

**KARABÜK ŞARTLARINDA FV GÜNEŞ  
ENERJİSİ, RÜZGAR ENERJİSİ VE BİYOGAZ  
HİBRİT ENERJİ ÜRETİM SİSTEMİNİN  
POTANSİYEL ARAŞTIRMASI VE SİSTEMİN  
OPTİMİZASYONU**

**2018  
DOKTORA TEZİ  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

**Abdülsamed TABAK**

**KARABÜK ŞARTLARINDA FV GÜNEŞ ENERJİSİ, RÜZGAR ENERJİSİ VE  
BİYOGAZ HİBRİT ENERJİ ÜRETİM SİSTEMİNİN POTANSİYEL  
ARAŞTIRMASI VE SİSTEMİN OPTİMİZASYONU**

**Abdülşamed TABAK**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Doktora Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Mayıs 2018**

Abdülsamed TABAK tarafından hazırlanan “KARABÜK ŞARTLARINDA FV GÜNEŞ ENERJİSİ, RÜZGAR ENERJİSİ ve BİYOGAZ HİBRİT ENERJİ ÜRETİM SİSTEMİNİN POTANSİYEL ARAŞTIRMASI ve SİSTEMİN OPTİMİZASYONU” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Tahir GÜNEŞER

EŐ DanıŐman, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu alıŐma, jürimiz tarafından oy birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 02/05/2018

nvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. KurtuluŐ BORAN (G)

ye : Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK (KB)

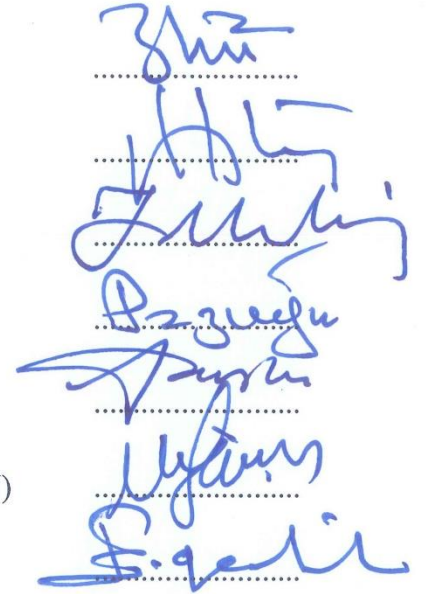
ye : Prof. Dr. Tayfun MENLİK (G)

ye : Prof. Dr. Ziyaddin RECEBLİ (KB)

ye : Doç. Dr. Habibe TECİMER (KB)

ye : Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Tahir GÜNEŞER (KB)

ye : Dr. Öğr. Üyesi Engin GEDİK (KB)



...../...../2018

KB Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıŐtır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.





*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Abdülsamed TABAK

## ÖZET

Doktora Tezi

### KARABÜK ŞARTLARINDA FV GÜNEŞ ENERJİSİ, RÜZGAR ENERJİSİ VE BİYOGAZ HİBRİT ENERJİ ÜRETİM SİSTEMİNİN POTANSİYEL ARAŞTIRMASI VE SİSTEMİN OPTİMİZASYONU

**Abdülamed TABAK**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK**

**Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Tahir GÜNEŞER**

**Mayıs 2018, 120 sayfa**

Enerji ihtiyaçlarındaki artış ve fosil yakıtlara karşı alternatif arayışlara girilmesi sonucunda yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) kullanılması zorunlu hale gelmiştir. YEK'lerin süreksiz enerji üretim yapısına sahip olması ve üretilen enerjinin birim maliyetlerinin henüz rekabetçi seviyelere inmemesi gibi nedenler, bu kaynakların hibrit olarak kullanılmasına yol açmıştır. Hibrit sistemlerin kullanımı ise bu kaynakların hibrit sistemdeki oranlarının tespit edilmesini gerektirmektedir.

Çalışmada Karabük Üniversitesi Kampüsü'nde bulunan İktisadi İdari Bilimler Fakültesi'nin enerji ihtiyacı YEK'lerden olan FV güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve biyokütleden elde edilen biyogaz enerjisinin bir araya gelerek oluşturduğu hibrit sistemle sağlanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda bu üç kaynağın optimum

boyutlandırması yapılmıştır. Toplam Net Bugünkü Değer'in (TNBD) denklemi amaç fonksiyonu olarak seçildiği, güvenilirlik açısından Güç Kaynağı Kaybı Olasılığı'nın (GKKO) değerlendirildiği çalışmada Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (SEM) de göz önünde bulundurulmuştur. GKKO'nun maksimum 0.02 ve 0.01 olduğu durumlarda TNBD değerleri elde edilerek karşılaştırılmıştır. Bunun yanında enerji kaynaklarının yatırım maliyetlerindeki ve faiz oranlarındaki değişimin TNBD'ye olan etkisi ortaya konmuştur. Tüm bu çalışmalar için oluşturduğumuz kontrol stratejisi kullanılarak meta sezgisel yöntemlerden olan Genetik Algoritma ve Isıl İşlem Algoritması ile sonuca gidilmiştir. Diğer yandan meta sezgisel yöntemlerin çözümleri kendi içinde performans açısından karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak etkili bir kontrol stratejisi ile fakülte binasının elektrik enerjisi ihtiyacı hibrit sistemle karşılanmıştır.

**Anahtar Sözcükler :** Hibrit enerji optimizasyonu, genetik algoritma, ısıl işlem algoritması, toplam net bugünkü değer, güç kaynağı kaybı olasılığı, seviyelendirilmiş enerji maliyeti

**Bilim Kodu** : 905.1.150

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **POTENTIAL RESEARCH AND OPTIMIZATION OF PV SOLAR ENERGY, WIND ENERGY AND BIOGAS HYBRID ENERGY PRODUCTION SYSTEM IN KARABUK CONDITIONS**

**Abdülsamed TABAK**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Energy Systems Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK**

**Assist. Prof. Muhammet Tahir GNEŐER**

**May 2018, 120 pages**

As a result of the increase in energy needs and the search for alternatives to fossil fuels, the use of renewable energy sources (RES) has become compulsory. Reasons such as the RESs have discontinuous energy production structure and the unit costs of the produced energy do not yet reach competitive levels have led to the use of these resources as hybrids. The use of hybrid systems requires that determining of usage rates of these resources.

The aim of the study is to provide the energy needs of the Faculty of Economics and Administrative Sciences at the Karabük University Campus with the hybrid system of RESs such as PV solar energy, wind energy and biogas energy obtained from biomass. In this context, optimum sizing of these three resources was made. The

equation of Total Net Present Value (TNPC) was chosen as the objective function. The Levelized Cost of Energy (LCOE) is also considered in the study while the Loss of Power Supply Probability (LPSP) is evaluated for reliability. TNPC values were obtained and compared when the LPSP was 0.02 and 0.01 maximum. Besides, the effect of changes in the investment costs of energy resources on TNPC has been revealed. We utilized genetic algorithm and simulated annealing algorithm which are meta-heuristic methods by using control strategy that we have created for all these studies. On the other hand, the solutions of meta-heuristic methods have been compared in terms of performance in themselves. As a result, with an effective control strategy, the electricity requirement of the faculty building was met by the hybrid system.

**Key Word** : Hybrid energy optimization, genetic algorithm, simulated annealing, total net present cost, loss of power supply probability, localized cost of energy.

**Science Code** : 905.1.150



## TEŞEKKÜR

Bu tez alıŐmasının planlanmasında, araŐtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıŐmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocalarım Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK ve Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Tahir GÜNEŞER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez alıŐması boyunca her zaman desteğini sunan ve hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan sevgili eşime tüm kalbimle teşekkür ederim.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımını esirgemedен yanımda oldukları için teşekkürü borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xv
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
1.1.LİTERATÜR ÖZETİ .....	4
1.2. ÇALIŞMANIN AMACI.....	9
BÖLÜM 2 .....	11
TÜRKİYE’NİN GÜNEŞ ENERJİSİ, RÜZGAR ENERJİSİ VE BİYOGAZ POTANSİYELİ.....	11
2.1. GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ.....	11
2.1.1. Karabük Güneş Enerjisi Potansiyeli .....	14
2.2. RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ.....	15
2.2.1. Karabük Rüzgar Enerjisi Potansiyeli.....	19
2.3. BİYOGAZ POTANSİYELİ .....	20
2.3.1. Karabük Biyogaz Potansiyeli .....	23
BÖLÜM 3 .....	25
METADOLOJİ VE MATEMATİKSEL MODEL .....	25
3.1. VERİLERİN ELDE EDİLMESİ .....	25
3.2. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PANELİ .....	29

3.2.1. Güneş Hücrelerinin Çalışma Prensibi.....	29
3.2.2. Üretim Şekline ve Yapısına Göre FV Güneş Panelleri .....	32
3.2.2.1. Kristal Silikon Hücreler .....	33
3.2.2.2. İnce Film hücreler .....	34
3.2.3. Kullanım Şekline Göre Sistemler .....	34
3.2.3.1. Şebekeden Bağımsız Sistemler (off-grid).....	34
3.2.4. Fotovoltaik Güneş Paneli Gücünün Matematiksel Modeli.....	37
3.3. RÜZGAR TÜRBİNİ .....	38
3.3.1. Rüzgar Türbini Ekipmanları .....	39
3.3.1.1 Kule.....	39
3.3.1.2. Makine Bölümü .....	40
3.3.1.3. Rotor .....	40
3.3.1.4. Jeneratör .....	40
3.3.1.5. Frenleme Sistemi .....	41
3.3.1.6. Rüzgar Hızını ve Yönünü Ölçen Sensörler.....	41
3.3.2. Kanat Tipine Göre Rüzgar Türbini Çeşitleri .....	42
3.3.2.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbini .....	42
3.3.2.2. Dikey Eksenli Rüzgar Türbini .....	43
3.3.3. Rüzgar Türbin Gücünün Matematiksel Modeli .....	45
3.4. BİYOKÜTLE ENERJİSİ .....	51
3.4.1. Biyogaz Tesisleri .....	53
3.4.1.1. Besleme Yöntemlerine Göre Biyogaz Tesisleri.....	53
3.4.1.2. Reaktör Tasarımlarına Göre Biyogaz Tesisleri.....	55
3.4.2. Biyogaz Üretim Sistemi Tesis Bileşenleri .....	58
3.4.2.1. Biyokütle Sistemi.....	58
3.4.2.2. Biyogaz Sistemi .....	60
3.4.3. Biyogaz Jeneratör Gücünün Matematiksel Modeli .....	61
3.5. KULLANILAN METASEZGİSEL YÖNTEMLER.....	64
3.5.1. Genetik Algoritma .....	64
3.5.1.1. Kromozomun Kodlanması .....	66
3.5.1.2. Genetik Algoritma Operatörleri .....	67
3.5.1.3. Popülasyon Büyüklüğü .....	68

	<b><u>Sayfa</u></b>
3.5.1.4. Seçme İşlemi .....	69
3.5.1.5. Elitizim.....	71
3.5.1.6. Genetik Algoritmanın Çalışma Prensipleri .....	71
3.5.2. Isıl İşlem Algoritması .....	72
3.5.2.1. Basamak Tipli Sıcaklık Düşürme Stratejisi .....	74
3.5.2.2. Sürekli Sıcaklık Düşürme Stratejisi .....	75
3.5.2.3. Monoton Olmayan Sıcaklık Düşürme Stratejisi .....	76
3.5.2.4. Yapay Isıl İşlem Algoritmasının Çalışma Prensipleri.....	77
3.6. SİSTEMİN KONTROL STRATEJİSİ .....	79
3.7. EKONOMİK ANALİZ .....	83
3.7.1. Toplam Net Bugünkü Değer Analizi .....	84
3.7.1.1. FV Güneş Enerjisi Sisteminin Toplam Net Bugünkü Değeri.....	84
3.7.1.2. Rüzgar Türbini Sisteminin Toplam Net Bugünkü Değeri .....	85
3.7.1.3. Biyogaz Enerji Üretim Sisteminin Net Bugünkü Değeri.....	86
3.7.2. Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti.....	87
3.8. SİSTEMİN GÜVENİLİRLİK ANALİZİ .....	88
3.8.1. Güç Kaynağı Kaybı Olasılığı.....	88
3.9. AMAÇ FONKSİYONU VE KISITLAMALAR.....	88
BÖLÜM 4 .....	90
SİSTEMİN OPTİMİZASYONU VE ANALİZİ .....	90
4.1. BİRİNCİ MODELE GÖRE OPTİMİZASYON VE ANALİZ .....	90
4.2. İKİNCİ MODELE GÖRE OPTİMİZASYON VE ANALİZ.....	98
BÖLÜM 5 .....	105
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	105
5.1. SONUÇ .....	105
5.2. ÖNERİLER .....	107
KAYNAKLAR .....	108
ÖZGEÇMİŞ .....	120

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1. Dünya’da nihai enerji tüketim oranları .....	2
Şekil 1.2. Dünya’da elektrik üretimindeki YEK’lerin oranı .....	2
Şekil 1.3. Türkiye’nin elektrik üretimindeki birincil enerji kaynaklarının dağılımı.....	3
Şekil 2.1. Türkiye’nin aylara göre yıllık güneşlenme miktarı ve saatleri .....	12
Şekil 2.2. Türkiye’nin güneşlenme haritası.....	14
Şekil 2.3. Karabük güneş enerjisi potansiyeli .....	14
Şekil 2.4. Aylara göre Karabük ili güneşlenme süreleri .....	15
Şekil 2.5. Türkiye’nin illere göre, 50 metre yükseklikteki rüzgar hızı haritası .....	17
Şekil 2.6. Lisanslı RES’lerin bölgelere göre dağılımı.....	18
Şekil 2.7. İnşa halindeki RES’lerin bölgelere göre dağılımı.....	18
Şekil 2.8. Karabük rüzgar enerjisi potansiyeli .....	19
Şekil 2.9. Karabük rüzgar enerjisi potansiyeli .....	20
Şekil 3.1. Meteoroloji istasyonu (a) ve elektrik sayacı (b) .....	26
Şekil 3.2. Bir yıllık ışıma (a), hava sıcaklığı (b), yük periyodu (c) ve rüzgar hızı (d). .....	26
Şekil 3.3. Işıma (a), hava sıcaklığı (b), yük periyodu (c) ve rüzgar hızı (d)’nin bir yıllık göreceli frekans grafikleri .....	27
Şekil 3.4. İletken, yarı iletken ve yalıtkan malzemelerin enerji seviyeleri .....	30
Şekil 3.5. Katkılama işleminde n-tipi malzeme oluşumu .....	31
Şekil 3.6. Katkılama işleminde p-tipi malzeme oluşumu .....	31
Şekil 3.7. N-tipi ve P-tipi malzemenin birleşmesi .....	32
Şekil 3.8. Güneş hücresinin gösterimi.....	32
Şekil 3.9. Şebekeden bağımsız sistem için FV enerji akış sistemi.....	35
Şekil 3.10. Şebekeye bağlı sistemin enerji akış şeması .....	37
Şekil 3.11. Rüzgar türbini bileşenleri.....	42
Şekil 3.12. Savanius (a) ve Darrieus (b) Türbinler .....	44
Şekil 3.13. 4 Aşamada biyogaz üretim süreçleri.....	52
Şekil 3.14. Sabit kubbeli biyogaz tesisi .....	56
Şekil 3.15. Hareketli kubbeli biyogaz tesisi.....	57

## Sayfa

Şekil 3.16. Membran tipi biyogaz tesisi.....	58
Şekil 3.17. Biyogaz tesisinin akış şeması.....	58
Şekil 3.18. Gen, Kromozom ve Popülasyon gösterimi .....	65
Şekil 3.19. İkili kodlama örneği.....	66
Şekil 3.20. Permütasyon kodlama örneği.....	66
Şekil 3.21. Değer kodlama örneği.....	67
Şekil 3.22. Ağaç kodlama örneği .....	67
Şekil 3.23. Rulet Tekerleği .....	70
Şekil 3.24. Genetik Algoritmada akış diyagramı .....	72
Şekil 3.25. Isıl işlem uygulanması esnasında sıcaklık değişimi.....	73
Şekil 3.26. Basamak tipli sıcaklık düşürmede iterasyona bağlı sıcaklık grafiği .....	75
Şekil 3.27. Sürekli sıcaklık düşürmede iterasyona bağlı sıcaklık grafiği .....	76
Şekil 3.28. Monoton olmayan sıcaklık düşürmede iterasyona bağlı sıcaklık grafiği .....	77
Şekil 3.29. Sistemin basitleştirilmiş akış diyagramı .....	80
Şekil 3.30. Sistemin kontrol stratejisi .....	83
Şekil 4.1. Algoritmalara göre önerilen kurulu güç oranları (a) GA ve (b) İİA .....	92
Şekil 4.2. Algoritmalara göre elde edilen sonuçlar bazında üretilen enerji oranları (a) GA ve (b) İİA.....	92
Şekil 4.3. GA çözümüne göre TNBD'yi oluşturan bileşenler .....	93
Şekil 4.4. İİA çözümüne göre TNBD'yi oluşturan bileşenler.....	94
Şekil 4.5. GA çözümündeki maliyetlerin oransal dağılımı .....	95
Şekil 4.6. İİA çözümündeki maliyetlerin oransal dağılımı .....	96
Şekil 4.7. Kaynaklara göre güç ihtiyacı grafiği.....	99
Şekil 4.8. GKKO'daki değişimin TNBD ve SEM üzerindeki etkisi .....	100
Şekil 4.9. Faiz oranlarındaki değişimin TNBD ve SEM üzerindeki etkisi .....	101
Şekil 4.10. Değişen FV panel yatırım maliyetlerinde TNBD ve SEM değerleri.....	102
Şekil 4.11. Değişen BG yatırım maliyetlerinde TNBD ve SEM değerleri .....	103

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1. Bölgelere göre Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli.....	13
Çizelge 2.2. 50 m'deki rüzgar hızına göre Türkiye rüzgar enerjisi potansiyeli.....	16
Çizelge 2.3. 50 m'deki alanlar bazında Türkiye rüzgar enerjisi potansiyeli.....	17
Çizelge 2.4. Biyogaz potansiyelinin sektörlere göre dağılımı .....	21
Çizelge 2.5. Şehirlere göre kanatlı hayvan ve sığır gübresinin biyogaz potansiyeli..	22
Çizelge 2.6. İllere göre tarımsal biyogaz potansiyeli.....	23
Çizelge 3.1. Yemekhane atıkları biyogaz üretim potansiyeli .....	28
Çizelge 3.2. Kampüs alanı çimen atıkları biyogaz üretim potansiyeli.....	29
Çizelge 3.3. Ortamlara göre Hellmann Sabiti .....	46
Çizelge 3.4. Yüzey pürüzlülük uzunluğu.....	47
Çizelge 3.5. Rüzgar Türbini Katalog Değerleri .....	51
Çizelge 3.6. Kullanılan alanlara göre biyogaz saflaştırma gereksinimi.....	61
Çizelge 3.7. Biyogaz Jeneratörünün Teknik Özellikleri .....	62
Çizelge 3.8. Hibrit sistemin teknik ve ekonomik parametreleri.....	63
Çizelge 3.9. Rulet seçme tekniği.....	70
Çizelge 4.1. GKKO<0.02 olduğu durumda yöntemlere göre optimizasyon sonuçları .....	91
Çizelge 4.2. GKKO<0.02 olduğu durumda yöntemlere göre gerekli adetler ve karşılıdığı güçler.....	91
Çizelge 4.3. GKKO<0.01 olduğu durumda yöntemlere göre optimizasyon sonuçları.....	97
Çizelge 4.4. GKKO<0.01 olduğu durumda yöntemlere göre gerekli adetler ve karşılıdığı güçler .....	97
Çizelge 4.5. Sonuçların GA ve İİA'ya göre sınıflandırılması.....	98
Çizelge 4.6. Enerji kaynaklarına göre optimizasyon sonuçları.....	99
Çizelge 4.7. Farklı FV yatırım maliyetlerinde maliyetin dağılımı.....	102
Çizelge 4.8. Farklı biyogaz sistemi yatırım maliyetlerinde maliyetin dağılımı.....	104

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

$A_{es}$	: rüzgar türbini tahmin edilen yüzey alanı
$A_{in}$	: rüzgar türbini başlangıç süpürme alanı
$A_{pv}$	: panel yüzey alanı
$\alpha_{pv}$	: FV panel kurulum birim maliyeti
$\alpha_{wt}$	: rüzgar türbini kurulum birim maliyeti
$^{\circ}C$	: santigrat derece
$CH_4$	: metan
$Cu$	: bakır
$I_{mpp}$	: maksimum güç noktası akımı
$i$	: faiz oranı
$K_p$	: maksimum güç sıcaklığı katsayısı
MPPT	: maksimum güç izleme noktası
$\eta_{bg}$	: biyogaz jeneratörünün verimi
$\eta_k$	: panel katalog verimi
$\eta_{pv}$	: FV panel verimi
$\eta_t$	: MPPT ekipman verimi
$N$	: projenin ömrü
$N_{pv}$	: panel sayısı
$\gamma$	: enflasyon oranı
$P_{bg}$	: biyogaz jeneratörünün tahmin edilen gücü
$P_{bgn}$	: biyogaz jeneratörünün nominal gücü
$p_{pv}$	: güneş paneli gücü
$P_r$	: rüzgar türbini nominal gücü
$P_w$	: rüzgar türbini çıkış gücü
$PR$	: performans oranı



- $R$  : ışıma miktarı  
 $\rho_{hava}$  : hava yoğunluğu  
 $T_A$  : hava sıcaklığı  
 $T_C$  : panel sıcaklığı  
 $T_R$  : standart test şartları sıcaklığı  
 $V_{mpp}$  : maksimum güç noktası gerilimi  
 $V_{ci}$  : rüzgar türbini devreye girme hızı  
 $V_{co}$  : rüzgar türbini devreden çıkma hızı  
 $V_r$  : rüzgar türbini nominal rüzgar hızı



## **KISALTMALAR**

- BG : Biyogaz  
BK : Biyokütle  
FV : Fotovoltaik  
DERT : Dikey Eksenli Rüzgar Türbini  
GA : Genetik Algoritma  
GEPA : Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası  
GKKO: Güç Kaynağı Kaybı Olasılığı  
İİA : Isıl İşlem Algoritması  
REPA : Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası  
RT : Rüzgar Türbini  
SEM : Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti  
TNBD : Toplam Net Bugünkü Değer  
YEK : Yenilenebilir Enerji Kaynakları  
YERT : Yatay Eksenli Rüzgar Türbini

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

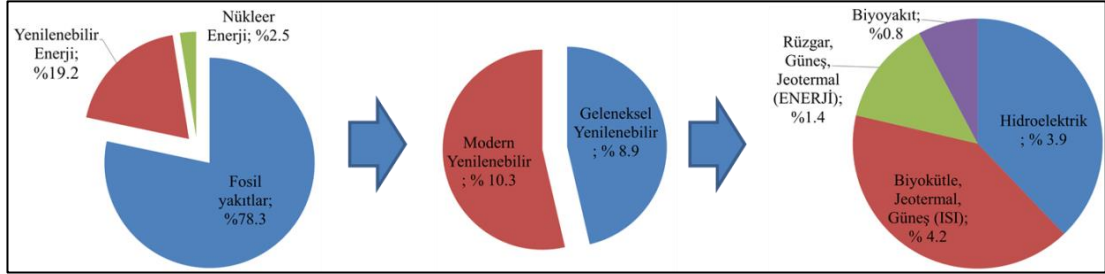
İnsanoğlu enerjiye ilk var olduğu zamanlardan günümüze kadar hep ihtiyaç duymuştur. İlk zamanlar sadece ısı olarak ihtiyaç duyulan enerjiye zamanla mekanik sonra da elektriksel olarak talep olmuştur [1].

Fosil enerji kaynakları; petrol, kömür ve doğalgaz olmakla birlikte bu kaynaklar kullanıldıktan sonra yok olarak tekrar kullanılamaz hale gelirler. Diğer yandan nükleer enerji de fosil enerji kaynaklarından olmasa da tekrar kullanılmadığı için YEK'lerden değildir. Yenilenebilir enerji doğal kaynaklardan elde edilen, kendini sürekli yenileyebilen enerji kaynağı olarak adlandırılır [2].

1973 yılında meydana gelen birinci petrol krizinden sonra enerjinin önemi tüm dünyada bir kez daha gündeme gelmiştir. Ülkeler mevcut krizlerin tekrarlanma ihtimali ile birlikte enerji arz güvenliklerini sağlayabilmek adına fosil yakıtlar yerine alternatif enerji kaynakları arayışına girmişlerdir. YEK'ler fosil yakıtlara iyi bir alternatif olarak görülmüştür. YEK ile ilgili çalışmalar her ne kadar 20 yy.ın başlarından itibaren devam etse de fosil kaynakların kolay elde edilebilmesi, teknolojilerinin bilindik olması ve üretilen enerjinin birim maliyetlerinin düşük olmasından dolayı YEK'e ihtiyaç duyulmamıştır. Ancak teknolojinin gelişmesi ve fosil yakıtların sürekli olarak siyasi bir baskı aracı olarak kullanılması 2000'li yıllardan itibaren YEK'lere olan talebi ivmelendirmiştir [3, 4].

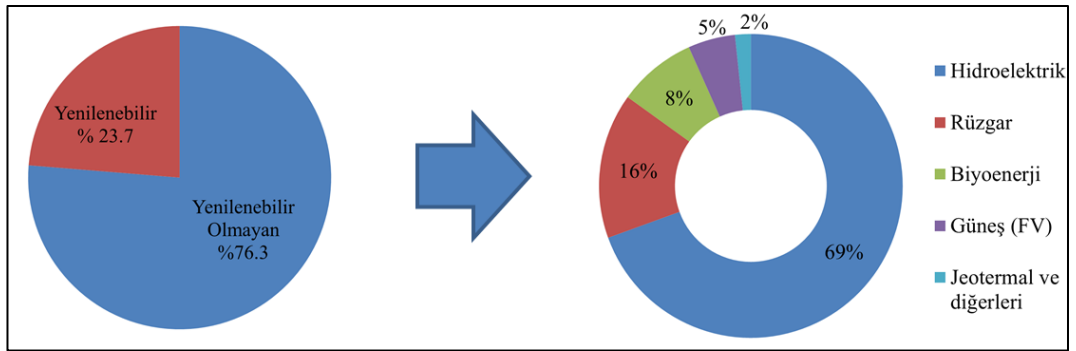
Hali hazırda dünyada nihai tüketim açısından fosil tabanlı yakıtlar ağırlıktadır. Şekil 1.1'de de görüldüğü gibi 2014 yılı itibari ile fosil yakıtların nihai enerji tüketiminde kullanılma oranı %78.3, YEK'lerin kullanılma oranı %19.2 ve nükleer enerjinin kullanılma oranı %2.5'tir. Son yıllarda YEK'lerin kullanımları ve teknolojileri arttıkça bilim adamları tarafından YEK'ler de kendi içinde geleneksel YEK ve

modern YEK olarak adlandırılmaya başlanmıştır. Burada geleneksel YEK'ler olarak hidroelektrik enerjiden bahsedilirken modern YEK'ler güneş, rüzgar, biyokütle, jeotermal ve dalga enerjisi olarak adlandırılmaktadır [5].



Şekil 1.1. Dünya'da nihai enerji tüketim oranları [5].

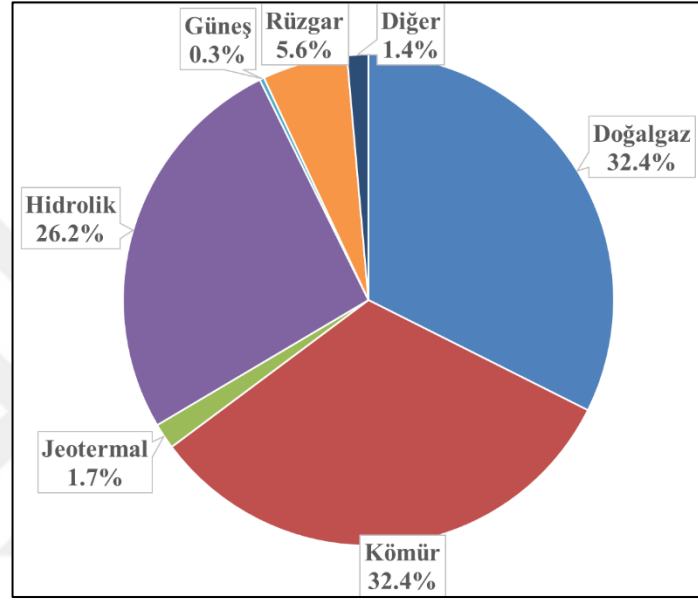
Şekil 1.2 Dünya'da enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki yerini göstermektedir. YEK'lerin elektrik üretimindeki yeri nihai enerji tüketim oranlarındaki yerinden %4.5 oranında daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun en önemli nedeni YEK'lerden enerji elde edilmesindeki öncelikli amaç elektrik enerjisi üretimidir. Isı ve hareket enerjisi ihtiyacı için fosil yakıtlar öncelikli olarak tercih edilmektedir.



Şekil 1.2. Dünya'da elektrik üretimindeki YEK'lerin oranı [5].

Gelişmiş ülkelerin enerji taleplerindeki artış oranı düşük olduğu için mevcut kurulu enerji kaynaklarından bir diğerine geçiş daha yavaş olmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerin enerji talepleri daha hızlı artmaktadır ancak buna karşın YEK'lerin gerek birim maliyetlerinin henüz fosiller kadar düşük olmaması gerekse fosil kaynakların kullanımının daha kolay olmasından dolayı YEK'lere olan yönelim henüz beklenenin altındadır [2]. Türkiye'de de son yıllarda YEK'lere yönelim artış sağlamıştır. Şekil 1.3 Türkiye'nin elektrik üretimindeki birincil enerji kaynaklarının dağılımını

göstermektedir. Buna göre Türkiye’de elektrik üretiminin yaklaşık %32’si YEK’lerden karşılanmaktadır. Bu oran doğalgaz ve kömür kaynaklarına sahip bir ülke için gayet iyi olmakla beraber Türkiye’nin doğalgaz ve kömür kaynaklarının olmaması YEK’lerin elektrik üretimindeki payının henüz düşük olduğunu gösterir. Çünkü Türkiye elektrik enerjisi üretiminde YEK kullanım oranları açısından Dünya ortalamasının üzerinde dahi olsa dışa bağımlılık açısından %68’lik bir orana sahiptir.



Şekil 1.3. Türkiye’nin elektrik üretimindeki birincil enerji kaynaklarının dağılımı [5].

YEK’lerin kullanımı arttıkça bu kaynakların sahip olduğu birtakım dezavantajlar da masaya yatırılmaktadır. YEK’lerin enerji yoğunluğunun ( $J/m^2$ - $J/m^3$ ) fosil ve nükleer enerji kaynaklarına göre düşük oluşu, yatırım maliyetlerinin henüz rekabet aşamasının olmayışı, özellikle şebeke bağlantılı sistemlerde seviyelendirilmiş enerji maliyetlerinin fosil kaynaklardan daha yüksek olması, temiz enerji olduğu düşünüldüğü için rüzgar ve biyokütle enerji kaynaklarının çevre ve sosyal kaygı açısından suistimal edilmesi ve YEK’lerin kesikli enerji üretim yapısına sahip olması gibi bir takım dezavantajlara sahiptir [6].

YEK’ler bu birtakım dezavantajların üstesinden gelebilmek için hibrit şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Çünkü birden fazla YEK’in hibrit şekilde enerji kaynağı olarak kullanılması bu kaynakların dezavantajlarını azaltmakta hatta ortadan

kaldırmaktadır [7]. Hibrit sistemlerin kullanılması yaygınlaşmaya başladıkça bu sefer hibrit sistemlerdeki bir diğer soru işareti olan kaynak dağılım oranları yani sistemin boyutlandırılması söz konusu olmuştur. Hibrit sistemi oluşturan YEK'lerin hangilerinin hangi oranda kullanılacağını belirlemek için optimizasyon çalışmaları yapılmaya başlanmıştır. Bu optimizasyon çalışmalarında hibrit sistemin ekonomik ve güvenilir olması amaçlanmaktadır [8].

## 1.1.LİTERATÜR ÖZETİ

Optimizasyon çalışmalarında istenen durum hibrit sistem bileşenlerinin en uygun dağılım oranlarında elde edilmesidir. Buna boyutlandırma çalışması da denebilir. Optimizasyon çalışmalarında öncelikle bir amaç fonksiyonu belirlenir. Hibrit enerji kaynaklarının optimizasyonunda amaç fonksiyonu genellikle maliyetin en düşük yapıldığı denklemlerdir [9].

Maliyetin en düşük yapıldığı denklemleri elde etmek için bir takım maliyet gösterici kavramlar ortaya konmuştur. Toplam net bugünkü değer (TNBD) metodu hibrit sistemlerin ekonomik analizi için en çok kullanılan metotlardan bir tanesidir. TNBD'de hibrit sistemleri oluşturan bileşenlerin net bugünkü değerlerinin toplamı bulunur. Sistem bileşenlerinin ilk yatırım maliyeti, işletme ve bakım maliyetleri, yakıt maliyetleri ve hurda değerlerinin net bugünkü değerlerinin toplamı şeklinde ifade edilir [10].

Diğer bir ekonomik analiz metodu ise yıllık toplam maliyettir (YTM). YTM, TNBD'nin yıllık şeklini ifade etmektedir [11]. Hibrit sistemlerin ekonomik açıdan verimliliklerini değerlendirebilmek için sıkça kullanılan bir diğer yöntem ise seviyelendirilmiş enerji maliyetidir (SEM). SEM'de üretilen enerjinin kWh başına düşen maliyetini verir [10].

Hibrit sistemlerin optimizasyonunun yapılması esnasında genellikle maliyet fonksiyonları amaç fonksiyonu olarak seçilse de ortaya konulan sistemin güvenilir bir şekilde enerji talebini karşılaması da çok önemlidir. Bunun için bir takım güvenilirlik eşitlikleri ortaya konmuştur. Ofry ve Braunstein tarafından ortaya

konulan, ardından Abouzahr ve Ramakumar tarafından geliştirilen güç kaynağı kaybı olasılığı (GKKO) metodu ile hibrit sistemin ne kadar güvenli bir şekilde talebi karşılayacağı ortaya konmuştur [12, 13].

Hibrit sistemin güvenilirliğini ortaya koyabilmek için kullanılan metotlardan enerji beklenti kaybı [14] ve güvenilirliğin enerji indeksi [15-17]'de sıkça kullanılmaktadır.

Birtakım ekonomik ve güvenilirlik endekslerine göre yapılan çalışmalarda farklı YEK'ler hibrit olarak kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda enerji ihtiyacını karşılamak için güneş, rüzgar ve batarya sistemlerinin ağırlıklı olarak optimize edildiği görülmektedir.

Askarzadeh yaptığı çalışmada FV güneş paneli, rüzgar türbini ve bataryadan oluşan bir hibrit sistemin en düşük maliyetle elde edilmesini öngören boyut optimizasyonu yapmıştır. Çalışmasını gerçekleştirmek için harmoni arama, kaotik arama ve ısıl işlem algoritmasını kullanarak hibrit bir algoritma elde etmiştir. Buna da “ısıl işlem tabanlı ayırık kaotik harmoni arama (İİTAKHA)” adını vermiştir. “Ayrık ısıl işlem”, “ısıl işlem tabanlı ayırık harmoni arama” ve “ısıl işlem tabanlı ayırık kaotik harmoni arama” metotlarını karşılaştırmıştır. Sonuç olarak en iyi verimi İİTAKHA algoritması ile almıştır [18].

Rajkumar ve arkadaşları “adaptif sinir ağına dayalı bulanık çıkarım sistemi” ile FV güneş paneli, rüzgar türbini ve bataryadan oluşan hibrit sistemin optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra aynı sistemi optimize edebilmek için HOMER ve HOGA hazır programlarını kullanmışlardır. HOMER VE HOGA hazır programlar rüzgar türbininin boyutunu yüksek; güneş paneli sayısı ve batarya gücünü düşük tutarken denedikleri yöntem tam tersi şekilde sonuçlar vermiştir. Sistemin boyutlandırılması esnasında güvenilirlik analizini maliyetin önünde tutmuşlardır. Bu yüzden gereğinden yaklaşık %10 daha fazla güç ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak üç farklı çalışmanın sonuçlarını karşılaştırdıklarında “adaptif sinir ağına dayalı bulanık çıkarım sistemi”ne dayalı optimizasyonun sonuçlarının gerçeğe daha yakın ve doğruluk oranının daha yüksek olduğunu görmüşlerdir [19].

FV güneş paneli, rüzgar türbini ve bataryaya ek olarak bazı çalışmalarda mikro türbin hibrit sisteme dahil edilmiştir. Kalantar ve Mousavi genetik algoritmayı FV güneş paneli, rüzgar türbini, mikro türbin, ve batarya sisteminden oluşan şebekeden bağımsız hibrit sistemin boyutlandırılması ve en düşük maliyetle elde etmek için kullanmışlardır. Yük talebini anlık karşılamak için yeni bir kontrol algoritması tasarlamışlardır [20].

Yakıt pilinin de hibrit sisteme dahil edildiği çalışmalar mevcuttur. Yakıt pili kullanılarak sistemin kararlılığının artırılması istenmiştir. Torreglosa ve arkadaşları şebekeden bağımsız yenilenebilir hibrit enerji sisteminin tekno-ekonomik analizlere dayalı kontrol sistemini çalışmışlardır. Hibrit sistem FV güneş paneli, rüzgar türbini, batarya grubu ve hidrojen enerjisi depolama/yakma sisteminden oluşmaktadır. Çalışmada kontrol ve boyutlandırma beraber yapılmıştır. Boyutlandırma için lineer programlama kullanılmış ve kontrol için de PI kullanılmıştır [21].

Erdoğan ve arkadaşları FV güneş paneli, rüzgar türbini, batarya grubu ve hidrojen tankından oluşan hibrit sistemin kural tabanlı bulanık kontrolör ile kontrol etmişlerdir. Farklı hava koşullarında farklı yüklerde bazı durumların kontrolünü yapmışlardır [22].

Enerji depolamanın problemleri bir konu olmasından dolayı alternatif enerji depolayıcılar da hibrit sistemde kullanılmaya başlanmıştır. Süper kapasitör son yıllarda sıkça kullanılan alternatif bir enerji depolayıcı olarak göze çarpmaktadır. Zhou ve Sun yaptıkları çalışmada FV güneş paneli, rüzgar türbini, batarya ve süper kapasitörden oluşan hibrit sistemin boyutlandırılması ve yatırım ile bakım maliyetlerinin en aza çekilmesini sağlamışlardır. Parçacık sürü optimizasyonu ile ısı işleme algoritmasını birleştirerek yeni bir çözüm algoritması elde etmişlerdir. Elde ettikleri yeni algoritmanın çözüme daha düşük işlem süresinde ve daha doğru sonuçlarla ulaştığını görmüşlerdir [23].

Dizel jeneratörler eskiden beri kullanılan fosil yakıtlı enerji üreteçleri olarak bilinmektedir. YEK'lerin dezavantajlarını ortadan kaldırmak adına son yıllarda dizel jeneratörler de sıklıkla kullanılmaktadır. Bianchini ve arkadaşları şebekenin olmadığı



yerlerde sadece dizel jeneratörü kullanmak yerine FV güneş paneli ve rüzgar türbini ile desteklenmiş bir dizel jeneratör kullanmayı düşünüp bu sistemin optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Sistem klasik bir dizel motor yapısına uygun olarak uzun vadeli bir süreçte tasarruf edilmesine yönelik optimize edilmiştir. Sistemde dizel jeneratöre olan yüklenmeyi azaltmak, jeneratör boyutlarını aşağı çekmek ve güvenilirliği artırmak için batarya sistemi de eklenmiştir [24].

Ghazvini ve arkadaşları FV güneş paneli, rüzgar türbini, dizel jeneratör ve bataryadan oluşan hibrit bir sistemin optimizasyonunu gerçekleştirmek için Parçacık sürü optimizasyonu (PSO), Pasif toplamalı parçacık sürü optimizasyon (PTPSO) yöntemlerini ve HOMER yazılımını kullanmışlardır. Amaç fonksiyonu olarak net bugünkü değer mali analizini kullanmışlardır, kısıtlama fonksiyonlarını oluşturmak için de enerji beklenti kaybı yönteminden yararlanmışlardır. Yazarlara göre daha önceden hibrit sistemin boyutlandırması ve işletme stratejisi ayrı ayrı çalışılırken bu çalışmalarında ilk defa birlikte çalışılmıştır. En iyi sonuçları veren yöntem PTPSO çıkmıştır [14].

Son yıllarda yapılan çalışmalarda biyokütle enerjisinin de hibrit sisteme dahil edildiği görülmüştür. Biyokütle enerjisinden biyogaz elde edilerek biyogaz jeneratörleri vasıtasıyla elektrik üretim aracına dönüştürülmesi ve hibrit sistemlere dahil edilmesi, biyogaz jeneratörlerinin dizel jeneratörlere benzerliğinden kaynaklanmaktadır [25].

Tanim ve arkadaşları Bangladeş'in kırsal kesimleri için FV güneş paneli ve biyokütle tabanlı hibrit sistemi HOMER yazılımını kullanarak optimize etmişlerdir. Şebeke bağlantılı ve şebekeden bağımsız her iki durumun da düşünüldüğü sistemde yapılan optimizasyon çalışması sonrasında güvenilir, üstün ve maliyeti düşük bir sistem elde edilmiştir [26].

