşan miktarı atmosferdeki kayıplardan dolayı sadece  $0-1100 \text{ W/m}^2$  değerleri arasındadır. Görüldüğü gibi güneşten dünyaya gelen enerjinin az bir miktarı dahi tüm dünyadaki enerji tüketiminden daha fazladır[37].

Güneşin her yere ulaşabilmesi, farklı biçimlere dönüştürülerek kullanılması, sonsuz ve temiz enerji gibi özelliklerinden dolayı enerji üretiminde tercih edilen bir kaynak olmuştur. Yenilenebilir enerjiler arasında son yıllarda en fazla eğilim gösterilen enerji kaynağıdır. Güneş enerjisinden beslenerek çalışan ilk motora 1861 yılında patent alınmış olsa dahi, 1970'lerdeki petrol krizine kadar güneş enerjisi gündeme gelmemiştir [38].

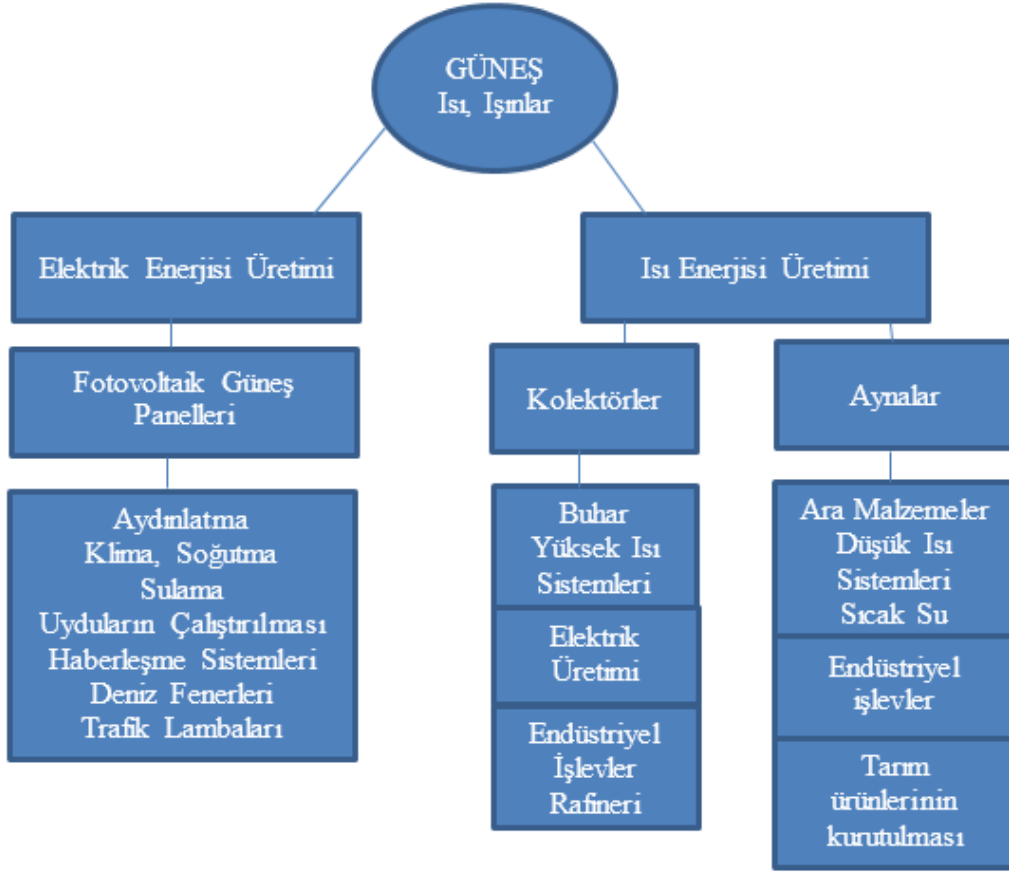
1970'lerde meydana gelen ekonomik kriz sonrası güneş enerjisi kaynağının önemi artmış, temiz bir enerji kaynağı olan güneş enerjisi temelli teknolojilerin gelişimi ivme kazanmıştır. Geleneksel enerji kaynaklarındaki azalma ve küresel siyasetteki değişimler nedeniyle enerji politikalarında radikal kararlar alınmıştır. Bu kararlardan biri de yenilenebilir enerji kaynaklarına daha fazla önem verilmesi olarak ortaya çıkmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından en yaygın olarak kullanılanı Güneş enerjisi teknolojileridir[38].

Güneş enerjisinin birçok farklı kullanım alanı vardır. Bunlar kısaca şöyle sıralanabilir[39]:

- Ev ve işletmelerin iklimlendirilmesinde
- Tuzlu suyun ayrıştırılmasında
- Sıcak suyun temin edilmesinde
- Yüzme havuzlarının ısıtılmasında
- Seraların ısı ihtiyacının giderilmesinde
- Endüstride
- Elektrik üretiminde

Güneş enerjisi teknolojileri ısı üretimi ve elektrik üretimi olmak üzere iki farklı uygulaması vardır. Bunlar:

- Isı üretimi: Bu sistemlerde güneş enerjisi kullanılarak ısı elde edilir. Elde edilen ısı direkt kullanılabilirdiği gibi buhara dönüştürülerek elektrik enerjisi üretiminde de kullanılmaktadır.
- Elektrik üretimi: PV paneller vasıtasıyla güneşten gelen ışık doğrudan elektriğe dönüştürülür.



**Şekil 2. 4** Güneş Enerjisinden Direkt ve Endirekt Elektrik Üretme Yöntemleri

Şekil 2.4'te görüldüğü gibi güneşten elektrik üretimi direkt ve endirekt olarak iki farklı şekilde gerçekleştirilmektedir. Direkt elektrik üretim yönteminde fotovoltaik, termoelektrik ve termo iyonik dönüştürücüler bulunmaktadır. Endirekt üretim yönteminde ise, güneşten faydalanarak elde edilen ısı sonucunda oluşan buhar ve bu buharı elektriğe çeviren sistem veya güneş enerjisinden açığa çıkan hidrojen ve elektrik enerjisine çevrildiği termik elektrik generatörü ya da yakıt piline rastlanmaktadır..

### 2.3.1. Güneş Enerjisi Isı Teknolojileri Ve Uygulamaları

Güneş enerjisinden faydalanılarak yapılan ısıtma sistemlerinde güneş radyasyonu kolektörlerde ısı enerjisine dönüştürülür. Bu ısıyı hava ve su gibi akışkanlar vasıtasıyla direkt olarak veya bir depo da biriktirip kullanıma sunan elektronik veya mekanik sistemlere güneş enerjisiyle ısıtma sistemleri adı verilir. Güneş enerjisinden faydalanarak yapılan ısıtma sistemleri, ısı dağıtımında kullanılan akışkanın cinsine göre iki gruba ayrılır.

- Güneş enerjisinden faydalanarak yapılan su ısıtma sistemleri
- Güneş enerjisinden faydalanarak yapılan hava ısıtma sistemleri

Güneş enerjisiyle yapılan ısıtma sistemleri, oluşacak ısı miktarına göre, düşük sıcaklıkta, orta sıcaklıkta ve yüksek sıcaklıkta kullanımı olacak şekilde üç gruba ayrılır [40].

Birincisi düşük sıcaklıkta kullanımı olup  $100^{\circ}\text{C}$  'den az sıcaklıklardaki uygulamaları içerir. Düşük sıcaklıklar için düzlemsel güneş kolektörleri kullanılır. Güneş havuzlarında ve su arıtma sistemlerinde, ev ve iş yeri ısıtmasında, ürün kurutma seralarında, güneş ocaklarında ve benzer uygulamalarda sıklıkla rastlanır. Düzlemsel güneş kolektörleriyle güneş enerjisi toplanır ve su ve hava gibi bir akışkana aktarılır. Bazı farklı türleri vardır.  $70^{\circ}\text{C}$  civarındaki sıcaklıklara ulaşırlar. Düzlemsel güneş kolektörlerinin yapısı

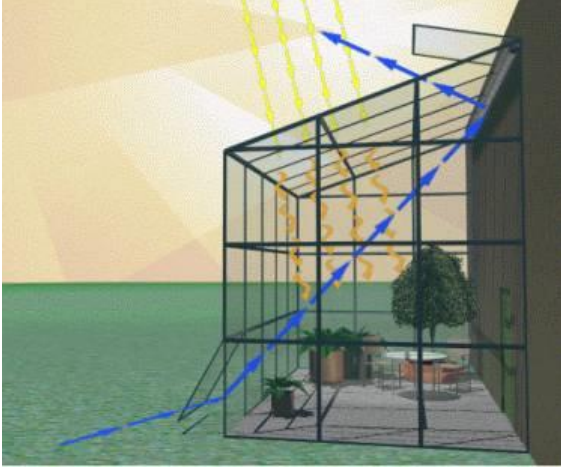
Şekil 2.5'te görülmektedir.



**Şekil 2. 5** Düzlemsel Güneş Kolektörlerinin Yapısı

Kolektörlerin güneşten en yüksek düzeyde yararlanabileceği sabit bir açıda konumlandırılması gerekir. Bu sistemin kullanım alanlarından bazıları da yüzme havuzlarının, ev ve iş yerlerinin sıcak su ihtiyacının karşılanmasıdır. Dünyada birçok ülkede güneş kolektörleri bulunmaktadır. 7,5 milyon m<sup>2</sup> kurulu kolektör alanına sahip

olan ülkemiz sahip olduğu kolektör alanı bakımından tüm dünyada öncü ülkeler arasındadır. Güneş enerjisinden tarım uygulamalarında da faydalanılır. Kurutma ve seralarda çokça kullanılır. Şekil 2.6’da ürün kurutma ve sera uygulamaları görülmektedir. Bu tür sistemlerin dünyada daha çok kırsal yerlerde ve sınırlı bir şekilde kullanımı görülmektedir [40].



**Şekil 2. 6** Ürün Kurutma ve Seralar

İkincisi, orta sıcaklıkta kullanımı olup 100- 350<sup>0</sup>C arası uygulamaları içerir; Bu tür uygulamalarda vakumlu güneş kolektörleri kullanılır. Vakumlu güneş kolektörlerinin bileşenleri arasında vakumlu cam, boru ve gerekli olduğu durumda emici yüzeydeki enerji arttırmak için metalden veya camdan yapılmış reflektörleri vardır. Bu kolektörlerin çıkışları 100<sup>0</sup>C-120<sup>0</sup>C gibi yüksek sıcaklıklara sahip olduğu için, düzlemsel kolektörlerin kullanım alanlarına ek olarak soğutma ve benzeri uygulamalarda yerini almaktadır.

Üçüncüsü de, yüksek sıcaklıkta kullanımı olup, 350<sup>0</sup>C’den daha yüksek sıcaklıkları içerir. Güneş fırınlarında ve güneş kulelerinde, elektrik üretiminde ve madenlerin eritilmesinde sıklıkla uygulanmaktadır.



**Şekil 2. 7** İki eksenli olarak güneşi takip eden, güneş enerjisinden elektrik üretimi sistemi

Parabolik çanaklı sistemlerde güneş iki eksenli olarak takip edilir ve güneş devamlı odak bölgesine yoğunlaştırılır. Şekil 2.7’de iki eksenli olarak güneşi takip eden, güneş enerjisinden elektrik üretimi sistemi görülmektedir. Çanak tipinde olan bu sistemle noktasal yoğunlaştırma yaparak güneşten elektrik üretilmektedir. Isı enerjisi akışkan sıvı vasıtasıyla odak kısmından başlayıp termodinamik bir dolaşıma girer veya odak kısmına takılacak mekanik bir stirling sistem vasıtasıyla direkt olarak elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Stirling çevrimi kullanılarak güneş enerjisinden elektrik elde edilmesinde %30’a yakın verime ulaşılabilir.

Doğrusal yoğunlaştırıcı ısı sistemlerinde en sık parabolik oluklu kolektörler kullanılmaktadır. Kolektörleri, parabolik kesite sahip yoğunlaştırıcı dizileri içerir. İç kısımdaki yansıtıcı yüzeyler sayesinde güneş enerjisi kolektörün odağında bulunan ve kolektörü çevreleyen emici boruya odaklanır. Bu sistemler, üzerine kolektörlerin yerleştirildiği, güneşin doğu ile batı arasındaki hareketini takip eden tek eksenli bir takip sistemine sahiptir. Emici boru içinde dolaştırılan sıvı sayesinde ısı enerjisi elde edilir. Bu ısı, enerji santraline gönderilerek elektrik üretilir. Yoğunlaştırma yapıldığından dolayı bu sistemlerde 350<sup>0</sup>C- 400<sup>0</sup>C gibi daha yüksek sıcaklıklara ulaşılabilir [40].

## 2.3.2 Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi ve Uygulamaları

### 2.3.2.1. Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik (PV) kelimesi anlam olarak ışık ve elektrik kelimelerinden oluşmaktadır. PV sistemler sayesinde güneş ışığı elektrik enerjisine dönüştürülür. Tasarımı iyi yapılmış PV sistemler az miktarda ışık olsa bile yüksek güçlerde elektrik üretimi yapabilir. Avantajlarından bazıları işletme ücretine, enerji kaynağına veya herhangi bir gürültülü makineye ihtiyaç duymamasıdır. Ayrıca havayı kirletmezler ve elektrik üretmek için bir tek güneş ışığına ihtiyaç duyarlar[41]. PV sistemler tarafından üretilen elektrik doğru akım (DC) formundadır. Üretilen bu DC elektrik;

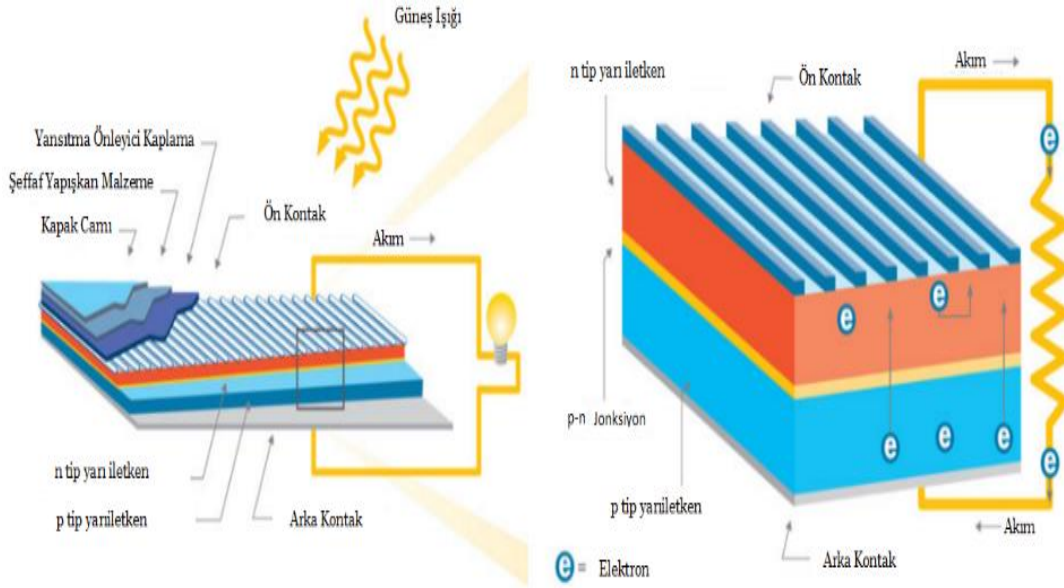
- DC elektriğe ihtiyaç duyan cihazlarda direkt olarak,
- Akülerde depolanıp ihtiyaç duyulduğunda,
- Alternatif akım (AC) ihtiyacı olan cihazlarda kullanılabilmesi için AC akıma çevrilerek kullanılır.

Güneş radyasyonunun etkisiyle p tipi ve n tipi olmak üzere iki ayrı tip malzemenin bir araya gelmesi sonucunda aralarında kalan ortak alanda oluşan potansiyele Fotovoltaik etki denir. 1839 yılında Fransız bilim adamı Becquerel tarafından ortaya atılmıştır[42]. PV paneller olarak adlandırılan yarı iletken malzemeler sayesinde güneş ışığı direkt olarak elektriğe dönüştürülür. PV panellerin yüzeyi çoğunlukla dikdörtgen, daire veya kare şeklinde olup kapladıkları alan 1m<sup>2</sup> civarındadır ve kalınlığı 0,2-0,4mm arasındadır. PV panellerin çalışma şekli fotovoltaik etki prensibine dayanır. Yüzeylerine güneş ışığı geldiği zaman uçlarında DC voltaj meydana gelir. PV paneller ile güneş ışığından elektrik elde ederken % 5 - %20 arası bir verime sahip olunabilir[40].

### 2.3.2.2 Güneş Hücrelerin Yapısı ve Çalışma Biçimi

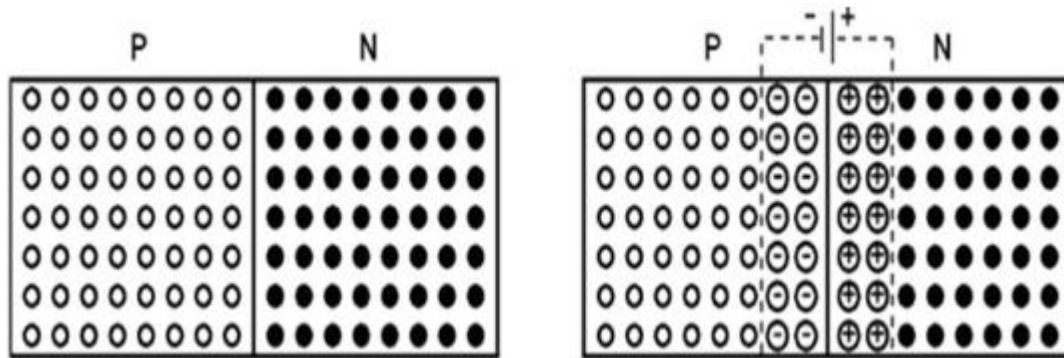
Güneş hücrelerinin yapısında n tipi veya p tipi katkı yapılmış yarı iletken malzemeler bulunur. Gerekli katkı maddeleri erimiş haldeki yarı iletken malzemeye olması gerektiği oranda eklenerek katkı işlemi yapılmış olur. Katkı yapılan malzemeye göre meydana gelen iletken n tipi ya da p tipi olur. Güneş hücresi yapımında kullanımı en uygun olan yarı iletken malzemelerden bazıları kadmiyum, galyum, tellür, silisyum ve arsenittir. P tipi ve n tipi yarı iletkenler birlikte kullanılmadan önce iki malzeme de elektrik yükü

olarak nötrdürler dolayısıyla devrede akım dolaşmaz. Şekil 2.8’de güneş hücrelerinin yapısı görülmektedir.



**Şekil 2. 8** Güneş Hücrelerinin Yapısı

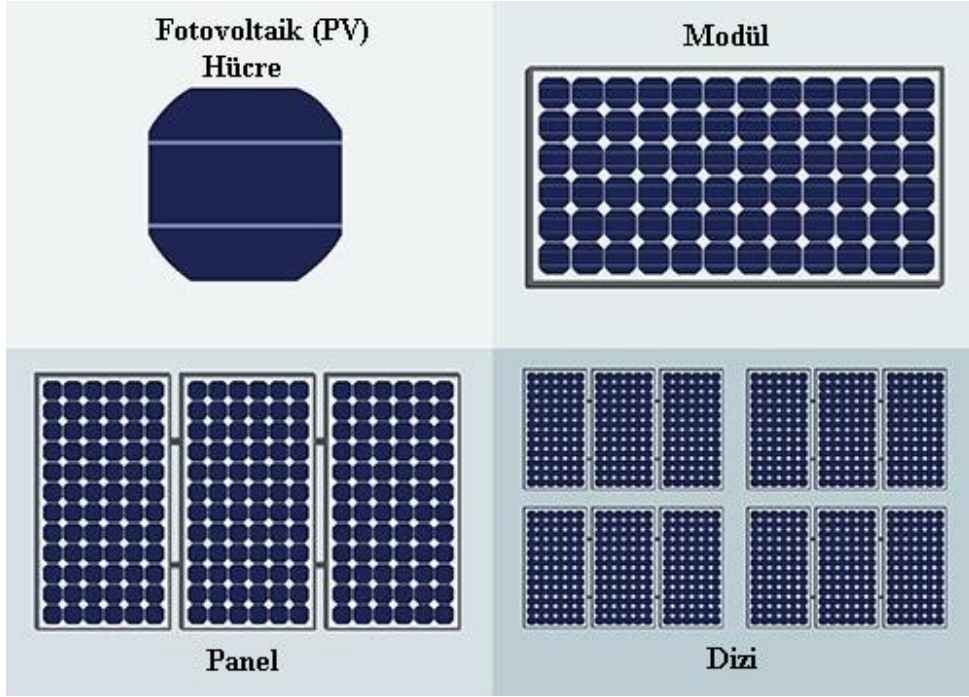
P-N eklemi meydana geldiğinde n tipi malzemedeki taşıyıcı elektronların p tipi malzemeye doğru hareketiyle akım oluşur ve bu durum iki malzemede de yük dengelenene kadar devam ederek elektrik akımını oluşturur. Yarı iletken eklemi güneş hücresi olarak çalıştırmak için eklem alanında iki aşamalı fotovoltaiik dönüşüm meydana gelmelidir. Birinci aşamada eklem alanına ışığın gelmesiyle elektron-hol çiftleri oluşur. İkinci aşamada ise bu çiftler eklem bölgesindeki elektrik vasıtasıyla birbirinden uzaklaşır. Şekil 2.9’da PN eklemin oluşma şeması görülmektedir.



**Şekil 2. 9** PN Eklemin Oluşumu

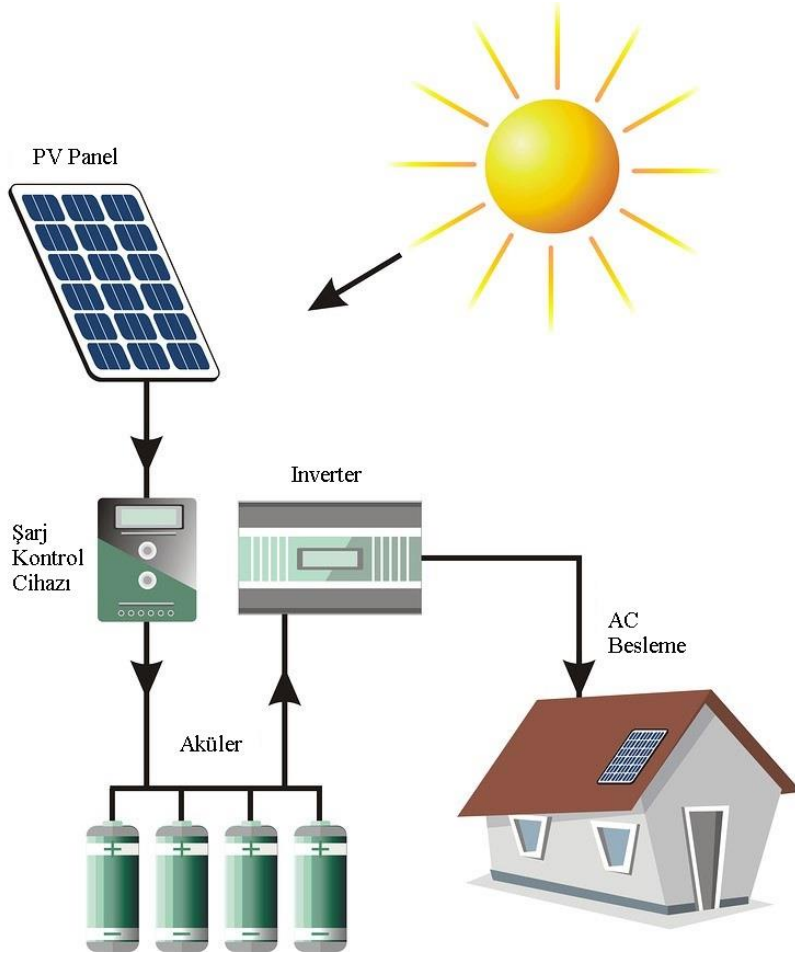
Çıkış gücünü arttırmak amacıyla fazla miktarda güneş hücresi seri veya paralel bağlanabilir. Güneş hücrelerinin birlikte kullanımından oluşan yapı PV modül olarak

adlandırılır. Daha yüksek güçlerde ihtiyacı karşılamak için modüller bir araya gelerek PV panelleri oluşturur. PV panellerin çoklu kullanılmasından da PV diziler oluşur. Şekil 2.10'da PV hücreden PV dizilere kadar tüm durumlar görülmektedir.



**Şekil 2. 10** Fotovoltaik Hücrelerin Birleşmesi

PV modüller elektriğe ihtiyaç duyan birçok uygulamada kullanılmaya uygundur. PV modüllerin uygulamanın türüne göre aküler, şarj kontrol cihazı, inverter ve bazı elektrik devrelerle birlikte kullanılmasıyla oluşan yapıya PV sistem denir. PV sisteminin çalışma biçimi Şekil 2.11'de görülmektedir.



**Şekil 2. 11** PV Sistemin Çalışması

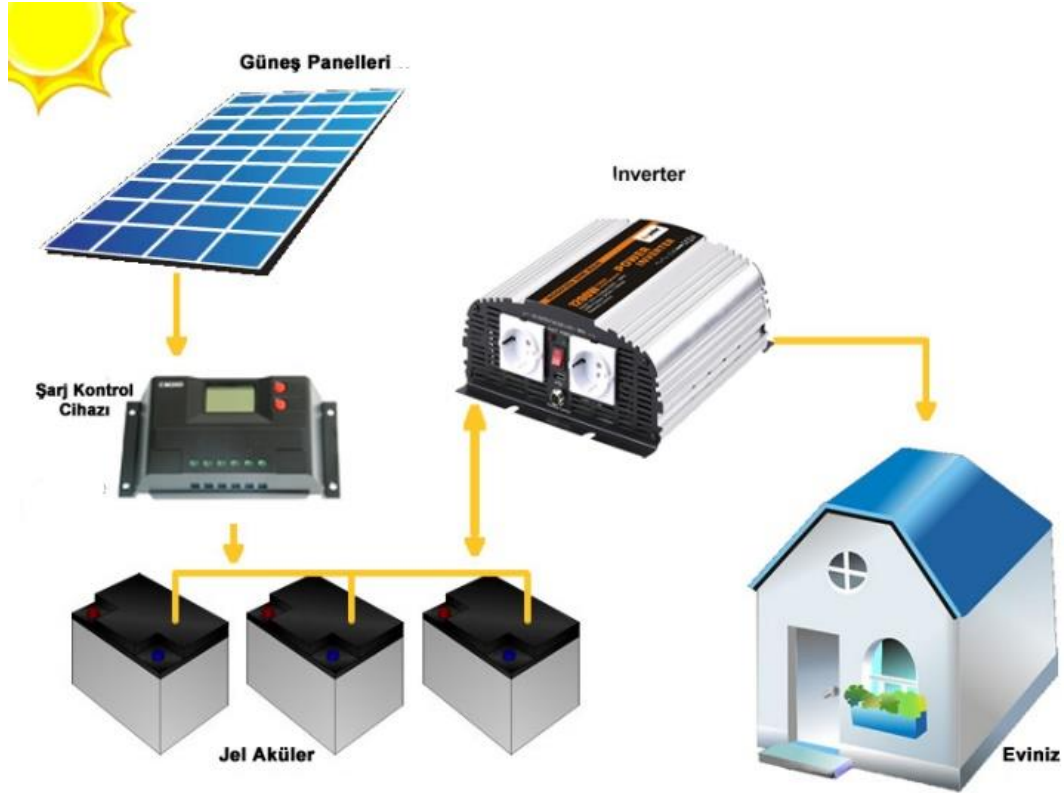
PV paneller sayesinde sadece gündüz güneş ışığı varken elektrik elde edilir. Bununla birlikte güneş enerjisinden gece ve gündüz yararlanmak için bazı yöntemler de mevcuttur. Güneş ışığı varken panellerin ürettiği elektriğin bir kısmını akülerde depolanıp daha sonra tüketilecek şekilde bekletilir ve gerektiğinde kullanılır.

PV güç üretim sistemleriyle hem doğru akımla (DC) hem de alternatif akımla (AC) çalışan yükün elektrik ihtiyacı karşılanabilir. PV panellerin ürettiği elektrik DC olduğu için DC yüklere doğrudan bağlanabilir. Yük AC ise üretilen DC elektriği AC'ye çevirmek için inverter kullanılmalıdır. Inverter, akülerdeki 12V veya 24V olan DC elektriği 240V AC'ye dönüştürerek yüke aktarır.

PV güç üretim sistemlerinde akülerin tamamen dolduktan sonra daha fazla yüklenmemeleri gerekir. Eğer aküler olması gerekenden fazla yüklenirse bu durum akülerin ısınmasına, akülerde sıvı azalmasına ve ömürlerinin azalmasına neden olur. Akülerin aşırı şarj olmasını önlemek için şarj kontrol cihazı kullanılır. Şarj kontrol cihazı

sürekli akülerin voltajını denetler. Aküler dolduğu zaman akülere gelen elektriği durdurur PV paneller düşük akım verirler fakat daha yüksek akım ihtiyacı duyan uygulamalarda kullanılması gerekirse sisteme jeneratör ilavesi yapılarak gün içinde üretilen enerji akülerde depolanıp yüksek akım gerektiği durumda kalan fark jeneratör tarafından karşılanır. Jeneratör bir motor tarafından beslenebileceği gibi, bir rüzgar türbini tarafından da beslenebilir.

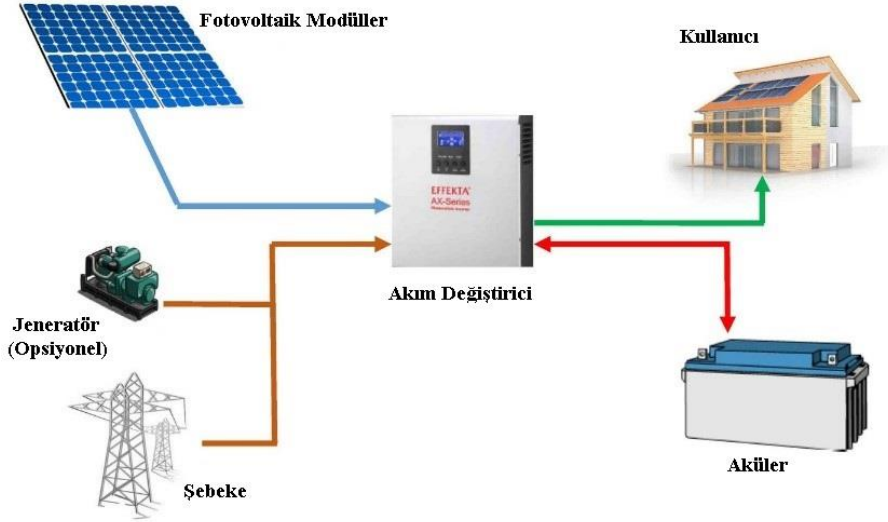
PV sistemler iki şekilde düzenlenebilirler. Birincisi yerleşim merkezinden veya elektrik şebekesinden uzak yerlerde yükün karşılanmasında şebekeden bağımsız olarak kurulur. İkinci olarak ta yük elektrik şebekesine yakın yerdeyse şebeke bağlantılı olarak yapılabilir. Şekil 2.12’de şebekeden bağımsız PV güç üretim sistemi görülmektedir [40].



**Şekil 2. 12** Şebekeden bağımsız PV güç üretim sistemleri

Şekil 2.13’te ise şebekeye bağlı PV güç üretim sistemi görülmektedir. Şebekeye bağlı PV güç üretim sistemlerinde PV’den üretilen güç evirici vasıtasıyla AC yüke gönderilerek yükün ihtiyacı karşılanır. Yükün ihtiyacı karşılandıktan sonra kalan enerji bataryalarda depolanır. PV sistemin yükün ihtiyacını karşılayamadığı durumda, bataryalarda da yükü

karşılacak kadar enerji olmadığı zaman yükün ihtiyacı şebekeden karşılanır. Şebeke evirici üzerinden yükün ihtiyacını karşılar.



Şekil 2. 13 Şebekeye bağlı PV güç üretim sistemleri

### 2.3.2.3 Güneş Takibi Yapan Sistemler

Elektrik enerjisinin üretimi PV modüle gelen gün ışığının dik bileşeni tarafından yapılır. Bu yüzden daha fazla enerji üretebilmek için modül güneş takip sistemlerinin üzerine yerleştirilerek güneşin konumunu takip edilip güneş ışınlarının modüle sürekli dik gelmesi sağlanmaktadır. Güneş takip sistemleri bir veya iki eksenli olabilirler ve PV güç üretim sisteminin verimini %30-%50 oranda artırır. Bir eksenli güneş takibinde güneş doğu ve batı arasında gün boyunca takip edilir. İki eksenli güneş takibinde ise güneş gün boyu doğu ve batı arasında takip edilirken yıl boyu da kuzey ve güney arasında takip edilir. Şekil 2.14'te tek eksenli PV takip sistemi ve Şekil 2.15'te iki eksenli PV takip sistemi görülmektedir.



