

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ HİBRİT YENİLENEBİLİR ENERJİ
SİSTEMLERİNİN TASARIMI VE YÖNETİM STRATEJİSİ
İÇİN PARETO OPTİMUM YAKLAŞIMI**

DOKTORA TEZİ

TUBA TEZER

BALIKESİR, MAYIS - 2017

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ HİBRİT YENİLENEBİLİR ENERJİ
SİSTEMLERİNİN TASARIMI VE YÖNETİM STRATEJİSİ
İÇİN PARETO OPTİMUM YAKLAŞIMI

DOKTORA TEZİ

TUBA TEZER

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ramazan YAMAN (Tez Danışmanı)

Prof. Dr. Bedri YÜKSEL

Prof. Dr. Ramazan KÖSE

Doç. Dr. Ozan ERDİNÇ

Yrd. Doç. Dr. Gültekin KUVAT

BALIKESİR, MAYIS - 2017

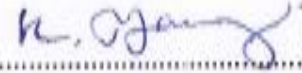
KABUL VE ONAY SAYFASI

Tuba TEZER tarafından hazırlanan "ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ HİBRİT YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİNİN TASARIMI VE YÖNETİM STRATEJİSİ İÇİN PARETO OPTİMUM YAKLAŞIMI" adlı tez çalışmasının savunma sınavı 12.05.2017 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Prof. Dr. Ramazan YAMAN



Üye
Prof. Dr. Bedri YÜKSEL



Üye
Prof. Dr. Ramazan KÖSE



Üye
Doç. Dr. Ozan ERDİNÇ



Üye
Yrd. Doç. Dr. Gültekin KUVAT



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

ÖZET

**ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ HİBRİT YENİLENEBİLİR ENERJİ
SİSTEMLERİNİN TASARIMI VE YÖNETİM STRATEJİSİ İÇİN PARETO
OPTİMUM YAKLAŞIMI
DOKTORA TEZİ
TUBA TEZER
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. RAMAZAN YAMAN)
BALIKESİR, MAYIS - 2017**

Enerji kaynakları günümüz dünyası için vazgeçilmez bir yaşam kaynağı, bunların kullanımı ve yönetimi de önemli bir gelişmişlik göstergesidir. Enerji kaynaklarının kullanımının artmasıyla birlikte var olan fosil kaynaklar giderek tükenmekte, ayrıca atmosfere salınan sera gazı miktarı da artmaktadır. Ortaya çıkan maddi ve çevresel kaygılar sonucunda alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaya başlanmıştır. Bu kaynaklar sürdürülebilir ve çevre dostu olmaları gibi avantajlarının yanı sıra, yatırım maliyetlerinin fazla olması ve sistem güvenilirliğinin yani kesintisiz ve güvenli enerji arzının yeterli olmaması gibi dezavantajlara sahiptir. Bu dezavantajların giderebilmesi amacıyla birden fazla yenilenebilir enerji kaynağının kullanıldığı, bunların geleneksel enerji kaynaklarıyla ve depolama sistemleriyle entegre edilebildiği hibrit sistemler geliştirilmiştir. Özellikle şebekeden uzak bölgelerin enerji ihtiyacını karşılamak için bu sistemler dizel jeneratör gibi geleneksel enerji kaynaklarına önemli bir alternatif olmaktadır. Bu sistemlerin kullanımı, toplam enerji maliyetinin minimizasyonu için sistem boyutlandırılması, ürettikleri enerjideki belirsizliğin dengelenmesi için sistem yönetimi ve sera gazı emisyonlarının azaltılması gibi bir ya da daha fazla sayıda amacı içerebilen optimizasyon problemlerine çözüm getirebilmeyi gerektirmektedir. Bu çalışmada minimum sistem maliyetini sağlayacak boyut optimizasyonu ve sistem güvenilirliği göstergelerinden biri olan Güç Tedariki Kaybı Olasılığı (LPSP) değerinin minimizasyonunu içeren çok amaçlı ve çok kısıtlı optimizasyon problemi için NSGA-II tabanlı SAHRESOpt çözüm algoritması geliştirilmiştir. Literatürdeki boyut optimizasyonu değerlendirmelerinden farklı olarak sistem elemanı tipleriyle birlikte sayıları da optimize edilmiştir. Ayrıca geliştirilen güç yönetimi stratejisiyle sistem elemanları arasındaki güç akışı, karşılanamayan yükü ve/veya boşa giden enerjiyi minimize edecek şekilde tasarlanmıştır. Geliştirilen algoritma fotovoltaik panel, rüzgâr türbini, yakıt hücresi, elektrolizör, hidrojen tank ve bir anaerobik reaktörün ürettiği metan gazını hidrojene dönüştüren reformer güç kaynaklarını içeren hibrit sistemler için simüle edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER:Hibrit Sistem, yenilenebilir enerji, çok amaçlı optimizasyon, güç yönetimi stratejisi, SAHRESOpt.

ABSTRACT

PARETO OPTIMUM APPROACH FOR DESIGN AND MANAGEMENT STRATEGY OF STAND-ALONE HYBRID RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

PH.D THESIS

TUBA TEZER

BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR:PROF. DR. RAMAZAN YAMAN)

BALIKESİR, MAY 2017

Energy resources are an indispensable source of life for today's world, their use and management is also an important developmental indicator. With the increase in the use of energy resources, fossil resources are gradually consumed and the amount of greenhouse gas released to the atmosphere is also increasing. As a result of emerging economic and environmental concerns, renewable energy sources come into use as an alternative. These resources have advantages such as being sustainable and environmentally friendly as well as they have disadvantages such as having high investment costs and insufficiency of continuous and reliable energy supply namely system reliability. To overcome these disadvantages, hybrid systems have been developed in which more than one renewable energy source those can be integrated with traditional energy sources and storage systems are used. These systems are an important alternative to conventional energy sources such as diesel generators, especially to meet the energy needs of remote areas. The use of these systems requires the ability to solve optimization problems involving one or more objectives, such as system sizing to minimize the total energy cost, system management to balance the uncertainty in their energy production and greenhouse gas emissions reduction. In this study, it has been developed NSGA-II based SAHRESOpt solution algorithm for multi-objective and multi-constraint optimization problem which includes size optimization that will provide minimum system cost and minimization of LPSP (Loss of Power Supply Probability) value which is one of the system reliability indexes. As different from size optimization evaluations in literature studies, the types of the system elements are also optimized together with the number of the system elements. In addition, with the developed power management strategy, power flow between system components is designed to minimize unmet load and/or waste energy. The developed algorithm was simulated for hybrid systems containing photovoltaic panels, wind turbines, fuel cells, electrolyzers, hydrogen tanks, and reformer that convert methane gas produced by an anaerobic reactor to hydrogen.

KEYWORDS:Hybrid System, renewable energy, multi-objective optimization, power management strategy, SAHRESOpt.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
TABLO LİSTESİ	vii
KISALTMALAR LİSTESİ.....	viii
SEMBOLLER LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ	4
2.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları	4
2.1.1 Güneş Enerjisi ve Sistemleri.....	5
2.1.2 Rüzgâr Enerjisi ve Sistemleri	7
2.1.3 Biyokütle Enerjisi	12
2.1.4 Hidrojen Enerjisi.....	12
2.2 Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemleri	12
3. OPTİMİZASYON KAVRAMI VE TÜRLERİ	14
3.1 Çok Amaçlı Optimizasyon Problemlerine Genel Bakış.....	15
3.2 SA-HRES Optimizasyonu Kapsamında En Sık Kullanılan Amaç Fonksiyonları.....	18
3.2.1 Sistem Maliyeti	18
3.2.1.1 Net Bugünkü Maliyet (NPC: Net Present Cost).....	19
3.2.1.2 Sistemin Yıllık Eşdeğer Maliyeti (ACS: Annualized Cost of System).....	20
3.2.1.3 Enerji Maliyeti (COE: Cost of Energy).....	20
3.2.1.4 Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC: Life Cycle Cost)	21
3.2.1.5 Yaşam Döngüsü Birim Maliyeti (LCUC: Life Cycle Unit Cost).....	21
3.2.1.6 Seviyelendirilmiş Enerji maliyeti (LCOE: Levelized Cost of Energy)	21
3.2.2 Sistem Güvenilirliği.....	22
3.2.2.1 Yük Kaybı Beklentisi (LOLE)	23
3.2.2.2 Enerji Kaybı Beklentisi (LOEE).....	24
3.2.2.3 Güç Tedariki Kaybı Olasılığı (LPSP).....	25
3.2.2.4 Güç Tedariki Eksikliği Olasılığı (DPSP).....	25
3.2.2.5 Yük Kaybı Olasılığı (LLP).....	25
4. HİBRİT YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ İÇİN GELİŞTİRİLEN OPTİMİZASYON YAKLAŞIMLARI	26
4.1 Klasik/Geleneksel Optimizasyon Yaklaşımları	26
4.1.1 Tek Amaçlı Optimizasyon için Klasik Optimizasyon Yaklaşımları	28
4.1.2 Çok Amaçlı Optimizasyon için Klasik Optimizasyon Yaklaşımları	28
4.2 Meta-Sezgisel Yöntemler	29
4.2.1 Genetik Algoritma	30
4.2.1.1 Tek Amaçlı Optimizasyon için Genetik Algoritma Yaklaşımları.....	33

4.2.1.2	Çok Amaçlı Optimizasyon için Genetik Algoritma Yaklaşımları.....	34
4.2.2	Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO).....	35
4.2.2.1	Tek Amaçlı Optimizasyon için PSO Yaklaşımları.....	37
4.2.2.2	Çok Amaçlı Optimizasyon için PSO Yaklaşımları	37
4.2.3	Evrimsel Algoritmalar	38
4.3	Diğer Optimizasyon Yaklaşımları.....	40
4.3.1	Tek Amaçlı Optimizasyon için Diğer Optimizasyon Yaklaşımları.....	41
4.3.2	Çok Amaçlı Optimizasyon için Diğer Optimizasyon Yaklaşımları	43
4.4	HOMER Yazılımı Kullanılarak Yapılan Çalışmalar	44
5.	SA-HRES TEMEL YAPILANMASI.....	46
5.1	Sistem Elemanlarının Modellenmesi	46
5.1.1	Rüzgâr Türbinlerinin Modellenmesi.....	47
5.1.2	Fotovoltaik Sistemin Modellenmesi	49
5.1.3	Yakıt Hücreleri ve Modellenmesi.....	50
5.1.3.1	Yakıt Hücreleri	50
5.1.3.2	Yakıt Hücrelerinin Modellenmesi	53
5.1.4	Elektrolizörler ve Modellenmesi	54
5.1.4.1	Elektrolizörler	55
5.1.4.2	Elektrolizörün Modellenmesi	59
5.1.5	Hidrojen Tankın Modellenmesi	60
5.1.6	Reformasyon ve Reformerin Modellenmesi.....	61
5.1.6.1	Biyogaz Buhar Reformasyonu.....	61
5.1.6.2	Reformerin Modellenmesi	62
5.2	SAHRESOpt Güç Yönetimi Stratejisi Algoritması	63
5.2.1	Başa Baş Enerji Durumu.....	64
5.2.2	Fazla Enerji Durumu.....	64
5.2.3	Eksik Enerji Durumu	66
5.3	Sistem Elemanlarının Değerlendirilmesi ve SA-HRESOpt Güç Yönetimi Stratejisi Algoritması'nın Doğrulanması	67
6.	SA-HRES ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYONU	72
6.1	NSGA-II	72
6.1.1	Hızlı Bastırılmama Sıralaması Yaklaşımı (Fast Non-Dominated Sorting Approach).....	73
6.1.2	Kalabalık Mesafe (Crowding Distance)	74
6.1.3	Crowded-Comparison Operator.....	75
6.1.4	NSGA-II Ana Döngü	75
6.2	Geliştirilen NSGA-II Tabanlı Çok Amaçlı Optimizasyon Algoritması (SA-HRESOpt) Adımları	76
6.2.1	Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması	79
6.2.1.1	Reformer Boyutu Algoritması	79
6.2.1.2	Sistemin Hibrit Olmasının Garanti Edilmesi için Algoritma	80
6.2.1.3	Başlangıç Popülasyonunun Operasyon Stratejisinin Düzenlenmesi	80
6.2.2	Çaprazlama	82
6.2.3	Mutasyon	83
6.3	SAHRESOpt ile Çok Amaçlı Optimizasyon Uygulamaları ve Örnek Sonuçlar.....	84

6.3.1 Pareto-Cepheye Ait Örnek Bir Çözüm için SAHRESOpt Güç Yönetimi Stratejisi Sonuçları.....	92
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	98
8. KAYNAKLAR.....	102
9. EKLER.....	121

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: FV reaksiyon sonucu P-N bağlantısı boyunca foton enerjisinin voltaja dönüşümü	6
Şekil 2.2: Temel bir FV hücrenin şematik görünümü	6
Şekil 2.3: FV dizi oluşum aşamaları	7
Şekil 2.4: Dikey eksenli RT Ana Elemanları	8
Şekil 2.5: Betz' Kanunu	10
Şekil 2.6: RT güç eğrisi örneği	11
Şekil 3.1: Pareto kavramı grafiksel anlatımı	16
Şekil 3.2: Sistem güvenilirliği ve maliyet ilişkisi	23
Şekil 3.3: LOEE 'nin grafiksel olarak anlatımı	24
Şekil 4.1: Bir optimizasyon probleminde Amaç Fonksiyonu - Yapılanma ilişkisi	27
Şekil 5.1: SA-HRES elemanları ve sistemin şematik görünümü	46
Şekil 5.2: Nominal gücü 1 kW olan RT'nin güç eğrisi	48
Şekil 5.3: PEMYH yapısı	52
Şekil 5.4: YH için örnek bir güç eğrisi	53
Şekil 5.5: ELC'nin şematik gösterimi	55
Şekil 5.6: PEM ELC'nin yapısı ve çalışma prensibi	57
Şekil 5.7: Alkali ELC'nin yapısı ve çalışma prensibi	58
Şekil 5.8: IEEE Test Sistemi saatlik bazda yıllık yük talebi değişimi eğrisi	68
Şekil 5.9: Çanakkale (40°9'0''K ve 26°24'0''D) iline ait bir yıllık rüzgâr hızı değişim eğrisi	68
Şekil 5.10: Çanakkale (40°9'0''K ve 26°24'0''D) iline ait bir yıllık güneş ışınımı değişim eğrisi	69
Şekil 5.11: Senaryo 3'e (RT- YH sistemine) ait HOMER ve SAHRESOpt Güç Yönetimi Stratejisi sonuçlarının karşılaştırması	71
Şekil 6.1: Crowding distance (CD)	75
Şekil 6.2: NSGA-II Prosedürü	76
Şekil 6.3: NSGA-II Tabanlı SAHRESOpt blok diyagramı	78
Şekil 6.4: Sistem yapılanması kodlama biçimi	81
Şekil 6.5: Tek noktalı çaprazlama	82
Şekil 6.6: Tek noktalı çaprazlama sonucu oluşan hatalı yapılanmaya örnek	83
Şekil 6.7: Operasyon stratejisi kısıtlarına göre düzenlenmiş yapılanmaya örnek	83
Şekil 6.8: Mutasyon	84
Şekil 6.9: Mutasyon sonucu oluşan bireyler	84
Şekil 6.10: LPSP kısıtı olmaksızın elde edilen Pareto-cepheye ait grafik	86
Şekil 6.11: SAHRESOpt sonucu oluşan Pareto-cephe	88
Şekil 6.12: SA-HRES elemanlarının toplam enerji üretimindeki payları	92
Şekil 6.13: Sistem tarafından yükün talebinin karşılanma durumu	93
Şekil 6.14: Aşırı enerji miktarı	94
Şekil 6.15: RFR tarafından üretilen fazla H ₂ (kg)	94
Şekil 6.16: Eksik enerji miktarı	94
Şekil 6.17: Sistemde oluşan fazla enerji (kWh) ve karşılanmayan yük değerleri	95

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 4.1: SA-HRES için bazı klasik optimizasyon algoritmaları ve temel özellikleri	27
Tablo 4.2: SA-HRES optimizasyonu için kullanılan GA yaklaşımları ve temel özellikleri	32
Tablo 4.3: SA-HRES optimizasyonu için kullanılan PSO yaklaşımları ve temel özellikleri	36
Tablo 4.4: SA-HRES optimizasyonu için kullanılan EA yaklaşımları ve temel özellikleri	39
Tablo 4.5: SA-HRES optimizasyonu için literatürde kullanılan diğer optimizasyon yaklaşımları ve özellikleri	41
Tablo 5.1: Sistemde kullanılan RT'lere ait veriler	48
Tablo 5.2: Sistemde kullanılan RT'ler ve maliyet değerleri	48
Tablo 5.3: Sistemde kullanılan FV Panel tipleri ve özellikleri	50
Tablo 5.4: Sistemde kullanılan FV Panelleri ve maliyet değerleri	50
Tablo 5.5: Sistemde kullanılan YH'ler ve maliyet değerleri	54
Tablo 5.6: Sistemde kullanılan ELC tipleri ve maliyet değerleri	60
Tablo 5.7: Sistemde kullanılan HT tipleri ve maliyet değerleri	60
Tablo 5.8: Sistemde kullanılan RFR tipleri ve maliyet değerleri	63
Tablo 5.9: Senaryo 1'e ait sonuçlar	70
Tablo 5.10: Senaryo 2'ye ait sonuçlar	70
Tablo 6.1: YH nominal çıkış gücüne bağlı olarak hidrojen tüketimi değerleri	80
Tablo 6.2: LPSP kısıtı olmaksızın elde edilen Pareto-cepheye ait değerler	87
Tablo 6.3: SAHRESOpt sonucu oluşan optimum sonuçlar (Pareto-cephe)	89
Tablo 6.4: Pareto-cepheye ait altı çözüm için SAHRESOpt Güç Yönetimi Stratejisi sonuçları	90
Tablo 6.5: E_dump değerinin kıyaslanması	91
Tablo 6.6: 32. Pareto optimum çözüme ait güç yönetimi stratejisi değerleri	96

KISALTMALAR LİSTESİ

ACS	Annualized Cost of System (Sistemin Yıllık Eşdeğer Maliyeti)
CD	Crowding Distance (Kalabalık Mesafe)
COE	Cost of Energy (Enerji Maliyeti)
EA	Evrimsel Algoritmalar
E_dump	Yıllık toplam aşırı enerji miktarı
EMS	Energy Management System (Enerji Yönetim Sistemi)
ELC	Elektrolizör
FV	Fotovoltaik
GA	Genetik Algoritma
HOMER	Yenilenebilir enerji sistemleri için hibrit optimizasyon modeli (Hybrid optimization model for electric renewables)
HT	Hidrojen Tank
HYES	Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemi/Sistemleri
LCC	Life Cycle Cost (Yaşam Döngüsü Maliyeti)
LCOE	Levelized Cost of Energy (Seviyelendirilmiş Enerji maliyeti)
LCUC	Yaşam Döngüsü Birim Maliyeti (Life Cycle Unit Cost)
LEC	Levelized Energy Cost (Seviyelendirilmiş Enerji maliyeti)
LOEE	Loss of Energy Expectation (yük kaybı beklentisi)
LOLE	Loss of Load Expectation (enerji kaybı beklentisi)
LPS	Loss of Power Supply (Güç Tedariki Kaybı)
LPSP	Loss of Power Supply Probability (Güç Tedariki Kaybı Olasılığı)
MATLAB	Matrix Laboratory
MCDM	Multi-Criterion Decision Making (Çok Kriterli Karar Verme)
MOEA	Multi-objective Evolutionary Algorithm (Çok Amaçlı Evrimsel Algoritma)
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Maksimum Güç Noktası İzleme)
NPC	Net Present Cost (Net Bugünkü Maliyet)
NSGA	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
NSGA-II	Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm (Hızlı ve Üstün Çok Amaçlı Genetik Algoritma)
PEM	Proton Exchange Membrane
PSO	Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)
RFR	Reformer
RT	Rüzgâr Türbini
SA-HRES	Stand Alone Hybrid Renewable Energy System/Systems (Şebekeden Bağımsız Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemi/Sistemleri)
SAHRESOpt	SA-HRES Çok Amaçlı ve Kısıtlı Optimizasyon Algoritması
SDO	Simulink Design Optimization (Simulink Tasarım Optimizasyonu)
SMR	Steam Methane Reforming (Buhar Metan Reformasyonu)
SPEA	Strength Pareto Evolutionary Algorithm (Güç Pareto Evrimsel Algoritma)
TAEP	Total Annual Energy Production (Toplam Yıllık Enerji Üretimi)
TOPSIS	Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution (İdeal Çözüme Benzerliği ile Performans Düzenleme Tekniği)
YH	Yakıt Hücresi

SEMBOLLER LİSTESİ

$cons_{H_2_{min}}$	YH'nin devreye girebilmesi için gerekli olan minimum H_2 miktarı (kg)
$cons_{H_2_{rated}}$	YH'nin tüketebileceği maksimum H_2 miktarı (kg)
E_{dump}	Sistem tarafından kullanılmayan (atık) enerji miktarı (kWh)
E_{dump-H_2}	Sistem tarafından kullanılmayan (atık) H_2 miktarı (kg)
$E_{ekskenj}$	Sistem tarafından üretilemeyen eksik enerji (kWh)
$E_{fc-conv}$	YH'nin ürettiği enerji (kWh)
E_{fzlenj}	Sistem tarafından üretilen fazla enerji miktarı (kWh)
$E_{fzlenj-pvwt}$	FV ve RT tarafından üretilen fazla enerji miktarı (kWh)
$E_{fzlenj-rfr}$	RFR tarafından üretilen fazla H_2 miktarı (kg)
E_{loss}	Yükün talep ettiği enerjinin karşılanamayan kısmı (kWh)
E_{pv}	FV panelin ürettiği enerji (kWh)
$E_{ren-elc}$	RT ve FV tarafından üretilen ELC'ye gönderilen fazla enerji (kWh)
$E_{ren-con}$	RT, FV ve RFR'nin beslediği YH tarafından üretilen toplam enerji (kWh)
$E_{rfr-fc-conv}$	RFR tarafından üretilen H_2 ile YH'nin ürettiği enerji (kWh)
E_{sist}	Sistemin ürettiği toplam enerji (kWh)
E_{tank}	HT'de bulunan H_2 miktarı (kg)
$E_{tank-max}$	HT'nin maksimum H_2 depolama kapasitesi (kg)
E_{wt}	RT 'nin ürettiği enerji (kWh)
$E_{yük}$	Yükün talep ettiği enerji miktarı (kWh)
f_{cic}	YH yakıt eğrisi birleşme (intercept) katsayısı ($kg/sa/kW_{rated}$)
f_{cs}	YH yakıt eğrisi eğimi ($kg/sa/kW$)
HHV_{H_2}	H_2 'nin üst ısı değeri
LHV_{H_2}	H_2 'nin alt ısı değeri
η_{elc}	ELC'nin etkililik katsayısı
η_{con}	Konverterin etkililik katsayısı
$P_{elc-tank}$	ELC tarafından HT'ye gönderilen H_2 miktarı (kg)
$P_{fc_{min}}$	YH'nin minimum çalışma gücü (kW)
$P_{fc_{rated}}$	YH'nin nominal çıkış gücü (kW)
P_{fc-tpl}	YH'nin toplam çıkış gücü (kW)
P_{rfr-fc}	RFR'nin YH'ye gönderdiği H_2 miktarı (kg)
$P_{rfr-tank}$	RFR tarafından HT'ye gönderilen H_2 miktarı (kg)
$P_{tank-fc}$	HT tarafından YH'ye gönderilen H_2 miktarı (kg)

ÖNSÖZ

Yüksek lisans ve doktora çalışmalarında bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli danışman hocam Prof. Dr. Ramazan Yaman'a doktora tezi süresince değerli katkılarıyla destek olan doktora tez izleme jüri üyeleri sayın Prof. Dr. Bedri Yüksel ve sayın Prof. Dr. Ramazan Köse'ye, desteklerini esirgemeyen Balıkesir Meslek Yüksekokulu kıymetli hocaları Öğr. Gör. Alp İmrek ve Yrd. Dç. Dr. Ersin Akyüz'e, her ihtiyacım olduğunda yardımlarını esirgemeyen canım kardeşim Kimya Mühendisi Halil Sinoplugil'e teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Hayatta amaçlarım doğrultusunda zorluklar karşısında yılmadan çalışma azmini örnek aldığım, dünyaya gelme ve sevme sebebim canım annem Fazilet Sinoplugil ve canım babam Himmet Sinoplugil'e, her zaman yanımda olan canım ablam Dr. Arzu Mallı'ya, yardım ve desteğiyle hep yanımda olan sevgili eşim Emre Tezer'e, bu süreçte destekleriyle yanımda olan annem Aysun Tezer ve babam Ekrem Tezer'e ve canımdan öte canlarım, zorluklar, sıkıntılar karşısında gücüm, ümidim, en güzel emanetlerim oğullarım Ömer Engin ve Ahmet Ediz'e, uzun ve zorlu geçen bu süreçte daima yanımda olan desteklerini esirgemeyen tüm değerli aileme, gösterdikleri sabır ve anlayış için sonsuz teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunuyorum.

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmelere paralel olarak gelişen dünya ekonomisinin sonucunda günümüzde enerji talebi dikkate değer bir şekilde artmaktadır. Artan enerji talebine cevap vermek için gerçekçi olarak uygulanabilecek iki strateji söz konusudur. Birincisi, endüstriyel ve ev kullanımlarında enerji verimliliğinin sağlanmasıyla, enerji tüketiminin azaltılarak mevcut kaynakların kullanım süresinin artırılması yani diğer bir ifadeyle enerji tasarrufu yoluna gidilmesi, ikincisi ise yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranının tüm dünyada artırılmasıdır [1]. Böylece artan enerji talebine paralel olarak fosil yakıt tüketiminin ve bunun sonucu olarak sera gazı emisyonu artışının önüne geçilebilecektir.

Enerji kaynakları, tüm ülkeler için ekonomik ve siyasi bakış açısından çok önemlidir. Bu kaynakların değerlendirilmesi ve teknolojik gelişimleri karşılayabilecek enerji sistemlerinin geliştirilmesi günümüz dünyasının en önemli konularından biridir.

Küresel enerji sistemi mevcut haliyle gelecek yıllar için umut ve beklentilere cevap verememe durumuna gelmektedir [2]. Dünya enerji talebinin 2010'dan 2040'a %56 artacağı, buna bağlı olarak da 2010 yılında 31,2 milyar metrik ton olan karbon dioksit emisyonlarının 2040 yılında 45,5 milyar metrik tona çıkması beklenmektedir [3]. Bununla birlikte, fosil esaslı petrol, kömür ve doğal gaz rezervlerinin de sonraki yıllarda hızla tükeneceği bilinmektedir [4].

Günümüzde, fosil yakıtların sebep olduğu karbondioksit emisyonu miktarının giderek artması, fosil yakıt kaynaklarının giderek azalıyor olması, nükleer enerji santrallerinin de çevreye ve insan sağlığına yönelik riskler taşıyor olması nedeniyle yenilenebilir enerjiye olan ilgi artarak devam etmektedir. Ayrıca enerjide dışa bağımlılığı ortadan kaldıracak yerli kaynaklar olmaları da bu kaynaklara olan talebin bir diğer sebebi olmaktadır. Artan ilgi ve taleple doğru orantılı olarak yenilenebilir enerjiyle ilgili çalışmalar ve uygulamalar da hız kazanmaktadır.

Genç ve büyüyen nüfusu, kişi başına düşük elektrik tüketimi, hızlı kentleşme ve güçlü ekonomik büyüme ile Türkiye, son yıllarda dünyanın en hızlı büyüyen enerji pazarlarından biri haline gelmiştir [5, 6]. Türkiye'de elektrik ağırlıklı olarak, kömür, linyit, doğalgaz, akaryakıt ve jeotermal enerji tüketen termik santraller ve de hidroelektrik enerji santralleri tarafından üretilmektedir [7]. Ülkemiz yenilenebilir enerji kaynakları açısından, özellikle de hidrolik, jeotermal, güneş ve rüzgâr enerjileri bağlamında, oldukça büyük bir potansiyele sahip olmasına rağmen bu kaynakların elektrik üretiminde ki payı henüz istenilen değerlere ulaşmış değildir. Dünyada oluşan farkındalığın bir yansıması olarak ülkemizde de yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin toplam üretimdeki payının artırılması için harekete geçilmiştir. Türkiye'de hükümetin açıkladığı Vizyon 2023'e göre, 2023 yılında yaklaşık 530.000 GWh olacağı tahmin edilen elektrik tüketiminde, hedeflenen yenilenebilir enerjiden elektrik eldesi payı %30 yani 160.000 GWh olarak belirlenmiştir. Ancak, mevcut kurulu yenilenebilir enerji kapasitesi yaklaşık 60.000 GWh tır [8]. Bu rakamlardan da anlaşılacağı üzere ülkemizde de enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması ve şebeke bağımlı ya da bağımsız yenilenebilir enerji sistemlerinin hızla geliştirilerek çoğaltılması bir zaruret haline gelmiştir.

Yenilenebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesi, enerji arz güvenilirliği ve organik yakıt ekonomisi geliştirme, yerel enerji ve su temini sorunlarını çözmeye, yerel nüfusun istihdam düzeyini ve yaşam standartlarını artırma, çöl ve dağlık bölgelerdeki uzak yerleşim bölgelerinde sürdürülebilir kalkınmanın sağlanması, çevre koruma ile ilgili uluslararası anlaşmaların uygulanmasına ilişkin ülkelerin yükümlülüklerinin yerine getirilmesi gibi, mevcut en önemli görevlerin üstesinden gelmeyi mümkün hale getirecektir [9].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının sağladıkları enerjinin kesintili olması, bunların birlikte kullanımını yani hibrit yenilenebilir enerji sistemlerini doğurmuştur. Birbirini tamamlayan farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı bu kaynakların yapılandırılması yani boyut optimizasyonu, sistem yönetimi ve güvenilirliği, çevreye zararlı atıkların minimizasyonu gibi parametrelerde optimizasyonu gerektirmektedir. Özellikle maliyeti minimize eden sistem elemanlarının türlerine ve de boyutlarına karar verme, yenilenebilir enerji

kaynaklarından elektrik enerjisi elde eden sistemlerin kurulum maliyetlerinin halen çok yüksek olmasından dolayı bu sistemlerin tasarım, seçim ve işletilmesinde öncelikli olarak değerlendirilen önemli bir optimizasyon problemi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin optimizasyonu aynı anda birden çok enerji kaynağının kullanılması, bu kaynakların yatırım maliyetlerinin yüksek olması dolayısıyla boyutlandırılmalarının önemli olması, yenilenebilir kaynakların enerji üretiminin kesintili olması gibi güçlükler nedeniyle oldukça karmaşık bir optimizasyon problemi olabilmektedir. Yenilenebilir enerji sistemleri için geliştirilen simülasyon tabanlı yaklaşımlar çözüm alternatiflerinin yalnızca sınırlı bir kısmını değerlendirirken, en uygun çözümleri dikkate alamama riskleri söz konusudur. Bu nedenle ayrıntılı analiz içeren optimizasyon yazılımlarının kullanılması ya da algoritmaların geliştirilmesi faydalı olacaktır.

Son yıllarda hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin tasarımı, optimizasyonu, işletimi ve kontrolü konuları birçok araştırmacı tarafından çalışılmaktadır. Bu doğrultuda, yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli kullanımı için, yenilenebilir enerji modelleri, emisyon azaltma modelleri, enerji planlaması modelleri, enerji arz ve talep modelleri, tahmin modelleri ve kontrol modelleri gibi çeşitli optimizasyon modelleri geliştirilmiş ya da incelenmiştir [10, 11]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli ve etkin olarak kullanıldığı tek kaynaklı ya da hibrit sistemlerin geliştirilebilmesi için doğru optimizasyon tekniklerinin uygulanması gerekliliği her geçen gün artan bir ivmeyle ortaya konulmaktadır.

2. YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ

Enerji kaynakları günümüz dünyası için vazgeçilmez bir yaşam kaynağı, bunların kullanımı ve yönetimi de önemli bir gelişmişlik göstergesidir. Gelişen dünya ekonomisine paralel olarak enerji kaynaklarının kullanımının artmasıyla birlikte var olan fosil kaynaklar giderek tükenmekte, ayrıca atmosfere salınan sera gazı miktarı da artmaktadır. Ortaya çıkan maddi ve çevresel kaygılar sonucunda alternatif enerji kaynakları olarak yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaya başlanmıştır. Bu kaynaklar sürdürülebilir ve çevre dostu olmaları gibi avantajlarının yanı sıra yatırım maliyetlerinin fazla olması ve sistem güvenilirliğinin yani kesintisiz ve güvenli enerji arzının yeterli olmaması gibi dezavantajlara sahiptir. Bu dezavantajlarının giderebilmesi amacıyla birden fazla yenilenebilir enerji kaynağının kullanıldığı ve/veya bunların geleneksel enerji kaynaklarıyla ve/veya depolama sistemleriyle entegre edilebildiği hibrit sistemler geliştirilmiştir.

2.1 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Enerji, değişime sebep olma yani bir cismin veya sistemin iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Başlıca enerji çeşitleri; kimyasal enerji, ısı enerjisi, elektrik enerjisi ve mekanik enerji olarak sıralanabilir. Bu enerjiler; enerji dönüşüm sistemleri ile birbirine dönüştürülebilmektedirler [12].

Yenilenebilir enerji doğada hiçbir üretim prosesi gerçekleştirilmeden sürekli var olan enerji akışından kaynaklanır. Bu nedenle, kullanılan enerjiye eşit ya da daha hızlı bir şekilde kendi kendini yenileyebilen enerji kaynaklarına yenilenebilir enerji kaynağı adı verilmektedir. Güneş ya da rüzgâr enerjisi kullanıldığında, bu kaynaklardan alınan enerjinin, kaynağın sonsuz enerjisinin yanında çok küçük kalması, güneş ışığı ve rüzgârın yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynakları olduklarını ifade etmektedir.

Güneş çekirdeğinde meydana gelen füzyon olayı, yani hidrojen gazının helyuma dönüşmesi ile meydana gelen ışıma enerjisi dünyanın en önemli enerji

kaynağıdır ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının çoğunun enerjisini doğrudan ya da dolaylı olarak sağlamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, güneş enerjisi, hidroelektrik, rüzgâr, biyokütle, jeotermal ve deniz enerjilerini kapsamaktadır [9]. Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinde ağırlıklı olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları ise başta rüzgâr ve güneş olmak üzere, biyokütle, hidrojen ve hidroelektrik enerjileridir.

Yenilenebilir enerji teknolojileri sistemleri, zararlı emisyonları azaltma ve enerji kaynaklarının tükenmesi ile başa çıkma stratejisinin önemli bileşenleridir. Yenilenebilir enerji kaynakları, minimum karbon dioksit emisyonları ile ısıtma ve elektrik üretimi gibi birçok uygulama için kullanılmaktadır [10].

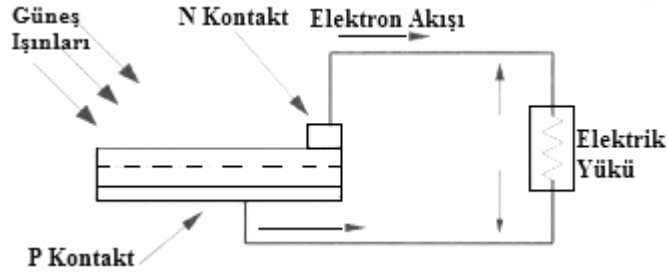
2.1.1 Güneş Enerjisi ve Sistemleri

Güneş, büyük bir termonükleer füzyon tepkimesiyle hidrojeni helyuma çevirdiğinde, kütle Einstein'ın ünlü formülü $E = mc^2$ 'ye göre enerjiye dönüştürülür [13].

Fotovoltaik (FV) güç teknolojisi, genellikle birkaç santimetreküp büyüklüğündeki yarı iletken hücreleri kullanarak güneş ışığını doğru akıma (DC: Direct Current) dönüştüren güç üretim yöntemidir.

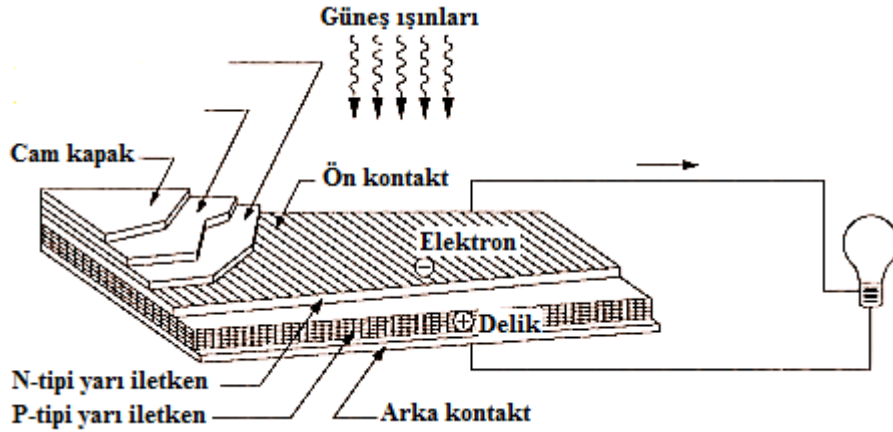
FV etki, güneş enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürüldüğü temel bir fiziksel işlemdir [14, 15].

FV hücrenin fiziki yapısı, P-N jonksiyonlu (bağlantılı) klasik diyotun fiziki yapısına çok benzemektedir (Şekil 2.1) [16]. Diyot, bir yöndeki dirençleri ihmal edilebilecek kadar küçük, diğer yöndeki dirençleri ise çok büyük olan ve böylece yalnızca bir yönde akım geçiren devre elemanıdır. Diyotun gerilim kaynağının pozitif (+) kutbunun bağlandığı uç kısmına anot, negatif (-) kutbunun bağlandığı uç kısmına katot denilmektedir.



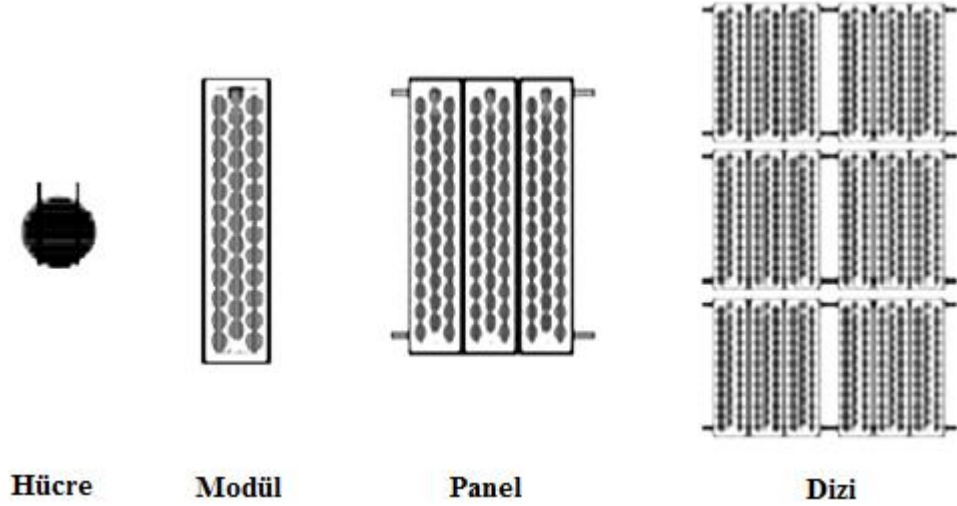
Şekil 2.1: FV reaksiyon sonucu P-N bağlantısı boyunca foton enerjisinin voltaja dönüşümü

FV hücrede, birleşim yüzeyinin (junction: bağlantı) absorbe ettiği güneş ışığından gelen fotonların enerjisi yarı iletken malzemeye aktarılarak bağlantı yüzeyinde ayrılmış yük taşıyıcıları oluşturulur. Elektron-delik (hole) çifti olarak tanımlanan yük taşıyıcıları P-N birleşim yüzeyinde oluşan elektrik alanı altında hızlanarak ayrılır ve elektronlar N-tipi yarı iletken yüzeye delikler ise P-tipi yarı iletken yüzeye sürüklenir. Hızlanan elektronlar N-bölgesinden harici bir devre üzerinden akım dolaştırarak direkt olarak yükü besleyebilecek elektrik gücünü oluşturur (Şekil 2.2) [14, 16].



Şekil 2.2: Temel bir FV hücrenin şematik görünümü

FV güç sisteminin ana yapı taşı olan FV hücre yaklaşık olarak 0,4-0,5 V DC gerilim ve 1 W güç üretir. Şekil 2.3'de görüldüğü üzere bu hücrelerin seri ve paralel olarak bağlanmasıyla birkaç metrekaarelik alanı oluşturan modül, modüllerin birleştirilmesiyle ise FV panel oluşturulur. İstenilen büyüklükte güç elde etmek üzere FV panellerin hem seri hem de paralel olarak bağlanmasıyla da FV dizi meydana getirilir.