Bhattacharjee ve Dey yaptığı çalışmada Hindistan-Tripura'daki çeltik işletmelerinin elektriğini sağlamak adına pirinç kabuklarının değerlendirilmesini düşünmüşlerdir. FV güneş paneli ve biyogaz tabanlı hibrit sistemin kullanıldığı tekno-ekonomik analizde HOMER kullanılmıştır [27].

Ho ve arkadaşları Malezya’da “Smart Eco-Village” adını verdikleri, enerjisini FV güneş paneli ve biyokütlenin hibrit oluşumundan karşılayacakları bir şehir düşünmüşlerdir. Üretilen enerjinin depolanması için 3 farklı batarya teknolojisini göz önünde bulundurarak boyut optimizasyonu yapmışlardır. Bu işlemi yaparken “birleşik tamsayı-lineer programlama” modeli geliştirmişlerdir. Sonuç olarak en uygun bileşen dağılımını ve batarya grubunu belirlemişlerdir [28].

Eziyi ve Krothapalli kırsal kesimlerde kullanılmak üzere düşündükleri hibrit sistemde FV güneş paneli, batarya ve biyokütle jeneratörü kullanmışlardır. HOMER yazılımını kullanarak yaptıkları çalışmada petrol ve dizel yakıt kullandıkları elektrik üretiminden ziyade hibrit sistemde %30 daha ucuza elektrik üretmişlerdir [29].

Sigarchian ve arkadaşları Kenya’da bir şehir için düşündükleri çalışmada FV güneş paneli, rüzgar türbini ve biyogaz jeneratöründen oluşan bir hibrit sistemin HOMER programı ile net bugünkü değer mali analizini ve seviyelendirilmiş enerji maliyetini değerlendirmişlerdir. Bu hibrit sistemi aynı zamanda sadece dizel jeneratörün kullanıldığı bir sistemle de karşılaştırmışlardır [30].

Heydari ve Askarzadeh’in yaptığı çalışmada FV güneş paneli ve biyokütle yakıtlı biyogaz jeneratöründen oluşan hibrit bir sistemin net bugünkü değer mali analizine, seviyelendirilmiş enerji maliyetine ve güç kaynağı kaybı olasılığına göre optimizasyonunu yapmışlardır. Çalışmada sezgisel yöntemlerden harmoni arama kullanılmış olup hibrit sistemin sadece FV ya da sadece biyogaz olarak kullanılmasından daha uygun maliyetli olduğu ortaya konmuştur. Şebekeden bağımsız bölgelerde güvenilir ve düşük maliyetli bir sistem olarak kullanılabileceğini savunmuşlardır [31].

Suganthi ve arkadaşlarının yazmış olduğu derleme makalede; son yıllarda optimizasyon işlemlerinin sıklıkla yapıldığını bunların ekseriyetle güneş ve rüzgar enerji sistemlerini kapsadığını belirtmektedir. Ayrıca güneş ve rüzgarın yanında biyoenerji içeren çalışmalara başlanmasına rağmen biyoenerji ile ilgili hala büyük bir boşluk olduğunu söylemişlerdir [32].

## 1.2. ÇALIŞMANIN AMACI

Hibrit enerji sistemlerinin optimizasyon çalışmalarının artması şebekeden bağımsız karmaşık sistemlerin boyutlandırılmasını kolaylaştırmıştır. Böylece mevcut potansiyellerin değerlendirilmesi sonucunda bir tüketim noktasının enerji ihtiyacı karşılanırken en düşük maliyetle tesis kurulması söz konusu olmaktadır.

Sadece şebekeden bağımsız sistemlerde değil şebekeye bağlı sistemlerde de bir optimizasyon çalışması yapılabilir. Burada şebeke, güvenilirliği artırma adına sistemi desteklemiş olur. Ancak bu şekilde kurgulanmış bir çalışmada şebekeden çekilen enerjinin bedeli, hibrit sistemin ürettiği enerjinin birim maliyetinden düşük olacağı için optimizasyon sonucu her zaman şebekenin lehine çıkacaktır. Ancak şebeke elektriğinin pahalı olduğu, maliyetin önemli olmadığı, “yeşil bina” statüsünde düşünüldüğü durumlarda şebeke bağlantılı hibrit sistemin kullanımı makul olabilir.

Bizim çalışmamızda üniversite kampüsündeki bir fakülte binasının tamamen şebekeden bağımsız, enerjisini kendi üreten bina statüsünde düşünülerek FV güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve biyogaz hibrit enerji sisteminden elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanması amaçlanmıştır. Böylece güneş ve rüzgar enerjisi gibi dünyada en çok tercih edilen hibrit sistemin dezavantajlarını yok etmek adına dizel jeneratör gibi çalışabilen biyogaz jeneratörü ile desteklenmiş ve sistemin elektrik enerjisi arz güvenilirliği artırılmıştır.

Ayrıca çalışmada bu hibrit sistemin optimum boyutlandırılması esnasında TNBD ekonomik analiz yöntemi, amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Yani optimum boyutlandırma yapılırken hibrit sistemin maliyeti en düşük yapılması gerekmektedir. Böylece kurulum maliyeti, işletme ve bakım maliyeti, yakıt maliyeti ve hurda değerinin göz önünde bulundurularak elde edilen net bugünkü değerlerin toplamı en aza çekilerek en uygun boyut elde edilmiş olacaktır.

Çalışma sonunda hibrit sistemin kurulumu açısından bize daha iyi bilgi vermesi açısından SEM’e göre sonuçlar elde edilerek karşılaştırma yapılmıştır. Böylece tüketim için sağlanan enerjinin birim maliyetleri (\$/kWh) ortaya konmuştur. SEM

sonuçları hem sistemin analizi için hem de çözümleme için kullanılan iki farklı meta-sezgisel algoritmanın problem çözme verimliliklerini karşılaştırmak için önem arz etmektedir.

Çalışma esnasında maliyet kadar üretilen enerjinin ihtiyacı karşılaması açısından düşünölen güvenilirlik de göz önünde bulundurulmuştur. Çünkü kurulan bir enerji üretim tesisinin ürettiği elektrik enerjisi tüketimin çok altında ya da çok üzerinde kalırsa bu yapılan yatırımın da boşa gitmesi anlamına gelmektedir. GKKO etkili bir güvenilirlik belirleme analizi olduğu için çalışmamızda kullanılmıştır. Böylece üretilen enerjinin tüketimi karşılayıp karşılamaması durumuna göre hibrit sistemin boyutları belirlenmiştir.

Çalışmada optimizasyon için genetik algoritma ve ısıl işlem algoritması kullanılmış ve sonuçlar farklı GKKO değerleri, farklı yatırım maliyetleri ve farklı faiz oranları açısından karşılaştırılmıştır.

## BÖLÜM 2

### TÜRKİYE’İN GÜNEŞ ENERJİSİ, RÜZGAR ENERJİSİ VE BİYOGAZ POTANSİYELİ

YEK fosil ya da nükleer yakıttan türetilmeyen, güneş, rüzgar, biyokütle, hidrolik, dalga ve gel-git enerjisinden elde edilen ve kullanıldığında tükenmeyen enerji kaynağıdır [33]. Enerjiye olan ihtiyacın artması, fosil yakıtların azalması ve teknolojinin gelişerek kurulum maliyetlerini düşürmesinden dolayı YEK’e olan yönelim giderek artmaktadır. Fosil tabanlı geleneksel enerji kaynakları ülkelere eşit olarak dağılmamıştır ancak YEK neredeyse tüm ülkelerde farklı şekillerde mevcuttur. Bu durum, enerjide dışa bağımlı olarak yaşayan ülkelerin dışa bağımlılığını azaltması açısından avantaj sağlamaktadır. Ekim 2017 itibari ile 82312.4 MW olan kurulu gücün yaklaşık %45’i YEK’e dayalı olan ülkemizde elektrik üretiminde ise YEK’in payı %30’lar seviyesindedir [34]. YEK açısından üretilen enerji oranının kurulu güç oranından düşük olması YEK’lerin en büyük dezavantajı olarak görülen süreksizliklerinden ve belirsizliklerinden kaynaklanmaktadır. Diğer nedenleri ise teknolojiye bağlı olarak henüz her birinden en yüksek verimlerin elde edilemiyor olmasıdır. Türkiye’de yine Ekim 2017 itibari ile YEK içinden barajlı hidrolikten elektrik üretimi kurulu güçte %24.77, elektrik üretiminde ise %14.9 olarak en yüksek paya sahiptir [35]. Barajlı hidroliğin ardından akarsu hidrolik, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji, güneş enerjisi ve biyokütle enerjisi gelmektedir. YEK’lerin genel olarak potansiyelleri göz önünde bulundurulduğunda henüz kullanımları çok düşük seviyelerde denebilir.

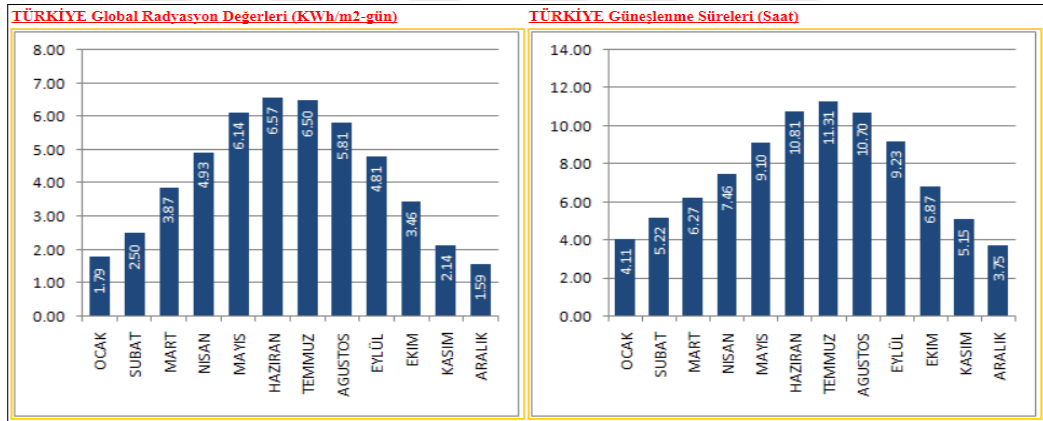
#### 2.1. GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ

Güneş enerjisi kaynağına sonsuz bir enerji kaynağı gözüyle bakılabilir. Yer yüzüne bir yılda düşen güneş enerjisi miktarı şimdiye kadar belirlenmiş fosil yakıt haznelerinin yaklaşık 160 katı; fosil, nükleer ve hidroelektrik santrallerin bir yıllık

üreteceği enerjinin yaklaşık 15000 katı kadardır. Asıl problem bunların kullanılabilir enerji şekline dönüştürülmesindedir [36, 37].

Güneş enerjisi potansiyeli açısından Türkiye dünya üzerinde verimli enerji üretebilecek ülkeler arasındadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası'na (GEPA) göre Türkiye'de güneşlenme süresi yıllık 2737 saat ve güneşlenme miktarı 1527 kWh/m<sup>2</sup>'dir. Günlük olarak düşünüldüğünde 4.2 kWh/m<sup>2</sup> olan güneş enerjisi ortalaması değerlendirildiği takdirde ülkemiz için önemli bir enerji kaynağı olacaktır [38].

Şekil 2.1'den de görüldüğü gibi güneşlenme süresi aralık ayında en az iken temmuz ayında en yüksek seviyeye ulaşmaktadır. Metrekareye düşen enerji miktarı açısından değerlendirildiğinde ise aralık ayında en az enerji elde edilirken haziran ayında en fazla enerji elde edilmektedir.



Şekil 2.1. Türkiye'nin aylara göre yıllık güneşlenme miktarı ve saatleri [39].

Türkiye'de 2016 yılı sonu itibari ile güneş enerjisinden elektrik üretimi için santrallerin kurulu gücü 819.6 MW lisanssız, 12.9 MW lisanslı olmak üzere toplam 832.5 MW'tır [40]. Türkiye potansiyeli değerlendirme açısından Almanya'nın gerisinde kalmıştır. Öyle ki Almanya'nın yıllık güneşlenme süresi 1600 saat olmasına karşın 2017 yılı sonu itibari ile kurulu gücü 43 GW civarındadır [41].

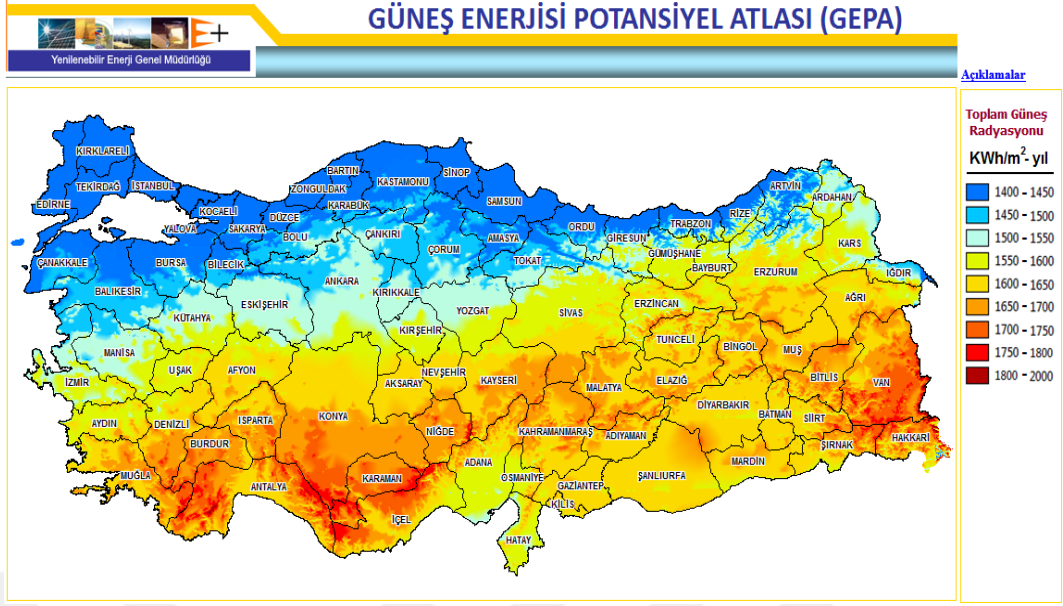
Yakıt ücreti probleminin olmaması, hareketli yapıya sahip olmaması, işletme kolaylığı, modüler yapıya sahip olması, kırılmadığı sürece 40-50 yıldan fazla enerji üretebilme özelliği, zararlı gaz emisyonlarının olmaması ve kısa sürede kurulabilmesi gibi avantajlarından dolayı Fotovoltaik güneş enerjisi kullanımı Türkiye ve Dünya’da hızla artmaktadır [42].

Çizelge 2.1’de güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı gösterilmiştir. Buna göre en yüksek potansiyelin Güneydoğu Anadolu ve Akdeniz bölgesinde olduğu görülmektedir. Karadeniz bölgesi ve Marmara bölgesi en az güneş enerjisi düşen bölgelerimizdir. Fakat az enerji dahi düşse verimli bir elektrik enerjisi üretimi mümkündür.

Çizelge 2.1. Bölgelere göre Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyeli [43].

Bölge	Toplam Ortalama Güneş Enerjisi (kWh/m <sup>2</sup> -yıl)	En çok güneş enerjisi (Haziran) (kWh/m <sup>2</sup> )	En az güneş enerjisi (Aralık) (kWh/m <sup>2</sup> )	Ortalama güneşlenme süresi (saat/yıl)
Güneydoğu Anadolu	1460	1980	729	2993
Akdeniz	1390	1869	476	2956
Doğu Anadolu	1365	1863	431	2664
İç Anadolu	1314	1855	412	2628
Ege	1304	1723	420	2738
Marmara	1168	1529	345	2409
Karadeniz	1120	1315	409	1971

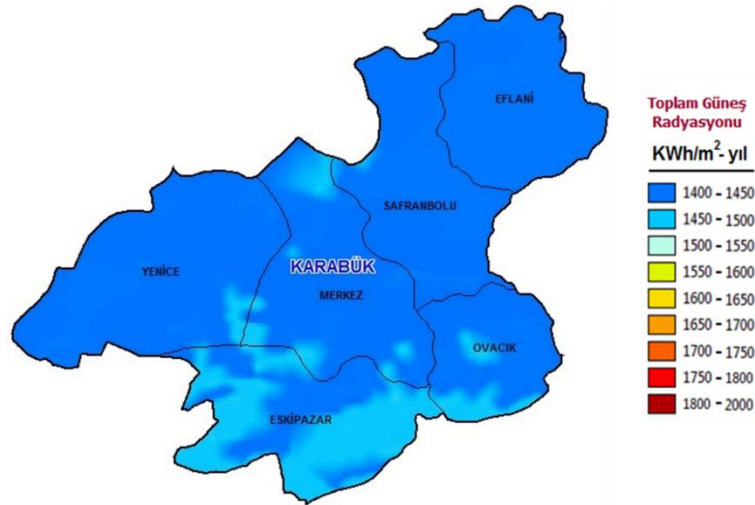
Şekil 2.2’de Türkiye’nin güneşlenme haritası görülmektedir. Koyu maviden koyu kırmızı renge doğru gidildikçe metrekareye düşen güneş enerjisi miktarı artmaktadır. Buna göre ülkemizin güneyi en fazla güneş enerjisi alan bölgemiz iken kuzeye doğru çikıldıkça düşen güneş enerjisi miktarı azalmaktadır.



Şekil 2.2. Türkiye'nin güneşlenme haritası [39].

### 2.1.1. Karabük Güneş Enerjisi Potansiyeli

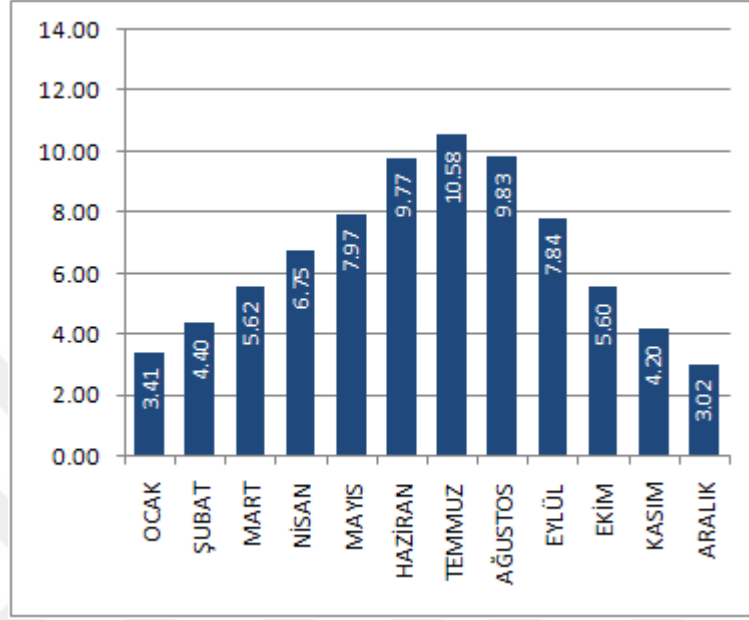
Karabük ili Karadeniz Bölgesi'nin batısında olup güneş enerjisi potansiyeli açısından güneydeki illerden daha düşük profile sahiptir. Şekil 2.3, Karabük'ün güneş enerjisi potansiyelini göstermektedir. Karabük'ün kuzeyi koyu mavi renkle gösterilmiş olup şeklin sağ tarafındaki açıklamadan da anlaşıldığı gibi yıllık 1400-1450 kWh/m<sup>2</sup>'lik bir güneş enerjisi ışımaya sahipken güney kısımlarında bu miktar yıllık 1450-1500 kWh/m<sup>2</sup>'yi bulmaktadır [44].



Şekil 2.3. Karabük güneş enerjisi potansiyeli [44].



Şekil 2.4, Karabük'ün yıl içerisinde güneşlenme sürelerini göstermektedir. Buna göre en düşük güneşlenme süresi 3.02 saat ile aralık ayı iken en yüksek güneşlenme süresi 10.58 saat ile temmuz ayıdır [44].



Şekil 2.4. Aylara göre Karabük ili güneşlenme süreleri [44].

## 2.2. RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ

Rüzgar, güneş enerjisinin yer yüzünün farklı noktalarını farklı miktarda ısıtmasıyla oluşur. Yeryüzündeki alanlar arasındaki sıcaklık farkı, havanın nemi ve basıncını da değiştirir. Hava basıncının değişmesiyle hava harekete başlar ve rüzgarlar oluşur. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin yaklaşık %2'si kadarı rüzgar enerjisine çevrilir [45].

Rüzgar da diğer YEK'ler gibi dünyadaki tüm ülkelerde az ya da çok oluşmaktadır. Böylece fosil tabanlı enerji kaynakları açısından fakir olan bir ülke rüzgar açısından çok zengin olabilmektedir.

Türkiye rüzgar enerjisi potansiyeli açısından zengin bir ülkedir. Türkiye'de rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenebilmesi için Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı bünyesinde hizmet veren Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün yaptığı

çalışmalar vardır. Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA) orta ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro ölçekli rüzgar akış modeli kullanılarak rüzgar hızı tahminleri yapmaktadır. Buna göre rüzgar hızı, rüzgar güç yoğunlukları ve kapasite faktörlerini belirleyebilmektedir. Çizelge 2.2’de, 50 metre yükseklikte rüzgar hızlarına göre enerji üretim kapasiteleri verilmiştir. Çizelge’den de anlaşıldığı gibi Türkiye’de 47849 MW’lık bir kapasite bulunmaktadır. Bu da Türkiye’nin kurulu gücünün yaklaşık yarısına yakın bir değere tekabül etmektedir. Türkiye’de elektrik üretim santrali kurulu gücünün 82312.4 MW olduğu düşünülürse rüzgar enerjisinden tam olarak faydalandığı takdirde kurulu güç ihtiyacının %58’i karşılanmış olacaktır [46].

Çizelge 2.2. 50 m’deki rüzgar hızına göre Türkiye rüzgar enerjisi potansiyeli [46].

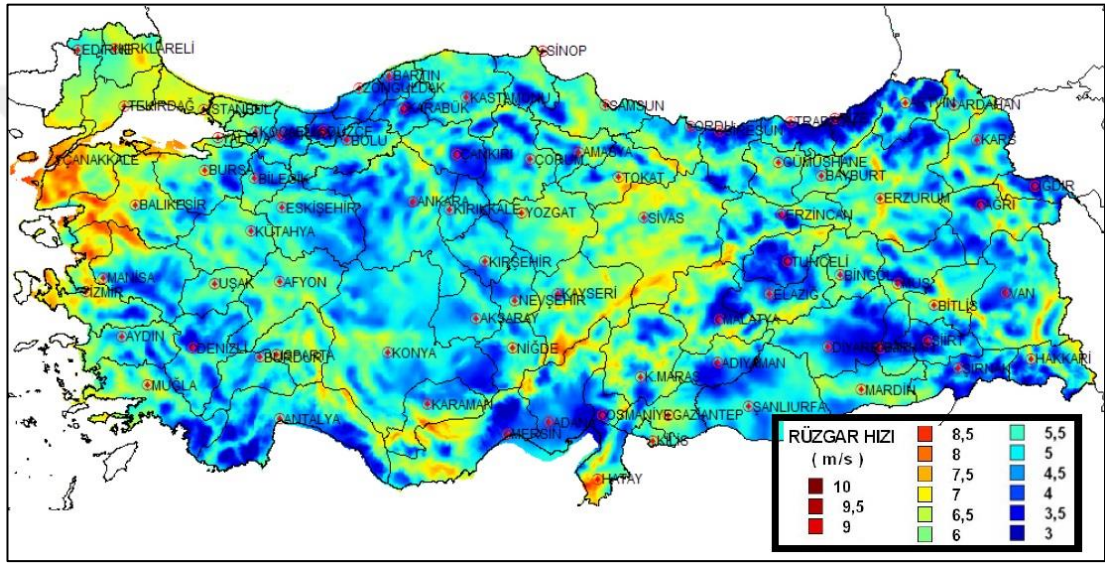
<b>Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı-50m (m/s)</b>	<b>Güç Yoğunluğu-50 m (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Kapasite (MW)</b>
7.0-7.5	400-500	29259,36
7.5-8.0	500-600	12994,32
8.0-9.0	600-800	5399,92
>9.0	>800	195,84
<b>Toplam</b>		<b>47849</b>

Çizelge 2.3’te ise yine 50 metre yükseklik için enerji üretim kapasitesi verilmiştir. Deniz üstü alanlarda rüzgar enerjisinden elektrik üretimi daha verimli gerçekleşmektedir. Çünkü karasal bölgelerde yer yüzeyinden kaynaklanan hava dalgalanmaları rüzgarın hızını kesmekte ve rüzgarı düzensiz forma sokmaktadır. Deniz üstü alanlarda rüzgar enerjisi yatırımı daha fazla enerji üretimini beraberinde getirir de bir takım teknolojik gereklilikler, tuzlu suyun zarar vermesi ve yatırım maliyetlerinin karadaki rüzgar türbinlerine göre daha yüksek olması deniz üstü alanlardaki rüzgar türbini yatırımlarını yavaşlatmaktadır [45].

Çizelge 2.3. 50 m'deki alanlar bazında Türkiye rüzgar enerjisi potansiyeli.

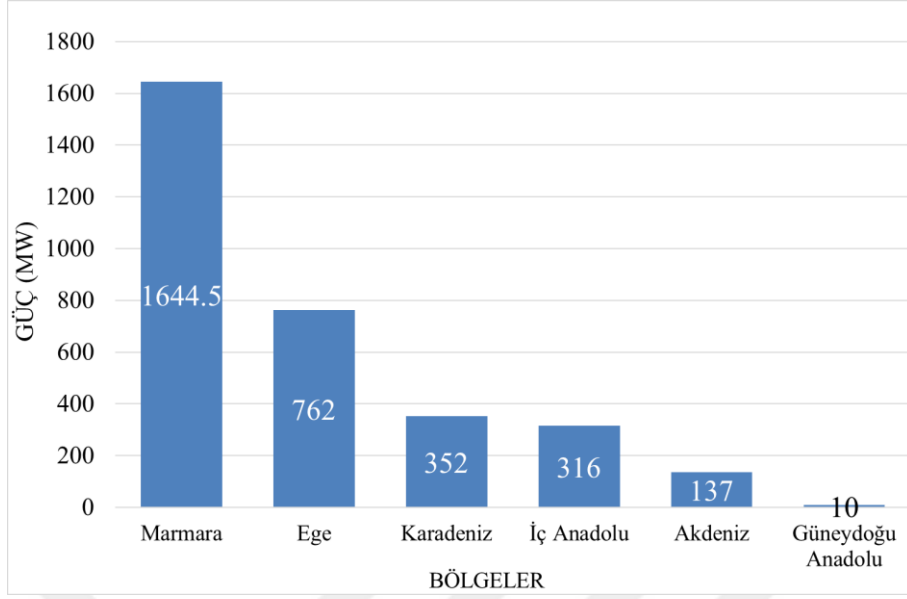
Karasal Alanlar (MW)	Deniz Üstü Alanlar (MW)
37836	10013

Şekil 2.5'te Türkiye'nin illere göre rüzgar hızları görülmektedir. Türkiye'nin Batısı ve İç Anadolu'nun Doğusu ile Hatay'da rüzgar hızlarının yüksek olduğu görülmektedir.



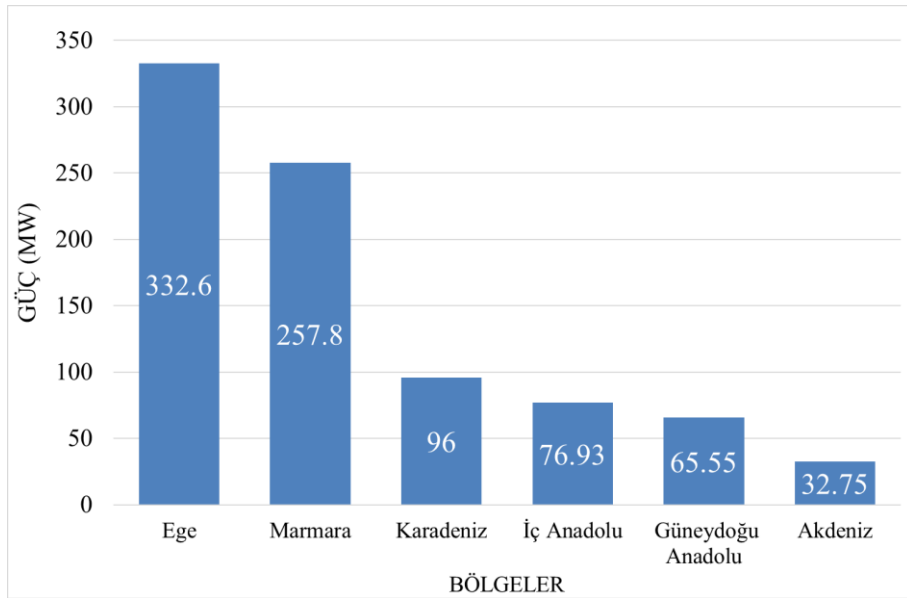
Şekil 2.5. Türkiye'nin illere göre, 50 metre yükseklikteki rüzgar hızı haritası [47].

Ülkemizde rüzgar enerjisi potansiyeli güneş enerjisine göre nispeten daha iyi değerlendirilmektedir [48]. Şekil 2.6 Lisanslı RES'lerin bölgelere göre dağılımını göstermektedir. Şekilden, Marmara bölgesinin rüzgar enerjisi potansiyelinin yüksek olmasının, lisanslı RES'lerin tercihini etkilediği anlaşılmaktadır.



Şekil 2.6. Lisanslı RES'lerin bölgelere göre dağılımı [49].

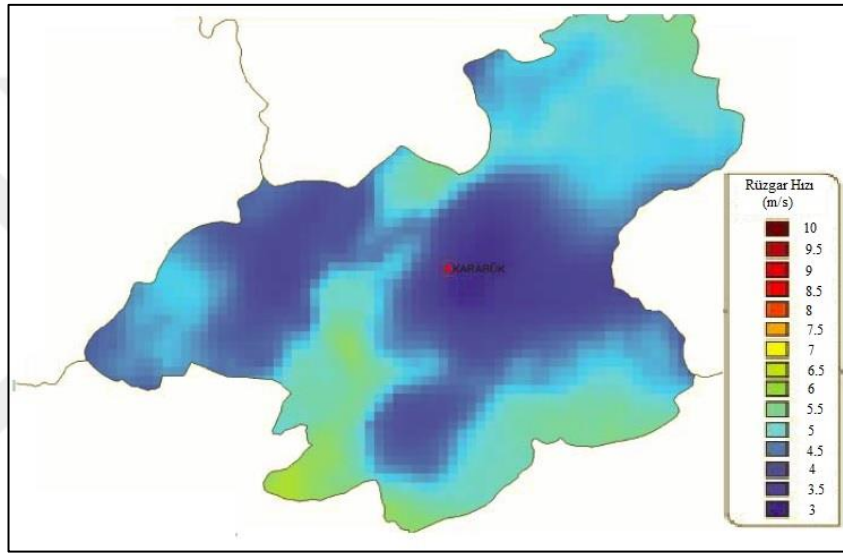
Şekil 2.7 Türkiye'de inşa halindeki RES'lerin bölgelere göre dağılımını göstermektedir. Rüzgar potansiyelinin en yüksek olduğu iki bölgemiz olan Ege ve Marmara bölgeleri RES yatırımlarını en fazla çeken bölgeler arasındadır.



Şekil 2.7. İnşa halindeki RES'lerin bölgelere göre dağılımı [49].

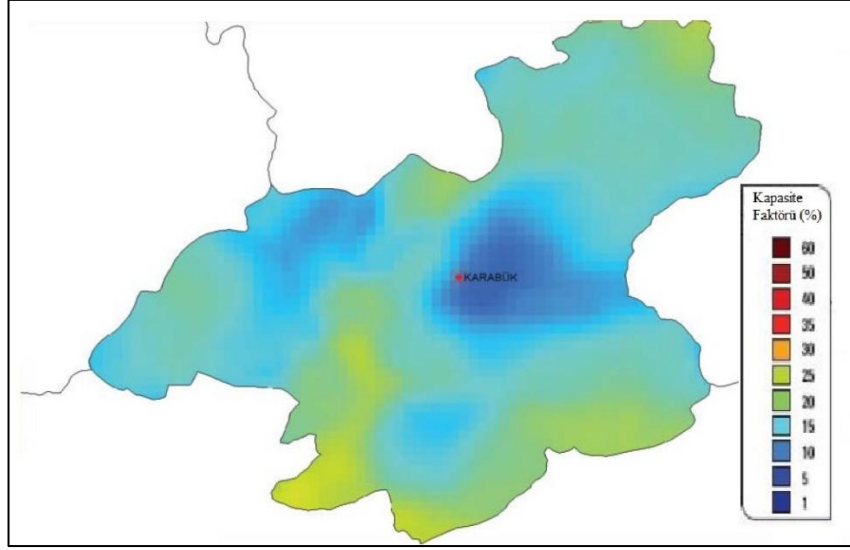
### 2.2.1. Karabük Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nden alınan ve Şekil 2.8'de gösterilen rüzgar potansiyeli haritasında Karabük merkezdeki rüzgar hızı yaklaşık 3-4 m/s olarak görülmektedir. Ancak güneye inildikçe bu hız 6-6.5 m/s'lere çıkmaktadır [50]. Verimli bir rüzgar enerjisi santrali yatırımı için beklenen rüzgar hızları 6 m/s ve üzeri olduğu için Karabük'ün güney kısımları rüzgar enerjisi santralleri için merkezden daha uygun olarak görülmektedir.



Şekil 2.8. Karabük rüzgar enerjisi potansiyeli.

Şekil 2.9'da Karabük ili için kapasite faktörü gösterilmektedir. Karabük merkez için kapasite faktörü %1-10 arasında iken güney ilçelerde bu oran %25'lerde seyretmektedir. Ekonomik bir rüzgar enerjisi santrali için kapasite faktörünün %35'ler ve üzerinde olması tavsiye edilmektedir [50].



Şekil 2.9. Karabük rüzgar enerjisi potansiyeli.

### 2.3. BİYOGAZ POTANSİYELİ

Biyokütle yaşayan ya da yakın zamanda yaşamını kaybetmiş fakat fosilleşmemiş tüm biyolojik malzemeyi ifade eder. Biyokütle içerisindeki organik maddelerden ısı ve elektrik gibi enerjiler elde edilebilir [51].

Biyokütlenin anaerobik fermantasyonu sonucunda ortaya çıkan gazlara biyogaz denir [52]. Biyogaz üretimi için bitkisel veya hayvansal organik madde gereklidir. Büyükbaş, küçükbaş, tavuk gibi hayvanların atıkları ve her türlü bitkinin kendisi ya da atıkları biyogaz üretimi için kullanılabilir [53].

Biyogaz potansiyelinin araştırılabilmesi için atık miktarından yola çıkmak gerekmektedir. Çünkü atık miktarından yaklaşık olarak ne kadar biyogaz üretileceği ile ilgili literatürde oldukça çalışma vardır. Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı illerden topladığı hayvansal verileri Türkiye istatistik kurumuna (TÜİK) bildirir ve TÜİK Türkiye'deki hayvansal verileri yayımlamakla sorumludur. Ne kadar dikkat edilirse edilsin hayvan sayılarının belirlenmesinde net sayıyı ortaya koymak bir hayli zordur. Bazı çiftçiler hayvanlar için aldıkları desteklerin kesilmemesi için sattıkları ya da kestikleri hayvanları bakanlığa bildirmemektedir. Bu yüzden sayısal veriler, gerçek verilerin üzerindedir [54].

Biyogaz potansiyeli değerlendirilirken biyogaz için hammadde olabilecek organik maddeler farklı başlıklar altında kategorize edilmiştir. Biyogaz üretiminde hayvan dışıklarının yanında tarımsal ürünler de kullanılmaktadır. Türkiye'nin yüzey alanı 78 milyon hektar civarındadır. Toplam tarım arazilerinin miktarı 24.4 milyon hektardır ve bunun 4.25 milyon hektarını nadas alanları oluşturmaktadır. Nadas alanlarının üzerinde yetişmesi için verimli toprak ihtiyacı duyulmayan çimen gibi bitkiler ekilerek toprak mahsullerinden biyogaz elde edilmesi mümkündür [55].

Arpa, buğday, pamuk, pirinç, gibi tarımsal ürünlerin atıkları tarımsal atıklar olarak adlandırılmaktadır. Bu ürünlerin sapları biyokütle enerjisi açısından değerlendirilip biyogaz elde edilebilir [53].

Zeytin, şeker pancarı, meyve suyu üretimi, et ve süt üretilen yerlerdeki atıklar tarım-sanayi atıkları olarak adlandırılmaktadır. Bu atıklar hali hazırda bertaraf edilmesi gereken atıklardır. Bu yüzden biyogaz elde etmek amacıyla kullanılmaları çevreci bir davranış olacaktır [54].

Çizelge 2.4'te biyogaz potansiyelinin sektörlere göre dağılımı gösterilmektedir. Buradaki teorik potansiyel Türkiye'deki tüm biyokütleden elde edilmesi muhtemel biyogaz miktarı anlamına gelmektedir. Teknik potansiyel ise teorik potansiyel içerisindeki teknik açıdan değerlendirilmesi mümkün olan biyogaz potansiyelini göstermektedir. Buna göre çizelgede en fazla payı enerji bitkileri almaktadır. Enerji bitkileri atıl olarak duran ve nadasa ayrılan tarım topraklarının değerlendirilmesi suretiyle üretilen enerjiyi göstermektedir. Türkiye'nin toplam teknik potansiyeli ise 221.5 PJ/yıl olarak gösterilmiştir. Bu enerji aynı zamanda 61.528 TWh'lik enerjiye karşılık gelmektedir.

Çizelge 2.4. Biyogaz potansiyelinin sektörlere göre dağılımı [54].

<b>Sektör</b>	<b>Teorik Biyogaz Potansiyeli (PJ/yıl)</b>	<b>Teknik Biyogaz Potansiyeli (PJ/yıl)</b>
Tarım Hayvancılık	144.4	78.4
Tarımsal artıklar	305.3	36.1

Enerji Bitkileri	325.1	81.3
Tarım-Sanayi artıkları	16.6	14.8
Belediye atıkları	22.0	11.0
Toplam	813.4	221.5

Çizelge 2.5'te illere göre kanatlı ve sığır gübresinin teknik biyogaz potansiyeli ve toplam biyogaz potansiyeli içindeki oranı gösterilmiştir. Buna göre Ege bölgesinde daha fazla biyogaz potansiyeli olduğu gözlenmektedir.

Çizelge 2.5. Şehirlere göre kanatlı hayvan ve sığır gübresinin biyogaz potansiyeli [54].

Sıra	Şehir Adı	Teknik Biyogaz Potansiyeli (TJ/yıl)	Toplam Biyogaz Potansiyeli İçindeki Oranı (%)
1	Bolu	5899	7.5
2	Balıkesir	5674	7.2
3	Sakarya	5373	6.9
4	İzmir	4171	5.3
5	Manisa	4034	5.1
6	Konya	3228	4.1
7	Afyon	2387	3.0
8	Adana	2119	2.7
9	Ankara	2110	2.7
10	Aydın	1792	2.3

Çizelge 2.6'da illere göre tarımsal teknik biyogaz potansiyeli ve toplam biyogaz potansiyeli içindeki oranı gösterilmiştir. Buna göre yüzölçümü büyük olan İç Anadolu illeri potansiyel açısından ön sıralarda görülmektedir.



Çizelge 2.6. İllere göre tarımsal biyogaz potansiyeli [54].

Sıra	Şehir Adı	Teknik Biyogaz Potansiyeli (TJ/yıl)	Toplam Biyogaz Potansiyeli İçindeki Oranı (%)
1	Konya	21985	11.2
2	Sivas	11706	6.0
3	Ankara	9706	5.0
4	Yozgat	6941	3.5
5	Balıkesir	6437	3.3
6	Bolu	6355	3.2
7	Kayseri	6134	3.1
8	Çorum	5906	3.0
9	Sakarya	5814	3.0
10	Şanlıurfa	5010	2.6

Türkiye, sadece hayvan atıkları ile çalışabilecek, 2.000 adet biyogaz tesisi kapasitesine sahiptir. Ülkemizde 81 il olduğu düşünüldüğünde ve illerin nüfus ve toprak büyüklüğü göz ardı edildiğinde her ilde yaklaşık 25 adet biyogaz tesisi olması gerektiği ortaya çıkmaktadır [56].

### 2.3.1. Karabük Biyogaz Potansiyeli

Biyogaz potansiyeli açısından Karabük ili değerlendirildiğinde öncelikle hayvancılık ve tarım artıklarından elde edilmesi muhtemel biyogaz potansiyeli dikkat çekmektedir. 2015 yılı TÜİK verilerine göre hayvan gübreleri göz önünde bulundurularak yapılan hesaplamalar neticesinde Karabük ilinin biyogaz potansiyeli ortaya konmuştur. Burada gübre üzerinden hesap yapılan hayvanlar; büyükbaş, küçükbaş, kümes ve tek tırnaklı hayvanlardır. Buna göre Karabük ili hayvan gübrelerinden elde edilebilen teorik biyogaz potansiyeline göre 81 ilin içerisinde yıllık  $21.98 \times 10^6$  m<sup>3</sup>'lük biyogaz potansiyeli ile 78. sırada yer almaktadır. Oluşan gübrenin tamamının toplanması mümkün olmadığı için teorik potansiyelden ziyade gübre toplanabilirlik oranlarına göre yapılan teknik potansiyel araştırması daha doğru

sonuç vermektedir. Gübre toplanabilirlik açısından değerlendirildiğinde ise Karabük yıllık  $12.24 \times 10^6$  m<sup>3</sup>'lük biyogaz potansiyeli ile 81 il içerisinde 74.'dür [57].