**Şekil 2. 14** Tek eksenli PV takip sistemi



**Şekil 2. 15** İki eksenli PV takip sistemi

Takip sistemlerinde güneş takibi sensörler vasıtasıyla yapılabildiği gibi zaman ayarlı olarak yapılan sistemler de vardır. Gün boyu doğu batı arası yapılan takip işlemi bir sonraki gün için doğuya gelecek şekilde ayarlanır. Doğuya yönelme eski sistemlerde nikel kadmiyum akü sayesinde güneşin batmasıyla olurken yeni sistemlerde doğuya yönelme işlemi gün ışığı zalinca olmaktadır.

#### **2.4 Biokütle Enerji Teknolojileri**

Kapsamı çok geniş olan biokütle terimi, kökeni biyolojik yapıda olan herhangi bir maddeyi tarif etmede kullanılır. Orman artıkları, suda ve toprakta yetişen bitkiler, gıda sanayisinin atık ve artıkları, orman ürünleri atıkları, şehir atıkları ve hayvansal atık ve artıklar biokütleyle örnek maddelerdir. Bu maddelere ait ortak özelliklerden biri yüz

yıldan daha az bir zamanda yeniden dönüşüme girerler. Fotosentez yaparak güneş enerjisini kimyasal enerjiye çeviren ve bu enerjiyi depolayan yeşil bitkiler de biokütle tanımı içindedir[43,44]. Biokütle meydana gelmesinin temel aşaması aşağıda verilmiş olan fotosentez tepkimesidir.

$CO_2 + H_2O + \text{güneş ışığı} + \text{klorofil} \rightarrow (CH_2O) + O_2$ .  $CH_2O$  organik yapının temelidir ve güneş enerjisinin kimyasal enerji olarak depolandığı yerdir.  $CH_2O$  olarak gösterilen karbonhidratı meydana getirmek için 470kJ civarında bir enerji alınmaktadır. Fotosentezin moleküler işleyişi günümüzde tam anlamıyla anlaşılamamış olsa bile taze biokütle geliştirmek için ihtiyaç duyulan şartlar kesin biçimde ortaya konulmuştur. Bu şartlar canlı bir bitki, klorofil katalizörü, elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde buluna ışık ve karbondioksit miktarıdır. Biokütlenin güneş ışığını tutma veriminin en yüksek değeri %8-%15 arası olduğu düşünülmektedir fakat gerçek uygulamada verimin %1 veya daha az olduğu ileri sürülmektedir[45].

Enerji üretimi maksadıyla kullanılan biokütlenin, kullanıldığı yere ve amaca göre geleneksel biokütle ve modern biokütle olmak üzere iki çeşidi vardır. Geleneksel biokütle evsel sobalarda kullanılan odunlardan, tezelerden ve tarımsal atıklardan meydana gelmektedir. Geleneksel biokütlenin gelişmekte olan ülkelerde kullanımı daha küçük ölçekli olup modern biokütlenin kullanımı nispeten daha büyük ölçeklidir ve geleneksel enerji kaynaklarının yerini alacağı düşünülmektedir. Modern biokütleye örnek olarak enerji bitkileri, odun, kentsel atıklar, biyogaz ve tarımsal atıklar gibi biyo yakıtlar verilebilir. Modern biokütle uygulamalarında odun ve atıkları kullanılabileceği gibi enerji bitkileri olarak adlandırılan ve enerji üretmek için yetiştirilen bitkiler de kullanılabilir[46].

Genel olarak eski zamanlardan beri biokütle birçok farklı ihtiyacı karşılamada kullanılmıştır. Ateşin bulunmasıyla birlikte yemek pişirmek için ve ısınma ihtiyacını gidermek için odun kullanılmıştır. Modern anlamda biokütle enerjisinin Asurlular ve Persler tarafından biyogaz formunda banyo ısıtma işleminde kullanılmış olması kaynaklarda mevcuttur[47].

19. yüzyılda başında İngiltere’de fosseptik gazlar sokak aydınlatmasında kullanılmıştır[48,49]. Biokütle enerjisinin temel bileşeni karbonhidrat olan ve kökeni hayvansal ve bitkisel olan tüm doğal maddelerden üretilir.

Biokütle enerjisi ormanda bulunan ağaçlardan, bitkisel ve hayvansal ürünlerden, sanayi atıklarından, insan ve hayvanların atıklarından ve tarımsal atıklardan elde edilir[44-50].

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında kullanım oranı yüksek olan biokütle enerjisinin Elektrik, ulaşım ve ısıtma amaçlı uygulamalarda kullanımı giderek artmaktadır. Biokütle enerjisinin dikkatlice uygulandığı durumda elde edilecek avantajları vardır[51] Enerji ihracatını arttırma, sera gazı salınımında azalma ve çevresel yaralar, fosil yakıtların ithalat edilmesi yerine yerli üretim ile ekonomiye katkı, kırsal kesim için sosyal kalkınma, atık imha sorununa çözüm olma ve kaynakları verimli kullanma bu avantajlardan bazılarıdır.

## 2.5 Biokütle Enerjisinin Kaynakları

Enerji üretimi için kullanılan biokütle enerjisi kaynakları dört gruba ayrılır. Biokütle enerjisi tarım ürünlerinden, kentsel atıklardan, orman ürünlerinden, ve endüstriyel atıklardan ve elde edilir. Tablo 2.1’de detaylı olarak verilmiştir.

**Tablo 2. 1** Enerji üretiminde kullanılabilir biokütle kaynakları

<b>Orman ürünleri</b>	Söğüt, kavak, okaliptüs gibi hızlı büyüyen ağaçları, odun parçaları, talaş vb. orman yan ürünleri
<b>Tarım ürünleri</b>	Tüm bitkisel ve hayvansal ürünler ve Miscanthus, kamış gibi kuru lignoselülozik bitkiler, yağ, nişasta, şeker içeren bitkiler, sap, saman, budama artıkları, hayvan dışkıları, hayvan kesim artıkları
<b>Endüstriyel artıklar</b>	Biyolojik kökenli tüm artık ve atıkları, tarıma dayalı endüstriyel atıklar, orman endüstrisi atıkları, kâğıt sanayi atıkları vb.
<b>Kentsel atıklar</b>	Çim, yaprak gibi park-bahçe artıkları, kanalizasyon atıkları, organik kökenli belediye atıkları, evsel çöpler

### **2.5.1 Enerji Elde Edilen Bitkiler**

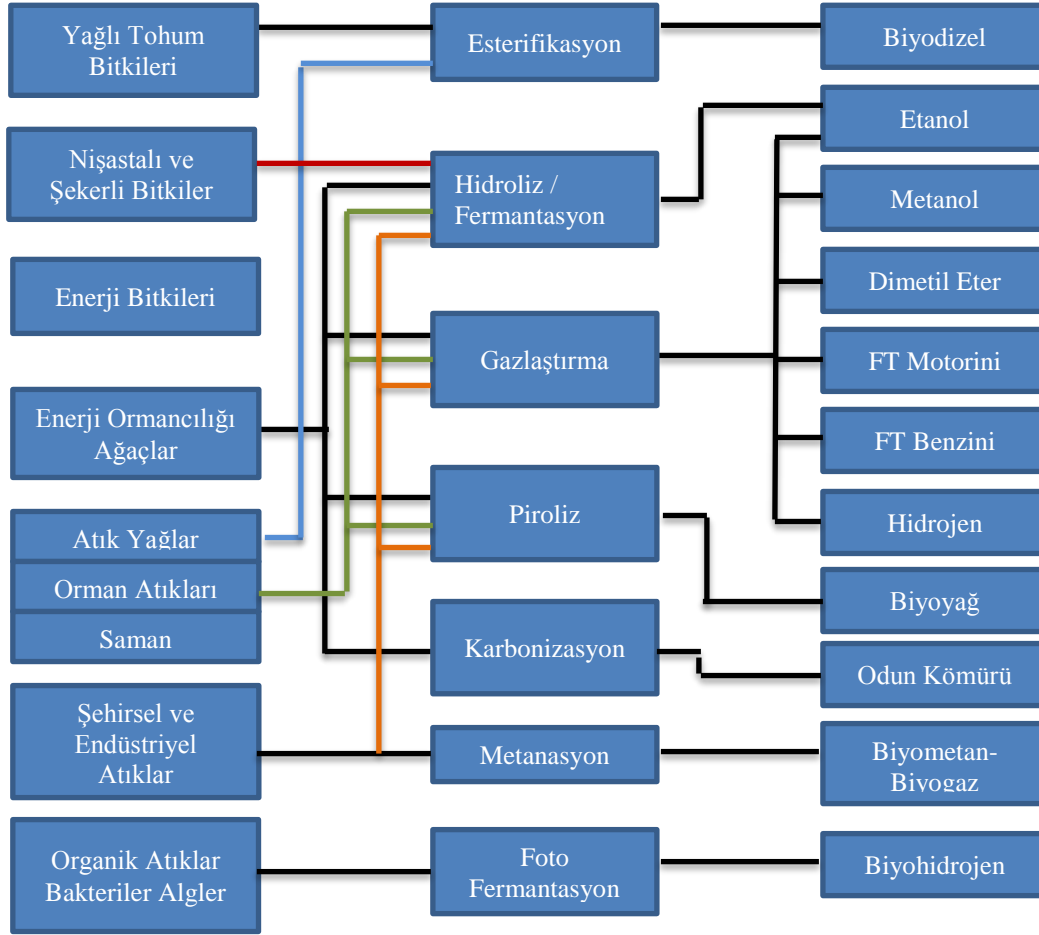
Tarım, insanların gerekli ihtiyaçlarını karşılamak için bitki üretimi yapması anlamına gelir. Son zamanlarda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artmasıyla biokütle enerjisi de gündeme gelmiş ve önem kazanmıştır. Bununla birlikte de enerji tarımı kavramı ortaya çıkmıştır. Her çeşit toprak şartlarında yetişen ve hızlı bir şekilde gelişen enerji elde edilen bitkiler enerji tarımının örneklerindedir. Günümüzde bu bitkilerin genleri üzerinde değişiklik yapılarak daha yüksek verim alınabilmektedir. Tütün, tatlı sığır otu, mısır, şeker kamışı, sorgum, yabancı otlar, miskantus ve endüstriyel kenevir bu bitkiler arasında en iyi bilinenleridir[52,53].

Kuraklığa dayanıklı olan ve güneş ışınlarını enerjiye dönüştürebilen enerji elde edilen bitkilere C<sub>4</sub> bitkileri de denir. Bu bitkilerin suya olan ihtiyaçları azdır. Havadaki CO<sub>2</sub> oranı belli bir değerin altında olduğu zaman birçok bitki solunum yapamaz hale gelmektedir. Atmosferde bulunan her CO<sub>2</sub> molekülünü soğurabilmesi C<sub>4</sub> bitkilerinin önemli bir özelliğidir. Bioküteller, biyoyakıt olarak yakıldığı zaman atmosfere saldıkları CO<sub>2</sub>'yi yetiştirilmeleri sırasında fotosentez yaparak kullanırlar. Enerji elde edilen bitkiler yetiştirilirken havadan aldığı CO<sub>2</sub> miktarı hektar başına 30-45 ton arasındadır[54].

Bundan dolayı enerji elde edilen bitkilerin yetiştirilmesinin küresel ısınma ve iklim değişikliği problemlerine yarar sağlayacağı tahmin edilmektedir. Birçok enerji ürününün hammaddesi olarak C<sub>4</sub> bitkileri kullanılabilir. Daha çok endüstride kullanılan bu ürünlerin en bilinenleri mangal kalitesi yükseltilmiş yağ, bazı bitkilerin posası, etanol, sentetik gaz ve pirolitik yağdır. Biokütle kaynağından elde edilen elektrik enerjisi yüksek maliyetli olup, yüksek verimle yetiştirilen C<sub>4</sub> bitkileri sayesinde üretilen enerji maliyetinin de azalacağı tahmin edilmektedir. AB ülkeleri içinde en çok tanınan C<sub>4</sub> bitkisi sorgum iken Türkiye'de bu bitkiyle beraber miscanthus üzerine çalışmalar yapılmaktadır[52-54].

### **2.6 Biokütle Oluşum Süreçleri**

Biokütleyle uygulanan işlemler üç an başlıktan oluşur. Bunlar; termokimyasal işlemler, fiziksel işlemler ve biyokimyasal işlemlerdir. Bunlardan en çok kullanılan işlem termokimyasal işlemlerdir. Biokütle kaynakları, dönüşüm işlemleri ve oluşan biyoyakıtlar Şekil 2.16'da ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



**şekil 2. 16** Biokütle Kaynakları, Dönüşüm İşlemleri Ve Oluşan Biyoyakıtlar

Her bir biokütlenin kül, ısı ve nem değerleri birbirinden farklıdır. Bu farklılıktan dolayı biokütlenin dönüşümü işleminde bazı problemler ortaya çıkmaktadır. Biokütlenin dönüşümü işleminde yapılan fiziksel küçültmenin kurutmanın ve yoğunlaştırma gibi işlemlerin mikrobiyal veya termokimyasal dönüşüm yöntemlerinden önce yapılmasıyla birlikte bu yöntemle yapılan dönüşümler daha uygulanabilir olmaktadır. Biokütle kaynağını kurutmak biokütleden elde edilecek enerji miktarını arttırmaktadır. Biokütle kaynağının kurutulma işlemi açık havada güneşlenmesi sonucunda az maliyetlerle yapılabileceği gibi sanayi tipi fırınlar gibi profesyonel sistemlerle de kısa zamanda ve daha verimli olacak şekilde yapılabilir. Biokütle kaynağının boyutun küçültülmesi biokütlenin yakıt olarak kullanılmasında, pelet ve briket oluşumunda gerekli olan bir işlemdir. Bu küçültme işlemi sayesinde depolama hacmi azaltılmış olur ve taşıma maliyetleri düşürülmüş olur[45].

### 2.6.1 Termokimyasal İşlemler

İnsanlık tarihinde kullanılan en eski termokimyasal dönüşüm yöntemi enerji üretmek için biokütle kaynaklarının yakılmasıdır. Modern yakma yöntemleriyle biokütle hem ısı hem de elektrik üretiminde kullanılabilir hale gelmiştir. Küçük ölçekli yakma yöntemlerinde odun sobaları düşük emisyon değerine sahip olup ısı verimi arttırmak için tasarlanırken, orta ve büyük ölçekli yakma yönteminde verimi arttırmak için fırınlarda ısının geri kazanılması amaçlanır. Modern yakma sistemlerinde odun gibi biokütle kaynakları kullanılabilir gibi evsel atıklar gibi bioküteller de kullanılabilir[45].

Doğrudan yakma sistemlerinin kullanımıyla buhar veya ısı direkt olarak üretilir. Yakıt hücreli veya otomatik beslemeli sistemler iki aşamalı olarak kullanılabilirler. Birinci aşamada kısmi gazlaştırma ve kurutma yapılırken ikinci aşamada yanma tamamlanır. Suyla soğutma sayesinde külleri uzaklaştıran hareketli ızgaralar bu sistemlerin daha gelişmiş uygulamalarında bulunur[56]. Diğer bir yakma grubu da genellikle sıvıların ve çok ince taneciklere sahip biokütle atıklarının kullanıldığı akışkan yataklı ve askılı yakma sistemleridir. Askılı yanma sistemlerinin temelinde biokütle taneciklerinin ön ısıtma işlemi uygulanmış hava dalgasının püskürtülmesiyle askı üzerindeyken yanması bulunmaktadır. Bu sistemlerde ızgaraya ihtiyaç duyulmazken havanın ön ısıtma işleminden geçirilmesi gerekmektedir[56,57].

Biokütle atıklarıyla fosil kökenli yakıtlar beraber de yakılabilir. Beraber yakma uygulamasının bazı üstünlükleri vardır. Birincisi, dönüştürme sistemleri genellikle orman ürünleri işleyen fabrikalara veya tarıma dayalı sanayi bölgelerinin yakınında kurulmuştur. Bundan dolayı maliyeti düşük biokütle atıkları tedarik edilebilir. İkincisi, yaygın olarak kullanılan fosil kökenli yakıtla çalışan enerji üretim tesislerinde CO<sub>2</sub>, kükürt ve diğer sera gazları yayılarak kirliliğe neden olmaktadır. Salınan emisyon değerini iyileştirmek için mevcut malzemelerin kullanılması ve biokütle ile beraber yakılması düşük maliyetli bir yöntemdir. Biokütle yakıtların CO<sub>2</sub> emisyon değeri ve kükürt ve azot içeriği kömüre göre daha düşüktür. Bundan dolayı biokütle ile beraber yakıldığında fosil yakıtların başlangıçta yüksek olan kükürt ve karbon içeriği de dengelenecektir. Üçüncüsü, tarıma dayalı sanayi veya orman ürünleri işleyen fabrikalarda fosil yakıtlarla beraber biokütle atıklarının yakılması sayesinde, tüm yıl boyunca işletmenin çalışması ve elde edilecek elektriğin daha ekonomik olması sağlanacaktır[56,57].

Gazlaştırma, eskiden beri kullanılan bir yöntem olup kömürün gazlaştırılması da doğal gazın kullanıma girmesinden önce yıllar boyunca kullanılmıştır. Son zamanlarda bu teknik bioküttele sıklıkla kullanılmıştır. Gazlaştırma biokütleden daha temiz bir yakıt ve farklı amaçlar için kullanılabilen bir gaz üretilmesine olanak sağlar. Gazlaştırma işleminde biokütle genellikle 800–900 °C arası yüksek bir sıcaklıkta kısmi oksitlenme ile yanabilir bir gaz karışımına dönüştürülür. Gazlaştırma işleminin sonucunda CO ve H<sub>2</sub> elde edilirken, ayrıca bir miktar CO<sub>2</sub>, metan içeren bazı ağır hidrokarbonlar ve su buharı meydana gelir. Biokütlenin hızlı pirolizi sayesinde bir gazlaştırıcı kullanarak kömürün gazlaştırılması sağlanabilir. Gazlaştırma tepkimelerinde gazlaştırıcı olarak hava, oksijen ve buhar kullanılabilir. Bu gazlaştırıcıların tepkimeye bazı etkileri vardır[58]

Gazlaştırıcı olarak hava kullanılması, maliyeti düşük olduğu için en çok tercih edilen yöntemdir. Oksijen elde edilmesi gerekli olmadığı için verimi yüksektir. Fakat bu yöntemle oluşan gazda azot, hidrokarbonlar, zift ve su buharı da bulunacaktır. N<sub>2</sub> içeriği %60 değerlerini bulmaktadır ve çıkan gazın ısıl değeri 4-6 MJ/Nm<sup>3</sup> iken reaktör sıcaklığı 900–1100°C arasındadır[59].

Gazlaştırıcı olarak oksijen kullanılmasıyla ısıl değeri 10–15 MJ/Nm<sup>3</sup> olan daha kaliteli bir gaz üretilir. Reaksiyon sıcaklığı 1000–1400°C seviyelerindedir. Gazlaştırıcı olarak oksijen kullanımının dezavantajlarından bazıları yüksek maliyete sahip olması ve güvenlik eksikliği olarak sıralanabilir[59].

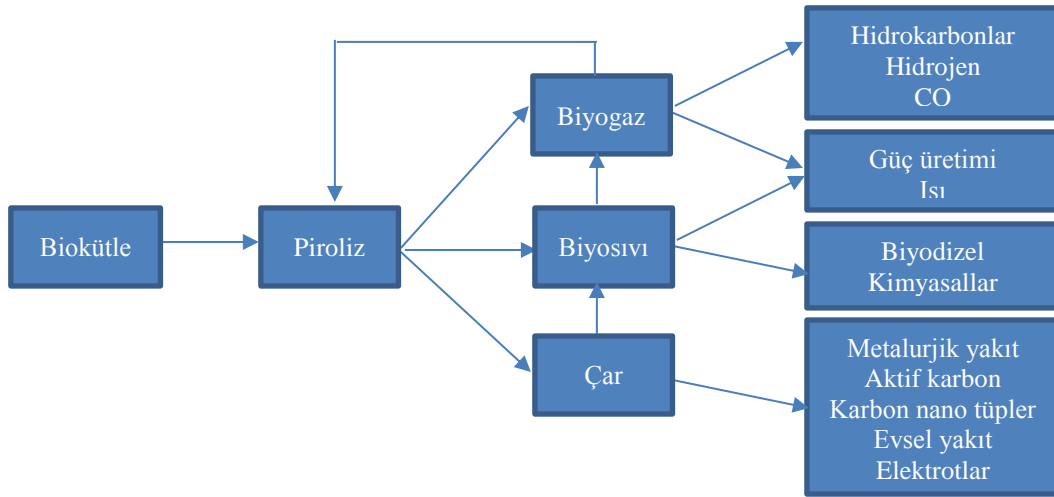
Gazlaştırıcı olarak buhar kullanılmasıyla çıkışta zift, hafif hidrokarbonlar, kömür, CO, CH<sub>4</sub> ve CO<sub>2</sub> içeren bir gaz üretilir. Bu yöntemin kataliz zehirlenmesi ve korozyon gibi dezavantajları vardır[60]. Fakat amaç gaz üretmek değil de hidrojen üretmek ise gazlaştırıcı olarak buhar kullanılması önem kazanmaktadır.

Bununla birlikte yatak durumuna göre gazlaştırıcılar, sürüklemeli yataklı, akışkan yataklı ve sabit yataklı olarak üç temel gruba ayrılır. Bu gazlaştırıcılara yeni bir teknoloji olan plazma gazlaştırma ve sulu biokütteleler için önemi yüksek olan ve üzerinde yapılan araştırmaların arttığı diğre bir gazlaştırma yöntemi SCWG de eklenince beş çeşit gazlaştırıcı sisteminden bahsedilebilir.

Malzemenin hava olmayan bir ortamda ve yüksek sıcaklık seviyesinde (773°K) hızlı bir şekilde ısıtılıp ayrıştırılması ve buharlaştırılmasına piroliz denir. Piroliz sonucu elde edilen buhar soğutulunca sıvı yakıt olarak yoğunlaşır. Bu işleme biokütle pirolizi adı

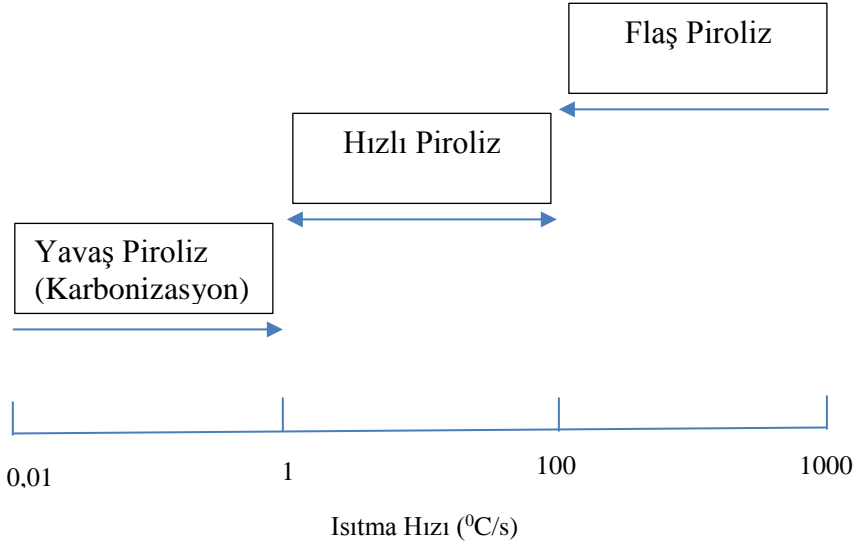
verilir[45]. Piroliz sonucunda oluşan ürünler karbon bakımından zengin çar, molekül ağırlığı düşük gazlar ve katrandır.

Gaz ürün hidrokarbonlar içeriğinde, hidrojen, CO, CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O bulundurur. Biyogazların doğal gaz yerine kullanılabilmesinin yanında yakılarak elektrik ve ısı üretilmesi de mümkündür. Açığa çıkan sıvı madde yüksek molekül ağırlığına sahip karmaşık bir karışım olup sıvı ürünler elektrik üretimi ve ısı üretimi için veya gazlaştırma işlemi ile içinde hidrojen barındıran biyogazlara dönüşebilir. Piroliz sonucu açığa çıkan ve çar olarak adlandırılan katı madde yüksek oranda karbon içeren evsel ve sanayi tipi kullanılan bir yakıttır. Yapısının gözenekli olmasından dolayı filtreleme işleminde aktif karbon olarak kullanılabilir[46]. Şekil 2.17’de piroliz ve ürünleri görülmektedir



**Şekil 2. 17** Piroliz ve ürünleri

Meydana gelen maddenin miktarını ve çeşidini etkileyen değişkenlerden bazıları yakıt çeşidi, ısıtma hızı, tepkime süresi, sıcaklık ve basınçtır. Parçanın boyutuna, en yüksek sıcaklık değerine, atmosfer basıncına ve reaktörde kalma süresine bağlı olarak piroliz sonucu oluşan ürünlerin verimi değişir. Şekil 2.18’den anlaşılacağı gibi piroliz ısıtma hızına göre yavaş, hızlı ve flaş piroliz olarak üç türde oluşur. Düşük ısıtma hızında çar üretimi artar ve bu işleme karbonizasyon da denir. Yüksek ısıtma hızında ise sıvı üretiminin arttığı görülmektedir[46].



**Şekil 2. 18** Isıtma hızına dayalı piroliz çeşitleri

Tablo 2.2’de yukarıda bahsedilen termokimyasal yöntemlerin çalışma şartları, oluşan ürünler ve bu ürünlerin kullanım alanları açısından karşılaştırılması yapılmıştır. Bu tabloya göre yakma ve gazlaştırma sıcaklık değerleri 1300°C ve 1500°C’leri görürken, piroliz işlemi daha düşük sıcaklıklarda meydana gelmektedir. Yakma için hava yakıt oranı 1’den fazla iken, gazlaştırma için bu değer 0,2-0,5 arasında bulunmaktadır. Piroliz aşamasında çıkan ürün olarak katı karbon, gaz ve sıvı ürünler bulunmaktadır. Yakma işleminin amacı ısı üretmek iken, gazlaştırmanın amacı sentetik bir gaz üretmektir. Piroliz sıvısı ve piroliz gazı, oluşan ürünlerin kullanım alanına bakılınca, ısı, elektrik ve kimyasal üretiminde veya taşıtların yakıtı olarak kullanılabilir. Gazlaştırma sonucu oluşan gaz, ısı ve elektrik üretiminin yanında kimyasal ve hidrojen üretiminde de kullanılabilir[58].

**Tablo 2. 2** Termokimyasal yöntemlerin çalışma şartları, oluşan ürünler ve kullanım alanları

	<b>Piroliz</b>	<b>Gazlaştırma</b>	<b>Yakma</b>
<b>Reaksiyon Sıcaklığı</b>	400-700 °C	600-1500 °C	800-1300 °C
<b>Hava Yakıt Oranı</b>	Teorik 0, pratikte < 0,2	0,2 - 0,5	>1
<b>Reaksiyon</b>	Biokütle + ısı → odun kömürü + sıvı yakıt + gaz	Biokütle + sınırlı oksijen/buhar → gaz ürün	Biokütle + stokiyometrik oksijen → CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O
<b>Metotlar</b>	Karbonizasyon, Geleneksel, Hızlı, Hızlı-sıvı, Hızlı-gaz, ultra,vakum, Hidropiroliz, Metanpiroliz	Gazlaştırıcıya göre hava, oksijen, buhar, hava/buhar, oksijen/buharla gazlaştırma	
<b>Ürün Kullanım Alanları</b>	Piroliz sıvısı, Kimyasal, Isı, Elektrik, Taşıt yakıtı	Gaz ürün, Kimyasal, Isı, Elektrik	Isı, Elektrik
<b>Teknolojik Durum</b>	Ticari	Ticari	Ticari

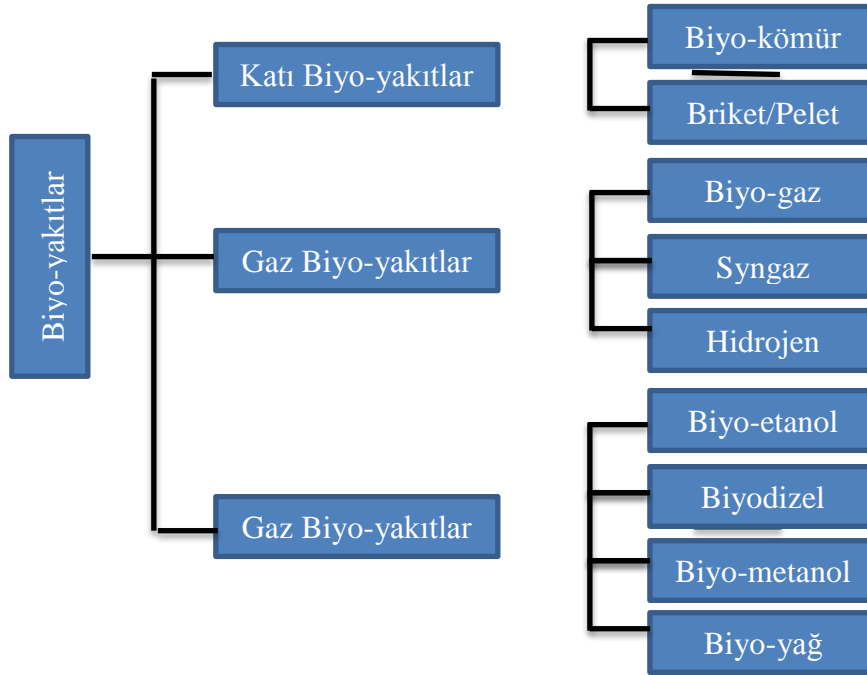
Sıvılaştırma yöntemi, temelinde pirolize benzemektedir. Biokütlenin sıvıya dönüştürülmesi her iki yöntemin de ortak özelliğidir. Sıvılaştırma, malzemenin uzun yapılı moleküllerinin kısa yapılı moleküle dönüştürülmesiyle birlikte sıvı yakıt meydana getirilmesidir. Sıvılaştırma işlemi 798K–8730K arası düşük sıcaklıklarda olurken piroliz işlemi 923K–10730K arası yüksek sıcaklıklarda yapılmakta olup sıvılaştırmada işlemin basıncı 5-20MPa arası değişiklik gösterirken pirolizde işlemin basıncı 0,1-0,5MPa değerleri arasındadır. Sıvılaştırma, yüksek basınç şartlarında ve hidrojen atmosferinde yapılmaktadır. Biokütlenin sıvılaştırılmasının birçok avantajı vardır. Bu sayede az yer kaplayan, pompalana, enerji içeriği yüksek, kolayca depolanan ve başka kimyasalların ve yakıtların elde edilmesine katkı sağlayan yağlar üretilebilmektedir[59].

## 2.7 Biyoyakıtlar

İçeriğinde biyolojik kökenli yakıt bulunduran biyoyakıtların kullanım alanı her geçen gün artmaktadır. Petrol ürünleri, doğal gaz ve kömür gibi geleneksel yakıtlardan farkı

yenilenebilir ve sürdürülebilir olmasıdır. Biyoyakıtların içerdiği kaynakların %80'den fazlası son on yılda yetiştirilmiş canlı organizmalardan oluşmaktadır[61,62].

Biyoyakıtlar tarım ve orman ürünleri, hayvansal ve bitkisel artık ve atıklar, organik kökenli evsel, endüstriyel ve kentsel atıklardan termokimyasal veya biyokimyasal yöntemlerle elde edilebilmektedir. Biyoyakıtlar katı, gaz veya sıvı şeklinde olabilmektedir. Katı biyoyakıtlar içerisinde briket, pelet, biyokömür ve odun kömürü yer almaktadır. Gaz biyoyakıtlar ise; singaz, biyogaz, biyohidrojen oluşmaktadır. Sıvı biyoyakıtlar içerisinde de biyodizel, biyoetanol, biyometanol, biyoetiltersiyerbutileter, biyodimetileter ve biyoyağ bulunmaktadır. Biyoyakıtların şematik olarak sınıflandırılması Şekil 2.19'de gösterilmektedir[63].



**Şekil 2. 19** Biyoyakıtların şematik olarak sınıflandırılması

Biyoyakıtlar hammadde içeriği ve üretim çeşidine göre dört gruba ayrılır[55]. Bunlar birinci nesil, ikinci nesil, üçüncü nesi ve dördüncü nesil biyoyakıtlardır.

2000-2010 yılları arasındaki biyoyakıt teknolojisi birinci nesil olarak tanımlanır. Şeker ve nişastalı kaynaklardan üretilen biyoetanol, içten yanmalı motorlarda kullanılan biyodizel, biyogaz ve benzin katkısı olarak kullanılan ve etanolün türevlerinden biri olan

biyoetil tersiyer butil eter birinci nesil biyoyakıtlara örnektir. Biyoetanol ve biyodizel gibi biyoyakıtların hammaddesi tarımdır fakat biyogaz için hammadde olarak atıklar kullanılır.