Şekil 2.3: FV dizi oluşum aşamaları

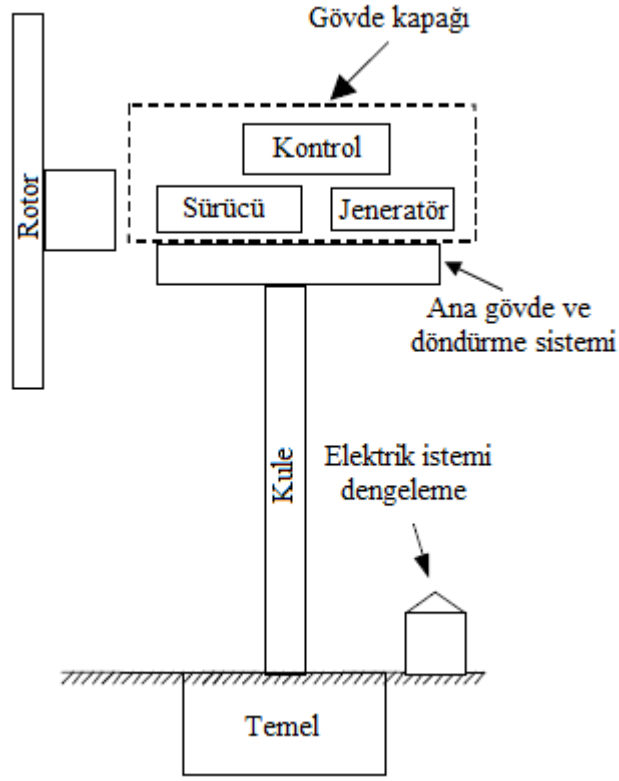
2.1.2 Rüzgâr Enerjisi ve Sistemleri

Rüzgâr enerjisi, güneşin yeryüzünü eşit olarak ısıtmamasından kaynaklanan sıcaklık ve basınç farkları sonucunda meydana gelen hava akımıyla oluşmaktadır. Güneşin dünyaya gönderdiği enerjinin %1-2 gibi çok küçük bir kısmıyla oluşan rüzgâr enerjisi [17], alternatif enerjinin en umut verici kaynaklarından biridir [1].

Rüzgâr enerji sistemleri, rüzgâr hızının düşük olduğu yerlerde teknik açıdan uygun olmayabilir. Ayrıca güneş enerjisine göre daha öngörülemez bir enerji kaynağıdır. Bu karakteristiklerinden dolayı da konumlandırma kararı önemli bir optimizasyon problemidir. Açık deniz ve yüksek irtifa alanları gibi rüzgârın daha güçlü ve daha sabit olduğu alanlar, rüzgâr çiftlikleri için tercih edilen yerlerdir [1].

Rüzgâr teknolojisi, rüzgâr türbinlerinin (RT'lerin) kullanımı ile rüzgârdan elde edilen enerjiyi mekanik enerjiye daha sonra elektrik enerjisine dönüştürür [18].

RT'ler gövde, rotor ve bunları taşıyan kuleden oluşur. Rüzgârın kinetik enerjisi kanatları döndürdüğünde rotora bağlı olan gövde içerisindeki düşük devirli ana mil de döner. Ana milin hareketi dişli kutusu vasıtasıyla jeneratöre iletilir. Şekil 2.4'de bir RT'nin ana elemanları şematik olarak gösterilmektedir [19].



Şekil 2.4: Dikey eksenli RT Ana Elemanları

Rüzgâr enerjisi mekanik kapasitesini (P) hesaplamak için, rüzgârın kinetik enerjisinin (E_K) kütle akışı türevine bağlı olarak Bernoulli denklemi şu şekilde kullanılır [20, 21]:

$$P = \frac{dE_K}{dt} = \frac{1}{2} v^2 \frac{dm}{dt} \quad (2.1)$$

Saniyedeki kütle akışı hızı, rotor kanatları tarafından süpürülmüş dairesel alan A (m^2) boyunca v hızıyla geçen hareketli hava kütlesi türevi ($\frac{dm}{dt}$) ile verilir. Bir akışkanın herhangi bir ortalama akışı ($\bar{\theta} = A\bar{v}$) için, akışkanın akıntıya karşı akışı, havanın hacmi (V) olarak verilebilir [20]:

$$\frac{dm}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} = \rho \bar{\theta} = \rho A \bar{v} \quad (2.2)$$

Burada $\rho = m/V$, kg/m^3 cinsinden havanın yoğunluğunu (deniz seviyesinde ve $0^\circ C$ sıcaklıkta hava yoğunluğu $1,2929 kg/m^3$ değerindedir) ifade etmektedir.

Rüzgârdan elde edilen efektif güç, türbine ulaşan hava akışı hızından (v_1) ve türbini terk eden hızdan (v_2) türemiştir. Denklem 2.2, rotor bıçaklarının rotor kanatları üzerinde etkili olan A bölgesindeki ortalama hız $(v_1 + v_2) / 2$ dikkate alındığında [20];

$$\frac{dm}{dt} = \rho A \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \quad (2.3)$$

Bununla birlikte, türbine ulaşan rüzgâr hızıyla türbini terk eden rüzgâr hızının kinetik enerjileri arasında bir fark söz konusudur. Denklem 2.1 bu fark dikkate alınarak yeniden düzenlendiğinde, RT'nin net mekanik gücü şu şekilde elde edilir [20];

$$P = \frac{dE_K}{dt} = \frac{1}{2} (v_1^2 - v_2^2) \frac{dm}{dt} \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.4)$$

(2.3) eşitliğindeki kütle akışı türevi, (2.4) eşitliğinde yerine konulduğunda güç ifadesi şu şekilde olmaktadır:

$$P = \frac{dE_K}{dt} = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \quad (2.5)$$

$$P = \frac{1}{4} \rho A v_1^3 \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \right) \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right) \quad (2.6)$$

Güç katsayısı ya da rotor etkinliği olarak Betz' tarafından ifade edilmiş olan C_p değeri (*Betz' Limiti*) ise;

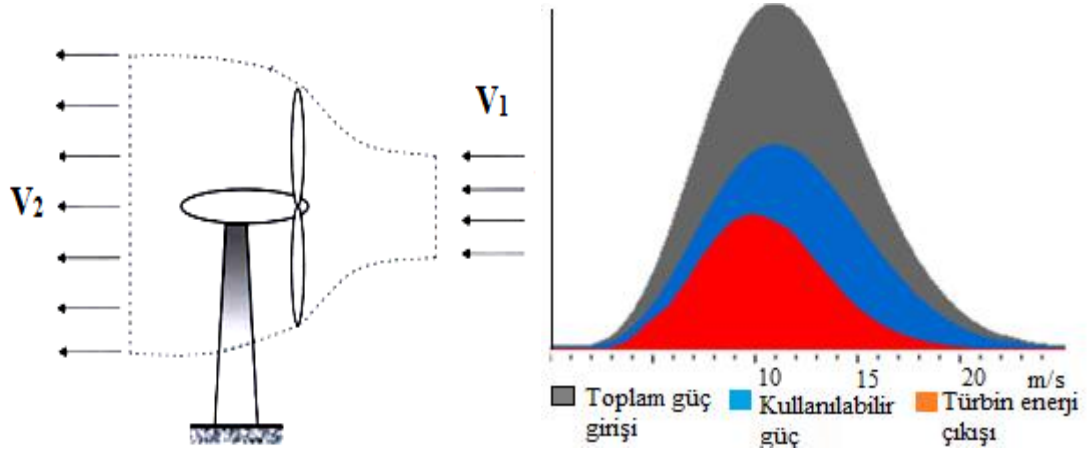
$$C_p = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \right) \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right) \quad (2.7)$$

Eşitlik (2.6) C_p değerine göre düzenlendiğinde bir RT'nin mekanik gücü şu şekilde ifade edilmektedir [20]:

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p A v_1^3 \quad (2.8)$$

RT'ler rüzgârı saptırdığından dolayı rüzgârın tüm enerjisini almak mümkün değildir. İdeal bir RT rüzgârın hızını $2/3$ oranında düşürmektedir. Bu durum Şekil 2.5'de görülebileceği gibi rüzgârın kinetik enerjisinin ancak $16/27$ 'sinin yani

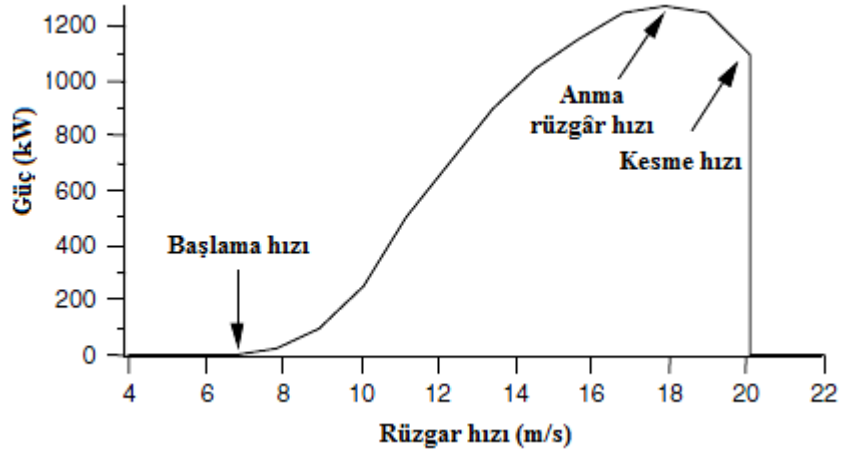
%59,3'ünün RT ile mekanik enerjiye dönüştürülebileceğini anlatan Betz' kanunu ile de açıklanmaktadır [22].



Şekil 2.5: Betz' Kanunu

Betz' Limiti (C_p) teorik olarak maksimum %59,3 olsa da günümüz teknolojisiyle iyi tasarlanmış ideal bir RT için C_p değeri %40 civarındadır. C_p güç faktörü aynı zamanda “Tip-Speed Ratio – Kanat Ucu Çevresel Hız Oranı” olarak bilinmektedir. (2.7) eşitliğinde de görüldüğü üzere prensip olarak, eğer elde edilen gücün sürekli olarak maksimum seviyede olması isteniyorsa, anlık rüzgâr hızlarına göre rotor dönüş hızının değiştirilerek kanat ucu çevresel hız oranının maksimum C_p değerini verebilecek bir optimum değerde tutulması gerekmektedir. Günümüz teknolojisiyle geliştirilmiş RT'lerde bu düzenleme otomatik olarak gerçekleştirilmektedir [17].

Bir RT'nin güç çıkışı rüzgâr hızına göre değişir ve her RT, karakteristik bir güç performans eğrisine sahiptir. Böyle bir eğri ile çeşitli bileşenlerin teknik ayrıntılarını dikkate almadan bir RT'nin enerji üretimini tahmin etmek mümkündür. Güç eğrisi, göbek yüksekliği rüzgârının hızının bir fonksiyonu olarak elektrik gücü çıktısını verir. Şekil 2.6, varsayımsal bir RT için bir güç eğrisi örneği sunmaktadır [19].



Şekil 2.6: RT güç eğrisi örneği

Verilen bir RT jeneratörünün performansı, hız ölçeğinde üç temel nokta ile ilgili olabilir [19]:

- **Başlama hızı (cut-in speed):** makinenin kullanışlı güç sağlayacağı minimum rüzgâr hızı.
- **Anma rüzgâr hızı (rated speed):** anma gücünün (genellikle elektrik jeneratörünün maksimum güç çıkışı) ulaştığı rüzgâr hızı.
- **Kesme hızı (cut-out speed):** türbinin güç üretmesine izin verilen azami rüzgâr hızı. Bu değer genel olarak mühendislik tasarımı ve emniyet kısıtlamaları ile sınırlandırılmıştır.

Türkiye'de yer seviyesinden 50 metre yükseklikte ve 7,5 m/s üzeri rüzgâr hızlarına sahip alanlarda kilometrekare başına 5 MW gücünde rüzgâr enerjisi santrali kurulabileceği kabul edilerek Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) hazırlanmıştır. Türkiye için 48.000 MW olarak belirlenen rüzgâr enerjisi potansiyeline karşılık gelen toplam alan Türkiye yüz ölçümünün %1,3'üne denk gelmektedir [23].

2.1.3 Biyokütle Enerjisi

Biyokütle, bitki ve hayvanlar da dâhil olmak üzere, yaşayan ya da yakın zamana kadar yaşamış olan canlı organizmalardan elde edilen bir yenilenebilir enerji kaynağı olan biyolojik malzemelerdir [1]. Biyokütle yenilenebilir, yanmaya dayalı elektrik üretimi için kullanılabilen tek yakıttır [24]. Biyokütle elektrik üretiminin yanı sıra buhar üretmek için ya da sanayi ve evlerde ısı sağlamak için kullanılabilir. [25].

2.1.4 Hidrojen Enerjisi

Hidrojen gazı farklı yöntemlerle elde edildiği gibi su, güneş enerjisi veya onun türevleri olarak kabul edilen rüzgâr, dalga ve biyokütle ile de üretilmektedir. Hidrojen, üretim kaynakları son derece bol ve çeşitli olan sentetik bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojen dünyada tek başına bulunmadığından önce birincil enerji kaynaklarından üretilmesi gerekir. Fosil yakıtlardan elde edilebildiği gibi güneş, rüzgâr, hidrolik enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ile suyun elektrolizi vasıtasıyla üretimi, biyokütleden üretimi ve biyolojik proseslerle üretimi mümkündür [25].

Dünyada hidrojen üretim yöntemleri arasında doğalgazın buhar metan reformasyonu ile hidrojen üretimi toplam hidrojen üretiminin %80-85'ini oluşturmaktadır [26, 27]. Kalan hidrojen üretiminin çoğu kömür gazlaştırma ve nispeten daha küçük miktarı suyun elektrolizi ile gerçekleştirilmektedir [27].

Hidrojen, buhar metan reformasyonuna alternatif olarak, saf oksijen veya hava ile kısmi oksidasyon, piroliz ve ototermal reformasyon (kısmi oksidasyon ve su buharı oksidasyonu bir arada) reaksiyonları ile de üretilmektedir [28].

2.2 Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemleri

Hibrit yenilenebilir enerji sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili tabiatı nedeniyle enerji arzının sürekliliğini sağlamak için bir ya da daha

fazla yenilenebilir enerji kaynağının birbirini tamamlayacak biçimde birlikte kullanılması ihtiyacından ortaya çıkmıştır. Tek başına kullanıldığında bir yenilenebilir enerji sistemi, yatırım maliyetinin yüksek oluşu, sistem güvenilirliğinin sağlanamaması, özellikle şebekeden bağımsız sistemlerde fazla enerjinin depolanamayarak boşa gitmesi gibi olumsuzlukları nedeniyle uygulamada çok fazla tercih edilmemektedir. Bu olumsuzluklarını gidermek için farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının en az iki tanesinin kullanıldığı ya da bir jeneratör ve/veya akü grubuyla birlikte kullanımlarının söz konusu olduğu hibrit yenilenebilir enerji sistemleri geliştirilmiştir.

Bir hibrit yenilenebilir enerji sistemi, sistem verimliliğini arttırmak ve aynı zamanda enerji arzında daha fazla denge sağlamak için, genellikle birlikte kullanılan iki veya daha fazla yenilenebilir enerji kaynağından oluşmaktadır [29]. Bir hibrit yenilenebilir enerji sistemi farklı yenilenebilir kaynaklardan ve enerji depolama ünitelerinden oluşabildiği gibi bir ya da birden fazla yenilenebilir enerji kaynağıyla geleneksel enerji kaynağı ya da kaynaklarının ve/veya yedekleme ünitelerinin (akü grubu gibi) birlikte kullanılmasından oluşan örneklerine literatürde rastlanmaktadır.

Hibrit yenilenebilir enerji sistemleri şebekeye bağlı ya da şebekeden bağımsız olarak kurulabilmektedir. Şebekeden bağımsız hibrit yenilenebilir enerji sistemleri (SA-HRES: Stand Alone Hybrid Renewable Energy System/Systems) özellikle küçük ölçekli kırsal bölgeler, adalar gibi şebekenin bulunmadığı ve şebekeye bağlanmanın daha maliyetli olabildiği bölgeler için enerji ihtiyacını karşılamada önemli bir alternatif haline gelmiş durumdadır. SA-HRES, yenilenebilir enerji teknolojilerindeki gelişmeler ve petrol ürünleri fiyatlarındaki yükseliş nedeniyle, uzak bölgelerde enerji üretimi uygulamaları için popüler hale gelmektedir [30].

Küresel olarak, yenilenebilir kaynaklı enerji üretiminde, büyümede en büyük payı %34 ile rüzgâr enerjisi almakta, onu takiben %30 pay ile hidroelektrik ve %18 ile güneş enerjisi gelmektedir [31].

3. OPTİMİZASYON KAVRAMI VE TÜRLERİ

Optimizasyon teorisi, verilen tanım kümesinde amaç fonksiyonunun minimum ya da maksimum değerlerini arayan problemlerin matematiksel çalışmasıdır [32, 33]. Optimizasyon problemi, kısıtları sağlayarak amaç fonksiyonunu minimize ya da maksimize eden değişkenlerin değerini bulmaktır [33]. Genel olarak bir optimizasyon probleminin matematiksel ifadesi şöyledir [34, 35]:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & F(x_1, x_2, \dots, x_n) & (3.1) \\ \text{Kısıtlar} \quad & G(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0 \\ & x_i \in S_i \end{aligned}$$

Burada F amaç fonksiyonunu, x değişkenlerin vektörünü, G fonksiyonel kısıtların vektörünü ifade etmektedir. S_i , sınır değerler ya da değişken türüne bağlı olarak ayrı bir dizi değer ile tanımlanan uygun çözümler kümesidir.

Optimizasyon problemleri çeşitli kriterlere göre farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Örneğin; kısıtların varlığına bağlı olarak kısıtlı ya da kısıtlanmamış optimizasyon, karar değişkenlerinin durumuna göre kesikli (kombinatorial) veya sürekli optimizasyon, amaç fonksiyonlarının sayısına göre tek veya çok amaçlı optimizasyon, ele alınan problemde verilerin kesin olarak bilinip bilinmediğine bağlı olarak deterministik ve stokastik optimizasyon şeklinde sınıflandırmalar mevcuttur. Kombinatorial optimizasyon kesikli değişkenli fonksiyonların optimizasyonu ile ilgili bir optimizasyon bir dalıdır [1] ve nesnelerin sonlu toplamında bir optimum nesneyi arar [36]. İşlemsel (computational) optimizasyon çok çeşitli optimizasyon problemlerini çözmek için, algoritmaları tasarlamak, uygulama ve test etme süreci olarak tanımlanabilir [1]. Yukarıda değinildiği gibi optimizasyon problemleri, amaç fonksiyonlarının sayısına bağlı olarak, tek amaçlı ve çok amaçlı optimizasyon olmak üzere iki grupta değerlendirilmektedir. Bu tezin konusu olan SA-HRES'in çok amaçlı optimizasyonu problemini irdelemeden önce, çok amaçlı optimizasyon kavramı izleyen bölümde kısaca açıklanmaktadır.

3.1 Çok Amaçlı Optimizasyon Problemlerine Genel Bakış

Çeşitli amaçların aynı anda optimizasyonunu gerektiren yani amaç fonksiyonunun birden fazla olduğu problemlere çok amaçlı optimizasyon problemi denilmektedir.

Genel bir çok amaçlı optimizasyon problemi m parametrenin (karar değişkenlerinin) bir grubunu n amaçlarının bir grubuyla eşleyen bir vektör fonksiyonu (f) olarak tanımlanabilir. Şöyle ki [37]:

$$\min \text{ yada } \max y = f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \quad (3.2)$$

x , karar vektörü, X parametre uzayı, y amaç vektörü ve Y amaç uzayı olmak üzere;

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_m) \in X \quad (3.3)$$

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \in Y \quad (3.4)$$

Amaç uzayı Y , aşağıdaki gibi bir dizi kısıt ile sınırlandırılmıştır:

$$g_j(x) = b_j \quad j = 1, \dots, k \quad (3.5)$$

Yukarıdaki çok amaçlı optimizasyon probleminde eğer bütün amaç fonksiyonları minimizasyona yönelik ise, bir $a \in X$ karar vektörünün başka bir karar vektörü $b \in X$ 'e baskın olduğu söylenir ($a < b$ şeklinde ifade edilebilir) ancak [38];

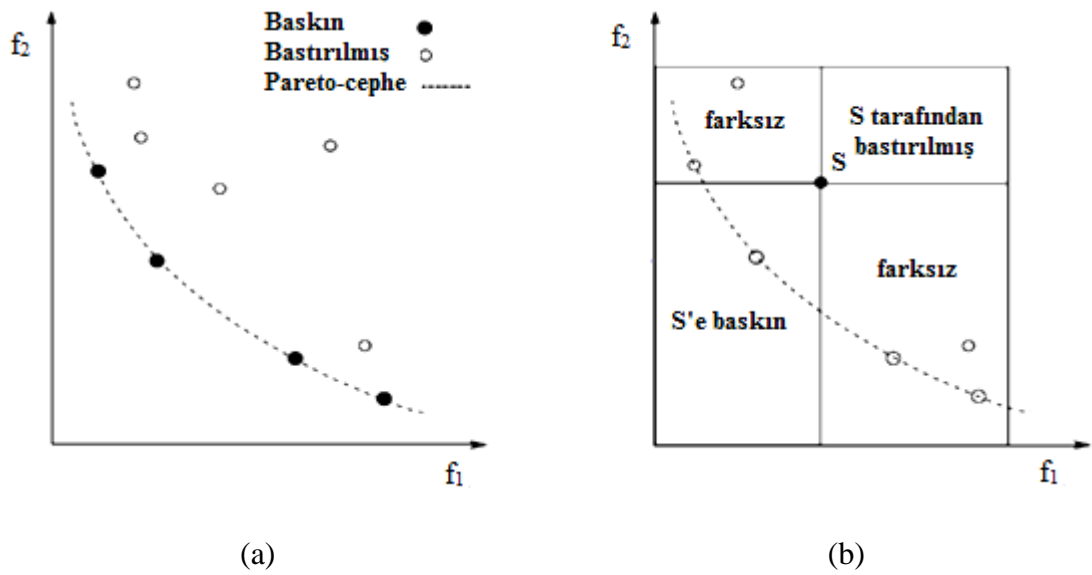
$$f_i(y) \leq f_i(z) \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (3.6)$$

$$f_j(y) < f_j(z) \quad \exists j \in \{1, \dots, n\} \quad (3.7)$$

Çok amaçlı bir optimizasyon probleminin çözümlerinin kümesi herhangi bir boyutta diğerinde bozulma olmaksızın geliştirilemeyen amaç vektörlerine karşılık gelen bütün karar vektörlerinden oluşur ki bu vektörler Pareto-optimum olarak bilinmektedir [37]. Başka bir ifadeyle, Pareto-optimum çözüm, en az bir başka amaç için kötüleşme söz konusu olmadan herhangi bir amaç açısından geliştirilemeyen

çözümdür [39]. Bu nedenle Pareto-cephe'ye ait olan bu vektörler farksız ya da kıyaslanamaz çözümler olarak tanımlanır [40, 41].

Çözüm uzayında tüm uygun *bastırılmış olmayan* çözümlerin kümesi **Pareto-optimum kümesi** olarak adlandırılır ve belli bir Pareto-optimum kümesi için, amaç uzayında karşılık gelen amaç fonksiyonu değerlerine de **Pareto-cephe** denir [42]. Şekil 3.1 iki amaçlı minimizasyon problemi için Pareto-optimum çözümlerin oluşturduğu Pareto-cephe eğrisini ve s noktasının belirttiği çözüm ile diğer çözümler arasındaki baskınlık ilişkisini göstermektedir [40].



Şekil 3.1: Pareto kavramı grafiksel anlatımı

a) Pareto-Cephe b) S noktasına göre baskınlık ilişkisi

Çok-amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde iki genel yaklaşım söz konusudur. Birinci genel yaklaşım, tüm amaç fonksiyonlarını tek bir bileşik fonksiyonda toplayan [43] ağırlıklı toplam yöntemi [35] ya da biri hariç tüm amaç fonksiyonlarını kısıt olarak kabul ederek tek amaçlı optimizasyona indirgeme yöntemidir [42]. Fonksiyonları toplama, tüm amaçları optimize etmek için tek bir matematiksel fonksiyonda birleştirmeyi ifade eder [1]. Ağırlıklı toplam yönteminde karar vericinin amaç fonksiyonlarının önemini ifade eden ağırlıkları belirlemesi oldukça zor ve göreceli bir durumdur. Amaç fonksiyonlarını kısıt olarak kabul ederken de kısıtlayıcı değerlerin her bir amaç fonksiyonunu doğru bir şekilde temsil etmesi gereklidir. Ancak bu da karar vericiye bağlı göreceli bir durumdur. Her iki

şekilde de karar verici tek bir çözüm elde eder ki bu da onu sınırlayan ve gerçek optimumdan uzaklaşmasına neden olan bir sonuç doğurabilmektedir.

Çözüm için ikinci yaklaşım ise, tüm Pareto-optimum çözüm kümesini ya da bir temsilci alt kümeyi belirleyerek [42] Pareto-baskınlık kavramına göre çözümler arasında ilişkiler kuran Pareto-tabanlı çok amaçlı optimizasyondur [1]. Bu yaklaşımda karar vericinin Pareto-optimum çözümler arasında birer birer kıyaslama yaparak tercihte bulunması ve nihai çözüme karar vermesi ödünleşme (trade-off) olarak tanımlanmaktadır.

Pareto-optimum kümesinin kabul edilebilir hesaplama süresinde belirlenebilmesi, problemin büyüklüğü nedeniyle imkansız olabilmektedir. Bu nedenle, çözüm için daha gerçekçi bir yaklaşım, Pareto-optimum kümeyi mümkün olduğunca iyi temsil eden çözümlerin kümesini (en iyi bilinen Pareto kümesini) araştırmaktır [42]. Bunu gerçekleştirirken aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurulmalıdır [42] :

1. En iyi bilinen Pareto-cephe gerçek Pareto-cepheye mümkün olduğunca yakın olmalıdır. İdeal olarak, en iyi bilinen Pareto kümesi Pareto-optimum kümesinin bir alt kümesi olmalıdır.

2. En iyi bilinen Pareto kümesinde çözümler düzgün dağılmış ve karar-alıcının ödünleşmelerin gerçek bir görüntüsünü elde etmesi için Pareto-cephe üzerinde çeşitli olmalıdır.

3. En iyi bilinen Pareto-cephe, Pareto-cephenin geniş bir yelpazesini yakalamalıdır. Bu da amaç fonksiyonu uzayının en uç noktalarındaki çözümleri araştırmayı gerektirir.

Sıklıkla birbiriyle çelişen amaçları içeren gerçek yaşam problemlerinde optimuma daha yakın gerçekçi çözümlerin elde edilebilmesi için, tek bir çözümün elde edilmesi yerine çoklu iyi çözümler arasından en iyisinin belirlenmesi, yani Pareto-tabanlı çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinin uygulanması daha doğru bir yaklaşım olmaktadır.

3.2 SA-HRES Optimizasyonu Kapsamında En Sık Kullanılan Amaç Fonksiyonları

Optimizasyon sürecinde ilk adım, uygun modeli oluşturmaktır. Modelleme; problemin amaç fonksiyonunu, değişkenlerini ve kısıtlarını belirleme ve matematiksel açıdan ifade etme işlemidir [44]. Modellemeden sonraki adım problemin cinsine ve buna uygun olarak optimizasyon probleminin çözümü için kullanılacak yazılıma ya da özgün olarak geliştirilecek algoritmaya karar vermektir. Tüm bunların sonunda nihai adım daha iyi bir çözüm bulana kadar elde edilen uygun çözümleri kıyaslama işleminden ibarettir. Uygulamada ve teoride sıklıkla tek bir amacı içeren optimizasyon problemleri ele alınmakla birlikte gerçek yaşam problemlerinin çoğu aslında genellikle birbiriyle çelişen birden fazla amacı içermektedir. SA-HRES'in optimizasyonu, maliyeti minimize eden sistem elemanlarının her birinin boyut optimizasyonunu, ayrıca maksimum sistem güvenilirliği ve minimum çevre kirliliğini de içeren bir dizi hedefi kapsayan çok amaçlı optimizasyon problemi olabilmektedir.

Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin çok amaçlı optimizasyonunun en yaygın kullanılan amaç fonksiyonları, sistem maliyetinin minimize edilmesi ve sistem güvenilirliğinin maksimize edilmesidir. Bu amaçlar izleyen alt bölümlerde kısaca verilmektedir.

3.2.1 Sistem Maliyeti

SA-HRES çok amaçlı optimizasyonunun ana konusu, minimum maliyeti sağlayacak şekilde sistem bileşenlerinin boyutlandırılmasıdır. Bunun için, birincil amaç fonksiyonu maliyet fonksiyonu dur.

SA-HRES çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı değerlendirilirken, sistem maliyetinin hesaplanmasında aşağıdaki bileşenler dikkate alınır:

- RT, reaktör, reformer (RFR), invertör, elektrolizör (ELC), yakıt hücresi (YH) ve hidrojen tankı (HT) gibi hibrit sistem bileşenlerinin ilk yatırım maliyetleri,

- Bileşenlerin bakım maliyetleri,
- Sistem bileşenlerinin ömrü boyunca değiştirme maliyetleri,
- Bileşenlerin sistemin ömrü boyunca işletme ve bakım masrafları.

Enerji üretim sistemi maliyet değerlendirmesi için kullanılan farklı hesaplama yöntemleri aşağıdaki alt bölümlerde sunulmaktadır.

3.2.1.1 Net Bugünkü Maliyet (NPC: Net Present Cost)

Sistem bileşenlerinin NPC değeri (\$), sistem ömrü boyunca edinme maliyeti, değiştirme maliyeti, tüm bileşenlerin işletim ve bakım maliyeti, kurulum maliyeti ve yakıt maliyeti (sistem dizel benzeri jeneratörler içeriyorsa) değerlerini içerir. Tüm nakit akışları, enflasyon ve faiz oranını dikkate alarak sistemin başlangıç anına (saat 0, yıl 1) dönüştürülür [45]. NPC değeri (3.8) eşitliği yardımıyla hesaplanabilir.

$$NPC(\$) = \sum_{i=1}^n N_i \times \left[(AC_i + RC_i) + \sum_{l=1}^R OMC_i \times \frac{(1+i_g)^l}{(1+ir)^l} \right] + C_{inst} \quad (3.8)$$

Burada, n FV panel, RT gibi hibrit sistem bileşeni sayısı, N her bir sistem bileşeni i için birim sayısıdır. AC_i i bileşeninin edinme maliyeti, RC_i sistem ömrü boyunca bileşen i 'nin değiştirme maliyetleri toplamının sistem ömrünün sonunda kalan bileşen maliyetinden farkı, OMC_i i bileşeninin yıllık işletme ve bakım maliyeti, i_g genel yıllık enflasyon beklentisi, ir yıllık faiz oranı ve C_{inst} i bileşeninin kurulum maliyetidir [45].

Hibrit sistemin NPC değerini hesaplamak için bir başka formülasyon ise şu şekildedir [46]:

$$NPC_i(\$) = \sum_{i=1}^n N_i \times \left(CC_i + RC_i \times F_i + OMC_i \times \frac{1}{CRF[ir,R]} \right) \quad (3.9)$$

Burada CC_i sermaye maliyeti (\$/kW), F_i bileşen i 'nin tek ödeme şimdiki değer faktörüdür.

Reel faiz oranı (ir), nominal faiz oranının ($ir_{nominal}$) ve yıllık enflasyon oranının (fr) bir fonksiyonudur [47].

$$ir = \frac{ir_{nominal} - fr}{1 + fr} \quad (3.10)$$

CRF (Capital Recovery Factor: Sermaye geri kazanım faktörü (%)) reel faiz oranı (*ir*) ve projenin yararlı ömrünün (*R*) bir fonksiyonudur.

$$CRF [ir, R] = \frac{ir [1+ir]^R}{[1+ir]^R - 1} \quad (3.11)$$

$$F = \sum_{n=1}^{Y_i} \frac{1}{[1+ir]^{L_i \times n}} \quad (3.12)$$

Burada L_i sistem bileşeni i 'nin yararlı ömrü ve Y_i projenin yararlı ömrü boyunca i bileşenin değiştirilme sayısıdır.

$$Y = \frac{R}{L} - 1 \quad R, L'ye \text{ bölünebiliyorsa,} \quad (3.13)$$

$$Y = \frac{R}{L} \quad R, L'ye \text{ bölünemiyorsa.} \quad (3.14)$$

3.2.1.2 Sistemin Yıllık Eşdeğer Maliyeti (ACS: Annualized Cost of System)

ACS ise (3.15) eşitliği yardımıyla hesaplanmaktadır [47]:

$$ACS(\$/yr) = \sum_{i=1}^n N_i \times [(CC_i + RC_i \times F_i(ir, L_i, y_i)) \times CRF(ir, R) + OMC_i] \quad (3.15)$$

3.2.1.3 Enerji Maliyeti (COE: Cost of Energy)

COE, *TAEP* (Total Annual Energy Production) ile gösterilen toplam yıllık enerji üretimine *ACS*'nin oranı olarak hesaplanır ve üretilen enerjinin birim maliyetini ifade eder.

$$TAEP(kWh) = \sum_{i=1}^{365} E_g(i) \quad (3.16)$$

$$COE \left(\frac{\$}{kWh} \right) = \frac{\sum_{i=1}^n ACS_i}{\sum_{i=1}^n TAEP_i} \quad (3.17)$$

3.2.1.4 Yaşam Döngüsü Maliyeti (LCC: Life Cycle Cost)

LCC, ürün yaşam döngüsünde doğrudan bir veya daha fazla bileşen tarafından kapsanan bir ürün sisteminin yaşam döngüsü ile ilgili tüm maliyetleri içeren bir kavramdır [48]. Sistemin *LCC*'si, tasarımdan geri dönüşüme, ömrü boyunca toplam maliyetini (\$ veya € cinsinden) ifade etmektedir [49].

$$LCC(\$) = \sum_{i=1}^n ICC_i + RC_i + OMC_i \quad (3.18)$$

3.2.1.5 Yaşam Döngüsü Birim Maliyeti (LCUC: Life Cycle Unit Cost)

Yaşam döngüsü birim maliyeti (*LCUC*), *LCC* 'nin sistemin tüm ömrü boyunca ürettiği toplam enerji miktarına bölünmesiyle elde edilen birim enerji maliyetidir.

$$LCUC \left(\frac{\$}{kWh} \right) = \frac{\sum_{i=1}^n LCC_i}{SL \times \sum_{i=1}^n TAEP_i} \quad (3.19)$$

(*SL*: sistem ömrü (yıl))

3.2.1.6 Seviyelendirilmiş Enerji maliyeti (LCOE: Levelized Cost of Energy)

LCOE, enerji sisteminin inşa edilmesi ve ömür boyu işletilmesi için gerekli toplam maliyetine, sistemin ömrü boyunca ürettiği toplam enerji çıktısının oranıdır. *LCOE* ayrıca, tesisin ömrü boyunca başa-baş noktası fiyatla elektrik satması için gereken asgari maliyet olarak da düşünülebilir. Başa-baş noktası, sistemin toplam maliyeti ve toplam geliri eşit olduğunda, net bir kayıp veya kazanç olmadığı anlamına gelen bir durumu ifade eder. *LCOE*, aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [50, 51]:

$$LCOE \left(\frac{\$}{kWh} \right) = \frac{\sum_{i=1}^n (CRF(ir,R) \times ICC_i) + RC_i + OMC_i}{E_L} \quad (3.20)$$

(3.20) eşitliğinde, ICC_i kurulu sermaye maliyeti (\$/kW), E_L sistemin ömrü boyunca toplam enerji üretimini ifade etmektedir.

LCOE ile aynı anlamı ifade eden *LEC* (Levelized Energy Cost) için başka bir formülasyon da *LCC*, *CRF* ve *TAEP*'i dikkate almaktadır [52]. *LEC* değeri (3.21) eşitliği yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$LEC \left(\frac{\$}{kWh} \right) = \frac{LCC \times CRF}{\sum_{i=1}^{365} E_g(i)} \quad (3.21)$$

3.2.2 Sistem Güvenilirliği

Güvenilirlik konsepti çok geniş bir anlam aralığı içerir ve tek bir spesifik tanımla ilişkilendirilemez [53]. Bu nedenle, güç sisteminin güvenilirliğini, güç sisteminin tüketicilere yeterli ve güvenli bir şekilde elektrik enerjisi tedarik etme kabiliyeti olarak tanımlanması daha anlamlı olacaktır. Bu tanım sistem yeterliliği ve sistem güvenliğini içermektedir.

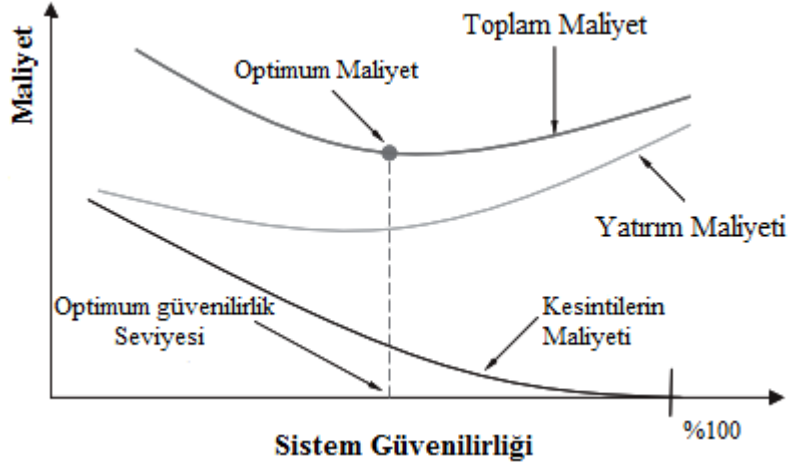
Sistem yeterliliği, tüketici yük talebini veya sistem işletme kısıtlamalarını karşılamak için sistem içerisinde yeterli tesislerin varlığıyla ilgilidir ve sistemde oluşan dinamik ve geçici bozuklukları içermez. Bu tesisler, yeterli enerjiyi üretmek için gerekli tesisleri ve enerjiyi gerçek tüketici yük noktalarına taşımak için gereken iletim ve dağıtım tesislerini kapsamaktadır [53].

Sistem güvenliği ise sistemin bozulmalara tepki verme ve istikrarlı çalışma koşullarını koruma yeteneğidir [54].

Literatürde güvenilirlik değerlendirmesi için mevcut olan olasılık tekniklerinin çoğu yeterlilik değerlendirmesi kapsamındadır. Sistemin güvenlik kapsamında modellenmesi çok karmaşık olduğu için güvenliğin değerlendirilmesi oldukça kısıtlıdır. Dolayısıyla, literatürdeki birçok çalışmada kullanılan yeterlilik göstergelerinin çoğu güvenilirlik göstergelerinin yerini almıştır. Yeterlilik göstergeleri, sistem bileşenleri kullanılabilirliği ve kapasitesi, yük özellikleri ve belirsizliği, sistem konfigürasyonu ve çalışma koşulları gibi çeşitli faktörleri yansıtmaktadır [53, 55].

Güvenilirlik göstergeleri, bir üretim sisteminin güvenilirlik performansını önceden belirlenmiş minimum gerekliliklere veya güvenilirlik standartlarına göre

değerlendirmek, alternatif tasarımları karşılaştırmak, zayıf noktaları tespit ettikten sonra üretim sisteminde düzeltme yollarını belirlemek ve sonuç olarak karar vermede maliyet ve performans konularını bütünleştirmek için kullanılmaktadır [56]. Şekil 3.2' de gösterildiği gibi güvenilirlik göstergeleri, üretim masraflarını minimize ederken, enerji tedarik maliyetlerini optimum seviyede tutabilecek bir maliyet/fayda çerçevesinde kullanılabilir [55].



Şekil 3.2: Sistem güvenilirliği ve maliyet ilişkisi

Hibrit bir yenilenebilir enerji sistemi üretiminin sistem güvenilirliği değerlendirmesinde en sık kullanılan güvenilirlik göstergeleri Yük Kaybı Beklentisi (*LOLE*: Loss of Load Expectation), Enerji Kaybı Beklentisi (*LOEE*: Loss of Energy Expectation), Güç Tedariki Kaybı Olasılığıdır (*LPSP*: Loss of Power Supply Probability).

3.2.2.1 Yük Kaybı Beklentisi (*LOLE*)

LOLE (saat/yıl), bir yıl içerisinde yükün mevcut elektrik üretim kapasitesini aşması beklenen saat sayısını ifade eder.

$$LOLE = \sum_{h=1}^H \sum_{i \in S} P_i \times T_i \quad (3.22)$$

Burada; *S* sistemin tüm yük kaybı durumlarını, P_i sistemin *i* durumuyla karşılaşma ihtimalini ve T_i yükün üretim kapasitesini aştığı zamanı (saat) ifade

etmektedir. Bu denklemde H , genellikle 8760 saat olarak kabul edilen bir yıllık zaman periyodu olarak kullanılır.