Karabük'te tarım artıklarının teorik biyogaz potansiyeli yıllık 5000 TJ'un altındadır. Teknik biyogaz potansiyeli göz önünde bulundurulduğunda ise bu değer yıllık 1000 TJ'un altına düşmektedir [54].



## BÖLÜM 3

### METADOLOJİ VE MATEMATİKSEL MODEL

#### 3.1. VERİLERİN ELDE EDİLMESİ

Hibrit enerji sistemlerinin boyutlandırma optimizasyonlarında en çok dikkat edilmesi gereken noktalardan bir tanesi kullanılacak verilerin doğruluğudur. Bazı optimizasyon çalışmalarında farazi veriler ortaya konur ve çalışma gerçekleştirilir. Örneğin bir evin tüketeceği elektrik enerjisi miktarı saatlere bölünür ve bir yük profili ortaya konur. Eğer optimize edilecek işleme ait lokasyon ev ise bu çok zor olmaz. Ancak yükün daha fazla arttığı iş yeri, üretim bölgesi, bina ise yük profilini farazi verilerle ortaya koymak optimizasyon çalışmasının sonucunu gerçeğinden uzaklaştırır [58].

Çalışmamızda değişken giriş parametreleri olarak kullanılan saatlik ışıma miktarı, rüzgar hızı ve hava sıcaklığı Şekil 3.1.a'da görülen Karabük Meteoroloji İl Müdürlüğü'nün meteoroloji istasyonundan temin edilmiştir. Yük bilgisi ise Şekil 3.1.b'de gösterilen, kampüs alanı içerisinde bulunan İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi binasının ana panosundaki KOHLER marka elektrik sayacından alınmıştır. Elektrik sayacından bilgileri alabilmek için BAŞKENT Elektrik A.Ş.'den tedarik edilen okuyucu ile optik porttan okuma gerçekleştirilmiştir.



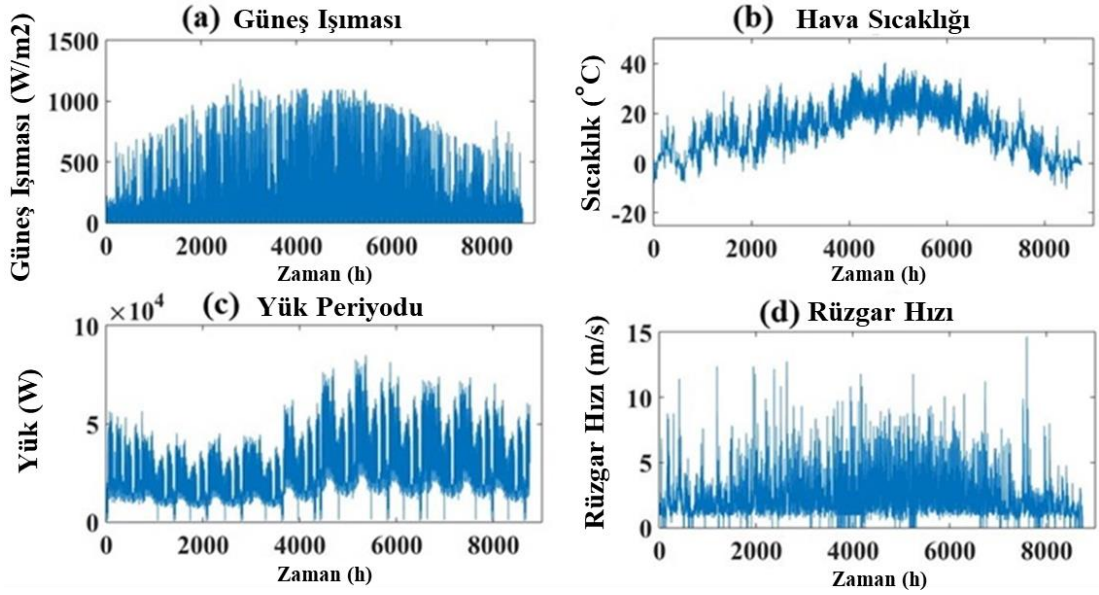
**a**



**b**

Şekil 3.1. Meteoroloji istasyonu (a) ve elektrik sayacı (b).

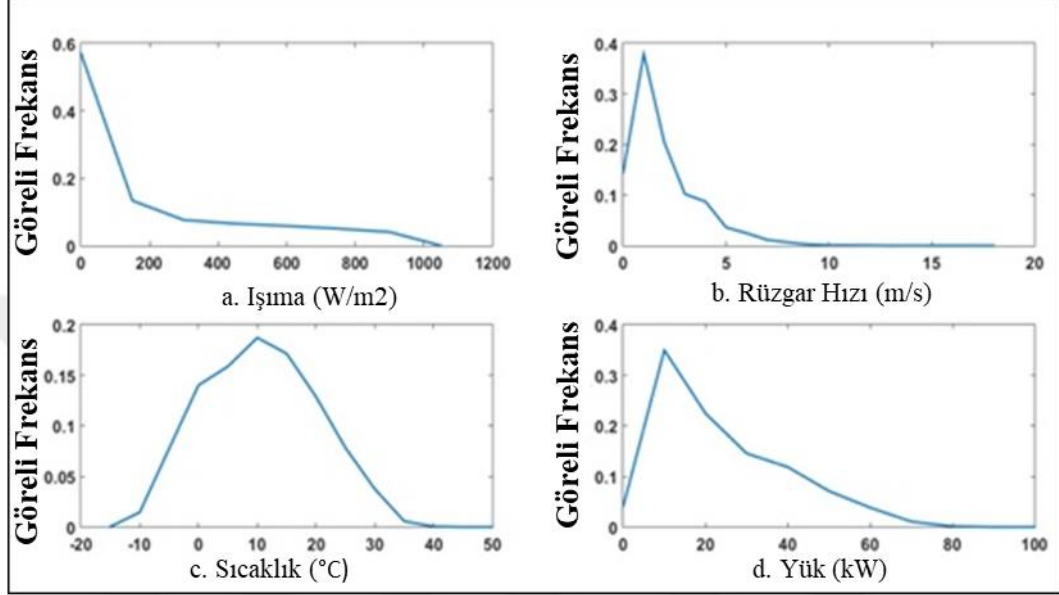
Şekil 3.2’de ışıma, hava sıcaklığı, yük periyodu ve rüzgar hızının 8760 saatlik dağılımını gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Bir yıllık ışıma (a), hava sıcaklığı (b), yük periyodu (c) ve rüzgar hızı (d).

Şekil 3.3’te giriş değişkenlerinin bir yıllık göreceli frekansları verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi güneş ışımalarının göreceli frekansı verimli enerji üretimi için yeterli seviyededir. Bunun yanında sıcaklık grafiğinin de çok yüksek frekanslara sahip

olmaması, sistemi verimi düşürücü etkisinden uzaklaştırmaktadır. Grafiğe bakıldığında rüzgar hızı verimli enerji üretimi için biraz düşük görülmektedir. Yükün görelî frekans grafiğine bakıldığında ise enerji tüketiminin ağırlıklı olarak 20 kW'lar civarında olduğu görülmektedir.



Şekil 3.3. Işıma (a), hava sıcaklığı (b), yük periyodu (c) ve rüzgar hızı (d)'nin bir yıllık görelî frekans grafikleri.

Tezde kullanılan biyogaz potansiyeli değerlendirilirken kampüs içi ve çevresinde biyogaz üretim potansiyeli olan atıklar değerlendirilmiştir. Çevre ilçelerde ve köylerde büyükbaş, küçükbaş ve tavuk gibi hayvan çiftlikleri olmasına rağmen değerlendirmeye alınmamış, sadece üniversite kampüsü ve çevresindeki yakın lokasyonlarda bulunan çimen ve yemekhane atıkları düşünülmüştür.

Biyogaz potansiyeli değerlendirilirken Karabük Üniversitesi öğrenci ve personel yemekhanesi, Kardemir A.Ş. yemekhanesi ve KBÜ Eğitim ve Araştırma Hastanesi yemekhanesinden alınan veriler kullanılmıştır. Yemekhanelerden kaç kişilik yemek çıktığına dair alınan veriler ile kişi başına olması muhtemel atık miktarı literatürden bulunarak toplam atık miktarı tespit edilmiştir. Yemekhanelerde çıkan yemek miktarı ilgili yemekhanenin sorumlu gıda mühendislerine sorularak yazılmıştır ve bir yıllık süre içinde günlere göre veriler alınmıştır.

Yemek atığı konusunda çalışma yapan Merrow ve arkadaşları Batı Michigan Üniversitesi'nin kampüsündeki Bistro 3, Hoekje/Bigelow ve Vally I Dining yemekhanelerinde ölçüm almışlardır. Vally I Dining yemekhanesinden aldıkları ölçümlere göre günlük mutfak artıkları kişi başı 12,97 gr., tabaklardan kalan artıklar ise kişi başı 81,65 gr.dır. Ölçüm sonucunda diğer yemekhanelerden aldıkları veriler de bu değerlere yakındır [59].

Demirer ve arkadaşlarının farklı atıklardaki biyogaz içeriğine dair yaptıkları çalışmaya göre yemekhane atıklarından elde edilen biyogazdaki metan oranı %64'tür ve bir gramlık yemek atığından 157 ml CH<sub>4</sub> ile 245 ml biyogaz elde etmek mümkündür [60].

Çizelge 3.1'de yemekhanelerden bir yılda çıkan yemek sayısı, toplam atık miktarı, üretilen biyogaz miktarı, biyogazdaki metan oranı ve üretilen metan miktarı gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Yemekhane atıkları biyogaz üretim potansiyeli.

Değerlendirilen Yerler	Çıkan Yemek Sayısı (adet/yıl)	Çıkan Toplam Atık Miktarı(kg/yıl)	Üretilen Biyogaz Miktarı (m <sup>3</sup> /yıl)	Biyogazdaki Metan Oranı [7]	Üretilen Metan Miktarı (m <sup>3</sup> /yıl)
Karabük Üniversitesi Yemekhanesi	1551000	146755,62	35955,12	%64	23011,28
Kardemir A.Ş. Yemekhanesi	1460000	138145,2	33845,57	%64	21661,16
KBÜ Araştırma Hastanesi Yemekhanesi	688286	65125,62	15955,77	%64	10211,69

Biyogaz potansiyelinin belirlenmesi için değerlendirilen diğer bir kaynak da kampüs içerisindeki biçilen çim miktarıdır. Biçilen çim miktarı bilgisi üniversite teknik personelinden alınmıştır. Çizelge 3.2'de biçilen çimen miktarı, üretilen biyogaz miktarı ve biyogazdaki metan oranı verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kampüs alanı çimen atıkları biyogaz üretim potansiyeli.

<b>Kaynak</b>	<b>Elde Edilen Miktar(kg/yıl)</b>	<b>Üretilen Biyogaz (l) [9-10]</b>	<b>Üretilen Biyogaz (m3)</b>	<b>Metan Oranı</b>
Kampüs Alanındaki Çimen	165000	82500000	82500	%70 [9]

### 3.2. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PANELİ

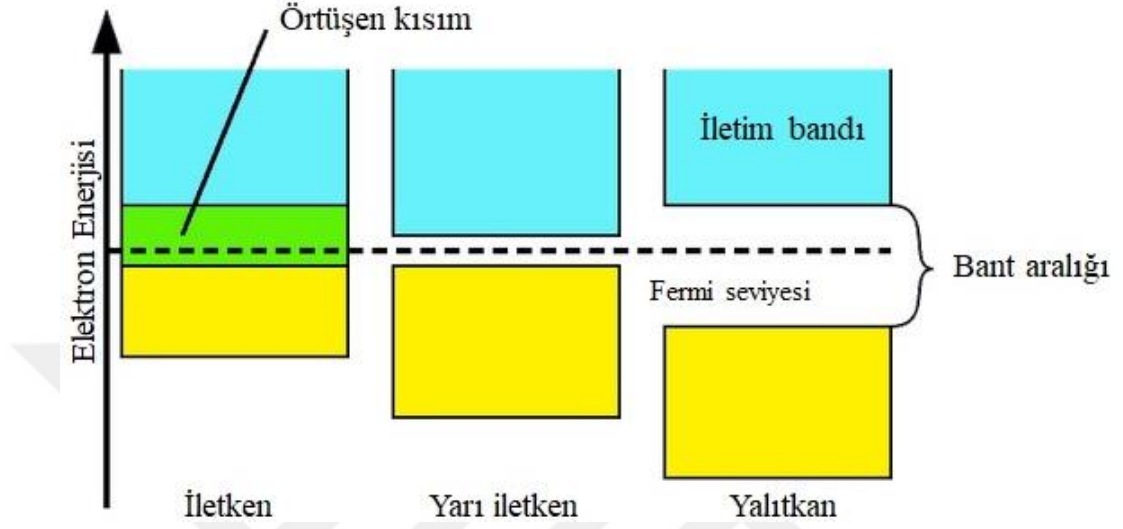
Güneş, dünya için sonsuz bir enerji kaynağı olduğu için insanların ilk yaşam zamanlarından itibaren çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Günümüzde güneş enerjisi; su ısıtma ve elektrik üretme amacıyla çokça kullanılmaktadır. Güneş enerjisinden elektrik üretimi daha çok teknolojinin gelişmesiyle mümkün olduğu için güneşten elektrik üretmeye yarayan Fotovoltaik güneş panellerinin tarihi 150 yıldır artan ivmeyle devam etmektedir. FV güneş panelini oluşturan ve elektrik üretimini sağlayan güneş hücresinin icadı ve kullanımı ilk olarak 1883 yılında Charles Fritts tarafından gerçekleştirilmiştir. Verimleri %1-2 civarında olan ilk güneş hücrelerinden günümüze verimleri pratik olarak %15-20 arasında olan güneş hücrelerine gelinmiştir [61].

#### 3.2.1. Güneş Hücrelerinin Çalışma Prensibi

Yarı iletken teknolojisi elektroniğin temelini oluşturur. Diyot, transistör gibi en temel elektronik malzemeler yarı iletken teknolojisine bağlı olarak çalışmaktadır. Bir malzemenin akım iletme kabiliyeti malzemenin atom yapısının etrafındaki yörüngelerde bulunan elektronlara dayanmaktadır. Her bir yörüngenin taşıyabileceği elektron sayısı  $2n^2$  formülüne göre belirlenmektedir [62]. Buna göre bakır atomunun son yörüngesinde bir elektron bulunduğu için iletken, silisyum atomunun son yörüngesinde 4 atom elektron için yarı iletken ve Neon atomunun son yörüngesinde 8 elektron bulunduğu için yalıtkan olarak adlandırılmaktadır [63].

Şekil 3.4 iletken, yarı iletken ve yalıtkan malzemelerin iletkenlik bandı ile valans bandı arasındaki yasak bandın enerji seviyelerini göstermektedir. Atomların iletkenlik bandı ile valans bandı arasındaki yasak band genişliği ne kadar az ise o

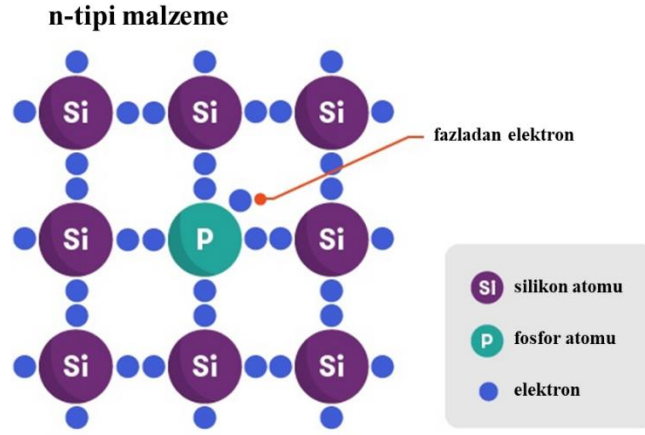
kadar iletken kabul edilir. Bu band genişliği arttıkça atom iletkenlikten yalıtkanlığa doğru evrilir. Yarı iletkenlerin yasak band genişliği iletken ve yalıtkan kabul edilen atomların arasındadır [62].



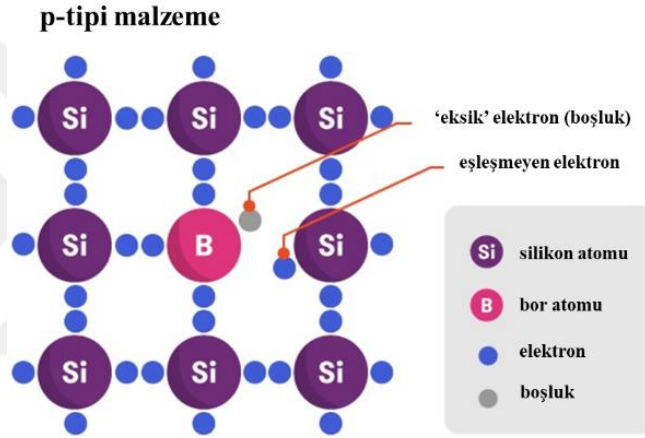
Şekil 3.4. İletken, yarı iletken ve yalıtkan malzemelerin enerji seviyeleri.

Yarı iletkenlerin, iletken ve yalıtkan malzemelere göre üstünlüğü ise iletkenliğinin duruma göre ayarlanabilir olmasıdır. Yarı iletken malzemelerin elektrik akımını iyi bir şekilde iletebilmesi için katkılama işlemi yapılmaktadır. Katkılama işlemi için genellikle periyodik cetvelin 5A grubundan fosfor ve 3A grubundan bor seçilmektedir. Şekil 3.5'te gösterildiği gibi 5A grubundan seçilen fosfor ile katkılanan silisyum n-tipi malzemeye dönüşür. Burada fosforun bağ kurabilecek 5 elektronu, silisyumun bağ kurabilecek 4 elektronu ile bağ kurmaya çalışır. Karşılıklı bağ eşleşmeleri kurulduktan sonra fosforun bir adet elektronu açıkta kalır ve elektron açısından zengin halde olan n-tipi malzeme oluşur. Şekil 3.6'da gösterildiği gibi silisyum 3A grubundan bor ile katkılındığı zaman ise karşılıklı elektronların bağ kurması sonucu silisyumun bir elektronu boşta kalır ve eşleşmediği elektronun karşısında yer alan, boşluk adı verilen kısım meydana gelir. Bu malzemeye de p-tipi malzeme denir.



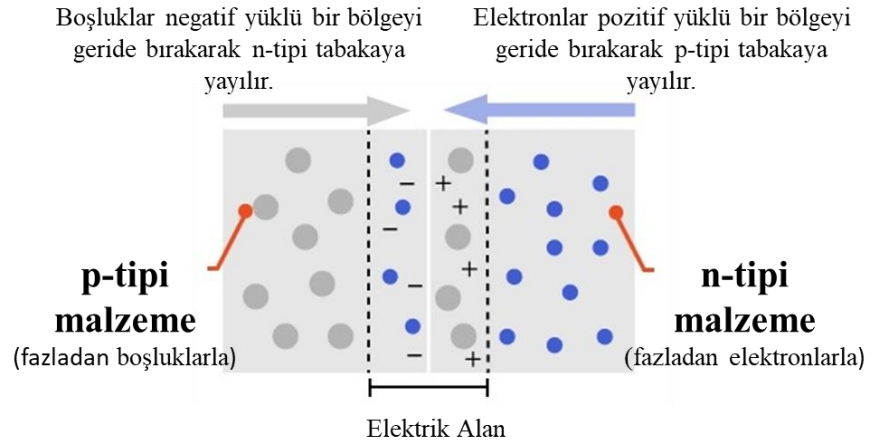


Şekil 3.5. Katkılama işleminde n-tipi malzeme oluşumu [64].

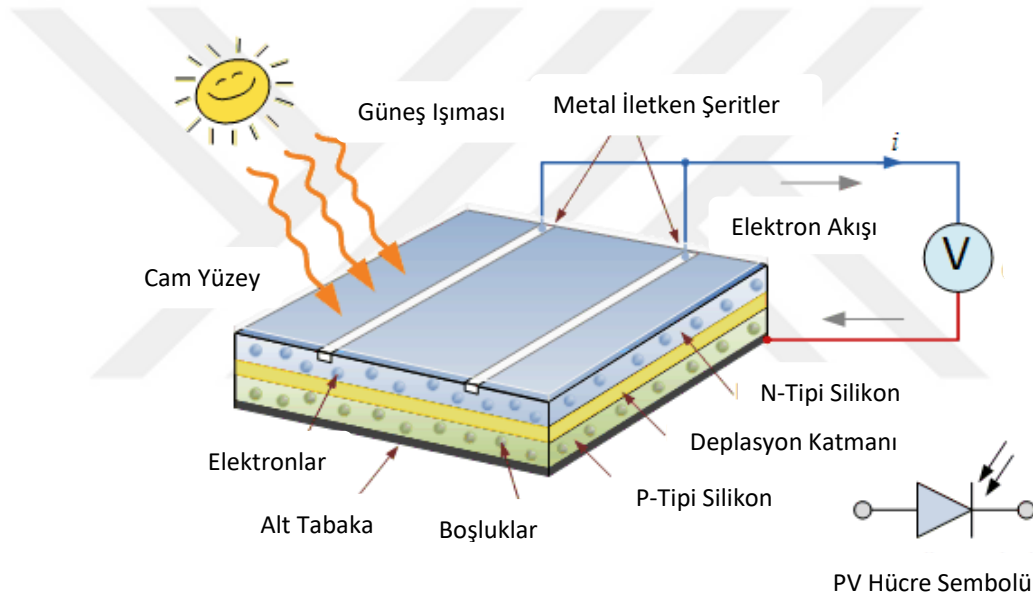


Şekil 3.6. Katkılama işleminde p-tipi malzeme oluşumu [64].

Artık yarı iletkenlerden elektrik üretimi için gerekli işlemler gerçekleştirilmiştir. Bundan sonra bu iki tip malzeme Şekil 3.7’de gösterildiği gibi birleştirilir ve ikisi arasında bir elektrik alanı oluşturulur. Bu esnada güneşten gelen bir foton bu bölgeye düştüğü zaman elektron-boşluk çiftini birbirinden ayırır ve ayrılan elektron n-tipi bölgesine düşerek Şekil 3.8’de gösterildiği gibi devreye verilir. Böylece elektron hareketi n-tipi malzemedan p-tipi malzemeye doğru oluşurken, akım da p-tipi malzemedan n tipi malzemeye doğru oluştuğu kabul edilir.



Şekil 3.7. N-tipi ve P-tipi malzemenin birleşmesi [64].



Şekil 3.8. Güneş hücresinin gösterimi.

### 3.2.2. Üretim Şekline ve Yapısına Göre FV Güneş Panelleri

FV güneş panelleri farklı malzemelerden ve farklı yöntemlerle elde edilebilir. Üretimde yöntem ve hammadde çeşitliliğinin oluşması, teknolojik ilerleme ve ekonomik nedenlere bağlıdır. Güneş hücreleri 1., 2. ve 3. nesil güneş hücresi olarak kategorize edilebilir. Geleneksel güneş hücreleri olarak da tanımlanan 1. Nesil güneş hücreleri silikon tabanlı hücrelerdir ve monokristal silikon ve polikristal silikon olarak adlandırılırlar. Bu ilk nesil güneş hücreleri piyasada da baskın şekilde satılan, geniş üretim alanına sahip olan gruptur. 2. Nesil güneş hücreleri; amorf silikon (a-

Si), bakır indiyum galyum selenid (CIGS) ve kadmiyum tellürid (CdTe) gibi malzemelerden imal edilmiştir ve ticari olarak güneş enerjisi santrallerinde, küçük ölçekli şebekeden bağımsız sistemlerde kullanılır. 3. Nesil güneş hücreleri de birkaç ince film teknolojisi ile gerçekleştirilen, ticari olarak üretimi olmayan fakat arge çalışmalarının devam ettiği çalışmalardır [65]. Güneş hücreleri; kristal silikon hücreler, ince film güneş hücreleri ve diğer hücreler olarak 3 grupta ele alınmaktadır.

### **3.2.2.1. Kristal Silikon Hücreler**

Kristal silikon hücreler; monokristal silikon, polikristal silikon ve ribon silikon olmak üzere farklı çeşitlere sahiptir. Bu farklılıklar yine üretim şekillerine göre meydana gelmektedir. Silikon tabanlı hücreler, üzerinde uzun yıllardır çalışılmasından ve mikro elektronik piyasasına paralel şekilde gelişmesinden dolayı piyasada en çok tercih edilen hücrelerdir. Yaygın olmasının diğer nedenleri arasında; dünya üzerinde bol miktarda bulunması, zehirli madde içermemesi, uzun yıllar dış ortamda kullanılabilir olması, yüksek verimlere ulaşılabilmesi, üretim maliyetlerinin düşürülebilir olması olarak sayılabilir [66].

### **Monokristal Silikon Hücreler**

Silisyum yeryüzünde en çok bulunan atomlardan biridir. Kum ve kuvars biçimleri doğada en yaygın olarak bulunanlarıdır. Ancak kumdaki silisyumun saflık derecesi oldukça düşük olduğu için kuvars maddesi üretim için daha uygundur. Kuvarstaki silisyum oranı yaklaşık %90'dır ve belirli işlemlerle %99 saflıkta silika elde edilir. Silika bir takım işlemlerden geçirilerek silisyum elde edilmektedir [67]. Monokristal silikon hücreler en eski solar hücrelerdir. Tarihi 1950'lere kadar dayanmaktadır ve "Czochralski metodu" olarak bilinen bir yöntemle üretilmektedir. Bu yöntemin uygulanmasında yüksek saflıktaki erimiş silisyumun içerisine sürekli dönen aşırı kristali daldırılır ve yukarı doğru çekilir. Eriyik halde bulunan silikondan tek kristalli molekül yapısına sahip bir külçe oluşur. Bu külçeler çok ince olacak şekilde yaklaşık 0.5 mm kalınlıkta kesitler halinde dilimlenir. Monokristal silikon hücreler diğer silikon hücrelere göre daha verimli olmasına karşın pahalı ve karmaşık bir üretim

prosesine sahip olduğu için çok fazla tercih edilmezler. Verimleri %15-20 arasında değişmektedir [68].

### **Polikristal Silikon Hücreler**

Solar panel piyasasının artış sağlaması daha ucuz ve kolay üretim yöntemlerine olan ihtiyacı artırmıştır. Polikristal silikon hücreler solar panellerde endüstrileşmenin hızlandığı 1980'lerden itibaren bulunarak yaygınlaşmaya başlamıştır. Polikristal silikon hücreler saf ergimiş silisyumdan döküm işlemi kullanılarak elde edilmektedir. Silikon monokristalde olduğu gibi homojen bir dağılıma sahip değildir ve verimlilikleri bu nedenle daha düşüktür. Piyasada en çok tercih edilen silikon hücre tipidir. Üretimi daha kolay ve daha uygun maliyetlidir. Verimleri %11-15 arasında değişmektedir [69]. Ancak hem maliyet hem de verimi düşük olmasına rağmen fayda-maliyet açısından düşünüldüğünde tercih sebebi olmaktadır.

#### **3.2.2.2. İnce Film hücreler**

Bu hücreler 1-2 mikrometre kalınlığında cam ve demir gibi malzemelerin üzerine yarı iletken malzemenin kaplanması ile oluşmaktadır. Ticari olarak yaygın bir şekilde kullanılan türleri amorf silisyum (a-Si), kadmiyum tellürid (CdTe) ve bakır indiyum galyum selenid (CIGS) olarak sayılabilir. Maliyet açısından karşılaştırıldığında kristal silikon hücrelerden daha uygun olmasına rağmen verimlerinin halen %5-8 arasında olmasından dolayı pek tercih edilmemektedir [65].

### **3.2.3. Kullanım Şekline Göre Sistemler**

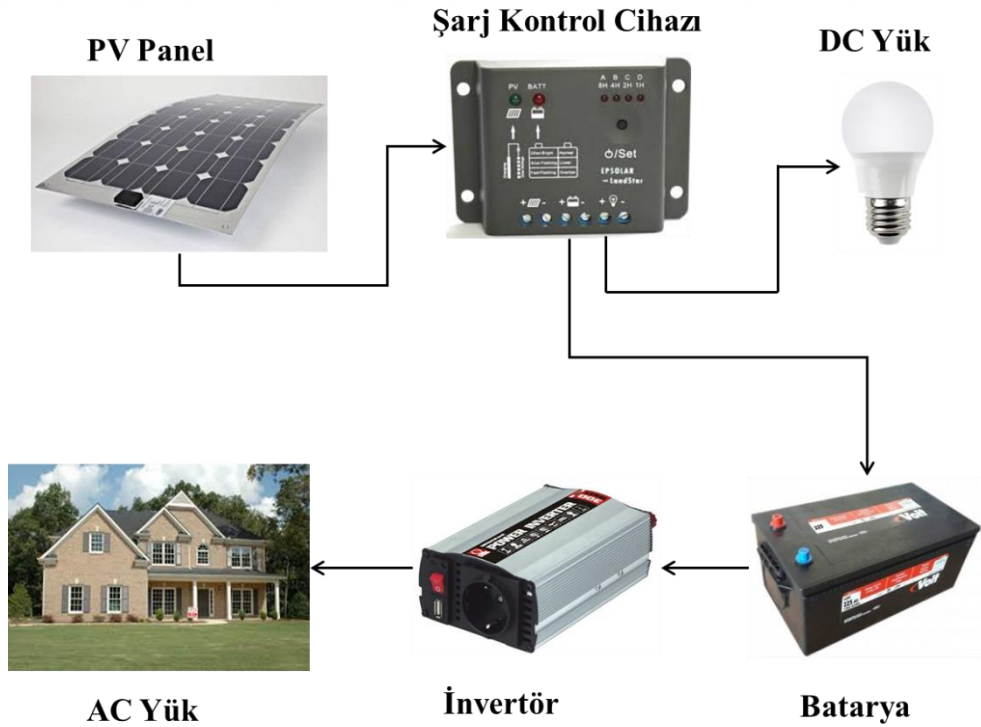
FV güneş enerjisi sistemleri kullanım şekillerine göre ikiye ayrılmaktadır. Bunlar şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı sistemlerdir.

#### **3.2.3.1. Şebekeden Bağımsız Sistemler (off-grid)**

Adından da anlaşılacağı gibi şebekeden bağımsız sistemler bir evin ya da bir tüketim noktasının enerji ihtiyacını şebekeden ayrı şekilde karşılayabilecek FV sistemlerden

oluşmaktadır. Bu sistemler daha çok elektrik üretim tesislerine ya da dağıtım tesislerine uzak bölgelerde, elektriğin henüz ulaşmadığı ya da ulaşmasının maliyetli olduğu bölgelerde tercih edilmektedir. Ülkemizde bu tür sistemler bağ evlerinde, köylerde elektrik aboneliği olmayan bölgelerde, sulama alanlarında ağırlıklı olarak tercih edilmektedir. Bu sistemlerin en büyük avantajı güneş enerjisinden üretilen elektrik fazla kayba uğramadan yerinde tüketilmesidir [70, 71].

Şekil 3.9'da şebekeden bağımsız bir FV güneş enerji sisteminin işlem akış şeması görülmektedir. Güneş panellerinden üretilen elektrik enerjisi solar kablolar vasıtasıyla şarj kontrol cihazı üzerinden DC yüke gitmekte ve DC olarak tüketilmeyen enerji akülerde depolanmaktadır. Şarj kontrol cihazı burada kontrol ekipmanı gibi davranarak enerjiyi gerektiğinde DC yüke gerektiğinde bataryaya yönlendirmekte, bataryanın tam dolu olduğu zamanlarda batarya şarjını kesmektedir. Aynı zamanda geceleri elektrik enerjisinin üretilmediği durumlarda bataryanın boşalmasını engelleyerek enerji kaybının önüne geçmektedir. Sistemdeki AC yükleri beslemek için ise invertör ile DC'den AC'ye dönüşüm gerçekleştirilir [71].

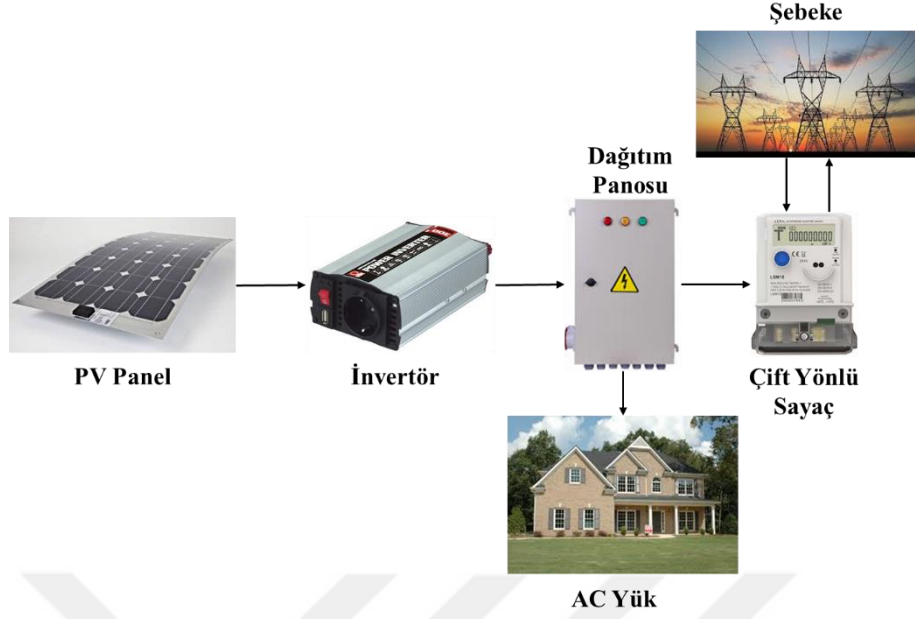


Şekil 3.9. Şebekeden bağımsız sistem için FV enerji akış sistemi.

### 3.2.3.2. Şebekeye Bağlı Sistemler (on-grid)

Şebekeye bağlı FV sistemler elektrik hattının olduğu yerlerde fakat üretilen enerjinin tüketildiği, fazla gelen enerjinin şebekeye verildiği, eksik kalan enerjinin de şebekeden temin edildiği elektrik üretim tesisleridir. Bu sistemler arazi üzerine ya da yapıların çatılarına monte edilip kullanılabilir. Bu sistemin bileşenleri Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Buna göre güneşten gelen fotonlar sayesinde FV paneller vasıtasıyla elektrik üretimi gerçekleştirilir. Üretilen elektrik invertörden geçerek DC formdan AC forma dönüşür. Dönüşen elektrik tüketim noktasının ana panosuna gönderilir ve tüketim noktasının ihtiyacı bu üretilen enerjiden sağlanır. Ana panoya bağlı bir diğer enerji sağlayıcı da şebekedir. Eğer FV panellerden üretilen enerji yetersiz ise şebekeden gelen enerji ile tüketim noktasının eksik kalan ihtiyacı aralıksız şekilde tedarik edilir. Eğer FV panellerden üretilen enerji tüketim noktasının ihtiyacından fazla ise üretilen fazla enerji tekrar şebekeye verilir. Üretilen fazla enerjinin şebekeye verilmesini ya da tüketim için eksik kalan enerjinin şebekeden teminini kayıt altına alması açısından tüketim noktasının ana panosunun şebeke tarafında çift yönlü sayaç bulundurulur. Ay sonunda çift yönlü sayaç şebeke tarafından gelen enerji ile FV panel tarafından gelen enerjinin farkını alarak FV tesis sahibinin üretici ya da tüketici konumunda olduğunu ortaya koyar. Buna mahsuplaşma denir ve mahsuplaşma elektrik enerjisi fiyatı üzerinden değil kWh üzerinden yapılır [70, 72].

Bazı tesisler çok büyüktür ve üretilen enerjinin çok küçük bir kısmı iç tüketimde kullanılır. Bu tesisler daha çok elektrik üretiminden kazanç sağlamak üzere tesis edilir ve her ay elektrik dağıtım şirketlerinden sattığı elektriğin ücretini alır. Ülkemizdeki tesislerin çoğu bu şekildedir.



Şekil 3.10. Şebekeye bağlı sistemin enerji akış şeması.

### 3.2.4. Fotovoltaik Güneş Paneli Gücünün Matematiksel Modeli

FV panellerin hibrit bir sistemde kullanılabilmesi için saatlik ürettiği enerjinin bilinmesi gerekmektedir. Saatlik üretilen enerjinin tespiti için literatürde farklı güneş paneli güç eşitlikleri mevcuttur.

FV panel gücünü ( $p_{pv}(t)$ ) saatlik olarak bulabilmek için “Birinci Modele Göre Optimizasyon” başlığında anlatılan çalışmada kullanılan model Eşitlik 3.1’de gösterilmiştir. Markward’ın önerdiği modelde eğimli açıyla gelen ışığa, hava sıcaklığı ve panelin datasheet bilgisi kullanılarak güneş panelinin gücü belirlenmektedir [73]. Burada  $A_{pv}$  FV panellerin kapladığı alandır ve optimize edilecek parametrelerden biridir. Ayrıca,  $\eta_{pv}$  panelin saatlik verimi,  $R$  saatlik ışığa miktarı ve PR performans oranıdır.

$$p_{pv}(t) = A_{pv} \cdot \eta_{pv}(t) \cdot R(t) \cdot PR \quad (3.1)$$

Panel gücünü saatlik olarak elde etmek için kullanılan panelin saatlik verimi gerekmektedir. Eşitlik 3.2’de panelin saatlik verimi gösterilmektedir [31, 74].

$$\eta_{pv}(t) = \eta_k \cdot \eta_t \cdot [1 - \beta_t \cdot (T_h(t) - T_k) - \beta_t \cdot R(t) \cdot \left(\frac{NOCT-20}{800}\right) \cdot (1 - \eta_k \cdot \eta_t)] \quad (3.2)$$

Burada  $\eta_k$  referans panel verimi,  $\eta_t$  MPPT ekipmanının verimi,  $\beta_t$  silikon hücreler için sıcaklık katsayısı,  $T_a$  hava sıcaklığı (°C),  $T_r$  panelin referans sıcaklığı (°C),  $NOCT$  nominal işletme hücre sıcaklığıdır (°C).  $\beta_t$  silikon hücreleri için her bir °C’de 0.004 ile 0.006 arasında değişmektedir.

“İkinci Modele Göre Optimizasyon” başlığında anlatılan çalışmada ise FV panel için Eşitlik 3.3 ve 3.4 kullanılmıştır [75].

$$P_{pv}(t) = N_{module} \cdot V_{mpp} \cdot I_{mpp} \cdot \frac{R(t)}{1000} \left[1 - \frac{K_p}{100} (T_C(t) - T_R)\right] \quad (3.3)$$

$$T_C(t) = T_A(t) + \frac{NOCT-20}{800} R(t) \quad (3.4)$$

Burada  $R(t)$  saatlik ışıma,  $NOCT$  nominal işletme hücre sıcaklığıdır (°C),  $T_A(t)$  hava sıcaklığı (°C),  $T_C(t)$  hücre sıcaklığı (°C),  $P_{pv}(t)$  maksimum güç izleme noktasındaki üretilen güç (W),  $N_{module}$  modül sayısı,  $V_{mpp}$  maksimum güç noktası voltajı,  $I_{mpp}$  maksimum güç noktası akımı,  $K_p$  maksimum güç sıcaklık katsayısıdır (%/°C),  $T_R$  standart test şartlarındaki hücre sıcaklığını (°C) göstermektedir.

### 3.3. RÜZGAR TÜRBİNİ

Rüzgar enerjisinin insan hayatını kolaylaştırmak için 5000 yıldan fazla süredir kullanıldığı bilinmektedir. İlk olarak gemilerin hareketinde kullanılan rüzgar enerjisi MS 1. yy.da su pompası için kullanılmıştır. Bu su pompası çiziminden yola çıkan İranlı bilim insanları ilk defa yel değirmenlerini geliştirip kullanmışlardır. Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimi ise 1887’de Amerika Birleşik Devletleri’nde bulunan Charles Francis Brush tarafından başarılmış ve bu bilim adamı kendi evinin elektrik ihtiyacını kendi bulduğu rüzgar güç makinesinden sağlamıştır. Elektrik üreten ve bugünkü yapısına en yakın olan ilk rüzgar türbini ise 1891 yılında Danimarkalı bilim adamı Poul la Cour tarafından üretilmiştir. Bu türbinle 5-25 kW



arasında bir güce sahip olup gelişen teknoloji ile günümüzde 9 MW'a kadar tek parça rüzgar türbinleri üretilebilmektedir [76].

Rüzgar türbinleri; kanat, dişli kutusu ve jeneratör vasıtasıyla rüzgarın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren aygıtlardır. RT'nin elektrik üretebilmesi için bu mekanizmalar yeterli iken büyük güçlerde türbinlerin hasar almadan ve en yüksek enerji üretebilme seviyelerinde çalışabilmesi için bazı ek ekipmanlar gerekmektedir.

### **3.3.1. Rüzgar Türbini Ekipmanları**

Rüzgar türbininde çok fazla parça ortak bir şekilde çalışarak rüzgarı yakalayıp, elektrik enerjisine çevrilmesine ve oradan da şebekeye uygun frekans ve voltajda verilmesine kadar görev yapmaktadır. Ancak ana başlıklar halinde bu ekipmanlar sayılacak olursa; kule, makine bölümü, rotor, jeneratör, frenleme sistemi ve rüzgar hızını ve yönünü ölçen sensörler şeklinde sıralanmaktadır. Ayrıca Şekil 3.11'de büyük bir rüzgar türbininde bulunması gereken bileşenler gösterilmiştir.

