

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

GÜN ÖNCESİ ELEKTRİK PİYASASINDA YER ALAN SANAL GÜÇ
SANTRALİNİN OPTİMUM TEKLİF VE İŞLETME STRATEJİSİNİN
BELİRLENMESİ

Özge Pınar AKKAŞ

OCAK 2020

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Özge Pınar AKKAŞ tarafından hazırlanan **GÜN ÖNCESİ ELEKTRİK PİYASASINDA YER ALAN SANAL GÜÇ SANTRALİNİN OPTİMUM TEKLİF VE İŞLETME STRATEJİSİNİN BELİRLENMESİ** adlı Doktora Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.



Prof. Dr. Nihat İNANÇ
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Doktora Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.



Prof. Dr. Ertuğrul ÇAM
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Kamil Çağatay BAYINDIR
Üye (Danışman) : Prof. Dr. Ertuğrul ÇAM
Üye : Prof. Dr. Tamer EREN
Üye : Prof. Dr. Tolga EREN
Üye : Doç. Dr. İsa NAVRUZ



13/01/2020

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onaylamıştır.



Prof. Dr. Recep ÇALIN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



Aileme

ÖZET

GÜN ÖNCESİ ELEKTRİK PİYASASINDA YER ALAN SANAL GÜÇ SANTRALİNİN OPTİMUM TEKLİF VE İŞLETME STRATEJİSİNİN BELİRLENMESİ

AKKAŞ, Özge Pınar

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora tezi

Danışman: Prof. Dr. Ertuğrul ÇAM

Ocak 2020, 115 sayfa

Bu çalışmada, Rüzgâr Enerjisi Santrali (RES), Fotovoltaik Enerji Santrali (FVES), Kombine Isı ve Güç Santrali (KIGS), Isı Üretim Birimi (IÜB) ve Batarya Enerji Depolama Sisteminden (BEDS) oluşan ve Gün Öncesi Piyasasına (GÖP) katılan bir Sanal Güç Santrali (SGS)'nin saatlik optimum teklif ve işletim planlaması yapılmıştır. İlk olarak, elde edilen kârı maksimum ve çevreye salınan emisyonu minimum yapmak amacıyla bir model oluşturulmuştur. Ayrıca, batarya ömründe etkisi olan deşarj derinliği ve sıcaklık parametreleri kullanılarak oluşturulan batarya bozulma maliyeti de daha gerçekçi bir SGS modeli elde etmek amacıyla modele eklenmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarındaki belirsizlik için, rüzgâr hızı ve güneş radyasyonu parametrelerinin geçmiş verileri kullanılarak senaryo azaltma ve senaryo ağacı oluşumu algoritmaları ile belirsizlik analizi de yapılmıştır. Modelin düşük kâr çıkarma riskine karşı, bir risk ölçütü olan Koşullu Riske Maruz Değer (CVaR) ölçütü kullanılarak risk analizi yapılmış ve farklı durumlar oluşturulup birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bütün durumlar, Karışık Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama (KTDOP) olarak ve Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (GAMS) yazılımı kullanılarak modellenmiş ve elde edilen sonuçlar analiz edilip, en uygun durum çalışmada önerilmiştir. Böylece, önerilen modelin, gün öncesi elektrik

piyasasında yer alan SGS katılımcılarına optimum işletme ve SGS operatörüne optimum teklif planlaması yapması konusunda yardımcı olacağı kanıtlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Sanal Güç Santrali, Gün Öncesi Piyasası, Kâr, Batarya Bozulma Maliyeti, Emisyon, Belirsizlik, Risk, Optimizasyon



ABSTRACT

DETERMINATION OF OPTIMAL BIDDING AND OPERATION STRATEGY OF A VIRTUAL POWER PLANT IN A DAY AHEAD MARKET

AKKAŞ, Özge Pınar

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical-Electronics Engineering, Ph. D. Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Ertuğrul ÇAM

January 2020, 115 pages

In this study, an hourly optimum bidding and operation planning of a Virtual Power Plant (VPP), which consists of a Wind Power Plant (WPP), a Photovoltaic Power Plant (PVPP), a Combined Heat and Power Plant (CHP), a Heat-only Unit (HOU) and a Battery Energy Storage System (BESS), are decided in a Day Ahead Market (DAM). Firstly, the model of problem is formed to maximize the profit and minimize the emission. Furthermore, the battery degradation cost using the depth of discharge and temperature parameters, which have an impact on the life of the battery, has been considered to obtain a more realistic VPP model. The uncertainty analysis is also performed by using the historical data of wind speed and solar radiation parameters with scenario reduction and scenario tree construction algorithms for the uncertainty in renewable energy sources. The risk analysis is made against the low profit making risk of the model by using the Conditional Value at Risk (CVaR) as a risk measure, different cases are presented and compared with each other. All cases are modeled as Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP) and by using General Algebraic Modeling System (GAMS) software, the obtained results are analyzed and the most suitable case is proposed in this study. Thus, the proposed model has been proven to help VPP participants to perform optimal operation and the VPP operator to make the optimal bidding scheduling in the day ahead electricity market.

Key Words: Virtual Power Plant, Day Ahead Market, Profit, Battery Degradation
Cost, Emission, Uncertainty, Risk, Optimization



TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitim ve akademisyenlik hayatım süresince hiçbir yardımı esirgemeyen ve her zaman büyük destek olan, bilgi ve birikimlerini sonuna kadar paylaşan, tez yöneticisi hocam, Sayın Prof. Dr. Ertuğrul ÇAM'a teşekkür ederim.

Tez izleme komitesinde yer alarak beni yönlendiren değerli hocalarım, Sayın Prof. Dr. Tamer EREN ve Sayın Prof. Dr. Tolga EREN'e katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Değerli görüşleri ve önerileri ile tezime katkı sağlayan tez savunma sınavı jüri üyesi hocalarım, Sayın Prof. Dr. Kamil Çağatay BAYINDIR ve Sayın Doç. Dr. İsa NAVRUZ'a teşekkür ederim.

Çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen tüm hocalarıma ve büyük fedakarlıklarla bana destek olan çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatım boyunca bana her konuda destek olan ve her zaman yanımda olan canım annem Sultan ARSLAN'a, babam Mustafa ARSLAN'a ve kardeşim Eren ARSLAN'a teşekkür ederim.

Varlığıyla hayatımı güzelleştiren ve kolaylaştıran, çalışmalarım konusunda beni her zaman yüreklendiren ve destekleyen sevgili eşim Hakan AKKAŞ'a ve hayatımıza renk ve huzur katan, moral kaynağım, canım oğlum Erdem'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|---|------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | iii |
| TEŞEKKÜR | v |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ | vi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | viii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | ix |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Literatür Taraması..... | 5 |
| 1.2. Tezin Amacı..... | 15 |
| 1.3. Sistem Tanımı..... | 17 |
| 1.3.1. SGS Bileşenlerinin Matematiksel Modellemesi..... | 18 |
| 1.3.1.1. Rüzgâr Enerji Santrali Modeli..... | 18 |
| 1.3.1.2. Fotovoltaik Enerji Santrali Modeli..... | 19 |
| 1.3.1.3. Kombine Isı ve Güç Santrali Modeli..... | 21 |
| 1.3.1.4. Isı Üretim Birimi Modeli..... | 24 |
| 1.3.1.5. Batarya Enerji Depolama Sistemi Modeli..... | 25 |
| 1.3.2. Problemin Modellenmesi..... | 28 |
| 1.3.2.1. Amaç Fonksiyonları..... | 28 |
| 1.3.2.2. Risk Analizi..... | 31 |
| 1.3.2.3. Güç Dengesi..... | 32 |
| 2. MATERYAL VE METOT | 33 |
| 2.1. Kullanılan Veriler ve Elde Edilmesi..... | 33 |
| 2.2. Kullanılan Metotlar..... | 37 |
| 2.2.1. Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (GAMS)..... | 37 |
| 2.2.2. Bulanık TOPSIS..... | 39 |

| | |
|--|-----|
| 3. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI | 49 |
| 3.1. Simülasyon Çalışması 1 | 50 |
| 3.1.1. Durum A-1 sonuçları | 51 |
| 3.1.2. Durum A-2 sonuçları | 55 |
| 3.1.3. Durum A-3 sonuçları | 59 |
| 3.1.4. Durum A-4 sonuçları | 63 |
| 3.1.5. Durum A-5 sonuçları | 66 |
| 3.2. Simülasyon Çalışması 2 | 71 |
| 3.2.1. Durum B-1 sonuçları | 73 |
| 3.2.2. Durum B-2 sonuçları | 78 |
| 3.2.3. Durum B-3 sonuçları | 82 |
| 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 86 |
| EKLER | 92 |
| KAYNAKLAR | 104 |
| ÖZGEÇMİŞ | 113 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>ŞEKİL</u> | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| 1.1. SGS yapısı [2] | 3 |
| 1.2. Gün Öncesi Piyasası süreçleri (TEİAŞ)..... | 4 |
| 1.3. SGS sistemi | 17 |
| 1.4. Birinci tip Kombine Isı ve Güç Santrali için çalışma bölgesi [58] | 21 |
| 2.1. Kriterlerin önemini değerlendirmede kullanılan üyelik fonksiyonları..... | 43 |
| 2.2. Alternatiflerin önemini değerlendirmede kullanılan üyelik fonksiyonları..... | 45 |
| 3.1. SGS işletiminin yapısı..... | 49 |
| 3.2. Durum A-1 için elektriksel güç dengesi..... | 54 |
| 3.3. Durum A-2 için elektriksel güç dengesi..... | 58 |
| 3.4. Durum A-3 için Pareto optimum çözümler..... | 59 |
| 3.5. Durum A-3 için elektriksel güç dengesi..... | 63 |
| 3.6. Durum A-4 için elektriksel güç dengesi..... | 66 |
| 3.7. Durum A-5 için Pareto optimum çözümler..... | 67 |
| 3.8. Durum A-5 için elektriksel güç dengesi..... | 70 |
| 3.9. Rüzgâr hızı ve güneş radyasyonu veri profilleri [62]..... | 71 |
| 3.10. 10 senaryo için edilen rüzgâr hızı ve güneş radyasyonu değerleri..... | 72 |
| 3.11. Senaryoların olasılık değerleri | 72 |
| 3.12. Durum B-1 için Pareto optimum çözümler | 74 |
| 3.13. Durum B-1 için 10 senaryoya göre piyasaya satılan/piyasadan satın alınan elektrik miktarları..... | 76 |
| 3.14. Durum B-2 için Pareto optimum çözümler | 78 |
| 3.15. Durum B-2 için 10 senaryoya göre piyasaya satılan/piyasadan satın alınan elektrik miktarları..... | 80 |
| 3.16. Durum B-3 için Pareto optimum çözümler | 82 |
| 3.17. Durum B-3 için 10 senaryoya göre piyasaya satılan/piyasadan satın alınan elektrik miktarları..... | 84 |
| 4.1. Farklı β değerlerine göre kâr miktarları | 90 |
| 4.2. Farklı β değerlerine göre emisyon miktarları..... | 90 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

Sayfa

| | |
|---|----|
| 1.1. SGS yönetimi ile ilgili literatürdeki önemli çalışmalar (2013-2019) ve önerilen çalışma karşılaştırması..... | 13 |
| 1.2. Rüzgâr türbini parametreleri ve değerleri | 19 |
| 1.3. Güneş paneli parametreleri [13]..... | 20 |
| 1.4. Kombine Isı ve Güç Santrali biriminin parametreleri ve değerleri [13] | 23 |
| 1.5. Isı üretim birimi parametreleri ve değerleri [13] | 24 |
| 1.6. Kurşun-asit batarya parametreleri ve değerleri | 27 |
| 1.7. NO _x , SO ₂ ve CO ₂ emisyon oranları | 31 |
| 2.1. Ortalama saatlik rüzgâr hızı verileri (Mart, Nisan, Mayıs 2018) [62] | 34 |
| 2.2. Ortalama saatlik güneş radyasyonu verileri (Mart, Nisan, Mayıs 2018) | 34 |
| 2.3. Ortalama saatlik sıcaklık verileri (Mart, Nisan, Mayıs 2018) [62] | 35 |
| 2.4. Elektrik fiyatı, perakende satış fiyatı, ısı fiyatı, elektriksel yük ve termal yük verileri [13]..... | 36 |
| 2.5. Kriterlerin önem ağırlığının belirlenmesinde kullanılan dilsel ifadeler ve bulanık sayılar [72]..... | 43 |
| 2.6. Alternatiflerin değerlendirilmesinde kullanılan dilsel ifadeler ve bulanık sayılar [72]..... | 44 |
| 2.7. Üç karar vericiden kriterlerin önem ağırlığı..... | 45 |
| 2.8. Üç karar vericiden kâr kriteri için alternatif değerlendirmesi | 46 |
| 2.9. Üç karar vericiden emisyon kriteri için alternatif değerlendirilmesi | 47 |
| 3.1. Durum A-1 için SGS'nin optimum işletim ve teklif sonuçları | 52 |
| 3.2. Durum A-1 için saatlik kâr ve emisyon miktarları..... | 53 |
| 3.3. Durum A-2 için SGS'nin optimum işletim ve teklif sonuçları | 56 |
| 3.4. Durum A-2 için saatlik kâr ve emisyon miktarları..... | 57 |
| 3.5. Durum A-3 için SGS'nin optimum işletim ve teklif sonuçları | 60 |
| 3.6. Durum A-3 için saatlik kâr ve emisyon miktarları..... | 62 |
| 3.7. Durum A-4 için SGS'nin optimum işletim ve teklif sonuçları | 64 |
| 3.8. Durum A-4 için saatlik kâr ve emisyon miktarları..... | 65 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.9. | Durum A-5 için SGS'nin optimum işletim ve teklif sonuçları | 68 |
| 3.10. | Durum A-5 için saatlik kâr ve emisyon miktarları..... | 69 |
| 3.11. | Durum B-1 için SGS'nin optimum işletim sonuçları..... | 75 |
| 3.12. | Durum B-1 için saatlik kâr ve emisyon miktarları..... | 77 |
| 3.13. | Durum B-2 için SGS'nin optimum işletim sonuçları..... | 79 |
| 3.14. | Durum B-2 için saatlik kâr ve emisyon miktarları..... | 81 |
| 3.15. | Durum B-3 için SGS'nin optimum işletim sonuçları..... | 83 |
| 3.16. | Durum B-3 için saatlik kâr ve emisyon miktarları..... | 85 |
| 4.1. | Simülasyon çalışması 1'deki durumlar için elde edilen kâr ve emisyon miktarları..... | 88 |
| 4.2. | Simülasyon çalışması 2'deki durumlar için elde edilen kâr ve emisyon miktarları..... | 89 |

KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|---------|--|
| AB | Avrupa Birliği |
| AHP | Analitik Hiyerarşı Süreci |
| ANP | Analitik Ağ Süreci |
| BA | Benders Ayrıştırma |
| BEDS | Batarya Enerji Depolama Sistemi |
| CVaR | Koşullu Riske Maruz Değer |
| ÇKKVY | Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri |
| DEK | Dağıtık Enerji Kaynakları |
| DOP | Doğrusal Olmayan Programlama |
| DP | Doğrusal Programlama |
| ELECTRE | Elimination and Choice Translating Reality English |
| EYS | Enerji Yönetim Sistemi |
| FTBY | Fiyat Tabanlı Birim Yüklenme |
| FVES | Fotovoltaik Enerji Santrali |
| GA | Genetik Algoritma |
| GAMS | Genel Cebirsel Modelleme Sistemi |
| GÖP | Gün Öncesi Piyasası |
| IÜB | Isı Üretim Birimi |
| İDKP | İkinci Dereceden Kısıtlı Programlama |
| KGS | Konvansiyonel Güç Santrali |
| KIGS | Kombine Isı ve Güç Santrali |
| KTDOP | Karışık Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama |
| KTDP | Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama |
| KTİDKP | Karışık Tamsayılı İkinci Dereceden Kısıtlı Programlama |
| KTP | Karışık Tamsayılı Programlama |
| NTY | Nokta Tahmin Yöntemi |
| PDHS | Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral |
| PSO | Parçacık Sürü Optimizasyonu |
| RES | Rüzgâr Enerjisi Santrali |

| | |
|--------|--|
| SCADA | Merkezi Denetim ve Veri Toplama Sistemi |
| SGS | Sanal Güç Santrali |
| TOPSIS | Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution |



1. GİRİŞ

Dünyada enerji tüketiminin hızla artması ile enerjiyi üretme, dağıtma ve tüketme yolunda yeni teknolojiler ortaya çıkmaktadır. Bunlar arasında dağıtık enerji üretimi birçok ülkede önemli bir yere sahiptir. Dağıtık Enerji Kaynakları (DEK), daha az çevre sorunu olan, daha fazla çeşitlendirilmiş enerji kaynağına sahip ve daha fazla enerji verimliliği sağlayan, sürdürülebilir bir enerji sistemi olmasından dolayı dünya genelinde çok tercih edilmektedir. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren DEK, enerji piyasasına katıldığı zaman bazı dezavantajlara sahip olmaktadır. Bu kaynakların kapasiteleri genellikle küçüktür ve sistem operatörleri dikkate değer bulmasalar da tek bir dağıtık enerji kaynağı elektrik şebekesine bağlandığında, teknik problemler, kontrol sorunları ve enerji ticaretinde problemler çıkmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının stokastik özelliği güç sistemi işletiminde önemli bir problemdir. Genellikle güç sisteminde, üretilen ve tüketilen güç arasında dengesizliğe neden olduğu için sistem frekansı etkilenir ve bu da kararsızlığa neden olmaktadır.

