T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞEBEKEYE BAĞLI HİBRİT YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİNİN TASARIMI VE OPTİMİZASYONU ÜZERİNE BİR MODEL ÖNERİSİ VE UYGULAMASI

DOKTORA TEZİ

OZAN ÇAPRAZ

DENİZLİ, ARALIK - 2020

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞEBEKEYE BAĞLI HİBRİT YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİNİN TASARIMI VE OPTİMİZASYONU ÜZERİNE BİR MODEL ÖNERİSİ VE UYGULAMASI

DOKTORA TEZİ

OZAN ÇAPRAZ

DENİZLİ, ARALIK - 2020

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

Ozan ÇAPRAZ

ÖZET

ŞEBEKEYE BAĞLI HİBRİT YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİNİN TASARIMI VE OPTİMİZASYONU ÜZERİNE BİR MODEL ÖNERİSİ VE UYGULAMASI

DOKTORA TEZİ

OZAN ÇAPRAZ

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. AŞKINER GÜNGÖR)
(İKİNCİ DANIŞMAN: PROF. DR. AYSUN SAĞBAŞ)
DENİZLİ, ARALIK - 2020

Artan çevresel baskılar sebebiyle hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin (HRES) kullanımının küresel ölçekte artması beklenmektedir. Dolayısıyla mevcut yenilenebilir enerji kaynaklarını verimli ve ekonomik bir şekilde kullanırken çevreye etkilerin azaltılmasını hedefleyen modellere ihtiyaç olacaktır. Bu amaçla, ilk olarak hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin (HRES) optimum boyutlandırma problemi ile ilgili literatür kapsamlı olarak araştırılmış ve bu problem çeşitli yönlerine göre sınıflandırılmıştır. Elde edilen bulgular ile güncel eğilimlerin altı çizilerek enerji ve çevre alanındaki araştırmacılar, yöneticiler ve karar vericiler için kapsamlı ve zengin bir içerik sunulmuştur ve yeni çalışmalara kaynak oluşturulması amaçlanmıştır.

Literatür incelemesi sonucunda, şebekeye bağlı HRES'lerin (GC-HRES) çok amaçlı optimizasyonu konusunda araştırma yapılmasına ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. Bu tez çalışması, enerji depolama sistemi olmayan şebekeye bağlı HRES'lerin (GC-HRES-WS) optimum boyutlandırılması alanında ekonomik ve çevresel kriterleri göz önüne bulunduran ve literatürde nadiren entegre bir şekilde kullanılan kısıtları bütünsel olarak birleştiren genelleştirilmiş bir ağırlıklı çok amaçlı karma tam sayılı doğrusal programlama (WMO-MILP) modeli önererek ilgili literatürün gelişimine katkı sağlamaktadır. Çok amaçlı model, toplam maliyetin net bugünkü değerinin minimizasyonu ve yıllık CO_2 emisyonunun minimizasyonu olarak belirlenen amaç fonksiyonlarına atanan ve karar vericinin maliyet temelli, çevre temelli veya kısmen maliyet ve çevre temelli önceliklerini temsil eden ağırlıklar sayesinde maliyet ve CO_2 emisyonu arasındaki ödünleşimi değerlendirmektedir.

Önerilen modelde, meteorolojik verilerin ve elektrik talebinin stokastik doğasını ele almak için Monte Carlo simülasyonu yaklaşımı ile optimizasyon süreci birleştirilmiştir. Modelin değerini ve uygulanabilirliğini göstermek için çeşitli duyarlılık analizleri ile birlikte bir vaka analizi üzerinde çalışılmıştır. Elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının ve dolayısıyla CO_2 emisyonun azaltılmasının teşvik edilmesi tezin uygulamaya katkılarıdır.

ANAHTAR KELİMELER: Şebekeye bağlı hibrit yenilenebilir enerji sistemleri, Yenilenebilir enerji kaynakları, Çok amaçlı optimizasyon, Boyutlandırma, Monte Carlo simülasyonu

ABSTRACT

A MODEL PROPOSAL FOR DESIGN AND OPTIMIZATION OF GRID-CONNECTED HYBRID RENEWABLE ENERGY SYSTEMS AND ITS APPLICATION

PH.D THESIS

OZAN ÇAPRAZ

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

INDUSTRIAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. AŞKINER GÜNGÖR)

(SECOND SUPERVISOR: PROF. DR. AYSUN SAĞBAŞ)

DENİZLİ, DECEMBER 2020

It is expected to increase the use of hybrid renewable energy systems (HRES) in the world due to the growing environmental concerns about emissions resulting from fossil fuels. Therefore, it is necessary to develop models to use the existing renewable energy sources efficiently and economically while reducing the negative environmental effects. In this thesis, at first, an extensive literature review study has been conducted on HRES optimum sizing problem and the problem has been classified according to its various aspects. Using the findings, the current trends have been underlined and an extensive content has been presented for researchers, managers, and decision-makers in the field of energy and environment. Besides, it is aimed to provide a basis by in-depth analyzing the issue of the HRES optimal sizing problem for new studies.

As a result of a detailed literature review, it is found that there is a need for studying the multi-objective optimization of grid-connected HRES (GC-HRES). This thesis contributes to relatively less studied area of the literature by proposing a generalized weighted multi-objective mixed-integer linear programming (WMO-MILP) model considering economic and environmental issues for the optimal sizing of the GC-HRES without storage (GC-HRES-WS). The WMO-MILP model holistically combines the constraints which are rarely considered in an integrated way in the literature. In the multi-objective model, minimization of the net present value of total cost and minimization of annual CO_2 emission are the objective functions. The proposed WMO-MILP model is capable of evaluating the trade-off between economic and environmental objectives by allocating them various weights resembling the decision maker's cost-based, environmental-based, or partially cost- and environmental-based priorities.

In the model, the Monte Carlo simulation approach has been combined with the optimization process to take into account the stochastic nature of meteorological data and electricity demand. Finally, a case study with various sensitivity analyses has been analyzed to show the value and applicability of the model. Encouraging the use of renewable energy sources in electricity generation and, thus reducing CO_2 emissions are the practical contributions of this thesis.

KEYWORDS: Grid-connected hybrid renewable energy systems, Renewable energy sources, Multi-objective optimization, Sizing, Monte Carlo simulation

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **i**
ABSTRACT ..... **ii**
İÇİNDEKİLER ..... **iii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **v**
TABLO LİSTESİ ..... **viii**
KISALTMALAR LİSTESİ ..... **ix**
ÖNSÖZ ..... **xv**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı 8
1.2 Tezin Önemi 9
1.3 Tezin Organizasyonu 12
2. HİBRİT YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİNİN TASARIMI ÜZERİNE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **13**
2.1 HRES Tasarımında Kullanılan Yöntemler 28
2.1.1 Geleneksel Yöntemler 28
2.1.2 Geleneksel Olmayan Yöntemler (Yapay Zekâ Yöntemleri) 30
2.1.3 Yazılım 33
2.1.4 Genel Değerlendirme 34
2.2 HRES Tasarımında Kullanılan Amaç Fonksiyonları 36
2.2.1 Genel Değerlendirme 37
2.3 HRES Tasarımında Kullanılan Göstergeler 39
2.3.1 Ekonomik Göstergeler 40
2.3.1.1 Sistem Maliyeti (SC) 40
2.3.1.2 Yaşam Döngü Maliyeti (LCC) 42
2.3.1.3 Yaşam Döngü Birim Maliyeti (LUC) 43
2.3.1.4 Yıllık Sistem Maliyeti (ACS) 43
2.3.1.5 Enerji Maliyeti (COE) 44
2.3.1.6 Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (LCOE) 44
2.3.1.7 Genel Değerlendirme 45
2.3.2 Güvenilirlik göstergeleri 45
2.3.2.1 Beklenen Enerji Kaybı (LOEE) 46
2.3.2.2 Beklenen Yük Kaybı (LOLE) 46
2.3.2.3 Güç Tedarik Kaybı Olasılığı (LPSP) 47
2.3.2.4 Otonomi Seviyesi (LA) 48
2.3.2.5 Eşdeğer Kayıp Faktörü (ELF) 48
2.3.2.6 Karşılanmayan Yük (UL) 49
2.3.2.7 Genel Değerlendirme 49
2.3.3 Çevresel göstergeler 50
2.3.3.1 CO_2 Emisyonu 50
2.3.3.2 Yenilenebilir Enerji Oranı (RER) 51
2.3.3.3 Genel Değerlendirme 52
2.4 HRES Tasarımında Kullanılan Çalışma Şekilleri 52
2.4.1 Şebekeye bağlı olmayan HRES (SA-HRES) 53
2.4.2 Şebekeye bağlı HRES (GC-HRES) 55
2.4.3 Genel Değerlendirme 57

2.5 HRES Tasarımında Kullanılan Enerji Kaynakları 58
2.5.1 Rüzgâr Enerjisi Sisteminin Modellenmesi 58
2.5.2 PV Sisteminin Modellenmesi 60
2.5.3 Akü Depolama Sisteminin Modellenmesi 61
2.5.4 Genel Değerlendirme 63
2.6 Elde Edilen Bulguların Değerlendirilmesi ve Yorumlanması 63
3. ŞEBEKEYE BAĞLI HİBRİT YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİNİN TASARIMI ÜZERİNE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 67
4. YÖNTEM 76
4.1 Optimizasyon Modelleri 76
4.2 Rassal Sayılar ve Monte Carlo Simülasyonu 80
5. GC-HRES-WS'NİN OPTİMUM BOYUTLANDIRILMASI İÇİN GENELLEŞTİRİLMİŞ WMO-MILP MODELİ 82
5.1 Varsayımlar 84
5.2 Kümeler ve İndisler, Parametreler ve Karar Değişkenleri 84
5.3 Amaç Fonksiyonları 86
5.4 Kısıtlar 93
6. VAKA ÇALIŞMASI 96
6.1 Stokastik Veriler 96
6.2 Teknik Veriler 108
6.3 Ekonomik Veriler 110
6.4 Operasyonel Veriler 111
6.5 Diğer Veriler 112
7. SAYISAL SONUÇLAR VE ANALİZ 113
7.1 Amaç Fonksiyonları ve Yatırım Karar Değişkenlerinin Analizi 113
7.2 Amaç Fonksiyonlarının Ağırlıklarının Analizi 115
7.3 Operasyonel Karar Değişkenlerinin Analizi 118
7.4 Yenilenebilir Enerji Kaynakları Penetrasyon Seviyesi Analizi 120
7.5 Yatırım Maliyetlerinin Analizi 122
7.6 Çevresel Etkilerin Analizi 124
8. SONUÇLAR VE GENEL DEĞERLENDİRME 125
9. KAYNAKLAR 128
10. EKLER 147
11. ÖZGEÇMİŞ 163

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Dünya'da birincil enerji tüketiminin yıllar bazında değişimi (BP 2020) 1
Şekil 1.2: Türkiye'de birincil enerji tüketiminin yıllar bazında değişimi (BP 2020) 2
Şekil 1.3: Dünya birincil enerji tüketiminde kaynakların payları (%) (2018) (BP 2020) 3
Şekil 1.4: Türkiye birincil enerji tüketiminde kaynakların payları (%) (2018) (BP 2020) 3
Şekil 1.5: Dünya'da yakıt türlerine göre CO_2 emisyonu miktarlarının yıllara göre değişimi (CDIAC 2020; GCP 2020) 4
Şekil 1.6: Kaynaklara göre Dünya'da elektrik üretiminin tahmini (IEA 2020) 5
Şekil 1.7: Hibrit yenilenebilir enerji sistemleri için genel bir gösterim 6
Şekil 1.8: Türkiye elektrik enerjisi talep projeksiyonu 9
Şekil 1.9: Türkiye kurulu gücünün 2009-2019 yılları için birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı (TEİAŞ 2019) 10
Şekil 1.10: Türkiye'nin toplam üretimi içinde yenilenebilir kaynaklı elektrik enerjisi üretiminin yıllara göre gelişimi (TEİAŞ 2019) 10
Şekil 2.1: Literatür taramasında incelenen makalelerin yıllara göre dağılımı 13
Şekil 2.2: HRES optimum boyutlandırma üzerine yapılan çalışmalarda ele alınan boyutlar 14
Şekil 2.3: Literatür taramasında incelenen makalelerde yöntemlerin kullanım sayıları 35
Şekil 2.4: Literatür taramasında incelenen makalelerde AI yöntemlerin kullanım sayıları 35
Şekil 2.5: Literatür taramasında incelenen makalelerde SO ve MO optimizasyon çalışmalarının kullanım sayıları 38
Şekil 2.6: Literatür taramasında incelenen MO optimizasyon çalışmalarının yıllara göre dağılımı 38
Şekil 2.7: Literatür taramasında incelenen makalelerde ekonomik, güvenilirlik ve çevresel göstergelerin toplam kullanım sayıları 39
Şekil 2.8: Literatür taramasında incelenen makalelerde ekonomik, güvenilirlik ve çevresel göstergelerin dağılımı 39
Şekil 2.9: Literatür taramasında incelenen makalelerde ekonomik göstergelerin kullanım sayıları 45
Şekil 2.10: Literatür taramasında incelenen makalelerde güvenilirlik göstergelerinin kullanım sayıları 50
Şekil 2.11: Literatür taramasında incelenen makalelerde çevresel göstergelerin kullanım sayıları 52
Şekil 2.12: Tipik bir şebekeye bağlı olmayan HRES'in elementleri ve çalışma şekli 53
Şekil 2.13: Depolama sistemlerinin kullanılması durumunda enerji üretimi 54
Şekil 2.14: Tipik bir şebekeye bağlı HRES'in elementleri ve çalışma şekli 56
Şekil 2.15: Literatür taramasında incelenen makalelerde şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı sistemlerin kullanım sayıları 57

Şekil 2.16: Literatür taramasında incelenen makalelerde şebekeye bağlı çalışmaların yıllara göre dağılımı 57
Şekil 2.17: Tipik bir rüzgâr türbini için güç eğrisi 59
Şekil 2.18: Literatür taramasında incelenen makalelerde enerji kaynakları, depolama sistemleri ve yardımcı araçların hibrit sistem bileşeni olarak kullanım sayıları 63
Şekil 2.19: IEA PVPS ülkelerinde 1992-2010 arasında kümülatif SA- ve GC-PV sistemlerinin kurulu gücünün değişimi 65
Şekil 2.20: ABD'de PV sistem fiyatlarının ve kurulu gücünün yıllara göre değişimi (SEIA 2020) 66
Şekil 4.1: Pareto optimal cephenin gösterimi 79
Şekil 5.1: GC-HRES-WS'lerin girdilerini, boyutlandırma süreç adımlarını ve çıktılarını gösteren bir akış diyagramı 83
Şekil 5.2: Doğrusal amortisman yöntemine göre hurda değerinin gösterimi 89
Şekil 5.3: Planlama periyodu boyunca oluşan $r = 1$ ve $s = 1$ için maliyetlerin ve gelirlerin zaman ekseni üzerinde gösterilmesi 91
Şekil 6.1: Talep noktasının günlük ortalama saatlik elektrik tüketimi verileri (Wh) 96
Şekil 6.2: (a) Bir yıl boyunca saatlik ortalama rüzgâr hızı (m/s) ve (b) yılın 2329. ile 2352. saatleri arasında saatlik rüzgâr hızı (m/s) verileri 97
Şekil 6.3: (a) Bir yıl boyunca saatlik ortalama sıcaklık (°C) ve (b) yılın 2353. ile 2376. saatleri arasında saatlik sıcaklık (°C) verileri 97
Şekil 6.4: Aylık ortalama saatlik (2002-2006) güneş radyasyonu (W/m^2) 98
Şekil 6.5: ARENA 14.0 Input Analyzer kısmında olasılık dağılım fonksiyonlarının belirlenmesi ve rassal veri üretilmesi adımları 107
Şekil 6.6: Gerçekleşen ve rassal üretilen talep değerlerinin karşılaştırılması (Wh) 108
Şekil 6.7: Çalışmada ele alınan rüzgâr türbinleri 109
Şekil 6.8: Çalışmada ele alınan PV paneller 110
Şekil 7.1: Optimize edilmiş GC-HRES-WS tasarımında NPV(TR) ve NPV(TC)'yi oluşturan kalemlerin dağılımı 114
Şekil 7.2: Pareto çözümler kümesi (Maliyet vs. CO_2 emisyonu) 116
Şekil 7.3: WT tarafından üretilen elektriğin ve talebin zaman içindeki değişimi 119
Şekil 7.4: PV paneller tarafından üretilen elektriğin ve talebin zaman içindeki değişimi 119
Şekil 7.5: Şebekeden alınacak ve şebekeye satılacak elektriğin ve talebin zaman içinde değişimi 120
Şekil 7.6: Minimum yenilenebilir enerji penetrasyon seviyesine göre amaç fonksiyonlarındaki değişim 121
Şekil 7.7: Yenilenebilir enerji üretim birimlerinin yatırım maliyetindeki yüzde değişimlerin birinci amaç fonksiyonuna etkisi 123
Şekil 7.8: Yenilenebilir enerji üretim birimlerinin yatırım maliyetindeki yüzde değişimlerin ikinci amaç fonksiyonuna etkisi 123
Şekil 10.1: Aeolos-V 600W rüzgâr türbini özellikleri (Aeolos-V600W 2019) 147
Şekil 10.2: Honeywell WT6500 1,5 kW rüzgâr türbini özellikleri (Honeywell WT6500 1.5 kW 2019) 150
Şekil 10.3: LG 300 W Mono-kristal PV panel özellikleri (LG 300 W Monocrystalline PV panel 2019) 152

Şekil 10.4: Canadian Solar 270 W Poli-kristal PV panel özellikleri
(Canadian Solar 270 W Polycrystalline PV panel 2019) 154
Şekil 10.5: Renogy 100 W Mono-kristal PV panel özellikleri
(Renogy 100 W Monocrystalline PV panel 2019) 156

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: Türkiye'nin toplam yenilenebilir enerji potansiyeli, 2013 yılında kurulu gücü (MW) ve 2015-2023 yılları arasında elektrik üretimi için hedefleri (MW) 11
Tablo 2.1: Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması üzerine literatür incelemesi 15
Tablo 3.1: Şebekeye bağlı hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması üzerine literatür incelemesi 68
Tablo 6.1: Saatlik rüzgâr hızı olasılık dağılım fonksiyonları (m/s) 101
Tablo 6.2: Saatlik güneş radyasyonu olasılık dağılım fonksiyonları (W/m^2) . 104
Tablo 6.3: Saatlik elektrik talebi olasılık dağılım fonksiyonları (Wh) 108
Tablo 6.4: Rüzgâr türbinleri ve PV panelleri için modelde kullanılan ekonomik parametreler 111
Tablo 6.5: Modelde kullanılan diğer ekonomik parametreler 111
Tablo 7.1: Temel senaryo için yatırım karar değişkenleri 113
Tablo 7.2: Sadece şebekeden enerji alınması ve optimize edilmiş GC-HRES-WS için amaç fonksiyonlarının karşılaştırılması 115
Tablo 7.3: Farklı ağırlık kombinasyonları altında model sonuçlarının karşılaştırılması 116
Tablo 7.4: Minimum yenilenebilir enerji penetrasyon seviyesine göre yatırım karar değişkenlerindeki değişim 121
Tablo 7.5: Farklı ağırlık kombinasyonları altında kirletici emisyon miktarının karşılaştırılması 124
Tablo 10.1: Farklı ağırlık kombinasyonları (0,01 aralıklarla) altında model sonuçlarının karşılaştırılması 158
Tablo 10.2: Aylık bazda operasyonel karar değişkenlerinin değişimi (kWh) 162

KISALTMALAR LİSTESİ

ABC	**:**	Yapay arı kolonisi (Artificial bee colony)
ABSO	**:**	Yapay arı sürü optimizasyonu (Artificial bee swarm optimization)
ACO	**:**	Karınca kolonisi optimizasyonu (Ant colony optimization)
ACS	**:**	Sistemin yıllık maliyeti (Annualized cost of the system)
AEPC	**:**	Ortalama elektrik üretim maliyeti (Average electricity production cost)
AGC	**:**	Ortalama üretim maliyeti (Average generation cost)
ANFIS	**:**	Uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (Adaptive neuro-fuzzy inference system)
ANN	**:**	Yapay sinir ağları (Artificial neural network)
AR	**:**	Hava buzdolabı (Air refrigerator)
ATC	**:**	Yıllık toplam maliyet (Annualized total cost)
BB-BC	**:**	Büyük patlama büyük çöküş algoritması (Big bang-big crunch algorithm)
BBO	**:**	Biyocoğrafya tabanlı optimizasyon (Biogeography based optimization)
BDG	**:**	Biyodizel jeneratör (Biodiesel generator)
BEPA	**:**	Başabaş noktası analizi (Break-even point analysis)
BESS	**:**	Batarya enerji depolama sistemi (Battery energy storage system)
BG	**:**	Biyogaz (Biogas)
BM	**:**	Biyokütle (Biomass)
BTS	**:**	Temel teknik boyutlandırma (Basic technical sizing)
CC	**:**	Sermaye maliyeti (Capital cost)
CEGA	**:**	Kontrollü elitist genetik algoritma (Controlled elitist genetic algorithm)
CI	**:**	Sermaye yatırımı (Capital investment)
CLONALG	**:**	Klonal seçim algoritması (Clonal selection algorithm)
CLPSO	**:**	Kapsamlı öğrenmeli parçacık sürü optimizasyonu (Comprehensive learning particle swarm optimization)

CO_2	**:**	Karbondioksit (Carbondioxide)
COE	**:**	Enerji maliyeti (Cost of energy)
CS	**:**	Kaotik arama (Chaotic search)
CSA	**:**	Kaotik tavlama benzetimi (Chaotic simulated annealing)
CSAHS	**:**	Kaotik tavlama benzetimi tabanlı harmoni arama (Chaotic simulated annealing-based harmony search)
CuS	**:**	Guguk kuşu arama algoritması (Cuckoo search)
DE	**:**	Diferansiyel gelişim (Differential evolution)
DEF	**:**	Dizel enerji fraksiyonu (Diesel energy fraction)
DG	**:**	Dizel jeneratör (Diesel generator)
DPSP	**:**	Güç tedarik eksikliği olasılığı (Deficiency of power supply probability)
DPT	**:**	Devlet planlama teşkilatı (State planning organization)
EA	**:**	Evrimsel algoritma (Evolutionary algorithm)
EE	**:**	Gömülü enerji (Embodied energy)
EENS	**:**	Karşılanmaması beklenen enerji (Expected energy not supplied)
EIA	**:**	Enerji Enformasyon İdaresi (Energy Information Administration)
EIR	**:**	Enerji indeks oranı (Energy index ratio)
EİGM	**:**	T.C. Enerji İşleri Genel Müdürlüğü (Republic of Turkey Ministry of Energy and Natural Resource)
EL	**:**	Elektrolizör (Electrolyzer)
ELF	**:**	Eşdeğer kayıp faktörü (Equivalent loss factor)
ENS	**:**	Sağlanmayan enerji (Energy not supplied)
EPDK	**:**	T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (Republic of Turkey Energy Market Regulatory Authority)
EPG	**:**	Güç üretimi fazlası (Excess of power generation)
ETKB	**:**	T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (Republic of Turkey Ministry of Energy and Natural Resources)
EXC	**:**	Fazla enerjinin yüzdesi (Percentage of excess energy)
FC	**:**	Yakıt hücresi (Fuel cell)

FE	**:**	Yakıt emisyonu (Fuel emission)
FFA	**:**	Ateşböceği algoritması (Firefly algorithm)
FFO	**:**	Meyve sineği optimizasyon algoritması (Fruit fly optimization)
FL	**:**	Yakıt emisyonları (Fuel emissions)
FPA	**:**	Çiçek tozlaşma algoritması (Flower pollination algorithm)
G	**:**	Benzin (Gasoline)
GA	**:**	Genetik algoritma (Genetic algorithm)
GC	**:**	Şebeke bağlantısı (Grid connection)
GC-HRES	**:**	Şebekeye bağlı hibrit yenilenebilir enerji sistemi (Grid-connected hybrid renewable energy system)
GC-HRES-WS	**:**	Şebekeye bağlı ve depolama sistemi olmayan HRES (Grid-connected HRES without storage)
GCM	**:**	Grafik yapım yöntemi (Graphical construction method)
GCS	**:**	Şebekeye bağlı sistem (Grid-connected system)
GHG	**:**	Sera gazı emisyonu (Greenhouse gas emission)
GWO	**:**	Gri kurt optimizasyon (Grey wolf optimization)
HGC	**:**	Hibrit jeneratör maliyeti (Hybrid generator cost)
HOGA	**:**	Genetik algoritmalar ile hibrit optimizasyon (Hybrid optimization by genetic algorithms)
HOMER	**:**	Yenilenebilir elektrik için hibrit optimizasyon modeli (Hybrid optimization of multiple energy resources)
HP	**:**	Isı pompası (Heat pump)
HRES	**:**	Hibrit yenilenebilir enerji sistemi (Hybrid renewable energy system)
HS	**:**	Harmoni arama (Harmony search)
HT	**:**	Hidrojen tankı (Hydrogen tank)
IC	**:**	İlk yatırım maliyeti (Initial cost)
ICA	**:**	Emperyalist rekabetçi algoritması (Imperialist competitive algorithm)
IEA	**:**	Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)
IFFO	**:**	Geliştirilmiş meyve sineği optimizasyon algoritması (Improved fruit fly optimization)

IHS : Geliştirilmiş harmoni arama
(Improved harmony search)
IHSBSA : Geliştirilmiş harmoni arama tabanlı tavlama benzetimi
(Improved harmony search-based simulated annealing)
IIR : Sonsuz dürtü yanıtı
(Infinite impulse response)
IOM : İteratif optimizasyon yöntemi
(Iterative optimization method)
IP : Tam sayılı programlama
(Integer programming)
IPSO : Geliştirilmiş parçacık sürü optimizasyonu
(Improved particle swarm optimization)
IRR : İç karlılık oranı
(Internal rate of return)
LA : Otonomi seviyesi
(Level of autonomy)
LCC : Yaşam döngü maliyeti
(Life cycle cost)
LCOE : Seviyelendirilmiş enerji maliyeti
(Levelized cost of energy)
LOEE : Beklenen enerji kaybı
(Loss of energy expected)
LOLE : Beklenen yük kaybı
(Loss of load expectation)
LOLF : Yük frekansı kaybı
Loss of load frequency
LOLH : Yük saatleri kaybı
(Loss of load hours)
LOLP : Yük kaybı olasılığı
(Loss of load probability)
LOLR : Yük riskleri kaybı
(Loss of load risk)
LP : Doğrusal programlama
(Linear programming)
LPSP : Güç tedarik kaybı olasılığı
(Loss of power supply probability)
LSM : En küçük kareler yöntemi
(Least squared method)
LUC : Yaşam döngü birim maliyeti
(Life cycle unit cost)
MBA : Mayın patlatma algoritması
(Mine blast algorithm)
MC : Bakım maliyeti
(Maintenance cost)
MILP : Karma tam sayılı doğrusal programlama
(Mixed-integer linear programming)
MLP : Çok katmanlı algılayıcılar
(Multi-layer perceptrons)
MO : Çok amaçlı
(Multi objective)

NGB	**:**	Doğalgaz buhar kazanı (Natural gas boiler)
NPV	**:**	Net bugünkü değer (Net present value)
NSGA-II	**:**	Domine edilmemiş sınıflama genetik algoritması (Non-dominated sorted genetic algorithm)
OMC	**:**	Operasyon ve bakım maliyeti (Operation and maintenance cost)
OC	**:**	Operasyon maliyeti (Operation cost)
QP	**:**	Karesel (kuadratik) programlama (Quadratic programming)
PA	**:**	Olasılıksal yaklaşım (Probabilistic approach)
PBP	**:**	Geri ödeme süresi (Payback period)
PC	**:**	Üretim maliyeti (Production cost)
PGE	**:**	Kirletici gaz emisyonları (Pollutant gas emissions)
PSO	**:**	Parçacık sürü optimizasyonu (Particle swarm optimization)
PSS	**:**	Pompalı depolama sistemi (Pumped-storage system)
PV	**:**	Fotovoltaik (Photovoltaic)
RBF	**:**	Radyal tabanlı fonksiyon (Radial basis function)
RC	**:**	Yenileme maliyeti (Replacement cost)
REPG	**:**	Bağıl güç üretimi fazlası (Relative excess power generated)
RER	**:**	Yenilenebilir enerji oranı (Renewable energy ratio)
RSM	**:**	Tepki yüzeyi metodolojisi (Response surface methodology)
SA	**:**	Tavlama benzetimi (Simulated annealing)
SA-HRES	**:**	Şebekeden bağımsız hibrit yenilenebilir enerji sistemi (Stand-alone hybrid renewable energy system)
SAHS	**:**	Tavlama benzetimi temelli harmoni arama (Simulated annealing-based harmony search)
SAM	**:**	Ortalama örnekleme yöntemi (Sampling average method)
SAS	**:**	Şebekeye bağlı olmayan sistem (Stand-alone system)
SC	**:**	Sistem maliyeti (System cost)
SDO	**:**	Simulink tasarım optimizasyonu (Simulink design optimization)

SH	**:**	Küçük hidro (Small hydro)
SLLPR	**:**	Sezonsal yük kaybı olasılığı oranı (Seasonal loss of load probability ratio)
SO	**:**	Tek amaçlı (Single objective)
SoC	**:**	Güneş kollektörü (Solar collector)
SuC	**:**	Süper kapasitör (Super-capacitor)
SPEA	**:**	Güç pareto evrim algoritması (Strength pareto evolutionary algorithm)
SPL	**:**	Sistem performans seviyesi (System performance level)
SSA	**:**	Salp sürüsü algoritması (Salp swarm algorithm)
SSR	**:**	Kendi kendine yeterlilik oranı (Self-sufficiency ratio)
SV	**:**	Hurda değeri (Salvage value)
TAOC	**:**	Toplam yıllık işletme maliyeti (Total annual operation cost)
TC	**:**	Toplam maliyet (Total cost)
TCGB	**:**	Şebekeden elektrik satın almadan kaynaklanan toplam gider (Total cost for grid buying)
TCGS	**:**	Şebekeye elektrik satışından elde edilen toplam gelir (Total cost for grid selling)
TCS	**:**	Sistemin toplam maliyeti (Total cost of the system)
TEİAŞ	**:**	Türkiye elektrik iletim A.Ş. (Turkish electricity transmission corporation)
TLBO	**:**	Öğretme-öğrenme esaslı optimizasyon yöntemi (Teaching-learning based optimization)
TO/RM	**:**	Ödün/risk yöntemi (Trade off/risk method)
TS	**:**	Tabu arama (Tabu search)
UEP	**:**	Kullanılmamış enerji olasılığı (Unutilized energy probability)
UL	**:**	Karşılanmayan talep (Unmet load)
WT	**:**	Rüzgâr türbini (Wind turbine)
WMO-MILP	**:**	Ağırlıklı çok amaçlı karma tam sayılı doğrusal programlama (Weighted multi-objective mixed integer linear programming)

ÖNSÖZ

Öncelikle, tez çalışmam süresince beni yönlendiren ve sürekli olumlu yönde motive eden, her aşamada çok değerli düşünce, öneri ve katkıları ile bana yol gösteren tez danışmanım Prof. Dr. Aşkıner Güngör'e saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Doktora sürecinin daha verimli geçmesi adına her türlü desteği sağlayan ikinci danışmanım Prof. Dr. Aysun Sağbaş'a teşekkürlerimi sunarım. Tezimi hazırlamamda katkılarıyla beni aydınlatan tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Harun Kemal Öztürk'e, Doç. Dr. Özcan Mutlu'ya ve Doç. Dr. Can Berk Kalaycı'ya teşekkür ederim. Tezin son aşamasında titiz değerlendirmeleri ve katkıları için tez jürisi üyeleri Prof. Dr. Serpil Erol'a ve Doç. Dr. Feriştah Özçelik'e teşekkür ederim. Enerji alanındaki çalışmalara başladığımda her türlü soruma itinayla cevap veren Prof. Dr. Gülgün Kayakutlu'ya teşekkür ederim.

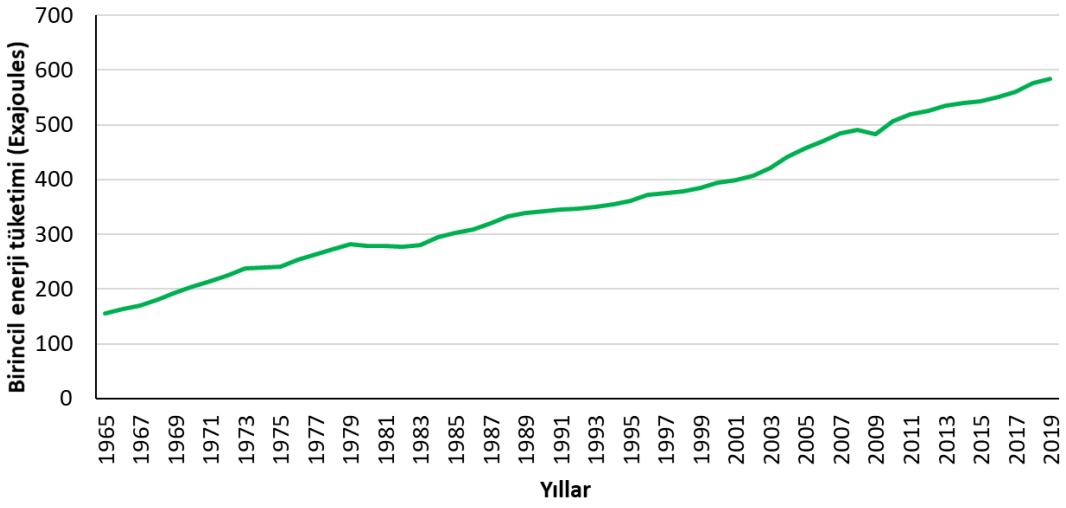
Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi'nde çalışan mesai arkadaşlarıma, Denizli'de bulunduğum sürelerde bana evini açan Doç. Dr. Olcay Polat'a, Öğr. Gör. Dr. Leyla Özgür Polat'a, Öğr. Gör. Dr. Mehmet Ulaş Koyuncuğlu'na ve her zaman güler yüzlü olan ve yardımcı olmaya çalışan başta Arş. Gör. Zeynep Özsüt Boğar olmak üzere tüm Pamukkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümü öğretim elemanlarına teşekkür ederim.

Tez çalışmasında ihtiyaç duyulan verinin paylaşımını sağlayan Denizli Meteoroloji Genel Müdürlüğü ve Denizli'de bulunan enerji şirketinin yetkililerine teşekkür ederim.

Son olarak, hayatımın her anında ve çalışmalarım esnasında her zaman manevi desteklerini hissettiğim sevgili aileme ve değerli dostlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

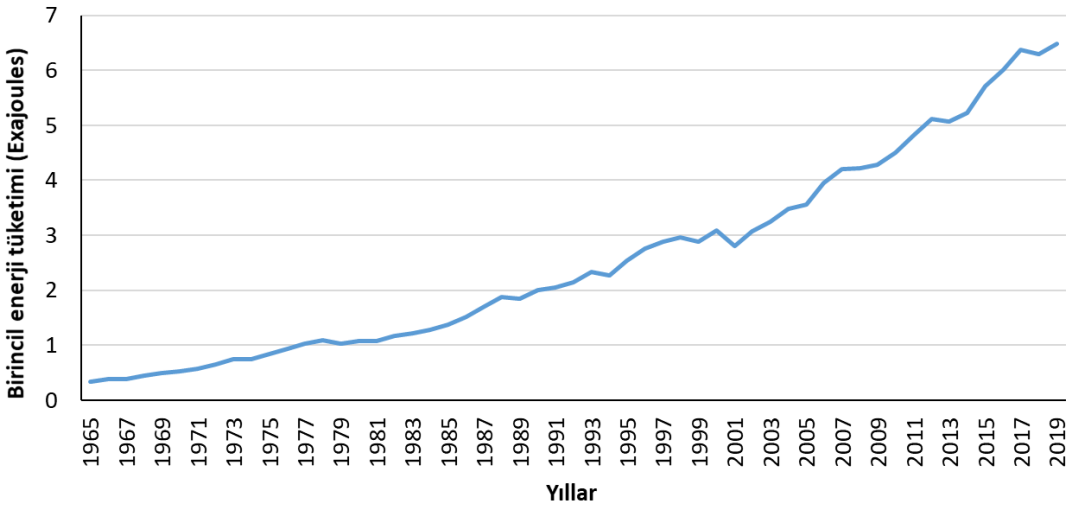
1. GİRİŞ

Dünya nüfusundaki hızlı artış ve kentleşme ve sanayileşme alanlarındaki gelişmelere paralel olarak, elektrik, ısınma ve ulaştırma için enerji ihtiyacı sürekli bir şekilde artmaktadır (Baños ve diğ. 2011). ABD Enerji Enformasyon İdaresi (Energy Information Administration-EIA) tarafından hazırlanan güncel bir rapora göre (EIA 2017), Dünya'da enerji tüketiminin 2040 yılına kadar 736 katrilyon Btu (British thermal unit) olacağı öngörülmektedir. Bu raporda, enerji tüketimindeki artışın temel nedenleri ekonomik büyüme, enerjiye erişimin artması ve hızlı nüfus artışı olarak gösterilmektedir (EIA 2017). 2019 yılında yayınlanan BP dünya enerjisinin istatistiksel değerlendirilmesi raporuna göre, dünya birincil enerji tüketimi 2017 yılında 13.474,6 mtep (Million tonnes oil equivalent) iken 2018 yılında %2,9 artışla 13.864,9 mtep'e yükselmiştir (BP 2019b). Bu oran, 2010 yılından itibaren en yüksek artış oranı olarak belirlenmiştir. Dünya'daki enerji tüketim eğilimlerine paralel olarak, Türkiye'de de birincil enerji tüketimi yıllar bazında sürekli artan bir eğilim göstermektedir (BP 2020) (Bkz. Şekil 1.1 ve Şekil 1.2).



Şekil 1.1: Dünya'da birincil enerji tüketiminin yıllar bazında değişimi (BP 2020)

Özellikle son yıllarda Türkiye'nin birincil enerji tüketimi, OECD ülkeleri ve Dünya birincil enerji tüketiminin artış trendinin üzerinde bir gelişim göstermektedir (Boran ve Boran 2012).



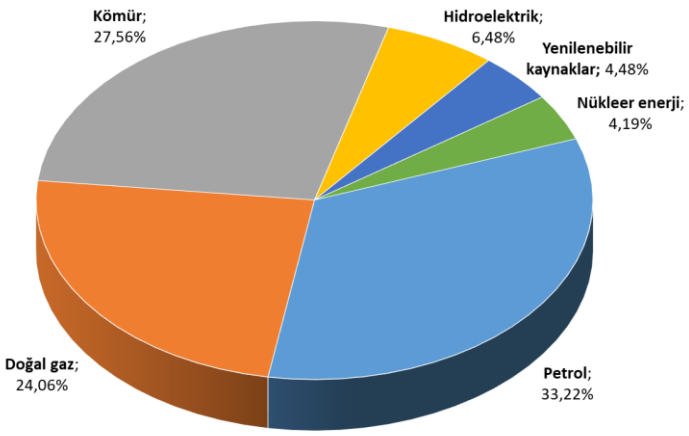
Şekil 1.2: Türkiye'de birincil enerji tüketiminin yıllar bazında değişimi (BP 2020)

BP enerji görünümü 2019 raporunda, refah seviyesindeki sosyal ve ekonomik gelişmelere bağlı olarak önümüzdeki yıllarda dünya enerji talebinin artmaya devam edeceği ve artan bu enerji talebi karşılanırken karbon salınımlarının azaltılması gerekliliği vurgulanmıştır (BP 2019a). Dolayısıyla, enerjiyle ilgili bilimsel konular akademik ve sanayi alanlarında yoğun bir şekilde çalışılmaya başlanmış (Sanajaoba 2019) ve enerji sektörü oldukça stratejik konuma gelmiştir (Kaplan 2015).

Enerji kaynakları yaygın olarak iki gruba ayrılabilir (EIA 2019):

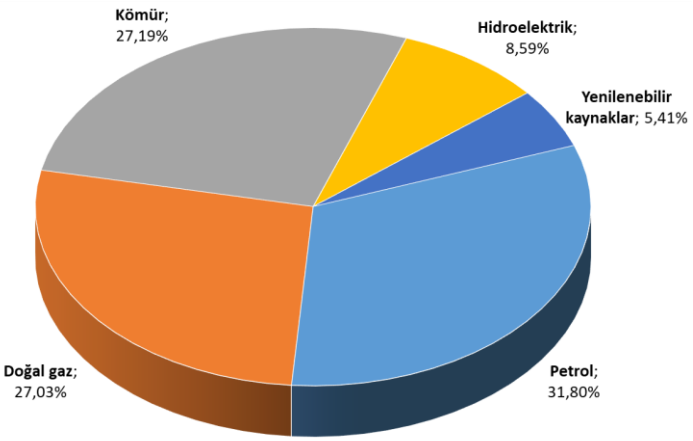
- Geleneksel (yenilenemez) enerji kaynakları
  - Kömür,
  - Nükleer enerji,
  - Petrol,
  - Doğalgaz, vb.
- Geleneksel olmayan (yenilenebilir) enerji kaynakları
  - Rüzgâr enerjisi,
  - Güneş enerjisi,
  - Hidrolik enerji (hidroelektrik),
  - Jeotermal enerji,
  - Biyokütle enerjisi,
  - Gelgit enerjisi,
  - Dalga enerjisi, vb.

Kömür, petrol, doğal gaz gibi fosil yakıtlar birincil enerji kaynakları olarak kullanılmaktadır. Günümüzde dünya birincil enerji tüketiminin yaklaşık %85'i kömür, petrol, doğal gaz gibi fosil, tükenebilir ve çevreye zararlı kaynaklardan oluşmaktadır (Bkz. Şekil 1.3) (BP 2020; Krishna ve Kumar 2015; Panchal ve diğ. 2019).



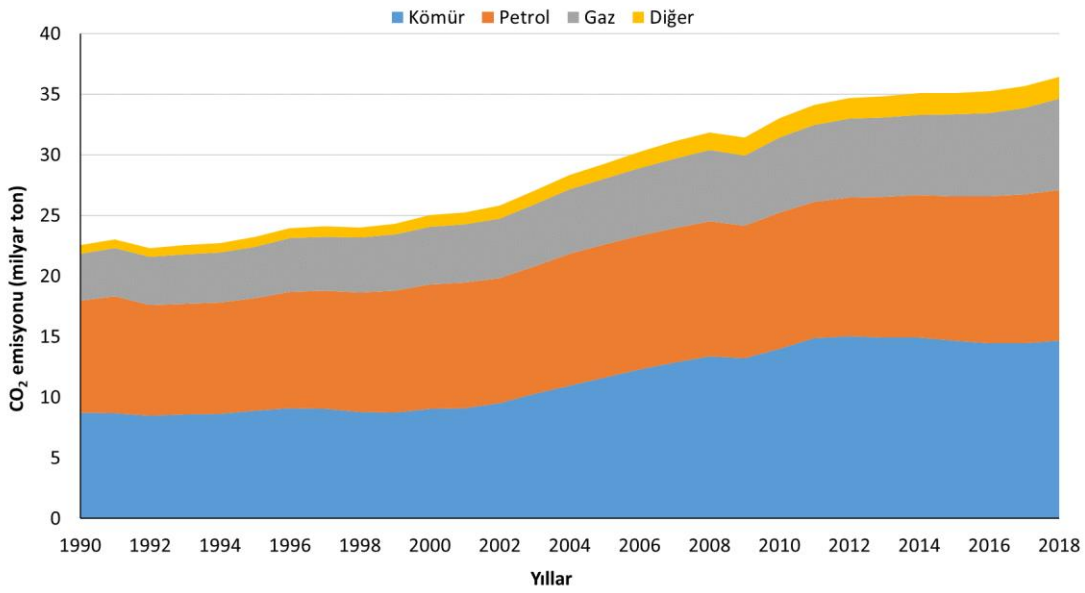
Şekil 1.3: Dünya birincil enerji tüketiminde kaynakların payları (%) (2018) (BP 2020)

Türkiye'nin 2018 yılındaki 6,29 Exajoules (EJ) birincil enerji tüketiminin kaynaklara dağılımı incelendiğinde (Bkz. Şekil 1.4), ilk sırayı 2,00 EJ ve %31,80 oran ile petrol almıştır. Petrolü sırasıyla; 1,71 EJ ve %27,19 oran ile kömür, 1,70 EJ ve %27,03 oran ile doğal gaz, 0,54 EJ ve %8,59 oran ile hidroelektrik ve 0,34 EJ ve %5,41 oran ile güneş, rüzgâr, jeotermal vb. yenilenebilir enerji kaynakları takip etmektedir. Benzer olarak, Türkiye'nin birincil enerji tüketiminin yaklaşık %86'sı fosil kaynaklardan oluşmaktadır.



Şekil 1.4: Türkiye birincil enerji tüketiminde kaynakların payları (%) (2018) (BP 2020)

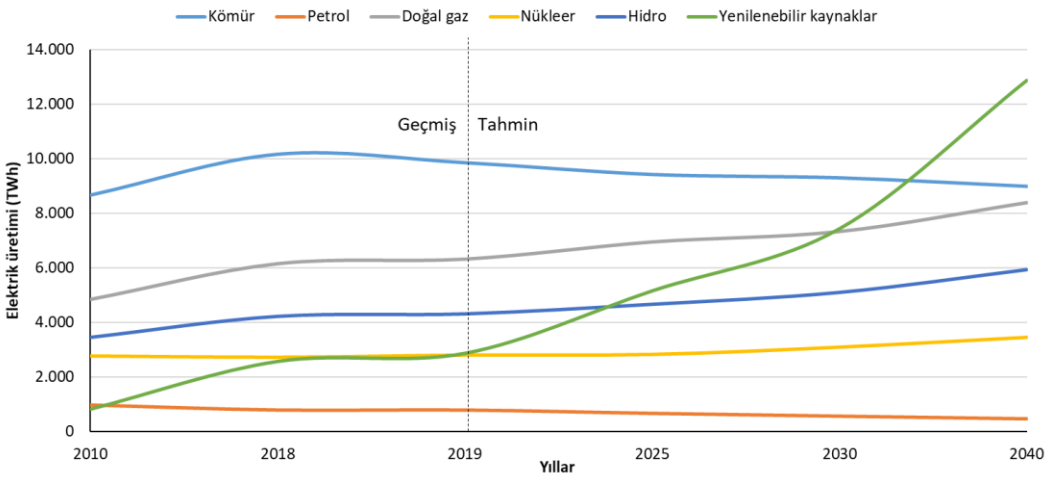
Fakat, fosil yakıtların sera gazı emisyonu ve hava kirliliği nedeniyle çevresel tahribatlara yol açtığı bilinmektedir ve bu nedenle küresel ısınmaya önemli ölçüde katkı sağlamaktadırlar (Razmjoo ve diğ. 2019). BP'nin dünya enerjisinin istatistiksel değerlendirilmesi raporunda (BP 2019b), 2018'de karbon emisyonlarının yaklaşık %2 arttığı ve bu verinin son yedi yıldaki en yüksek artış değeri olduğu söylenmektedir. Aynı raporda karbon emisyonlarındaki artışın büyük ölçüde artan fosil kaynaklı yakıtlardan üretilen enerjinin tüketiminden kaynaklandığını ifade edilmektedir. Şekil 1.5'de Dünya'da yakıt türlerine göre salınan karbondioksit (CO_2) emisyonlarının yıllara göre değişimi gösterilmektedir. Fosil kaynakların küresel CO_2 emisyonlarının artmasında büyük bir etken olduğu görülmektedir. EIA (2017) tarafından raporlanan bir bulguya göre, Dünya'da enerji tüketimine dayalı CO_2 emisyonlarının 2040 yılına kadar yılda ortalama %0,6 artacağı öngörülmektedir.



Şekil 1.5: Dünya'da yakıt türlerine göre CO_2 emisyonu miktarlarının yıllara göre değişimi (CDIAC 2020; GCP 2020)

Bu nedenle çoğu ülke yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik ederek karbon emisyonlarını azaltmak için çeşitli politikalar ve teşvikler önermiştir. Hem doğada bol miktarda bulunması, temiz ve yenilenebilir olması, hem de sera gazı emisyonu oluşturmaması düşünüldüğünde yenilenebilir enerji kaynakları artan enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında önemli rol oynamaktadır (Heydari ve diğ. 2019; Razmjoo ve Davarpanah 2019).

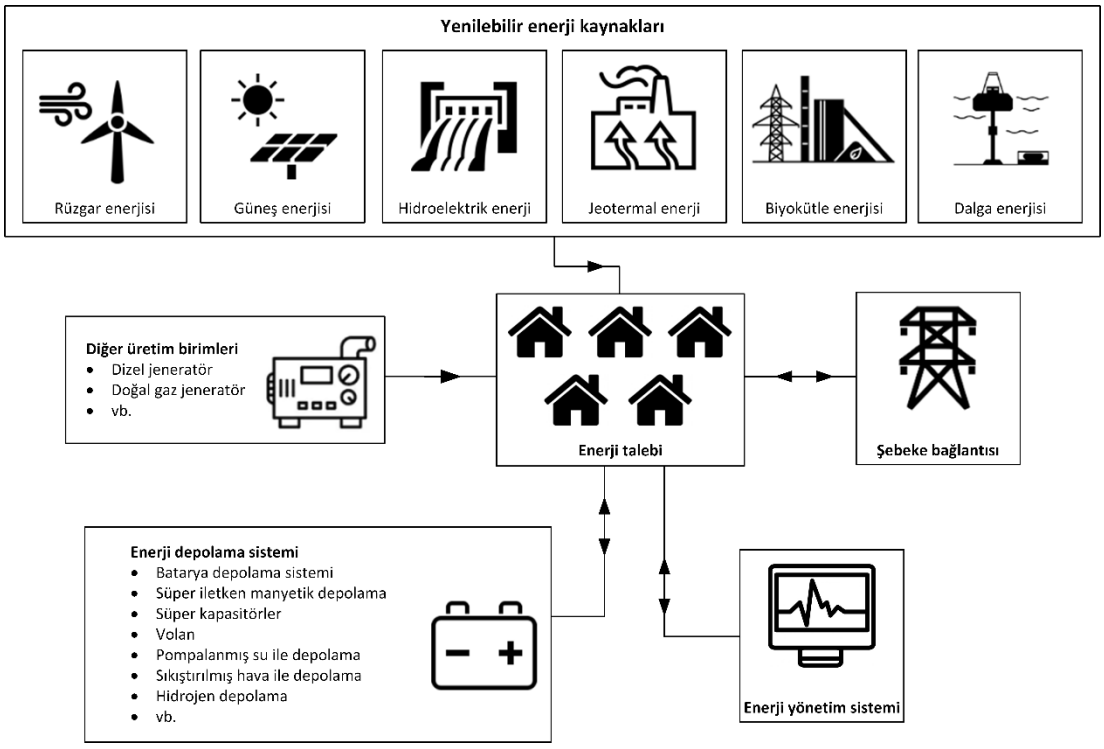
Örneğin; güneş enerjisi dünyaya düşen güneş ışınlarının çeşitli paneller kullanılarak ısı ve elektriğe dönüştürülmesi ile elde edilen bir enerji türüdür. Güneş enerjisi kaynaklarının zararlı gaz salınımı ile çevreye etkisi ihmal edilebilecek kadar az olmaktadır. Rüzgâr enerjisi ise bu ışınların geliş açısındaki farklılıklar nedeniyle ortaya çıkan ve atmosferde doğal olarak oluşan rüzgâr veya hava akımı kullanılarak elde edilen enerji türüdür. Diğer bir örnek, dalga enerjisi denizlerdeki dalgaların oluşturduğu basınçtan elde edilir. Herhangi bir yakıt kullanılmadığı için atık veya gaz salınımı yapmamaktadır (Özkara 2018). EIA (2017) raporunda yenilenebilir enerji kaynaklarının 2040 yılına kadar yıllık minimum ortalama %2,8 büyüme oranıyla en hızlı büyüyen enerji üretim kaynağı olacağını belirtmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency-IEA) tarafından yayınlanan Dünya Enerji Görünümü 2020 raporunda (IEA 2020) "Stated Policies" senaryosu (mevcut politikalar göz önüne alındığında) için elektrik üretiminde kullanılan kaynakların payları 2040 yılına kadar tahmin edilmiştir (Bkz. Şekil 1.6). Bu senaryoda başta güneş enerjisi olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarının payının önümüzdeki 20 yıllık süreçte kademeli olarak artacağı öngörülmüştür.



Şekil 1.6: Kaynaklara göre Dünya'da elektrik üretiminin tahmini (IEA 2020)

Yenilenebilir enerji; doğal olarak yenilenebilen güneş ışığı, rüzgâr, jeotermal ısı gibi kaynaklardan elde edilen enerji olarak bilinmektedir (Demirbaş 2006). Hem fosil yakıtların olumsuz etkilerini en aza indirmek ve hem de artan enerji talebine sürdürülebilir ve çevreye duyarlı bir şekilde yanıt vermek için yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre bir şekilde kullanımı gerekmektedir. Son yıllarda bu alandaki teknolojik gelişmeler ve teşvikler nedeniyle, hibrit yenilenebilir enerji sistemleri (HRES) yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Deshmukh ve Deshmukh 2008).

HRES genellikle birden fazla enerji kaynağından (örneğin; yenilenebilir enerji kaynakları, geleneksel enerji kaynakları ve/veya enerji depolama sistemleri) oluşmaktadır (Luna-Rubio ve diğ. 2012). Bir HRES'e ilişkin genel bir gösterim Şekil 1.7'de verilmiştir. Tek tip yenilenebilir enerji kaynağının enerji talebinin karşılanmasında kullanımı genellikle düşük güvenilirlik sağladığı için bu sistemlerde birden fazla enerji kaynağı birbirini tamamlaması açısından birlikte kullanılmaktadır (Kasaeian ve diğ. 2019). Kullanılan enerji kaynaklarının türleri, ortamın çevre koşulları ve coğrafi yapısı, güncel teknolojiler ve maliyetler gibi birçok kısıta bağlı olarak değişebilmektedir (Bhandari ve diğ. 2015).



Şekil 1.7: Hibrit yenilenebilir enerji sistemleri için genel bir gösterim

Bir HRES şebekeye bağlı (grid-connected) veya bağlı olmadan (stand-alone) çalışabilmektedir. Şebekeye bağlı olmayan HRES'lerin (SA-HRES), genellikle coğrafi (arazi koşulları vb.) ve ekonomik (şebekeden elektrik taşıma maliyeti vb.) kısıtlar nedeniyle şebekeden uzak ve izole alanlarda elektrik üretimi için iyi bir seçenek olduğu bilinmektedir (Chauhan ve Saini 2014). Bu sistemler; güneş, rüzgâr, hidro gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını tek başına ya da hibrit bir şekilde (kaynakların birbirini tamamlaması amacıyla) kullanmaktadır. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarının kesikli yapısını doğru yönetebilmek için, dizel jeneratör gibi yedek araçlar ve aküler gibi enerji depolama sistemleri dahil edilebilir. HRES'lerde

yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanan elektriğin talebi karşılayamamasını önlemek için kullanılan enerji depolama sistemleri; fazla üretilen elektriği depolamak, gerekli olduğu durumlarda kullanmak ve güvenilirliği sağlamak için amaçlarıyla sistemde yer almaktadır. Elektrik talebinin yenilenebilir enerji kaynakları tarafından üretilen ve enerji depolama sistemlerinde bulunan elektrikten fazla olması durumunda ise; talep dizel jeneratör gibi yedek araçlar ile karşılanabilmektedir (Bajpai ve Dash 2012; Bhandari ve diğ. 2015; Chauhan ve Saini 2014).