2010-2030 yılları arasındaki biyoyakıt teknolojisi ikinci nesil olarak tanımlanır. İkinci nesil biyoyakıtlara örnek olarak elektrik üretiminde veya ısı üretiminde kullanılan bitkisel yağlar, biyoetanol, biyobutanol, biyometil tersiyer butil, biyodizel, biyoetil tersiyer butil, biyometanol, biyodimetil eter, biyohidrojen ve biyometan verilebilir. Bu tür yakıtlar lignoselülozik yapıda hammaddelerden elde edilir ve temelini gıda dışı kaynaklar oluşturur. İkinci nesil biyoyakıtların temel hedefleri arasında hammadde çeşitliliğini arttırmak, hasatta ve üretimde kimyasal madde kullanımının ve enerji tüketimini azaltmak, verimi arttırmak ve tarımsal atıkları ve orman atıklarını değerlendirmek bulunur. Bu hedeflere ulaşmak için biorafineri teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte sürdürülebilir kaynakların kullanımının artması ve gıda ile direkt iletişimin azalması beklenmekte ve bu konu üzerine Ar-Ge çalışmaları ve birçok örnek uygulama yapılmaktadır. Uygulamanın başarısı için en önemli motivasyon kaynağı yeni teknoloji geliştirme hızı ve maliyetin azaltılmasıdır.

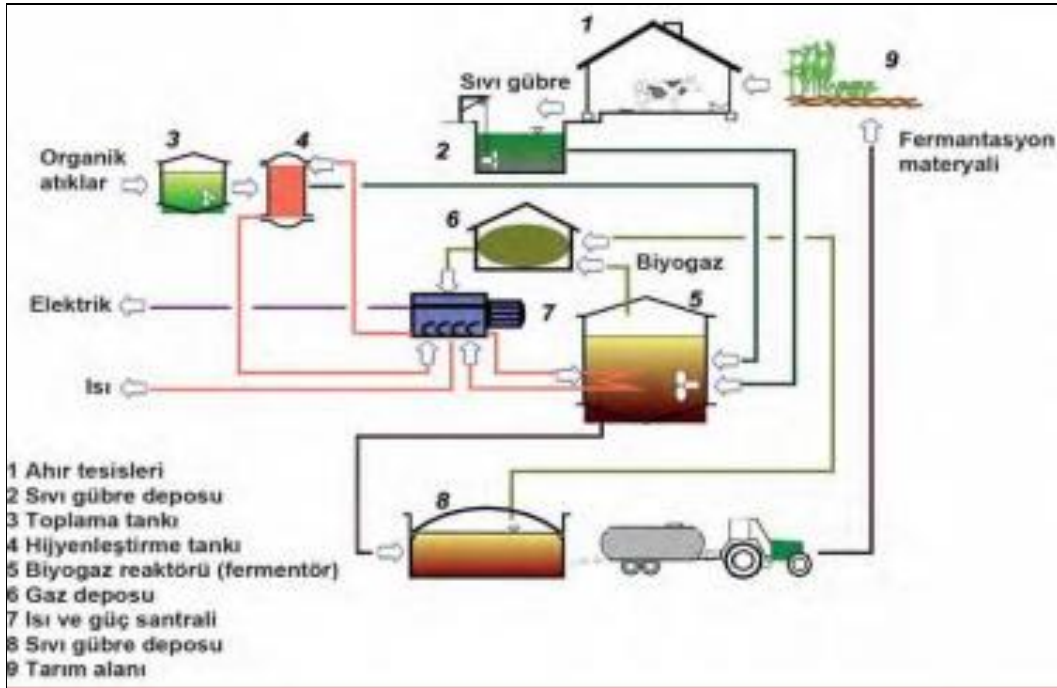
Üçüncü nesil biyoyakıtlar 2030 yılı sonrası kullanılacak olan yakıtlar olup, ileri biyoyakıtlar olarak adlandırılırlar. Bu tür biyoyakıtlarda lignoselülozik hammaddeler yerine selülozik hammadde kullanılması, ve biorafineri teknolojisinin gelişmesiyle içerğinde daha fazla selüloz ve yağ bulunduran genetiğiyle oynanmış bitkilerin ve alglerin kullanılması sonucu biyoyakıt üretimi amaçlanmaktadır. Biyoyakıt üretiminde gıda dışı hammaddeler tarımsal ürünlerin yerini alması mümkün olacaktır. Bu türün bir diğer hedefi de biokütlenin karbondioksit depolamasının artması ve üretimin veriminin artmasıdır.

Dördüncü nesil biyoyakıtlar yine 2030 yılı sonra kullanılacak olan yakıtlar olup genetiği mükemmelleştirilmiş kaynaklardan üretilmesi ve biyoyakıtların karbon tutma ve depolama teknolojileri sayesinde atmosfere karbondioksit salınımı yapılmaması öngörülmektedir. Bu tür biyoyakıtlar karbon negatif biyoyakıtlar olarak ta adlandırılırlar. Karbon tutma ve depolamanın gelişmesiyle birlikte temiz kömür teknolojisi yoğunluk kazanacaktır. Bununla birlikte mikroorganizmalar yardımıyla karbondioksitin önce şeker gibi maddelere ve daha sonra hidrojen ve etanol gibi yakıtlara dönüştürülmesi

amaçlanmaktadır. Bu nesil biyoyakıtların 2030 yılından sonra ne zaman ticari olarak kullanılabilirliği ile ilgili şu an bir öngörü yoktur.

### 2.7.1 Biyogaz Teknolojisi

Gaz biyoyakıtlardan biri olan biyogaz tüm Dünyada yaygın olarak üretilen ve kullanılan biokütle enerji kaynağıdır. Biyogaz teknolojisinin en önemli özelliği her türlü organik atığın kullanarak enerjiye dönüştürülebilmesidir. İnsan sağlığı ve çevreye zararlı olan atıkların oksijensiz ortamda fermentasyona tabi tutulmasıyla elde edilen biyogaz doğal gaza benzeyen bir gaz karışımıdır. Biyogaz direk ısı enerjisi elde etmek amacıyla kullanılabilir gibi, motorlarda yakıt olarak ve elektrik enerjisi üretiminde de yararlanılabilmektedir. Şekil 2.20’de görüldüğü gibi biyogaz teknolojiyle atıkların bertarafı ve enerji kazanımı sağlandığı gibi tesisten alınan sulu çamur tarımsal üretimde bitkilerin su ve organik madde gereksinimini karşılamak amacıyla kullanılabilir.



Şekil 2. 20 Komateryal kullanan bir tarımsal biyogaz tesisi şeması

Biyogaz tesisleri kuruldukları bölgelerin ve kullanılan hammaddelerin özelliklerine göre farklı büyüklük ve modellerde olabilmektedir. Asya’da genellikle küçük ölçekli biyogaz tesislerinde bitkisel ve hayvansal artık ve atıklar kullanarak bitkisel üretim için gerekli fermente gübre ana ürün olmaktadır. Avrupa’da ise orta ve büyük ölçekli tesislerde her

türlü evsel, endüstriyel ve tarımsal atıklar kullanılarak hem atık bertarafı hem de enerji elde edilmesi hedeflenmektedir [64].

Biyogaz üretimi için organik içerikli maddeler kullanılmaktadır. Bu maddeler aşağıdaki şekilde sıralanabilir[65,66].

- Hayvan gübreleri (büyükbaş hayvancılık, küçükbaş hayvancılık, tavukçuluk),
- Bitkisel üretimde ortaya çıkan artıklar,
- Orman ve kağıt sanayi artık ve atıkları,
- Tekstil sanayi atıkları,
- İçecek, süt, maya, jips, çikolata gibi gıda sanayi atıkları
- Tarıma dayalı sanayi (yağ, şeker vb) atıkları,
- Şehir katı atıkları,
- Kanalizasyon atıkları.

Enerji bitkileri artıkları ve algler yüksek verimle biyogaz üretimi için hammadde olarak kullanılabilir. Kanalizasyon-atık suların ağır metaller ve toksik maddeler içermesi nedeniyle bunların arıtımında anaerobik fermentasyon uygulaması daha kompleks bir yapıya sahiptir. Hayvansal atıklar hem çevresel açıdan hem de uygulama kolaylığı açısından biyogaz üretimine uygun olan atıklardır [67,68].

AB ülkelerindeki biyogaz tesislerinin büyük çoğunluğunda hayvansal atıklardan yararlanılmaktadır [68,69]. Biyogaz, bitkiler, yemek artığı, çöp ve hayvan dışkıları gibi organik maddelerin anaerobik koşullar altında biyokimyasal fermentasyon ve mikrobiyolojik faaliyet sonucunda parçalanması ile elde edilen ve havadan %20 oranında daha hafif olan yanıcı bir gaz karışımıdır [70].

Biyogazın bileşimi; fermentasyonda kullanılan materyalin cinsine fermentasyon özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Biyogazın ana bileşenleri metan (%40-70 CH<sub>4</sub>) ve karbondioksittir (%60-30 CO<sub>2</sub>). Bunlar dışında çok az miktarlarda hidrojen, azot, hidrojen sülfür ve karbon monoksit bulunabilmektedir. Metan bakterileri H<sub>2</sub> gazını kullandıkları için biyogaz içerisinde de bulunabilmektedir. Azotun reaktör içerisinde fazla miktarda bulunması hava karıştığını göstermektedir. H<sub>2</sub>S, tesiste kullanılan hammaddeye bağlı olarak bulunmaktadır [71].

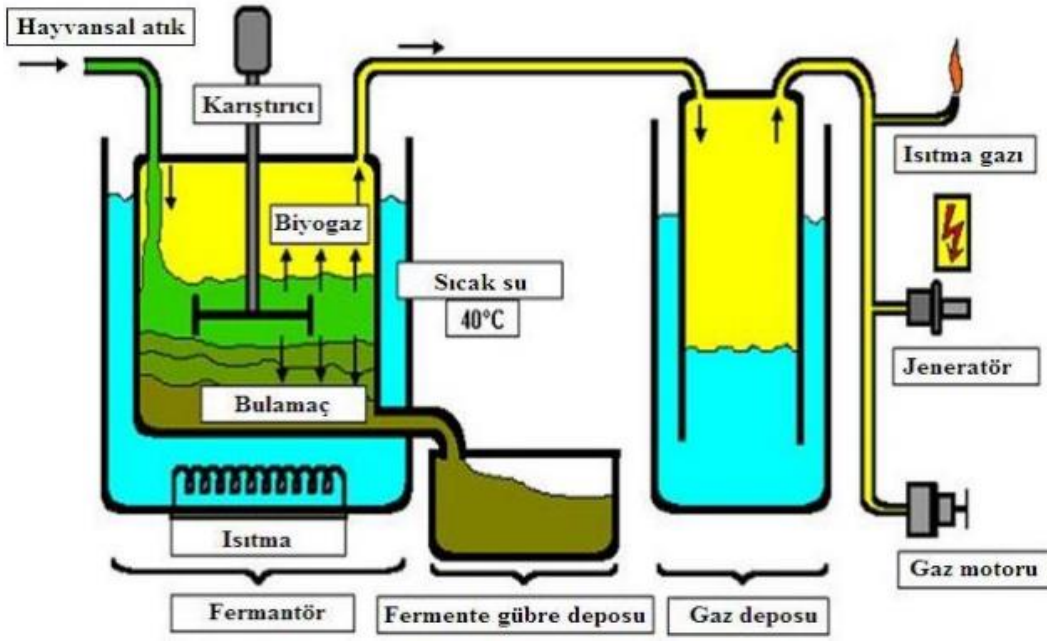
Biyogazın enerji özelliğini sağlayan yapısındaki metan içeriğidir ve metan ideal bir gaz gibi davranmaktadır. Diğer gazlarda olduğu gibi biyogazın içeriği de nem, sıcaklık ve basınç gibi özelliklere bağlı olarak değişmektedir. Metanın LPG gibi düşük basınç değerlerinde sıvılaştırılabilme özelliği yoktur, sıvılaştırılabilmesi 280-350bar'lık basınçlarda gerçekleşebilmektedir [69].

Biyogaz üretimine çeşitli faktörler etki etmektedir. Bunlar, biyogaz üretimi esnasında fermantasyona etki ederek oluşacak gazın CH<sub>4</sub> miktarını belirlemektedir. Biyogaz farklı türden atıkların oksijen olmayan bir ortamda tepkimeye girmesi sonucunda üretilen gaz olduğu için, üretilen gazın miktarı ve kalitesi doğrudan, tesiste kullanılacak atığın kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. Bunlar; maddenin cinsi ve bileşenleri, içeriğindeki yabancı maddelerin miktarı, partikül büyüklüğü, hayvansal atıkların içindeki yataklık oranı, yoğunluğu ile materyalin kuru madde ve organik kuru madde miktarları gibi etmenleridir. Biyogazın üretim miktarı ve verimliliği açısından atığın işlenecek olduğu üreticinin, atıklardan biyogaz elde edilmesi sınır şartlarını sağlaması gerekir. Biyogaz sisteminde fermantasyona etki eden üreteçle ilgili özellikler ise; üreticinin yapıldığı malzeme, üreticinin boyutları ve hacmi, üreticinin yeri, yalıtım özellikleri ve ısıtma sistemi, karıştırma ve yükleme ve boşaltma özellikleridir[65-70]

### **2.7.2 Biyogaz Üretim Tesisleri**

Biyogaz üretim sistemleri aşağıdaki elemanlardan oluşmaktadır (Şekil 2.21):

- Materyal hazırlama ve besleme sistemi,
- Fermantasyon tankı (fermantör, reaktör),
- Gaz deposu,
- Organik madde deposu,
- Isıtma sistemi,
- Karıştırma sistemi



Şekil 2. 21 Biyogaz üretim sisteminin elemanları

Biyogaz üretim sisteminin tasarımı iki farklı şekilde yapılabilmekte ve tasarımda reaktör kapasitesi belirlenmektedir:

- Birinci durumda; başlangıç için işletmede mevcut atıkların miktarından hareket ederek üretilen biyogaz ve reaktör büyüklüğü hesaplanmaktadır.
- İkinci şekilde biyogaz gereksinimine göre reaktör büyüklüğü belirlenmektedir.

Biyogaz tesisleri kapasitelerine göre dört grupta sınıflandırılmaktadır. Bunlar:

- 10–12 m<sup>3</sup> kapasiteli aile tipi biyogaz tesisleri,
- 50–150 m<sup>3</sup> kapasiteli çiftlik tipi biyogaz tesisleri,
- 100–200 m<sup>3</sup> kapasiteli köy tipi biyogaz tesisleri
- 1000-10000 m<sup>3</sup> kapasiteli sanayi tipi biyogaz tesisleridir.

Uygulamada yaygın olarak görülen tesisler aile ve çiftlik tipi küçük ölçekli tesislerdir. Çok az hayvan sayısına sahip Hindistan ve Nepal gibi ülkelerde ortak tesisler kullanılmaktadır. Daha gelişmiş ülkelerde merkezi tesislerden daha yaygın olarak yararlanılmaktadır. AB ülkelerinde uygulamadaki biyogaz tesislerinin yarısından fazlası orta ve büyük ölçekli tesislerdir [69,70].

Biyogaz tesislerinin tasarımında dikkate alınması gereken pek çok parametre

bulunmaktadır. Bu parametreler;

- Materyal ile ilgili özellikler: Günlük beslenecek materyal miktarı, materyalin cinsi ve özellikleri,
- Tesis ile ilgili özellikler: Reaktörün tipi ve malzemesi, inşaat ve yalıtım özellikleri, ısıtma, karıştırma özellikleri,
- Tesisin kurulacağı bölge ile ilgili özellikler: Tesisin kurulacağı yerin seçimi, iklim özellikleri,
- İşletme ile ilgili özellikler: Sistemin işletilmesi ve kontrolü ile ilgili elemanlar, gazın depolanması ve dağıtımı, fermente gübrenin depolanması, dağıtımı ve kullanımı, biyogazın kullanılacağı elemanlardır.

## **2.8 Doğrultucu ve Eviriciler**

Elektrik enerjisinin dönüştürücüler vasıtasıyla DC'den AC'ye çevrilmesine evirme denirken, AC'den DC'ye çevrilmesine doğrultma denir.

HOMER yazılımı sayesinde rotary ve solid-state olarak iki dönüştürücü türü modellenebilir. Dönüştürücünün büyüklüğü, DC enerjiden AC'ye çevrilirken donanım tarafından üretilen en yüksek AC enerji değeri olarak ifade edilen evirici kapasitesine karşılık gelmektedir. AC enerjiden DC'ye doğrultma işlemi sırasında donanım tarafından üretilen en yüksek enerji miktarı da doğrultma kapasitesi olarak tanımlanır ve evirici kapasitesinin bir yüzde değeri olarak ifade edilir. Bundan dolayı doğrultucu kapasitesi farklı bir karar değişkeni değildir. HOMER yazılımı evirici kapasitelerinin ve doğrultucu kapasitelerinin, sistemin az bir zaman dilimi içinde karşılayabileceği anlık kapasiteler değil, sistemin gerekli olduğu sürece karşılayabileceği sürekli kapasiteler olduklarını kabul etmektedir[72].

## 2.9 Homer Yazılımının Tanıtılması

HOMER yazılımı güç sistemlerinin modellenmesi, analizi ve simülasyonu ve hassasiyet analizi gibi işlemleri gerçekleştiren bir yazılımdır ve Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) bünyesinde geliştirilmiştir. Yazılım hem güç sistemlerinin tasarımına olanak verirken hem de güç sistemlerinin birbirleri ile kıyaslanmasına da olanak sağlamaktadır. HOMER yazılımı tasarlanan güç üretim sisteminin her bir bileşenine ait (komponent) başlangıç maliyeti, işletme maliyeti ve bakım – onarım maliyeti değerlerini dikkate alarak sistemin toplam maliyeti elde etmektedir. HOMER yazılımı her bir bileşenin sayısı, gücü, v.b özellikleri teknik veriler; başlangıç maliyeti, işletme maliyeti ve bakım – onarım maliyeti, kullanım ömrü v.b. özellikler ise ekonomik veriler birlikte kullanılarak yapılan analizler sonucunda sistemin tekno-ekonomik analizi gerçekleştirilmektedir. Aynı zamanda bir güç sisteminin tekno-ekonomik analizi o sistemin fizibilite çalışmasının temelini teşkil etmektedir. Aynı zamanda yatırımcının yatırım yapma kararı alma aşamasında önemli rol oynamaktadır[72,73].

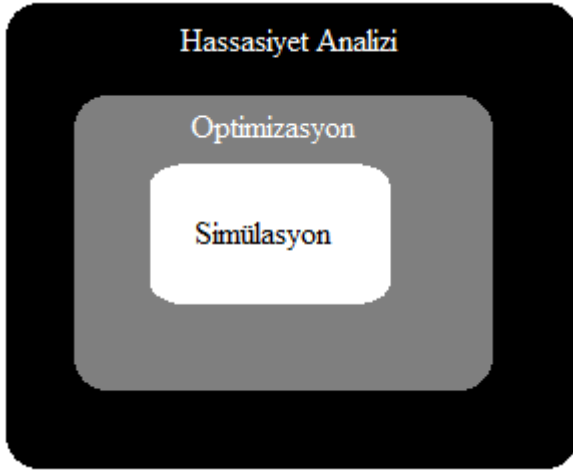
HOMER yazılımı farklı güç üretim kaynaklarının birlikte kullanılmasına, tasarlanacak olan güç üretim sisteminin yerelde bulunan ya da enerji üretim sisteminin kurulması düşünülen bölgeye ait yerel enerji kaynak türleri açısından herhangi bir potansiyel olup olmadığı varsa bu potansiyelin enerji kaynak türünün modellenmeye katkısının sunulmasına imkan veren bir yazılımdır. HOMER ile çoğunlukla bir yükün ihtiyacını karşılamak amacıyla güç üretim sistemleri tasarlanmaktadır. HOMER, tek bir güç üretim sistemi ya da farklı türde güç üretim sistemlerini kullanarak bir yükün ya da birden çok yükün enerji ihtiyacını karşılanmasını sağlayan, şebekeye bağlı ya da şebekeden bağımsız şekilde pil, batarya hidrojen v.s. depolama sistemlerinin kullanılmasına imkan veren ve farklı kombinasyonlarda hibrit güç üretim sistemlerinin modellenmesi, analiz edilmesi ve optimizasyonlarının gerçekleştirilmesine olanak sağlayan bir yazılımdır. Şehir şebekesinden uzak bir yerde bir yükü besleyen PV panel, dönüştürücü ve batarya sisteminden oluşan güneş güç üretim sistemi, benzer şekilde şehir şebekesinin erişemediği dağlık kırsal bir alanda bulunan bir köyün enerji ihtiyacını karşılamak için rüzgar ve dizel jeneratörden oluşan Rüzgar/Dizel hibrit güç üretim sistemi veya bir üretim tesisine elektrik ve ısı enerjisi tedarik eden şebekeye bağlı doğalgaz güç üretim sistemi

vb. sistemler HOMER yazılımında modellenebilecek örneklerdir. Güç üretim sistemi belirli bir yükü beslemeyip doğrudan ürettiği elektriği yüksek gerilim hattı üzerinden şehir şebekesine aktaran güç üretim sistemleri HOMER’da modellenmemektedir. HOMER ile elektrik yükünü veya ısı yükü besleyen PV paneller, rüzgar türbinleri, düşük ölçekli hidroelektrik santraller, biokütle güç üretim sistemleri, hidrojen depolama sistemleri yakıt hücreleri, batarya ve pistonlu motor jeneratörler içeren ve şebeke bağlantılı veya şebekeden bağımsız uygulanan sistemler modellenmektedir. Güç üretim sistemlerinin tasarımı ve analizi, yükün büyük olması, bileşenlerin çeşitliliği, her bir bileşene ait parametrelerin birden çok olması, yüksek yakıt maliyetleri gibi ana parametrelerin belirsizliği ve tasarım seçeneklerinin çok olmasından dolayı birçok parametrik işlem gerektiğinden dolayı hesaplamalar biraz zaman almaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları temiz, çevre dostu, doğada bolca bulunan ve ülkelerin potansiyelleri ölçüsünde değerlendirilebildikleri enerji kaynaklarıdır. Bu kaynaklar, rüzgar, güneş, hidrolik ve biokütledir. Yenilenebilir kaynaklardan faydalanma durumu kaynakların mevsimlere göre farklı olması, her istenildiğinde kullanım imkanı olmaması ve kaynakların sürekli olmaması gibi durumlarından dolayı güç sistemleri tasarımını zorlaştırmaktadır. HOMER bahsedilen olumsuzluklar dikkate alarak işlem yapma kabiliyetine sahip olup bu durumları kullandığı algoritmalar ile simüle edebilmektedir[72].

HOMER yazılımı sayesinde simülasyon, optimizasyon ve hassasiyet analizi olarak adlandırılan üç ana vazife yerine getirilmektedir. Simülasyon aşamasında HOMER, giriş parametresi olarak verilen süreyi (10 yıllık, 5 yıllık, aylık vb.) saatlik veriye dönüştürerek işlem yapmaktadır. Yük verisi, (rüzgar hızı, güneş radyasyon verisi, biokütle miktarı) gibi enerji kaynağı verileri saatlik olarak verilememekte genellikle ortalama değerler cinsinden girilmektedir [72]. Yazılım bu durumda kendi içerisinde bulundurduğu algoritmalar ile saatlik verilere dönüştürmektedir. Belirli bir hibrit güç üretim sistemi konfigürasyonunun performansını, tekno-ekonomik fizibilitesini, ömür maliyet analizi süreçleri simülasyon aşamasında gerçekleştirilmektedir. Optimizasyon aşamasında ise minimum enerji üretim maliyeti baz alınarak, teknik gereksinimleri yerine getiren bir güç üretim sistemi konfigürasyonunu belirleyebilmek için, birbirinden farklı konfigürasyonların tüm olasılıkları hesaba katılır ve simülasyonu yapılır[72].

HOMER yazılımı hassasiyet analizi yaparken giriş değişkenlerinin ve bazı belirsiz durumların sisteme olan etkilerini ölçmek amacıyla bir kısım giriş varsayımlarıyla büyük

ölçüde optimizasyon çalışması gerçekleştirmektedir. Optimizasyon çalışması sayesinde sistemde kullanılan bileşenlerin kombinasyonu ve bu bileşenlerin boyutu ve miktarı gibi sistem tasarımı aşamasında belirlenen parametrelerin optimum değeri belirlenir. Hassasiyet analizinin faydalarından biri de yakıt fiyatı ve ortalama rüzgar hızı verisi gibi sistemin tasarımı yapan kişiye bağlı olmayan parametrelerin değişimlerinin etkilerini değerlendirmede kullanılmasıdır. Şekil 2.22’de simülasyon, optimizasyon ve hassasiyet analizi arasındaki ilişkiyi gösteren şema verilmiştir[72].



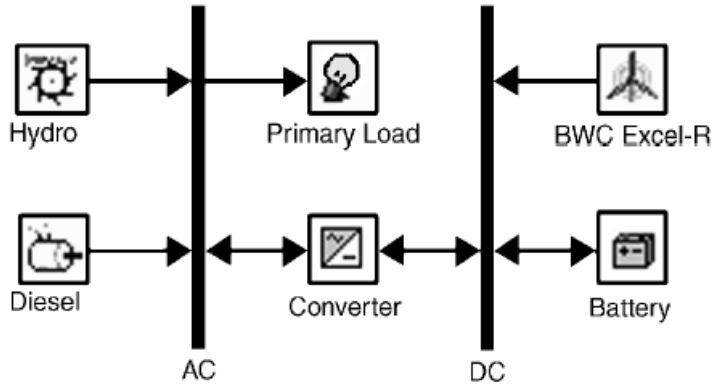
**Şekil 2. 22** HOMER yazılımının üç temel görevinin şematik gösterimi

Şemadan da görüldüğü gibi optimizasyon tarafından çevrelenen alan simülasyon tarafından çevrelenen alanı kapsamaktadır. Bu her bir optimizasyon çalışmasının birden fazla simülasyonu içerdiğini göstermektedir. Aynı şekilde hassasiyet analizi tarafından çevrelenen alan optimizasyon tarafından çevrelenen alanı kapsar ve hassasiyet analizi yapılması için birden fazla optimizasyon çalışmasının yürütülmesi gerekmektedir[72].

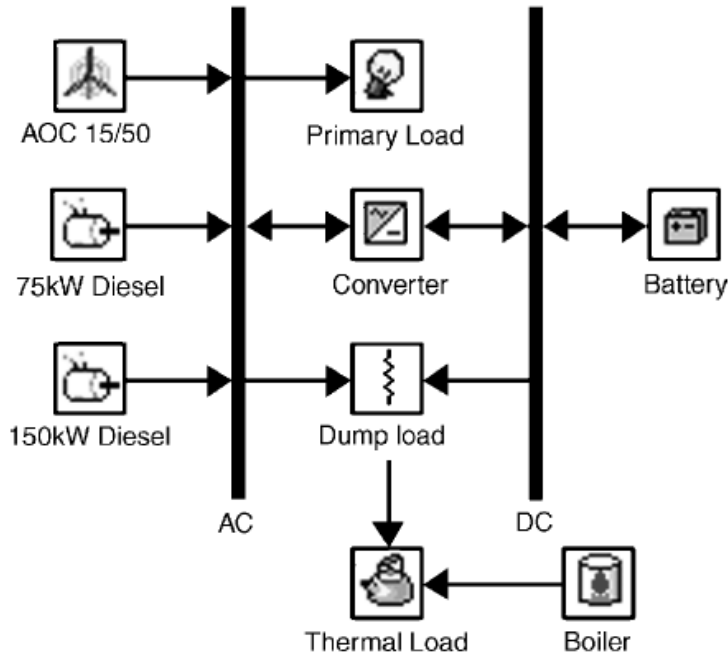
Simülasyon aşamasında HOMER yazılımının uzun dönemli güç üretim sistemlerinin çalışma sonuçlarının gerçek hayattaki sisteme benzetme yeteneğinden faydalanılır. Bu aşamada istenen boyutlardaki sistem bileşenlerinin birlikte kullanımı olan konfigürasyonlar ve bu sistem elemanlarının bir arada nasıl kullanılacağını belirten işletme stratejileri ve uzun zamanda istenen değerlerde nasıl davranacağı belirlenir[72].

HOMER çok sayıda değişik güç üretim sistemi konfigürasyonlarını simüle edebilmektedir. Örneğin PV panelleri, bir veya birden fazla rüzgar türbinini, generatörleri, batarya grubunu, AC/DC ya da DC/AC dönüştürücüleri, elektrolizörleri, hidrojen depolama tankını ve bunların kombinasyonlarını simüle etmektedir. Bu hibrit

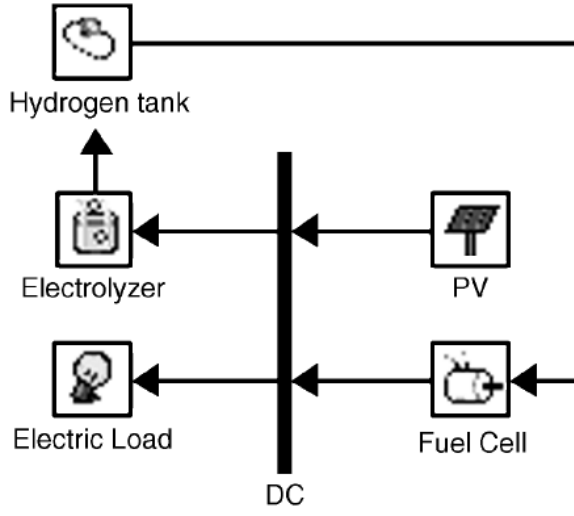
güç üretim sistemleri şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız olabilmektedir. Ayrıca yazılım ısı yüklerinin yanında elektrik yükünün alternatif akım (AC) veya doğru akım (DC) olarak da modellenmesine imkan vermektedir. Şekil 2.23 - Şekil 2.26'da HOMER yazılımı ile simüle edilebilecek farklı güç üretim sistemi konfigürasyonu örnekleri görülmektedir[72].



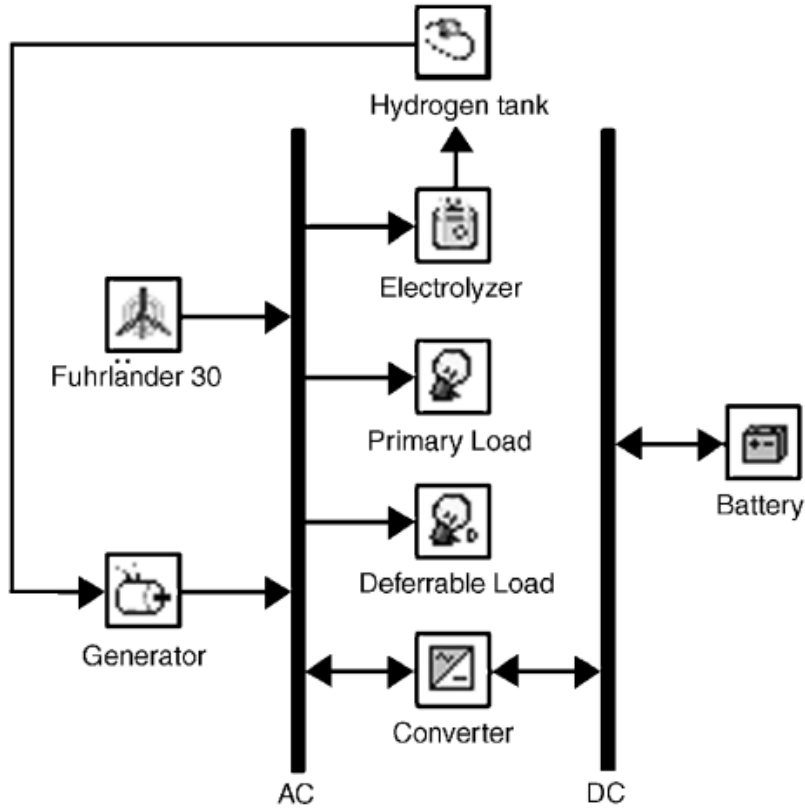
Şekil 2. 23 Hidro/Rüzgar/Dizel/Batarya Hibrit Güç Üretim Sistemi



Şekil 2. 24 Termal Yüklü Rüzgar/Dizel/Batarya Hibrit Güç Üretim Sistemi



Şekil 2. 25 PV/Yakıt Hücresi Güç Üretim Sistemi



Şekil 2. 26 Rüzgar/Dizel/Yakıt Hücresi/Batarya Hibrit Güç Üretim Sistemi

Örnek hibrit güç üretim sistem konfigürasyonlarında simülasyon işlemi iki temel amacı yerine getirmektedir. Birincisi hibrit sistemin yükün enerji ihtiyacını karşılamada en uygun olup olmadığının belirlenmesidir. Burada hibrit güç üretim sistemi istenen elektrik

yükünü veya ısı yükü ve tasarımı yapan kişinin belirlediği diğer kriterleri karşılayabiliyorsa bu durumda hibrit sistemin uygulanabilir (feasible) bir sistem olduğundan söz edilebilir[72].