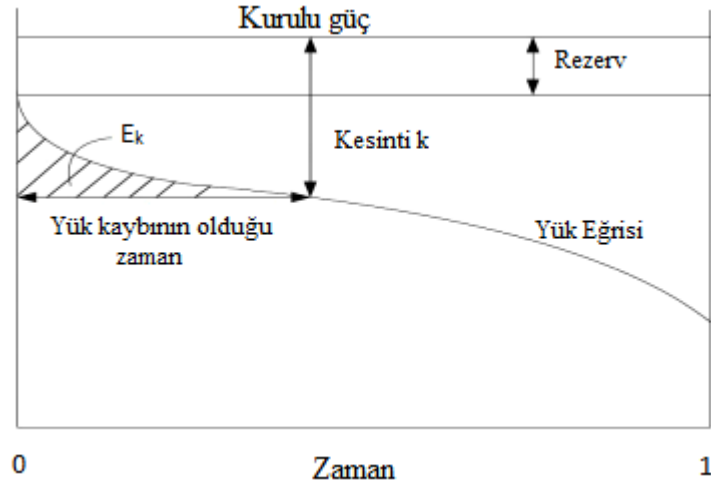
3.2.2.2 Enerji Kaybı Beklentisi (LOEE)

$LOEE$, sağlanmayan enerjinin beklenen değeri anlamına gelir. Mevcut elektrik üretim kapasitesi saatlik yük taleplerini karşılayamadığında ortaya çıkar.

$$LOEE = \sum_{h=1}^H \sum_{i \in S} P_i \times LOE_i \quad (3.23)$$

Burada; S tüm sistemin tüm enerji kaybı durumları, P_i sistemin i durumuyla karşılaşma ihtimali ve LOE_i h zaman periyodunda, sistem beklenen enerjiyi sağlayamadığında, oluşan enerji kaybının (açığının) miktarıdır (kWh).

Şekil 3.3'de gösterildiği gibi k ile belirtilen alanda kapasite kesintisi olması durumunda, yük eğrisinin altında kalan, E_k ile gösterilen taralı alan LOE 'yi ifade etmektedir [56].



Şekil 3.3: $LOEE$ 'nin grafiksel olarak anlatımı

3.2.2.3 Güç Tedariki Kaybı Olasılığı (LPSP)

LPSP, sistemin enerji üretimi eksikliğinin toplam yük talebine oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$LPSP = \frac{LOEE}{\sum_{h=1}^H LD} \quad (3.24)$$

(3.24) eşitliğinde *LD* (kWh), *h* zaman periyodundaki yük talebini ifade etmektedir.

3.2.2.4 Güç Tedariki Eksikliği Olasılığı (DPSP)

DPSP değeri (3.26) eşitliği yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$DPS = \sum_{t=1}^T LD(t) - E_{sist}(h) \quad (3.25)$$

$$DPSP = \frac{\sum_{t=1}^T DPS(t)}{\sum_{t=1}^T LD(t)} \quad (3.26)$$

(3.25) eşitliğinde *DPS* (Deficiency of Power Supply: Güç Kaynağı Eksikliği), ana enerji üretim bileşenleri ve/veya hibrit yenilenebilir enerji sisteminin yedekleme üniteleri yük talebini karşılayamadığında ortaya çıkan bir durumdur. $E_{sist}(h)$ (kWh), *t*. saatte hibrit yenilenebilir enerji sistemi tarafından sağlanan enerji anlamına gelir.

3.2.2.5 Yük Kaybı Olasılığı (LLP)

LLP de *LPSP* ve *DPSP* gibi bir yıl süresince sistemin enerji açığı toplamının yıllık toplam yük talebine oranını ifade etmektedir:

$$LLP = \frac{\sum_{i=1}^{8760} ES(i)}{\sum_{i=1}^{8760} LD(i)} \quad (3.27)$$

Yukarıdaki eşitlikte $ES(i)$ (kWh), *i*. saatte meydana gelen güç eksikliğini ifade etmektedir.

4. HİBRİT YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ İÇİN GELİŞTİRİLEN OPTİMİZASYON YAKLAŞIMLARI

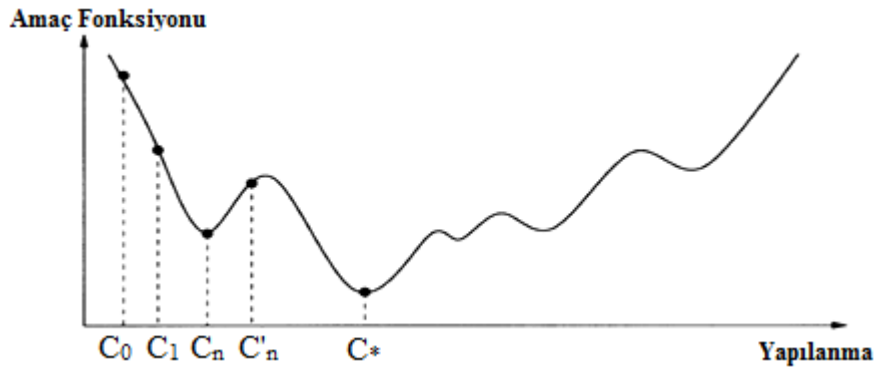
Hibrit yenilenebilir enerji sistemleri için literatürde yer alan algoritmalar incelendiğinde, genel olarak klasik yöntemler ve meta sezgisel yöntemler şeklinde iki ana başlık altında toplandığı görülmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere, hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin optimizasyonu, maliyeti minimize eden sistem elemanlarının boyut optimizasyonunu içeren tek amaçlı optimizasyon problemi olarak değerlendirilebildiği gibi bir dizi hedefi kapsayan çok amaçlı optimizasyon problemi de olabilmektedir. Bu kapsamda gerek tek amaçlı gerekse çok amaçlı optimizasyon problemleri için klasik yöntemler, kullanılan algoritmaların tekrarlanan uygulamaları sonucunda optimum çözüm/çözümlere ulaşabilmektedirler [57]. Meta sezgisel yöntemler ise, bir seferde tek bir çözüm geliştiren ve sonuç olarak tek bir optimum çözüm üreten yöntemleri içerebilmekle birlikte, eş zamanlı olarak basit bir simülasyon ile çözümlerin tüm popülasyonunu işletebilen ve pareto optimum çözümler üretebilen yöntemleri de içerebilmektedirler.

Bu bölümde, bir ya da daha fazla sayıda amacı içerebilen SA-HRES optimizasyon problemlerine çözüm getirebilmek için geçmişten günümüze geliştirilen optimizasyon teknikleri literatürde oldukça kapsamlı bir araştırma sonucu incelenerek, tek ya da çok amaçlı olmalarına göre sınıflandırılmak suretiyle, her bir optimizasyon yaklaşımı ayrı ayrı irdelenmiştir.

4.1 Klasik/Geleneksel Optimizasyon Yaklaşımları

Optimizasyon probleminde çok fazla sayıda yerel minimum olduğu durumda bir global optimizasyon yöntemi kullanılmaktadır. Global optimizasyon yöntemleri meta-sezgisel ve klasik yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Klasik global optimizasyon amaç fonksiyonuna bağlı olarak kısıtlayıcı matematiksel özelliklere ihtiyaç duymaktadır [58]. Klasik optimizasyon tekniklerinde, örneğin bir iteratif optimizasyon yönteminde olduğu gibi yerel minimuma takılıp kalma olasılığı fazladır. Şekil 4.1 bir klasik iteratif algoritmanın yerel minimumu (C_n) geçemeyip

global minimuma (C_*) ulaşamaması durumunu göstermektedir [59]. Bundan kurtulmak için rastgele seçilmiş farklı başlangıç koşulları ile birçok kez yöntem tekrarlanabilir ve yöntem tarafından hesaplanmış en iyi yerel minimum optimum çözüm olarak alınabilir. Ancak bu işlem algoritmanın hesaplama süresini büyük ölçüde artırır ve optimum yapılandırmayı bulmayı garanti edemez. Bu nedenle Tablo 4.1'de de görüldüğü gibi gerek tek amaçlı gerekse çok amaçlı optimizasyon problemi olsun SA-HRES'in optimizasyonu problemlerinde çözüm için klasik yöntemler çok fazla tercih edilmemektedir.



Şekil 4.1: Bir optimizasyon probleminde Amaç Fonksiyonu - Yapılanma ilişkisi

Tablo 4.1: SA-HRES için bazı klasik optimizasyon algoritmaları ve temel özellikleri

	FV	RT	ELC- YH- HT	Biyogaz	Diğer	Akü	Dizel Jen. (DJ)	Sistem bileşenlerinin optimizasyonu (Toplam sistem maliyetinin minimizasyonu)	Sistem güvenilirliğinin optimizasyonu	Sera gazı emisyonlarının azaltılması	Kullanılan optimizasyon yaklaşımı
Borowy ve Salameh, 1994	√	√					√	√			En küçük kareler yöntemi
R. Chedid ve Y. Saliba, 1996	√	√					√	√			Doğrusal programlama teknikleri
Kellogg ve diğ., 1998	√	√						√			Yinelemeli optimizasyon tekniği
Prasad ve Natarajan, 2006	√	√					√	√			Yinelemeli optimizasyon tekniği
S. Ashok, 2007	√	√			Mikro- hidro		√	√	√		Doğrusal olmayan kısıtlı optimizasyon teknikleri
C. Rubio-Maya, ve diğ., 2011	√			√	Doğal gaz			√		√	Karışık Tam Sayılı Doğrusal Olmayan Programlama
A. Kaabeche, ve diğ., 2011	√	√					√	√	√		Yinelemeli optimizasyon tekniği

4.1.1 Tek Amaçlı Optimizasyon için Klasik Optimizasyon Yaklaşımları

Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinde toplam maliyeti minimize edecek optimum yapılandırmanın tespit edilmesini kapsayan tek amaçlı optimizasyon problemlerinde çözüm için literatürde başta iteratif optimizasyon yöntemi olmak üzere, en küçük kareler yöntemi ve doğrusal programlama tekniklerine dayalı optimizasyon yöntemleri karşımıza çıkmaktadır.

Borowy ve Salameh [60], rüzgâr ve FV hibrit sisteminde FV panelin optimum boyutunu hesaplamak için enerji kavramı temelinde bir algoritma geliştirmişlerdir. Bunun için 30 yıl boyunca günün her saati için kaydedilen rüzgâr hızı ve ışınım verilerinden oluşan çok büyük bir veri kullanılmıştır. Verilen yüke en uygun RT ve FV diziye karar vermek için en küçük kareler yöntemini kullanmışlardır.

Cehedid ve Saliba [61], bağımsız bir rüzgâr-güneş-dizel-akü enerji sisteminde enerji maliyetini en aza indiren optimum sistem tasarımı için doğrusal programlama teknikleri kullanan yeni bir yöntem sunmuşlardır. Kellogg ve diğ. [62], bağımsız rüzgâr, FV ve hibrit rüzgâr/FV güç üretim sistemlerinin optimum boyutlandırılması için bir iteratif optimizasyon yöntemi sunmuşlardır. Parasad ve Natarajan [63], rüzgâr, FV ve aküden oluşan hibrit sisteminin optimizasyonu için iteratif şema kullanan yeni bir sayısal yöntem sunmuşlardır. Bu kapsamda, belirtilen DPSP değeri için enerji üretiminin yaşam döngüsü birim maliyetine (LCUC) veya üretilen görelî fazla güç (REPG: relative excess power generated) veya kullanılmayan enerji olasılığı (UEP: unutilized energy probability) esaslarına dayanan optimal boyutlandırma yaklaşımını tasarlamışlardır.

4.1.2 Çok Amaçlı Optimizasyon için Klasik Optimizasyon Yaklaşımları

Sistem boyutu minimizasyonu, sistem güvenilirliği ve çalışma stratejisinin optimizasyonu gibi amaç fonksiyonlarından iki ya da daha fazlasının optimizasyonunu içeren çok amaçlı optimizasyon problemlerinde klasik optimizasyon tekniklerinin çok ender olarak kullanıldığı görülmektedir (bkz. Tablo

4.1). İteratif optimizasyon yöntemi ve doğrusal olmayan programlama teknikleri araştırmacılar tarafından kullanılan klasik yöntemlerdendir.

Ashok [64], dizel ve akü yedekleme ile FV, rüzgâr, mikro hidro hibrit enerji sisteminde sistem güvenilirliğini maksimize ederken yaşam döngüsü maliyetlerini minimize eden enerji bileşenlerinin optimal bir kombinasyonunu bulmak için genel bir model geliştirmiştir. Güvenilirlik, maliyet ve dizel jeneratörlerin minimum kullanımı arasındaki ödünleşmeye dayalı doğrusal olmayan kısıtlı optimizasyon teknikleri ile çözülebilecek bir yöntem geliştirmiştir. Çalışması sonucunda dizel jeneratöre ihtiyaç duyulmayan mikro hidro-rüzgâr sisteminin optimum kombinasyon olduğunu göstermiştir.

Rubio-Maya ve diğ. [65], aynı anda enerji (elektrik, ısı) ve tuzdan arındırılmış su üreten, doğalgaz, güneş enerjisi ve gazlaştırılmış biyokütleyle beslenen bir tesisin ilk olarak sentez ve ön tasarım, sonrasında detaylı bir tasarım ve tesis işletimi olmak üzere iki aşamalı optimizasyon prosedürünü sunmuşlardır. Optimizasyon prosedürünü enerji tasarrufu, sera gazları emisyonu azaltma ve ekonomik fizibilite amaçlarını optimize etmek üzere Karma Tamsayılı Doğrusal olmayan Programlama'ya (MINLP: Mixed Integer Non-Linear Programming) dayalı olarak tasarlamışlardır. Analiz sonuçlarıyla, doğal gazla üretimin daha karlı olduğunu ancak yenilenebilir kaynaklar kullanıldığında ise enerji tasarrufunun ve çevresel kazanımların arttığını, sistem güvenilirliğinin sağlandığını göstermişlerdir.

Kaabeche ve diğ. [66], çalışmalarında şebekeden bağımsız bir hibrit FV/rüzgâr sisteminde DPSP ve Seviyelendirilmiş Birim Elektrik Maliyeti (LUEC) alt modellerini dikkate alarak sırasıyla enerji güvenilirliği ve sistem maliyeti için iteratif bir optimizasyon tekniği sunmuşlardır.

4.2 Meta-Sezgisel Yöntemler

Meta-sezgisel yöntemler, yapay/benzetimli tavlama yönteminde olduğu gibi, metalin tavlama gibi doğal bir işlemin taklit edilmesine dayanmaktadır. Bu yöntemler kombinatoriyel optimizasyon problemlerinin çeşitli türlerine uygulanabildiği gibi sürekli optimizasyon problemlerine de adapte edilebilmektedir

[58, 59]. Klasik global optimizasyon yöntemlerine alternatif olarak tercih edilen metasezgiseller arasında, bir seferde tek bir çözüm geliştiren ve sonuç olarak tek bir optimum çözüm üreten "neighborhood" metasezgiselleri ya da diğer adıyla "yörünge" metasezgiselleri (tavlama benzetimi, tabu arama, vb.) ve çözümlerin tüm popülasyonunu aynı anda işletebilen "distributed" metasezgiselleri ya da diğer bir ifadeyle "popülasyon temelli" metasezgiseller (parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), evrimsel algoritmalar (EA), genetik algoritma (GA), vb.) şeklinde bir ayrım söz konusudur [58]. Yerel optimumu aşmak için gerekli mekanizmalara sahip olan Meta-sezgisel yöntemler bu özellikleriyle global optimumu bulmada başarılı olmaktadır. Ayrıca çeşitli yöntemlerin avantajlarını bir araya getirerek bu yöntemlerin etkinliğini artırmak amacıyla son zamanlarda araştırmacılar hibrit yaklaşımlar geliştirmektedirler. Özellikle çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde bazı meta-sezgisellerin farklı versiyonları geliştirilerek bu algoritmaların etkinliği artırılmaktadır.

SA-HRES'in optimizasyonu problemlerinde literatürde karşılaşılan başlıca meta-sezgisel çözüm yaklaşımları arasında GA'lar, EA'lar ve PSO algoritmaları yer almaktadır.

4.2.1 Genetik Algoritma

GA, ilk olarak John Henry Holland tarafından geliştirilmiştir. Holland 1975 yılında "Adaptation in Natural and Artificial Systems" adlı kitabında GA ile ilgili çalışmalarını yayınlamıştır. GA, genlerin doğal evrimsel gelişimini bilgisayar ortamında taklit eden gelişmiş bir arama ve optimizasyon yöntemidir. Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında GA'lar tek bir çözüm elde edecek bir yapılandırma yerine muhtemel çok sayıda çözümleri içeren ve popülasyon adı verilen bir küme oluşturur. Popülasyonu oluşturan çözümlerin her biri bir birey, vektör ya da kromozom olarak adlandırılan sayı dizilerinden oluşur. Kromozomlar da genlerden oluşmaktadır. GA'lar Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemleri (HYES) için kullanıldığında, sistem elemanlarından rastgele oluşturulan sistem yapılandırması kromozomları ve her bir enerji kaynağı da genleri temsil etmektedir.

Rastgele oluşturulan ilk yapılandırmadan sonra GA'nın kullandığı üç operatör (seçim, çaprazlama ve mutasyon) [67] arasından seçim operatörü devreye girer ve amaç fonksiyonunu sağlama derecesine yani etkinliklerine göre bireyler seçilir. Sonrasında çaprazlama ve mutasyon operatörleri uygulanır ve durdurma kriteri sağlanıncaya kadar bu üç işlem tekrarlanır. Çaprazlama sonrasında oluşturulan yeni kromozomların mutasyona uğratılması sayesinde yerel minimuma takılıp kalma riski de azaltılmış olmaktadır [68].

GA, çok sayıda optimum çözüm üretebilen yapısı sayesinde global optimumu bulmada oldukça başarılı sonuçlar veren popülasyon tabanlı bir metasezgisel yöntemdir. Bu avantajına daha da katkı sağlamak adına araştırmacılar uzun zamandır yeni bireyler ve popülasyonlar üretmede farklılık gösteren GA versiyonları geliştirmektedirler [69, 70]. Bu tekniğin ve versiyonlarının tek amaçlı optimizasyon problemlerinin yanı sıra çok amaçlı optimizasyon problemlerinde de oldukça başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. İncelenen literatürde, SA-HRES tek ve çok amaçlı optimizasyonu için kullanılan GA yaklaşımları ve versiyonları Tablo 4.2'de SA-HRES temel özellikleriyle birlikte verilmektedir.

Tablo 4.2: SA-HRES optimizasyonu için kullanılan GA yaklaşımları ve temel özellikleri

	FV	RT	ELC-YH - HT	Biyogaz	Diğer	Akü	Dizel Jen. (DJ)	Sistem bileşenlerinin optimizasyonu (Toplam sistem maliyetinin minimizasyonu)	Sistem yönetiminin / kontrol stratejisinin optimizasyonu	Sistem güvenilirliğinin optimizasyonu	Sera gazı emisyonları nın azaltılması	Kullanılan optimizasyon yaklaşımı
Koutroulis ve diğ., 2006	√	√				√		√				GA
Senju ve diğ., 2007	√	√				√	√	√				GA
Sopian ve diğ., 2008	√				pico hidro sistem	√	√	√				GA
Lagorse ve diğ., 2009	√				sadece FC - HT	√		√				GA
Lagorse ve diğ., 2009	√				sadece FC - HT	√		√				GA
Bala ve Siddique, 2009	√					√	√	√				GA
Kalantar ve Mousavi G., 2010	√	√			mikro-türbin	√		√				GA
Hong ve diğ., 2012	√	√					√	√				GA
Ismail ve diğ., 2014	√				mikro-türbin	√		√				GA
Dufo-López ve diğ., 2017	√	√				√	√	√				GA
Das ve diğ., 2017	√				mikro gaz türbini / içten yanmalı motor	√		√				GA
Seeling-Hochmuth, 1997	√	√				√	√	√	√			GA
Dufo-López ve Bernal-Agusti'n, 2005	√					√	√	√	√			GA (HOGA program)
Dufo-López R ve diğ., 2007	√		√			√	√	√	√			GA
Shi ve diğ., 2007	√	√				√		√	√			NSGA-II
Yang ve diğ., 2008	√	√				√		√		√		GA
Yang ve diğ., 2009	√	√				√		√		√		GA
Bilal ve diğ., 2010	√	√				√		√		√		GA
Zeng ve diğ., 2010	√	√				√		√	√			GA
Tafreshi ve diğ., 2010	√	√		√	Reaktör ve gaz motoru	√		√		√		GA
Katsigiannis ve diğ., 2010	√	√	√	√	Biyodizel jeneratör	√	√	√			√	NSGA-II
Bilil ve diğ., 2014	√	√						√		√		NSGA-II
Maheri ve diğ., 2014	√	√					√	√		√		GA ve Monte Carlo simülasyonu
Shayeghi ve diğ., 2015	√	√				√		√		√	√	NSGA-II
Kamjoo ve diğ., 2016	√	√				√				√		NSGA-II

4.2.1.1 Tek Amaçlı Optimizasyon için Genetik Algoritma Yaklaşımları

Koutroulis ve diğ. [71], şebekeden bağımsız FV/ RT sistemlerinin yük enerji ihtiyaçlarının tamamen karşılanması kısıtına bağlı olarak 20 yıllık toplam sistem maliyetini minimize etmek üzere sistem elemanlarının optimal sayısı ve türünü belirleyecek GA kullanan bir metot önermişlerdir. Senju ve diğ. [72], RT, FV paneller, dizel jeneratör ve akülerden oluşan hibrit bir sistem tasarlamışlar ve toplam maliyeti minimize ederek ucuz ve temiz bir sistem için optimizasyon problemi çözüm tekniği olarak GA kullanmışlardır.

Sopian ve diğ. [73], sistemin bileşenlerinin optimum boyutlandırması, yenilenebilir kaynakların kullanımının maksimizasyonu ve dizel jeneratörün kullanımının minimizasyonunu kapsayan sistemin operasyonel stratejisine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için GA kullanılmış ve ayrıca sistemin duyarlılık analizi de yapılmıştır.

GA yaklaşımları kullanan diğer çalışmalar [74-77] kaynaklarından incelenebilir.

Hong ve Lian [78], SA-HRES'in optimum boyutlandırmasında Markov modelini içeren GA tekniğini uygulamışlardır. [79]'da da yazarlar hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinde toplam maliyeti minimize edecek optimum yapılandırmanın belirlenmesi amacıyla yönelik GA kullanmışlardır.

Dufo-López ve diğ. [80], hibrit FV-rüzgâr-dizel jeneratör ve akü sisteminin günlük toplam işletme maliyetini minimize etmek için GA kullanmışlardır. Akülerdeki korozyona bağlı bozulmayı, dizel jeneratörün bakım ve onarım ek masraflarını da dikkate alarak optimal günlük kontrol stratejisi ile toplam sistem maliyetinde %37,7'ye kadar bir azalma gerçekleştiğini göstermişlerdir.

Das ve diğ. [81], GA kullanarak belirli bir LPSP değeri altında içten yanmalı motorlar ve mikro gaz türbinleriyle hibridize edilmiş enerji sisteminde FV modüllerinin ve kurşun asit pillerinin sayısını minimum COE (\$/kWh) sağlamak üzere optimize etmişlerdir.

4.2.1.2 Çok Amaçlı Optimizasyon için Genetik Algoritma Yaklaşımları

Seeling-Hochmuth [82], GA kullanarak hibrit FV sistemlerinin boyutlandırma ve operasyon (işletme kontrolü) optimizasyonu için genel bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri yöntemi hibrit FV-rüzgâr-dizel-akü sisteminde uygulamışlardır.

Dufo-Lopez ve Bernal-Agustín [83], GA'lar vasıtasıyla hibrit FV-dizel-akü sistemlerinin boyut optimizasyonunu ve sistem kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar GA kullanan HOGA (GA ile Hibrit Optimizasyon) adını verdikleri programı C++ kullanarak geliştirmişlerdir. Dufo-López ve diğ. [84], FV, rüzgâr, hidro, hidrojen, akü gibi bileşenleri içerebilecek SA-HRES'in ömrü boyunca toplam maliyetini ve sistem kontrolünü optimize etmek için GA kullanan yeni bir strateji geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri stratejiyi FV-dizel-akü-hidrojen sisteminde uygulamışlardır.

Shi ve diğ. [85], Hızlı ve Üstün Çok Amaçlı GA (NSGA-II: Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm) ile literatürde yer alan diğer yöntemlerin toplam sistem maliyeti, sistem özerklik düzeyi ve boşa giden enerji oranını içeren tekno-ekonomik optimizasyondaki etkinliklerini bir FV-rüzgâr-akü hibrit sistemi üzerinden kıyaslamışlar ve bu algoritmanın daha iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir.

Yang ve diğ. [67], LPSP ve ACS değerlerini minimize etmek üzere GA'ya dayalı bir optimum boyutlandırma modeli geliştirmişlerdir. Yang ve diğ. [86] da, akü grubu kullanan hibrit FV-rüzgâr sistemleri için yıllık maliyeti minimize edecek optimum yapılandırmayı ve istenen LPSP değerini sağlayacak GA kullanan bir tasarım modeli geliştirmişlerdir. Optimizasyon sürecine, FV modül sayısı, FV modül eğim açısı, RT sayısı, RT montaj yüksekliği ve akü kapasitesinden oluşan beş karar değişkenini dahil etmişlerdir.

Bilal ve diğ. [87], Senegal kuzey kıyısında bulunan izole bir bölge için rüzgâr-FV ve akü hibrit sisteminin boyutlandırmasını çok amaçlı GA kullanarak gerçekleştirmiş ve optimum dizayn üzerinde farklı yük profillerinin etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında ACS ve LPSP değerlerinin minimize edilmesini hedeflemişlerdir. Zeng ve diğ. [88], modüler bir hibrit sistem tasarlamışlar ve

sistemin ekonomik ve kontrol optimizasyonu için bir gelişmiş GA tekniği önermişlerdir. Tafreshi ve diğ. [89], genetik tabanlı bir algoritma kullanarak enerji maliyetini minimize ederken istenilen LPSP değerini sağlamışlardır. Geliştirdikleri yöntemi aynı sistem için "Yenilenebilir enerji sistemleri için hibrit optimizasyon modeli (HOMER: Hybrid Optimization Model for Electric Renewables)" programını kullanarak doğrulamışlardır.

Katsigiannis ve diğ. [90], akü ve HT'den oluşan iki farklı enerji depolama birimleriyle küçük bir otonom (autonomous) hibrit enerji sisteminin ekonomik ve çevresel optimizasyonu için NSGA-II ile birlikte geliştirdikleri yerel arama prosedürünü kullanmışlardır. Bilil ve diğ. [91], sistem güvenilirliğini sağlamak için üretilen yenilenebilir enerjinin talebi aşması durumunda penaltı faktörünü devreye sokan yeni bir formülasyon sunmuşlardır. Bu yazarlar yıllık eşdeğer yenilenebilir enerji maliyeti ve sistem güvenilirliğinin her ikisinin aynı anda optimizasyonunu NSGA-II'yi kullanarak gerçekleştirmişlerdir.

Maheri [92], şebekeden bağımsız rüzgâr-FV-dizel sisteminde maliyet ve sistem güvenilirliğinin optimizasyonu için GA ve Monte Carlo simülasyonu kullanan çok amaçlı stokastik optimizasyon yöntemi geliştirmiştir.

Shayeghi ve Hashemi [93] ve Kamjoo ve diğ. [94] tarafından yapılan çalışmalar, SA-HRES'in çok amaçlı optimizasyonunda NSGA-II kullanılan diğer çalışmalardır.

4.2.2 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

PSO en iyi besin kaynağı için kuş ve balık sürüleri gibi hayvanların topluca yer değiştirmelerini taklit eden bir meta-sezgisel yaklaşımdır [95]. 1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından geliştirilen yöntem, evrimsel hesaplama tekniklerine dayalı bir optimizasyon tekniğidir. Sürekli olarak gelişen pozisyon ve hızlarıyla birlikte üç boyutlu uzayda aynı anda hareket eden parçacık popülasyonunu kullanarak geniş bir arama yapma yeteneğine ve avantajına sahiptir [96]. Bu algoritma da her bir parçacık olası bir çözümü temsil etmektedir [97]. HYES için kullanıldığında ise bunlar uygun sistem yapılandırmasını ifade etmektedir. Rastgele

başlangıç popülasyonu ile başlatılan PSO algoritması, her bir iterasyonda tüm parçacıkların P_{best} ve G_{best} olarak adlandırılan iki değere bağlı olarak geliştirilmesiyle ilerler. P_{best} (bireysel en iyi), her bir parçacığın o ana kadar elde ettiği en iyi değeri ürettiği pozisyonudur [98]. G_{best} (global en iyi), o ana kadar gerçekleştirilen iterasyonlarda elde edilen tüm bireysel iyi pozisyonlar arasında en iyi pozisyonudur [99]. PSO algoritmasında iterasyonlar önceden belirlenen durdurma kriteri sağlandığında son bulur [68, 100].

PSO yaklaşımı; kodlama basitliği, kullanım kolaylığı, yüksek yakınsama hızına sahip oluşu ve minimum depolama gereksinimi bulunması, ayrıca diğer algoritmalara nazaran başlangıç popülasyonuna daha az bağlı olması nedeniyle yakınsama algoritmasının güçlü oluşu avantajlarına sahiptir [98]. Tüm bu avantajları nedeniyle PSO tekniği SA-HRES'in optimizasyonunda da sıklıkla kullanılmaktadır (Tablo 4.3).

Tablo 4.3: SA-HRES optimizasyonu için kullanılan PSO yaklaşımları ve temel özellikleri

	FV	RT	Elektrolizör- YH - HT	Biyogaz	Diğer	Akü	Dizel Jen. (DJ)	Sistem bileşenlerinin optimizasyonu (Toplam sistem maliyetinin minimizasyonu)	Sistem yönetiminin / kontrol stratejisinin optimizasyonu	Sistem güvenilirliğinin optimizasyonu	Sera gazı emisyonlarının azaltılması	Kullanılan optimizasyon yaklaşımı
Hakimi ve Tafreshi, 2009		√	√	√	Reformer, anaerobik reaktör			√				PSO
Kaviani ve diğ., 2009	√	√	√					√				Gelişmiş PSO varyasyonu
Haghi ve diğ., 2010		√	√	√	Reformer, anaerobik reaktör			√				PSO ve Monte Carlo simülasyonu
Zhao ve diğ., 2009	√	√					√	√	√	√		Geliştirilmiş PSO
Avril ve diğ., 2010	√		√				√	√	√			MOPSO
Borhanazad ve diğ., 2014	√	√					√	√	√	√		MOPSO
Sharafi ve ELMekaw, 2014	√	√	√				√	√	√	√	√	e-kısıtlı Simülasyon tabanlı PSO
Sharafi ve diğ., 2015	√	√		Biyokütle kazanı	Isı pompası, ısı depolama			√	Yenilenebilir enerji oranının maksimizasyonu		√	Simülasyon tabanlı dinamik MOPSO
Askarzadeh ve Coelho 2015	√	√					√	√		√		Uyarlamalı eylemsizlik ağırlık bazlı PSO
Clarke ve diğ., 2015	√		√		Ters osmoz ünitesi, su deposu	√		√			√	PSO

4.2.2.1 Tek Amaçlı Optimizasyon için PSO Yaklaşımları

Özellikle SA-HRES'in optimum boyutlandırılması için literatürde PSO kullanımına GA'ya nazaran daha az rastlanmaktadır. Bunun bir sebebi, çok sayıda yenilenebilir enerji kaynağı ve/veya dizel jeneratör ve/veya depolama üniteleri içerebilen bu sistemler için PSO yaklaşımında parçacıkların üç boyutlu koordinata dayalı olarak tanımlanması nedeniyle, PSO yapılandırmasının daha karmaşık olması olabilir. Ayrıca PSO yaklaşımına nazaran, GA için daha fazla versiyon geliştirilmiş olması da diğer bir sebep olarak söylenebilir. Ancak yine de, daha önce belirtildiği gibi, sahip olduğu birçok avantaj nedeniyle SA-HRES tek veya çok amaçlı optimizasyonu için PSO yaklaşımının GA'dan sonra literatürde en sık yer alan çözüm yaklaşımı olduğu görülmektedir. Tek amaçlı optimizasyon kapsamında yer alan çalışmalar izleyen paragrafta verilmektedir.

Hakimi ve Tafreshi [46], rüzgâr/YH/ELC/HT ve hidrojen üretimi için biyokütle kullanılmış bir hibrit yenilenebilir enerji sisteminde, talebi karşılayacak şekilde sistemin toplam maliyetini minimize edecek sistem bileşenlerinin uygun boyutlandırması için, PSO'ya dayalı yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Kaviani ve diğ. [47], bir hibrit rüzgâr/FV/YH sisteminin yıllık maliyetinin talebin güvenilir bir şekilde sağlanması kısıtına bağlı olarak en aza indirilmesi için PSO algoritmasının gelişmiş bir varyasyonunu kullanmışlardır. Yazarlar maliyet fonksiyonunda yatırım, değiştirme, işletme ve bakımın yanı sıra yük kaybı maliyetlerini de hesaba katarak sistem güvenilirliğinin toplam maliyet üzerindeki etkisini ortaya koymuşlardır. Ayrıca sistem güvenilirliği için oldukça hızlı bir yaklaşık yöntem tasarlamışlardır. Haghi v.d. [101], SA-HRES'in optimum boyutlandırması için çok değişkenli Monte Carlo simülasyonuna entegre edilmiş bir PSO algoritması geliştirmişlerdir.

4.2.2.2 Çok Amaçlı Optimizasyon için PSO Yaklaşımları

PSO'nun avantajlarını ön plana çıkararak daha önce bahsedilen eksikliklerini giderecek ilave prosedürlerle geliştirilen yeni versiyonları ve ayrıca diğer meta-sezgisel yöntemler ile birlikte kullanıldığı hibrit yaklaşımları, SA-HRES'in çok amaçlı optimizasyonu için literatürde yer bulmaktadır.

Borhanazad ve diğ. [102], akü depolama ve dizel jeneratörü olan bir hibrit rüzgâr/FV sistemi için Çok Amaçlı PSO (MOPSO: Multi Objective PSO) sunmuşlardır. COE ve LPSP'yi içeren çok amaçlı optimizasyon problemini çözmek için ağırlıklı toplam yöntemini kullanmışlardır.

Sharafi ve ELMekaw [103], hibrit enerji sistemlerinde toplam maliyeti, karşılanamayan yükü ve yakıt emisyonunu en aza indirmek için PSO-simülasyon temelli ϵ -kısıtlaması yöntemini geliştirmişlerdir. Yazarlar sonraki çalışmalarında ise [104], konutlar için toplam NPC değerini ve CO2 emisyonunu azaltan ve yenilenebilir enerji oranını maksimize eden simülasyon tabanlı dinamik MOPSO algoritmasına dayalı bir meta-sezgisel yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu algoritmayla diğer MOPSO yaklaşımlarından daha iyi bir Pareto-cephe elde etmişlerdir. Geliştirdikleri yöntemi ısı pompası, bir biyokütle kazanı, RT'ler, güneş ısı kollektörleri, FV paneller ve ısı depolama tankından oluşan bir hibrit sistem ile test etmişlerdir. [105, 106, 107, 108] son yıllarda bağımsız hibrit enerji sistemlerinin çok amaçlı optimizasyonu için PSO'ya dayalı çözüm yöntemlerinin geliştirildiği diğer çalışmalardır.

4.2.3 Evrimsel Algoritmalar

EA'ların tek bir simülasyon işletiminde çoklu ödünleşme çözümleri bulmada ilk gerçek uygulaması David Schaffer tarafından 1984 yılında kendisinin doktora tezi çalışmasında ortaya konmuştur [109]. Amaç fonksiyonunun optimize edilmesi için çalışırken ardışık iterasyonlar geliştiren EA'nın işleyişi, çözüm kümesinin yani bireylerden oluşan popülasyonun sürdürülmesine (devam ettirilmesine) dayanır [110]. EA doğanın evrimsel prensiplerini taklit ederek çözüm uzayında aramasını sürdürür. EA her bir iterasyonda tek bir çözüm yerine çok sayıda çözüm içeren bir çözüm popülasyonu kullanırlar ve optimizasyon prosedürünün sonunda da bir çözüm popülasyonu elde ederler. EA'nın popülasyon tabanlı çözüm yaklaşımı tek bir simülasyon işletiminde çoklu ödünleşme çözümler elde etmesini sağlamaktadır [109]. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin birbiriyle çelişen amaç fonksiyonlarına sahip olması nedeniyle, bunların Pareto-tabanlı çözümünde bir dizi çözüm elde edilmelidir ki bu çözümler ödünleşme (trade-off) çözümleri olarak

adlandırılır. Bu bağlamda SA-HRES'in çok amaçlı optimizasyonunda EA'nın sıklıkla kullanıldığı Tablo 4.4'de görülmektedir.

Tablo 4.4: SA-HRES optimizasyonu için kullanılan EA yaklaşımları ve temel özellikleri

	FV	RT	Elektrolizör- YH - HT	Biyogaz	Diğer	Akü	Dizel Jen. (DJ)	Sistem bileşenlerinin optimizasyonu (Toplam sistem maliyetinin minimizasyonu)	Sistem yönetiminin / kontrol stratejisinin optimizasyonu	Sistem güvenliliğinin optimizasyonu	Sera gazı emisyonlarının azaltılması	Kullanılan optimizasyon yaklaşımı
Dufo-López ve diğ., 2006	√	√					√	√	√		√	Güç Pareto Evrim Algoritması (SPEA)
Dufo-López ve Bernal-Agustín, 2008	√	√	√			√	√	√		√	√	SPEA tabanlı MOEA ve GA
Logenthiran ve diğ., 2010	√	√				√		√		LPSP (kısıt olarak)	kısıt olarak	Evrimsel Strateji (ES)
Abedi ve diğ., 2012	√	√	√			√	√	√		√	√	Bulanık mantık teknikleri eşliğinde DEA
Perera ve diğ., 2013	√	√			ICG (içten yanmalı jeneratör)	√		√	Çok kriterli karar verme (MCDM)	√	√	Steady ϵ -state evrim algoritması
Shi ve diğ., 2015	√	√				√	√	√		√	√	Hedef vektörleri kullanarak tercihten esinlenen co- evrimsel algoritma (PICEA-g)

Dufo-López ve diğ. [111], ilk defa olarak Güç Pareto EA'yı (SPEA: Strength Pareto Evolutionary Algorithm) SA-HRES'in çok amaçlı optimizasyonu için kullanmışlar, FV-rüzgâr-dizel sisteminin yararlı ömrü boyunca toplam maliyetinin ve de zararlı emisyonların minimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Dufo-López ve Bernal-Agustín [112], ilk kez olarak şebekeden bağımsız hibrit sistemlerin tasarımı için üçlü-çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı uygulamışlar, toplam maliyeti, yakıt emisyonunu ve karşılanmamış yükü minimize etmek üzere SPEA temeline dayanan MOEA ve GA kullanmışlardır. Yazarlar geliştirdikleri tasarım yöntemini FV-rüzgâr-dizel-hidrojen-akü sisteminde uygulamışlardır. [113]'de LPSP, karbon emisyonu limiti kısıtları altında SA-HRES'in optimum boyutlandırılması için iyi bilinen bir EA olan Evrimsel Strateji (ES) kullanılmıştır.

Abedi ve diğ. [114], SA-HRES'de net bugünkü maliyeti, yakıt emisyonunu ve karşılanmamış yükü en aza indirmek üzere bulanık tekniği eşliğinde diferansiyel evrim algoritması (DEA) kullanmışlardır. Perera ve diğ. [115], bağımsız enerji

sistemlerinin tasarımında Pareto çok-amaçlı optimizasyon ile Bulanık-TOPSIS'i (Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution: İdeal çözüme benzerliği ile performans düzenleme tekniği) birleştiren yeni bir teknik (kararlı ϵ -devlet evrimsel algoritması) geliştirmişlerdir. Bu yazarlar seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LEC), karşılanmamış yük yüzdesi, yakıt tüketimi, kullanılmayan/boşa giden yenilenebilir enerjinin minimizasyonunu içeren çok-amaçlı optimizasyon ile çok-kriterli karar verme tekniğini (MCDM: Multi-Criterion Decision Making) birleştirerek karşılanmamış yük yüzdesinin %20 olarak belirlendiği FV-rüzgâr-akü-içten yanmalı jeneratörden oluşan bir sistem üzerinde yeni yöntemlerini uygulamışlardır.

Shi v.d. [116], SA-HRES'de sistemin AC, LPSP ve yakıt emisyonlarını minimize etme amaçlarından oluşan çok amaçlı optimizasyon problemine çözüm getirmişlerdir. Bu amaçla *hedef vektörleri kullanan tercihten esinlenen birlikte geçirilen evrim algoritmasını* (PICEA-g) geliştirmek için bir geliştirilmiş uygunluk atama yöntemi ortaya koymuşlardır. Böylelikle Pareto-tabanlı ve ayrıştırma tabanlı EA'lara nazaran daha hızlı ve basit bir çözüm yöntemi geliştirmişlerdir.