Şebekeye bağlı HRES'lerde (GC-HRES), yenilenebilir enerji kaynaklarının doğasından kaynaklanan belirsizlikler gereği sistem şebekeye bağlıdır. Bu durumda, sistemin şebekeden elektrik alması ve/veya şebekeye elektrik satmasına izin verilmektedir (Caballero ve diğ. 2013). Şebekeye bağlı hibrit sistemler genellikle şebekeye yakın konumlar için tercih edilmektedir ve elektrik tedarikinde şebekeye bağlı olmayan sistemlere kıyasla daha güvenilirdir (Kaundinya ve diğ. 2009). Şebekeye bağlı ve şebekeye bağlı olmayan sistemler hakkında detaylı bilgi almak için Emad ve diğ. (2019), Ghenai ve Bettayeb (2019a), Gómez-Hernández ve diğ. (2019), Kaundinya ve diğ. (2009), Lian ve diğ. (2019) ve Twaha ve Ramli (2018) çalışmaları incelenebilir.

HRES optimum boyutlandırma problemi; ekonomik, çevresel ve güvenilirlik kriterleri altında enerji talebini karşılayabilmek için enerji sisteminin optimum konfigürasyonunun ve konumunun, üretim birimlerinin tipi ve boyutunun (adetinin) belirlenmesini araştırmaktadır (Erdinc ve Uzunoglu 2012; Singh ve diğ. 2016). Optimum boyutlandırma, hibrit sistemlerde yenilenebilir enerji kaynakların etkili ve verimli kullanılması, sistemin kabul edilebilir bir maliyet ile çalışması ve sistem güvenilirliğinin sağlanması açısından önemlidir (Merei ve diğ. 2013b; Parihar ve diğ. 2019). Örneğin, sistemin fazla boyutlandırılması sistem maliyetlerini arttırırken, az boyutlandırılması enerji tedarikinde aksaklıklara yol açabilmektedir (Kumar ve diğ. 2019). Optimum boyutlandırma süreci sistemin matematiksel olarak modellenmesi ile başlar. Daha sonra, mevcut enerji kaynaklarının etkili ve ekonomik kullanımını sağlamak amacıyla çalışılan konumun hava durumu ve elektrik talebi verilerinin tahmin edilmesi gerekir. Elde edilen tahminlerin ve gerçek verilerin kıyaslanması önemlidir. Son olarak, uygun bir metodoloji ile boyutlandırma süreci gerçekleştirilir (Khatib ve diğ. 2013).

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

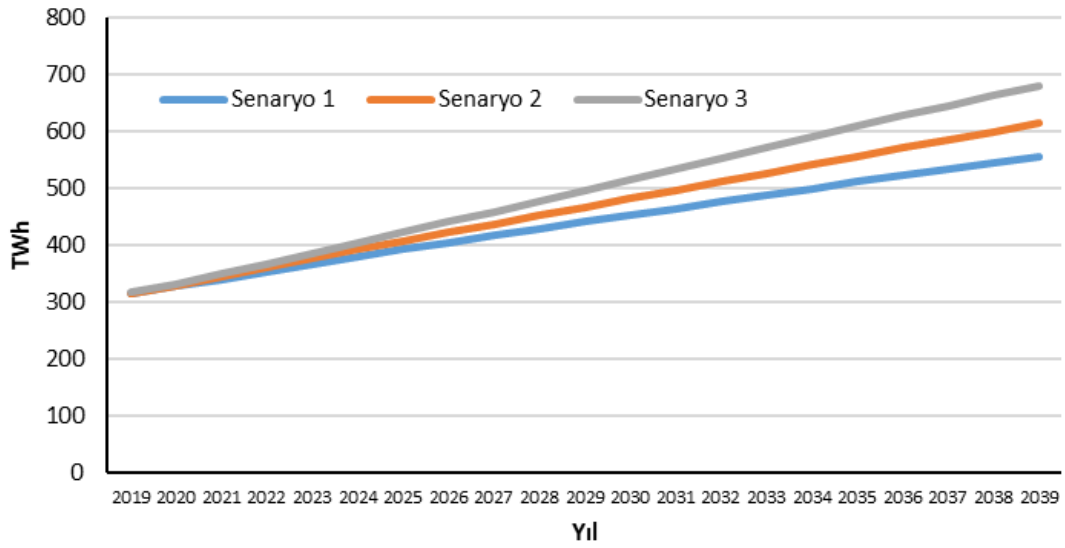
Bu tez çalışması aşağıda verilen üç orijinal katkıyı sağlamaktadır. İlk olarak, HRES optimum boyutlandırma problemine ilişkin bir kapsamlı literatür incelemesi sunulmuştur. Bu incelemede, güncel çalışmalar kapsamlı olarak analiz edilmiştir ve ele alınan problem (bileşenler, amaç fonksiyonları, karar değişkenleri, kısıtlar, optimizasyon teknikleri/yazılımlar vb.) çeşitli yönlerine göre sınıflandırılmıştır. Analiz sonuçları, bu alandaki araştırmacılara faydalı bilgiler sağlaması amacıyla tablo ve grafiklerle görselleştirilmiştir. Literatürdeki güncel eğilimlerin altı çizilmiştir ve araştırma fırsatları vurgulanmıştır. İnceleme sonucunda, şebekeye bağlı olmayan sistemlere kıyasla şebekeye bağlı sistemler üzerinde daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir.

İkinci olarak, enerji depolama sistemi olmayan ve şebekeye bağlı HRES'lerin optimum bir şekilde boyutlandırılması amacıyla ekonomik ve çevresel konuları da göz önüne alarak genelleştirilmiş bir ağırlıklı çok amaçlı karma tamsayılı doğrusal programlama (weighted multi-objective mixed integer linear programming-WMO-MILP) modeli önerilmiştir. Önerilen model, literatürde nadiren entegre bir şekilde kullanılan operasyonel, teknik, fiziksel ve kapasite kısıtlarını bütünsel olarak birleştirmektedir. Önerilen model karar vericinin maliyet temelli, çevre temelli veya kısmen maliyet ve çevre temelli önceliklerini temsil eden çeşitli ağırlıkları maliyet ve CO_2 emisyonu minimizasyonu gibi birbiri ile çelişen amaç fonksiyonlarına atayarak ikisi arasındaki ödünleşimi değerlendirme yeteneğine sahiptir. Ayrıca, önerilen modelin farklı durumlar için tasarlanabilir ve uyarlanabilir olması amaçlanmıştır.

Üçüncü olarak, modelleme ortamının stokastik doğasını da göz önüne almak için optimizasyon süreci ve Monte Carlo simülasyonu ile birleştirilmiştir. Rüzgâr hızı, güneş radyasyonu gibi veriler stokastik girdilerdir ve hava durumu gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak zamanla değişebilmektedir. Elektrik tüketim verileri ise ekonomik, teknolojik ve meteorolojik verilere bağlı olarak zamanla değişebilen diğer stokastik girdilerdir. Burada, Monte Carlo simülasyonu elde edilen geçmiş verilerden faydalanarak rüzgâr hızı ve güneş radyasyonu gibi meteorolojik verileri ve elektrik talebini tahmin etmek için kullanılmıştır. Son olarak, bir vaka çalışması modelin değerini ve uygulanabilirliğini göstermek için kullanılmıştır.

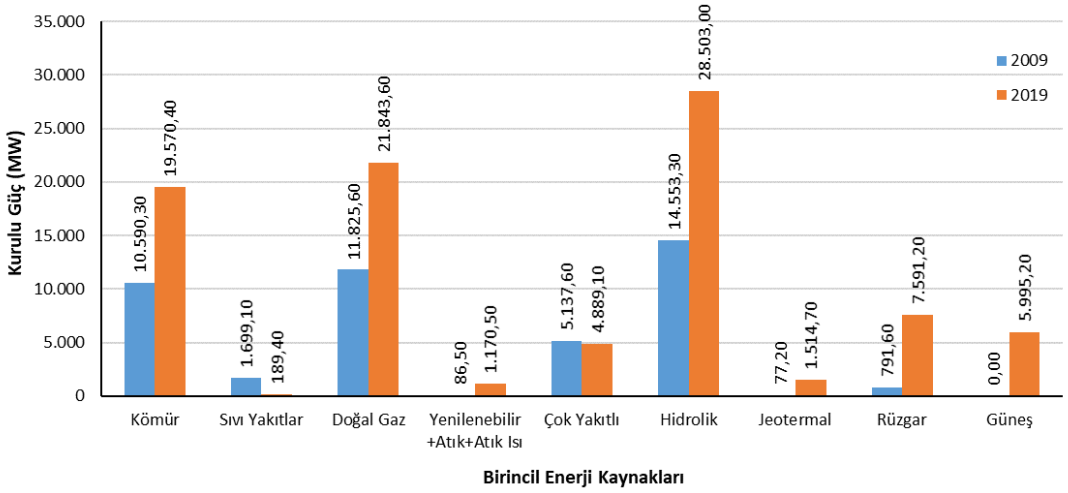
1.2 Tezin Önemi

Nüfus ve sanayileşmedeki artışa paralel olarak özellikle son 30 yılda Dünya'da ve Türkiye'de enerjiye olan talep giderek artmaktadır (Baris ve Kucukali 2012). Enerji talep tahmini çalışmalarına göre (Beskirli ve diğ. 2017; Canyurt ve diğ. 2004; Ceylan ve Öztürk 2004; Kıran ve diğ. 2012a; Kıran ve diğ. 2012b; Tefek ve diğ. 2019; Toksarı 2007), enerji ihtiyacı gelecekte de artmaya devam edecektir. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) tarafından yayınlanan Türkiye elektrik enerjisi talep projeksiyonu raporunda (ETKB 2019), 3 farklı senaryo (düşük, referans ve yüksek) için tahminlerde bulunulmuş (Bkz. Şekil 1.8) ve sırasıyla %2,90, %3,36 ve %3,84 yıllık ortalama artış oranıyla 2039 yılındaki enerji talebi 556,3 TWh, 613,4 TWh ve 679,9 TWh olarak tahmin edilmiştir.



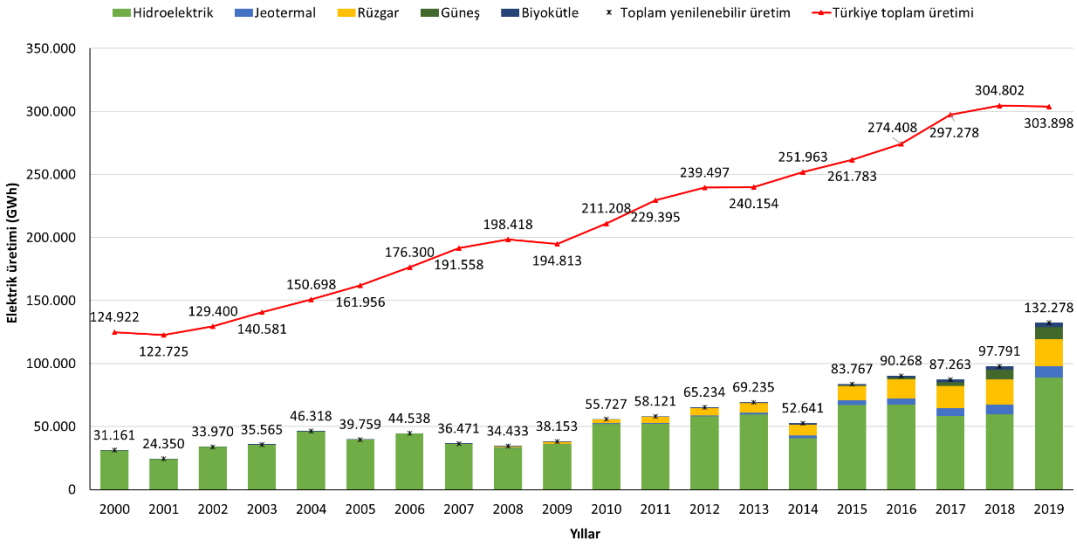
Şekil 1.8: Türkiye elektrik enerjisi talep projeksiyonu

Fosil kaynaklı yakıtların orta vadede ekonomik olarak tükenecek olması nedeniyle, yenilenebilir enerji kaynakları enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında önemli kaynaklar olarak görülmektedir. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) tarafından yayınlanan Türkiye'nin kurulu gücünün yıllar itibariyle gelişimi istatistiklerine (TEİAŞ 2019) göre, hem Türkiye'nin kurulu gücü hem de kurulu güç içerisindeki yenilenebilir kaynaklarının kullanım oranı yıllar itibariyle önemli ölçekte artmıştır (Bkz. Şekil 1.9).



Şekil 1.9: Türkiye kurulu gücünün 2009-2019 yılları için birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı (TEİAŞ 2019)

Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payları ve gelişimi Şekil 1.10'da gösterilmiştir. TEİAŞ (2019) verilerine göre, 2000 yılında elektrik üretimindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının payı %24,94 iken rüzgâr ve güneş kaynaklarının kullanımını artması ile birlikte bu oran 2018 yılında %32,08'e ve 2019 yılında %43,53'e yükselmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının çeşitliliği bakımından uygun bir konuma sahip olan Türkiye'de hem enerjide dışa bağımlılığın azaltılması hem de düşük karbon salınımlı sistemlere geçişin sağlanması bakımından yenilenebilir enerjinin kaynaklarının elektrik üretimdeki paylarının arttırılması konusunun büyük önem taşıdığı söylenebilir (WWF 2011)



Şekil 1.10: Türkiye'nin toplam üretimi içinde yenilenebilir kaynaklı elektrik enerjisi üretiminin yıllara göre gelişimi (TEİAŞ 2019)

Tablo 1.1 ise, Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyelini, 2013 yılında kurulu kapasitesini ve 2015-2023 yılları arasında elektrik üretimi için hedeflerini göstermektedir. Türkiye jeotermal ve güneş enerjisi potansiyeli açısından Avrupa Birliğinde ikinci sırada, hidroelektrik ve rüzgâr enerjisi açısından üçüncü sırada yer almaktadır. Ayrıca yüksek miktarda biyokütle kaynağı da mevcuttur (Baris ve Kucukali 2012). Devlet Planlama Teşkilatı (DPT) tarafından yayınlanan Elektrik Enerjisi ve Arz Güvenliği Stratejisi Belgesi'ne (DPT 2009) göre, yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi içerisindeki payını arttırmak çeşitli hedefler belirlenmiştir.

Tablo 1.1: Türkiye'nin toplam yenilenebilir enerji potansiyeli, 2013 yılında kurulu gücü (MW) ve 2015-2023 yılları arasında elektrik üretimi için hedefleri (MW)

Enerji kaynağı	**Potansiyel***	**Kurulu güç (MW)**	**Hedefler (MW)**			
		2013**	**2015****	**2017****	**2019****	**2023*****
Hidroelektrik	36.603 MW	22.289	25.000	27.700	32.000	34.000
Rüzgâr enerjisi	48.000 MW	2.759	5.600	9.500	10.000	20.000
Jeotermal	600 MW (elektrik); 31.500 MW (termal)	311	360	420	700	1.000
Güneş enerjisi	32,6 mtep	-	300	1.800	3.000	5.000
Biyokütle	2,6 mtep (elektrik); 6 mtep (termal)	237	380	540	700	1.000

*(ETKB 2013), **(ETKB 2014a), ***(ETKB 2014b)

Sonuç olarak; yenilenebilir enerji sistemleri konusu, Dünya ve Türkiye için önemli bir gündem konusudur ve yukarıda belirtildiği gibi, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına yönelik ihtiyaç ve buna paralel olarak devlet teşviki giderek artmaktadır. Gelecekte daha yaygın olarak kullanılması beklenen şebekeye bağlı hibrit sistemlerin tasarım-boyutlandırma konusunun çalışılması ve sonuçların tartışılmasıyla, çevreye duyarlı elektrik üretiminin gerçekleştirilmesi, elektrik üretim maliyetlerinin azaltılması ve sistem güvenilirliğinin arttırılması gibi konularda farkındalık sağlanabileceği ve tez çalışmasının yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının daha da yaygınlaşmasına katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

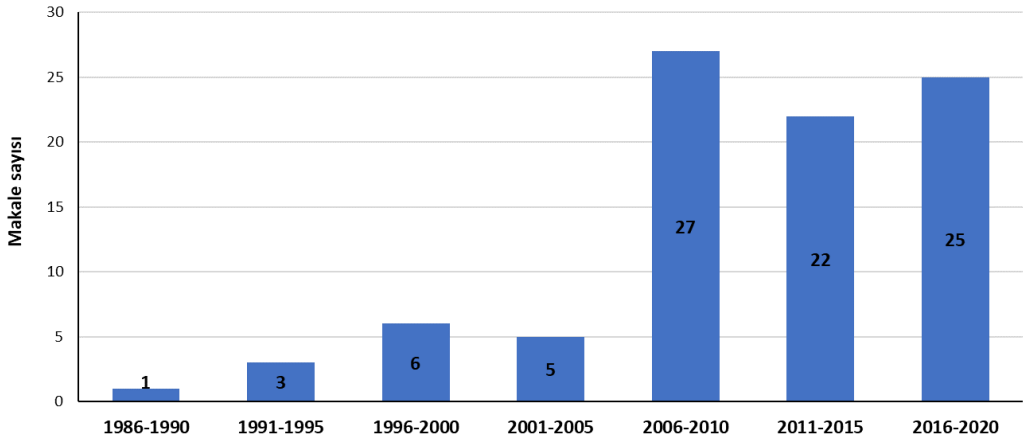
1.3 Tezin Organizasyonu

Tezin kalan bölümlerinin organizasyonu şu şekildedir: İkinci bölümde HRES optimum boyutlandırılması/tasarımı konusu üzerine kapsamlı bir literatür araştırması sunulmuştur. Ele alınan konu kullanılan yöntemler, amaç fonksiyonları, göstergeler, çalışma şekilleri vb. farklı boyutlarına göre matematiksel hesaplama formülleri ile açıklanmıştır. Ayrıca elde edilen bulgular değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır. Üçüncü bölümde, kapsamlı literatür araştırmasının devamı olarak GC-HRES optimum boyutlandırma konusu daha detaylı olarak incelenmiştir. İlgili literatürdeki eksiklikler vurgulanarak tez çalışmasının katkısı açıklanmıştır. Dördüncü bölümde, tez çalışmasında kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Beşinci bölümde, GC-HRES-WS'lerin optimum boyutlandırılması konusu için önerilen genelleştirilmiş WMO-MILP modeli verilmiş ve kullanılan parametreler, karar değişkenleri, kısıtlar ve amaç fonksiyonları detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Altıncı bölümde, modelin faydasını ve uygulanabilirliği göstermek için bir vaka çalışması sunulmuştur. Vaka çalışmasında kullanılan veriler kategoriler halinde tablolar ve şekillerle sunulmuştur. Yedinci bölümde, sayısal sonuçlar verilmiş ve çeşitli duyarlılık analizleri ile tartışılmıştır. Sekizinci ve son bölümde çalışmanın sonuçları, uygulamaya katkısı ve sınırlılıkları hakkında bilgiler verilmiş ve gelecek çalışma konuları tartışılmıştır.

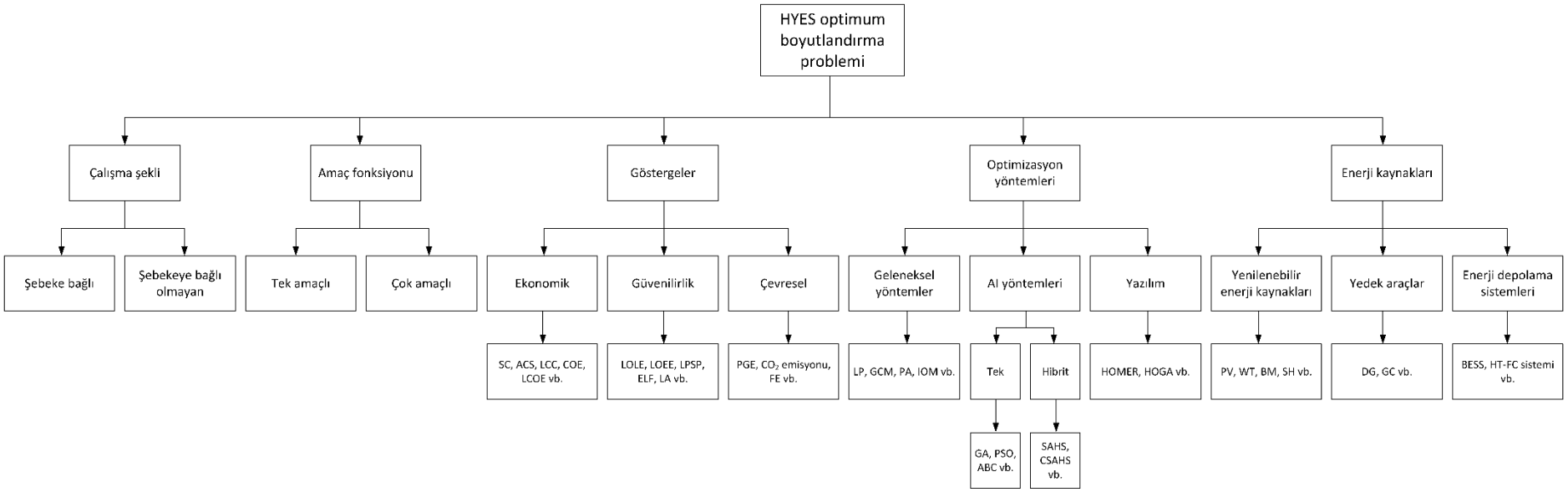
2. HİBRİT YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİNİN TASARIMI ÜZERİNE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Son yıllarda, yenilenebilir enerji alanında yapılan çalışmalar literatürde birçok yazarın ilgisini çekmiştir. Hem SA- hem de GC-HRES'lerin entegrasyon biçimleri, depolama seçenekleri, boyutlandırma metodolojileri ve sistem kontrolü alanlarındaki çalışmaları içeren literatür araştırmaları Zhou ve diğ. (2010), Erdinc ve Uzunoglu (2012), Fadaee ve Radzi (2012), Luna-Rubio ve diğ. (2012), Khatib ve diğ. (2013), Chauhan ve Saini (2014), Upadhyay ve Sharma (2014), Bhandari ve diğ. (2015), Sinha ve Chandel (2015), Anoune ve diğ. (2018), Singh ve Bansal (2018) ve Twaha ve Ramli (2018) tarafından sunulmuştur.

İncelenen makalelerin yıllara göre dağılımı Şekil 2.1'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar Dünya'da ve Türkiye'de yenilenebilir enerji alanındaki çalışmaların hız kazanmaya başladığını göstermektedir. Çevresel etmenler ve kısıtlı fosil yakıtlar göz önüne alındığında bu alandaki çalışmaların artışına devam edeceği öngörülebilir. HRES'lerin optimum boyutlandırılması probleminin yukarıda verilen optimizasyon yöntemlerinin yanı sıra diğer boyutlarıyla (Bkz. Şekil 2.2) ele alınması önemlidir. Bu kapsamda, literatürdeki çalışmalar enerji kaynakları, sistem çalışma şekli, amaç fonksiyonları, optimizasyon yöntemleri ve değerlendirmede kullanılan ekonomik, çevresel ve güvenilirlik göstergeleri gibi boyutlara göre sınıflandırılarak Tablo 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1: Literatür taramasında incelenen makalelerin yıllara göre dağılımı



Şekil 2.2: HRES optimum boyutlandırma üzerine yapılan çalışmalarda ele alınan boyutlar

Tablo 2.1: Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması üzerine literatür incelemesi

Yazar(yıl)	Dergi	Ülke	Talep Konumu	Enerji Kaynakları	Çalışma Türü		Amaç Fonksiyonu		Metot	Göstergeler		
					SAS	GCS	SO	MO		Ekonomik	Güvenilirlik	Çevresel
Ramakumar ve diğ. (1986)	IEEE Transactions on Energy Conversion	Gelişmekte olan bir ülke	Köy	PV, WT, BG, SH	■		■		LP	ACS		
Gavanidous ve Bakirtzis (1992)	IEEE Transactions on Energy Conversion	Yunanistan	Bina	PV, WT, BESS	■			■	TO/RM	CI	LOLP	
Ramakumar ve diğ. (1992)	IEEE Transactions on Energy Conversion	Hindistan	Köy	PV, WT, BG, SH	■		■		Bilgi tabanlı tasarım yaklaşımı (IRES-KB)	CC	LPSP	
Borowy ve Salameh (1994)	IEEE Transactions on Energy Conversion	ABD	Telekomünikasyon sistemi	PV, WT	■		■		LSM			
Borowy ve Salameh (1996)	IEEE Transactions on Energy Conversion	ABD	Konut	PV, WT, BESS	■		■		GCM	SC	LPSP	
Markvart (1996)	Solar Energy	Birleşik Krallık	Belirli bir konum	PV, WT	■		■		GCM	HGS		
Kellogg ve diğ. (1996)	Electric Power Systems Research	ABD	Konut	PV, WT, BESS	■		■		IOM	ACS		

Tablo 2.1: Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması üzerine literatür incelemesi (devam)

Yazar(yıl)	Dergi	Ülke	Talep Konumu	Enerji Kaynakları	Çalışma Türü		Amaç Fonksiyonu		Metot	Göstergeler		
					SAS	GCS	SO	MO		Ekonomik	Güvenilirlik	Çevresel
Chedid ve Rahman (1997)	IEEE Transactions on Energy Conversion	ABD	Belirli bir konum	PV, WT, BESS, DG, GC	■	■		■	LP	AEPC	EENS	PGE
Kellogg ve diğ. (1998)	IEEE Transactions on Energy Conversion	ABD	Konut	PV, WT, BESS, DG, GC	■	■	■		IOM	ACS		
Karaki ve diğ. (1999)	IEEE Transactions on Energy Conversion	ABD	Belirli bir konum	PV, WT, BESS	■		■		PA	PC	EENS	
Yang ve diğ. (2003)	Renewable Energy	Hong Kong	Telekomünikasyon sistemi	PV, WT, BESS	■		■		IOM		LPSP	
Dufo-López ve Bernal-Agustín (2005)	Solar Energy	İspanya	5 farklı talep profili	PV, DG	■		■		HOGA	NPV	UL	
Eke ve diğ. (2005)	International Journal of Green Energy	Türkiye	Güneş enerjisi enstitüsü	PV, WT		■	■		GCM	HGS		
Mellit ve diğ. (2005)	Renewable Energy	Cezayir	İzole alanlar	PV, BESS	■		■		ANN (RBF-IRR)		LOLP	

Tablo 2.1: Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması üzerine literatür incelemesi (devam)

Yazar(yıl)	Dergi	Ülke	Talep Konumu	Enerji Kaynakları	Çalışma Türü		Amaç Fonksiyonu		Metot	Göstergeler		
					SAS	GCS	SO	MO		Ekonomik	Güvenilirlik	Çevresel
Khan ve Iqbal (2005)	Renewable Energy	Kanada	Konut	PV, WT, DG, FC, BESS, EL, HT	■		■		HOMER	NPV, CC, COE		
Bernal-Agustín ve diğ. (2006)	Renewable Energy	İspanya	2 farklı talep konumu	PV, WT, BESS, DG	■			■	SPEA	NPV		PGE
Koutroulis ve diğ. (2006)	Solar Energy	Yunanistan	Konut	PV, WT, BESS	■		■		GA	TCS		
Prasad ve Natarajan (2006)	Energy	Hindistan	Belirli bir konum	PV, WT, BESS	■		■		IOM	LCC, LCOE, LUC	DPSP, REPG, UEP	
Senjyu ve diğ. (2006)	IEEE Transactions on Energy Conversion	Japonya	Konut	PV, WT, BESS, GC		■	■		GA	TC		
Rehman ve diğ. (2007)	Renewable and Sustainable Energy Reviews	Suudi Arabistan	Köy	WT, DG		■	■		HOMER	NPV, COE		
Senjyu ve diğ. (2007)	Renewable Energy	Japonya	Ada	PV, WT, BESS, DG	■		■		GA	TCS		
Shaahid ve Elhadidy (2007)	Renewable and Sustainable Energy Reviews	Suudi Arabistan	Süpermarket	PV, DG, BESS	■		■		HOMER	CC, NPV, COE		

Tablo 2.1: Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması üzerine literatür incelemesi (devam)

Yazar(yıl)	Dergi	Ülke	Talep Konumu	Enerji Kaynakları	Çalışma Türü		Amaç Fonksiyonu		Metot	Göstergeler		
					SAS	GCS	SO	MO		Ekonomik	Güvenilirlik	Çevresel
Wang ve Singh (2007)	IEEE Swarm Intelligence Symposium	ABD	Belirli bir konum	PV, WT, BESS, GC		■		■	MO-PSO	TC	EIR, EENS	PGE
Yang ve diğ. (2007)	Solar Energy	Çin	İletişim istasyonu	PV, WT, BESS	■		■		IOM	LCOE	LPSP	
Dalton ve diğ. (2008)	Renewable Energy	Avustralya	Hotel	PV, WT, DG, BESS	■		■		HOMER, HYBRIDS	NPV, PBP		
Ekren ve Ekren (2008)	Applied Energy	Türkiye	GSM baz istasyonu	PV, WT, BESS	■		■		RSM, ARENA	SC	LOLP, LA	
Yang, H. ve diğ. (2008)	Solar Energy	Çin	Telekomünikasyon röle istasyonu	PV, WT, BESS	■			■	GA	ACS	LPSP	
Yang, Q. ve diğ. (2008)	IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies	Çin	Belirli bir konum	PV, WT, BESS	■		■		DE	TCS	EENS	
Dufo-López ve Bernal-Agustín (2008)	Renewable Energy	İspanya	Belirli bir konum	PV, WT, BESS, DG, FC, EL, HT	■			■	SPEA, GA	NPV	UL	
Bala ve Siddique (2009)	Energy for Sustainable Development	Bangladeş	Ada	PV, DG, BESS	■		■		HOGA	NPV		

Tablo 2.1: Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması üzerine literatür incelemesi (devam)

Yazar(yıl)	Dergi	Ülke	Talep Konumu	Enerji Kaynakları	Çalışma Türü		Amaç Fonksiyonu		Metot	Göstergeler		
					SAS	GCS	SO	MO		Ekonomik	Güvenilirlik	Çevresel
Bernal-Agustín ve Dufo-López (2009)	Electric Power Systems Research	İspanya	Belirli bir konum	PV, WT, BESS, DG	■			■	SPEA, GA	NPV	UL	
Ekren ve Ekren (2009)	Applied Energy	Türkiye	Ev, GSM baz istasyonu	PV, WT, BESS	■		■		OptQuest, ARENA	SC	LOLP, LA	
Ekren ve diğ. (2009)	Applied Energy	Türkiye	GSM baz istasyonu	PV, WT, BESS	■		■		RSM, ARENA, BEPA	SC	LOLP, LA	
Hakimi ve Moghaddas-Tafreshi (2009)	Renewable Energy	İran	Köy	WT, FC, HT, EL	■		■		PSO	NPV		
Kashefi Kaviani ve diğ. (2009)	Renewable Energy	İran	Belirli bir konum	PV, WT, FC, HT, EL	■		■		PSO	NPV	LOLE, EENS, LPSP, ELF	
Kenfack ve diğ. (2009)	Renewable Energy	Kamerun	Köy	PV, SH, DG, BESS	■		■		HOMER	NPV, COE		
Wang ve Singh (2009)	IEEE Transactions on Energy Conversion	ABD	Belirli bir konum	PV, WT, BESS, GC		■		■	IPSO	TC	EIR, EENS, LOLE, LOLF	PGE
				PV, WT, GC		■		■	IPSO	TC	EIR, EENS, LOLE, LOLF	

Tablo 2.1: Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması üzerine literatür incelemesi (devam)

Yazar(yıl)	Dergi	Ülke	Talep Konumu	Enerji Kaynakları	Çalışma Türü		Amaç Fonksiyonu		Metot	Göstergeler		
					SAS	GCS	SO	MO		Ekonomik	Güvenilirlik	Çevresel
Ardakani ve diğ. (2010)	9th International Conference on Environment and Electrical Engineering	İran	Spesifik bir alan	PV, WT, BESS, GC		■	■		PSO	SC	ELF	
Ekren ve Ekren (2010)	Applied Energy	Türkiye	GSM baz istasyonu	PV, WT, BESS	■		■		SA	SC	LOLP, LA	
Katsigiannis ve diğ. (2010)	IET Renewable Power Generation	Yunanistan	Belirli bir konum	PV, WT, DG, BDG, FC, EL, HT, BESS	■			■	NSGA-II	COE	UL	GHG, RER
Kornelakis (2010)	Solar Energy	Yunanistan	Belirli bir konum	PV, GC		■		■	PSO	NPV		PGE
Ould Bilal ve diğ. (2010)	Renewable Energy	Senegal	İzole bir bölge	PV, WT, BESS	■			■	GA	ACS	LPSP	
Karakoulidis ve diğ. (2011)	Renewable Energy	Yunanistan	Laboratuvar	PV, DG, BESS, FC, HT, EL	■		■		HOMER	NPV		
Rajkumar ve diğ. (2011)	Energy	Malezya	Konut	PV, WT, BESS	■		■		ANFIS	COE	LPSP	

Tablo 2.1: Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması üzerine literatür incelemesi (devam)

Yazar(yıl)	Dergi	Ülke	Talep Konumu	Enerji Kaynakları	Çalışma Türü		Amaç Fonksiyonu		Metot	Göstergeler		
					SAS	GCS	SO	MO		Ekonomik	Güvenilirlik	Çevresel
Supriya ve Siddarthan (2011)	International Journal of Engineering Science and Technology	ABD	Konut	PV, WT, GC		■	■		QP	TC		
Katsigiannis ve diğ. (2012)	IEEE Transactions on Energy Conversion	Yunanistan	Belirli bir konum	WT, PV, BESS, DG, BDG, FC	■		■		TS, SA	COE		
Amer ve diğ. (2013)	Energy Procedia	Fransa	Konut	PV, WT	■		■		PSO	LCOE		
Askarzadeh (2013)	Solar Energy	ABD	Konut	PV, WT, BESS	■		■		CSAHS	ACS		
Caballero ve diğ. (2013)	Energy	Paskalya adası, Şili	15 ev	PV, WT, DG, GC		■	■		MATLAB optimizasyon araç kutusu	LCC	LPSP	
Hiendro ve diğ. (2013)	Energy	Endonezya	Köy	PV, WT, BESS	■		■		HOMER	COE		
Kumar ve diğ. (2013)	Swarm and Evolutionary Computation	Hindistan	Belirli bir konum	PV, WT, BESS, DG	■		■		BBO	NPV, COE	EENS	

Tablo 2.1: Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması üzerine literatür incelemesi (devam)

Yazar(yıl)	Dergi	Ülke	Talep Konumu	Enerji Kaynakları	Çalışma Türü		Amaç Fonksiyonu		Metot	Göstergeler		
					SAS	GCS	SO	MO		Ekonomik	Güvenilirlik	Çevresel
Abbes ve diğ. (2014)	Mathematics and Computers in Simulation	Fransa	Konut	PV, WT, BESS	■			■	CEGA	LCC	LPSP	EE
Cano ve diğ. (2014)	Journal of the Energy Institute	İspanya	Belirli bir konum	PV, WT, BESS, FC, EL, HT	■		■		HOMER, HOGA, SDO, BTS	NPV		
Maleki ve Askarzadeh (2014b)	Sustainable Energy Technologies and Assessments	İran	Uzak bir alan	PV, WT, DG, BESS	■		■		HS	ACS		
Paliwal ve diğ. (2014)	Renewable Energy	Hindistan	Belirli bir konum	PV, WT, DG, BESS	■		■		PSO	LCOE		
Sharafi ve Elmekkawy (2014)	Renewable Energy	İspanya	Belirli bir konum	PV, WT, DG, BESS, FC, EL, HT	■			■	PSO	TCS	UL	FL
Maleki ve Askarzadeh (2014a)	Solar Energy	İran	Belirli bir konum	PV, WT, FC, EL, HT	■		■		ABSO	ACS	LPSP	
Askarzadeh ve Coelho (2015)	Solar Energy	İran	Uzak bir alan	PV, WT, BESS	■		■		PSO ve türevleri	LCC	LPSP	
Gupta ve diğ. (2015)	Renewable and Sustainable Energy Reviews	Hindistan	Koloni	PV, WT, BESS, DG	■		■		BBO	NPV, COE	EENS	

Tablo 2.1: Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması üzerine literatür incelemesi (devam)

Yazar(yıl)	Dergi	Ülke	Talep Konumu	Enerji Kaynakları	Çalışma Türü		Amaç Fonksiyonu		Metot	Göstergeler		
					SAS	GCS	SO	MO		Ekonomik	Güvenilirlik	Çevresel
González ve diğ. (2015a)	Sustainability	İspanya	Kırsal bir kasaba	PV, WT, GC, BM		■	■		GA	LCC		
González ve diğ. (2015b)	Applied Energy	İspanya	Kırsal bir kasaba	PV, WT, GC		■	■		GA	LCC		
Maleki ve Pourfayaz (2015)	Solar Energy	İran	Belirli bir konum	PV, WT, BESS	■		■		PSO, TS, SA, IPSO, IHS, IHSBSA, ABSO	ACS	LPSP	
Sharafi ve diğ. (2015)	Renewable Energy	Kanada	Bina	PV, WT, GC, BM, SoC, NGB, AR, G		■		■	Dinamik MO-PSO	NPV		FE, RER
Sharafi ve ElMekkawy (2015)	Renewable and Sustainable Energy Reviews	Kanada	Bina	PV, WT, GC, BM, SoC, NGB, AR, G		■		■	Dinamik MO-PSO, SAM	NPV		FE, RER
Ahmadi ve Abdi (2016)	Solar Energy	İran	Köy	PV, WT, BESS	■		■		BB-BC, PSO, HS	NPV	ENS	
Fathy (2016)	Renewable Energy	Mısır		PV, WT, FC, EL, HT	■		■		MBA, PSO, ABC, CuS	ACS		

Tablo 2.1: Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması üzerine literatür incelemesi (devam)

Yazar(yıl)	Dergi	Ülke	Talep Konumu	Enerji Kaynakları	Çalışma Türü		Amaç Fonksiyonu		Metot	Göstergeler		
					SAS	GCS	SO	MO		Ekonomik	Güvenilirlik	Çevresel
Maleki ve diğ. (2016b)	Energy	İran	Konut	PV, WT, FC, EL, HT	■		■		SA, HS, CSA, SAHS, CSAHS	LCC	LPSP	
Singh ve Kaushik (2016)	IET Renewable Power Generation	Hindistan	Köy	PV, BM	■	■	■		ABC, HOMER	LCOE, ACS		
Zebarjadi ve Askarzadeh (2016)	Solar Energy	İran	6 ev	PV, BESS, GC		■	■		HS	TC	LPSP	PE
Zhao ve Yuan (2016)	Soft Computing	Çin		PV, WT, BESS, DG	■			■	IFFO	ACS		PGE
Yahiaoui ve diğ. (2017)	Solar Energy	Cezayir	Köy	PV, DG, BESS	■		■		GWO, PSO	ACS		
Zhang ve diğ. (2017)	Energy Conversion and Management	İsveç	Bina	PV, BESS, GC		■		■	MO-GA	NPV		SSR
Altıntaş ve diğ. (2018)	International Journal of Energy Research	Türkiye	Üniversite	PV, WT; BESS, GC		■		■	ε-kısıt, NSGA-II, SPEA-2, optimize edilmiş MO-PSO	ATC		CO_2 emisyonu

Tablo 2.1: Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması üzerine literatür incelemesi (devam)

Yazar(yıl)	Dergi	Ülke	Talep Konumu	Enerji Kaynakları	Çalışma Türü		Amaç Fonksiyonu		Metot	Göstergeler		
					SAS	GCS	SO	MO		Ekonomik	Güvenilirlik	Çevresel
Eteiba ve diğ. (2018)	Sustainable Cities and Society	Mısır	Köy	PV, BM, BESS	■		■		FPA, HS, ABC, FFA	NPV	LPSP, EXC	GHG
Giallanza ve diğ. (2018)	Journal of Cleaner Production	Sicilya	3 farklı tesis	PV, WT, BESS	■		■		IOM	ACS	LOLP, SLLPR	
González ve diğ. (2018)	Renewable Energy	İspanya	Kasaba	PV, WT, BM, GC		■		■	GA	LCC		CO_2 emisyonu
Hatata ve diğ. (2018)	Sustainable Energy Technologies and Assessments	Fransa, Mısır	2 tesis	PV, WT, BESS	■		■		CLONALG, GA, bulanık uyarlanabilir GA	SC	LPSP	
Nayak ve Nayak (2018)	Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences	Hindistan	Konut	PV, BESS, GC		■	■		IHS	TAOC		
Zhang ve diğ. (2018)	Energy	İran	Uzak bir alan	PV, WT, BESS, HT, EL, FC	■		■		Hibrit CS-HS-SA	LCC		
Anand ve diğ. (2019)	IET Energy Systems Integration	Hindistan	Köy	PV, BESS, BG, BM, GC		■	■		GWO	NPV	LPSP	

Tablo 2.1: Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması üzerine literatür incelemesi (devam)

Yazar(yıl)	Dergi	Ülke	Talep Konumu	Enerji Kaynakları	Çalışma Türü		Amaç Fonksiyonu		Metot	Göstergeler		
					SAS	GCS	SO	MO		Ekonomik	Güvenilirlik	Çevresel
Ghenai ve Bettayeb (2019b)	Energy	Birleşik Arap Emirlikleri	Üniversite	PV, DG, BESS, FC, EL, HT	■			■	Bir simülasyon ve optimizasyon yöntemi	COE		RER, GHG
Javed ve diğ. (2019)	Energy	Çin	Ada	PV, WT, BESS	■		■		GA, HOMER	COE	LPSP	
Konneh ve diğ. (2019)	Sustainability	Sierra Leone	10 blok	PV, WT, BESS, DG, BM, GC		■		■	MO-PSO	LCC	DPSP	CO_2 emisyonu, DEF
Moghaddam ve diğ. (2019)	Renewable energy	İran	Köy	PV, WT, FC, HT, EL	■		■		FPA, TLBO, PSO	NPV	LOLE, LOEE	
Zhang ve diğ. (2019)	Energy Conversion and Management	İran	Uzak bir alan	PV, WT, HT, EL, FC	■			■	Hibrit CS-HS-SA, ANN	LCC	LPSP	
Attemene ve diğ. (2020)	International Journal of Hydrogen Energy	Fildişi Sahili	Ev	WT, FC, EL, HT, BESS, SuC	■			■	NSGA-II	ACS	LPSP	

Tablo 2.1: Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması üzerine literatür incelemesi (devam)

Yazar(yıl)	Dergi	Ülke	Talep Konumu	Enerji Kaynakları	Çalışma Türü		Amaç Fonksiyonu		Metot	Göstergeler		
					SAS	GCS	SO	MO		Ekonomik	Güvenilirlik	Çevresel
Khan ve Javaid (2020)	Engineering	İran	Belirli bir tüketici	PV, WT, BESS	■		■		TLBO, Jaya, GA	ACS	LPSP	
Kouhestani ve diğ. (2020)	International Journal of Green Energy	Kanada	Üniversite	PV, WT, BESS, GC		■		■	PSO	LCC	LPSP	GHG
Wu ve diğ. (2020)	Energy Sources Part A: Recovery, Utilization and, Environmental Effects	Çin	Belirli bir elektrik talebi	PV, WT, GC, PSS		■	■		SSA	LCOE		

2.1 HRES Tasarımında Kullanılan Yöntemler

HRES'lerin optimum boyutlandırılmasında kullanılan yöntemler genel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

2.1.1 Geleneksel Yöntemler

Grafik yapım yöntemi (GCM), en küçük kareler yöntemi (LSM), iteratif optimizasyon yöntemi (IOM), olasılıksal yaklaşım (PA), doğrusal programlama (LP), karesel programlama (QP), karma tam sayılı doğrusal programlama (MILP) vb. matematiksel optimizasyon yöntemleri bu kategoride yer almaktadır (Gupta ve diğ. 2011). Bu yöntemler uzun vadeli rüzgâr hızı, güneş radyasyonu vb. meteorolojik verilerin bulunduğu durumlarda tercih edilmektedir. HRES'lerin modellenmesinde LP ve MILP sıklıkla kullanılmaktadır (Chauhan ve Saini 2013; Singh ve diğ. 2016). LP ve MILP enerji yönetimi alanındaki karmaşık problemler için verimli bir şekilde çözülebilen modeller sunmaktadır. Bu modeller bazı problemlerde direk modelleme aracı olarak kullanılırken bazı problemlerde sezgisel bir algoritmanın bir parçası olarak kullanılabilmektedir (Polat ve Gürtuna 2018). LP ve MILP modellerinin çözümünde genellikle GAMS (Huneke ve diğ. 2012), LINGO (Ren ve Gao 2010), IBM ILOG CPLEX Optimization Studio (Dominguez ve diğ. 2018) vb. yazılımlar tercih edilmektedir.

HRES optimum boyutlandırma probleminde geleneksel yöntemleri kullanan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Ramakumar ve diğ. (1986), bir köyün enerji ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılan hibrit bir SA-PV/WT/BG/SH sisteminin tasarımında LP tekniğini kullanılmıştır. Sistem tasarımı için kaynak ve yük talebi kısıtları altında sistemin yıllık maliyetinin minimize edilmesi amaçlanmıştır.

Borowy ve Salameh (1994) çalışmasında hibrit bir SA-PV/WT sisteminde PV panellerin ve WT'lerin optimum boyutlarının hesaplanması için LSM tekniğini uygulamıştır. Uzun dönemli (30 yıllık) geçmiş güneş radyasyonu ve rüzgâr hızı verileri kullanılarak olasılık yoğunluk fonksiyonları belirlenmiştir. Vaka analizinde, bir telekomünikasyon sistemi talep noktası olarak belirlenmiştir.

Borowy ve Salameh (1996), PV/WT/akü hibrit sisteminde PV panellerin ve akünün optimum boyutlarının minimum sistem maliyetin altında belirlenmesi için GCM tekniğini kullanmıştır. Bu teknikte, verilen yük karakteristiği ve verilen bir WT göz önüne alındığında istenilen LPSP değerine erişebilmek için PV panellerinin ve akülerin sayısının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Markvart (1996), hibrit bir SA-PV/WT sisteminde PV panel ve WT boyutlarının belirlenmesi için GCM yöntemi kullanmıştır. Enerji tedarikindeki ortalama değerlerden sapmaların bir akü tarafından alındığı varsayılmış, ancak akünün boyutları dikkate alınmamıştır.

Kellogg ve diğ. (1996), PV/WT/akü hibrit sisteminde kaynakların optimum birleşiminin belirlenmesi amacıyla ekonomik faktörleri de göz önünde bulunduran sayısal bir algoritma geliştirilmiştir.

Kellogg ve diğ. (1998), şebekeden bağımsız olarak çalışan sadece WT, sadece PV ve hibrit PV/WT sistemlerinde üretim birimlerinin boyutlandırılması için sayısal bir algoritma geliştirilmiştir. Ele alınan sistemler yıllık yük talebini karşılayabilmek için yıllık sistem maliyetini minimize edebilmek amacıyla boyutlandırılmıştır. Değerlendirilen sistemler arasında maliyet karşılaştırması yapılmıştır. Ayrıca, yük talebinin en yakın enerji hattından karşılanması için enerji hattına uzantı yapılması durumu senaryolarla incelenmiştir.

Karaki ve diğ. (1999), farklı WT, farklı PV panelleri ve bir aküden oluşan otonom bir hibrit enerji sistemi için bir PA yaklaşımı geliştirmiştir. Önerilen yaklaşım birincil enerji dalgalanmaları ve donanım bozulmaları sebebiyle yaşanan kesintileri de hesaba katmaktadır.

Eke ve diğ. (2005), Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsünün elektrik tüketimini karşılamak amacıyla PV/WT hibrit sisteminin optimum tasarımı için GCM yöntemi kullanmıştır. Bireysel WT ve PV panel sistemlerinin boyutları aynı metot ile hesaplanmış ve hibrit sistem ile karşılaştırılmıştır.

Huneke ve diğ. (2012), GAMS yazılımında LP tekniğini kullanarak hibrit bir SA-PV/WT/DG/akü sisteminin iki farklı talep noktası (Hindistan ve Kolombiya'da bulunan köyler) için optimum tasarımını belirlemiştir. Çalışmada çeşitli parametreler üzerinde duyarlılık analizleri de yapılmıştır.

2.1.2 Geleneksel Olmayan Yöntemler (Yapay Zekâ Yöntemleri)

Bu alanda GA, PSO, HS, SA, CS vb. sezgisel algoritmalar bireysel olarak veya hibrit bir şekilde kullanılmaktadır. Bu algoritmaların genellikle uzun vadeli güneş radyasyonu, rüzgâr hızı gibi meteorolojik verilerin olmadığı durumlar için makul sürelerde daha iyi sonuçlar verdiği söylenmektedir. Yapay zekâ (AI) algoritmaları HRES'lerde dahil edilen sistem bileşenlerindeki doğrusal olmayan değişimleri de ele alabilir (Badwawi ve diğ. 2015; Chauhan ve Saini 2014).

HRES optimum boyutlandırma probleminde AI yöntemleri kullanan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Yang, H. ve diğ. (2008), hibrit bir PV/WT/akü sistemini optimize etmek için bir optimal boyutlandırma yöntemi önermiştir. GA'ya dayanan bu yöntemde, yıllık sistem maliyetinin minimize edilmesi ve istenen LPSP değerini elde edecek optimum tasarımın belirlenmesi amaçlanmıştır. Karar değişkenleri PV panel sayısı, WT sayısı, batarya sayısı, PV eğim açısı ve WT kurulum yüksekliği olarak belirlemiştir. Bu yöntem, bir telekomünikasyon röle istasyonuna güç sağlayan bir sistemin analizi için uygulanmıştır.

Hakimi ve Moghaddas-Tafreshi (2009), WT/HT-FC sisteminin optimum boyutlandırılması problemini ele almıştır. Sistem gerekli hidrojeni üretmek için biyokütleyi kullanmaktadır. Talebin karşılanması için toplam maliyetin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Boyutlandırmada PSO algoritması kullanılmıştır.

Kashefi Kaviani ve diğ. (2009), enerji talebini karşılamak amacıyla hibrit bir WT/PV/FC sisteminin optimal tasarımı üzerine çalışmıştır. 20 yıllık operasyon süresinde sistemin yıllık maliyetinin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada PSO yönteminin gelişmiş bir versiyonu kullanılmıştır. Yazarlar sistem bileşenlerinin kesintilerinin sistem güvenilirliği ve maliyeti üzerindeki etkilerini araştırmıştır.

Ekren ve Ekren (2010), hibrit bir PV/WT/akü sisteminin boyutlarını optimize etmek için SA algoritmasını kullanmıştır. Amaç fonksiyonu hibrit sistemin toplam maliyetinin minimize edilmesi ve karar değişkenleri PV panel boyutları, WT pervanesinin süpürdüğü alan ve akü kapasitesi olarak seçilmiştir. Enerji sistemi, Türkiye'de bir kampüs alanında mobil iletişim (GSM) baz istasyonunun elektrik talebini karşılamak için kullanılmıştır. Yazarlar, hibrit enerji sistemini temsil eden bir simülasyon modelini ARENA 12.0'da hazırlamış ve GSM istasyonun saatlik rüzgâr hızı, güneş ışınımı ve enerji tüketimi dağılımları için geçmiş verilere dayanarak ARENA 12.0'ın girdi analizi kısmını kullanarak uygun dağılımları bulmuştur.

Askarzadeh (2013), hibrit bir PV/WT/akü sisteminin optimum tasarımı için HS, SA ve CS algoritmalarını birleştirerek hibrit bir algoritma (CSAHS) önermiştir. Önerilen algoritmadan elde edilen sonuçlar hibrit sistem, sadece PV ve sadece WT enerji sistemleri için SA ve HS-SA algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Amaç fonksiyonu toplam yıllık toplam maliyetin minimize edilmesidir.

Kumar ve diğ. (2013), hibrit bir PV/WT/DG/akü sisteminde enerjinin mevcut olması durumunu garanti ederken toplam maliyetin minimize edilmesi için optimum bileşen boyutlarının ve operasyonel stratejisinin belirlenmesinde BBO algoritmasını kullanmıştır. Elde edilen sonuçlar, GA ve PSO algoritmaları ve HOMER'den elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Merei ve diğ. (2013a), hibrit SA-PV/WT/DG/akü sisteminin modellenmesi ve optimizasyonu üzerine çalışmıştır. Çalışmada, kurşun-asit, lityum-iyon ve vanadyum redoks akış pili olmak üzere 3 farklı akü teknolojisinin entegrasyonu araştırılmıştır. Baz istasyonu tarafından ihtiyaç duyulan elektriğin karşılanması için şarj/deşarj proseslerini ve sistem bileşenleri arasındaki enerji akışını kontrol eden bir enerji yönetim sistemi önerilmiştir. Sistemde hangi akü teknolojisinin hangi adımda şarj veya deşarj olacağı, dizel jeneratörün ne zaman aktive edileceği ve bileşenler

arasındaki akış kontrol edilmektedir. Sistemin 20 yıllık performansı analiz edilmiştir. Kullanılan bileşenlerin optimum boyutlarını ve optimum çalışma koşullarını belirlemek için GA kullanılarak toplam sistem maliyeti optimize edilmiştir. Farklı akü fiyatları, faiz oranları ve karbon emisyonu fiyatları için duyarlılık analizleri gerçekleştirmiştir.

Paliwal ve diğ. (2014), PV/WT/DG/akü otonom sisteminde optimum kaynak karmasının belirlenmesi için bir yaklaşım sunmuştur. Bu yaklaşım iki adımdan oluşmaktadır. İlk adımda bir tekno-sosyo-ekonomik kritere göre, tanımlanan farklı hibrit sistem konfigürasyonlarının optimum bileşen boyutları PSO algoritması kullanılarak elde edilmiştir. İkinci adımda, konfigürasyonlar LCOE değerlerine göre karşılaştırılmış ve minimum LCOE'yi sağlayan konfigürasyon optimum kaynak karması olarak belirlenmiştir.

Gupta ve diğ. (2015) birim enerji maliyetini minimize etmek amacıyla otonom çalışan küçük HRES'lerin optimal bileşen boyutlarını bulmak için BBO algoritmasını kullanmıştır. Ele alınan HRES; WT, PV panelleri, akü ve DG'den oluşmaktadır. Ayrıca, küçük otonom HRES'ler üzerinde geçmiş verileri kullanmak yerine tahmin edilmiş hava durumu değerlerinin kullanılması durumunu analiz edilmiştir. Rüzgâr hızı ve güneş radyasyonu tahminleri için geri yayılımlı eğitim algoritmasıyla eğitilen YSA'ya dayalı zaman serileri tahmin metodu kullanılmıştır. Sonuç olarak, küçük otonom HRES'lerin optimizasyon probleminde rüzgâr hızı ve güneş ışınımı tahminlerinin kullanımının sonuçları geliştirdiği tespit edilmiştir.

Singh ve Kaushik (2016), hibrit SA-PV/BM ve GC-PV/BM sistemlerinin boyutlandırılması için ABC algoritmasını ve HOMER yazılımını kullanmıştır. SA-PV/BM sistemi ile karşılaştırıldığında, GC-PV/BM sisteminin daha düşük maliyetli ve güvenilir olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, çalışılan vaka için ABC algoritmasının HOMER yazılımına göre daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. LCOE ve diğer parametreler ile ilgili duyarlılık analizleri de gerçekleştirilmiştir.

2.1.3 Yazılım

Sinha ve Chandel (2014), HRES'lerin tasarımı, analizi ve optimizasyonu için kullanılan yazılımlar ve özellikleri hakkında detaylı bir inceleme çalışması sunmuştur. ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (National Renewable Energy Laboratory, NREL) tarafından geliştirilen çoklu enerji kaynaklarının hibrit optimizasyonu (Hybrid optimization of multiple energy resources-HOMER), Dufo-López ve Bernal-Agustín (2005) tarafından geliştirilen genetik algoritmalar ile hibrit optimizasyon (Hybrid optimization by genetic algorithms-HOGA), HYBRID2 vb. bu alanda kullanılan yazılımlardır. HOMER GC- veya SA-HRES'lerin simülasyonu ve optimizasyonunda en yaygın kullanılan yazılımdır. HRES'lerin HOMER yazılımı kullanılarak optimum planlanması konusu Bahramara ve diğ. (2016) tarafından kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. HOMER yazılımı birçok parametre üzerine duyarlılık analizleri yapılmasına izin vermektedir. Ancak yukarıda bahsi geçen çoğu tekniğin problemin çözümünde daha kısa zamana ihtiyaç duyduğu ve HOMER yazılımından daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir (Singh ve diğ. 2016).