Tekel sistemden rekabetçi piyasa yapısına geçiş ile elektrik piyasalarının serbestleştirilmesi süreci de bu problemi artıran unsurlardandır. Dağıtık Enerji Kaynaklarının güç sistemlerine nüfusunun giderek artması ve daha rekabetçi bir elektrik piyasasına yönelik devam eden eğilim, ortaya çıkan teknik ve ekonomik sorunları ele almak için yeni teknolojiler ve politikalar gerektirmektedir. Dağıtık üretimdeki sorunları ele almak ve enerji piyasalarındaki görünürlüğünü artırmak için Sanal Güç Santrali (SGS) fikri ortaya çıkmıştır. SGS, farklı üretim teknolojilerini tek bir güç sistemi içerisinde toplayarak işletim esnekliğini arttırmakta ve elektrik piyasasında bireysel yer alan dağıtık enerji kaynaklarının bir araya getirilerek performans iyileştirilmesine de neden olmaktadır.

SGS fikri, 1997 yılında Shimon Awerbuch tarafından ortaya çıkmıştır [1]. Son zamanlarda SGS üzerindeki çalışmalar, çoğunlukla Avrupa ve Kuzey Amerika'da yoğunlaşmıştır [2]. SGS ile ilgili Avrupa'da çeşitli projeler bulunmaktadır. Bunlardan bazıları, Avrupa Birliği (AB) FENIX projesi [3], AB sanal yakıt hücresi güç santrali projesi [4], Alman profesyonel sanal güç santrali projesidir [5]. Bu projeler temel

olarak dağıtık üretimin güvenilir şebeke bağlantısı ve enerji piyasasını dikkate almaktadır. Kuzey Amerika’da ise talep tepkisi ve yenilenebilir enerji kullanımı konuları SGS’nin geliştirilmesinde ele alınmıştır. Son yıllarda, Çin’de de SGS üzerinde geliştirmeler yapılmıştır. State Grid Jiangsu elektrik şirketi tarafından gerçekleştirilen bir proje bulunmaktadır [2].

SGS’nin özellikleri ve üstünlükleri aşağıda sıralanmıştır [2]:

Çevrenin korunması ve yenilenebilirlik: Yenilenebilir enerji kullanımı ve enerji tasarrufu sağlayan teknolojilerin kullanılmasıyla, fosil yakıtlı enerjinin kullanımını azaltır. Böylece kirliliği azaltır ve çevreyi korur.

Yüksek verimlilik: Dağıtık enerji sistemlerini ve kontrol edilebilir yükleri etkin bir şekilde yönetir. Geleneksel ve yenilenebilir enerjinin birbirleri ile uyum içinde çalışmasını sağlar. Ayrıca verimliliği ve sistem işletiminin güvenliğini artırır.

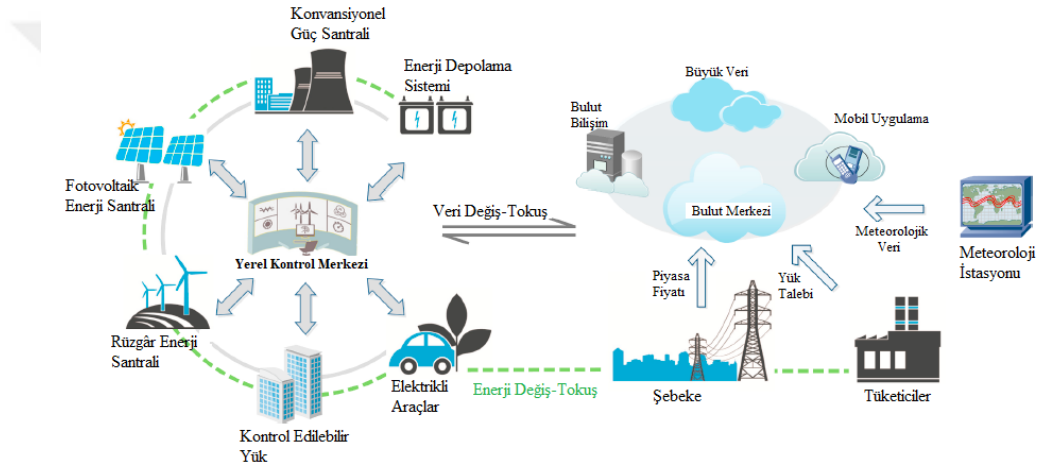
Sinerji ve etkileşim: Farklı alanlarda çeşitli dağıtık enerji sistemlerini bir araya getirir ve Enerji Yönetim Sistemi (EYS) yoluyla koordineli dağıtım sağlar. Enerji endüstrisi zincirinde, SGS piyasa katılımcıları ile etkileşim sağlar, ağ yönetimine yardımcı olur ve yardımcı hizmetler sunar.

Denge: Güç tüketicilerinin güç sisteminde aktif katılımcı olarak yer almasını sağlar. Tepe zamanda geleneksel enerji üretimini değiştirerek arz-talep dengesini sağlar.

İdeal bir SGS üç ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar; üretim teknolojisi, enerji depolama teknolojileri ve bilgi iletim teknolojisi [6]. Üretim teknolojisi, dağıtık üretim sistemlerinden oluşmaktadır. Bunlar arasında; Rüzgâr Enerji Santrali (RES), Fotovoltaik Enerji Santrali (FVES), Biyogaz ve Biyokütle Enerji Santrali, Kombine Isı ve Güç Santrali (KIGS), Hidroelektrik Santral, Gaz Türbini ve Dizel gibi Konvansiyonel Güç Santralleri (KGS) ile kontrol edilebilir yükler bulunmaktadır. Günümüzde enerji depolama sistemleri, güç talebindeki değişiklikleri verilen enerji üretim seviyesine uyarlamada önemli bir yere sahiptir. Enerji depolama teknolojileri arasında, Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral (PDHS), Batarya Enerji Depolama

Sistemi (BEDS), sıkıştırılmış hava ile enerji depolama sistemi, volan enerji depolama sistemi, süper iletken manyetik enerji depolama sistemi, süper kapasitör enerji depolama sistemi ile yakıt hücreli hidrojen sistemi bulunmaktadır. SGS için önemli gereksinimlerden birisi de iletişim teknolojileri ve alt yapıdır. Bilgi iletişimi için kullanılan teknolojiler arasında, EYS, Merkezi Denetim ve Veri Toplama Sistemi (SCADA), Dağıtık Dağıtım Merkezi bulunmaktadır.

Örnek bir SGS yapısı Şekil 1.1’de verilmektedir [2].

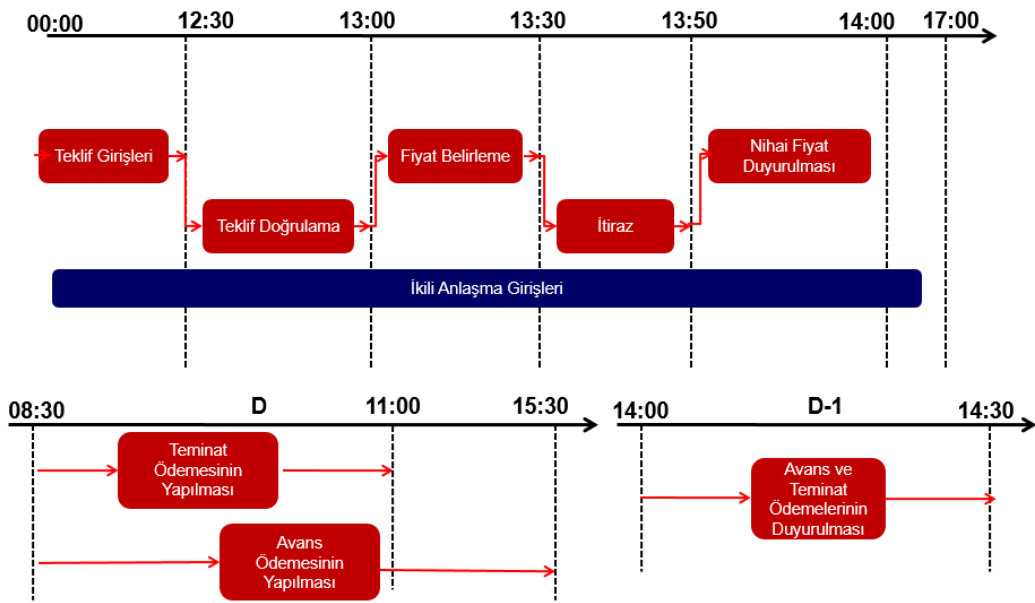


Şekil 1.1. SGS yapısı [2]

Şekil 1.1’de görüldüğü gibi, rüzgâr enerji santrali, fotovoltaik enerji santrali, konvansiyonel güç santrali, enerji depolama sistemi, elektrikli araçlar ve kontrol edilebilir yük gibi SGS’yi oluşturan dağıtık enerji kaynakları ortak bir merkezden kontrol edilmektedir. Meteorolojik veri, yük talebi, piyasa fiyatı gibi veriler değerlendirilerek, piyasa ile elektrik alım-satımı yapılmaktadır. Özellikle alım-satım işlemleri ülkemizde Gün Öncesi Piyasasında (GÖP) yapılmaktadır.

GÖP, elektrik piyasalarında arz-talep ve kapasite enerji dengesini sağlamak için enerji transferi tekliflerinin ve ticaretinin bir gün öncesinden yapıldığı bir sistemdir. Elektrik

piyasasında 2011 yılında devreye giren GÖP, bir gün sonrası teslim edilecek uzlaştırma dönemi bazında elektrik enerjisi alım-satım işlemleri için kurulan ve piyasa işletmecisi tarafından işletilen organize toptan elektrik piyasasıdır [7]. GÖP işlemleri, hergün saatlik bazda gerçekleştirilir. Her bir gün, 00:00'dan başlayıp, ertesi gün 00:00'da sona eren saatlik zaman dilimlerinden oluşur. Katılımcılar, gün öncesi piyasası kapsamında belirli bir zaman dilimi için saatlik, blok ve/veya esnek teklifler sunabilmektedirler. GÖP süreçleri Şekil 1.2'de verilmiştir [8].



Şekil 1.2. Gün Öncesi Piyasası süreçleri (TEİAŞ)

Şekil 1.2'de görüldüğü gibi gün öncesi piyasasına katılan piyasa katılımcıları, bir sonraki güne ait gün öncesi piyasası tekliflerini, her gün saat 12:30'a kadar piyasa işletmecisine bildirirler. Gün öncesi piyasası açılış zamanından önce, saat 12:30-13:00 arasında gün öncesi piyasasına teklif verilemeyeceği değerlendirilerek teminat kontrolü yapılır. Teklifler, saat 12:30-13:00 arasında piyasa işletmecisi tarafından doğrulanır. Teyit edilen teklifler saat 13:00-13:30 arasında optimizasyon aracı ile değerlendirilir ve piyasa takas fiyatları ve piyasa takas miktarları ilgili günün her bir saati için belirlenir. Piyasa katılımcısına bildirilen alım-satım miktarlarının içeriğinde

hata olması durumunda, piyasa katılımcısı saat 13:30-13:50 arasında itiraz edebilir. Saat 13:50-14:00 arasında yapılan itirazlar incelenir ve sonucu katılımcıya bildirilir. Ertesi günün 24 saatine ilişkin fiyat ve eşleşmeler, saat 14:00'da nihai olarak duyurulur. Her gün saat 00:00-17:00 arasında piyasa katılımcıları tarafından ikili anlaşma bildirimleri gün öncesi piyasası sistemine girilir. Eğer sistemden kaynaklanabilecek teknik arızalar olursa, piyasa işletmecisi tarafından arıza prosedürleri uygulanır [8].

Piyasanın daha etkin ve şeffaf şekilde yönetilmesiyle her geçen gün GÖP oranı daha da artmaktadır ve daha fazla katılımcı gün öncesi piyasasında işlem yapmaktadır.

1.1. Literatür Taraması

Literatürde, SGS ile ilgili yapılan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bunlardan son zamanlarda yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Pandzic ve arkadaşları, yenilenebilir kaynaklar, depolama sistemi ve KGS içeren bir SGS oluşturarak haftalık işletim planlamasını yapmışlardır. Optimizasyon problemi, uzun vadeli ikili sözleşmeler ve teknik kısıtlamalar göz önünde bulundurularak, SGS'nin haftalık kârını maksimum yapmayı hedefleyen Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama (KTDP) modeli olarak formüle edilmiştir [9].

Pandzic ve arkadaşları bir diğer çalışmalarında, RES, KGS ve PDHS içeren SGS oluşturmuşlardır. SGS işletim planlamasında, hem gün-öncesi hem de dengeleme elektrik piyasasında elektrik alım satım yaparak, beklenen kâr miktarını maksimum yapmak amaçlanmıştır [10].

Shayegan-Rad ve arkadaşları, RES, senkron dağıtık üretim birimi, elektrikli araçlar ve küçük pompaj depolamalı santral içeren SGS'nin gün-öncesi işletim planlamasını yapmışlardır. Aynı zamanda senkron dağıtık üretim biriminin karbondioksit (CO₂) emisyonunun etkisi, ceza maliyeti olarak amaç fonksiyonuna eklenmiştir [11].

Zamani ve arkadaşları, elektrik ve termal enerji sistemlerinden oluşan SGS'nin optimum gün-öncesi işletim planlaması için olasılıksal bir model önermişlerdir. Piyasa fiyatı, elektrik talebi ve yenilenebilir enerji üretimi gibi belirsiz parametreleri Nokta Tahmin Yöntemi (NTY) kullanarak modellemişlerdir [12].

Hadayeghparast ve arkadaşları, fotovoltaik paneller, rüzgâr türbinleri, elektrik enerjisi depolama sistemleri, kombine ısı ve güç sistemleri (kojenerasyon) ve ısı üretim birimi (İÜB) içeren SGS için enerji yönetimi modeli sunmuşlardır. Çok amaçlı problemde, SGS'nin gün öncesi kârını maksimum ve emisyonu minimum yapmak hedeflenmiştir. Rüzgâr hızı, güneş radyasyonu, piyasa fiyatı ve elektriksel yük gibi parametreler senaryo temelli yaklaşım kullanılarak modellenmiştir. Ayrıca, SGS'nin enerji yönetimini modellemek için iki aşamalı stokastik programlama uygulamışlardır. Çok amaçlı problemin çözümünde Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) yöntemini kullanmışlardır. [13].