#### **3.3.1.1 Kule**

Kule rüzgar türbininin tüm ekipmanlarını havada tutmaya yarayan kısımdır. Yatay rüzgar türbinlerinde kule yüksekliği, kanatların dönüşü esnasında yere değmeyecek şekilde belirlenmelidir. Rüzgar hızı yerden yükseklerle çıkıldıkça daha güçlü ve daha az türbülansa sahiptir. Türbin kanatlarının dönmesi esnasında ortaya çıkan titreşim hareketlerine dayanıklı, yüksek rüzgar hızlarında da fazla esnemeye meyilli olmayan optimum sertlikte kuleler tercih edilmektedir. Kulenin doğal frekansının kanat geçiş frekansından fazla olduğu durumlarda kule sert olarak adlandırılır. Bu kuleler dayanıklılık açısından avantaj olmasına rağmen maliyeti çok yüksektir. Kulenin doğal frekansı kanat geçiş frekansından düşük olan kuleler yumuşak kuleler olarak adlandırılır. Bu kuleler sert olarak adlandırılan kulelerden daha hafif olduğu için daha az maliyetlidir. Ancak yumuşaklığın ayarlanması türbinin sağlıklı şekilde hareket etmesi için şarttır. Sert kule maliyeti artırırken yumuşak kule de dayanıklılığı azaltıyor. Optimum kule sertliği için iyi bir analiz yapılmalıdır [77].

### 3.3.1.2. Makine Bölümü

Jeneratör ve dişli kutusu gibi RT'nin ekipmanlarının içinde bulunduğu rotor ile kule arasında bulunan ekipmandır. Rüzgar yönüne doğru yaw mekanizması sayesinde pozisyon alır. Yaw mekanizmasının içinde de ayrıca yaw dişlisi ve birkaç adet yaw motoru vardır. Rüzgardan maksimum fayda sağlanması adına türbinin sürekli rüzgar yönüne dönmesi gerekmektedir. Çünkü büyük boyutlardaki RT'ler rüzgar yönünden bir miktar kaydıkları zaman yüzlerce kWh enerjiyi daha az üretme ihtimali ile karşı karşıya kalmaktadır. Dakikadaki dönüş hızı 30-60 devir olan kanatlardaki bu hareketi dakikada 1200-1500 devir olarak jeneratöre aktaran dişli kutusu RT'nin en ağır parçalarından biridir [78].

### 3.3.1.3. Rotor

Rotor türbinin dönen parçası anlamına gelmektedir ve kanatlar ile kanatların bağlı olduğu bir göbekten oluşur. Bu kanatlar rüzgarı yakalayan parçalardır ve rüzgar sayesinde oluşan tork türbin şaftını döndürür. Rüzgardan maksimum fayda sağlamak amacıyla yeni nesil türbin kanatlarının açısı kontrol edilebilir şekildedir. Türbinin durdurulması istendiğinde ise kanat açıları, kanatlara gelen kuvvetin minimum yapılacak şekilde ayarlanmasını sağlar. Kanat açısını kontrol etmek için elektrikli ya da hidrolik bir motor kullanılır. Türbin kanatlarının süpürme alanı, üretilen enerji ile doğrudan orantılıdır [78].

### 3.3.1.4. Jeneratör

Jeneratör mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmeye yarayan ekipmandır. Bir rüzgar türbininde jeneratör seçimi türbin kanatlarının boyutları ayarlanırken yapılmalıdır. RT üreticileri türbinler için en iyi jeneratörün hangisi olduğu üzerinde tam bir fikir birliğine varamamıştır. Ancak RT çeşitleri için düşünülen 3 temel jeneratör vardır. Bunlar DC, AC senkron ve AC asenkron jeneratörlerdir. Prensipite tüm jeneratör tipleri sabit ve değişken hızlarda çalışabilirler. DC jeneratöre sahip RT'ler büyük enerji tesislerinden ziyade yükün türbine yakın olduğu yerlerde, batarya şarj edilmesi gerektiği durumlarda ve ısıtma uygulamalarında

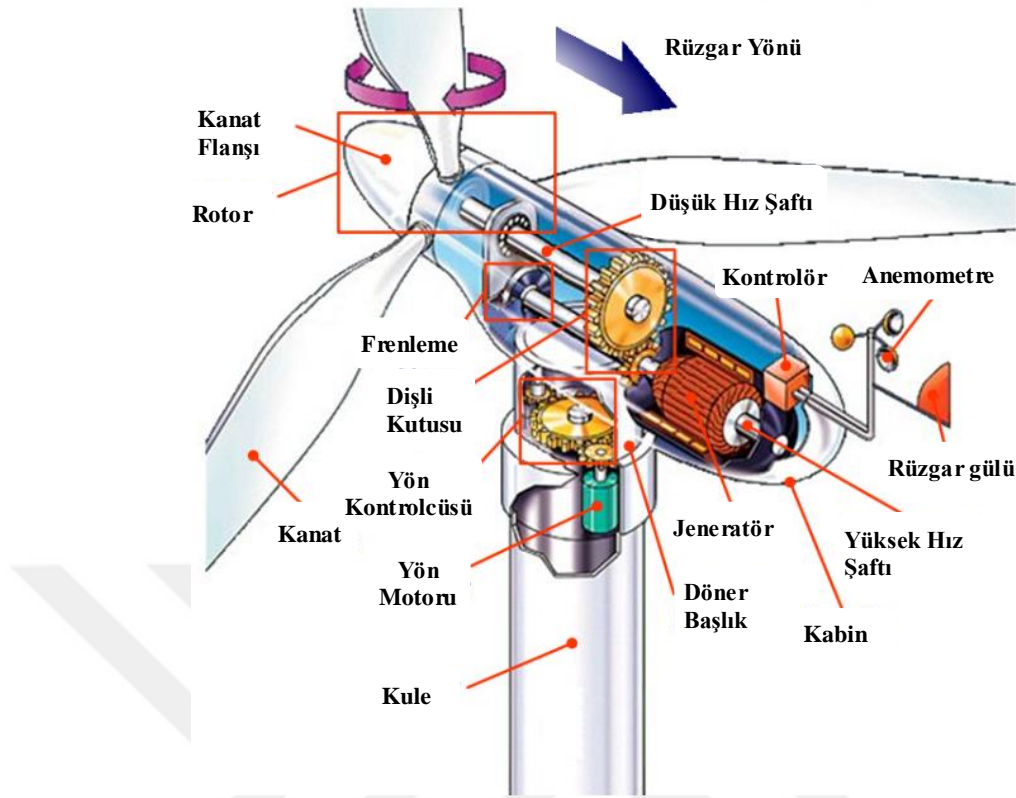
kullanılmaktadır. Senkron jeneratöre sahip RT'ler asenkron jeneratöre sahip RT'ler kadar yaygın değildir. Bunun nedeni işletmede birtakım sorunların meydana gelmesidir. Asenkron jeneratörler yüksek güçlerde ve yüke uzak noktalardaki büyük enerji tesislerinde konumlandırılan RT'ler için kullanılan jeneratörlerdir [79, 80].

### **3.3.1.5. Frenleme Sistemi**

Rüzgar türbinlerinde bazı ekipmanların arızalanması, bakıma alınması ya da yüksek rüzgar hızlarının görüldüğü durumlarda türbinin durdurulması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu durumlar için türbin, otomobillerin frenleme sistemine benzer bir mekanik fren sistemi ile donatılır. Bu fren sistemi, yüksek hız şaftına, jeneratörün ön kısmına monte edilir. Eğer frenlemenin ardından bakım çalışması ya da ekipman değişimi için kanatların sabit kalması istenirse, ek olarak rotor ana milindeki diskte bir deliğin içine pim sokularak kanatların dönmesi engellenebilir [78].

### **3.3.1.6. Rüzgar Hızını ve Yönünü Ölçen Sensörler**

RT'nin kontrolünü daha iyi yapabilmek için rüzgar hızını bilmek gereklidir ve rüzgar hızı anemometre denilen bir ekipmanla ölçülür. Bazı anemometre modelleri rüzgarın yönünü de ölçebilir. Büyük ölçekli RT'ler bu ölçümleri hassas bir şekilde yapabilmek adına gelişmiş anemometreler ile donatılır. Rüzgarın yönünün bilinmesi türbinin rüzgara doğru sürekli dönmesini sağlamak için çok büyük önem teşkil etmektedir. Hız ölçen ve yön belirleyen anemometre bozulduğu takdirde kanat açıları ve rotor yönü belirlenemeyeceği için büyük enerji kayıpları söz konusu olabilir. Genellikle anemometreler makine bölümünün üzerine monte edilir [78].



Şekil 3.11. Rüzgar türbini bileşenleri [81].

### 3.3.2. Kanat Tipine Göre Rüzgar Türbini Çeşitleri

Dönme eksenine göre rüzgar türbinleri yatay eksenli rüzgar türbini (YERT) ve dikey eksenli rüzgar türbini (DERT) olarak ikiye ayrılır.

#### 3.3.2.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbini

YERT'in döner eksenli yatay şekilde olup yere paralel şekilde konumlandırılır ve kanatlar rüzgarın esme yönüne dik şekildedir. Tek kanatlıdan çok kanatlıya kadar birçok YERT üzerinde bilimsel çalışmalar yapılmış olup piyasada en fazla enerji üretim potansiyeline sahip ve en stabil çalışanlar 3 kanatlı olanlarıdır. Tek kanatlı YERT'lerde dönme hızı çok hızlı olsa da aerodinamik balanssızlık, aşırı gürültü ve teknik problemlerin çözümü için ileri teknoloji ve maliyet gerektirmesi nedenleriyle piyasada kendine yeterince yer bulamamıştır [82]. Her ne kadar üç kanatlı YERT'lerin kanat uç hızları tek kanatlı ve iki kanatlı YERT'lere göre daha düşük olsa da balansının daha iyi olması, daha az gürültülü olması ve uzun süreli

kullanımda daha az teknik problemler çıkarması nedeniyle piyasada hakim konumdadır. Piyasada YERT'lerin DERT'lerden daha fazla kullanılmasının nedeni rüzgar enerjisinden elektrik üretim performansının daha fazla olmasıdır [83].

### **Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Avantajları**

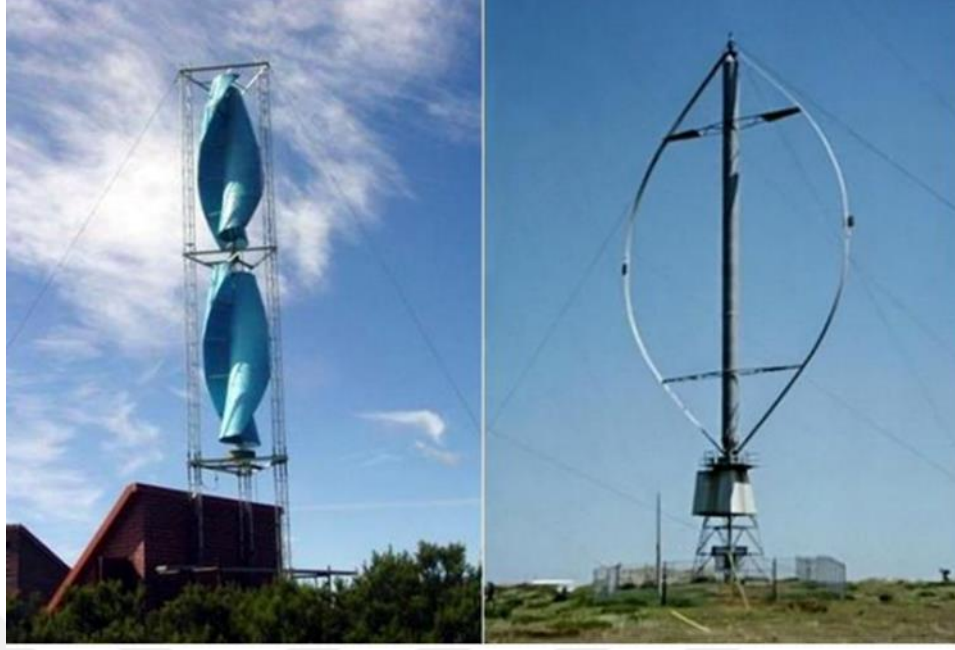
- Kanatlar türbinin ağırlık merkezinde olduğu için sağlamlık sağlanmış olur.
- Kanatların açılı kontrolü sayesinde şiddetli rüzgarlarda hasar en aza indirgenmiştir.
- Uzun kuleler sayesinde daha şiddetli rüzgarları yakalayabilme şansı sunar.
- Kanat açılarının kontrolü sayesinde rüzgar enerjisinden maksimum fayda sağlanır.
- Yüksek üretim hacimlerine ulaşıldığı için daha ucuza mal edilebilir [84, 85].

### **Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Dezavantajları**

- Zemine yakın olarak kurulduklarında bazı zorluklarla karşılaşılır.
- Uzun kule ve uzun kanatlar nakliye esnasında zorluk çıkarır.
- Açık denizlere konulduğunda haberleşme problemleri görülebilir [84, 85].

### **3.3.2.2. Dikey Eksenli Rüzgar Türbini**

DERT'lerin dönme eksenini yere dik şekilde konumlandırılmıştır. Verimleri YERT'lere göre daha düşük olmasından dolayı genellikle küçük rüzgar projelerinde ve konut uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu türbinlerde dişli kutusu ve jeneratör zeminde olduğu için YERT'lere göre daha güvenlidir. Bu türbinlerde rüzgarın hangi yönden estiğinin önemi olmadığı için rüzgar yönünü takip edecek özel bir ekipmana ihtiyacı yoktur. Her yönden esen rüzgar, türbin tarafından elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. DERT'ler Savanius ve Darrieus Türbinler olarak sınıflandırılmaktadır ve Şekil 3.12'de gösterilmiştir [83].



(a)

(b)

Şekil 3.12. Savanius (a) ve Darrieus (b) Türbinler.

Savanius rüzgar türbinleri “S” harfi şeklinde iki yarım silindirin bir şafta oturtulmasıyla elde edilir. Kanatların bir tanesi rüzgarı içine alarak dönme momenti sağlarken rüzgar diğer kanatın çevresinden akıp gittiği için bu dönüş engellenemez. Böylece rüzgar enerjisinden elde edilen net tork iki kanat arasındaki torkun farkına eşittir [78].

Darrieus rüzgar türbinlerinde kanatlar kavisli olarak uzanarak alt kısımdan ve üst kısımdan birleşecek şekilde gövdeye yerleştirilmiştir. Bu türbinin dezavantajı düşük hızlarda dönmeye başlamamasından dolayı düşük rüzgar hızlarında torku düşüktür. Ancak kalkışa başladıktan sonra iyi bir torka sahiptir [86].

### **Dikey Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Avantajları**

- Rüzgarı tüm yönlerden yakalayabildiği için rüzgara doğru dönmek için herhangi bir ek ekipmana ihtiyaç duymaz.
- Zemine yakın monte edilebildiği için her taraftan görünmez.
- Çok düşük rüzgar hızlarında dönme hareketine başlar.

- Rüzgar tarlalarında birbirine daha yakın konumlandırılabilirdiği için daha az yer kaplar.
- Yerden 10 metre yükseklikte konumlandırıldıklarında dikey eksenli rüzgar türbinleri, yatay eksenli rüzgar türbinlerinden daha sessizdir.
- Rüzgarı alması için yüksek yerlere montaj gerektirmez [84, 85].

### **Dikey Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Dezavantajları**

- Çok şiddetli rüzgarlarda bazen düzgün çalışmayabilir.
- Düşük tork üretirler ve dinamik denge sorunlarına sahiptirler.
- Bu türbinlerde kanatlar tüm yönlerden sürekli rüzgara maruz kaldıkları için zamanla kanatların eğilmesi, çatlaması hatta kırılması söz konusu olabilir [84, 85].

### **3.3.3. Rüzgar Türbin Gücünün Matematiksel Modeli**

Rüzgarın gücünü belirleyen en önemli etmen rüzgarın hızıdır. Rüzgar hızı zamanın ve yüksekliğin bir fonksiyonu olarak sürekli değişmektedir. Rüzgar hızının belirlenmesi, rüzgar türbini konulacak alan için son derece önemlidir [80].

Olması gereken, rüzgar hızının türbinin konumlandırılacağı alan içerisinde her yükseklikte ölçülmesidir. Ancak bazen bu ölçüm, istenen yükseklik için yapılmamış olabilir ve daha farklı yüksekliklerde yapılan ölçüm sonuçlarına sahip olunabilir. Bu durumlarda rüzgar hızı bilinen bir yükseklikten yola çıkılarak daha farklı yüksekliklerdeki rüzgar hızı tahmin edilebilir. Bu tahmin işlemi için en yaygın kullanılan eşitliklerden bir tanesi Hellmann bağıntısıdır ve Eşitlik 3.5'te gösterilmiştir [87].

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^a \quad (3.5)$$

Bu bağıntıda  $v_0$  bilinen noktadaki rüzgar hızı (m/s),  $H_0$  rüzgar hızının bilindiği noktanın yerden yüksekliği (m),  $H$  rüzgar hızının bulunmak istendiği noktanın

yerden yüksekliği,  $v$  bulunmak istenen yeni rüzgar hızı (m/s) ve  $a$  Hellmann sabitidir.

Hellmann sabiti sürtünme katsayısı olarak da ifade edilir ve yeni rüzgar hızının belirleneceği yerin karakteristik özelliklerine göre değişiklik gösterir. Çizelge 3.3, Hellmann sabitinin bulunduğu ortama göre alınan değerlerini göstermektedir.

Çizelge 3.3. Ortamlara göre Hellmann Sabiti [87].

Yüzey Karakteristiği	Hellmann Sabiti ( $a$ )
Göller, denizler ve düz zeminler	0.1
Zemin seviyesindeki çayırlar	0.15
Uzun boylu bitki ve çalılık alanlar	0.20
Ormanlık araziler	0.25
Ağaç ve çalılık içeren küçük yerleşim yerleri	0.30
Yüksek binalar içeren şehir alanları	0.40

Belirli yükseklikteki rüzgar hızını bulmaya yönelik yaygın olarak kullanılan bir diğer yöntem de Eşitlik 3.6'da gösterilen logaritmik rüzgar profili eşitliğidir [88].

$$\frac{v}{v_0} = \frac{\ln\left(\frac{H}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{H_0}{z_0}\right)} \quad (3.6)$$

Burada  $z_0$  yüzey pürüzlülük uzunluğudur (m) ve arazi tipine göre değişiklik göstermekle birlikte 0.00001 ile 1.6 arasında değişmektedir.  $H_0$ , bilinen yüksekliktir (m),  $v_0$  bilinen yükseklikteki rüzgar hızıdır (m/s),  $H$  yeni yüksekliktir (m) ve  $v$  bilinmek istenen yeni hızıdır (m/s). Yüzeyin karakteristik özelliklerine göre yüzey pürüzlülük uzunluğu Çizelge 3.4'te gösterilmiştir.



Çizelge 3.4. Yüzey pürüzlülük uzunluğu [88].

Yüzey Karakteristiği	Yüzey Pürüzlülük Uzunluğu (m)- $z_0$
Buz	0.00001
Deniz	0.0001
Sahil kenarları	0.001
Kısa Çimenlik Alanlar	0.02
Uzun Çimenlik, otluk alan.	0.05
Seyrek Ağaçlık Alanlar	0.15
Ağaçlık ya da az binanın bulunduğu bölge	0.3
Şehir çevreleri	0.4
Ormanlık arazi	1

Rüzgar türbini yatırımlarında rüzgar hızının yanında kapasite faktörü de önemli bir parametredir. Türbinlerin gerçekte bir yılda ürettiği elektrik enerjisinin, türbinin nominal gücünde bir yılda üretebileceği enerjiye oranına kapasite faktörü denir. Kapasite faktörü Eşitlik 3.7’de gösterildiği gibi ifade edilir. Burada  $C_F$  kapasite faktörünü,  $E$  yıl boyunca üretilen toplam enerjiyi (kWh),  $T$  saat cinsinden bir yıllık süreyi (h),  $P_r$  türbinin nominal gücünü (kW) göstermektedir [89].

$$C_F = \frac{E}{T.P_r} \quad (3.7)$$

Kapasite faktörü, rüzgar enerjisinin ne kadarlık bir kısmını etkin şekilde kullandığını gösterir. Bir türbinin devreye girme hızı ne kadar düşük ve devreden çıkma hızı ne kadar yüksekse kapasite faktörü o kadar yüksektir. Kapasite faktörünü etkileyen diğer parametreler; rüzgar türbininin çeşidi ve kurulum yapılacak yerin rüzgar rejimi olarak sayılabilir [90].

Rüzgar türbininin gücü bulunurken, türbin kanatlarına temas eden rüzgarın gücünden yola çıkılır. Eşitlik 3.8’de esen rüzgarın kinetik enerjisi gösterilmiştir ve  $E_k$  kinetik

enerji formülünü ifade eder.  $m$  esen rüzgarın kütlesini (kg),  $V$  de rüzgarın hızını (m/s) göstermektedir.

$$E_k = \frac{1}{2} \times m \times V^2 \quad (3.8)$$

Esen rüzgarın kütlesi Eşitlik 3.9’da gösterildiği gibi havanın yoğunluğu ve hacminin çarpılması sonucunda bulunur. Eşitlik 3.10’da gösterilen  $\rho$  yüksekliğin bir fonksiyonu olarak hava yoğunluğunu ifade eder ( $\text{kg/m}^3$ ).  $P_0$  standart deniz seviyesindeki atmosferik yoğunluğu ( $1.225 \text{ kg/m}^3$ ),  $R$  hava için spesifik gaz sabitini ( $287.05 \text{ J/kg.K}$ ),  $g$  yer çekimi sabitini ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ),  $T$  Kelvin cinsinden sıcaklığı ve  $z$  deniz seviyesinden olan yüksekliği (m) ifade eder [80].

$$m = \rho \times v \quad (3.9)$$

$$\rho(z) = \frac{P_0}{R.T} \exp\left(\frac{-gz}{R.T}\right) \quad (3.10)$$

Eşitlik 3.11 esen rüzgarın hacmini ifade eder. Esen rüzgarın hacmini bulabilmek için rüzgarın geçtiği kesit alanı ( $A$ ) ile o anki rüzgar hızı ( $V$ ) çarpılır. Eşitlik 3.12 ise rüzgarın geçtiği kesitin alanını verir. Eşitlik 3.9-3.12’yi, Eşitlik 3.8’de yerine yazdığımızda ise Eşitlik 3.13’teki rüzgarın kinetik enerjisi elde edilmiş olur.

$$v = A.V \quad (3.11)$$

$$A = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (3.12)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \times \rho \times \pi \cdot \frac{D^2}{4} V^3 \quad (3.13)$$

Rüzgardaki güç birim zaman başına düşen toplam enerjidir. Rüzgardaki güç rüzgar türbini rotorunda mekanik enerjiye dönüşür. Hava kütlesinin rüzgar türbininin rotoruna değdiği noktada tamamen durdurulmasından dolayı rüzgarın gücü tamamıyla mekanik enerjiye dönüştürülemez. Rotora temas eden rüzgarın

arkasındaki takip eden rüzgar için kesit alanının tıkanması anlamına gelen bu olay sonrası takip eden rüzgarın hızı azalır. Bu nedenle rüzgar gücünün kullanılmasının teorik olarak maksimum bir değeri vardır. Bu değer 0.59'dur ve 1926 yılında Betz tarafından bulunduğu için "Betz limiti" adını almıştır. Rüzgar türbininin teorik olarak maksimum gücü Eşitlik 3.14'teki gibi verilir. Diğer bir deyişle rüzgar türbininin gücü; hava yoğunluğu, türbin rotoru süpürme alanı, rüzgar hızının küpü ve güç katsayısı ile doğru orantılıdır [80, 91].

$$P_r = \frac{1}{2} \times \rho_{hava} \times A_{wt} \times V_r^3 \times C_p \text{ Betz} \quad (3.14)$$

Ancak Betz'in belirlediği teorik sınır olan 0.59'u en iyi dizayn edilmiş rüzgar türbinlerinde bile gözlemlemek imkansızdır. Gerçek dünyada bu oran en iyi tasarımlarda bile 0.35-0.45 arasındadır. Gerçek bir rüzgar türbininin çalışması esnasında dişli kutusu, rulmanlar, jeneratör ve diğer ekipmanların çalışması söz konusu olduğu için rüzgar enerjisinin ancak %10-30'u elektrik enerjisine dönüştürülebilir [92].

Eşitlik 3.15'de güç katsayısı gösterilmiştir. Buradaki güç katsayısı kanat açısı  $\beta$  ile kanat uç hız oranı  $\lambda$ 'nın bir fonksiyonudur. Buradaki  $\lambda_i$  değeri Eşitlik 3.16'dan elde edilir. Eşitlik 3.16'daki kanat uç hız oranı olan  $\lambda$  ise Eşitlik 3.17'den elde edilir [45, 78].

$$C_p = 0.5176 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (3.15)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{3\beta + 1} \quad (3.16)$$

Eşitlik 3.17'deki  $\omega_{\omega t}$ , açısal hız (rad/s),  $R$  ise kanat yarıçapını (m) ifade eder.

$$\lambda = \frac{\omega_{\omega t} R}{v} \quad (3.17)$$

Rüzgar türbininin gücü farklı matematiksel yöntemlerle modellenmektedir. Çalışmada kullanılan modelde rüzgar türbininin saatlik çıkış gücü türbinin süpürme alanına bağlı tutulmuştur. Bu noktada algorithmda dikkat edilmesi gereken; ilk olarak katalog verilerine göre ve saatlik rüzgar hızına göre 3.18, 3.19 ve 3.20 numaralı denklemde rüzgar türbininin ürettiği saatlik güç bulunur ( $P_{WTG}$ ), ardından denklem 3.21’de de gösterildiği gibi yazılım tarafından tahmin edilen rüzgar türbini süpürme alanına göre üretilen güç güncellenir.

$$P_r = \frac{1}{2} \times \rho_{hava} \times A_{in} \times V_r^3 \times C_p \quad (3.18)$$

Saatlik esen rüzgar hızına göre rüzgar türbininin gücü ilk olarak Eşitlik 3.18’de hesaplanacak ardından Eşitlik 3.19’daki rüzgar hız aralıklarına göre türbin çıkış gücü belirlenecektir [16, 93].

$$P_{WTG} = \begin{cases} 0, & V < V_{ci} \\ a \times V^3 - b \times P_r, & V_{ci} \leq V < V_r \\ P_r, & V_r \leq V \leq V_{co} \\ 0, & V > V_{co} \end{cases} \quad (3.19)$$

Burada a ve b katsayıları için aşağıdaki eşitlikler verilmiştir;

$$a = \frac{P_r}{V_r^3 - V_{ci}^3} \quad b = \frac{V_{ci}^3}{V_r^3 - V_{ci}^3} \quad (3.20)$$

Burada  $P_{WTG}$  saatlik rüzgar hızına göre gücü (W),  $P_r$  türbinin nominal gücünü (W),  $V_{ci}$  türbinin devreye girdiği hızı (m/s),  $V_r$  rüzgar türbininin nominal hızını (m/s) ve  $V_{co}$  rüzgar türbininin devreden çıktığı hızı (m/s) göstermektedir. Eşitlik 3.21 tahmin edilen yeni türbin alanına göre gücün güncellenmesi işlemi gösterir.

$$P_w = P_{WTG} \times \left( \frac{A_{es}}{A_{in}} \right) \quad (3.21)$$

Burada  $P_w$  rüzgar türbini çıkış gücünü (W),  $A_{in}$  başlangıçtaki rüzgar süpürme alanını ( $m^2$ ) ve  $A_{es}$  rüzgar türbininin yazılım tarafından tahmin edilen süpürme alanını ( $m^2$ )

göstermektedir.  $A_{es}$  , amaç fonksiyonu tanımlanırken  $A_{wt}$  olarak alınmıştır. Örnek vermek gerekirse 11 m/s hızda rüzgar estiği zaman seçilen türbin 10 kW'lık güce sahip olmaktadır. Ancak bu 44.156 m<sup>2</sup>'lik türbin süpürme alanı tahmin edildiği takdirde geçerlidir. Eğer yazılım tarafından 88.312 m<sup>2</sup>'lik (2x44.156 m<sup>2</sup>) bir alan tahmin edilirse otomatik olarak güç de iki katına çıkarak 20 kW olacaktır.

Optimizasyonda kullanılan 10 kW gücündeki rüzgar türbininin katalog değerleri Çizelge 3.5'te gösterilmektedir.

Çizelge 3.5. Rüzgar Türbini Katalog Değerleri.

Rüzgar Türbini Gücü (W)	10000
D (m)	7.5
P <sub>r</sub> (W)	10000
V <sub>r</sub> (m/s)	11
V <sub>ci</sub> (m/s)	2,5

### 3.4. BİYOKÜTLE ENERJİSİ

Fosil olmayan, yapısal olarak kimyasal enerjiye sahip tüm canlı veya ölü organik maddelere biyokütle denir ve biyoyakıt elde etmek için kullanılır [51]. Temelde biyoyakıtları; biyoetanol, biyodizel ve biyogaz olmak üzere üç başlık altında inceleyebiliriz. Biyoetanol, fermente olabilen şekerlerin mayalar vasıtasıyla alkole dönüştürülmesi ile elde edilen bir üründür [52]. Biyodizel; bitkisel veya hayvansal yağlardan kimyasal işlemlerle elde edilen, yalnız olarak ya da dizel yakıt ile karıştırılarak dizel motorlarda kullanılan bir biyoyakıttır [94]. Biyogaz ise organik maddelerin anaerobik fermantasyonu sonucunda ortaya çıkan gazların karışımı olarak tabir edilir [52]. Biyokütle enerji dönüşümü termokimyasal, biyokimyasal veya fizikokimyasal yollarla gerçekleşir.

Biyogaz, ağırlıklı olarak bileşenleri CH<sub>4</sub> ve CO<sub>2</sub> olan bir gaz karışımıdır. Biyogaz içerisindeki bu iki gazın oranı %98 civarındayken NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> gibi

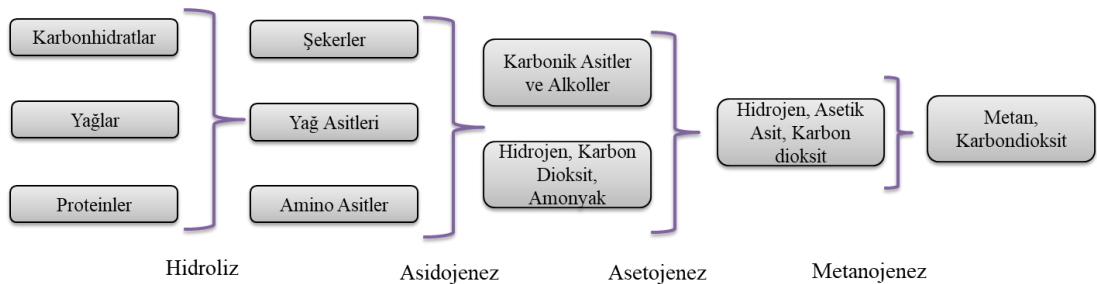
diğer gazların oranı %2 civarındadır [95]. Metan gazı  $0.75 \text{ kg/m}^3$  yoğunlukta, biyogazın yoğunluğu  $1.15 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Bunun nedeni karbon dioksitin metan gazından daha yoğun olmasıdır [96].

Biyogazın üretilmesi için organik madde, bakteri, anaerobik ortam ve ısı bileşenlerinin olması şarttır [97].

Biyogaz sıvılaştırılmış petrol gazı ve sıkıştırılmış doğal gaz gibi kokusuz ve is bırakmadan yanabilir. Bu diğer gazlardan farklı olarak biyogaz için YEK denmesinin nedeni ise çok düşük karbon salınımına sahip olması ve yaydığı karbon gazının zaten atmosfer çevriminin bir parçası olmasından dolayıdır [98].

Hayvan gübresi, enerji bitkileri, tarımsal atıklar ya da evsel atıklar gibi biyokütle kaynakları bir çürütücüde anaerobik çürütmeye (oksijensiz bozunma) tabii tutulur. Anaerobik çürütme sonrasında içeriği %60-%70 arasında metan, %20-%30  $\text{CO}_2$  olan biyogaz elde edilir.

Şekil 3.13'te biyogaz üretim süreçleri görülmektedir. Bunlardan hidroliz sürecinde uzun zincirli karbonhidratlar, proteinler ve yağlar kısa zincirli şekerlere, yağ asitlerine ve aminoasitlere dönüşür. Asidojenez sürecinde ise hidroliz fazında ortaya çıkan ürünlerin laktik, probiyonik, valerik ve bütirik asit oluşumu sağlanır. Asetojenez fazında bu asitler anaerobik bakteriler tarafından hidrojen, asetik asit ve karbon dioksit'e dönüştürülür ve metan gazı oluşumu için metan bakterilerine uygun ortam oluşturur. Son aşama ise metanojenez aşamasıdır ve metan gazı ile karbondioksitin oluşumunu gösterir [99].



Şekil 3.13. 4 Aşamada biyogaz üretim süreçleri.

Biyogaz ile elektrik üretimi diğer enerji kaynaklarından elektrik üretiminden biraz zordur. Bunun nedeni biyogazın elde edilmesi için birçok etken faktörün rol oynamasıdır. Biyogazın üretimi bakterilerin fonksiyonuna bağlı olduğu için sıcaklığın üretim üzerindeki etkisi çok büyüktür. Bakterilerin çoğalıp biyogaz üretmeleri için 30-40 °C arasındaki mezofilik bölgede ya da 50-60 °C arasındaki termofilik bölge arasında olması gerekmektedir. Termofilik bölgeyi elde edebilmek için ihtiyaç duyulan enerji yüksek olduğu için biyogaz tesisleri tarafından tercih edilmezler. Tesisler daha çok mezofilik bölgede üretim yaparlar. Ancak kış aylarında sıcaklığın çok düştüğü yerlerde psikofilik sıcaklık aralığı olarak da adlandırılan 15-20 °C arasında çalıştırılırlar [100]. Sıcaklığın yanında çürütücünün dizaynı, karbon/azot oranı, organik maddenin biyogaz potansiyeli, bakterinin konsantrasyonu, PH, yükleme hızı, karıştırma hızı gibi biyogaz üretimini etkileyen diğer faktörler mevcuttur [99].

### **3.4.1. Biyogaz Tesisleri**

Biyogaz tesisleri üzerinde çalışmalar uzun yıllardır devam etmektedir. Amaç her zaman daha fazla biyogazı daha kısa zamanda ve daha az substratla nasıl elde edilebileceği olmuştur. Bu yüzden gerek besleme yöntemleri gerekse reaktör teknolojileri üzerinde sürekli çalışmalar yapılmıştır, hala yapılmaktadır. Bu başlıkta besleme yöntemlerine göre ve reaktör tasarımlarına göre biyogaz tesisleri incelenmiştir.

#### **3.4.1.1. Besleme Yöntemlerine Göre Biyogaz Tesisleri**

Biyogaz tesisleri besleme yöntemlerine göre sürekli tip, yarı sürekli tip ve kesikli tip tesisler olarak kategorize edilebilir.

#### **Sürekli Tip Biyogaz Tesisleri**

Sürekli tip biyogaz tesislerinde gaz çıkışının başlamasıyla günlük besleme başlar. Biyogazı alınarak dışarı çıkarılan kısım kadar yeni karışım besleme tankına alınır. Küçük reaktörlerde organik madde günde bir kez ya da iki kez besleme tankına

eklenirken büyük reaktörlerde saatte bir besleme tankına eklenir. Organik atığın reaktörlerde genellikle 14-40 gün arasında kalması gerekmektedir [101]. Besleme sürekli olduğu için hem besleme tankındaki hem reaktörlerdeki karışım miktarı hem de günlük üretilen biyogaz miktarı yaklaşık olarak aynıdır. Sürekli tip beslemeli biyogaz tesisleri; tam karıştırmalı, fermantasyon kanallı ve tam karıştırmalı-fermantasyon kanallı olmak üzere üç tipi vardır. Bu tesislerin bir avantajı gaz üretimini sabit olmakla birlikte kesikli tip tesislerden biraz daha yüksektir. Diğer yandan organik maddenin daha az bozunmaya uğraması ve iz elementer bulunması nedeniyle gerçek verimi biraz daha düşüktür [101, 102].

### **Kesikli Tip Biyogaz Tesisleri**

Bu tip tesislerde üretim tankı bitkisel ve/veya hayvansal atıklar ile bir kere doldurulur ve sistemin dış ortamla izolasyonu sağlanır. Atıkların tanklardaki bekleme süresi; atılan organik atığın cinsine ve sistemin sıcaklığına göre değişmektedir. Kesikli tip tesisler katı sebze ve lifli hammaddeler gibi katılık özelliği yüksek olan atıklar için ve yağış miktarı az olan yerler için en uygun tesis tipidir [102]. Bu tesislerde reaktör başlangıçta biyogaz üretecek malzeme ile doldurulur. Gaz üretimi önce belirli bir süre artar ardından azalmaya başlar. Hızı belirli miktar azalmaya başladıktan sonra üretim işlem sona erdirilir ve reaktörler boşaltılıp tekrar doldurulur. Kesikli tip tesislerde gaz temininin sürekli elde edilebilmesi için birden fazla reaktöre ihtiyaç duyulabilir [101].

### **Yarı Kesikli Tip Biyogaz Tesisleri**

Yarı kesikli tip tesislerde tank başlangıçta yarıya kadar doldurulur ve geriye kalan yarısı fermantasyon süresi boyunca günlük olarak doldurulur. İşlemin sonunda reaktörler boşaltılıp temizlenip tekrar doldurulur. Örnek olarak bu tesis tipinde saman ile gübrenin karışımı fermente edilebilir. Saman yavaş fermente olan bir maddedir ve yılda iki kez beslenir. Gübre ise üzerine eklenerek düzenli olarak uzaklaştırılır [102].

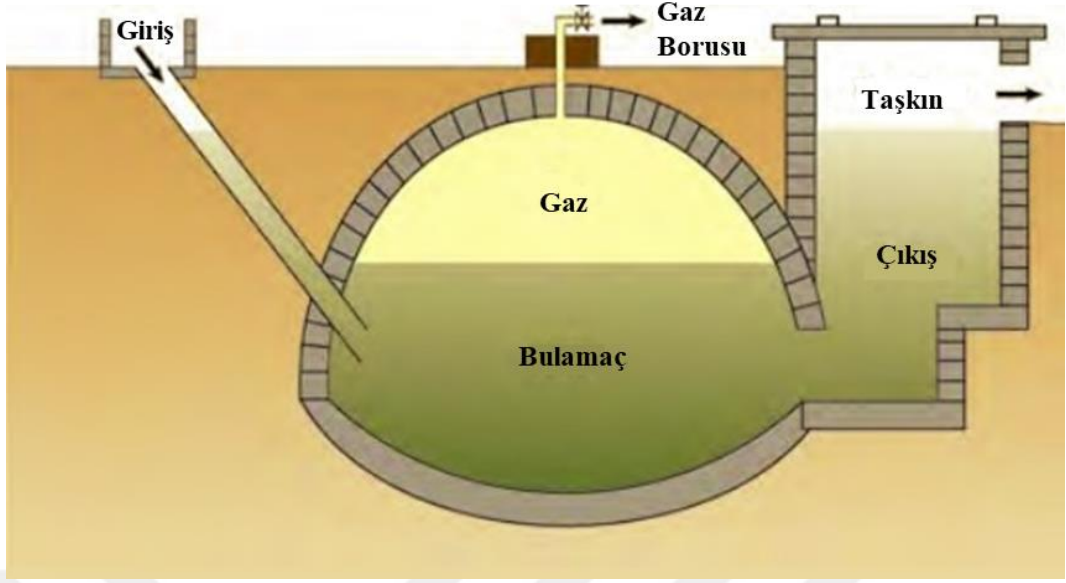


### 3.4.1.2. Reaktör Tasarımlarına Göre Biyogaz Tesisleri

Biyogaz tesisleri farklı özellikleri açısından gruplandırılabilir. Bunlardan bir tanesi de reaktör tasarımlarına göre yapılan gruplandırmadır. Biyogaz tesisleri reaktör tasarımlarına göre başlıca sabit kubbeli biyogaz tesisleri, hareketli kubbeli biyogaz tesisleri ve balon tipi biyogaz tesisleri olarak gruplandırılabilir. Bunların yanında daha birçok tesis tipi bu gruba eklenebilir. Ancak bu kısımda en sık kullanılan tipler anlatılacaktır.