HRES optimum boyutlandırma probleminde yukarıda verilen yazılımları kullanan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Dufo-López ve Bernal-Agustín (2005), hibrit bir PV/DG sisteminin tasarımı için C++ ortamında GA kullanarak bir program (HOGA) geliştirmiştir. HOGA programı tarafından optimize edilen PV/DG sistemi, yalnız PV ve yalnız DG, en kötü durum senaryosuna dayalı klasik bir metot ile optimize edilen sadece PV sistemi ve HOMER yazılımı ile optimize edilen PV/DG ile karşılaştırılmıştır.

Rehman ve diğ. (2007) çalışmasında Suudi Arabistan'da bulunan bir şebekeye bağlı dizel güç üretim tesisine rüzgâr enerjisi penetrasyonun ön fizibilite çalışmasını HOMER yazılımı kullanılarak yapmıştır. Rüzgâr hızı, mazot fiyatı vb. durumlar için duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir.

Shaahid ve Elhadidy (2007), hibrit PV/DG/akü sisteminde bileşenlerin seçimi ve boyutlandırılması işlemlerini HOMER kullanarak gerçekleştirmiştir. HOMER yazılımında, 1 yıllık yük verileri ve güneş ışınımı değerleri, bileşen teknik detayları ve maliyetleri, kısıtlar vb. girdi olarak kullanılmıştır.

Dalton ve diğ. (2008) çalışmasında büyük bir otelin ihtiyaçları için HOMER ve HYBRIDS yazılımlarını kullanarak hibrit bir PV/WT/DG/akü sisteminin tasarımını gerçekleştirmiştir. Değerlendirme kriterleri, NPV, RER ve PBP olarak belirlenmiştir. Bu iki yazılım kullanılarak yalnız DG, yalnız yenilenebilir enerji kaynakları ve hibrit yenilenebilir enerji kaynakları/DG sistemleri karşılaştırılmıştır.

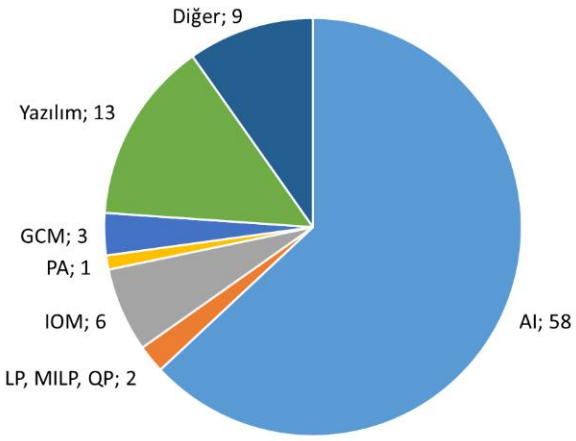
Kenfack ve diğ. (2009), hibrit bir PV/WT/SH sisteminin tasarımında HOMER yazılımını kullanmıştır. Ayrıca sistemin şebekeye uzantı durumu analiz edilmiş ve hibrit sistemin daha uygun olduğu bulunmuştur.

Karakoulidis ve diğ. (2011), verilen bir elektrik yükünü karşılamak için hibrit bir PV/DG/akü sisteminin optimizasyonunu HOMER yazılımı ile yapılmıştır. Akü ve DG'nin, FC-HT sistemi ile değiştirilme durumu incelenmiştir. Yakıt fiyatı, güneş ışınımı ve elektrik talebi verileri üzerinde duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir.

Hiendro ve diğ. (2013), hibirt bir PV/WT/akü sisteminin teknik ve ekonomik analizini HOMER yazılımı ile gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak, sisteme yüksek maliyetler yüklemesine rağmen WT ve akülerin akşam saatlerindeki yük talebinin karşılamasında gerekli olduğu tespit edilmiştir.

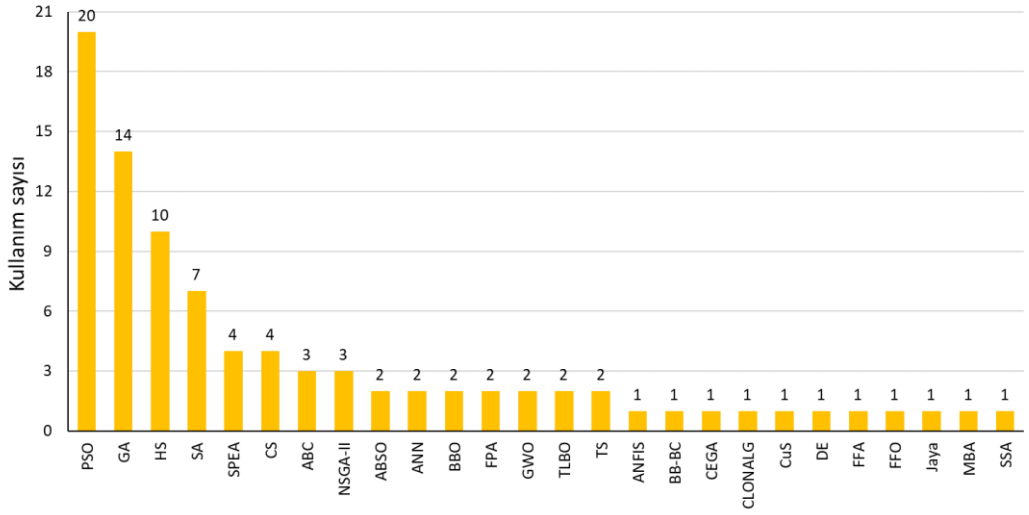
2.1.4 Genel Değerlendirme

Literatür taraması sonucunda Tablo 2.1'de incelenen çalışmalar kullandıkları optimizasyon yöntemlerine göre Şekil 2.3'de verildiği gibi sınıflandırılmıştır. Şekil 2.3'den görülebileceği üzere, literatürde AI teknikleri sıklıkla kullanılmıştır. 58 farklı makalede AI tekniklerini kullanılarak HRES boyutlandırılma problemine çözüm aranmıştır.



Şekil 2.3: Literatür taramasında incelenen makalelerde yöntemlerin kullanım sayıları

Başlangıçta HRES tasarımı alanında yapılan çalışmalarda geleneksel optimizasyon yöntemleri daha sık kullanılırken, özellikle son 10 yılda yeni nesil AI teknikleri, daha az hesaplama zamanı gerektirmesi ve daha yüksek doğruluk sağlaması sebebiyle birçok çalışmada tercih edilmiştir. Bu alanda HOMER ve HOGA gibi yazılımlar ikinci sırada kullanılmıştır. Şekil 2.4'den görülebileceği üzere, PSO, GA, HS, SA, CS, ABC vb. AI teknikleri hibrit enerji sistemlerinin optimizasyonunda kullanmıştır. GA, PSO ve türevleri bahsi geçen algoritmalar arasında en popüler olarak kullanılan algoritmalardır. Hatta birçok makalede birden fazla AI tekniği uygulanmış ve elde edilen sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmıştır. Ayrıca son yıllarda yapılan çalışmalarda, birden fazla AI tekniğinin birbirine entegrasyonu ile elde edilen hibrit algoritmaların uygulandığı ve bu hibrit algoritmaların bireysel algoritmalardan daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.



Şekil 2.4: Literatür taramasında incelenen makalelerde AI yöntemlerin kullanım sayıları

2.2 HRES Tasarımında Kullanılan Amaç Fonksiyonları

HRES'lerin tasarımı, tek amaçlı (SO) veya çok amaçlı (MO) olarak optimize edilebilmektedir. Tek amaçlı çalışmalar genellikle maliyetin minimizasyonu üzerine odaklanmaktadır. Ayrıca, birden fazla amaç fonksiyonunun (ekonomik, çevresel ve güvenilirlik) göz önünde bulunduran çok amaçlı modellerde bulunmaktadır. Son dönemde yapılan çok amaçlı çalışmaların bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Dufo-López ve Bernal-Agustín (2008), uzak ve izole alanlarda bulunan HRES'lerin optimizasyonu için eş zamanlı olarak toplam NPV, CO_2 emisyonu ve UL amaçlarını minimize etmeye çalışmıştır. Yazarlar, HRES bileşenlerinin en iyi birleşimini ve kontrol stratejilerini bulmak amacıyla çok amaçlı EA ve GA algoritmalarını kullanmıştır. Çalışmada, hibrit bir PV/WT/DG/FC-HT/akü sistemin olası çözümler kümesi (Pareto kümesi) elde edilerek tasarlanmıştır.

Wang ve Singh (2009), hibrit bir GC-PV/WT/akü sisteminin ekonomik (CTS), güvenilirlik (EIR) ve çevresel (PE) ölçütler açısından fiziksel ve operasyonel kısıtlar altında uygun bir şekilde tasarımı için çok amaçlı PSO algoritmasını kullanmıştır. Sistemin belirsizlik altında olma ve olmama durumlarına göre iki farklı senaryo araştırılmıştır.

Katsigiannis ve diğ. (2010) çalışmasında küçük otonom HRES'lerin COE ve GHG amaçlarının minimizasyonu altında çok amaçlı optimizasyonu için bir model önermiştir. MO optimizasyon probleminin çözümü için NSGA-II algoritması kullanılmıştır. Yazarlar çalışmada, iki farklı tipte sistem modellemiştir. Birinci sistem depolama için aküleri kullanırken ikinci sistem depolama için hidrojeni kullanmaktadır. Sonuç olarak, çalışmada hem çevresel hem de ekonomik amaçlar altında akülerin üstünlüğü ortaya koyulmuştur.

Ould Bilal ve diğ. (2010), uzak ve izole bir bölgede bulunan hibrit bir PV/WT/akü sisteminin boyutlarının optimize edilmesinde çok amaçlı GA tekniğini kullanmıştır. ACS ve LPSP amaç fonksiyonlarının minimize edilmesi amaçlanmıştır ve 3 farklı yük profili üzerinde analizler yapılmıştır.

Abbes ve diğ. (2014) otonom çalışan hibrit bir PV/WT/akü sistemini LCC, EE ve LPSP amaçları altında modellemiştir. Optimal konfigürasyon dinamik bir model kullanılarak ve CEGA uygulanarak bulunmuştur. Bu metodoloji bir evin yıllık toplam enerji talebinin %95'inin karşılanması için kullanılan bir HRES'in optimum boyutlandırılması için kullanılmıştır.

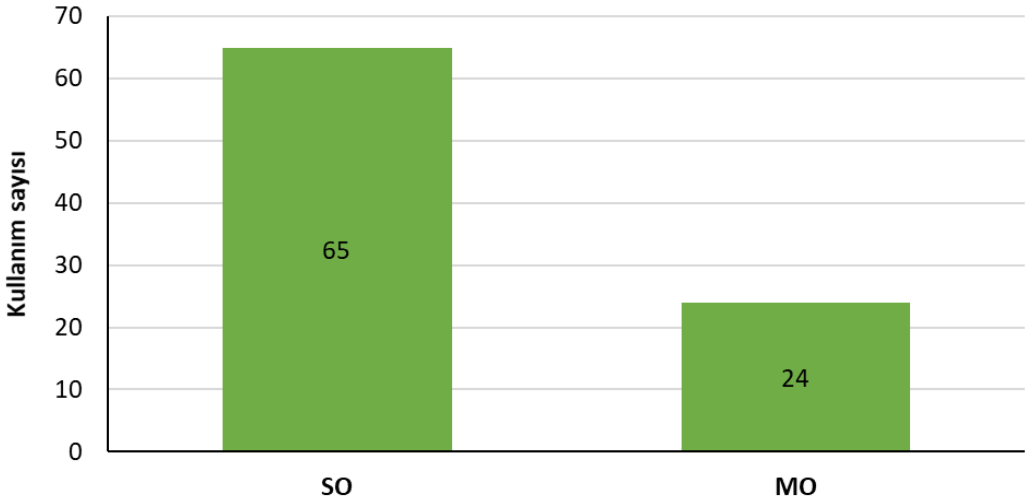
Sharafi ve Elmekkawy (2014), hibrit bir WT/PV/DG/akü/FC-HT sisteminin optimal tasarımı için PSO-simülasyon tabanlı bir yaklaşım kullanmıştır. Yazarlar problemi, MO optimizasyon problemi olarak ele almış ve toplam SC, UL ve FE amaçlarını minimize etmeye çalışmıştır.

Zhao ve Yuan (2016), hibrit bir SA-PV/WT/DG/akü sisteminin tasarım optimizasyonu için geliştirilmiş bir FFO algoritmasına dayalı MO optimizasyon yöntemi önermiştir. Yazarlar, problemin amaçlarını ACS ve PE'nin minimize edilmesi olarak belirlemiştir.

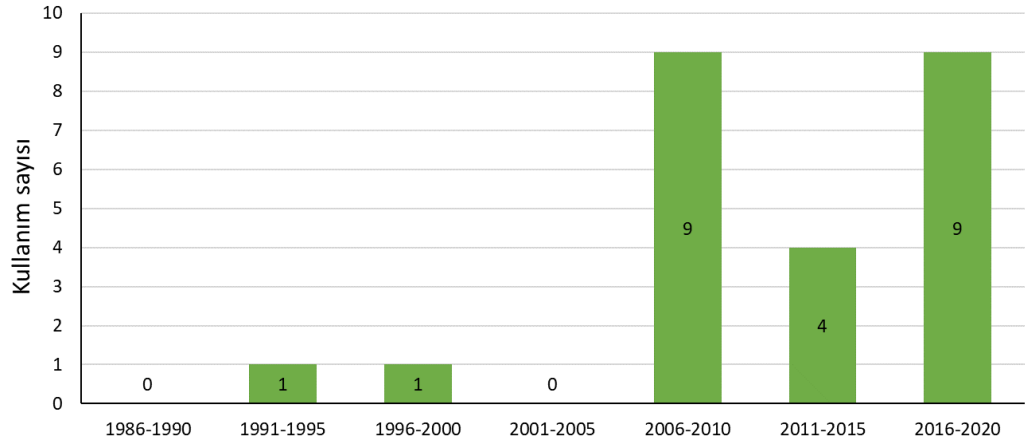
Kouhestani ve diğ. (2020), hibrit bir GC-PV/WT/akü sisteminin tasarımında PV panellerin, WT ve akü birimlerinin optimum sayısı ve konfigürasyonunu belirlemek için çok amaçlı PSO algoritması geliştirmiştir. Birinci amaç fonksiyonu toplam LCC'nin minimize edilmesi iken ikinci amaç fonksiyonu sistem güvenilirliğinin maksimize edilmesi olarak belirlenmiştir. Ayrıca çevresel kriterler de göz önüne alınmış ve şebekeden alınan fosil kaynaklı elektriğin miktarı kısıtlar ile sınırlandırılmıştır. Sonuç olarak, bir HRES'in karbon ayakizini ve enerji maliyetini önemli derecede azaltabileceği söylenmiştir.

2.2.1 Genel Değerlendirme

Şekil 2.5'den görülebileceği üzere, literatürde incelenen çalışmalarda ilgili alanda SO optimizasyon problemleri üzerine daha fazla sayıda çalışma bulunurken MO optimizasyon problemleri üzerine daha az sayıda çalışma bulunduğu tespit edilmiştir. Şekil 2.6'dan görülebileceği gibi, son yıllarda MO optimizasyon üzerine yapılan çalışmalar artmaya başlamıştır. Ekonomik, çevresel, güvenilirlik ile ilgili göstergelerden iki veya daha fazlası amaç fonksiyonu olarak ele alınmaktadır.



Şekil 2.5: Literatür taramasında incelenen makalelerde SO ve MO optimizasyon çalışmalarının kullanım sayıları



Şekil 2.6: Literatür taramasında incelenen MO optimizasyon çalışmalarının yıllara göre dağılımı

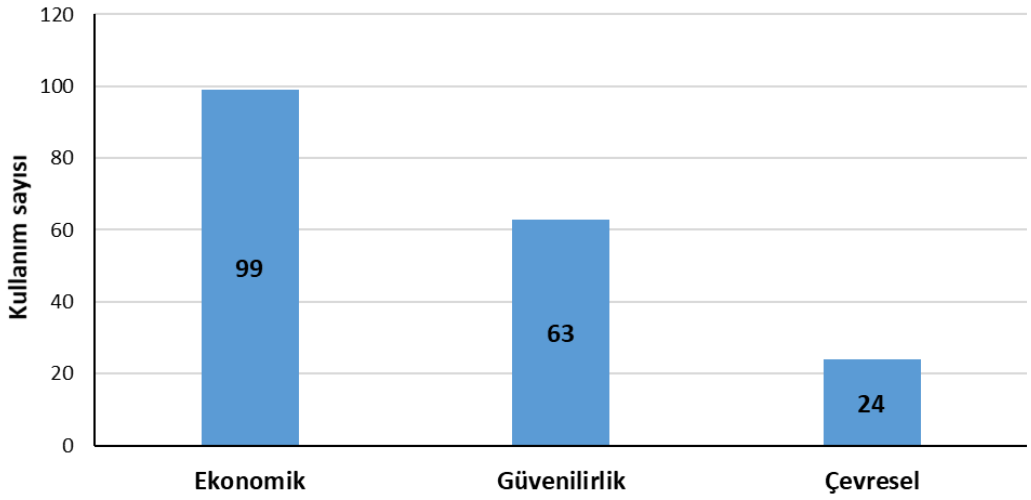
MO optimizasyon çalışmaları birden fazla amaç fonksiyonunu göz önüne aldığı için sistem tasarımına daha uygundur. Örneğin; birbiriyle çelişen maliyet ve güvenilirlik göstergeleri düşünülsün. Bu sistemde, bileşenlerin boyutu büyüdükçe maliyet artarken ve güvenilirliği temsil eden örnek bir gösterge olarak LOLP'de azalacaktır. Dolayısıyla sistem güvenilirliği de artacaktır. Çok amaçlı çalışmalarda, bu iki çelişen amaç fonksiyonu göz önüne alınarak HRES'in optimum olarak boyutlandırılmasına çalışılacaktır. Bunların yanı sıra, maliyet minimizasyonu amaç fonksiyonu olarak sisteme eklenirken çevresel ve güvenilirlik ile ilgili göstergeler belirli kısıtlar çerçevesinde sisteme eklenerek SO olarak modellenebilmektedir.

2.3 HRES Tasarımında Kullanılan Göstergeler

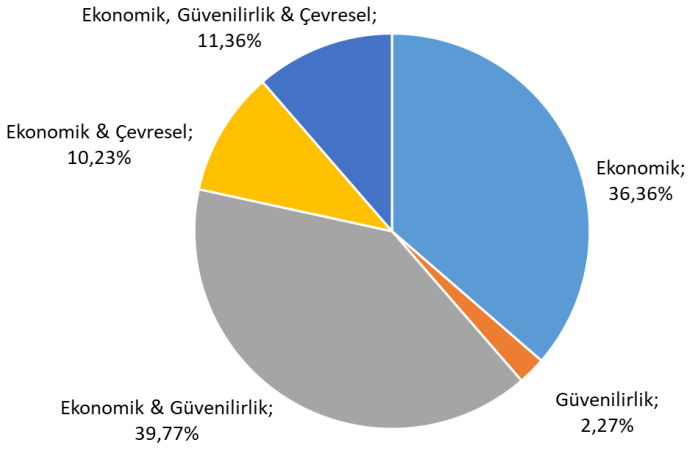
HRES'lerin optimum boyutlandırılmasında kullanılan göstergeler genellikle üç başlık altında toplanabilir:

i. Ekonomik,
ii. Güvenilirlik ve
iii. Çevresel.

Şekil 2.7, literatür taraması kapsamında Tablo 2.1'de incelenen çalışmalarda kullanılan göstergelerinin kullanım sayılarını ve Şekil 2.8 ise, bu çalışmalarda tek veya beraber olarak kullanılan göstergelerin dağılımını vermektedir.



Şekil 2.7: Literatür taramasında incelenen makalelerde ekonomik, güvenilirlik ve çevresel göstergelerin toplam kullanım sayıları



Şekil 2.8: Literatür taramasında incelenen makalelerde ekonomik, güvenilirlik ve çevresel göstergelerin dağılımı

Şekil 2.7'den ve Şekil 2.8'den görülebileceği üzere; çalışmalar genellikle ekonomik ve güvenilirlik göstergeleri üzerine odaklanmıştır. Çevresel göstergeler nispeten bu iki göstergeye göre daha az kullanılmıştır. Son dönemlerdeki çevresel kaygılar ve toplumun konu üstündeki artan hassasiyeti sebebiyle çevresel göstergeler de kullanılmaya başlanmıştır. Çalışmaların yaklaşık %36'sı sadece ekonomik göstergeleri düşünürken yaklaşık %40'ı ekonomik ve güvenilirlik göstergeleri aynı çalışma içinde kullanmıştır. Sonuç olarak, çalışmaların yaklaşık %61 birden fazla göstergeyi planlama ve boyutlandırma sürecinde dahil etmiştir. Dolayısıyla, elde edilen bulgular HRES boyutlandırma probleminin sadece maliyet odaklı değil birden fazla boyutuyla düşünülmesi gerektiğini göstermektedir.

Bu kapsamda, literatür araştırmasından elde edilen bilgiler ışığında, sıklıkla kullanılan ekonomik, güvenilirlik ve çevresel göstergeler ve bunların hesaplama formülleri alt bölümlerde açıklanmıştır.

2.3.1 Ekonomik Göstergeler

Literatürde kullanılan başlıca ekonomik göstergeler şu şekildedir:

2.3.1.1 Sistem Maliyeti (SC)

Sistem maliyeti (SC); sistem ömrü boyunca HRES'de kullanılacak WT, PV panel vb. yenilenebilir enerji üretim birimlerinin, akü vb. depolama araçlarının ve DG vb. yedek araçların ilk yatırım maliyeti (IC), operasyon ve yenileme maliyeti (OMC), yenileme maliyeti (RC), hurda değeri (SV) gibi kalemler göz önüne alınarak bir maliyet fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Elde edilen bu maliyet fonksiyonu optimum boyutlandırma problemine amaç fonksiyonu olarak ilave edilerek minimize edilmesi amaçlanmaktadır (Anoune ve diğ. 2018; Luna-Rubio ve diğ. 2012; Tezer ve diğ. 2017).

Literatürde sistem maliyetinin hesaplanması genellikle iki farklı şekilde tanımlanmaktadır. İlk olarak, sistem ömrü boyunca ortaya çıkan tüm nakit akışları planlama dönemi başlangıç noktasına getirilmektedir. Örneğin; IC sistem planlama periyodu başında oluşurken OMC planlama periyodu boyunca her yıl ortaya çıkmaktadır (Maleki ve diğ. 2016a). SC, para birimi (PB) ($, €, ₺ vb.) olarak ifade edilmektedir. $i = \{1, \dots, n\}$ sistem bileşenlerini ifade etmek üzere SC, Eşitlik (2.1) veya Eşitlik (2.2)'deki gibi hesaplanabilmektedir (Anoune ve diğ. 2018; Bukar ve Tan 2019; Luna-Rubio ve diğ. 2012; Maleki ve diğ. 2016a; Tezer ve diğ. 2017).

$$NPV(SC) = \sum_{i=1}^{n} N_i \left(IC_i + NPV(RC_i) + NPV(OMC_i) - NPV(SV_i)\right) \tag{2.1}$$

veya

$$NPV(SC) = \sum_{i=1}^{n} N_i \left(IC_i + RC_i SPPW_i + OMC_i \frac{1}{CRF(j,R)} - SV_i SPPW_i\right) \tag{2.2}$$

Burada;

N_i : i. bileşenin sayısı (adet) veya boyutu (kW)
IC_i : i. bileşenin ilk yatırım maliyeti (PB/adet veya PB/kW)
RC_i : i. bileşenin yenileme maliyeti (PB/adet veya PB/kW)
OMC_i : i. bileşenin operasyon ve bakım maliyeti (PB/adet/yıl veya PB/kW/yıl)
SV_i : i. bileşenin hurda değeri (PB/adet veya PB/kW)
CRF : Sermaye geri dönüş faktörü
$SPPW$: Tek ödeme bugünkü değer faktörü

CRF, Eşitlik (2.3)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$CRF(j,R) = \frac{j(1+j)^R}{(1+j)^R - 1} \tag{2.3}$$

Burada;

j : Faiz oranı (%)
R : Sistem ömrü veya planlama periyodu (yıl), $r = \{1, \dots, R\}$

SPPW, Eşitlik (2.4)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$SPPW_i = \sum_{n=1}^{X_i} \frac{1}{(1+j)^{LS_i n}} \tag{2.4}$$

Burada;

X_i : i. bileşenin sistem ömrü boyunca değiştirilme sayısı

LS_i : i. bileşenin ömrü (yıl)

X_i değeri, Eşitlik (2.5)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$X_i = \left\lfloor \frac{R}{LS_i} \right\rfloor \quad \forall i \in I \tag{2.5}$$

Sistemin şebekeye bağlı olması durumunda, planlama periyodu boyunca şebekeye elektrik satışından elde edilen toplam gelirin (TCGS) net bugünkü değeri ve planlama periyodu boyunca şebekeden elektrik satın almadan kaynaklanan toplam giderin (TCGB) net bugünkü değeri amaç fonksiyonuna dahil edilmektedir.

2.3.1.2 Yaşam Döngü Maliyeti (LCC)

Yukarıda verilen hesaplama kapsamında NPV analizi kullanılarak hesaplanan yaşam döngü maliyeti (LCC) de ekonomik gösterge olarak kullanılmıştır.

LCC, bir HRES'in yaşam döngüsü (planlama periyodu) boyunca ortaya çıkması beklenen IC, OMC, RC vb. tüm sistem maliyetlerinin net bugünkü değerinin toplamı olarak tanımlanmaktadır. Bu maliyet kalemleri hesaplanırken kurulması planlanan tüm sistem bileşenleri dikkate alınmaktadır. LCC, PB olarak ifade edilmektedir ve Eşitlik (2.6)'da verildiği gibi hesaplanmaktadır (Anoune ve diğ. 2018; Askarzadeh ve Coelho 2015; Bukar ve Tan 2019; Khatib ve diğ. 2016; Lian ve diğ. 2019; Tezer ve diğ. 2017).

$$LCC = IC + NPV(OMC) + NPV(RC) - NPV(SV) \tag{2.6}$$

2.3.1.3 Yaşam Döngü Birim Maliyeti (LUC)

Yaşam döngü birim maliyeti (LUC), hesaplanan LCC değerinin sistemin ömrü boyunca üretilen toplam enerji miktarına bölünmesi ile elde edilmektedir. R, sistem ömrünü (yıl) göstermektedir. LUC, PB/kWh olarak ifade edilmektedir ve Eşitlik (2.7)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır (Prasad ve Natarajan 2006; Tezer ve diğ. 2017).

$$LUC = \frac{LCC}{R(TAEP)} \tag{2.7}$$

TAEP, yıllık üretilen toplam enerji miktarını (kWh/yıl) ifade etmektedir ve Eşitlik (2.8)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır (Prasad ve Natarajan 2006; Tezer ve diğ. 2017).

$$TAEP = \sum_{t=1}^{365} EG_t \tag{2.8}$$

$t = \{1, \dots, 365\}$ yılın günlerini göstermek üzere, EG_t (kWh), *t*. günde üretilen toplam enerji miktarını ifade etmektedir.

2.3.1.4 Yıllık Sistem Maliyeti (ACS)

İkinci olarak, sistem maliyetinin hesaplanmasında göz önünde bulundurulan maliyet kalemleri yıllık değerlere dönüştürülerek yıllık sistem maliyeti (ACS) hesaplanmaktadır. Bu durumda ACS, PB/yıl olarak ifade edilmektedir ve Eşitlik (2.9) veya Eşitlik (2.10)'daki gibi hesaplanmaktadır (Bukar ve Tan 2019; Maleki ve diğ. 2016a; Shezan ve diğ. 2018; Tezer ve diğ. 2017).

$$ACS = NPV(SC)CRF(j, R) \tag{2.9}$$

veya

$$ACS = \sum_{i=1}^{n} N_i \left((IC_i + RC_i SPPW_i - SV_i SPPW_i) CRF(j,R) + OMC_i \right) \quad (2.10)$$

2.3.1.5 Enerji Maliyeti (COE)

Enerji maliyeti (COE), üretilen enerjinin birimi başına maliyeti gösterir ve PB/kWh olarak ifade edilmektedir. Eşitlik (2.11)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır (Deshmukh ve Deshmukh 2008; Lian ve diğ. 2019; Tezer ve diğ. 2017).

$$COE = \frac{ACS}{TAEP} \quad (2.11)$$

2.3.1.6 Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (LCOE)

Seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE veya LCE), bir HRES'in yatırım, işletme, bakım vb. maliyetleri düşünülerek hesaplanan yaşam döngü maliyetinin sistemin ömrü boyunca üretilen enerjiye oranıdır. Bir HRES'in ömrü boyunca kar elde edebilmesi için gerekli başabaş noktası fiyatı veya minimum enerji birim fiyatını göstermektedir. LCOE, PB/kWh olarak ifade edilmektedir. Literatürde farklı LCOE hesaplama yöntemleri olmakla beraber genellikle LCOE Eşitlik (2.12) veya Eşitlik (2.13)'de gösterildiği hesaplanabilmektedir (Bruck ve diğ. 2018; Bukar ve Tan 2019; Khatib ve diğ. 2016; Tezer ve diğ. 2017; Zhao ve diğ. 2017).

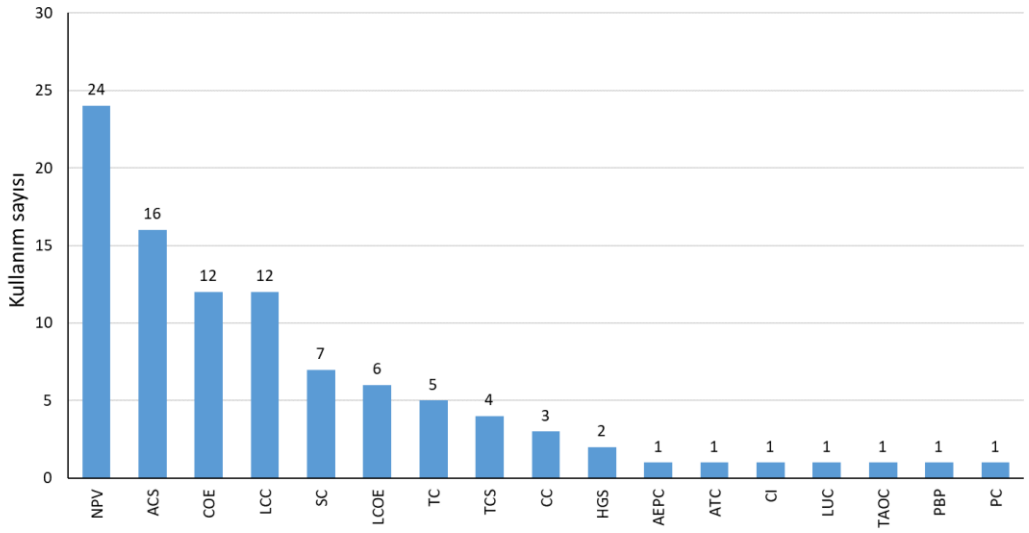
$$LCOE = \frac{LCC}{R(TAEP)} \quad (2.12)$$

veya

$$LCOE = \frac{CRF(j,R)LCC}{TAEP} \quad (2.13)$$

2.3.1.7 Genel Değerlendirme

Şekil 2.9'dan görülebileceği üzere, literatürde incelenen makalelerde NPV, ACS, LCC, COE ve LCOE sıklıkla kullanılan ekonomik göstergelerdir. Bazı makalelerde değerlendirmeler için birden fazla ekonomik gösterge de hesaplanarak alternatif HRES tasarımları arasında kıyaslamalar yapılmış ve sisteme yeni üretim birimlerinin veya enerji depolama birimlerinin eklenmesi durumunda LCOE, COE gibi göstergelerin değişimi gözlenmiştir.



Şekil 2.9: Literatür taramasında incelenen makalelerde ekonomik göstergelerin kullanım sayıları

2.3.2 Güvenilirlik göstergeleri

İklim ve hava koşullarındaki belirsizlikler, HRES'lerdeki enerji üretimini büyük ölçüde etkilemektedir ve güvenli ve güvenilir bir şekilde enerji tedarikinde zorluklara yol açabilmektedir. Güvenilirlik göstergeleri, bir HRES'in yük talebini karşılama yeteneğini değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır (Lian ve diğ. 2019). Bir HRES'in performansının değerlendirilmesinde yaygın ve güncel olarak kullanılan güvenilirlik indekslerinden bazıları LPSP, EENS, LOEE, LOLE, ELF ve LA'dır (Bukar ve Tan 2019). Bu göstergelerin açıklamaları ve matematiksel formülleri aşağıda tanımlanmıştır.

2.3.2.1 Beklenen Enerji Kaybı (LOEE)

Beklenen enerji kaybı (LOEE) veya diğer ifadeyle karşılanmaması beklenen enerji (EENS), sistem yük talebinin mevcut üretim kapasitesini geçmesi durumunda karşılanmaması beklenen enerjiyi (Chauhan ve Saini 2014) veya karşılanamayan enerjinin beklenen değerini (Tezer ve diğ. 2017) ifade etmektedir. LOEE, kWh/yıl cinsinden ifade edilmektedir ve Eşitlik (2.14)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır (Georgilakis ve Katsigiannis 2009; Li ve Zio 2012; Moghaddam ve diğ. 2019).

$$LOEE = EENS = \sum_{t=1}^{T} EU_t \tag{2.14}$$

Burada, t zaman dilimlerini (örneğin; 1 saat) ve T, toplam zaman dilimi sayısını göstermektedir, $t = \{1, \dots, T\}$. Genellikle $T = 8760$ saat (1 yıl) olarak ele alınmaktadır. EU_t, t. zaman diliminde sistemin sağlayamadığı enerji miktarını ifade etmektedir (kWh) ve Eşitlik (2.15)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır (Georgilakis ve Katsigiannis 2009).

$$EU_t = \begin{cases} D_t - E_t, & \text{eğer } D_t > E_t \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \tag{2.15}$$

E_t, t. zaman diliminde mevcut toplam enerji üretimini (kWh) gösterirken D_t, t. zaman dilimindeki yük talebini göstermektedir (kWh).

2.3.2.2 Beklenen Yük Kaybı (LOLE)

Beklenen yük kaybı (LOLE), sistem yük talebinin mevcut üretim kapasitesini geçmesi beklenen zaman dilimi (saat) sayısını ifade etmektedir (Khatib ve diğ. 2016; Tezer ve diğ. 2017). LOLE, saat/yıl olarak ifade edilmektedir ve Eşitlik (2.16)'daki gibi hesaplanmaktadır (Georgilakis ve Katsigiannis 2009; Li ve Zio 2012). Bu iki gösterge genellikle Monte Carlo simülasyonu yoluyla hesaplanabilmektedir (Li ve Zio 2012).

$$LOLE = \sum_{t=1}^{T} O_t \tag{2.16}$$

$$O_t = \begin{cases} 1, & \text{eğer } D_t > E_t \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \tag{2.17}$$

O_t, *t.* zaman diliminde yük talebinin karşılanıp karşılanamama durumunu göstermektedir, {0,1}.

2.3.2.3 Güç Tedarik Kaybı Olasılığı (LPSP)

Güç tedarik kaybı olasılığı (LPSP), belirli bir zaman periyodu için karşılanmayan toplam talebin toplam yük talebine oranı olarak hesaplanmaktadır. LPSP yıllık bazda HRES'lerin istikrarını ölçmek için yaygın olarak kullanılan bir göstergedir. LPSP, % olarak ifade edilmektedir (Lu ve diğ. 2017). LPSP değerinin %0 olması planlama periyodu boyunca yük talebinin tamamının karşılandığı anlamına gelmektedir. LPSP değerinin %0 ile %100 (veya 0 ile 1) arasında bir değer alması durumunda, kaynak eksikliğinden dolayı yük talebinin tamamen karşılanamadığı anlamı çıkmaktadır (Khatib ve diğ. 2016).

LPSP, Eşitlik (2.18) veya Eşitlik (2.19)'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır (Khatib ve diğ. 2016; Lu ve diğ. 2017; Tezer ve diğ. 2017).

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^{T} EU_t}{\sum_{t}^{T} D_t} \tag{2.18}$$

veya

$$LPSP = \frac{LOLE}{\sum_{t}^{T} D_t} \tag{2.19}$$

2.3.2.4 Otonomi Seviyesi (LA)

Otonomi seviyesi (LA), sistemin ömrü boyunca karşılanan yükün yüzdesini gösteren bir güvenilirlik göstergesidir (Bukar ve Tan 2019; Chauhan ve Saini 2014). Sistemde karşılanamayan yük saati sayısının toplam saat sayısına bölümünden elde edilen değerin 1'den çıkarılması yoluyla hesaplanmaktadır (Bukar ve Tan 2019; Ekren ve Ekren 2008; Ekren ve diğ. 2009; Upadhyay ve Sharma 2014). Matematiksel olarak Eşitlik (2.20)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$LA = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T} O_t}{T} \tag{2.20}$$

Burada, O_t, LOLE göstergesinin formülünde tanımlanmıştır. T, toplam operasyon saatini (Örneğin; $T = 8760$) göstermektedir.

2.3.2.5 Eşdeğer Kayıp Faktörü (ELF)

Eşdeğer kayıp faktörü (ELF), saat cinsinden zorunlu kesinti süresinin (veya karşılanamayan talep) sistemin toplam çalışma süresine oranıdır. Kesintilerin hem sayısı hem de büyüklüğü hakkında bilgiler içermektedir. Uzak kırsal alandaki bir şebekeden bağımsız çalışan bir HRES için genellikle 0,01'den küçük ELF değerleri ($\text{ELF} < 0{,}01$) kabul edilebilir olarak düşünülür (Bukar ve Tan 2019; Upadhyay ve Sharma 2014). Eşitlik (2.21)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır (Ardakani ve diğ. 2010; Garcia ve Weisser 2006).

$$ELF = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\frac{EU_t}{D_t} \tag{2.21}$$

Burada, EU_t, t. zaman diliminde (saat) karşılanmayan yük miktarını (kWh) ifade ederken D_t, t. zaman dilimindeki yük talebini (kWh) göstermektedir. T, toplam zaman dilimi sayısıdır (Örneğin; $T = 8760$ için $t = \{1, \ldots, 8760\}$).

2.3.2.6 Karşılanmayan Yük (UL)

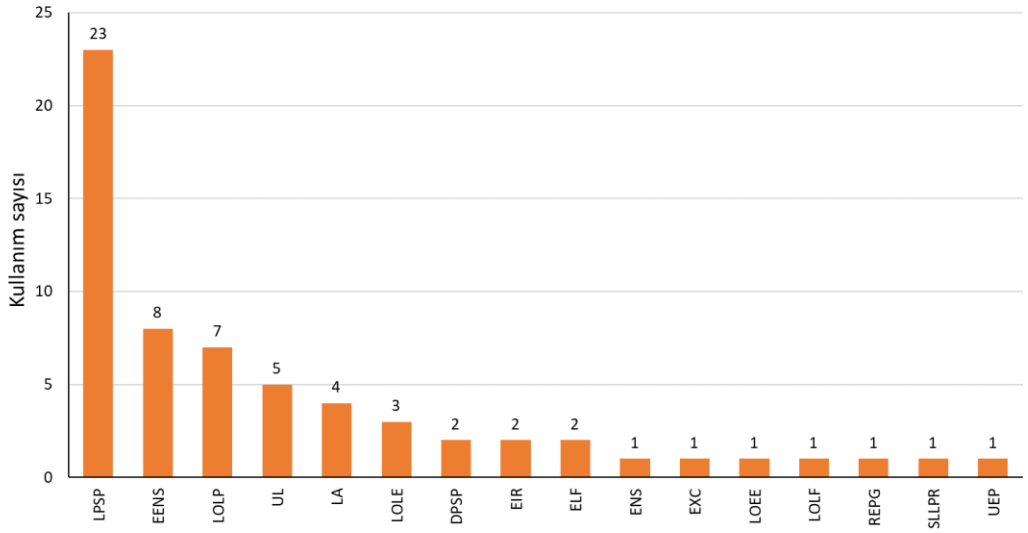
Karşılanmayan yük (UL), bir yılda karşılanamayan yük miktarını tanımlar ve UL genellikle kWh/yıl olarak ölçülse de % olarak ifade edilebilmektedir. İzin verilen maksimum karşılanamayan yük miktarı HRES boyutlandırma problemlerinde kısıt olarak eklenebilmektedir (Dufo-López ve Bernal-Agustín 2008) Literatürde UL yüzde olarak ifade edildiği zaman LPSP hesaplama formülü kullanılmaktadır. UL'nin kWh/yıl ve % olarak gösterimi sırasıyla Eşitlik (2.22) ve Eşitlik (2.23)'de verilmiştir.

$$UL\left(\frac{kWh}{yıl}\right) = \sum_{t=1}^{T} EU_t \tag{2.22}$$

$$UL(\%) = \frac{\sum_{t=1}^{T} EU_t}{\sum_{t=1}^{T} D_T} \tag{2.23}$$

2.3.2.7 Genel Değerlendirme

Şekil 2.10'dan görülebileceği üzere, literatürde incelenen makalelerde LPSP, EENS, LOLP, UL, LA sıklıkla tercih edilen güvenilirlik göstergeleri olarak belirlenmiştir. Daha önce bahsedildiği gibi, güvenilirlik göstergeleri çok amaçlı çalışmalarda ikinci amaç fonksiyonu olarak göz önünde bulundurulmalarının yanı sıra tek amaçlı çalışmalarda kısıt olarak sisteme eklenebilmektedirler. Tek amaçlı çalışmalarda bu güvenilirlik göstergelerinin farklı değerleri için duyarlılık analizleri yapılmıştır. Örneğin; LPSP < %1, LPSP < %2, LPSP < %5 ve LPSP < %10 durumları için senaryolar karşılaştırılmış ve karar verici için sonuçları içeren bir veri demeti sunulmuştur. Zhang ve diğ. (2019) çalışmasında hibrit bir SA-PV/WT/FC-HT sisteminin optimum tasarımı için CS, HS ve SA yöntemlerine dayalı yeni bir hibrit algoritma önermiştir. Modelin doğruluğunu arttırmak adına güneş radyasyonu, sıcaklık ve rüzgâr hızı verileri için ANN kullanılarak hava tahminleri yapılmıştır. Sistemin amaç fonksiyonu LCC'nin minimize edilmesi olarak belirlenmiştir. Sistemin güvenilirliği de LPSP göstergesi kullanılarak değerlendirilmiştir. İzin verilen maksimum LPSP değerinin %0, %1, %2, %5 ve %10 olması durumları için karar değişkenleri ve amaç fonksiyonu değerlendirilmiştir.



Şekil 2.10: Literatür taramasında incelenen makalelerde güvenilirlik göstergelerinin kullanım sayıları

2.3.3 Çevresel göstergeler

Fosil kaynaklı yakıtlar, kullanımları sırasında önemli miktarda CO_2 ve sülfür dioksit (SO_2) açığa çıkarmaktadır. Fosil yakıtların çevreye ve insan sağlığına verdiği zararları azaltmak ve çevresel çalışmaların sürdürülebilir gelişimini sağlamak adına yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı teşvik edilmesi önemli hedeflerdir. Bu yüzden, mevcut enerji trendine uygun olarak son dönemlerde HRES optimizasyon problemlerinde çevresel göstergeler de kullanılmaya başlanmıştır (Lian ve diğ. 2019). Güvenilirlik göstergelerine benzer olarak çevresel göstergeler de amaç fonksiyonu veya kısıt olarak tasarım problemine dahil edilebilmektedir.

Başlıca kullanılan çevresel göstergeler aşağıda açıklanmıştır.

2.3.3.1 CO_2 Emisyonu

CO_2 emisyonu, sistem enerji üretim birimleri tarafından ortaya çıkarılan CO_2 emisyonu miktarını ifade etmektedir. Amaç fonksiyonu olarak düşünülürse minimize edilmesi hedeflenmektedir. Farklı üretim birimlerinin emisyon oranı tarafından belirlenmektedir (Lian ve diğ. 2019; Upadhyay ve Sharma 2014).

Burada karar verici tarafından istenirse SO_x ve NO_x emisyonları da dahil edilebilir (Meza ve diğ. 2007). Genel olarak, *t.* zaman diliminde üretilen CO_2 emisyonu miktarı (E_t) Eşitlik (2.24)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$E_t = \sum_{t}^{T} \sum_{n}^{N} E_n g n_{nt} \tag{2.24}$$

Burada, $n = \{1,2, \dots, N\}$ farklı üretim birimlerini ve $t = \{1,2, \dots, T\}$ zaman dilimlerini göstermek üzere, E_n, *t.* zaman diliminde *n.* tip üretim birimi tarafından üretilen CO_2 emisyonu miktarını (ton/MWh) göstermektedir. gn_{nt} ise, *t.* zaman diliminde yenilenebilir olmayan *n.* tip üretim biriminden üretilen enerji miktarıdır (MWh). Ayrıca emisyonlar; karesel, üstel, polinom vb. fonksiyonlarla da ifade edilebilmektedir. Bu fonksiyonlarda emisyon fonksiyonu katsayılarına ihtiyaç vardır (Upadhyay ve Sharma 2014).

2.3.3.2 Yenilenebilir Enerji Oranı (RER)

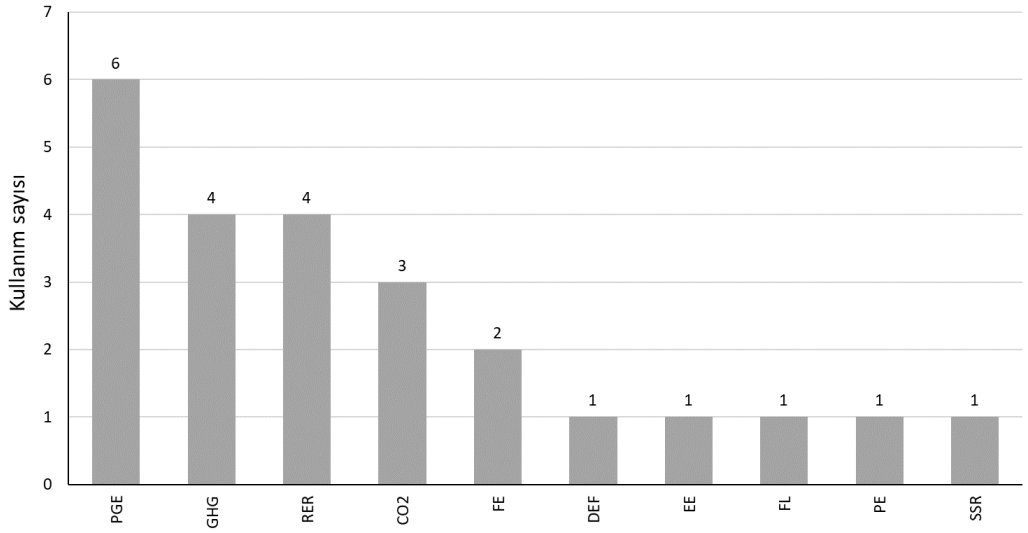
Yenilenebilir enerji oranı (RER), enerji tüketiminde (talebin karşılanmasında) yenilenebilir ve yenilenebilir olmayan enerji kaynaklarının paylarını göstermektedir ve Eşitlik (2.25)'de verildiği gibi hesaplanır (Ghenai ve Bettayeb 2019b; Sharafi ve ElMekkawy 2015; Sharafi ve diğ. 2015). RER değerinin %100 (1) olması talebin tamamen yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılandığını ve RER değerinin %0 (0) olması ise talebin karşılanmasında hiç yenilenebilir enerji kaynağından üretilen enerjinin kullanılmadığını göstermektedir.

$$RER = \frac{E_{RE}}{E_{PC}} \tag{2.25}$$

E_{PC}, talebi karşılamada hem yenilenebilir hem de yenilenebilir olmayan kaynaklardan üretilen toplam enerji miktarını (kWh/yıl) ve E_{RE} ise yenilenebilir kaynaklarla karşılanan enerji talebini (kWh/yıl) ifade etmektedir.

2.3.3.3 Genel Değerlendirme

Şekil 2.11'den görülebileceği üzere, literatürde incelenen çalışmalarda yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel ölçekte emisyonların azalmasındaki olumlu etkisi sebebiyle kirletici gaz emisyonu (PGE), sera gazı emisyonu (GHG), CO_2 emisyonu en sık kullanılan çevresel göstergeler olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.11: Literatür taramasında incelenen makalelerde çevresel göstergelerin kullanım sayıları

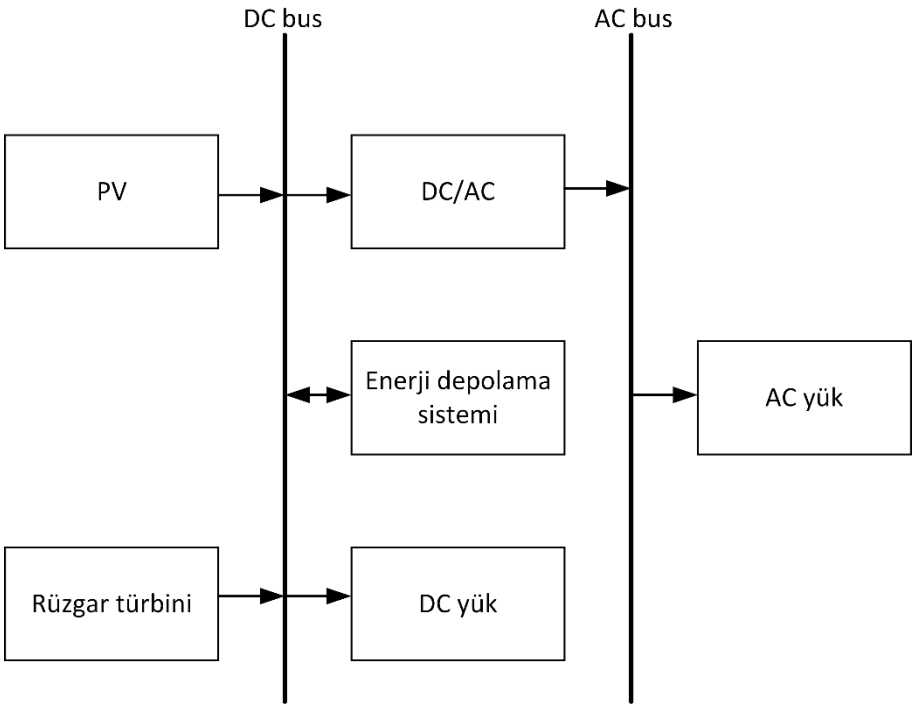
Birçok çalışmada CO_2 emisyonu ya direk olarak ya da SO_x, NO_x vb. diğer kirletici gaz emisyonlarını ile beraber dikkate alınarak hesaplamalara dahil edilmiştir. Sistemde dizel jeneratör vb. yedek araçların bulunması durumunda yakıt emisyonlarını (FE) dikkate alan çalışmalar bulunmaktadır.

2.4 HRES Tasarımında Kullanılan Çalışma Şekilleri

Literatürdeki çalışmalardan görülebileceği üzere, HRES'ler iki farklı şekilde (şebekeye bağlı (GC-) ve şebekeye bağlı olmadan (SA-)) çalışabilmektedir. Alt bölümlerde bu iki durum açıklanmıştır.

2.4.1 Şebekeye bağlı olmayan HRES (SA-HRES)

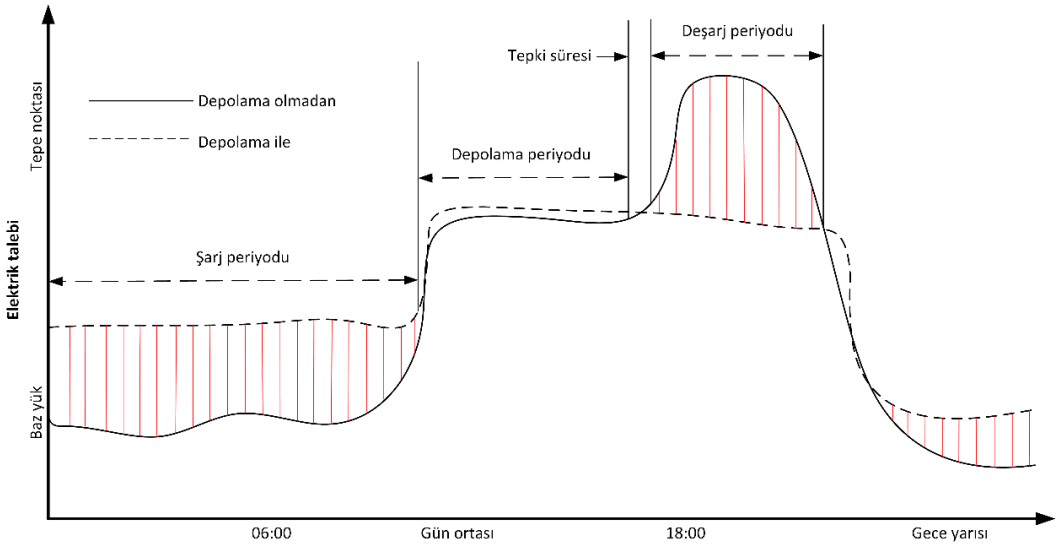
Ulusal elektrik şebekelerinden uzak, teknik ve ekonomik kısıtlar nedeniyle ulaşılması güç bölgeler için (izole bölgeler) elektrik enerjisi üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması; doğada bol miktarda bulunması, temiz ve yenilenebilir olması, sera gazı üretmemesi düşünüldüğünde cazip bir alternatif olduğu bilinmektedir ve bu nedenle yenilenebilir enerji kaynakları birçok ülkede her geçen gün daha da fazla tercih edilmektedir. Şebekeden bağımsız olarak çalışan uzak bölgelerde elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanması için HRES'ler kullanılmaktadır. Literatürde "stand-alone" ismiyle de kullanılan bu sistemler; güneş, rüzgâr, hidro gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını tek başına ya da hibrit bir şekilde (kaynakların birbirini tamamlaması amacıyla) kullanmaktadır (Chauhan ve Saini 2014). Tipik bir şebekeden bağımsız PV/WT HRES'in elementleri ve çalışma şekli Şekil 2.12'de gösterilmiştir (Emad ve diğ. 2020).



Şekil 2.12: Tipik bir şebekeye bağlı olmayan HRES'in elementleri ve çalışma şekli

Yük talebi ile sistemin mevcut enerji üretimi arasında genellikle bir eşleşmeme söz konusudur. Bu durum, sistemi bazen güvenilmez hale getirebilir ve depolama veya başka bir yedek araç ihtiyacını ortaya çıkarabilmektedir. Şekil 2.12'de görüldüğü üzere, yenilenebilir enerji kaynaklarının kesikli yapısını doğru

yönetebilmek için, bu sistemler dizel jeneratör gibi yedek araçlar ve/veya enerji depolama sistemlerine sahiptir. Hibrit sistemlerde yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanan enerjinin elektrik yük talebini karşılayamamasını önlemek amacıyla enerji depolama sistemleri kullanılmaktadır. Enerji depolama sistemleri; fazla üretilen enerjiyi depolamak, gerekli olduğu durumlarda kullanmak ve en önemlisi sistem güvenilirliğini sağlamak için sistemde yer almaktadır. Örneğin, akşam vakitlerinde güneş enerji kaynağından yararlanılamayacağı ve bu vakitlerde enerji talebinin tepe noktaya ulaştığı düşünüldüğünde enerji depolamanın önemi daha iyi anlaşılmaktadır (Chauhan ve Saini 2014). Şekil 2.13 ise depolama sistemlerinin kullanıldığı durumda enerji üretimini göstermektedir (Chauhan ve Saini 2014).



Şekil 2.13: Depolama sistemlerinin kullanılması durumunda enerji üretimi

Şarj periyodunda; belirli andaki enerji üretim miktarı talepten fazladır ve enerji depolama sistemleri fazla enerji miktarını (enerji üretimi - talep) depolar. Depolama periyodunda; enerji üretimi ile talep miktarı hemen hemen eşittir ve enerji depolama sistemi enerji depolamaya devam eder. Deşarj periyodunda ise; enerji üretim eksikliğinden dolayı karşılanamayan talep enerji depolama sisteminden karşılanmaktadır (Chauhan ve Saini 2014). Anlık enerji talebinin yenilenebilir enerji kaynakları tarafından üretilen ve enerji depolama sistemlerinin sahip olduğu enerjiden fazla olması durumunda ise; talep dizel jeneratör gibi yedek araçlar tarafından karşılanmaktadır (Bhandari ve diğ. 2015; Chauhan ve Saini 2014).