İkinci hedef ise sistemin ömrü ve maliyeti arasındaki ilişkiyi belirlemektir. Hibrit güç üretim sisteminin kurulumundan itibaren tüm kullanım ömrü süresince yapılacak toplam işletme maliyetlerini belirlemektir. Güç üretim sisteminin ömür ve maliyet ilişkisi farklı türden sistem konfigürasyonlarını ekonomik bakımdan değerlendirmede kullanılan en uygun ölçüttür. Bu ölçütler HOMER yazılımındaki optimizasyon aşamasının temelini oluşturur. HOMER ile istenen sistem konfigürasyonunun bir yıl boyunca saatlik simülasyonları yapılarak modellenmektedir[72]. HOMER saatlik periyotlarla modellediği bu sistem için kullanılabilir enerji miktarını hesaplar ve sonuç ile elektrik yükünü kıyaslar. Üretilen enerji fazlaysa bunu nasıl değerlendireceğine veya yenilenebilir kaynaklardan üretilen enerjinin yetersiz olması durumunda ihtiyacı nasıl karşılayacağına karar verir. HOMER yıllık hesaplamalar sonucunda güç üretim sisteminin elektrik yükünü karşılama durumunu, yenilenebilirlik oranını ve sistem tasarımcısının belirlediği kriterlerin sağlanma durumunu değerlendirir[72].

Bununla birlikte HOMER hibrit güç üretim sisteminin kullanım ömrü boyunca oluşacak maliyetleri hesaplamak için ihtiyaç duyulan, yakıt tüketimi, tahmin edilen akü ömrü, şebekeden satın alınacak enerji miktarı ve generatörün yıl boyu çalışma saati gibi parametreleri de hesaplamaktadır.

HOMER yazılımı toplam bugünkü net maliyeti (NPC) kullanarak sistemin toplam maliyetini belirler. Bu maliyetin hesaplanmasında sistemin ömrü boyunca oluşacak tüm gider ve gelirler ve geleceğe yönelik nakit akışının bugüne indirgenmiş hali dikkate alınmıştır.

Toplam bugünkü net maliyet, hibrit güç üretim sistemi elemanlarının başlangıç maliyetini, projenin ömrü boyunca yapılacak bakım ve onarım, yakıt ve yenileme maliyetlerini ve ihtiyaç durumunda şebekeden tedarik edilen enerji maliyetlerini içermektedir. Üretim fazlasından dolayı şebekeye satılan enerjiden elde edilen gelir ise bugünkü net maliyet değerini azaltmaktadır[72].

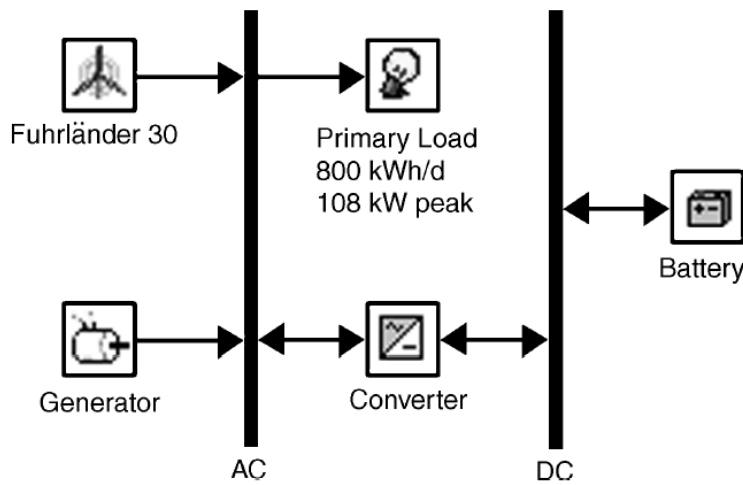
Özellikle enerji kaynaklarının sürekliliği olmayan hibrit güç üretim sistemlerinin birçoğunda, sistemin doğru bir şekilde modellenmesi için bir saatlik zaman periyodu

gereklidir. Örnek olarak bir rüzgar-dizel-batarya hibrit güç üretim sisteminde aylık ortalama rüzgar güç çıkışının bilgisi tek başına değildir. Bunun yanında zamanlama ve çıkış gücündeki değişkenlik de hesaba katılmalıdır[72].

Optimizasyon aşamasında koşulları sağlayan en iyi sistem belirlenirken simülasyon yapılırken belirli bir sistem konfigürasyonu modellenmektedir. HOMER yazılımında sistemi tasarlayan kişinin belirlediği özellikleri karşılayan ve toplam bugünkü net maliyeti en düşük olan konfigürasyona sahip olan sistem optimum sistemdir. Optimum sistemin bulunmasında sistem konfigürasyonlarını oluşturan bileşenlerin ne olduğuna, adedine ve boyutuna karar verilir[72]. HOMER yazılımı ile optimizasyon aşamasında çeşitli sistem konfigürasyonunu simüle edilir, bunlardan belirlenen şartlara uymayanlar elenir ve geriye kalanlar toplam bugünkü net maliyetlerine göre sıralanır. Bu sıralamada toplam bugünkü net maliyeti en düşük sistem optimum hibrit güç üretim sistemidir. Karar değişkenleri, sistemi tasarlayanın kontrolü altında olan bir değişken iken optimizasyon aşaması, tasarımı ilgilendiren her bir karar parametresinin optimum olanını belirler[72].

PV panel büyüklüğü, rüzgar türbini adeti, hidrojen depolama tankı büyüklüğü, elektrolizörlerin büyüklüğü, AC/DC dönüştürücü büyüklüğü ve kullanılan jeneratörün büyüklüğü gibi değişkenler HOMER yazılımında kullanılan bazı karar değişkenlerindedir.

Optimizasyon aşaması sayesinde tasarımcı farklı olasılıklar arasından en uygun sistemi belirler ve geliştirir. Örneğin bir rüzgar/dizel/batarya hibrit güç üretim sistemini göze önüne alalım. Bu sistemin şematik gösterimi Şekil 2.27’de verilmiştir[72].



Şekil 2. 27 Rüzgar/dizel/batarya hibrit güç üretim sistemi

Sistemde rüzgar türbini sayısı, dönüştürücü büyüklüğü ve batarya sayısında oluşacak değişikliğin toplam bugünkü net maliyete nasıl bir etkisi olacağını bilmek mümkün değildir. Bu değişiklikler toplam bugünkü net maliyeti arttırabilir veya azaltabilir. Bundan dolayı bu değişkenlere karar değişkenleri denir. HOMER yazılımı sayesinde çeşitli adetlerde rüzgar türbini, farklı güçlerde dönüştürücüler, farklı adetlerde bataryalar gibi karar değişkenleri ve bunlara karşılık gelen adet veya büyüklüklerin veri girişi yapılır. Programa girişi yapılan bu olasılıklardan en uygun yani optimum sistem seçilir.

Tablo 2.3'te çeşitli sistem bileşenleri için yazılıma giriş yapılan farklı değerler sunulmuştur[72].

**Tablo 2. 3** Farklı sistem konfigürasyonu içeren durum

	FL 30	Generatör	Bataryalar	Dönüştürücü
	Adet	kW	Adet	kW
1	0	135	0	0
2	1		16	30
3	2		32	60
4	3		48	120
5	4		64	
6			128	
7			256	

Tablo 2.3'te görülen veriler için HOMER yazılımı 140 adet seçeneği ( $5 \times 1 \times 7 \times 4 = 140$ ) değerlendirerek içinden en uygun olanını seçecektir. Buraya ne kadar çok sayıda değer girilirse seçenek sayısı ve dolayısıyla daha uygun sistemi tespit etme imkanı artar. Optimizasyon işlemi sonucunda HOMER yazılımı farklı konfigürasyonları ilk sırada en düşük toplam bugünkü net maliyete sahip sistemden başlayarak en yükseğe doğru sıralayarak tablo şeklinde verir. Şekil 2.28'de optimizasyon işlemi sonrası oluşan bir konfigürasyon tablosu görülmektedir[72].

FL30	Gen (kW)	Batt.	Conv. (kW)	Initial Capital	Total NPC	COE (\$/kWh)	Diesel (L)	Gen (hrs)
1	135	64	30	\$ 216,500	\$ 849,905	0.273	75,107	4,528
2	135	64	30	\$ 346,500	\$ 854,660	0.274	54,434	3,350
1	135	48	30	\$ 200,500	\$ 855,733	0.275	78,061	4,910
2	135	48	30	\$ 330,500	\$ 856,335	0.275	57,654	3,685
2	135	32	30	\$ 314,500	\$ 873,322	0.280	62,394	4,139
2	135	96	60	\$ 401,000	\$ 878,370	0.282	48,139	2,603
2	135	64	60	\$ 369,000	\$ 880,421	0.282	52,999	3,195
	135	64	30	\$ 86,500	\$ 885,175	0.284	101,290	5,528
1	135	96	30	\$ 248,500	\$ 887,379	0.285	74,193	4,346
	135	48	30	\$ 70,500	\$ 888,528	0.285	104,009	6,067
1	135	32	30	\$ 184,500	\$ 889,688	0.285	85,310	5,615
2	135	96	30	\$ 378,500	\$ 890,504	0.286	52,442	3,136
2	135	48	60	\$ 353,000	\$ 891,896	0.286	57,316	3,615
2	135	32	60	\$ 337,000	\$ 905,959	0.291	62,312	4,080
2	135	128	60	\$ 433,000	\$ 907,508	0.291	45,596	2,226
1	135	64	60	\$ 239,000	\$ 911,667	0.292	77,753	4,613

**Şekil 2. 28** Sistem konfigürasyonlarına ait örnek optimizasyon çıktıları

Şekil 2.28’de görüldüğü gibi optimizasyon aşamasında konfigürasyonlar toplam bugünkü net maliyet (NPC) değerine göre düşük olandan yüksek olana doğru sıralanır ve en üst satırda görülen konfigürasyon en düşük toplam bugünkü net maliyet değerine sahip olduğu için optimum sistemdir[72].

Hassasiyet analizi yapılırken giriş değerlerindeki değişimlerin çıkış değerlerini ne kadar etkilediği görülür. Hassasiyet analizi için yalnız bir giriş değişkenine ait çeşitli değerler girilebilir. HOMER yazılımında karar değişkeni olarak tanımlanamayan yakıt fiyatı, PV panel ömrü, şebeke fiyatı ve faiz oranı gibi değişkenler hassasiyet değişkeni olarak tanımlanırlar. Ayrıca rüzgar, güneş, akarsu ve elektrik yükü gibi saatlik veriler içeren kaynaklar için de hassasiyet analizi yapılabilir. Analiz yapılırken mevsimsel davranış, istatistiksel özellik veya günlük yük eğrisini değiştirmeden yük verisinin genlikleri değiştirilebilir. HOMER yazılımı ile yenilenebilir enerji kaynaklarının verileri de bu şekilde değerlendirilebilmektedir. Hassasiyet analizi sayesinde belirsiz durumlar çözüme kavuşur. Tasarımcı sistemi tasarlarken belli değişkenlerden emin değilse, değerleri değiştirerek sonuçta oluşan değişimleri görebilir ve değerlendirebilir. Ayrıca hassasiyet analizi kullanıcıya bir hibrit güç üretim sistemi konfigürasyonunun diğer alternatiflerle hangi fiyat ve şartlar altında rekabet edebileceğini gösterir[72].

HOMER yazılımında hem simülasyon sırasında hem de optimizasyon aşamasında ekonomik kriterler göz önünde bulundurulur. Simülasyon yapılırken sistem toplam

bugünkü net maliyeti en düşük değerde yapacak şekilde çalıştırılırken optimizasyon aşamasında en az bugünkü net maliyeti olan konfigürasyon aranmaktadır[72]. HOMER yazılımının optimizasyon aşamasında yenilenebilir ve geleneksel enerji kaynaklarının farklı değerleri için farklı sistem konfigürasyonlarına ait ekonomik durumlarını defalarca karşılaştırması gerekmektedir. Bu karşılaştırmaları doğrulukla yapabilmesi için de sermaye maliyetinin ve işletme maliyetinin hesaba katılması gerekir.

Toplam maliyetin analizinde, projenin ömrü süresince oluşan bütün maliyetler hesaba katılmaktadır. Toplam bugünkü net maliyet parametresi indirim oranı kullanılarak bugüne indirgenmiş nakit akışlarını ve projenin ömrü boyunca oluşacak bütün maliyetlerle birlikte gelirleri dolar üzerinden toplu ödenen bir masraf olarak özetler. Projenin ömrü ve indirim oranları tasarımcı tarafından belirlenebilir. Toplam bugünkü net maliyetin içinde yatırım, bakım ve onarım, işletme, yenileme, şebekeden alınan elektrik ve yakıt maliyetleri bulunmaktadır. Üretim fazlası sonucu şebekeye satılan enerjiden sistemin ömrü sonucu oluşan hurdadan gelir elde edilir. Maliyetlerin pozitif olarak ve gelirler negatif olarak hesaba katılır.

Her bir bileşenin hurda değerini hesaplamak için HOMER yazılımı denklem (2.43)'deki ifadeyi kullanmaktadır[72-74].

$$S = C_{rep} \frac{R_{rem}}{R_{comp}} \quad \text{denklem (2.43)}$$

Bu denklemdeki parametrelerden S dolar cinsinden hurda değeri,  $C_{rep}$  dolar cinsinden bileşenin yenileme maliyeti,  $R_{rem}$  bileşenin yıl olarak kalan ömrü,  $R_{comp}$  bileşenin yıl olarak yaşam süresi olarak temsil edilmektedir. Örneğin projenin süresi 25 yıl ve bileşenlerin ömrü de 25 yıl ise proje bitiminde hurda gelirinden söz edilemez. Fakat projenin ömrü 25 yıl iken bileşenlerin ömrü 30 yıl ise bileşenin yenilenme maliyetinin üçte biri değerinde hurda geliri elde edilir. HOMER yazılımı her bileşenin ilk yatırım, bakım ve onarım, yenilenme, yakıt maliyetleri ve diğer maliyetleriyle, hurda geliri ve diğer gelirlerini birleştirip bileşenin yıllık maliyetini hesaplar. Tüm bileşenlerin yıllık maliyetlerinin toplamı olarak da hibrit güç üretim sisteminin yıllık maliyeti bulunur. Bu değer yardımıyla HOMER yazılımının kullandığı iki ana ekonomik parametrenin hesaplanır. Bu parametrelerden biri toplam net bugünkü maliyet ve diğeri birim enerji maliyetidir(COE).

HOMER yazılımıyla toplam bugünkü net maliyet hesaplanırken denklem (2.44)'deki eşitlikten yararlanılır[73,74].

$$C_{NPC} = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i,R_{proj})} \quad \text{denklem (2.44)}$$

$C_{ann,tot}$  toplam yıllık maliyeti (\$/yıl),  $i$  % cinsinden reel faiz oranını,  $R_{proj}$  yıl cinsinden proje ömrünü,  $CRF$  anaparayı geri kazanma faktörünü (capital recovery factor) belirtmektedir.  $CRF$  denklem (2.45)'deki gibi ifade edilmektedir[73,74].

$$CRF(i, N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad \text{denklem (2.45)}$$

Burada  $i$  yıllık reel faiz oranını,  $N$  yıl sayısını temsil eder. Birim enerji maliyeti (Cost of energy) ise, denklem (2.46)'teki gibi ifade edilir[73,74].

$$COE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{prim} + E_{def} + E_{grid,sales}} \quad \text{denklem (2.46)}$$

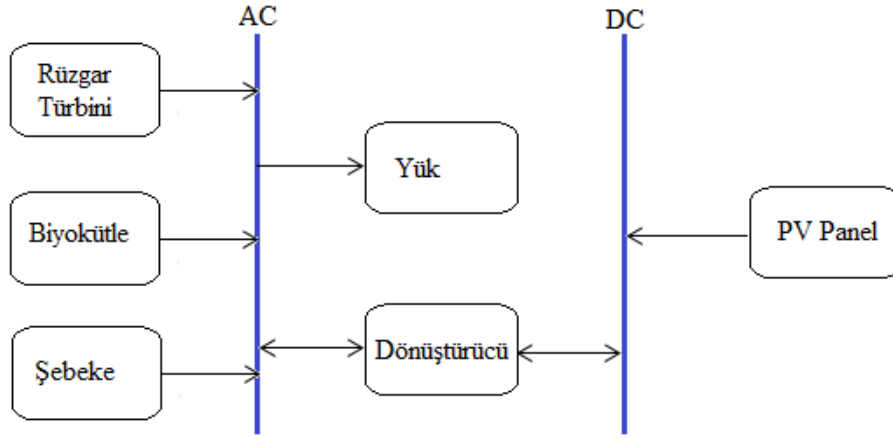
Burada  $C_{ann,tot}$  toplam yıllık maliyeti (\$/yıl),  $E_{prim}$  yıllık toplam yük miktarını (kWh/yıl),  $E_{def}$  yıllık ertelenebilir toplam yük miktarını (kWh/yıl),  $E_{grid,sales}$  Şebekeye satılan yıllık enerji miktarını (kWh/yıl) belirtmektedir[73,74].

Tez çalışmasında kullanılan HOMER yazılımı hesaplamaları saatlik periyotta yapmaktadır. Yılın her bir saati için HOMER programı kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik talebinin karşılanıp karşılanmayacağını belirlemekte, eğer bu kaynakların yetersizliği söz konusuysa, şebeke veya generatör gibi kaynakların gerekli şekilde devreye alınmasını sağlamaktadır. HOMER yazılımıyla sistem kontrol edilirken amaç maliyeti en düşük değerde tutmaktır. Yazılımda kullanılan tüm enerji kaynaklarının maliyeti kWh başına enerji maliyeti olarak tanımlanır. Bu maliyetler güç kaynaklarının belirli bir zamanda enerji üretimi için gerekli olan üretim maliyetleridir. HOMER yazılımı bu maliyetleri kullanarak elektrik yükünü karşılayacak kaynakların kombinasyonunu araştırır ve bu kombinasyonlardan en düşük maliyete sahip olan sistemi bulur[72].

## 2.10 Hibrit Güç Üretim Sistemlerinin Modellenmesi

Hibrit güç üretim sistemleri temelde yük, enerji üretim kaynağı ve dönüştürücüler olmak üzere üç çeşit bileşen içermektedir. Enerji kaynağı olarak genellikle, geleneksel enerji kaynaklarından dizel jeneratörler, yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar, güneş,

biokütle ve hidrolik son olarak alternatif enerji kaynaklarından ise hidrojen kaynakları HOMER’de modellenenmektedir. Ayrıca şebeke de HOMER’da modellenmektedir. Tez çalışması kapsamında Marmara Üniversitesi Göztepe Kampüsünün enerji ihtiyacı rüzgar, güneş, biokütle enerji kaynakları ve şebeke ile en optimum şekilde karşılanacaktır. Şekil 2.29’da Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sisteminin blok diyagramı görülmektedir.



**Şekil 2. 29** Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sistemi blok diyagramı

### 2.10.1 Yükün Modellenmesi

Marmara Üniversitesi İstanbul’un Anadolu ve Avrupa yakasında 9 farklı yerleşkede faaliyet gösteren bir kurumdur. Bunların Anadolu yakasında bulunanları Göztepe, Acıbadem, Bağlarbaşı, Anadoluhisarı, Başbüyük, ve Haydarpaşa yerleşkeleridir. Avrupa yakasında yerleşkeler ise Nişantaşı, Bahçelievler ve Sultanahmet yerleşkeleridir. Toplam alanı 617.782,9 m<sup>2</sup> olan yerleşkeler içinde alanı bakımından 153.394 m<sup>2</sup> ile ikinci en büyüğü Göztepe Yerleşkesidir.

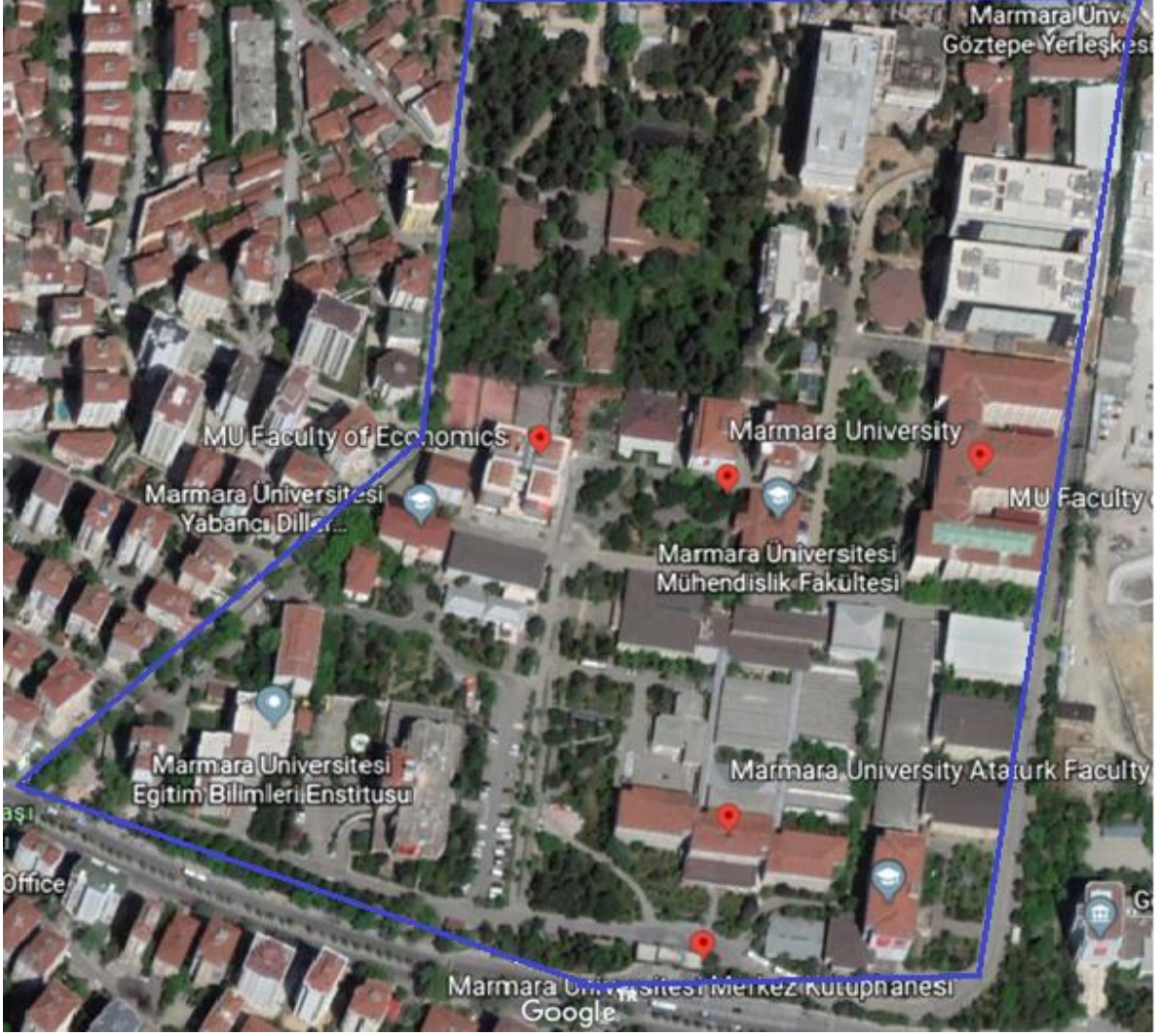
Göztepe yerleşkesinde Yabancı Diller Yüksekokulu, Mühendislik Fakültesi, Teknoloji Fakültesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Bankacılık ve Sigortacılık Yüksekokulu, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Atatürk Eğitim Fakültesi, İşletme Fakültesi ve birçok Araştırma ve Uygulama Merkezleri, Merkez kütüphane, Üniversite yemekhanesi, kültür merkezi, kantin, yurt ve barınma gibi birçok sosyal birimlerde bulunmaktadır. Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesine ait yerleşim planı Şekil 2.30’da detaylı olarak görülmektedir.[75]

- 1-Isı Merkezi
- 2-Depo
- 3-Kafeterya
- 4-AEF Yabancı Diller Bölümü
- 5-Yenilik Merkezi
- 6-Handan Ertuğrul Kız Öğrenci Yurdu
- 7-Ortez Protez Atelyesi
- 8-Mediko Sosyal
- 9-Mediko Sosyal Ek Bina
- 10-İnternet Cafe
- 11-Yemekhane
- 12-Tarihi Hamam
- 13-Trafo
- 14-Mühendislik Fakültesi B
- 15-Mühendislik Fakültesi C
- 16-Mühendislik Fakültesi A
- 17-Fen Edebiyat Fakültesi
- 18-Rekreasyon Alanı
- 19-Çarşı
- 20-Açık Spor Sahası
- 21-İmdat Anfisi
- 22-Bankacılık Sigortacılık Y.O
- 23-İktisadi İdari Bilimler Fakültesi
- 24-Y Dil Eğitim Öğr. Arş. Mrk & Y. Dil Yüksekokulu Hz Sınıfı
- 25-Y. Diller Yüksekokulu
- 26-İbrahim Üzümcü Kültür Merkezi
- 27-İ.İ.B.F. (İ.Ü.K.M) İngilizce Bölümler
- 28-Özmen Aktar Kız Yurdu
- 29-Odışen&Türkiyat Arş. Enst. & Anaokulu Öğr. Anabilim Dalı
- 30-ATE&Kadın İş gücü Arş. Mrk. & Yeni Tekno Arş. Mrk
- 31-Trafo
- 32-Lokanta
- 33-Konuk Evi
- 34-Rektörlük
- 35-Kütüphane
- 36- Kapalı Spor Salonu



**Şekil 2. 30** Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesine ait yerleşim planı

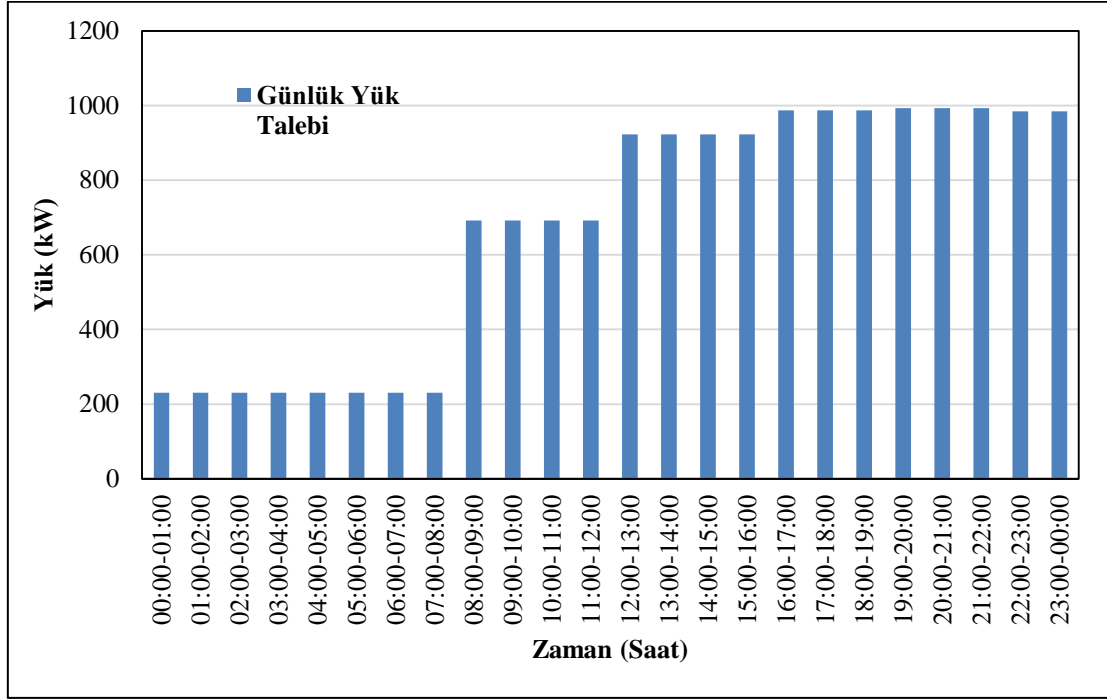
Ayrıca Göztepe Yerleşkesine ait Google Earth uydu görüntüsü de Şekil 2.31’de görülmektedir. Yükün modellenmesi ve yükün ne tür bir içeriğe sahip olduğunun anlaşılması açısından bu bilgiler azami önem arz etmektedir. Bu kampüste 24 saat enerji tüketimi söz konusudur. Sosyal tesislerde özellikle yurtlarda ve ikinci öğretim olan birimlerde enerji tüketimi gece geç saatlere kadar gerçekleşmektedir. Göztepe yerleşkesinde tüketilen enerji daha çok aydınlatma yükü olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca uygulaması olan bölümlerin laboratuvarlarında da azda olsa sanayi yükü olarak ifade edilebilecek olan bir tüketim söz konusudur.



**Şekil 2. 31** Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesine ait Google Earth Uydu Görüntüsü

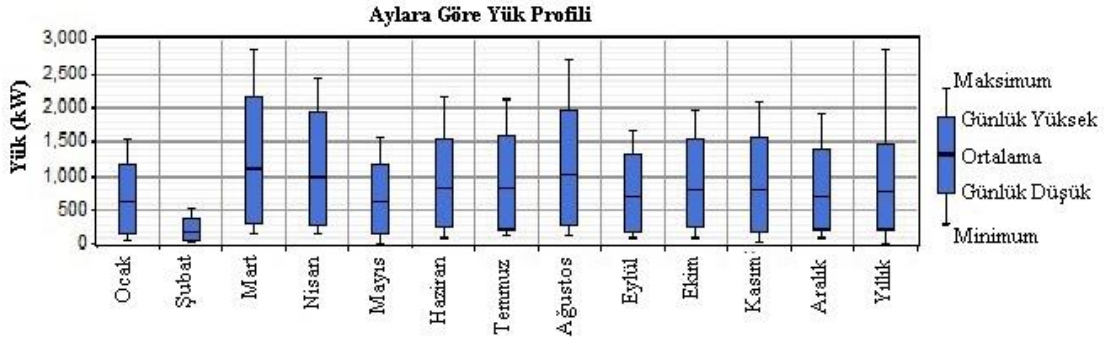
Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesinde enerji dağılımı farklı dağıtım transformatörleri üzerinden gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla yerleşkenin enerji ölçümü bir noktadan değil birden çok noktadan gerçekleştirilmektedir. Ayrıca her fakülte ya da birimin enerji ölçümü süzme elektrik enerji sayaçları ile yapılmaktadır. Yerleşkenin 2015-2017 yıllarına ait enerji tüketim değerleri elektrik enerjisi dağıtım şirketinden (AYEDAŞ) aylık faturalar alınarak elde edilmiştir[76]. Aylık enerji tüketim değerleri her bir birimin mevcut enerji tüketim davranışı yani elektrik enerjisi tüketim eğilimi dikkate alınarak bir değerlendirme yapılmıştır. Saatlik bazda Göztepe yerleşkesinin enerji tüketim değerleri elde edilmiştir. Göztepe yerleşkesine ait günlük yük talebi Şekil 2.32’de verilmiştir. Enerji tüketiminin en düşük olduğu saat aralıkları 00:00 – 08:00 olup

230.63kW olarak gerçekleşmektedir. Enerjinin en yoğun tüketildiği zaman aralıkları ise akşam saatlerindedir. Bu zaman dilimleri arasında 993kW'lık bir enerji tüketimi söz konusudur. Akşam saatlerindeki enerji tüketimindeki artışı ikinci öğretim programları bulunan fakültelerdeki enerji tüketimleri oluşturmaktadır.



**Şekil 2. 32** Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesine ait günlük yük talebi

Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesinin enerji tüketiminin mevsimsel durumu Şekil 2.33'te verilmektedir. Şekil 3.12 detaylı irdelendiğinde her aya ait minimum enerji tüketimi, ortalama enerji tüketimi, maksimum enerji tüketimi değerleri görülmektedir. Aylık enerji tüketimi değerleri bu bağlamda değerlendirildiğinde en fazla enerji tüketimi Mart ve Ağustos aylarında gerçekleşirken, en düşük enerji tüketiminin de Şubat ayında olduğu görülmektedir.



**Şekil 2. 33** Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesinin 2017 yılı enerji tüketiminin mevsimsel durumu

### 2.10.2 Enerji Kaynaklarının Modellenmesi

Tez çalışması kapsamında temelde üç yenilenebilir enerji kaynağı kullanılmaktadır. Kaynaklar rüzgar, güneş ve biokütle olup bu kaynakların modellenmesi detaylı olarak irdelenecektir.