4.3 Diğer Optimizasyon Yaklaşımları

SA-HRES'in optimizasyonu için yukarıda ele alınan optimizasyon yaklaşımlarına ilave olarak literatürde farklı çözüm yaklaşımları birçok yazar tarafından kullanılmıştır (Tablo 4.5)

Tablo 4.5: SA-HRES optimizasyonu için literatürde kullanılan diğer optimizasyon yaklaşımları ve özellikleri

	FV	RT	Elektrolizör-		Diğer	Akü	Dizel Jen. (DJ)	Sistem bileşenlerinin optimizasyonu (Toplam sistem maliyetinin minimizasyonu)	Sistem yönetiminin / kontrol stratejisinin optimizasyonu	Sistem güvenilirliğinin optimizasyonu	Sera gazı emisyonlarının azaltılması	Kullanılan optimizasyon yaklaşımı
Browy ve Salameh, 1996	√	√				√		√				PASCAL ile gelişmiş boyutlandırma yöntemi
Markvart, 1996	√	√						√				Grafiksel yaklaşım
Protoğeropoulos ve diğ., 1997	√	√				√		√				Simülasyon prosedürüne dayalı sistem performansı
Morgan ve diğ., 1997	√					√	√	√				ARES-II simülasyon programı
El-Hefnawi, 1998	√					√	√	√				FORTTRAN ile gelişmiş boyutlandırma yöntemi
Elhadidy ve Shaahid, 1999		√				√	√	√				Geliştirilmiş optimizasyon boyutlandırma yöntemi
Çelik, 2003	√	√				√		√				Yeni tekno-ekonomik optimizasyon tekniği
Muselli ve diğ., 1999	√				Benzinli motor jeneratörü	√	√	√	√	Özerklik kısıtı (yük kaybı olmaması)		Geliştirilmiş optimizasyon boyutlandırma yöntemi
Isherwood, ve diğ., 2000	√	√			Hidrojen ve çinko hava yakıt hücreleri		√	√	√			Lojistik ve zaman serisi modellerine dayalı
Manolakos ve diğ., 2001	√	√			Mikro hidrolik güç istasyonu	√		√	√			Geliştirilmiş simülasyon optimizasyon programı
Yang ve diğ., 2007	√	√				√		√		√		HSWSO boyutlandırma modeli
Diaf ve diğ., 2007	√	√				√		√		√		Geliştirilmiş optimizasyon boyutlandırma yöntemi
Diaf ve diğ., 2008	√	√			UPS	√		√		√		Geliştirilmiş optimizasyon boyutlandırma yöntemi
Diaf ve diğ., 2008	√	√				√		√		√		Geliştirilmiş tekno-ekonomik optimizasyon yöntemi
Torreglosa ve diğ., 2016	√	√	√			√		√		√		MATLAB Simulink Tasarım Optimizasyonu (SDO)

4.3.1 Tek Amaçlı Optimizasyon için Diğer Optimizasyon Yaklaşımları

Browy ve Salameh [117], şebekeden bağımsız FV-rüzgâr hibrit sistemi için akü grubunun ve FV panellerin optimum büyüklüğünün hesaplanması için bir yöntem geliştirmişlerdir. Bunun için 30 yıl boyunca günün her saati için kaydedilen rüzgâr hızı ve ışı nım verilerinden oluşan çok büyük bir veriyi bir ayın belirli bir

gününün her saati için FV modül ve RT'nin ürettiği ortalama gücü hesaplamak için kullanmışlardır. Yazarlar çalışmalarında verilen yük ve sistemin enerjisiz kalma değerleri için, minimum maliyeti sağlayan optimum akü ve FV modül sayısını hesaplamışlardır. Markvart [118], çalışmasında FV-rüzgâr hibrit enerji sisteminin optimum yapılandırılması için basit bir grafik yapı kullanarak sistemdeki rüzgâr ve güneş kaynaklarının mevsimsel değerlerini dikkate alan arz-talep kriterine bağlı bir grafiksel yaklaşım sunmuştur. Protogeropoulos ve diğ. [119], yeterli özerklik elde edilmesini garanti eden bir yapılandırmaya kadar akülerin boyutunu değiştirerek, FV-rüzgâr-akü hibrit sisteminin boyut ve tekno-ekonomik optimizasyonunu gerçekleştirmek üzere bir sistem performansı simülasyon prosedürü uygulamışlardır. Morgan ve diğ. [120], yüksek hassasiyete sahip akülerin modellendiği FV-dizel-akü hibrit sisteminin simülasyonu ve optimizasyonun üzerine ARES-II (ARES: Autonomous Renewable Energy Systems) programını geliştirerek hibrit sistem voltaj simülasyonunda, akü algoritması içinde akü sıcaklığı etkilerini de dikkate alan, yeni bir gelişme ortaya koymuşlardır. Bu yazarların geliştirdikleri program diğer hibrit sistem simülasyonlarından farklı olarak akü şarj durumunu (SoC: State of Charge) değil de gerilim durumunu (SoV: State of Voltage) tahmin etmektedir.

El-Hefnawi [121], FORTRAN programlama dilini kullanarak FV-dizel-akü sistemi için boyut optimizasyonu metodu geliştirmiştir. Yazar geliştirdiği yöntemle dizel jeneratör modelinin belirlenmesine dayalı olarak FV jeneratör ve akülerin optimum boyutlandırmasını da gerçekleştirmiştir. Elhadidy ve Shaahid [122], rüzgâr-dizel-akü sisteminde, rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi ve dizel jeneratör tarafından sağlanan enerji üzerinde akü boyutu değişiminin etkisini incelemişlerdir. Yazarlar yalnızca RT yeterli enerji sağlayamadığında ve buna ek olarak aküler talebi karşılayamadığında dizel jeneratörün devreye girdiği sistemde akülerin boyutunu değiştirerek sistemin ekonomik optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Çelik [123], şebekeden bağımsız FV-rüzgâr-akü hibrit enerji sistemi için tasarım parametrelerini dikkate alan yeni bir tekno-ekonomik optimizasyon tekniği geliştirmiştir. Yazar bir yılın tüm ayları için güneş ve rüzgâr verilerinin detaylı analizini içeren bir senaryo üzerinden elde ettiği sonuçların en kötü ayı dikkate alan diğer çalışmalara göre tekno-ekonomik olarak daha optimum çözüm olduğunu ortaya koymuştur.

4.3.2 Çok Amaçlı Optimizasyon için Diğer Optimizasyon Yaklaşımları

Muselli ve diğ. [124], gücünü FV paneller ve benzinli ya da dizel motorla tahrik edilen bir jeneratörden alan hibrit FV-dizel-akü sisteminin boyutunu hesaplamak ve yönetimini optimize etmek için bir optimizasyon yöntemi geliştirmişlerdir.

Isherwood vd. [125], Alaska'da şebekeden uzak bir köy için dizel jeneratör ile birlikte RT, FV panellere ek olarak hidrojen ve çinko-hava YH'lerinden oluşan hibrit sistemin optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar, HYBRID2 [126] ile aynı genel yapıyı izlemekle birlikte lojistik, zaman serisi modeli temeline dayalı olarak geliştirdikleri kodu daha sonra SuperCode adlı bir optimizasyon aracı ile entegre etmişlerdir. Manolakos ve diğ. [127], yenilenebilir enerji kaynağı olarak FV paneller, RT ve depolama birimleri olarak da akü ve mikro hidrolik santrali kullandıkları bir hibrit yenilenebilir enerji sistemini şebekeden uzak bölgeler için elektrik eldesi ve deniz suyunun arıtılması için tasarlamışlardır. Yazarlar sistem elemanlarının optimum boyutlandırması ve optimum enerji yönetimi için bir simülasyon-optimizasyon programı geliştirmişlerdir. Yang ve diğ. [128], akü grubu kullanan hibrit güneş-rüzgâr enerjisi üretim sistemlerinin farklı bileşenlerin boyutlarını optimize etmek için, hibrit güneş-rüzgâr sistemi optimizasyonu (HSWSO) boyutlandırma modeli geliştirmişlerdir. Yazarların geliştirdikleri model, akü grubu kullanan hibrit güneş-rüzgâr sistemlerinin, LPSP tekniği ve LCE kavramına dayalı optimum yapılandırmasını elde etmek için yeni bir simülasyon aracıdır.

Diaf ve diğ. [129], otonom HYES için RT, FV panel ve akü modellemesi yaparak LPSP ve LCE kavramlarına dayalı olarak enerji maliyeti ve sistemin enerjisiz kalma olasılığını minimize eden bir boyutlandırma optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Diğer bir çalışmalarında ise [130], bağımsız bir hibrit güneş-rüzgâr-akü sistemi için sistem bileşenleri alt modeli, LPSP'ye dayalı teknik alt model ve LCE'ye dayalı ekonomik alt modellerinden oluşan bir optimizasyon boyutlandırma modeli geliştirmişlerdir. Yazarlar önerdikleri bağımsız sistemde, RT tarafından üretilen enerjinin yüke doğrudan gönderilebildiği, bir kesintisiz güç kaynağı (UPS) vasıtasıyla rüzgâr gücü temini şeklinde yeni bir konsept sunmuşlardır. Diaf ve diğ [131] şebekeden bağımsız hibrit FV-rüzgâr-akü sisteminde LCE'yi en aza

indiren ve LPSP tekniğine göre sistem özerkliğini (autonomy) garanti eden teknolojik ekonomik optimizasyon gerçekleştirmişlerdir. Torreglosa ve diğ. [132], Simulink Design Optimization (SDO) kullanarak hibrit sistem bileşenlerini boyutlandırmaya ve enerji yönetiminin optimum kontrolüne dayanan Enerji Yönetim Sistemi (EMS) önermişlerdir.

4.4 HOMER Yazılımı Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

HOMER[®] [133], mikro güç sistemlerini tekli ya da çoklu enerji kaynaklarıyla modelleyen, simülasyon, optimizasyon ve duyarlılık analizini gerçekleştiren bir hibrit optimizasyon yazılımıdır. Simülasyon modülü ile yılda 8760 saat için sistem çalışmasını simüle ederken, optimizasyon modülü ile tüm sistem elemanlarının enerji talebini sistem maliyetini minimize edecek şekilde karşılamaları için enerji dengesini hesaplar. Bunu yaparken yılın her bir saati için belirtilen yüke karşılık modelin her bir bileşeni için sistemin sağlayacağı enerji akışını hesaplar. Optimizasyon modülü her sistem yapılandırmasını simüle eder ve sistemleri NPC değerine göre sıralar.

SA-HRES'in gerek simülasyonu gerek optimizasyonu için HOMER yazılımı kullanılan çalışmalar literatürde yer almaktadır. Khan ve Iqbal [134], Kanada Newfoundland'da 4,73 kW pik güç talebi ile enerji tüketimi 25 kWh olan şebekeden uzak bir ev için FV-rüzgâr-YH-dizel-akü den oluşan hibrit enerji sisteminde HOMER yazılımını kullanarak boyut optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar ayrıca rüzgâr hızı verileri, güneş ışınımı seviyesi, dizel yakıt fiyatı ve YH maliyeti ile duyarlılık analizi yapmışlardır. Shaahid ve Elhadidy [135], Suudi Arabistan Krallığı (KSA) bulunan bir ticari binaya enerji sağlayan FV-dizel-akü sisteminin ekonomik optimizasyonu için HOMER yazılımı kullanmışlar, ayrıca farklı sistem konfigürasyonları için karşılanmamış yük, aşırı elektrik üretimi, yakıt tasarrufu ve karbon emisyonlarının azaltılmasını da dikkate almışlardır. Himri ve diğ. [136], Cezayir'in uzak bir köyüne enerji sağlamak için Rüzgâr-Dizel sisteminde yaşam döngüsü maliyetleri ve sera gazı emisyonlarının azaltılması amacıyla HOMER yazılımı kullanmışlardır. Dalton ve diğ. [137], Avustralya'da şebekeden uzak büyük bir otel için FV-rüzgâr-dizel-akü sisteminde NPC ve sera gazı emisyonlarının minimizasyonunu HOMER ve HYBRIDS[®] [138] yazılımları vasıtasıyla

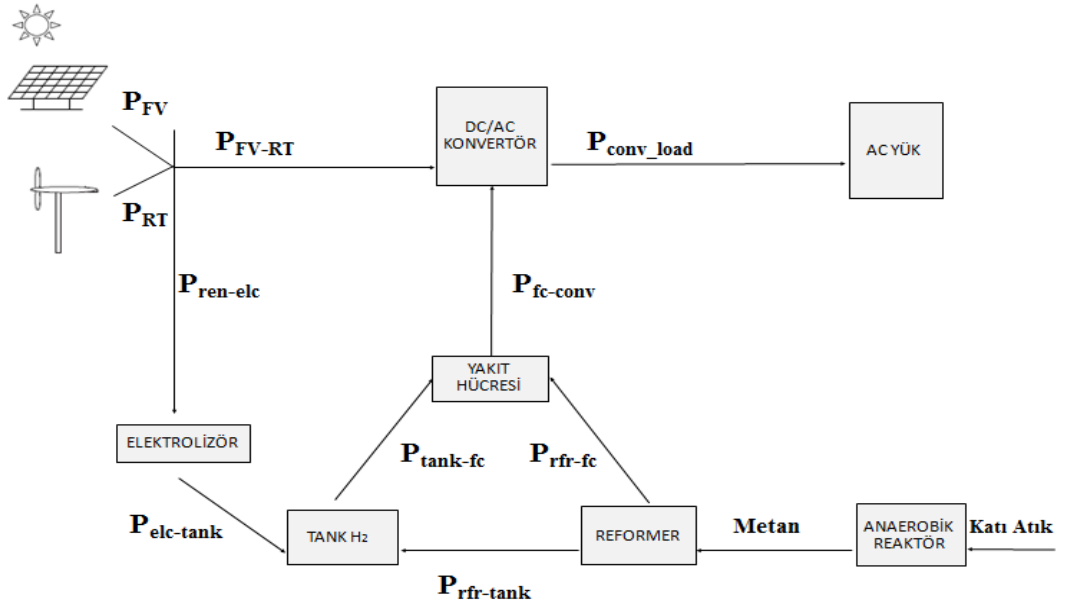
gerçekleştirmişler, ayrıca her iki program ile elde edilen simülasyon sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Shaahid ve El-Amin [139], Suudi Arabistan'da uzak bir köyün enerji ihtiyacını karşılamak üzere, FV-dizel-akü sisteminin optimizasyonu için HOMER kullanmışlar, ayrıca farklı sistem konfigürasyonları için karşılanmamış yük, aşırı elektrik üretimi, yakıt tasarrufu yüzdesi ve karbon emisyonlarının azaltılmasını da dikkate almışlardır.

5. SA-HRES TEMEL YAPILANMASI

NSGA-II tabanlı olarak geliştirilen "SAHRESOpt (SA-HRES Çok Amaçlı ve Kısıtlı Optimizasyon Algoritması) isimli yaklaşımın alt yapısını oluşturmak üzere, sistem elemanlarının matematiksel olarak modellenmesi yapılmış ve bu modellemeye dayalı olarak sistem güç yönetimi stratejisi oluşturulup sistem simülasyonu gerçekleştirilmiştir. SAHRESOpt'un bir alt bileşeni olarak geliştirilen ve "SAHRESOpt Güç Yönetimi Stratejisi" olarak adlandırılan güç yönetimi stratejisi algoritmasının doğrulanması için FV panel, RT ve ELC-HT-YH'den oluşan hidrojen enerjili sistemler ayrı ayrı simüle edilerek aynı girdilerle HOMER programında çalıştırılıp karşılaştırılmıştır.

5.1 Sistem Elemanlarının Modellenmesi

Tasarlanan şebekeden bağımsız yenilenebilir hibrit enerji sistemi FV paneller, RT'ler, YH'ler, ELC, HT'ler, bir anaerobik reaktör ve bir RFR'den oluşmaktadır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: SA-HRES elemanları ve sistemin şematik görünümü

5.1.1 Rüzgâr Türbinlerinin Modellenmesi

RT tarafından üretilen gücü hesaplamak için iki yöntem söz konusudur. Her RT için üretici tarafından sağlanan güç eğrileri kullanılarak saatlik rüzgâr verisine karşılık üretilen türbin çıkış gücünün elde edildiği ilk yöntemde bu eğriler saha ölçümü ile elde edilmiş gerçek değerlerden yararlanılarak oluşturuldukları için oldukça gerçekçi sonuçlar vermektedir. RT çıkış gücünü hesaplamak için kullanılan diğer yöntem ise formül ile hesaplamadır. Her iki yöntem için de öncelikle saatlik bazda ölçülen yıllık rüzgâr hızı verisini, RT hub (göbek) yüksekliği hızına dönüştürmek gereklidir.

Tasarlanan programda 8760 saatlik RT'nin çıkış gücünü hesaplamak için, uygulanan yöntemde izlenen adımlar şu şekildedir:

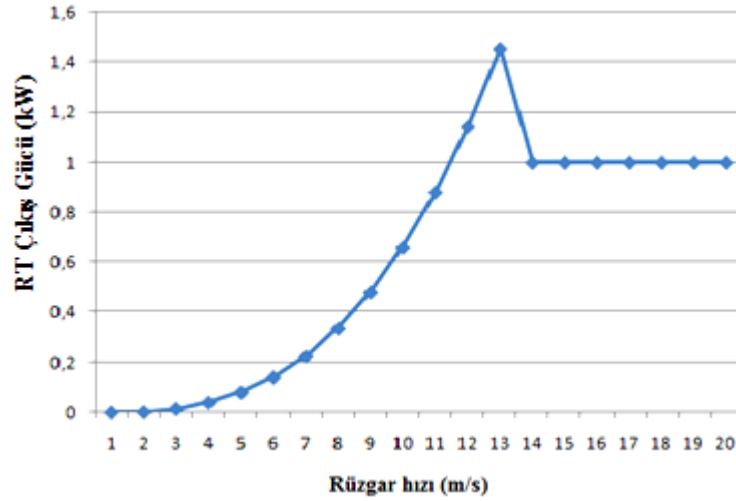
- Saatlik bazda ölçülen ($V_{ref}(t)$) yıllık rüzgâr hızı verisini, RT hub yüksekliği (h_{hub}) hızına (V_{hub}) dönüştürmek için yıllık rüzgâr hızını içeren bir dosyadan okunan rüzgâr hızı saatlik değerleri ve RT'ye ait verilerle birlikte türbinin konumlandığı coğrafi bölgeye ait gerekli bilgileri içeren ayrı bir dosyadaki veriler, tasarlanan program tarafından okunarak, belirli bir hub yüksekliğindeki rüzgâr hızı aşağıdaki formülle hesaplanır [112]:

$$V_{hub}(t) = V_{ref}(t) \times \frac{\ln(h_{hub}/l_{sr})}{\ln(h_{ref}/l_{sr})} \quad (5.1)$$

- Daha sonra V_{hub} , RT nominal gücü ($P_{wt_{rated}}$), RT başlama hızı (cut-in speed) V_{cin} , anma rüzgâr hızı (rated speed) V_{rated} ve k sabit üssü kullanılarak saatlik RT çıkış gücü hesaplanır [30, 102, 140, 141]:

$$P_{wt} = \frac{V_{hub}^k - V_{cin}^k}{V_{rated}^k - V_{cin}^k} \times P_{wt_{rated}} \quad (5.2)$$

SAHRES optimizasyonu için geliştirilen programda kullanılan RT'lerden 1 kW'lık anma gücüne sahip olan türbin için yukarıdaki formülle hesaplanan çıkış güçleri ile oluşturulan güç eğrisi Şekil 5.2'de gösterilmektedir.



Şekil 5.2: Nominal gücü 1 kW olan RT'nin güç eğrisi

Tasarlanan sistemde optimize edilecek RT sayısı 3 adet olarak alınmış ve 9 farklı RT seçeneği değerlendirilmiştir. RT'lere ait veriler Tablo 5.1'de sunulmuştur. Her bir türbine ait maliyet değerleri ise Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.1: Sistemde kullanılan RT'lere ait veriler

RT	RT Verimi	Kesme hızı	Başlama hızı	Anma hızı	RT Nominal Gücü	Hub Yüksekliği	Referans Yükseklik	Yüzey pürüzlülüğü uzunluğu
Tip_wt	e_WT	V_cout	V_cin	V_rated	P_wt_rated	h_hub	h_ref	l_sr
WT_1	0,95	20	2	12	0,5	25	10	0,01
WT_2	0,95	20	3	12	1	25	10	0,01
WT_3	0,95	20	3	12	1,5	25	10	0,01
WT_4	0,95	21	4	14	2	25	10	0,01
WT_5	0,95	21	4	14	3	25	10	0,01
WT_6	0,95	21	4	14	3,5	25	10	0,01
WT_7	0,95	21	4	14	5	25	10	0,01
WT_8	0,95	21	4	14	6	25	10	0,01
WT_9	0,95	21	4	14	7	25	10	0,01

Tablo 5.2: Sistemde kullanılan RT'ler ve maliyet değerleri

RT Jeneratörleri	-----	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4	Tip 5	Tip 6	Tip 7	Tip 8	Tip 9
Nominal Tepe Gücü (kW)	0	0,5	1	1,5	2	3	3,5	5	6	7
Satın Alma maliyeti (\$)	0	2273	3500	5000	6500	9500	11200	16000	19000	22500
İşletme ve Bakım Maliyeti (\$/yıl)	0	50	50	55	60	60	65	75	80	85

5.1.2 Fotovoltaik Sistemin Modellenmesi

Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT) teknolojisi, herhangi bir güneş ışınımı ve sıcaklık değerinde sürekli olarak maksimum güç çıkışı elde etmek için geliştirilmiştir.

İkiz-şaft izleme cihazı ve MPPT ile FV dizinin güç çıkışı yalnızca güneş ışınımı ve sıcaklık ile belirlenir. FV güç çıkışı (P_{PV_out}), Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) [142] tarafından geliştirilen HOMER yazılımındaki model temelinde aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır [102, 143, 144].

$$P_{PV_out} = P_{pv_rated} + \frac{R}{R_{stc}} \times (1 + T_{co} \times (T - T_{ref})) \quad (5.3)$$

(5.3) eşitliğinde P_{pv_rated} , referans koşullarda nominal güç, R güneş ışınımı (W/m^2), R_{stc} referans koşullardaki güneş radyasyonu ($1000 W/m^2$), T_{ref} referans koşullardaki hücre sıcaklığı, T_{co} mono ve poli-kristalin Si için maksimum gücün sıcaklık katsayısıdır. Hücre sıcaklığı T ise ortam sıcaklığı (T_{ort}) ve R dikkate alınarak (5.4) eşitliği yardımıyla hesaplanmaktadır [102, 144].

$$T = T_{ort} + R \times 0,0256 \quad (5.4)$$

Deshmukh ve Deshmukh [30] tarafından yapılan çalışmada ise hücre sıcaklığı T aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$T = T_{ort} + R \times \frac{\alpha\tau}{U_L} \quad (5.5)$$

$$\frac{\alpha\tau}{U_L} = \frac{T_{N\check{C}HS} - T_{ort_N\check{C}HS}}{R_{N\check{C}HS}} \quad (5.6)$$

(5.6) eşitliğinde $T_{N\check{C}HS}$ normal çalışma hücre sıcaklığını ifade etmektedir. Rüzgâr hızı 1 m/s için, $T_{ort_N\check{C}HS} = 20^\circ C$ ve $R_{N\check{C}HS} = 800 W/m^2$ olarak alınmaktadır.

Tasarlanan sistemde optimize edilecek FV panel sayısı 4 adet olarak alınmış ve 9 farklı FV panel seçeneği değerlendirilmiştir. FV panellerin özellikleri Tablo 5.3'de, her bir FV panele ait maliyet değerleri ise Tablo 5.4'de verilmiştir.

Tablo 5.3: Sistemde kullanılan FV Panel tipleri ve özellikleri

FV Tipi	Tip_FV	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4	Tip 5	Tip 6	Tip 7	Tip 8	Tip 9
FV verimliliği	e_FV	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
FV Anma Gücü	P_FV_rated	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6
Referans şartındaki sıcaklık	T_ref	25	25	25	25	25	25	25	25	25
FV panelinin sıcaklık katsayısı	T_co	-0,47	-0,47	-0,47	-0,47	-0,47	-0,47	-0,47	-0,47	-0,47

Tablo 5.4: Sistemde kullanılan FV Panelleri ve maliyet değerleri

FV Panelleri	----	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4	Tip 5	Tip 6	Tip 7	Tip 8	Tip 9
Nominal Tepe Gücü (kWp)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0
Satın Alma Maliyeti (\$)	0	3000	6000	9000	11700	14500	17000	22000	26000	30000
İşletme ve Bakım Maliyeti (\$/yıl)	0	30	33	37	40	44	50	60	70	80

5.1.3 Yakıt Hücreleri ve Modellenmesi

YH'ler, hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinde depolanan ya da direkt olarak üretilen hidrojeni elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılan elemanlardır. SA-HRES optimizasyonu kapsamında da YH'ler, sistemin ürettiği fazla enerjinin HT'de hidrojen olarak depolanan kısmını ve RFR'nin ürettiği hidrojeni elektrik enerjisine dönüştürmek üzere kullanılmaktadır. YH genel yapısı ve özellikleriyle birlikte SA-HRES simülasyonu içinde matematiksel olarak modellenmesi izleyen alt bölümlerde açıklanmaktadır.

5.1.3.1 Yakıt Hücreleri

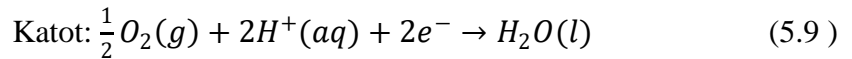
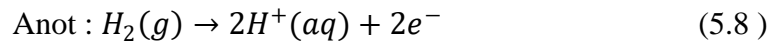
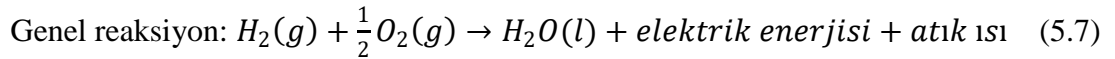
YH, bir yakıtın kimyasal enerjisini doğrudan elektriğe dönüştüren elektrokimyasal bir enerji dönüştürme aygıtıdır. Enerji sistemlerinde YH'ler, hidrojen ile havadaki oksijenin elektrokimyasal reaksiyonuyla elektrik enerjisi ve ısı üreten

enerji dönüşüm elemanı olarak kullanılmaktadırlar. Kullanılan elektrolit türüne bağlı olarak, Proton Geçirgen Membranlı YH (PEMYH), Alkalın YH, Fosforik Asit YH, Erimiş Karbonlu YH ve Katı Oksit YH gibi çeşitli YH'ler geliştirilmiştir [145, 146].

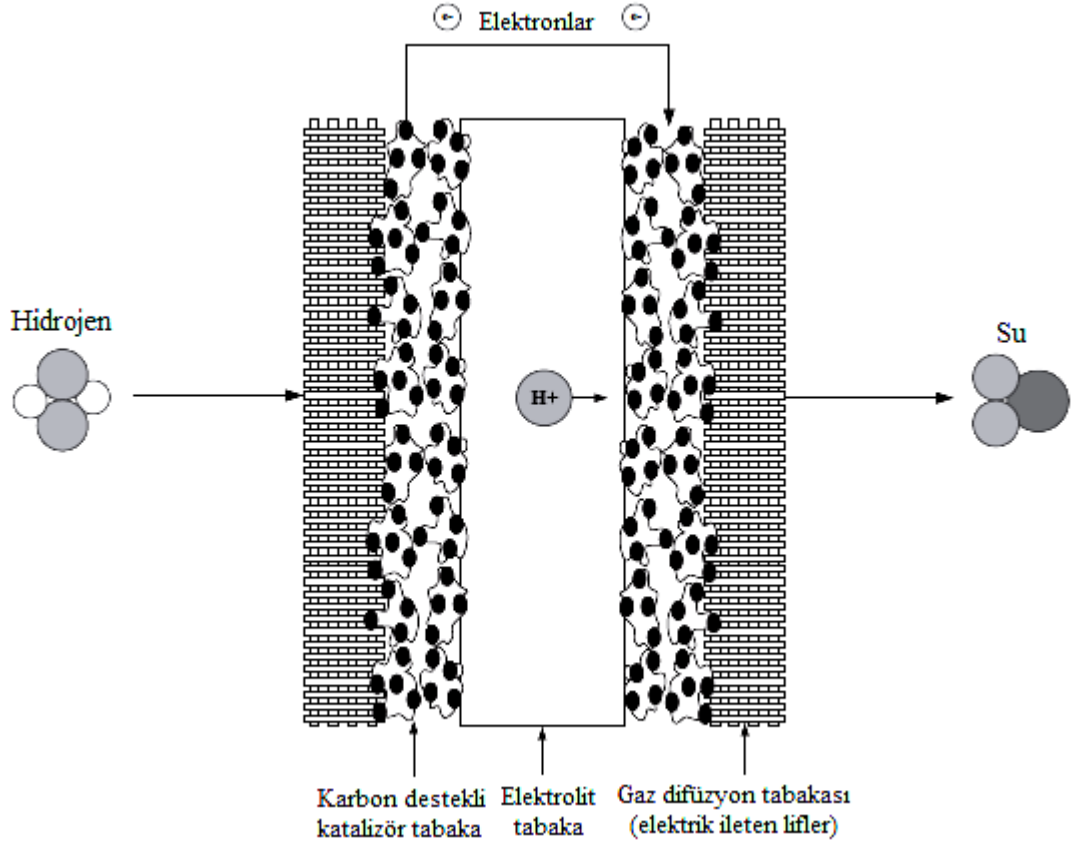
Bir negatif yüklü elektrot (anot), bir pozitif yüklü elektrot (katot) ve bir elektrolit membrandan oluşan YH'de, hidrojen anotta yükseltgenirken oksijen katotta indirgenir. Katottaki oksijen, protonlar ve elektronlar ile reaksiyona girerek su oluşturur ve ısı üretir. Protonlar, elektrolit membran boyunca anottan katoda taşınırken elektronlar ise dış devre üzerinden katoda taşınır. Elektronlar iletken materyallere çekilir ve gerektiğinde yüke gider. Hem anot hem de katot, Şekil 5.3'de gösterildiği gibi, elektrokimyasal prosesleri hızlandırmak için bir katalizör ihtiva eder [147].

Doğada, moleküller iyonik halde kalamazlar ve bu nedenle doğal hallerine dönmek için diğer moleküllerle derhal tekrar birleşirler. YH'lerdeki hidrojen protonları, özel malzemeler kullanılarak moleküllerden moleküllere geçmek suretiyle iyonik halde kalırlar. Bu protonlar, teflon yapıya sahip persülfonik asit gruplarından oluşan bir polimer zar boyunca dolaşırlar.

Tipik bir PEMYH'de meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlara ait denklemler aşağıda gösterildiği gibidir [147]:



(aq. = abbreviation Aqueous= su içeren)



Şekil 5.3: PEMYH yapısı

Kimyasal enerjiyi direkt olarak elektrik enerjisine dönüştürebilme yetenekleri ile YH'ler, konvansiyonel termo-mekanik sistemlere oranla daha yüksek dönüşüm verimliliğine sahiptirler. Başka bir deyişle, YH kullanılarak aynı miktardaki bir yakıt ile daha fazla miktarda elektrik enerjisi üretilebilmektedir. Isıl geri kazanım işlemi ile birlikte elektrik üretiminde %80'lere varan bir verimliliğe ulaşmak mümkündür [21].

İçinde depolanan reaktif miktarı ile enerji saklama kapasitesinin sınırlandırıldığı bir aküden farklı olarak yakıt ve oksitleyici ile beslenen bir YH'de, güç kaynağı kesintisizdir [148].

5.1.3.2 Yakıt Hücrelerinin Modellenmesi

YH'nin t zaman aralığında hidrojen tüketimi aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır [133]:

$$Cons_{H_2}(t) = fcic \times P_{fc-rated} + fcs \times P_{fc}(t) \quad (5.10)$$

$Cons_{H_2}$: YH yakıt tüketimi (kg/sa)

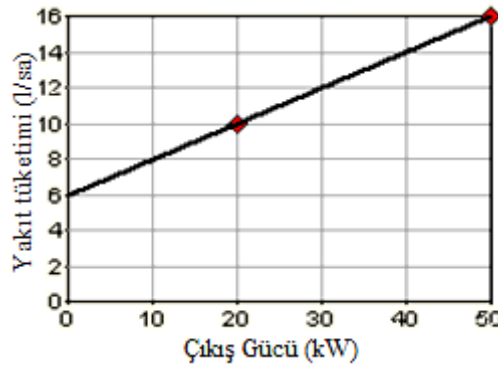
$fcic$: YH yakıt eğrisi birleşme (intercept) katsayısı ($kg/sa/kW_{rated}$)

$P_{fc-rated}$: YH anma çıkış gücü (kW)

fcs : YH yakıt eğrisi eğimi ($kg/sa/kW$)

P_{fc} : YH çıkış gücü (kW) (t. zaman aralığı için)

Burada $fcic$ ve fcs değerleri sırasıyla $0,08 \text{ kg/sa/kW}_{rated}$ ve $0,25 \text{ kg/sa/kW}$ olarak, sonuçların kıyaslanabilmesi açısından HOMER programında kullanılan değerlerle aynı alınmıştır. Hibrit sistem optimizasyonu için kullanılacak tüm YH'lerin yakıt eğrisi katsayıları aynıdır. Şekil 5.4'de örnek bir YH güç eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 5.4: YH için örnek bir güç eğrisi

Hidrojenin alt ısıl değeri (lower heating value of $H_2 = LHV_{H_2}$) ne bağlı olarak YH verimi yüzdesi aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır [112]:

$$\eta_{fc} (\%) = \frac{P_{fc}}{LHV_{H_2} \times Cons_{H_2}} \times 100 \quad (5.11)$$

Burada $LHV_{H_2} = 33,3 \text{ kWh/kg}$ olarak alınmıştır.

SA-HRES çok amaçlı optimizasyon algoritmasında optimize edilecek YH'lerin boyutları ve maliyet değerleri Tablo 5.5'de verilmiştir. YH yapılanması için 6 farklı tip YH ve kullanılabilir YH sayısı olarak da 3 adet seçenek tanımlanmıştır.

Tablo 5.5: Sistemde kullanılan YH'ler ve maliyet değerleri

Yakıt Hücreleri	-----	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4	Tip 5	Tip 6
Nominal çıkış gücü (kW)	0	1	2	3	4	5	6
Satın Alma Maliyeti (\$)	0	7000	12000	16000	20000	24000	28000
İşletim ve Bakım Maliyeti (\$/yıl)	0	864	1037	1296	1469	1728	1901
Değiştirme Maliyeti (\$)	0	6000	10500	14000	18000	22500	26000

5.1.4 Elektrolizörler ve Modellenmesi

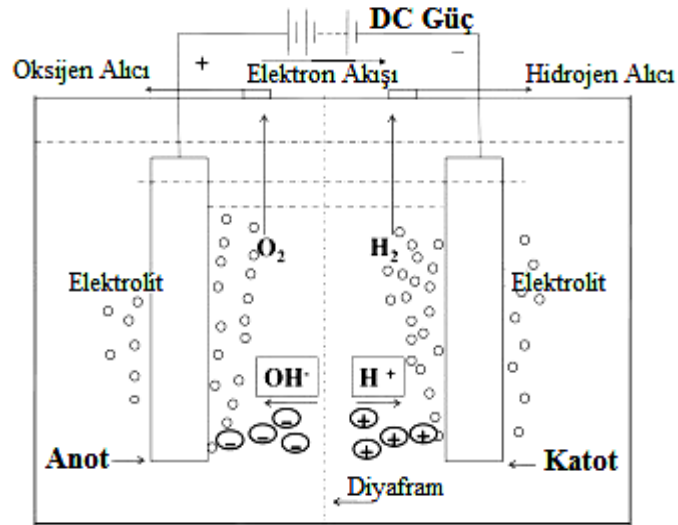
Yenilenebilir hibrit enerji sistemlerinde fazla enerjinin hidrojene dönüştürülmesi için kullanılan ELC'ler SA-HRES'de de RT ve FV panellerin ürettiği fazla enerjinin dönüşümü için kullanılabilir bir seçenek olarak bulunmaktadır. ELC yapısı ve özellikleriyle ilgili özet bilgiler ve sistemde yer aldığı güç akışında nasıl rol oynayacağına dair matematiksel modellemesi izleyen alt bölümlerde açıklanmaktadır.

5.1.4.1 Elektrolizörler

Suyun elektrolizi ilk olarak Nicholson ve Carlisle tarafından 19. yüzyılın başlarında, elektriğin suyu hidrojen ve oksijen gazlarına ayırdığını keşfetmeleriyle ortaya çıkmıştır [149].

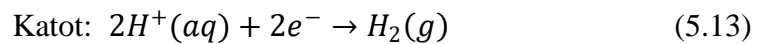
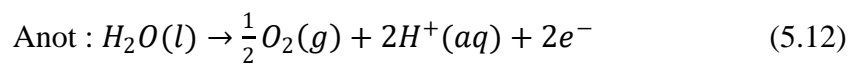
ELC'ler suyu elektrik enerjisi ile hidrojen ve oksijene ayırarak elektroliz üniteleridir. Temel bir su elektroliz ünitesi Şekil 5.5'de gösterildiği gibi bir anot, bir katot, güç kaynağı ve bir elektrolitten oluşur [150]. Elektrolit elektriksel iletkenliğe sahip serbest iyon içeren sıvı veya katı ortamı ifade etmektedir.

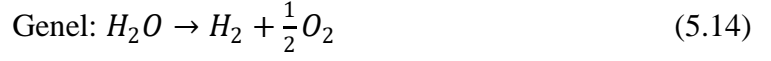
Suyun elektrolizi sırasında hidrojen iyonları katoda doğru hareket ederken hidroksil iyonları anot yönünde hareket eder. Membran (diyafram) sayesinde hidrojen alıcıları katotta oluşturulan hidrojeni ve de oksijen alıcıları anotta üretilen oksijen gazlarını birbirlerine karışmadan alırlar.



Şekil 5.5: ELC'nin şematik gösterimi

ELC'de YH'de meydana gelen reaksiyonların tam tersi meydana gelir. Şöyle ki [15, 150, 151]:

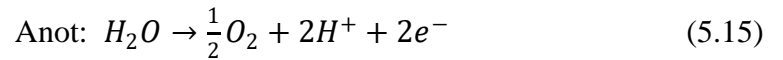




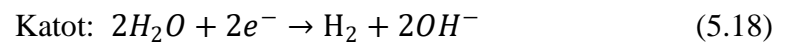
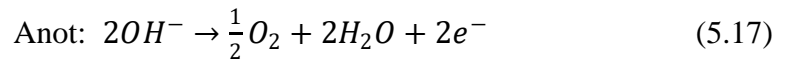
Kullanılan elektrolitin sıvı veya katı olmasına göre ticari olarak mevcut iki tip ELC vardır. Sıvı elektrolit içeren Alkali ELC ve katı elektrolit içeren PEM ELC olarak tanımlanmaktadır.

Bir PEM ELC sistemi sadece protonların geçmesine izin veren polimer membran, elektrokimyasal reaksiyon sonucu suyun parçalandığı ve oksijenin olduğu anot katalizör tabaka, hidrojenin gazının meydana geldiği katot katalizör tabaka ve elektriğin uygulandığı elektrot tabakalarından oluşmaktadır. Elektrot tabakaları (anot ve katot) aynı zamanda sıvının ve gazların katalizör yüzeylere iletilmesi ve uzaklaştırılması görevini üstlenmektedir. Anot girişinden hücreye alınan su, anot katalizör tabakasında hidrojen iyonu (H^+ , Proton) ve oksijen gazına ayrılmaktadır. Oksijen gazı anot çıkışından dışarı verilirken hidrojen iyonu Nafion membrandan karşıya geçerek katot katalizör tabakasında elektron almakta (indirgenmekte) ve hidrojen gazına dönüşmektedir [152]. PEM su elektrolizinde, esas olarak PEMYH işlemlerinin tersi gerçekleşmektedir.