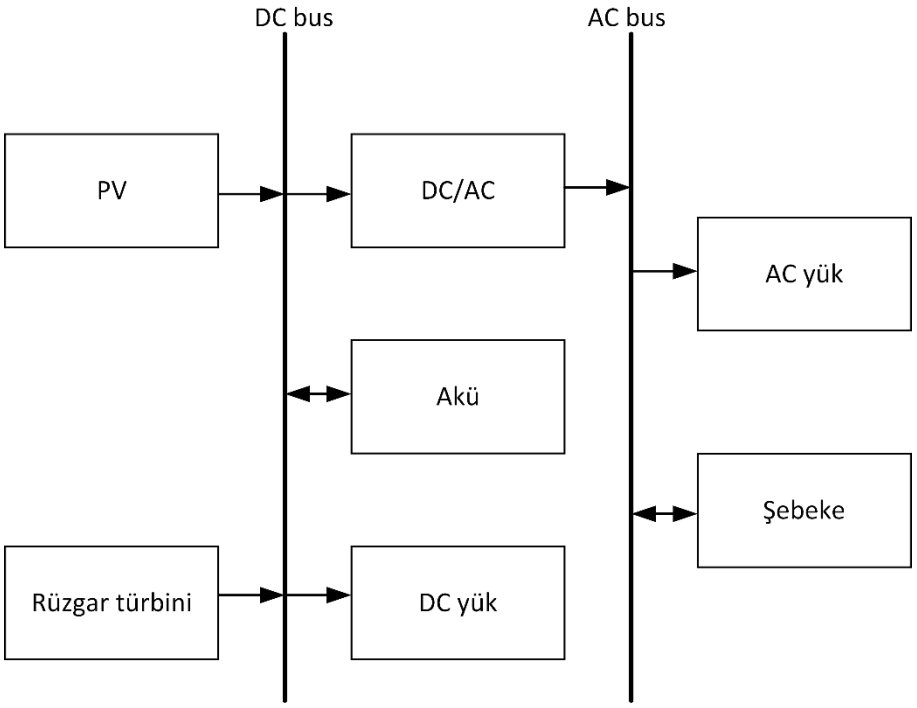
SA-HRES'lerin yük profili düşük seviyelerde olan ve şebekeden uzak konumlar için uygun olduğu söylenebilir. Bu sistemler genellikle güneş enerjisi (bir yıl boyunca herhangi bir günün tüm zaman dilimlerinde enerji sağlayamaz), rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı oldukları için mevsimsel olarak adlandırılabilirler. Bu sistemler şebekeye bağlı olmadıkları için talebin yoğun olmadığı dönemlerdeki enerjinin depolanması için depolama sistemlerine ihtiyacı vardır ve bu durum ekstra depolama maliyetini beraberinde getirir. Enerji depolama sisteminin olmaması durumunda üretilen fazla enerjinin atılması gerekir ve sistem güvenilirliği düşerek talebin karşılanamama durumları ortaya çıkabilir (Kaundinya ve diğ. 2009).

2.4.2 Şebekeye bağlı HRES (GC-HRES)

Bir HRES'in şebekeye bağlı olarak çalışması durumunda, sistemin sahip olduğu anlık enerjinin yetersiz kalması durumunda şebekeden enerji alınabilir ve enerjinin fazla olması durumunda ise şebekeye satılabilir (Caballero ve diğ. 2013). Şebekeye bağlı sistemler genellikle şebekeye yakın konumlar için tercih edilmektedir ve şebekeden bağımsız çalışan sistemlerden daha güvenilirlerdir (Kaundinya ve diğ. 2009).

Genellikle, iki farklı tür şebekeye bağlı sistemden bahsedilmektedir. İlk türde, sistem tarafından üretilen toplam enerji yalnızca şebekeye gönderilmektedir. Bu türün amacı, toplam kazancı en üst düzeye çıkaran sistemin optimum boyutunu bulmaktır (Kaundinya ve diğ. 2009). Örneğin; Kornelakis ve Koutroulis (2009) şebekeye bağlı çalışan bir PV sisteminin optimum tasarımı ve ekonomik analizi için bir metolodoloji sunmuştur. Önerilen yöntem, önemli derecede güneş radyasyonu potansiyeline sahip bir adanın elektrik şebekesine bağlı bir PV sisteminin optimum tasarımı için uygulanmıştır. Bu çalışmanın amacı, sistem operasyonel yaşam periyodu boyunca çıkan toplam net ekonomik faydanın maksimize edilmesidir. Ekonomik analiz için NPV, PBP ve IRR yöntemleri kullanılmıştır. Benzer şekilde, Kornelakis (2010), şebekeye bağlı çalışan bir PV sisteminin optimum tasarımı için çok amaçlı PSO algoritmasını uygulamıştır. Sistem net karının net bugünkü değerini maksimize edilmesi ve bu sistemin kullanımı nedeniyle önlenen kirletici gaz

emisyonlarını maksimize edilmesi amaçlarıyla sistem araçlarının optimum sayısı ve PV modül kurulum detaylarını bulunmaya çalışılmıştır. Bu çalışma, Girit adasında şebekeye katılacak bir PV sisteminin optimum tasarımına uygulanmıştır. İkinci türde ise sistem enerji talebini karşılayamadığında şebekeden enerji alınmasına ve fazla enerji olduğunda şebekeye enerji gönderilmesine izin verilmektedir. Literatürdeki araştırmaların çoğu ikinci tür için yapılmıştır (Kaundinya ve diğ. 2009). Tipik bir şebekeye bağlı PV/WT HRES'in elementleri ve çalışma şekli Şekil 2.14'de gösterilmiştir (Emad ve diğ. 2020)

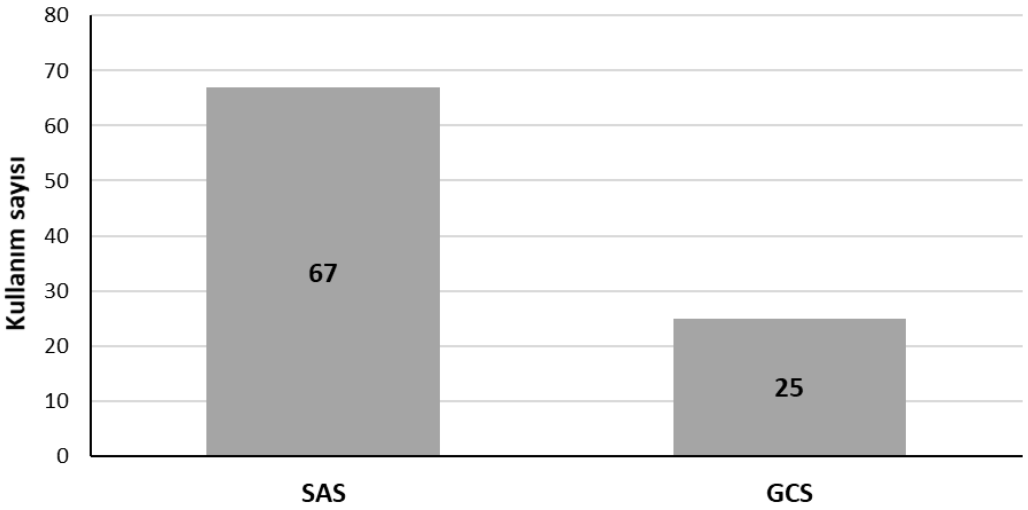


Şekil 2.14: Tipik bir şebekeye bağlı HRES'in elementleri ve çalışma şekli

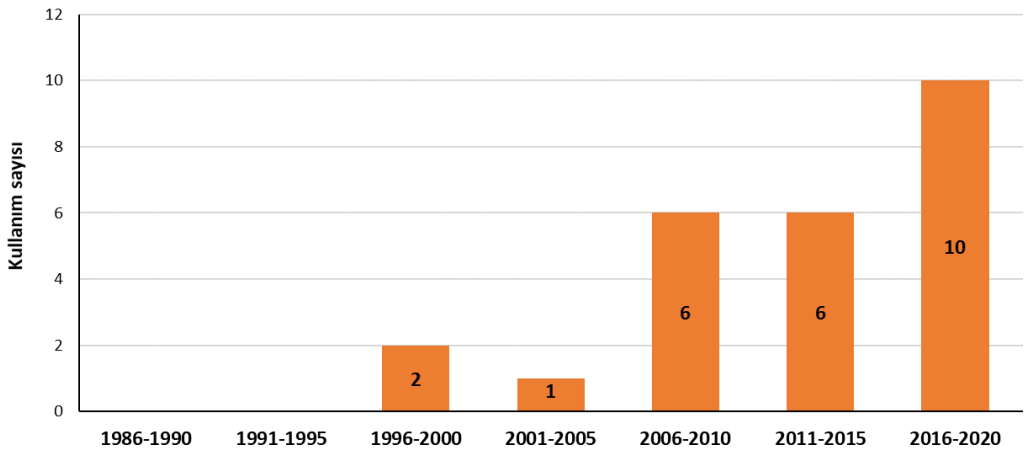
Şebekeye bağlı HRES'lerde şebeke sınırsız depolama kapasitesine sahip bir akü gibi davranmaktadır. Bu nedenle mevsimsel yük dalgalanmalarının da rahatça üstesinden gelebilir. Depolama kapasitesinde herhangi bir sınır olmadığı ve üretilen fazla enerjinin atılmasına gerek kalmadan depolanabildiği (şebekeye satıldığı) düşünülürse GC-HRES'in genel verimliliği SA-HRES'e göre daha yüksek olduğu söylenebilir (Kaundinya ve diğ. 2009).

2.4.3 Genel Değerlendirme

Tablo 2.1'de verilen çalışmaların büyük bir çoğunluğu, şebekeden bağımsız sistemler için yapılmış olup, şebekeye bağlı sistemler üzerinde yapılan çalışmalar sınırlıdır (Bkz. Şekil 2.15). Son dönemde yapılmış literatür araştırması (Eltawil ve Zhao 2010; Iqbal ve diğ. 2014; Kaundinya ve diğ. 2009; Obi ve Bass 2016) çalışmalarına göre, şebekeye bağlı sistemlerde son dönemlerde artan bir yönelim vardır. Şekil 2.16'dan görüldüğü üzere son 10-15 yıl için şebekeye bağlı sistemler üzerine çalışmalar yapılmıştır. Şebekeye bağlı sistemler üzerinde çalışmaların yapılması yönünde bir gereksinim olduğu görülmektedir.



Şekil 2.15: Literatür taramasında incelenen makalelerde şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı sistemlerin kullanım sayıları



Şekil 2.16: Literatür taramasında incelenen makalelerde şebekeye bağlı çalışmaların yıllara göre dağılımı

2.5 HRES Tasarımında Kullanılan Enerji Kaynakları

HRES'ler yenilenebilir enerji kaynakları, geleneksel enerji kaynakları ve/veya enerji depolama sistemleri gibi birden fazla enerji kaynağını içermektedir. HRES'lerde kullanılacak sistem bileşenlerinin modellenmesi ve elde edilebilecek çıktının hesaplanması HRES'lerin doğru boyutlandırılması için oldukça önemlidir. Bileşenlerin bireysel olarak modellenmesinden sonra elde edilen veriler kullanılarak tüm sistemin modellenmesi gerçekleştirilir (Reddi ve diğ. 2012).

Rüzgâr türbini, PV panelleri ve aküler gibi bileşenlerinin modellenmesi için literatürde kullanılan bazı metodolojiler aşağıda özetlenmiştir.

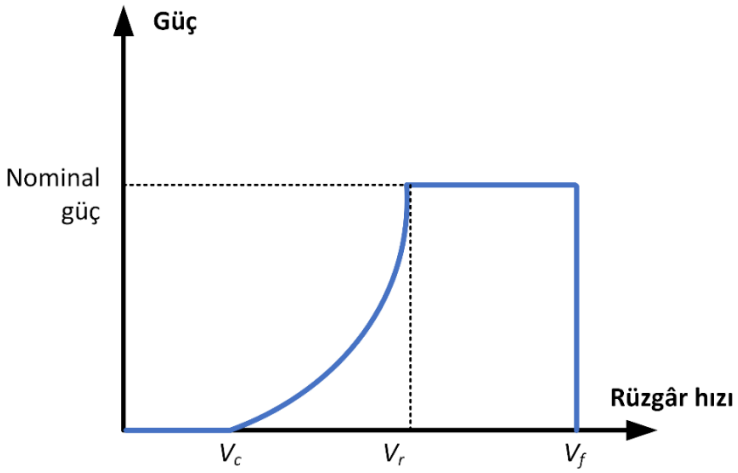
2.5.1 Rüzgâr Enerjisi Sisteminin Modellenmesi

Bir WT'nin belirli bir konumdaki çıktısı türbinin kule yüksekliğine ve karakteristiklerine bağlı olarak değişmektedir. Kule yüksekliğindeki rüzgâr hızı güç kanunu eşitliği kullanılarak Eşitlik (2.26)'daki gibi hesaplanmaktadır (Deshmukh ve Deshmukh 2008):

$$\frac{V_z}{V_i} = \left[\frac{Z}{Z_i}\right]^{\alpha} \tag{2.26}$$

Burada, V_z ve V_i, sırasıyla Z kule yüksekliğindeki ve Z_i referans yükseklikteki rüzgâr hızlarıdır. α ise güç kanunu üssüdür.

Şekil 2.17, tipik bir WT için güç eğrisini göstermektedir (Deshmukh ve Deshmukh 2008). Her WT kendi güç eğrisine sahiptir. Literatürde rüzgâr gücünü tahmin etmek için farklı modellerde kullanılsa da en yaygın kullanılan modellerden biri aşağıda açıklanmıştır (Emad ve diğ. 2020).



Şekil 2.17: Tipik bir rüzgâr türbini için güç eğrisi

Bir rüzgâr türbininden *t*. zaman diliminde üretilecek çıktı P_t (kWh) Eşitlik (2.27)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır (Deshmukh ve Deshmukh 2008; Emad ve diğ. 2020; Sharafi ve Elmekkawy 2014):

$$P_t = \begin{cases} 0, & v_t < V_c \\ \frac{1}{2} C_p \rho A v_t^3 \eta, & V_c < v_t < V_r \\ PR, & V_c < v_t < V_r \\ 0, & v_t > V_f \end{cases} \tag{2.27}$$

Burada,

v_t : *t*. periyottaki rüzgâr hızı (m/sn)

V_c : Cut-in rüzgâr hızı (m/sn)

V_r : Nominal rüzgâr hızı (m/sn)

V_f : Cut-off rüzgâr hızı (m/sn)

C_p : Güç katsayısı (%)

ρ : Hava yoğunluğu (kg/m^3)

η : WT ve dönüştürücülerin verimliliği (%)

A : WT pervanelerinin süpürdüğü alan (m^2)

PR : WT nominal gücü (kW)

Bu modelde, cut-in rüzgâr hızından düşük veya cut-off rüzgâr hızından yüksek olan durumlarda enerji üretimi gerçekleşmez. Nominal rüzgâr hızından fazla ve cut-off rüzgâr hızından düşük olan durumlarda türbin nominal gücü kadar çıktı sağlar. Cut-in ve nominal rüzgâr hızı arasındaki durumlar için elde edilecek çıktı Eşitlik (2.27)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır (Emad ve diğ. 2020).

2.5.2 PV Sisteminin Modellenmesi

PV sistemlerin çıktısı birçok faktörden etkilenmektedir ve bu sistemlerin modellenmesinde çeşitli eşitlikler kullanılmaktadır. Elde edilecek çıktı için genellikle güneş radyasyonu, PV yüzey alanı ve sistem verimliliği gibi değişkenlere ihtiyaç vardır (Deshmukh ve Deshmukh 2008; Emad ve diğ. 2020).

PV sistemlerinde temel enerji girdisi güneş radyasyonudur ve eğimli bir yüzeye gelen toplam güneş radyasyonu (I_T) (Wh/m^2) Eşitlik (2.28)'de verildiği gibi tahmin edilmektedir (Deshmukh ve Deshmukh 2008; Emad ve diğ. 2020):

$$I_T = I_b R_b + I_d R_d + (I_b + I_d) R_r \tag{2.28}$$

Burada, I_b ve I_d, sırasıyla direk normal güneş radyasyonu ve difüz güneş radyasyonunu göstermektedir. R_b, R_d ve R_r ise sırasıyla güneş radyasyonu için direk, difüz ve yansıyan kısımların eğim faktörleridir (Deshmukh ve Deshmukh 2008; Emad ve diğ. 2020).

PV yüzeyi üzerine düşen toplam güneş radyasyonu, I_T olmak üzere A_{PV} (m^2) yüzey alanına sahip bir PV panelden elde edilecek saatlik çıktı (P_j) (Wh) Eşitlik (2.29)'da verildiği gibi hesaplanmaktadır (Deshmukh ve Deshmukh 2008; Emad ve diğ. 2020).

$$P_j = I_T \eta_{PV} A_{PV} \tag{2.29}$$

η_{PV}, PV sistem verimliliğini göstermektedir ve Eşitlik (2.30)'da verildiği gibi hesaplanmaktadır (Deshmukh ve Deshmukh 2008; Lan ve diğ. 2015).

$$\eta_{PV} = \eta_{ref}\eta_{mppt}\left[1 - K_t\left(T_c - T_{ref}\right)\right] \quad (2.30)$$

Burada,

η_{PV} : PV sistem verimliliği (%)

η_{ref} : Referans verimlilik (%)

η_{mppt} : Güç izleme sisteminin verimliliği (%)

K_t : PV sıcaklık katsayısı

T_c : Aylık ortalama hücre sıcaklığı (^{o}C)

T_{ref} : Hücre verimliliği için referans sıcaklık (^{o}C)

Burada, T_c, Eşitlik (2.31)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır (Deshmukh ve Deshmukh 2008; Lan ve diğ. 2015).

$$T_c = T_a + \left[\frac{\left(NOCT - T_{a,NOCT}\right)}{I_{T,NOCT}}\right] I_T \quad (2.31)$$

Burada, T_a, anlık ortam sıcaklığını ($^{\circ}$C) ve NOCT, nominal işletim hücre sıcaklığını göstermektedir. 1 m/s rüzgâr hızı için $T_{a,NOCT}$ = 20 $^{\circ}$C ve $I_{T,NOCT}$ = 800 W/m^2'dir (Deshmukh ve Deshmukh 2008; Lan ve diğ. 2015).

2.5.3 Akü Depolama Sisteminin Modellenmesi

PV ve rüzgâr sistemleri genellikle meteorolojik verilere bağlı oldukları için düşük güvenilirliğe sahip sistemlerdir. Bu sistemlerde güvenilirliği arttırmak için sisteme aküler eklenebilir. Sistemde akülerin olması durumunda, üretilen enerji ve yük talebi arasındaki farklılık akünün şarj veya deşarj durumunda olduğunu gösterir (Deshmukh ve Deshmukh 2008; Emad ve diğ. 2020). *t*. zaman dilimindeki akünün şarj miktarını (state of charge) gösteren değişken SOC_t, Eşitlik (2.33)'deki gibi hesaplanmaktadır (Deshmukh ve Deshmukh 2008; Emad ve diğ. 2020).

$$EBAT_t = ER_t - \frac{D_t}{\eta_{inv}} \quad \forall t \in T \tag{2.32}$$

$$SOC_t = SOC_{t-1}(1-\sigma) + EBAT_t \eta_{bat} \quad \forall t \in T \tag{2.33}$$

Burada;

SOC_t : *t*. zamanda akünün şarj miktarı (kWh)

SOC_{t-1} : ($t-1$). zamanda akünün şarj miktarı (kWh)

σ : Saatlik kendi kendine deşarj oranı (%)

$EBAT_t$: $\begin{cases} \text{şarj periyodu,} & EBAT_t > 0 \\ \text{deşarj periyodu,} & EBAT_t < 0 \end{cases}$

ER_t : *t*. zamanda yenilenebilir kaynaklar ile üretilen toplam enerji (kWh)

D_t : *t*. zamanda yük talebi (kWh)

η_{inv} : Çevirici verimliliği (%)

η_{bat} Akülerin şarj verimliliği (%)

Bu değer genellikle *t*. zamandaki minimum ve maksimum şarj miktarı ile kısıtlandırılabilir. Burada, $SOC_{t,min}$ ve $SOC_{t,maks}$ sırasıyla izin verilen minimum ve maksimum şarj miktarlarını (kWh) göstermektedir (Deshmukh ve Deshmukh 2008; Emad ve diğ. 2020).

$$SOC_{t,min} \leq SOC_t \leq SOC_{t,maks} \quad \forall t \in T \tag{2.34}$$

Bir akünün *t*. zamandaki SOC durumu yüzde olarak (%) Eşitlik (2.35)'deki gibi hesaplanmaktadır (Chang 2013).

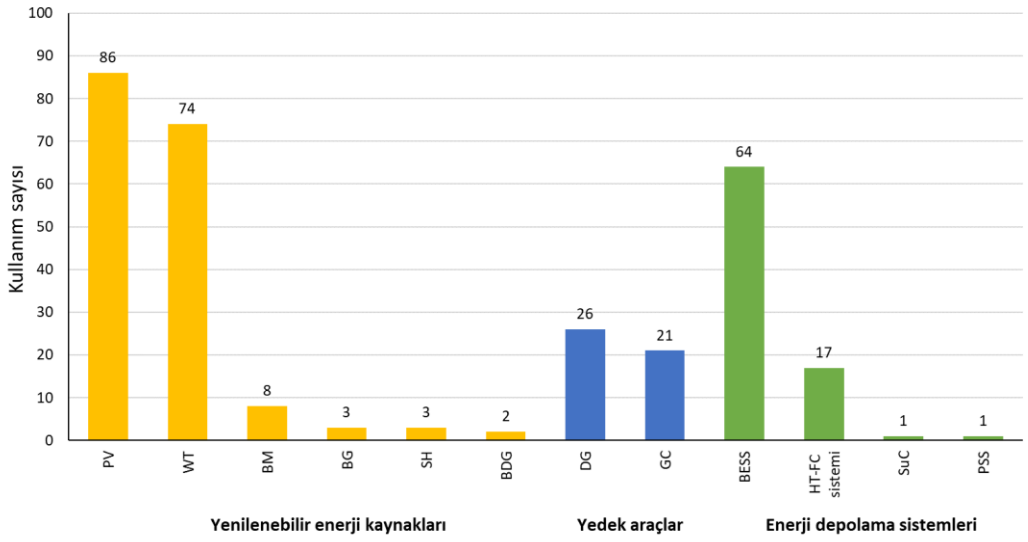
$$SOC_t(\%) = \frac{SOC_t(kWh)}{C_n\,(kWh)} \quad \forall t \in T \tag{2.35}$$

C_n aküde depolanabilecek maksimum şarj miktarını temsil etmektedir. Akü tam olarak dolu (%100) olduğunda SOC_t değeri ile C_n değerine eşit duruma gelmektedir. SOC_t, %0 değerini aldığında akünün tamamen boş ve %100 değerini aldığında akünün tamamen dolu olduğu anlamına gelmektedir (NREL 2019).

2.5.4 Genel Değerlendirme

Şekil 2.18'de sunulan veriler incelendiğinde, hibrit enerji sistemlerinin tasarımında en sık kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları sırasıyla PV ve rüzgâr olarak tespit edilmiştir. PV kaynağı, hemen hemen bütün çalışmalarda enerji kaynağı olarak kullanılmıştır. Dizel jeneratörler yardımcı araçlar kategorisinde en sık kullanılan araç iken depolama aracı olarak kullanılan aküler ise bir diğer depolama aracı yakıt hücrelerine göre daha sık tercih edilmiştir.

Dizel jeneratörler ve aküler hibrit sistemlerinin güvenilirliğinin arttırılması amacıyla sisteme eklenen ve birçok çalışmada sıklıkla kullanılan yardımcı araçlardır. Ancak son yıllarda yakıt hücresi sisteminin (yakıt hücresi, elektrolizör ve hidrojen depolama tankı) fiyatlarının daha uygun hale gelmesi ve dizel jeneratör ve akülere göre çevreye daha duyarlı olması sebebiyle popüler hal almaya başlamış ve son yıllardaki çalışmalarda enerji depolama aracı olarak sisteme eklenmiştir.



Şekil 2.18: Literatür taramasında incelenen makalelerde enerji kaynakları, depolama sistemleri ve yardımcı araçların hibrit sistem bileşeni olarak kullanım sayıları

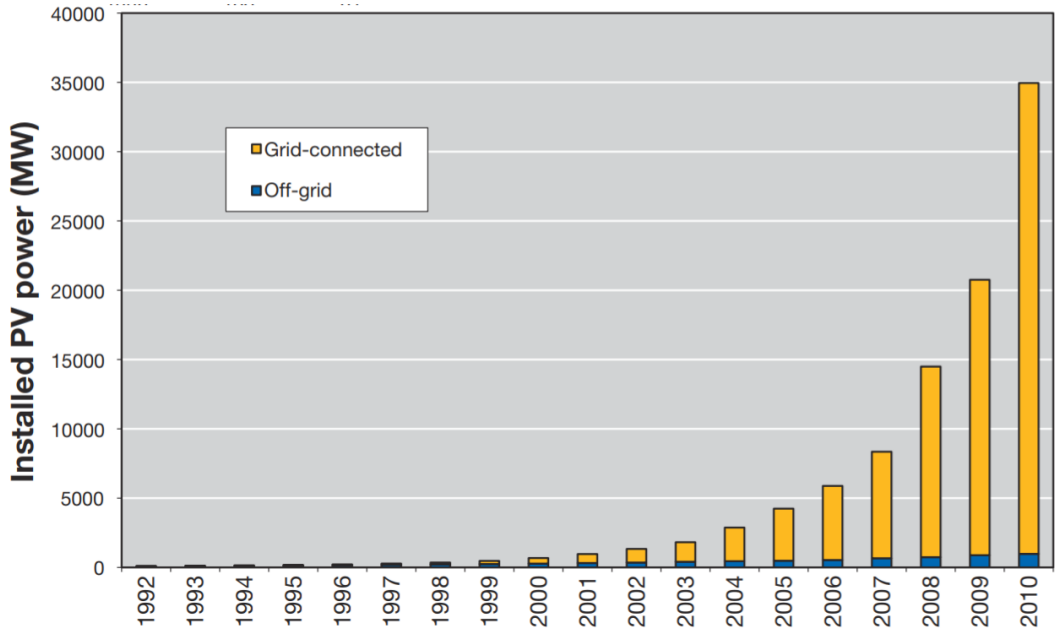
2.6 Elde Edilen Bulguların Değerlendirilmesi ve Yorumlanması

Literatürde yer alan çalışmalarının eğilimine göre hibrit enerji sistemlerinin kaynakları, çalışma tarzı, amaçları ve optimizasyon yöntemleri yönünde bilgiler elde edilmiştir. Bu kapsamda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- Hibrit enerji sistemlerinin tasarımında en sık kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları sırasıyla güneş ve rüzgâr enerji kaynakları olarak tespit edilmiştir.
- HRES optimum boyutlandırma konusu birçok çalışmada LP veya MILP formunda modellenmiştir.
- Bazı çalışmalar bu modelleri direk kullanarak çeşitli yazılımlar ve çözücüler aracılığıyla çözüm ararken bazı çalışmalarda bu modeller sezgisel bir algoritmanın parçası olarak kullanılmıştır.
- Başlangıçta hibrit sistemlerin tasarımı alanında yapılan çalışmalarda geleneksel optimizasyon yöntemleri (GCM, LSM vb.) daha sık kullanılırken, özellikle son 10 yılda yeni nesil AI teknikleri daha az hesaplama zamanı gerektirmesi sebebiyle çalışmalarda tercih edilmiştir.
- Uzun dönemli meteorolojik verilerin bulunduğu durumlarda geleneksel yöntemler tercih edilirken diğer durumda AI yöntemleri makul sürelerde iyi sonuçlar verebilmektedir.
- GA ve PSO popüler olarak kullanılan AI tekniklerdir.
- HOMER ise bu alanda en sık kullanılan yazılımlardan biridir.
- İncelenen birçok çalışmada AI tekniklerinin HOMER yazılımından daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.
- Birden fazla AI tekniğinin entegrasyonu ile elde edilen hibrit algoritmaların bireysel algoritmalardan daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.
- Hibrit sistemlerin optimum boyutlandırılması, tek amaçlı ve çok amaçlı olarak optimize edilebilmektedir.
- Hibrit enerji sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu konusunda çok amaçlı problemlerin ele alındığı nispeten daha az sayıda çalışma vardır.
- Özellikle son dönemlerde çok amaçlı optimizasyon üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir.
- Çok amaçlı modeller; ekonomik, güvenilirlik ve çevresel göstergeler gibi birbiriyle çelişen kriterlerin aynı anda göz önüne bulundurulmasına imkân sağlamaktadır.
- Çalışmaların büyük bir çoğunluğu (yaklaşık %75'i) ekonomik ve ekonomik & güvenilirlik göstergelerini aynı çalışma içinde hesaba katmıştır. Çevresel göstergeler bu iki göstergeye göre daha az tercih edilmiştir.

- Literatürdeki çalışmaların büyük bir çoğunluğu, stand-alone sistemler için yapılmış olup, şebekeye bağlı (grid-connected/grid-linked) sistemler üzerinde yapılan çalışmalar üzerine daha az sayıda çalışma yapılmıştır.
- Şebekeye bağlı sistemler üzerinde çalışmaların gerçekleştirilmesi yönünde bir gereksinim olduğu görülmektedir.
- HRES tasarımında farklı parametreler üzerinde duyarlılık analizleri ve gerekli istatistiksel analizlerin yapılması gereklidir.

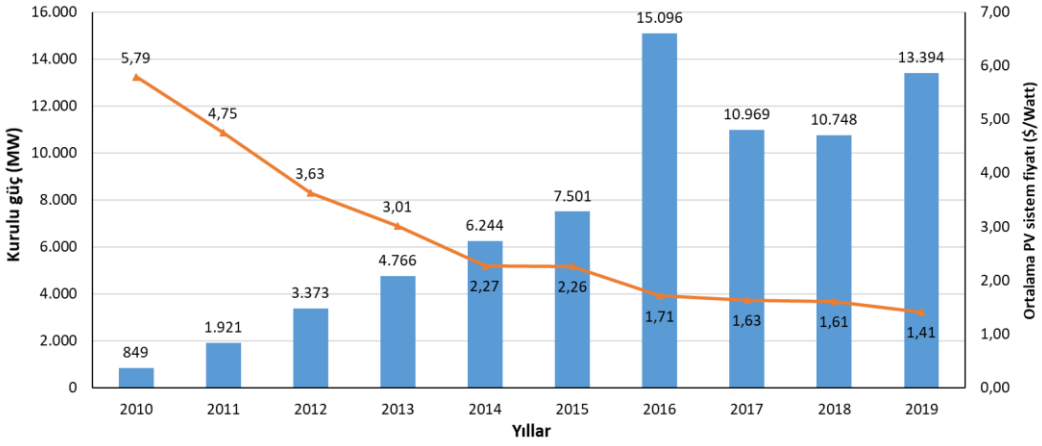
Uluslararası Enerji Ajansı Fotovoltaik Güç Sistemleri Programı (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme-IEA PVPS) tarafından 2010'da yayınlanan bir raporda (IEA 2011), IEA PVPS ülkelerinde SA-PV ve GC-PV sistemlerinin kümülatif kurulu gücü (MW) analiz edilmiştir (Bkz. Şekil 2.19).



Şekil 2.19: IEA PVPS ülkelerinde 1992-2010 arasında kümülatif SA- ve GC-PV sistemlerinin kurulu gücünün değişimi

Bu rapora göre SA-PV sistemlerinin kullanım oranı göreceli olarak düşük seviyelerde seyrederken 2000'li yılların başından itibaren GC-PV sistemlerin kurulu gücü yüksek oranlarda artmaya başlamıştır. IEA (2019) tarafından yayımlanan güncel bir raporda, IEA PVPS ülkelerinde 2010 yılında yaklaşık 35 GW olan PV kurulu gücü 2018 yılında yaklaşık 430 GW seviyelerine çıktığı ve bu kurulu gücün büyük bir kısmının şebekeye bağlı sistemler olduğu söylenmektedir.

SA- ve GC-HRES'ler farklı ölçeklerde ve farklı durumlar için kullanılsa da (örneğin; SA-HRES'ler şebekeden uzak ve ulaşılması güç küçük ölçekli bölgeler için tercih edilmektedir), Şekil 2.19'dan görülebileceği üzere şebekeye bağlı enerji sistemlerin kullanımı son dönemlerde ciddi oranlarda artmıştır. Yenilenebilir enerji alanındaki tarifeler ve devlet teşviklerinin devam edeceği, teknolojideki gelişmelere bağlı olarak gelecekte yatırım maliyetlerinin azalacağı ve ekipman verimlerinin artacağı gibi senaryolar varsayıldığında şebekeye bağlı sistemlerin kullanımının artarak devam edeceği söylenebilir. Örneğin; ABD'de son 10 yılda PV sistemlerinin kurulum maliyetlerinin %70 civarında düşmesi sonucunda ülke genelinde PV sistemlerinin kurulumu artmıştır (SEIA 2020) (Bkz. Şekil 2.20).



Şekil 2.20: ABD'de PV sistem fiyatlarının ve kurulu gücünün yıllara göre değişimi (SEIA 2020)

Literatür taramasından elde edilen bulgular ışığında, SA-HRES'lere kıyasla GC-HRES'lerin optimum boyutlandırılması üzerine daha az sayıda çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu kapsamda GC-HRES'lerin optimum boyutlandırılması konusunda daha kapsamlı bir literatür araştırması bir sonraki bölümde sunulmuştur.

3. ŞEBEKEYE BAĞLI HİBRİT YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİNİN TASARIMI ÜZERİNE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

GC-HRES'lerin optimum boyutlandırılmasına ilişkin literatür; yenilenebilir enerji kaynak(lar)ı/sistem bileşen(ler)i, amaç fonksiyon(lar)ı, karar değişken(ler)i, kısıt(lar) ve optimizasyon yöntem(ler)i veya yazılım(lar) gibi çeşitli boyutlara göre Tablo 3.1'de daha detaylı olarak değerlendirilmiştir. Tablo 3.1'deki çalışmaların neredeyse yarısı, problemin çevresel boyutunu dikkate almadan ele aldıkları vakaya özgü kısıtlar ile maliyet fonksiyonunu minimize etmeye çalışmıştır (Ardakani ve diğ. 2010; Caballero ve diğ. 2013; González ve diğ. 2015a; González ve diğ. 2015b; Nayak ve Nayak 2018; Senjyu ve diğ. 2006; Supriya ve Siddarthan 2011; Wu ve diğ. 2020; Zebarjadi ve Askarzadeh 2016).

Çalışmaların çoğunluğu talebin karşılamasında iki veya üç yenilenebilir enerji kaynağını beraber kullanılmıştır. PV panel ve WT en çok tercih edilen enerji üretim birimleridir. Üç veya daha fazla yenilenebilir enerji kaynağını ele alan daha az sayıda çalışma vardır. González ve diğ. (2015a), GC-PV/WT/BM hibrit sisteminin optimum boyutlandırma problemini incelemiştir. Sistemin boyutları LCC'yi minimize etmek amacıyla GA kullanılarak belirlenmiştir. González ve diğ. (2018), bu çalışmayı hem ekonomik hem de çevresel amaçları da göz önüne alarak genişletmiştir. Sharafi ve diğ. (2015), PV panel, WT, BM üretim birimlerinin ve diğer sistem bileşenlerinin dahil edildiği bir GC-HRES'in optimum boyutlandırılması için dinamik çok amaçlı bir PSO algoritması önermiştir. Çalışmada 3 amaç fonksiyonu ele alınmıştır: NPV, FE ve RER. Bu çalışma, Sharafi ve ElMekkawy (2015) tarafından süreçteki stokastiklik dikkate alınarak genişletilmiştir. Anand ve diğ. (2019), hibrit bir GC-PV/BM/BG/akü sisteminin boyutlandırılması için GWO yaklaşımını kullanmıştır. Çalışmada sistem maliyetinin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Konneh ve diğ. (2019), Sierra Leone'de şebekeye bağlı on adet bloktan oluşan hibrit bir sistemi boyutlandırmak için çok amaçlı bir PSO algoritması önermiştir. Hibrit sistemdeki enerji üretim birimleri; PV panel, WT, BM yakma tesisi, akü ve DG olarak ve amaç fonksiyonları; DPSP, DEF, LCC ve CO_2 emisyonu olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.1: Şebekeye bağlı hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması üzerine literatür incelemesi

Yazar (Yıl)	Sistem bileşenleri	Amaç fonksiyonları			Karar değişken(ler)i	Kısıt(lar)	Yöntem(ler)
		SO	MO	Amaç(lar)			
Chedid ve Rahman (1997)	PV, WT, BESS, DG, GC		■	**Obj.-1 Min.** AEPC • IC, NPV(RC), NPV(SV), NPV(OMC) **Obj.-2 Min.** PE	1) Toplam rotor alanı 2) Toplam güneş panellerin alanı 3) DG kapasitesi 4) Şebekenin oranı 5) Akü boyutu	1) EENS dikkate alınarak güç denge (power balance) kısıtı 2) Karar değişkenleri için alt ve üst sınır kısıtları	LP
Senjyu ve diğ. (2006)	PV, WT, BESS, GC	■		**Obj.-1 Min.** TC • IC, MC, OC	1) PV panel optimum sayısı 2) WT optimum sayısı 3) Akü optimum sayısı	1) Güç denge kısıtı 2) SOC kısıtı	GA
Wang ve Singh (2007)	PV, WT, BESS, GC		■	**Obj.-1 Min.** TC • IC, NPV(OMC), NPV(SV), şebekeden elektrik almanın yıllık maliyeti **Obj.-2 Max.** EIR **Obj.-3 Min.** PE	1) WT taradığı toplam alan 2) PV alanı 3) Toplam akü kapasitesi 4) Şebekeden alınan enerjinin oranı	1) Güç denge kısıtı 2) SOC kısıtı 3) Şebekeden alınan enerji miktarı ile ilgili maksimum ve minimum sınırlar 4) Şebekeden satın alınan enerjinin oranı ile ilgili kısıt 5) Karar değişkenlerinin sınırları	MO-PSO
Wang ve Singh (2009)	PV, WT, BESS, GC		■	**Obj.-1 Min.** TC • IC, NPV(OMC), NPV(SV), şebekeden enerji almanın yıllık maliyeti **Obj.-2 Max.** EIR **Obj.-3 Min.** PE	1) WT taradığı toplam alan 2) PV alanı 3) Toplam akü kapasitesi 4) Şebekeden alınan enerjinin oranı	1) Güç denge kısıtı 2) SOC kısıtı 3) Şebekeden satın alınan enerji miktarı ile ilgili maksimum ve minimum sınırlar 4) Şebekeden satın alınan enerjinin oranı ile ilgili kısıt 5) Karar değişkenlerinin sınırları	IPSO
	PV, WT, GC		■	**Obj.-1 Min.** TC • IC, NPV(OMC), NPV(SV) **Obj.-2 Max.** EIR	1) WT taradığı toplam alan 2) PV alanı	1) Güç denge kısıtı 2) LOLE için maksimum limit 3) LOLF için maksimum limit 4) Karar değişkenlerinin sınırları	IPSO

Tablo 3.1: Şebekeye bağlı hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması üzerine literatür incelemesi (devam)

Yazar (Yıl)	Sistem bileşenleri	Amaç fonksiyonları			Karar değişken(ler)i	Kısıt(lar)	Yöntem(ler)
		SO	MO	Amaç(lar)			
Ardakani ve diğ. (2010)	PV, WT, BESS, GC	■		**Obj.-1 Min.** SC • CC, RC × SPPW, OMC × 1/CRF, yük kaybının yıllık maliyeti	1) WT sayısı 2) PV panel sayısı 3) PV panel kurulum açısı 4) Akü sayısı 5) DC/AC dönüştürücü boyutları	1) Şebekeden alınan enerji ve akülerde saklanan enerji için alt ve üst sınırlar 2) ELF sınırı 3) PV panel kurulum açısı için bir sınır	PSO
Supriya ve Siddarthan (2011)	PV, WT, GC	■		**Obj.-1 Min.** TC • IC, MC, şebekeden enerji almanın maliyeti	1) PV panel sayısı 2) WT sayısı 3) Şebekeden alınacak enerji birimlerinin sayısı	1) Güç denge kısıtı	QP
Caballero ve diğ. (2013)	PV, WT, DG, GC	■		**Obj.-1 Min.** LCC • IC, NPV(OMC), NPV(RC), NPV(şebekeyle enerji alışverişinden kaynaklanan gelir ve gider)	1) PV panellerin toplam yüzey alanı 2) WT taradığı toplam alan 3) Şebekeden enerji almanın yıllık maliyeti ve şebekeye enerji satmanın yıllık geliri	1) Alan sınırlamaları 2) Şebekeden enerji almanın yıllık maliyetini hesaplamak için kullanılan bir fonksiyon 3) Şebekeye enerji satışının yıllık gelirini hesaplamak için kullanılan bir fonksiyon 4) LPSP kısıtlaması	MATLAB optimizasyon aracı
González ve diğ. (2015b)	PV, WT, GC	■		**Obj.-1 Min.** LCC • IC, NPV(OMC), NPV(RC), NPV(şebekeye enerji satmadan elde edilen gelir), NPV(şebekeden enerji alma maliyeti), NPV(SV)	1) PV panellerin kapladığı alan 2) WT sayısı	1) Net yıllık güç denge kısıtı	GA
González ve diğ. (2015a)	PW, WT, BM, GC	■		**Obj.-1 Min.** LCC • IC, NPV(OMC), NPV(RC), NPV(BM yakıtı elde etme maliyeti), NPV(şebekeye enerji satmadan elde edilen gelir), NPV(şebekeden enerji alma maliyeti), NPV(SV)	1) PV panellerin kapladığı alan 2) WT sayısı	1) Net yıllık güç denge kısıtı	GA

Tablo 3.1: Şebekeye bağlı hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması üzerine literatür incelemesi (devam)

Yazar (Yıl)	Sistem bileşenleri	Amaç fonksiyonları			Karar değişken(ler)i	Kısıt(lar)	Yöntem(ler)
		SO	MO	Amaç(lar)			
Sharafi ve diğ. (2015)	PV, WT, GC, BM, SoC, NGB, AR, G		■	**Obj.-1 Min.** NPV • IC, RC × SPPW, OMC × 1/CRF, (Yakıt maliyeti + arazi kiralama maliyeti + BM toplama, depolama ve taşıma maliyeti) × 1/CRF **Obj.-2 Max.** RER **Obj.-3 Min.** FE	1) Bileşenlerin kapasitesi 2) Isıtma, soğutma, elektrik ve taşıma yükleri için teknolojilerin paylaşım katsayıları (allocation coefficients)	1) LLP kısıtlamaları 2) Güç denge kısıtı 3) Kurulum için alan sınırlaması 4) Bileşen kapasitelerinin maksimum ve minimum seviyeleri	Dinamik MO-PSO
Sharafi ve ElMekkawy (2015)	PV, WT, GC, BM, SoC, NGB, AR, G		■	**Obj.-1 Min.** NPV • IC, RC × SPPW, OMC × 1/CRF, (Yakıt maliyeti + arazi kiralama maliyeti + BM toplama, depolama ve taşıma maliyeti) × 1/CRF **Obj.-2 Max.** RER **Obj.-3 Min.** FE	1) Sistem bileşenlerin kapasitesi 2) Isıtma, soğutma, elektrik ve taşıma yükleri için teknolojilerin paylaşım katsayıları	1) LLP kısıtlamaları 2) Güç denge kısıtı 3) Kurulum için alan sınırlaması 4) Bileşen kapasitelerinin maksimum ve minimum seviyeleri	Dinamik MO-PSO, SAM
Zebarjadi ve Askarzadeh (2016)	PV, BESS, GC	■		**Obj.-1 Min.** TC • IC, NPV(OMC), NPV(RC), NPV(SV), NPV(şebekeyle enerji alışverişinden kaynaklanan gelir ve gider)	1) PV sisteminin alanı 2) Akü kapasitesi 3) Şebekeden alınan enerjinin payı	1) PV panel yüzey alanı için üst sınır 2) LPSP kısıtlaması 3) Şebekeden alınan enerjinin payı için alt ve üst sınırlar	HS
Zhang ve diğ. (2017)	PV, BESS, GC		■	**Obj.-1 Max.** SSR **Obj.-2 Max.** NPV • IC, NPV(OMC), NPV(RC), NPV(elektrik azaltma (electricity reduction) geliri), NPV(elektrik transfer geliri), NPV(pik azaltılması (peak shaving) geliri)	1) Akü kapasitesi 2) Her operasyon stratejisi için parametreler	1) Güç denge kısıtı 2) SOC kısıtı 3) Bileşenlerin fiziksel kısıtları	MO-GA

Tablo 3.1: Şebekeye bağlı hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması üzerine literatür incelemesi (devam)

Yazar (Yıl)	Sistem bileşenleri	Amaç fonksiyonları			Karar değişken(ler)i	Kısıt(lar)	Yöntem(ler)
		SO	MO	Amaç(lar)			
Altıntaş ve diğ. (2018)	PV, WT, BESS, GC		■	**Obj.-1 Min.** ATC • IC (CC, OC, MC) × yıllık hale getirme faktörü (annualization factor), şebekeden enerji almanın toplam maliyeti, şebekeye enerji satmanın toplam geliri × yıllık hale getirme faktörü **Obj.-2 Min.** CO_2 emisyonu	1) Güneş paneli alanı 2) WT sayısı 3) Akü boyutu 4) Depolanacak enerji miktarı 5) Satın alınacak enerji miktarı 6) Satılacak enerji miktarı	1) Enerji çıktı eşitlikleri 2) Güç denge kısıtı 3) SOC kısıtı 4) Operasyonel kısıtlar 5) Kapasite kısıtları	ε-kısıt, NSGA-II, SPEA-2, optimize edilmiş MO-PSO
González ve diğ. (2018)	PW, WT, BM, GC		■	**Obj.-1 Min.** LCC • IC, NPV(OMC), NPV(RC), NPV(BM yakıtı elde etme maliyeti), NPV(şebekeye enerji satmadan elde edilen gelir), NPV(şebekeden enerji alma maliyeti), NPV(SV) **Obj.-2 Min.** CO_2 emisyonu	1) PV panellerin kapladığı alan 2) WT sayısı	1) Net yıllık güç denge kısıtı	GA
Nayak ve Nayak (2018)	PV, BESS, GC	■		**Obj.-1 Min.** TAOC • Net elektrik maliyeti, yıllık CC, yıllık RC, yıllık OMC, toplam penaltı maliyeti	1) Akü sayısı ve boyutu (türü)	1) Güç denge kısıtı 2) SOC kısıtı 3) Şebekeden alınan enerji için minimum ve maksimum kısıtlar 4) Akü DC çıkışları için minimum ve maksimum kısıtlar	IHS
Anand ve diğ. (2019)	PV, BESS, BG, BM, GC	■		**Obj.-1 Min.** SC • CC, NPV(OMC), NPV(RC), NPV(SV), NPV(yakıt maliyeti), NPV(elektrik alış ve satış fiyatı)	1) PV panel sayısı 2) Akü sayısı 3) BG sisteminin çıktısı 4) BM jeneratör sistemi tarafından üretilen çıktı	1) Enerji çıktı denklemleri 2) Güç denge kısıtı 3) SOC kısıtı 4) Kapasite kısıtları 5) LPSP kısıtı 6) Alan ihtiyacı kısıtı 7) Karar değişkenleri için alt ve üst sınırlar	GWO

Tablo 3.1: Şebekeye bağlı hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması üzerine literatür incelemesi (devam)

Yazar (Yıl)	Sistem bileşenleri	Amaç fonksiyonları			Karar değişken(ler)i	Kısıt(lar)	Yöntem(ler)
		SO	MO	Amaç(lar)			
Konneh ve diğ. (2019)	PV, WT, BESS, DG, BM, GC		■	**Obj.-1 Min.** LCC • IC, NPV(OMC), NPV(RC), NPV(SV) **Obj.-2 Min.** DEF **Obj.-3 Min.** CO_2 emisyonu **Obj.-4 Min.** DPSP	1) Toplam PV panel alanı 2) WT taradığı toplam alan 3) Mevcut bagas miktarı 4) DG sayısı 5) Akü kapasitesi	1) Güç denge kısıtı 2) SOC kısıtı 3) Operasyonel kısıtlar 4) Karar değişkenleri için alt ve üst sınırlar	MO-PSO
Kouhestani ve diğ. (2020)	PV, WT, BESS, GC	■		**Obj.-1 Min.** ACS • (IC, NPV(OMC), NPV(RC), NPV(SV))/N, şebekeden elektrik almanın yıllık maliyeti, şebekeye elektrik satmanın yıllık geliri	1) PV panel alanı 2) WT rotor süpürme alanı 3) Akü kapasitesi	1) Güç denge kısıtı 2) Şebekeden alınan enerji için üst sınır 3) LPSP kısıtlaması 4) Bileşenler için alt ve üst sınırlar	PSO
Wu ve diğ. (2020)	PV, WT, PSS, GC	■		**Obj.-1 Min.** LCOE • IC, NPV(OMC), NPV(RC), NPV(SV), yıllık yük talebi	1) Bileşen kapasiteleri	1) Güç denge kısıtları 2) Operasyonel kısıtlar	SSA
Bu tez çalışmasında önerilen model, farklı yenilenebilir enerji üretim birimlerini ve her bir üretim biriminin farklı türlerini dikkate almaktadır.			■	**Obj.-1 Min.** Toplam (maliyet – gelir) • IC, NPV(OMC), NPV(RC), NPV (toplam şebekeden enerji alma maliyeti), NPV(SV), NPV(toplam şebekeye enerji satma geliri) **Obj.-2 Min.** CO_2 emisyonu	1) Enerji üretim birimlerinin sayısı 2) Şebekeden alınacak enerji miktarı 3) Şebekeye satılacak enerji miktarı 4) Şebekeden alınacak maksimum ve minimum enerji miktarı limiti için ikili değişkenler, {0,1}	1) Güç denge kısıtı 2) Toplam alan kısıtı 3) Her üretim birimi için birim alan kısıtı 4) Her üretim birimi için maksimum adet sınırı 5) Şebekeden alınacak enerji miktarları için minimum ve maksimum sınırlar 6) Yenilenebilir enerji penetrasyon seviyesi için minimum sınır 7) Karar değişkenleri için alt ve üst sınırlar	WMO-MILP, Monte Carlo simülasyonu

Modellerde kullanılan karar değişkenleri iki kategoriye ayrılabilir:

- Yatırım kararlarıyla ilgili değişkenler. Örneğin;
  - WT sayısı ve/veya süpürme alanı,
  - PV panel sayısı, yüzey alanı ve/veya eğim açısı,
  - Akü sayısı ve/veya boyutu vb.
- Operasyonel kararlarla ilgili değişkenler. Örneğin;
  - Depolanacak enerji miktarı,
  - Şebekeden satın alınacak enerji miktarı,
  - Şebekeye satılacak enerji miktarı vb.

Literatürdeki çalışmaların büyük çoğunluğu önceden belirlenmiş spesifik bir WT ve/veya PV paneli vb. üzerine odaklanmıştır ve enerji üretiminde kullanılacak yenilenebilir enerji üretim birimi türlerinin farklı türlerini (örneğin, farklı WT türleri) model içerisinde birbirleriyle kıyaslamamıştır. Tablo 3.1'de verilen çalışmalardan Altıntaş ve diğ. (2018) merkezi olmayan hibrit bir GC-PV/WT/akü sistemin optimum boyutlandırma problemini araştırırken 3 farklı rüzgâr türbini türünü alternatif olarak sürece dahil etmiştir.

Bir GC-HRES'te enerji depolama sisteminin olması beraberinde bazı avantajları ve dezavantajları getirmektedir. Mevcut teknolojilerle enerji depolamanın yüksek maliyetleri sebebiyle GC-HRES'ler genellikle şebekeye bağlıdırlar. Bir enerji depolama sistemi, kurulum için ek maliyetler, altyapı ve alan gerektirmektedir ve operasyonel faaliyetler sırasında ekstra karmaşıklığa neden olabilir. Ayrıca, aküler gibi bazı enerji depolama sistemleri kadmiyum, cıva, kurşun vb. toksik metaller içerebildikleri için çevreye olumsuz etkilere sahiptirler. Diğer taraftan, sistemin güvenilirliğini artırarak aralıklı yapıya sahip rüzgâr ve güneş kaynaklarının daha etkin kullanımına yardımcı olabilirler.

Bu tez çalışmasında, öncelikli amaçlar sistemin çevreye olumsuz etkilerini azaltmak ve kabul edilebilir maliyetle yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmek olduğu için aküler dikkate alınmamıştır ve şebekeye bağlı depolama sistemi olmayan HRES'ler (GC-HRES-WS) üzerine odaklanılmıştır. Bu çalışma, GC-HRES optimum boyutlandırma konusunda literatürdeki çalışmalarda kullanılan kısıtları bütünsel olarak birleştirerek genelleştirilmiş çok amaçlı bir optimizasyon

modeli sunarak ilgili alana katkıda bulunmaktadır. GC-HRES-WS optimum boyutlandırma problemi; operasyonel, teknik, fiziksel ve kapasite kısıtları dahil ederek ve ekonomik ve çevresel amaçları da göz önüne alarak ağırlıklı çok amaçlı karma tam sayılı doğrusal programlama (WMO-MILP) modeli olarak formüle edilmiştir. Modelde, yatırım (kesikli) ve operasyonel (sürekli) karar değişkenler optimize edilmektedir.

Mevcut teknolojiler göz önüne alındığında yenilenebilir kaynaklardan üretilen enerjiyi kullanan HRES'lerde kurulum maliyeti fazla olabilmektedir ve her ne kadar enerji temiz ve yenilenebilir kaynaklarla üretilse de yüksek maliyetler ortaya çıkabilmektedir. Şebekeden satın alınan enerji ise fosil kaynaklı yakıtlar kullanan santrallerden yüksek miktarlarda ve düşük maliyetlerle üretilmesine rağmen CO_2 salınımına sebep olarak çevreye ve insanlara zarar vermektedir. Dolayısıyla düşük maliyetli enerji daha fazla CO_2 ortaya çıkarmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda maliyet ve CO_2 emisyonu arasındaki ilişkinin yeterince çalışılmadığı görülmektedir. Buradan yola çıkarak, önerilen WMO-MILP modelinde maliyet ve CO_2 arasındaki bu ödünleşim (trade-off) dikkate alınmıştır. Önerilen model karar vericinin maliyet temelli, çevre temelli veya kısmen maliyet ve çevre temelli önceliklerini temsil eden çeşitli ağırlıkları maliyet ve CO_2 emisyonu minimizasyonu gibi birbiri ile çelişen amaç fonksiyonlarına atayarak ikisi arasındaki ödünleşimi değerlendirme yeteneğine sahiptir. Böylece karar verici farklı CO_2 emisyonu değerlerine göre sistem maliyeti ve bileşen türleri ve sayılarının değişimini görebilecektir.

Bu çalışma, farklı büyüklükteki yük talebi noktaları ve farklı yenilenebilir enerji üretim birimlerinin farklı türlerinin değerlendirilmesine genelleştirilmiş bir çok amaçlı optimizasyon problemi sunması bakımından için önemlidir. Önerilen model, farklı yenilenebilir enerji üretim birimleri (PV panel, WT, vb.) ve her bir üretim biriminin farklı türlerinin (1 kW dikey WT ve/veya 1,5 kW yatay WT, vb.; 180 W mono-kristal PV panel ve/veya 150 W poli-kristal PV panel, vb.) karşılaştırmasına izin verdiği için karar verme sürecini geliştirmektedir. Önerilen genelleştirilmiş modelin farklı durumlar ve talep noktaları (köy, ev, apartman, organize sanayi bölgesi vb.) için tasarlanabilir ve uyarlanabilir olması amaçlanmıştır. Önerilen model (kısıtlar, karar değişkenleri vb.) tezin beşinci bölümünde açıklanmıştır.