Peik-Herfeh ve arkadaşları, gün öncesi elektrik piyasasında yer alan bir SGS'nin optimum teklifini belirlemek için olasılıksal Fiyat Tabanlı Birim Yüklenme (FTBY) yaklaşımını uygulamışlardır. Piyasa fiyatı ve üretim kaynaklarındaki belirsizlikleri modellemek için NTY yöntemini kullanmışlardır. Önerilen optimizasyon algoritmasını 18-baralı güç sistemi üzerinde uygulamışlardır [14].

Tan ve arkadaşları, elektrik piyasasındaki SGS'nin optimum teklif stratejisini belirlemek için gürbüz optimizasyon modeli oluşturmuşlardır. SGS, enerji depolama istasyonu, fotovoltaik enerji ve rüzgâr enerji sistemlerini içermektedir. Modelde enerji depolama istasyonunun şarj ve deşarj maliyeti ile iletim tıkanıklığı maliyetini de göz önünde bulundurmuşlardır [15].

Tascikaraoglu ve arkadaşları, rüzgâr, güneş, hidrojen enerji dönüşüm sistemleri ve termal enerji biriminden oluşan bir SGS'nin ekonomik işletimini önceden tanımlanmış bir güç profili sağlamak için belirlemişlerdir. Bunun için yük dağıtım algoritmaları ve meteorolojik durum tahmin algoritmalarını kullanmışlardır [16].

Arslan ve Karasan, sanal güç santralleri için enerji yönetimi modeli geliştirmişlerdir. SGS oluşumunun ve fişli (plug-in) hibrit araçların penetrasyonunun maliyet ve emisyon etkilerini analiz etmişlerdir [17].

Mahdavi ve Javidi, enerji ve rezerv piyasalarında yer alan SGS'nin teklifi için yeni bir matematiksel yaklaşım önermişlerdir. Bunun için Benders Ayrıştırma (BA) yöntemini kullanmışlardır ve sonuçları Genetik Algoritma (GA) sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Simülasyon sonuçları, BA yönteminin problemi çözmeye daha avantajlı olduğunu göstermiştir [18].

Ju ve arkadaşları, rüzgâr enerji santrali, fotovoltaik güç üretimi, biyokütle güç üretimi, enerji depolama sistemi, konvansiyonel gaz türbini içeren SGS oluşturmuşlardır. Üç amaç fonksiyonundan oluşan çok amaçlı optimizasyon modeli önermişlerdir. Problemlerinde amaç; maksimum kar, minimum işletim riski ve minimum karbon emisyonu sağlamaktır. Simülasyonlarında modifiye ettikleri IEEE30 sistemini kullanmışlardır [19].

Dietrich ve arkadaşları, rüzgâr enerjisi, fotovoltaik üretim, kombine ısı ve güç santrali ve esnek enerji taleplerinden oluşan bir SGS modellemiştir. Talep esnekliğini, piyasadaki enerji açığının ve fazlalığının alım satımlarından elde edilen kârı maksimum yapmak ve SGS'nin talebi mümkün olduğu kadar kendi üretimi ile karşılamasını sağlamak için kullanmışlardır [20].

Alahyari ve arkadaşları, rüzgâr enerjisi üretiminin yanında, elektriksel araçların şarj ve deşarj güçlerinin de gün-öncesi ve rezerv elektrik piyasalarında yer aldığı bir SGS oluşturmuşlardır. Çalışmalarında, elektrik piyasa fiyatı ve rüzgâr enerjisi üretimi belirsizliklerine ek olarak, elektrikli araç belirsizliklerini de modellemiştir [21].

Zamani ve arkadaşları, enerji ve rezerv piyasalarında katılım gösteren bir SGS'nin optimum elektrik ve termal enerji planlamasını yapmak için olasılıksal bir model önermişlerdir. Bu amaçla, SGS işletiminde bulunan belirsizliklerin modellenmesi için senaryo tabanlı karar verme yöntemi geliştirmişlerdir. Aynı zamanda talep tepkisi programlarını da çalışmalarında göz önünde bulundurmuşlardır [22].

Liu ve arkadaşları, SGS'nin dağıtım problemini çözmek için interval ve deterministik optimizasyonu birleştirmişlerdir. Önerdikleri metot, SGS'nin deterministik kârlarının yanı sıra, belirsizlikleri yönetmek için SGS'nin kâr aralıklarını da maksimum yapmaya çalışmaktadır [23].

Ju ve arkadaşları, power-to-gas (P2G) tabanlı yeni bir SGS tasarlamışlardır. Modellerinde maksimum kâr ve minimum işletim riski amaçlanmıştır. Belirsizlik riskleri için Koşullu Riske Maruz Değer (CVaR) ve gürbüz optimizasyon teorisini kullanmışlardır [24].

Luo ve arkadaşları, SGS'nin kısa vadeli işletimi için iki aşamalı bir işletim planı önermişlerdir. İlk aşamada, SGS'nin enerji piyasasındaki tekliflerini maksimum kâr elde etmek amaçlı optimize etmek için stokastik bir teklif modeli sunmuşlardır. Teklif modelinde SGS'nin dengesizlik maliyetlerini de göz önünde bulundurmuşlardır. İkinci aşamada ise gerçek zamanlı kontrol eylemlerini optimize etmek için model tahmin kontrol (model predictive control) tabanlı dağıtım modeli oluşturmuşlardır [25].

Zhou ve arkadaşları, enerji depolama sisteminin bozulma maliyetini de göz önünde bulundurarak SGS için yeni bir optimum üretim planlama modeli sunmuşlardır [26].

Fan ve arkadaşları, SGS gün-öncesi işletiminde ekonomi ve güvenilirlik arasında en uygun dengeyi sağlamak için fuzzy chance constraint programming metodunu kullanmışlardır. Belirsiz faktörleri bulanık parametreler ile, sistem rezerv gereksinimlerini ise chance kısıtlamaları ile modellemişlerdir [27].

Sadeghian ve arkadaşları, SGS'deki dağıtık üretim sistemlerinin daha uzun ömürlü kullanılması amacıyla SGS'nin bakım yönetimini önermişlerdir. Konvansiyonel dağıtık üretim sistemlerinin yanı sıra, rüzgâr türbinleri, fotovoltaik sistemler, enerji depolama sistemleri ve kesilebilir yükleri de SGS'nin yapısında düşünmüşlerdir [28].

Skarvelis-Kazakos ve arkadaşları, SGS'de bulunan bir grup mikro-jeneratörlerden kaynaklanan emisyonları kontrol etmek için bir metodoloji geliştirmişlerdir ve test etmişlerdir. Metodoloji, Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Planı'na dayanmaktadır [29].

Giron ve Omran, SGS'de bulunan farklı yenilenebilir enerji sistemlerinin üretim çıktılarını optimize eden bir simülasyon aracı sunmuşlardır. Çalışma, Hindistan'ın Kayathar bölgesinde kurulması planlanan SGS üzerinde yapılmıştır [30].

Xia ve Liu, toplam işletme maliyetini, satın alınan elektrik maliyetini, birim gelirlerini, arz-talep dengesini ve diğer kısıtlamaları göz önünde bulundurarak SGS'nin planlama modelini sunmuşlardır. CVaR değerlendirme metodunu da modele eklemişlerdir [31].

Kang ve arkadaşları, yenilenebilir enerji kaynakları belirsizliklerinin ele alınması, işletme maliyetlerinin azaltılması, sistem voltaj seviyelerinin düzenlenmesi gibi temel özellikleri göz önünde bulundurarak SGS'nin optimum enerji yönetimi için model önermişlerdir [32].

Dong ve arkadaşları, rüzgâr enerji santrali, kesilebilir yükler, pompaj depolamalı santral ve gaz türbininden oluşan SGS modeli sunmuşlardır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının güç çıkışı belirsizliğini ve talep tepkisi kaynaklarını da dikkate almışlardır [33].

Tan ve arkadaşları, rüzgâr enerji santrali, fotovoltaik üretim birimleri, konvansiyonel gaz türbini, enerji depolama sistemleri ve teşvik-bazlı talep tepkisinden (incentive-based demand response) oluşan SGS'nin planlama modelini oluşturmak için CVaR ve güven derecesi teorisi (confidence degree theory) metodlarını tanıtmışlardır. Simülasyon sistemi olarak IEEE30-baralı sistemi kullanmışlardır [34].

Ju ve arkadaşları, rüzgâr enerji santrali, fotovoltaik üretim birimleri, fişli elektrikli araç grubu ve konvansiyonel güç santralinden bir SGS oluşturmuşlardır. Amaç fonksiyonlarında, minimum sistem karşılama maliyeti, minimum kullanılmayan enerji maliyeti, maksimum işletim geliri elde etmeyi hedeflemişlerdir. Parçacık sürü optimizasyonu, entropi ağırlık metodu ve bulanık memnuniyet teorisi (fuzzy satisfaction theory) yöntemlerini kullanarak önerilen modeli çözmek için üç aşamalı hibrit akıllı çözüm algoritması geliştirmişlerdir [35].

Al-Awami ve arkadaşları, gün-öncesi ve gerçek-zamanlı piyasalarda, çeşitli dağıtık enerji kaynaklarından oluşan bir SGS için işletim modeli önermişlerdir. SGS'nin karşılaştığı belirsizlikleri de göz önünde bulundurarak, gün-öncesi teklif stratejisini optimize etmek için bulanık optimizasyon metodunu önermişlerdir [36].

Baringo, konvansiyonel güç santrali, rüzgâr enerjisi ünitesi, depolama tesisi ve esnek taleplerden oluşan, gün-öncesi ve gerçek-zamanlı enerji piyasalarında katılım gösteren bir SGS'nin teklif stratejisi için yeni bir yaklaşım önermişlerdir [37].

Giuntoli ve Poli, büyük bir SGS'nin gün öncesinde, termal ve elektriksel enerji planlamasını optimize etmek için yeni bir algoritma sunmuşlardır. Algoritma, dağıtık enerji sistemlerinin şebekedeki gerçek yerlerini ve belirli kapasitelerini de göz önünde bulundurmıştır [38].

Dabbagh ve Sheikh-El-Eslami, ortak enerji piyasası ve rezerv servisinde enerji ticareti için yer alan bir SGS'nin, riskten kaçınan (risk averse) optimum teklif modeli için iki aşamalı stokastik programlama yaklaşımı önermişlerdir. Kâr değişkenliği riskini kontrol etmek için CVaR kullanmışlardır [39].

Lazaroiu ve arkadaşları, gün-öncesi piyasası ve yeşil sertifika piyasalarına katılan bir SGS sahibinin kârını maksimum yapmayı hedeflemişlerdir. RES ve fotovoltaik sistemler gibi aralıklı yenilenebilir enerji sistemlerinden oluşan SGS'yi; düşük, orta ve yüksek üretim miktarlarına göre üç senaryoda analiz etmişlerdir [40].

Tajeddini ve arkadaşları, günlük işletim kârını etkileyen risk faktörlerini göz önünde bulundurarak, bir SGS'nin optimum çalışma modelini ele almışlardır. Optimum işletim, üretim şirketlerinin kârını maksimum yapmak için, iki aşamalı stokastik KTDP olarak, hem gün-öncesi hem de dengeleme piyasalarında modellenmiştir. Düşük kâr senaryoları riskini kontrol etmek için, bir risk ölçüm tekniği olan CVaR kullanılmıştır [41].

Kasaei ve arkadaşları, rüzgâr türbini, fotovoltaik sistem ve yakıt hücresi bileşenlerinin işletme maliyetlerini minimum yapmak ve batarya enerji depolama sisteminin şarj ve

deşarj sürelerini optimize etmek için, SGS'nin optimum enerji yönetimi stratejisine karar vermişlerdir. Bunun için bir optimizasyon tekniği olan öğretime-öğrenme temelli optimizasyon (teaching-learning based optimization) metodunu kullanmışlardır [42].

Ju ve arkadaşları, rüzgâr ve güneş gücünün SGS üzerindeki belirsizlik etkisini azaltmak için, gürbüz optimizasyon teorisini tanıtmışlardır. Bunun için, belirsizlik, fiyat-bazlı talep tepkisi ve teşvik-bazlı talep tepkisi konularını göz önünde bulundurarak, SGS için stokastik bir planlama modeli oluşturmuşlardır [43].

Rahimiyan ve Baringo, gün-öncesi ve gerçek-zamanlı piyasalarda katılım gösteren bir SGS'nin optimum teklif stratejisi için, iki-aşamalı gürbüz optimizasyon yaklaşımını sunmuşlardır [44].

Kasaei ve arkadaşları, 24 saatlik zaman aralığında, kayıp enerji maliyetini de göz önünde bulundurarak, SGS'nin toplam işletme maliyetini minimum yapmayı amaçlamışlardır. Problemin çözümünde, meta-sezgisel optimizasyon algoritması olan Imperialist Competitive Algoritmasını kullanmışlardır [45].

Shabanzadeh ve arkadaşları, SGS'lerin günlük ve haftalık planlaması için gürbüz optimizasyon bazlı karar verme aracı önermişlerdir. Çalışmalarında risk yönetimi stratejisini de dikkate almışlardır [46].

Sharma ve Mishra, SGS'nin potansiyelini ve etkilerini belirlemek için, bir kamu enerji birimi olan Punjab State Power Corporation Limited üzerinde çalışmışlardır. Bunun için, KTDP bazlı karar verme aracı olan Distributed Energy Resources Customer Adoption Model'den yararlanmışlardır [47].

Shafiekhani ve arkadaşları, gün-öncesi ve düzenleme piyasalarında, rakipleri yani diğer üretim şirketleri ile birlikte yer alan, konvansiyonel birimleri, rüzgar ünitesi ve kesilebilir yüklerden oluşan bir SGS'nin optimum stratejik teklifi için bir metod önermişlerdir [48].

Li ve arkadaşları, SGS'nin fizibilitesini, yerel yenilenebilir güç santrali ve elektrik kullanıcılarında bulunan yüksek verimli cihazların güncelleme yoluyla analiz etmeyi amaçlamışlardır. Sonuçlar, Chongming'de mevcut politikalara dayanarak, gücün kendi kendini yenilemesi yeterliliğini artırmak için rüzgâr ve fotovoltaiik santrallerinin optimum birleştirilmesi oranının uygun olduğunu göstermiştir [49].

SGS yönetimi ile ilgili literatürde son zamanlarda yapılan önemli çalışmalar ve bu tezde önerilen çalışma karşılaştırmalı olarak Çizelge 1.1'de verilmiştir. Amaç fonksiyonunda genelde maliyeti minimum yapmak/kârı maksimum yapmak hedeflenmektedir. Maliyet/kâr hesabı yapılırken SGS modeli KGS içeriyorsa bu sistemin işletim maliyeti amaç fonksiyonunda hesaba katılmaktadır. Literatürde eksiklik olarak enerji depolama sisteminin maliyetinin çoğunlukla dikkate alınmadığı görülmüştür. Daha gerçekçi bir SGS işletim planlaması yapmak ve işletim riskini azaltmak için, enerji depolama sisteminin maliyeti de göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin enerji depolama sistemlerinden bataryaların kullanım ömrünü deşarj miktarı, ortam sıcaklığı, yüksek deşarj akımları gibi faktörler azaltmaktadır, bu da SGS katılımcısı için maliyete neden olmaktadır. Batarya bozulma maliyeti, toplam maliyet üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu yüzden, SGS problemlerinin planlamasına dahil edilmelidir. Literatürde diğeri bir eksiklik olarak emisyonun amaç fonksiyonunda ele alınmadığı gözlemlenmiştir. Çağımızın sorunu olan küresel ısınma ve çevresel problemler nedeniyle emisyon salınımları da güç sistemi işletim planlaması yapılırken dikkate alınmalıdır. SGS yönetiminde yenilenebilir enerji sistemlerinin güç çıkışlarının belirsizliğinden dolayı belirsizlik analizi de ele alınması gereken diğeri konulardandır. Belirsizlik analizi ile amaç fonksiyonu senaryolardan ve bu senaryoların olasılıklarından oluşmaktadır. Bundan dolayı, düşük kâr senaryoları ile karşılaşma riski de olmaktadır. Bu yüzden SGS operatörünün karşılaşabileceği düşük kâr senaryolarına karşı risk analizi de yapılmalıdır. Literatürde risk analizinin yapılması konusunda da eksiklik olduğu tespit edilmiştir. Önerilen çalışma bu eksikliklerin hepsini ele alarak literatürdeki eksiklikleri tamamlamıştır.