#### Sabit Kubbeli Biyogaz Tesisleri

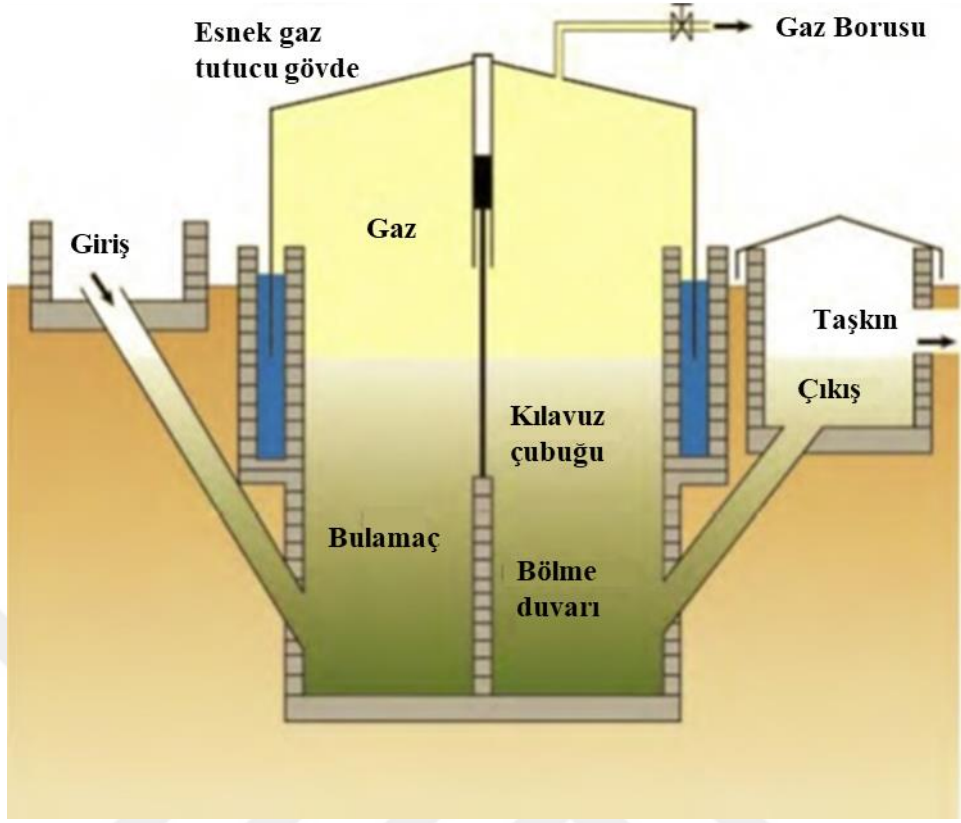
Sabit kubbeli biyogaz tesisi üzerinde kubbe şeklinde örtülmüş bir reaktör, sabit bir gaz deposu ve bir çukurdan oluşur. Şekil 3.14'te gösterilen bu tesis tipi Çin modeli olarak da adlandırılır ve 1936 yılının başlarında tasarlanmıştır. Bu reaktörler çimento ve tuğladan yapılır ve duvarları gaz geçirmeyecek şekilde parafinle kaplanır veya tamamen boyanır. Bu tesislerde oluşan gaz tankın üst kısmında toplanır. Eğer gaz basıncı 1 bar olan atmosfer basıncını geçerse ve reaktörden gaz çıkışı gerçekleşmezse gaz basıncı karışımı çukurun içerisine doğru iter. Gaz çıkışı gerçekleşince de bir miktar karışım tekrar reaktöre dolar. Bu tesislerde gaz deposu için çelik bir yapıya gerek kalmadığından dolayı çelik depo masrafından tasarruf edilmiş olur. Bu tesislerin kullanım süresi yaklaşık 20-50 yıl arasındadır. Sabit kubbeli tesisler gaz dolu üst reaktör boşluğunun üzerine kadar toprakla örtülmektedir. Reaktörün hacmi 20 m<sup>3</sup>'ü geçmesi istenmez ve bu durumda 3-4 m<sup>3</sup>'lük gaz deposu hacmine sahip olur [102, 103].



Şekil 3.14. Sabit kubbeli biyogaz tesisi [104].

### Hareketli Kubbeli Biyogaz Tesisleri

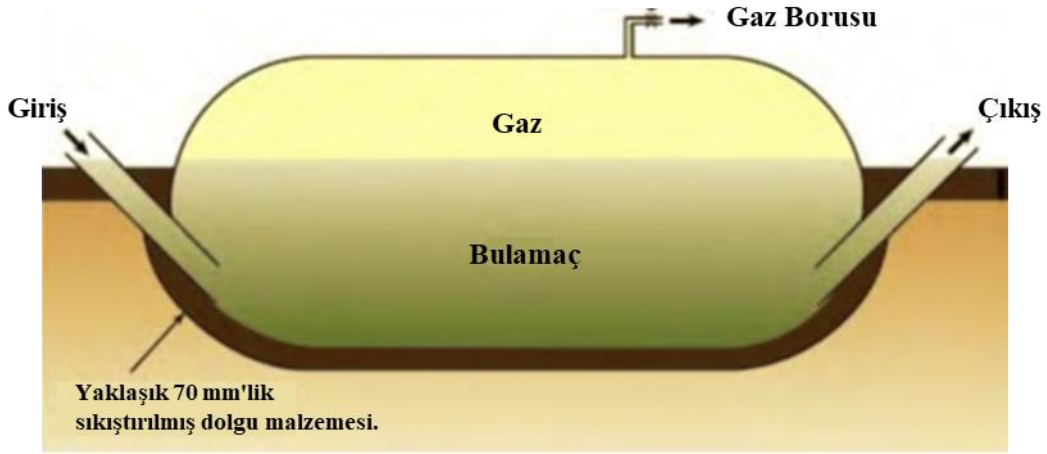
Hareketli kubbeli tipi tesisler ile ilgili çalışmalar ilk defa 1937 yılında Hindistan'da başlamıştır. Bu yüzden bu tipe Hindistan tipi reaktör de denilir. 1956 yılında Jashu Bhai J. Patel tarafından geliştirilerek Hindistan'da ve tüm dünyada kullanılmaya başlanmıştır. Tesis Şekil 3.15'te gösterilmiştir. Bu tesis tipi, silindirik bir gövde, gazometre, karışım çukuru ve çıkış çukurundan oluşur. Reaktörün duvarları tuğla ve çimento ile örülür. Silindirik kubbe metal levhalardan oluşur ve biyogazı depolayıp serbest bırakırken yukarı aşağı doğru hareket eder. Gaz yukarı doğru taşınırken bazı hafif karışım miktarını da yukarı yönlü taşır. Bu karışım tabakası, biyogazın silindirden çıkışını engelleyebilir. Sebze atıklarının kullanıldığı tesislerde bu sorun daha sık gerçekleşmektedir. Bu sorunun önüne geçebilmek için karışım bazı karıştırıcılar vasıtasıyla karıştırılabilir [101, 102].



Şekil 3.15. Hareketli kubbeli biyogaz tesisi [104].

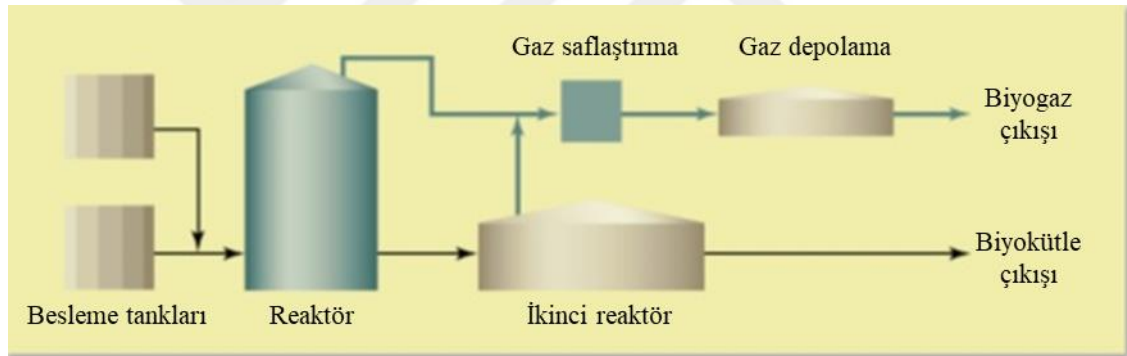
### Membran Tipi Biyogaz Tesisleri

Membran tipi tesis 1960'larda Tayvan'da sabit kubbeli ve hareketli kubbeli biyogaz tesislerinin eksiklerini giderebilmek adına keşfedilmiştir. Şekil 3.16'da gösterilen membran tipi tesislerin üst kısmı balonu andırır. Bu balon plastik veya kauçuktan yapılmıştır ve gazın toplandığı kısımdır. Hemen altında ise çürütücü kısım bulunmaktadır. Sabit ve hareketli kubbeli tesislerin aksine bu iki kısım aynı bölümdedir ve direk ilişki içerisinde. Gaz deposu tamamen dolduğunda sabit kubbeli tesis gibi çalışmasına devam eder. Balonun güneşin ultraviyole ışınlarından zarar görmeyecek şekilde olması gereklidir. Membran yapının yararlı kullanım süresi 2-5 yıldır [105].



Şekil 3.16. Membran tipi biyogaz tesisi [104].

Şekil 3.17'de tipik bir biyogaz tesisinin işlem akış şeması gösterilmektedir. Bu akış şemasında biyokütle sistemi ve biyogaz sistemi olarak iki adet çıktı vardır.



Şekil 3.17. Biyogaz tesisinin akış şeması [106].

### 3.4.2. Biyogaz Üretim Sistemi Tesis Bileşenleri

Biyogaz üretim sistemleri aslında iki görevi yerine getirmektedir. Bunlardan bir tanesi tesisin asıl kurulma maksadı olan biyogaz sistemi, diğeri ise organik gübrenin elde edildiği biyokütle sistemidir.

#### 3.4.2.1. Biyokütle Sistemi

Biyokütle sisteminin çıkış ürünü olan organik maddeler çiftçiler tarafından kullanılan gübredir. Hatta sistemin çıkışında elde edilen organik gübre biyogaz elde edilmemiş

ham gübreden daha faydalıdır. Bu yüzden biyogaz elde etmek için kurulan bir tesis daha yararlı gübre elde edilmesine de yol açmaktadır. Biyokütle sisteminin bileşenleri en basit haliyle; besleme tankı, reaktör tankı ve depolama tankından oluşmaktadır [107].

### **Besleme Tankı**

Temelde iki çeşit besleme tankı bulunmaktadır. Bunlar çamur ve gübre için olan besleme tankı ve organik endüstriyel atıklar için olan besleme tanklarıdır. Besleme tankının temel görevi tesisin haftanın yedi günü sürekli olarak çalışmasını sağlamak amacıyla tampon görevi görmektir. Ayrıca reaktöre gönderilen biyokütlenin homojen olarak gönderilmesi için besleme tanklarında biyokütle karıştırılır. Besleme tankları en az bir hafta yetecek şekilde atık tutma kapasitesine sahiptir ve endüstriyel tesislerde bu tank çok daha büyüktür. Tankların içerisinde belirli katmanların oluşmasını engellemek adına atıklar tamamen karıştırılır ve sıvı kalması gereken yağlı kısımlar ısıtılır. Besleme tankında zaman zaman kum ve benzeri partiküller oluşabilir ancak bunların tanktan arındırılması gerekmektedir. Bazı tesislerde besleme tankında karıştırma yapılmazken gerekli karıştırma işlemi besleme tankı ile reaktör arasında gerçekleştirilir. Besleme tankları çeşitli kokular yayabilir. Bu kokular farklı saflaştırma yöntemleriyle sistemden atılabilir. Ayrıca atıklar, besleme tankından reaktöre pompa vasıtasıyla aktarılır [96].

### **Reaktör Tankı**

Reaktör tankı, tamamen kapalı ve yalıtılmış olacak şekilde çelikten ya da hava geçirmezliği sağlanmış betondan yapılmaktadır. Biyokütle belirli bir ısıda tutulması gerekmektedir. Bunun için ısıtma bobinleri ya da harici bir ısı kaynağı ısı değiştiriciler vasıtasıyla kullanılabilir. Tank, tüm hacmi karıştırabilen bir karıştırıcı, taşma valfi, sıcaklık ve basınç göstergeleri ile donatılmıştır. Bunun yanında gaz boşaltımının yapılamadığı durumlarda basıncın aşırı artmasını engellemek için yüksek basınç valfi vardır. Üretilen biyogazın dışarı alınabilmesi için tankın üzerinde biyogaz çıkış noktası vardır. Reaktör tankı termofilik bir işlem için günlük biyokütle

giriş miktarının 10-20 katı, mezofilik işlem için günlük biyokütle giriş miktarının 15-25 katı kadar bir hacme sahiptir [96, 108].

### **Depolama Tankı**

Depolama tankının kullanılmasının amacı gübre haline gelen biyokütlenin nakledileceği noktaya gitmeden önce belirli bir alanda depolanmasıdır. Tank, yağmur suyunun girişini ve amonyak çıkışını önlemek için kısmen kapalıdır. Ancak hava geçirmezlik gibi bir özelliğe sahip değildir. Eğer biyokütlenin bu tankın içinde uzun süre kalma ihtimali varsa bu tankta da gaz çıkışı olacağı için çıkan gaz tekrar biriktirilebilir [96, 108].

#### **3.4.2.2. Biyogaz Sistemi**

Hem reaktör tankında hem de depolama tankında oluşan biyogaz ılıktır ve bu yüzden yüksek miktarda su buharı içerir. Biyogaz soğutulduğunda suyun çoğu yoğunlaşmamaktadır ve depolama tankına geri gönderilmektedir.

Biyogaz üretildikten sonra ısı ve buhar üretimi, elektrik üretimi, araç yakıtı, doğalgaz besleme hattı ya da kimyasal madde üretiminde kullanılabilir. Ancak tüm bu işlemlerde biyogazın üretildiği şekilde kullanılması mümkün değildir. Biyogazın bazı kullanımları için saflaştırma işlemi gerekmektedir. Saflaştırma işlemi sırasında biyogazın içerisindeki CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S ve H<sub>2</sub>O bileşenleri seyrekleştirilerek biyogaz içeriğindeki metan oranı artırılmış olur [109]. Biyogaz saflaştırma gereksinimi duyulan alanlar Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Biyogazın saflaştırılması için en çok kullanılan metotlar su ile temizleme, polietilen glikol ile absorblama, karbon moleküler elek kullanma ve membran ile ayırmadır [109]. Bunlardan su ile saflaştırma sistemin basit ve düşük maliyetli olmasından dolayı en çok kullanılan yöntemdir. Su ile saflaştırma esnasında CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>S'nin metana göre su içerisinde daha fazla çözünmesinden faydalanılır. CO<sub>2</sub>'nin sudaki çözünürlüğü göz önünde bulundurularak yapılan saflaştırma işleminden sonra oranı yaklaşık olarak %5-10 arasında düşer [110]. Diğer yandan H<sub>2</sub>S korozyona neden

olduğu için, kötü koktuğu için ve yakıldığında SO<sub>2</sub> ve SO<sub>3</sub>'e dönüştüğü için biyogaz içerisinde kullanım alanlarına göre istenmemektedir. Ayrıca H<sub>2</sub>S proses içerisinde anaerobik bakterilerin gelişimini de engellediğinden dolayı daha proses içinde engellenmesi gerekmektedir [111].

Çizelge 3.6. Kullanılan alanlara göre biyogaz saflaştırma gereksinimi [112].

Uygulama	H <sub>2</sub> S giderimi	CO <sub>2</sub> giderimi	H <sub>2</sub> O giderimi
Buhar kazanı	<1000 ppm	Hayır	Hayır
Mutfak ocağı	Evet	Hayır	Hayır
Gaz motoru (kojenerasyon)	<1000 ppm	Hayır	Hayır Yoğunlaşma
Araç yakıtı	Evet	Tavsiye edilir	Evet
Doğalgaz hattı	Evet	Evet	Evet

Biyogaz saflaştırıldıktan sonra depolanma ihtiyacı belirir. Bu yüzden genellikle biyogaz tesislerinde 2-24 saatlik biyogaz üretimi kadarlık bir depolama hacmi vardır. Biyogaz çok yer kapladığı için büyük depolama hacimleri yapmaktan kaçınılır [96].

Üretilen biyogaz doğal gaz yerine kullanılmak istendiği takdirde genellikle 5-20 km uzaklıktaki bir ısı ve güç santraline boru hatlarıyla taşınabilir.

### 3.4.3. Biyogaz Jeneratör Gücünün Matematiksel Modeli

Biyogaz jeneratör gücünün matematiksel modelinde güç; biyogaz jeneratörünün verimine, kullanılan biyogaz miktarına ve biyogaz alt ısı değerine bağlıdır. Biyogaz jeneratör gücünün matematiksel modeli Eşitlik 3.22'de verilmiştir [31, 113, 114].

$$P_{bg}(t) = \eta_{bg} \times Q_{bg}(t) \times LHV_{bg} \quad (3.22)$$

Burada  $P_{bg}$  biyogaz jeneratörünün saatlik gücünü (W),  $\eta_{bg}$  biyogaz jeneratörünün verimini,  $Q_{bg}(t)$  biyogaz tüketim miktarını (m<sup>3</sup>/h) ve  $LHV_{bg}$  biyogaz alt ısı değerini (kWh/m<sup>3</sup>) göstermektedir. Eşitlik 3.23  $LHV_{bg}$  değerinin metanın alt ısı değerinden

elde edilmesini ifade etmektedir.  $LHV_{bg}$  biyogazın içeriğindeki metan gazının alt ısı değeri ve metan oranından yola çıkılarak elde edilmektedir.

$$LHV_{bg} = \frac{P_{CH_4}}{100} \cdot LHV_{CH_4} \quad (3.23)$$

Eşitlik 3.24 saatlik tüketilen biyogaz miktarını ( $m^3/h$ ) göstermektedir.  $P_{bg,h}(t)$  biyogaz jeneratörünün “t” saatindeki çalışma gücünü (kW) ifade etmektedir.

$$Q_{bg}(t) = \frac{P_{bg,h}(t)}{\eta_{bg} \times LHV_{bg}} \quad (3.24)$$

Çizelge 3.7’de optimizasyonda kullanılan biyogaz jeneratörünün teknik özellikleri verilmektedir.

Çizelge 3.7. Biyogaz Jeneratörünün Teknik Özellikleri.

Parametre	Değer
Jeneratör Üreticisi	NPT
Model	10GFT
Alternatör Üreticisi	MBH(Germany)
Nominal Gücü (kW/kVA)	10/12.5
Nominal Hızı (r/min)	1500
Güç Faktörü	0.8

Çizelge 3.8’de çalışmada kullanılan değerler gösterilmiştir [31, 60, 115-119]. Bu değerler amaç fonksiyonundaki karar değişkenlerinin eşitliklerinde kullanılan sabit parametrelerdir.



Çizelge 3.8. Hibrit sistemin teknik ve ekonomik parametreleri.

Parametreler	Birim	Değer
Faiz Oranı (i)	-	0.1
Projenin Ömrü (N)	yıl	25
Enflasyon Oranı	-	0.0805
FV Sistemin Eskalasyon Oranı	-	0.09
Rüzgar Türbini Eskalasyon Oranı		0.09
Biyogaz Sistemin Eskalasyon Oranı	-	0.05
FV Sistemin Yatırım Maliyeti ( $\alpha_{pv}$ )	(\$/m <sup>2</sup> )	234
FV Sistemin Yıllık İşletme ve Bakım Maliyeti	(\$/m <sup>2</sup> /yıl)	0.011 x $\alpha_{pv}$
FV Sistemin Hurda Fiyatı	(\$/m <sup>2</sup> )	0.2 x $\alpha_{pv}$
Maksimum Güç Sıcaklık Katsayısı ( $K_p$ )	(%/°C)	-0.42
Standart Test Şartlarındaki Sıcaklık ( $T_R$ )	(°C)	25
Nominal Hücre İşletme Sıcaklığı (NOCT)	(°C)	20
Rüzgar Türbini Yatırım Maliyeti $\alpha_{wt}$	(\$/m <sup>2</sup> )	480
Rüzgar Türbini Hurda Fiyatı	(\$/m <sup>2</sup> )	0.1 x $\alpha_{wt}$
Rüzgar Türbininin Yıllık İşletme ve Bakım Maliyeti	(\$/ m <sup>2</sup> /yıl)	0.0109 x $\alpha_{wt}$
Biyogaz Sisteminin Yatırım Maliyeti $\alpha_{bg}$	(\$/kW)	2438.45
Biyogaz Sisteminin Yıllık Sabit İşletme ve Bakım Maliyeti	(\$/kW/yıl)	0.045x $\alpha_{bg}$
Biyogaz Sisteminin Yıllık Değişken İşletme ve Bakım Maliyeti	(\$/kWh/yıl)	0.0351
Biyogaz Sisteminin Yakıt Maliyeti	(\$/m <sup>3</sup> /yıl)	0.1657
Biyogaz Sisteminin Hurda Fiyatı	(\$/kW)	0.3 x $\alpha_{bg}$
Biyogaz Jeneratörünün Elektriksel Dönüşüm Verimi	-	0.41
Metan Alt Isıl Değeri	(kWh/m <sup>3</sup> )	10
Biyogazdaki Metan Oranı	-	0.64
Biyogaz Alt Isıl Değeri	(kWh/m <sup>3</sup> )	6.4
FV Panelin Maksimum Sayısı ( $N_{module}^{max}$ )	(m <sup>2</sup> )	1000
Rüzgar Türbini Maksimum Süpürme Alanı ( $A_{wt}^{max}$ )	(m <sup>2</sup> )	1000
Biyogaz Jeneratörünün Maksimum Gücü ( $P_{bg}^{max}$ )	(kW)	100
Maksimum Güç Kaynağı Kaybı Olasılığı ( $GKKO^{max}$ )	-	0.01

## 3.5. KULLANILAN METASEZGİSEL YÖNTEMLER

### 3.5.1. Genetik Algoritma

Evrimsel hesaplamaların bir parçası olan Genetik Algoritma Darwin'in evrim teorisinden esinlenerek ortaya çıkmıştır. Evrimsel hesaplama algoritmaları; genetik algoritmalar, evrimleşme stratejileri, genetik programlama, evrimsel programlama ve diferansiyel gelişim algoritmaları (DGA) olarak sayılabilir. Bunlardan evrimleşme stratejileri, hem gerçek parametre, hem de ayrık eniyileme problemlerinde kullanılır. Evrimleşme stratejileri yeni bireyleri oluşturabilmek için sadece mutasyon operatörünü kullanır [120]. Evrimsel programlama Fogel tarafından geliştirilmiştir. Yeni bireylerin elde edilmesi için mutasyon operatörü kullanılırken çaprazlama operatörü kullanılmaz [121]. Genetik programlama ise Cramer tarafından GA'da ağaç yapısının kullanılmasıyla başlayan çalışmalar sonrasında Koza'nın 1992'de genetik programlama adlı kitabıyla literatüre kazandırılmıştır. Genetik programlama teknik olarak genetik algoritmanın bir uzantısı olarak görülebilir ve genetik algoritmaların programlara uygulanmasıdır. Genetik programlamada bireyler ağaç formuyla temsil edilir [121]. 1995 yılında Storn ve Price tarafından bulunan diferansiyel gelişim algoritması ise popülasyon tabanlı sezgisel bir algoritma olmakla beraber düzenlenmiş bir uzayda tanımlı ve gerçek değerli parametreleri içeren fonksiyonları optimize etmek amacıyla kullanılan bir algoritmadır [122].

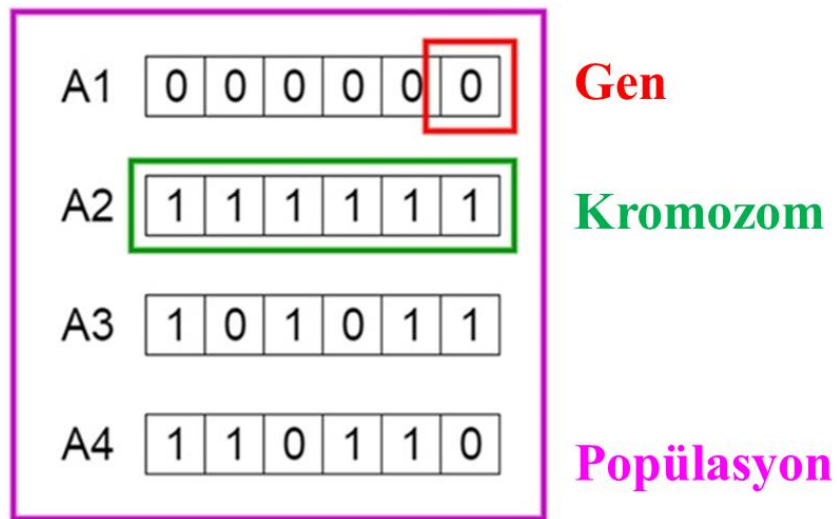
GA ilk defa 1975 yılında Michigan Üniversitesi'nden psikolog ve bilgisayar bilimleri uzmanı olan J.H. Holland tarafından ortaya konmuştur [123]. Geçen 20-30 yılda evrim prensibine dayalı algoritmalara olan ilgi artmış ve bu konularla ilgili literatürdeki çalışmaların sayısı hızla çoğalmıştır [124]. GA şu ana kadar en çok geliştirilmiş ve en yaygın olarak kullanılan optimizasyon tekniklerinden biridir. Holland'ın keşfi sonrası 1989 yılında Goldberg 83 farklı uygulamayı GA yöntemine göre çözerek GA'nın farklı uygulama alanlarında araştırılabilirliğini ortaya koymuştur. Sayısal parametrelerin kullanıldığı problemlerin çözümü esnasında GA'larda ikili tamsayılarla çalışmasından ötürü temsil yeteneğinin kısıt olduğu görülmüştür. 1992 yılında Zbigniew Michalewicz bu problemi aşarak çok önemli bir adım atmıştır [125].

Genetik algoritmada başlangıç popülasyonunun oluşturulması, boyutunun belirlenmesi, çaprazlanması ve mutasyona uğraması üzerinde durulmaktadır [126]. GA'lar çözüm alanı geniş, problemi etkileyen parametrelerin çok fazla olduğu ve matematiksel modeli kurulamayan problemlerin çözümünde etkin olarak kullanılmaktadır [127].

Genetik algoritmaların çalışma prensibine geçmeden önce algoritmada sıklıkla kullanılan terimlerin ve algoritmanın performansı üzerinde etkili kontrol parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir. Genetik Algoritmalarda kullanılan bazı temel kavramlar aşağıda açıklanmıştır [128]:

- **Gen:** Genetik bilgiyi taşıyan en küçük yapıdır.
- **Kromozom:** Genlerin bir araya gelmesiyle oluşan ve çözümü ifade eden dizidir. Problemin muhtemel çözümlerini temsil ederler.
- **Popülasyon:** Kromozomların bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Kromozom çözümü temsil ederken popülasyon bu çözüm yığınlarını ifade eder.
- **Uygunluk Değeri:** Her bir kromozomun çözüm için gösterdikleri başarıyı gösteren değerdir.

Gen, kromozom ve popülasyonun arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılması için Şekil 3.18'e bakılabilir.



Şekil 3.18. Gen, Kromozom ve Popülasyon gösterimi [129].

### 3.5.1.1. Kromozomun Kodlanması

Kromozomların kodlanması GA'da ilk düşünülmesi gereken sorunlardan bir tanesidir. Çünkü standart bir kodlama yöntemi yoktur. Yani probleme uygun olan kodlama yönteminin seçilmesi gerekmektedir. Aşağıda kodlama yöntemleri açıklanmıştır [130].

#### İkili Kodlama

İkili kodlamada her kromozom 0 ve 1'lerden oluşan bir bit dizisidir ve ikili diziyle ifade edilir. GA'da en çok kullanılan kodlama yöntemidir. Bu dizinin tamamı bir sayıya karşılık gelmektedir ve Şekil 3.19'daki gibi gösterilmektedir.

10011001

Şekil 3.19. İkili kodlama örneği.

#### Permütasyon Kodlama

Burada her sayı ayrı geni temsil eder ve permütasyon problemlerinde kullanılır. Optimizasyon deyince ilk akla gelen Gezgin Satıcı Problemi ve sıralama problemlerinin çözümü için uygun olan yöntemdir. Şekil 3.20'de permütasyon kodlama tekniği gösterilmiştir.

921763854

Şekil 3.20. Permütasyon kodlama örneği.

#### Değer Kodlama

İkili kodlamanın kullanılmasının zor olduğu problem türlerinde; kompleks sayılar, kompleks nesnelere, gerçel sayılar ve karakter gibi nesnelere kullanılan kodlama

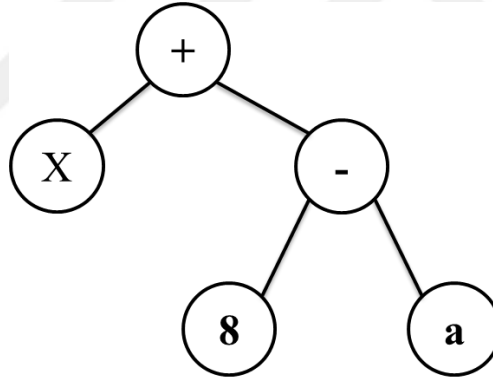
biçimidir. Şekil 3.21’de gösterildiği gibi buradaki her kromozom bir değerler dizisidir.



Şekil 3.21. Değer kodlama örneği.

### Ağaç Kodlama

Ağaç kodlama program ve ifadelerden oluşarak genelde genetik programlamada kullanılır. Bu kodlamada her kromozom bir ağaç yapısından oluşur ve nesnelere nesnelere arasındaki işlemleri içerir. Ağaç kodlamada çaprazlama ve mutasyon işlemleri çok kolay şekilde uygulanabilir. Ağaç kodlama Şekil 3.22’de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Ağaç kodlama örneği.

### 3.5.1.2. Genetik Algoritma Operatörleri

Genetik algoritma operatörleri bireyler üzerinde işlem yapmaya yaramaktadır ve şimdiye kadar üzerinde çok fazla çalışma yapılmıştır. Farklı kaynaklarda bu operatörlerin sayısı artırılrsa da çaprazlama ve mutasyon en temel iki operatördür. Çaprazlama ve mutasyon yöntemleri ve oranlarının problemin çözümüne yönelik doğru şekilde belirlenmesi, çözümün kalitesine doğrudan yansır.

## **Çaprazlama Operatörü**

Çaprazlama işlemi, eski kromozomların çaprazlanması ile daha iyi ve yeni kromozomlar elde etme işlemidir. Çaprazlama işleminde kodlama türlerine göre farklı çaprazlama yöntemleri mevcuttur. Kodlama türü belirlendikten sonra uygun bir çaprazlama yöntemi seçilir ve ebeveyn kromozomunun genleri bu seçilen yöntem doğrultusunda kendi aralarında yer değiştirerek yeni çocuklar oluşturur.

Çaprazlama oranının yüksek olması araştırma uzayının çok hızlı araştırmasına sebep olmaktadır. Oranın aşırı yüksek olması durumunda iyi bireylerin yapılarının bozulmasından dolayı kuvvetli bireylerin üretilmesi sekteye uğrar. Bu da GA'nın performansı düşürmektedir. Çaprazlama oranının düşük olması durumunda az miktarda yeni bireyler jenerasyona dahil olduğundan tekrar üreme operatörü etkili olmakta ve araştırmanın yakınsama hızı düşmektedir. Çaprazlama oranı genel olarak 0.6-0.9 aralığında olması önerilir [128].

## **Mutasyon Operatörü**

Mutasyon, araştırma uzayına yeni bölgelerin katılmasını sağlamaktadır. Mutasyon esnasında belirli bir orana göre kromozomdaki genlerin yeri değiştirilir. Belirlenen bu oran mutasyon oranı olarak adlandırılır. Mutasyon oranının düşük olması, araştırma uzayının tamamının araştırılmasına engel olacaktır. Bu da yerel çözümlerde takılmalara sebep olabilir [131]. Mutasyon oranının yüksek olması ise araştırmaya rasgelelik kazandıracak ve kromozomları değiştirecektir. Popülasyonun gelişmesine değil tahribatına neden olacaktır [132]. Mutasyon oranı genellikle 0.001-0.01 aralığında alınmaktadır [130].

### **3.5.1.3. Popülasyon Büyüklüğü**

Popülasyon büyüklüğü, popülasyonda kaç kromozom olduğunu ifade etmektedir. Popülasyon büyüklüğünün seçimi GA kullanıcıları için önemli bir parametredir. Popülasyon büyüklüğünün aşırı küçük alınması araştırma uzayının yetersiz örneklenmesi sonucuna sebep olacaktır. Bu da alanın sadece küçük bir kısmının

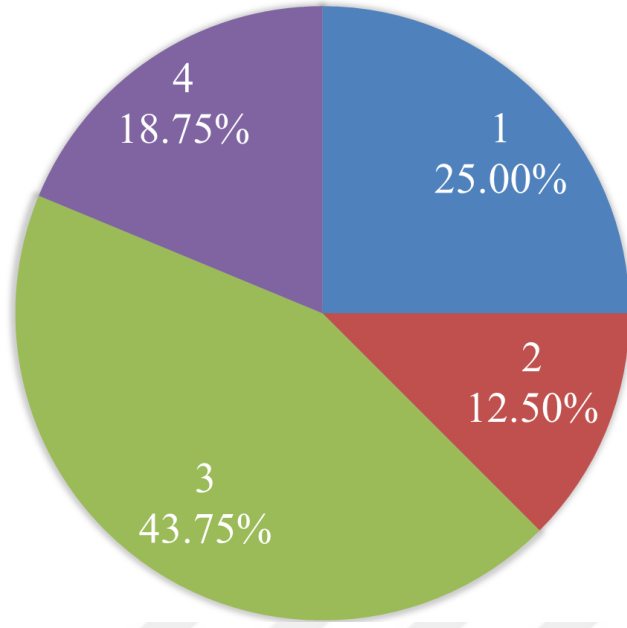
araştırılabilmesine ve yerel optimum noktaya yakalanma olasılığının artmasına neden olacaktır. Popülasyon büyüklüğünün aşırı büyük alınması durumunda algoritma oldukça yavaşlayacaktır. Çünkü neslin evrimleşmesi oldukça uzun bir süreye ihtiyaç duymaktadır. Gerçek zamanlı problemlerde bu hiç istenmeyen durumdur. Genellikle popülasyon büyüklüğü 30 ile 100 arasında belirlenmektedir [128, 133].

#### **3.5.1.4. Seçme İşlemi**

Seçme işlemi kalitesi yüksek olan bireylerin popülasyon içerisindeki yerini tutup, kalitesi düşük olan bireylerin yok edilmesidir. Popülasyon büyüklüğü sabit kalacağı için bu seçme ve eleme işlemi gereklidir [128, 133]. Hangi bireylerin yani kromozomların gelecek nesle aktarılıp hangilerinin eleneceğini belirleyen birtakım yöntemler geliştirilmiştir.

#### **Rulet Tekerliği**

Bireylerin uygunluk değerine göre seçilme işleminin yapıldığı yöntem rulet tekerleği yöntemidir. En büyük uygunluk değerine sahip bireyin seçilme ihtimali yüksek olsa bile seçilme garantisi yoktur. Bu yöntemde tüm bireylerin uygunluk değerleri yani kalitesi toplanır ve toplam uygunluk değerine bölünür. Böylece her bireyin seçilme olasılıkları ortaya çıkmış olur. Seçim yapılırken tüm olasılıklar sırayla rasgele bir sayıya kadar birbirine eklenir. Rasgele belirlenen sayıya ulaşıldığında ya da geçildiğinde, son eklenen sayıya ait olan çözüm seçilmiş olur. Rulet tekerleği seçiminde uygunluk değerlerinin pozitif olması istenir. Çünkü olasılıkların negatif olması o bireyin seçilmeyeceği anlamına gelir. Eğer negatif uygunluk değerleri çoğunluktaysa, yeni oluşturulan bireyler yerel çözüm noktalarında takılıp kalırlar. Bu sorunu çözmek için uygunluk ölçeklendirme yöntemi kullanılır [130]. Şekil 3.23'te rulet tekerleği görülmektedir. Bu örneğin kalitesi ve seçilme oranları da Çizelge 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.23. Rulet Tekerleği [133].

Çizelge 3.9. Rulet seçme tekniği [133].

Sayı	Dizi	Kalitesi	Toplam
1	00110	100	%25
2	01010	50	%12.5
3	10110	175	%43.75
4	10010	75	%18.75
<b>Toplam</b>		400	100

### Sıralama Seçimi

En iyi bireyin uygunluk değeri diğer bireylerden çok yüksek ise rulet tekerleği tekniği problemlere yol açabilir. Çünkü diğer bireylerin seçilme şansı çok az olacaktır. Sıralama seçimi bu sorunun üstesinden gelmektedir. Bu seçim yönteminde en kötü bireyden en iyi bireye kadar sıralama yapılır ve her bireyin sıra numarası, o bireyin uygunluk değerini gösterecektir. Örneğin en kötü uygunluk değerine sahip birey 1 uygunlukta, en kötü 2. Birey 2 uygunlukta ve en iyi birey de popülasyon sayısı kadar uygunlukta olacak şekilde uygunluk değerleri oluşturulur. Bu yöntem



tüm bireylere seçilme şansı verecektir. Fakat bu yöntemde en iyi birey ile kötü bireyler arasında oransal olarak çok fazla fark olmadığı için çözüme ulaşılması biraz zaman alacaktır [130].

### **Sabit Durum Seçimi**

Bu seçim yönteminde en büyük uygunluk değerine sahip birkaç kromozom seçilerek yeni nesiller oluşturulur, yeni oluşturulan nesil sayısı kadar en kötü uygunluk değerine sahip kromozomlar elenir. En iyi ve en kötü kromozomların haricindeki orta uygunluk değerlerine sahip kromozomlar değiştirilmeden bir sonraki nesle aktarılır [130].

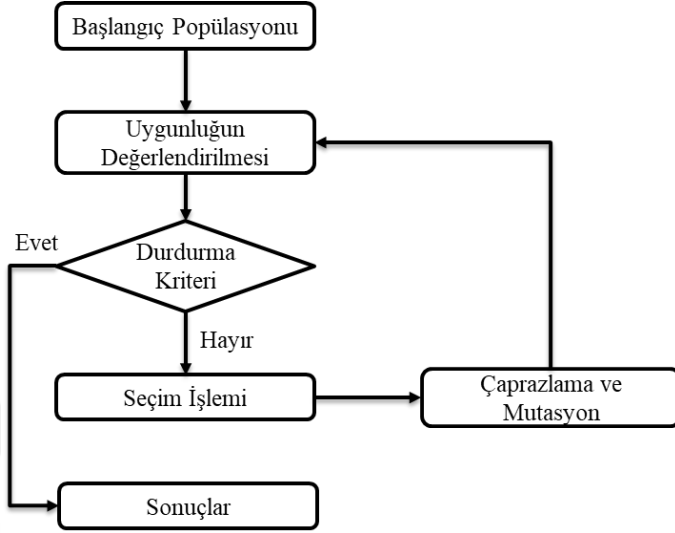
#### **3.5.1.5. Elitizm**

Çaprazlama ve mutasyon işlemlerinin en iyi kromozomlara uygulanması, bu kromozomların yeni nesillere aktarılamaması sorununu beraberinde getirecektir. Böylece bir daha o neslin elde edilememesi ya da iyi nesiller elde edilmesi işlemlerinin uzaması söz konusudur. Elitizmde en iyi birkaç kromozom seçilerek bir sonraki nesle aktarılır. Geri kalan nesillere ise seçme yöntemlerinden bir tanesi uygulanır. Elitizmde bulunan en iyi sonuç korunduğu için genetik algoritmanın performansını ve hızını artırır.

#### **3.5.1.6. Genetik Algoritmanın Çalışma Prensibi**

Şekil 3.24'te Genetik Algoritma için evrimleşme döngüleri görülmektedir ve bu kısımda anlatılan işlemler özetlenmiştir. Optimizasyonun başlamasıyla birlikte araştırmacı tarafından belirlenen sayıda başlangıç popülasyonu oluşturulur. Oluşturulan popülasyondaki kromozomların durdurma kriterini sağlayıp sağlamadığına bakılır. Eğer durdurma kriteri sağlanmışsa sonucu bize verir. Eğer durdurma kriteri sağlanmamışsa yukarıda verilen seçim işlemlerinden biri ile seçim gerçekleştirilir. Ardından seçilen kromozomlar çaprazlama ve mutasyon operatörüne tabi tutulur. Sonrasında çaprazlama ve mutasyon sonucu oluşan yeni bireylerin uygunluğu değerlendirilir. Uygunluğu değerlendirilen yeni bireylerin durdurma

kriteri olarak belirlenen kriterleri sağlayıp sağlamadığına bakılır. İşlem bu şekilde devam eder. Eğer durdurma kriteri belirli bir iterasyon sayısı girilerek belirlendiyse, sonuç kabul edilebilir dahi olsa iterasyon sayısı tamamlanmadan işlem sona ermez.



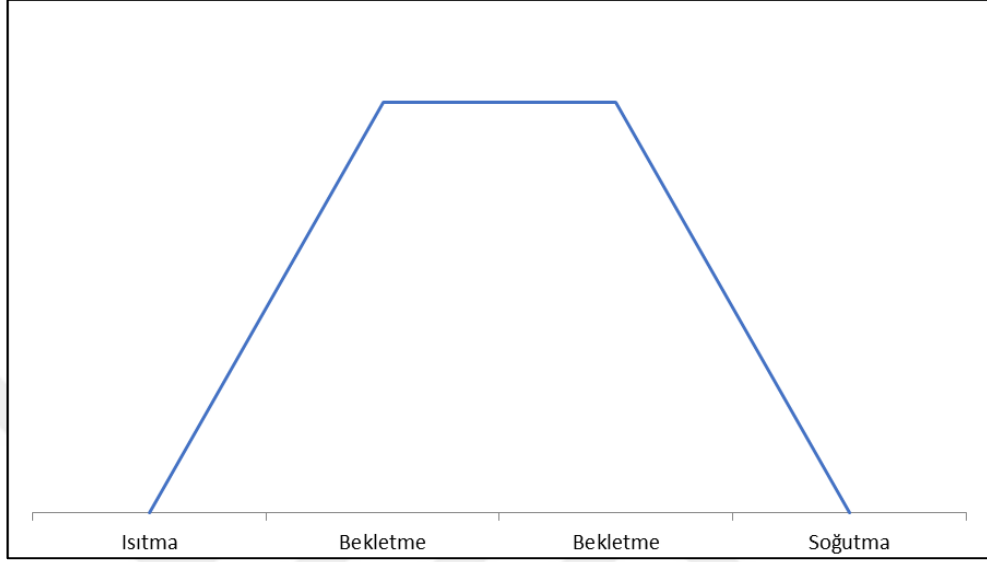
Şekil 3.24. Genetik Algoritmada akış diyagramı [134].