Model, aşağıda verilen noktaları belirlemeye çalışmaktadır.

- Kurulacak yenilenebilir enerji üretim birimlerinin sayısı ve türü,
- Her bir zaman diliminde (1 saat) yenilenebilir enerji üretim birimleri ile üretilen enerji miktarı,
- Her bir zaman diliminde sistem tarafından karşılanan talep miktarı ve şebekeye satılan enerji miktarı ve
- Her bir zaman diliminde şebekeden alınan enerji miktarı.

Meteorolojik verilerin ve yük talebi verilerinin barındırdığı stokastiklik bir HRES'in tasarımında dikkate alınmalıdır. Bu yüzden, çalışılan konumun hava durumu ve yük talebi verilerini tahmin etmek için bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, çalışmanın diğer bir katkısı olarak, literatürde geçmiş saatlik gerçek verileri kullanan saatlik çalışmaların (Ardakani ve diğ. 2010; Chedid ve Rahman 1997; Nayak ve Nayak 2018; Senjyu ve diğ. 2006; Sharafi ve diğ. 2015; Wang ve Singh 2007; Zebarjadi ve Askarzadeh 2016) aksine Monte Carlo simülasyonu ve WMO-MILP modeli birleştirilmiştir.

GC-HRES-WS optimum boyutlandırma modeli, bir vaka çalışması için GAMS yazılımı kullanılarak çözülmüştür. GAMS yazılımı doğrusal, doğrusal olmayan ve karma tam sayılı optimizasyon problemlerini modellemek ve çözmek için tasarlanmış bir programlama dilidir. Tez çalışmasında, CPLEX, Gurobi gibi çözücülerin hemen hemen hepsini bünyesinde barındırdığı ve model formüllerini değiştirmeden farklı çözücüler arasında geçiş yapmaya izin verdiği için GAMS yazılımı tercih edilmiştir (GAMS 2020).

Literatürün detaylı analizinden elde edilen bulgularla birlikte, bu çalışmada önerilen model karar vericilerin bir GC-HRES-WS'nin ekonomik ve çevresel olarak değerlendirmesine olanak tanımaktadır. Her bir zaman dilimi için yenilenebilir enerji üretim birimleri tarafından üretilen enerji miktarının, şebekeye satılan ve şebekeden satın alınan enerji miktarlarınn yaklaşık olarak önceden biliniyor olması başarılı operasyonel planlar geliştirilmesine imkan tanımaktadır.

4. YÖNTEM

Bu bölümde, tezde çalışılan GC-HRES-WS optimum boyutlandırma konusunun modellenmesinde kullanılan optimizasyon modelleri ve hazırlanan WMO-MILP modelinde rüzgar hızı, güneş radyasyonu ve elektrik talebi gibi parameterlerin stokastikliğini ele almak için kullanılan Monte Carlo simülasyonu yöntemleri açıklanmıştır.

4.1 Optimizasyon Modelleri

Optimizasyon modelleri, sistemlerin hem kendi içindeki işleyişini ve hem de çevresindeki sistemlerle olan etkileşimlerini en iyi şekilde temsil edebilen modelleri oluşturmak için semboller ve matematiksel ifadeleri kullanmaktadır. Bu semboller ve matematiksel ifadeler; parametreler, karar değişkenleri, performans ölçütü/amaç fonksiyonu ve kısıtlardan oluşmaktadır. Parametreler; sistemin ölçülebilir özelliklerini tanımlamak için kullanılan ve modelin çıktısına etki eden girdilerdir. Kontrol edilebilen (karar verici tarafından belirlenen) ve kontrol edilemeyen olmak üzere iki grupta incelenebilir. Amaç fonksiyonu; sistem etkinliğini ve performansını değerlendirmek için tanımlanan ölçüttür. Belirlenen ölçütün eniyilenmesi/optimize edilmesi (maksimize veya minimize edilmesi) amaçlanmaktadır. Karar değişkenleri; amaç fonksiyonunun optimum değerini verecek değerleri tanımlayan değişkenlerdir. Modelin oluşturulmasında ve problemin doğru şekilde modellenmesinde karar değişkenlerin belirlenmesi en önemli adımlardan biridir. Kısıtlar; sistem sınırlarını belirlemek için kullanılmaktadır. Bu amaçla, değişkenlere belirli kısıtlar koyulabilir (Öztürk 2005; Türkay 2011).

Bir optimizasyon modeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Türkay 2011):

$$Maks.\ z = f(x, y) \tag{4.1}$$

$$g(x, y) = 0, h(x, y) \leq 0 \tag{4.2}$$

$$x \in \Re^n, y \in \{0, 1, 2, \dots, m\} \tag{4.3}$$

Burada;

$z = f(x, y)$: Amaç fonksiyonu

x : Karar değişkenleri (sürekli)

y : Karar değişkenleri (kesikli)

$g(x, y), h(x, y)$: Kısıtlar

Eşitlik (4.1)-(4.3) arasında verilen optimizasyon probleminde, $g(x, y)$ eşitliği ve $h(x, y)$ kısıtları altında $z = f(x, y)$ amaç fonksiyonu maksimize edecek x (herhangi bir değeri alabilen sürekli değişkenler) ve y (sıfırdan büyük herhangi bir tam sayı değeri alabilen tam sayılı değişkenleri) karar değişkenlerinin bulunması hedeflenmektedir (Türkay 2011).

Burada; eğer y karar değişkeninin yer almadığı ve $f(x)$, $g(x)$ ve $h(x)$ fonksiyonlarının doğrusal olduğu durumlarda model doğrusal programlama (linear programming-LP) herhangi bir tanesinin doğrusal olmadığı durumlarda doğrusal olmayan programlama (non-linear programming) olarak tanımlanmaktadır. Tam tersi durumda, x karar değişkeni ile beraber y değişkeni de modelde yer aldığı $f(x)$, $g(x)$ ve $h(x)$ fonksiyonlarının doğrusal olduğu durumlarda model karma tam sayılı doğrusal programlama modeli (mixed integer linear programming-MILP) doğrusal olmadığı durumlarda karma tam sayılı doğrusal olmayan programlama modeli olarak adlandırılmaktadır. MILP modelleri bir çok alandaki mühendislik probleminlerine başarıyla uygulanmıştır (Türkay 2011; Winston ve Goldberg 2004).

MILP modellerinin matematiksel formülleri bir örnekle aşağıdaki gibi gösterilebilir (Winston ve Goldberg 2004):

$$Min.\ z = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j \tag{4.4}$$

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \geq b_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \tag{4.5}$$

$$x_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \tag{4.6}$$

$$x_j\ tam\ sayı \quad \text{bazı } (j = 1, 2, \dots, n) \text{ için} \tag{4.7}$$

Burada;

z : Minimize edilecek amaç fonksiyonu

c_j : 1 birim j. karar değişkenin amaç fonksiyonuna katkısı (parametre)

x_j : Belirlenecek karar değişkeni

a_{ij} : Teknoloji katsayıları (parametre)

b_i : Elverişli kaynak miktarları (sağ taraf sabiti) (parametre)

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde maksimize veya minimize edilecek birden fazla amaç fonksiyonları eş zamanlı olarak ve sistematik bir şekilde optimize edilmeye çalışılmaktadır. Çok amaçlı optimizasyon problemleri, birbiri ile çelişen amaç fonksiyonları arasındaki en iyi ödünleşimi arayan çözüm kümesini bulunmaya çalışılmaktadır (Deb 2001; Kaya ve Fığlalı 2016)

Genel olarak çok amaçlı bir optimizasyon problemi aşağıdaki gibi verilebilir (Deb 2001):

$$Min./Max.\, f_m(x) \quad (m = 1, 2, \dots, M) \tag{4.8}$$

$$g_j(x) \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, J) \tag{4.9}$$

$$h_k(x) = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, K) \tag{4.10}$$

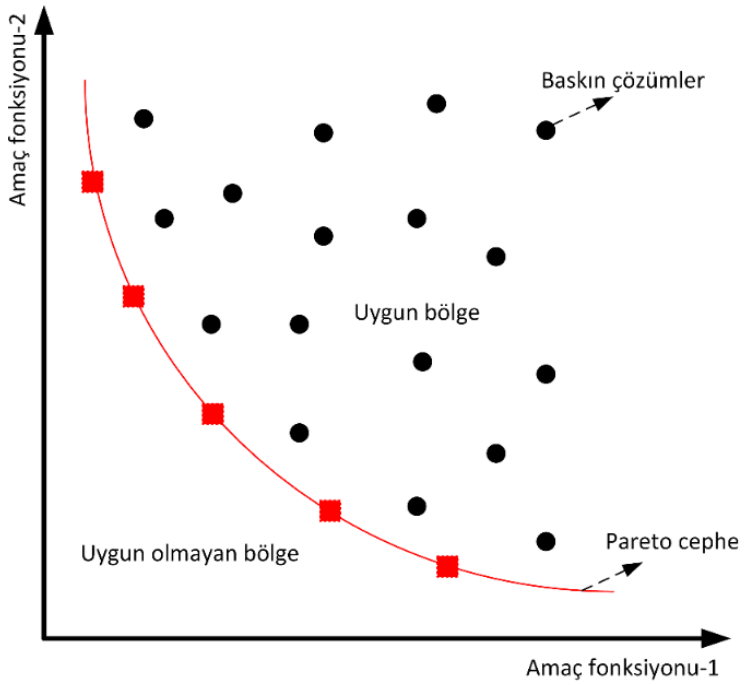
$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad (i = 1, 2, \dots, N) \tag{4.11}$$

Burada, $m = 1, 2, \dots, M$ amaç fonksiyonu sayısını göstermektedir. x_i^l ve x_i^u karar değişkenleri için alt ve üst sınırı ifade etmektedir. Burada amaç fonksiyonları hem aynı yönde (Örneğin; $Min.\, f_1(x)$-$Min.\, f_2(x)$ veya $Maks.\, f_1(x)$-$Maks.\, f_2(x)$) hem ters yönlerde (Örneğin; $Min.\, f_1(x)$-$Maks.\, f_2(x)$ veya $Maks.\, f_1(x)$-$Min.\, f_2(x)$) modellenebilmektedir (Atalan 2018).

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde iki farklı yaklaşım kullanılmaktadır. Bunlardan birinci yaklaşım pareto yaklaşımı olarak adlandırılmaktadır ve optimal çözümler kümesini (pareto-optimal küme) bulmaya çalışmaktadır. Burada, birbiriyle çelişen tüm amaç fonksiyonlarının eş zamanlı olarak optimizasyonundan elde edilen çözüm noktalarının baskınlık ilişkisi içerisinde karşılaştırılmasıyla optimal çözümler

kümesi ortaya çıkmaktadır. Baskın çözümler kümesinin tanımladığı sınırlar ise pareto optimal cephe (pareto optimal front) olarak adlandırılmaktadır. Burada amaç pareto optimal cepheye mümkün olduğunca yakın ve çeşitli çözümleri bulmaktır (Atalan 2018; Deb 2001; Gunantara 2018; Kaya ve Fığlalı 2016; Türkölmez 2016).

İki amaç fonksiyonunu içeren bir problem için pareto optimal cephe kavramı Şekil 4.1'de gösterilmiştir (Schweidtmann ve diğ. 2018).



Şekil 4.1: Pareto optimal cephenin gösterimi

İkinci yaklaşımda ise çeşitli dönüşümler (normalizasyon vb.) kullanılarak amaç fonksiyonları tek bir amaç fonksiyonuna dönüştürülmektedir. En çok tercih edilen yöntemlerden biri olan ağırlıklı toplam yönteminde kullanıcı tarafından tanımlanmış ağırlıklarla önceden tanımlanmış her bir amaç fonksiyonunu çarpılarak amaç fonksiyonunu tek bir amaç fonksiyonuna dönüştürülür. Bir amacı ağırlığı o amacın göreceli önemini belirtmektedir (Kaya ve Fığlalı 2016; Türkölmez 2016).

Eşitlik (4.12)-(4.15) arasından görülebileceği üzere ağırlıklı çok amaçlı bir optimizasyon problemi aşağıdaki gibidir (Deb 2001):

$$Minimize\ F(x) = \sum_{m=1}^{M} w_m f_m(x) \quad (m = 1, 2, \dots, M) \tag{4.12}$$

$$g_j(x) \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, J) \tag{4.13}$$

$$h_k(x) = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, K) \tag{4.14}$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad (i = 1, 2, \dots, N) \tag{4.15}$$

w_m , amaç fonksiyonlarının ağırlıklarını tanımlamaktadır. Burada, amaç fonksiyonlarına atanan farklı ağırlık değerleri yardımıyla farklı pareto çözümler elde edilmeye çalışılmaktadır (Kaya ve Fığlalı 2016).

4.2 Rassal Sayılar ve Monte Carlo Simülasyonu

Önerilen WMO-MILP modelinde kullanılması durumunda rüzgâr hızı, güneş radyasyonu, elektrik talebi gibi stokastik verilerin Monte Carlo simülasyonu ile tahmin edilip gelecekte ne gibi durumlarla karşı karşıya kalınabileceğini öngörerek planlamanın yapılması amaçlanmıştır.

Simülasyon; bir sistemi girdi, süreç ve çıktılarıyla bütünsel olarak ele alıp aralarındaki ilişkiyi içeren ve sistemi temsil eden bir modeldir. Simülasyon modellerinde ele alınan bir olayın süreleri (hizmet süreleri veya gelişler arası süreler), direk veya indirek olarak belirlenmiş olasılık dağılım fonksiyonlarından üretilmektedir. Literatürde, verilen bir olasılık dağılım fonksiyonundan bu rassal sürelerin üretilmesi süreci olasılık dağılım fonksiyonlarından örnekleme ya da Monte Carlo simülasyonu olarak adlandırılmaktadır. Geçmişte rassal sayıların üretilmesinde rulet, zar atma gibi yöntemler kullanılırken günümüzde belirli olasılık dağılım fonksiyonlarına dayanarak rassal sayıların üretilmesi sürecinde bilgisayarlar kullanılmaktadır (Winston ve Goldberg 2004).

Monte Carlo simülasyon modellerinde girdi değişkenleri rassal değişken olarak kabul edilmek üzere aşağıdaki adımlar uygulanmaktadır (Yıldırım 2017):

- Girdi parametrelerinin belirlenmesi,
- Girdi parametrelerinin olasılık dağılım fonksiyonları ve istatistiki değerlerinin belirlenmesi,
- Parametreler arasındaki ilişkinin istatistiki olarak tanımlanması,
- Oluşturulan olasılık dağılımlarının analiz edilmesi,
- Olasılık dağılımlarının çıkarılması.

Monte Carlo simülasyonunda ortaya çıkan en önemli problemlerden bir tanesi rassal değişkene ait uygun olasılık dağılımının belirlenmesidir. Değişkenler; normal, lognormal, uniform, triangular, gamma vb. farklı olasılık dağılımlara uydurulabilir (Winston ve Goldberg 2004). Burada ilgili verinin hangi dağılıma uyduğu ve bu dağılıma ait parametrelerin ne olduğunu belirlenmelidir. Bu kapsamda, Ki-Kare (χ^2) uygunluk testi ve Kolmogrov-Smirnov testleri kullanılabilmektedir.

ARENA yazılımının Input Analyzer kısmında olasılık dağılım fonksiyonlarının uyum kalitesi (quality of fit) belirlenebilmektedir. Bu durum, bir veri setini bir olasılık dağılım fonksiyonuna uydurmak için ve diğer dağılımlarla karşılaştırmak için kullanılabilmektedir. Yazılımın Input Analyzer kısmı ile Ki-kare uygunluk ve Kolmogrov-Smirnov testleri yapılabilirken yazılımın dağılım uydurma (distribution-fitting) özelliği ile rassal veri setleri de oluşturulabilmektedir (Deepradit ve diğ. 2017).

Bu tez çalışmasında bahsi geçen stokastik rüzgâr hızı, güneş radyasyonu ve elektrik talebinin zaman serisi olarak elde edilen geçmiş verileri kullanılarak ARENA 14.0 yazılımının Input Analyzer kısmında en uygun olasılık dağılım fonksiyonları elde edilmiştir. Daha sonra, bu olasılık dağılım fonksiyonlarına dayanarak ARENA 14.0 yazılımının Input Analyzer kısmında karşılık gelen rassal veriler üretilmiştir.

Rassal verilerin üretim aşaması daha detaylı olarak 6. Bölümde açıklanmıştır. Çalışmada kullanılan yöntemlerden yola çıkarak, bir sonraki bölümde GC-HRES-WS'lerin optimum tasarımı için önerilen WMO-MILP modeli açıklanmıştır.

5. GC-HRES-WS'NİN OPTİMUM BOYUTLANDIRILMASI İÇİN GENELLEŞTİRİLMİŞ WMO-MILP MODELİ

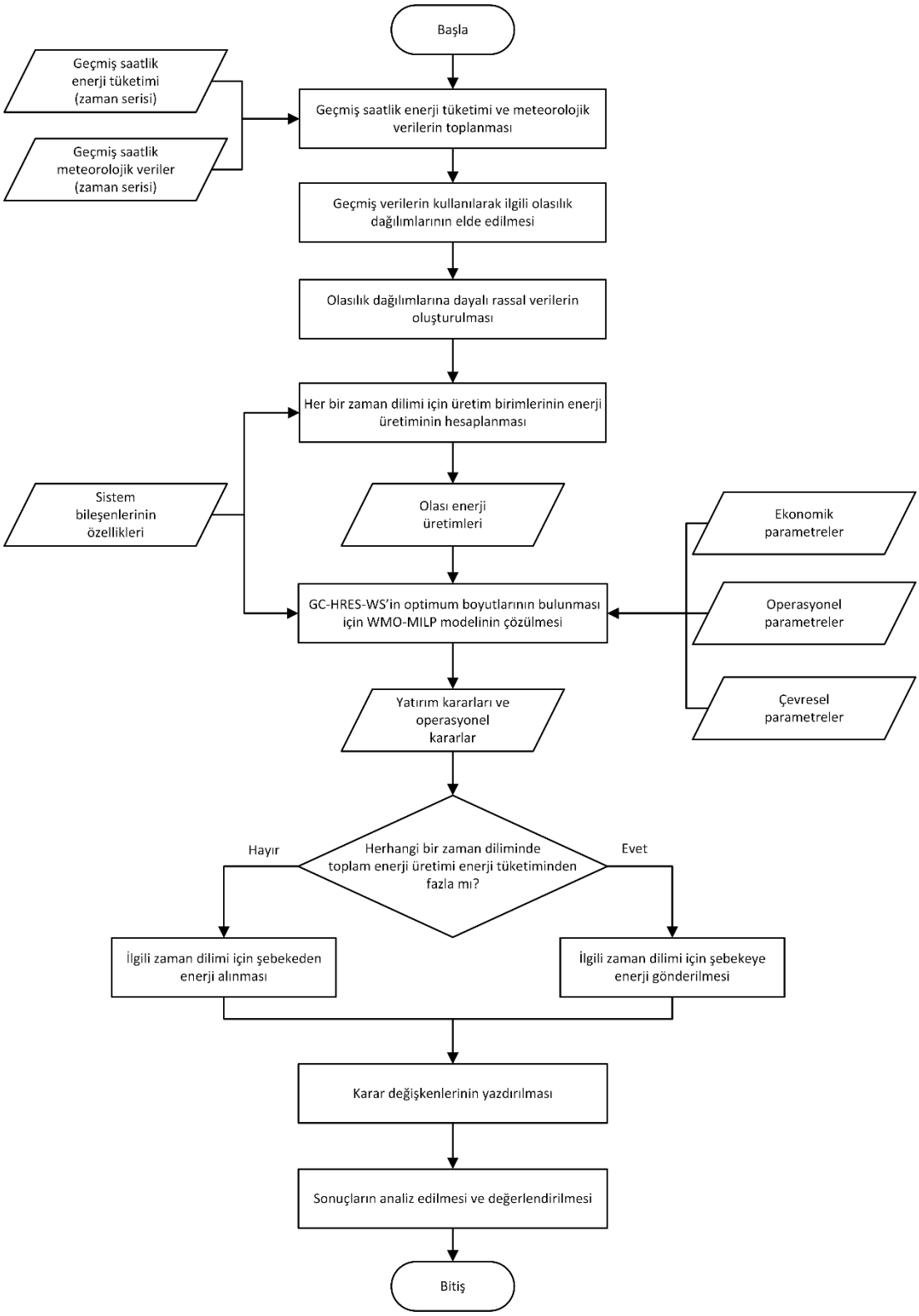
Bu tez çalışmasında, GC-HRES-WS'nin optimal boyutlandırması problemi çok amaçlı optimizasyon problemi olarak modellenmiştir. WMO-MILP modelinde, birbiriyle çelişen iki amaç fonksiyonu ele alınmıştır. İlk amaç fonksiyonu toplam maliyet ile toplam gelir arasındaki farkın minimize edilmesini amaçlarken ikinci amaç fonksiyonu ise sistem tarafından üretilen yıllık toplam CO_2 emisyonu miktarını minimize etmeyi amaçlamaktadır.

Ağırlıklı çok amaçlı optimizasyon problemi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir. Burada, i. amaç fonksiyonu $f_i(x)$ ve i. amaç fonksiyonun ağırlığı w_i olsun. WMO-MILP modelinin amaç fonksiyonu; Eşitlik (5.1)'de verildiği gibi tüm amaç fonksiyonlarının ağırlıklı toplamı olarak ifade edilmektedir.

$$Min. \sum_{i=1}^{n} w_i f_i(x) \tag{5.1}$$

Her amaç fonksiyonu farklı birimlerle ölçüldüğü için amaç fonksiyonlarının değerleri geniş aralıklarda değişebilir. Bu gibi durumlarda, büyük değerler alan amaç fonksiyonları diğerlerine göre daha önemli hale gelir. Tüm amaç fonksiyonlarını eşit derecede değerlendirmek amacıyla her amaç fonksiyonunun 0 ve 1 arasında değer alması için normalizasyon işlemi yapılır. Toplamları 1 olacak şekilde ($\sum w_i = 1$) ele alınan ağırlıklar 0 ile 1 arasında değişebilmektedir. Aşağıda açıklanan WMO-MILP modelinde bu yaklaşım kullanılmıştır.

Modelin oluşturulmasında ihtiyaç duyulan parametreler çeşitli kaynaklardan elde edilmiştir. Bir talep noktasının enerji tüketimi, rüzgâr hızı ve güneş radyasyonu değerlerini tahmin etmek için geçmiş veriler toplanmıştır. Şekil 5.1'de verilen akış şeması, GC-HRES-WS'lerin girdilerini, boyutlandırma süreç adımlarını ve çıktılarını göstermektedir.



Şekil 5.1: GC-HRES-WS'lerin girdilerini, boyutlandırma süreç adımlarını ve çıktılarını gösteren bir akış diyagramı

5.1 Varsayımlar

WMO-MILP modeli geliştirilirken aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır.

- Tüm parametreler önceden bilinmektedir.
- Tüm elemanlar planlama periyodu boyunca bozulmadan çalışırlar.
- Enerji talebi her bir zaman diliminde kesintisiz olarak karşılanır.
- Yatırım ve yenileme maliyetleri; nakliye, vergiler, kurulum vb. tüm maliyetleri kapsar.
- Operasyon ve bakım maliyetleri; işletim maliyeti, işçilik maliyeti, bakım maliyeti ve sistemin güvenilir şekilde işletilmesi ve bakımı için genel masraflar gibi yıllık tekrar eden maliyetleri kapsar.
- Bileşenlerin bakımları yıllık olarak yapılır.
- Sistem şebekeye bağlı olarak çalışmaktadır ve belirli limitler dahilinde şebekeden enerji alabilmekte ve şebekeye enerji satabilmektedir.
- Her bir zaman diliminde sistem bileşenlerinin üretebilecekleri enerji miktarı hesaplanmış bir şekilde dışarıdan alınmaktadır ve enerji miktarı hesaplanırken çevirici verimliliği, dönüştürücü verimliliği ve bileşen verimliliği gibi parametreler dikkate alınmaktadır.
- Operasyon ve bakım maliyetleri, başlangıç maliyetlerinin bir oranıdır.
- Üretilen enerji ve yük talebi zaman aralıklarında (t) değişmez.
- Hurda değeri; yatırım maliyetinin doğrusal olarak azalması yoluya hesaplanmaktadır.

5.2 Kümeler ve İndisler, Parametreler ve Karar Değişkenleri

WMO-MILP modelinde kullanılan kümeler ve indisler, parametreler ve karar değişkenleri aşağıdaki gibidir:

Kümeler ve indisler		
$r \in R$	:	Yenilenebilir enerji kaynakları (RES)
$s \in S_r$	:	*r*. yenilenebilir enerji kaynakları için alternatifler (yenilenebilir enerji üretim birimleri)
$t \in T$	:	Planlama periyodu (saat), $t = \{1, 2, 3, \dots, 8760\}$
$n \in N$	:	Sistem ömrü (yıl)

Parametreler		
IC_{rs}	:	*r*. RES'in *s*. tipi için yatırım maliyeti ($/adet)
OMC_{rs}	:	*r*. RES'in *s*. tipi için yıllık operasyon ve bakım maliyeti ($/adet/yıl)
RC_{rs}	:	*r*. RES'in *s*. tipi için yenileme maliyeti ($/adet)
SV_{rs}	:	*r*. RES'in *s*. tipi için hurda fiyatı ($/adet)
LS_{rs}	:	*r*. RES'in *s*. tipinin ömrü (yıl)
i	:	Yıllık faiz oranı (%)
α_{rs}	:	*r*. RES'in *s*. tipi için eskalasyon oranı (%)
β	:	Enflasyon oranı (%)
D_t	:	*t*. dilimde müşteri talebi (Wh)
PE_{trs}	:	*t*. dilimde *r*. RES'in *s*. tipi ile üretilebilecek enerji miktarı (Wh)
CGB_t	:	*t*. dilimde şebekeden enerji alma fiyatı ($/Wh)
CGS_t	:	*t*. dilimde şebekeye enerji satma fiyatı ($/Wh)
GB_t^{max}	:	*t*. dilimde şebekeden satın alınabilecek maksimum enerji miktarı (Wh)
GB_t^{min}	:	*t*. dilimde şebekeden satın alınabilecek minimum enerji miktarı (Wh)
Y_{rs}^{max}	:	*r*. RES'in *s*. tipinin kullanılabilecek maksimum sayısı
A_{rs}	:	*r*. RES'in *s*. tipinin kapladığı alan (m^2)
TA	:	Toplam alan (m^2)
UA_r	:	*r*. RES için kullanılabilecek alan (m^2)

Parametreler (devam)		
ε	:	CO_2 salınımı katsayısı (kg CO_2/Wh)
k	:	Minimum yenilenebilir enerji penetrasyon seviyesi ($0 \leq k \leq 1$)
M	:	Çok büyük bir sayı

Karar değişkenleri		
y_{rs}	:	r. RES'in s. tipinin üretimde kullanılan sayısı (adet)
gb_t	:	t. dilimde şebekeden enerji alma miktarı (Wh)
gs_t	:	t. dilimde şebekeye enerji satma miktarı (Wh)
z_t	:	$\begin{cases} 1 & \text{eğer } gb_t \geq GB_t^{min} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$

Burada, y_{rs} yatırım karar değişkenleri olarak adlandırılırken gb_t, gs_t ve z_t operasyonel kararlar ile ilgili karar değişkenleridir.

Önerilen WMO-MILP modeli aşağıda verilmiştir.

5.3 Amaç Fonksiyonları

Önerilen matematiksel modelde, Eşitlik (5.2)'de verilen birinci amaç fonksiyonu (f_1) ele alınan planlama periyodunda (N) toplam maliyetin net bugünkü değeri, NPV(TC) ile toplam gelirin net bugünkü değeri, NPV(TR) arasındaki farkı minimize etmeyi amaçlamaktadır.

$$Min.\ f_1 = NPV(TC) - NPV(TR) \tag{5.2}$$

Eşitlik (5.3) toplam maliyetin net bugünkü değerini vermektedir ve toplam yatırım maliyetinin, toplam operasyon ve bakım maliyetinin net bugünkü değerinin, toplam yenileme maliyetinin net bugünkü değerinin ve toplam şebekeden enerji satın alma maliyetinin net bugünkü değerinin toplamı alınarak hesaplanmaktadır.

$$NPV(TC) = TIC + NPV(TOMC) + NPV(TRC) + NPV(TCGB) \quad (5.3)$$

Toplam yatırım maliyeti (TIC); her bileşen için planlama periyodu başlangıcında ortaya çıkan yatırım maliyetlerinin toplamıdır ve Eşitlik (5.4)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. Bileşenlerin yatırım maliyeti ise; daha önce bahsedildiği gibi nakliye, vergiler, kurulum vb. maliyetleri kapsamaktadır (Maleki ve diğ. 2015; Wang ve Singh 2007). Yatırım maliyetleri; bileşenlerin boyutları ve özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir (Sharafi ve ElMekkawy 2015; Sharafi ve diğ. 2015).

$$TIC = \sum_{r \epsilon R} \sum_{s \epsilon S_r} IC_{rs} y_{rs} \quad (5.4)$$

Toplam operasyon ve bakım maliyetinin net bugünkü değeri, NPV(TOMC), eskalasyon oranını dikkate alarak planlama periyodu boyunca ortaya çıkan yıllık operasyon ve bakım maliyetlerinin net bugünkü değerlerinin toplamıdır ve Eşitlik (5.5)'deki gibi hesaplanmaktadır. Bileşenlerin operasyon ve bakım maliyetleri; işletim maliyeti, işçilik maliyeti, bakım maliyeti ve sistemin güvenilir şekilde işletilmesi ve bakımı için genel masraflar gibi yıllık tekrar eden maliyetleri kapsamaktadır (Anand ve diğ. 2019; Caballero ve diğ. 2013; Wang ve Singh 2007).

$$NPV(TOMC) = \sum_{n \in N} \left(\frac{1 + \alpha_{rs}}{1 + i}\right)^n \sum_{r \epsilon R} \sum_{s \epsilon S_r} OMC_{rs} y_{rs} \quad (5.5)$$

Bazı bileşenlerin kullanım ömürlerini tamamlamalarından dolayı planlama periyodu içerisinde bir veya birkaç kere değiştirilmesi gerekebilir. Bu durumda yenilemenin yapıldığı yıllarda yenileme/değişim maliyeti ortaya çıkar. Eskalasyon oranını dikkate alarak oluşan yenileme maliyetlerinin net bugünkü değerlerinin toplamı sonucunda NPV(TRC) hesaplanmaktadır ve Eşitlik (5.6)'da verildiği hesaplanmaktadır. Kullanım ömrü planlama periyoduna eşit olan bileşenler için herhangi bir değişim/yenileme gerçekleşmez (Anand ve diğ. 2019; Caballero ve diğ. 2013; Kouhestani ve diğ. 2020).

$$NPV(TRC) = \sum_{n=1}^{X_{rs}} \left(\frac{1+\alpha_{rs}}{1+i}\right)^{nLS_{rs}} \sum_{r\epsilon R} \sum_{s\epsilon S_r} RC_{rs} y_{rs} \quad (5.6)$$

Burada kullanılan X_{rs}, r. yenilenebilir enerji kaynağının s. tipi için değişim sayısını (adet) göstermek üzere Eşitlik (5.7)'deki gibi hesaplanmaktadır (Anand ve diğ. 2019).

$$X_{rs} = \left\lfloor \frac{N}{LS_{rs}} \right\rfloor \quad \forall r \in R, \forall s \in S_r \quad (5.7)$$

Yenilenebilir enerji üretim birimlerinden üretilen enerji miktarının talebi karşılayamaması durumunda ihtiyaç duyulan enerji belirli bir fiyattan şebekeden satın alınmaktadır. Toplam şebekeden enerji satın alma maliyetinin net bugünkü değeri, NPV(TCGB), enflasyon oranını dikkate alarak yıllık şebekeden satın alma maliyetlerinin (YCGB) net bugünkü değerlerinin toplamıdır ve Eşitlik (5.8)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$NPV(TCGB) = \sum_{n\in N} \left(\frac{1+\beta}{1+i}\right)^{n} \sum_{t\in T} gb_t \, CGB_t \quad (5.8)$$

Eşitlik (5.9), toplam gelirin net bugünkü değerini vermektedir ve toplam hurda gelirinin net bugünkü değerinin ve toplam şebekeye enerji satma gelirinin net bugünkü değerinin toplamı alınarak hesaplanmaktadır.

$$NPV(TR) = NPV(TSV) + NPV(TCGS) \quad (5.9)$$

Toplam hurda değerinin net bugünkü değeri, NPV(TSV), yenilemenin yapıldığı yıllarda ve projenin ömrü sonunda bileşenlerin satışından elde edilen gelirlerin net bugünkü değerlerinin toplamıdır ve Eşitlik (5.10)'da verildiği gibi hesaplanmaktadır (Caballero ve diğ. 2013; González ve diğ. 2015a; González ve diğ. 2015b).

$$NPV(TSV) = \sum_{n=1}^{X_{rs}} \left(\frac{1+\beta}{1+i}\right)^{nLS_{rs}} \sum_{r\epsilon R} \sum_{s\epsilon S_r} SV_{rs} y_{rs} + \left(\frac{1+\beta}{1+i}\right)^{N} SV_{rs} y_{rs} \left(\frac{LS_{rs}}{N - X_{rs} LS_{rs}}\right) \quad (5.10)$$

Kullanım ömrünü tamamlayan bir bileşenin hurda değeri; yatırım maliyetinin doğrusal olarak azalması yoluya hesaplanmaktadır (Bkz. Şekil 5.2). Eğer bir bileşen ömürü sonuna ulaşmadan projenin ömrü tamamlanırsa aradaki doğrusal ilişkiye dayanarak belirlenen bir fiyata satılmaktadır (Caballero ve diğ. 2013; González ve diğ. 2015a; González ve diğ. 2015b).

Şekil 5.2: Doğrusal amortisman yöntemine göre hurda değerinin gösterimi

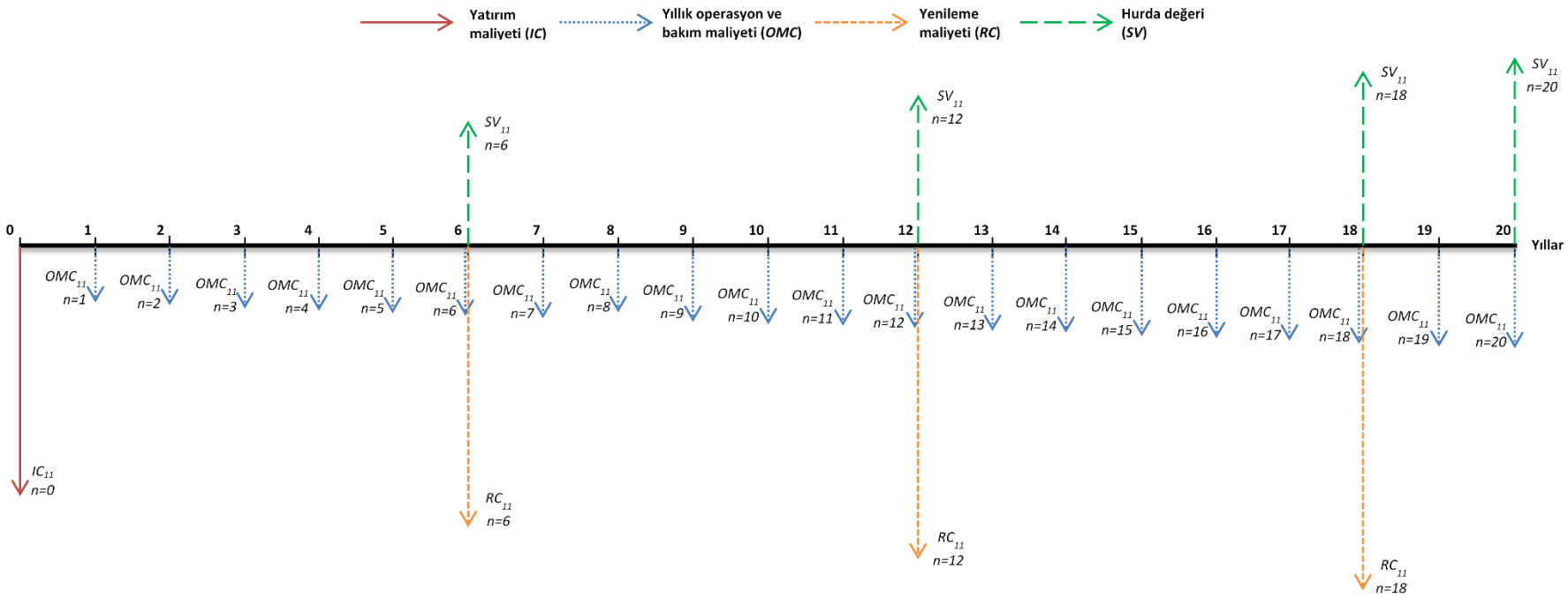
Yenilenebilir enerji üretim birimlerinden üretilen enerji miktarının talepten fazla durumunda bu fazla enerji belirli bir fiyattan şebekeye satılmaktadır. Toplam şebekeye enerji satmanın gelirinin net bugünkü değeri NPV(TCGS); enflasyon oranını dikkate alarak yıllık şebekeye satma gelirinin (YCGS) net bugünkü değerlerinin toplamıdır ve Eşitlik (5.11)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$NPV(TCGS) = \sum_{n\in N} \left(\frac{1+\beta}{1+i}\right)^{n} \sum_{t\in T} gs_t \, CGS_t \quad (5.11)$$

Örnek olarak; $r = 1$ alternatif yenilenebilir enerji kaynağının ve $s = 1$ tipi için amaç fonksiyonunda yer alan maliyetler görselliği arttırmak adına iki kısım olarak zaman ekseni üzerinde verilmiştir. $N = 20$ ve $L_{11} = 6$ olduğunu varsayalım. Bu durumda, Eşitlik (5.7)'de verilen formül kullanılarak X_{11} değeri şu şekilde hesaplanmaktadır.

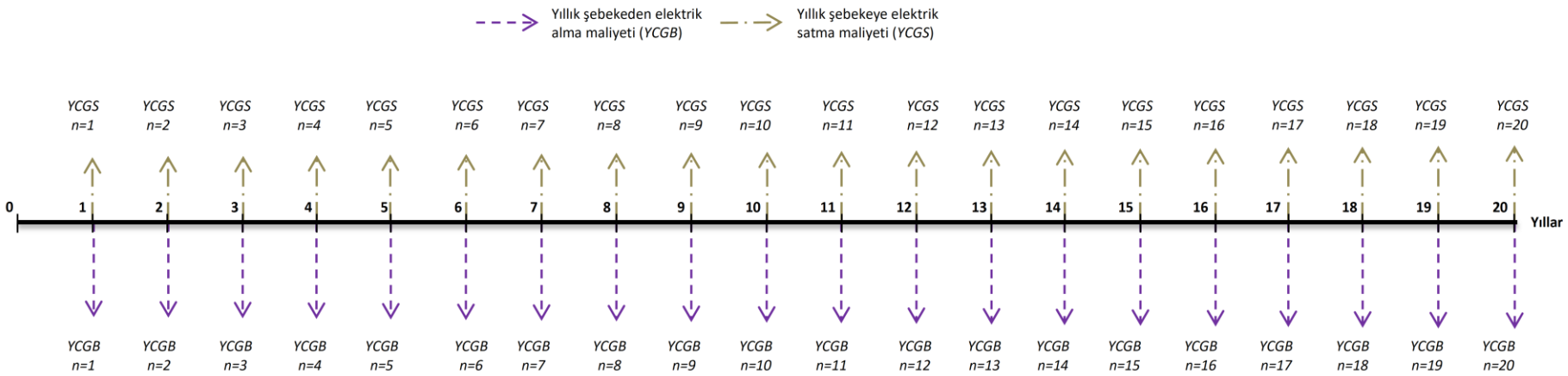
$$X_{11} = \left\lfloor \frac{20}{6} \right\rfloor = \lfloor 3{,}33 \rfloor = 3$$

Örnek olarak; 20 yıllık planlama periyodu için bu bileşenin oluşturduğu IC, OMC, RC ve SV Şekil 5.3(a)'da ve TCGB ve TCGS Şekil 5.3(b)'de verildiği gibi zaman ekseninde gösterilmiştir.



(a) IC, OMC, RC ve SV

Şekil 5.3: Planlama periyodu boyunca oluşan $r = 1$ ve $s = 1$ için maliyetlerin ve gelirlerin zaman ekseni üzerinde gösterilmesi



(b) ($\boldsymbol{YCGB = \sum_{t \in T} gb_t\, CGB_t}$ ve $\boldsymbol{YCGS = \sum_{t \in T} gs_t\, CGS_t}$)

Şekil 5.3. Planlama periyodu boyunca oluşan $r = 1$ ve $s = 1$ için maliyetlerin ve gelirlerin zaman ekseni üzerinde gösterilmesi (devam)

Önerilen matematiksel modelde, Eşitlik (5.12)'de verilen ikinci amaç fonksiyonu (f_2) yıllık CO_2 emisyonunun minimize edilmesidir. CO_2 emisyonunun şebekeden satın alınan enerji miktarının fonksiyonu olduğu varsayılmaktadır. Şebekeden alınan elektrik ile CO_2 emisyonu katsayısının çarpımından elde edilir.

$$Min.\ f_2 = \varepsilon \sum_{t \epsilon T} gb_t \tag{5.12}$$

Amaç fonksiyonları göreceli olarak alabilecekleri en büyük maliyet ve yıllık CO_2 emisyonu değerlerine bölünerek normalize edilmiştir. Bu en büyük değerler ise, modelin her bir amaç fonksiyonun maksimizasyonu için ayrı ayrı çözülmesi ile elde edilmektedir. Buradaki ağırlıklar karar vericinin tercihlerini yansıtmaktadır ve ağırlıklar değiştiğinde optimum boyutların değişiminin görülmesine imkân vermektedir. Böylece, bazı duyarlılık analizlerini gerçekleştirmek için daha esnek bir model elde edilmiş olunur.

Sonuç olarak, Eşitlik (5.13)'de verilen amaç fonksiyonu kullanılmaktadır.

$$Min. f = w_1 f_1^{norm.}(x) + w_2 f_2^{norm.}(x) \tag{5.13}$$

Modelde kullanılan kısıtlar aşağıda açıklanmıştır.

5.4 Kısıtlar

Eşitlik (5.14) güç denge (power balance) kısıtı olarak adlandırılmaktadır ve herhangi bir *t.* zamanda üretilen toplam enerjinin artı şebekeden satın alınacak enerji miktarı eksi şebekeden satılacak enerji miktarı için enerji talebine eşit olmasını sağlamaktadır.

$$\sum_{r \epsilon R} \sum_{s \epsilon S_r} PE_{trs} y_{rs} + gb_t - gs_t = D_t \quad \forall t \in T \tag{5.14}$$

Burada, iki farklı durum ortaya çıkabilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerji miktarına bağlı olarak şebekeden enerji satın alınabilir ya da şebekeye enerji satılabilir.

Herhangi bir t. zamanı için $\sum_{r\epsilon R}\sum_{s\epsilon S_r} PE_{trs}y_{rs} > D_t$ durumunda oluşan fazla enerji şebekeye satılmaktadır. Şebekeye satılan enerji, $gs_t = \sum_{r\epsilon R}\sum_{s\epsilon S_r} PE_{trs}y_{rs} - D_t$ formülü ile belirlenmektedir (Bkz. Eşitlik (5.15)).

$$gs_t = \begin{cases} \sum_{r\epsilon R}\sum_{s\epsilon S_r} PE_{trs}y_{rs} - D_t, & \text{eğer } \sum_{r\epsilon R}\sum_{s\epsilon S_r} PE_{trs}y_{rs} > D_t \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \tag{5.15}$$

Herhangi bir t. zamanı için $\sum_{r\epsilon R}\sum_{s\epsilon S_r} PE_{trs}y_{rs} < D_t$ durumunda oluşan eksik enerji şebekeden enerji satın alınmaktadır. Şebekeden satın alınan enerji, $gb_t = D_t - \sum_{r\epsilon R}\sum_{s\epsilon S_r} PE_{trs}y_{rs}$ formülü ile belirlenmektedir (Bkz. Eşitlik (5.16)).

$$gb_t = \begin{cases} D_t - \sum_{r\epsilon R}\sum_{s\epsilon S_r} PE_{trs}y_{rs}, & \text{eğer } \sum_{r\epsilon R}\sum_{s\epsilon S_r} PE_{trs}y_{rs} < D_t \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \tag{5.16}$$

Sosyal ve çevresel kaygıları da dikkate almak için sisteme eklenen Kısıt (5.17) ve Kısıt (5.18), alan kullanımı ile ilgili kısıtlardır. Kısıt (5.17), sistemin kurulumu için gerekli alanın sahip olunan alanı aşmamasını sağlamaktadır. Bazı alanlar, özel gereksinimler nedeniyle belirli yenilenebilir enerji kaynakları için uygun olmayabilir. Bu amaçla, Kısıt (5.18) toplam alan içinde özel gereksinimlerine göre bir yenilenebilir enerji kaynağının kurulumu için gerekli alanın ona tahsis edilen alanı aşmamasını sağlamaktadır.

$$\sum_{r\epsilon R}\sum_{s\epsilon S_r} A_{rs}y_{rs} \leq TA \tag{5.17}$$

$$\sum_{s\epsilon S_r} A_{rs}y_{rs} \leq UA_r \quad \forall r \in R \tag{5.18}$$

Kısıt (5.19), karar değişkeni olarak belirlenen üretim birimleri sayısının kullanılabilecek maksimum sayısı geçmemesini sağlamaktadır.

$$y_{rs} \leq Y_{rs}^{max} \quad \forall r \in R, \forall s \in S_r \tag{5.19}$$

$$y_{rs} \geq 0 \; ve \; tamsayı \quad \forall r \in R, \forall s \in S_r \tag{5.20}$$

Enerji kaynakları tarafından üretilen elektriğin yeterli olmaması durumunda eksik kalan ihtiyaçların karşılanması için şebekeden elektrik satın alınmaktadır. Ancak bazı şebekelerde planlama yapılırken kararlılığı (stability) sağlayabilmek için şebekeden alınacak elektrik için sınırlar olabilmektedir. Kısıt (5.21) ve Kısıt (5.22) her bir *t.* zaman diliminde şebekeden satın alınan enerji miktarının, şebekenin satabileceği minimum ve maksimum enerji miktarı sınırları arasında olmasını sağlamaktadır.

$$gb_t \geq GB_t^{min} - M(1 - z_t) \quad \forall t \in T \tag{5.21}$$

$$gb_t \leq GB_t^{max} z_t \quad \forall t \in T \tag{5.22}$$

$$gb_t, gs_t \geq 0 \quad \forall t \in T \tag{5.23}$$

$$z_t \epsilon [0,1] \quad \forall t \in T \tag{5.24}$$

Kısıt (5.25) toplam talebin yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanma oranının (sistemin kendine yetebilme seviyesini) minimum yenilenebilir enerji penetrasyon seviyesinden (k) büyük olmasını garanti etmektedir. Karar verici tarafından tanımlanan k değerinin yüksek seçilmesi; elektrik talebin karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının rolünün arttırıldığı anlamına gelmektedir.

$$1 - \frac{\sum_{t \epsilon T} gb_t}{\sum_{t \epsilon T} D_t} \geq k \tag{5.25}$$

$$0 \leq k \leq 1 \tag{5.26}$$

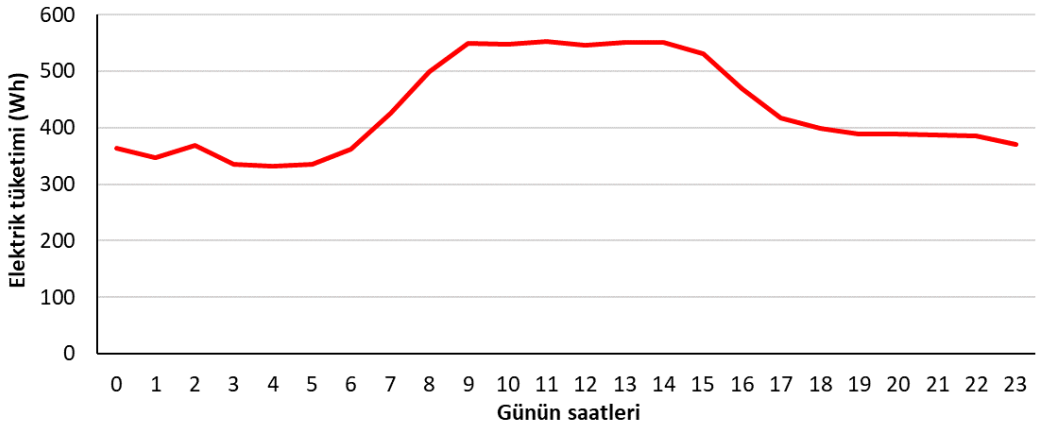
Yukarıda verilen matematiksel modelin değeri ve uygulanabilirliği bir sonraki bölümde açıklanan bir vaka çalışması üzerinde gösterilmiştir.

6. VAKA ÇALIŞMASI

Bu bölümde, Denizli'de bulunan bir talep noktasında kullanılacak bir GC-HRES-WS'nin tasarımı için vaka çalışması planlanmıştır. Elektrik talebi; WT, PV paneller ve/veya şebeke tarafından karşılanabilecektir. WT ve PV paneller, birçok alanda yaygın olarak ve başarıyla kullanılmaktadır ve diğer kaynaklara göre farklı alanlarda avantajları vardır (Li 2019). Bu nedenle, çeşitli WT ve PV paneller vaka çalışmasında olası elektrik üretimi için seçilmiştir. Modelin uygulanabilirliğini ve değerini göstermek için önerilen model aşağıda veriler açıklanan vaka çalışmasına uygulanmıştır. Temel olarak, modelde kullanılan stokastik, teknik, ekonomik ve operasyonel verilere ihtiyaç duyulmaktadır (Bkz. Şekil 5.1). Vaka çalışmasında kullanılan bu veriler aşağıda açıklanmıştır. Ayrıca, net metering tarifesi (çift taraflı sayaç sistemi) uygulandığı düşünülmüştür ve fazla elektrik olması durumunda şebekeye satılabilmektedir.

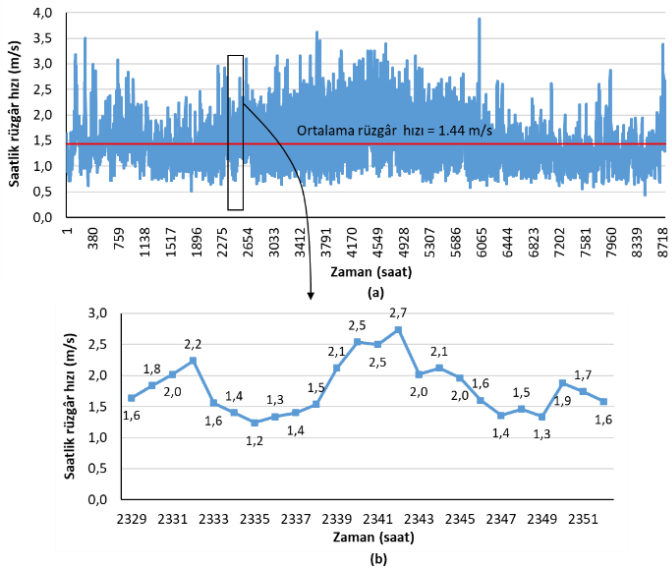
6.1 Stokastik Veriler

Ele alınan talep noktasının 2018 yılı için geçmiş saatlik elektrik tüketim verileri Denizli'de bulunan bir enerji şirketinden alınmıştır. Saatlik en yüksek tüketim (hourly peak consumption) 1,054 kWh'dir ve 29 Kasım 2018 saat 14.00'de gerçekleşmiştir. Talep noktasının tipik bir gün için ortalama saatlik elektrik tüketim verileri Şekil 6.1'de verilmiştir.

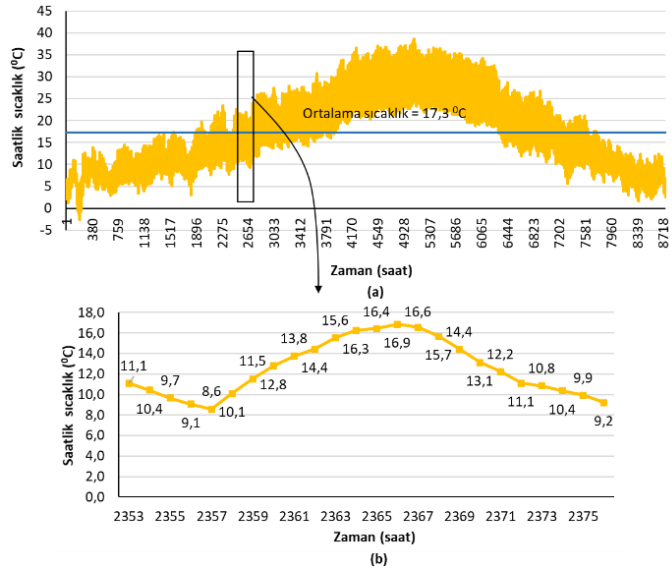


Şekil 6.1: Talep noktasının günlük ortalama saatlik elektrik tüketimi verileri (Wh)

2013-2017 yılları arası geçmiş saatlik rüzgâr hızı (m/sn), 2013-2017 yılları arası geçmiş saatlik sıcaklık (°C) ve 2002-2006 yılları arası geçmiş saatlik güneş radyasyonu (W/m^2) gibi veriler Denizli Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden eğitim amaçlı olarak elde edilmiştir. Talep konumunun meteorolojik verilerinin Denizli Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınan meteorolojik verilerle aynı olduğu varsayılmıştır. Yıllık ortalama saatlik rüzgâr hızı (m/s) ve yıllık ortalama saatlik sıcaklık (°C) verileri Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'de gösterilmiştir.