#### 2.10.2.1 Rüzgar Enerji Kaynağı

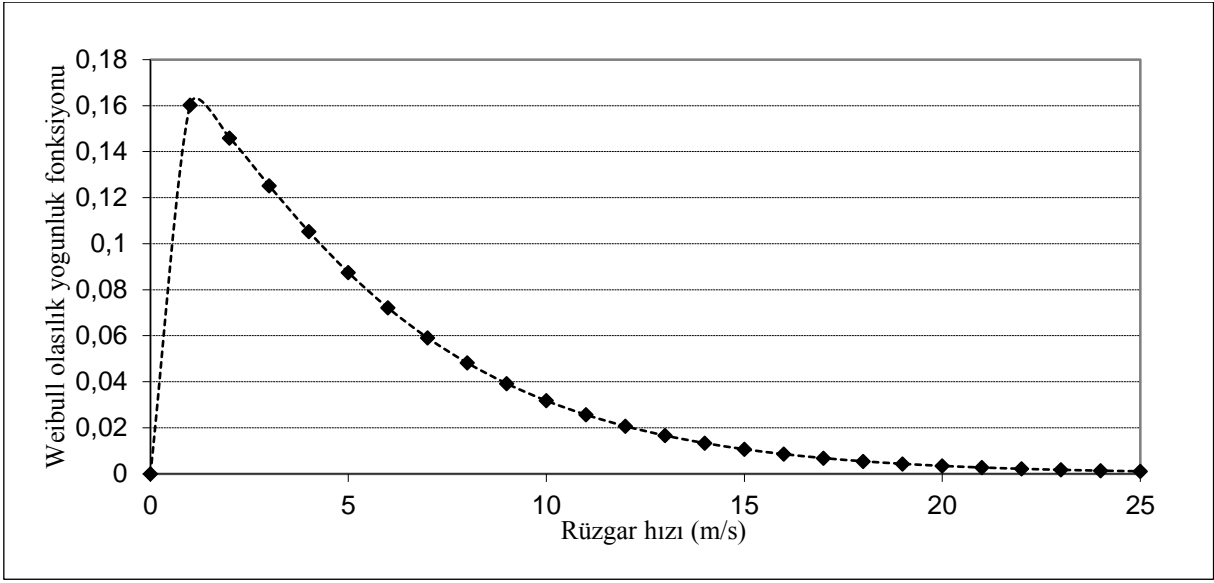
Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesine en yakın lokasyonda bulunan ve Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğüne ait 2015-2017 yılları arasında rüzgar ölçüm istasyonundan 10m yükseklikten alınan rüzgar hızı verileri incelenmiştir[77] Rüzgar enerjisi potansiyel belirleme çalışmalarında yoğun olarak kullanılan Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ile bu veriler analiz edilmiştir. Tablo 2.4'te 2015-2017 yıllarına ait rüzgar hız değerleri ve esme sıklıkları görülmektedir. Bu veriler Bölüm 2'de detaylı olarak irdelenmiş olan matematiksel denklemler kullanılarak Tablo 2.4 oluşturulmuştur.

**Tablo 2. 4** 2015 - 2017 yıllarına ait rüzgar hız değerleri ve esme sıklıkları

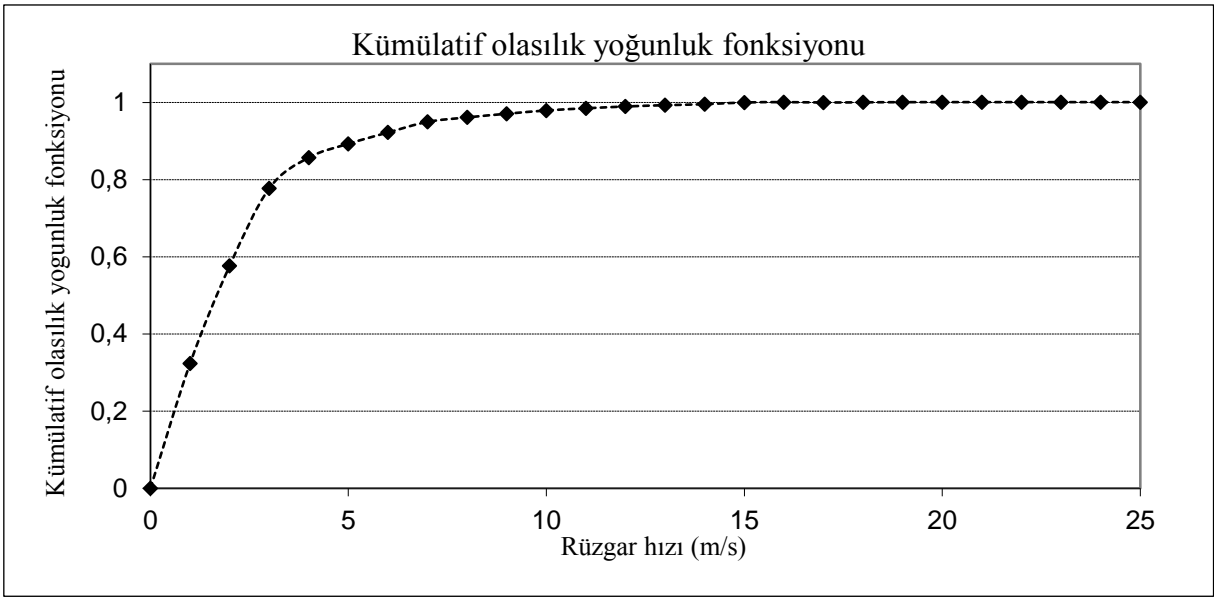
Rüzgar hız aralığı	Rüzgar hızı ( $V_i$ )	$V_i^3$	Bir yıl içerisindeki esme süresi (saat)	Frekans $f_i$	$f_i V_i^3$
0-1	0.50	0.13	2831	0.3232	0.0403967
1-2	1.50	3.38	2218	0.2532	0.8545377
2-3	2.50	15.63	1760	0.2009	3.1392694
3-4	3.50	42.88	701	0.0800	3.4309789

4-5	4.50	91.13	312	0.0356	3.2455479
5-6	5.50	166.38	257	0.0293	4.881093
6-7	6.50	274.63	241	0.0275	7.5553225
7-8	7.50	421.88	101	0.0115	4.8640839
8-9	8.50	614.13	83	0.0095	5.8187643
9-10	9.50	857.38	75	0.0086	7.3405394
10-11	10.50	1157.63	49	0.0056	6.4752997
11-12	11.50	1520.88	41	0.0047	7.1182506
12-13	12.50	1953.13	30	0.0034	6.6887842
13-14	13.50	2460.38	22	0.0025	6.179024
14-15	14.50	3048.63	18	0.0021	6.2642979
15-16	15.50	3723.88	8	0.0009	3.4007991
16-17	16.50	4492.13	5	0.0006	2.5639983
17-18	17.50	5359.38	4	0.0005	2.4472032
18-19	18.50	6331.63	3	0.0003	2.1683647
19-20	19.50	7414.88	1	0.0001	0.8464469
			8760	1	85.323002
Ortalama rüzgar hızı:			$V_m = \left( \frac{\sum_{i=1}^n f_i V_i^3}{\sum_{i=1}^n f_i} \right)^{1/3}$		<b><u>5,20m/s</u></b>
Standart Sapma:			$\sigma_V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_i (V_i - V_m)^2}{\sum_{i=1}^n f_i}}$		<b><u>10.199</u></b>

Standart sapmanın düşük değerleri veri setinin düzgün dağılmış olduğunu göstermektedir. Tablo 2.4'teki veriler kullanılarak grafik metodu yardımıyla Weibull parametreleri olan k ve c parametrelerinin değerleri sırasıyla 1,73 ve 4,32m/s olarak elde edilmiştir. Bu parametreler ışığında Göztepe Yerleşkesine ait Weibull olasılık yoğunluk ve kümülatif yoğunluk fonksiyonları Şekil 2.34 ve Şekil 2.35'te elde edilmiştir.

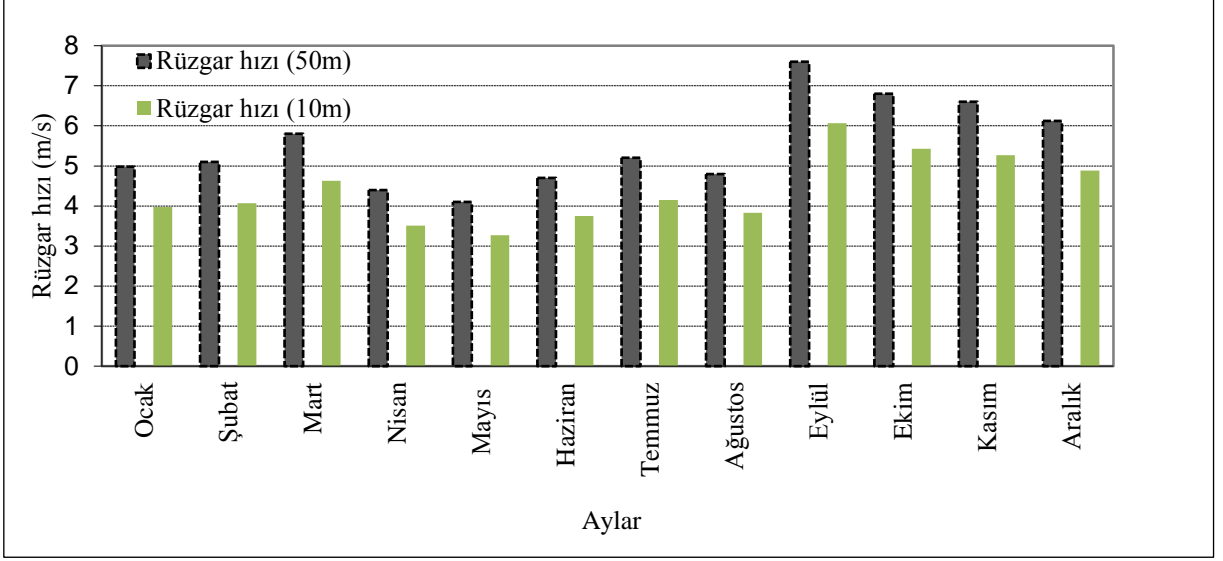


**Şekil 2. 34** Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesi Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu



**Şekil 2. 35** Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesi kümülatif yoğunluk fonksiyonu

Göztepe Yerleşkesine ait 2014-2015 yıllarına ait 10m yükseklikte ölçülmüş olan saatlik ortalama rüzgar hız değerleri denklem 1.36 kullanılarak 50m yükseklikteki aylık rüzgar ortalamaları hesaplanmıştır. Şekil 2.36'da 10m ve 50m yükseklikteki aylık ortalama rüzgar hız değerleri görülmektedir.



**Şekil 2. 36** 10m ve 50m yükseklikteki aylık ortalama rüzgar hız değerleri

HOMER yazılımına 50m yükseklikteki rüzgar hız değerleri girilmiştir.

### 2.10.2.2. Güneş Enerji Kaynağı

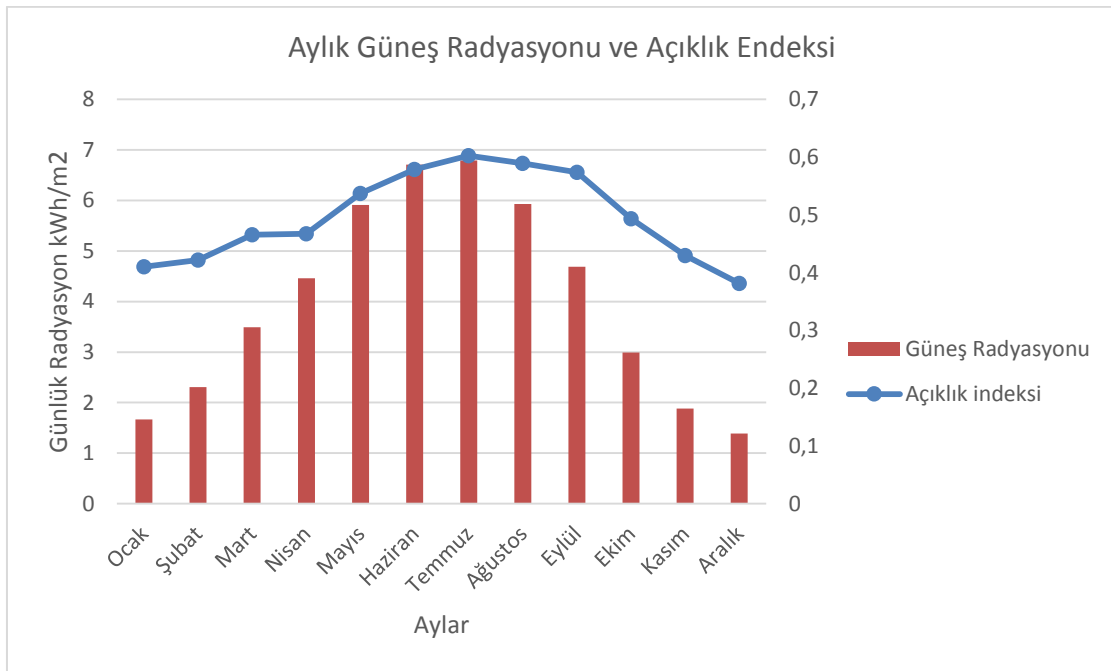
PV panel barındıran bir hibrit güç üretim sistemini modellerken HOMER yazılımı uygulama yapılacak konumun ne kadar güneş aldığı verisine gereksinim duymaktadır. Güneş verisi, bir yıl içinde yeryüzüne çarpan global güneş radyasyonu miktarını göstermektedir. Güneş kaynağı verisi temel olarak üç şekilde olabilir:

- Yatay yüzey üzerine gelen saatlik ortalama küresel güneş radyasyonu ( $\text{kWh/m}^2$ )
- Yatay yüzey üzerine gelen aylık ortalama küresel güneş radyasyonu ( $\text{kWh/m}^2$ )
- Aylık ortalama açıklık (geçirgenlik) indeksi

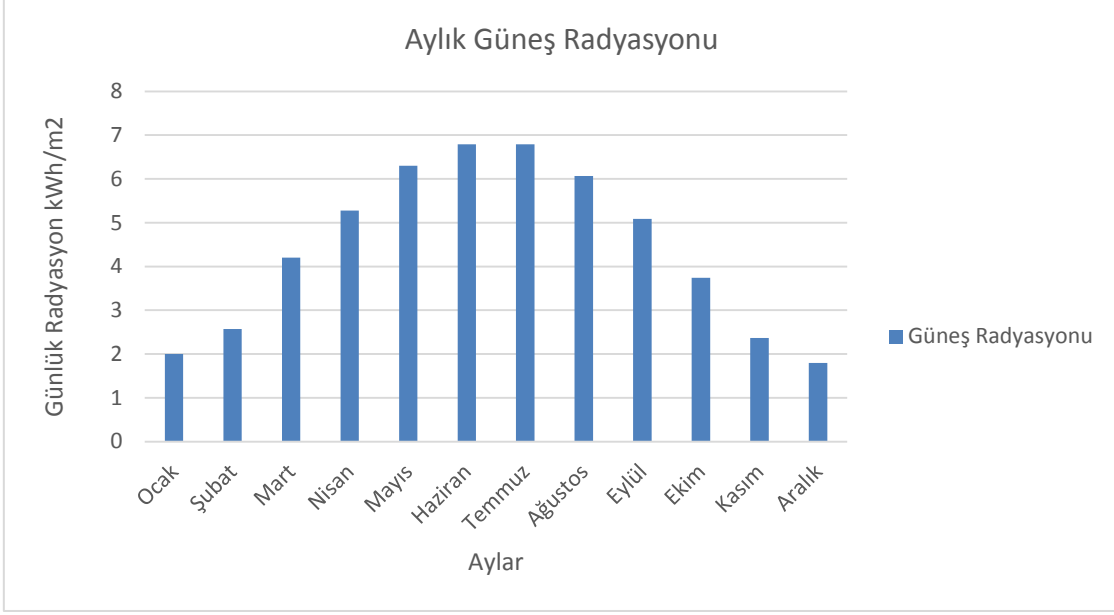
Yeryüzüne gelen güneş radyasyonunun atmosferin en üst katmanına gelen güneş radyasyonuna oranı açıklık indeksini verir. Açıklık indeksinin değeri 0 ile 1 arasında değişir ve atmosferin geçirgenliğiyle ilgili bilgi verir.

HOMER yazılımına ilgili lokasyona ait enlem ve boylam bilgileri girildiğinde HOMER, Graham ve Hollands tarafından geliştirilmiş olan bir algoritma vasıtasıyla doğal olmayan saatlik küresel güneş radyasyonu verisini oluşturur[78]. Aylık ortalama güneş radyasyonu değerleri ve enlem bu algoritmanın giriş verileri iken çıkış verisi de gerçekten ölçümü yapılmış bir veri kümesi ile benzer istatistiksel karakteristiğe sahip 8760 saatlik bir veri kümesidir.

Bu istatistiksel özelliklerden biri, bir günün bir önceki güne benzer olması ve bir saatin bir önceki saate benzer olması eğilimi olan otokorelasyon özelliğidir[72]. Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesi 40.9893° N enlem ve 29.0546° E boylamda yer almaktadır. Deniz seviyesinden yüksekliği 41m'dir. Göztepe Yerleşkesinin GPS koordinatları 40° 59' 6.0036" ve 29° 3' 9.5472" dır[75]. Göztepe Yerleşkesine ait enlem ve boylam verileri kullanılarak Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesine ait Graham ve Hollands tarafından geliştirilmiş algoritma yardımıyla HOMER tarafından güneş radyasyon verileri elde edilmiştir. Şekil 2.37'de Göztepe Yerleşkesine ait güneş radyasyonu ve açıklık indeksi değerleri görülmektedir[78].



**Şekil 2. 37** Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesine ait HOMER'dan alınan güneş radyasyonu ve açıklık indeksi değerleri [78]



**Şekil 2. 38** Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesine ait YEGM'den alınan güneş radyasyonu değerleri [98]

HOMER yazılımından elde edilen ve YEGM 'den alınan değerlere göre güneş radyasyonu verileri karşılaştırıldığında değerlerin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. YEGM'den alınan veriler yıl boyunca genel olup HOMER'dan alınan veriler simülasyon esnasında gerçek zamanlı olarak elde edilmektedir. Bu yüzden HOMER yazılımından alınan güneş radyasyon verileri tercih edilmiştir.

Şekil 2.37 detaylı irdelendiğinde en yüksek güneş radyasyon değerine Temmuz ayında ulaşılırken en düşük güneş radyasyon verisi ise Aralık ayında görülmektedir. Ortalama güneş radyasyon değeri  $4.028 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$  olarak hesaplanmaktadır. Benzer şekilde açıklık indeksinde ise maksimum değer Ağustos ayında gerçekleşirken en düşük değer ise Aralık ayında oluşmaktadır. Ortalama açıklık indeksi değeri  $0.520$  olarak hesaplanmaktadır.

### 2.10.2.3 Biokütle Enerji Kaynağı

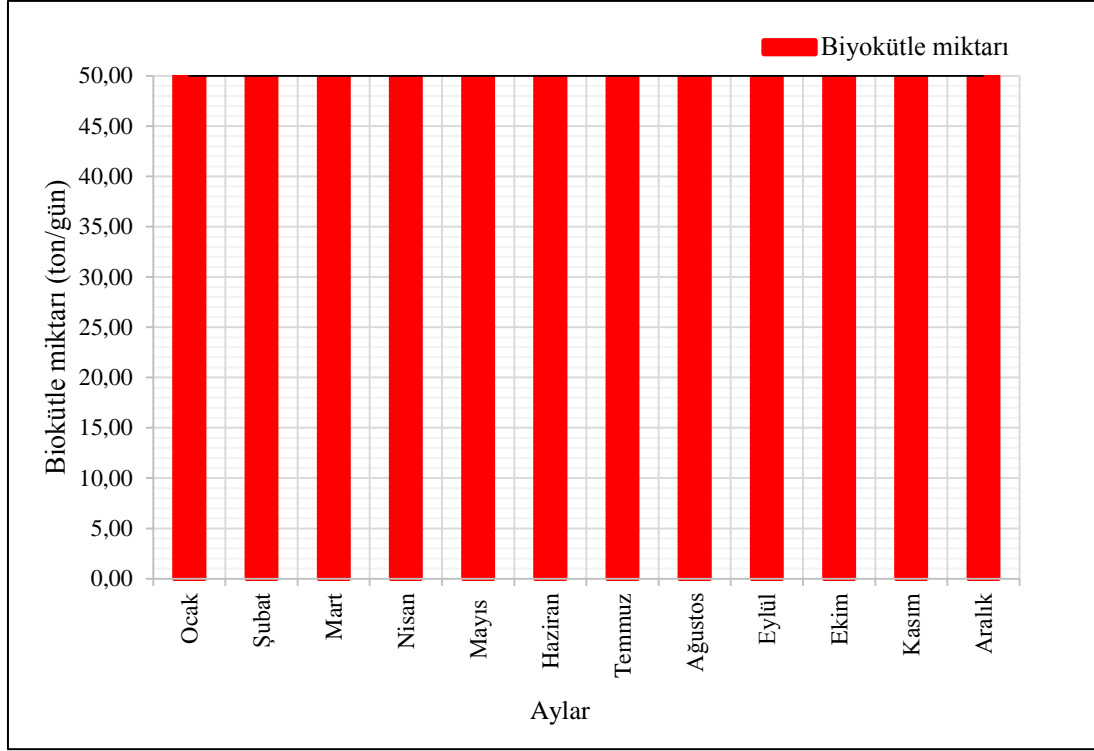
Büyükbaş hayvanlardan elde edilen atıkları metan veya sıvı formda kojenarasyon tesisinde yakarak elektrik ve ısı üretilebilmektedir. Tez kapsamında Trakya Bölgesinde hayvancılığın gelişmiş düzeyde olması nedeniyle bölgedeki hayvancılık atıklarından elde edilebilecek elektrik üretim potansiyeli dikkate alınmıştır. İstanbul'a yakın bir yerleşim bölgesi olan Tekirdağ, Edirne ve Kırklareli biokütle enerjisi potansiyeli yüksek bir bölgedir. Bu kapsamda bu bölgede bulunan hayvan atıklarının değerlendirilmesi

düşünülmüştür. Bölgede bulunan büyükbaş hayvan sayıları Türkiye İstatistik Kurumundan temin edilmiştir[79].

**Tablo 2. 5** 2017 yılı Trakya Bölgesi hayvan sayıları

<b>İller</b>	<b>Büyükbaş hayvan</b>
Edirne	251.230
Kırklareli	189.192
Tekirdağ	253.920
<b>Toplam</b>	<b>442.321</b>

Tablo 2.5'te 2017 yılı Trakya bölgesi büyükbaş hayvan sayıları görülmektedir. Literatürde yapılmış birçok çalışma ile geçerliliği ispatlanmış olan modeller ile büyükbaş bir hayvandan yılda 3.6ton gübre elde edilmekte ve bu gübre miktarından hayvanın cinsine ve ırkına göre günlük  $33m^3 - 50m^3$  aralığında biyogaz elde edilmektedir [80,81]. Bu değerler dikkate alınarak Göztepe Yerleşkesinin enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla İstanbul'a en yakın yerleşim olan Tekirdağ'dan 5000 büyükbaş hayvana ait atık temin edilecek ve bu atığın değerlendirilmesi ile 18,000ton gübre elde edilmektedir. Bu değer Şekil 2.39'da görüldüğü gibi ortalama günlük olarak yaklaşık 50ton olarak hesaplanmaktadır. Elde edilen biyogaz miktarı ise  $2000m^3$ 'dür. HOMER yazılımına biokütle kaynağını günlük 50t olarak veri girişi yapılmıştır.

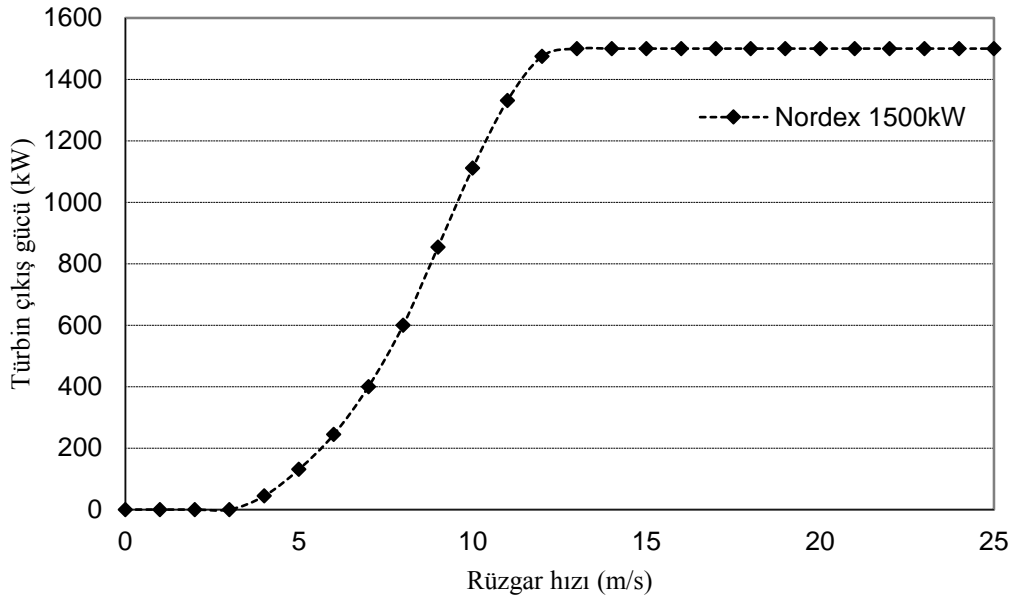


**Şekil 2. 39** Göztepe yerleşkesi için kullanılacak biyokütle miktarı

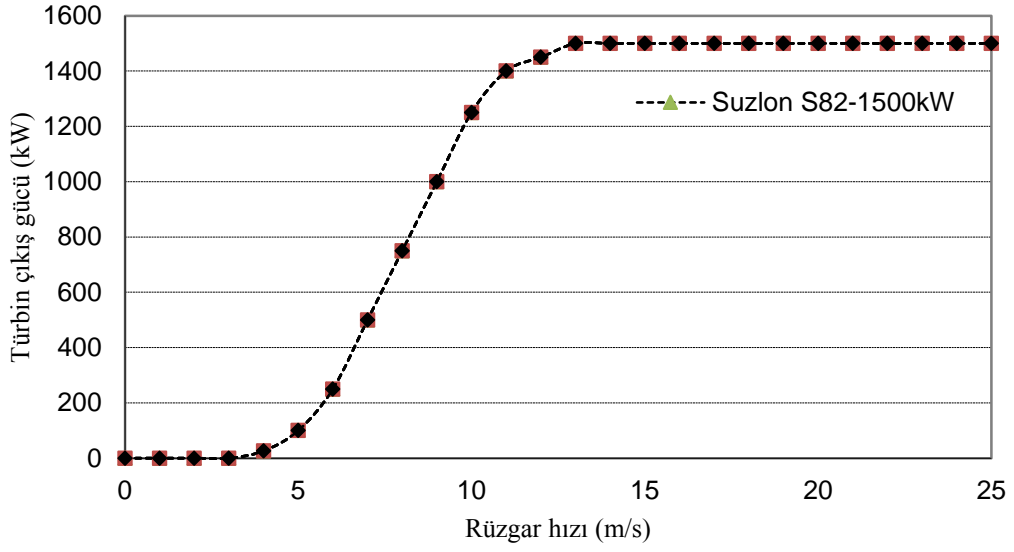
## 2.10.3 Güç Üretim Sistemi Bileşenlerinin Modellenmesi

### 2.10.3.1 Rüzgar Türbini Modeli

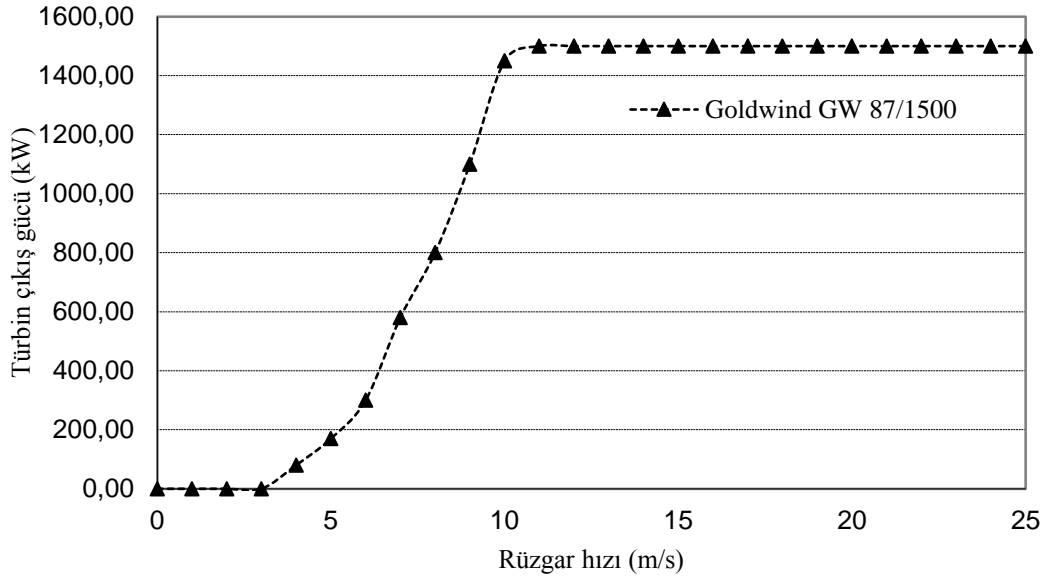
HOMER yazılımı seçilen rüzgar türbini kanat uzunluğu ve direk boyuna göre tekrar rüzgar hızlarını yüksekliğe bağlı olarak hesaba katmaktadır. Optimum rüzgar türbinini belirlemek amacıyla beş farklı rüzgar türbini güç eğrileri dikkate alınarak analiz edilmiştir.



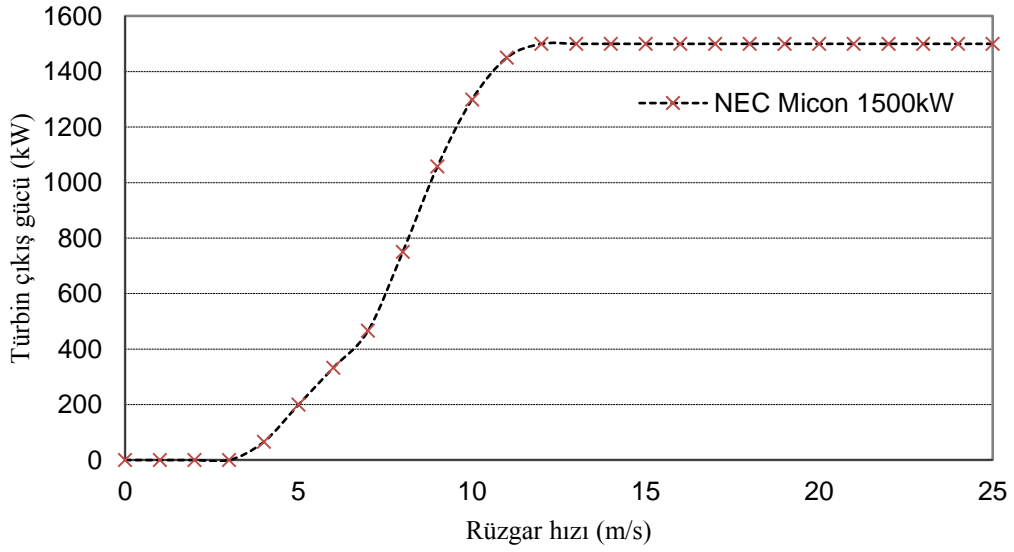
Şekil 2. 40 Nordex 1500kW rüzgar türbini güç karakteristiği[82]



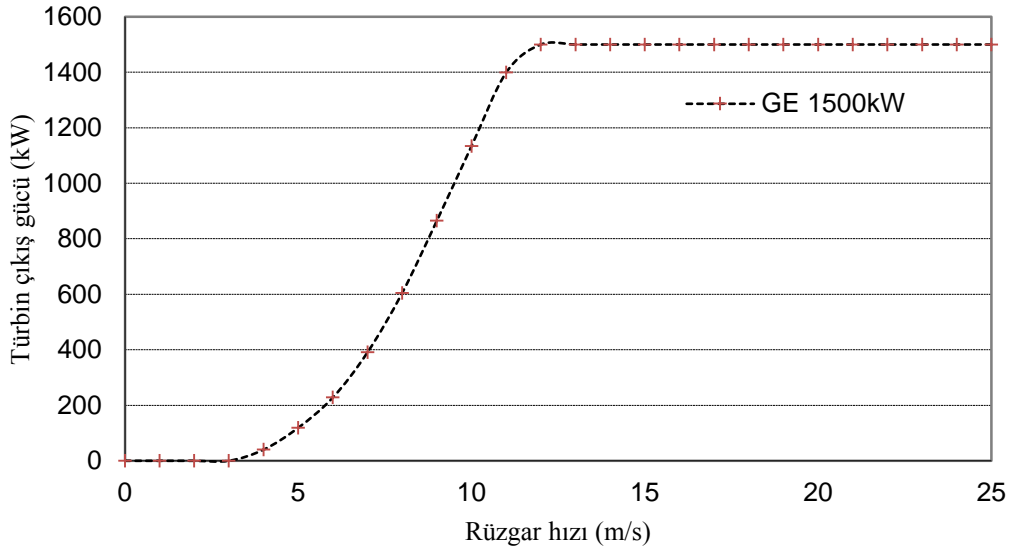
Şekil 2. 41 Suzlon S82 1500kW rüzgar türbini güç karakteristiği[83]



Şekil 2. 42 Goldwind GW 87/1500kW rüzgar türbini güç karakteristiği[84]



Şekil 2. 43 NEG Micon 1500kW rüzgar türbini güç karakteristiği[85]



Şekil 2. 44 GE 1500kW rüzgar türbini güç karakteristiği[86]

Rüzgar türbinlerinden elde edilen elektriksel güç ifadesi denklem (2.47)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$P_e = \begin{cases} 0 & v < v_c \\ P_{eR} \frac{v - v_c}{v_R - v_c} & v_c \leq v \leq v_R \\ P_{eR} & v_R \leq v \leq v_F \\ 0 & v > v_F \end{cases} \quad \text{denklem (2.47)}$$

Burada  $P_e$  rüzgar türbininin anlık elektriksel gücünü (W),  $v$  anlık rüzgar hızı,  $P_{eR}$  rüzgar türbini anma gücünü,  $v_c$  türbinin enerji üretebileceği minimum rüzgar hız değerini,  $v_R$  türbinin anma rüzgar hızını,  $v_F$  türbininin durdurulduğu rüzgar hız değeridir[34].

$$CP = \frac{\sum_{i=1}^{8760} P_{e_i}}{8760 \cdot P_{eR}} \quad \text{denklem (2.48)}$$

Kapasite faktörü ortalama üretilen gücün anma gücüne bölünmesi ile elde edilen değerdir.[34] Bir lokasyonda maksimum enerji üretmek ve maksimum fayda elde etmek için farklı rüzgar türbinleri seçilerek en uygun olanın belirlenebilmesi için kapasite faktörü hesaplamaları yapılmaktadır. Kapasite faktörü en yüksek olan türbin seçilmektedir.