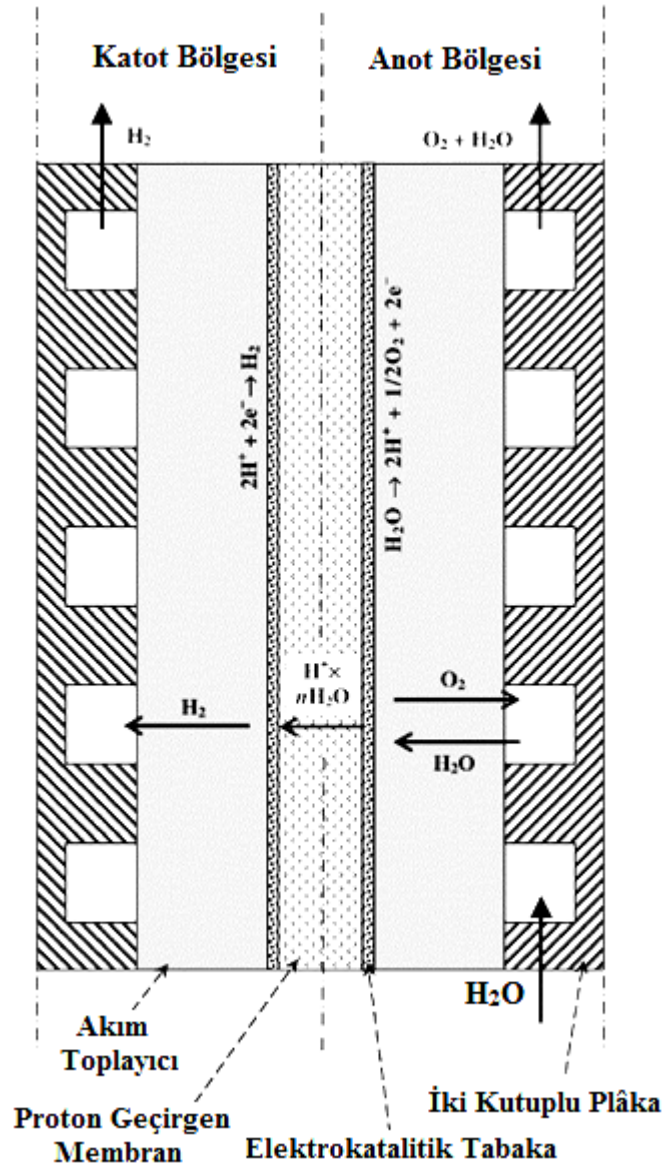
Elektroliz işleminde Alkali ELC ya da PEM ELC kullanılması halinde elektrolizörde gerçekleşen genel reaksiyon aynı olmaktadır. Ancak, anot ve katotta gerçekleşen reaksiyonlar farklılık göstermektedir. PEM ELC'de anot ve katotta gerçekleşen reaksiyonlar şu şekildedir:



Alkali elektrolizörde anot ve katotta gerçekleşen reaksiyonlar ise (5.17) ve (5.18) eşitlikleriyle gösterilmektedir:



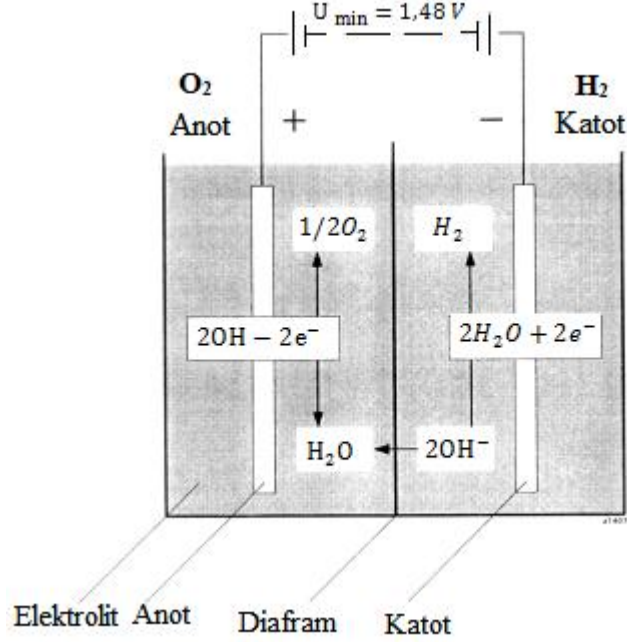
Bir PEM ELC'nin yapısı ve çalışma prensibi Şekil 5.6'da şematik olarak gösterilmektedir [153].



Şekil 5.6: PEM ELC'nin yapısı ve çalışma prensibi

Alkalin su elektrolizinde Şekil 5.7'de görüldüğü gibi iki su molekülü katotta bir molekül hidrojene ve iki hidroksil iyonuna indirgenir [149]. Hidrojen, gaz biçiminde katodun yüzeyinden ayrılarak katot çıkışına yönelirken, katot ve anot arasında mevcut elektriksel alanının etkisi altında hidroksil iyonları, gözenekli diyafram vasıtasıyla anot katalizör yüzeye geçer. Burada iki hidroksil iyonu elektron vererek 1/2 molekül oksijene ve bir molekül suya yükseltgenmiş olur. Böylece oksijen de gaz formunda anot katalizör katmanından uzaklaşır.

Alkali ELC'ler, verimlerinin düşük olması ve meydana gelen hidrojen ve oksijen gazlarında safsızlıklar olması gibi dezavantajlara sahiptirler. Şekil 5.7'de bir alkali ELC'nin yapısı ve çalışma prensibi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 5.7: Alkali ELC'nin yapısı ve çalışma prensibi

PEM ELC'ler ise bu dezavantajların tersine şu avantajlara sahiptirler [152, 153]:

- Yüksek verim,
- Yüksek hidrojen ve oksijen saflığı (%99,9),
- Yüksek basınçlı hidrojen üretimi,
- Farklı akım yoğunlukları, sıcaklık ve basınç değerleri altında çalışabilme
- Yüksek emniyet seviyesi,
- Küçük kütle ve hacim,
- Düşük güç maliyeti: Yüksek basınçlı hidrojen üretimi sayesinde ayrıca kompresör kullanımına ihtiyaç duyulmaması nedeniyle doğrudan sıkıştırılmış hidrojen gazı elde etme.

Bu avantajları sayesinde PEM ELC'ler, günümüzde özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının ürettiği değişken karakteristikteki fazla enerjiyi daha sonra kullanılmak üzere HT'de depolanabilecek hidrojeni doğrudan üretmek için oldukça elverişlidir.

5.1.4.2 Elektrolizörün Modellenmesi

SA-HRES'de RT ve FV paneller tarafından üretilen enerjinin yükün talebinden fazla olması durumunda fazla enerji ELC'ye gönderilerek burada hidrojene dönüştürülür. ELC'ye gönderilen güç nominal gücü aşarsa, bu durumda aşırı enerji bir rezistans vasıtasıyla harcanır. Bu şekilde ELC korunmuş olur. Rezistansa gönderilen enerji fazlası miktarına bağlı olarak bu ısının, enerji üretim sistemlerinde sürecin diğer aşamalarında ya da ısınma amaçlı olarak kullanılması söz konusu olabilir.

Sistemde kullanılan ELC'nin t zaman aralığında ürettiği hidrojen kg cinsinden (5.18) eşitliğinde belirtildiği gibi hesaplanmıştır:

$$P_{ELC}(t) = \frac{P_{fzlenj - FVRT}(t) \times e_{ELC}}{HHV_{H_2}} \quad (5.19)$$

Burada $P_{fzlenj - FVRT}$, sistemde kullanılan RT ve FV panellerin ürettiği gücün yükün talebinden fazla olan miktarını, e_{ELC} , ELC verimliliğini, HHV_{H_2} ise hidrojenin üst ısıl değerini ifade etmektedir.

SAHRESOpt uygulaması için dikkate alınan ELC tipleri Tablo 5.6'da görüldüğü gibi 5 adettir ve sayı olarak da 1 ve 2 adet seçenekleri ile birlikte boyut optimizasyonu kapsamında değerlendirilmiştir.

Tablo 5.6: Sistemde kullanılan ELC tipleri ve maliyet değerleri

Elektrolizörler	-----	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4	Tip 5
Nominal Giriş Gücü (kW)	0	1	2	3	4	5
Satın Alma maliyeti (\$)	0	7200	13500	18000	23000	27000
İşletme ve Bakım Maliyeti (\$/yıl)	0	40	45	50	55	60
Değiştirme maliyeti (\$)	0	6000	12000	16500	21500	25000

5.1.5 Hidrojen Tankın Modellenmesi

Sistemde kullanılan HT, FV paneller ve RT'lerden kaynaklanan güç fazlasının ELC tarafından hidrojene dönüştürülen miktarını depolarken, aynı zamanda RFR'den kaynaklanan güç fazlası söz konusu olduğunda RFR tarafından üretilen hidrojenin direkt olarak depolanması görevini de üstlenmektedir. Tablo 5.7'de de görüldüğü üzere HT için 4 farklı tip seçeneği değerlendirilmiştir. HT sayısı olarak da 1, 2, 3 ve 4 adet seçenekleri boyut optimizasyonu kapsamında dikkate alınmıştır.

Tablo 5.7: Sistemde kullanılan HT tipleri ve maliyet değerleri

Hidrojen Tankları	-----	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4
Nominal Kapasite (kg)	0	1	1,5	2	2,5
Satın Alma Maliyeti (\$)	0	1000	1350	1700	2000
İşletme ve Bakım Maliyeti (\$/yıl)	0	50	65	80	90

5.1.6 Reformasyon ve Reformerin Modellenmesi

5.1.6.1 Biyogaz Buhar Reformasyonu

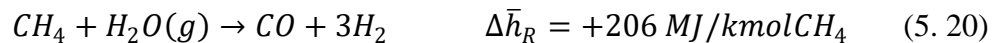
Organik maddeler, oksijensiz ortamda, mikrobiyolojik reaksiyonlar sonucunda biyogaz ve organik gübreye dönüştürülür. 1776'da İtalyan Fizikçi Volta, ilk defa, göletlerin ve akarsuların taban çökeltilerindeki organik maddelerden üretilen bataklık gazında metan bulunduğunu göstermiştir [154].

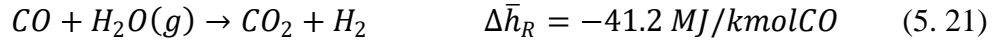
Biyogaz, hidrojen sülfür (H₂S), amonyak (NH₃), hidrojen (H₂), azot (N₂), oksijen (O₂) ve buhar suyu (H₂O) gibi diğer gazların eser miktarlarıyla birlikte esas olarak metan (CH₄) ve karbondioksitten (CO₂) oluşan bir üründür [148].

Biyogaz metan ve karbondioksit gazlarının karışımından oluşur. Sentez gazı veya hidrojen üretmek üzere hidrokarbonlar, buhar, karbon dioksit ya da oksijen gibi oksitleyiciler tarafından reforme edilebilir [155].

Buhar metan reformasyonu, metanın su buharı ile katalitik olarak oksidasyonuna dayanmaktadır. Biyogaz, geleneksel buhar metan reformasyonu teknolojisinde kullanılan doğal gazın alternatif bir hammadde olabilir. Biyogaz doğal gazın benzer bir kaynak olmakla birlikte ilave olarak yenilenebilir enerji kaynağı olma, atmosferdeki metan salınımını engelleyerek emisyonları azaltma (metan sera gazı olarak karbondioksite göre 21 kat daha güçlüdür) ve ticari olarak anaerobik çürütücülerde ayrıca gübre, kanalizasyon, enerji bitkileri ve organik madde gibi biyolojik atıkların arıtımı için tasarlanmış depolama gazı geri kazanım tesislerinde büyük miktarlarda üretilme gibi avantajlara sahiptir [156]. Biyogaz üretimi ayrıca, düzenli depolama alanlarını azaltmakta ve yan ürün olarak besin açısından zengin gübreler üretmektedir [154].

Buhar metan reformasyonu (SMR) ile metandan hidrojen üretimi işlemi iki ana kimyasal reaksiyona dayanmaktadır: (5.19) eşitliğiyle ifade edilen metan reformasyon reaksiyonu ve (5.20) eşitliğiyle ifade edilen su gaz değiştirme/kaydırma reaksiyonu [26, 157].





Metan reformasyonu sonucu elde edilen karbon monoksit değiştirme reaksiyonuyla hidrojene donüştürölerek hidrojen verimi artırılır. Biyogaz buhar reformasyonunun gaz yan ürünü CO₂'dir ancak biyokütleden elde edilen metanın reformasyonu sonucu oluşan karbon dioksit sera gazlarıyla kıyaslandığında ‐nötral‐ dir, yani atmosferdeki CO₂ konsantrasyonunu artırmaz [158].

Çoğu araştırmanın gösterdiği biyogaz reformasyon süreçlerinde karşılaşılan başlıca problemler, katalizör yüzeyinde kok oluşumu ve kükürt içeren, katalizörün deaktive edilmesine ve H₂ üretiminin azalmasına neden olabilecek zehirlenmeler ile ilgilidir [148].

5.1.6.2 Reformerin Modellenmesi

Tasarlanan hibrit sistemde organik atıkların anaerobik çürütücü (reaktör) de muamelesi sonucu oluşan biyogazın reformasyonu sonucu elde edilen hidrojen RFR'den direkt olarak YH'ye gönderilerek elektrik enerjisine donüştürölmektedir. Sistemde üretilen toplam enerjinin yükün talebini aşması durumunda ise fazla enerjinin RFR'den kaynaklanan kısmı ise doğrudan HT'ye gönderilerek depolanabilmektedir.

RFR tarafından YH'ye gönderilen hidrojen ile YH'nin t. saatte ürettiği enerji ise (5.10) eşitliği duzenlendiğinde:

$$E_{fc}(t) = \text{Cons}_{H_2}(t) - (f_{cic} \times P_{fc-rated}) / f_{cs} \quad (5.22)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

SAHRESOpt uygulaması için dikkate alınan RFR tipleri ve maliyet değerleri Tablo 5.8'de verildiği gibidir. Diğer sistem elemanlarından farklı olarak RFR yalnızca bir adet olarak sistemde yer alabilmektedir.

Tablo 5.8: Sistemde kullanılan RFR tipleri ve maliyet değerleri

Reformer	-----	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4	Tip 5	Tip 6
Nominal Kapasite (kg/saat)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Satın Alma Maliyeti (\$)	0	3200	6000	8500	11000	14000	17500
İşletme ve Bakım Maliyeti (\$/yıl)	0	225	450	600	800	1000	1100

5.2 SAHRESOpt Güç Yönetimi Stratejisi Algoritması

Enerji sistemlerinde güç yönetimi stratejisi öncelikle sistemin çalışması sonrasında maliyeti, güvenilirliği ve ömrünü direkt olarak etkileyen önemli bir unsurdur [114]. Güç yönetimi stratejisindeki en küçük bir değişiklik sistemin tümünü etkileyeceğinden hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonunda öncelikli olarak sistemin güç yönetimi stratejisi oluşturulmalıdır.

SAHRESOpt yaklaşımında sistem elemanlarının belirtilen tip ve adet değerleri dikkate alınarak rastgele başlangıç popülasyonu oluşumu gerçekleştirilir. Oluşan bu yapılanmada her bir sistem elemanının nominal gücü ve de sayısı belirlenmiş bulunmaktadır. Buna göre sistem elemanlarının saatlik bazda yıllık yük talebi karşısında yine saatlik güneş ışınımı, sıcaklık ve rüzgâr hızı değerlerine göre ne kadar güç üretebileceğinin, enerji fazlası ya da enerji açığı olduğunda sistem elemanlarının her birinin nasıl davranacağına belirlendiği SAHRESOpt Güç Yönetimi Stratejisi algoritması devreye girmektedir. Bu algoritma fazla enerji, başa baş enerji ve eksik enerji algoritması olmak üzere üç ayrı alt bölümden oluşmaktadır.

Tasarlanan sistem için oluşturulan SAHRESOpt Güç Yönetimi Stratejisi algoritmasında hibrit sistemin asıl elemanları olan yenilenebilir kaynakların, yani RT, FV paneller ve anaerobik reaktörün ürettiği metan gazını hidrojene dönüştüren RFR'nin beslediği YH tarafından üretilen toplam enerji P_{sist} olarak adlandırılmıştır. t . saatte sistemin ürettiği toplam güç:

$$E_{sist}(t) = E_{pv}(t) + E_{wt}(t) + E_{rfr-fc-conv}(t) \quad (5.23)$$

Burada P_{sist} , hibrit enerji sisteminde t . saatte üretilen toplam sistem gücünü ifade etmektedir. Toplam gücün toplam yük talebine eşit olması (başa baş enerji durumu), az olması (eksik enerji durumu) ve de fazla olması (fazla enerji durumu) durumlarında sistem güç yönetimi algoritmasının davranışı izleyen kısımda açıklanmıştır.

5.2.1 Başa Baş Enerji Durumu

RT, FV sistem ve RFR'nin beslediği YH tarafından t . saatte üretilen toplam enerjinin (E_{sist}) yüke eşdeğer olması, başa baş enerji durumu olarak tanımlanmaktadır. Yani eğer $E_{sist} = P_{load} / \eta_{conv}$ ise;

$$E_{sist} = E_{ren-con} \quad (5.24)$$

$$E_{ren-elc} = 0 \quad (5.25)$$

$$P_{fc-conv}(t) = P_{rfr-fc-conv}(t) = (P_{rfr-fc}(t) - (fcic \times P_{fc-tpl})) / fcs \quad (5.26)$$

$$P_{elc-tank} = 0 \quad (5.27)$$

$$P_{rfr-tank} = 0 \quad (5.28)$$

$$P_{tank-fc} = 0 \quad (5.29)$$

$$E_{tank}(t) = E_{tank}(t-1) \quad (5.30)$$

Bu durumda RT, FV paneller ve RFR'nin beslediği YH tarafından üretilen toplam güç konverter (dönüştürücü) aracılığıyla yüke enjekte edilir.

5.2.2 Fazla Enerji Durumu

E_{sist} , yükün talebinden fazlaysa, yani eğer $E_{sist} > P_{yük} / \eta_{con}$ ise meydana gelen fazla enerji E_{fzlenj} olarak tanımlanmaktadır;

$$E_{fzlenj} = E_{sist} - (P_{yük} / \eta_{con}) \quad (5.31)$$

Bu durumda öncelikle yenilenebilir kaynaklardan gelen enerjinin (P_{sist}) yükü beslediği miktarından artı kalanı olan E_{fzlenj} 'nin RT ve FV panellerden mi, RFR'nin beslediği YH'den mi yoksa her iki durum dolayısıyla mı kaynaklandığı tespit edilir. Sonrasında aşağıdaki adımlar izlenir:

- E_{fzlenj} 'nin RT ve FV panellerden kaynaklanan kısmı E_{fzlenj_pvwt} olarak tanımlandıktan sonra fazla enerjinin ELC kapasitesini aşmayan kısmı hidrojene dönüştürülmek üzere ELC'ye gönderilir varsa aşırı miktarı da aşırı enerji (E_{dump}) olarak atılır. Eğer sistemde bir ELC yoksa E_{fzlenj_pvwt} 'nin tamamı E_{dump} olarak atılır.

$$E_{fzlenj_pvwt} = E_{pv}(t) + E_{wt}(t) - (P_{yük}/\eta_{con}) \quad (5.32)$$

- ELC nominal gücü sınırları dahilinde aldığı enerjiyi hidrojene dönüştürerek HT'ye iletir. HT'ye iletilen hidrojen miktarı tankın maksimum kapasitesini aşmamalıdır. Eğer aşırıysa fazla hidrojen ($E_{dump-H2}$) olarak atılır.

$$P_{elc-tank} = E_{ren-elc} \times \eta_{elc} \div HHV_{H_2} \quad (5.33)$$

$$(\eta_{elc} = 0,65) \quad (HHV_{H_2} = 39,4 \text{ kWh/kg})$$

$$P_{elc-tank}(t) \leq E_{tank-max} - E_{tank}(t-1) \quad (5.34)$$

- E_{fzlenj} 'nin E_{fzlenj_pvwt} 'ye eşit olmaması durumunda fazla enerjinin kalan kısmı RFR'nin beslediği YH'den kaynaklanıyor demektir ki bu da E_{fzlenj_rfr} olarak tanımlanır. E_{fzlenj_rfr} RFR tarafından üretilen, yükün talebini aşan enerji miktarına karşılık gelen kg cinsinden hidrojen miktarını temsil etmektedir. Fazla enerjinin bu kısmı direkt olarak HT'ye gönderilir. HT kapasitesini aşan kısmı ise aşırı enerji ($E_{dump-H2}$) olarak atılır.

$$E_{fzlenj_rfr} = E_{fzlenj} - E_{fzlenj_pvwt} \quad (5.35)$$

$$E_{rfr_fc_conv}(t) = (P_{yük}(t)/\eta_{con}) - (E_{pv}(t) + E_{wt}(t)) \quad (5.36)$$

$$P_{tank-fc} = 0 \quad (5.37)$$

$$P_{rfr-tank}(t) \leq E_{tank-max} - E_{tank}(t-1) \quad (5.38)$$

$$E_{tank}(t) = E_{tank}(t-1) + P_{elc-tank}(t) + P_{rfr-tank}(t) \quad (5.39)$$

5.2.3 Eksik Enerji Durumu

RT, FV paneller ve RFR'nin beslediği YH tarafından üretilen toplam güç (P_{sist}) yükün talebinden az ise yani, eğer $P_{sist} < P_{yük}/\eta_{con}$ ise ortaya çıkan enerji açığı $E_{ekskenj}$ olarak tanımlanmaktadır:

$$E_{ekskenj} = (P_{yük}/\eta_{conv}) - E_{sist} \quad (5.40)$$

Bu durumda enerji açığı HT'de depolanan hidrojenin YH'de elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle kapatılır. HT'de yeterli hidrojen yoksa karşılanamayan yük (P_{loss}) söz konusu olacaktır.

$$P_{tank-fc}(t) \leq E_{tank}(t-1) - E_{tank_min} \quad (5.41)$$

$$E_{tank}(t) = E_{tank}(t-1) - P_{tank-fc}(t) \quad (5.42)$$

$$E_{fc-cnv}(t) = (P_{tank-fc}(t) - fcic \times P_{fc-rated})/fcs + E_{rfr-fc-cnv}(t) \quad (5.43)$$

$$P_{loss}(t) = P_{yük}(t) - ((E_{fc-cnv}(t) + E_{ren-con}(t)) \times \eta_{con}) \quad (5.44)$$

$$E_{ren-elec}(t) = 0 \quad (5.45)$$

$$P_{elc-tank}(t) = 0 \quad (5.46)$$

Burada öncelikle eksik enerji miktarını karşılayabilmek için gerekli olan hidrojen miktarı YH'ye gönderildikten sonra HT'de kalan hidrojenin tankın minimum seviyesinin (E_{tank_min}) altına düşmemesi şartı aranır. Buna ek olarak HT'den YH'ye gönderilecek hidrojen miktarının YH'nin çalışabilmesi için gerekli olan minimum hidrojen tüketiminin ($cons_{H2_min}$) üzerinde olması kısıtı ve YH'nin nominal çıkış gücünde çalışabilmesi için tüketebileceği maksimum hidrojen miktarını ($cons_{H2_max}$) aşmaması kısıtları da söz konusudur.

$$P_{fc_min} = P_{fc_rated} \times 0,03 \quad (5.47)$$

$$cons_{H2_min} = fcic \times P_{fc_rated} + fcs \times P_{fc_min} \quad (5.48)$$

$$cons_{H2_rated} = fcic \times P_{fc_rated} + fcs \times P_{fc_rated} \quad (5.49)$$

SAHRESOpt Güç Yönetimi Stratejisi algoritması sonucunda belirlenen tip ve adet değerleri ile her bir sistem elemanının saatlik periyotlarla bir yıl boyunca ne kadar enerji üreteceği, bu enerjinin ne kadarlık kısmının yükün talebini karşılayacağı, ne kadarının fazla enerji olarak depolanacağı, depolanamayan fazla enerji (atık enerji) miktarının değeri ya da ne kadarlık eksik enerjinin sistem depolama elemanı olan HT ile beslenen YH tarafından karşılanabileceği, karşılanamayan yük değerinin ne kadar olacağı simüle edilerek belirlenmekte ve sonuçta karşılanmamış yük (LPS: loss of power supply) ya da kayıp yük (P_{loss}) değerleri toplamının toplam yük talebine ($P_{yük}$) bölünmesiyle sistemin karşılanmamış yük olasılığı (LPSP) değeri elde edilmektedir. SA-HRES çok amaçlı optimizasyon probleminin amaç fonksiyonlarından biri olan LPSP değeri (5.48) eşitliği yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^{8760} P_{loss}(t)}{\sum_{t=1}^{8760} p_{yük}(t)} \quad (5.50)$$

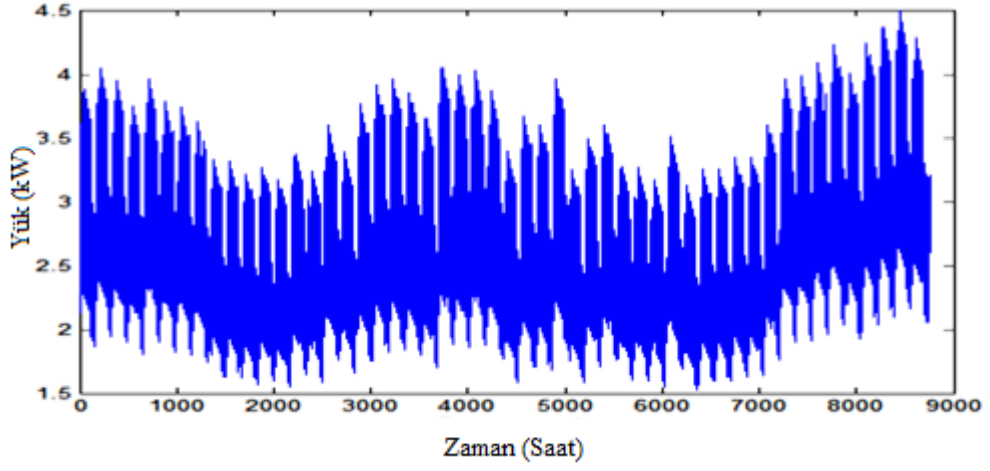
5.3 Sistem Elemanlarının Değerlendirilmesi ve SA-HRESOpt Güç Yönetimi Stratejisi Algoritması'nın Doğrulaması

Sistem elemanlarının doğru ve anlamlı değerler üretip üretmediği öncelikli olarak dikkate alınması gereken bir husustur. Çünkü sonuçta oluşan toplam değer bir bileşke değer olup oluşan enerji fazlalığı ve de kayıplarının nerelerde oluştuğunun bilinmesi, dahası sisteme ait enerji akışı ayrıntılarının ortaya konulması bir zorunluluktur.

Bu amaca yönelik olarak her bir sistem elemanının ayrı ayrı tek bir güç sistemi oluşturduğu varsayımıyla aynı girdi verileriyle değerlendirilip üretilen toplam enerji değerleri izleyen şekilde sunulmaktadır. Geliştirilen programı doğrulamak amacıyla HOMER ticari yazılımı kullanılarak aynı güç üretim elemanları ve girdi değerleriyle sonuçlar üretilerek her iki programa ait çıktılar karşılaştırılmıştır.

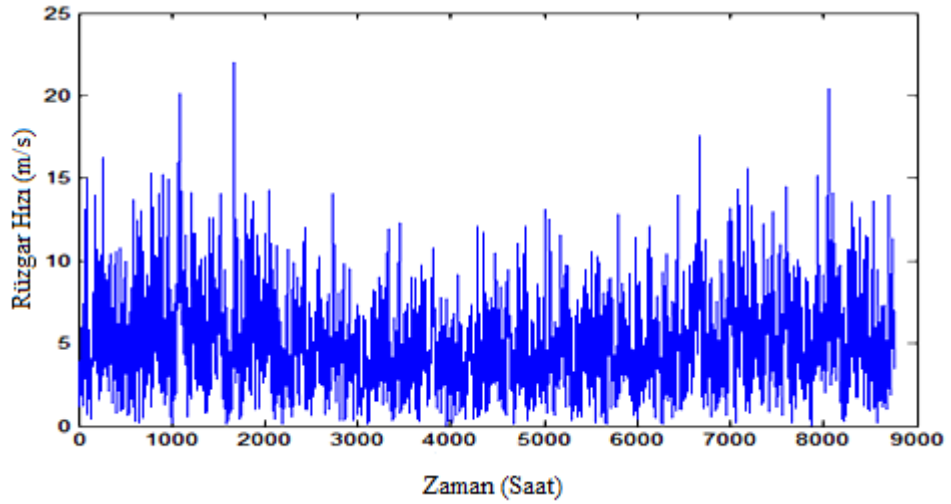
Doğrulama için kullanılan veriler şu şekilde oluşturulmuştur. Yük verisi olarak IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) RTS (Reliability Test System) yük verileri kullanılmıştır [159]. Pik yük değeri 4,5 kW olarak alınarak

saatlik bazda bir yıllık periyot için yük verileri dikkate alınmıştır. Yıllık yük talebi değişimi Şekil 5.8'de görülmektedir.



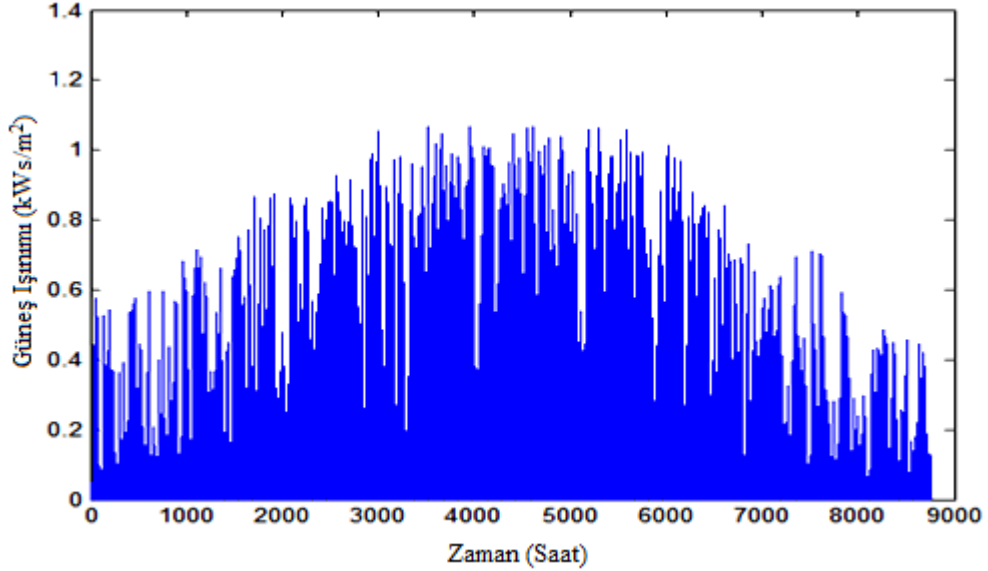
Şekil 5.8: IEEE Test Sistemi saatlik bazda yıllık yük talebi değişimi eğrisi

Rüzgâr verisi olarak Çanakkale iline ait bir yıllık saatlik bazda ölçülen rüzgâr hızı verileri kullanılmıştır. Ölçülen verilerin hesaplamalarda dikkate alınan RT'ye ait hub yüksekliğindeki rüzgâr hızı değerleri Betz' kanununa göre hesaplanarak Şekil 5.9'daki değerler elde edilmiştir.



Şekil 5.9: Çanakkale (40°9'0"K ve 26°24'0"D) iline ait bir yıllık rüzgâr hızı değişim eğrisi

Güneş ışınımı ve sıcaklık değerleri için yine Çanakkale iline ait saatlik olarak ölçülen bir yıllık verilerden yararlanılmıştır. Güneş ışınımına ait saatlik bazda değişim eğrisi Şekil 5.10'da gösterildiği gibidir.



Şekil 5.10: Çanakkale (40°9'0''K ve 26°24'0''D) iline ait bir yıllık güneş ışınımı değişim eğrisi

Söz konusu yıllık elektriksel yük talebi ve meteorolojik veriler kullanılarak, RT'ler-FV paneller-ELC-HT-YH ve RFR'den oluşan SA-HRES'in çok amaçlı ve kısıtlı optimizasyonunu irdelemeden önce, SAHRESOpt Güç Yönetimi Stratejisi algoritmasının doğruluğunu test etmek amacıyla sistemi oluşturan elemanlar ve hidrojen enerjili sistem ayrı ayrı simüle edilmiştir. Bunun için oluşturulan senaryolar şu şekildedir:

- *Senaryo 1:* 1kW'lık anma gücüne sahip RT ile yıllık enerji üretiminin değerlendirilmesi
- *Senaryo 2:* 1 kW'lık anma gücüne sahip FV panel ile yıllık enerji üretiminin değerlendirilmesi
- *Senaryo 3:* 17 kW'lık anma gücüne sahip RT, 2 kW'lık YH ve 1'er kW'lık ELC ve HT ile yıllık enerji üretiminin değerlendirilmesi.

Yukarıda geçen senaryoların aynı girdi değerleriyle yani aynı yük talebi ve aynı meteorolojik verilerle HOMER[®]'da ve MATLAB[®] [160] ortamında geliştirilen

SAHRESOpt Güç Yönetimi algoritmasında simüle edilmesiyle elde edilen sonuçlar izleyen kısımda sunulmuştur.

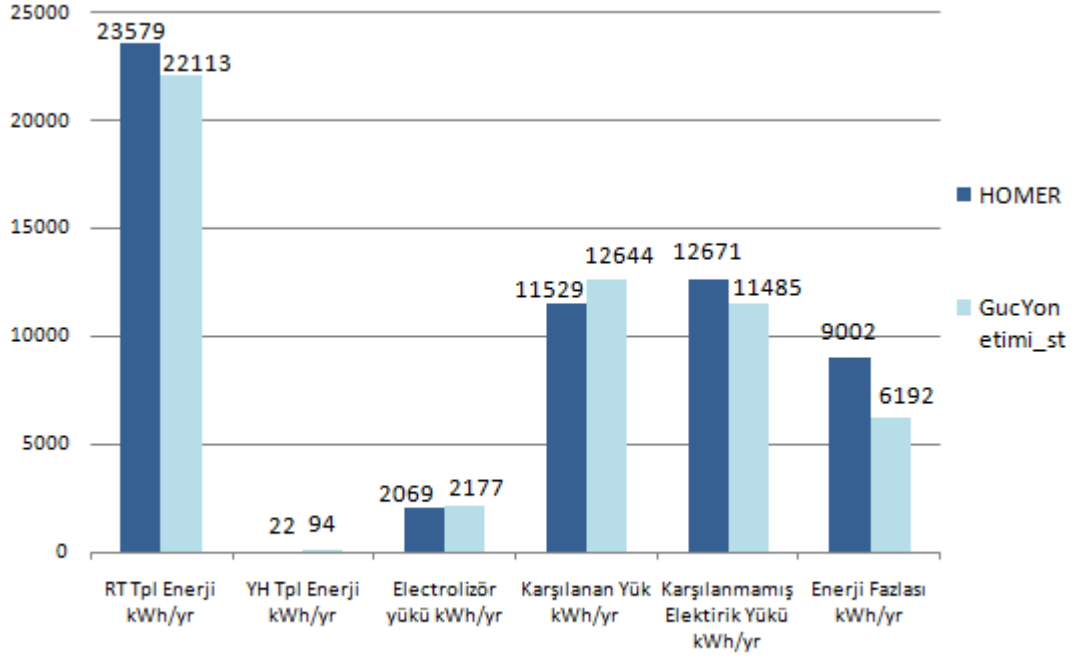
Tablo 5.9: Senaryo 1'e ait sonuçlar

	SAHRES_Güç Yönetimi Stratejisi	HOMERPro	HOMER
Rüzgar Türbininin Toplam Yıllık Elektrik Üretimi (kWh/yıl)	1300,7	1319	1387

Tablo 5.10: Senaryo 2'ye ait sonuçlar

	SAHRES_Güç Yönetimi Stratejisi	HOMERPro	HOMER
FV Panelin Toplam Yıllık Elektrik Üretimi (kWh/yıl)	1542,3	1362	1189

Senaryo 3: Oluşturulan bu senaryoda RT'nin yanında rüzgâr hızının değişken yapısından kaynaklanan enerji açıklarını biraz olsun dengeleyebilmek adına ELC, HT ve YH'den oluşan bir back-up sistemi kullanılmıştır. HOMER'da kullanılan farklı olarak YH nominal gücü 1 kW olarak alınmış 2 kW'lık toplam gücü elde edebilmek için 2 adet YH kullanılmıştır. Hidrojen tüketiminde YH nominal gücünün direkt rol oynadığı daha önce verilen (5.10) eşitliğinde açıkça görülmektedir. Bu nedenle sistemde 2 kW'lık YH yerine 1 kW'lık 2 adet YH kullanılarak hidrojen tüketiminin azaltılması dolayısıyla boşa giden enerjinin de azaltılması sonucunda YH toplam çıkış gücünün daha fazla olması sağlanmıştır. HOMER ile oluşan farkın sebebi aşağıda grafikte de görüldüğü gibi güç yönetimi stratejisinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.11: Senaryo 3'e (RT- YH sistemine) ait HOMER ve SAHRESOpt Güç Yönetimi Stratejisi sonuçlarının karşılaştırması

Senaryo 3'de HOMER'dan alınan sonuçlarda YH yıllık toplam üretiminin 22 kWh/yr değerine karşılık SAHRESOpt Güç Yönetimi Stratejisi sonucunda 94 kWh/yr olduğu görülmektedir. Yine 22113 kWh/yr olan toplam RT üretimiyle karşılanan yükün 12644 kWh/yr değeriyle HOMER'da karşılanan yükten 1115 kWh/yr daha fazla olduğu ve buna karşılık karşılanamayan yükün de 1186 kWh/yr daha az olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde HOMER da üretilen enerji fazlalığının yani boşa giden enerjinin 2810 kWh/yr daha fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar geliştirilen SAHRESOpt Güç Yönetimi Stratejisi algoritmasının, özellikle YH sistemi kullanıldığında, daha etkin ve verimli bir güç yönetimi sağladığını göstermektedir.

6. SA-HRES ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYONU

Tez çalışmasının bu aşamasında sistem elemanlarıyla birlikte tanımlanmış ve SA-HRES'in çok amaçlı optimizasyonu kapsamında NSGA-II tabanlı SAHRESOpt yaklaşımı geliştirilen operasyon stratejisiyle birleştirilerek uygulanmıştır. Ayrıca NSGA-II prosedüründe yer alan çaprazlama ve mutasyon operatörlerinde sistem yapısına ve geliştirilen SAHRESOpt Güç Yönetimi Stratejisi algoritmasına uygun olacak şekilde farklılıklar ve yenilikler getirilmiştir. Yine NSGA-II prosedürü farklı yenilenebilir enerji kaynaklarıyla çalıştırılabilecek şekilde yeniden yapılandırılmıştır. Tasarlanan Pareto tabanlı SAHRESOpt yaklaşımı MATLAB® programlama dili kullanılarak oluşturulmuştur. MATLAB® programlama dili kullanılarak oluşturulmuş NSGA gibi diğer tek ya da çok amaçlı optimizasyon algoritmalarının temel yazılımlarına Yarpiz [161] internet kaynağından ulaşılabilmektedir.

6.1 NSGA-II

NSGA-II Pareto-tabanlı bir çok amaçlı optimizasyon yaklaşımıdır. NSGA-II Deb ve diğ. tarafından daha önce geliştirdikleri NSGA algoritmasının bir üst versiyonu olarak 2002 yılında ortaya konulmuştur. NSGA algoritmasındaki seçkinciliğin olmaması, paylaşım parametresinin belirlenmesindeki belirsizlik ve daha karışık yapı gibi olumsuzluklar bu algoritmayla ortadan kalkmıştır.

Pareto-tabanlı optimizasyon yaklaşımlarının çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde tek bir çözüm yerine birden fazla çözümü içeren Pareto-cepheyi sunması nedeniyle global optimuma en yakın doğru çözümlerin elde edilebilmesi açısından çok daha etkin bir yol oldukları açıktır [162]. Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinde artan amaç fonksiyonu ve kısıt sayısı ile orantılı olarak büyüyen çözüm uzayı ve dolayısıyla artan hesaplama süreleriyle başa çıkabilmek için problemi alt modellere ayırarak çözmek de Pareto yaklaşımıyla birlikte değerlendirilebilecek bir başka çözüm alternatifi olabilecektir.

NSGA-II algoritması üç temel yaklaşımdan oluşmaktadır. İzleyen alt bölümlerde bu yaklaşımlar açıklanmaktadır.

6.1.1 Hızlı Bastırılmama Sıralaması Yaklaşımı (Fast Non-Dominated Sorting Approach)

Bu yaklaşımda her bir çözüm için iki değer hesaplanır:

- Baskınlık kümesi (domination set); çözümün baskın olduğu çözümlerin kümesi
- Bastırılma sayısı (dominated count); çözümü bastıran çözümlerin sayısı

Bastırılma sayısı 0 olan çözümlerin rank (uygunluk) değeri 1 olarak belirlenir ve bu çözümler birinci bastırılmamış çözümler cephesini (first non-dominated front) oluştururlar. Bu çözümlerin bastırdığı çözümlere gidilerek her birinin bastırılma sayısı birer birer azaltılarak bastırılma sayısı 0 olanlar ayrılır ve yeni bir Q kümesi oluşturulur. Bu küme ikinci bastırılmamış çözümler cephesini oluşturur. Birinci cepheye uygulanan aynı işlem ikinci cephe yani Q kümesinin tüm elemanları içinde uygulanarak üçüncü bastırılmamış çözümler cephesi oluşturulur. Bu işlemler tüm cepheler oluşturuluncaya kadar devam eder. İzleyen kısımda hızlı bastırılmama sıralaması algoritması verilmiştir [163]:

Hızlı bastırılmama sıralaması (P) (Fast-non-dominated-sort)

for each $p \in P$ için

$$S_p = \emptyset$$

$$n_p = 0$$

for each $q \in P$ için

if ($p < q$) eğer p q yu bastırıyorsa

$$S_p = S_p \cup \{q\} \quad q \text{ yu } p \text{ tarafından bastırılan çözümlerin kümesine ekle}$$

else if ($q < p$)

$$n_p = n_p + 1 \quad p \text{ nin domination sayacını 1 artır}$$

if $n_p = 0$ p birinci cepheye aittir

$$p_{rank} = 1$$

$$F_1 = F_1 \cup \{p\}$$

$$i = 1 \quad \text{cephe sayacını başlat}$$

```

while  $F_i \neq \emptyset$ 
     $Q = \emptyset$            Bir sonraki cepheye ait elemanları saklamak için kullanılır
for each  $p \in F_i$ 
    for each  $q \in S_p$ 
         $n_q = n_q - 1$ 
        if  $n_q = 0$       q bir sonraki cepheye aittir
             $q_{rank} = i + 1$ 
             $Q = Q \cup \{q\}$ 
             $i = i + 1$ 
             $F_i = \emptyset$ 

```

6.1.2 Kalabalık Mesafe (Crowding Distance)

Popülasyondaki tüm çözümlerin her birinin etrafını çevreleyen çözümlerin yoğunluğunu belirleyebilmek için hesaplanan değer kalabalık mesafe (CD: crowding distance) olarak ifade edilmektedir. Bunun için çözümün belirttiği noktanın, tüm amaç fonksiyonu değerleri için, her iki tarafında yer alan noktalara ortalama uzunluğu hesaplanır. Bu değer, Şekil 6.1'de [163] görüldüğü gibi i . çözümden önceki ve sonraki çözümlerin köşelerini oluşturduğu bir dikdörtgenin çevresini tahmin etmemizi sağlar. Kısaca CD, Pareto-cephedeki bir çözümü çevreleyen çözümlerin yoğunluğunu ifade eder.