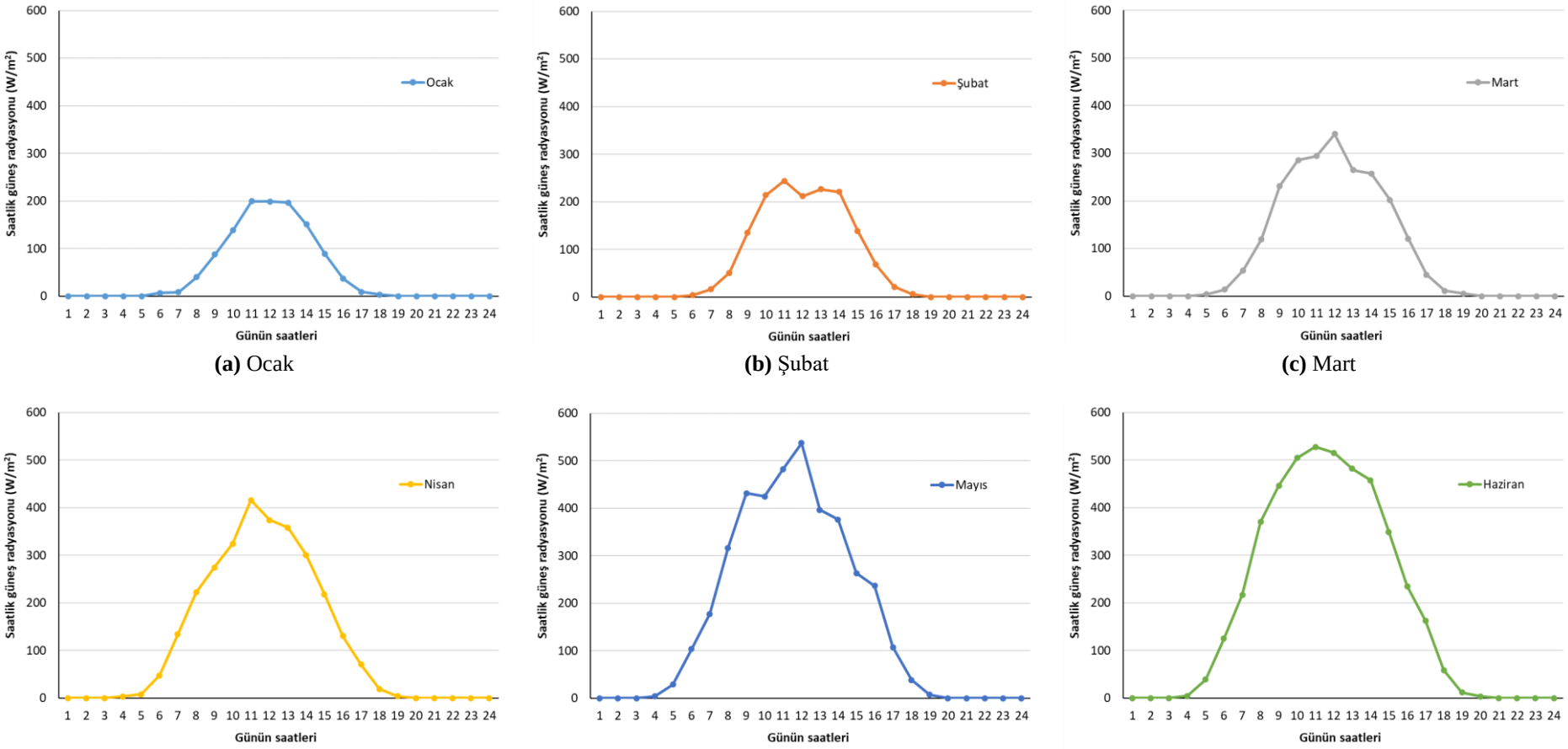


Şekil 6.2: (a) Bir yıl boyunca saatlik ortalama rüzgâr hızı (m/s) ve **(b)** yılın 2329. ile 2352. saatleri arasında saatlik rüzgâr hızı (m/s) verileri



Şekil 6.3: (a) Bir yıl boyunca saatlik ortalama sıcaklık (°C) ve **(b)** yılın 2353. ile 2376. saatleri arasında saatlik sıcaklık (°C) verileri

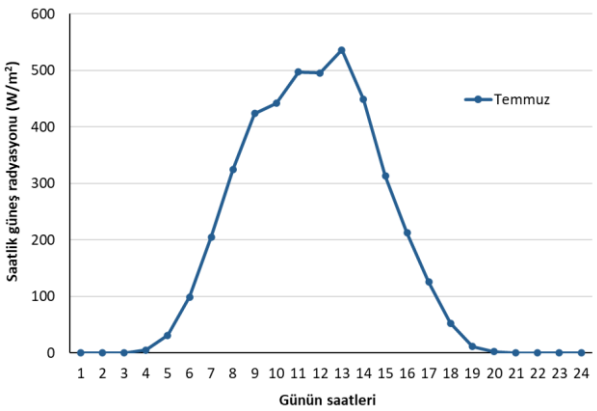
Tipik bir gün için aylık ortalama saatlik güneş radyasyonu verileri yılın ayları için sırasıyla Şekil 6.4'de verilmiştir.



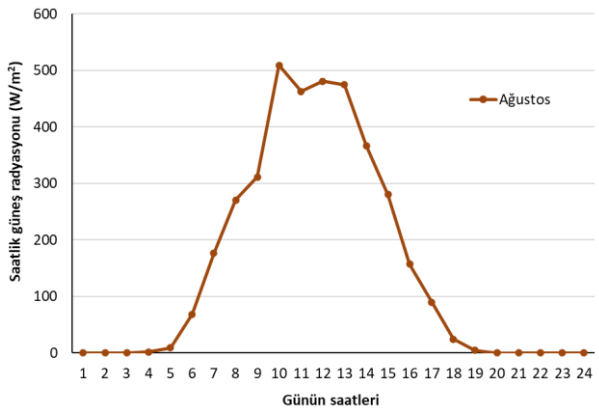
(a) Ocak **(b)** Şubat **(c)** Mart

(d) Nisan **(e)** Mayıs **(f)** Haziran

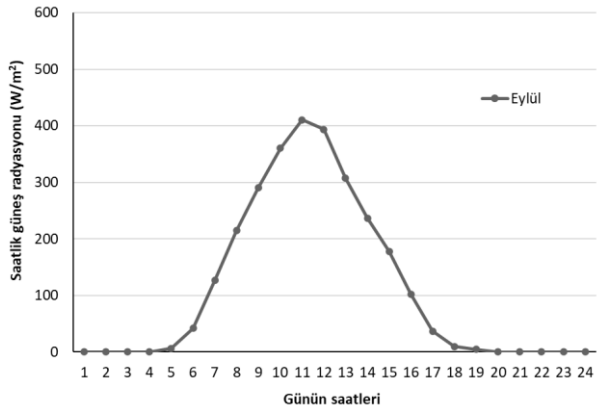
Şekil 6.4: Aylık ortalama saatlik (2002-2006) güneş radyasyonu (W/m^2)



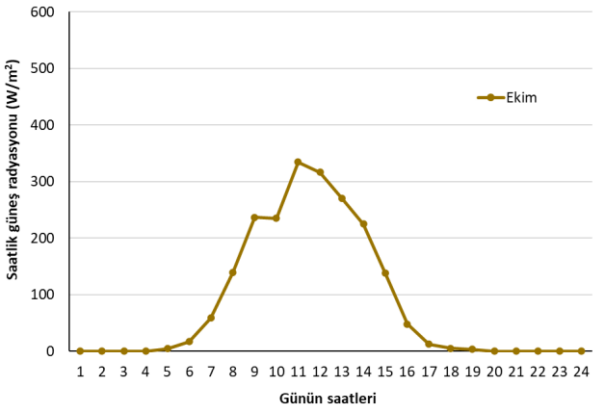
(g) Temmuz



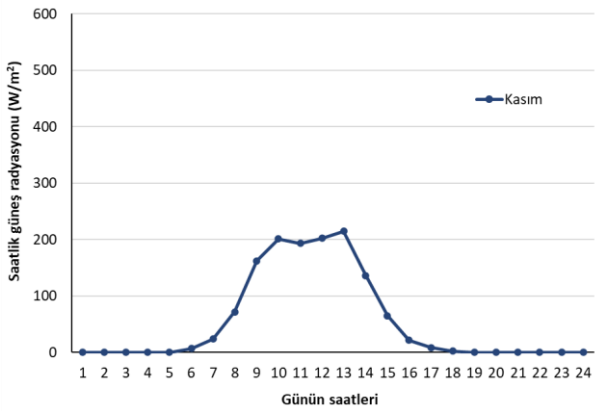
(h) Ağustos



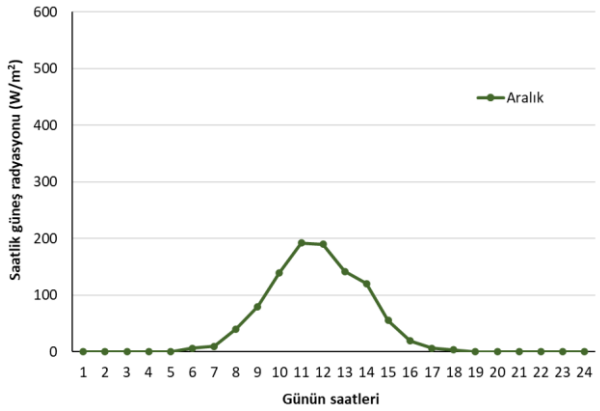
(i) Eylül



(j) Ekim



(k) Kasım



(l) Aralık

Şekil 6.4: Aylık ortalama saatlik (2002-2006) güneş radyasyonu (W/m^2) (devam)

Rüzgâr hızı ve güneş radyasyonu, hava durumu gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak zaman içerisinde değişen stokastik girdilerdir (Talari ve diğ. 2015). Çalışılan bölgeye göre rüzgâr hızı ve güneş radyasyonu verilerinin değişkenlik ve farklılık gösterebileceği bilinmektedir. Dolayısıyla bu tarz optimizasyon ve modelleme çalışmalarında verilerinin stokastikliğinin ele alınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, Ekren ve Ekren (2008) ve Ekren ve Ekren (2010) tarafından kullanıldığı gibi geçmiş verilere dayanarak yılın her ayının tipik bir gününün her saati için karşılık gelen olasılık dağılım fonksiyonları ARENA 14.0 yazılımının Input Analyzer kısmında Ki-Kare uygunluk testi ve Kolmogrov-Smirnov testi değerleri kontrol edilerek belirlenmiştir. Rüzgâr hızı ve güneş radyasyonu için elde edilen olasılık dağılımları Tablo 6.1 ve Tablo 6.2'de verilmiştir. Diğer taraftan, elektrik tüketimi diğer bir stokastik girdidir ve büyük oranda ekonomik, teknolojik ve meteorolojik vb. değişkenlere bağlıdır (Boogen ve diğ. 2017). Elektrik tüketimi için ilgili olasılık dağılım fonksiyonları tipik bir günün her saati için geçmiş verilere dayanarak ARENA 14.0 yazılımının Input Analyzer kısmı kullanılarak ve Ki-Kare uygunluk testi ve Kolmogrov-Smirnov testi değerleri kontrol edilerek belirlenmiştir (Ekren ve Ekren 2008, 2010) ve Tablo 6.3'de verilmiştir.

Daha sonra, ARENA 14.0 yazılımının Input Analyzer kısmı kullanılarak elde edilen olasılık dağılım fonksiyonlarına göre bir yılın her bir saati için 20 tane rassal veri (rüzgâr hızı, güneş radyasyonu ve elektrik tüketimi) üretilmiştir. Hesaplamalarda yılın her saati için bu 20 verinin ortalaması alınmış ve kullanılmıştır.

Örnek olarak, 2013-2017 yılları arasında 1. ayın tüm günlerinin (toplam 31 gün) 0. saatlerinde gerçekleşen rüzgâr hızları (toplam 155 adet veri) kullanılarak olasılık dağılım fonksiyonlarının elde edilmesi ve bu verilere dayanarak 1.ayın 1.gününün 0.saati için 20 adet rassal verinin oluşturulması süreci Şekil 6.5'de verilmiştir. Bahsi geçen ay, gün ve saat için 20 tane rassal verinin ortalaması kullanılmıştır. Benzer adımlar yılın tüm aylarındaki tipik bir günün tüm saatleri (24 saat) için de yapılmıştır.

Diğer bir örnek olarak; 3457. ve 3480. saatleri arasında gerçekleşen ve rassal üretilen elektrik talebi verilerinin karşılaştırılması Şekil 6.6'da gösterilmiştir.

Tablo 6.1: Saatlik rüzgâr hızı olasılık dağılım fonksiyonları (m/s)

Ay	Saat	Dağılım	Ay	Saat	Dağılım	Ay	Saat	Dağılım	Ay	Saat	Dağılım
Ocak	0	-0,001 + ERLA(0,477; 3)	Şubat	0	-0,001 + ERLA(0,524; 3)	Mart	0	-0,001 + 2,75 * BETA(5,64; 8,63)	Nisan	0	-0,001 + ERLA(0,49; 2)
	1	-0,001 + ERLA(0,44; 3)		1	0,02 + LOGN(1,33; 0,734)		1	-0,001 + 3 * BETA(4,32; 6,43)		1	-0,001 + ERLA(0,603; 2)
	2	-0,001 + GAMM(0,53; 2,5)		2	0,14 + LOGN(1,51; 0,727)		2	-0,001 + 3 * BETA(5,26; 9,44)		2	-0,001 + GAMM(0,327; 4,09)
	3	LOGN(1,32; 0,718)		3	0,16 + LOGN(1,48; 0,75)		3	-0,001 + 3,41 * BETA(3,17; 6,42)		3	-0,001 + GAMM(0,35; 3,21)
	4	LOGN(1,47; 0,88)		4	LOGN(1,35; 0,676)		4	-0,001 + 4 * BETA(3; 5,12)		4	-0,001 + GAMM(0,368; 3,47)
	5	LOGN(1,42; 0,864)		5	LOGN(1,35; 0,737)		5	-0,001 + 4 * BETA(4,34; 10,1)		5	-0,001 + GAMM(0,381; 3,49)
	6	-0,001 + GAMM(0,604; 2,38)		6	LOGN(1,36; 0,682)		6	-0,001 + 4 * BETA(5,81; 8,65)		6	-0,001 + GAMM(0,402; 3)
	7	LOGN(1,39; 0,939)		7	LOGN(1,36; 0,686)		7	-0,001 + 5 * BETA(3,96; 10,8)		7	-0,001 + GAMM(0,44; 4,08)
	8	-0,001 + ERLA(0,474; 3)		8	LOGN(1,38; 0,851)		8	-0,001 + 5,61 * BETA(5,74; 22,2)		8	-0,001 + GAMM(0,464; 2,99)
	9	LOGN(1,55; 0,84)		9	LOGN(1,4; 0,792)		9	-0,001 + 7 * BETA(5,15; 12,9)		9	-0,001 + GAMM(0,465; 2,43)
	10	LOGN(1,64; 0,928)		10	LOGN(1,41; 0,746)		10	-0,001 + ERLA(0,188; 5)		10	-0,001 + GAMM(0,475; 2,23)
	11	LOGN(1,63; 0,863)		11	LOGN(1,43; 0,66)		11	-0,001 + ERLA(0,216; 5)		11	-0,001 + GAMM(0,505; 2,46)
	12	LOGN(1,58; 0,88)		12	LOGN(1,43; 0,725)		12	-0,001 + ERLA(0,257; 5)		12	-0,001 + LOGN(1,25; 1,12)
	13	LOGN(1,59; 1)		13	LOGN(1,44; 0,73)		13	-0,001 + ERLA(0,313; 4)		13	0,01 + LOGN(1,08; 0,449)
	14	LOGN(1,49; 1,02)		14	LOGN(1,46; 0,671)		14	-0,001 + ERLA(0,353; 4)		14	0,01 + LOGN(1,12; 0,504)
	15	LOGN(1,47; 0,9)		15	LOGN(1,51; 0,683)		15	-0,001 + ERLA(0,37; 3)		15	0,01 + LOGN(1,33; 0,607)
	16	-0,001 + ERLA(0,533; 3)		16	LOGN(1,53; 0,75)		16	-0,001 + ERLA(0,372; 3)		16	0,01 + LOGN(1,36; 0,515)
	17	LOGN(1,6; 0,897)		17	LOGN(1,53; 0,774)		17	-0,001 + ERLA(0,375; 4)		17	0,01 + LOGN(1,5; 0,629)
	18	LOGN(1,52; 0,878)		18	LOGN(1,55; 0,705)		18	-0,001 + ERLA(0,382; 3)		18	0,01 + LOGN(1,94; 0,847)
	19	LOGN(1,51; 0,821)		19	LOGN(1,62; 0,791)		19	-0,001 + ERLA(0,405; 3)		19	0,02 + LOGN(1,19; 0,492)
	20	-0,001 + ERLA(0,523; 3)		20	LOGN(1,63; 0,731)		20	-0,001 + ERLA(0,41; 3)		20	0,02 + LOGN(1,24; 0,533)
	21	-0,001 + ERLA(0,523; 3)		21	LOGN(1,64; 0,757)		21	-0,001 + ERLA(0,424; 3)		21	0,02 + LOGN(1,52; 0,721)
	22	-0,001 + ERLA(0,503; 3)		22	LOGN(1,65; 0,911)		22	-0,001 + ERLA(0,444; 3)		22	0,02 + LOGN(1,55; 0,641)
	23	-0,001 + GAMM(0,474; 3,09)		23	LOGN(1,68; 0,906)		23	-0,001 + ERLA(0,447; 3)		23	0,04 + LOGN(1,28; 0,49)

Tablo 6.1: Saatlik rüzgâr hızı olasılık dağılım fonksiyonları (m/s) (devam)

Ay	Saat	Dağılım	Ay	Saat	Dağılım	Ay	Saat	Dağılım	Ay	Saat	Dağılım
Mayıs	0	0,04 + LOGN(1,32; 0,553)	Haziran	0	0,12 + LOGN(1,43; 0,591)	Temmuz	0	0,18 + LOGN(0,999; 0,477)	Ağustos	0	0,25 + LOGN(0,948; 0,439)
	1	0,05 + LOGN(1,29; 0,59)		1	0,13 + LOGN(1,16; 0,466)		1	0,18 + LOGN(1,58; 0,666)		1	0,25 + LOGN(1,03; 0,48)
	2	0,05 + LOGN(2,47; 1,05)		2	0,14 + ERLA(0,306; 6)		2	0,18 + LOGN(1,86; 0,731)		2	0,25 + LOGN(1,1; 0,585)
	3	0,06 + LOGN(1,09; 0,455)		3	0,14 + GAMM(0,231; 7,39		3	0,19 + ERLA(0,124; 11)		3	0,25 + LOGN(1,26; 0,647)
	4	0,06 + LOGN(1,95; 0,845)		4	0,14 + GAMM(0,288; 7,19)		4	0,19 + ERLA(0,177; 6)		4	0,26 + ERLA(0,172; 6)
	5	0,07 + LOGN(1,24; 0,526)		5	0,14 + LOGN(1,17; 0,531)		5	0,19 + LOGN(1,21; 0,481)		5	0,26 + LOGN(0,852; 0,378)
	6	0,07 + LOGN(1,24; 0,6)		6	0,14 + LOGN(1,21; 0,475)		6	0,19 + LOGN(1,41; 0,684)		6	0,26 + LOGN(1,11; 0,455)
	7	0,07 + LOGN(1,29; 0,459)		7	0,14 + LOGN(1,23; 0,515)		7	0,2 + ERLA(0,158; 6)		7	0,27 + ERLA(0,0708; 18)
	8	0,07 + LOGN(1,29; 0,622)		8	0,14 + LOGN(1,27; 0,598)		8	0,2 + LOGN(1,05; 0,539)		8	0,27 + GAMM(0,194; 4,95)
	9	0,07 + LOGN(1,39; 0,591)		9	0,14 + LOGN(1,66; 0,431)		9	0,21 + LOGN(1,13; 0,497)		9	0,27 + LOGN(1; 0,392)
	10	0,08 + LOGN(1,13; 0,577)		10	0,14 + LOGN(1,75; 0,802)		10	0,21 + LOGN(1,15; 0,594)		10	0,27 + LOGN(1,19; 0,445)
	11	0,08 + LOGN(1,18; 0,644)		11	0,15 + LOGN(1,09; 0,508)		11	0,21 + LOGN(1,41; 0,482)		11	0,27 + LOGN(1,75; 0,757)
	12	0,09 + 4,91 * BETA(4,01; 4,53)		12	0,15 + LOGN(1,26; 0,607)		12	0,21 + LOGN(1,51; 0,525)		12	0,28 + ERLA(0,203; 4)
	13	0,09 + ERLA(0,194; 10)		13	0,15 + LOGN(1,27; 0,637)		13	0,22 + 3,36 * BETA(5,89; 13,7)		13	0,28 + LOGN(0,832; 0,44)
	14	0,09 + GAMM(0,321; 5,56)		14	0,15 + LOGN(1,54; 0,5)		14	0,22 + 3,36 * BETA(9,04; 16,4)		14	0,28 + LOGN(1,08; 0,599)
	15	0,09 + LOGN(0,988; 0,429)		15	0,16 + GAMM(0,391; 5,42)		15	0,22 + ERLA(0,187; 6)		15	0,28 + LOGN(1,15; 0,658)
	16	0,09 + LOGN(1,25; 0,548)		16	0,16 + LOGN(1,18; 0,445)		16	0,23 + ERLA(0,205; 4)		16	0,28 + LOGN(1,61; 0,624)
	17	0,09 + LOGN(1,36; 0,588)		17	0,17 + LOGN(0,781; 0,338)		17	0,23 + LOGN(1,07; 0,602)		17	0,29 + LOGN(0,983; 0,452)
	18	0,09 + LOGN(1,87; 0,697)		18	0,17 + LOGN(0,829; 0,414)		18	0,24 + GAMM(0,144; 7,45)		18	0,29 + LOGN(1,19; 0,441)
	19	0,1 + LOGN(1,21; 0,557)		19	0,17 + LOGN(1,04; 0,404)		19	0,24 + LOGN(1,15; 0,362)		19	0,29 + LOGN(1,19; 0,521)
	20	0,12 + LOGN(0,993; 0,462)		20	0,17 + LOGN(1,11; 0,416)		20	0,24 + LOGN(1,18; 0,484)		20	0,31 + ERLA(0,0974; 12)
	21	0,12 + LOGN(1,04; 0,448)		21	0,17 + LOGN(1,24; 0,537)		21	0,24 + LOGN(1,3; 0,469)		21	0,31 + ERLA(0,151; 5)
	22	0,12 + LOGN(1,13; 0,448)		22	0,17 + LOGN(1,26; 0,524)		22	0,25 + 4,2 * BETA(6,16; 17,3)		22	0,31 + LOGN(1,25; 0,484)
	23	0,12 + LOGN(1,24; 0,607)		23	0,17 + LOGN(1,34; 0,586)		23	0,25 + ERLA(0,0643; 22)		23	0,32 + ERLA(0,139; 5)

Tablo 6.1: Saatlik rüzgâr hızı olasılık dağılım fonksiyonları (m/s) (devam)

Ay	Saat	Dağılım	Ay	Saat	Dağılım	Ay	Saat	Dağılım	Ay	Saat	Dağılım
Eylül	0	0,32 + GAMM(0,0686; 16,5)	Ekim	0	6,88 * BETA(3,13; 6,77)	Kasım	0	LOGN(1,19; 0,601)	Aralık	0	LOGN(1,44; 0,589)
	1	0,32 + LOGN(1,08; 0,552)		1	GAMM(0,276; 4,45)		1	LOGN(1,19; 0,625)		1	LOGN(1,44; 0,832)
	2	0,32 + LOGN(1,12; 0,344)		2	GAMM(0,392; 3,75)		2	LOGN(1,2; 0,581)		2	LOGN(1,47; 0,683)
	3	0,33 + LOGN(0,983; 0,498)		3	LOGN(0,921; 0,385)		3	LOGN(1,2; 0,616)		3	LOGN(1,47; 0,722)
	4	0,34 + 4,21 * BETA(2,86; 3,49)		4	LOGN(0,932; 0,4)		4	LOGN(1,21; 0,525)		4	LOGN(1,51; 0,847)
	5	0,34 + GAMM(0,14; 5,36)		5	LOGN(0,992; 0,439)		5	LOGN(1,23; 0,498)		5	LOGN(1,52; 0,721)
	6	0,38 + LOGN(0,802; 0,418)		6	LOGN(0,999; 0,417)		6	LOGN(1,23; 0,524)		6	LOGN(1,52; 0,812)
	7	0,52 + 4,48 * BETA(3,05; 4,26)		7	LOGN(1,01; 0,556)		7	LOGN(1,26; 0,521)		7	LOGN(1,72; 0,674)
	8	0,54 + LOGN(1,1; 0,4)		8	LOGN(1,02; 0,513)		8	LOGN(1,27; 0,543)		8	LOGN(1,85; 0,817)
	9	0,56 + GAMM(0,119; 7,87)		9	LOGN(1,05; 0,395)		9	LOGN(1,29; 0,515)		9	LOGN(2,09; 0,771)
	10	0,58 + LOGN(0,911; 0,349)		10	LOGN(1,06; 0,407)		10	LOGN(1,29; 0,53)		10	LOGN(2,2; 0,887)
	11	0,63 + GAMM(0,142; 7,97)		11	LOGN(1,07; 0,552)		11	LOGN(1,29; 0,598)		11	LOGN(2,3; 1,01)
	12	0,72 + LOGN(0,835; 0,295)		12	LOGN(1,09; 0,38)		12	LOGN(1,31; 0,629)		12	LOGN(2,41; 0,876)
	13	0,999 + 2,64 * BETA(3,13; 9,25)		13	LOGN(1,09; 0,437)		13	LOGN(1,32; 0,581)		13	NORM(0,989; 0,366)
	14	0,999 + 3,41 * BETA(1,77; 5,52)		14	LOGN(1,09; 0,443)		14	LOGN(1,32; 0,643)		14	NORM(1,06; 0,387)
	15	0,999 + 5,94 * BETA(3,24; 17,1)		15	LOGN(1,11; 0,431)		15	LOGN(1,33; 0,601)		15	NORM(1,11; 0,434)
	16	0,999 + ERLA(0,268; 4)		16	LOGN(1,12; 0,589)		16	LOGN(1,34; 0,654)		16	NORM(1,12; 0,396)
	17	0,999 + ERLA(0,402; 2)		17	LOGN(1,13; 0,545)		17	LOGN(1,36; 0,575)		17	NORM(1,14; 0,423)
	18	0,999 + GAMM(0,468; 2,15)		18	LOGN(1,16; 0,662)		18	LOGN(1,36; 0,646)		18	NORM(1,22; 0,591)
	19	0,999 + WEIB(0,949; 1,13)		19	LOGN(1,17; 0,563)		19	LOGN(1,37; 0,539)		19	NORM(1,33; 0,562)
	20	1 + GAMM(0,387; 3,26)		20	LOGN(1,18; 0,488)		20	LOGN(1,37; 0,638)		20	NORM(1,76; 0,723)
	21	1 + LOGN(0,909; 0,454)		21	LOGN(1,18; 0,605)		21	LOGN(1,38; 0,644)		21	NORM(2,59; 0,84)
	22	1 + LOGN(1,26; 0,83)		22	LOGN(1,18; 0,623)		22	LOGN(1,41; 0,601)		22	NORM(2,61; 0,821)
	23	3,6 * BETA(6,39; 11,2)		23	LOGN(1,19; 0,493)		23	LOGN(1,42; 0,597)		23	TRIA(1; 2,83; 5)

Tablo 6.2: Saatlik güneş radyasyonu olasılık dağılım fonksiyonları (W/m^2)

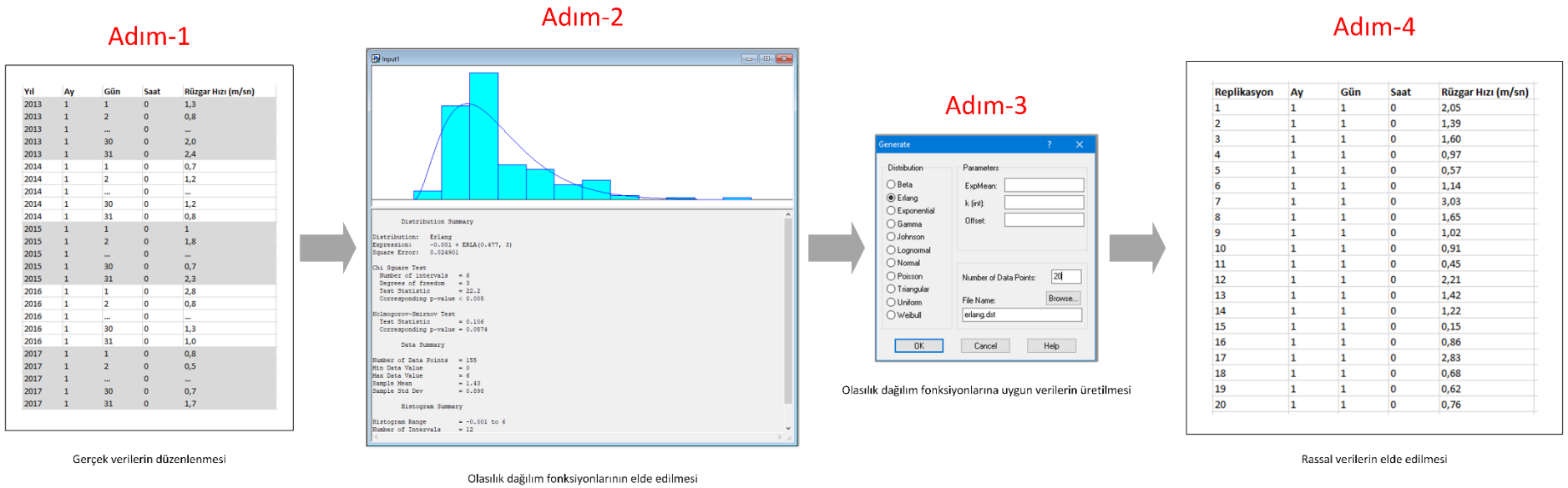
Ay	Saat	Dağılım	Ay	Saat	Dağılım	Ay	Saat	Dağılım	Ay	Saat	Dağılım
Ocak	0	0	Şubat	0	0	Mart	0	0	Nisan	0	0
	1	0		1	0		1	0		1	0
	2	0		2	0		2	0		2	0
	3	0		3	0		3	0		3	0
	4	0		4	0		4	-0,001 + EXPO(0,207)		4	-0,001 + EXPO(6,09)
	5	0		5	-0,001 + EXPO(0,445)		5	-0,001 + 63 * BETA(0,595; 2,19)		5	3 + 151 * BETA(1,49; 2,91)
	6	-0,001 + EXPO(5,64)		6	-0,001 + 91 * BETA(0,959; 4,33)		6	2 + GAMM(32,5; 2,05)		6	6 + 322 * BETA(1,17; 1,39)
	7	-0,001 + 98 * BETA(1,3; 1,73)		7	-0,001 + 196 * BETA(1,08; 1,65)		7	13 + 350 * BETA(0,808; 1,12)		7	UNIF(20; 489)
	8	6 + 288 * BETA(1,06; 1,97)		8	3 + 381 * BETA(1,1; 1,39)		8	13 + 560 * BETA(1,04; 1,33)		8	TRIA(13; 505; 635)
	9	TRIA(13; 241; 398)		9	3 + 500 * BETA(1,03; 1,13)		9	20 + 615 * BETA(0,983; 0,851)		9	TRIA(13; 589; 740)
	10	13 + 441 * BETA(0,923; 1,18)		10	13 + 622 * BETA(1,05; 1,32)		10	TRIA(13; 600; 684)		10	27 + 776 * BETA(1,03; 0,93)
	11	NORM(237; 126)		11	20 + 574 * BETA(0,916; 1,1)		11	TRIA(13; 538; 754)		11	13 + 783 * BETA(0,89; 0,857)
	12	13 + 483 * BETA(1,21; 1,64)		12	13 + 532 * BETA(0,916; 1,1)		12	TRIA(27; 512; 712)		12	13 + 727 * BETA(1,03; 0,884)
	13	13 + 434 * BETA(1,25; 2,03)		13	13 + 490 * BETA(0,825; 1,04)		13	20 + 636 * BETA(0,944; 1,13)		13	13 + 636 * BETA(0,881; 0,782)
	14	13 + 239 * BETA(1,09; 1,87)		14	13 + 406 * BETA(0,854; 1,36)		14	13 + 546 * BETA(0,89; 1,28)		14	13 + 525 * BETA(0,767; 0,827)
	15	6 + WEIB(38,5; 1,6)		15	2 + WEIB(81; 1,39)		15	13 + 427 * BETA(0,796; 1,96)		15	13 + 399 * BETA(1,01; 1,48)
	16	-0,001 + EXPO(6,81)		16	-0,001 + 77 * BETA(0,571; 1,53)		16	1 + WEIB(53,9; 1,69)		16	TRIA(13; 29,6; 412)
	17	0		17	-0,001 + 21 * BETA(0,273; 2,35)		17	-0,001 + EXPO(9,12)		17	1 + 69 * BETA(0,863; 1,91)
	18	0		18	0		18	-0,001 + EXPO(0,301)		18	-0,001 + WEIB(0,0215; 0,258)
	19	0		19	0		19	0		19	0
	20	0		20	0		20	0		20	0
	21	0		21	0		21	0		21	0
	22	0		22	0		22	0		22	0
	23	0		23	0		23	0		23	0

Tablo 6.2: Saatlik güneş radyasyonu olasılık dağılım fonksiyonları (W/m^2) (devam)

Ay	Saat	Dağılım	Ay	Saat	Dağılım	Ay	Saat	Dağılım	Ay	Saat	Dağılım
Mayıs	0	0	Haziran	0	0	Temmuz	0	0	Ağustos	0	0
	1	0		1	0		1	0		1	0
	2	0		2	0		2	0		2	0
	3	-0,001 + 14 * BETA(0,11; 1,31)		3	-0,001 + EXPO(4,5)		3	-0,001 + 21 * BETA(0,245; 1,56)		3	-0,001 + EXPO(0,0123)
	4	NORM(32,5; 16,3)		4	NORM(42,9; 14,6)		4	3 + WEIB(38,2; 2)		4	-0,001 + WEIB(11,6; 1,37)
	5	TRIA(13; 141; 217)		5	TRIA(13; 167; 231)		5	NORM(36,9; 17,6)		5	NORM(81,4; 26,4)
	6	TRIA(13; 307; 384)		6	TRIA(27; 300; 412)		6	NORM(269; 63,8)		6	NORM(206; 61,1)
	7	TRIA(27; 468; 531)		7	27 + 497 * BETA(1,46; 0,653)		7	NORM(395; 103)		7	TRIA(34; 381; 454)
	8	TRIA(55; 587; 663)		8	48 + 601 * BETA(1,25; 0,584)		8	48 + 567 * BETA(1,8; 0,666)		8	34 + 518 * BETA(0,792; 0,534)
	9	TRIA(48; 678; 768)		9	NORM(590; 161)		9	NORM(587; 137)		9	NORM(525; 121)
	10	13 + 790 * BETA(1,28; 0,769)		10	34 + 769 * BETA(1,86; 0,787)		10	62 + 685 * BETA(0,734; 0,453)		10	27 + 657 * BETA(1,95; 0,643)
	11	20 + 790 * BETA(1,55; 0,858)		11	TRIA(62; 710; 803)		11	69 + 692 * BETA(0,668; 0,434)		11	55 + 636 * BETA(1,64; 0,576)
	12	TRIA(13; 655; 747)		12	TRIA(48; 678; 768)		12	NORM(594; 141)		12	NORM(534; 146)
	13	TRIA(27; 595; 663)		13	TRIA(41; 604; 684)		13	TRIA(41; 556; 691)		13	13 + 588 * BETA(1,91; 0,787)
	14	TRIA(6; 496; 566)		14	TRIA(20; 510; 580)		14	13 + 546 * BETA(1,19; 0,733)		14	NORM(363; 122)
	15	13 + 434 * BETA(1,06; 0,98)		15	TRIA(34; 418; 454)		15	6 + 448 * BETA(1,24; 1,04)		15	13 + 378 * BETA(1,19; 1,13)
	16	13 + 302 * BETA(1,33; 1,84)		16	5 + 303 * BETA(1,27; 0,849)		16	NORM(171; 84,2)		16	13 + WEIB(94,2; 1,37)
	17	3 + 137 * BETA(2,12; 4,91)		17	3 + WEIB(65,6; 1,73)		17	1 + WEIB(63,4; 1,63)		17	-0,001 + 84 * BETA(1,17; 2,58)
	18	-0,001 + EXPO(4,5)		18	-0,001 + 49 * BETA(0,918; 3,33)		18	-0,001 + EXPO(9,73)		18	-0,001 + EXPO(1,6)
	19	0		19	-0,001 + WEIB(0,0603; 0,8)		19	-0,001 + WEIB(0,0888; 1,19)		19	0
	20	0		20	0		20	0		20	0
	21	0		21	0		21	0		21	0
	22	0		22	0		22	0		22	0
	23	0		23	0		23	0		23	0

Tablo 6.2: Saatlik güneş radyasyonu olasılık dağılım fonksiyonları (W/m^2) (devam)

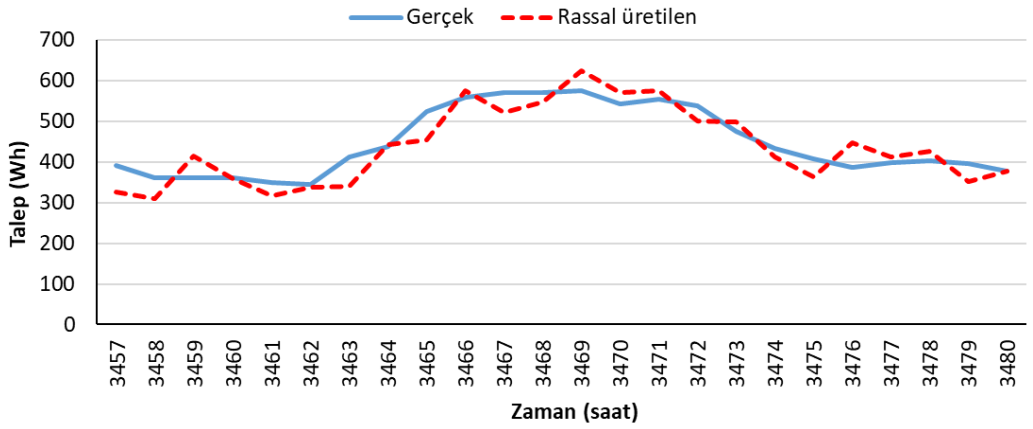
Ay	Saat	Dağılım	Ay	Saat	Dağılım	Ay	Saat	Dağılım	Ay	Saat	Dağılım
Eylül	0	0	Ekim	0	0	Kasım	0	0	Aralık	0	0
	1	0		1	0		1	0		1	0
	2	0		2	0		2	0		2	0
	3	0		3	0		3	0		3	0
	4	-0,001 + 21 * BETA(0,367; 1,55)		4	-0,001 + EXPO(0,436)		4	0		4	0
	5	11 + GAMM(11,6; 3,05)		5	-0,001 + 56 * BETA(1,27; 2,67)		5	-0,001 + EXPO(3,47)		5	-0,001 + EXPO(0,286)
	6	TRIA(13; 173; 259)		6	NORM(71,8; 38,3)		6	-0,001 + 112 * BETA(1,43; 3,99)		6	-0,001 + 42 * BETA(0,63; 2,71)
	7	TRIA(13; 333; 419)		7	TRIA(13; 226; 335)		7	NORM(90,2; 49,1)		7	NORM(44,6; 22,6)
	8	TRIA(27; 420; 524)		8	TRIA(27; 325; 503)		8	TRIA(13; 218; 391)		8	-0,001 + 252 * BETA(1,2; 1,69)
	9	TRIA(27; 548; 622)		9	TRIA(13; 463; 559)		9	TRIA(20; 313; 433)		9	13 + 295 * BETA(0,766; 0,873)
	10	13 + 664 * BETA(1,65; 0,893)		10	TRIA(13; 521; 580)		10	20 + 462 * BETA(1,1; 1,01)		10	TRIA(13; 301; 377)
	11	TRIA(6; 581; 663)		11	TRIA(13; 451; 566)		11	20 + 441 * BETA(0,962; 1,06)		11	TRIA(13; 307; 384)
	12	TRIA(6; 510; 642)		12	TRIA(20; 412; 531)		12	TRIA(13; 306; 482)		12	13 + 371 * BETA(1,07; 1,17)
	13	TRIA(6; 444; 559)		13	13 + 420 * BETA(0,952; 0,821)		13	TRIA(13; 273; 342)		13	13 + 295 * BETA(0,88; 1,19)
	14	NORM(253; 123)		14	13 + 322 * BETA(1,18; 1,33)		14	13 + 169 * BETA(1,01; 1,63)		14	6 + 183 * BETA(1,44; 2,97)
	15	13 + 385 * BETA(1,15; 3,02)		15	3 + GAMM(24,9; 2,07)		15	-0,001 + 84 * BETA(0,644; 1,68)		15	-0,001 + EXPO(19)
	16	-0,001 + WEIB(43,5; 1,21)		16	-0,001 + 49 * BETA(0,476; 1,49)		16	-0,001 + 42 * BETA(0,264; 2,06)		16	-0,001 + 21 * BETA(0,104; 1,08)
	17	-0,001 + 42 * BETA(0,316; 1,7)		17	-0,001 + WEIB(0,0118; 0,27)		17	0		17	0
	18	-0,001 + WEIB(0,073; 0,774)		18	0		18	0		18	0
	19	0		19	0		19	0		19	0
	20	0		20	0		20	0		20	0
	21	0		21	0		21	0		21	0
	22	0		22	0		22	0		22	0
	23	0		23	0		23	0		23	0



Şekil 6.5: ARENA 14.0 Input Analyzer kısmında olasılık dağılım fonksiyonlarının belirlenmesi ve rassal veri üretilmesi adımları

Tablo 6.3: Saatlik elektrik talebi olasılık dağılım fonksiyonları (Wh)

Saat	Dağılım
0	-0.001 + GAMM(0.0414, 8.83)
1	-0.001 + GAMM(0.0372, 9.36)
2	-0.001 + GAMM(0.0853, 4.33)
3	NORM(0.335, 0.0865)
4	-0.001 + ERLA(0.0333, 10)
5	NORM(0.336, 0.0799)
6	NORM(0.361, 0.0806)
7	NORM(0.425, 0.094)
8	NORM(0.5, 0.136)
9	-0.001 + ERLA(0.0785, 7)
10	NORM(0.548, 0.172)
11	NORM(0.552, 0.177)
12	NORM(0.546, 0.174)
13	NORM(0.55, 0.183)
14	-0.001 + ERLA(0.0919, 6)
15	-0.001 + ERLA(0.0888, 6)
16	-0.001 + GAMM(0.0745, 6.31)
17	-0.001 + ERLA(0.0598, 7)
18	-0.001 + ERLA(0.05, 8)
19	-0.001 + ERLA(0.0488, 8)
20	-0.001 + GAMM(0.046, 8.47)
21	-0.001 + ERLA(0.0431, 9)
22	-0.001 + GAMM(0.0371, 10.4)
23	-0.001 + ERLA(0.0413, 9)



Şekil 6.6: Gerçekleşen ve rassal üretilen talep değerlerinin karşılaştırılması (Wh)

6.2 Teknik Veriler

Şekil 6.2'de sunulan veriler incelendiğinde, bölgenin düşük rüzgâr hızı profili sebebiyle düşük rüzgâr hızlarında çalışabilen ve şebeke bağlantısına uyumlu Şekil 6.7'de verilen Honeywell WT6500 1,5 kW ve Aeolos-V 600W marka rüzgâr türbinleri potansiyel elektrik üretimi için seçilmiştir.

HOMER yazılımı, MS Excel ve Bölüm 2.5.1'de açıklanan Eşitlik (2.26) ve Eşitlik (2.27) kullanılarak bu rüzgâr türbinlerinin potansiyel saatlik enerji çıktıları hesaplanmıştır. Varsayımlar kısmında bahsedildiği gibi, enerji çıktıları hesaplanırken çeşitli sebeplerden kaynaklanan verimlilik kayıpları da dahil edilmiştir. Eşitlik (2.27)'de kullanılmak üzere, rüzgâr türbinleri için ihtiyaç duyulan özellikleri ve güç eğrilerini içeren kataloglar Ekler bölümünde Şekil 10.1 ve Şekil 10.2'de sunulmuştur.

(a) Honeywell WT6500 1.5 kW

(b) Aeolos-V 600W

Şekil 6.7: Çalışmada ele alınan rüzgâr türbinleri

Ayrıca, elektrik üretiminde kullanılabilecek alternatif PV panelleri aşağıdaki gibi seçilmiştir (Bkz. Şekil 6.8).

- LG 300 W Monocrystalline PV panel
  - Boyutlar: 1686 x 1016 x 40 mm
  - Standart test koşullarında %17,50 verim
- Canadian Solar 270 W Polycrystalline PV panel
  - Boyutlar: 1650 x 992 x 40 mm
  - Standart test koşullarında %16,50 verim
- Renogy 100 W Monocrystalline PV panel
  - Boyutlar: 1202 x 541 x 35mm
  - Standart test koşullarında %15,47 verim

Benzer şekilde, HOMER yazılımı, MS Excel ve Eşitlik (2.28)-(2.31) arası formüller bu PV panellerin potansiyel saatlik enerji çıktılarını hesaplamak için kullanılmıştır. Benzer şekilde verimlilik kayıpları çıktı hesaplamasına dahil edilmiştir. Bu eşitliklerde kullanılmak üzere PV paneller için ihtiyaç duyulan özellikleri içeren kataloglar Ekler bölümünde Şekil 10.3, Şekil 10.4 ve Şekil 10.5'de sunulmuştur.

(a) LG 300 W Monocrystalline PV panel

(b) Canadian Solar 270 W Polycrystalline PV panel

(c) Renogy 100 W Monocrystalline PV panel

Şekil 6.8: Çalışmada ele alınan PV paneller

6.3 Ekonomik Veriler

Rüzgâr türbinleri ve PV panelleri ile ilgili modelde kullanılacak ekonomik girdi parametreleri, bu ürünlerin web sitelerinden ve kataloglarından toplanmıştır. Bu veriler Tablo 6.4'de özetlenmiştir.

Ayrıca, modelde kullanılan diğer ekonomik parametreler ise Denizli'de bulunan bir enerji şirketi, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü (EİGM) ve Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) ve Caballero ve diğ. (2013) çalışmaları aracılığıyla vaka analizine uyarlanmıştır. Bu veriler Tablo 6.5'de özetlenmiştir.

Tablo 6.4: Rüzgâr türbinleri ve PV panelleri için modelde kullanılan ekonomik parametreler

Parametre	WT6500 1,5 kW WT	Aeolos-V 600W WT	300 W Monocrystalline PV panel	270 W Polycrystalline PV panel	100 W Monocrystalline PV panel
Yatırım maliyeti ($/adet)	9000	6100	340	250	210
Yıllık OM maliyeti ($/adet/yıl)	90	61	3,4	2,5	2,1
Yenileme maliyeti ($/adet)	9000	6100	340	250	210
Hurda değeri ($/adet)	1800	1220	68	50	42
Ömür (yıl)	20	20	25	25	25
Kapladığı alan (m^2)	2,5	1,8	1,713	1,637	0,650
Maksimum sayı (adet)	5	5	20	25	65

Tablo 6.5: Modelde kullanılan diğer ekonomik parametreler

Parametre	Değer
Yıllık faiz oranı (%)	10
Eskalasyon oranı (%)	7,5 (rüzgâr türbinleri ve PV panelleri için)
Enflasyon oranı (%)	4
Elektrik satış maliyeti ($/Wh)	0,000103
Elektrik satın alma maliyeti ($/Wh)	0,000111 (06:00 ve 17:00 arası için) 0,000164 (17:00 ve 22:00 arası için) 0,000070 (22:00 ve 06:00 arası için)

6.4 Operasyonel Veriler

Aşağıdaki parametreler ise karar verici tarafından belirlenmiştir. Elektrik talebinin en az %50'sinin yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik tarafından karşılanması istenmektedir. Şebekeden alınabilecek maksimum elektrik miktarı 06:00 ve 17:00 saatleri arasında 650 Wh, 17:00 ve 22:00 saatleri arasında 550 Wh ve 22:00 ve 06:00 saatleri arasında 750 Wh olarak varsayılmıştır. Şebekeden alınabilecek minimum elektrik miktarı ise 0 Wh olarak belirlenmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmek amacıyla, yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen tüm fazla elektriğin şebekeye satılabileceği varsayılmıştır.

6.5 Diğer Veriler

Sistem ömrü 20 yıl olarak kabul edilmiştir. Kurulum için toplam 55 m^2 alan olduğu varsayılmıştır. Ele alınan talep noktasının rüzgâr türbinlerinin kurulumu için 10 m^2 alana ve PV panellerin kurulumu için 50 m^2 alan sahip olduğu düşünülmüştür. Şebekeden elektrik alımında Wh başına CO_2 emisyonu katsayısı 0,000866 (kg CO_2/Wh) olarak belirlenmiştir (Brander ve diğ. 2011).

Önerilen WMO-MILP yukarıda verilen veriler kullanılarak çeşitli senaryolar altında GAMS programında çözülmüştür ve elde edilen bulgular ve sonuçlar şekil ve tablolarla birlikte bir sonraki bölümde sunulmuştur.

7. SAYISAL SONUÇLAR VE ANALİZ

Bir önceki bölümde açıklanan vaka analizi için, önerilen WMO-MILP modeli CORE i7 @2.50 GHz 8.00 GB RAM özelliklerine sahip bir laptop bilgisayar üzerinde GAMS yazılımının CPLEX çözücüsü kullanılarak çeşitli durumlar için çözülmüştür. Bu bölümün amacı, modelin uygulanabilirliği ve değerini göstermek ve karar vericiye modelin olası çıktıları hakkında bilgi vermektedir. Model farklı veri setleri için tasarlanabilir ve uygulanabilir durumdadır. Elde edilen amaç fonksiyonları, yatırım ve operasyonel karar değişkenlerinin değerleri ve çeşitli senaryo analizleri yorumları ile birlikte aşağıdaki alt bölümlerde verilmiştir.

7.1 Amaç Fonksiyonları ve Yatırım Karar Değişkenlerinin Analizi

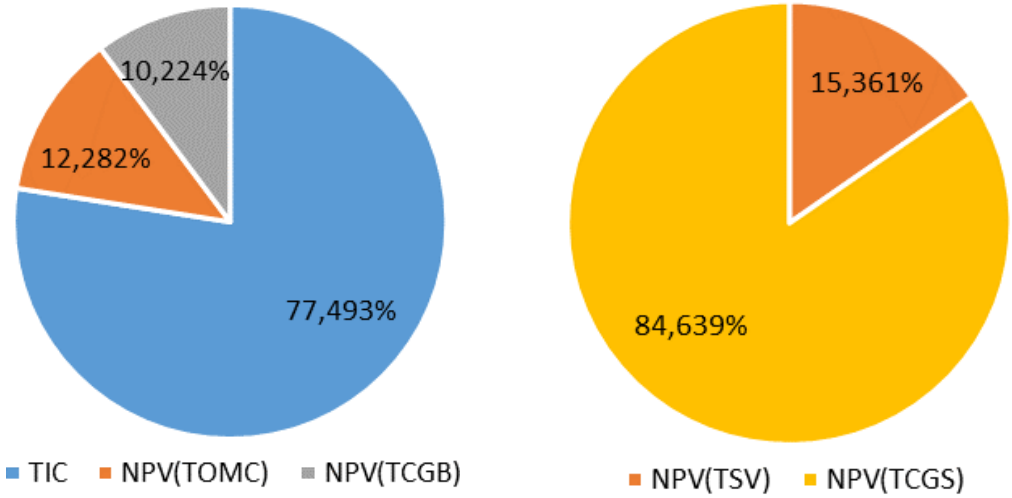
Her bir amaç fonksiyonuna atanan ağırlığın eşit olması durumu ($w_1 = 0{,}5$ ve $w_2 = 0{,}5$) temel senaryo (base case) olarak adlandırılmıştır. Tablo 7.1'de verilen sonuçlar incelendiğinde, GC-HRES-WS'nin kurulu gücü; 1 adet 1,500 kW rüzgar türbininden, 25 panelden oluşan ve 40,920 m^2 yüzey alanına sahip 6,750 kWp gücünde poli-kristal PV sistemi ve 5 panelden oluşan ve 8,565 m^2 yüzey alanına sahip 1,500 kWp gücünde mono-kristal PV sisteminden oluşmaktadır.

Tablo 7.1: Temel senaryo için yatırım karar değişkenleri

Yenilenebilir enerji üretim birimleri	**Üretim birimlerinin sayısı (adet)**	**Kurulu kapasite (kW)**	**Kapladığı alan (m^2)**
WT6500 1,5kW WT (y_{11})	1	1,500	2,500
Aeolos-V 600W WT (y_{12})	0	0	0
300 W Monocrystalline PV panel (y_{21})	5	1,500	8,565
270 W Polycrystalline PV panel (y_{22})	25	6,750	40,920
100 W Monocrystalline PV panel (y_{23})	0	0	0

Elde edilen bu sonuçlara göre; birinci amaç fonksiyonu yaklaşık $14.684,887 ve ikinci amaç fonksiyonu ise yaklaşık 1.468,630 kg CO_2/yıl olarak bulunmuştur. Talebin yaklaşık %55,38'i yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerji ile karşılanmaktadır.

Birinci amaç fonksiyonunda toplam maliyetin net bugünkü değeri $21.872,809 olarak ve toplam gelirin net bugünkü değeri $7,187.922 olarak tespit edilmiştir (Bkz. Tablo 7.2). Optimize edilmiş GC-HRES-WS'nin NPV(TR)'sini oluşturan kalemlerin dağılımı Şekil 7.1(a)'da ve NPV(TC)'sini oluşturan kalemlerin dağılımı Şekil 7.1(b)'de verilmiştir. Şekilden görülebileceği üzere, yenilenebilir enerji kaynaklarının yatırım maliyeti toplam maliyetin büyük bir kısmını (yaklaşık %77) oluşturmaktadır. İlerleyen bölümde WT ve PV panellerin yatırım maliyetleri üzerinde duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiş ve maliyetlerdeki artış ve azalışların amaç fonksiyonuna etkileri karar vericilere sunulmuştur.



(a) NPV(TR) **(b)** NPV(TC)

Şekil 7.1: Optimize edilmiş GC-HRES-WS tasarımında NPV(TR) ve NPV(TC)'yi oluşturan kalemlerin dağılımı

Elde edilen sonuçları karşılaştırmalı olarak analiz etmek için elektrik talebinin tamamının sadece şebekeden karşılanması (şebekeden satın alınacak elektrik miktarı sınırlamaları olmadan) durumu analiz edilmiştir. Tablo 7.2, her iki durum için amaç fonksiyonlarını karşılaştırmaktadır. Tablo 7.2'den görülebileceği üzere, talebin sadece şebekeden karşılanması durumunda amaç fonksiyonu $5.053,321 (yaklaşık 66% daha az) ve ikinci amaç fonksiyonu ise 3.291,162 kg CO_2/yıl (yaklaşık 124% daha fazla) tespit edilmiştir.

Tablo 7.2: Sadece şebekeden enerji alınması ve optimize edilmiş GC-HRES-WS için amaç fonksiyonlarının karşılaştırılması

Amaç fonksiyonu	Sadece şebeke	Optimize edilmiş GC-HRES-WS
f_1 **($)**	5.053,321	14.684,887
NPV(TC) ($)	5.053,321	21.872,809
TIC ($)	0,000	16.950,000
NPV(TOMC) ($)	0,000	2.686,424
NPV(TRC) ($)	0,000	0,000
NPV(TCGB) ($)	5.053,321	2.236,385
NPV(TR) ($)	0,000	7.187,922
NPV(TSV) ($)	0,000	1.104,111
NPV(TCGS) ($)	0,000	6.083,811
f_2 **(kg CO_2/yıl)**	3.291,162	1.468,630

Sonuç olarak, CO_2 emisyonu ile ilgili ikinci amaç fonksiyonun elde edilen sonuçlar üzerinde önemli bir etkisi vardır. Eğer sistem elektrik üretmek için yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmazsa yıllık üretilen CO_2 emisyonu miktarı önemli ölçüde artmaktadır.

7.2 Amaç Fonksiyonlarının Ağırlıklarının Analizi

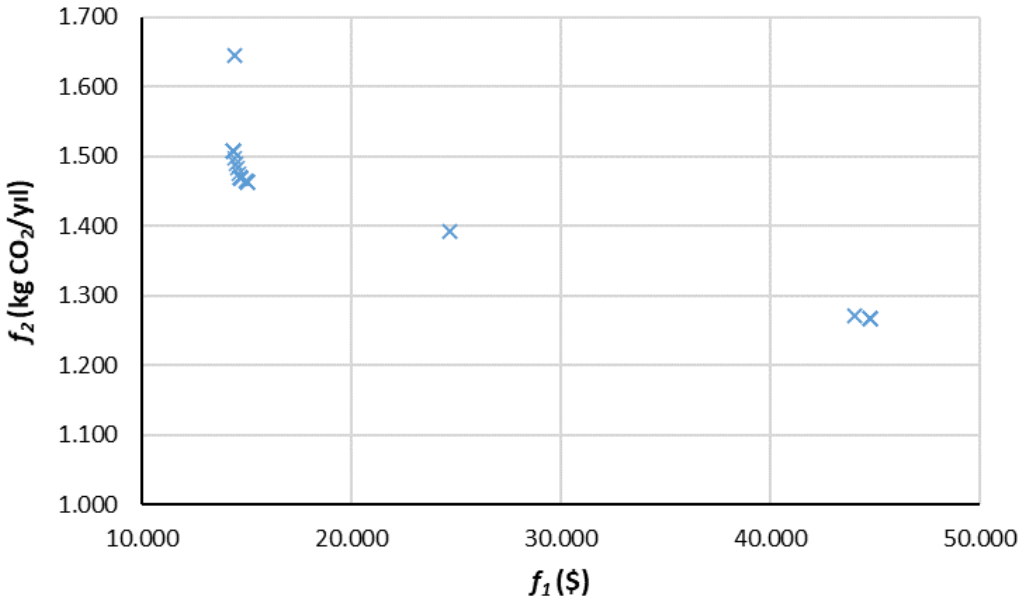
Amaç fonksiyonlarının ağırlıklarının değiştirilmesinin sistemin tasarımı ve optimum boyutları gibi modelin çıktıları üzerindeki etkilerini görmek için çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. 0 ve 1 arasında değişen ağırlıklara göre deneyler yapılmıştır. LCOE; HRES bileşenlerinin optimum boyutlarının belirlenmesinde önemli bir ölçüttür ve bir sistemin ömrü boyunca üretilen enerjinin maliyetini göstermektedir (Said ve diğ. 2015). Bu çalışmada LCOE Hafez ve Bhattacharya (2012) çalışmasında verildiği gibi hesaplanmıştır.