**Tablo 2. 6** Göztepe Yerleşkesi için seçilen türbin tipleri ve kapasite faktörleri

<b>Türbin modeli</b>	<b>Nordex 1500kW</b>	<b>Suzlon S82-1500kW</b>	<b>Goldwind GW 87/1500kW</b>	<b>NEC Micon 1500kW</b>	<b>GE 1500kW</b>
<b>Toplam üretilen güç (kWh)</b>	1,515,627	1,606,386	1,852,440	1,801,683	1,506,051
<b>Rüzgar türbini çıkış gücü x 8760 (kWh)</b>	13140000	13140000	13140000	13140000	13140000
<b>Kapasite faktörü</b>	6.31%	7.01%	9.57%	8.38%	6.54%

Göztepe Yerleşkesi için kullanılan rüzgâr hız değerleri kullanılarak her bir rüzgar türbininden üretilen yıllık enerji miktarı hesaplanmıştır. Toplam üretilen enerjinin mevcut rüzgar türbin gücüne oranı olan kapasite faktörleri belirlenmiştir. Hesaplanan kapasite faktörü en yüksek olan türbin HOMER yazılımında kullanılacaktır. Tablo 2.6 Rüzgar türbinlerinden elde edilen enerji ve kapasite faktörleri görülmektedir. Tablo 2.6 irdelendiğinde en yüksek kapasite faktörüne sahip olan türbinin 1500kW'lık Goldwind GW 87/1500 modelidir.

Tez çalışması kapsamında bu model kullanılacaktır. Goldwind GW 87/1500 modeli rüzgar türbininin ilk kurulum maliyeti 2,000,000\$ olup yenileme ve işletme- bakım maliyetleri sırasıyla 1,800,000\$, 12,000\$/yıldır. HOMER yazılımda rüzgar türbin sayısı aralığı 0 – 8 arasında birer artırımla programda koşturulmuştur. Sıfır rakamı yazılımda rüzgar türbininin olmadığı olasılığı ifade etmektedir. Rüzgar türbin ömrü 25 yıl olarak belirtilmiştir.

### **2.10.3.2 PV Panel Modeli**

PV güç üretim sistemlerinde uygulamada en yoğun olarak kullanılan PV panel tipleri kristal silikonlu ve ince filmlili PV panellerdir. Yapılan birçok akademik çalışma da ince

film, monokristal ve polikristal PV panelleri incelenmiş ve birtakım sonuçlar elde etmişlerdir. Bu sonuçlardan biri mono-kristal ve poli-kristal panellerin ürettiği gerilimlerin birbirine çok yakın olduğu ince filmli PV panelin ise mono ve poli kristalli PV panellerin çıkışının yaklaşık iki katı olduğu fakat çıkış akımının çok küçük olduğudur. Bu yüzden ince film PV panelinin çıkış gücü monokristal ve polikristal PV panellerinin yarısı kadardır. PV panellerin boyutları incelendiğinde; monokristal PV paneli en az yer kaplayan PV panelemdir. Polikristal PV paneli, monokristal PV panele göre %1-2 arası daha fazla yer kaplamaktadır. PV paneller arasında en çok yer kaplayan ise ince film PV panelidir. Monokristal PV panele göre yaklaşık 2-3 kat fazla yer kaplamaktadır. Monokristal ve polikristal PV panellerin verimlilik değerleri birbirlerine çok yakındır. Polikristal PV paneller fiyat bakımından daha uygundur[87]. Benzer şekilde Fanney ve ark., tek kristalli, çok kristalli, Silikon filmli ve Amorf yapı PV panelleri karşılaştırmıştır. PV panellere ait teknik bilgiler Tablo 2.7’de görülmektedir.

**Tablo 2. 7** PV panel tipleri teknik özellikleri

Hücre teknolojisi	Tek kristalli PV	Çok kristalli PV	Silikon PV	Amorf yapı PV
<b>Panel boyutları (mxm)</b>	1.38 x 1.18	1.38 x 1.18	1.38 x 1.18	1.37 x 1.48
<b>Ön kaplama</b>	6mm cam	6mm cam	6mm cam	Tefzal
<b>Hücre boyutları (mm x mm)</b>	125 x 125	125 x 125	150 x 150	119 x 340
<b>Hücre sayısı (seri olarak)</b>	72	72	56	44
<b>Toplam maliyet (\$)</b>	1324	1123	995	578
<b>Anma gücü (W)</b>	153	133	93	128
<b>Fiyat/güç (\$/W)</b>	8.66	8.43	10.75	4.52

Bu çalışmanın sonucunda güç ve fiyat performansı açısından en uygun PV panelin Tek kristalli PV panel olduğu görülmektedir [88]. Tablo 2.7’de de görüldüğü gibi PV panellerin ilk kurulum maliyeti 6.00\$–11.00\$/W arasında değişmektedir[89] . Bu değerler 2000 - 2010 yılları arasında yukarıda belirtildiği gibi PV panellerin ilk kurulum maliyeti 6.00\$/W –11.00\$/W arasında değişirken günümüzde teknolojinin hızla gelişmesi ile PV panellerin ilk kurulum maliyetleri 1.95\$/W - 6\$/W aralığına kadar düşüş göstermiştir. Bu durum PV güç üretim sistemlerin daha fazla kullanılmasına, tercih

edilmesine sebep olmuştur[90].

HOMER yazılımı için gerekli olan 1kW'lık PV panel fiyatı 500\$ olarak belirlenmiştir. Yenileme ve bakım – onarım maliyetleri ise sırasıyla 400\$, 20\$/yıl olarak değerlendirilmiştir. PV panel ömrü 20 yıldır. Canadian Solar firmasına ait MAXPOWER CS6U- 350P model panel tercih edilmiştir[91].

### 2.10.3.3 Inverter Modeli

Bir güç sisteminde PV panellerde ya da DC üretim yapan güç üretim elemanlarının ürettikleri DC'yi yükün ihtiyacı olan AC'ye dönüştüren cihazlara inverter denir. İnverter gücü yükün çekebileceği maksimum güç dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Yükün değerinden yaklaşık %10-%30 oranında daha büyük güçte seçilmelidir.

$$P_{cnv,min} = 0,1 \cdot P_{yük}$$

$$P_{cnv,max} = 0,3 \cdot P_{yük} \quad \text{denklem (2.49)}$$

Sistemin şebekeden bağımsız veya şebekeye bağlı olmasına göre de inverter çeşidinin değişebileceği gözden kaçırılmamalıdır. Bu bağlamda Göztepe yerleşkesinin enerji ihtiyacını karşılamada DC olarak üretim yapan ve invertere ihtiyaç duyan eleman PV panellerdir. Dolayısıyla yükün ihtiyaç duyduğu AC'ye dönüştürme işlemi sadece PV panelden üretilen enerji kısmında gerçekleşecektir. PV panelin tek başına yükü karşılama durumu söz konusu olmadığından burada yükün değerinde bir inverter seçmek çok doğru bir karar olmayacaktır.

PV paneller büyük güçlü sistemlerde enerjinin sürekliliği ve kalitesi göz önünde bulundurulduğunda tek başına bir kaynak olarak değerlendirilmez. Dolayısıyla PV panel sadece yükün ihtiyacını karşılamaya belirli bir oranda katkı sağlamaktadır. İnverter gücü de burada seçilen PV panelin gücüne göre belirlenmelidir. Böylece gereksiz bir şekilde büyük boyutlarda inverter seçerek gereksiz bir maliyet oluşmasının önüne geçilmiş olur. İnverter maliyeti 0.3 – 0.9\$/W olarak değişim göstermektedir. İnverter gücü 100kW ve üzerinde arttıkça inverter maliyeti 0.3\$/W'lara kadar düşmektedir. Küçük güçlerde 10kW ve altında ise bu durum 0.9\$/W'dır[92].

HOMER yazılımında Göztepe yerleşkesi için önerilen modelde PV panel güçleri dikkate alınarak 500kW, 1000kW ve 1500kW'lık güçlerde inverterler seçilmiştir. Fakat optimum çözüm seçeneklerinde 1000kW'lık ABB PVS800-57-1000kW-C modelin en uygun inverter olduğu görülmektedir[93]. Kullanılan inverterin kurulum maliyeti 150\$/kW olup, yenileme maliyeti ve yıllık bakım onarım maliyeti sırasıyla 100\$/kW ve 20\$/kW olarak belirlenmiştir.

#### **2.10.3.4 Şebeke Modeli**

Göztepe yerleşkesinin enerji ihtiyacının karşılanmasında şebeke minimum kullanılacak şekilde bir model geliştirilmiştir. Yenilenebilir kaynaklardan enerji ihtiyacı karşılanamadığı takdirde şebeke devreye girmektedir. Modelde şebeke 500kW, 750kW, 1000kW, 200kW ve 3000kW kademelerinde enerji verecek şekilde belirlenmiştir. HOMER yazılımına parametrik olarak bu değerler girilmiştir. Enerji fazlası da şebekeye satılacak şekilde belirlenmiştir. Enerjinin şebekeden satın aldığımız fiyat 0.1\$/kWh olup, şebekeye enerji satmamız durumunda satış fiyatı 0.05\$/kWh olarak belirlenmiş olup, değerler Türkiye Cumhuriyeti Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'ndan alınmıştır[94].

#### **2.10.3.5 Biogaz Jeneratörü Modeli**

Sığır, tosun, inek gibi büyükbaş hayvan atıklarının değerlendirmek ve enerji üretmek için biyogaz jeneratörü olarak 500kW'lık NPT -500GFT Biyogaz jeneratörü tercih edilmiştir. Biyogaz jeneratörünün birim fiyatı 500\$/kW, değiştirme maliyeti 400\$/kW, ve ömrü 20 yıl olarak belirlenmiştir [95].

### **2.11 Kyoto Protokolü ve Emisyonların Azaltılması**

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çalıştayı (BMİDÇ), iklim değişikliğine neden olan atmosfere salınan sera gazı emisyonunu azaltmak için kendisine mensup olan ülkeleri müzakereye davet etmiştir ve Kyoto protokolü olarak adlandırılan bir sözleşme yapılmıştır [96]. İki buçuk yıl süren müzakereler 1997 yılında kabul edilmiş olup yürürlüğe 2005 yılında girmiştir. Kyoto protokolüne göre sözleşmenin birinci taahhüt döneminde 2008-2012 yılları için 1990 yılındaki seviyenin %5 altında olması kararına varılırken, 2012 yılında Doha'da yapılan toplantıda alınan kararlar sonucunda protokolün 2020 yılına kadar devam etmesine karar verildi. Böylece ikinci taahhüt

dönemi 2013-2020 yılları arasında olup sözleşmeye göre emisyon değeri 2020 yılında 1990 yılındaki değerinin %18 altında olması gerekmektedir. Protokol kabul edildiğinde Türkiye BMİDÇ üyesi olmadığı için protokole dahil edilmemiştir[97].

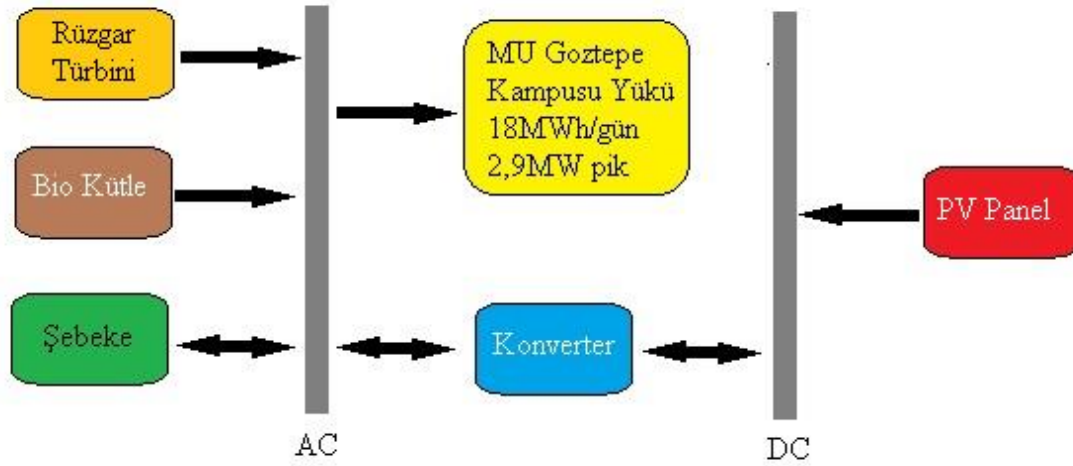
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Marmara Üniversitesi Göztepe yerleşkesinin enerji ihtiyacını kesintisiz ve sürekli bir şekilde karşılayacak hibrit güç üretim sistemi seçenekleri, senaryo bazlı teknik ve ekonomik parametrelere bağlı olarak detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Senaryo bazlı çalışma yapmanın en anlamlı tarafı tüm hibrit güç üretim sistemlerinin detaylı olarak birbirleri ile kıyaslanmasına imkan vermesidir. Senaryo bazlı çalışmalarda, aşağıda verilen işletme karakteristiklerine bağlı kalınarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

- Yerleşkenin enerji ihtiyacını karşılamada ana kaynakları rüzgar türbini, PV paneller ve biokütle generatörü oluşturmaktadır.
- Yükün enerjiye ihtiyaç duyduğu anda hangi kaynak enerji üretimine müsait durumda ise o kaynaktan karşılanacaktır.
- Gece enerjiye ihtiyaç olduğu durumda PV güç üretim sistemi dışındaki kaynaklardan karşılanacaktır.
- Enerji ihtiyacının karşılanmasında mevcut kaynaklar yetersiz kaldığı durumda enerji ihtiyacı şebekeden karşılanacaktır.
- Yükün ihtiyaç duyduğu enerji miktarından fazla enerji üretimi gerçekleştiği durumda ise enerji şebekeye verilerek fazla enerji şebekeye satılacaktır.
- Yükün değerinin MW'lar mertebesinde olduğundan dolayı hibrit sistemde enerji sürekliliğini ve enerjinin her daim arzı sağlamak için hibrit sistemde şebeke her zaman olmak zorundadır.
- Biokütle jeneratörünün enerji üretimindeki hammaddesi olan büyük baş hayvan atıklarının her gün emre amade şekilde hazır bulundurulduğu dikkate alınarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla biokütle jeneratörünün günlük enerji üretim kapasitesi belirli düzeyin altına düşmeyecektir.
- Şebeke, kaynak olarak sınırsız bir kapasiteye sahip olacak şekilde modellenmiştir.

#### 3.1 Şebeke Bağlantılı Rüzgar/Güneş/Biokütle Hibrit Güç Üretim Sistemi

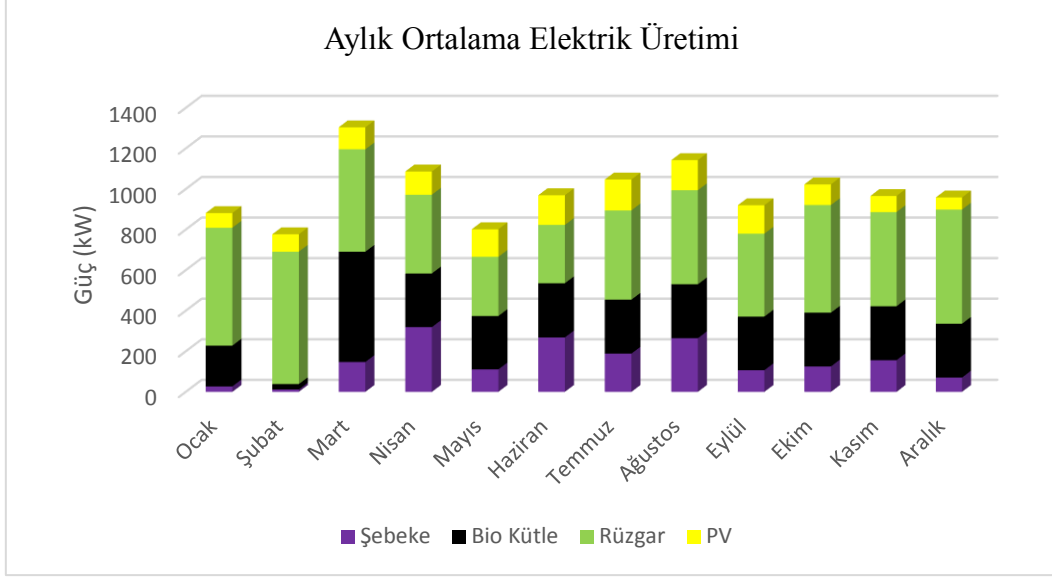
Yükün enerji ihtiyacının, rüzgar, güneş, biokütle ve şebeke kaynakları kullanılarak karşılanması planlanmaktadır. Hibrit sisteme ait blok diyagram Şekil 3.1'de görülmektedir.



**Şekil 3. 1** Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sistemi blok diyagramı

Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş/Biokütle hibrit sisteminin HOMER ile analizi gerçekleştirildiğinde, optimum sistem bileşenleri sırasıyla 750kW'lık PV panel, 1 adet 1.5MW'lık rüzgar türbini, 1000kW'lık biokütle jeneratörü, 750kW'lık konverter, ve 1000 kW şebekeden oluşmaktadır. Sistemin yenilenebilir oranı, yani sistemde yükün ihtiyacının ne kadarının yenilenebilir kaynaklardan karşılandığını belirten parametre 0.85 olarak belirlenmiştir. Enerji elde etmede hammadde olarak kullanılan biokütle miktarı yıllık 3,649 kg olarak hesaplanmıştır. Toplamda biokütle jeneratörü yıl boyunca 3,831 saat çalışmıştır.

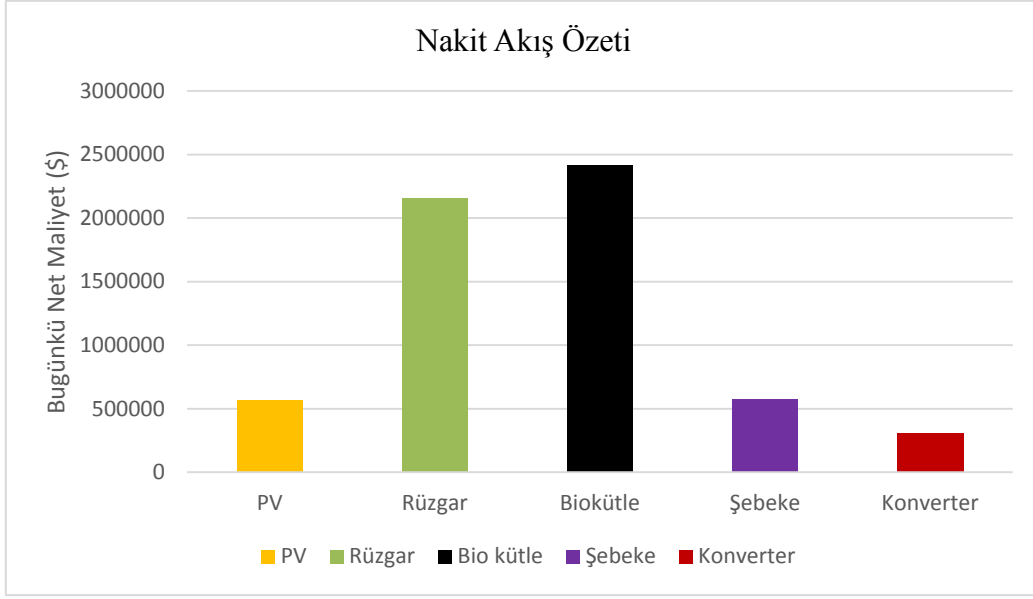
Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sistemi ile yıllık 8.683.681 kWh enerji üretilir. Bu enerjinin %11'i PV güç üretim sisteminden, %47'si rüzgar güç üretim sisteminden, %27'si biokütle güç üretim sisteminden, kalan %15'lik kısım ise şebekeden karşılanmıştır. Yükün aylara göre kaynaklar cinsinden karşılanma durumu Şekil 3.2'de görülmektedir. Yenilenebilir kaynaklardan yıl boyunca elde edilen enerji fazlası ve şebekeye satılan miktar 1.726.433 kWh olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 3. 2** Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sistemine ait Aylara Göre Ortalama Elektrik Üretimi

### 3.1.1 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş/Biokütle Hibrit Güç Üretim Sisteminin Ekonomik Açından İncelenmesi

Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sisteminin başlangıç maliyeti 2.887.500 \$ olup, hibrit sistemin işletme ve bakım maliyeti 1.211.863\$'dir. Sistemin bugünkü net maliyeti 6.021.393 \$ ve birim enerji maliyeti 0,072 \$/kWh olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 3. 3** Rüzgar/Güneş/Biokütle hibrit sistemi bileşenlerinin nakit akış özeti

Şekil 3.3'te Rüzgar/Güneş/Biokütle hibrit sistemi bileşenlerinin nakit akış özeti görülmektedir. Şekil 3.3'te görülen maliyetlerin hibrit sistem bileşenlerinin her biri için detaylı analizi Tablo 3.1'de verilmektedir.

**Tablo 3. 1** Nakit akışının bileşenlerin maliyetlerine göre analizi

Bileşen	Başlangıç Maliyeti (\$)	Yenileme Maliyeti (\$)	İşletme ve Bakım Maliyeti (\$)	Yakıt (\$)	Hurda (\$)	Toplam maliyet (\$)
PV	375.000	0	191.750	0	0	556.750
Rüzgar Türbini	2.000.000	0	153.400	0	0	2.153.401
Biokütle	400.000	0	97.946	1.959.112	-37.083	2.419.976
Şebeke	0	0	577.016	0	0	577.016
Converter	112.500	0	191.750	0	0	304.250
<b>Sistem</b>	<b>2.887.500</b>	<b>0</b>	<b>1.211.863</b>	<b>1.959.112</b>	<b>-37.083</b>	<b>6.021.393</b>

Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sisteminden yükün ihtiyacı karşılanırken aylık olarak şebekeden satın alınan ve şebekeye satılan enerji miktarları Tablo 3.2’de görülmektedir. Tablo 3.2 detaylı değerlendirildiğinde en fazla şebekeye enerji satılan ay Şubat ayı ve 328.582 kWh’lik bir enerji miktarıdır. En fazla şebekeden enerji satın alınan ay ise 229.890 kWh’lik enerji miktarı ile Nisan ayı olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 3. 2** Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sisteminde şebekenin enerji değişimi

Aylar	Satın alınan enerji (kWh)	Satılan enerji (kWh)	Net satın alınan enerji (kWh)
Ocak	19.824	190.892	-171.068
Şubat	7.779	<b>328.582</b>	-320.803
Mart	109.570	110.225	-655
Nisan	<b>229.890</b>	76.119	153.770
Mayıs	82.601	125.073	-42.472
Haziran	192.956	80.354	112.603
Temmuz	140.214	136.213	4.001
Ağustos	196.817	105.271	91.546
Eylül	76.835	137.170	-60.336
Ekim	93.131	155.478	-62.347
Kasım	112.451	118.541	-6.090
Aralık	52.530	162.517	-109.987
Yıllık	1.314.597	1.726.433	-411.836

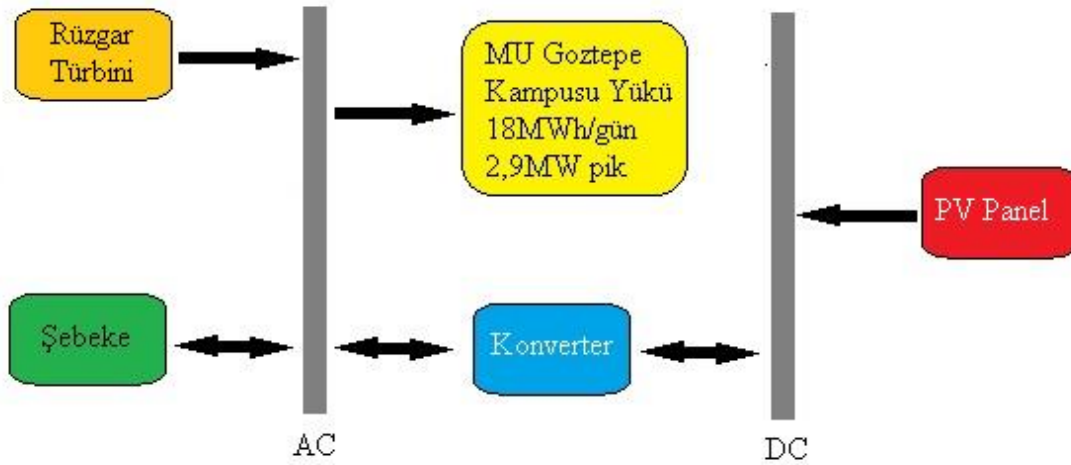
### 3.1.2 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş/Biokütle Hibrit Güç Üretim Sisteminin Çevresel Açından İncelenmesi

Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş/Biokütle Hibrit Güç Üretim Sisteminin bileşenleri enerji üretimi gerçekleştirirken çevreye bir takım gaz salınımı yapılmaktadır. Her ne kadar yenilenebilir enerji kaynaklarının doğaya gaz salınımı yapmadığı iddia edilse de çok az miktarlarda da olsa gaz salınımı yapmaktadırlar. Şebeke bağlantılı hibrit sistemlerde en

fazla gaz salınımı şebeke tarafından ortaya çıkmaktadır. Şebeke dışındaki diğer kaynakların (rüzgar, güneş ve biokütle) atmosfere saldığı CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>...vb gazlar ihmal edilecek kadar az miktarda olduğu için gaz salınımına etkisi olmadığı düşünülür. Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş/Biokütle Hibrit Güç Üretim Sisteminde yıl boyunca toplamda -259.649 kg CO<sub>2</sub>, 23.7 kg CO, 2.63 kg yanmamış hidrokarbonlar, 1.79 kg partikül, -1.128 kg SO<sub>2</sub> ve -340 kg NO<sub>x</sub> gazları atmosfere salınmıştır.

### 3.2 Şebeke Bağlantılı Rüzgar Güneş Hibrit Güç Üretim Sistemi

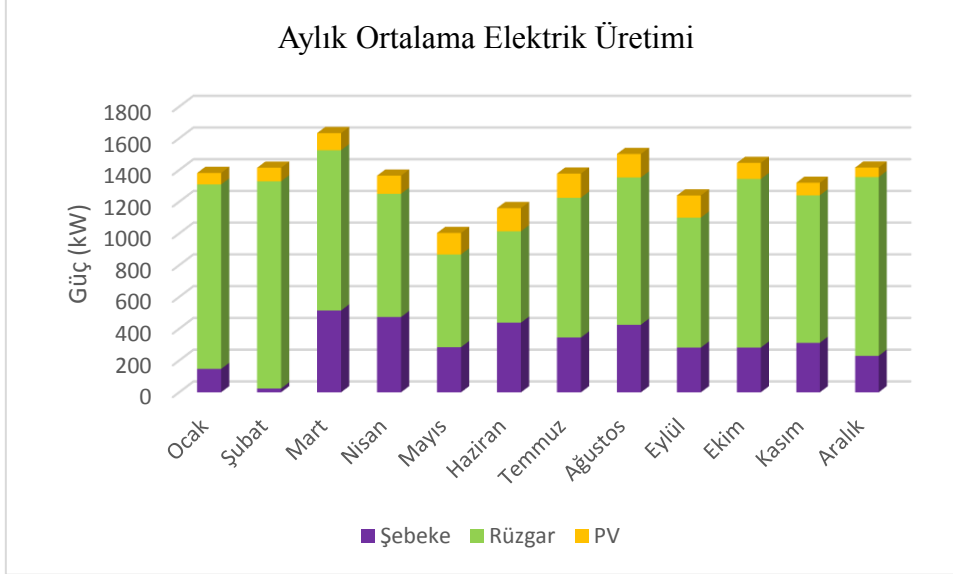
Yükün enerji ihtiyacının rüzgar, güneş ve şebeke kaynakları kullanılarak karşılanması planlanmaktadır. Hibrit güç üretim sistemine ait blok diyagram Şekil 3.4'te görülmektedir.



Şekil 3. 4 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş hibrit güç üretim sistemi blok diyagramı

Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş hibrit güç üretim sisteminin HOMER ile analizi gerçekleştirildiğinde, optimum sistem bileşenleri sırasıyla 750kW'lık PV panel, 2 adet 1.5MW'lık rüzgar türbini, 750kW'lık konverter ve 2000 kW şebekeden oluşmaktadır. Sistemin yenilenebilir oranı, yani sistemde yükün ihtiyacının ne kadarının yenilenebilir kaynaklardan karşılandığını belirten parametre 0,77 olarak belirlenmiştir. Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş hibrit güç üretim sistemi ile yıllık 11.870.808 kWh enerji üretilir. Bu enerjinin %8'i PV güç üretim sisteminden, %68'i rüzgar güç üretim sisteminden ve kalan %23'lük kısım ise şebekeden karşılanmıştır. Yükün aylara göre kaynaklar cinsinden karşılanma durumu Şekil 3.5'te görülmektedir. Yenilenebilir kaynaklardan yıl

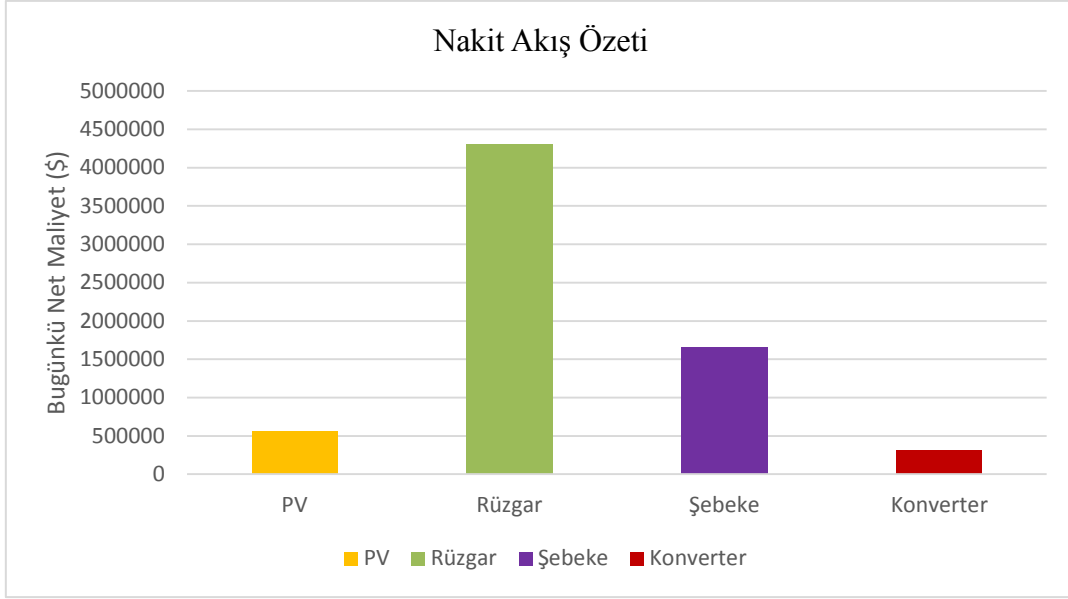
boyunca elde edilen enerji fazlası ve şebekeye satılan miktar 2.927.297 kWh olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 3. 5** Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş hibrit güç üretim sisteminin Aylık Ortalama Elektrik Üretimi

### 3.2.1 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş Hibrit Güç Üretim Sisteminin Ekonomik Açıdan İncelenmesi

Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş hibrit güç üretim sisteminin başlangıç maliyeti 4.487.500 \$ olup, hibrit sistemin işletme ve bakım maliyeti 2.346.404 \$'dir. Sistemin bugünkü net maliyeti 6.833.904 \$ ve birim enerji maliyeti 0,08 \$/kWh olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 3. 6** Rüzgar/Güneş hibrit güç sistemi bileşenlerinin nakit akış özeti

Şekil 3.6'da Rüzgar/Güneş hibrit sistemi bileşenlerinin nakit akış özeti görülmektedir. Şekil 3.6'da görülen maliyetlerin hibrit sistem bileşenlerinin her biri için detaylı analizi Tablo 3.3'te verilmektedir.