### 3.5.2. Isıl İşlem Algoritması

Isıl işlem, metal malzemelerin katı hallerindeki sıcaklık değişimleri ile bir ya da birbirine bağlı birkaç işlemle amaca uygun özellik değişmelerinin sağlanması olayı olarak ifade edilir. Bu tanıma göre metal malzemeler ısıl işlem vasıtasıyla belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır (ısıtma), ısıtılan sıcaklıkta belirli bir süre bekletilir (bekleme) ve malzemenin sıcaklığı belirli bir stratejiye dayanarak oda sıcaklığına kadar soğutulur (soğutma). Bu üç aşama vasıtasıyla malzemedeki özellik değişimleri sağlanır. Soğutmanın sıfır derecenin altındaki bir sıcaklık noktasına kadar sağlanması, derin soğutma olarak adlandırılır [135].

Isıl işlemde öngörülen en yüksek ısıtılma noktası ısıtma sıcaklığı ya da işlem sıcaklığı olarak adlandırılır. Isıl işlemin çeşidine göre bu sıcaklığa tavlama sıcaklığı, sertleştirme sıcaklığı, ostenitleştirme sıcaklığı, meneviş sıcaklığı, ani soğutma sıcaklığı veya yaşlandırma sıcaklığı da denir [133].

Metallerde ısıtma işlemi amacı; yumuşaklığı, dayanıklılığı artırmak, stresi azaltmak ve belirli bir mikro yapıyı oluşturmaktır [136]. Şekil 3.25'te ısıtma işlemi uygulanması esnasındaki sıcaklık değişimi görülmektedir.



Şekil 3.25. Isıtma işlemi uygulanması esnasındaki sıcaklık değişimi.

Metal maksimum sıcaklığa kadar ısıtıldığında kristalin tüm molekülleri kendilerini rasgele sıvı faza ayarlar. Sonra erimiş kristalin sıcaklığı uygun bir yöntemle azaltılarak seçilen alt sıcaklığa göre soğutulması kristal yapının çok düzenli bir şekilde oluşmasını sağlar. Sıcaklığın yavaş yavaş düşürülmesi esnasında parçacıkların enerjilerinde de düşüş sağlanır. Atomlar her yeni enerji düzeyinde kendilerini tekrar düzene koyarlar. Soğutma işlemi, dış sıcaklık ani şekilde düşürülmek suretiyle yapılırsa her bir sıcaklık değeri için kristalin termal dengeye erişmesine müsaade edilmediği için kristal yapıda geniş dağılımlı düzensizlikler ve yapısal bozukluklar meydana gelir. Diğer bir deyişle süper kafes oluşmaz, atomlar düzensiz olarak dağılır. Bu da metalde şekil bozukluğuna hatta çatlamalara neden olur. Süper kafesin oluşturulabilmesi için metalin yavaş soğutulması şarttır. Ayrıca tavlama sıcaklığı artırılarak bu işlem hızlandırılabilir [133, 136].

Kirkpatrick ve arkadaşları optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanmak üzere Isıtma işlemi uygulamasından faydalanmak adına birtakım çalışmalar yapmıştır. Çalışmalarının sonunda ortaya koydukları ısıtma işlemi algoritması, metallerin ısıtma

işleminden yani tavlama işleminden esinlenerek optimizasyon problemlerinin çözümünü gerçekleştirmişlerdir [137].

Isıl işlem algoritmasında bir problemin minimum ya da maksimum yapılması için algoritma dizaynında karar verilmesi gereken iki adet kavram vardır [138]:

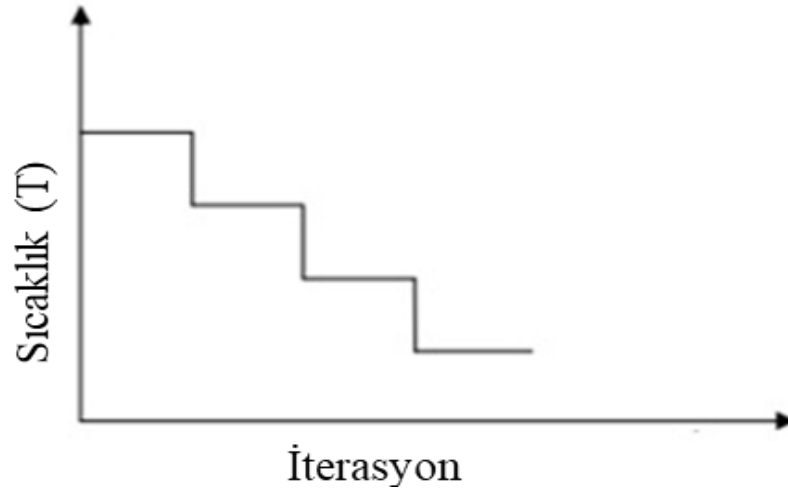
1. Probleme özgü seçimler: Mümkün olan çözümlerin kümesi tanımlanacak şekilde problem formüle edilir. Minimize edilecek bir amaç fonksiyon değeri ve komşuluk üretim mekanizması belirlenir ve başlangıç çözümü oluşturulur.

2. Soğutma planına ait seçimler: Sıcaklık parametresi olan  $T$ 'nin başlangıç değeri, soğutma oranı ve güncelleme kuralı, her sıcaklıktaki iterasyon sayısı ve algoritmanın durdurma kriterine karar verilir.

Isıl işlem algoritmasının performansı büyük oranda seçilen soğutma planına bağlıdır [139]. Uygun bir soğutma tekniği ile gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebilmektedir. Literatürde farklı soğutma teknikleri mevcuttur. Aşağıda soğutma teknikleri incelenmiştir.

### **3.5.2.1. Basamak Tipli Sıcaklık Düşürme Stratejisi**

Basamak tipli sıcaklık düşürme stratejisinde sıcaklık bir kademe düşürülmeden önce verilen sıcaklık değerinde sabit bir Markov zincir uzunluğunun ( $L$ ) uygulandığı uygulamaları içermektedir [133]. Bu uygulamada başlangıçta  $T_b$  sıcaklığı yüksek bir değer seçilir ve son sıcaklık olarak belirlenen  $T_s$  sıcaklığına kadar basamak halinde düşürülür. Şekil 3.26'da iterasyona bağlı sıcaklık grafiği görülmektedir.



Şekil 3.26. Basamak tipli sıcaklık düşürmede iterasyona bağlı sıcaklık grafiği.

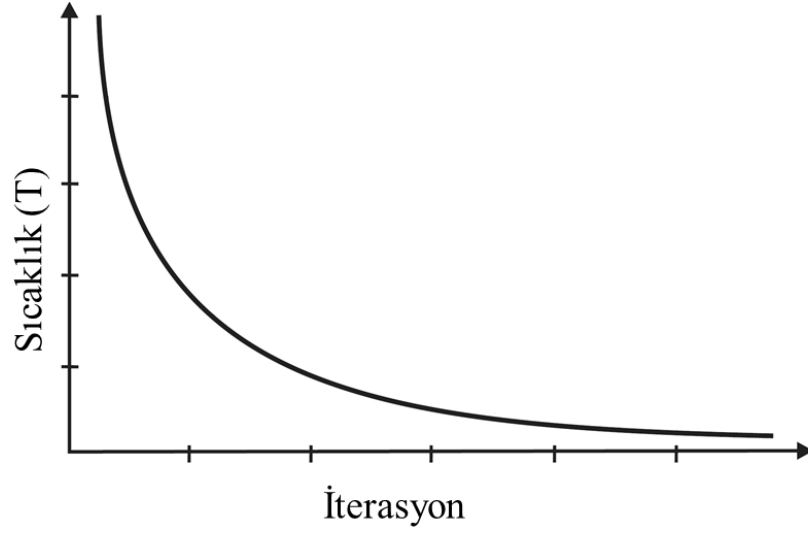
Basamak tipli stratejide genellikle geometrik sıcaklık düşürme kuralı kullanılmaktadır. Bu kuralda değişiklik Eşitlik 3.25'te gösterildiği gibi sağlanmaktadır.

$$T_{k+1} = cT_k \quad k=0,1,2,\dots \quad (3.25)$$

Buradaki  $c$  sıcaklık faktörüdür ve genellikle 0.5 ile 0.99 arasında alınır. Kirkpatrick ve arkadaşları bu kuralda  $c$ 'yi 0.90 ve sıcaklık süresini  $L=n$  olarak almışlardır [137]. Burada  $n$  problemdeki değişkenlerin sayısıdır. Sonrasında bu kural Johnson ve arkadaşları tarafından da kullanılmıştır ve onlar  $L = m|N|$  olarak almışlardır. Buradaki  $m$  bir sabit ve  $|N|$  ise komşuluğu beklenen büyüklüğüdür [138].

### 3.5.2.2. Sürekli Sıcaklık Düşürme Stratejisi

Sürekli sıcaklık düşürme stratejisinde sıcaklık her iterasyondan sonra düşürülür. Şekil 3.27'de sıcaklığın düşürülme eğrisi verilmiştir. Lundy ve arkadaşı bu stratejiye dayalı çalışma yapmıştır [140]. Lundy ve arkadaşının çalışmasında sabit azalma oranı ve üstel sıcaklık yenileme kuralı kullanılmıştır. Bu metodun avantajı da sıcaklık süresinin optimal büyüklüğü ile ilgili bir şey düşünülmemesidir.  $L=1$ 'dir yani her iterasyonda bir kere düşer.



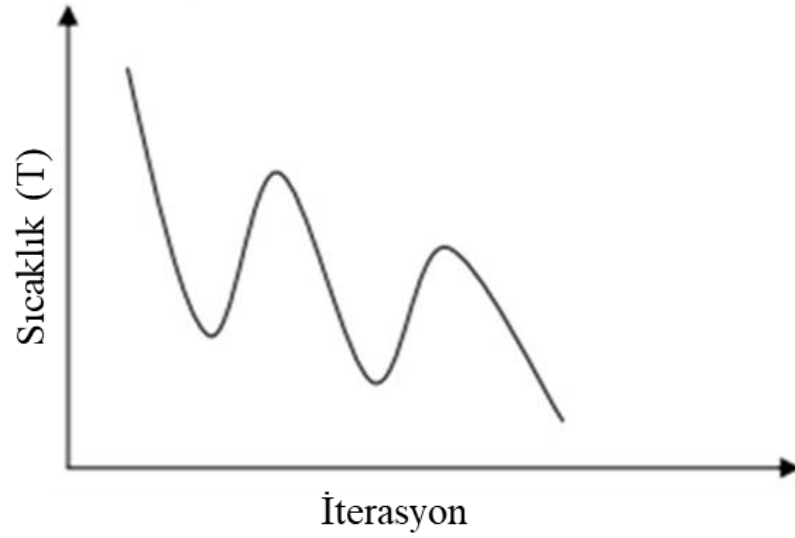
Şekil 3.27. Sürekli sıcaklık düşürmede iterasyona bağlı sıcaklık grafiği.

Bu stratejide sıcaklık düşürülürken sabit bir azalma oranı ( $\beta \ll 1/U$ ) kullanılır ve her bir iterasyonda sıcaklık ardışık şekilde daha az miktarda azalır. Sıcaklık Eşitlik 3.26'daki kurala göre yenilenir [133]:

$$T_{k+1} = T_k \cdot (1 + \beta \cdot T_k)^{-1} \quad k=0,1,2,\dots \quad (3.26)$$

### 3.5.2.3. Monoton Olmayan Sıcaklık Düşürme Stratejisi

Bu stratejide komşuluk araştırmasının ardından herhangi bir hareket kabul edilmezse sıcaklık artışı gerçekleşmektedir. Çünkü sıcaklık düşürme işe yaramayacak diye düşünülür [133]. Bu strateji Osman tarafından geliştirilmiştir ve önceki yöntemlerin dezavantajlarından biri olan mevcut çözümün önceki çözümden daha kötü olduğu durumların oranını düşürmek için ortaya atılmıştır [141]. Şekil 3.28'de sıcaklık grafiği gösterilmiştir.



Şekil 3.28. Monoton olmayan sıcaklık düşürmede iterasyona bağlı sıcaklık grafiği.

Bu stratejide sıcaklık başlangıçta  $T_{\text{tekrar}}=T_s/\mu$  değerine set edilir. Burada  $\mu$  2'ye eşit ya da daha büyük bir değer seçilen bir sabittir. Daha sonraki setlemelerde  $T_{\text{tekrar}}$  değeri  $T_{\text{tekrar}}/\mu$  olarak değiştirilir. Burada  $T_{\text{tekrar}}$ 'ın yeni değeri set etmeden önceki sıcaklık değerinden daha büyük ise mevcut sıcaklık yenilenir aksi takdirde sıcaklık en iyi çözümün bulunduğu sıcaklık değerine yani  $T_{\text{bulunan}}$ 'a set edilir. Bu stratejide değişken azalma oranı kullanılmaktadır ve oranın değeri iterasyon sayısı ve çözülmeye çalışılan problemin karakteristiğine bağlıdır [133].

#### 3.5.2.4. Yapay Isıl İşlem Algoritmasının Çalışma Prensibi

Yapay ısı işlem algoritması Metropolis ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadan esinlenerek çıkmıştır. Metropolis ve arkadaşları  $T$  sıcaklığındaki bir kristalin termal dengeye erişebilmesinin bir açıklamasını yapabilmek adına Monte-Carlo metodunu geliştirmişlerdir [142]. Bu açıklamada mevcut durumun bozulması durumunda ortaya çıkan yeni enerjinin önceki enerjiden düşük olduğu zamanlarda yeni durum olması gereken durum olarak kabul edilir. Eğer yeni durumun enerjisi eskisinden daha yüksek ise yeni durumun mevcut durum olup olmaması ile ilgili kabulün Eşitlik 3.27'deki olasılığa göre karar verilmektedir [133].

$$p(\delta E) = \exp\left(-\frac{\delta E}{kT}\right) \quad (3.27)$$

Burada T sabit bir sıcaklık değeri, k boltzman sabiti,  $\delta E$  önceki ve yeni enerji durumları arasındaki enerji farkıdır.

Metropolis algoritmasının basamakları aşağıdaki gibidir:

1. T için başlangıç değeri seçilir.
2. N boyutlu uzayda  $\vec{x}_i$  başlangıç noktası ( $i = 0$ ) seçilir,  $f(\vec{x}_i)$  hesaplanır.
3. Nokta  $\vec{x}_{i+1} = \vec{x}_i + \nabla \vec{x}_i$ , şeklinde rastgele bir hareket gerçekleştirilir,  $f(\vec{x}_{i+1})$  hesaplanır.
4.  $f(\vec{x}_{i+1}) < f(\vec{x}_i)$  ise hareket kabul edilir, değilse
  - (a)  $\omega = \exp[-(f(\vec{x}_{i+1}) - f(\vec{x}_i))/T]$  önceden seçilen ve program boyunca sabit olan bir T değeri için hesaplanır.
  - (b)  $0 < r < 1$  olacak biçimde bir r rastgele sayısı üretilir.
  - (c)  $\omega > r$  ise hareket kabul edilir, değilse reddedilir.
5. 3,4 işlemleri yeni hareket noktası için yinelenir.
6. Hareketin durduğu önceden belirlenmiş olan s zaman adımında fonksiyonun bir minimumu bulunmuş olur.

Metropolis algoritmasında T başlangıçta seçilir ve uygulama boyunca sabittir. Bunun dezavantajları vardır [143]. T çok büyük seçildiğinde  $f(\vec{x}_{i+1}) < f(\vec{x}_i)$  durumunda hareketin sonlandığı yer fonksiyonun belli bir minimum noktası olmayacaktır. T' çok küçük seçildiğinde ise  $f(\vec{x}_{i+1}) < f(\vec{x}_i)$  durumunda bulunan sonuç fonksiyonun ilk minimum noktası olacaktır.

Kirkpatrick ve arkadaşları Metropolis yönteminden esinlenerek yapay ısı işlem algoritmasını geliştirmişler ve optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanmışlardır. Isıl İşlem Algoritmasının basamakları aşağıdaki gibidir:

1. T için başlangıç değeri seçilir.
2. N boyutlu uzayda  $\vec{x}_i$  başlangıç noktası ( $i = 0$ ) seçilir,  $f(\vec{x}_i)$  hesaplanır.
3. Nokta  $\vec{x}_{i+1} = \vec{x}_i + \nabla \vec{x}_i$ , şeklinde rastgele bir hareket gerçekleştirilir,  $f(\vec{x}_{i+1})$  hesaplanır.
4.  $f(\vec{x}_{i+1}) < f(\vec{x}_i)$  ise hareket kabul edilir, değilse

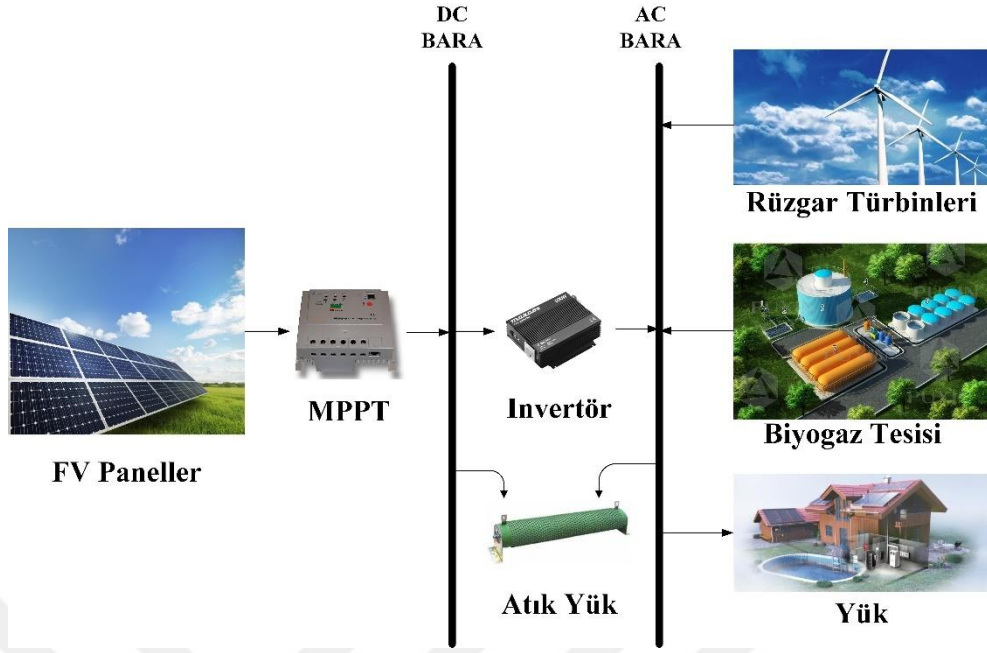


- a.  $\omega = \exp [-(f(\vec{x}_{i+1}) - f(\vec{x}_i)) / T]$  önceden seçilen ve program boyunca sabit olan bir T değeri için hesaplanır.
  - b.  $0 < r < 1$  olacak biçimde bir  $r$  rastgele sayısı üretilir.
  - c.  $\omega > r$  ise hareket kabul edilir, değilse reddedilir.
5. 3,4 işlemleri yeni hareket noktası için yinelenir.
  6. Fonksiyonun en küçük değerini veren  $\vec{x}$  bulunur ( $\vec{x}^j$ )
  7. T azaltılır
  8. Yeni T için 2-6 arası işlemler, hareketin başlangıç noktası 6 da bulunan  $\vec{x}^j$  olacak şekilde uygulanır.
  9. T, programın başında belirlenen değere indiğinde program durur.

Bu yöntemde T'nin çok büyük bir değeri için başlayan hareket uzayın büyük kısmını araştırır, sonraki harekette T bir miktar düşer ve daha öncekinden daha az bir alanı tekrar tarar. Her bir harekette bir önceki hareketin sonunda bulunduğu başlangıç değerini baz alarak başlar. Böylece hareket gittikçe global minimum çevresinde gerçekleşecek ve sonuç global minimum noktasına çok yakın bir noktada sonuçlanacaktır [144].

### 3.6. SİSTEMİN KONTROL STRATEJİSİ

Şekil 3.29'da hibrit enerji üretim sisteminin basitleştirilmiş akış diyagramı gösterilmektedir. Bu sistemde FV panellerden DC enerji üretilerek DC baraya bağlanmış, seçilen rüzgar türbini ve biyogaz jeneratörü AC enerji üreterek AC baraya bağlanmıştır. FV panellerden üretilen DC enerji İnvörtör vasıtasıyla AC enerjiye çevrilerek AC barasına bağlanmıştır. Hem DC hem AC üretilen ve anlık olarak tüketilemeyen enerji ise atık yük vasıtasıyla harcanmaktadır. İktisadi İdari Bilimler Fakültesi'nin yük ihtiyacı da AC olarak karşılanmaktadır ve AC barasına yük olarak bağlanmıştır.



Şekil 3.29. Sistemin basitleştirilmiş akış diyagramı.

Sistemin kontrol stratejisi Şekil 3.30’da gösterilmiştir. Buna göre ilk önce ışıma miktarı, rüzgar hızı, hava sıcaklığı ve yük gibi değişkenler saatlik olarak girilmektedir. Bunun yanında kullanılan FV panel, rüzgar türbini ve biyogaz jeneratörünün kataloglarında yer alan ebatlar ve nominal güç gibi sabit olan teknik veriler, ekonomik veriler girilmektedir. Ardından karar değişkenleri olan FV panel yüzey alanı, adeti, rüzgar türbini süpürme alanı ve biyogaz jeneratörünün gücü gibi değerler yazılım tarafından tahmin edilmektedir.

İşlemin akışı mantığı çerçevesinde yükü karşılamak için öncelikle güneş ve rüzgar enerjisi tercih edilmiştir. Bu kaynakların yetersiz olduğu durumlarda biyogaz jeneratörü devreye girmiştir. Sistemin kontrol stratejisi aşağıdaki gibi açıklanmıştır:

FV panellerden ve rüzgar türbinlerinden üretilen enerjinin toplamı Eşitlik 3.28’deki gibi gösterilmiştir.

$$P_{rn}(t) = P_{pv}(t) + P_{wt}(t) \quad (3.28)$$

1. Durum:  $P_{rn}(t) \geq P_l(t)$

FV panellerin ve rüzgar türbinlerinin ürettiği anlık toplam enerji anlık yüke eşit ya da fazla olduğu durumdur. Bu durumda  $GKK(t)$  Eşitlik 3.29'daki gibi sifıra eşit olacaktır. Çünkü tüketim FV güneş enerjisi ve rüzgar enerjisinden üretilen enerjinin toplamı ile karşılanmaktadır. Bunun anlamı sistem tüketimin karşılanması açısından tam güvenlidir.

$$GKK(t) = 0 \quad (3.29)$$

Eşitlik 3.30'da gösterilen atık yük ( $P_{dl}(t)$ ) üretilen anlık enerjinin harcanmadığı zamanlarda fazla gelen enerjiyi temsil etmektedir. Bu fazla üretilen enerjinin bir yük sayesinde atılması anlamına gelmektedir.

$$P_{dl}(t) = P_{rn}(t) - P_l(t) \quad (3.30)$$

2. Durum:  $P_{rn}(t) \leq P_l(t)$

FV panellerden ve rüzgar türbininden üretilen anlık enerjinin tüketimi karşılamadığı durumdur. Her iki enerji kaynağının tüketimi karşılamadığı durumda eksik kalan güç  $P_d(t)$  ile temsil edilmiştir.

$$P_d(t) = P_{rn}(t) - P_l(t) \quad (3.31)$$

Bu durumda eksik kalan güç ( $P_d(t)$ ) biyogaz jeneratörünün devreye girmesiyle karşılanmak istenmektedir. Ancak biyogaz jeneratörünün gücü belirlenirken dikkat edilmesi gereken birtakım hususlar vardır. Tahmin edilen güçlerdeki biyogaz jeneratörü devreye girdiğinde, karşılanamayan tüketimi yani eksik kalan gücü karşılayacak mı karşılayamayacak mı? Bu noktada aşağıda anlatılan iki durum gerçekleşir:

2.1.  $P_d(t) \geq P_{bg}(t)$  burada eksik olan gücün biyogazdan karşılanamaması durumu söz konusudur. Böylece  $GKK(t)$  aradaki fark kadar oluşmuştur. Diğer bir deyişle tahmin edilen güçteki biyogaz jeneratörünün devreye girmesi durumunda dahi tüketim karşılanamamış ve bir güvenlik zafiyeti ortaya çıkmıştır. Buradaki arzı

karşılama açısından güvenlik zafiyetinin boyutlarını ortaya koymak adına karşılanamayan yükten tahmin edilen biyogaz jeneratörü gücü çıkartılarak GKK kayıt altına alınır.

$$GKK(t) = P_d(t) - P_{bg}(t) \quad (3.32)$$

2.2.  $P_d(t) \leq P_{bg}(t)$  Biyogaz jeneratöründen üretilen enerji eksik kalan enerjiden fazla ise eksik kalan enerjinin biyogaz jeneratörünün nominal gücüne bölümünden elde edilen bölüm  $n(t)$ 'ye atanır.

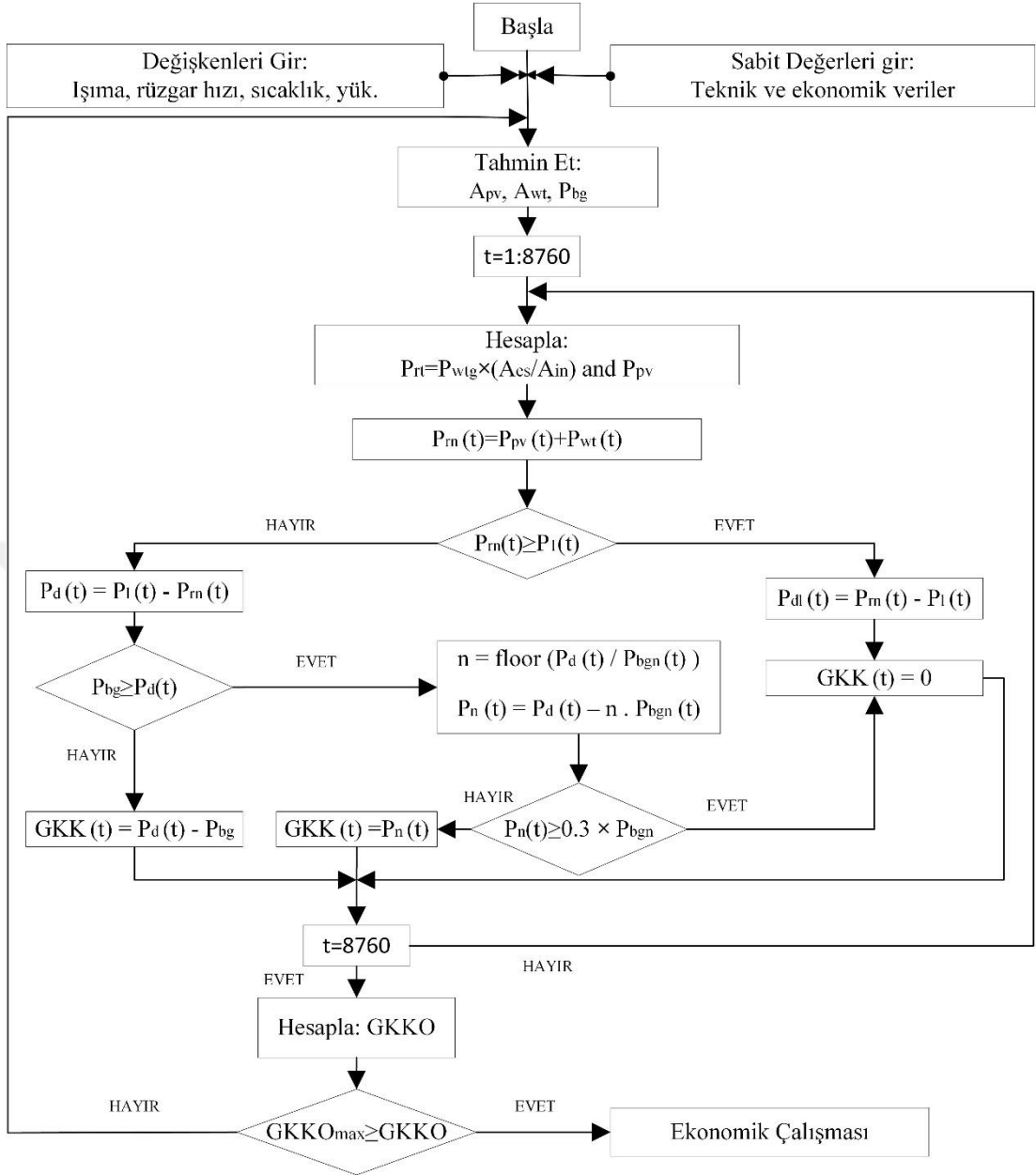
$$n(t) = \text{floor}\left(\frac{P_d(t)}{P_{bgn}}\right) \quad (3.33)$$

$P_n(t)$  saatlik gerekli enerji miktarını göstermektedir ve eksik kalan enerji ile biyogaz jeneratörünün nominal gücünün elde edilen  $n$ 'nin çarpımı arasındaki farkı şeklinde ifade edilmektedir.

$$P_n(t) = P_d(t) - n \times P_{bgn} \quad (3.34)$$

Burada  $P_n(t)$ ,  $P_{bgn}$ 'nin 0.3 katından büyük ya da eşit ise saatlik çalışan biyogaz gücü eksik kalan güce eşit olarak kabul edilecektir ( $P_{bg,h}(t) = P_d(t)$ ). Aksi takdirde saatlik çalışan biyogaz gücü  $P_{bg,h}(t) = n \cdot P_{bgn}$  olur. Bu durumda da gerekli olan enerji anlık GKK'ye eşit hale gelir ( $P_n(t) = GKK(t)$ ).

Burada  $P_n(t)$   $P_{bgn}$ 'nin 0.3 katından büyük ya da eşit olması konusunda 0.3 katsayısının alınmasının nedeni biyogaz jeneratörünün %30'un altındaki yüklerde çalıştığı zaman jeneratörün zarar görecektir.



Şekil 3.30. Sistemin kontrol stratejisi.

### 3.7. EKONOMİK ANALİZ

Mühendislik problemlerinin çözümünde iki temel boyuttan bahsedilebilir. Bunlardan birisi teknik boyut diğeri ise ekonomik boyuttur. Bir mühendislik uygulaması ekonomik açıdan değerlendirilmeden önce uygulamaya geçirilemez. Bu yüzden yapılması planlanan mühendislik uygulamalarının değerlendirilmesi için birçok ekonomik analiz yönteminden faydalanılabilir [145]. Çalışmada bizim faydalandığımız yöntem toplam net bugünkü değerdir.

### 3.7.1. Toplam Net Bugünkü Değer Analizi

Net bugünkü değer yönteminin farklı kullanımları vardır. Bu yöntem ile farklı başlangıç yatırım maliyetlerine sahip, her yıl getirisi farklı olan birden çok yatırımın karşılaştırılması yapılabilir [145]. Bu durumda NBD'si yüksek olan yatırım tercih edilir. Çünkü NBD yatırımın ömrü boyunca olacak olan toplam giderlerin bugünkü değerlerinden yatırımın ömrü boyunca olacak olan toplam gelirlerinden çıkarılması ile bulunur. NBD'nin diğer bir kullanım şekli de  $n$  yıl sonra yapılacak yatırımın bugünkü değerini hesaplamak şeklindedir [146].

Çalışmada kullanılan TNBD, hibrit enerji üretim sisteminin ömrü boyunca tüm maliyetlerin net bugünkü değerlerinin toplamı şeklinde oluşturulmuştur ve Eşitlik 3.35'te gösterilmektedir.

$$TNBD = I + OM + FC - S \quad (3.35)$$

Burada  $I$  ilk yatırım maliyeti,  $OM$  işletme ve bakım maliyetlerinin net bugünkü değeri,  $FC$  yakıt maliyetlerinin net bugünkü değeri,  $S$  sistemlerin hurda değerinin net bugünkü değerini göstermektedir.

#### 3.7.1.1. FV Güneş Enerjisi Sisteminin Toplam Net Bugünkü Değeri

FV sistem için TNBD değeri Eşitlik 3.36'da gösterilmektedir. FV sistemde yakıt maliyetleri olmadığı için TNBD eşitliğinde yazılmamıştır.

$$TNBD_{pv} = I_{pv} + OM_{pv} - S_{pv} \quad (3.36)$$

Eşitlik 3.37'de FV sistemin yatırım maliyeti verilmiştir. Burada  $\alpha_{pv}$  FV panellerin yatırımdaki birim fiyat maliyetidir ( $\$/m^2$ ).  $A_{pv}$  ise optimizasyon esnasında yazılım tarafından tahmin edilen panel yüzey alanıdır ( $m^2$ ).

$$I_{pv} = \alpha_{pv} \times A_{pv} \quad (3.37)$$

$OM_{pv}$  FV panellerin işletme ve bakım maliyetlerinin net bugünkü değerini göstermektedir. Eşitlik 3.38'deki  $\phi_{pv}$  (\$/m<sup>2</sup>/yıl) panel birim alanının yıllık işletme ve bakım maliyetini gösterir.  $N$  ise projenin varsayılan ömrünü göstermektedir.  $\lambda_{pv}$  FV panellerin eskalasyonunu,  $i$  ise faiz oranlarını göstermektedir.

$$OM_{pv} = \phi_{pv} \times A_{pv} \times \sum_{k=1}^N \left( \frac{1+\lambda_{pv}}{1+i} \right)^k \quad (3.38)$$

FV panellerin hurda değerlerinin net bugünkü değeri ( $S_{pv}$ ) aşağıdaki Eşitlik 3.39'da verilmiştir. Burada  $\delta_{pv}$  FV panellerin birim alanının hurda değeridir (\$/m<sup>2</sup>).  $\gamma$  değeri ise enflasyon değerini göstermektedir.

$$S_{pv} = \delta_{pv} \times A_{pv} \times \left( \frac{1+\gamma}{1+i} \right)^N \quad (3.39)$$

### 3.7.1.2. Rüzgar Türbini Sisteminin Toplam Net Bugünkü Değeri

Rüzgar türbinleri için TNBD değerini gösteren eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$TNBD_{wt} = I_{wt} + OM_{wt} - S_{wt} \quad (3.40)$$

Rüzgar türbininin ilk yatırım maliyetini veren  $I_{wt}$  Eşitlik 3.41'de gösterilmiştir. Burada  $\alpha_{wt}$  rüzgar türbininin yatırım metrekare birim maliyetidir (\$/m<sup>2</sup>).  $A_{wt}$  ise optimizasyon esnasında yazılım tarafından tahmin edilen türbin kanadı yüzey alanıdır (m<sup>2</sup>).

$$I_{wt} = \alpha_{wt} \times A_{wt} \quad (3.41)$$

Eşitlik 3.42'deki  $OM_{wt}$  rüzgar türbini için işletme ve bakım maliyetlerinin net bugünkü değerini göstermektedir.  $\phi_{wt}$  (\$/m<sup>2</sup>) türbininin işletme ve bakım maliyetleri açısından süpürme alanının metrekare birim fiyatını göstermektedir.  $\lambda_{wt}$  rüzgar türbinlerindeki eskalasyon oranını göstermektedir.

$$OM_{wt} = \phi_{wt} \times A_{wt} \times \sum_{k=1}^N \left( \frac{1+\lambda_{wt}}{1+i} \right)^k \quad (3.42)$$

$S_{wt}$  rüzgar türbinlerinin hurda değerlerinin net bugünkü değerini göstermektedir ve Eşitlik 3.43'te gösterilmiştir. Burada  $\delta_{wt}$  (\$/m<sup>2</sup>) değeri rüzgar türbininin süpürme alanının metrekare birim fiyatı üzerinden hurda değerini gösterir (\$/m<sup>2</sup>).  $\gamma$  ise enflasyon değerini göstermektedir.

$$S_{wt} = \delta_{wt} \times A_{wt} \times \left( \frac{1+\gamma}{1+i} \right)^N \quad (3.43)$$

### 3.7.1.3. Biyogaz Enerji Üretim Sisteminin Net Bugünkü Değeri

Biyogaz enerji üretim sistemi için TNBD değerini gösteren denklem Eşitlik 3.44'te verilmiştir.

$$TNBD_{bg} = I_{bg} + OM_{bg} + FC_{bg} - S_{bg} \quad (3.44)$$

Eşitlik 3.45'teki  $I_{bg}$  biyogaz tesisinin yatırım maliyetini,  $\alpha_{bg}$  (\$/W) değeri ise yatırım birim maliyetidir.  $P_{bg}$  optimizasyon esnasında yazılım tarafından tahmin edilen biyogaz jeneratörünün kurulu gücünü gösterir.

$$I_{bg} = \alpha_{bg} \times P_{bg} \quad (3.45)$$

Eşitlik 3.46'da verilen  $OM_{bg}$  biyogaz tesisinin sabit ve değişken işletme ve bakım maliyetlerinin net bugünkü değerini ifade etmektedir.  $\phi_{f,bg}$  (\$/W) kurulu sistemin sabit işletme ve bakım maliyetini,  $\phi_{v,bg}$  (\$/W) ise sistemin değişken işletme ve bakım maliyetini göstermektedir.  $\lambda_{bg}$  biyogaz tesisinin eskalasyon oranını göstermektedir.

$$OM_{bg} = \phi_{f,bg} \times P_{bg} \times \sum_{k=1}^N \left( \frac{1+\lambda_{bg}}{1+i} \right)^k + \phi_{v,bg} \times P_{bg,h} \times \sum_{k=1}^N \left( \frac{1+\lambda_{bg}}{1+i} \right)^k \quad (3.46)$$



Biyogaz tesisinde yakıt giderleri de mevcuttur.  $Q_{bg,tot}^{yr}$  ( $m^3$ ) yıllık tüketilen biyogaz miktarıdır ve Eşitlik 3.47’de gösterilmiştir. Eşitlik 3.48’de verilen  $FC_{bg}$  biyogaz tesisinin yakıt giderlerinin net bugünkü değerini ifade etmektedir.  $F_{bg}$  ( $$/m<sup>3</sup>) biyogazın birim maliyetidir.$

$$Q_{bg,tot}^{yr} = \sum_{t=1}^{8760} Q_{bg}(t) \quad (3.47)$$

$$FC_{bg} = F_{bg} \times Q_{bg,tot}^{yr} \times \sum_{k=1}^N \left( \frac{1+\lambda_{bg}}{1+i} \right)^k \quad (3.48)$$

$S_{bg}$  biyogaz tesisinin hurda değerlerinin net bugünkü değerini göstermektedir ve Eşitlik 3.49’da gösterilmiştir. Burada  $\delta_{bg}$ , biyogaz tesisinin watt başına düşen hurda değeridir ( $$/W).  $\gamma$  ise enflasyon değerini göstermektedir.$

$$S_{bg} = \delta_{bg} \times P_{bg} \times \left( \frac{1+\gamma}{1+i} \right)^N \quad (3.49)$$

### 3.7.2. Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti

Üretilen enerji miktarının birim maliyetinin hesabı için seviyelendirilmiş enerji maliyeti yöntemi kullanılmaktadır. Hibrit sistemlerin yaygınlaşmasıyla sistem yatırımının makul olup olmadığı bu yöntem ile tespit edilebilmektedir. Sistemin net bugünkü değerinin üretilen enerji miktarına bölünmesiyle elde edilir [147].

Çalışmada kullandığımız seviyelendirilmiş enerji maliyeti ( $$/kWh) hesabı Eşitlik 3.50’de gösterilmiştir.  $E_l$  bir yıl boyunca fakültenin çektiği enerjinin toplamıdır. Eşitliğin payda kısmında üretilen enerjinin değil de fakültenin bir yıllık tüketiminin yazılmasının nedeni, bazı durumlarda ihtiyacın üzerinde enerji üretilip atık yük vasıtasıyla tüketilmesidir. Tüketimin paydaya yazılması sonuçların doğruluğunu artırmaktadır.$

$$SEM = \frac{TNBD \times AGDK}{E_l} \quad (3.50)$$

Anaparanın geri dönüşüm katsayısı (AGDK) aşağıdaki Eşitlik 3.51’de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$AGDK = \frac{i \times (1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (3.51)$$

### 3.8. SİSTEMİN GÜVENİLİRLİK ANALİZİ

Enerji tesisleri kurulurken, kurulacak tesisin tüketimi karşılayıp karşılamaması önemli bir konudur. Tüketimin bilindiği yerlerde güvenilirlik hesabı yapılmadan kurulan tesisler ya tüketimi karşılayamayacak ve tüketicuyu mağdur edecektir ya da gereğinden büyük bir tesis kurularak fazla enerjiyi toprağa akıtmak yolu ile maddi israfı yol açacaktır. Çalışmamızda, optimizasyonu yapılan sistemin güvenilirliğini tespit etmek için güç kaynağı kaybı olasılığı (GKKO) yöntemi kullanılmıştır.

#### 3.8.1. Güç Kaynağı Kaybı Olasılığı

Güç kaynağı kaybı olasılığı bir enerji tesisinin, tüketimi bir yıl boyunca karşılayamadığı saatlerdeki enerjinin toplam saatlerdeki tüketime bölümü ile elde edilen olasılık değeri olarak tanımlanır [12].