Modelin çeşitli ağırlık kombinasyonları (0,1 aralıklarla amaç fonksiyonu ağırlıklarının değişimi) ile çözülmesinden sonra amaç fonksiyonları, karar değişkenleri ve LCOE değerleri özet olarak Tablo 7.3'de verildiği gibi elde edilmiştir. Daha detaylı veriler (0,01 aralıklarla amaç fonksiyonu ağırlıklarının değişimi) Ekler bölümde Tablo 10.1'de sunulmuştur.

Tablo 7.3: Farklı ağırlık kombinasyonları altında model sonuçlarının karşılaştırılması

Ağırlık		Üretim birimlerinin sayısı					f_1($)	f_2 (kg CO_2/yıl)	LCOE
w_1	w_2	y_{11}	y_{12}	y_{21}	y_{22}	y_{23}			
0	1	4	0	20	6	1	44.747,023	1.266,869	0,7340
0,1	0,9	4	0	20	6	1	44.747,023	1.266,869	0,7340
0,2	0,8	1	0	11	19	0	15.053,271	1.463,913	0,2535
0,3	0,7	1	0	5	25	0	14.684,887	1.468,630	0,2531
0,4	0,6	1	0	5	25	0	14.684,887	1.468,630	0,2531
0,5	0,5	1	0	5	25	0	14.684,887	1.468,630	0,2531
0,6	0,4	1	0	5	25	0	14.684,887	1.468,630	0,2531
0,7	0,3	1	0	5	25	0	14.684,887	1.468,630	0,2531
0,8	0,2	1	0	2	25	0	14.512,815	1.490,365	0,2764
0,9	0,1	1	0	0	25	0	14.398,512	1.506,911	0,2954
1	0	1	0	2	25	0	14.442,988	1.645,581	0,2751

Tablo 10.1'de verilen tüm ağırlık kombinasyonları için modeller 1,457 sn ve 3,834 sn arasında değişen sürelerde optimal olarak çözülmektedir. Tablo 10.1'deki veriler kullanılarak modelden elde edilen pareto çözümler Şekil 7.2'de verilmiştir.



Şekil 7.2: Pareto çözümler kümesi (Maliyet vs. CO_2 emisyonu)

Şekil 7.2, maliyet ve CO_2 emisyonu arasındaki ilişkiyi göstermektedir. İki amaç fonksiyonunu aynı anda göz önünde bulundurarak modelin pareto çözümlerinin incelenmesi karar vericilerin tercihlerine uygun bir çözüm belirlemesine yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Tablo 7.3'e göre, eğer ikinci amaç fonksiyonun ağırlığı 1 ve birinci amaç fonksiyonun ağırlığı 0 olarak ayarlanırsa (tamamen çevre odaklı bir bakış açısıyla) ($w_1 = 0$ ve $w_2 = 1$), vaka analizi için 4 tane WT6500 1,500 kW rüzgâr türbininin, 6 kWp kapasiteli 34,260 m^2 yüzey alanına sahip 20 adet 300 W mono-kristal PV panelden oluşan bir PV sisteminin, 1,62 kWp kapasiteli 9,834 m^2 yüzey alanına sahip 6 adet 270 W poli-kristal PV panelden oluşan bir PV sisteminin ve 0,1 kWp kapasiteli 0,650 m^2 yüzeye sahip 1 adet 100 W mono-kristal PV panelin kurulmasının gerekli olduğu tespit edilmiştir. Temel senaryo ($w_1 = 0{,}5$ ve $w_2 = 0{,}5$) ile karşılaştırma yapıldığında, sistemin toplam kurulu kapasitesi yaklaşık %41 artışla 13,72 kW olarak belirlenmiştir. Yıllık CO_2 emisyon miktarı temel senaryoya göre yaklaşık %14 daha az olmak üzere 1.266.869 kg CO_2/yıl olarak bulunmuştur.

Eğer ikinci amaç fonksiyonun ağırlığı 0 ve birinci amaç fonksiyonun ağırlığı 1 olarak ayarlanırsa (tamamen maliyet odaklı bir bakış açısıyla) ($w_1 = 1$ ve $w_2 = 0$), vaka analizi için 1 tane WT6500 1,500 kW rüzgâr türbininin, 0,6 kWp kapasiteli 3.426 m^2 yüzey alanına sahip 2 adet 300 W mono-kristal PV panelden oluşan bir PV sisteminin ve 6,75 kWp kapasiteli 40,975 m^2 yüzey alanına sahip 25 adet 270 W poli-kristal PV panelden oluşan bir PV sisteminin kurulmasının gerekli olduğu bulunmuştur. Temel senaryo ($w_1 = 0{,}5$ ve $w_2 = 0{,}5$) ile karşılaştırma yapıldığında, sistemin toplam kurulu kapasitesi yaklaşık %10 azalma ile 8,85 kW olarak ve yıllık CO_2 emisyon miktarı yaklaşık %11 artışla olmak üzere 1.645,581 kg CO_2/yıl olarak bulunmuştur.

Elde edilen bulgular, karar vericinin CO_2 emisyonu ile ilgili amaç fonksiyonunun ağırlığını önemli ölçüde arttırması veya azaltması durumunda kurulacak yenilenebilir enerji üretim ünitelerinin toplam kapasitesinin de önemli ölçüde arttığını veya azaldığını göstermektedir. Bu sonuçlar aynı zamanda sistem maliyetlerini de önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle karar vericinin ağırlıkları nasıl ve ne ölçüde belirlediği önemlidir.

Sunulan bu bilgiler ile beraber, karar verme aşamasında maliyet ve CO_2 arasındaki ödünleşimin incelenmesi ile CO_2 emisyonunu düşürmek için maliyetlerden ne kadar ödün verilmesi gerektiğini görmenin daha akılcı kararlar almaya yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Çalışmanın bulgularının vaka çalışması için geçerlidir. Başka bir deyişle, başka girdi parametrelerinin kullanılması farklı çözümlere ortaya çıkaracaktır.

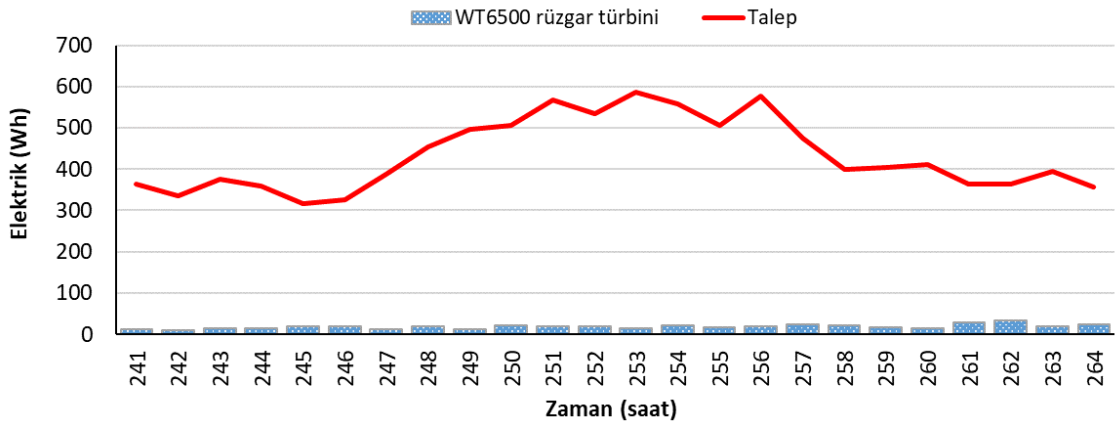
7.3 Operasyonel Karar Değişkenlerinin Analizi

Her bir *t*. zaman diliminde elde edilen operasyonel kararlar modelin ortaya çıkardığı diğer sonuçlardır. Bu kararlar; her yenilenebilir enerji üretim birimi tarafından üretilen elektrik miktarını, üretilen toplam elektrik miktarını, yenilenebilir enerji üretim birimlerinin ürettiği elektriğin talebi karşılamak ve şebekeye satmak için kullanılacak miktarlarını ve şebekeden satın alınan elektrik miktarı ilgili verileri içermektedir.

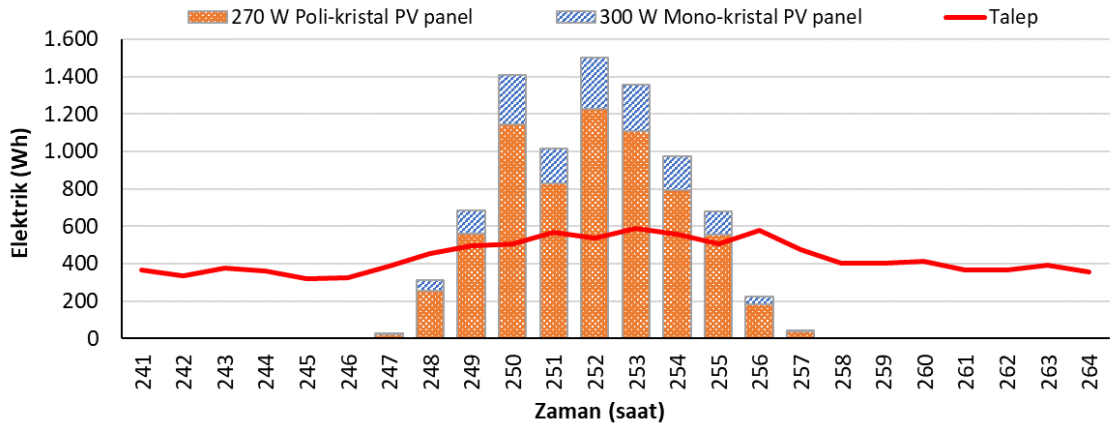
Temel senaryo ($w_1 = 0{,}5$ ve $w_2 = 0{,}5$) için elde edilen verilere göre, yıllık üretilen toplam elektrik miktarı 7.158,957 kW/yıl'dır. Üretilen elektriğin önemli bir kısmı 5.722,547 kW/yıl ile 270 W poli-kristal PV panelleri ile karşılanmaktadır. Üretilen elektriğin geri kalan kısmı 1.297,268 kW/yıl ile 300 W mono-kristal PV paneller ve 139,141 kW/yıl ile WT6500 1,500 kW rüzgâr türbini tarafından karşılanmaktadır. Ayrıca, sistem yılda 5.053,602 kW/yıl elektriği şebekeye satarken 1.696,535 kW/yıl elektriği ihtiyacı dahilinde şebekeden satın almaktadır. Böylelikle talebi karşılamasının yanı sıra elektriği şebekeye satarak önemli miktarda gelir elde edilmektedir. Böylelikle, şebekeye yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin satılması ile şebekedeki temiz enerji oranının arttırılmasına ve ülkenin şebeke elektriğindeki emisyon oranlarının (kg CO_2/Wh, kg CH_4/Wh, kg N_2O/Wh vb.) azaltılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Her bir zaman dilimi için sonuçlar incelendiği zaman, 241. ve 264. saatler arasındaki PV panelleri ve WT tarafından üretilen elektriğin saatlik değişimi ve talebe bağlı olarak satın alınacak ve satılacak elektrik miktarları sırasıyla Şekil 7.3, Şekil 7.4 ve Şekil 7.5'de verilmiştir.

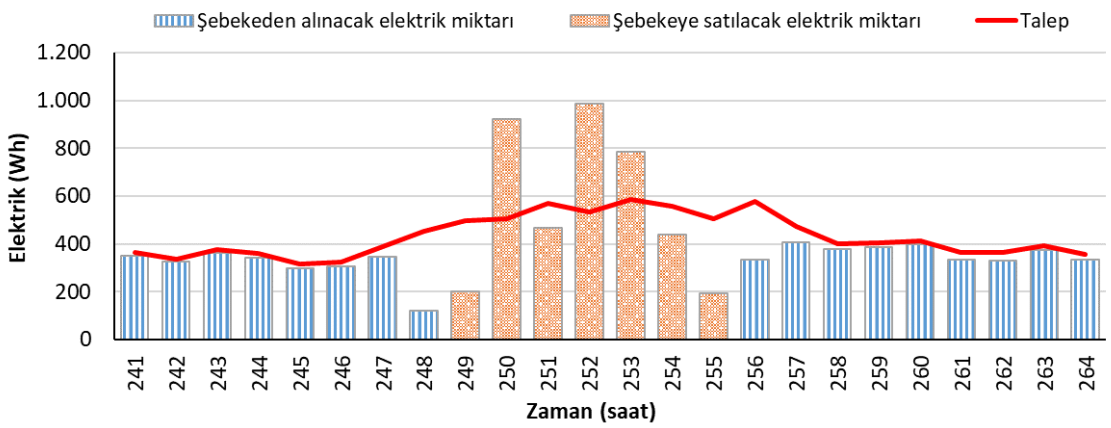
Ayrıca, operasyonel kararları daha detaylı inceleyebilmek için saatlik bazda verilerin sunulması çok fazla alan gerektirdiği ($T = 8760$ saat) için aylık bazda her bir yenilenebilir enerji üretim biriminden üretilen enerji miktarları, şebekeden satın alınacak ve şebekeye satılacak enerji miktarları Ekler bölümünde Tablo 10.2'de özetlenmiştir.



Şekil 7.3: WT tarafından üretilen elektriğin ve talebin zaman içindeki değişimi



Şekil 7.4: PV paneller tarafından üretilen elektriğin ve talebin zaman içindeki değişimi



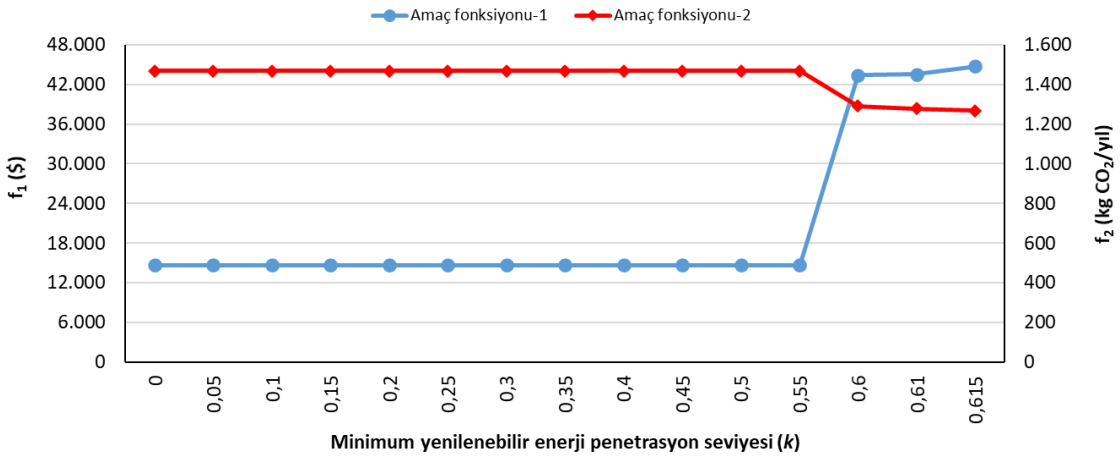
Şekil 7.5: Şebekeden alınacak ve şebekeye satılacak elektriğin ve talebin zaman içinde değişimi

Şekil 7.3'den görülebileceği gibi, talep noktasının rüzgâr enerjisi potansiyeli düşük olduğu için (Bkz. Şekil 6.2, ortalama saatlik rüzgâr hızı 1,44 m/s), rüzgâr türbinin elektrik üretimindeki etkisi oldukça azdır ancak model CO_2 emisyonunu azaltmak için 1 adet rüzgâr türbini kurulmasını önermektedir. Aksine, uygulamada, bir karar verici sezgisel olarak bu tür konumlarda bir sistem tasarlarken rüzgâr türbinlerinin kurulumunu tercih etmeyebilecektir. Şekil 7.4'den görülebileceği üzere, güneş radyasyonunun yüksek olduğu durumlarda sistem kapasitesine göre maksimum elektriği üretme ve fazla elektriği şebekeye satarak gelir elde etme eğilimindedir. Şekil 7.5'de gösterildiği gibi rüzgâr türbini tarafından üretilen elektriğin yeterli olup olmadığına bağlı olarak şebekeden elektrik satın alma işlemi gerçekleşmektedir. Rüzgâr türbinleri tarafından üretilen elektrik genellikle yetersiz kalmaktadır ve alternatif olarak şebekeden elektrik satın alınmaktadır. Özetle, vaka analizinde çalışılan konum (Denizli) için PV panellerin rüzgâr türbinlerinden daha uygun alternatifler olduğu söylenebilir.

7.4 Yenilenebilir Enerji Kaynakları Penetrasyon Seviyesi Analizi

Şebekeden satın alınan elektrik büyük oranda fosil kaynaklı yakıtlardan üretildiği için CO_2 vb. zararlı gazların emisyonuna dolayısıyla çevrenin kirlenmesine neden olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanan talep miktarı ne kadar yüksek olursa sistemin çevreye etkisinin o kadar az olacağı bilinmektedir. Bu nedenle, sistem bütünsel olarak hem çevresel hem de ekonomik açıdan karar verici tarafından analiz edilmelidir.

Bu amaçla, minimum yenilenebilir enerji penetrasyon seviyesinin (k) farklı değerlerini araştırmak için duyarlılık analizleri yapılmıştır. Önerilen model, temel senaryonun ($w_1 = 0{,}5$ ve $w_2 = 0{,}5$) farklı k değerleri için çalıştırılmıştır. Amaç fonksiyonları ve yatırım karar değişkenlerinin k değerine göre değişimleri Şekil 7.6 ve Tablo 7.4'de verilmiştir.



Şekil 7.6: Minimum yenilenebilir enerji penetrasyon seviyesine göre amaç fonksiyonlarındaki değişim

Tablo 7.4: Minimum yenilenebilir enerji penetrasyon seviyesine göre yatırım karar değişkenlerindeki değişim

Yenilenebilir enerji üretim birimleri	***k*=0**	***k*=0,05**	***k*=0,1**	***k*=0,15**	***k*=0,2**	***k*=0,25**	***k*=0,3**	***k*=0,35**
y_{11}	1	1	1	1	1	1	1	1
y_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0
y_{21}	5	5	5	5	5	5	5	5
y_{22}	25	25	25	25	25	25	25	25
y_{23}	0	0	0	0	0	0	0	0
Yenilenebilir enerji üretim birimleri	***k*=0,4**	***k*=0,45**	***k*=0,5**	***k*=0,55**	***k*=0,6**	***k*=0,61**	***k*=0,615**	
y_{11}	1	1	1	1	4	4	4	
y_{12}	0	0	0	0	0	0	0	
y_{21}	5	5	5	5	0	2	20	
y_{22}	25	25	25	25	25	25	6	
y_{23}	0	0	0	0	0	0	1	

Vaka analizi başlangıcında k değeri 0,5 (%50) karar verici tarafından olarak belirlenmişti. Şekil 7.6'ya göre, elektrik talebinin en az %60'ının yenilenebilir enerji üretim birimleri tarafından üretilen elektrikten karşılanması istendiğinde, temel senaryoya ($w_1 = 0{,}5$ ve $w_2 = 0{,}5$) kıyasla maliyet ile ilgili amaç fonksiyonunun değeri \$14.684,887'dan \$43.396,387'a sıçrayarak önemli ölçüde artmıştır. Amaç fonksiyonu üzerindeki bu artış, k'nın %61,5 değerine kadar devam etmektedir.

Daha büyük *k* değerleri için kapasite kısıtlamaları nedeniyle uygun çözümler bulmak mümkün olmamıştır. Bu durum, elektrik talebinin en fazla %61,5'inin yenilenebilir enerji birimleri ile üretilen elektrikten karşılanabileceği anlamına gelmektedir.

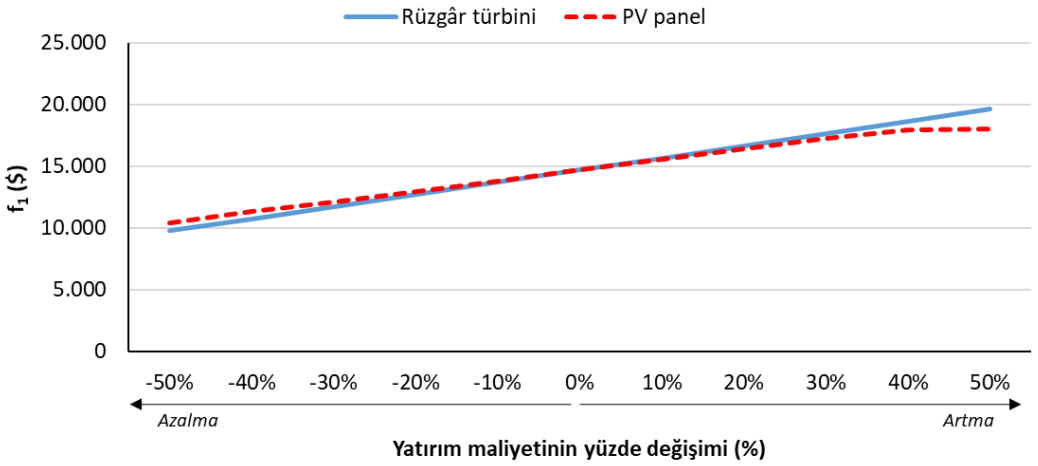
Tablo 7.4'den görülebileceği üzere, *k* değeri arttıkça sistem yenilenebilir enerji üretim birimleri tarafından üretilen elektrik ile talebi karşılamak zorunda kalmaktadır ve sonuç olarak kurulacak rüzgâr türbini sayısı artmaktadır. Bu nedenle, vaka analizi için elektrik üretim kapasitesi bakımından olası yatırım maliyetleri de düşünüldüğünde rüzgâr türbinlerinin yatırım geri dönüş oranının PV paneller kadar iyi olmadığı gözükmektedir.

7.5 Yatırım Maliyetlerinin Analizi

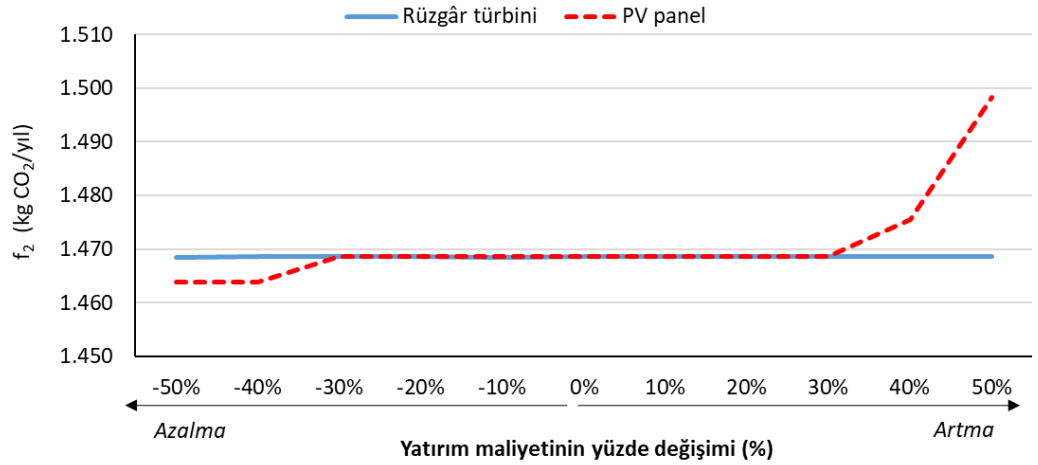
Bu bölümde, rüzgâr türbinleri ve PV panellerin yatırım maliyetindeki %50'ye kadar artış ve azalış oranları senaryolarla analiz edilmiştir. Gelecekte yeni ve daha verimli ve düşük maliyetli rüzgâr türbinlerinin ve PV panellerin piyasa olması beklenmektedir (Li ve diğ. 2017). Ayrıca, bir yenilenebilir enerji üretim biriminin yatırım maliyeti; işletme ve bakım maliyetini, yenileme maliyetini ve hurda değerini de etkilemektedir. Olası yatırım maliyetlerinin değişiminin amaç fonksiyonlarına etkisini görmek karar vericilerin planlamama yapmasında yardımcı olacaktır.

Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'den görülebileceği üzere, PV panellerin ve rüzgâr türbinlerinin yatırım maliyetleri, amaç fonksiyonları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. PV panel fiyatları %50 azaldığı varsayımında amaç fonksiyonları sırasıyla \$10.411,993 ve 1.463,913 kg CO_2/yıl olarak hesaplanmaktadır. PV panel fiyatları %50 arttığı varsayımında ise, amaç fonksiyonları sırasıyla \$18.058,195 ve 1.498,343 kg CO_2/yıl olarak hesaplanmaktadır. Bu durumda, PV paneller talep noktası için çekiciliğini kaybetmeye başlamakta kurulması planlanan PV panel sayısı azalmaya başlamaktadır. Kurulması planlanan rüzgâr türbini sayısı fiyat artışı ve azalışından etkilenmeden değişmeden kalmaktadır.

Rüzgâr türbini yatırım maliyetlerinin artış veya azalış varsayımlarına paralel olarak amaç fonksiyonları artış veya azalış gösterirken kurulması planlanan yatırım karar değişkenleri değişmemektedir. Amaç fonksiyonları; rüzgâr türbini fiyatları %50 arttığında sırasıyla $19.604,970 ve 1.468,630 kg CO_2/yıl ve rüzgâr türbini fiyatları %50 azaldığında sırasıyla $9.764,804 ve 1.468,630 kg CO_2/yıl olarak tespit edilmiştir.



Şekil 7.7: Yenilenebilir enerji üretim birimlerinin yatırım maliyetindeki yüzde değişimlerin birinci amaç fonksiyonuna etkisi



Şekil 7.8: Yenilenebilir enerji üretim birimlerinin yatırım maliyetindeki yüzde değişimlerin ikinci amaç fonksiyonuna etkisi

7.6 Çevresel Etkilerin Analizi

Çevreyi olumsuz etkileyen ve enerji üretimi sırasında oluşan CH_4 ve N_2O emisyonları gibi diğer önemli kirleticiler de tez çalışmasında çevresel analiz kapsamında değerlendirilmiştir. Bu analiz için, Brander ve diğ. (2011) çalışmasında bahsedildiği gibi şebekeden elektrik alınması durumunda karşılaşılacak Wh başına CH_4 ve N_2O emisyonu katsayılarının sırasıyla 0,0000000111 kg CH_4/Wh ve 0,00000000991 kg N_2O/Wh olduğu varsayılmıştır. Tablo 7.5, talebin yalnızca şebeke tarafından karşılandığı durum ve farklı amaç fonksiyonu ağırlıklarından elde edilmiş GC-HRES-WS'ler için kirletici emisyon miktarlarını göstermektedir.

Tablo 7.5: Farklı ağırlık kombinasyonları altında kirletici emisyon miktarının karşılaştırılması

Vaka	Ağırlık		Yenilenebilir enerji üretim birimleri					CH_4 emisyonu (kg CH_4/yıl)	N_2O emisyonu (kg N_2O/yıl)
	w_1	w_2	y_{11}	y_{12}	y_{21}	y_{22}	y_{23}		
Sadece şebeke	-	-	-	-	-	-	-	0,042099	0,037677
GC-HRES-WS	0	1	4	0	20	6	1	0,016205	0,014503
	0,1	0,9	4	0	20	6	1	0,016205	0,014503
	0,2	0,8	1	0	11	19	0	0,018726	0,016759
	0,3	0,7	1	0	5	25	0	0,018786	0,016813
	0,4	0,6	1	0	5	25	0	0,018786	0,016813
	0,5	0,5	1	0	5	25	0	0,018786	0,016813
	0,6	0,4	1	0	5	25	0	0,018786	0,016813
	0,7	0,3	1	0	5	25	0	0,018786	0,016813
	0,8	0,2	1	0	2	25	0	0,019064	0,017062
	0,9	0,1	1	0	0	25	0	0,019276	0,017251
	1	0	1	0	2	25	0	0,021049	0,018839

Kirletici emisyonlar, birçok kurum tarafından hazırlanan ve raporlanan son düzenlemeler dikkate alındığında önemli küresel sorunlar haline gelmiştir. Tablo 7.5'den görülebileceği üzere GC-HRES-WS daha az kirletici emisyonu ortaya çıkarmaktadır ve bu sonuçlar HRES'in kirletici emisyonların azaltılmasında önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Vaka analizinde tespit edilen sayısal sonuçlar ve yorumlar tablolar ve şekiller ile karar vericilere sunmak amacıyla bu bölümde tartışılmıştır. Bir sonraki bölümde, bütünsel olarak tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalar ve bu çalışmaların genel değerlendirmesi, çalışmanın uygulamaya katkısı ve sınırlılıkları tartışılmıştır.

8. SONUÇLAR VE GENEL DEĞERLENDİRME

Son dönemlerde hem gelişmekte olan hem de sanayileşmiş ülkelerde çevresel baskılar sebebiyle hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin kullanımına yönelik artan bir ilgi olduğu görülmektedir ve yakın gelecekte bu sistemlerin kullanımının ciddi oranlarda artışına devam etmesi beklenmektedir. Dolayısıyla mevcut yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli ve ekonomik bir şekilde kullanılarak çevresel zararların azaltılmasını hedefleyen çeşitli modellere ihtiyaç olacaktır. Bu amaçla, bu tez çalışmasında, hem çevresel hem de ekonomik konuları da kapsayarak GC-HRES-WS'lerin çok amaçlı optimum boyutlandırılması için çalışmalar yürütülmüştür.

Tez çalışması kapsamında yapılan çalışmaların teorik alana katkısı şu şekilde özetlenebilir. İlk olarak, HRES optimum boyutlandırma konusu için ilgili literatür kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve sistemin kaynakları, çalışma tarzı, amaç fonksiyonları, göstergeleri ve optimizasyon yöntemleri bakımından bilgiler toplanarak tablolar ve şekillerle özetlenmiştir. Buradan yola çıkarak; ekonomik ve çevresel kriterler göz önüne alınarak GC-HRES'lerin çok amaçlı optimizasyonu konusunda yeterince çalışma yapılmadığı fark edilmiştir. Daha sonraki aşamada, tez çalışması bu alana yönlendirilmiş ve GC-HRES'lerin optimum boyutlandırılması konusu daha kapsamlı incelenmiştir. İlgili literatürdeki çalışmalar, benzer olarak, sistem bileşenleri, amaç fonksiyonları, karar değişkenleri, kısıtlar ve optimizasyon yöntemleri veya yazılımlar açısından değerlendirildikten sonra maliyet ve CO_2 emisyonu arasındaki ödünleşimi dikkate alan ve literatürde nadiren entegre bir şekilde kullanılan operasyonel, teknik, fiziksel ve kapasite kısıtlarını bütünsel olarak birleştiren bir WMO-MILP modeli önerilmiştir.

Şebekeden karşılanan fosil kaynaklı elektrik yüksek miktarlarda ve düşük maliyetlerle üretilmesine rağmen CO_2 salınımına sebep olmaktadır. Diğer taraftan günümüz şartlarında yenilenebilir enerji kaynaklarının ilk yatırım maliyeti yüksek olması nedeniyle HRES'lerin birim enerji maliyeti (COE) yüksek olabilmektedir. GC-HRES-WS'lerin tasarımı için önerilen bu esnek model, karar vericilerin sistemi tasarlarken farklı boyut ve türlerde yenilenebilir enerji kaynaklarını göz önünde bulundurmasına imkân tanırken aynı zamanda maliyet ve CO_2 emisyonu gibi birbiri

ile çelişen iki amaç fonksiyonu arasındaki ödünleşimi analiz etmesine imkân tanımaktadır. Son olarak, modelde ihtiyaç duyulan rüzgâr enerjisi, güneş radyasyonu ve elektrik talebi gibi stokastik veriler için Monte Carlo simülasyonu yaklaşımı kullanılmıştır.

Bu kapsamda, tez çalışmasının bahsi geçen operasyonel, teknik, fiziksel ve kapasite kısıtları altında GC-HRES-WS'lerin çok amaçlı (ekonomik vs. çevresel) optimizasyonu için WMO-MILP modelinin önerilmesi ve modelin optimizasyonun sürecine Monte Carlo simülasyonu yaklaşımının dahil edilmesi bakımından ilgili literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Önerilen modelin uygulanabilirliğini ve değerini göstermek için bir vaka analizi kullanılmıştır. Vaka analizinin verileri kullanılarak modelin çözümden elde edilen amaç fonksiyonları, yatırım ve operasyonel karar değişkenleri gibi sayısal sonuçlar tartışılmıştır. Minimum yenilenebilir enerji penetrasyon seviyesi, yatırım maliyetleri, kirletici emisyonlar gibi bazı parametreler üzerinde duyarlılık analizleri yapılmıştır. Ayrıca, amaç fonksiyonları ağırlıklandırılarak CO_2 emisyonu miktarının probleme etkisi araştırılmıştır.

Tez çalışmasının uygulamaya katkısı ise iki şekilde özetlenebilir. Birinci katkı elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmek ve ikincisi ise CO_2 emisyonunu azaltmaya katkı sağlamaktır. Önerilen modelin sonuçlarından önemli bir bulgu olarak, CO_2 emisyon seviyesinin GC-HRES-WS'nin konfigürasyonunu ve optimum boyutlarını belirlenmesinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. CO_2 emisyonu ile ilgili amaç fonksiyonun ağırlığı arttığında yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim birimlerinin kurulumu nedeniyle sistem maliyeti de artmaktadır. Örneğin; vaka çalışmasının verilerine göre karar vericinin sadece çevre odaklı bakış açısıyla CO_2 emisyonuna odaklanması (ağırlığı 1 olarak ayarlanmıştır) ve sistem maliyetini göz ardı etmesi (ağırlığı 0 olarak ayarlanmıştır) durumunda, temel senaryoya kıyasla yıllık CO_2 emisyon miktarı yaklaşık %14 azalırken toplam kurulu kapasitenin yaklaşık %41 arttığı ve bu nedenle sistem maliyetinin yaklaşık %205 arttığı görülmektedir. Böylece sistem ekonomik olarak neredeyse kabul edilemez hale gelmektedir. Farklı ağırlık kombinasyonları için model çıktılarının analiz edilmesi ve kısmen maliyet ve çevre temelli tasarımlara odaklanması önemlidir. Dolayısıyla, talebin kabul edilebilir maliyet ve CO_2

emisyonu seviyelerinde karşılanması için çevresel ve maliyet odaklı amaç fonksiyonlarının birleşik etkisi analiz edilmelidir. Önerilen model, GC-HRES-WS'lerin hem ekonomik hem de çevresel olarak değerlendirilmesinde karar verme sürecini önemli ölçüde destekleme potansiyeline sahiptir.

Çalışmanın diğer bir bulgusu, tüm ağırlık kombinasyonları için GC-HRES-WS kirletici emisyonların neredeyse yarısını azaltmaktadır. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin şebekeye satılması ile ülkenin şebeke elektriğinin CO_2 emisyon gibi zararlı emisyon değerlerinin azaltılmasına katkı sağlanabilecektir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının yatırım maliyetleri; amaç fonksiyonlarını, özellikle sistem maliyetini, ve karar değişkenlerini etkileyen önemli bir parametredir. Günümüz şartlarında yüksek yatırım maliyetli yenilenebilir enerji kaynakları olması durumunda sistemlerin COE'si de yüksek olmaktadır. Vaka çalışmasından elde edilen sonuçlara göre, PV panellerin yatırım maliyetinin artması varsayımında çalışılan konum için PV paneller değerini kaybetmeye başlamakta ve kurulacak PV panel sayısında azalma görülmeye başlamaktadır. Bulgular, gelecekte daha verimli ve uygun fiyatlı PV panellerin piyasada olması gerekliliğini desteklemektedir.

Modelde farklı enerji üretim birimlerinin dahil edilmesi yani tam sayılı değerler alan yatırım karar değişkenlerinin sayısının artması sonucunda model çözüm sürelerinin artacağı tahmin edilmektedir. Bu durumda, problem boyutuna göre bilinen doğrusal optimizasyon yöntemleriyle makul sürelerde optimal çözümlerin elde edilmesi mümkün olamayabileceğinden sezgisel algoritmaların geliştirilmesi tez çalışmanın gelecek uygulaması olarak değerlendirilebilir. Meteorolojik verilerin tahmin edilmesinde zaman serisi veya ANN yöntemleri kullanılabilir.

Çalışmanın sınırlılıkları olarak, modelde bir yıllık (8760 saat) elektrik talebi, rüzgâr hızı ve güneş radyasyonu verilerinin kullanıldığı ve bu verilerin sistemin ömrü boyunca her yıl kendini tekrar ettiği varsayılmıştır. Bu verilerin sistem ömrü boyunca her yıl değişmesi (Örneğin; 20×8760) ile modelin doğruluğu artacaktır. Ancak bu durumda, problemin karmaşıklığı artabilir. Bu tezin geliştirme önerisi olarak, bu sınırlılıkların kaldırılarak çalışmaların devam ettirilmesi düşünülebilir.

9. KAYNAKLAR

Abbes, D., Martinez, A., 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).

Aeolos-V 600W, "Katalog", (10 Nisan 2019), http://www.windturbinestar.com/, (2019).

Ahmadi, S., Abdi, S., "Application of the Hybrid Big Bang–Big Crunch algorithm for optimal sizing of a stand-alone hybrid PV/wind/battery system", *Solar Energy*, 134, 366-374, (2016).

Altıntaş, O., Okten, B., Karsu, Ö., Kocaman, A.S., "Bi-objective optimization of a grid-connected decentralized energy system", *International Journal of Energy Research*, 42(2), 447-465, (2018).

Amer, M., Namaane, A., M'Sirdi, N.K., "Optimization of Hybrid Renewable Energy Systems (HRES) Using PSO for Cost Reduction", *Energy Procedia*, 42, 318-327, (2013).

Anand, P., Rizwan, M., Bath, S.K., "Sizing of renewable energy based hybrid system for rural electrification using grey wolf optimisation approach", *IET Energy Systems Integration*, 1(3), 158-172, (2019).

Anoune, K., Bouya, M., Astito, A., Abdellah, A.B., "Sizing methods and optimization techniques for PV-wind based hybrid renewable energy system: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 652-673, (2018).

Ardakani, F.J., Riahy, G., Abedi, M., "Optimal sizing of a grid-connected hybrid system for north-west of Iran-case study", *9th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC 2010)*, Prague, Czech Republic, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 29-32, (2010).

Askarzadeh, A., "A discrete chaotic harmony search-based simulated annealing algorithm for optimum design of PV/wind hybrid system", *Solar Energy*, 97, 93-101, (2013).

Askarzadeh, A., Coelho, L.d.S., "A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: A case study of Iran", *Solar Energy*, 112, 383-396, (2015).

Atalan, A., "Türkiye Sağlık Ekonomisi için İstatistiksel Çok Amaçlı Optimizasyon Modelinin Uygulanması", *İşletme Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*, 1(1), 34-51, (2018).

Attemene, N.S., Agbli, K.S., Fofana, S., Hissel, D., "Optimal sizing of a wind, fuel cell, electrolyzer, battery and supercapacitor system for off-grid applications", *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(8), 5512-5525, (2020).

Badwawi, R.A., Abusara, M., Mallick, T., "A Review of Hybrid Solar PV and Wind Energy System", *Smart Science*, 3(3), 127-138, (2015).

Bahramara, S., Moghaddam, M.P., Haghifam, M.R., "Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 609-620, (2016).

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).

Bala, B.K., 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), 137-142, (2009).

Baños, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F.G., Gil, C., Alcayde, A., Gómez, J., "Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1753-1766, (2011).

Baris, K., Kucukali, S., "Availibility of renewable energy sources in Turkey: Current situation, potential, government policies and the EU perspective", *Energy Policy*, 42, 377-391, (2012).

Bernal-Agustín, J.L., Dufo-López, R., "Multi-objective design and control of hybrid systems minimizing costs and unmet load", *Electric Power Systems Research*, 79(1), 170-180, (2009).

Bernal-Agustín, J.L., Dufo-López, R., Rivas-Ascaso, D.M., "Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions", *Renewable Energy*, 31(14), 2227-2244, (2006).

Beskirli, M., Hakli, H., Kodaz, H., "The energy demand estimation for Turkey using differential evolution algorithm", *Sādhanā*, 42(10), 1705-1715, (2017).

Bhandari, B., Lee, K.-T., Lee, G.-Y., Cho, Y.-M., Ahn, S.-H., "Optimization of hybrid renewable energy power systems: A review", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2(1), 99-112, (2015).

Boogen, N., Datta, S., Filippini, M., "Dynamic models of residential electricity demand: Evidence from Switzerland", *Energy Strategy Reviews*, 18, 85-92, (2017).

Boran, F.E., Boran, K., "Evaluation of Natural Gas Systems: A Comparison Study for Turkey", *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 7(3), 222-229, (2012).

Borowy, B.S., Salameh, Z.M., "Optimum photovoltaic array size for a hybrid wind/PV system", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 9(3), 482-488, (1994).

Borowy, B.S., Salameh, Z.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*, 11(2), 367-375, (1996).

BP, "BP Energy Outlook 2019 Edition", (08 Şubat 2020), https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf, London, United Kingdom, (2019a).

BP, "BP Statistical Review of World Energy 2019 68th Edition", (08 Şubat 2020), https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf, London, United Kingdom, (2019b).

BP, "BP Statistical Review of World Energy 2020 69th Edition", (21 Aralık 2020), https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf, London, United Kingdom, (2020).

Brander, M., Sood, A., Wylie, C., Haughton, A., Lovell, J., "Electricity-specific emission factors for grid electricity", *Ecometrica*, (2011).

Bruck, M., Sandborn, P., Goudarzi, N., "A Levelized Cost of Energy (LCOE) model for wind farms that include Power Purchase Agreements (PPAs)", *Renewable Energy*, 122, 131-139, (2018).

Bukar, A.L., Tan, C.W., "A review on stand-alone photovoltaic-wind energy system with fuel cell: System optimization and energy management strategy", *Journal of Cleaner Production*, 221, 73-88, (2019).

Caballero, F., Sauma, E., Yanine, F., "Business optimal design of a grid-connected hybrid PV (photovoltaic)-wind energy system without energy storage for an Easter Island's block", *Energy*, 61, 248-261, (2013).

Canadian Solar 270 W Polycrystalline PV panel, "Katalog", (10 Nisan 2019), https://www.canadiansolar.com/en, (2019).

Cano, A., Jurado, F., Sánchez, H., Fernández, L.M., Castañeda, M., "Optimal sizing of stand-alone hybrid systems based on PV/WT/FC by using several methodologies", *Journal of the Energy Institute*, 87(4), 330-340, (2014).

Canyurt, O.E., Ceylan, H., Öztürk, H.K., Hepbaslı, A., "Energy demand estimation based on two-different genetic algorithm approaches", *Energy Sources*, 26, 1313-1320, (2004).

CDIAC, "Fossil-Fuel CO_2 Emissions", (21 Aralık 2020), https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/meth_reg.html, Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), (2020).

Ceylan, H., Öztürk, H.K., "Estimating energy demand of Turkey based on economic indicators using genetic algorithm approach", *Energy Conversion and Management*, 45(15-16), 2525-2537, (2004).

Chang, W.-Y., "The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review", *ISRN Applied Mathematics*, 2013, 953792, (2013).

Chauhan, A., Saini, R.P., "Renewable energy based power generation for stand-alone applications: A review", *International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 424-428, (2013).

Chauhan, A., Saini, R.P., "A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 99-120, (2014).

Chedid, R., Rahman, S., "Unit sizing and control of hybrid wind-solar power systems", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 12(1), 79-85, (1997).

Dalton, G.J., Lockington, D.A., Baldock, T.E., "Feasibility analysis of stand-alone renewable energy supply options for a large hotel", *Renewable Energy*, 33(7), 1475-1490, (2008).

Deb, K., *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., (2001).

Deepradit, S., Pisuchpen, R., Ongkunaruk, P., "The harvest planning of aromatic coconut by using Monte Carlo simulation", *4th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, Nagoya, Japan, 116-120, (2017).

Demirbaş, A., "Global Renewable Energy Resources", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 28(8), 779-792, (2006).

Deshmukh, M.K., Deshmukh, S.S., "Modeling of hybrid renewable energy systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(1), 235-249, (2008).

Dominguez, O.D.M., Kasmaei, M.P., Lavorato, M., Mantovani, J.R.S., "Optimal siting and sizing of renewable energy sources, storage devices, and reactive support devices to obtain a sustainable electrical distribution systems", *Energy Systems*, 9(3), 529-550, (2018).

DPT, "Elektrik Enerjisi ve Arz Güvenliği Stratejisi Belgesi", Devlet Planlama Teşkilatı, Ankara, Türkiye, (2009).

Dufo-López, R., Bernal-Agustín, J.L., "Design and control strategies of PV-Diesel systems using genetic algorithms", *Solar Energy*, 79(1), 33-46, (2005).

Dufo-López, R., Bernal-Agustín, J.L., "Multi-objective design of PV–wind–diesel–hydrogen–battery systems", *Renewable Energy*, 33(12), 2559-2572, (2008).

EIA, "International Energy Outlook 2017", https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf, U.S. Energy Information Administration, Washington DC, (2017).

EIA, "What is energy?", (6 Şubat 2019), https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=about_home, U.S. Energy Information Administration, Washington, DC, (2019).

Eke, R., Kara, O., Ulgen, K., "Optimization of a Wind/PV Hybrid Power Generation System", *International Journal of Green Energy*, 2(1), 57-63, (2005).

Ekren, B.Y., Ekren, O., "Simulation based size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage under various load and auxiliary energy conditions", *Applied Energy*, 86(9), 1387-1394, (2009).

Ekren, O., Ekren, B.Y., "Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using response surface methodology", *Applied Energy*, 85(11), 1086-1101, (2008).

Ekren, O., Ekren, B.Y., "Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing", *Applied Energy*, 87(2), 592-598, (2010).

Ekren, O., Ekren, B.Y., Ozerdem, B., "Break-even analysis and size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage – A case study", *Applied Energy*, 86(7), 1043-1054, (2009).

Eltawil, M.A., Zhao, Z., "Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems—A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 112-129, (2010).

Emad, D., El-Hameed, M.A., Yousef, M.T., El-Fergany, A.A., "Computational Methods for Optimal Planning of Hybrid Renewable Microgrids: A Comprehensive Review and Challenges", *Archives of Computational Methods in Engineering*, (2019).

Emad, D., El-Hameed, M.A., Yousef, M.T., El-Fergany, A.A., "Computational Methods for Optimal Planning of Hybrid Renewable Microgrids: A Comprehensive Review and Challenges", *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(4), 1297-1319, (2020).

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

Eteiba, M.B., Barakat, S., Samy, M.M., Wahba, W.I., "Optimization of an off-grid PV/Biomass hybrid system with different battery technologies", *Sustainable Cities and Society*, 40, 713-727, (2018).

ETKB, "Mavi Kitap 2013", Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara, Türkiye, (2013).

ETKB, "2015-2019 Stratejik Plan", Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara, Türkiye, (2014a).

ETKB, "Türkiye Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı", Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara, Türkiye, (2014b).

ETKB, "Türkiye Elektrik Enerjisi Talep Projeksiyonu Raporu", https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari, (2019).

Fadaee, M., Radzi, 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(5), 3364-3369, (2012).

Fathy, A., "A reliable methodology based on mine blast optimization algorithm for optimal sizing of hybrid PV-wind-FC system for remote area in Egypt", *Renewable Energy*, 95, 367-380, (2016).

GAMS, "User's Guide", (8 Şubat 2020), https://www.gams.com/latest/docs/UG_MAIN.html, Fairfax, VA, USA, (2020).

Garcia, R.S., Weisser, D., "A wind–diesel system with hydrogen storage: Joint optimisation of design and dispatch", *Renewable Energy*, 31(14), 2296-2320, (2006).

Gavanidous, E.S., Bakirtzis, A.G., "Design of a stand alone system with renewable energy sources using trade off methods", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 7(1), 42-48, (1992).

GCP, "Carbon budget and trends 2020", (21 Aralık 2020), https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/, Global Carbon Project (GCP), (2020).

Georgilakis, P.S., Katsigiannis, Y.A., "Reliability and economic evaluation of small autonomous power systems containing only renewable energy sources", *Renewable Energy*, 34(1), 65-70, (2009).

Ghenai, C., Bettayeb, M., "Design and optimization of grid-tied and off-grid solar PV systems for super-efficient electrical appliances", *Energy Efficiency*, 1-15, (2019a).

Ghenai, C., Bettayeb, M., "Modelling and performance analysis of a stand-alone hybrid solar PV/Fuel Cell/Diesel Generator power system for university building", *Energy*, 171, 180-189, (2019b).

Giallanza, A., Porretto, M., Puma, G.L., Marannano, G., "A sizing approach for stand-alone hybrid photovoltaic-wind-battery systems: A Sicilian case study", *Journal of Cleaner Production*, 199, 817-830, (2018).

Gómez-Hernández, D.F., Domenech, B., Moreira, J., Farrera, N., López-González, A., Ferrer-Martí, L., "Comparative evaluation of rural electrification project plans: A case study in Mexico", *Energy Policy*, 129, 23-33, (2019).

González, A., Riba, J.-R., Esteban, B., Rius, A., "Environmental and cost optimal design of a biomass–Wind–PV electricity generation system", *Renewable Energy*, 126, 420-430, (2018).

González, A., Riba, J.-R., Rius, A., "Optimal Sizing of a Hybrid Grid-Connected Photovoltaic–Wind–Biomass Power System", *Sustainability*, 7(9), 12787-12806, (2015a).

González, A., Riba, J.-R., Rius, A., Puig, R., "Optimal sizing of a hybrid grid-connected photovoltaic and wind power system", *Applied Energy*, 154, 752-762, (2015b).

Gunantara, N., "A review of multi-objective optimization: Methods and its applications", *Cogent Engineering*, 5(1), 1502242, (2018).

Gupta, A., Saini, R.P., Sharma, M.P., "Modelling of hybrid energy system—Part I: Problem formulation and model development", *Renewable Energy*, 36(2), 459-465, (2011).

Gupta, R.A., Kumar, R., Bansal, A.K., "BBO-based small autonomous hybrid power system optimization incorporating wind speed and solar radiation forecasting", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1366-1375, (2015).

Hafez, O., Bhattacharya, K., "Optimal planning and design of a renewable energy based supply system for microgrids", *Renewable Energy*, 45, 7-15, (2012).

Hakimi, S.M., Moghaddas-Tafreshi, S.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(7), 1855-1862, (2009).

Hatata, A.Y., Osman, G., Aladl, M.M., "An optimization method for sizing a solar/wind/battery hybrid power system based on the artificial immune system", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 27, 83-93, (2018).

Heydari, A., Astiaso Garcia, D., Keynia, F., Bisegna, F., De Santoli, L., "Hybrid intelligent strategy for multifactor influenced electrical energy consumption forecasting", *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 14(10-12), 341-358, (2019).

Hiendro, A., Kurnianto, R., Rajagukguk, M., Simanjuntak, Y.M., Junaidi, *Energy*, 59, 652-657, (2013).

Honeywell WT6500 1.5 kW, "Katalog", (10 Nisan 2019), https://www.honeywellstore.com/, (2019).

Huneke, F., Henkel, J., Benavides González, J.A., Erdmann, G., "Optimisation of hybrid off-grid energy systems by linear programming", *Energy, Sustainability and Society*, 2(1), 1-19, (2012).

IEA, "Trends in Photovoltaic Applications: Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2010", https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/tr_2010_low.pdf, International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS), (2011).

IEA, "Trends in Photovoltaic Applications 2019", https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/02/5319-iea-pvps-report-2019-08-lr.pdf, International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS), (2019).

IEA, "World Energy Outlook 2020", (21 Aralık 2020), www.iea.org/weo, International Energy Agency (IEA), (2020).

Iqbal, M., Azam, M., Naeem, M., Khwaja, A.S., Anpalagan, A., "Optimization classification, algorithms and tools for renewable energy: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 640-654, (2014).

Javed, M.S., Song, A., Ma, T., "Techno-economic assessment of a stand-alone hybrid solar-wind-battery system for a remote island using genetic algorithm", *Energy*, 176, 704-717, (2019).

Kaplan, Y.A., "Overview of wind energy in the world and assessment of current wind energy policies in Turkey", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 562-568, (2015).

Karaki, S.H., Chedid, R.B., Ramadan, R., "Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion systems", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14(3), 766-772, (1999).

Karakoulidis, K., Mavridis, K., Bandekas, D.V., Adoniadis, P., Potolias, C., Vordos, N., "Techno-economic analysis of a stand-alone hybrid photovoltaic-diesel–battery-fuel cell power system", *Renewable Energy*, 36(8), 2238-2244, (2011).

Kasaeian, A., Rahdan, P., Rad, M.A.V., Yan, W.-M., "Optimal design and technical analysis of a grid-connected hybrid photovoltaic/diesel/biogas under different economic conditions: A case study", *Energy Conversion and Management*, 198, 111810, (2019).

Kashefi Kaviani, A., Riahy, G.H., Kouhsari, S.M., "Optimal design of a reliable hydrogen-based stand-alone wind/PV generating system, considering component outages", *Renewable Energy*, 34(11), 2380-2390, (2009).

Katsigiannis, Y.A., Georgilakis, P.S., Karapidakis, E.S., "Multiobjective genetic algorithm solution to the optimum economic and environmental performance problem of small autonomous hybrid power systems with renewables", *Renewable Power Generation, IET*, 4(5), 404-419, (2010).

Katsigiannis, Y.A., Georgilakis, P.S., Karapidakis, E.S., "Hybrid Simulated Annealing-Tabu Search Method for Optimal Sizing of Autonomous Power Systems With Renewables", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 3(3), 330-338, (2012).

Kaundinya, D.P., Balachandra, P., Ravindranath, N.H., "Grid-connected versus stand-alone energy systems for decentralized power—A review of literature", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2041-2050, (2009).

Kaya, S., Fığlalı, N., "Çok Amaçlı Optimizasyon Problemlerinde Pareto Optimal Kullanımı", *Social Sciences Research Journal*, 5(2), 9-18, (2016).

Kellogg, W., Nehrir, M.H., Venkataramanan, G., Gerez, V., "Optimal unit sizing for a hybrid wind/photovoltaic generating system", *Electric Power Systems Research*, 39(1), 35-38, (1996).

Kellogg, W.D., Nehrir, M.H., Venkataramanan, G., Gerez, V., "Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic, and hybrid wind/PV systems", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 13(1), 70-75, (1998).

Kenfack, J., Neirac, F.P., Tatietse, T.T., Mayer, D., Fogue, M., Lejeune, A., "Microhydro-PV-hybrid system: Sizing a small hydro-PV-hybrid system for rural electrification in developing countries", *Renewable Energy*, 34(10), 2259-2263, (2009).

Khan, A., Javaid, N., "Jaya Learning-Based Optimization for Optimal Sizing of Stand-Alone Photovoltaic, Wind Turbine, and Battery Systems", *Engineering*, 6(7), 812-826, (2020).

Khan, M.J., Iqbal, M.T., "Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland", *Renewable Energy*, 30(6), 835-854, (2005).

Khatib, T., Ibrahim, I.A., Mohamed, A., "A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system", *Energy Conversion and Management*, 120, 430-448, (2016).

Khatib, T., Mohamed, A., Sopian, K., "A review of photovoltaic systems size optimization techniques", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 454-465, (2013).

Kıran, M.S., Özceylan, E., Gündüz, M., Paksoy, T., "A novel hybrid approach based on Particle Swarm Optimization and Ant Colony Algorithm to forecast energy demand of Turkey", *Energy Conversion and Management*, 53(1), 75-83, (2012a).

Kıran, M.S., Özceylan, E., Gündüz, M., Paksoy, T., "Swarm intelligence approaches to estimate electricity energy demand in Turkey", *Knowledge-Based Systems*, 36, 93-103, (2012b).