Çizelge 1.1. SGS yönetimi ile ilgili literatürdeki önemli çalışmalar (2013-2019) ve önerilen çalışma karşılaştırması

| Çalışma | Amaç fonksiyonu | | | | Belirsizlik Analizi | Çözüm Metodu | |
|--------------------------------|----------------------|----------------------------------|---------|------|---------------------|------------------------|-------|
| | Kâr/Maliyet | | Emisyon | Risk | | Matematiksel | Diğer |
| | KGS İşletim Maliyeti | Enerji Depolama Sistemi Maliyeti | | | | | |
| Pandzic vd. (2013) [9] | ✓ | - | - | - | ✓ | ✓ (GAMS/ CPLEX) | - |
| Pandzic vd. (2013) [10] | ✓ | - | - | - | ✓ | ✓ (GAMS/ CPLEX) | - |
| Shayegan-Rad vd. (2017) [11] | ✓ | - | ✓ | - | ✓ | ✓ (GAMS/ CPLEX) | - |
| Zamani vd. (2016) [12] | ✓ | ✓ | - | ✓ | ✓ | ✓ (GAMS/ CPLEX) | - |
| Hadayeghparast vd. (2019) [13] | ✓ | - | ✓ | - | ✓ | - | ✓ |
| Peik-Herfeh vd. (2013) [14] | ✓ | - | - | - | ✓ | ✓ (GAMS) | - |
| Tan vd. (2018) [15] | - | - | - | ✓ | ✓ | ✓ (GAMS/ CPLEX) | - |
| Tascikaraoglu vd. (2014) [16] | ✓ | - | - | - | ✓ | - | ✓ |
| Mahdavi ve Javidi (2014) [18] | ✓ | ✓ | - | - | - | - | ✓ |
| Dietrich vd. (2015) [20] | ✓ | - | ✓ | - | - | ✓ (GAMS/ CPLEX) | - |
| Alahyari vd. (2019) [21] | - | ✓ | - | ✓ | ✓ | - | ✓ |
| Zamani vd. (2016) [22] | ✓ | ✓ | - | - | ✓ | ✓ (GAMS/ XPRESS) | - |
| Liu vd. (2018) [23] | ✓ | ✓ | - | ✓ | ✓ | - | ✓ |
| Ju vd. (2019) [24] | ✓ | - | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ (GAMS/ CPLEX) | - |
| Luo vd. (2015) [25] | ✓ | ✓ | - | ✓ | ✓ | - | ✓ |

Çizelge 1.1. (devam)

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|--------------------------|---|
| Zhou vd. (2015) [26] | ✓ | ✓ | - | ✓ | ✓ | ✓ (IBM ILOG CPLEX) | - |
| Fan vd. (2016) [27] | ✓ | - | - | ✓ | ✓ | - | ✓ |
| Sadeghian vd. (2019) [28] | ✓ | ✓ | - | ✓ | ✓ | ✓ (GAMS) | - |
| Skarvelis-Kazakos vd. (2013) [29] | ✓ | - | ✓ | - | - | - | ✓ |
| Xia ve Liu (2016) [31] | ✓ | - | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ (MATLAB CPLEX) | - |
| Kang vd. (2017) [32] | ✓ | - | - | - | ✓ | - | ✓ |
| Tan vd. (2017) [34] | ✓ | ✓ | - | ✓ | ✓ | ✓ (GAMS/ CPLEX) | - |
| Ju vd. (2016) [35] | ✓ | - | - | ✓ | ✓ | - | ✓ |
| Al-Awami vd. (2017) [36] | ✓ | - | - | - | ✓ | - | ✓ |
| Baringo (2017) [37] | ✓ | - | - | ✓ | ✓ | ✓ (GAMS/ CPLEX) | - |
| Giuntoli ve Poli (2013) [38] | ✓ | - | - | - | - | - | ✓ |
| Dabbagh ve Sheikh-El-Eslami (2016) [39] | ✓ | - | - | ✓ | ✓ | ✓ (GAMS/ CPLEX) | - |
| Tajeddini vd. (2014) [41] | ✓ | - | - | ✓ | ✓ | ✓ (GAMS/ CPLEX) | - |
| Önerilen çalışma | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ (GAMS/ LINDO) | - |

Problemimiz Karışık Tamsayı Doğrusal Olmayan Programlama (KTDO) olarak Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (GAMS) yazılımında modellenmiştir. KTDO modelinin çözümü için GAMS yazılımının çeşitli çözümleri kullanılabilir. Fakat bu çözümler doğrusal olmayan kısıtlamalarla sınırlı olmasından dolayı, uygun bir

çözüm bulmakta zorlanmaktadır. Bu yüzden, bu çalışmada, uygun çözümü bulabilen, doğrusal olmayan problemlere global optimum çözümleri bulmayı garanti eden, kısa sürede çözümü elde eden ve literatürde SGS yönetimi problemlerinin çözümünde kullanımına rastlanmayan LINDO çözücüsü kullanılmıştır.

1.2. Tezin Amacı

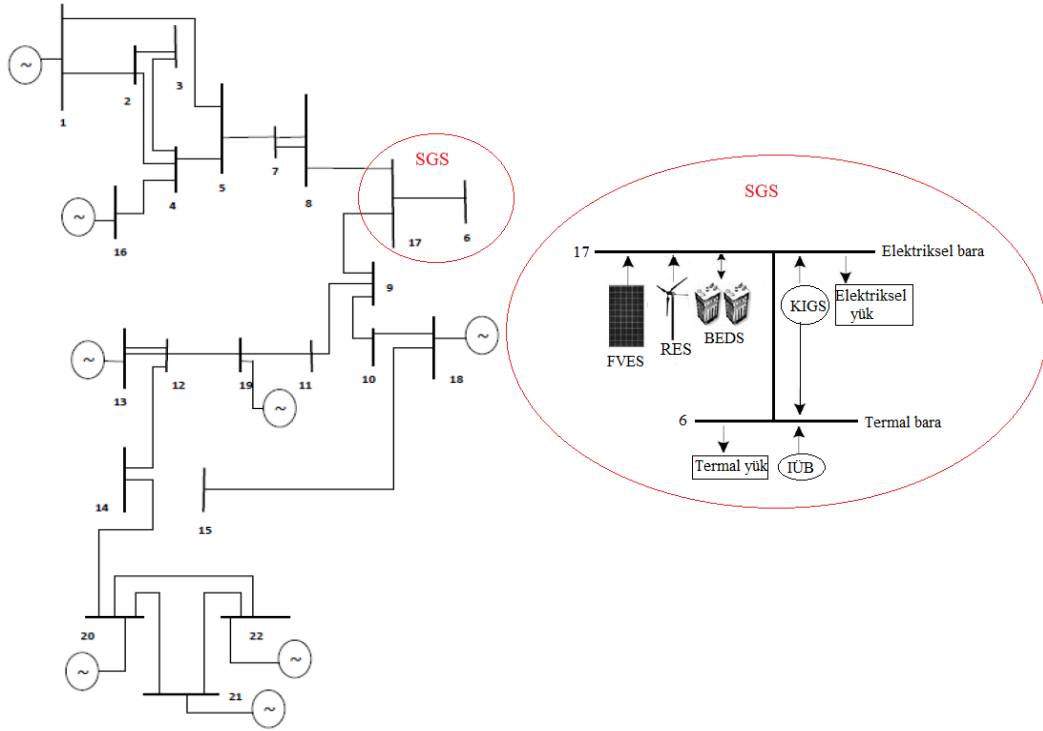
Bu tez çalışmasında, gün öncesi elektrik piyasasına katılan bir SGS'nin optimum teklif ve işletme stratejisini belirlemek amaçlanmıştır. Çalışmada sunulan SGS; RES, FVES, KIGS, IÜB ve BEDS'den oluşmaktadır. Literatürde SGS ile ilgili olan çalışmalardaki eksiklikler incelenmiş ve bu çalışmada bu eksiklikler giderilmeye çalışılmıştır. Bu eksikliklerden biri emisyon salınımlarının dikkate alınmamasıdır. Özellikle konvansiyonel dağıtık enerji kaynaklarının neden oldukları sera gazları, çevre üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır. Bu nedenle, çalışmalarda SGS planlaması yapılırken emisyonun minimum yapılması da dikkate alınmalıdır. Literatürdeki SGS enerji yönetimi problemlerinde, emisyonu göz önünde bulundurmeyen oldukça fazla çalışma bulunmaktadır [11, 47]. Bu çalışmada emisyon, minimum yapılması gereken bir faktör olarak amaç fonksiyonuna dahil edilmiştir. Bir diğer eksiklik de enerji depolama sisteminin maliyetinin dikkate alınmamasıdır. Daha gerçekçi bir SGS işletim planlaması yapmak ve işletim riskini azaltmak için, enerji depolama sisteminin maliyeti de göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin enerji depolama sistemlerinden bataryaların, fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı çevrim ömrü (cycle life) olarak adlandırılan sınırlı bir ömrü vardır [24, 48]. Dolayısıyla, deşarj derinliği (DoD), ortam sıcaklığı, yüksek deşarj akımları gibi faktörler bataryanın kullanım ömrünü azaltmaktadır [49, 50], bu da SGS katılımcısı için maliyete neden olmaktadır. Batarya bozulma maliyeti, toplam maliyet üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu yüzden, SGS problemlerinin planlamasına dahil edilmelidir.

Literatürdeki çalışmaların eksikliklerini gidermenin amaçlandığı bu çalışmada aşağıda verilenler yapılarak literatüre katkı sağlanmıştır.

- Gün öncesi elektrik piyasasında yer alan bir SGS'nin hem maksimum kâr elde etmesi hem de minimum emisyon oluşturması düşünülerek çok-amaçlı bir optimizasyon problemi oluşturulmuştur.
- Çok amaçlı problemi çözmek amacıyla Pareto-tabanlı yaklaşım sunulmuştur. Elde edilen Pareto-optimum sonuçlar arasından hem kârı hem de emisyonu düşünün en iyi çözüm seçilmiştir. Bunun için Bulanık TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemi kullanılmıştır.
- SGS, hem elektriksel yükü hem de termal yükü karşılayacak şekilde işletilmiştir.
- Rüzgâr türbinleri, fotovoltaik paneller, kombine ısı ve güç santrali, enerji depolama sistemleri, tek ısı birimi gibi çeşitli DEK teknolojileri SGS içinde yer almıştır.
- SGS'nin işletme maliyetinin hesaplamasında, literatürdeki birçok çalışmada enerji depolama sisteminin maliyetinin ele alınmadığı gözlemlenmiştir. Bunun için SGS'de yer alan batarya enerji depolama sistemi için batarya bozulma maliyeti (battery degradation cost) de amaç fonksiyonuna eklenmiştir.
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının güç çıkışları belirsiz olduğundan güç sisteminde kararsızlığa yol açmaktadır. Bu yüzden rüzgâr hızı ve güneş radyasyonu gibi rüzgâr ve güneş enerjisi santrallerinin çıkış gücünü etkileyen belirsiz parametreler için belirsizlik analizi yapılmıştır.
- Düşük kâr senaryoları için risk değerlendirmesi de çalışmaya eklenmiştir. Bunun için risk ölçüm yöntemi olan CVaR kullanılmıştır.

1.3. Sistem Tanımı

Bu çalışmada, Türkiye’de bulunan 380 kV’luk 22 baralı enterkonekte güç sistemi [54] modifiye edilerek bu güç sistemi üzerinde önerilen SGS modeli oluşturulmuştur. Bu SGS modeli RES, FVES, KIGS, IÜB ve BEDS’den oluşmaktadır ve Şekil 1.3’de gösterilmektedir. RES ve FVES’nin nominal kapasiteleri sırasıyla 5.4 MW ve 4.1 MW’dır. KIGS’nin üretebileceği minimum ve maksimum güç değerleri sırasıyla 0.81 MW ve 2.47 MW, üretebileceği minimum ve maksimum ısı değerleri ise sırasıyla 0 MWth ve 1.8 MWth’dır. IÜB’nin üretebileceği maksimum ısı değeri 1.2 MWth’dır. BEDS’nin depoladığı minimum ve maksimum enerji değerleri sırasıyla 0.141 MWh ve 1.273 MWh’dır.



Şekil 1.3. SGS sistemi

Şekil 1.3’de görüldüğü gibi 22 baralı enterkonekte güç sisteminde 8 adet jeneratör barası bulunmaktadır. Bu baralar 1, 13, 16, 18, 19, 20, 21 ve 22 numaralı baralardır.

Oluşturulan SGS modelinde, 1 adet RES, 1 adet FVES, 1 adet KIGS ve 1 adet BEDS 17 numaralı baraya yerleştirilmiştir ve bu bara elektriksel yük barası olarak düşünülmüştür. Elektriksel yük 17 numaralı baradan karşılanmaktadır. 1 adet İÜB ise 6 numaralı baraya yerleştirilmiştir. Bu bara ise termal yük barası olarak kabul edilmiştir ve termal yük bu baradan karşılanmaktadır. KIGS, hem elektriksel yükü, hem de termal yükü karşıladığından iki bara için de enerjiyi kontrol etmektedir.

1.3.1. SGS Bileşenlerinin Matematiksel Modellemesi

SGS'yi oluşturan RES, FVES, KIGS, İÜB ve BEDS bileşenlerinin matematiksel modellemesi bu bölümde açıklanmıştır.

1.3.1.1. Rüzgâr Enerji Santrali Modeli

Rüzgâr türbinleri, elektrik enerjisi üretimine devreye girme (cut-in) hızı olarak bilinen belirli bir rüzgâr hızında başlayabilir. Devreden çıkma (cut-out) rüzgâr hızına ulaştığında ise dururlar. Yani, rüzgâr türbinleri devreye girme ve devreden çıkma rüzgâr hızları arasında elektrik üretmektedirler. Her bir rüzgâr türbini için belirlenmiş bir rüzgâr hızında, sistemden elde edilen güç en büyük değere ulaşmaktadır. Bu en büyük güce nominal güç ve bu rüzgâr hızına nominal hız denilmektedir. Modern rüzgâr türbinlerinin devreye girme hızları 2-4 m/s, nominal hızları 10-15 m/s ve devreden çıkma hızları ise 25-35 m/s arasındadır [55]. Rüzgâr hızına bağlı olarak hesaplanan RES çıkış gücü Eşitlik 1.1'de verilmiştir [11, 47].

$$P_{s,t}^{wpp}(v_{s,t}) = N^{wind} \times \begin{cases} 0, & v_{s,t} < v_{in} \\ P_{rtd}^{wt} \times \left(\frac{v_{s,t}-v_{in}}{v_{rtd}-v_{in}}\right)^3, & v_{in} \leq v_{s,t} \leq v_{rtd} \\ P_{rtd}^{wt}, & v_{rtd} \leq v_{s,t} < v_{out} \\ 0, & v_{out} \leq v_{s,t} \end{cases} \quad (1.1)$$

Eşitlik 1.1’de, $P_{s,t}^{wpp}$, RES’in t. zaman ve s. senaryodaki güç çıkışını (MW), N^{wind} , RES’deki rüzgâr türbinleri sayısını, $v_{s,t}$, t. zaman ve s. senaryodaki rüzgâr hızını (m/s), v_{in} , v_{rtd} , v_{out} , sırasıyla devreye girme, nominal ve devreden çıkma rüzgâr hızlarını (m/s), P_{rtd}^{wt} , rüzgâr türbininin nominal gücünü (MW) göstermektedir. Rüzgâr hızının nominal rüzgâr hızından yüksek değerlerinde türbin hızı kontrol edilerek çıkış gücü nominal güç sınırında tutulmaktadır.

Bu çalışmada, RES’nin nominal kapasitesi 5.4 MW’dır ve rüzgâr türbini olarak Enercon E-66 kullanılmıştır. Bu türbinin parametreleri ve değerleri Çizelge 1.2’de verilmiştir [57].