CD ilk olarak amaç fonksiyonlarına göre küçükten büyüğe sıralamayı gerektirir. En küçük ve en büyük değere sahip olan çözümlerin CD değerleri sonsuz olarak kabul edilir. Her bir amaç fonksiyonu için hesaplanan CD değerleri toplanarak çözümün CD değeri hesaplanır. Pareto-cepheye ait tüm çözümler için CD değeri hesaplandıktan sonra tüm Pareto-cepheler için bu işlem tekrarlanır. CD operatörü aşağıda belirtildiği gibi işlemektedir [163]:

Crowding distance ataması (I)

```

 $l = |I|$                                I daki çözümlerin sayısı
for each  $i$ , set  $I[i]_{distance} = 0$       mesafeyi başlat

```

for each objective m

$$I = \text{sort}(I, m)$$

her bir amaç değeri kullanarak sırala

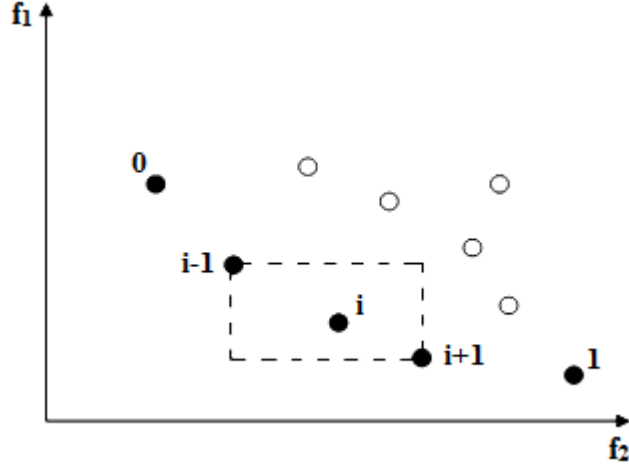
$$I[l]_{\text{distance}} = I[l]_{\text{distance}} = \infty$$

böylece sınır noktaları her zaman seçilir

for $i = 2$ to $(l - 1)$

tüm diğer noktalar için

$$I[i]_{\text{distance}} = I[i]_{\text{distance}} + (I[i + 1].m - I[i - 1].m) / (f_m^{\max} - f_m^{\min})$$



Şekil 6.1: Crowding distance (CD)

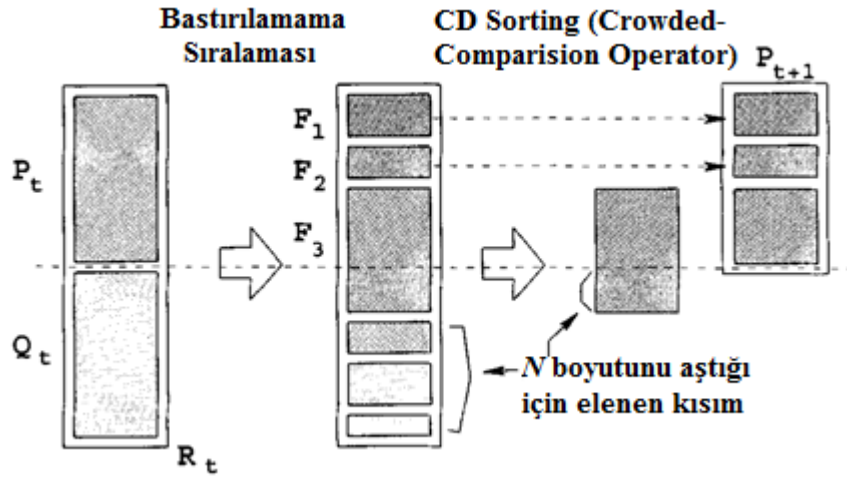
6.1.3 Crowded-Comparison Operator

Bastırılmama sıralaması sonucu rank değerleri, yoğunluk yaklaşımı (density estimation) sonucu CD değerleri oluşturulan çözümlerin sıralanması için crowded-comparison operatörü devreye girer. Bu operatör öncelikle CD değerlerine göre popülasyona ait tüm bireyleri büyükten küçüğe sıraladıktan sonra, devamında bireyleri artan rank değerlerine göre sıralar. Böylelikle, en iyi rank değerine sahip yani bastırılmayan çözümler sıralamanın başında yer almış olurlar.

6.1.4 NSGA-II Ana Döngü

Rastgele oluşturulan ve sonrasında crowded-comparison operatörü ile sıralanan N boyutlu ebeveyn popülasyondan öncelikle seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörleriyle çocuk popülasyonlar elde edilir. Sonrasında ebeveyn ve çocuk popülasyonları birleştirilerek $2N$ boyutlu popülasyon elde edilir. Böylelikle

algoritmanın elitist (seçkin) olması garantilenmiş olur. Elde edilen popülasyon yukarıda bahsedilen NSGA-II'ye ait üç operatör uygulanarak bastırılmama durumuna göre sıralanır. Daha sonra $2N$ boyutlu popülasyon yeniden N boyutuna indirgenir. Bu sırada sıralamanın başında yer alan en iyi uygunluk (rank) değerine sahip genler yani F_1 kümesi sayısı N den küçükse seçilen popülasyonda geri kalan kısım sırayla F_2, F_3, \dots vs üyelerinden seçilir ve bu işlemler önceden belirlenen maksimum iterasyon sayısına ulaşıncaya kadar devam eder. Bu işlemlerin şematik olarak ifadesi Şekil 6.2'de gösterildiği gibidir [163].



Şekil 6.2: NSGA-II Prosedürü

6.2 Geliştirilen NSGA-II Tabanlı Çok Amaçlı Optimizasyon Algoritması (SA-HRESOpt) Adımları

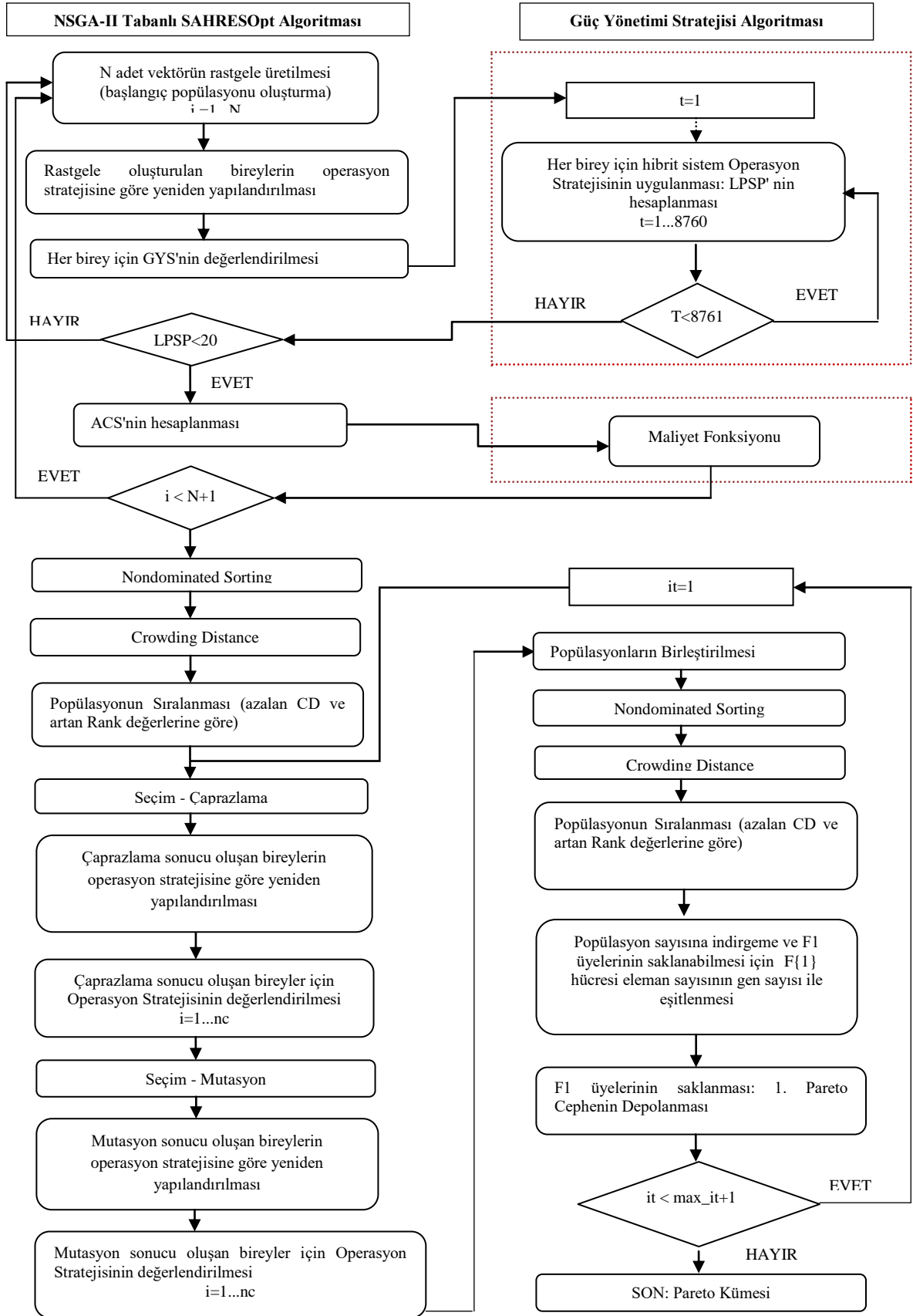
Literatürde yer alan diğer çalışmalardan farklı olarak aşağıdaki hususlar dikkate alınmış ve uygulanmıştır:

- FV paneller, RT'ler ve depolama ünitesi olarak kullanılan ELC (ELC), HT ve YH haricinde kesintisiz enerji kaynağı ve aynı zamanda enerji yedekleme kaynağı olarak kullanılabilen hidrojen üreten anaerobik reaktör ve RFR sistemi kullanılmıştır.

- Literatürde hibrit yenilenebilir enerji sistemleri boyut optimizasyonu çerçevesinde belirli ve tek bir nominal güce sahip olan sistem elemanlarının yalnızca sayıları optimize edilmektedir. Dufo-Lopez ve diğ. [112], çalışmalarında farklı olarak sistem elemanları tipleri yani farklı nominal güce sahip olan sistem elemanları arasından rastgele seçimlerle boyut optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Ancak tüm elemanların sayısı bir olarak alınmıştır. Geliştirilen NSGA-II tabanlı SAHRESOpt kapsamında ise, incelenen literatürden farklı olarak ilk defa sistem elemanları için farklı tip seçenekleriyle birlikte farklı adet seçenekleri de optimizasyon dahilinde değerlendirilmiştir.

- Yine incelenen literatür dikkate alındığında ilk defa olarak tasarlanan hibrit sistemde ELC'nin ürettiği hidrojen haricinde RFR'nin biyokütleden elde edilen metan gazını kullanarak ürettiği hidrojen enerji fazlalığı olması durumunda direkt olarak HT'de depolanabilmektedir.

- Literatürde çok amaçlı optimizasyon uygulamalarında yenilenebilir hibrit sistemler için de kullanılan NSGA-II algoritması geliştirilen operasyon stratejisiyle birleştirilerek uygulanmıştır. Ayrıca NSGA-II prosedüründe yer alan çaprazlama ve mutasyon operatörlerinde sistem yapısına ve geliştirilen operasyon stratejisi algoritmasına uygun olacak şekilde farklılıklar ve yenilikler getirilmiştir.



Şekil 6.3: NSGA-II Tabanlı SAHRESOpt blok diyagramı

6.2.1 Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması

SAHRESOpt yaklaşımında, 6 adet sistem elemanının belirtilen boyut ve adet seçenekleri arasından elli adet sistem yapılanmasını (bireylerini) oluştururken, öncelikle RT, FV, YH, ELC ve HT elemanları için rastgele boyut ve sayı belirlendikten sonra, YH sistemiyle entegre çalışan RFR boyutunun belirlenebilmesi için izleyen kısımda açıklanan RFR boyutu algoritması uygulanmıştır.

6.2.1.1 Reformer Boyutu Algoritması

Hibrit yenilenebilir enerji sisteminde bir anaerobik reaktörün ürettiği metan gazından hidrojen üreten RFR RT ve FV panellerle birlikte üçüncü ana enerji kaynağı olarak sistemde yer almaktadır. RFR'nin ürettiği hidrojenin elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi için YH ile birlikte, ürettiği hidrojenin yükün talebini aşan kısmının depolanabilmesi içinde HT ile birlikte sistemde yer alması gerekmektedir.

Optimizasyon prosedüründe sezgisel bir yöntem olan NSGA-II algoritması normalde başlangıç popülasyonu oluşturmada rastgele bir seçim yapmaktadır. Geliştirilen algoritmada FV, RT, YH, ELC ve HT tipleri ve sayıları için rastgele başlangıç popülasyonu oluşturulduktan sonra öncelikle RFR boyutunun belirlenen YH boyutu ile uyumu için RFR boyutu algoritması oluşturulmuştur.

Buna göre öncelikle sistemde YH bulunmaması durumunda RFR'nin de bulunmaması, sonrasında da YH'nin nominal gücünün %3'ü olarak tanımlanan YH minimum çıkış gücünün (P_{fc_min}) sağlanması için gerekli olan minimum hidrojen miktarının $cons_{H2_min}$ altında kalmayacak şekilde RFR boyutunun rastgele seçimi sağlanmıştır (Tablo 6.1).

Tablo 6.1: YH nominal çıkış gücüne bağlı olarak hidrojen tüketimi değerleri

P_fc_rated	1	2	3	4	5	6
fcic*P_fc_rated	0,08	0,16	0,24	0,32	0,4	0,48
P_fc_min	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18
cons_H2_min	0,0875	0,175	0,2625	0,35	0,4375	0,525
cons_H2_rated	0,33	0,66	0,99	1,32	1,65	1,98

6.2.1.2 Sistemin Hibrit Olmasının Garantisi için Algoritma

Rastgele oluşan başlangıç popülasyonunda tüm yenilenebilir kaynakların anma güçleri sıfır ise rastgele iki tanesi seçilerek bunların boyutlarının sıfırdan farklı olması sağlanır. Böylelikle sistemde en az iki yenilenebilir güç kaynağı bulunması sağlanarak sistemin hibrit olması garanti edilir. SAHRESOpt'un ana kısmında uygulanan bu algoritma, çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin sonrasında da uygulanarak SA-HRES yapılanmasının korunması sağlanmaktadır.

6.2.1.3 Başlangıç Popülasyonunun Operasyon Stratejisinin Düzenlenmesi

RFR boyutu ve sistemin hibrit olması için geliştirilen algoritmalar sonucu oluşan popülasyonun operasyon stratejisinin düzenlenmesi için izleyen adımlar uygulanmıştır:

- YH, ELC ve RFR'nin nominal güçleri 0 kW iken HT'nin nominal gücünün 0 kW'dan farklı olması durumunda HT nominal gücünün de 0 kW olması sağlanır.
- ELC, HT ve RFR'nin nominal güçleri 0 kW iken YH'nin nominal gücünün 0 kW'dan farklı olması durumunda YH nominal gücünün de 0 kW olması sağlanır.
- YH, HT ve RFR'nin nominal güçleri 0 kW iken ELC'nin nominal gücünün 0 kW'dan farklı olması durumunda ELC nominal gücünün de 0 kW olması sağlanır.

- YH ile ELC ya da YH ve RFR nominal güçleri sıfırdan farklı iken HT'nin nominal gücünün 0 kW olması durumunda HT nominal gücünün de 0 kW'dan farklı bir değer alması sağlanır.
- ELC veya HT ile RFR anma güçleri sıfırdan farklı iken YH nominal gücünün 0 kW olması durumunda YH nominal gücünün de 0 kW'dan farklı bir değer alması sağlanır.
- YH ve HT anma güçleri 0 kW'dan farklı iken ELC ve RFR nominal güçleri 0 kW ise, ELC nominal gücünün 0 kW'dan farklı bir değer alması sağlanır.
- Oluşan başlangıç popülasyonunda son olarak sistemde en az iki yenilenebilir enerji kaynağı bulunup bulunmadığı kontrol edilir.

Başlangıç popülasyonunun yukarıda belirtilen kısıtlara bağlı olarak düzenlenmesinden sonra sistem yapılanmasını temsil eden bireyler tip ve adet değerleri ile birlikte oluşturulmuş olmaktadır. Şekil 6.4 bir bireye ait sistem yapılanmasının kodlama biçimini göstermektedir.

Sistem elemanları tip bilgileri						Sistem elemanları adet bilgileri				
FV	RT	YH	ELC	HT	RFR	FV	RT	YH	ELC	HT
6	7	2	4	3	0,6	4	3	2	2	4

(a) (b)

Şekil 6.4: Sistem yapılanması kodlama biçimi

a) SA-HRES elemanları tip bilgileri

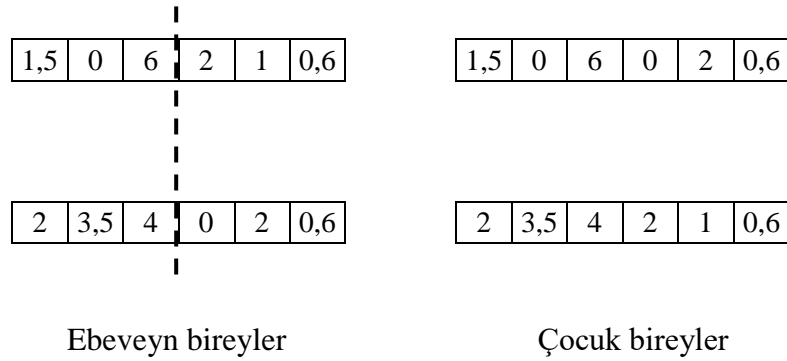
b) SA-HRES elemanları adet bilgileri

SAHRESOpt'un yukarıda açıklanan başlangıç popülasyonunun oluşturulması aşamasından sonra, her bir bireyin güç yönetimi stratejisinin değerlendirilmesi yapılarak LPSP değeri hesaplanır. Bu değer için belirtilen kısıt sağlanamadıysa sağlanana kadar operasyon stratejisi kısıtlarına bağlı olarak yeniden başlangıç popülasyonu oluşturulur. Kısıt sağlandıktan sonra her bir birey için ACS değerleri hesaplanarak tüm bireyler için amaç fonksiyonları değerleri oluşturulmuş olur. Sonrasında ana algoritmaya dönülerek hızlı bastırılama sıralaması (Fast-non-dominated-sort) ve CD algoritmaları uygulandıktan sonra azalan CD ve artan rank değerlerine göre başlangıç popülasyonu sıralanır.

Bu adımlardan sonra çaprazlama operatörü ve ardından mutasyon operatörü devreye girmektedir.

6.2.2 Çaprazlama

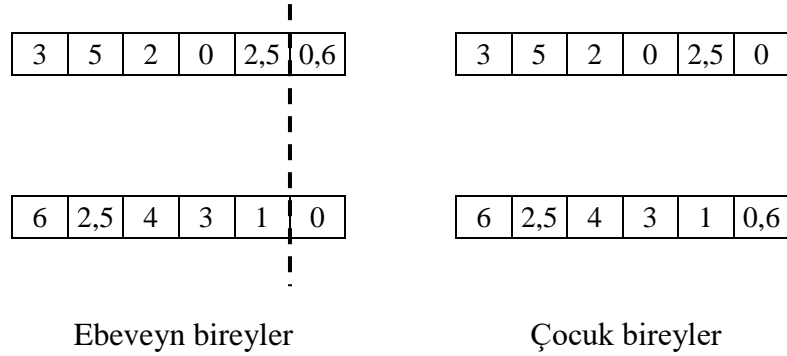
Çaprazlama adımında tek noktalı çaprazlama uygulanmış ancak farklı olarak oluşan çocuk bireylerin temsil ettiği sistem yapılanmasının, sistem elemanlarının operasyon stratejisine bağlı olarak tanımlanan kısıtlara uyup uymadığının kontrolü SAHRESOPT başlangıcında rastgele ilk popülasyonun oluşturulmasında yapıldığı gibi burada da yapılmıştır. Buna göre hem eleman tipi hem de sayısı için rastgele seçilen çaprazlama noktasına göre sistem yapılanmasını temsil eden iki ebeveyn birey Şekil 6.4'de gösterildiği gibi çaprazlanmış ve sonuçta iki çocuk birey oluşmuştur. Ancak burada da hibrit enerji sisteminin elemanlarının birlikte çalışabilirliği ile ilgili Bölüm 6.2.1'de belirtilen kısıtların sağlanması gerekliliği tekrar ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.5: Tek noktalı çaprazlama

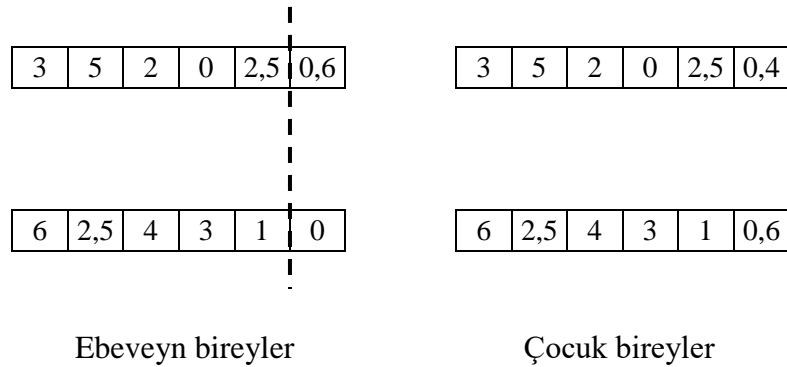
Şekil 6.5'de gösterildiği gibi çaprazlama sonrası oluşan çocuk bireylerde bu kısıtlara uymayan yapılanmalar meydana gelebilmektedir. Buradaki örnekte oluşan birinci çocuk bireyde üçüncü genin temsil ettiği YH ve beşinci bireyin temsil ettiği HT sıfırdan farklı bir değer alırken bunları besleyecek olan dördüncü genin temsil ettiği ELC ya da altıncı genin temsil ettiği RFR boyutları sıfır değeri almıştır. Bu sonuç YH sisteminin çalışmasına engel bir durum teşkil etmektedir. Bu şekilde oluşabilecek yapılanmaların önüne geçebilmek için Bölüm 6.2.1'de açıklanan

başlangıç popülasyonun operasyon stratejisinin düzenlenmesi ile ilgili kısıtlar çaprazlama algoritmasında da uygulanmıştır.



Şekil 6.6: Tek noktalı çaprazlama sonucu oluşan hatalı yapılanmaya örnek

Çaprazlama sonucu oluşan çocuk bireylerin operasyon stratejisinin düzenlenmesi ile ilgili kısıtlar uygulandıktan sonra bu kısıtlara uymayan birinci çocuk birey için oluşabilecek doğru yapılanma seçeneklerinden biri Şekil 6.6'da gösterilmiştir.



Şekil 6.7: Operasyon stratejisi kısıtlarına göre düzenlenmiş yapılanmaya örnek

6.2.3 Mutasyon

Çaprazlama operatöründen sonra mutasyon operatörü devreye girmektedir. Mutasyon rastgele seçilen bir bireye ait bir genin yeniden oluşturulması işlemidir (Şekil 6.7).



Şekil 6.8: Mutasyon

Mutasyona uğrayan bireylerde de Şekil 6.8 (a)'da gösterildiği gibi, çaprazlama sonucu oluşabilen hibrit sistem yapılanması operasyon kısıtlarına uymayan bireylerin oluşması riski söz konusudur. Çaprazlama operatöründe uygulanan kısıtlar mutasyon için de uygulandıktan sonra Şekil 6.8 (b)'de görüldüğü gibi YH sisteminin çalışabilmesi için gerekli olan YH-HT ve RFR kombinasyonu sağlanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 6.9: Mutasyon sonucu oluşan bireyler

a) kısıtlara uymayan yapılanma (birey)

b) kısıtlar uygulandıktan sonra düzeltilmiş yapılanma

6.3 SAHRESOpt ile Çok Amaçlı Optimizasyon Uygulamaları ve Örnek Sonuçlar

Bölüm 5.1'de matematiksel modellemesi açıklanan 6 adet sistem elemanını içeren yenilenebilir hibrit enerji sisteminin çok amaçlı optimizasyonu MATLAB yazılım ortamında geliştirilen NSGA-II Tabanlı SAHRESOpt yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. IEE-RTS test sistemine ait saatlik bazda yıllık yük verileri ve Çanakkale iline ait saatlik bazda yıllık rüzgâr hızı, güneş ışınımı ve sıcaklık değerleri daha önce Bölüm 5.3'de verildiği gibi sistemde giriş verileri olarak yer almıştır.

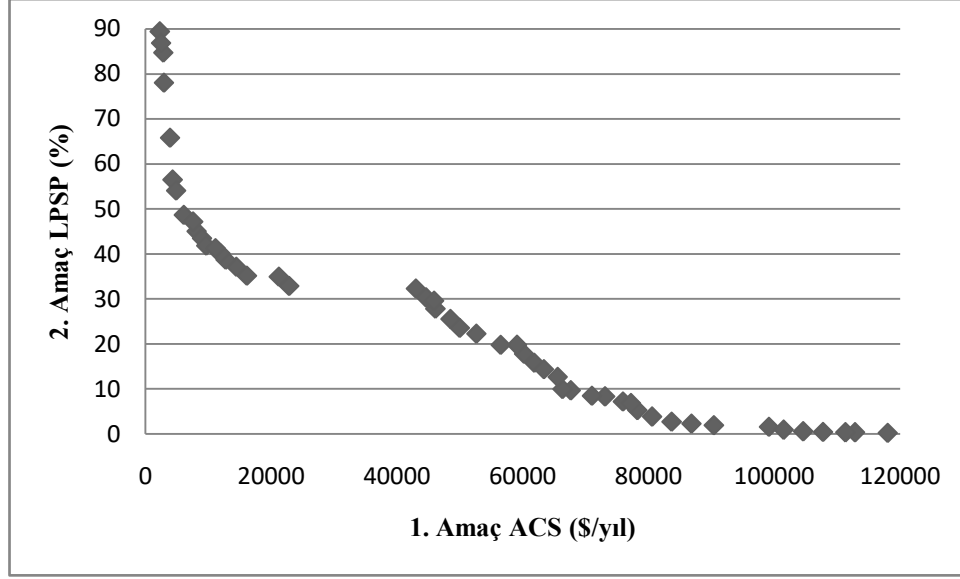
Bölüm 5.1'de verilen sistem elemanları tipi yani farklı boyut seçenekleri ve adetleri, ayrıca sistem elemanları özellikleri ve maliyet değerleri kullanıcı tarafından değiştirilebilir girdilerdir.

Çok amaçlı optimizasyon kapsamında amaç fonksiyonlarından ilki ACS, ikincisi ise sistemin güvenilirlik indeksi olarak LPSP değeridir. Amaç fonksiyonlarına ait bu değerlerle ilgili hesaplamalar Bölüm 3. 2'de açıklanmıştır.

Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinde uygun maliyetli bir sistem oluşturmak kadar talebin mümkün olduğunca kesintiye uğramadan karşılanması da önemli bir beklentidir. Bu nedenle geliştirilen çok amaçlı optimizasyon algoritmasında yukarıda bahsedilen iki amacı en iyi şekilde gerçekleştirebilecek çözümler kümesini oluşturmada iki farklı yaklaşım denenmiştir. İlkinde sistem güvenilirliği indeksi LPSP için hiçbir kısıt devreye sokmadan, ikincisinde ise LPSP kısıtı uygulanarak amaç fonksiyonlarını en iyi gerçekleştirecek Pareto çözümler aranmıştır. Yani, ikinci amaç fonksiyonu olan LPSP sistemde belirli bir değer üstüne çıkmayacak şekilde sınırlandırılarak kısıt olarak da sistemde rol oynamıştır.

Önceki bölümlerde belirtilen tüm girdi değerleri, kısıtlar ve amaç fonksiyonları çerçevesinde SAHRESOpt uygulamasında, kullanılan bilgisayar ortamında (Intel Core i5-2410m CPU, 2,3 GHz, 8 GB, 64 Bit işletim sistemi), yaklaşık 24 saatlik bir çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar izleyen kısımda sunulmaktadır.

LPSP kısıtı dikkate alınmaksızın elde edilen çözümlere ait Pareto-cephe grafiği Şekil 6.9'da, çözümlerin ayrıntıları ise Tablo 6.2'de verilmiştir.



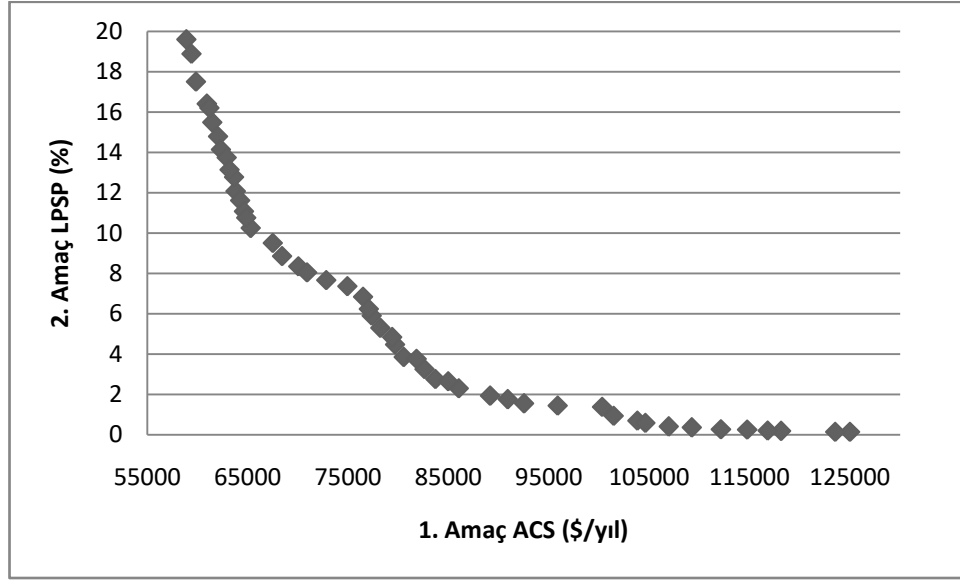
Şekil 6.10: LPSP kısıtı olmaksızın elde edilen Pareto-cepheye ait grafik

Sonuçlar incelendiğinde amaç fonksiyonları olan ACS ve sistem güvenilirliği indeksi LPSP değerlerinin birbirleriyle çelişen iki değer olmaları dolayısıyla LPSP kısıtı dikkate alınmadığında ortaya çıkan Pareto çözümler ile LPSP için belirli bir kısıt dikkate alındığında ortaya çıkan çözümlerin oldukça farklılık gösterdiği görülmektedir. Tablo 6.2'deki Pareto optimum çözümler incelendiğinde daha düşük ACS değerlerine karşılık oldukça yüksek LPSP değerleri gözlenmektedir. SA-HRES için toplam maliyetin en düşük değerlerde olması elbette ki istenilen bir sonuçtur ancak bu değerler sağlanırken sistemin talep edilen enerji gereksinimini karşılaması da bir o kadar önemli bir beklentidir. Bu nedenle SA-HRES çok amaçlı optimizasyon kapsamında kullanıcı beklentilerini daha gerçekçi olarak karşılayabilmek adına LPSP için belirli bir sınır değeri belirleyerek sonuç üretmek daha doğru bir yaklaşım olacaktır.

Tablo 6.2: LPSP kısıtlı olmaksızın elde edilen Pareto-cepheye ait değerler

F1 Üyeleri	FV_ tip (kW)	RT_ tip (kW)	YH_ tip (kW)	ELC _tip (kW)	HT_ tip (kg)	RFR _tip (kg)	FV_ adet	RT_ adet	YH_ adet	ELC_ adet	HT_ adet	AC	LPSP
1	6	7	2	3	2,5	0,6	4	2	2	2	3	118042,2	0,3
2	0,5	1	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2294,1	89,4
3	2,5	3,5	0	0	0	0	1	1	2	2	2	3887,8	65,8
4	1,5	1,5	0	0	0	0	1	1	1	1	4	2933,4	78,0
5	6	7	0	0	0	0	4	3	1	1	2	22858,2	32,9
6	6	7	1	0	2	0,2	1	1	1	2	1	42979,1	32,3
7	5	1	0	0	0	0	1	1	1	1	2	4334,7	56,5
8	6	7	3	0	2,5	0,6	4	2	1	2	3	90401,0	1,9
9	6	7	2	0	2,5	0,6	2	1	2	2	2	99129,2	1,6
10	0,5	3	0	0	0	0	1	1	1	1	4	2815,5	84,7
11	6	7	0	0	0	0	2	3	1	1	2	16143,5	35,2
12	6	5	0	0	0	0	4	3	2	1	1	21225,9	34,9
13	6	7	3	0	2,5	0,6	2	1	1	2	3	80543,4	3,8
14	6	7	3	0	2,5	0,6	2	2	1	2	3	83686,4	2,8
15	4	7	0	0	0	0	2	3	1	2	4	14419,6	37,1
16	6	7	2	0	1,5	0,4	1	1	1	2	3	60205,6	17,8
17	6	7	1	0	2	0,2	1	2	1	2	1	46122,1	27,8
18	6	7	3	0	2,5	0,6	2	3	1	2	3	86829,3	2,3
19	6	7	1	0	2	0,2	2	3	1	2	1	52622,3	22,3
20	4	7	2	0	1,5	0,4	2	1	1	2	3	61839,0	15,8
21	6	7	1	0	2	0,3	1	2	1	2	1	49985,2	23,6
22	6	7	3	0	2,5	0,6	2	1	1	2	2	78202,9	5,3
23	6	7	2	0	1,5	0,4	1	2	1	2	3	63348,6	14,4
24	6	5	2	0	2,5	0,6	4	3	2	1	3	112838,0	0,4
25	6	7	2	0	2,5	0,6	2	1	2	1	3	101469,7	0,9
26	6	7	2	0	2,5	0,6	1	1	1	2	2	67622,4	9,7
27	0,5	1,5	0	0	0	0	1	1	1	1	4	2486,9	86,9
28	6	7	2	0	2,5	0,6	1	2	1	1	3	73105,9	8,3
29	4	7	1	0	2	0,2	2	1	1	2	1	44612,5	30,3
30	5	3	0	0	0	0	1	1	1	1	4	4856,1	54,1
31	6	7	0	0	0	0	1	3	1	2	2	12786,2	38,7
32	6	7	1	0	2,5	0,3	2	3	1	2	2	59089,5	19,8
33	4	7	1	0	2	0,3	2	1	1	2	1	48475,6	25,6
34	4	7	0	0	0	0	2	1	1	1	2	8133,7	45,0
35	5	7	0	0	0	0	1	1	1	2	2	6069,3	48,7
36	6	7	2	0	1,5	0,6	2	3	1	2	2	75956,9	7,2
37	6	7	2	0	1,5	0,6	1	1	1	2	2	66313,6	10,0
38	5	7	0	0	0	0	2	1	1	1	2	8995,6	43,5
39	6	7	2	0	2,5	0,6	2	3	2	1	3	107755,6	0,5
40	6	7	1	0	2	0,3	2	3	1	2	1	56485,4	19,8
41	6	7	2	0	2,5	0,4	2	1	1	2	3	65526,1	12,7
42	6	7	2	0	2,5	0,6	4	2	2	1	3	111327,2	0,4
43	6	7	2	0	2,5	0,6	2	1	1	2	2	70979,7	8,5
44	6	7	2	0	2,5	0,6	2	2	2	1	3	104612,6	0,6
45	6	7	0	0	0	0	1	2	1	1	2	9643,3	41,8
46	6	5	0	0	0	0	2	2	2	1	4	11912,4	40,1
47	6	7	3	0	2,5	0,6	1	1	1	2	3	77186,1	6,8
48	4	7	1	0	1,5	0,2	2	1	1	2	2	45907,7	29,6
49	6	5	0	0	0	0	1	3	2	1	1	11154,0	41,3
50	4	5	0	0	0	0	2	1	1	1	4	7589,6	47,2

LPSP değerinin kısıt olarak da dikkate alındığı ikinci çok amaçlı optimizasyon yaklaşımında, LPSP kısıtı maksimum %20 olarak belirlenmiş olmakla birlikte istenildiğinde kullanıcı tarafından her hangi bir değer tanımlanabilecektir. Bu yaklaşıma ait sonuçlar Tablo 6.3'de, Pareto-cephe grafiği ise Şekil 6.10'da görölmektedir.



Şekil 6.11: SAHRESOpt sonucu oluşan Pareto-cephe

Tablo 6.3'deki sonuçlardan da görüldüğü üzere yükün talebinin mümkün olduğunca az kesintili olacak şekilde karşılanabilmesi sistem maliyetini daha yüksek değerlere çekmektedir. Tablo 6.3'deki Pareto optimum çözüm kümesine ait sonuçlar değerlendirildiğinde kullanıcı birbiriyle çelişen iki farklı amaç fonksiyonundan, sistemin özellikleri ve ihtiyacına göre ağır basan amaç fonksiyonu için, daha düşük değere sahip olan çözümü tercih edebilecektir.