GKKO’nun hesaplanması için verilen denklem Eşitlik 3.52’de görülmektedir.

$$GKKO = \frac{\sum_{t=1}^T GKK(t)}{\sum_{t=1}^T P_l(t)} \quad (3.52)$$

### 3.9. AMAÇ FONKSİYONU VE KISITLAMALAR

Optimizasyon problemlerinde bir amaç fonksiyonu ortaya konulmalıdır. Tezde kullandığımız amaç fonksiyonu TNBD’nin minimum yapıldığı fonksiyondur ve Eşitlik 3.53 ve 3.54’te gösterilmiştir. Bunlardan Eşitlik 3.53’te yer alan amaç fonksiyonu “Birinci Modele Göre Optimizasyon ve Analiz” başlığında anlattığımız çalışmaya, Eşitlik 3.54’te yer alan amaç fonksiyonu ise “İkinci Modele Göre Optimizasyon ve Analiz” kısmında anlattığımız çalışmaya ait amaç fonksiyonunu

göstermektedir. Eşitlik 3.53'te güneş panelinin yüzey alanı, rüzgar türbininin süpürme alanı ve biyogaz jeneratörünün gücü optimize edilen değerlerdir. Eşitlik 3.54'te ise panelin adeti, rüzgar türbininin süpürme alanı ve biyogaz jeneratörünün gücü optimize edilen değerlerdir. Bu değerler optimize edilirken dikkat edilen husus ise maliyetin en düşük olmasıdır.

$$\text{Min.TNBD} ( A_{pv}, A_{wt}, P_{bg} ) = \sum_{i=pv,wt,bg} TNBD_i \quad (3.53)$$

$$\text{Min.TNBD} ( N_{modül}, A_{wt}, P_{bg} ) = \sum_{i=pv,wt,bg} TNBD_i \quad (3.54)$$

Optimizasyon işlemlerinde sonuca daha hızlı ve daha doğru bir şekilde ulaşabilmek için kısıtlamalar getirilmektedir. Aksi takdirde arama uzayı çok geniş olacaktır ve doğru sonuçlara ulaşma süresi ve ihtimali azalacaktır. Sistem optimizasyonunda karar değişkenleri için kısıtlamalar Eşitlik 3.55-3.58 aralığında gösterilmiştir. GKKO'nun aralığı da Eşitlik 3.59'da ifade edilmiştir.

$$A_{pv}^{min} \leq A_{pv} \leq A_{pv}^{max} \quad (3.55)$$

$$N_{modül}^{min} \leq N_{modül} \leq N_{modül}^{max} \quad (3.56)$$

$$A_{wt}^{min} \leq A_{wt} \leq A_{wt}^{max} \quad (3.57)$$

$$P_{bg}^{min} \leq P_{bg} \leq P_{bg}^{max} \quad (3.58)$$

$$GKKO^{min} \leq GKKO \leq GKKO^{max} \quad (3.59)$$

## BÖLÜM 4

### SİSTEMİN OPTİMİZASYONU VE ANALİZİ

FV, RT ve BG hibrit sistemin belirli güvenlik sınırlarının içerisinde ve minimum maliyete göre boyut optimizasyonunun yapıldığı çalışmada kodların yazılması için MATLAB programından faydalanılmıştır.

#### 4.1. BİRİNCİ MODELE GÖRE OPTİMİZASYON VE ANALİZ

Birinci optimizasyon çalışmasında ilk olarak GKO 0.02'ye set edilerek çalışma yapılmış ve çalışma sonucunda yükü karşılayabilmek adına gerekli olan hibrit sistemin boyutları ortaya konmuştur. Hibrit sistemin boyutları belirlenirken FV panellerin yüzey alanı, rüzgar türbininin süpürme alanı ve biyogaz jeneratörünün gücü optimize edilecek parametreler olarak alınmıştır. Optimizasyon sonucunda ise TNBD ve SEM değerlerine göre değerlendirme yapılmıştır. Bu çalışmada Eşitlik 3.1'deki FV güneş enerjisi güç denkleminde faydalanılmıştır.

Çizelge 4.1 GKKO'nun 0.02'ye set edildiği durumdaki karar değişkenlerinin değerlerini, TNBD ve SEM'i optimizasyon algoritmalarına göre göstermektedir. Sonuçlara göre GA'da TNBD 582685\$, İİA'da 586714\$ olarak çıkmıştır. GA sonuçları İİA sonuçlarından TNBD'ye göre %0.68, SEM'e göre de %0.66 daha düşüktür. Karar değişkenlerine bakılacak olursa GA çözümünde BG enerjisine ağırlık verilirken İİA çözümünde FV güneş enerjisine ağırlık verildiği görülmektedir. Rüzgar türbini süpürme alanınının  $0 \text{ m}^2$  olarak çıkması, her iki algoritma tarafından enerji kaynağı olarak rüzgar türbininin tercih edilmediği anlamına gelmektedir.

Çizelge 4.1. GKKO<0.02 olduğu durumda yöntemlere göre optimizasyon sonuçları.

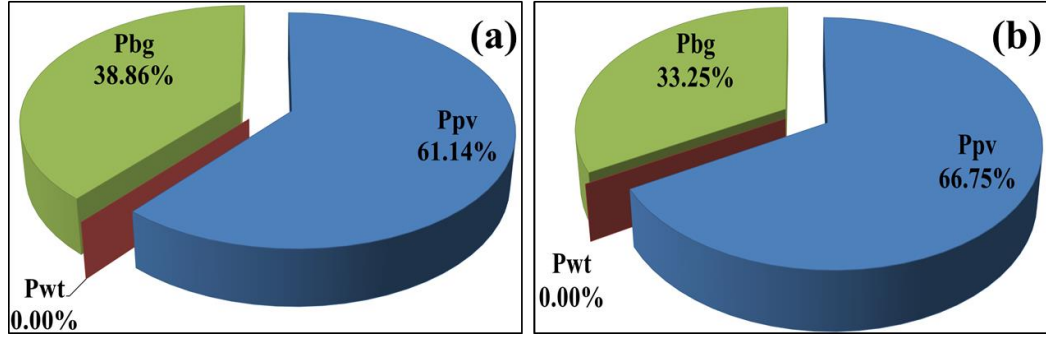
Metot	A <sub>pv</sub> (m <sup>2</sup> )	A <sub>wt</sub> (m <sup>2</sup> )	P <sub>bg</sub> (W)	TNBD (\$)	SEM (\$/kWh)	GKKO (%)
GA	507.134	0	52404.689	582685	0.2557	0.0199
İİA	619.978	0	50209.95	586714	0.2574	0.0199

Çizelge 4.2 GKKO'nun maksimum 0.02'ye set edildiği durumdaki GA ve İİA'nın önermiş olduğu boyutların adet ve güç olarak karşılığı ile üretilen enerji miktarlarını göstermektedir. Kullanılan adet, kurulu güç ve üretilen enerji açısından GA'da FV güneş enerjisine yönelim İİA'dan daha azdır ancak algoritmaların kendi içinde değerlendirmeye bakılacak olursa FV güneş enerjisine yönelim BG enerjisine yönelimden daha fazladır.

Çizelge 4.2. GKKO<0.02 olduğu durumda yöntemlere göre gerekli adetler ve karşıladığı güçler.

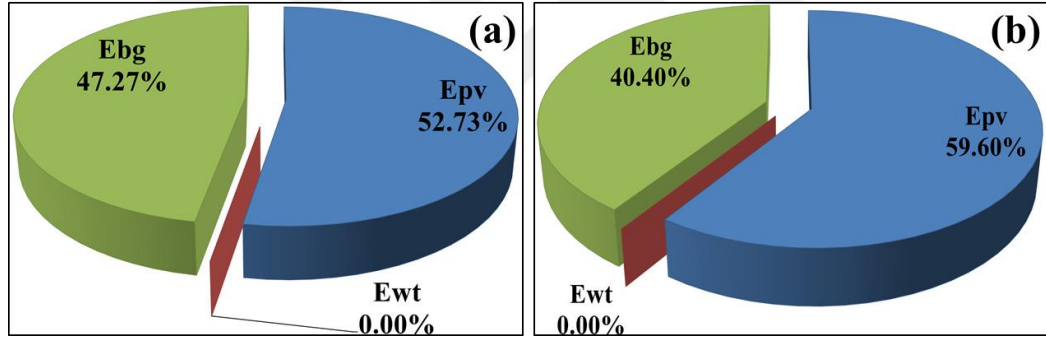
Sistem	Kullanılan Adet		Nominal Güç (kW)		Üretilen Enerji (kWh)	
	GA	İİA	GA	İİA	GA	İİA
Yöntem						
FV Panel	312	381	82.68	100.965	155150	189670
Biyogaz Jeneratörü	5	5	50	50	139110	128580
Rüzgar Türbini	0	0	0	0	0	0

Şekil 4.1 GA ve İİA'nın sunduğu sonuçlara göre enerji kaynaklarının güç dağılımlarını göstermektedir. Hibrit sistemin güç dağılımında GA %61.14 oranında FV güneş enerjisine ağırlık vermiştir. İİA ise %66.75 oranında FV güneş enerjisine ağırlık vermiştir. Her iki algoritma da rüzgar türbini kurulu gücünü %0 olarak almıştır.



Şekil 4.1. Algoritmalarla önerilen kurulu güç oranları (a) GA ve (b) İİA.

Şekil 4.2 ise yine GA ve İİA'nın verdiği sonuçlara göre enerji kaynaklarından üretilen enerji dağılımını göstermektedir. Kurulu güç açısından FV güneş enerjisi ve biyogaz enerjisi tercihlerinde fark daha fazla olmasına rağmen üretilen enerjide bu fark azalmıştır. GA sonuçlarında üretilen enerji oranlarında FV güneş enerjisini %52.73 oranında görülürken İİA sonuçlarında bu oran %59.60 olarak görülmektedir.

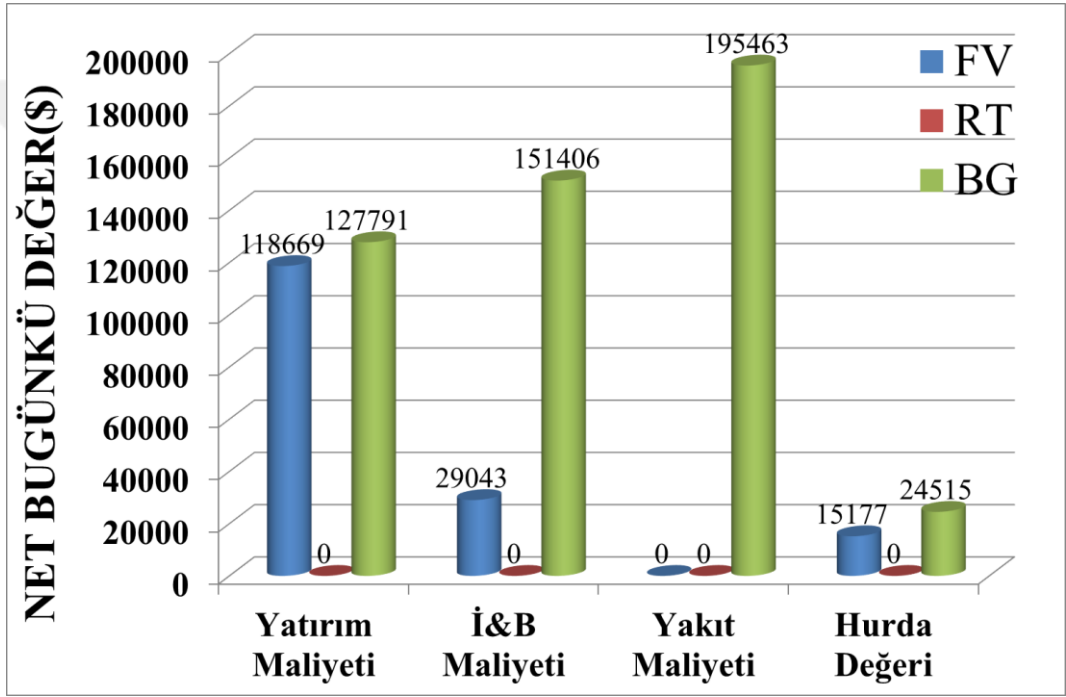


Şekil 4.2. Algoritmalarla elde edilen sonuçlar bazında üretilen enerji oranları (a) GA ve (b) İİA.

Genel olarak İİA tarafından önerilen çözümde, güneş enerjisine olan eğilim biyokütle enerjisinden daha fazla olduğu görülürken GA, elektrik üretimi açısından İİA'dan daha dengeli bir çözüm önermiştir. Rüzgar türbinleri enerji kaynağı olarak düşünülmediğinden türbinler tarafından üretilen enerji yoktur.

Şekil 4.3'te Genetik Algoritmaya göre TNBD'yi oluşturan yatırım maliyeti, işletme ve bakım maliyetleri, yakıt maliyeti ve hurda değeri bileşenlerinin tutarları gösterilmiştir. FV güneş enerjisi sistemi ile biyogaz sisteminin yatırım maliyetleri birbirine yakın çıkmıştır ancak işletme ve bakım maliyetlerinde biyogaz sisteminin

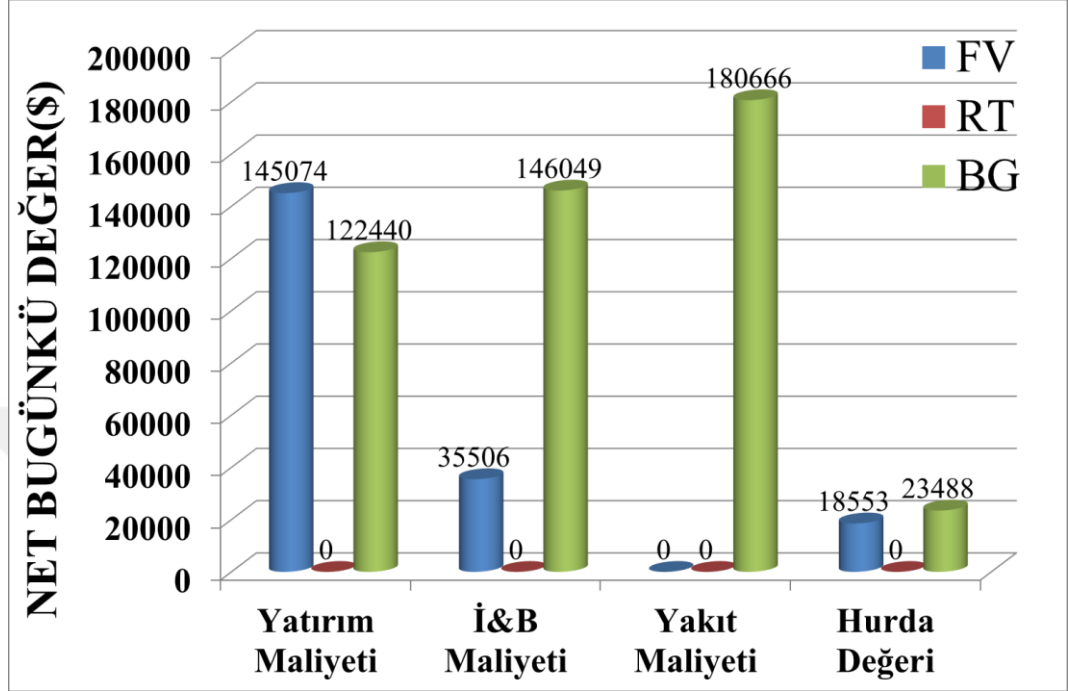
çok daha yüksek çıkmasının nedeni hem sabit hem de değişken işletme ve bakım maliyetlerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Diğer yandan FV güneş enerjisi sisteminde yakıt maliyetinin olmadığı buna karşın biyogaz sisteminde en büyük bileşenin yakıt maliyetinin olduğu görülmektedir. Bunun önemli bir nedeni sistemin çalışma süresi olarak 25 yıl olarak belirlenmesidir. Ayrıca GA çözümünde yakıt maliyetlerinin İİA çözümünden daha fazla çıkması, biyogaz enerjisinin ağırlıklı olarak kullanılmasının bir sonucudur. Yine her iki sistemin yatırım maliyetlerinde olduğu gibi hurda değerleri de birbirine yakın çıkmıştır.



Şekil 4.3. GA çözümüne göre TNBD'yi oluşturan bileşenler.

Şekil 4.4'te ise Isıl İşlem Algoritmasına göre TNBD'yi oluşturan yatırım maliyeti, işletme ve bakım maliyetleri, yakıt maliyeti ve hurda değerinin tutarları gösterilmiştir. İİA'da önerilen FV güneş enerjisi sistemi kurulu güç oranı GA'da önerilen güçten daha fazla, biyogaz sisteminin gücü de daha az olduğu için grafikte güneş enerjisi bileşenlerinde artış görülürken biyogaz sistemi bileşenlerinde düşüş görülmektedir. Şekilde FV güneş enerjisi sisteminin yatırım maliyeti biyogaz tesisinden fazla çıkmıştır ancak diğer bileşenlerde yine biyogaz sisteminin ağırlığı görülmektedir. Sistem yine 25 yıl yakıt maliyetine maruz kalacağı için en yüksek pay yine ondadır.

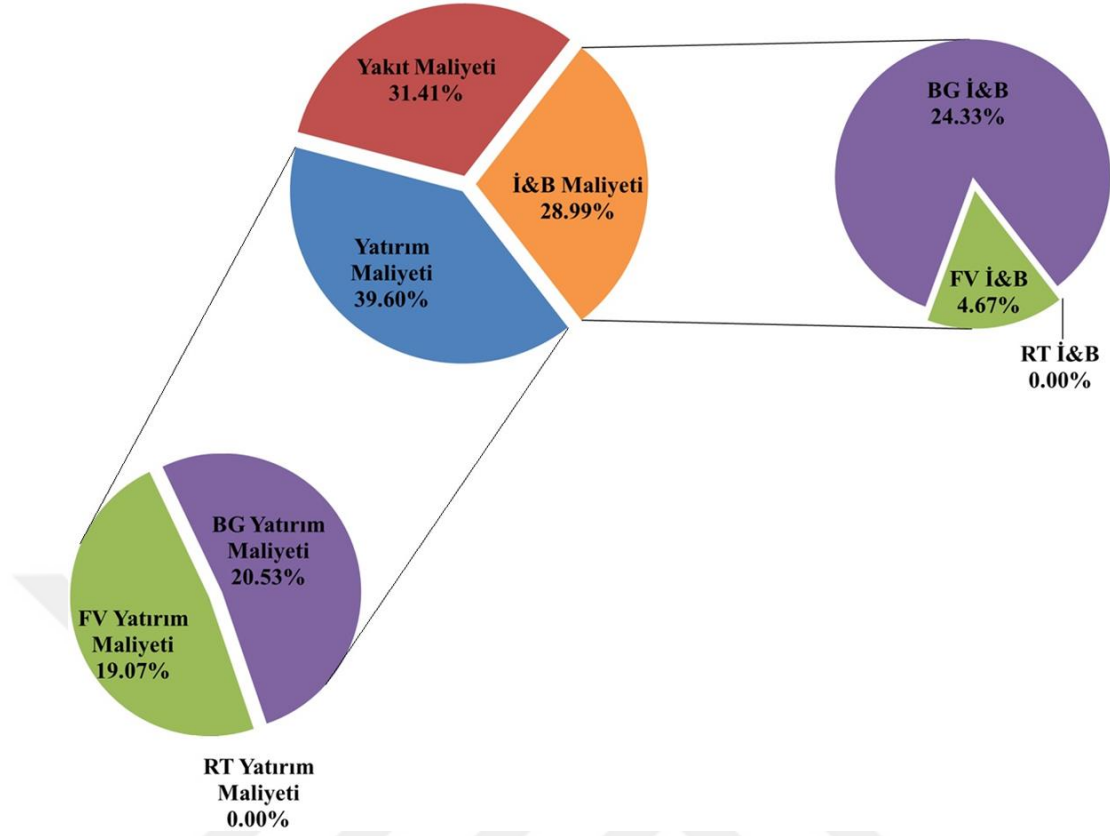
Rüzgar türbini her iki algoritmada tercih edilmediği için hem Şekil 4.3'te hem de Şekil 4.4'te maliyetleri sıfır olarak görülmektedir.



Şekil 4.4. İİA çözümüne göre TNBD'yi oluşturan bileşenler.

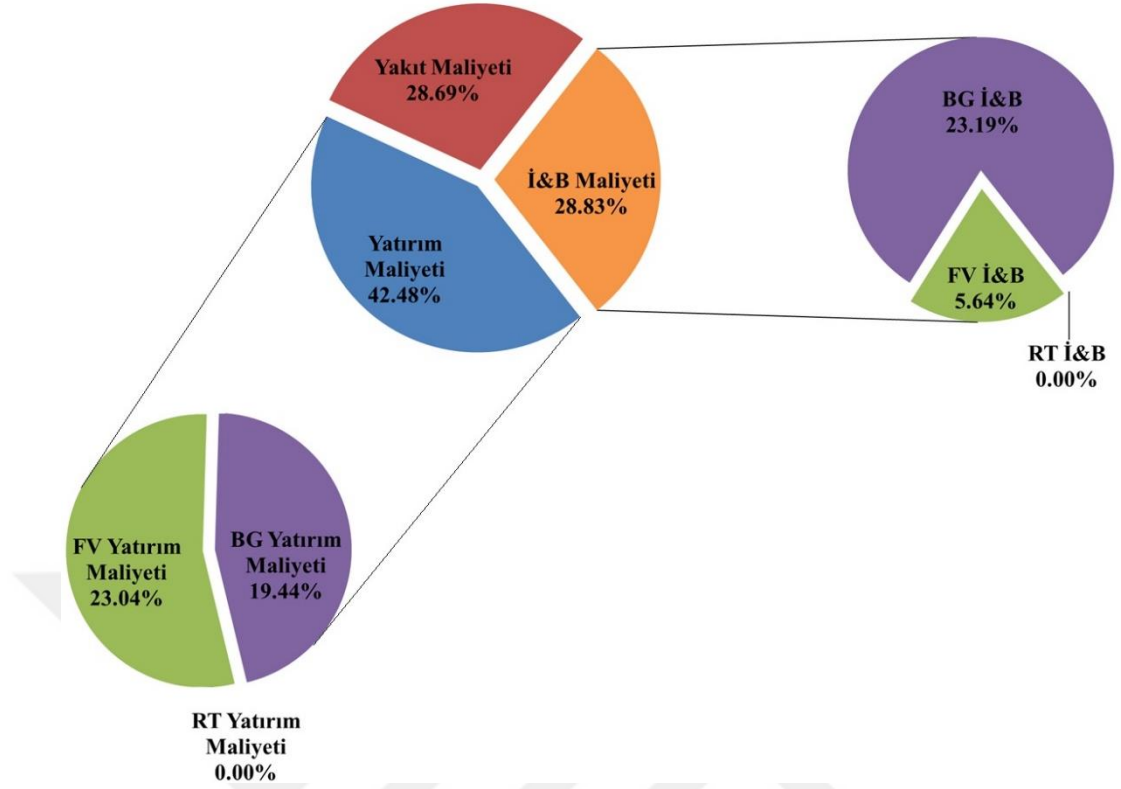
Şekil 4.5 GA çözümündeki TNBD'yi oluşturan maliyetlerin oranını göstermektedir. Bu çözümde en yüksek payı %39.6 ile yatırım maliyetleri alırken yatırım maliyetlerinde BG sisteminin yatırım maliyeti %20.53'lük oranla FV güneş enerjisi sisteminin önünde yer almaktadır. Yakıt maliyetleri %31.41'lik oranla tüm maliyetlerde ikinci sırada yer almaktadır. Yakıt maliyetlerini oluşturan tek kalem biyogaz sisteminin yakıtı olduğu için ayrıca grafikte incelenmemiştir. İşletme ve bakım maliyetleri ise %28.99'lük oranla son sırada yer almaktadır. Buradaki oranın %24.33'ü biyogaz sistemine aittir ve bu oran FV güneş enerjisi sisteminin yaklaşık 5.2 katıdır. Rüzgar enerjisi, algoritma tarafından enerji kaynağı olarak seçilmediği için tüm oranları %0'dır.





Şekil 4.5. GA çözümündeki maliyetlerin oransal dağılımı.

Şekil 4.6'da İİA çözümündeki maliyetlerin oranları gösterilmiştir. Burada da yine yatırım maliyeti %42.48'lik bir oranla ilk sırada yer almaktadır. Yatırım maliyetlerinde GA çözümünün aksine FV güneş enerjisi sistemi %23.04'lük oranla biyogaz sisteminin yatırım maliyetini geçmiştir. İşletme ve bakım maliyeti ise GA'daki çözümden farklı olarak toplamda %28.83'lük oranla ikinci sırada yer almaktadır. Biyogaz sistemi için işletme ve bakım maliyeti %23.19'lük oranla güneş enerjisi sisteminin işletme ve bakım maliyetinin 4 katından biraz fazladır. Yakıt maliyetinin oranı İİA çözümünde %28.69'lük oranla son sırada yer almaktadır. Yakıt maliyetlerini biyogaz sisteminin yakıtı tek başına oluşturduğu için onun bileşenleri grafikte gösterilmemiştir. Rüzgar türbini için hem yatırım hem de işletme ve bakım maliyetleri %0 çıkmıştır.



Şekil 4.6. İİA çözümündeki maliyetlerin oransal dağılımı.

Enerji ihtiyacının hibrit sistemle karşılanması açısından güvenilirliğin artırılması sonucu maliyetlerin ne şekilde değişeceği de irdelenmiştir. Bu bağlamda GKKO'nun maksimum 0.01'e set edilerek yapılan optimizasyonun, çözüm yöntemlerine göre optimizasyon parametrelerinin sonuçları ve TNBD ile SEM değerleri Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Sonuçlara göre TNBD GA'da 728257\$, İİA'da 763371\$ olarak çıkmıştır. GA sonuçları İİA sonuçlarından TNBD'ye göre %4.6, SEM'e göre de %4.59 daha düşüktür. GKKO'nun 0.02'den 0.01'e indirilmesi durumunda GA'nın güneş paneli yüzey alanı tahmini 507.134 m<sup>2</sup>'den 876.191 m<sup>2</sup>'ye; İİA'da ise 619.978 m<sup>2</sup>'den 874.759 m<sup>2</sup>'ye çıkmıştır. GA'nın güneş enerjisine yönelimi İİA'dan daha fazla olarak gözlenmiştir. Biyogaz enerjisi açısından değerlendirildiğine ise GA 52404.689 W'tan 71971.063 W'a çıkarken İİA 50209.95 W'tan 80014.1 W'a çıktığı görülmektedir. Güvenilirliğin artırılması ile birlikte İİA daha çok biyogaz enerjisine yöneldiği görülmektedir.

GKKO 0.01 olduğu durumda da her iki algoritma tarafından enerji kaynağı olarak rüzgar enerjisi tercih edilmemiştir. Buradan çıkarılan bir diğer sonuç ise güvenilirlik arttıkça TNBD ve SEM'in ciddi oranda arttığıdır.

Çizelge 4.3. GKKO<0.01 olduğu durumda yöntemlere göre optimizasyon sonuçları.

Metot	$A_{pv}$ (m <sup>2</sup> )	$A_{wt}$ (m <sup>2</sup> )	$P_{bg}$ (W)	TNBD (\$)	SEM (\$/kWh)	GKKO (%)
GA	876.191	0	71971.063	728257	0.3195	0.0099
İİA	874.759	0	80014.1	763371	0.3349	0.0099

Çizelge 4.4 GKKO'nun maksimum 0.01'e set edildiği durumdaki kullanılan metotların önermiş olduğu boyutların adet ve güç olarak karşılığı ile üretilen enerji miktarlarını göstermektedir. Güvenilirlik arttıkça tüketimi karşılamak için ihtiyaç duyulan güç ve üretilen enerji miktarı artmıştır. Her iki algoritmanın çözümünde FV güneş enerjisi sisteminin kurulu gücü birbirine çok yakın çıkmıştır ancak biyogaz jeneratörünün gücü açısından aynı şey söz konusu değildir. GA çözümündeki güce 7 adet biyogaz jeneratörü tekabül ederken İİA çözümündeki güce 8 adet biyogaz jeneratörü tekabül etmektedir. Üretilen enerji açısından algoritmaların FV güneş enerjisine yöneldiği görülmektedir.

Çizelge 4.4. GKKO<0.01 olduğu durumda yöntemlere göre gerekli adetler ve karşıladığı güçler.

Sistem	Kullanılan Adet		Nominal Güç (kW)		Üretilen Enerji (kWh)	
	GA	İİA	GA	İİA	GA	İİA
FV Panel	538	537	142.57	142.305	268050	267620
Biyogaz Jeneratörü	7	8	70	80	112560	112630
Rüzgar Türbini	0	0	0	0	0	0

Çizelge 4.5'te güvenilirlik artışı sonucunda algoritmaların kendi içinde gerçekleşen değişiklikler görülmektedir. GKKO'nun 0.02'den 0.01'e indiği durumda GA'nın verdiği sonuçlarda TNBD 582685 \$'dan 728257 \$'a çıkararak %24.98 oranında

artmıştır. SEM ise 0.2557 kWh/\$'dan 0.3195 kWh/\$'a çıkarak %24.95 oranında artmıştır. İİA'nın verdiği sonuçlara bakılacak olursa TNBD 586714 \$'dan 763371 \$'a çıkarak %30.11 oranında artmıştır. SEM ise 0.2574 kWh/\$'dan 0.3349 kWh/\$'a çıkarak %30.11 oranında artmıştır. Güvenilirliğin artırılması sonucunda GA'da gerçekleşen artış oranı İİA'dan daha düşüktür.

Çizelge 4.5. Sonuçların GA ve İİA'ya göre sınıflandırılması.

Parametre	GA		İİA	
	0.01	0.02	0.01	0.02
GKKO	728257	582685	763371	586714
TNBD	0.3195	0.2557	0.3349	0.2574
SEM				

Emisyonlar açısından değerlendirildiğinde YEK'ler konvansiyonel olarak elektrik enerjisi üreten kaynakların aksine CO<sub>2</sub> yayılımı yapmamaktadırlar. Böylece KYOTO protokollerine uymaya çalışan ülkeler için enerji üretimi esnasında bu yayılımı azaltmak avantajlı durum sağlamaktadır. İlk modelde yapılan optimizasyon çevre açısından da değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Ortalama fosil yakıt yerine YEK kullanıldığında 483 g/kWh CO<sub>2</sub> yayılım miktarı daha az olmaktadır [148]. Optimizasyonunu yaptığımız tesisin kurulması durumunda yılda 142.12 ton CO<sub>2</sub> emisyon azalacaktır.

## 4.2. İKİNCİ MODELE GÖRE OPTİMİZASYON VE ANALİZ

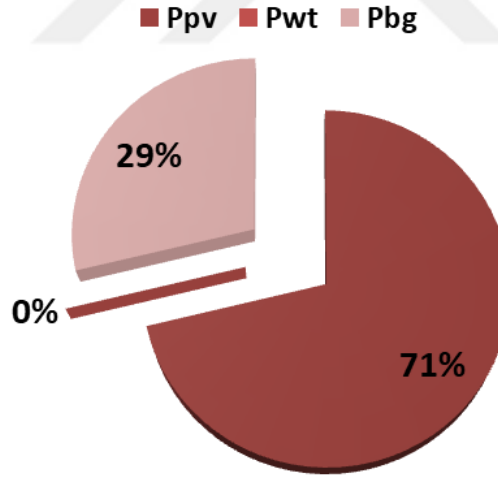
Yapılan ikinci bir çalışmada ise enerji kaynaklarının yatırım maliyetlerinin, faiz oranlarının ve GKKO'da gözlenen değişikliklerin TNBD ve SEM'e olan etkisi ortaya konmuştur. Bu çalışmada FV panel güçlerinin matematiksel modelleri değiştirilmiş ve Eşitlik 3.3'teki model kullanılmıştır. Rüzgar türbini ve biyogaz jeneratörlerinin matematiksel modelleri aynı tutulmuştur. FV panel güçlerinin matematiksel modeli değiştirildiği için yeni karar değişkeni  $N_{pv}$  olmuştur. RT ve BG jeneratörleri için karar değişkenleri aynı kalmıştır. Bu çalışmada optimizasyon için sadece GA kullanılmıştır. Kontrol algoritması önceki çalışma ile aynıdır.

Çizelge 4.6’da optimizasyon sonuçları görülmektedir. Buna göre FV panelden 597 adet, 10’ar kW’lık biyogaz jeneratöründen de 6 adet kullanılacaktır. Rüzgar türbini hiç seçilmediği için kullanımı olmayacaktır.

Çizelge 4.6. Enerji kaynaklarına göre optimizasyon sonuçları.

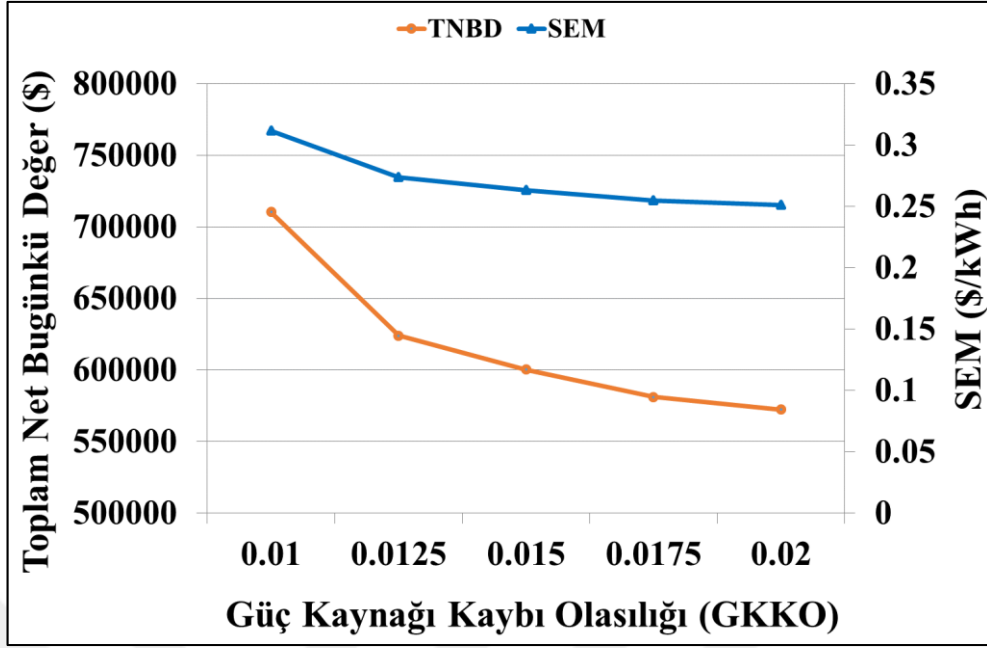
Enerji Kaynakları	Optimizasyon parametreleri	Sonuç	Güç (kW)
FV	$N_{pv}$ (adet)	596,429	158,205
RT	$A_{wt}$ (m <sup>2</sup> )	0	0
BG	$P_{bg}$ (W)	63790,795	60

Şekil 4.7’de kaynaklara göre önerilen kurulu güç oranları gösterilmiştir. Optimizasyon sonucunda %71 oranında FV, %29 oranında BG ve %0 oranında rüzgar türbini kullanılması önerilmiştir. GA tarafından optimizasyon esnasında rüzgar enerjisi, enerji kaynağı olarak değerlendirilmemiştir.



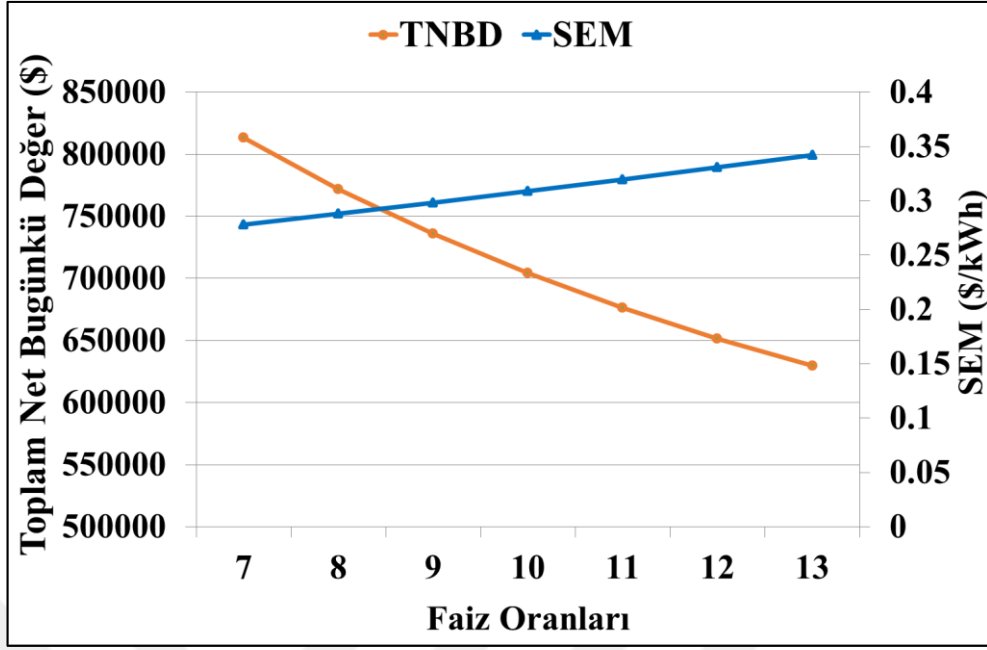
Şekil 4.7. Kaynaklara göre güç ihtiyacı grafiği.

Şekil 4.8’de GKKO’nun 0.01 ile 0.02 arasındaki değerlerinde TNBD ve SEM’in aldığı değerler görülmektedir. Hibrit enerji üretim sisteminde üretilen enerjinin tüketimi karşılama oranı arttıkça güvenilirlik artmaktadır. Güvenilirliğin artmasıyla TNBD ve SEM artmaktadır. TNBD’de gözlenen iki nokta arasındaki fark SEM’den daha fazladır.



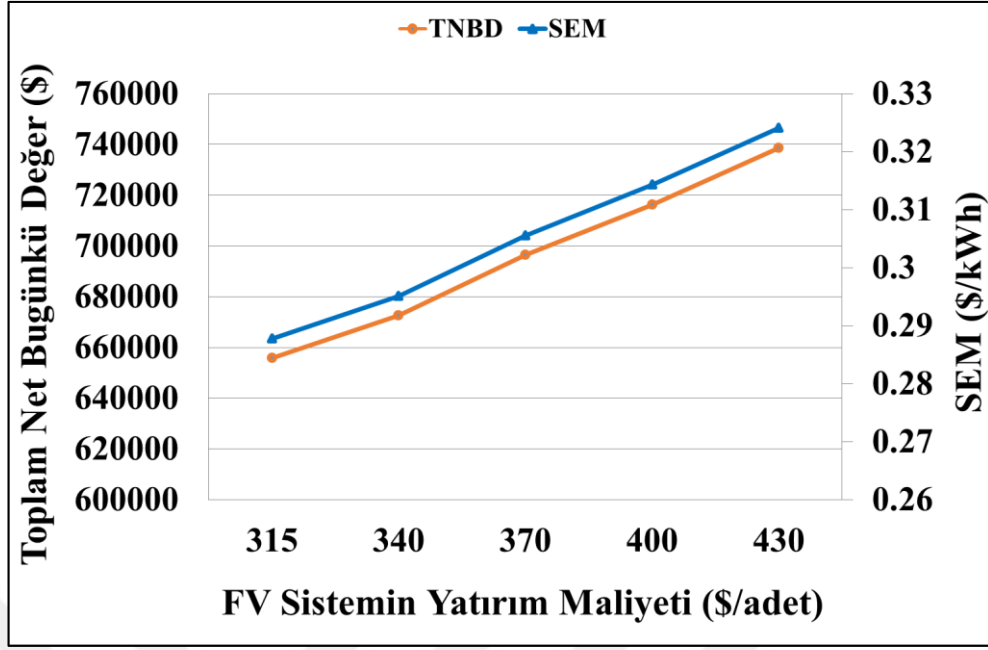
Şekil 4.8. GKKO'daki değişimin TNBD ve SEM üzerindeki etkisi.

Şekil 4.9'da ise faiz oranlarına bağlı olarak değişen TNBD ve SEM değerleri görülmektedir. Gelişmemiş ve gelişmekte olan ülkelerde faiz oranları; gelişmiş ülkelerdeki kadar sabit değerlerde seyretmez. Yıl içerisinde bile değişebilmektedir. Türkiye de gelişmekte olan ülkeler arasındadır. Bu yüzden faizdeki değişikliklerin de yatırım maliyetleri üzerindeki etkisi önemlidir. Şekil 4.9'da görüldüğü üzere faiz oranlarının %7'den %13'e kadar çıktığında SEM 0.2778 \$/kWh'ten 0.3421 \$/kWh'e çıkarken, TNBD değeri ise 813085 \$'dan 629685 \$'a çıkmaktadır. SEM, faiz oranları ile doğru orantılı ilen TNBD ters orantılı olarak değişmiştir. Faiz oranlarındaki %6'lık artış SEM'de %19.5'lik artışa neden olurken TNBD'de %22.5'lik azalışa neden olmuştur.



Şekil 4.9. Faiz oranlarındaki değişimin TNBD ve SEM üzerindeki etkisi.

Şekil 4.10'da FV güneş enerjisi sisteminin yatırım maliyetindeki değişimin TNBD ve SEM üzerindeki etkisi gösterilmektedir. FV sistemin yatırım maliyeti 430 \$'dan 315 \$'a indiğinde SEM'in 0.3240 \$/kWh'ten 0.2877 \$/kWh'e indiği, TNBD'nin de 738485 \$'dan 655714 \$'a indiği görülmektedir. Bu sonuçlara göre FV sistemin yatırım maliyetlerindeki değişim TNBD ve SEM'i önemli ölçüde etkilediği görülmektedir.