Çizelge 1.2. Rüzgâr türbini parametreleri ve değerleri

| Türbin tipi | N^{wind} | P_{rtd}^{wt} | v_{in} | v_{rtd} | v_{out} |
|--------------|------------|----------------|----------|-----------|-----------|
| Enercon E-66 | 3 | 1800 kW | 2.5 m/s | 12 m/s | 28 m/s |

Çizelge 1.2’de görüldüğü gibi, RES’de 3 adet rüzgâr türbini bulunmaktadır. Her bir türbinin nominal güç değeri, yani türbinden elde edilebilecek en büyük güç değeri 1800 kW’dır. Türbinin devreye girme hızı 2.5 m/s, nominal hızı 12 m/s ve devreden çıkma hızı 28 m/s’dir.

1.3.1.2. Fotovoltaik Enerji Santrali Modeli

Fotovoltaik enerji santralının çıkış gücü, güneş radyasyonuna, bölgenin sıcaklığına ve fotovoltaik panellerin özelliklerine bağlıdır ve Eşitlik 1.2-1.6 kullanılarak hesaplanmaktadır [11, 20].

$$T_{s,t}^{cell} = T_t^{amb} + SR_{s,t} \times \left(\frac{NOT_{cell}-20}{0.8} \right) \quad (1.2)$$

$$I_{s,t} = SR_{s,t} \times [I_{scc} + K_{ctc} \times (T_{s,t}^{cell} - 25)] \quad (1.3)$$

$$V_{s,t} = V_{ocv} - K_{vtc} \times T_{s,t}^{cell} \quad (1.4)$$

$$FL = \frac{V_{Max} \times I_{Max}}{V_{ocv} \times I_{scc}} \quad (1.5)$$

$$P_{s,t}^{pvpp} (SR_{s,t}) = N^{pv} \times FL \times V_{s,t} \times I_{s,t} \quad (1.6)$$

Eşitlik 1.2-1.6'da, $T_{s,t}^{cell}$, güneş panelinin t. zaman ve s. senaryodaki sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), T_t^{amb} , t. zamandaki bölgenin sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), $SR_{s,t}$, t. zaman ve s. senaryodaki güneş radyasyonunu (kW/m^2), NOT_{cell} , güneş panelinin nominal işletim sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), I_{scc} , güneş panelinin kısa devre akımını (A), K_{ctc} , güneş panelinin akım sıcaklık katsayısını ($\text{A}/^{\circ}\text{C}$), V_{ocv} , güneş panelinin açık devre gerilimini (V), K_{vtc} , güneş panelinin gerilim sıcaklık katsayısını ($\text{V}/^{\circ}\text{C}$), FL , güneş panelinin doldurma faktörünü (fill factor), V_{Max} , güneş panelinin maksimum güç noktasındaki gerilimini (V), I_{Max} , güneş panelinin maksimum güç noktasındaki akımını (A), N^{pv} , FVES'deki güneş panelleri sayısını, $P_{s,t}^{pvpp}$, FVES'nin t. zaman ve s. senaryodaki çıkış gücünü (MW) göstermektedir. Nominal işletim sıcaklığı, güneş panellerinin, $800 \text{ W}/\text{m}^2$ ışıyım, $1 \text{ m}/\text{s}$ rüzgâr hızı ve 20 C° ortam koşullarındaki sıcaklığıdır.

Bu çalışmada, FVES'nin nominal gücü 4.1 MW 'dır ve kullanılan güneş panelinin parametreleri ve değerleri Çizelge 1.3'de verilmiştir [13].

Çizelge 1.3. Güneş paneli parametreleri [13]

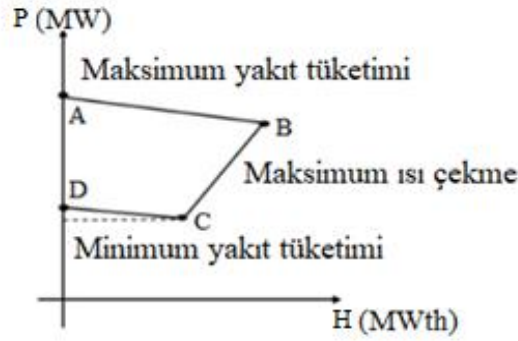
| V_{ocv} | I_{scc} | K_{ctc} | K_{vtc} | NOT_{cell} | V_{Max} | I_{Max} |
|-----------|-----------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------|-----------|-----------|
| 21.98 V | 5.32 A | 0.00122 A/ $^{\circ}\text{C}$ | 0.0144 V/ $^{\circ}\text{C}$ | 43 $^{\circ}\text{C}$ | 17.32 V | 4.76 A |

Çizelge 1.3'de görüldüğü gibi, her bir panelin açık devre gerilimi 21.98 V, kısa devre akımı 5.32 A değerindedir. Maksimum güç noktasındaki gerilimi 17.32 V ve

maksimum güç noktasındaki akımı 4.76 A değerindedir. Nominal işletim sıcaklığı 43 C°'dir.

1.3.1.3. Kombine Isı ve Güç Santrali Modeli

Kojenerasyon olarak da bilinen Kombine Isı ve Güç Santrali, entegre bir sistemde aynı anda elektrik ve ısı üretir, böylece enerji maliyetini düşürür ve enerji tasarrufu sağlar. Bu santral, elektriksel ve termal çıkış gücünü birbirinden bağımsız olduğunu varsayan Uygulanabilir Çalışma Bölgesine (FOR) bağlı olarak elektrik ve ısı üretir. Bu çalışmada, Şekil 1.4'de gösterilen gibi dışbükey FOR ile birinci tip Kombine Isı ve Güç ünitesi [58] ele alınmıştır.



Şekil 1.4. Birinci tip Kombine Isı ve Güç Santrali için çalışma bölgesi [58]

Birinci tip KIGS ünitesini modellemek için Eşitlik 1.7-1.11 kullanılmıştır [11, 49].

$$P_{chp}^t - P_{chp}^A - \frac{P_{chp}^A - P_{chp}^B}{H_{chp}^A - H_{chp}^B} (H_{chp}^t - H_{chp}^A) \leq 0 \quad (1.7)$$

$$P_{chp}^t - P_{chp}^B - \frac{P_{chp}^B - P_{chp}^C}{H_{chp}^B - H_{chp}^C} (H_{chp}^t - H_{chp}^B) \geq (1 - V_{chp}^t \times K) \quad (1.8)$$

$$P_{chp}^t - P_{chp}^C - \frac{P_{chp}^C - P_{chp}^D}{H_{chp}^C - H_{chp}^D} (H_{chp}^t - H_{chp}^C) \geq (1 - V_{chp}^t \times K) \quad (1.9)$$

$$0 \leq P_{chp}^t \leq P_{chp}^A \times V_{chp}^t \quad (1.10)$$

$$0 \leq H_{chp}^t \leq H_{chp}^B \times V_{chp}^t \quad (1.11)$$

Eşitlik 1.7-1.11’de, P_{chp}^t , KIGS’nin t. zamandaki elektriksel çıkış gücünü (MW), P_{chp}^A ve H_{chp}^B , sırasıyla elektrik ve ısı üretiminin maksimum işletme noktalarını, P_{chp}^C ve H_{chp}^D , sırasıyla elektrik ve ısı üretiminin minimum işletme noktalarını, H_{chp}^t , KIGS’nin t. zamandaki termal çıkış gücünü (MWth) göstermektedir. V_{chp}^t , t. zamanda KIGS’nin yüklenme durumunu gösteren ikili değerdir (0,1). K ise pozitif sonsuza yakın büyük bir sayıdır.

Elektriksel ve termal çıkış gücüne bağlı olarak KIGS’nin işletme maliyetinin hesaplanması Eşitlik 1.12’de verilmiştir. KIGS’nin toplam maliyeti, Eşitlik 1.13’de gösterildiği gibi, işletme maliyeti, birim açma ve birim kapatma maliyetlerinden oluşmaktadır. Ünitenin başlatma ve kapatma durumları sırasıyla Eşitlik 1.14 ve Eşitlik 1.15’de gösterilmiştir.

$$C_{op}^{chp,t} = a_p \times (P_{chp}^t)^2 + b_p \times P_{chp}^t + c_p + d_p \times (H_{chp}^t)^2 + e_p \times H_{chp}^t + f_p \times (P_{chp}^t \times H_{chp}^t) \quad (1.12)$$

$$C_{to}^{chp,t} = C_{op}^{chp,t} + C_{su}^{chp} \times XU_{chp}^t + C_{sd}^{chp} \times XD_{chp}^t \quad (1.13)$$

$$XU_{chp}^t = V_{chp}^t \times (1 - V_{chp}^{(t-1)}) \quad (1.14)$$

$$XD_{chp}^t = (1 - V_{chp}^{(t-1)}) \times V_{chp}^t \quad (1.15)$$

Eşitlik 1.12-1.15’de, $C_{op}^{chp,t}$, KIGS’nin t. zamandaki işletim maliyetini (\$/MWh), $C_{to}^{chp,t}$, KIGS’nin t. zamandaki toplam maliyetini, a_p , b_p , c_p , d_p , e_p ve f_p , birimin

maliyet katsayılarını, C_{su}^{chp} ve C_{sd}^{chp} , sırasıyla birimin başlatma ve kapatma maliyetlerini göstermektedir. XU_{chp}^t ve XD_{chp}^t , t. zamanda sırasıyla birimin başlatma ve kapatma durumlarını belirten ikili değerlerdir (0,1).

Bu çalışmada KIGS'nin üretebileceği minimum ve maksimum güç değerleri sırasıyla 0.81 MW ve 2.47 MW, üretebileceği minimum ve maksimum ısı değerleri ise sırasıyla 0 MWth ve 1.8 MWth'dir. KIGS'de kullanılan birimin parametreleri ve değerleri Çizelge 1.4'de verilmiştir [13].

Çizelge 1.4. Kombine Isı ve Güç Santrali biriminin parametreleri ve değerleri [13]

| Parametreler | Değerler |
|--------------------------|---|
| a_p | 0.0435 (\$/MW ²) |
| b_p | 56 (\$/MW) |
| c_p | 12.5 (\$) |
| d_p | 0.027 (\$/MWth ²) |
| e_p | 0.6 (\$/MWth) |
| f_p | 0.011 (\$/MW·MWth) |
| C_{su}^{chp} | 20 (\$) |
| C_{sd}^{chp} | 20 (\$) |
| FOR koordinatları [P, H] | [2.47,0], [2.15,1.8], [0.81,1.048], [0.988,0] |

Çizelge 1.4, KIGS biriminin maliyet katsayıları (a_p , b_p , c_p , d_p , e_p ve f_p) parametrelerinin değerlerini, başlatma (C_{su}^{chp}) ve kapatma (C_{sd}^{chp}) maliyetlerini göstermektedir. FOR koordinatları, Şekil 1.4'deki P-H grafiğindeki A, B, C ve D noktalarının koordinatlarını göstermektedir. Örneği A noktası, P ekseninde 2.47, H ekseninde 0 değerine karşılık gelen noktadır. A noktasının koordinatı [2.47, 0], B noktasının koordinatı [2.15, 1.8], C noktasının koordinatı [0.81, 1.048], D noktasının koordinatı [0.988, 0]'dir.

1.3.1.4. Isı Üretim Birimi Modeli

IÜB, termal yükü sağlamak için kullanılmaktadır. IÜB'nin ısı üretim maliyeti Eşitlik 1.16 ile hesaplanır [11, 50].

$$C_{ho}^t = \alpha_p \times (H_{ho}^t)^2 + \beta_p \times H_{ho}^t + \gamma_p \quad (1.16)$$

Eşitlik 1.16'da, C_{ho}^t , t. zamanda IÜB'nin maliyetini, α_p , β_p , ve γ_p , IÜB'nin maliyet katsayılarını, H_{ho}^t , t. zamanda IÜB'nin termal çıkış gücünü (MWth) göstermektedir. IÜB işletimindeki kısıtlama Eşitlik 1.17'de verilmiştir.

$$0 \leq H_{ho}^t \leq H_{ho}^{max} \quad (1.17)$$

Eşitlik 1.17'de, H_{ho}^{max} , IÜB'nin maksimum termal çıkış gücünü göstermektedir.

Bu çalışmada kullanılan IÜB'nin üretebileceği maksimum ısı değeri 1.2 MWth'dir ve parametreler ile değerleri Çizelge 1.5'de verilmiştir [13].

Çizelge 1.5. Isı üretim birimi parametreleri ve değerleri [13]

| Parametreler | Değerler |
|----------------|----------------------------|
| H_{ho}^{max} | 1.2 MWth |
| α_p | 0.052 \$/MWth ² |
| β_p | 3.0651 \$/MWth |
| γ_p | 4.8 \$ |

Çizelge 1.5'de, IÜB'nin maliyet katsayıları (α_p , β_p , ve γ_p) parametrelerinin değerleri verilmiştir. IÜB'nin maksimum termal çıkış gücü 1.2 MWth'dir.

1.3.1.5. Batarya Enerji Depolama Sistemi Modeli

Bu çalışmada, BEDS olarak Kurşun-asit (Lead-acid) batarya kullanılmıştır. BEDS'nin işletim kısıtlamaları Eşitlik 1.18-1.24'de verilmiştir [11, 49].

$$0 \leq P_{ch}^t \leq P_{ch}^{max} \times z_{ch}^t \quad (1.18)$$

$$0 \leq P_{dis}^t \leq P_{dis}^{max} \times z_{dis}^t \quad (1.19)$$

$$E_{bess}^{min} \leq SoC^t \leq E_{bess}^{max} \quad (1.20)$$

$$SoC^{(t=0)} = E_{bess}^{initial} \quad (1.21)$$

$$SoC^{(t=24)} = E_{bess}^{final} \quad (1.22)$$

$$z_{ch}^t + z_{dis}^t \leq 1 \quad (1.23)$$

$$SoC^t = SoC^{(t-1)} + \eta_{ch} \times P_{ch}^t - \frac{P_{dis}^t}{\eta_{dis}} \quad (1.24)$$

Eşitlik 1.18-1.24'de, P_{ch}^t ve P_{dis}^t , sırasıyla t. zamanda BEDS'nin şarj ve deşarj güçlerini (MW), P_{ch}^{max} and P_{dis}^{max} , sırasıyla BEDS'nin maksimum şarj ve deşarj güçlerini (MW), E_{bess}^{min} ve E_{bess}^{max} , sırasıyla BEDS'de depolanan minimum ve maksimum enerjiyi (MWh), $E_{bess}^{initial}$ ve E_{bess}^{final} , sırasıyla BEDS'nin başlangıçta ve bitişte bulunan enerji seviyesini (MWh), η_{ch} ve η_{dis} , sırasıyla BEDS'nin şarj ve deşarj verimini, SoC^t , t. zamanda BEDS'nin şarj durumunu göstermektedir. z_{ch}^t ve z_{dis}^t ise, sırasıyla t. zamanda BEDS'nin şarj ve deşarj durumlarını gösteren ikili değerlerdir (0,1).

Daha önce bahsedildiği gibi, bu çalışmada bataryanın bozulma maliyeti dikkate alınmıştır. Batarya bozulma maliyetini modellemek için, batarya ömrünü etkileyen DoD ve ortam sıcaklığı parametreleri göz önünde bulundurulmuştur. Her saat için DoD Eşitlik 1.25 kullanılarak hesaplanır [26].

$$DoD^t = 1 - \frac{SoC^t}{E_{bess}^{max}} \quad (1.25)$$

Bataryanın kullanım ömrü ile DoD arasındaki ilişki Eşitlik 26 ile ifade edilir [26].

$$L_{DoD} = a \times DoD + b \quad (1.26)$$

Eşitlik 1.26'da, L_{DoD} , çevrim sayısı olarak bataryanın kullanım ömrünü, a ve b, sırasıyla DoD'ye bağlı olan kullanım ömrü katsayılarını göstermektedir (a=-4230 ve b=4332).

Bataryanın kullanım ömrü ile ortam sıcaklığı arasındaki ilişki Eşitlik 1.27 ile ifade edilir [26].

$$L_{temp} = m \times \exp(\varphi T) \quad (1.27)$$

Eşitlik 1.27'de, L_{temp} , çevrim sayısını; m ve φ , ortam sıcaklığına bağlı olan kullanım ömrü katsayılarını (m=3291 ve $\varphi=-0.05922$); T ise ortam sıcaklığını ($^{\circ}C$) göstermektedir.