**Tablo 3. 3** Nakit akışının bileşenlerin maliyetlerine göre analizi

Bileşen	Başlangıç Maliyeti (\$)	Yenileme Maliyeti (\$)	İşletme ve Bakım Maliyeti (\$)	Yakıt (\$)	Hurda (\$)	Toplam maliyet (\$)
PV	375.000	0	191.750	0	0	566.750
Rüzgar Türbini	4.000.000	0	306.801	0	0	4.306.801
Şebeke	0	0	1.656.103	0	0	1.656.103
Converter	112.500	0	191.750	0	0	304.250
<b>Sistem</b>	<b>4.487.500</b>	<b>0</b>	<b>2.346.404</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>6.833.904</b>

Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş hibrit güç üretim sisteminden yükün ihtiyacı karşılanırken aylık olarak şebekeden satın alınan ve şebekeye satılan enerji miktarları Tablo 3.4'de görülmektedir. Tablo 3.4 detaylı değerlendirildiğinde en fazla şebekeye enerji satılan ay Şubat ayı ve 414.517kWh'lik bir enerji miktarıdır. En fazla şebekeden

enerji satın alınan ay ise Mart ayı ve 383.249kWh'lik enerji miktarı olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 3. 4** Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş hibrit güç üretim sisteminde şebekenin enerji değişimi

Aylar	Satın alınan enerji (kWh)	Satılan enerji (kWh)	Net satın alınan enerji (kWh)
Ocak	109.636	330.641	-221.005
Şubat	16.261	414.517	-398.256
Mart	383.249	226.361	156.888
Nisan	341.245	162.561	178.684
Mayıs	211.37	176.689	34.681
Haziran	315.629	132.054	183.575
Temmuz	257.032	230.466	26.566
Ağustos	316.371	224.944	91.427
Eylül	203.123	226.145	-23.022
Ekim	209.843	277.627	-67.784
Kasım	224.397	227.377	-2.981
Aralık	171.007	297.915	-126.908
Yıllık	2.759.163	2.927.297	-168.134

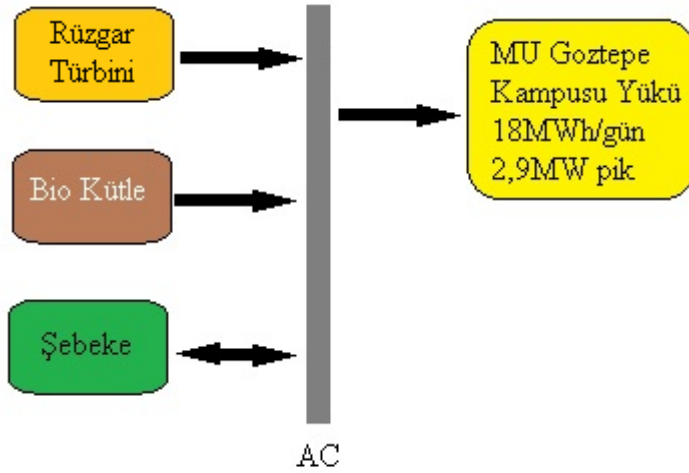
### 3.2.2 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş Hibrit Güç Üretim Sisteminin Çevresel Açından İncelenmesi

Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş Hibrit Güç Üretim Sistemi bileşenleri enerji üretimi gerçekleştirirken çevreye bir takım gaz salınımı yapılmaktadır. Her ne kadar yenilenebilir enerji kaynaklarının doğaya gaz salınımı yapmadığı iddia edilse de çok az miktarlarda da olsa gaz salınımı yapmaktadırlar. Şebeke bağlantılı hibrit sistemlerde en fazla gaz salınımı şebeke tarafından ortaya çıkmaktadır. Şebeke dışındaki diğer kaynakların (rüzgar ve güneş) atmosfere saldığı CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>...vb gazlar ihmal edilecek kadar az miktarda olduğu için gaz salınımına etkisi olmadığı düşünülür. Şebeke bağlantılı Rüzgar/Güneş Hibrit Güç Üretim Sisteminde yıl boyunca toplamda -106.261 kg CO<sub>2</sub>, -461 kg SO<sub>2</sub> ve -225 kg NO<sub>x</sub> gazları atmosfere salınmıştır. CO, partikül ve yanmamış

hidrokarbonların değeri çok düşük olduğu için sıfır olarak hesaplanmıştır.

### 3.3 Şebeke Bağlantılı Rüzgar Biokütle Hibrit Güç Üretim Sistemi

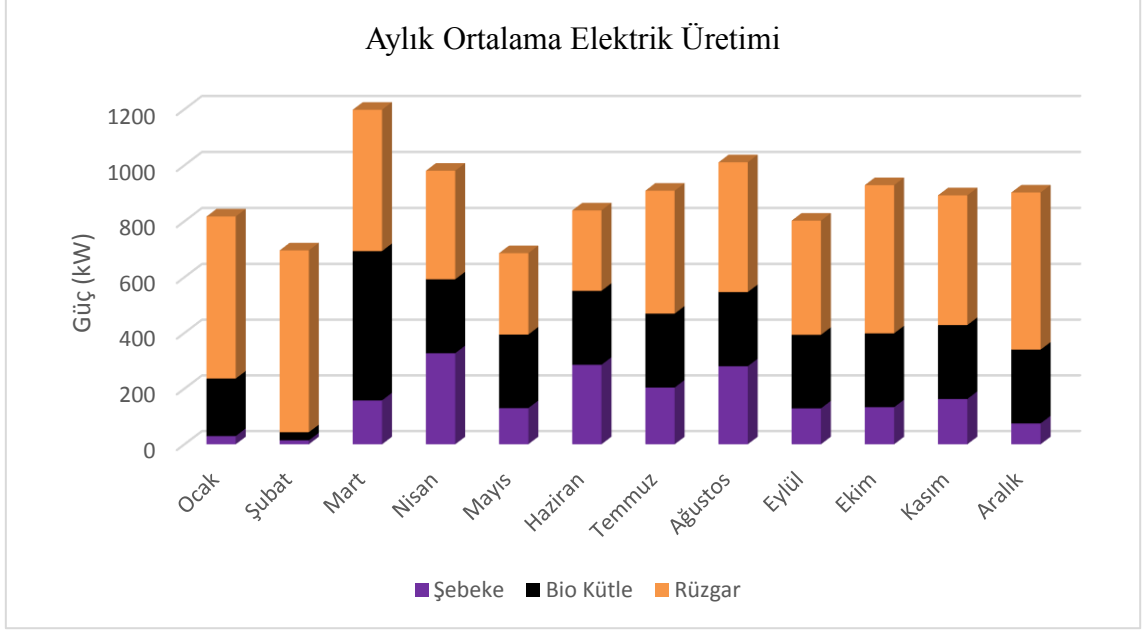
Yükün enerji ihtiyacının rüzgar, biokütle ve şebeke kaynakları kullanılarak karşılanması planlanmaktadır. Hibrit sisteme ait blok diyagram Şekil 3.7’de görülmektedir.



Şekil 3. 7 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Biokütle hibrit güç üretim sistemi blok diyagramı

Şebeke bağlantılı Rüzgar/Biokütle hibrit güç üretim sisteminin HOMER ile analizi gerçekleştirildiğinde, optimum sistem bileşenleri sırasıyla 1 adet 1.5MW’lık rüzgar türbini, 1000kW’lık biokütle jeneratörü ve 1000 kW şebekeden oluşmaktadır. Sistemin yenilenebilir oranı 0,82 olarak hesaplanmıştır. Enerji elde etmede hammadde olarak kullanılan biokütle miktarı 3.649 ton olarak hesaplanmıştır. Toplamda biokütle jeneratörü yıl boyunca 3.988 saat çalışmıştır.

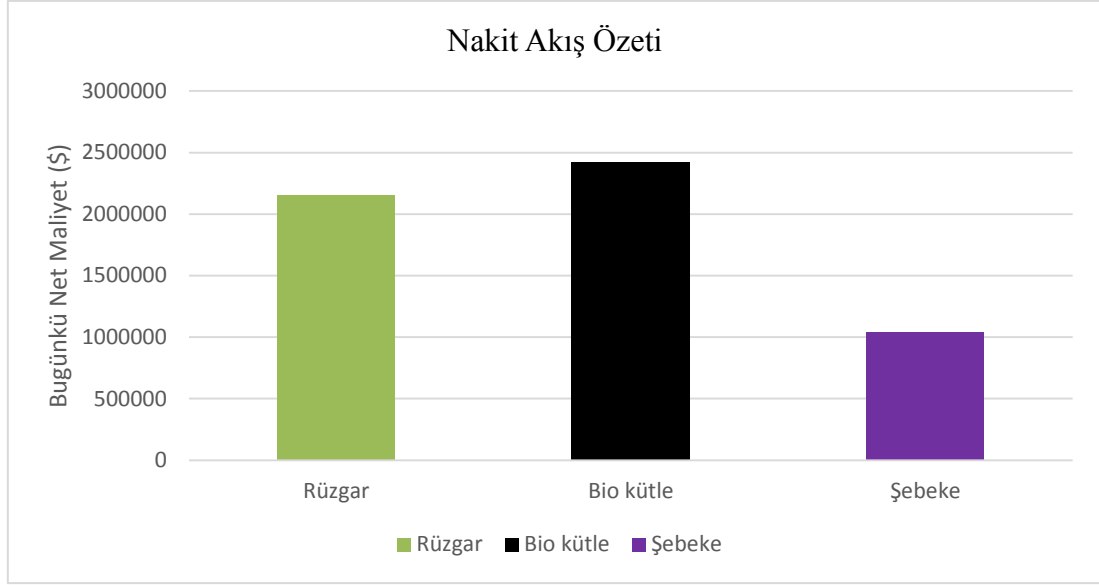
Şebeke bağlantılı Rüzgar/Biokütle hibrit güç üretim sistemi ile yıllık 7.797.431 kWh enerji üretilir. Bu enerjinin %52’si rüzgar güç üretim sisteminden, %30’u biokütle güç üretim sisteminden, kalan %18’lik kısım ise şebekeden karşılanmıştır. Yükün aylara göre kaynaklar cinsinden karşılanma durumu Şekil 3.8’de görülmektedir. Yenilenebilir kaynaklardan yıl boyunca elde edilen enerji fazlası ve şebekeye satılan miktar 1.190.330 kWh olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 3. 8** Şebeke bağlantılı Rüzgar/Biokütle hibrit güç üretim sisteminin Aylık Ortalama Elektrik Üretimi

### 3.3.1 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Biokütle Hibrit Güç Üretim Sisteminin Ekonomik Açıdan İncelenmesi

Şebeke bağlantılı Rüzgar/Biokütle hibrit güç üretim sisteminin başlangıç maliyeti 2.400.000 \$ olup, hibrit sistemin işletme ve bakım maliyeti 252.007 \$'dır. Sistemin bugünkü net maliyeti 5.621.501\$ ve birim enerji maliyeti 0,067\$/kWh olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 3. 9** Rüzgar/Biokütle hibrit sistemi bileşenlerinin nakit akış özeti

Şekil 3.9’da Rüzgar/Biokütle hibrit sistemi bileşenlerinin nakit akış özeti görülmektedir. Şekil 3.9’da görülen maliyetlerin hibrit sistem bileşenlerinin her biri için detaylı analizi Tablo 3.5’te verilmektedir.

**Tablo 3. 5** Nakit akışının bileşenlerin maliyetlerine göre analizi

Bileşen	Başlangıç Maliyeti (\$)	Yenileme Maliyeti (\$)	İşletme ve Bakım Maliyeti (\$)	Yakıt (\$)	Hurda (\$)	Toplam maliyet (\$)
Rüzgar Türbini	2.000.000	0	153.400	0	0	2.153.400
Biokütle	400.000	0	101.960	1.958.941	-35.738	2.425.163
Şebeke	0	0	1.042.939	0	0	1.042.939
<b>Sistem</b>	<b>2.400.000</b>	<b>0</b>	<b>1.298.299</b>	<b>1.958.941</b>	<b>-35.738</b>	<b>5.621.502</b>

Şebeke bağlantılı Rüzgar/Biokütle hibrit güç üretim sisteminden yükün ihtiyacı karşılanırken aylık olarak şebekeden satın alınan ve şebekeye satılan enerji miktarları Tablo 3.6’da görülmektedir. Tablo 3.6 detaylı değerlendirildiğinde en fazla şebekeye enerji satılan ay Şubat ayı ve 298.871kWh’lik bir enerji miktarıdır. En fazla şebekeden enerji satın alınan ay ise Nisan ayı ve 235.504kWh’lik enerji miktarı olarak

hesaplanmıştır.

**Tablo 3. 6** Şebeke bağlantılı Rüzgar/ Biokütle hibrit güç üretim sisteminde şebekenin enerji değişimi

Aylar	Satın alınan enerji (kWh)	Satılan enerji (kWh)	Net satın alınan enerji (kWh)
Ocak	22.087	155.663	-133.576
Şubat	9.573	298.871	-289.298
Mart	117.243	73.142	44.101
Nisan	235.504	38.438	197.065
Mayıs	96.496	62.881	33.615
Haziran	205.482	33.453	172.029
Temmuz	151.474	74.762	76.712
Ağustos	208.475	52.943	155.532
Eylül	92.763	75.736	17.027
Ekim	99.050	107.086	-8.036
Kasım	117.066	84.554	32.512
Aralık	55.808	132.801	-76.993
Yıllık	1.411.021	1.190.330	220.691

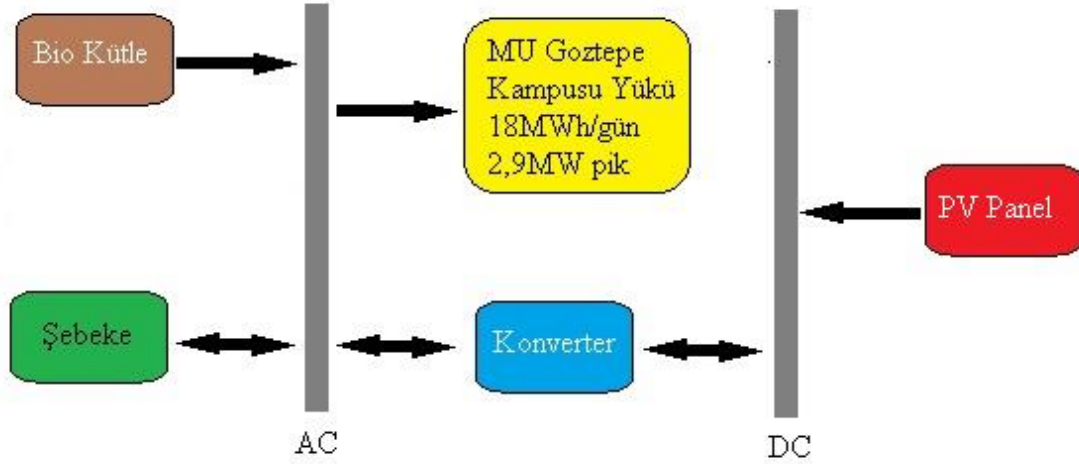
### 3.3.2 Şebeke bağlantılı Rüzgar/Biokütle Hibrit Güç Üretim Sisteminin Çevresel Açından İncelenmesi

Şebeke bağlantılı Rüzgar/Biokütle Hibrit Güç Üretim Sistemi bileşenleri enerji üretimi gerçekleştirirken çevreye bir takım gaz salınımı yapılmaktadır. Her ne kadar yenilenebilir enerji kaynaklarının doğaya gaz salınımı yapmadığı iddia edilse de çok az miktarlarda da olsa gaz salınımı yapmaktadırlar. Şebeke bağlantılı hibrit sistemlerde en fazla gaz salınımı şebeke tarafından ortaya çıkmaktadır. Şebeke dışındaki diğer kaynakların (rüzgar ve biokütle) atmosfere saldığı CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>...vb gazlar ihmal edilecek kadar az miktarda olduğu için gaz salınımına etkisi olmadığı düşünülür. Şebeke bağlantılı Rüzgar/Biokütle hibrit güç üretim sisteminde yıl boyunca toplamda 140.108 kg CO<sub>2</sub>, 23.7kg CO, 2.63kg yanmamış hidrokarbonlar, 1.79kg partikül, 605kg SO<sub>2</sub> ve 507kg NO<sub>x</sub>

gazları atmosfere salınmıştır.

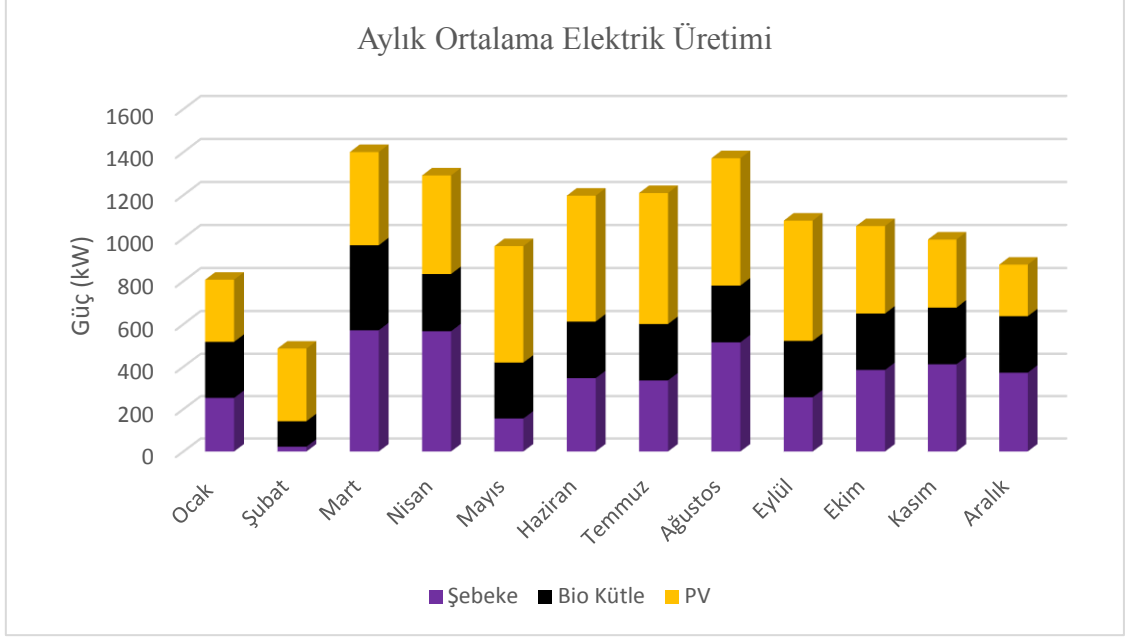
### 3.4 Şebeke Bağlantılı Güneş Biokütle Hibrit Güç Üretim Sistemi

Yükün enerji ihtiyacının güneş, biokütle ve şebeke kaynakları kullanılarak karşılanması planlanmaktadır. Hibrit sisteme ait blok diyagram Şekil 3.10'da görülmektedir.



**Şekil 3. 10** Şebeke bağlantılı Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sistemi blok diyagramı

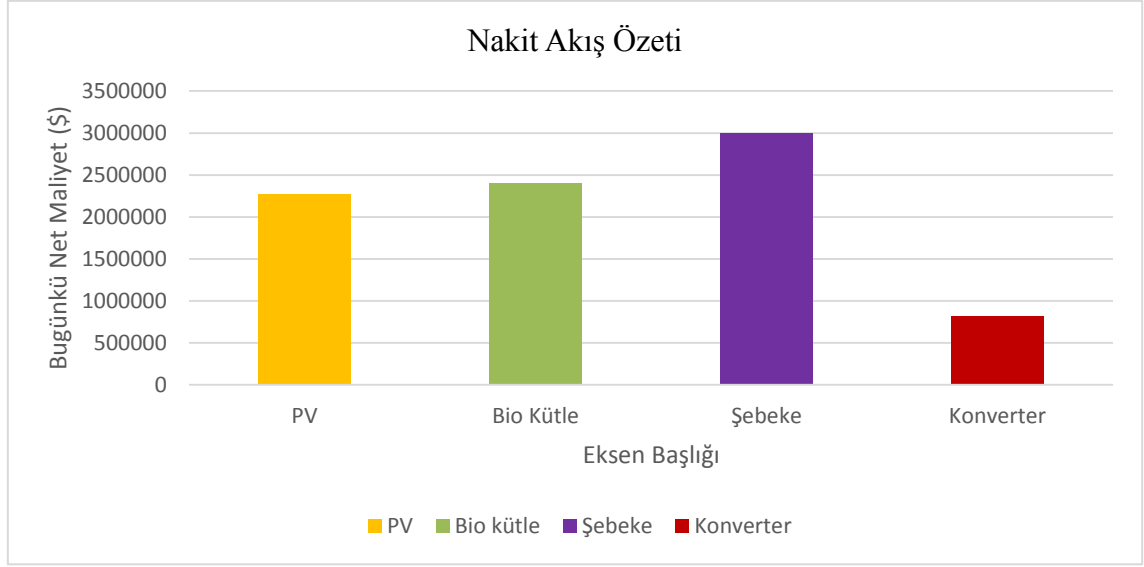
Şebeke bağlantılı Güneş/Biokütle hibrit sistemin HOMER ile analizi gerçekleştirildiğinde, optimum sistem bileşenleri sırasıyla 3000kW'lık PV panel, 1000kW'lık biokütle jeneratörü, 2000kW'lık konverter ve 2000kW şebekeden oluşmaktadır. Sistemin yenilenebilir oranı, yani sistemde yükün ihtiyacının ne kadarının yenilenebilir kaynaklardan karşılandığını belirten parametre 0,67 olarak belirlenmiştir. Enerji elde etmede hammadde olarak kullanılan biokütle miktarı 3.648 ton olarak hesaplanmıştır. Toplamda biokütle jeneratörü yıl boyunca 3.487 saat çalışmıştır. Şebeke bağlantılı Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sistemi ile yıllık 9.330.422kWh enerji üretilir. Bu enerjinin %42'si PV güç üretim sisteminden, %25'i biokütle güç üretim sisteminden, kalan %33'lük kısım ise şebekeden karşılanmıştır. Yükün aylara göre kaynaklar cinsinden karşılanma durumu Şekil 3.11'de görülmektedir. Yenilenebilir kaynaklardan yıl boyunca elde edilen enerji fazlası ve şebekeye satılan miktar 1.469.114kWh olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 3. 11** Şebeke bağlantılı Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sisteminin Aylık Ortalama Elektrik Üretimi

### 3.4.1 Şebeke bağlantılı Güneş/Biokütle Hibrit Güç Üretim Sisteminin Ekonomik Açıdan İncelenmesi

Şebeke bağlantılı Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sisteminin başlangıç maliyeti 2.200.000 \$ olup, hibrit sistemin işletme ve bakım maliyeti 491.515\$'dir. Sistemin bugünkü net maliyeti 8.483.205\$ ve birim enerji maliyeti 0,099 \$/kWh olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 3. 12** Güneş/Biokütle hibrit sistemi bileşenlerinin nakit akış özeti

Şekil 3.12’de Güneş/Biokütle hibrit sistemi bileşenlerinin nakit akış özeti görülmektedir. Şekil 3.12’de görülen maliyetlerin hibrit sistem bileşenlerinin her biri için detaylı analizi Tablo 3.7’de verilmektedir.

**Tablo 3. 7** Nakit akışının bileşenlerin maliyetlerine göre analizi

Bileşen	Başlangıç Maliyeti (\$)	Yenileme Maliyeti (\$)	İşletme ve Bakım Maliyeti (\$)	Yakıt (\$)	Hurda (\$)	Toplam maliyet (\$)
PV	1.500.000	0	767.002	0	0	2.267.002
Biokütle	400.000	0	89.151	1.958.839	-40.030	2.407.961
Şebeke	0	0	2.996.912	0	0	2.996.912
Converter	300.000	0	511.335	0	0	811.335
Sistem	2.200.000	0	4.364.398	1.958.839	-40.030	8.483.208

Şebeke bağlantılı Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sisteminden yükün ihtiyacı karşılanırken aylık olarak şebekeden satın alınan ve şebekeye satılan enerji miktarları Tablo 3.8’de görülmektedir. Tablo 3.8 detaylı değerlendirildiğinde en fazla şebekeden enerji satın alınan ay Mart ayı ve 425.323kWh’lik bir enerji miktarıdır. En fazla şebekeye enerji satılan ay ise Mayıs ayı ve 187.276 kWh’lik enerji miktarı olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 3. 8** Şebeke bağlantılı Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sisteminde şebekenin enerji değişimi

Aylar	Satın alınan enerji (kWh)	Satılan enerji (kWh)	Net satın alınan enerji (kWh)
Ocak	188.255	107.113	81.141
Şubat	14.996	142.499	-127.503
Mart	425.323	68.237	357.086
Nisan	408.356	86.988	321.369
Mayıs	115.789	187.276	-71.487
Haziran	249.526	150.160	99.366
Temmuz	249.752	152.908	96.844
Ağustos	383.252	126.112	257.141
Eylül	184.149	175.104	9.045
Ekim	286.283	109.859	176.424
Kasım	296.456	90.590	205.866
Aralık	276.804	72.269	204.536
Yıllık	3.078.942	1.469.114	1.609.827

### 3.4.2 Şebeke bağlantılı Güneş/Biokütle Hibrit Güç Üretim Sisteminin Çevresel Açından İncelenmesi

Şebeke bağlantılı Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sistemi bileşenleri enerji üretimi gerçekleştirirken çevreye bir takım gaz salınımı yapılmaktadır. Her ne kadar yenilenebilir enerji kaynaklarının doğaya gaz salınımı yapmadığı iddia edilse de çok az miktarlarda da olsa gaz salınımı yapmaktadırlar. Şebeke bağlantılı hibrit sistemlerde en fazla gaz salınımı şebeke tarafından ortaya çıkmaktadır. Şebeke dışındaki diğer kaynakların (güneş ve biokütle) atmosfere saldığı CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>...vb gazlar ihmal edilecek kadar az miktarda olduğu için gaz salınımına etkisi olmadığı düşünülür. Şebeke bağlantılı Güneş/Biokütle hibrit güç üretim sisteminde yıl boyunca toplamda 1.018.042kg CO<sub>2</sub>, 23.7kg CO, 2.63kg yanmamış hidrokarbonlar, 1.79kg partikül, 4.411kg SO<sub>2</sub> ve 2.369kg NO<sub>x</sub> gazları atmosfere salınmıştır.

Analizlerde genellikle yıllık ortalama rüzgar hızı ve güneş radyasyon değerleri alınarak optimum hibrit güç üretim sistemlerinin boyutlandırılması gerçekleştirilmektedir. Dördüncü bölümde tüm analizler Marmara Üniversitesi Göztepe yerleşkesinin ortalama rüzgar hızı ve güneş radyasyon değerleri sırasıyla 5.20m/s ve 4.028kWh/m<sup>2</sup>/d alınarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.9’da Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesi için 5.20m/s ve 4.028kWh/m<sup>2</sup>/d ortalama değerlerinde optimum güç üretim sistemleri ve konfigürasyonları görülmektedir. Bu değerler dikkate alınarak yapılan analizlerde birim enerji maliyeti en düşük olan hibrit güç üretim sistemi Marmara Üniversitesi Göztepe yerleşkesi için tercih edilecektir. Birim enerji maliyeti en düşük olan hibrit sistem türü Şebeke Bağlantılı Rüzgar/Biokütle hibrit güç üretim sistemidir. Bu sistemin optimum konfigürasyonu 1000kW gücünde Biokütle generatörü, 1 adet 1500kW gücünde rüzgar türbini ve 1000kW’lık şebekeden oluşmaktadır. Bu hibrit sistemin yenilenebilir oranı %82’dir. Şebeke bağlantılı Rüzgar/Biokütle hibrit güç üretim sisteminin başlangıç maliyeti 2.400.000 \$ olup, hibrit sistemin işletme ve bakım maliyeti 252.007 \$’dir. Sistemin bugünkü net maliyeti 5.621.501 \$ ve birim enerji maliyeti 0,067 \$/kWh olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 3. 9** Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesi için 4.72m/s ve 4.028kWh/m<sup>2</sup>/d ortalama değerlerinde optimum güç üretim sistemleri ve konfigürasyonları

Hibrit Güç Üretim Sistemi Türü	PV (kW)	Rüzgar Türbini	Biokütle Jeneratörü (kW)	Konverter (kW)	Şebeke (kW)	Başlangıç maliyeti (\$)	İşletme Maliyeti (\$/yıl)	Toplam Bugünkü Net Maliyet (\$)	Birim Enerji Maliyeti (\$/kWh)	Yen. Oran	BF (ton)	BG (saat)
Şebeke Bağlantılı Rüzgar/Güneş HRES	750	3000	-	750	2000	4.487.500	183.551	6.833.904	0,08	0,77		
Şebeke Bağlantılı Rüzgar/Biokütle HRES	0	1500	1000	-	1000	2.400.000	252.007	5.621.501	<b>0,067</b>	0,82	3.649	3.988
Şebeke Bağlantılı Rüzgar/Güneş /Biokütle HRES	750	1500	1000	750	1000	2.887.500	245.154	6.021.391	0,072	0,85	3.649	3.831
Şebeke Bağlantılı Güneş /Biokütle HRES	3000	0	1000	2000	2000	2.200.000	491.515	8.483.205	0,099	0,67	3.648	3.487

### 3.5 Marmara Üniversitesi Göztepe Kampüsü Hibrit Güç Üretim Sisteminin Hassasiyet Analizi

Hassasiyet analizi, bir doğrusal programlama probleminde belirlenen katsayı değerlerinin değişmesinin problemin optimal çözümüne ne gibi bir etki sağladığını belirlemektedir. Tez çalışması kapsamında optimizasyon problemimizin optimal çözümü etkileyen parametreler rüzgar hızı, güneş radyasyon değeri ve biokütle atık miktarıdır. Biokütle atık miktarı her gün aynı miktarda büyükbaş hayvan atığı kullanıldığından bu değer sabit tutulmaktadır. Fakat güneş radyasyonu ve rüzgar hızı değerleri sürekli değişim göstermektedir. Ortalama değerlerin dışında belirtilecek olan rüzgar hızı ve güneş radyasyon değerlerinde hibrit güç üretim sistemleri türlerinin ve konfigürasyonlarının ne şekilde değişim gösterdiğini HOMER yazılımı detaylı analizini gerçekleştirmektedir. Bu tez çalışmasında rüzgar hızı ve güneş radyasyon değerleri Tablo 3.10'deki gibi ele alınmıştır.

**Tablo 3. 10** Hassasiyet değerleri

<b>Güneş Radyasyonu (kWh/m<sup>2</sup>/d)</b>	<b>Rüzgar hızı (m/s)</b>
2,000	3,00
3,000	4,00
4,028	5,00
5,000	5,20
6,000	6,00

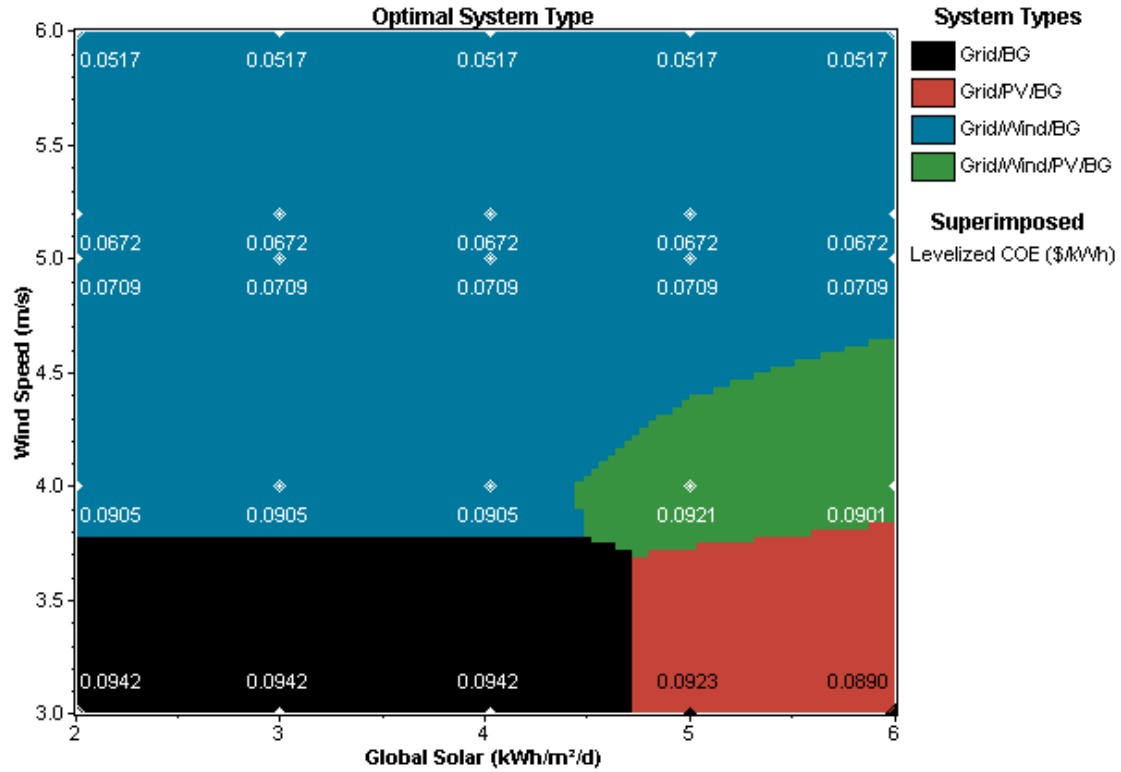
Bu değerler ile HOMER yazılımında analizler gerçekleştirildiğinde elde edilen sonuçlar ve her bir güneş radyasyon değerine karşılık gelen rüzgar hız değerlerinde hesaplanan optimum hibrit güç üretim sistemleri, konfigürasyonları ve optimum maliyetleri Tablo 3.11'de detaylı olarak görülmektedir.