Tablo 6.3: SAHRESOpt sonucu oluşan optimum sonuçlar (Pareto-cephe)

F1 Üyeleri	FV_ tip (kW)	RT_ tip (kW)	YH_ tip (kW)	ELC_ tip (kW)	HT_ tip (kg)	RFR_ tip (kg)	FV_ adet	RT_ adet	YH_ adet	ELC_ adet	HT_ adet	ACS (\$)	LPSP (%)
1	5	7	2	0	2	0,4	1	1	1	1	2	58870,2	19,6
2	6	7	2	4	2,5	0,6	4	3	2	2	4	125011,8	0,1
3	6	7	2	0	2,5	0,4	1	1	1	1	2	59828,4	17,5
4	6	7	3	0	2,5	0,6	4	3	1	2	4	95884,4	1,4
5	5	7	2	0	2,5	0,4	1	1	1	1	2	59397,4	18,9
6	6	7	2	3	2,5	0,6	4	3	2	2	4	123525,7	0,1
7	6	7	2	5	2,5	0,6	3	3	2	1	4	118134,2	0,2
8	6	7	2	0	2,5	0,6	1	1	1	1	1	65282,0	10,2
9	6	7	3	0	2,5	0,6	2	3	1	2	4	89169,8	1,9
10	6	7	3	0	2,5	0,6	2	2	1	2	4	86026,8	2,3
11	6	7	2	0	2,5	0,6	2	3	1	1	1	74925,2	7,4
12	6	7	2	0	1,5	0,6	2	2	1	1	2	72813,9	7,7
13	6	7	3	0	2,5	0,6	3	3	1	2	4	92527,1	1,5
14	5	6	2	0	2,5	0,6	2	1	1	1	1	67494,0	9,5
15	4	7	3	0	2,5	0,6	2	1	1	1	2	76479,0	6,8
16	5	7	2	0	2,5	0,6	3	3	2	1	4	112160,5	0,3
17	4	7	2	0	2	0,4	2	1	1	1	2	60934,6	16,4
18	6	7	3	0	2,5	0,6	2	1	1	2	2	78202,9	5,3
19	6	6	2	0	2,5	0,6	2	3	2	1	4	109246,0	0,4
20	4	7	2	0	2,5	0,4	2	1	1	1	2	61461,8	15,5
21	5	6	2	0	2,5	0,6	2	1	2	2	3	100324,4	1,4
22	5	6	2	0	2,5	0,4	2	1	1	1	2	62040,4	14,8
23	6	7	2	0	2,5	0,6	2	2	2	1	4	106953,1	0,4
24	5	7	3	0	2,5	0,6	3	1	1	1	3	82607,8	3,3
25	6	7	2	0	2,5	0,6	1	2	1	1	1	68424,9	8,9
26	4	7	2	0	2,5	0,6	2	2	1	1	1	70058,3	8,3
27	5	7	2	0	2,5	0,6	2	2	1	1	1	70920,3	8,0
28	6	7	2	0	2,5	0,6	2	1	2	1	3	101469,7	0,9
29	6	7	2	5	2,5	0,6	2	3	2	1	4	114776,9	0,2
30	6	5	3	0	2,5	0,6	3	3	1	2	4	90894,9	1,7
31	6	7	3	0	2,5	0,6	2	1	1	1	3	80543,4	3,8
32	5	7	2	0	1	0,6	1	1	1	1	1	63805,7	12,1
33	5	7	3	0	2,5	0,6	2	1	1	1	3	79681,4	4,5
34	5	7	2	0	2,5	0,4	2	1	1	1	2	62323,7	14,1
35	6	7	3	0	2,5	0,6	2	2	1	2	3	83686,4	2,8
36	5	7	3	0	2,5	0,6	2	1	1	1	2	77340,9	5,9
37	6	7	2	0	2,5	0,6	2	1	2	1	4	103810,1	0,7
38	5	3	2	0	2,5	0,6	1	1	1	1	1	63637,8	12,8
39	5	6	3	0	2,5	0,6	2	1	1	1	3	79398,1	4,8
40	6	7	2	0	1	0,6	1	1	1	1	1	64236,7	11,6
41	6	6	2	0	2,5	0,4	2	1	1	2	2	62902,3	13,7
42	6	7	2	0	2,5	0,6	2	2	2	2	3	104612,6	0,6
43	6	7	3	0	2	0,6	2	1	1	1	4	81829,6	3,8
44	5	6	3	0	2,5	0,6	2	1	1	1	2	77057,6	6,2
45	6	7	2	0	2,5	0,4	2	1	1	1	2	63185,7	13,1
46	6	7	3	0	2	0,6	2	2	1	2	4	84972,5	2,6
47	4	6	2	0	2,5	0,4	2	1	1	1	2	61178,4	16,2
48	6	7	2	0	2,5	0,6	4	3	2	1	4	116810,7	0,2
49	6	7	2	0	1,5	0,6	1	1	1	1	1	64627,5	11,1
50	5	7	2	0	2,5	0,6	1	1	1	1	1	64851,0	10,8

Tablo 6.4: Pareto-cepheye ait altı çözüm için SAHRESOpt Güç Yönetimi Stratejisi sonuçları

			1.	32.	12.	35.	29.	2.
			Çözüm	Çözüm	Çözüm	Çözüm	Çözüm	Çözüm
FV_tip (kW)	*	FV_adet	5*1	5*1	6*2	6*2	6*2	6*4
RT_tip (kW)	*	RT_adet	7*1	7*1	7*2	7*2	7*3	7*3
YH_tip (kW)	*	YH_adet	2*1	2*1	2*1	3*1	2*2	2*2
ELC_tip (kW)	*	ELC_adet	0*1	0*1	0*1	0*2	5*1	4*2
HT_tip (kg)	*	HT_adet	2*2	1*1	1,5*2	2,5*3	2,5*4	2,5*4
RFR_tip (kg)	*	1 (sabit)	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
P_load		Yıllık Toplam Yük Miktarı (kWh/yıl)	24217,2	24217,2	24217,2	24217,2	24217,2	24217,2
P_pv		FV Jeneratörlerin Yıllık Toplam Üretimi (kWh/yıl)	12612,4	12612,4	30269,8	30269,8	30269,8	60539,7
P_wt		RT Türbilerinin Yıllık Toplam Üretimi (kWh/yıl)	5989,8	5989,8	11979,5	11979,5	17969,3	17969,3
P_fc_conv		Yakıt Hücrelerinin Yıllık Toplam Üretimi (kWh/yıl)	7661,2	9641,3	7944,3	9235,7	9188,5	8625,1
P_rfr_fc_conv		Reformerin ürettiği H ₂ ile YH' ın Yıllık Toplam Üretimi (kWh/yıl)	5412,6	9308,2	7226,9	6096,7	6677,5	6201,7
P_rfr_fc		Reformerden YH' a gönderilen Yıllık Toplam H ₂ Miktarı (kg/yıl)	2308,5	3282,4	2553,3	2644,0	2363,9	2183,2
P_tank_fc		HT' den YH' a gönderilen Yıllık Toplam H ₂ Miktarı (kg/yıl)	963,1	312,4	676,0	1556,6	1127,3	1089,4
P_rfr_tank		Reformerden HT' na gönderilen Yıllık Toplam H ₂ Miktarı (kg/yıl)	1005,2	327,8	710,3	1583,4	1012,2	917,4
P_elc_tank		Elektrolizörden HT' na gönderilen Yıllık Toplam H ₂ Miktarı (kg/yıl)	0,0	0,0	0,0	0,0	126,5	183,3
P_conv_load		Sistem tarafından üretilen ve yükü besleyen yıllık toplam enerji miktarı (kWh/yıl)	19471,0	21292,7	22358,3	23546,4	24154,4	24181,9
E_dump		Yıllık Toplam Aşırı Enerji Miktarı (kWh/yıl)	5099,3	5099,3	25891,1	25891,1	25310,6	52351,2
E_dump_H2		Yıllık Toplam Aşırı H ₂ Miktarı (kg/yıl)	189,8	1645,2	1991,9	1028,0	1879,2	2154,7
P_loss		Yıllık Toplam Karşılammamış Yük Miktarı (kWh/yıl)	4743,8	2922,2	1856,5	668,4	60,5	33,0
LPSP		Güç Tedariği Kaybı Olasılığı (%)	19,6	12,1	7,7	2,8	0,2	0,1
ACS		Sistemin Yıllıklandırılmış Maliyeti (\$)	58870,2	63805,7	72813,9	83686,4	114776,9	125011,8

SAHRESOpt ile elde edilen Pareto-cepheye ait elli adet sonuçtan altısına ait güç yönetimi stratejisi ayrıntıları Tablo 6.4'de görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, ELC'nin bulunmadığı çözümlerde FV paneller ve RT toplam çıkış gücüne bağlı olarak E_dump (yıllık toplam aşırı enerji miktarı) değerinin arttığı görülmektedir. 12. ve 35. çözümler kıyaslandığında FV, RT ve RFR tip ve sayıları aynı olmakla birlikte 35. çözümde YH çıkış gücünün ve HT toplam kapasitesinin fazla olması nedeniyle yenilenebilir kaynakların ürettiği toplam enerji aynı olmasına rağmen LPSP değerinin 2,8 olmuştur. Bunun sebebi RFR tarafından üretilen

hidrojenin 12. çözüme göre daha fazla olan HT kapasitesi sayesinde depolanabilmesi ve yine daha fazla çıkış gücüne sahip olan YH ile bunun enerjiye dönüştürülebilmesidir. Benzer olarak 35. ve 10. çözümlerde de yalnızca HT kapasitesinin artması LPSP değerini düşürmüştür.

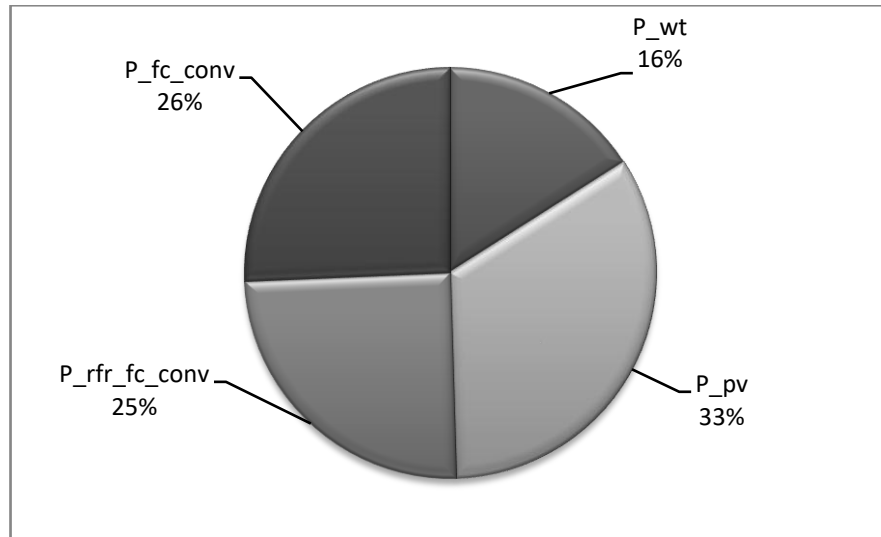
Tablo 6.5: E_dump değerinin kıyaslanması

		35. Çözüm	10. Çözüm	*
FV_tip (kW)	* FV_adet	6*2	6*2	6*1
RT_tip (kW)	* RT_adet	7*2	7*2	7*1
YH_tip (kW)	* YH_adet	3*1	3*1	2*2
ELC_tip (kW)	* ELC_adet	0*2	0*2	5*1
HT_tip (kg)	* HT_adet	2,5*3	2,5*4	2,5*4
RFR_tip (kg)	* 1 (sabit)	0,6	0,6	0,6
P_load	Yıllık Toplam Yük Miktarı (kWh/yıl)	24217,2	24217,2	24217,2
P_pv	FV Jeneratörlerin Yıllık Toplam Üretimi (kWh/yıl)	30269,8	30269,8	15134,9
P_wt	RT Türbülerinin Yıllık Toplam Üretimi (kWh/yıl)	11979,5	11979,5	5989,8
P_fc_conv	Yakıt Hücrelerinin Yıllık Toplam Üretimi (kWh/yıl)	9235,7	9358,2	11832,6
P_rfr_fc_conv	Reformerin ürettiği H ₂ ile YH' ın Yıllık Toplam Üretimi (kWh/yıl)	6096,7	6096,7	9026,1
P_rfr_fc	Reformerden YH' a gönderilen Yıllık Toplam H ₂ Miktarı (kg/yıl)	2644,0	2644,0	3180,1
P_tank_fc	HT' den YH' a gönderilen Yıllık Toplam H ₂ Miktarı (kg/yıl)	1556,6	1615,5	1273,4
P_rfr_tank	Reformerden HT' na gönderilen Yıllık Toplam H ₂ Miktarı (kg/yıl)	1583,4	1645,5	1205,5
P_elc_tank	Elektrolizörden HT' na gönderilen Yıllık Toplam H ₂ Miktarı (kg/yıl)	0,0	0,0	78,4
P_conv_load	Sistem tarafından üretilen ve yükü besleyen yıllık toplam enerji miktarı (kWh/yıl)	23546,4205	23659,2	23673,6
E_dump	Yıllık Toplam Aşırı Enerji Miktarı (kWh/yıl)	25891,1	25891,1	3589,0
E_dump_H2	Yıllık Toplam Aşırı H ₂ Miktarı (kg/yıl)	1028,0	965,9	869,8
P_loss	Yıllık Toplam Karşılanmamış Yük Miktarı (kWh/yıl)	668,4	555,7	541,2
LPSP	Güç Tedariği Kaybı Olasılığı (%)	2,8	2,3	2,2
ACS	Sistemin Yıllıklandırılmış Maliyeti (\$)	83686,4	86026,8	105133,7

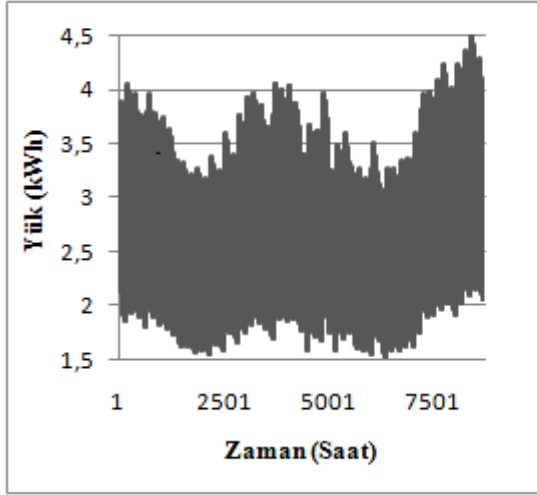
Tablo 6.5'te * ile ifade edilen çözüm, Pareto-cephede yer almayan bir çözüm olmakla birlikte, E_dump değerinin kıyaslanabilmesi açısından tabloda yer almaktadır. Bu çözüm, 10. çözüm ile çok yakın LPSP değerine sahip olmasına karşın ACS değerinin yüksek olması nedeniyle pareto çözümler arasına girememiştir. Bu çözümü incelediğimizde 10. Çözüme göre çok daha düşük ve makul bir E_dump değerine sahip olduğu görülmektedir. Bunu sebebi 10. çözümden farklı olarak bu çözümde ELC'nin yer alması ve YH çıkış gücünün daha düşük olmasına karşın bir yerine iki adet olmasıdır. Daha önce açıklandığı gibi bu durum daha az hidrojen ile daha fazla enerji üretimini sağlamaktadır. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde çok amaçlı optimizasyon çerçevesinde ACS ve LPSP değerlerinin yanı sıra üçüncü bir amaç olarak E_dump değerinin minimizasyonunun da dikkate alınmasının daha da anlamlı olacağı görülmektedir.

6.3.1 Pareto-Cepheye Ait Örnek Bir Çözüm için SAHRESOpt Güç Yönetimi Stratejisi Sonuçları

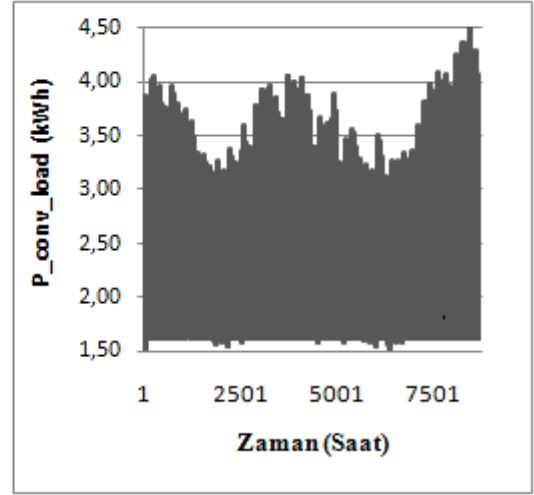
Tablo 6.3'deki Pareto optimum çözümlerden 63.805,7 \$ ACS ve 12,1 LPSP değerine sahip 32. çözüm için COE değeri 2,6 \$'dır. Bu çözüme ait SAHRESOpt Güç Yönetimi Stratejisi sonuçlarının ayrıntıları izleyen kısımda verilmektedir.



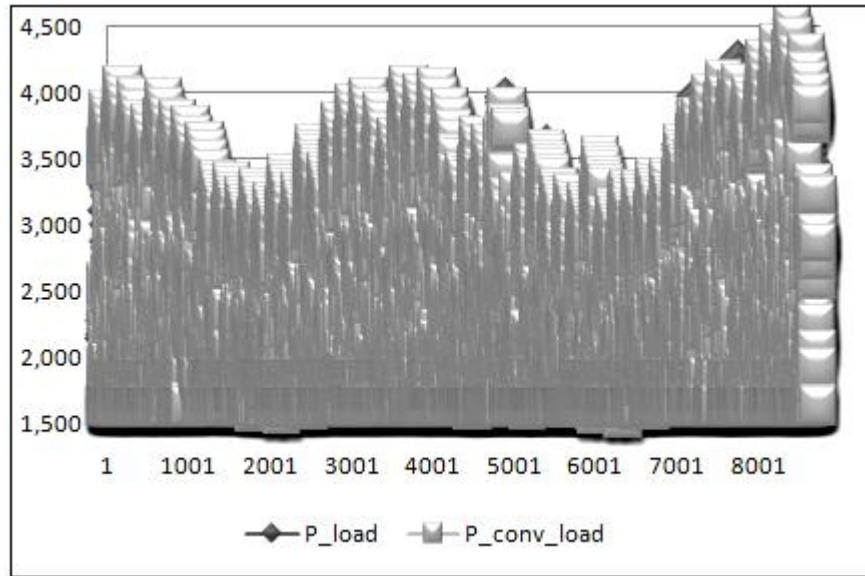
Şekil 6.12: SA-HRES elemanlarının toplam enerji üretimindeki payları



(a)



(b)

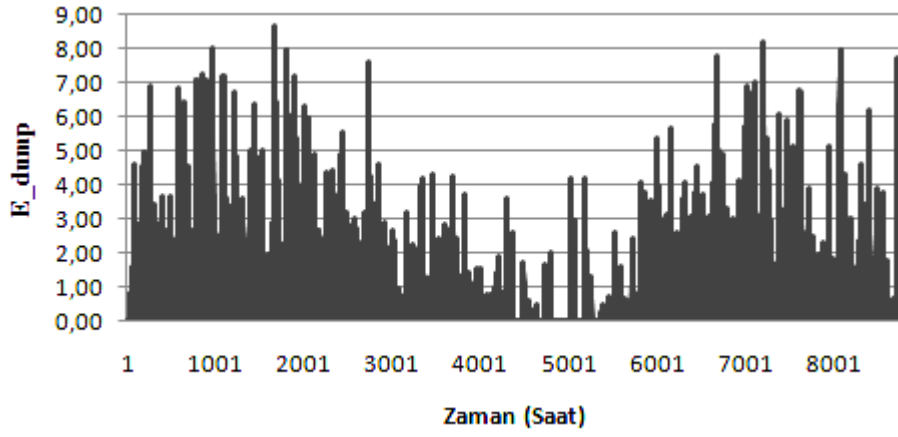


(c)

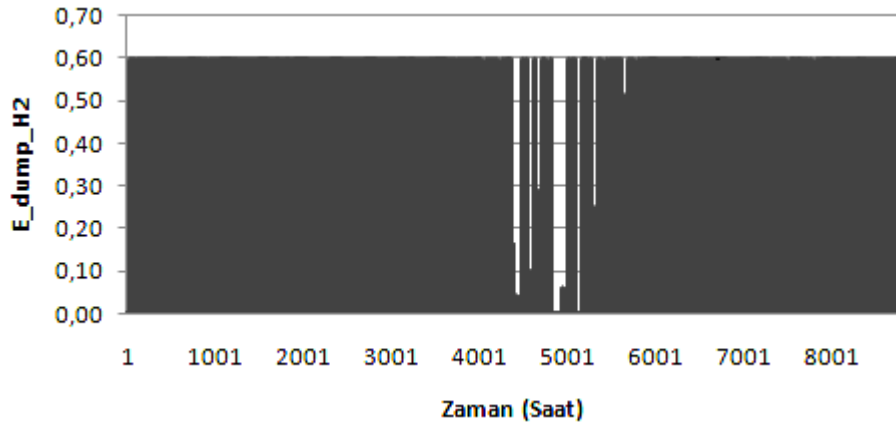
Şekil 6.13: Sistem tarafından yükün talebinin karşılanma durumu

a) Yükün talebinin yıllık değişimi b) Karşılanaan yükün yıllık değişimi

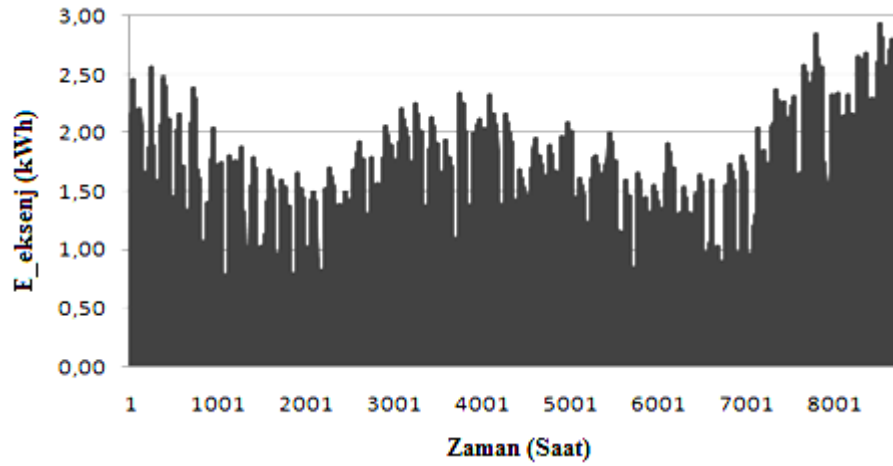
c) Talep edilen yük (P_load) ve sistem tarafından karşılanana yük (P_conv_load)



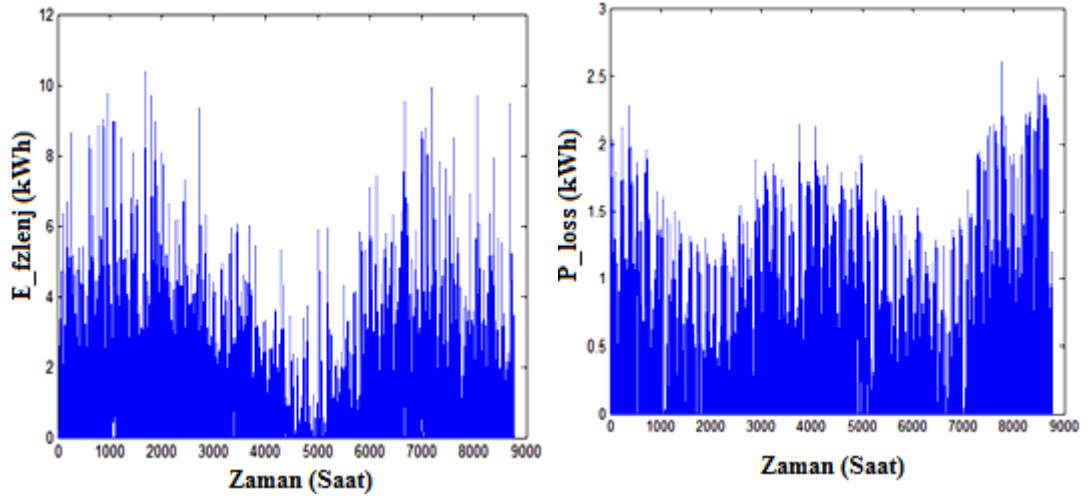
Şekil 6.14: Aşırı enerji miktarı



Şekil 6.15: RFR tarafından üretilen fazla H₂ (kg)



Şekil 6.16: Eksik enerji miktarı



Şekil 6.17: Sistemde oluşan fazla enerji (kWh) ve karşılanmayan yük değerleri

Çok amaçlı optimizasyon sonucu oluşan Pareto optimum çözümlerden yukarıda ayrıntıları verilen 32. çözüm incelendiğinde sistemde ELC olmadığını, FV panellerin ise toplam nominal gücünün yalnızca 1 kW olduğunu buna karşılık saatlik 0,6 kg hidrojen üretimi yapabilen RFR ve 2 kW nominal çıkış gücüne sahip YH ve 1 kg kapasiteli HT olduğu görülmektedir. RFR tarafından YH'ye gönderilen 0,6 kg hidrojen ile YH'nin herhangi bir t . satte ürettiği enerji, Bölüm 5.2'de verilen eşitlik (5.21) kullanılarak hesaplandığında:

$$E_{fc}(t) = (0,6 - (0,08 \times 2))/0,25 = 1,76 \text{ kWh}$$

olmaktadır. Bu nedenle Tablo 6.6'da yalnızca elli saatlik kısmı verilen güç yönetimi stratejisi sonuçlarından da görülebildiği gibi, RFR tarafından üretilen hidrojen (0,6 kg) YH kapasitesini (0,66 kg) tamamen doldurmadığı için eksik enerji olması durumunda HT'de depolanan hidrojen ile enerji açığını karşılamak üzere YH tarafından güç üretilmektedir. Başka bir ifadeyle, RFR tarafından üretilen hidrojenin YH'den t . satte enerji olarak çıkışı 1,76 kWh olmakla birlikte YH maksimum çıkış gücü 2 kW olduğundan, enerji açığı olması durumunda HT'de depolanan hidrojen YH'de enerjiye dönüştürülebilmektedir.

Tablo 6.6: 32. Pareto optimum çözüme ait güç yönetimi stratejisi değerleri

Zaman (Saat)	P_load	P_wt	P_pv	P_ren	P_ren_conv	E_dum p	E_dum p_H2	E_fzl enj	E_eks enj	P_loss	P_elc tank	P_rfr_fc	P_rfr_tank_fc	P_tank_fc_conv	P_fc_conv	E_tank	P_conv_load	
1	2,42	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	0,87	0,80	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,05	1,62
2	2,27	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	0,71	0,65	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,05	1,62
3	2,16	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	0,59	0,55	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,05	1,62
4	2,13	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	0,55	0,51	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,05	1,62
5	2,13	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	0,55	0,51	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,05	1,62
6	2,16	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	0,59	0,55	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,05	1,62
7	2,67	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	1,14	1,05	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,05	1,62
8	3,10	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	1,61	1,48	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,05	1,62
9	3,43	0,00	0,05	1,81	1,81	0,00	0,00	0,00	1,91	1,76	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,05	1,67
10	3,46	0,00	1,03	2,79	2,79	0,00	0,00	0,00	0,98	0,90	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,05	2,56
11	3,46	0,00	0,17	1,93	1,93	0,00	0,00	0,00	1,83	1,69	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,05	1,78
12	3,43	0,00	0,10	1,86	1,86	0,00	0,00	0,00	1,86	1,71	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,05	1,72
13	3,43	0,00	2,17	3,93	3,73	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00	0,55	0,05	0,00	1,55	1,55	0,10	3,43
14	3,43	0,00	2,07	3,83	3,73	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,58	0,02	0,00	1,66	1,66	0,13	3,43
15	3,35	0,00	0,75	2,51	2,51	0,00	0,00	0,00	1,14	1,05	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,13	2,31
16	3,39	0,00	0,34	2,10	2,10	0,00	0,00	0,00	1,59	1,46	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,13	1,93
17	3,57	0,00	1,01	2,77	2,77	0,00	0,00	0,00	1,12	1,03	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,13	2,54
18	3,61	0,00	2,12	3,88	3,88	0,00	0,00	0,00	0,04	0,04	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,13	3,57
19	3,61	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	2,16	1,99	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,13	1,62
20	3,46	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	2,00	1,84	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,13	1,62
21	3,28	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	1,81	1,66	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,13	1,62
22	2,99	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	1,49	1,38	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,13	1,62
23	2,63	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	1,10	1,01	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,13	1,62
24	2,27	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	0,71	0,65	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,13	1,62
25	2,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	1,06	0,98	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,13	1,62
26	2,44	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	0,90	0,82	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,13	1,62
27	2,33	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	0,77	0,71	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,13	1,62
28	2,29	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	0,73	0,67	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,13	1,62
29	2,29	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	0,73	0,67	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,13	1,62
30	2,33	0,62	0,00	2,38	2,38	0,00	0,00	0,00	0,15	0,14	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,13	2,19
31	2,87	0,09	0,00	1,85	1,85	0,00	0,00	0,00	1,27	1,17	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,13	1,70
32	3,34	0,49	0,00	2,25	2,25	0,00	0,00	0,00	1,37	1,26	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,13	2,07
33	3,69	0,28	0,08	2,12	2,12	0,00	0,00	0,00	1,89	1,74	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,13	1,95
34	3,72	0,03	1,97	3,76	3,76	0,00	0,00	0,00	0,28	0,26	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,13	3,46
35	3,72	0,44	4,25	6,45	4,05	0,65	0,00	2,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,73	3,72
36	3,69	0,57	4,25	6,58	4,01	0,82	0,33	2,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	1,00	3,69
37	3,69	0,20	4,25	6,21	4,01	0,44	0,60	2,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	3,69
38	3,69	0,26	4,25	6,27	4,01	0,50	0,60	2,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	3,69
39	3,61	0,33	4,25	6,34	3,92	0,66	0,60	2,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	3,61
40	3,65	0,04	4,25	6,05	3,96	0,33	0,60	2,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	3,65
41	3,84	0,00	1,91	3,67	3,91	0,00	0,00	0,00	0,50	0,24	0,00	0,60	0,00	0,22	1,76	2,00	0,77	3,60
42	3,88	0,00	2,20	3,96	4,20	0,00	0,00	0,00	0,26	0,02	0,00	0,60	0,00	0,22	1,76	2,00	0,54	3,86
43	3,88	0,00	0,00	1,76	2,00	0,00	0,00	0,00	2,46	2,04	0,00	0,60	0,00	0,22	1,76	2,00	0,31	1,84
44	3,72	0,00	0,00	1,76	2,00	0,00	0,00	0,00	2,29	1,88	0,00	0,60	0,00	0,22	1,76	2,00	0,07	1,84
45	3,53	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	2,08	1,91	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,07	1,62
46	3,22	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	1,74	1,60	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,07	1,62
47	2,83	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	1,32	1,21	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,07	1,62
48	2,44	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	0,90	0,82	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,07	1,62
49	2,55	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	1,01	0,93	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,07	1,62
50	2,39	0,00	0,00	1,76	1,76	0,00	0,00	0,00	0,84	0,78	0,00	0,60	0,00	0,00	1,76	1,76	0,07	1,62

Yine Tablo 6.6 incelendiğinde, 35. saate kadar eksik enerji olmasına ve HT'de hidrojen bulunmasına rağmen, HT'den YH'ye hidrojen iletimi olmadığı görülmektedir. Bunun nedeni HT kapasitesinin, YH minimum hidrojen tüketimi değeri olan (*cons_H2_rated*) 0,66 kg'ın altında kalmış olmasıdır (Bkz. Tablo 6.1). 35. Saatten itibaren fazla enerji durumu söz konusu olmakta ve böylelikle HT maksimum kapasitesi olan 1 kg. değerine ulaşmaktadır. 41. saatte tekrar eksik enerji durumu ortaya çıktığında, HT'de bulunan hidrojen miktarının YH minimum hidrojen tüketimi değerinin üzerinde olması nedeniyle, HT YH kalan kapasitesi olan 0,24

kWh'lık enerji üretimi için gerekli olan 0,22 kg hidrojeni YH'ye iletebilmektedir. Bu durumda halen karşılanmamış yük miktarı bulunmaktadır çünkü YH kapasitesi yetersiz kalmaktadır. Ayrıca yine görülmektedir ki, fazla enerji olması durumunda da bu enerjinin önemli bir kısmı HT kapasitesinin yetersiz kalması, ayrıca sistemde ELC bulunmaması nedeniyle E_dump olarak atılmak durumunda kalmaktadır. Bu sonuçlardan da görülmektedir ki sistem LPSP ve E_dump değerlerinin azalması sistemdeki HT, ELC kapasitelerinin daha fazla olmasını ve ayrıca sistemde ELC bulunmasını gerektirmektedir. Bunlar da ACS değerini oldukça yüksek seviyelere çekmektedir. Ayrıca Tablo 6.4 incelendiğinde 2. ve 29. çözümlerin çok düşük LPSP değerlerine karşın oldukça yüksek E_dump değerlerine sahip oldukları görülmektedir. Bu da E_dump değeri minimizasyonunun üçüncü bir amaç fonksiyonu olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dünya nüfusunun ve teknolojik gelişmelerin artış oranına paralel olarak günümüzde dünyanın enerji kaynaklarının da giderek azaldığını bilmekteyiz. Dünya genelinde ve ülkemizde de en çok kullanılan petrol ve türevlerinden oluşan geleneksel enerji kaynakları rezervlerinin tükeniyor olması ve bunların kullanımının küresel ısınmayla sonuçlanan sera gazı emisyonlarının artışına sebep olması dolayısıyla sürdürülebilir olarak kabul edilen ve çevre dostu yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına yönelim söz konusudur.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının bu güne kadar yeterince yaygınlaştırılmamış olmasının en önemli sebebi olarak, yatırım maliyetlerinin fazla oluşu ve sistem güvenilirliğinin yeterli olmamasını söyleyebiliriz. Bu olumsuzlukların giderilerek yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin yaygınlaştırılması için bu kaynakların birlikte kullanıldığı hibrit yenilenebilir enerji sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler sistem güvenilirliğinin sağlanması ve toplam maliyetlerin düşürülmesi amaçlarıyla, tek bir yenilenebilir enerji kaynağının yanında kullanılan geleneksel enerji kaynağı ya da kaynaklarından oluşabildiği gibi, en az iki yenilenebilir enerji kaynağı veya bunların depolama üniteleriyle birlikte kullanımlarından da oluşabilmektedir.

SA-HRES'de toplam maliyeti minimize edecek sistem elemanlarının boyutlarının minimizasyonu amaç fonksiyonlarının ilki olarak karşımıza çıkmaktadır. Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin çok amaçlı optimizasyonunda amaçlardan biri de sistem yönetiminin optimizasyonudur. Bu, dağıtım sisteminin idaresi ve kontrolünü içerir. Hibrit yenilenebilir enerji sistemini oluşturan yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken tabiatı sonucu yükün kesintisiz beslenebilmesi önündeki engellerin aşılabilmesi için enerji dönüşüm ve depolama üniteleri ile birlikte iyi geliştirilmiş bir güç yönetimi stratejisine ihtiyaç söz konusudur.

Gerçekleştirilen bu çalışmada ACS ve LPSP değerlerinin minimizasyonunu içeren amaç fonksiyonlarının her ikisini birden minimize etmek üzere SA-HRES için

NSGA-II tabanlı SAHRESOpt yaklaşımı, geliştirilen SAHRESOpt Güç Yönetimi Stratejisi algoritması ile birlikte farklı sistemler üzerinde uygulanmıştır. Sistemlerde literatürde yer alan çoğu çalışmada olduğu gibi geleneksel depolama üniteleri olan batarya ve fosil yakıtlar ile çalışan jeneratörler yerine hem ELC'nin hem de biyokütle kaynaklı hidrojen üretimi sağlayan RFR'nin beslediği YH sistemi kullanılarak öncelikle sera gazı emisyonlarının söz konusu olmadığı tamamen çevreci sistemler dikkate alınmıştır. Depolama ünitesi olarak kullanım ömrü daha kısa ve daha büyük boyutlu olan batarya grubu yerine HT'lerin kullanımı ile depolama sisteminin ömrü ve verimi artırılarak daha az depolama alanı gereksinimi sağlanması söz konusu olabilecektir.

Geliştirilen güç yönetimi stratejisiyle, yenilenebilir enerji kaynakları olan FV ve RT jeneratörlerini ve bunların değişken enerji üretimi kapasitesinden farklı olarak sabit enerji üretebilen biyokütle kaynaklı anaerobik reaktör ve RFR sisteminin ürettiği hidrojen ile beslenen YH sistemleri ayrı ayrı değerlendirilmiştir. YH'nin hem ELC hem de RFR tarafından beslenmesi söz konusu olan böyle bir hibrit sistem literatürde Hakimi ve Tafreshi [46], tarafından daha önce çalışılmış olsa da burada farklı olarak ilk defa RFR boyutu da optimizasyon kapsamına dahil edilip sistemdeki YH boyutuna göre en uygun enerji akışını sağlayacak şekilde bir RFR boyutu algoritması geliştirilmiştir. Diğer bir fark da RFR tarafından üretilen hidrojenin fazla olması durumunda doğrudan HT'ye gönderilip depolanabilmesidir. Bununla birlikte iki farklı YH sistemi elemanlarının birbirlerine bağlı çalışmaları gerekliliğinden doğan kısıtlar da dikkate alınmıştır. Böylelikle çok amaçlı optimizasyon probleminin ikinci amacı olan sistem güvenilirliğinin maksimizasyonu için en uygun enerji akışını sağlayacak bir güç yönetimi stratejisi geliştirilmiştir.

Optimizasyon algoritmasında incelenen ve değerlendirilebilen literatürde ilk defa olarak hibrit enerji sistemini oluşturan tüm elemanların, toplam sistem maliyetini minimize edecek, boyut optimizasyonu kapsamında her bir eleman için farklı tip (nominal güç) seçeneklerinin yanı sıra eleman sayıları da dikkate alınmıştır. Bu yaklaşım literatürde yer alan sistem elemanları için tanımlanan belirli bir nominal güce sahip sistem elemanının yalnızca sayısının optimize edilmesi ya da tam tersi eleman sayısı bir olarak sabit tutulup farklı nominal güç ve kapasite değerleri

arasından seçim yapılarak boyutlandırılması yaklaşımlarına göre bir takım avantajlara sahiptir. Bu avantajlar kısaca:

- Yenilenebilir enerji sistemlerinin özellikle kurulum maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı toplam sistem maliyetleri geleneksel enerji kaynaklarına göre yüksek olmaktadır. Ancak bunların boyutları arttıkça kW başına kurulum maliyetleri Tablo 5.2 ve Tablo 5.4'de FV ve RT için görüldüğü gibi azalmaktadır. Bu nedenle tek bir tip sistem elemanı yerine örnek sistemlerde olduğu gibi farklı boyutlarda sistem elemanlarının seçiminin optimize edilmesi maliyet açısından artı bir avantaj sağlamaktadır.
- Sistem elemanları için tanımlanan farklı tip seçenekleri yanında sayılarının da boyut optimizasyonuna dâhil edilmesiyle maliyet değerlendirmesinde farklı avantajlar söz konusu olmaktadır. Örneğin SAHRESOpt sonucu oluşan Pareto optimum çözümlerden birinde RT için belirlenen toplam gücün (yani RT nominal gücü ile türbin sayısı çarpımı) 6 olduğunu kabul edilsin. Toplam 6 kW'lık nominal güç değerini elde edebilmek için sistem de 6 kW * 1 adet, 2 kW *3 adet, 3 kW*2 adet gibi farklı seçenekler söz konusu olacaktır. Burada kurulum maliyeti dikkate alındığında elbette ki 6 kW'lık RT'nin daha ekonomik olduğu açıktır. Ancak burada kullanıcı talep ve tercihleri yanı sıra sistem elemanlarının bulunabilirlikleri de söz konusu olduğunda farklı senaryolar da dikkate alınabilecektir.
- Diğer bir açıdan YH söz konusu olduğunda daha önce bölüm 5.1.3.2'de ifade edildiği üzere eşitlik (5.10) ile hesaplanan hidrojen tüketimi YH çıkış gücüyle doğru orantılıdır. Buna göre güç yönetimi stratejisinde de belirtildiği gibi daha düşük miktarlarda enerji ihtiyacı olduğunda YH çıkış gücü arttıkça hidrojen tüketimi artacak bu da daha büyük boyutlarda RFR, HT ya da ELC ihtiyacına sebep olacaktır. Bu nedenle özellikle YH için toplam çıkış gücü değerini daha düşük nominal çıkış gücü değeri ile YH sayısı artırılarak elde edilmesi daha düşük sistem maliyetini sağlama konusunda katkı sağlayacaktır.

Bunların yanı sıra NSGA-II algoritması temelinde başlangıç popülasyonunun oluşturulmasından, çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin uygulanmasına kadar tamamen hibrit enerji sistem elemanlarının güç yönetimi stratejisiyle entegre edilmiş yeni bir çok amaçlı optimizasyon algoritması tasarlanmıştır. Böylelikle farklı sistem elemanlarıyla farklı senaryolar için ACS ve LPSP minimizasyonu gerçekleştirilebilecektir.

ACS ve LPSP minimizasyonuna ek olarak, bu çalışmada dikkate alınmayan E_dump minimizasyonu üçüncü amaç fonksiyonu olarak sonraki çalışmalarda değerlendirilebilecektir.

Geliştirilen SAHRESOpt yaklaşımı devamında gelecek çalışması olarak, kullanıcıların kolaylıkla çalıştırabileceği HOMER gibi bir ticari yazılım programına dönüştürülmesi için bir temel oluşturabileceği düşünülmektedir. Ayrıca yine, gelecek uygulaması olarak optimizasyon sonuçlarının gerçek bir sistemde uygulanması söz konusu olabilecektir. Yine, bu sistemde dikkate alınmayan termal kaynakların sisteme dâhil edilmesi de farklı gelecek uygulamaları arasında değerlendirilebilecektir.

8. KAYNAKLAR

- [1] Baños R., Manzano-Agugliaro F., Montoya F., Gil C., Alcayde A. and Gómez J. "Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1753–1766, (2011).
- [2] OECD/IEA, World energy outlook 2014, <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2014.pdf>, Paris (2014).
- [3] U.S. Energy Information Administration, International energy outlook2013, [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2013).pdf), (2013).
- [4] IEA, International Energy Agency, World energy outlook 2009, <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2009/WEO2009.pdf>, (2009).
- [5] International Energy Agency (IEA),Energy policies of IEA countries: Turkey 2009 review OECD/IEA, (01.04.2017), <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/turkey2009.pdf>, Paris (2010).
- [6] Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Türkiye Enerji RAPORU 2009, (10.04.204), http://www.dektmk.org.tr/upresimler/enerji_raporu_2009.pdf
- [7] Çapık, M., Yılmaz, A. O. ve Çavuşoğlu, İ.,“Present situation and potential role of renewable energy in Turkey”, *Renewable Energy*, 46, 1–13, (2012).
- [8] Melikoglu, M. “Vision 2023: Feasibility analysis of Turkey's renewable energy projection”, *Renewable Energy*, 50, 570–575, (2013).
- [9] Panwara, N.L., Kaushik, S.C. and KothariS., “Role of renewable energy sources in environmental protection: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (3), 1513–1524, (2011).

- [10] Iqbal, M., Azam, M., Naeem, M. and Khwaja, A.S., "A. Anpalagan Optimization classification, algorithms and tools for renewable energy: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39, 640–654, (2014).
- [11] Jebaraj, S. and Iniyar, S., "A review of energy models", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(4), 281–311, (2006)
- [12] Kaya K. ve Koç E., Enerji Kaynakları–Yenilenebilir Enerji Durumu, (01.02.2017), Mühendis ve Makina, 56 (668), 36-47, http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/1479cfc47e84446_ek.pdf?dergi=1590, 2015.
- [13] Messenger, R. A. and Ventre J., *Photovoltaic Systems Engineering*, Second Edition, New York Washington, D.C.: CRC Press, Taylor & Francis, (2004).
- [14] Wang, C., "Modeling and control of hybrid wind/photovoltaic/fuel cell distributed generation systems," PhD, *Montana State University*, (2006).
- [15] Brka, A., "Optimisation of stand-alone hydrogen-based renewable energy systems using intelligent techniques", PhD, *Edith Cowan University*, (2015).
- [16] Patel, M. R., *Wind and solar power systems: design, analysis, and operation*, New York, U.S.A: CRC press, (2005).
- [17] (12.12.2014 21:40), http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/ruzgar-ruzgar_enerjisi.aspx
- [18] Balat, M., "Usage of energy sources and environmental problems", *Energy Exploration and Exploitation*, 23, 141–168, (2005).
- [19] Manwell, J.F., McGowan, J.G. and Rogers A.L., *Wind energy explained*, New York: Wiley, (2002).
- [20] Farret, F.A. ve Simoes, M.G., *Integration of alternative sources of energy*, John Wiley&Sons, (2006).