DoD ve ortam sıcaklığının batarya ömrü üzerindeki etkisi birleştirildiğinde, SGS'de yer alan bataryanın kullanım ömrü (L_{VPP}), Eşitlik 1.28'de gösterildiği gibi tanımlanır.

$$L_{VPP} = \frac{L_{DoD} \times L_{temp}}{L_R} \quad (1.28)$$

Eşitlik 1.28'de, L_R , üretici tarafından nominal DoD ve ortam sıcaklığında değerlendirilen nominal batarya kullanım ömrünü göstermektedir.

Batarya bozulma maliyeti Eşitlik 1.29 yardımıyla hesaplanmaktadır [26].

$$C_{BD} = \frac{C_{BC}}{L_{VPP} \times E_{total} \times DoD_{ref}} \quad (1.29)$$

Eşitlik 1.29’da, C_{BD} , batarya bozulma maliyetini; C_{BC} , batarya değiştirme maliyetini (işgücü); E_{total} , bataryadaki toplam depolanan enerjiyi göstermektedir. DoD_{ref} ise referans DoD’dir.

Eşitlik 1.29; Eşitlik 1.26-1.28 yardımıyla problem modelimize göre yeniden düzenlendiğinde her saat için batarya bozulma maliyeti (C_{BD}^t) Eşitlik 1.30 ile hesaplanmaktadır.

$$C_{BD}^t = \frac{C_{BC} \times L_R}{(a \times DoD^t + b) \times (m \times \exp(\varphi T)) \times SoC^t \times DoD_{ref}} \times (\eta_{ch} \times P_{ch}^t - \frac{P_{dis}^t}{\eta_{dis}}) \quad (1.30)$$

Bu çalışmada, BEDS olarak, Kurşun-asit batarya kullanılmıştır. [26] numaralı çalışmadaki batarya parametreleri bu çalışmaya uygun değiştirilerek elde edilen parametreler kullanılmıştır ve Çizelge 1.6’da bu bataryanın parametreleri ve değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 1.6. Kurşun-asit batarya parametreleri ve değerleri

| Parametreler | Değerler | Parametreler | Değerler |
|----------------------|-----------|--------------|-------------|
| E_{bess}^{max} | 1.273 MWh | C_{BC} | 152181.5 \$ |
| E_{bess}^{min} | 0.141 MWh | L_R | 1000 |
| $E_{bess}^{initial}$ | 0.141 MWh | T | 20 °C |
| P_{ch}^{max} | 0.283 MWh | η_{ch} | 91.4% |
| P_{dis}^{max} | 0.283 MWh | η_{dis} | 91.4% |
| DoD_{ref} | 80 % | | |

Çizelge 1.6’da görüldüğü gibi kurşun-asit bataryada başlangıçta (t=0) depolanan enerji miktarı 0.141 MWh olarak düşünülmüştür. İşletim sonunda (t=24) bataryada depolanan enerji miktarı yine 0.141 MWh olacaktır. BEDS’nin depoladığı minimum ve maksimum enerji değerleri sırasıyla 0.141 MWh ve 1.273 MWh’dir.

1.3.2. Problemin Modellenmesi

Kâr miktarının ve riskten kaçınmanın maksimum, emisyon miktarının minimum yapılmasının hedeflendiği çok amaçlı problemimiz KTDOP olarak modellenmiştir. Problem modellenirken risk değerlendirmesi dikkate alınarak kârın maksimum ve emisyonun minimum yapılması amaçlanmıştır. Bu durumla ilgili amaç fonksiyonları, risk analizi ve güç dengesi şeklindeki sistem kısıtları aşağıda açıklanacaktır.

1.3.2.1. Amaç Fonksiyonları

Problemin amaç fonksiyonu, kâr maksimizasyonu ve emisyon minimizasyonu şeklinde iki fonksiyondan oluşmaktadır.

Amaç fonksiyonunun birincisi kârın maksimum yapılmasıdır ve Eşitlik 1.31 ile gösterilmiştir. Kâr, gelir ve maliyet farkından oluşmaktadır. Gelir, piyasaya verilen elektrik, tüketicilere verilen perakende elektrik ve termal yükün karşılanması için verilen ısı satışından elde edilmektedir. Maliyet ise, KIGS ve IÜB'nin işletim maliyetlerinden ve batarya bozulma maliyetinden oluşmaktadır.

$$KM = \max \sum_{t=1}^{24} [MP^t \times P_{mrkt}^t + RER^t \times P_{served}^t + HP^t \times H_{load}^t - C_{to}^{chp,t} - C_{ho}^t - C_{BD}^t] \quad (1.31)$$

Eşitlik 1.31'de, KM, kâr miktarını; t, zaman sayısını; MP^t , t. zamandaki elektrik piyasa fiyatını (\$/MWh); P_{mrkt}^t , t. zamanda piyasaya satılan/piyasadan satın alınan elektrik miktarını (Pozitif ise elektrik piyasaya satılmıştır, negatif ise elektrik piyasadan satın alınmıştır.); RER^t , t. zamanda tüketicilere verilen elektriğin satış bedeli olan perakende satış fiyatını, P_{served}^t , t. zamanda servis edilen elektrik yükünü; HP^t , t. zamanda ısı fiyatını; H_{load}^t , t. zamanda termal yükü; $C_{to}^{chp,t}$, t. zamanda KIGS'nin toplam maliyetini, C_{ho}^t , t. zamanda IÜB'nin maliyetini, C_{BD}^t , t. zamanda batarya bozulma maliyetini göstermektedir.

Problemimiz RES ve FVES gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının çıkış güçlerinin değişkenliğinden dolayı belirsizlik içermektedir. RES çıkış gücü, rüzgâr hızının;

FVES çıkış gücü ise güneş radyasyonunun stokastik özelliğinden dolayı belirsiz olmaktadır. Bu nedenle, amaç fonksiyonuna belirsizlik modeli eklenmiştir. Problemimiz belirsizlik içerdiği için karar verme riskli olmaktadır. Bu yüzden, kâr değişkenliği riskini değerlendirmek için uygun bir risk ölçümü modele dahil edilmelidir. Bu amaçla, risk ölçüm formülü de amaç fonksiyonuna dahil edilmiştir.

Eşitlik 1.31'deki amaç fonksiyonuna belirsizlik ve risk faktörleri de eklendiğinde amaç fonksiyonu (OF1) Eşitlik 1.32'de gösterildiği gibi olmaktadır. Bu amaç fonksiyonu, düşük kâr senaryolarına karşı risk değerlendirmesini de göz önünde bulundurarak hem kârın hem de riskten kaçınmanın maksimum yapılmasını hedeflemektedir.

$$OF1 = \max(1 - \beta) \times \sum_{t=1}^{24} \sum_{s=1}^S \pi_s \times [MP^t \times P_{mrkt}^{t,s} + RER^t \times P_{served}^t + HP^t \times H_{load}^t - C_{to}^{chp,t} - C_{ho}^t - C_{BD}^t] + (\beta \times Risk) \quad (1.32)$$

Eşitlik 1.32'de, t, zaman sayısını; s, senaryo sayısını; π_s , s. senaryonun olasılığını; MP^t , t. zamandaki elektrik piyasa fiyatını (\$/MWh); $P_{mrkt}^{t,s}$, t. zamanda ve s. senaryoda piyasaya satılan/piyasadan satın alınan elektrik miktarını (Pozitif ise elektrik piyasaya satılmıştır, negatif ise elektrik piyasadan satın alınmıştır.); RER^t , t. zamanda tüketicilere verilen elektriğin satış bedeli olan perakende satış fiyatını; P_{served}^t , t. zamanda karşılanan elektrik yükünü; HP^t , t. zamanda ısı fiyatını; H_{load}^t , t. zamanda termal yükü; $C_{to}^{chp,t}$, t. zamanda KIGS'nin toplam maliyetini; C_{ho}^t , t. zamanda IÜB'nin maliyetini; C_{BD}^t , t. zamanda batarya bozulma maliyetini göstermektedir. Son terim $(\beta \times Risk)$ ise risk ölçüm formülüdür. Buradaki β , amaç fonksiyonundaki risk minimizasyonunun önemini ifade eder ve 0-1 arasında değer alan katsayıdır.

Eşitlik 1.31 ve 1.32'de görüldüğü gibi, kâr miktarını artırmak için, piyasaya ve tüketicilere satılan elektriği artırmak ve KIGS, IÜB, batarya bozulma maliyetlerini azaltmak gerekmektedir.

Amaç fonksiyonunun ikincisi (OF2) ise emisyonu minimum yapmaktır ve Eşitlik 1.33'de gösterilmiştir. KIGS, IÜB ve piyasadaki üretim sistemlerinden kaynaklanan emisyonlar, toplam emisyon miktarını oluşturmaktadır. Piyasadaki üretim

sistemlerinin neden olduğu emisyon, yalnızca elektrik piyasadan satın alındığında dahil edilmiştir.

$$OF2 = \min \sum_{t=1}^{24} E_{chpp}^t + E_{hou}^t + E_{mrkt}^{t,s} \quad (1.33)$$

Toplam emisyon miktarının verildiği Eşitlik 1.33'de, E_{chpp}^t , KIGS tarafından ortaya çıkan emisyon miktarını (kg/h); E_{hou}^t , IÜB tarafından ortaya çıkan emisyon miktarını (kg/h); $E_{mrkt}^{t,s}$ ise piyasadan elektrik satın alındığında piyasadaki üretim sistemleri tarafından ortaya çıkan emisyon miktarını (kg/h) göstermektedir. Eşitlik 1.33'de görüldüğü gibi emisyonu minimum yapmak için KIGS'den ve IÜB'den elde edilen elektrik üretim miktarını ve piyasadan satın alınan elektrik üretiminin azaltılması gerekmektedir. E_{chpp}^t , E_{hou}^t , ve $E_{mrkt}^{t,s}$, sırasıyla Eşitlik 1.34-1.36'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır [13].

$$E_{chpp}^t = (NO_x^{chpp} + SO_2^{chpp} + CO_2^{chpp}) \times P_{chp}^t \quad (1.34)$$

$$E_{hou}^t = (NO_x^{hou} + SO_2^{hou} + CO_2^{hou}) \times H_{ho}^t \quad (1.35)$$

$$E_{mrkt}^{t,s} = (NO_x^{mrkt} + SO_2^{mrkt} + CO_2^{mrkt}) \times \max \{-P_{mrkt}^{t,s}, 0\} \quad (1.36)$$

Eşitlik 1.34'de, NO_x^{chpp} , SO_2^{chpp} , CO_2^{chpp} sırasıyla KIGS biriminin NO_x, SO₂, ve CO₂ emisyon oranlarını; Eşitlik 1.35'de, NO_x^{hou} , SO_2^{hou} , CO_2^{hou} sırasıyla IÜB biriminin NO_x, SO₂, ve CO₂ emisyon oranlarını; Eşitlik 1.36'da, NO_x^{mrkt} , SO_2^{mrkt} , CO_2^{mrkt} sırasıyla piyasadaki üretim birimlerinin NO_x, SO₂, ve CO₂ emisyon oranlarını göstermektedir.

KIGS, IÜB ve piyasadaki üretim sistemleri için NO_x, SO₂ ve CO₂ emisyon oranları Çizelge 1.7'de verilmiştir [13].

Çizelge 1.7. NO_x, SO₂ ve CO₂ emisyon oranları

| Parametreler | Değerler |
|---------------|----------|
| NO_x^{chpp} | 0.1995 |
| SO_2^{chpp} | 0.0036 |
| CO_2^{chpp} | 723.93 |
| NO_x^{hou} | 0.3145 |
| SO_2^{hou} | 0.0027 |
| CO_2^{hou} | 401.4284 |
| NO_x^{mrkt} | 2.295 |
| SO_2^{mrkt} | 3.583 |
| CO_2^{mrkt} | 921.25 |

1.3.2.2. Risk Analizi

Üretim şirketlerinin karşılaştığı kâr değişkenliği riskini hesaba katmak için bu çalışmada risk analizi yapılmıştır. Risk ölçüm yöntemi olarak CVaR kullanılmıştır. Risk modellemesi Eşitlik 1.37-1.39'da gösterilmiştir [61].

$$\eta - \sum_{t=1}^T [MP^t \times P_{mrkt}^{t,s} + RER^t \times P_{served}^{t,s} - C_{to}^{chp,t} - C_{ho}^t - C_{BD}^t] \leq r_s \quad (1.37)$$

$$Risk = \eta - \frac{1}{1-\alpha} \times \sum_{s=1}^S \pi_s \times r_s \quad (1.38)$$

$$r_s \geq 0 \quad (1.39)$$

Eşitlik 1.37-1.39'da de, η ve r_s CVaR hesabı için kullanılan yardımcı değişkenlerdir, α ise değeri (0,1) aralığında olan güven seviyesidir (confidence level).

1.3.2.3. Güç Dengesi

Elektriksel güç dengesi, güç sistemi işletiminde üretilen ve tüketilen enerjinin eşit olmasını sağlar. Çünkü elektrik enerjisinin üretim-tüketim eşitliğinin bozulması, sistem frekansının bozulmasına neden olur. Termal güç dengesinde ise, KIGS ve IÜB birimleri termal yükü karşılamak için ısı açığa çıkarırlar. Üretilen toplam ısı termal yükten büyük ise fazla ısı atmosfere salınır. Elektriksel ve termal güç dengesi eşitliği kısıtları sırasıyla Eşitlik 1.40 ve 1.41'de verilmiştir.

$$P_{s,t}^{wpp} + P_{s,t}^{pvpp} + P_{chp}^t + P_{dis}^t = P_{mrkt}^{t,s} + P_{served}^t + P_{ch}^t \quad (1.40)$$

$$H_{load}^t = H_{chp}^t + H_{ho}^t - H_{sp}^t \quad (1.41)$$

Eşitlik 1.40'da görüldüğü gibi t. zamanda RES, FVES ve KIGS'nin elektriksel çıkış gücü ile BEDS'nin deparj ettiği güç toplamı, piyasaya satılan veya satın alınan (Satılıyor ise pozitif, satın alınıyor ise negatif alınır.) güç, elektriksel yük ve BEDS'nin sarj ettiği güç toplamını karşılamalıdır. Eşitlik 1.41'de görüldüğü gibi t. zamanda KIGS ve IÜB'nin toplam termal çıkış gücü termal yükü (H_{load}^t) karşılamalıdır. Fazla ısı gücü (H_{sp}^t) var ise atmosfere salınmaktadır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Kullanılan Veriler ve Elde Edilmesi

Rüzgâr çıkış gücünün hesaplanması için, Türkiye’de bulunan bir bölgenin saatlik rüzgâr hızı verileri, Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nden temin edilmiştir. 2018 yılı, Mart, Nisan ve Mayıs aylarının saatlik rüzgâr hızları, bu çalışmada veri olarak kullanılmıştır.

Güneş çıkış gücünün hesaplanması için ise, Türkiye’de bulunan bir bölgenin saatlik güneş radyasyonu ve sıcaklık verileri, Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nden temin edilmiştir. 2018 yılı, Mart, Nisan ve Mayıs aylarının saatlik güneş radyasyonu ve sıcaklık değerleri, bu çalışmada veri olarak kullanılmıştır.