Konneh, D.A., Howlader, H.O.R., Shigenobu, R., Senjyu, T., Chakraborty, S., Krishna, N., "A Multi-Criteria Decision Maker for Grid-Connected Hybrid Renewable Energy Systems Selection Using Multi-Objective Particle Swarm Optimization", *Sustainability*, 11(4), 1188, (2019).

Kornelakis, A., "Multiobjective Particle Swarm Optimization for the optimal design of photovoltaic grid-connected systems", *Solar Energy*, 84(12), 2022-2033, (2010).

Kornelakis, A., Koutroulis, E., "Methodology for the design optimisation and the economic analysis of grid-connected photovoltaic systems", *IET Renewable Power Generation*, 3(4), 476-492, (2009).

Kouhestani, F.M., Byrne, J., Johnson, D., Spencer, L., Brown, B., Hazendonk, P., Scott, J., "Multi-criteria PSO-based optimal design of grid-connected hybrid renewable energy systems", *International Journal of Green Energy*, 17(11), 617-631, (2020).

Koutroulis, E., Kolokotsa, D., Potirakis, A., Kalaitzakis, K., "Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms", *Solar Energy*, 80(9), 1072-1088, (2006).

Krishna, K.S., Kumar, K.S., "A review on hybrid renewable energy systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 907-916, (2015).

Kumar, R., Gupta, R.A., Bansal, A.K., "Economic analysis and power management of a stand-alone wind/photovoltaic hybrid energy system using biogeography based optimization algorithm", *Swarm and Evolutionary Computation*, 8, 33-43, (2013).

Kumar, S., Kaur, T., Arora, M.K., Upadhyay, S., "Resource estimation and sizing optimization of PV/micro hydro-based hybrid energy system in rural area of Western Himalayan Himachal Pradesh in India", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(22), 2795-2807, (2019).

Lan, H., Wen, S., Hong, Y.-Y., Yu, D.C., Zhang, L., "Optimal sizing of hybrid PV/diesel/battery in ship power system", *Applied Energy*, 158, 26-34, (2015).

LG 300 W Monocrystalline PV panel, "Katalog", (10 Nisan 2019), https://www.lg.com/us, (2019).

Li, C., "Techno-economic study of off-grid hybrid photovoltaic/battery and photovoltaic/battery/fuel cell power systems in Kunming, China", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(13), 1588-1604, (2019).

Li, X., Ramshani, M., Khojandi, A., Omitaomu, O., Hathaway, J.M., "An agent based model for joint placement of PV panels and green roofs", *Winter Simulation Conference (WSC)*, Las Vegas, NV, USA, 1133-1144, (2017).

Li, Y.-F., Zio, E., "A multi-state model for the reliability assessment of a distributed generation system via universal generating function", *Reliability Engineering & System Safety*, 106, 28-36, (2012).

Lian, J., Zhang, Y., Ma, C., Yang, Y., Chaima, E., "A review on recent sizing methodologies of hybrid renewable energy systems", *Energy Conversion and Management*, 199, 112027, (2019).

Lu, J., Wang, W., Zhang, Y., Cheng, S., "Multi-Objective Optimal Design of Stand-Alone Hybrid Energy System Using Entropy Weight Method Based on HOMER", *Energies*, 10(10), 1664, (2017).

Luna-Rubio, R., Trejo-Perea, M., Vargas-Vázquez, D., Ríos-Moreno, G.J., "Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies", *Solar Energy*, 86(4), 1077-1088, (2012).

Maleki, A., Ameri, M., Keynia, F., "Scrutiny of multifarious particle swarm optimization for finding the optimal size of a PV/wind/battery hybrid system", *Renewable Energy*, 80, 552-563, (2015).

Maleki, A., Askarzadeh, A., "Artificial bee swarm optimization for optimum sizing of a stand-alone PV/WT/FC hybrid system considering LPSP concept", *Solar Energy*, 107, 227-235, (2014a).

Maleki, A., Askarzadeh, A., "Optimal sizing of a PV/wind/diesel system with battery storage for electrification to an off-grid remote region: A case study of Rafsanjan, Iran", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7, 147-153, (2014b).

Maleki, A., Khajeh, M.G., Ameri, M., "Optimal sizing of a grid independent hybrid renewable energy system incorporating resource uncertainty, and load uncertainty", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 83, 514-524, (2016a).

Maleki, A., Pourfayaz, F., "Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms", *Solar Energy*, 115, 471-483, (2015).

Maleki, A., Pourfayaz, F., Rosen, M.A., "A novel framework for optimal design of hybrid renewable energy-based autonomous energy systems: A case study for Namin, Iran", *Energy*, 98, 168-180, (2016b).

Markvart, T., "Sizing of hybrid photovoltaic-wind energy systems", *Solar Energy*, 57(4), 277-281, (1996).

Mellit, A., Benghanem, M., Arab, A.H., Guessoum, A., "An adaptive artificial neural network model for sizing stand-alone photovoltaic systems: application for isolated sites in Algeria", *Renewable Energy*, 30(10), 1501-1524, (2005).

Merei, G., Berger, C., Sauer, D.U., "Optimization of an off-grid hybrid PV–Wind–Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm", *Solar Energy*, 97, 460-473, (2013a).

Merei, G., Leuthold, M., Sauer, D.U., "Optimization of an Off-grid hybrid PV-Wind-Diesel system with different battery technologies - Sensitivity Analysis", *Proceedings of 35th International Telecommunications Energy Conference 'Smart Power and Efficiency' (INTELEC)*, 1-6, (2013b).

Meza, J.L.C., Yildirim, M.B., Masud, A.S.M., "A Model for the Multiperiod Multiobjective Power Generation Expansion Problem", *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(2), 871-878, (2007).

Moghaddam, M.J.H., Kalam, A., Nowdeh, S.A., Ahmadi, A., Babanezhad, M., Saha, S., "Optimal sizing and energy management of stand-alone hybrid photovoltaic/wind system based on hydrogen storage considering LOEE and LOLE reliability indices using flower pollination algorithm", *Renewable Energy*, 135, 1412-1434, (2019).

Nayak, C.K., Nayak, M.R., "Technoeconomic analysis of a grid-connected PV and battery energy storage system considering time of use pricing", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 26(1), 318-329, (2018).

NREL, "HOMER Energy", (19 Mart 2019), https://www.homerenergy.com/, U.S. Department of Energy's National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA, (2019).

Obi, M., Bass, R., "Trends and challenges of grid-connected photovoltaic systems – A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1082-1094, (2016).

Ould Bilal, B., Sambou, V., Ndiaye, P.A., Kébé, C.M.F., Ndongo, 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(10), 2388-2390, (2010).

Özkara, G., "Yenilenebilir Enerji Kaynakları Nelerdir?", (10 Kasım 2020), https://www.enerjiportali.com/, (2018).

Öztürk, A., *Yöneylem Araştırması*, 10. Baskı, Bursa: Ekin Kitabevi, (2005).

Paliwal, P., Patidar, N.P., Nema, R.K., "Determination of reliability constrained optimal resource mix for an autonomous hybrid power system using Particle Swarm Optimization", *Renewable Energy*, 63, 194-204, (2014).

Panchal, B., Chang, T., Qin, S., Sun, Y., Wang, J., Bian, K., "Optimization and kinetics of tung nut oil transesterification with methanol using novel solid acidic ionic liquid polymer as catalyst for methyl ester synthesis", *Renewable Energy*, (2019).

Parihar, A.K.S., Sethi, V., Banerjee, R., "Sizing of biomass based distributed hybrid power generation systems in India", *Renewable Energy*, 134, 1400-1422, (2019).

Polat, U., Gürtuna, F., "A Review of Applications of Linear Programming and Mixed Integer Linear Programming in Energy Management: From Policy Makers/Producers to Consumers", *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(2), 84-89, (2018).

Prasad, A.R., Natarajan, E., "Optimization of integrated photovoltaic–wind power generation systems with battery storage", *Energy*, 31(12), 1943-1954, (2006).

Rajkumar, R.K., Ramachandaramurthy, V.K., Yong, B.L., Chia, D.B., "Techno-economical optimization of hybrid pv/wind/battery system using Neuro-Fuzzy", *Energy*, 36(8), 5148-5153, (2011).

Ramakumar, R., Abouzahr, I., Ashenayi, K., "A knowledge-based approach to the design of integrated renewable energy systems", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 7(4), 648-659, (1992).

Ramakumar, R., Shetty, P.S., Ashenayi, K., "A Linear Programming Approach to the Design of Integrated Renewable Energy Systems for Developing Countries", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, EC-1(4), 18-24, (1986).

Razmjoo, A., Davarpanah, A., "Developing various hybrid energy systems for residential application as an appropriate and reliable way to achieve Energy sustainability", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(10), 1180-1193, (2019).

Razmjoo, A., Ehyaei, M.A., Ahmadi, A., Pazhoohesh, M., Marzband, M., Mansouri Khosravi, M., Shahhoseini, A., Davarpanah, A., "Implementation of energy sustainability using hybrid power systems, a case study", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-14, (2019).

Reddi, K.R., Li, W., Wang, B., Moon, Y., "System dynamics modelling of hybrid renewable energy systems and combined heating and power generator", *International Journal of Sustainable Engineering*, 6, 31, (2012).

Rehman, S., El-Amin, I.M., Ahmad, F., Shaahid, S.M., Al-Shehri, A.M., Bakhashwain, J.M., Shash, A., "Feasibility study of hybrid retrofits to an isolated off-grid diesel power plant", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(4), 635-653, (2007).

Ren, H., Gao, W., "A MILP model for integrated plan and evaluation of distributed energy systems", *Applied Energy*, 87(3), 1001-1014, (2010).

Renogy 100 W Monocrystalline PV panel, "Katalog", (10 Nisan 2019), https://www.renogy.com/, (2019).

Said, M., El-Shimy, M., Abdelraheem, M.A., "Photovoltaics energy: Improved modeling and analysis of the levelized cost of energy (LCOE) and grid parity – Egypt case study", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 9, 37-48, (2015).

Sanajaoba, S., "Optimal sizing of off-grid hybrid energy system based on minimum cost of energy and reliability criteria using firefly algorithm", *Solar Energy*, 188, 655-666, (2019).

Schweidtmann, A.M., Clayton, A.D., Holmes, N., Bradford, E., Bourne, R.A., Lapkin, A.A., "Machine learning meets continuous flow chemistry: Automated optimization towards the Pareto front of multiple objectives", *Chemical Engineering Journal*, 352, 277-282, (2018).

SEIA, "Solar Industry Research Data", (21 Aralık 2020), https://www.seia.org/solar-industry-research-data, Solar Energy Industries Association (SEIA), (2020).

Senjyu, T., Hayashi, D., Urasaki, N., Funabashi, T., "Optimum configuration for renewable generating systems in residence using genetic algorithm", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(2), 459-466, (2006).

Senjyu, T., Hayashi, D., Yona, A., Urasaki, N., Funabashi, T., "Optimal configuration of power generating systems in isolated island with renewable energy", *Renewable Energy*, 32(11), 1917-1933, (2007).

Shaahid, S.M., Elhadidy, M.A., "Technical and economic assessment of grid-independent hybrid photovoltaic–diesel–battery power systems for commercial loads in desert environments", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(8), 1794-1810, (2007).

Sharafi, M., Elmekkawy, T.Y., "Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO-simulation based approach", *Renewable Energy*, 68, 67-79, (2014).

Sharafi, M., ElMekkawy, T.Y., "Stochastic optimization of hybrid renewable energy systems using sampling average method", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1668-1679, (2015).

Sharafi, M., ElMekkawy, T.Y., 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).

Shezan, S.K.A., Al-Mamoon, A., Ping, H.W., "Performance investigation of an advanced hybrid renewable energy system in indonesia", *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 37(4), 1424-1432, (2018).

Singh, R., Bansal, R.C., "Review of HRESs based on storage options, system architecture and optimisation criteria and methodologies", *IET Renewable Power Generation*, 12(7), 747-760, (2018).

Singh, S., Kaushik, S.C., "Optimal sizing of grid integrated hybrid PV-biomass energy system using artificial bee colony algorithm", *IET Renewable Power Generation*, 10(5), 642-650, (2016).

Singh, S., Singh, M., Kaushik, S.C., "A review on optimization techniques for sizing of solar-wind hybrid energy systems", *International Journal of Green Energy*, 13(15), 1564-1578, (2016).

Sinha, S., Chandel, S.S., "Review of software tools for hybrid renewable energy systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 192-205, (2014).

Sinha, S., Chandel, S.S., "Review of recent trends in optimization techniques for solar photovotaic-wind based hybrid energy systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 755-769, (2015).

Supriya, C.S., Siddarthan, M., "Optimization and sizing of a grid-connected hybrid PV-Wind energy system", *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 3(5), 4296-4323, (2011).

Talari, S., Yazdaninejad, M., Haghifam, M., "Stochastic-based scheduling of the microgrid operation including wind turbines, photovoltaic cells, energy storages and responsive loads", *IET Generation, Transmission & Distribution*, 9(12), 1498-1509, (2015).

Tefek, M.F., Uğuz, H., Güçyetmez, M., "A new hybrid gravitational search–teaching–learning-based optimization method for energy demand estimation of Turkey", *Neural Computing and Applications*, 31(7), 2939-2954, (2019).

TEİAŞ, "Türkiye elektrik üretim-iletim 2019 yılı istatistikleri", https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri, Türkiye Elektrik İletim A.Ş., Ankara, Türkiye, (2019).

Tezer, T., Yaman, R., Yaman, G., "Evaluation of approaches used for optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 840-853, (2017).

Toksarı, M.D., "Ant colony optimization approach to estimate energy demand of Turkey", *Energy Policy*, 35(8), 3984-3990, (2007).

Türkay, M., "Optimizasyon Modelleri ve Çözüm Metodları", (15 Ekim 2020), http://home.ku.edu.tr/~mturkay/indr501/optimizasyon.pdf, (2011).

Türkölmez, G.B., "Yazılım Projesi Seçim Probleminde Çok Amaçlı Optimizasyon Uygulaması", *İşletme Fakültesi Dergisi*, 17(1), 47-63, (2016).

Twaha, S., Ramli, M.A.M., "A review of optimization approaches for hybrid distributed energy generation systems: Off-grid and grid-connected systems", *Sustainable Cities and Society*, 41, 320-331, (2018).

Upadhyay, S., Sharma, M.P., "A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 47-63, (2014).

Wang, L., Singh, C., "PSO-Based Multi-Criteria Optimum Design of A Grid-Connected Hybrid Power System With Multiple Renewable Sources of Energy", *Swarm Intelligence Symposium*, Honolulu, HI, USA, IEEE, 250-257, (2007).

Wang, L., Singh, C., "Multicriteria Design of Hybrid Power Generation Systems Based on a Modified Particle Swarm Optimization Algorithm", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24(1), 163-172, (2009).

Winston, W.L., Goldberg, J.B., *Operations Research: Applications and Algorithms*, Fourth Edition, Belmont, CA, USA: Brooks/Cole, Cengage Learning, (2004).

Wu, T., Zhang, H., Shang, L., "Optimal sizing of a grid-connected hybrid renewable energy systems considering hydroelectric storage", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-17, (2020).

WWF, "Enerji Raporu: 2050 yılında %100 Yenilenebilir Enerji", (21 Aralık 2020), https://wwftr.awsassets.panda.org/downloads/wwf_enerjiraporu.pdf?1410, World Wide Fund for Nature (WWF), (2011).

Yahiaoui, A., Fodhil, F., Benmansour, K., Tadjine, M., Cheggaga, N., "Grey wolf optimizer for optimal design of hybrid renewable energy system PV-Diesel Generator-Battery: Application to the case of Djanet city of Algeria", *Solar Energy*, 158, 941-951, (2017).

Yang, H., Lu, L., Zhou, W., "A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system", *Solar Energy*, 81(1), 76-84, (2007).

Yang, H., Zhou, W., Lu, L., Fang, Z., "Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar–wind system with LPSP technology by using genetic algorithm", *Solar Energy*, 82(4), 354-367, (2008).

Yang, H.X., Lu, L., Burnett, J., "Weather data and probability analysis of hybrid photovoltaic–wind power generation systems in Hong Kong", *Renewable Energy*, 28(11), 1813-1824, (2003).

Yang, Q., Zhang, J., Liu, Z., Xia, S., Li, W., "A new methodology for optimizing the size of hybrid PV/wind system", *International Conference on Sustainable Energy Technologies*, IEEE, 922-927, (2008).

Yıldırım, H.H., "Rüzgâr Enerjisi Santral Yatırımlarında Geri Ödeme Süresinin Monte Carlo Simülasyonu ile Belirlenmesi", *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme Fakültesi İşletme İktisadı Enstitüsü Yönetim Dergisi*, 82, 76-104, (2017).

Zebarjadi, M., Askarzadeh, A., "Optimization of a reliable grid-connected PV-based power plant with/without energy storage system by a heuristic approach", *Solar Energy*, 125, 12-21, (2016).

Zhang, W., Maleki, A., Rosen, M.A., Liu, J., "Optimization with a simulated annealing algorithm of a hybrid system for renewable energy including battery and hydrogen storage", *Energy*, 163, 191-207, (2018).

Zhang, W., Maleki, A., Rosen, M.A., Liu, J., "Sizing a stand-alone solar-wind-hydrogen energy system using weather forecasting and a hybrid search optimization algorithm", *Energy Conversion and Management*, 180, 609-621, (2019).

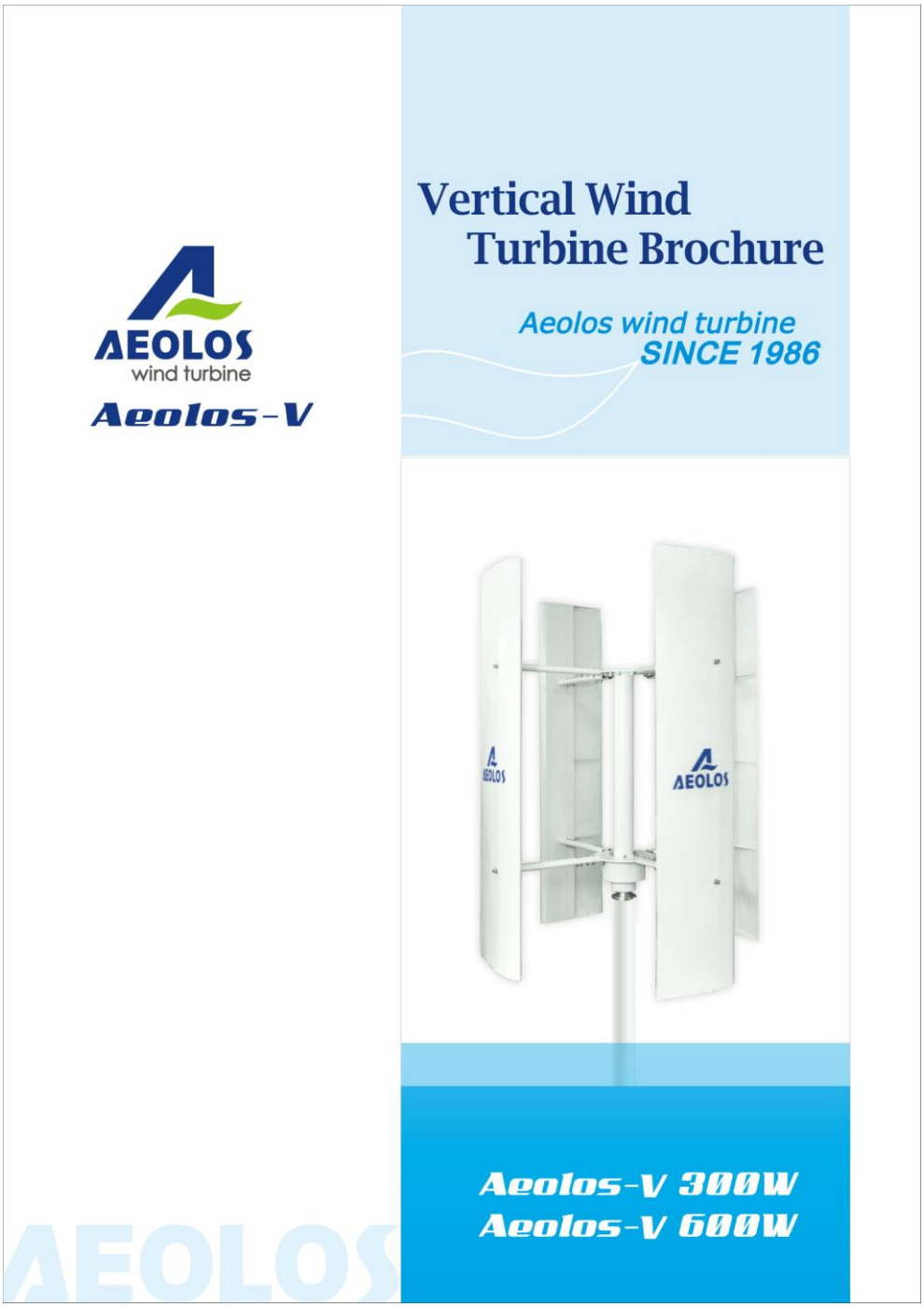
Zhang, Y., Lundblad, A., Campana, P.E., Benavente, F., Yan, J., "Battery sizing and rule-based operation of grid-connected photovoltaic-battery system: A case study in Sweden", *Energy Conversion and Management*, 133, 249-263, (2017).

Zhao, J., Yuan, X., "Multi-objective optimization of stand-alone hybrid PV-wind-diesel-battery system using improved fruit fly optimization algorithm", *Soft Computing*, 20(7), 2841-2853, (2016).

Zhao, Z.-Y., Chen, Y.-L., Thomson, J.D., "Levelized cost of energy modeling for concentrated solar power projects: A China study", *Energy*, 120, 117-127, (2017).

Zhou, W., Lou, C., Li, Z., Lu, L., Yang, H., "Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar–wind power generation systems", *Applied Energy*, 87(2), 380-389, (2010).

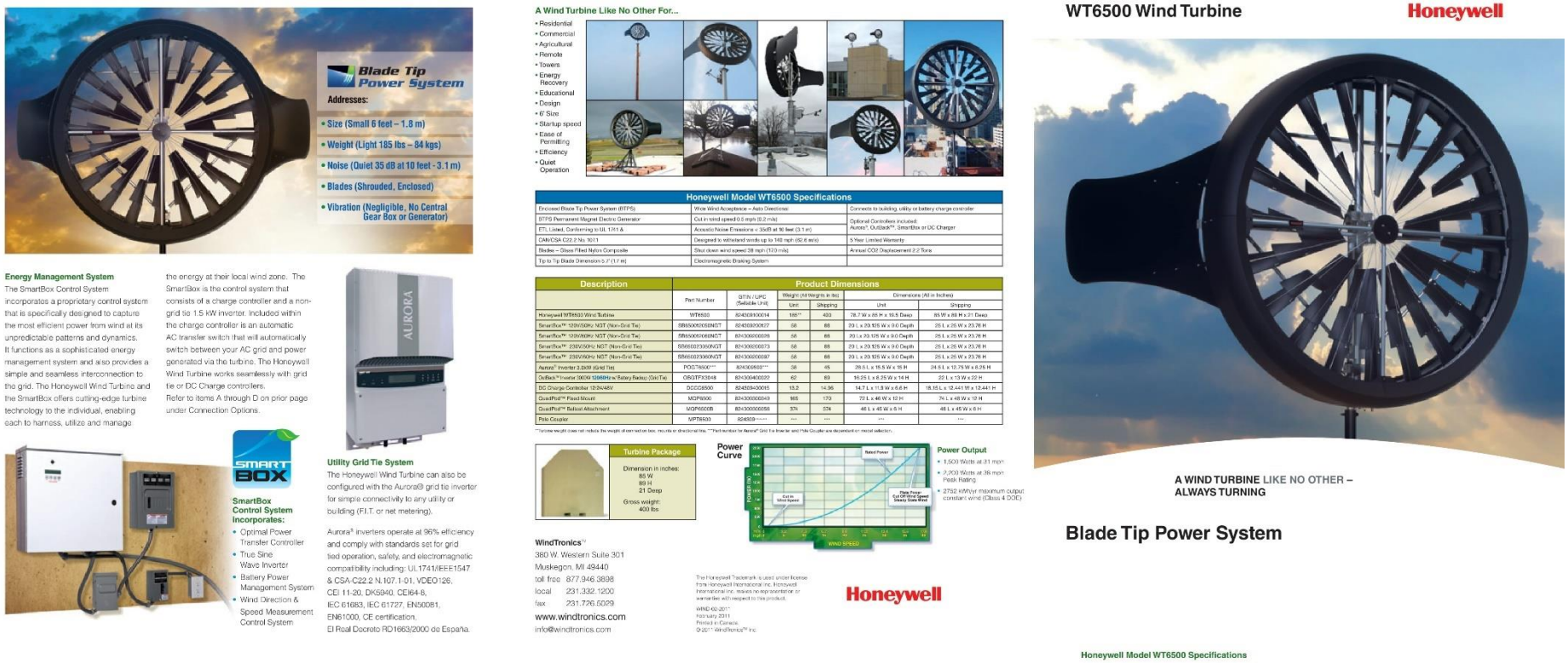
10. EKLER



Şekil 10.1: Aeolos-V 600W rüzgâr türbini özellikleri (Aeolos-V 600W 2019)

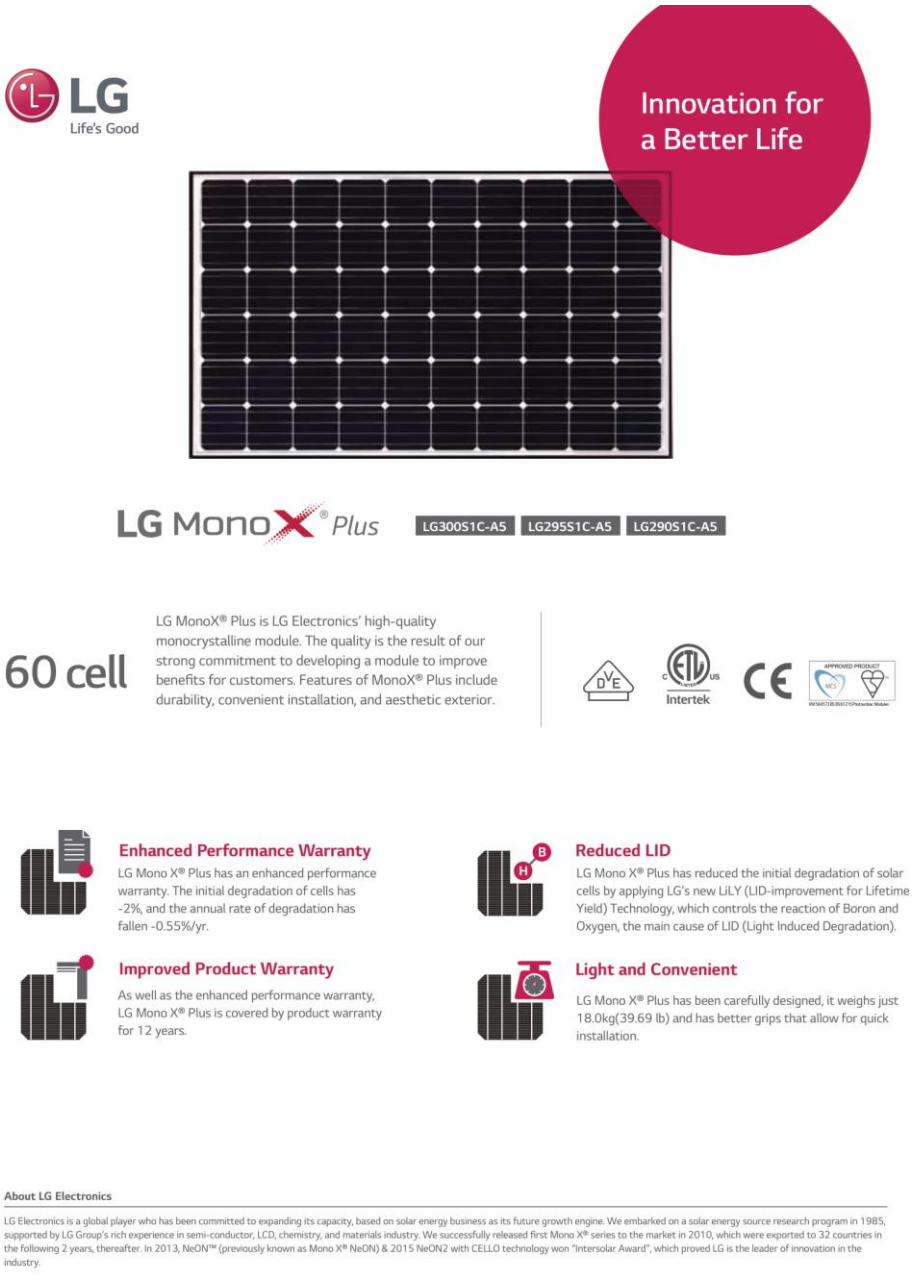
Şekil 10.1: Aeolos-V 600W rüzgâr türbini özellikleri (devam)

Şekil 10.1: Aeolos-V 600W rüzgâr türbini özellikleri (devam)



Şekil 10.2: Honeywell WT6500 1,5 kW rüzgâr türbini özellikleri (Honeywell WT6500 1.5 kW 2019)

Şekil 10.2: Honeywell WT6500 1,5 kW rüzgâr türbini özellikleri (devam)



Şekil 10.3: LG 300 W Mono-kristal PV panel özellikleri (LG 300 W Monocrystalline PV panel 2019)

LG MonoX® Plus

LG300S1C-A5 | LG295S1C-A5 | LG290S1C-A5

Mechanical Properties

Cells	6 x 10
Cell Vendor	LG
Cell Type	Monocrystalline / P-type
Cell Dimensions	161.7 x 161.7 mm / 6 inches
# of Busbar	4
Dimensions (L x W x H)	1686 x 1016 x 40 mm
	66.38 x 40 x 1.57 inch
Front Load	6000Pa
Rear Load	5400Pa
Weight	18 kg
Connector Type	MC4
Junction Box	IP67 with 3 Bypass Diodes
Cables	1000 mm x 2 ea / 39.37 in x 2 ea
Glass	High Transmission Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium

Certifications and Warranty

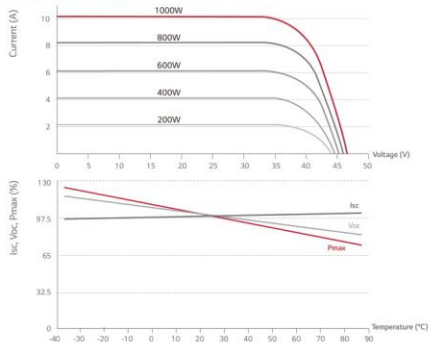
Certifications	IEC 61215, IEC 61730-1/-2
	UL 1703
	IEC 61701 (Salt mist corrosion test)
	IEC 62716 (Ammonia corrosion test)
	ISO 9001
Module Fire Performance (USA)	Type 1
Fire Rating (CANADA)	Class C (ULC / ORD C1703)
Product Warranty	12 years
Output Warranty of Pmax	Linear warranty**

** 1) 1st year : 98%, 2) After 2nd year : 0.55% annual degradation, 3) 25 years : 84.8%

Temperature Characteristics

NOCT	45 ± 3 °C
Pmpp	-0.41%/°C
Voc	-0.30%/°C
Isc	0.03 %/°C

Characteristic Curves



Electrical Properties (STC *)

Module	300W	295W	290W
Maximum Power (Pmax)	300	295	290
MPP Voltage (Vmpp)	31.6	31.3	31.0
MPP Current (Impp)	9.50	9.43	9.36
Open Circuit Voltage (Voc)	38.9	38.6	38.3
Short Circuit Current (Isc)	10.07	10.02	9.97
Module Efficiency	17.5	17.2	16.9
Operating Temperature		-40 ~ +90	
Maximum System Voltage		1000	
Maximum Series Fuse Rating		20	
Power Tolerance (%)		0 ~ +3	

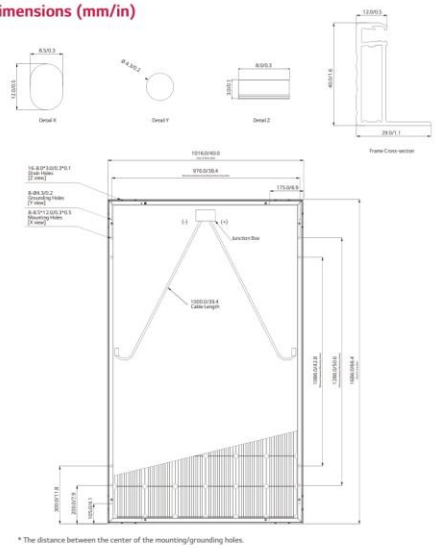
* STC (Standard Test Condition): Irradiance 1000 W/m², Ambient Temperature 25 °C, AM 1.5
* The nameplate power output is measured and determined by LG Electronics at its sole and absolute discretion.

Electrical Properties (NOCT*)

Module	300W	295W	290W
Maximum Power (Pmax)	220	216	212
MPP Voltage (Vmpp)	29.1	28.7	28.4
MPP Current (Impp)	7.56	7.53	7.47
Open Circuit Voltage (Voc)	36.0	35.7	35.4
Short Circuit Current (Isc)	8.10	8.06	8.02

* NOCT (Nominal Operating Cell Temperature): Irradiance 800W/m², ambient temperature 20 °C, wind speed 1m/s

Dimensions (mm/in)



* The distance between the center of the mounting/grounding holes.

LG Life's Good

North America Solar Business Team
LG Electronics U.S.A. Inc
1000 Sylvan Ave, Englewood Cliffs, NJ 07632

Contact: lg.solar@lge.com
www.lgsolarusa.com

Product specifications are subject to change without notice.

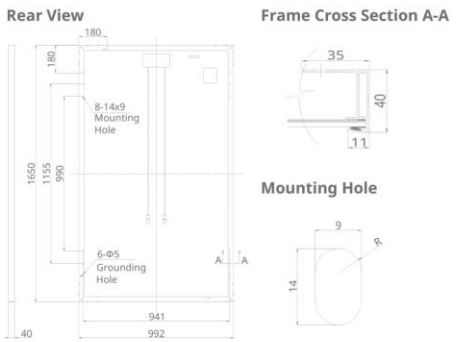
Copyright © 2017 LG Electronics. All rights reserved.
01/01/2017

Innovation for a Better Life

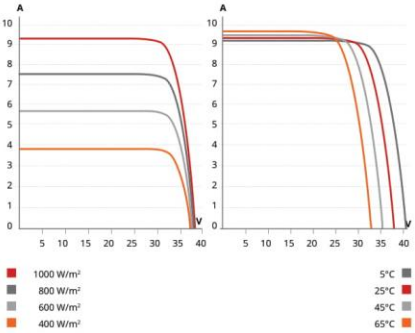
Şekil 10.3: LG 300 W Mono-kristal PV panel özellikleri (devam)

Şekil 10.4: Canadian Solar 270 W Poli-kristal PV panel özellikleri (Canadian Solar 270 W Polycrystalline PV panel 2019)

ENGINEERING DRAWING (mm)



CS6K-270P / I-V CURVES



ELECTRICAL DATA | STC*

CS6K	260P	265P	270P	275P
Nominal Max. Power (Pmax)	260 W	265 W	270 W	275 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	30.4 V	30.6 V	30.8 V	31.0 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.56 A	8.66 A	8.75 A	8.88 A
Open Circuit Voltage (Voc)	37.5 V	37.7 V	37.9 V	38.0 V
Short Circuit Current (Isc)	9.12 A	9.23 A	9.32 A	9.45 A
Module Efficiency	15.88%	16.19%	16.50%	16.80%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C			
Max. System Voltage	1000 V (IEC) or 1000 V (UL)			
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730)			
Max. Series Fuse Rating	15 A			
Application Classification	Class A			
Power Tolerance	0 ~ + 5 W			

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Poly-crystalline, 6 inch
Cell Arrangement	60 (6×10)
Dimensions	1650×992×40 mm (65.0×39.1×1.57 in)
Weight	18.2 kg (40.1 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame Material	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP67, 3 diodes
Cable	4 mm² (IEC) or 4 mm² & 12 AWG 1000 V (UL), 1000 mm (39.4 in)
Connector	T4 series or PV2 series
Per Pallet	26 pieces, 520 kg (1146.4 lbs)
Per container (40' HQ)	728 pieces

ELECTRICAL DATA | NOCT*

CS6K	260P	265P	270P	275P
Nominal Max. Power (Pmax)	189 W	192 W	196 W	199 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	27.7 V	27.9 V	28.1 V	28.3 V
Opt. Operating Current (Imp)	6.80 A	6.88 A	6.97 A	7.05 A
Open Circuit Voltage (Voc)	34.5 V	34.7 V	34.8 V	34.9 V
Short Circuit Current (Isc)	7.39 A	7.48 A	7.55 A	7.66 A

* Under Nominal Operating Cell Temperature (NOCT), irradiance of 800 W/m², spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.41 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.31 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.053 % / °C
Nominal Operating Cell Temperature	45±2 °C

PERFORMANCE AT LOW IRRADIANCE

Outstanding performance at low irradiance, with an average relative efficiency of 96.5 % from irradiances, between 1000 W/m² and 200 W/m² (AM 1.5, 25°C).

PARTNER SECTION

The specification and key features described in this datasheet may deviate slightly and are not guaranteed. Due to on-going innovation, research and product enhancement, Canadian Solar Inc. reserves the right to make any adjustment to the information described herein at any time without notice. Please always obtain the most recent version of the datasheet which shall be duly incorporated into the binding contract made by the parties governing all transactions related to the purchase and sale of the products described herein.

Caution: For professional use only. The installation and handling of PV modules requires professional skills and should only be performed by qualified professionals. Please read the safety and installation instructions before using the modules.

CANADIAN SOLAR INC. Jan. 2017. All rights reserved, PV Module Product Datasheet V5.531_EN

Şekil 10.4: Canadian Solar 270 W Poli-kristal PV panel özellikleri (devam)

Şekil 10.5: Renogy 100 W Mono-kristal PV panel özellikleri (Renogy 100 W Monocrystalline PV panel 2019)

RNG-100D

100W Monocrystalline Solar Panel

Electrical Data

Maximum Power at STC*	100 W
Optimum Operating Voltage (V_{mp})	18.9 V
Optimum Operating Current (I_{mp})	5.29 A
Open Circuit Voltage (V_{oc})	22.5 V
Short Circuit Voltage (I_{sc})	5.75 A
Module Efficiency	15.47%
Maximum System Voltage	600 VDC UL
Maximum Series Fuse Rating	15 A

Mechanical Data

Solar Cell Type	Monocrystalline (4.92 x 4.92 in)
Number of Cells	36 (4 x 9)
Dimensions	47.3 x 21.3 x 1.4in (1202 x 541 x 35mm)
Weight	16.5 lbs (7.5 kg)
Front Glass	Tempered Glass 0.13 in (3.2 mm)
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Connectors	MC4 Connectors
Fire Rating	Class C

Thermal Characteristics

Operating Module Temperature	-40ºC to +80ºC
Nominal Operating Cell Temerature (NOCT)	47±2ºC
Temperature Coefficient of Pmax	-0.44%/ºC
Temperature Coefficient of Voc	-0.30%/ºC
Temperature Coefficient of Isc	0.04%/ºC

MC4 Connectors

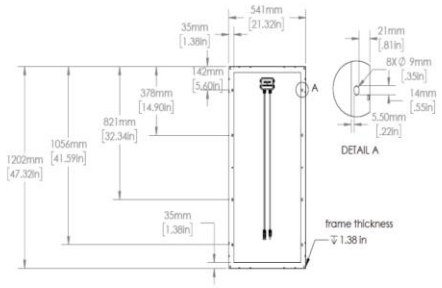
Rated Current	30A
Maximum Voltage	1000VDC
Maximum AWG Size Range	10 AWG
Temperature Range	-40ºF to 194ºF
IP Rating	IP 67

Junction Box

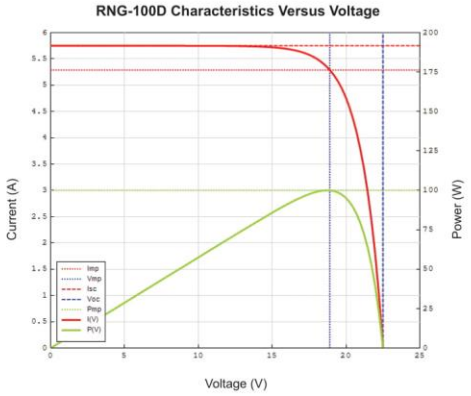
IP Rating	IP 65
Diode Type	HY 10SQ050
Number of Diodes	2 Diode(s)
Output Cables	12 AWG (2.10 ft long)

Certifications

Module Diagram



IV-Curve



*All specifications and data described in this data sheet are tested under Standard Test Conditions (STC - Irradiance: 1000W/m², Temperature: 25°C, Air Mass: 1.5) and may deviate marginally from actual values. Renogy and any of its affiliates has reserved the right to make any modifications to the information on this data sheet without notice. It is our goal to supply our customers with the most recent information regarding our products. These data sheets can be found in the downloads section of our website, www.renogy.com

Renogy | www.renogy.com | techsupport@renogy.com | T: 800-330-8678
2775 E. Philadelphia St., Ontario, CA 91761

Şekil 10.5: Renogy 100 W Mono-kristal PV panel özellikleri (devam)

Tablo 10.1: Farklı ağırlık kombinasyonları (0,01 aralıklarla) altında model sonuçlarının karşılaştırılması

Ağırlık		**Üretim birimlerinin sayısı**					f_1(\$)	f_2 (kg CO_2/yıl)
w_1	w_2	y_{11}	y_{12}	y_{21}	y_{22}	y_{23}		
0,00	1,00	4	0	20	6	1	44.747,02	1.266,87
0,01	0,99	4	0	20	6	1	44.747,02	1.266,87
0,02	0,98	4	0	20	6	1	44.747,02	1.266,87
0,03	0,97	4	0	20	6	1	44.747,02	1.266,87
0,04	0,96	4	0	20	6	1	44.747,02	1.266,87
0,05	0,95	4	0	20	6	1	44.747,02	1.266,87
0,06	0,94	4	0	20	6	1	44.747,02	1.266,87
0,07	0,93	4	0	20	6	1	44.747,02	1.266,87
0,08	0,92	4	0	20	6	1	44.747,02	1.266,87
0,09	0,91	4	0	20	6	1	44.747,02	1.266,87
0,10	0,90	4	0	20	6	1	44.747,02	1.266,87
0,11	0,89	4	0	20	6	1	44.747,02	1.266,87
0,12	0,88	4	0	20	6	1	44.747,02	1.266,87
0,13	0,87	4	0	20	6	1	44.747,02	1.266,87
0,14	0,86	4	0	10	17	0	44.002,06	1.270,86
0,15	0,85	4	0	10	17	0	44.002,06	1.270,86
0,16	0,84	2	0	11	19	0	24.719,62	1.393,24
0,17	0,83	2	0	11	19	0	24.719,62	1.393,24
0,18	0,82	1	0	11	19	0	15.053,27	1.463,91
0,19	0,81	1	0	11	19	0	15.053,27	1.463,91
0,20	0,80	1	0	11	19	0	15.053,27	1.463,91
0,21	0,79	1	0	11	19	0	15.053,27	1.463,91
0,22	0,78	1	0	11	19	0	15.053,27	1.463,91
0,23	0,77	1	0	11	19	0	15.053,27	1.463,91
0,24	0,76	1	0	11	19	0	15.053,27	1.463,91
0,25	0,75	1	0	11	19	0	15.053,27	1.463,91

Tablo 10.1: Farklı ağırlık kombinasyonları (0,01 aralıklarla) altında model sonuçlarının karşılaştırılması (devam)

Ağırlık		**Üretim birimlerinin sayısı**					f_1(\$)	f_2 (kg CO_2/yıl)
w_1	w_2	y_{11}	y_{12}	y_{21}	y_{22}	y_{23}		
0,26	0,74	1	0	11	19	0	15.053,27	1.463,91
0,27	0,73	1	0	10	20	0	14.991,87	1.464,69
0,28	0,72	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,29	0,71	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,30	0,70	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,31	0,69	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,32	0,68	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,33	0,67	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,34	0,66	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,35	0,65	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,36	0,64	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,37	0,63	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,38	0,62	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,39	0,61	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,40	0,60	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,41	0,59	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,42	0,58	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,43	0,57	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,44	0,56	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,45	0,55	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,46	0,54	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,47	0,53	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,48	0,52	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,49	0,51	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,50	0,50	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63

Tablo 10.1: Farklı ağırlık kombinasyonları (0,01 aralıklarla) altında model sonuçlarının karşılaştırılması (devam)

Ağırlık		**Üretim birimlerinin sayısı**					f_1(\$)	f_2 (kg CO_2/yıl)
w_1	w_2	y_{11}	y_{12}	y_{21}	y_{22}	y_{23}		
0,51	0,49	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,52	0,48	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,53	0,47	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,54	0,46	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,55	0,45	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,56	0,44	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,57	0,43	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,58	0,42	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,59	0,41	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,60	0,40	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,61	0,39	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,62	0,38	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,63	0,37	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,64	0,36	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,65	0,35	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,66	0,34	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,67	0,33	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,68	0,32	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,69	0,31	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,70	0,30	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,71	0,29	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,72	0,28	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,73	0,27	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,74	0,26	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,75	0,25	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63

Tablo 10.1: Farklı ağırlık kombinasyonları (0,01 aralıklarla) altında model sonuçlarının karşılaştırılması (devam)

Ağırlık		**Üretim birimlerinin sayısı**					f_1(\$)	f_2 (kg CO_2/yıl)
w_1	w_2	y_{11}	y_{12}	y_{21}	y_{22}	y_{23}		
0,76	0,24	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,77	0,23	1	0	5	25	0	14.684,89	1.468,63
0,78	0,22	1	0	4	25	0	14.627,46	1.475,55
0,79	0,21	1	0	3	25	0	14.570,11	1.482,81
0,80	0,20	1	0	2	25	0	14.512,82	1.490,37
0,81	0,19	1	0	1	25	0	14.455,60	1.498,34
0,82	0,18	1	0	0	25	0	14.398,51	1.506,91
0,83	0,17	1	0	0	25	0	14.398,51	1.506,91
0,84	0,16	1	0	0	25	0	14.398,51	1.506,91
0,85	0,15	1	0	0	25	0	14.398,51	1.506,91
0,86	0,14	1	0	0	25	0	14.398,51	1.506,91
0,87	0,13	1	0	0	25	0	14.398,51	1.506,91
0,88	0,12	1	0	0	25	0	14.398,51	1.506,91
0,89	0,11	1	0	0	25	0	14.398,51	1.506,91
0,90	0,10	1	0	0	25	0	14.398,51	1.506,91
0,91	0,09	1	0	0	25	0	14.398,51	1.506,91
0,92	0,08	1	0	0	25	0	14.398,51	1.506,91
0,93	0,07	1	0	0	25	0	14.398,51	1.506,91
0,94	0,06	1	0	0	25	0	14.398,51	1.506,91
0,95	0,05	1	0	0	25	0	14.398,51	1.506,91
0,96	0,04	1	0	0	25	0	14.398,51	1.506,91
0,97	0,03	1	0	0	25	0	14.398,51	1.506,91
0,98	0,02	1	0	0	25	0	14.398,51	1.506,91
0,99	0,01	1	0	2	25	0	14.442,99	1.645,58
1,00	0,00	1	0	2	25	0	14.442,99	1.645,58

Tablo 10.2: Aylık bazda operasyonel karar değişkenlerinin değişimi (kWh)

Aylar	$\sum_{t\in T} PE_{t11}$	$\sum_{t\in T} PE_{t12}$	$\sum_{t\in T} PE_{t21}$	$\sum_{t\in T} PE_{t22}$	$\sum_{t\in T} PE_{t23}$	$\sum_{t\in T} gb_t$	$\sum_{t\in T} gs_t$	t. zaman dilimi (saat)
Ocak	13,592	0,000	50,101	220,975	0,000	176,768	138,186	$t = 1, \dots, 744$
Şubat	11,372	0,000	60,370	266,333	0,000	146,993	192,794	$t = 745, \dots, 1416$
Mart	9,468	0,000	105,631	465,996	0,000	142,825	401,006	$t = 1417, \dots, 2160$
Nisan	8,794	0,000	107,691	475,066	0,000	106,892	428,444	$t = 2161, \dots, 2880$
Mayıs	13,903	0,000	178,093	785,608	0,000	133,743	745,237	$t = 2881, \dots, 3624$
Haziran	14,349	0,000	170,473	751,977	0,000	105,376	729,478	$t = 3625, \dots, 4344$
Temmuz	10,450	0,000	169,313	746,924	0,000	114,859	718,490	$t = 4345, \dots, 5088$
Ağustos	9,858	0,000	152,736	673,748	0,000	126,116	640,846	$t = 5089, \dots, 5832$
Eylül	13,729	0,000	111,820	493,258	0,000	132,158	439,064	$t = 5833, \dots, 6552$
Ekim	8,140	0,000	88,103	388,615	0,000	157,864	321,110	$t = 6553, \dots, 7296$
Kasım	9,122	0,000	59,506	262,494	0,000	169,988	187,601	$t = 7297, \dots, 8016$
Aralık	16,364	0,000	43,431	191,554	0,000	182,952	111,345	$t = 8017, \dots, 8760$
Toplam	**139,141**	**0,000**	**1.297,268**	**5.722,547**	**0,000**	**1.696,535**	**5.053,602**	$\boldsymbol{t = 1, \dots, 8760}$

11. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	:	Ozan ÇAPRAZ
Doğum Yeri ve Tarihi	:	Tire/İzmir
Lisans Üniversite	:	Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü
Y. Lisans Üniversite (varsa)	:	Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği ABD
Elektronik posta	:	ocapraz35@gmail.com
İletişim Adresi	:	Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü

Seçilmiş Yayın Listesi :

• Supçiller, A.A., Çapraz, O., "AHP-TOPSIS yöntemine dayalı tedarikçi seçimi uygulaması", *İstanbul Üniversitesi İktisat Fakültesi Ekonometri ve İstatistik e-Dergisi*, 13, 1-22, (2011).

• Capraz, O., Meran, C., Wörner, W. Gungor, A., "Using AHP and TOPSIS to evaluate welding processes for manufacturing plain carbon stainless steel storage tank", *Archives of Materials Science and Engineering*, 76 (2), 157-162, (2015).

Çapraz, O., Polat, O., "Mühendislik fakültesi öğrencilerinin bir üniversite kütüphanesi hizmetlerine ilişkin görüşlerinin incelenmesi", *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 21, 57-71, (2015).

• Capraz, O., Polat, O., Gungor, A., "Planning of waste electrical and electronic equipment (WEEE) recycling facilities: MILP modelling and case study investigation", *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 27 (4), 479-508, (2015).

• Capraz, O., Polat, O., Gungor, A., "Performance evaluation of waste electrical and electronic equipment disassembly layout configurations using simulation", *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 11 (5), 5, (2017).

• Polat, O., Capraz, O., Gungor, A., "Modelling of WEEE recycling operation planning under uncertainty", *Journal of Cleaner Production*, 180, 769-779, (2018).

Sağbaş, A., Hasan, D., Çapraz, O., Karakurt, N., "Yalın Üretime Geçiş Sürecinde Seri Üretim Hattında Üretim Sistemi Optimizasyonu", *Verimlilik Dergisi*, 2, 7-27, (2018).

• Bogar, Z.O., Capraz, O., Gungor, A., "Chapter 3-An overview of methods used for estimating E-waste amount", (eds: M. N. V. Prasad and M. Vithanage), *Electronic Waste Management and Treatment Technology*, Butterworth-Heinemann, 53-75, (2019).

• Capraz, O., Gungor, A., Mutlu, O., Sagbas, A., "Optimal sizing of grid-connected hybrid renewable energy systems without storage: a generalized optimization model", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, (Article in Press), (2020).

Seçilmiş Konferans Listesi :

• Çapraz, O., Güngör, A., "E-atık demontaj sistemleri için etkili bir yerleşim planlaması çalışması", *Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 31. Ulusal Kongresi*, 05-07 Temmuz 2011, Sakarya, Türkiye, (2011).

• Güngör, A., Çapraz, O., Koyuncuoğlu, M.U., "Bir üniversite yerleşkesinin engelli dostluğu düzeyini tespiti", *17. Ulusal Ergonomi Kongresi*, 14-16 Ekim 2011, Eskişehir, Türkiye, (2011).

• Gungor, A., Capraz, O., Polat, O., "Simulation based evaluation of e-waste disassembly layouts", *26th European Conference on Operational Research*, 01-04 July 2013, Rome, Italy, (2013).

• Güngör, H., Capraz, O., Gungor, A., "Is industrial engineering education creating perfectionist and/or anxiety prone individuals?", *26th European Conference on Operational Research*, 01-04 July 2013, Rome, Italy, (2013).

• Çapraz, O., Meran, C., Güngör, A., "Welding process selection for stainless steel milk storage tank using multi-criteria decision making tools", *15th International Materials Symposium*, 15-17 October 2014, Denizli, Türkiye, (2014).

• Gungor, H., Capraz, O., Gungor, A., "Selection of preschool using multi-criteria decision making tools", *V. European Conference on Social and Behavioral Sciences*, 11-14 September 2014, St. Petersburg, Russia, (2014).

• Haşıloğlu, S.B., Çapraz, O., Tanrıverdi, Y., "Mısır iplik sanayisi girişimcilerinin web sayfalarının değerlendirilmesi", *VI. International Congress on Entrepreneurship*, 24-26 April 2014, Bishkek, Kyrgyzstan, (2014).

• Capraz, O., Güngör, H., Gungor, A., "A close look on the preschool selection problem", *International Conference on New Horizons in Education*, 10-12 June 2015, Barcelona, Spain, (2015).

• Bogar, Z.O., Polat, L.O., Capraz, O., Gungor, A., "Determining the location of a waste electrical and electronic equipment (WEEE) recycling plant in the Agean Region of Turkey", *International Conference on Engineering Technology and Innovation*, 22-26 March 2017, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, (2017).

• Capraz, O., Polat, L.O., Bogar, Z.O., Gungor, A., "Review of estimation methods for e-waste quantities and the application of simple delay method for the case of Turkey", *International Conference on Engineering Technology and Innovation*, 22-26 March 2017, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, (2017).

• Polat, O., Çapraz, O., Güngör, A., "Belirsizlik altında atık elektrikli ve elektronik eşyaların (AEEE) geri dönüşüm operasyonlarının modellenmesi ve optimizasyonu", *37. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Ulusal Kongresi*, 05-07 Temmuz 2017, İstanbul, Türkiye, (2017).

• Boğar, Z.Ö., Çapraz, O., Polar, L.Ö., Güngör, A., "An overview of e-waste estimation methods and their applicability for the case of Turkey", *4th International Researchers, Statisticians and Young Statisticians Congress,* 28-30 April 2018, İzmir, Turkey, (2018).

• Çapraz, O., Güngör, A., "Şebekeye bağlı hibrit yenilenebilir enerji sistemleri: optimum boyutlandırma problemi üzerine bir literatür incelemesi ve gelecek için öneriler", *II. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Sempozyumu*, 05-08 Temmuz 2018, Nevşehir, Türkiye, (2018).

• Çapraz, O., Mutlu, Ö., Sağbaş, A., Güngör, A., "Şebekeye bağlı hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin optimum tasarımı için genel bir model", *II. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Sempozyumu,* 05-08 Temmuz 2018, Nevşehir, Türkiye, (2018).

• Polat, L.Ö., Boğar, Z.Ö., Çapraz, O., Güngör, A., "Türkiye ve AB ülkeleri arasındaki AEEE yönetimi yaklaşımlarının karşılaştırması", *II. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Sempozyumu,* 05-08 Temmuz 2018, Nevşehir, Türkiye, (2018).

• Çapraz, O., Güngör, A., "Heuristic based optimization for design of a grid-connected hybrid renewable energy system", *4th International Conference on Knowledge and Innovation in Engineering, Science and Technology*, 21-23 December 2018, Berlin, Germany, (2018).

• Capraz, O., Güngör, A., Polat, O., Öztürk, H.K., "Evaluation of alternative maintenance strategies of wind farms using a hybrid multi-criteria decision making (MCDM) framework: a case study", *IX. International Maintenance Technologies Congress and Exhibition,* 26-28 September 2019, Denizli, Turkey, (2019).