**Tablo 3. 11** Farklı rüzgar hızı ve güneş radyasyon değerlerinde optimum hibrit güç üretim sistemleri ve konfigürasyonları

Güneş Radyasyonu (kWh/m <sup>2</sup> /d)	Rüzgar hızı (m/s)	PV (kW)	Rüzgar Türbini (kW)	Biokütle Jeneratörü (kW)	Konverter (kW)	Şebeke (kW)	Başlangıç maliyeti (\$)	İşletme Maliyeti (\$/yr)	Toplam Bugünkü Net Maliyet (\$)	Birim Enerji Maliyeti (\$/kWh)	Yen. Oran	BF	BG (hrs)
2,00	3,00			1000		2000	400.000	598.853	8.055.354	0,094	0,34	3.649	3.964
2,00	4,00		1500	1000		2000	2.400.000	418.259	7.746.753	0,090	0,62	3.649	3.939
2,00	5,20		1500	1000		1000	2.400.000	252.007	5.621.501	0,067	0,82	3.649	3.988
2,00	6,00		3000	1000		3000	4.400.000	2.123	4.427.139	0,052	0,98	3.187	3.351
3,00	3,00			1000		2000	400.000	598.853	8.055.354	0,094	0,34	3.649	3.964
3,00	4,00		1500	1000		2000	2.400.000	418.259	7.746.753	0,090	0,62	3.649	3.939
3,00	5,20		1500	1000		1000	2.400.000	252.007	5.621.501	0,067	0,82	3.649	3.988
3,00	6,00		3000	1000		3000	4.400.000	2.123	4.427.139	0,052	0,98	3.187	3.351
4,03	3,00			1000		2000	400.000	598.853	8.055.354	0,094	0,34	3.649	3.964
4,03	4,00		1500	1000		2000	2.400.000	418.259	7.746.753	0,090	0,62	3.649	3.939
4,03	5,20		1500	1000		1000	2.400.000	252.007	5.621.501	0,067	0,82	3.649	3.988
4,03	6,00		3000	1000		3000	4.400.000	2.123	4.427.139	0,052	0,98	3.187	3.351
5,00	3,00	3000		1000	2000	2000	2.200.000	445.773	7.898.476	0,092	0,72	3.649	3.448
5,00	4,00	2000	1500	1000	1000	1000	3.750.000	300.956	7.597.227	0,092	0,82	3.648	2900
5,00	5,20		1500	1000		1000	2.400.000	252.007	5.621.501	0,067	0,82	3.649	3.988

5,00	6,00		3000	1000		3000	4.400.000	2.123	4.427.139	0,052	0,98	3.187	3.351
6,00	3,00	3000		1000	2000	2000	2.200.000	423.621	7.615.292	0,089	0,74	3.649	3.624
6,00	4,00	2000	1500	1500	1000	1000	3.750.000	289.031	7.444.785	0,090	0,83	3.648	2.873
6,00	5,20		1500	1000		1000	2.400.000	252.007	5.621.501	0,067	0,82	3.649	3.988
6,00	6,00		3000	1000		3000	4.400.000	2.123	4.427.139	0,052	0,98	3.187	3.351

Rüzgar hızlarına ve güneş radyasyon verilerine göre optimum hibrit güç üretim sistemleri ve konfigürasyonlarında optimum güç üretim sistemlerini genel anlamda görmek ve birim enerji maliyetinin ne şekilde değiştiği Şekil 3.13’de detaylı olarak görülmektedir.



**Şekil 3. 13** Rüzgar hızı ve güneş radyasyon değerlerinin değişimine göre elde edilen optimum hibrit güç üretim sistemleri

Rüzgar hızının 3,80 m/s’den daha az olduğu durumda güneş radyasyonu 4,70 kWh/m<sup>2</sup>/gün’den az ise en optimum sistem siyah renkle gösterilen şebeke biokütle sistemi olup, güneş radyasyonu 4,70 kWh/m<sup>2</sup>/gün’den fazla ise optimum sistem kırmızı renkle gösterilen şebeke-PV-Biokütle sistemidir. Rüzgar hızı 3,80m/s’den fazla iken, güneş radyasyonu 4,50 kWh/m<sup>2</sup>/gün’den fazla ise en uygun sistem yeşil renkle gösterilen şebeke bağlantılı rüzgar-PV-biokütle sistemi olup, güneş radyasyonu 4,50 kWh/m<sup>2</sup>/gün’den az ise en optimum sistem mavi renkle gösterilen şebeke bağlantılı rüzgar-biokütle sistemidir. Yıllık ortalama rüzgar hızımız 5,20m/s ve güneş radyasyonumuz 4,028 kWh/m<sup>2</sup>/gün olduğu için en uygun sistem şebeke bağlantılı rüzgar biokütle hibrit güç üretim sistemi olup Marmara Üniversitesi Göztepe yerleşkesi için önerilen sistemdir.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışma ile Marmara Üniversitesi Göztepe yerleşkesi için enerji ihtiyacının yenilenebilir enerji kaynakları temelli hibrit bir sistem ile karşılanması durumunda mevcut enerji kaynaklarının potansiyelleri dikkate alınarak en uygun hibrit güç üretim sistemi belirlenmiştir. Bu tez çalışması özgünlük bakımından bir fizibilite çalışması olup ölü ve gereksiz yatırımın önüne geçilmesine doğrudan katkı sağlamaktadır. Kamu kaynaklarının etkin ve verimli kullanılmasına olanak sağlayacaktır.

Gerçekleştirilen çalışmada yerleşkenin yük, rüzgar hızı, güneş radyasyonu vb. verileri gerçek zamanlı ve saatlik bazda elde edilmiştir. Bu veriler HOMER yazılımında kullanılacak şekilde ilgili matematiksel forma dönüştürülmüştür.

Rüzgar hız verileri saatlik hız verileri frekans sıklık verilerine dönüştürülmüş, Weibull ve Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanılarak gerekli hesaplamalar hem analitik hem de MATLAB’da yazılımında gerçekleştirilmiştir. Burada olasılık temelli rüzgar hızı değerleri ve güç yoğunluğu ( $W/m^2$ ) gibi rüzgar potansiyeli belirlemede etkili olan tüm parametreler elde edilmiştir. Seçilecek ya da kullanılması olası rüzgar türbinlerinin güç performans eğrileri elde edilmiş ve bu türbinlerin mevcut rüzgar hız değerleri ile ne kadar güç üretebildikleri ve her bir türbinin kapasite faktörleri MATLAB yazılımı ile hesaplanmıştır. Beş farklı rüzgar türbini arasından en uygun olanı diğer bir deyişle kapasite faktörü en yüksek değerde olan seçilmiştir. Dolayısıyla Marmara Üniversitesi Göztepe yerleşkesi için en uygun (optimum) rüzgar türbini belirlenmiştir. Ayrıca MATLAB Curve Fitting Toolbox kullanılarak Weibull k ve c parametreleri belirlenmiştir.

Güneş radyasyon verileri Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından ölçülen değerler ile HOMER yazılımının kullandığı formata dönüştürülmüştür. Ayrıca HOMER enlem ve boylam koordinatlarına Graham ve Hollands tarafından geliştirilen Graham algoritmasını kullanarak da güneş radyasyon verilerini aylık ortalama olarak elde etmektedir. Bu çalışmada YEGM’den alınan veriler ile HOMER yazılımdan elde edilen güneş radyasyon değerlerinin karşılaştırılması da yapılmıştır. Aralarında kayda değer bir farkın olmadığı ve HOMER yazılımından alınan verilerin güvenilir olduğu ve kullanılabilceği görülmektedir.

Biokütle ham maddesi olan büyükbaş hayvan atığı hesaplamaları yapılarak gerçek zamanlı olarak çiftliklerden toplanacak olan ortalama atık miktarları günlük yaklaşık 50 ton olduğu belirlenmiş ve elde edilen biyogaz miktarı  $2000m^3$  olarak hesaplanmıştır. Bu

enerjiyi sağlayacak en uygun biokütle enerji üretim sistemi belirlenmiştir. HOMER yazılımına biokütle kaynağını günlük 50t olarak veri girişi yapılmıştır.

Marmara Üniversitesi Göztepe yerleşkesinin ortalama rüzgar hızı 5,20m/s, günlük ortalama güneş radyasyon verisi 4,03kW/m<sup>2</sup> ve günlük 50 ton biokütle atıkları da dahil edildiğinde bu durumda;

- Şebeke bağlantılı Rüzgar/Biokütle hibrit güç üretim sistemi en uygun güç üretim sistemi olarak belirlenmiştir.
- Optimum sistem bileşenleri sırasıyla 1 adet 1.5MW'lık rüzgar türbini, 1000kW'lık biokütle jeneratörü ve 1000 kW şebekeden oluşmaktadır.
- Sistemin yenilenebilir oranı 0,82 olarak hesaplanmıştır.
- Enerji elde etmede hammadde olarak kullanılan biokütle miktarı 3.649 ton olarak hesaplanmıştır.
- Toplamda biokütle jeneratörü yıl boyunca 3.988 saat çalışmıştır.
- Şebeke bağlantılı Rüzgar/Biokütle hibrit güç üretim sistemi ile yıllık 7.797.461kWh enerji üretilir. Bu enerjinin %52'si rüzgar güç üretim sisteminden, %30'u biokütle güç üretim sisteminden, kalan %18'lik kısım ise şebekeden karşılanmıştır.
- Yenilenebilir kaynaklardan yıl boyunca elde edilen enerji fazlası ve şebekeye satılan miktar 1.190.330kWh olarak hesaplanmıştır.
- Şebeke bağlantılı Rüzgar/Biokütle hibrit güç üretim sisteminin başlangıç maliyeti 2.400.000 \$ olup, hibrit sistemin işletme ve bakım maliyeti 252.007\$'dır.
- Sistemin bugünkü net maliyeti 5.612.501\$.
- Birim enerji maliyeti 0,067\$/kWh olarak hesaplanmıştır.
- Şebeke bağlantılı Rüzgar/Biokütle hibrit güç üretim sisteminde yıl boyunca toplamda 140.108kg CO<sub>2</sub>, 23.7kg CO, 2.63kg yanmamış hidrokarbonlar, 1.79kg partikül, 605kg SO<sub>2</sub> ve 507kg NO<sub>x</sub> gazları atmosfere salınmıştır.
- Sistemin 12 yılda maliyetini çıkardığı hesaplanmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] Öztürk, H.H. (2013) Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye
- [2] Gokcol, C., Dursun, B., Alboyaci, B., Sunan, E. (2009) Importance of Biomass Energy as Alternative to Other Sources in Turkey, *Energy Policy*, 37 (2), 424-431.
- [3] Dursun, B., Alboyaci, B. (2010) The Contribution of Wind-Hydro Pumped Storage Systems in Meeting Turkey's Electric Energy Demand, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (7), 1979-1988.
- [4] Dursun, B., Gokcol, C., Umut, I., Ucar, E., Kocabey, S. (2013) Techno-Economic Evaluation of a Hybrid PV—Wind Power Generation System, *International Journal of Green Energy*, 10 (2), 117-136.
- [5] Magarappanavar, U.S. Coti, S. (2016) Optimization of Wind-Solar-Diesel Generator Hybrid Power System Using HOMER, *International Research Journal Of Engineering And Technology* Volume: 03, Issue: 06, Page 522-526
- [6] Olatomiwa, L. Mekhilef S., Huda A.S.N., Sanusi K. (2015) Techno-Economic Analysis of Hybrid PV–Diesel–Battery and Pv–Wind–Diesel–Battery Power Systems Ffor Mobile Bts: The Way Forward for Rural Development, *Energy Science and Engineering*, 3(4): 271–285
- [7] Mokheimer, E.M.A., Al-Sharafi, A., Habib, A. & Alzaharnah, I. (2015) A New Study for Hybrid PV/Wind off-Grid Power Generation Systems with the Comparison of Results from Homer, *International Journal of Green Energy*, 12:5, 526-542
- [8] Khan M.J., Iqbal M.T. (2005) Pre-Feasibility Study of Stand-Alone Hybrid Energy Systems for Applications in Newfoundland, *Renewable Energy* 30, 835–854
- [9] Liu G., Rasul M.G., Amanullah M.T.O., Khan M.M.K. (2011) Feasibility Study of Stand-Alone PV-Wind-Biomass Hybrid Energy System in Australia, *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 25-28 March 2011, Wuhan, China.
- [10] Maklad, Y. (2014) An Introduction and Costing of a Biomass/Wind/PV Hybrid Energy System for Electricity Micro-Generation to Domestic Buildings in Armidale Nsw, Australia, *Global Journal for Research Analysis*, Vol.3, No.4, 70-74.
- [11] Pradhan, SR., Sahoo, SP., Das, R., Sen, P. (2014) Design of Off-Grid Home with

Solar-Wind-Biomass Energy, International Journal of Engineering Research and Applications, Vol.4, No.1, 76-81.

[12] Dinçsoy, M.E. (2010) Orta Ölçekli Bir Otelin Elektrik Enerjisinin Hibrit Sistemler İle Modellenmesi Ve Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

[13] Engin, M. (2010) Bornova İçin Güneş - Rüzgâr Hibrid Enerji Üretim Sistemi Tasarımı, Celal Bayar Üniversitesi Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, 2(13): 11-20

[14] Fazelpour F., Soltani N., 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.

[15] Fazelpour F., Soltani N., Rosen M.A. (2016) Economic Analysis of Standalone Hybrid Energy Systems for Application in Tehran, Iran, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 41, Issue 19, 25 May 2016, Pages 7732-7743.

[16] Varshney N., Sharma M.P., Khatod D.K. (2016) Sizing of Hybrid Energy System Using HOMER, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Volume 3, Issue 6, June 2013, 436-442.

[17] Lal S., Raturi A. (2012) Techno-Economic Analysis of a Hybrid Mini-Grid System for Fiji Islands, International Journal of Energy and Environmental Engineering, 3:10, 1-10.

[18] Maherchandani, JK., Agarwal, C., Sahi, M. (2012) Economic Feasibility of Hybrid Biomass/PV/Wind System for Remote Villages Using HOMER, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol.1, No.2, 49-53.

[19] Demiroren A., Yilmaz U. (2010) Analysis of Change in Electric Energy Cost with Using Renewable Energy Sources in Gokceada, Turkey: An Island Example. Renewable Sustainable Energy Reviews,14, 323–33.

[20] Johnson N.G., Glassmire J.W., Lilienthal P.D. (2012) Comparing Power System Architectures for Domestic Lighting in Isolated Rural Villages with HOMER, IEEE Global Humanitarian Technology Conference, 375-380.

[21] Nema P., Dutta S. (2012) Feasibility Study of 1 Mw Standalone Hybrid Energy System: For Technical Institutes, Low Carbon Economy 3 (03), 63

[22] Dalton G.J., Lockington D.A., Baldock T.E. (2008) Feasibility Analysis of Stand-Alone Renewable Energy Supply Options for a Large Hotel, Renewable Energy 33 1475–1490

- [23] Jamil, M., Parsa, S., Majidi, M. (1995) Wind power statistics and an evaluation of wind energy density, *Renewable Energy*, 6(5-6), 623-628.
- [24] Mathew, S., (2006) *Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany
- [25] Kose, F., Özgören, M. (2005) Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Ölçümü Ve Rüzgâr Türbini Seçimi, *Mühendis ve Makina*, 46(20), 20-30.
- [26] Akkaş, A.A. (2001) Rüzgâr Enerji Sistemlerinin Performans Değerlendirmesi, *Rüzgâr Enerjisi Sempozyumu*, (5 – 7 Nisan 2001), 75-84.
- [27] Chang, T.J., Wu, Y.T., Hsu, H.Y., Chu, C.R., Liao C.H. (2003) Assessment of Wind Characteristics and Wind Turbine Characteristics in Taiwan, *Renewable Energy*, 28 (6), 851-871.
- [28] Tar, K. (2008) Some Statistical Characteristics of Monthly Average Wind Speed at Various Heights, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(6), 1712– 1724.
- [29] Johnson, G.L. (1985) *Wind energy systems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA
- [30] Ilinca, A., McCarthy, E., Chaumel, J.L., Rétiveau, J.L. (2003) Wind Potential Assessment of Quebec Province, *Renewable Energy*, 28(12), 1881-1897.
- [31] Akpınar, E.K., Akpınar, S. (2004). An Analysis of the Wind Energy Potential of Elazığ, Turkey, *International Journal of Green Energy*, 1(2), 193 – 207.
- [32] Dursun, B., Alboyacı, B. (2011) An Evaluation of Wind Energy Characteristics for Four Different Locations in Balıkesir, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 33(11), 1086-1103.
- [33] Celik, A.N. (2004) A Statistical Analysis of Wind Power Density Based on the Weibull and Rayleigh Models at The Southern Region of Turkey, *Renewable Energy*, 29(4), 593-604,.
- [34] Dursun B., Aykut, E. (2019) An Investigation on Wind/Pv/Fuel Cell/Battery Hybrid Renewable Energy System, For Nursing Home in Istanbul. *Proc I Mech E Part A: J Power and Energy* 0(0) 1–10.
- [35] Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi. 2009. Dünya’da ve Türkiye’de Güneş Enerjisi, ISBN: 978-605-89548-2-3. DEKTMK YAYIN NO: 0011/2009, EKC Form Ofset, Ankara, Türkiye.
- [36] Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü. 2015. “Meteoroloji Laboratuvarı / Yenilenebilir Enerjiler / Güneş Enerjisi,” <http://web.boun.edu.tr/meteoroloji/yenerji.php>, son erişim tarihi: 06.12.2018.
- [37] YEGM. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü. 2017. <http://>

www.eie.gov.tr/yenilenebilir/g\_enj\_tekno.aspx, son erişim tarihi: 06.10.2017.

[38] (TMMOB, 2008).

[39] Özek, E. (2009) Peyzaj Mimarisi Uygulamalarında Güneş Enerjisinin Kullanımının Değerlendirmesine Yönelik Bir Araştırma ve Yalova- Termal Yolu Örneği, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

[40] Sakıncı, E. (2006) Sürdürülebilirlik Bağlamında Mimaride Güneş Enerjili Etken Sistemlerin Bir Tasarım Ögesi Olarak Değerlendirilmesine Yönelik Bir Yaklaşım, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.

[41] Altın, M. (2005). Research on The Architectural Use of Photovoltaic (PV) Components in Turkey From The View Point of Building Shape, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

[42] Patel, M.R. (1999) Wind and Solar Power Systems, CRC Press, Boca Raton, USA

[43] Karaosmanoğlu, F. (2006). Biyoyakıt Teknolojisi ve İTÜ Araştırmaları, ENKÜS 2006-İTÜ Enerji Çalıştayı ve Sergisi, Bildiri Kitabı, Sayfa: 110-146, 22-23 Haziran 2006, İstanbul.

[44] Mutlu, Ü. (2012). Farklı Biokütlelerin Pirolizi ve Ürünlerin Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi. Anadolu Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir.

[45] Yılmaz, E. (2012) Biokütle Yarıkoku-Kömür Karışımlarının Yanma Davranımlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[46] Ulu, F. (2011) Soma Deniz Kömürü ve Ayçiçeği Kabuğu Yarıkokunun Birlikte Briketlenmesi, Yüksek Lisans Tezi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

[47] Akova, İ.(2008) Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, Türkiye.

[48] Adıyaman, Ç. (2012) Türkiye'nin Yenilenebilir Enerji Politikaları, Yüksek Lisans Tezi. Niğde Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Niğde

[49] Uğurlu, Ö. (2006) Türkiye'de Çevresel Güvenlik Bağlamında Sürdürülebilir Enerji Politikaları, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sosyal Çevre Bilimleri Anabilim Dalı, Ankara.

[50] Demirbas, A. (2001) Biomass Resource Facilities and Biomass Conversion Processing For Fuel Sand Chemicals, Energy Conversion And Management, Turkey, 1357-1378.

[51] Yapar, M. (2014) Türkiye'de İktisat Politikaları Çerçevesinde Rüzgar Enerjisi Politikalarının Etkinliğinin Analizi: Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi. İstanbul

Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.

[52] Severoğlu, A. (2010) Katı Biyoyakıt Üretimi. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum.

[53] Barbour, B. G. (1999) Terrestrial Plant Ecology. A.W. Longman, New York, USA

[54] Türe, S. (2001) Biokütle Enerjisi, Temiz Enerji Vakfı, Ankara, Türkiye

[55] İşler, A. (2012) Aspir Yağı Etil Esteri ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, Doktora Tezi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

[56] Karaca, C. (2009) Çukurova Bölgesindeki Tarıma Dayalı Sanayi Atıklarının Enerjiye Dönüşüm Olanaklarının İncelenmesi. Doktora Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

[57] Woods, J. ve D. O. Hall (1994) Bioenergy for Development, FAO Environment and Energy Paper, 13, Rome, Italy

[58] Kalıncı, Y.(2011) Biokütle Esaslı Hidrojen Üretim Sistemlerinin Eksergoekonomik Analizi ve Yaşam Döngüsü Değerlendirilmesi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi. İzmir.

[59] Özay, Y., Ateş, H. Taner, F. (2014) Biokütle Dönüşüm Süreçleri, ISEM2014 Adıyaman. <http://www.isem2014.com/PastConferences/ISEM2014/ISEM2014/papers/A1-ISEM2014ID166.pdf> , Erişim Tarihi 10.03.2019.

[60] Saxena, R.C., Seal, D., Kumar, S. and Goyal, H.B. (2008) Thermo-chemical routes for hydrogen rich gas from biomass: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12,1909-1927.

[61] Taşyürek, M., Acaroğlu, M. (2007) Biyoyakıtlarda (Biyomotorinde) Emisyon Azaltımı ve Küresel Isınmaya Etkisi, Uluslararası Küresel İklim Değişikliği ve Çevresel Etkileri Konferansı, 18-20 Ekim 2007, Konya.

[62] Yaşar, B.(2009) Alternatif Enerji Kaynağı Olarak Biyodizel Üretim ve Kullanım Olanaklarının Türkiye Tarımı ve AB Uyum Süreci Açısından Değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Ankara.

[63] Adıgüzel, A.O. (2011) Lignoselülozik Biokütleden Biyoetanol Üretimi. Yüksek Lisans Semineri. Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.

[64] Onurbaş Avcıoğlu, A., Türker, U., Atasoy, Z. Koçtürk, D. (2011) Tarımsal Kökenli Yenilenebilir Enerjiler-Biyoyakıtlar, Nobel Yayınevi, ISBN: 978-605-5426-71-2, Ankara.

[65] Buğutekin, A. (2007) Atıklardan Biyogaz Üretiminin İncelenmesi, Doktora Tezi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, İstanbul.

[66] Öztürk, M. (2005) Hayvan Gübresinden Biyogaz Üretimi Çevre ve Orman

Bakanlığı, Ankara.

[67] Steffen, R., Szolar, O., Braun, R.(1998) Feedstocks for Anaerobic Digestion, AD-NETT.

[68] Boyd, R. (2000) Internalising Environmental Benefits of Anaerobic Digestion of Pig Slurry in Norfolk, University of East Anglia, [www.green-trust.org/PigSlurryADProject.pdf](http://www.green-trust.org/PigSlurryADProject.pdf), Erişim Tarihi: 05.04.2019

[69] Eryaşar, A. (2007) Kırsal kesime Yönelik Bir Biyogaz Sisteminin Tasarımı, Kurulumu, Testi ve Performansına Etki Eden Parametrelerin Araştırılması, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Güneş Enerjisi Anabilim Dalı, İzmir.

[70] Onurbaş, A. (1993) Tarımda Kullanılan Sabit Patlamalı Motorlarda Çeşitli Gaz Yakıtların Kullanımını Sağlayacak Karıştırıcı Geliştirilmesi, TÜBİTAK Doğa Dergisi, 17(3), Ankara

[71] Stafford, D.A., Hawkes, D.L., Horton, R. (1981) Methane Production from Waste Organic Matter, CRC Press, Inc., ISBN 0-8493-5223-1, Boca Raton, Florida

[72] Lambert, Tom Gilman Paul Lilienthal P. (2006) Micropower system modeling with HOMER. In: Farret, Felix A. Simoes GM (ed) Integration of Alternative Sources of Energy. John Wiley & Sons, Inc, , pp. 379–418.

[73] Dursun, B. (2015) Determination of Optimum Renewable Energy Sources for Public Libraries, Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering, 3 (2), 70-74.

[74] Dursun B., Altay A. (2019) Determination of hybrid renewable energy systems for project type public library building, International Journal of Renewable Energy Research 9 (1), 24-31.

[75] Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesi Görünümü, <http://www.haritamap.com/yer/marmara-universitesi-goztepe-kampusu-kadikoy> Erişim Tarihi:15.04.2019

[76] AYEDAŞ, (2018) 2016-2017 yılı elektrik yük verisi, İstanbul.

[77] YEGM, (2017) İstanbul Göztepe lokasyonuna ait 2015-2017 saatlik rüzgar hız verisi, Ankara

[78] Graham V. A. Hollands, K.G.T. (1990) A method to generate synthetic hourly solar radiation globally, Solar Energy, 44( 6), 333–341

[79] Türkiye İstatistik Kurumu (2018) 2017 yılı sonu büyükbaş hayvan sayıları [www.tuik.gov.tr](http://www.tuik.gov.tr) Erişim Tarihi:12.08.2018

[80] Doğru, C. (2010). Trakya Bölgesinin Biyogaz Potansiyeli ve Mevcut Potansiyelin Bölge Ekonomisine Katkısı Üzerine Bir İnceleme, Uluslararası II. Trakya Bölgesi Kalkınma - Girişimcilik Sempozyumu,01-02 Ekim 2010, 113–121, Kırklareli.

[81] Milbrandt, A., Overend, R. (2011). Assessment of Biomass Resources in

Afghanistan. Golden, Colorado, USA

[82] Nordex 1500kW Wind Turbine Specifications [http://www.nordex-online.com/fileadmin/MEDIA/Produktinfos/EN/Nordex\\_S70\\_S77\\_Produktbroschuere\\_EN.pdf](http://www.nordex-online.com/fileadmin/MEDIA/Produktinfos/EN/Nordex_S70_S77_Produktbroschuere_EN.pdf), Erişim Tarihi:05.04.2019

[83] Suzlon 1500kW Wind Turbine Specifications <http://pdf.directindustry.com/pdf/suzlon-102149.html> , Erişim Tarihi:05.04.2019

[84] Goldwind 1500kW Wind Turbine Specifications <https://www.goldwindamericas.com/15-mw-pmdd> , Erişim Tarihi:05.04.2019

[85] Neg miçon 1500kW Wind Turbine Specifications <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/64-neg-micon-nm-64-1500> , Erişim Tarihi:05.04.2019

[86] GE1500kW Wind Turbine Specifications <https://geosci.uchicago.edu/~moyer/GEOS24705/Readings/GEA14954C15-MW-Broch.pdf>, Erişim Tarihi:05.04.2019

[87] Oğuz, Y., Karakan A., Uslu B. (2015) Afyonkarahisar’da Kurulu Olan Monokristal, Polikristal ve İnce Film Güneş Panellerinin Verimliliğinin İncelenmesi, Tesilat Mühendisliği - Sayı 149 - Eylül/Ekim 2015 47-59.

[88] Hunter Fanney, A., Brian, P., Dougherty, Mark W. Davis, (2001) Measured Performance of Building Integrated Photovoltaic Panels, the Journal of Solar Energy Engineering, Special Issue: Solar Thermochemical Processing, 123(2),187-193, August 2001.

[89] Dalton GJ, Lockington DA, Baldock TEJ. (2009) Feasibility Analysis of Renewable Energy Supply Options for a Grid-Connected Large Hotel. Renewable Energy, 34, 955–64.

[90] NCCER, Solar Photovoltaic Systems Installer Trainee Guide, (2011) National Center for Construction Education and Research (U.S.), Prentice Hall, 2011 - Technology & Engineering - 304 pages

[91]. MAXPoWER CS6U- 350P PV panel spesifications and technical properties. [https://www.canadiansolar.com/fileadmin/user\\_upload/downloads/datasheets/en/new/2018-4-12-v5.562/Canadian\\_Solar-Datasheet-MaxPower\\_CS6U-P\\_High\\_Efficiency\\_v5.562\\_EN.pdf](https://www.canadiansolar.com/fileadmin/user_upload/downloads/datasheets/en/new/2018-4-12-v5.562/Canadian_Solar-Datasheet-MaxPower_CS6U-P_High_Efficiency_v5.562_EN.pdf), Erişim Tarihi:05.04.2019

[92] Salam M.A., Aziz, A., Alwaeli, A., Hussein, A.K. (2013) Optimal Sizing of Photovoltaic Systems Using Homer for Sohar, Oman, International Journal Of Renewable Energy Research, 3(2), 301-307.

[93] ABB PVS800-57-1000kW-C, central inverters, technical specifications, [https://library.e.abb.com/public/4736ece73ecf4e3aa2bb7a6ec7f0ee6d/PVS800\\_central](https://library.e.abb.com/public/4736ece73ecf4e3aa2bb7a6ec7f0ee6d/PVS800_central)

- [inverters\\_flyer\\_3AUA0000057380\\_RevN\\_EN\\_lowres.pdf](#) , Erişim Tarihi:05.04.2019
- [94] EPDK, (2018) Ticari ve Mesleki Amaçla Elektrik Tüketen Aboneliklerde Serbest Tüketicili Olmak, Ankara, <https://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/16-12/ticari-ve-mesleki-amacla-elektrik-tuketen-aboneli>, Erişim Tarihi:05.04.2019
- [95] Kahar J.A., Imran, M., Khalid, A., Iqbal, W., Ashraf, S.R., Adnan, M., Syed Farooq A., Khokhar, K.S. (2018) Techno Economic Analysis of A Wind-Photovoltaic-Biomass Hybrid Renewable Energy System for Rural Electrification: A Case Study of Kallar, Energy 148, 208-234.
- [96] Binboğa G. (2017) Sürdürülebilirlik Kapsamında Kyoto Protokolü Esneklik Mekanizmaları Ve Türkiye'nin Durumunun İncelenmesi, MCBÜ Sosyal Bilimler Dergisi Cilt:15 Sayı:4, Aralık 2017, Manisa, Türkiye
- [97] T.C. Dış İşleri Bakanlığı, Kyoto Protokolü, <http://www.mfa.gov.tr/kyoto-protokolu.tr.mfa>, 08.06.2019
- [98] YEGM, (2017). Hourly wind speed data between 2015 and 2017 in Istanbul, Turkey Enerji Bakanlığı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Ankara.

# ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı :**Ercan AYKUT

**Doğum Yeri ve Tarihi :**Istanbul 1979

**Yabancı Dili :**İngilizce

**E-Posta :**aykutercan@yahoo.com

## Öğrenim Durumu

Derece	Üniversite/Lise	Bölüm/Program	Mezuniyet Yılı
Lise	İ.T.O.A.T.L	Elektrik	1998
Üniversite	Marmara Üniversitesi	Elektrik Eğitimi	2002
Y. Lisans	Marmara Üniversitesi	Elektrik Eğitimi	2007

## Bilimsel Eserler

1. B. Dursun , E. Aykut An investigation on wind/PV/fuel cell/battery hybrid renewable energy system for nursing home in Istanbul, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A Journal of Power and Energy, April 2019.
2. N Ekren, B Dursun, E Aykut Lighting computer programs in lighting technology, Gazi University Journal of Science,2008, Cilt 21, Sayı 1, Sayfalar 15 - 20.
3. N Ekren, E Aykut, B Dursun Elektrikli Ev Aletlerinde CE Uyumluluğu Ve Bir Uygulama, 2009, Pamukkale Univ Muh Bilim Derg. 2009; 15(1): 25-32.
4. E. Aykut, B. Dursun , F. Büyüktümtürk, N. Ekren Examination of Harmonics in Incandescent Lamps and CFLs"" Conference on Energy Strategy and Technology (CEST), Beijing-China 23-24 October.

## Ödüller