İlk simülasyon çalışmasında RES ve FVES çıkış güçlerinin belirsizliği dikkate alınmamıştır ve deterministik bir model oluşturulmuştur. Bu simülasyon çalışmasında RES çıkış gücünün hesaplanması için rüzgâr hızı verisi olarak Çanakkale iline ait 2018 yılı, Mart, Nisan ve Mayıs aylarının saatlik rüzgâr hızlarının ortalaması alınmıştır ve bu saatlik ortalama rüzgâr hızı verileri Çizelge 2.1’de verilmiştir. FVES çıkış gücünün hesaplanması için ise güneş radyasyonu ve sıcaklık verileri olarak sırasıyla Muğla iline ait 2018 yılı, Mart, Nisan ve Mayıs aylarının saatlik güneş radyasyonlarının ve sıcaklık değerlerinin ortalaması alınmıştır. Saatlik ortalama güneş radyasyonu verileri Çizelge 2.2’de, saatlik ortalama sıcaklık verileri ise Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Ortalama saatlik rüzgâr hızı verileri (Mart, Nisan, Mayıs 2018) [62]

| Saat | Rüzgâr Hızı (m/s) | Saat | Rüzgâr Hızı (m/s) | Saat | Rüzgâr Hızı (m/s) |
|------|-------------------|------|-------------------|------|-------------------|
| 1 | 5.388 | 9 | 7.678 | 17 | 6.078 |
| 2 | 5.351 | 10 | 7.868 | 18 | 5.277 |
| 3 | 5.152 | 11 | 8.171 | 19 | 5.104 |
| 4 | 5.393 | 12 | 8.122 | 20 | 5.095 |
| 5 | 5.608 | 13 | 8.292 | 21 | 5.170 |
| 6 | 6.101 | 14 | 7.873 | 22 | 5.207 |
| 7 | 6.605 | 15 | 7.376 | 23 | 5.130 |
| 8 | 7.277 | 16 | 6.568 | 24 | 5.338 |

Çizelge 2.2. Ortalama saatlik güneş radyasyonu verileri (Mart, Nisan, Mayıs 2018)

| Saat | Güneş radyasyonu (W/m ²) | Saat | Güneş radyasyonu (W/m ²) | Saat | Güneş radyasyonu (W/m ²) |
|------|---|------|---|------|---|
| 1 | 0.000 | 9 | 655.000 | 17 | 0.435 |
| 2 | 0.000 | 10 | 642.500 | 18 | 0.000 |
| 3 | 0.109 | 11 | 605.978 | 19 | 0.000 |
| 4 | 35.870 | 12 | 548.261 | 20 | 0.000 |
| 5 | 134.783 | 13 | 433.587 | 21 | 0.000 |
| 6 | 303.152 | 14 | 320.217 | 22 | 0.000 |
| 7 | 492.826 | 15 | 157.283 | 23 | 0.000 |
| 8 | 623.804 | 16 | 37.717 | 24 | 0.000 |

Çizelge 2.3. Ortalama saatlik sıcaklık verileri (Mart, Nisan, Mayıs 2018) [62]

| Saat | Sıcaklık (C°) | Saat | Sıcaklık (C°) | Saat | Sıcaklık (C°) |
|------|---------------|------|---------------|------|---------------|
| 1 | 11.42 | 9 | 19.30 | 17 | 17.69 |
| 2 | 10.93 | 10 | 20.66 | 18 | 16.22 |
| 3 | 10.69 | 11 | 21.18 | 19 | 15.33 |
| 4 | 10.23 | 12 | 21.52 | 20 | 14.62 |
| 5 | 10.54 | 13 | 21.44 | 21 | 13.96 |
| 6 | 12.30 | 14 | 21.01 | 22 | 13.21 |
| 7 | 14.67 | 15 | 20.25 | 23 | 12.56 |
| 8 | 17.34 | 16 | 19.26 | 24 | 12.03 |

İkinci simülasyon çalışmasında RES ve FVES çıkış güçlerinin belirsizliği dikkate alınmıştır ve stokastik bir model oluşturulmuştur. Bu simülasyon çalışmasında RES çıkış gücünün hesaplanması için rüzgâr hızı verisi olarak 2018 yılı, Mart, Nisan ve Mayıs aylarının saatlik rüzgâr hızları kullanılmıştır (Bkz. EK 1). FVES çıkış gücünün hesaplanması için ise güneş radyasyonu verisi olarak 2018 yılı, Mart, Nisan ve Mayıs aylarının saatlik güneş radyasyonları (Bkz. EK 2) ile sıcaklık verisi olarak Çizelge 2.3'deki sıcaklık değerleri kullanılmıştır.

Elektrik fiyatı, perakende satış fiyatı, ısı fiyatı, elektriksel yük ve termal yük verileri [13] numaralı çalışmadan alınmıştır ve Çizelge 2.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Elektrik fiyatı, perakende satış fiyatı, ısı fiyatı, elektriksel yük ve termal yük verileri [13]

| Saat | Elektrik fiyatı (\$/MWh) | Perakende satış fiyatı (\$/MWh) | Isı Fiyatı (\$/MWth) | Elektriksel yük (MW) | Termal Yük (MWth) |
|------|-----------------------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| 1 | 33 | 76 | 60.8 | 1.3340 | 1.5840 |
| 2 | 27 | 76 | 60.8 | 1.3280 | 1.5840 |
| 3 | 20 | 76 | 60.8 | 1.3340 | 1.5840 |
| 4 | 17 | 76 | 60.8 | 1.3340 | 1.5840 |
| 5 | 17 | 76 | 60.8 | 1.2800 | 1.5840 |
| 6 | 29 | 76 | 60.8 | 1.4400 | 1.6000 |
| 7 | 33 | 76 | 60.8 | 1.8880 | 1.4720 |
| 8 | 54 | 116 | 92.8 | 2.0800 | 1.3440 |
| 9 | 215 | 116 | 92.8 | 2.2560 | 1.4240 |
| 10 | 572 | 116 | 92.8 | 2.3520 | 1.4080 |
| 11 | 572 | 116 | 92.8 | 2.3680 | 1.4080 |
| 12 | 572 | 53 | 42.4 | 2.0480 | 1.3280 |
| 13 | 215 | 53 | 42.4 | 1.5840 | 1.4720 |
| 14 | 572 | 53 | 42.4 | 1.5360 | 1.5520 |
| 15 | 286 | 53 | 42.4 | 1.7440 | 1.5520 |
| 16 | 279 | 116 | 92.8 | 2.1600 | 1.5520 |
| 17 | 86 | 116 | 92.8 | 2.3200 | 1.5520 |
| 18 | 59 | 116 | 92.8 | 2.4000 | 1.5200 |
| 19 | 50 | 116 | 92.8 | 2.3040 | 1.5200 |
| 20 | 61 | 76 | 60.8 | 2.1280 | 1.5200 |
| 21 | 181 | 76 | 60.8 | 1.4720 | 1.5360 |
| 22 | 77 | 76 | 60.8 | 0.9600 | 1.5200 |
| 23 | 43 | 76 | 60.8 | 1.0080 | 1.5040 |
| 24 | 37 | 76 | 60.8 | 0.9920 | 1.4880 |

2.2. Kullanılan Metotlar

Bu çalışmada, KTDOP olarak modellenen, çok amaçlı problemin çözümünde GAMS [63] yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen Pareto optimum sonuçlardan en iyi çözümü seçmek için Bulanık TOPSIS [64] yöntemi kullanılmıştır.

2.2.1. Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (GAMS)

Güç sistemlerinde optimizasyon problemlerinin çözümünde genellikle klasik ve sezgisel yöntemler kullanılmaktadır. Klasik yöntemlerin çoğu gradyan temelli tekniklerdir. Bu da büyük ölçekli optimizasyon problemleri için uygun olmamaktadır. Klasik yöntemler ile tamsayı değişkenleri ve konveks olmayan kısıtları olan doğrusal olmayan problemlerin çözümü zor olmaktadır. Sezgisel yöntemlerin de zorlukları bulunmaktadır. Bunlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir [65].

- Bu yöntemlerde parametre değerini ayarlamak bir sorundur. Probleme bağlıdır ve karar verici tarafından ayarlanmalıdır.
- Elde edilen çözümün global optimum olup olmadığını kontrol etmek kolay değildir.
- Çalışması uzun zaman alabilmektedir. Bu da bu yöntemleri, gerçek zamanlı uygulamalar için uygunsuz hale getirir.
- Bu yöntemler yinelemeli olduğundan, her yinelemede yeni bir çözüm olabilir. Problem tekrar çözüldüğünde aynı değerde parametreler kullanılsa bile benzer sonuçlar elde etmek garanti değildir.
- Durdurma kriterini ayarlamak zordur. Çünkü problemin optimum çözümü bilinmemektedir. Ne zaman duracağını belirlemek kolay değildir. Genelde amaç fonksiyonunda önemli bir değişiklik olmadığında durdurulur.

Bu nedenlerden dolayı problemimizin çözümünde klasik ve sezgisel yöntemlerin yerine GAMS yazılımı tercih edilmiştir.

GAMS, matematiksel programlama ve optimizasyon amaçlı bir modelleme aracıdır. SGS belirsizlikleri ile optimum dağıtım problemlerini çözmeye yaygın kullanılan bir yazılımdır. Karmaşık ve büyük ölçekli modelleme uygulamaları için uygundur ve sayısal analizde de çok iyidir [66].

GAMS, cebirsel gösterim ile matematiksel programlama ve optimizasyon modellerini ifade etmek için kullanılan üst düzey bir modelleme sistemidir. Dil derleyicisi ve yüksek performanslı çözücülerden oluşmaktadır. Karmaşık ve büyük ölçekli modelleme uygulamaları için tasarlanmıştır ve yeni durumlara hızlı bir şekilde adapte edilebilen büyük ve sürdürülebilir modelleri oluşturmaya olanak sağlar. Doğrusal, doğrusal olmayan ve karışık tamsayılı optimizasyon problemlerini modellemek için özel olarak tasarlanmıştır.

GAMS, 25'den fazla çözücülerden oluşan kapsamlı ve çeşitli bir portföy içermektedir. Bu çözücüler ve uygulandıkları problemlerin bazıları aşağıda verilmiştir [67].

- Doğrusal Programlama (DP), Karışık Tamsayılı Programlama (KTP), İkinci Dereceden Kısıtlı Programlama (İDKP), Karışık Tamsayılı İkinci Dereceden Kısıtlı Programlama (KTİDKP) modellerinin çözümü için CPLEX, GUROBI, MSEL, XPRESS çözücülerini kullanılabilmektedir.
- Doğrusal Olmayan Programlama (DOP) modelinin çözümü için, CONOPT, IPOPTH, NITRO, MINOS, SNOPT çözücülerini kullanılabilmektedir.
- KTDOP modelinin çözümü için, ALPHAECF, ANTIGONE, BARON, DICOPT, LINDO, OQNLP, SBB çözücülerini kullanılabilmektedir.

Bu çalışmada, KTDOP olarak modellenen çok-amaçlı problem, GAMS yazılımında uygulanmış ve LINDO çözücüsü ile çözülmüştür. [68] ve [69] numaralı çalışmalarda, KTDOP için GAMS yazılımında DICOPT çözücüsü kullanılmıştır. Fakat bu

çözücünün doğrusal olmayan kısıtlamalarla sınırlı olmasından dolayı, uygun bir çözüm bulmakta zorlanmaktadır. Bu yüzden, bu çalışmada, uygun çözümü bulabilen, doğrusal olmayan problemlere global optimum çözümleri bulmayı garanti eden ve kısa sürede çözümü elde eden LINDO çözücüsü kullanılmıştır.

2.2.2. Bulanık TOPSIS

Bu çalışmada, hem elde edilen kârı maksimum yapmak, hem de ortaya çıkan emisyonu minimum yapmak amacıyla çok-amaçlı optimizasyon problemi oluşturulmuştur. Problemin çözümünde kâr ve emisyonu düşünerek optimum sonucu bulmak için Pareto tabanlı yaklaşım kullanılmıştır ve Pareto-optimum sonuçların olduğu set elde edilmiştir. Bu set içerisinde, SGS operatörünün hem kârı maksimum yapan hem de emisyonu minimum yapan optimum çözümü belirlemesi için bir karar verme yöntemine ihtiyaç duyulmuştur. Bunun için 2000 yılında Chen tarafından sunulan Bulanık TOPSIS [70] yöntemi kullanılmıştır.

TOPSIS yönteminin avantajı en iyi alternatifi hızlı bir şekilde belirleme yeteneğine sahip olmasıdır. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), Analitik Ağ Süreci (ANP), Elimination and Choice Translating Reality English (ELECTRE) gibi diğer Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri (ÇKKVY) öncelikle ağırlık üretmeye odaklanmışlardır. TOPSIS, temel tahmin modelinin eşleştirilmesinde AHP'ye göre daha iyi performans göstermektedir. TOPSIS yönteminin bulanık ortama genişletilmesiyle elde edilen Bulanık TOPSIS yöntemi, belirsizliğin olduğu ve çoklu karar vericilerin bulunduğu problemlerin çözümünde oldukça kullanışlıdır. Bu yöntem, karar vericilerin yorumlarının net olmadığı durumlarda, sayısal değerler yerine dilsel ifadeler kullanılarak ortam daha gerçekçi yansıtılır. Bu yüzden bu çalışmada karar verme yöntemi olarak Bulanık TOPSIS yöntemi tercih edilmiştir.

Bulanık TOPSIS yönteminin algoritması ve açıklamaları aşağıda verilmiştir [71].

- Karar vericilerden oluşan bir grup oluşturulur. N tane karar vericiden oluşan küme $E=DM_1, DM_2, \dots, DM_N$ şeklinde gösterilir.

- Alternatifler (A_1, A_2, \dots, A_m) ve bu alternatifleri değerlendirmede kullanılacak kriterler (C_1, C_2, \dots, C_n) belirlenir. Alternatif sayısı m ile, kriter sayısı n ile gösterilmektedir.
- Alternatifleri değerlendirmek ve kriterlerin önem ağırlıklarını belirlemek için sözel değişkenler oluşturulur ve karar vericiler bunları değerlendirerek sözel değişkenleri bulanık sayılar şeklinde ifade ederler.
- N tane karar vericinin alternatifler ve kriterler için değerlendirmeleri Eşitlik 2.1 yardımıyla tek bir değere indirgenir.

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{1}{N} [\tilde{x}_{ij}^1 + \tilde{x}_{ij}^2 + \dots + \tilde{x}_{ij}^N] \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1’de, \tilde{x}_{ij}^N , N . karar vericinin değerlendirmesini göstermektedir.

- N tane karar verici tarafından belirlenen ağırlıklar, her kriter için Eşitlik 2.2 yardımıyla tek bir değere indirgenir.

$$\tilde{w}_j = \frac{1}{N} [\tilde{w}_j^1 + \tilde{w}_j^2 + \dots + \tilde{w}_j^N] \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2’de, \tilde{w}_j^N , N . Karar vericinin ağırlığını göstermektedir.

- Karar matrisi oluşturulur.

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix} \quad \tilde{W} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n] \quad (2.3)$$

Eşitlik 2.3’de, $\tilde{x}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ ve $\tilde{w}_j = (w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{j3})$ üçgen bulanık sayılardır, \tilde{D} , bulanık karar matrisini, \tilde{W} ise bulanık ağırlıklar matrisin göstermektedir.

- Bulanık karar matrisi, Eşitlik 2.4 ve Eşitlik 2.5 kullanılarak normalize edilir ve Eşitlik 2.6'da gösterilen normalize bulanık karar matrisi (\tilde{R}) elde edilir.

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_{ij}}{u_j^+}, \frac{m_{ij}}{u_j^+}, \frac{u_{ij}}{u_j^+} \right), \quad u_j^+ = \max_i u_{ij} \quad (\text{Fayda kriteri}) \quad (2.4)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_j^-}{u_{ij}}, \frac{l_j^-}{m_{ij}}, \frac{l_j^-}{l_{ij}} \right), \quad l_j^- = \min_i l_{ij} \quad (\text{Maliyet kriteri}) \quad (2.5)$$

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad \text{ve} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2.6)$$

Eşitlik 2.4-2.6'da, \tilde{r}_{ij} , normalize edilmiş üçgen bulanık sayıları göstermektedir.

- Her bir karar kriteri, önem ağırlıklarına göre, Eşitlik 2.7'deki gibi ağırlıklı normalize bulanık karar matrisi şeklinde ifade edilir.

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad \text{ve} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2.7)$$

Eşitlik 2.7'deki \tilde{v}_{ij} , Eşitlik 2.8'de gösterilmiştir.