- [21] Erdinç O., "Şebekeden Bağımsız Uygulamalar için Hibrit Bir Rüzgâr Türbini/FV/Yakıt Hücresi/Batarya Sisteminin Optimizasyonu, Tasarımı ve Uygulaması", Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, (2012).
- [22] Özpmar, M. A., "Yenilenebilir Enerji Santrallerinde Yapay Sinir Ağları Yöntemiyle Enerji Üretiminin Modellenmesi ve Planlanması", Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi F.B.E*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programı, İstanbul, (2007).
- [23] (13.12.2014), <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Ruzgar>
- [24] Evans, A., Strezov, V. and Evans, T. J., "Sustainability considerations for electricity generation from biomass", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1419–1427, (2010).
- [25] Hidrojen Üretimi, (27.07.2016), http://www.eie.gov.tr/teknoloji/h_uretimi.aspx
- [26] Boyano, A., Morosuk, T., Blanco-Marigorta, A.M. and Tsatsaronis, G., "Conventional and advanced exergoenvironmental analysis of a steam methane reforming reactor for hydrogen production", *Journal of Cleaner Production*, 20, 152–160, (2012).
- [27] Simpson A.P., Lutz A.E. "Exergy analysis of hydrogen production via steam methane reforming", *International Journal of Hydrogen Energy*, 32 (18): 4811–4820, (2007).
- [28] Hidrojen ekonomisi, (10.09.2015), https://tr.wikipedia.org/wiki/Hidrojen_ekonomisi
- [29] Hybrid renewable energy system, (21.05.2016), http://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_renewable_energy_system
- [30] Deshmukh, M.K. and Deshmukh, S.S., "Modeling of hybrid renewable energy systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 235–249, (2008).
- [31] (11.12.2014), <http://www.iea.org/Textbase/npsum/WEO2014SUM.pdf>

- [32] Hubertus, Th.,Jongen, Meer, K. and Eberhard Triesch, Meer, *Optimization Theory*, Boston: Springer Science & Business Media, (2004)
- [33] Tezer T., " Toplama ve dağıtım zaman pencereli araç rotalama problemi için kesin çözüm yaklaşımı ve örnek uygulamalar", Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, (2009).
- [34] Wang, W., Rivardb H. And Zmeureanu R.,“An object-oriented framework for simulation-based green building design optimization with genetic algorithms”. *Advanced Engineering Informatics*, 19, 5–23, (2005).
- [35] Evins, R., “A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 230–245, (2013).
- [36] Schrijver, A.,*Combinatorial Optimization: Polyhedra and Efficiency*, A,Germany; Springer, 1,(2003).
- [37] Zitzler, E. and Thiele L., "Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach", *Evolutionary Computation*, IEEE Transactions on, 3(4), 257-271, (1999).
- [38] Zitzler, E., Deb, K. and Thiele, L., “Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: empirical results”, *Evolutionary Computation*, 8(2), 173–195, (2000).
- [39] Delgarm N., Sajadi B., Kowsary F. And Delgarm S.,“Multi-objective optimization of the building energy performance: A simulation-based approach by means of particle swarm optimization (PSO)”, *Applied Energy*, 170, 293-303, (2016).
- [40] Baños R., Gil C. Reça J. and Martínez J., “Implementation of scatter search for multi-objective optimization: a comparative study” *Comput. Optim. Appl.*, 42, 421–441, (2009).

- [41] Manzano-Agugliaro F., San-Antonio-Gómez C., López S., Montoya, F.G., and Gil C., “Pareto-based evolutionary algorithms for the calculation of transformation parameters and accuracy assessment of historical maps”, *Computers & Geosciences*, 57, 124–132, (2013).
- [42] Konak, A., Coit, D. W. and Smith A. E., “Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial”, *Reliability Engineering and System Safety*, 91, 992–1007, (2006).
- [43] Fadaee, M., Radzi and M.A.M., “Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using evolutionary algorithms: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3364–3369, (2012).
- [44] <http://www.neos-guide.org/content/optimization-introduction> 13.12.2014 15:10
- [45] Dufo-López R., Cristóbal-Monreal I.R., and Yusta M.J., “Optimisation of PV-wind-diesel-battery stand-alone systems to minimize cost and maximize human development index and job creation”, *Renewable Energy*, 94, 280–293, (2016).
- [46] Hakimi S.M. and Tafreshi, S.M.M., “Optimal sizing of a stand-alone hybrid power system via particle swarm optimization for Kahnouj area in south-east of Iran”, *Renewable Energy*, 34, 1855–1862, (2009).
- [47] Kaviani, A.K., Riahy, G.H. and Kouhsari, S.H.M., “Optimal design of a reliable hydrogen-based stand-alone wind/PV generating system, considering component outages”, *Renewable Energy*, 34(11), 2380–2390, (2009).
- [48] Petrillo, A., Felice, F.D., Jannelli, E., Autorino, C., Minutillo, M. and Lavadera, A.L., “Life cycle assessment (LCA) and life cycle cost (LCC) analysis model for a stand-alone hybrid renewable energy system”, *Renewable Energy*, 95, 337–355, (2016).
- [49] Abbesa, D., Martinez, A. and Champenois, G., “Life cycle cost, embodied energy and loss of power supply probability for the optimal design of hybrid power systems” *Mathematics and Computers in Simulation*, 98, 46–62, (2014).

- [50] Seth, B., Darling, F. Y., Veselka, T., and Alfonso Velosa “Assumptions and the Levelized Cost of Energy for Photovoltaics”, *Energy and Environmental Science*, 4, 3133-3139, (2011).
- [51] Amer M., Namaane, A. And M'Sirdi, N.K., “Optimization of Hybrid Renewable Energy Systems (HRES) Using PSO for Cost Reduction” *Energy Procedia*, 42, 318–327, (2013).
- [52] Prasad, A.R. and Natarajan, E., “Optimization of integrated photovoltaic–wind power generation systems with battery storage”, *Energy*, 31(12), 1943–1954, (2006).
- [53] Billinton, R. and Li, W. (1994). *Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods*, New York: Springer Science & Business Media.
- [54] Dong, Z., Zhang, P., Ma, J., Zhao, J., Ali, M. and Meng, K., et al. *Emerging Techniques in Power System Analysis*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, (2010).
- [55] Momoh, J. and Mili, L. (2009). *Economic Market Design and Planning for Electric Power Systems*, United States of America: John Wiley & Sons.
- [56] Anbalagan, P., (2013). Scalable and enhanced remote services for power system reliability estimation. Faculty of Electrical and Electronics Engineering, AnnaUniversity, India.
http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/10247/8/08_chapter%203.pdf
- [57] Deb, K. (2014). Multi-objective optimization. In *Search methodologies* (pp. 403-449). Springer US.
- [58] Collette, Y. and Siarry, P. (Eds.). (2004). *Multiobjective optimization principles and case studies*, Berlin: Springer, 2004.

- [59] Dréo, J., Petrowski, A., Siarry, P. and Taillard, E. (2016). *Metaheuristics for Hard Optimization Methods and Case Studies*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- [60] Borowy, B.S. and Salameh, Z. M. "Optimum Photovoltaic Array Size for a Hybrid Wind/PV System" *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 9(3), 482-488, (1994).
- [61] Chedid, R. and Saliba, Y., "Optimization And Control of Autonomous Renewable Energy Systems", *International Journal Of Energy Research*, 20, 609-624, (1996).
- [62] Kellogg WD, Nehrir MH, Venkataramanan G and Gerez V., "Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind photovoltaic and hybrid wind/PV systems", *IEEE Trans Energy Convers*, 1998;13(1):70–5
- [63] Prasad, A. R., and Natarajan E., "Optimization of integrated photovoltaic–wind power generation systems with battery storage", *Energy*, 31, 1943–1954, (2006).
- [64] Ashok, S., "Optimised model for community-based hybrid energy system", *Renewable Energy*, 32, 1155–1164, (2007).
- [65] Rubio-Maya, C., Uche-Marcuello, J., Martínez-Gracia, A. and Bayod-Rújula A. A., "Design optimization of a polygeneration plant fuelled by natural gas and renewable energy sources", *Applied Energy*, 88, 449–457 (2011).
- [66] Kaabeche, A., Belhamel, M. and Ibtouen, R., "Sizing optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation system", *Energy*, 36, 1214-1222, (2011).
- [67] Yang, H., Zhou, W., Lu, L. and Fang, Z., "Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar–wind system with LPSP technology by using genetic algorithm", *Solar Energy*, 82(45), 354–367, (2008).

- [68] Erdinc, O and Uzunoglu, M., “Optimum design of hybrid renewable energy systems: Overview of different approaches”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (3),1412–1425, (2011).
- [69] Elsayed, S., Sarker, R. and Essam D. A. (2010). *Comparative study of different variants of genetic algorithms for constrained optimization*, *Simulated evolution and learning*, (eds: Deb K, Bhattacharya A, Chakraborti N, Chakraborty P, Das S, Dutta J., et al.), *Simulated evolution and learning*, SE - 18, vol. 6457, Berlin Heidelberg: Springer, 177-186.
- [70] Cheung, B. C., Carriveau, R. and Ting, D.S.K., “Multi-objective optimization of an underwater compressed air energy storage system using genetic algorithm”, *Energy*, 74, 396-404, (2014).
- [71] Koutroulis, E., Kolokotsa, D., Potirakis, A. and Kalaitzakis, K., “Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms”, *Solar Energy*, 80(9), 1072–88, (2006).
- [72] Senjyu, T., Hayashi, D., Yona, A., Urasaki, N. And Funabashi T., “Optimal configuration of power generating systems in isolated island with renewable energy”, *Renewable Energy*, 32, 1917–1933, (2007).
- [73] Sopian, K., Zaharim, A., Ali, Y., Nopiah, Z.M., Razak, J.A.B. and Muhammad, N.S., “Optimal operational strategy for hybrid renewable energy system using genetic algorithms”, *WSEAS Transactions on Mathematics*, 7(4), 130-140, (2008).
- [74] Lagorse, J., Paire, D. and Miraoui, A., “Sizing optimization of a stand-alone street lighting system powered by a hybrid system using fuel cell. PV and battery”, *Renewable Energy*, 34(3), 683–91, (2009).
- [75] Lagorse, J., Paire, D. and Miraoui A. “Hybrid stand-alone power supply using PEMFC, PV and battery –modelling and optimization” In: International conference on clean electrical power (ICCEP), 135–40 (2009).

- [76] Bala, B.K. and Siddique, S.A.,“Optimal design of a PV–diesel hybrid system for electrification of an isolated island – Sandwip in Bangladesh using genetic algorithm” *Energy for Sustainable Development*, 13(3), 137–42, (2009).
- [77] Kalantar, M. and Mousavi, S.M.G.,“Dynamic behavior of a stand-alone hybrid power generation system of wind turbine, microturbine, solar array and battery storage”, *Applied Energy*, 87(10), 3051–64, (2010).
- [78] Hong, Y.Y. and Lian, R.C., “Optimal sizing of hybrid wind/PV/diesel generation in a stand-alone power system using markov-based genetic algorithm”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(2), 640-647, (2012).
- [79] Ismail, M.S., Moghavemia, M. and Mahlia, M.I.,“Genetic algorithm based optimization on modeling and design of hybrid renewable energy systems”, *Energy Convers. Manage*, 85(1), 120–130, (2014).
- [80] Dufo-López, R., L., Ignacio J. R. R., Sergio, J. A. S., Domínguez-Navarro, J. A. and Bernal-Agustín, J. L.,“Daily operation optimisation of hybrid stand-alone system by model predictive control considering ageing model”, *Energy Conversion and Management*, 134, 167–177, (2017).
- [81] Das B. K. , Al-Abdeli Y. M. and Kothapalli, G.,“Optimisation of stand-alone hybrid energy systems supplemented by combustion-based prime movers”, *Applied Energy*, 196, 18–33, (2017).
- [82] Seeling-Hochmuth, G. C.,“A combined optimisation concept for the design and operation strategy of Hybrid–PV energy systems”, *Solar energy*, 61(2), 77–87, (1997).
- [83] Dufo-López, R. and Bernal-Agustin, J. L., “Design and control strategies of PV–diesel systems using genetic algorithms” *Solar Energy*, 79(1), 33–46, (2005).
- [84] Dufo-López, R.,Bernal-Agustín, J. L. And Contreras, J,. “Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage” *Renewable Energy*, 32, (7), 1102–1126, (2007).

- [85] Shi, J.-H., Zhu, X.-J. and Cao, G.-Y., “Design and techno-economical optimization for stand-alone hybrid power systems with multi-objective evolutionary algorithms” *International Journal of Energy Research*, 31(3), 315-328, (2007).
- [86] Yang, H., Zhou, W. and Lou, C., “Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar–wind power generation system”, *Appl Energy*, 86 (2), 163 – 169, (2009).
- [87] Ould B. B., Sambou, V., Ndiaye, P.A., Kébé C.M.F. and Ndong M., “Optimal design of a hybrid solar-wind–battery system using the minimization of the annualized cost system and the minimization of the loss of power supply probability (LPSP)”, *Renewable Energy*, 35, 2388-2390, (2010).
- [88] Zeng, J., Li, M., Liu, J.F., Wu, J. and Ngan, H.W., “Operational optimization of a stand-alone hybrid renewable energy generation system based on an improved genetic algorithm”, *IEEE PES General Meeting, PES* 5589885, (2010).
- [89] Tafreshi, S.M.M., Zamani, H.A., Ezzati, S.M., Baghdadi, M. and Vahedi, H., “Optimal unit sizing of distributed energy resources in microgrid using genetic algorithm. Proceedings”, 18th Iranian Conference on Electrical Engineering, ICEE, 836-841, (2010).
- [90] Katsigiannis, Y.A., Georgilakis, P.S. and Karapidakis, E.S., “Multiobjective genetic algorithm solution to the optimum economic and environmental performance problem of small autonomous hybrid power systems with renewables”, *IET Renewable Power Generation*, 4 (5), 404-419, (2010).
- [91] Bilil H., Aniba G., Maaroufi M., “Multiobjective Optimization of Renewable Energy Penetration Rate in Power Systems”, *Energy Procedia*, 50, 368-375, (2010).
- [92] Maheri A., “Multi-objective design optimisation of standalone hybrid wind-PV-diesel systems under uncertainties”, *Renewable Energy*, 66, 650–661, (2014).

- [93] Shayeghi H. and Hashemi Y., “Application of fuzzy decision-making based on INSGA-II to designing PV–wind hybrid system”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 45, 1-17, (2015).
- [94] Kamjoo A., Maheri A., Dizqah A. M. and Putrus G. A., “Multi-objective design under uncertainties of hybrid renewable energy system using NSGA-II and chance constrained programming”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 74, 187-194, (2016).
- [95] Kennedy, J. and Eberhart, R., “Particle swarm optimization”, In: Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, 4, 1942–1948, (1995).
- [96] Shang, C., Srinivasan, D. and Reindl, T., “An improved particle swarm optimisation algorithm applied to battery sizing for stand-alone hybrid power systems”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 74, 104-117, (2016).
- [97] Esmin, A.A., Lambert-Torres, G., and Zambroni de Souza, A.C., “A hybrid particle swarm optimization applied to loss power minimization” *IEEE Trans Power Syst*, 20(2), 859–866, (2005).
- [98] Kerdphol T., Fuji K., Mitani Y., Watanabe M. and Qudaih, Y., “Optimization of a battery energy storage system using particle swarm optimization for stand-alone microgrids”, *Electrical Power and Energy Systems*, 81, 32–39, (2006).
- [99] Abido, M. A., “Optimal power flow using particle swarm optimization”, *Elect. Power Energy Syst.*, 24, 563-571, (2002).
- [100] Dehghan, S., Saboori H., Parizad, A. and Kiani, B., “Optimal sizing of a hydrogen-based wind/PV plant considering reliability indices” In: International conference on electric power and energy conversion systems (EPECS’09), 1–9, (2009).
- [101] Haghi, H.V., Hakimi, S.M. and Tafreshi, S.M.M., “Optimal sizing of a hybrid power system considering wind power uncertainty using PSO-embedded

stochastic simulation” 2010 IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS (2010).

- [102] Borhanazad, H., Mekhilef, S., Ganapathy, V.G., Modiri-Delshad, M. And Mirtaheri A., “Optimization of micro-grid system using MOPSO”, *Renew. Energy*, 71, 295–306. (2014).
- [103] Sharafi M. and ELMekawwy, T. Y., “Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO-simulation based approach”, *Renewable Energy*, 68, 67-79, (2014).
- [104] Sharafi M., ELMekawwy T.Y. and Bibeau, E.L., “Optimal design of hybrid renewable energy systems in buildings with low to high renewable energy ratio”, *Renewable Energy*, 83, 1026–1042, (2015).
- [105] Avril, S., Arnaud, G., Florentin, A. and Vinard, M., “Multi-objective optimization of batteries and hydrogen storage technologies for remote photovoltaic systems” *Energy*, 35(12), 5300–8, (2010).
- [106] Askarzadeh, A. and dos Santos Coelho, L., “A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: a case study of iran”, *Solar Energy*, 112, 383–396, (2015).
- [107] Clarke, D.P., Al-Abdeli, Y.M. and Kothapalli, G., “Multi-objective optimisation of renewable hybrid energy systems with desalination”, *Energy*, 88, 457-468, (2015).
- [108] Zhao, Y.S., Zhan J., Zhang Y., Wang D.P. and Zou B.G., “The optimal capacity configuration of an independent wind/PV hybrid power supply system based on improved PSO algorithm” In: 8th international conference on advances in power system control, operation and management (APSCOM), 1–7, (2009).
- [109] Deb, K., *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. New York: John Wiley & Sons, (2001).

- [110] Baños, R., Gil, C., Paechter, B. and Ortega, J., “A hybrid meta-heuristic for multi-objective optimization: MOSATS”, *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms* ,6(2), 213–30, (2007).
- [111] Dufo-López, R., Bernal-Agustín, J. L. and Rivas-Ascaso, D.M., “Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions”, *Renewable Energy*, 31, 2227–2244, (2006).
- [112] Dufo-López, R. and Bernal-Agustin, J.L., “Multi-objective design of PV–wind–diesel–hydrogen–battery systems”, *Renew. Energy*, 33, 2559–2572, (2008).
- [113] Logenthiran, T., Srinivasan, D., Khambadkone, A.M. and Raj, T.S., “Optimal sizing of an islanded microgrid using evolutionary strategy”, 11th international conference on probabilistic methods applied to power systems (PMAPS), 12–17, (2010).
- [114] Abedi,S.,Alimardani, A., Gharehpetian,G., Riahy,G. and Hosseinian, S., “A comprehensive method for optimal power management and design of hybrid RES-based autonomous energy systems”, *Renew. Sustain. Energy Rev*, 16 (3), 1577–1587, (2012).
- [115] Perera, A.T.D., Attalage, R.A., Perera, K.K.C.K. and Dassanayake V.P.C., “A hybrid tool to combine multi-objective optimization and multi-criterion decision making in designing standalone hybrid energy systems”, *Applied Energy*, 107, 412–425, (2013).
- [116] Shi,Z.,Wang,R. andZhangT., “Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using preference-inspired coevolutionary approach”, *Sol Energy*, 118, 96–106, (2015).
- [117] Bogdan, S., Borowy, Z. and Salameh, M., “Methodology for Optimally Sizing the Combination of a Battery Bank and PV Array in a Wind/PV Hybrid System”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 11 (2), (1996).

- [118] Markvart, T., "Sizing Of Hybrid Photovoltaic-Wind Energy Systems", *Solar Energy*, 51 (4), 277-281, (1996).
- [119] Protogeropoulos, C., Brinkworth, B. J. and Marshall, R. H., "Sizing and techno-economical optimization for hybrid solar photovoltaic/wind power systems with battery storage", *Int J Energy Res.*, 21(6), 465-79, (1997).
- [120] Morgan, T. R., Marshall, R. H. and Brinkworth, B. J., "ARES'-A Refined Simulation Program For The Sizing And Optimisation Of Autonomous Hybrid Energy Systems" *Solar Energy*, 59, (4-6), 205-215, (1997).
- [121] El-Hefnawi, S. H., "Photovoltaic Diesel-generator hybrid power system sizing", *Renew. Energy*, 13(1), 33-40, (1998).
- [122] Elhadidy, M. A. and Shaahid, S. M., "Optimal sizing of battery storage for hybrid (wind + diesel) power systems" *Renew Energ*, 18(1), 79-86, (1999).
- [123] Celik, A.N. "Techno-economic analysis of autonomous PV-wind hybrid systems using different sizing methods", *Energy Convers. Manag.*, 44, 1951-1968, (2003).
- [124] Muselli, M., Notton, G., and Louche, A., "Design of Hybrid-Photovoltaic Power Generator, with Optimization of Energy Management", *Solar Energy*, 65 (3), 143-157, (1999).
- [125] Isherwood, W., Smith, J. R., Aceves, S.M., Berry, G., Clark, W. and Johnson, R. et al., "Remote power systems with advanced storage technologies for Alaskan villages", *Energy*, 25 (10), 1005-1020, (2000).
- [126] Baring-Gould E. I. HYBRID2, The Hybrid System Simulation Model, Version 1.0 User Manual, NREL/TP-440-21272. National Renewable Energy Laboratory, 1996.
- [127] Manolakos D., Papadakis G., Papantonis D. and Kyritsis S. "A simulation-optimisation programme for designing hybrid energy systems for supplying electricity and fresh water through desalination to remote areas: case study: the

- Merssini village, Donoussa island, Aegean Sea, Greece”, *Energy*, 26 (7), 679–704, (2001).
- [128] Yang, H., Lu, L. And Zhou, W., “A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system” *Solar Energy*, 81 (1), 76–84, (2007).
- [129] 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 (11), 5708–5718, (2007).
- [130] Diaf, S., Belhamel, M. and Haddadi, M., “A. Technical and economic assessment of hybrid photovoltaic/wind system with battery storage in Corsica island”, *Louche Energy Policy*, 36 (2), 743–754, (2008).
- [131] Diaf, S., Notton, G., Belhamel, M. and Haddadi, M., “A. Louche. Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions”, *Appl Energy*, 85 (10), 968–987, (2008).
- [132] 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).
- [133] Lambert, T., Lilliental, P., “HOMER: the micro-power optimisation model, NREL, (2004). <http://www.homerenergy.com/software.html>
- [134] Khan, M. J. and Iqbal, M.T., “Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland”, *Renew Energy*, 30 (6), 835–854, (2005).
- [135] Shaahid, S.M. and Elhadidy M.A., “Technical and economic assessment of grid-independent hybrid photovoltaic–diesel–battery power systems for commercial loads in desert environments”, *Renew Sustain Energy Rev*, 11 (8), 1794–1810, (2007).

- [136] Himri, Y., Boudghene, A., Stambouli, B. D. and Himri, S., “Techno-economical study of hybrid power system for a remote village in Algeria”, *Energy*, 33 (7), 1128–1136, (2008).
- [137] Dalton, G.J., Lockington, D.A. And Baldock, T.E., “Feasibility analysis of stand-alone renewable energy supply options for a large hotel”, *Renew Energy*, 33 (7), 1475–1490, (2008).
- [138] T Berrill, T., “HYBRIDS Solaris solar powered home, 29 Burnett St., Wellington Point, Qld, Australia”, (2005).
- [139] Shaahid S.M. and El-Amin, I., “Techno-economic evaluation of off-grid hybrid photovoltaic–diesel–battery power systems for rural electrification in Saudi Arabia—a way forward for sustainable development”, *Renew Sustain Energy Rev.*, 13 (3), 625–633, (2009).
- [140] Chedid, R., Akiki, H. and Rahman, S. A., “Decision support technique for the design of hybrid solar–wind power systems”, *IEEE Trans Energy Convers.*, 13(1), 76–83, (1998).
- [141] Wang, L. and Singh, C., “PSO-based multi-criteria optimum design of a gridconnected hybrid power system with multiple renewable sources of energy” In: *Swarm intelligence symposium*, SIS 2007. IEEE, 250–7, (2007).
- [142] (25.01.2017) <http://www.nrel.gov/homer>
- [143] Li, F-F. and Qiu, J., “Multi-objective optimization for integrated hydro–photovoltaic power system”, *Applied Energy*, 167, 377–384, (2016).
- [144] Dauda, A-K. and Ismail, M.S., “Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions”, *Renewable Energy*, 44, 215–224 (2012).
- [145] Bajpai, P., Dash, V., “Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2926–2939, (2012).

- [146] Andujar, J. M. and Segura, F., "Fuel cells: history and updating. A walk along two centuries", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2309–22, (2009).
- [147] Spiegel, C., *EM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB®*, Academic Press., (2008).
- [148] Alves H. J., Junior, C. B., Niklevicz, R. R., Frigo, E. P., Frigo, M. S. and Coimbra-Arau, C. H., "Overview of hydrogen production technologies from biogas and the applications in fuel cells.", *international journal of hydrogen energy*, 38, 5215-5225, (2013).
- [149] Kreuter, W. and Hofmann, H., "Electrolysis: the important energy transformer in a world of sustainable energy," *International Journal of Hydrogen Energy*, 23, 661-666, (1998).
- [150] Zeng K. and Zhang D., "Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications", *Progress in Energy and Combustion Science*, 36, 307–326, (2010).
- [151] Ipsakis, D., Voutetakis, S., Seferlis, P., Stergiopoulos, F. and Elmasides, C., "Power management strategies for a stand-alone power system using renewable energy sources and hydrogen storage", *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 7081-7095, (2009).
- [152] Becerikli, F., "Yüksek Basıncılı PEM (Proton Geçirgen Membran) Elektrolizör Geliştirilmesi ve Çalışma Parametrelerinin Performansa Etkisi", Doktora Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Matematik Anabilim Dalı*, (2011).
- [153] Grigoriev, S.A., Porembsky, V.I. and Fateev, V.N., "Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy", *International Journal of Hydrogen Energy*, 31 (2), 171–175, (2006).
- [154] Kothari, R., Tyagi, V.V. and Pathak, A., "Waste-to-energy: A way from renewable energy sources to sustainable development", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3164–3170, (2010).

- [155] Galvagno,A.,Chiodo,V.,Urbani,F. andFreni,F., “Biogas as hydrogen source for fuel cell applications”, *Int. J. Hydrog. Energy*, 38, 3913-3920, (2013).
- [156] Bollini B.L., Silveira, J.L., da Silva, M.E., Tuna, C.E., Machin, E.B. and Pedroso, D.T., “Hydrogen production by biogas steam reforming: A technical, economic and ecological analysis”, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 28, 166–173, (2013).
- [157] Izquierdo, U., Barrio, V.L., Lago, N., Requies, J., Cambra, J.F., Güemez, M.B. and Arias, P.L., “Biogas steam and oxidative reforming processes for synthesis gas and hydrogen production in conventional and microreactor reaction systems”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(18), 13829–13842, (2012).
- [158] (09.03.2017 15:15), <http://www.bayar.edu.tr/besergil/hidrojen.pdf>
- [159] Kekezoğlu, B.,“Şebekeden bağımsız çalışan hibrit enerji sistemlerinde risk değerlendirmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, (2007).
- [160] MATLAB The Language of Technical Computing, <https://www.mathworks.com/>
- [161] Yarpiz - Academic Source Codes and Tutorials, <http://yarpiz.com/>
- [162] Tezer T., Yaman R. and Yaman G., “Evaluation of approaches used for optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 840–853, (2017).
- [163] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T. A.,“Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), (2002).

EKLER

9. EKLER

EK A SAHRESOpt Algoritması MATLAB Kodları

```
%% Problem Parametreleri

ngen=50;
maxit=100;

pCrossover=0.7; % Çaprazlama yüzdesi
nc=2*round(pCrossover*ngen/2); % Çocuk gen sayısı

pm=0.2; % Mutasyon yüzdesi
nm=round(pm*ngen); % Mutasyona uğrayan gen sayısı
rm=0.02; % Mutasyon Oranı

%% Başlangıç
bos_gen.Yapilanma.tip=[];
bos_gen.Yapilanma.adet=[];
bos_gen.Amacfonklr=[];
bos_gen.Rank=[];
bos_gen.DominationSet=[];
bos_gen.DominatedCount=[];
bos_gen.CrowdingDistance=[];

gen= repmat(bos_gen,ngen,1);
i=1;
while true

    while true

        gen(i).Yapilanma.tip(1,:)=randsample([0 0.5 1 1.5 2 2.5 3
4 5 6],1); %PV
        gen(i).Yapilanma.adet(1,:)=randsample([1 2 3 4],1);
        gen(i).Yapilanma.tip(2,:)=randsample([0 0.5 1 1.5 2 3 3.5
5 6 7],1); %WT
        gen(i).Yapilanma.adet(2,:)=randsample([1 2 3],1);
        gen(i).Yapilanma.tip(3,:)=randsample([0 1 2 3 4 5 6],1);
        %FC
        gen(i).Yapilanma.adet(3,:)=randsample([1 2 3],1);
        gen(i).Yapilanma.tip(4,:)=randsample([0 1 2 3 4 5],1);
        %ELC
        gen(i).Yapilanma.adet(4,:)=randsample([1 2],1);
        gen(i).Yapilanma.tip(5,:)=randsample([0 1 1.5 2 2.5],1);
        %Hidrojen Tank (kg)
```



```

        esit=esit+1;
    end
end
denk=0;
for l=1:w
    if v(x(l),:)==y(x(l),:)
        denk=denk+1;
    end
end
if esit==q && denk>=1
    ayni_adet(k)=ayni_adet(k)+1;
end
end

end
ayni(k)=ayni_tip(k)+ayni_adet(k);
end
end

if all (ayni<2)
    break;
end

end

[LPSP] =
SAHRESOpt_GucYonetimi_Stratejisi_SON_dzl(gen(i).Yapilanma.tip(
1),gen(i).Yapilanma.adet(1),gen(i).Yapilanma.tip(2),gen(i).Yapilanma.adet(2),gen(i).Yapilanma.tip(3),gen(i).Yapilanma.adet(3),gen(i).Yapilanma.tip(4),gen(i).Yapilanma.adet(4),gen(i).Yapilanma.tip(5),gen(i).Yapilanma.adet(5),gen(i).Yapilanma.tip(6,:));
    if LPSP <= 20
        [ AC ] =
maliyet_RFR(gen(i).Yapilanma.tip(1),gen(i).Yapilanma.adet(1),gen(i).Yapilanma.tip(2),gen(i).Yapilanma.adet(2),gen(i).Yapilanma.tip(3),gen(i).Yapilanma.adet(3),gen(i).Yapilanma.tip(4),gen(i).Yapilanma.adet(4),gen(i).Yapilanma.tip(5),gen(i).Yapilanma.adet(5),gen(i).Yapilanma.tip(6,:));

        gen(i).Amacfonklr=[AC,LPSP]';
        fprintf('gen(%d).Amacfonklr= %d, %d \n',i,
gen(i).Amacfonklr);
        i=i+1;
    else
        %i=i;
        gen(i).Amacfonklr=0;
        %fprintf('gen(%d).Amacfonklr= %d\n',i,
gen(i).Amacfonklr);
    end

    if i==ngen+1 && gen(i-1).Amacfonklr(1,1)~=0
        break;
    end
end

```



```

        k=1;
    if d~=1
        for k=1:d-1
            for n=1:2
                if
genc(d,n).Yapilanma.tip(:, :)==genc(k,1).Yapilanma.tip(:, :);
                    ayni_tip_c(k,n)=ayni_tip_c(k,n)+1;
                    if
genc(d,n).Yapilanma.adet(:, :)==genc(k,1).Yapilanma.adet(:, :);
                    ayni_adet_c(k,n)=ayni_adet_c(k,n)+1;
                    end

                    if
any(genc(d,n).Yapilanma.tip(:, :)==0)

[x,y]=find(genc(d,n).Yapilanma.tip(:, :)==0);
                    indices
=find(genc(d,n).Yapilanma.tip(:, :));
                    q=length(indices);
                    if genc(d,n).Yapilanma.tip(6, :)==0;
                    q=q-1;
                    end
                    w=length(x);
                    y=genc(d,n).Yapilanma.adet;
                    v=genc(k,1).Yapilanma.adet;
                    esit=0;
                    for t=1:q
                        if
y(indices(t), :)==v(indices(t), :);
                            esit=esit+1;
                        end
                    end
                    denk=0;
                    for l=1:w
                        if v(x(l), :)==y(x(l), :);
                            denk=denk+1;
                        end
                    end
                    if esit==q && denk>=1

ayni_adet_c(k,n)=ayni_adet_c(k,n)+1;
                    end
                    end

ayni_c(k,n)=ayni_tip_c(k,n)+ayni_adet_c(k,n);
                    end
                end
            end
        for k=1:d-1
            for n=1:2
                if n==1
                    p=3;
                else
                    p=4;
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        if
genc(d,n).Yapilanma.tip(:, :) == genc(k,2).Yapilanma.tip(:, :)
            ayni_tip_c(k,p) = ayni_tip_c(k,p) + 1;
        if
genc(d,n).Yapilanma.adet(:, :) == genc(k,2).Yapilanma.adet(:, :)
            ayni_adet_c(k,p) = ayni_adet_c(k,p) + 1;
        end

        if
any(genc(d,n).Yapilanma.tip(:, :) == 0)

[x,y] = find(genc(d,n).Yapilanma.tip(:, :) == 0);
        indices
= find(genc(d,n).Yapilanma.tip(:, :));
        q = length(indices);
        if genc(d,n).Yapilanma.tip(6, :) ~ = 0;
            q = q - 1;
        end
        w = length(x);
        y = genc(d,n).Yapilanma.adet;
        v = genc(k,2).Yapilanma.adet;
        esit = 0;
        for t = 1:q
            if
y(indices(t), :) == v(indices(t), :)
                esit = esit + 1;
            end
        end
        denk = 0;
        for l = 1:w
            if v(x(l), :) ~ = y(x(l), :)
                denk = denk + 1;
            end
        end
        if esit == q && denk >= 1

ayni_adet_c(k,p) = ayni_adet_c(k,p) + 1;
        end
        end

        end

ayni_c(k,p) = ayni_tip_c(k,p) + ayni_adet_c(k,p);
        end
    end
    for k = 1:ngen
        for n = 1:2
            if n == 1
                z = 5;
            else
                z = 6;
            end
            if
genc(d,n).Yapilanma.tip(:, :) == gen(k).Yapilanma.tip(:, :)
                ayni_tip_c(k,z) = ayni_tip_c(k,z) + 1;

```

```

        if
genc(d,n).Yapilanma.adet(:,z)==genc(k).Yapilanma.adet(:,z)
        aynı_adet_c(k,z)=ayni_adet_c(k,z)+1;
        end

        if
any(genc(d,n).Yapilanma.tip(:,z)==0)

[x,y]=find(genc(d,n).Yapilanma.tip(:,z)==0);
        indices
=find(genc(d,n).Yapilanma.tip(:,z));
        q=length(indices);
        if genc(d,n).Yapilanma.tip(6,:)~=0;
            q=q-1;
        end
        w=length(x);
        y=genc(d,n).Yapilanma.adet;
        v=genc(k).Yapilanma.adet;
        esit=0;
        for t=1:q
            if
y(indices(t),:)==v(indices(t),:)
                esit=esit+1;
            end
        end
        denk=0;
        for l=1:w
            if v(x(l),:)==y(x(l),:)
                denk=denk+1;
            end
        end
        if esit==q && denk>=1

ayni_adet_c(k,z)=ayni_adet_c(k,z)+1;
        end
        end

        end
        aynı_c(k,z)=ayni_tip_c(k,z)+ayni_adet_c(k,z);
    end
end

if all (ayni_c<2)
    break;
end

end

[LPSP] =
SAHRESOpt_GucYonetimi_Stratejisi_SON_dzl(genc(d,1).Yapilanma.t
ip(1),genc(d,1).Yapilanma.adet(1),genc(d,1).Yapilanma.tip(2),g
enc(d,1).Yapilanma.adet(2),genc(d,1).Yapilanma.tip(3),genc(d,1
).Yapilanma.adet(3),genc(d,1).Yapilanma.tip(4),genc(d,1).Yapil
anma.adet(4),genc(d,1).Yapilanma.tip(5),genc(d,1).Yapilanma.ad
et(5),genc(d,1).Yapilanma.tip(6,:));

```

```

        if LPSP<20
            [ AC ] =
maliyet_RFR(genc(d,1).Yapilanma.tip(1),genc(d,1).Yapilanma.adet(1),genc(d,1).Yapilanma.tip(2),genc(d,1).Yapilanma.adet(2),genc(d,1).Yapilanma.tip(3),genc(d,1).Yapilanma.adet(3),genc(d,1).Yapilanma.tip(4),genc(d,1).Yapilanma.adet(4),genc(d,1).Yapilanma.tip(5),genc(d,1).Yapilanma.adet(5),genc(d,1).Yapilanma.tip(6,:));
            genc(d,1).Amacfonklr=[AC,LPSP]';
            genf(f)=genc(d,1);
            f=f+1;
        else
            genc(d,1).Amacfonklr=0;
        end

        [LPSP] =
SAHRESOpt_GucYonnetimi_Stratejisi_SON_dzl(genc(d,2).Yapilanma.tip(1),genc(d,2).Yapilanma.adet(1),genc(d,2).Yapilanma.tip(2),genc(d,2).Yapilanma.adet(2),genc(d,2).Yapilanma.tip(3),genc(d,2).Yapilanma.adet(3),genc(d,2).Yapilanma.tip(4),genc(d,2).Yapilanma.adet(4),genc(d,2).Yapilanma.tip(5),genc(d,2).Yapilanma.adet(5),genc(d,2).Yapilanma.tip(6,:));

        if LPSP<20
            [ AC ] =
maliyet_RFR(genc(d,2).Yapilanma.tip(1),genc(d,2).Yapilanma.adet(1),genc(d,2).Yapilanma.tip(2),genc(d,2).Yapilanma.adet(2),genc(d,2).Yapilanma.tip(3),genc(d,2).Yapilanma.adet(3),genc(d,2).Yapilanma.tip(4),genc(d,2).Yapilanma.adet(4),genc(d,2).Yapilanma.tip(5),genc(d,2).Yapilanma.adet(5),genc(d,2).Yapilanma.tip(6,:));
            genc(d,2).Amacfonklr=[AC,LPSP]';
            genf(f)=genc(d,2);
            f=f+1;

        else
            genc(d,2).Amacfonklr=0;
        end

        d=d+1;

        if f>nc
            break;
        end

    end

    % nc/2 * 2 lik genc yapısını nc/2*1 lik yapıya
dönüştürme
    genc=genc(:); %#ok
    genf=genf(1:nc); % genf nc sayısından 1 fazla
olabiliyor. bu şekilde boyutunu nc ye ayarlamış oluyoruz.
    genc=genf;

```



```

        if esit==q && denk>=1
            ayni_adet_m(k,1)=ayni_adet_m(k,1)+1;
        end
    end

    end
    ayni_m(k,1)=ayni_tip_m(k,1)+ayni_adet_m(k,1);
end

for k=1:nc
    if
genm(d).Yapilanma.tip(:,')==genc(k).Yapilanma.tip(:,')
        ayni_tip_m(k,2)=ayni_tip_m(k,2)+1;
        if
genm(d).Yapilanma.adet(:,')==genc(k).Yapilanma.adet(:,')
            ayni_adet_m(k,2)=ayni_adet_m(k,2)+1;
        end

        if any(genm(d).Yapilanma.tip(:,')==0)
%
            [x,y]=find(genm(d).Yapilanma.tip(:,')==0);
            indices =find(genm(d).Yapilanma.tip(:,')==0);
            q=length(indices);
            if genm(d).Yapilanma.tip(6,')~=0;
                q=q-1;
            end
            w=length(x);
            y=genm(d).Yapilanma.adet;
            v=genc(k).Yapilanma.adet;
            esit=0;
            for t=1:q
                if y(indices(t),')==v(indices(t),')
                    esit=esit+1;
                end
            end
            denk=0;
            for l=1:w
                if v(x(l),')~=y(x(l),')
                    denk=denk+1;
                end
            end
            if esit==q && denk>=1
                ayni_adet_m(k,2)=ayni_adet_m(k,2)+1;
            end
        end

        end
        ayni_m(k,2)=ayni_tip_m(k,2)+ayni_adet_m(k,2);
    end

    if all (ayni_m<2)
        break;
    end

    end
end

```



```
xlabel('1. Amaç (ACS) ($/yıl)');  
ylabel('2. Amaç (LPSP) (%)');  
title('Non-dominated (Bastırılmayan) Çözümler (1. Pareto  
Cephe)');  
grid on;
```