Şekil 4.10. Değişen FV panel yatırım maliyetlerinde TNBD ve SEM değerleri.

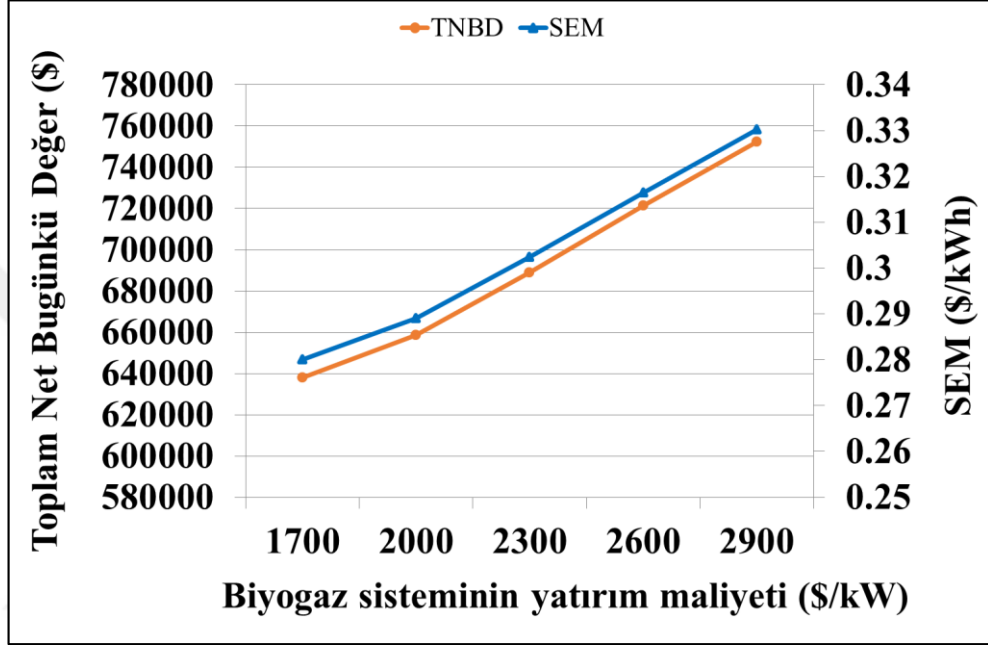
Çizelge 4.7 FV güneş panellerinin farklı yatırım maliyetlerinde; FV panel, rüzgar türbinleri ve BG sisteminin TNBD değerleri ve işletme-bakım maliyetleri gösterilmektedir. FV panellerin başlangıç maliyetlerinin değişimi TNBD'yi önemli miktarda değiştirmiştir. Çizelge'den FV panellerin yatırım maliyeti ile hibrit sistemdeki kullanım oranları ters orantılı olduğu görülmektedir. Ayrıca FV panellerin yatırım maliyeti arttıkça biyogaz sisteminin kullanım oranı ve  $TNBD_{bg}$  artmaktadır.

Çizelge 4.7. Farklı FV yatırım maliyetlerinde maliyetin dağılımı.

FV Sistem Fiyatı (\$/adet)	TNBD <sub>pv</sub> (\$)	TNBD <sub>wt</sub> (\$)	TNBD <sub>bg</sub> (\$)	OM <sub>pv</sub> (\$)	OM <sub>bg</sub> (\$)	TNBD (\$)	SEM (\$/kWh)
315	240085	0	415628	52611	162605	655714	0.2877
340	245620	0	427057	53825	166917	672657	0.2951
370	251223	0	445228	55051	175117	696428	0.3055
400	267694	0	448657	58662	176660	716342	0.3143
430	285665	0	452800	62600	178834	738485	0.3240



Şekil 4.11'de biyogaz sisteminin yatırım maliyeti arttıkça TNBD ve SEM değerlerinin birlikte arttığı görülmektedir. BG sisteminin başlangıç maliyeti 2900 \$'dan 1700 \$'a indiğinde, SEM 0.3301 \$/kWh'den 0.28 \$/kWh'e düşmekte ve TNBD 752485 \$'dan 638114 \$'a düşmektedir. BG sisteminin başlangıç maliyeti %41.4 azaldığında, SEM ve TNBD beraber %15.2 oranında azalmaktadır.



Şekil 4.11. Değişen BG yatırım maliyetlerinde TNBD ve SEM değerleri.

Çizelge 4.8'de biyogaz sisteminin farklı yatırım maliyetlerinde, hibrit sistemi oluşturan FV panel, rüzgar türbini ve biyogaz sisteminin TNBD değerleri ve işletme ve bakım maliyetleri gösterilmektedir. Çizelge 4.8'e göre, BG sisteminin başlangıç maliyetindeki değişiklikler TNBD'yi etkilemiştir. BG sisteminin yatırım maliyeti arttıkça sonuçlar güneş enerjisinin kullanımına doğru eğilim göstermiştir. Biyogaz sisteminin yatırım maliyetindeki artış hem  $TNBD_{bg}$  hem de  $TNBD_{pv}$ 'yi artırmıştır. Çünkü, BG sisteminin başlangıç maliyeti arttığında, FV panelinin kullanım oranı artmaktadır.

Çizelge 4.8. Farklı biyogaz sistemi yatırım maliyetlerinde maliyetin dağılımı.

<b>BG Fiyatı (\$/kW)</b>	<b>TNBD<sub>pv</sub> (\$)</b>	<b>TNBD<sub>wt</sub> (\$)</b>	<b>TNBD<sub>bg</sub> (\$)</b>	<b>OM<sub>pv</sub> (\$)</b>	<b>OM<sub>bg</sub> (\$)</b>	<b>TNBD (\$)</b>	<b>SEM (\$/kWh)</b>
1700	251257	0	386857	55060	141562	638114	0.28
2000	257585	0	401000	56445	150225	658600	0.2889
2300	258154	0	430857	56571	166828	689028	0.3023
2600	260797	0	460457	57151	183534	721257	0.3164
2900	264928	0	487571	58057	199054	752485	0.3301

## BÖLÜM 5

### SONUÇ VE ÖNERİLER

#### 5.1. SONUÇ

Fosil yakıt rezervlerinin azalarak ve siyasi baskı aracı olarak kullanılması, YEK'lere olan eğilimi günden güne artırmaktadır. Ancak YEK'ler süreksiz olması, değişken olması ve henüz maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı birtakım dezavantajlara sahiptir. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak amacıyla hibrit sistemler yaygınlaşmaktadır. Hibrit sistemlerin yaygınlaşması ile birtakım kaynak seçimi ve boyutlandırma problemi de ortaya çıkmıştır. Bu problemlerin üstesinden gelebilmek için son yıllarda yapay zeka teknikleri kullanılmaya başlanmıştır

Çalışma, Karabük Üniversitesi kampüsündeki İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi'nin şebekeden bağımsız şekilde enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve biyogazın değerlendirildiği bir hibrit sistemin boyut ve enerji optimizasyonu çalışmasıdır.

Çalışma için kullanılan güneş ışınması, hava sıcaklığı, rüzgar hızı ve biyogaz potansiyeli kampüs içi ve yakın çevresi açısından değerlendirilmiştir.

Bu sistemin optimizasyonu için etkili bir akış kontrol algoritması oluşturulmuş ve kaynakların tüketimi karşılama noktasında ne şekilde seçileceği bu algoritma sayesinde karar verilmiştir. Bu algorithmada kaynak seçimi esnasında biyogaz jeneratörünün çalışma ve devreye girme özellikleri göz önünde bulundurulmuştur.

Optimizasyon çalışması için oluşturulan amaç fonksiyonu Toplam Net Bugünkü Değer'in minimum yapıldığı fonksiyondur. TNBD'nin yanında Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti aracılığı ile da hibrit sistem ekonomi açısından değerlendirilmiştir.

Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti denklemi üretilen enerji üzerinden değil, daha doğru sonucu vermesi amacıyla tüketimde kullanılan enerji üzerinden oluşturulmuştur. Böylece kullanılan elektrik enerjisinin kWh başına kaç dolar (\$) maliyeti olduğu ortaya konmuştur. Çünkü 25 yıl boyunca çalışacak sistemin bugünkü değerinin bilinmesinin yanı sıra üretilen elektrik enerjisinin birim maliyetinin de bilinmesi ekonomik analizi güçlü kılmaktadır. Diğer yandan sistemi enerji ihtiyacının karşılanması açısından değerlendirilebilmesi için Güç Kaynağı Kaybı Olasılığı'ndan faydalanılmıştır. Güvenilirlik için GKKO'nun hem 0.01 hem de 0.02 maksimum değerlere set edildiğinde verdiği sonuçlar ortaya konmuştur.

Aynı zamanda FV güneş panellerinin matematiksel eşitliği değiştirilerek ikinci bir çalışma yapılmış ve bu çalışmada FV güneş panellerinin ve biyogaz sisteminin farklı yatırım maliyetlerinde, farklı faiz oranlarında ve GKKO oranlarında hibrit sistemin TNBD ve SEM maliyetlerinin nasıl değiştiğine bakılmıştır. Gelişmekte olan ülkeler içerisinde yerini alan ülkemizde fiyatlar zaman zaman değişkenlik arz etmektedir ve bu değişikliklerin de sistem üzerinde etkisi ortaya konmuştur.

Rüzgar hızlarının yeterli seviyede olmamasından dolayı hem birinci hem de ikinci modeldeki optimizasyon çalışmasında rüzgar enerjisi, Genetik Algoritma ve Isıl İşlem Algoritması tarafından enerji kaynağı olarak seçilmemiştir. İkinci modeldeki çalışma sırasında rüzgar türbini maliyetlerindeki değişimin TNBD ve SEM üzerindeki etkisi araştırılırken dahi rüzgar enerjisinin kaynak olarak seçilmemesi, rüzgar hızının Karabük Üniversitesi ve çevresinde rüzgar enerjisine makul yatırımların yapılamayacağı anlamına gelmektedir. Böylece birtakım yatırımcılar tarafından sıklıkla sorulan sorunun cevabı olarak rüzgar enerjisi yatırımı kampüs ve yakın çevresindeki bölgeler için verimli ve makul değildir, bu sonuç literatüre geçirilmiştir.

Optimizasyon çalışması için kendini ispatlamış ve yaygın olarak kullanılan Genetik Algoritma ve Isıl İşlem Algoritmaları'nın verdiği sonuçları, problem çözümedeki performansları açısından birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Yapay zeka algoritmalarının karşılaştırılmasında GKKO'nun maksimum 0.02'ye set edildiği durumda Genetik

Algoritma'nın Isıl İşlem Algoritması'na karşı üstünlüğü ortaya konmuştur. Bu üstünlük, GKKO'nun maksimum 0.01'e set edildiği durumda daha da artmıştır.

Tüm bu çalışmalar sonucunda, birinci modelde yapılan çalışmadaki Genetik Algoritma çözümüne göre GKKO'nun 0.02 olduğu durumda TNBD 582685 \$, SEM 0.2557 \$/kWh çıkmıştır. Tüketimi karşılaması açısından bu hibrit sistem; 507.134 m<sup>2</sup>'lik bir FV güneş paneli yüzey alanına ve 52404.689 W'lık bir biyogaz jeneratör gücüne sahip olacaktır. Bu sonuçlara göre rüzgar türbininin dahil edilmediği FV/Biyogaz hibrit sistem sayesinde fakültenin enerji ihtiyacının karşılanabileceği görülmüştür.

## 5.2. ÖNERİLER

Yapılan çalışmanın üzerine birtakım ilaveler ileriki çalışmalar için mümkündür. Bu çalışmalardan bir kısmı aşağıda listelenmiştir.

- Rüzgar hızının daha yüksek olduğu bölgelerde simülasyon tekrar edilebilir ve rüzgar enerjisinin de dahil olduğu hibrit sistemler tasarlanabilir.
- Son zamanlarda çıkan ve kendini kısa sürede ispat eden birtakım yapay zeka algoritmaları bu sistemin optimizasyonu için kullanılabilir ve mevcut çalışma ile karşılaştırma yapılabilir.
- Atık yükün değerlendirilmesi kapsamında birtakım enerji depolayıcılar hibrit sisteme dahil edilerek sistemin TNBD'si düşürülebilir ve enerji depolayıcıların kendi aralarında karşılaştırmaları yapılabilir.
- Literatürde denenmiş olan diğer ekonomik analiz yöntemleri kullanılarak amaç fonksiyonunu değiştirmek vasıtasıyla yeni sonuçlar elde edilebilir ve mevcut sistemle karşılaştırılabilir.
- Hibrit yapay zeka yöntemleri elde etmek suretiyle sistem tekrar optimize edilebilir.
- Tezde kullanılan enerji kaynaklarının matematiksel modelleri değiştirilerek bunun sonuçlardaki etkisi ortaya konabilir.

## KAYNAKLAR

1. Doğanay, H. ve Coşkun, O., "Enerji Kaynakları", *Pegem Akademi*, Ankara, 2-11 (2017).
2. Karagöl, E.T. ve Kavaz, İ., "Dünyada ve Türkiye'de Yenilenebilir Enerji", *Siyaset, Ekonomi ve Toplum Araştırmaları Vakfı*, Ankara, 6-12 (2017).
3. Öztürk, S. ve Saygı, S., "1973 Petrol Krizinin Ekonomiye Etkileri ve Stagflasyon Olgusu", *Balkan Sosyal Bilimler Dergisi*, 6 (2): 1-12 (2017).
4. Güneşer, M.T., "Güneş Enerjisi ile Çalışan Motorlu Araçta Hız, Zaman ve Güneş Radyasyonu Değerleri Gözetiminde Güç Optimizasyonu", Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 1-3 (2015).
5. Martinot, E., "Renewable Energy Policy Network for the 21st Century": *Global Status Report*, Paris France, 28-62 (2016).
6. Turkenburg, W., "Renewable Energy, in Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future", *International Institute for Applied Systems Analysis*, UK., 775 (2010).
7. Celik, A.N., "Techno-economic analysis of autonomous PV-wind hybrid energy systems using different sizing methods", *Energy Conversion and Management*, 44 (12): 1951-1968 (2003).
8. Luna-Rubio, R., Trejo-Perea, M., Vargas-Vazquez, D. and Rios-Moreno, G.J., "Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies", *Solar Energy*, 86 (4): 1077-1088 (2012).
9. Ko, M., Kim, Y., Chung, M. and Jeon, H., "Multi-Objective Optimization Design for a Hybrid Energy System Using the Genetic Algorithm", *Energies*, 8 (4): 2924-2949 (2015).
10. Lazou, A.A. and A.D. Papatsoris, "The economics of photovoltaic stand-alone residential households: A case study for various European and Mediterranean locations", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 62: 411-427 (1999).
11. Nas, T.F., "Cost Benefit Analysis: Theory and Application 2nd Edition", *Rowman & Littlefield Publishing Group*, London, 67-75 (2016)
12. Ofry, E. and A. Braunstein, "The Loss of Power Supply Probability as a Technique for Designing Stand-Alone Solar Electrical (Photovoltaic) Systems", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-102: 1171-1175 (1983).

13. Abouzahr, I. and R. Ramakumar, "Loss Of Power Supply Probability of Stand-Alone Wind Electric Conversion Systems: A Closed Form Solution Approach", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 5 (3): 445-452 (1990).
14. Ghazvini, M., A. Abbaspour-Tehrani-Fard, and M. Fotuhi-Firuzabad, "A particle swarm optimization-based approach to achieve optimal design and operation strategy of standalone hybrid energy systems", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 23: 335-353 (2015).
15. Lingfeng, W. and C. Singh, "Multicriteria Design of Hybrid Power Generation Systems Based on a Modified Particle Swarm Optimization Algorithm", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24 (1): 163-172 (2009).
16. Mukhtaruddin, R.N.S.R., Rahman, H.A., Hassan, M.Y and Jamian, J.J., "Optimal hybrid renewable energy design in autonomous system using Iterative-Pareto-Fuzzy technique", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64: 242-249 (2015).
17. Wang, L. and Singh, C. "Compromise Between Cost and Reliability In Optimum Design of An Autonomous Hybrid Power System Using Mixed-Integer PSO Algorithm", *Clean Electrical Power ICCEP '07 International Conference*, Capri, 682-689 (2007).
18. Askarzadeh, A., "A discrete chaotic harmony search-based simulated annealing algorithm for optimum design of PV/wind hybrid system", *Solar Energy*, 97: 93-101 (2013).
19. Rajkumar, R.K., Ramachandaramurthy, V.K., Yong, B.L. and Chia, D.B., "Techno-economical optimization of hybrid pv/wind/battery system using Neuro-Fuzzy", *Energy*, 36 (8): 5148-5153 (2011).
20. Kalantar, M. and Mousavi, G. S. M., "Dynamic behavior of a stand-alone hybrid power generation system of wind turbine, microturbine, solar array and battery storage", *Applied Energy*, 87 (10): 3051-3064 (2010).
21. Torreglosa, J.P., García-Triviño, P., Fernández-Ramirez, L.M. and Jurado, F., "Control based on techno-economic optimization of renewable hybrid energy system for stand-alone applications", *Expert Systems with Applications*, 51: 59-75 (2016).
22. Erdinc, O., Elma, O., Uzunoglu, M. and Selamogullari, U.S., "Real-time performance analysis of an optimally sized hybrid renewable energy conversion unit", *Energy and Buildings*, 75: 419-429 (2014).
23. Zhou, T. and W. Sun, "Optimization of Battery–Supercapacitor Hybrid Energy Storage Station in Wind/Solar Generation System", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5 (2): 408-415 (2014).

24. Bianchini, A., Magnelli, N., Ferrara, G., Carnevale, E.A and Ferrari, L., "Optimization of a PV-wind-Diesel Hybrid System for a Remote Stand-alone Application", *Energy Procedia*, 81: 133-145 (2015).
25. Singh, G., Singh, A., and Jain, V.K., "Economic Viability of Biogas Generator in Comparison with Diesel Generator and Local Electricity Connection", *International Journal of Emerging Research in Management & Technology*, 2 (7): 40-43 (2013).
26. Tanim, M.M., Chowdhury, N.A., Rahman, M.M and Ferdous, J., "Design of a Photovoltaic-Biogas Hybrid Power Generation System for Bangladeshi Remote Area Using HOMER Software", *Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET)*., Dhaka, Bangladesh, 1-5 (2014)
27. Bhattacharjee, S. and Dey, A., "Techno-economic performance evaluation of grid integrated PV-biomass hybrid power generation for rice mill", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7: 6-16 (2014).
28. Ho, W.S., Hashim, H., and Lim, J.S., "Integrated biomass and solar town concept for a smart eco-village in Iskandar Malaysia (IM)", *Renewable Energy*, 69: 190-201 (2014).
29. Eziyi, I. and Krothapalli, A., "Sustainable Rural Development: Solar/Biomass Hybrid Renewable Energy System", *Energy Procedia*, 57: 1492-1501 (2014).
30. Ghaem Sigarchian, S., Paleta, R., Malmquist, A and Pina, A., "Feasibility study of using a biogas engine as backup in a decentralized hybrid (PV/wind/battery) power generation system – Case study Kenya", *Energy*, 90: 1830-1841 (2015).
31. Heydari, A. and Askarzadeh, A., "Optimization of a biomass-based photovoltaic power plant for an off-grid application subject to loss of power supply probability concept", *Applied Energy*, 165: 601-611 (2016).
32. Suganthi, L., S. Iniyar, and Samuel, A.A., "Applications of fuzzy logic in renewable energy systems – A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48: 585-607 (2015).
33. Janssen, R., "Renewable Energy Working Party", *International Energy Agency*, Sittard, Netherlands, 1-3 (2002).
34. Türkiye Elektrik İletim A.Ş., "Türkiye Elektrik Sistemi Kuruluş ve Kaynaklara Göre Kurulu Güç", *TEİAŞ*, Ankara, 1 (2017).
35. T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu., "Elektrik Piyasası Sektör Raporu", *Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı-EPDK*, Ankara, 4-10 (2017).
36. Şen, Z., "Temiz Enerji ve Kaynakları", *Su Vakfı Yayınları*, İstanbul, (2002)



37. Ültanır, M.Ö., "21. Yüzyılın Eşiğinde Güneş Enerjisi", *Bilim ve Teknik Dergisi*, 340: 50-55 (1996).
38. Kılıç, F.Ç., "Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri", *Mühendis ve Makina*, 56 (671): 28-40 (2015).
39. İnternet: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, "Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli", <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx> (2018).
40. İnternet: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Güneş", <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes> (2017).
41. Wirth, H., "Recent Facts about Photovoltaics in Germany", *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE*, Freiburg, 5-6 (2018).
42. Akarslan, F., "Photovoltaic Systems and Applications, in Modeling and Optimization of Renewable Energy Systems", A. Şencan, Editor. *InTech*, 21-22 (2012).
43. İnternet: Alaçakır, F.B., "Türkiye'de Güneş Enerjisi Potansiyeli ve EİE'deki Çalışmalar", <http://www.nukte.org/node/163> (2018).
44. İnternet: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, "Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli", <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/pages/78.aspx> (2018).
45. Tong, W., "Fundamentals of wind energy, in Wind Power Generation and Wind Turbine Design", *WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering*, 4-5 (2010).
46. İnternet: Çalışkan, M., "Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli", [https://www.mgm.gov.tr/FILES/haberler/2010/rets-seminer/2\\_Mustafa\\_CALISKAN\\_RITM.pdf](https://www.mgm.gov.tr/FILES/haberler/2010/rets-seminer/2_Mustafa_CALISKAN_RITM.pdf) (2010).
47. İnternet: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü "Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası", [http://www.yegm.gov.tr/YEKrepa/REPA-duyuru\\_01.html](http://www.yegm.gov.tr/YEKrepa/REPA-duyuru_01.html) (2018)
48. Köse, B., Güneşer, M.T., Yazıcı, M. ve Yılmaz, H., "Eskipazar Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Rayleigh, Lognormal ve Weibull Dağılım Modeli Kullanarak Tahminlenmesi", *International Symposium on Innovative Technologies in Engineering And Science*, 2251-2260 (2015).
49. Ataseven, M.S., "Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu", *Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TÜREB)*, 20-26 (2017).
50. İnternet: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü "Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası", <http://www.yegm.gov.tr/YEKrepa/KARABUK-REPA.pdf> (2018).

51. Klass, D.L., "Biomass for Renewable Energy and Fuels", *Encyclopedia of Energy*, 193-212 (2004).
52. Deniz, E., Yeşilören, G., ve İşçi, N.Ö., "Türkiye'de Gıda Endüstrisi Kaynaklı Biyokütle ve Biyoyakıt Potansiyeli", *GIDA*, 40 (1): 47-54 (2015).
53. Sümer, S.K., Kavdır, Y., ve Çiçek, G., "Türkiye'de Tarımsal ve Hayvansal Atıklardan Biyokömür Üretim Potansiyelinin Belirlenmesi", *KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi*, 19 (4): 379-387 (2016).
54. DBFZ - Deutsches Biomasse Forschungs Zentrum gemeinnützige GmbH, "Türkiye'de biyogaz yatırımları için geçerli koşulların ve potansiyelin değerlendirilmesi", *T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Leipzig, 23, 48, 68-70 (2011).
55. TUIK, "Crop Production Statistics", **Turkey Statistics Office**, Ankara (2010).
56. İnternet: IEA Bioenergy Task 37, "Anaerobic Digestion Report Turkey's Situation in Biogas", [http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publications/country-reports/2010/Turkey\\_Country\\_Report\\_11-2010.pdf](http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publications/country-reports/2010/Turkey_Country_Report_11-2010.pdf) (2011).
57. Ersoy, A.E., "Türkiye'nin Hayvansal Gübre Kaynaklı Sera Gazı Emisyonları Durumu ve Biyogaz Enerjisi Potansiyeli", Yüksek Lisans Tezi, *Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi*, Ankara, (2017).
58. İnternet: Watt, J.H. and Berg, S.v.d., "Measurement", Research Methods For Communication Science, <http://ciosmail.cios.org:3375/readbook/rmcs/ch07.pdf> (2002).
59. Merrow, K., Penzien, P., and Dubats, T., "Exploring Food Waste Reduction in Campus Dining Halls", *Western Michigan University*, USA. (2012).
60. Demirer, G.N., Duran, M., Güven, E., Uğurlu, Ö., Ergüder, T.H., Tezel, U., Şen, S., Korkusuz, E.A ve Varolan, N., "Organik Atıklardan Anaerobik Yöntemlerle Biyogaz Eldesi: Türkiye'de Uygulanabilirlik", *Çevre ve Endüstri*, 56-60 (2001).
61. Energy Efficiency and Renewable Energy, "The History of Solar", *U.S. Department of Energy USA*, 1-12 (2002).
62. Singh, J., "Semiconductors Band Structures", *Semiconductor Devices: Basic Principles*, **John Wiley & Sons, Inc.**, New York, 2-3 (2001).
63. Paszti, Z., Petö, G., Horvath, Z. E., Karacs, A. and Guzzi, L., "Formation and Valence Band Density of States of Nonspherical Cu Nanoparticles Deposited on Si(100) Substrate", *J. Phys. Chem B*, 101: 2109-2115 (1997).

64. İnternet: Australian Academy of Science, "From sunlight to electricity", <https://www.science.org.au/curious/technology-future/solar-pv> (2018)
65. Mohammad Bagher, A., "Types of Solar Cells and Application", *American Journal of Optics and Photonics*, 3 (5): 94 (2015).
66. Glunz, S.W., Preu, R., and Biro, D., "Crystalline Silicon Solar Cells-State-of-the-Art and Future Developments", *Comprehensive Renewable Energy, Elsevier*, 353-387 (2012).
67. Arslan, İ., "Tekirdağ Koşullarında Polikristal ve Monokristal Tip PV Güneş Panellerinin Verimlilik Karşılaştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Namık Kemal Üniversitesi Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı*. Tekirdağ, 7 (2018).
68. Kumar, A., Richhariya, G., and Sharma, A., "Solar Photovoltaic Technology and Its Sustainability", *Energy Sustainability Through Green Energy, Springer*, New Delhi, 3-25 (2015).
69. Lynn, P.A., "Electricity from Sunlight: An Introduction to Photovoltaics", *Wiley*, London (2010).
70. Ceylan, İ. ve Gürel, A.E., "Güneş Enerjisi Sistemleri ve Tasarımları", *Dora Basım-Yayı Dağıtım*, Bursa, 95-98. (2018).
71. Uysal, N., "Konya İli İçin Güneş ve Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretimi ve Kullanımının Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Konya, (2011).
72. Galloway, T., "Tasarımcılar İçin Güneş Evi", TMMOB Elektrik Mühendisler Odası-Wiley, Ankara, 133-141 (2011).
73. Markwart, T., "Solar Electricity, 2nd Edition", Wiley, U.K. (2000).
74. Diaf, S., Diaf, D., Belhamel, M., Haddadi, M. and Louche, A., "A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system", *Energy Policy*, 35: 5708-5718 (2007).
75. Alsayed, M., Cacciato, M., Scarcella, G. and Scelba, G., "Design of hybrid power generation systems based on multi criteria decision analysis", *Solar Energy*, 105: 548-560 (2014).
76. Kaldellis, J.K. and Zafirakis, D., "The wind energy (r)evolution: A short review of a long history", *Renewable Energy*, 36 (7): 1887-1901 (2011).
77. Manwell, J.F., McGowan, J.G., and Rogers, A.L., "Wind Energy Explained – Theory, Design and Application", *Wind Turbine Design, John Wiley & Sons Ltd.* (2002).

78. Hemami, A., "Wind Turbine Technology", *Cengage Learning*, United States of America (2012).
79. Cao, W., Xie, Y., and Zheng, T., "Wind Turbine Generator Technologies", *Advances in Wind Power, IntechOpen*, 178-192 (2012).
80. Hansen, A.D., "Güç Sistemlerinde Rüzgar", *TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası-Wiley*, Ankara, 72-80 (2009).
81. İnternet: Renewable Sources and Efficient Electrical Energy Systems "Wind Power Systems", <http://ecee.colorado.edu/~ecen2060/wind.html> (2018).
82. Elibüyük, U. and Üçgül, İ., "Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri Ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri", *Journal of YEKARUM*, 2 (3): 1-14 (2014).
83. Modi, V.J. and Fernando, M.S.U.K., "On The Performance of The Savonius Wind Turbine", *Journal of Solar Energy Engineering*, 111 (1): 71-81 (1989).
84. Saad, M.M.M. and Asmuin, N., "Comparison of Horizontal Axis Wind Turbines and Vertical Axis Wind Turbines", *IOSR Journal of Engineering*, 4 (8): 27-30 (2014).
85. Möllerström, E., "Vertical Axis Wind Turbines", Thesis, *Division of Electricity Department of Engineering Sciences Uppsala Universitet*, Uppsala (2015)
86. Douak, M. and Aouachria, Z., "Starting Torque Study of Darrieus Wind Turbine". *International Journal of Physical and Mathematical Sciences*, 9 (8): 476-481 (2015).
87. Bañuelos-Ruedas, F., Camacho, C.Á., and Rios-Marcuello, S., "Methodologies Used in the Extrapolation of Wind Speed Data at Different Heights and Its Impact in the Wind Energy Resource Assessment in a Region", *Wind Farm-Technical Regulations, Potential Estimation and Siting Assessment, InTech*, Rijeka, Croatia, 97-100. (2011).
88. Gipe, P., "Wind Power Renewable Energy for Home, Farm, and Business", *Chelsea Green Publishing Company*, USA 39-41 (2004).
89. Mathew, S., "Wind Energy Fundemantals, Resource Analysis and Economics", *Springer Berlin Heidelberg Inc.*, Germany 155-156 (2006).
90. Şenkal, A. ve Çetin, N.S., "Türkiye’de Kurulu Olan Büyük Güçlü Rüzgar Santrallerinin Kapasite Faktörlerine Genel Bir Bakış", *Ege Bölgesi Enerji Forumu*, Denizli, 12-13 Ekim (2009).
91. Lüy, M., Civelek, Z., and Çam, E., "Individual pitch control on wind turbines with permanent magnet synchronous generator for reduction of mechanical

- load and stability of output power", *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23 (5): 504-511 (2017).
92. RWE npower renewables, "Wind Turbine Power Calculations", The Royal Academy of Engineering, *RWE npower renewables*, 1-5. (2018).
  93. Chedid, R. and Rahman, S., "A Decision Support Technique for the Design of Hybrid Solar- Wind Power Systems", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 13 (1): 76-83 (1998).
  94. Romano, S.D. and Sorichetti, P.A., "Introduction to Biodiesel Production", Dielectric Spectroscopy in Biodiesel Production and Characterization, *Springer*, London, 7-27 (2010).
  95. IEA Bioenergy, "Energy From Biological Conversion of Municipal Solid Waste Task24". *International Energy Agency (IEA) Report*, 10-35, (2000).
  96. Jorgensen, P.J., "Biogas Green Energy", *Digisource, Danmark A/S*, Tjele, 4 (2009).
  97. House, H., "Alternative Energy Sources-Biogas Production", *London Swine Conference-Today's Challenges..Tomorrow's Opportunities*, London, 119-128 (2007).
  98. Frisk, M., "Simulation and Optimization of a Hybrid Renewable Energy System for application on a Cuban farm", *Teknisk- naturvetenskaplig fakultet UTH-enheten Uppsala Universitet*, Uppsala, Sweden, 72 (2017).
  99. Abbasi, T., Tauseef, S.M., and Abbasi, S.A., "Biogas Energy"., *Springer*, New York (2012).
  100. Bahtiyar, Ö., and Emin, O., "Membran yöntemiyle biyogazdan karbondioksitin ayrıştırılması ve metan saflaştırma projesi". *Proje no: 105Y084*, (2008).
  101. Samer, M., "Biogas Plant Constructions", *Biogas, Intech.*, 345-348. (2012).
  102. Kaya, D., ve Öztürk, H.H., "Biyogaz Teknolojisi Üretim Kullanım Projeleme", *Umuttepe Yayınları*, Kocaeli, 51-70 (2012).
  103. Ramatsa, I.M., Akinlabi, E.T., Madyira, D.M. and Huberts, R., "Design of the Bio-digester for Biogas Production: A Review", *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2014 Vol II WCECS 2014*, San Francisco, USA, 1-4 (2014).
  104. Vögeli, Y., Lohri, C.R., Gallardo, A., Diener, S. and Zurbrügg, C., "Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries", *Binkert Buag AG*, Switzerland, 34,36,38 (2014).

105. Lahlou, Y., "Design of a Biogas Pilot Unit for Al Akhawayn University", Thesis, *School of Science and Engineering, Al Akhawayn University, Morocco*, 32-33 (2017).
106. Junne, S., "Basics of the Biogas Production Process", *Institute of Biotechnology, Technische Universitat Berlin*, Kozani, 6 (2014).
107. Regattieri, A., Bortolini, M., Ferrari, E., Gamberi, M. and Piana, F., "Biogas Micro-Production from Human Organic Waste—A Research Proposal", *Sustainability*, 10 (2): 330. (2018).
108. Sadi, M.-A., "Design and Building of Biogas Digester for Organic Materials Gained From Solid waste", Master Thesis, *An-Najah National University Faculty of Graduate Studies*, Nablus, West Bank, Palestine (2010).
109. İlkılıç, C. ve Deviren, H., "Biyogazın Oluşumu ve Biyogazı Saflaştırma Yöntemleri", *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, 150-155 (2011).
110. Kapdi, S.S., Vijay, V.K., Rajesh, S.K. and Prasad, R., "Biogas scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian context", *Renewable Energy*, 30 (8): 1195-1202 (2005).
111. Rautenbach, R. and Welschb, K., "Treatment of landfill gas by gas permeation - pilot plant results and comparison to alternatives", *Journal of Membrane Science*, 87: 107-118 (1994).
112. Çallı, B., "Atıklardan Biyogaz Üretimi", *Türk Kimya Derneği-Genç Kimyacılar Platformu*, İstanbul, 6 (2012).
113. Edwin, M. and Joseph Sekhar, S., "Techno-economic studies on hybrid energy based cooling system for milk preservation in isolated regions", *Energy Conversion and Management*, 86: 1023-1030 (2014).
114. Kang, D.W., Kim, T.S., Hur, K.B. and Park, J.K., "The effect of firing biogas on the performance and operating characteristics of simple and recuperative cycle gas turbine combined heat and power systems", *Applied Energy*, 93: 215-228 (2012).
115. İnternet: "Distributed Generation Renewable Energy Estimate of Costs", National Renewable Energy Laboratory, <https://www.nrel.gov/analysis/tech-lcoe-re-cost-est.html> (2016).
116. İnternet: Solar, J.D., "Economic Analysis", Chapter 15-21, <http://ecgllp.com/files/3914/0200/1304/15-Economic-Analysis.pdf> (2012).
117. Monlau, F., Sambusiti, C., Antoniou, N., Barakat, A. and Zabaniotou, A., "A new concept for enhancing energy recovery from agricultural residues by

- coupling anaerobic digestion and pyrolysis process", *Applied Energy*, 148: 32-38 (2015).
118. Rahman, R., "Feasibility analysis of wood-biomass energy generation for the off-grid community of Brochet in North-west Manitoba, Canada", *Master Thesis, Faculty of Environment Earth and Resources Natural Resources Institute, The University of Manitoba*, Canada (2014).
119. Amin, A.Z., "Power Generation Costs in 2014", *International Renewable Energy Agency (IRENA)*, Germany, 125-140 (2015).
120. Karabulut, K., "Asimetrik Gezgin Satıcı Problemi İçin Bir Evrimsel Strateji Algoritması", *CBÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 12 (3): 561-568 (2016).
121. Brownlee, J., "Clever Algorithms: Nature-Inspired Programming Recipes", *LuLu Melbourne*, Australia, 99-103, 120-122 (2011).
122. Storn, R. and Price, K., "Differential Evolution - A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces", *Technical Report TR-95-012. ICSI*, 1-15 (1995).
123. Küçükkoç, İ., "Karışık Modelli Montaj Hattı Dengeleme Problemleri ve Genetik Algoritmalar ile Bir Uygulama", Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Endüstri Mühendisliği*, Balıkesir, 36-39 (2011).
124. Vural, M., "Genetik Algoritma Yöntemi ile Toplu Üretim Planlama", *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 30-45 (2005).
125. Keskindürk, T., "Diferansiyel Gelişim Algoritması", *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5 (9): 85-99 (2006).
126. Whitley, D., "An overview of evolutionary algorithms practical issues and common pitfalls", *Information and Software Technology*, 43 (14): 817-831 (2001).
127. Emel, G.G. ve Taşkın Ç., "Genetik Algoritmalar ve Uygulama Alanları", *Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, XXI (1): 129-152 (2002).
128. Çetin, E., "Yapay Zeka Uygulamaları", *Seçkin Yayıncılık*, Ankara, 388-398 (2016).
129. İnternet: Vijini Mallawaarachchi, "Introduction to Genetic Algorithm" <https://towardsdatascience.com/introduction-to-genetic-algorithms-including-ex-ample-code-e396e98d8bf3> (2018).
130. Nabiyev, V.V., "Yapay Zeka", *Seçkin Yayıncılık*, Ankara, 602-613 (2012).

131. Şeker, T., "Düzlemsel Çelik Çerçevelerin Genetik Algoritma ile Optimizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği*, İstanbul (2008).
132. Kalınlı, A. ve Ö. Aksu, "Baskın Gen Seçimi Operatörüne Dayalı Genetik Algoritma Modeli", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26 (4): 869-875 (2011).
133. Karaboğa, D., "Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları", 4. Baskı, *Nobel Akademik Yayıncılık*. İstanbul: 73-88, 21-35 (2014).
134. Ahmadi, A., Bouanani, F.E., and Ben-Azza, H., "Four Parallel Decoding Schemas of Product BlockCodes", *Transactions on Networks and Communications*, 2 (3): 49-69 (2014).
135. Topbaş, M.A., "Isıl İşlemler", *Prestij Basın Yayın ve Hizmetleri*, İstanbul, Türkiye (1993).
136. Söke, A. ve Bingül, Z., "İki Boyutlu Giyotinsiz Kesme Problemlerinin Benzetilmiş Tavlama Algoritması ile Çözümlerinin İncelenmesi" *Politeknik Dergisi*, 8 (1): 25-35 (2005).
137. Kirkpatrick, S., C.D.G. Jr., and Vecchi, M.P., "Optimization by Simulated Annealing". *Science*, 220 (4598): 671-680 (1983).
138. Johnson, D.S., Aragon, C.R., McGeoch, L.A and Chevon, C., "Optimization by Simulated Annealing: An Experimental Evaluation; Part-I Graph Partitioning", *Operations Research*, 37: 865-892 (1989).
139. Kalınlı, A., "Elman Ağının Benzetilmiş Tavlama Algoritması Kullanarak Eğitilmesi", *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19 (1-2): 28-37 (2003).
140. Lundy, M. and Mees, A., "Convergence of Annealing Algorithm", *Mathematical Programming*, 34: 111-124 (1986).
141. Osman, I.H., "Metastrategy Simulated Annealing and Tabu Search Algorithms for Combinatorial Optimization Problems", *Imperial College, London University*, London, UK. (1991).
142. Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M.N., Teller, A.H and Teller, E., "Equation of State Calculations by Fast Computing Machines", *The Journal of Chemical Physics*, 21 (6): 1087-1092 (1953).
143. Çayıroğlu, İ., "Isıl İşlem Algoritması", *İleri Algoritma Analizi Ders Notları* (2016).
144. Kılıçaslan, K., "Isıl İşlem Algoritması (Simulated Annealing)", *Fen Bilimleri Enstitüsü, Trakya Üniversitesi*.



145. Ay, S., "Mühendisler, Ekonomistler ve İşletmeler İçin Elektrik Enerjisi Ekonomisi", *Birsan Yayınevi*, İstanbul, 249-251 (2008).
146. İnternet: Cesur, A.M., "Projenin Değerlendirme Yöntemleri ve Kullanılan Enstrümanlar", [http://www.emo.org.tr/ekler/baf163c24ed14b5\\_ek.doc?tipi=2&turu=X&sube=14](http://www.emo.org.tr/ekler/baf163c24ed14b5_ek.doc?tipi=2&turu=X&sube=14), Ankara (2006).
147. DOE Office of Indian Energy, "Levelized Cost of Energy (LCOE)", *U.S. Department of Energy* 2-9 (2013).
148. Nikolas Hill, Walker, H., Beevor, J. and James, K., "2011 guidelines to Defra/DECC's greenhouse gas conversion factors for company reporting: Methodology paper for emission factors", *Department for Environment, Food & Rural Affairs*, London (2011).

## ÖZGEÇMİŞ

Abdülsamed Tabak 1988 yılında Uşak'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini İzmir'de tamamladı. İzmir Kız Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2011 yılında Pamukkale Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Lisans eğitimi süresinde Erasmus programıyla Silesian University of Technology'den 2 dönem eğitim aldı. Lisans mezuniyetinden sonra İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde Enerji Mühendisliği alanında yüksek lisansa başladı. 2012 yılında İzmir'de özel bir şirkette elektrik-elektronik mühendisi olarak çalıştı. 2012 yılında Karabük Üniversitesi'ne araştırma görevlisi olarak atandı ve lisansüstü eğitimine burada devam etmeye başladı. Üniversitedeki görevine başladıktan sonra projeler kapsamında; 2012-2014 yılları arasında sanayi kuruluşlarında enerji etütlerine ve kestirimci bakım çalışmalarına katıldı.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Karabük Üniversitesi  
Teknoloji Fakültesi  
Balıklarkayası Mevkii / KARABÜK

Tel : (555) 553 8682

E-posta : samettabak@hotmail.com