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \times \tilde{w}_j \quad (2.8)$$

- Bulanık pozitif ideal çözüm (FPIS, A^+) ve bulanık negatif ideal çözüm (FNIS, A^-) sırasıyla Eşitlik 2.9 ve Eşitlik 2.10'daki gibi tanımlanır.

$$A^+ = (\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_2^+, \dots, \tilde{v}_n^+) \quad (2.9)$$

$$A^- = (\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-) \quad (2.10)$$

Eşitlik 2.9 ve 2.10'da, $\tilde{v}_{ij}^+ = (1,1,1)$ ve $\tilde{v}_{ij}^- = (0,0,0)$, $j = 1, 2, \dots, n'$ dir.

- Her alternatifin pozitif ideal çözüme (A^+) ve negatif ideal çözüme (A^-) olan uzaklıkları, sırasıyla Eşitlik 2.11 ve Eşitlik 2.12'deki gibi hesaplanır.

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+), i = 1, 2, \dots, m \text{ ve } j = 1, 2, \dots, n \quad (2.11)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-), i = 1, 2, \dots, m \text{ ve } j = 1, 2, \dots, n \quad (2.12)$$

Eşitlik 2.11 ve 2.12'de $d_v(a, b)$ iki bulanık sayı arasındaki uzaklığı göstermektedir ve vertex metodu ile Eşitlik 13'deki gibi hesaplanır.

$$d(a, b) = \sqrt{\frac{1}{3} [(l_a - l_b)^2 + (m_a - m_b)^2 + (u_a - u_b)^2]} \quad d(a, b) \in R^+ \quad (2.13)$$

- Her alternatife ilişkin yakınlık katsayıları (CC_i) Eşitlik 2.14'deki gibi hesaplanır. Yakınlık katsayısı, bulanık pozitif ideal çözüme (A^+) ve bulanık negatif ideal çözüme (A^-) olan uzaklığı aynı anda dikkate alır.

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.14)$$

- Alternatifler, yakınlık katsayılarına göre büyükten küçüğe doğru sıralanır. En iyi alternatif, FPIS'a en yakın, FNIS'a en uzak olandır. Yakınlık katsayısı 1'e ne kadar yakınsa alternatifin tercih edilme şansı o kadar artar.

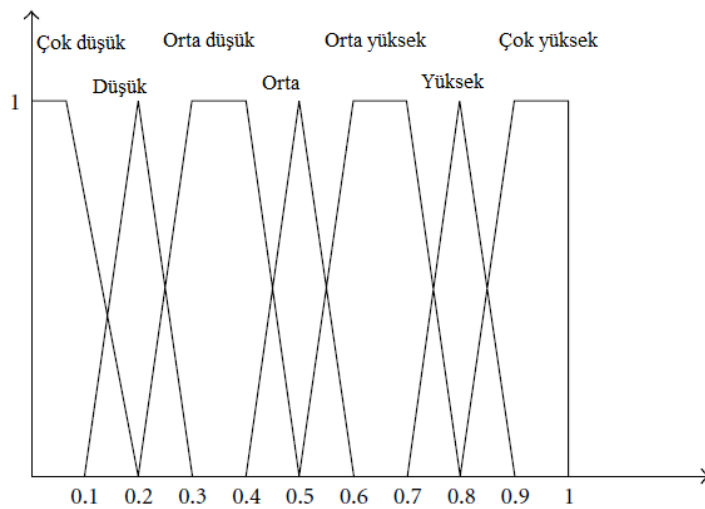
Bu çalışmada, 3 karar verici (N), 20 alternatif (m) ve 2 kriter (n) belirlenmiştir. 20 adet alternatiften oluşan pareto optimum çözümlerden, emisyon ve kâr kriterlerine göre en iyi sonuca karar verilmiştir. Karar vericiler elektrik piyasasında uzman kişilerdir. Alternatifler hem kâr ve hem emisyon değerlerinin olduğu 20 adet çözüm kümesidir. Kriterler ise kâr ve emisyondan oluşmaktadır. Kâr kriterini santrallerin işletim maliyeti, piyasaya satılan veya piyasadan satın alınan elektrik miktarları gibi parametreler etkilemektedir. Emisyon kriterini ise emisyon salan birimlerin üretim miktarı etkilemektedir.

Kriterlerin önem ağırlığının belirlenmesinde kullanılan dilsel ifadeler ve bu dilsel ifadelere karşılık gelen bulanık sayılar Çizelge 2.5’de verilmektedir [72].

Çizelge 2.5. Kriterlerin önem ağırlığının belirlenmesinde kullanılan dilsel ifadeler ve bulanık sayılar [72]

| Dilsel ifadeler | Bulanık sayılar |
|------------------|----------------------|
| Çok düşük (ÇD) | [0, 0, 0.1, 0.2] |
| Düşük (D) | [0.1, 0.2, 0.2, 0.3] |
| Orta düşük (OD) | [0.2, 0.3, 0.4, 0.5] |
| Orta (O) | [0.4, 0.5, 0.5, 0.6] |
| Orta yüksek (OY) | [0.5, 0.6, 0.7, 0.8] |
| Yüksek (Y) | [0.7, 0.8, 0.8, 0.9] |
| Çok yüksek (ÇY) | [0.8, 0.9, 1.0, 1.0] |

Kriterlerin önemini değerlendirmek için Şekil 2.1’de gösterilen üyelik fonksiyonları kullanılmıştır.



Şekil 2.1. Kriterlerin önemini değerlendirmede kullanılan üyelik fonksiyonları

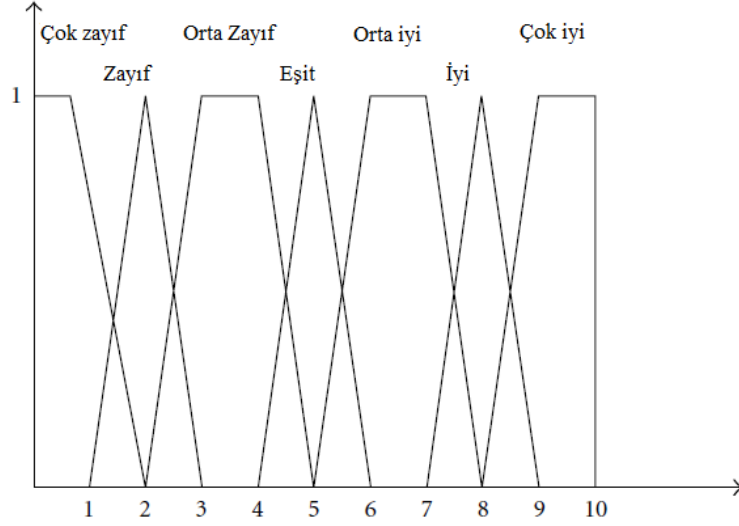
Çizelge 2.5 ve Şekil 2.1’de görüldüğü gibi, örneğin “Orta düşük” sözel değişkeni (0.2, 0.3, 0.4, 0.5) olarak, “Yüksek” sözel değişkeni (0.7, 0.8, 0.8, 0.9) olarak belirtilebilir.

Alternatiflerin değerlendirilmesinde kullanılan dilsel ifadeler ve bu dilsel ifadelere karşılık gelen bulanık sayılar Çizelge 2.6’da verilmektedir [72].

Çizelge 2.6. Alternatiflerin değerlendirilmesinde kullanılan dilsel ifadeler ve bulanık sayılar [72]

| Dilsel ifadeler | Bulanık sayılar |
|-----------------|-----------------|
| Çok zayıf (ÇZ) | [0,0,1,2] |
| Zayıf (Z) | [1,2,2,3] |
| Orta Zayıf (OZ) | [2,3,4,5] |
| Eşit (E) | [4,5,5,6] |
| Orta iyi (Oİ) | [5,6,7,8] |
| İyi (İ) | [7,8,8,9] |
| Çok iyi (Çİ) | [8,9,10,10] |

Alternatiflerin önemini değerlendirmek için Şekil 2.2’de gösterilen üyelik fonksiyonları kullanılmıştır.



Şekil 2.2. Alternatiflerin önemini değerlendirmede kullanılan üyelik fonksiyonları

Çizelge 2.6 ve Şekil 2.2’de görüldüğü gibi, örneğin “Zayıf” sözel değişkeni (1, 2, 2, 3) olarak, “Orta iyi” sözel değişkeni (5, 6, 7, 8) olarak belirtilebilir.

Bu çalışmada, 3 karar verici tarafından kriterlerin önem ağırlığını ifade eden sözel değişkenler, her kriter için Çizelge 2.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.7. Üç karar vericiden kriterlerin önem ağırlığı

| Kriterler | Karar vericiler | | |
|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | DM ₁ | DM ₂ | DM ₃ |
| C ₁ (Kâr) | ÇY | ÇY | Y |
| C ₂ (Emisyon) | ÇY | Y | ÇY |

Konuda uzman 3 karar verici (DM₁, DM₂, DM₃) kriterlerin önem ağırlığını değerlendirmişlerdir. Çizelge 2.10’a göre, sözel değişkenler olarak, DM₁, kâr (C₁) ve emisyon (C₂) kriterlerinin önem dereceleri için sırasıyla “Çok yüksek” ve “Çok

yüksek”, DM₂, “Çok yüksek” ve “Yüksek”, DM₃, “Yüksek” ve “Çok yüksek” değerlendirmesini yapmışlardır.

İlk kriter kâr için, karar vericilerin alternatiflerin değerlendirilmesinde kullandıkları sözel değişkenler Çizelge 2.8’de verilmiştir.

Çizelge 2.8. Üç karar vericiden kâr kriteri için alternatif değerlendirmesi

| Kriter | Alternatifler | Karar vericiler | | |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | DM ₁ | DM ₂ | DM ₃ |
| C ₁ | A ₁ | İ | Çİ | Çİ |
| C ₁ | A ₂ | İ | İ | Çİ |
| C ₁ | A ₃ | İ | İ | İ |
| C ₁ | A ₄ | İ | İ | Oİ |
| C ₁ | A ₅ | Oİ | İ | Oİ |
| C ₁ | A ₆ | Oİ | Oİ | Oİ |
| C ₁ | A ₇ | Oİ | Oİ | Oİ |
| C ₁ | A ₈ | Oİ | E | Oİ |
| C ₁ | A ₉ | Oİ | E | E |
| C ₁ | A ₁₀ | E | E | E |
| C ₁ | A ₁₁ | E | OZ | E |
| C ₁ | A ₁₂ | E | OZ | OZ |
| C ₁ | A ₁₃ | OZ | OZ | OZ |
| C ₁ | A ₁₄ | OZ | Z | OZ |
| C ₁ | A ₁₅ | OZ | Z | Z |
| C ₁ | A ₁₆ | Z | Z | Z |
| C ₁ | A ₁₇ | Z | Z | ÇZ |
| C ₁ | A ₁₈ | Z | ÇZ | ÇZ |
| C ₁ | A ₁₉ | ÇZ | ÇZ | ÇZ |
| C ₁ | A ₂₀ | ÇZ | ÇZ | ÇZ |

Çizelge 2.8’de görüldüğü gibi 3 karar verici tarafından 20 adet alternatif (Pareto optimum çözümler) için değerlendirme yapılmıştır. Örneğin kâr değeri için 20 alternatif arasından 1. Alternatifi (A₁), DM₁ “İyi” olarak, DM₂ ve DM₃ ise “Çok iyi”

olarak değerlendirmiştir. 14. Alternatifi ise, DM_1 ve DM_3 , “Orta zayıf” olarak DM_2 ise “Zayıf” olarak değerlendirmiştir.

İkinci kriter emisyon için, karar vericilerin alternatiflerin değerlendirilmesinde kullandıkları sözel değişkenler Çizelge 2.9’da verilmiştir.

Çizelge 2.9. Üç karar vericiden emisyon kriteri için alternatif değerlendirmesi

| Kriter | Alternatifler | Karar vericiler | | |
|--------|---------------|-----------------|--------|--------|
| | | DM_1 | DM_2 | DM_3 |
| C_2 | A_1 | ÇZ | ÇZ | Z |
| C_2 | A_2 | ÇZ | Z | Z |
| C_2 | A_3 | Z | Z | Z |
| C_2 | A_4 | OZ | Z | OZ |
| C_2 | A_5 | OZ | OZ | OZ |
| C_2 | A_6 | OZ | OZ | OZ |
| C_2 | A_7 | OZ | OZ | OZ |
| C_2 | A_8 | E | OZ | E |
| C_2 | A_9 | E | E | E |
| C_2 | A_{10} | E | E | E |
| C_2 | A_{11} | E | Oİ | Oİ |
| C_2 | A_{12} | Oİ | Oİ | Oİ |
| C_2 | A_{13} | Oİ | İ | Oİ |
| C_2 | A_{14} | Oİ | İ | İ |
| C_2 | A_{15} | Oİ | İ | İ |
| C_2 | A_{16} | Oİ | İ | İ |
| C_2 | A_{17} | Oİ | İ | İ |
| C_2 | A_{18} | İ | İ | Çİ |
| C_2 | A_{19} | Çİ | İ | Çİ |
| C_2 | A_{20} | Çİ | Çİ | Çİ |

Çizelge 2.9’da görüldüğü gibi 3 karar verici tarafından 20 adet alternatif (Pareto optimum çözümler) için değerlendirme yapılmıştır. Örneğin emisyon değeri için 20 alternatif arasından 1. Alternatifi (A_1), DM_1 ve DM_2 “Çok zayıf” olarak, DM_3 ise

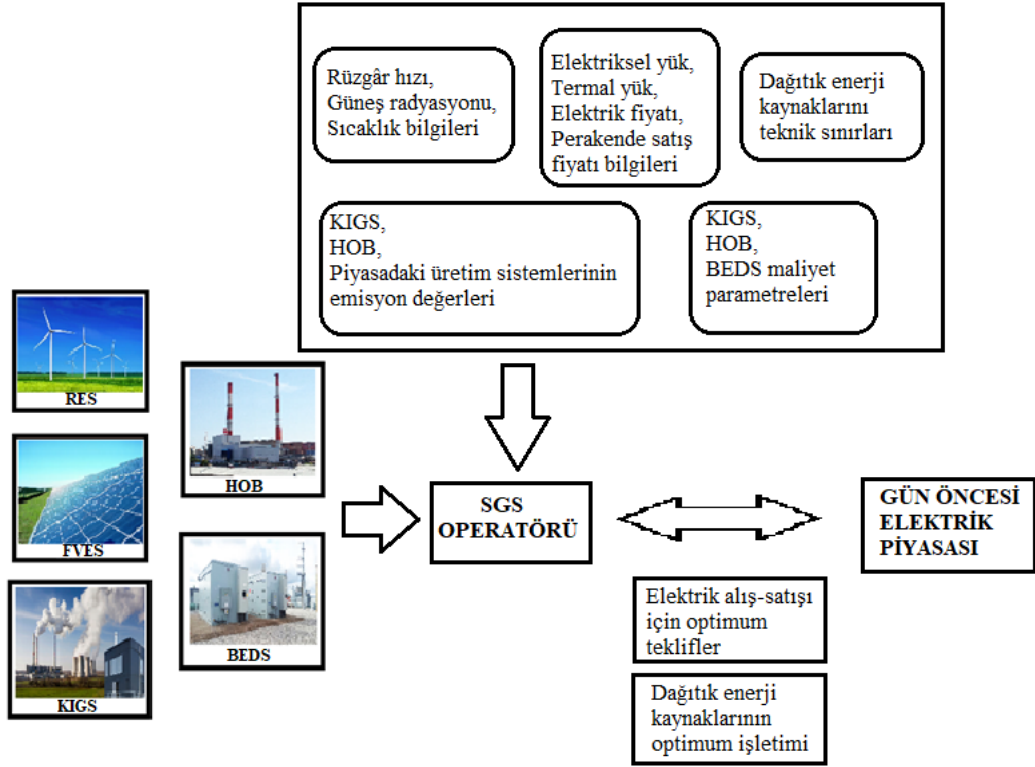
“Zayıf” olarak değerlendirmiştir. 14. Alternatifi ise, DM_1 “Orta iyi” olarak DM_2 ve DM_3 ise “İyi” olarak değerlendirmiştir.

Bu çalışmada, optimum çözümü belirlemek için uygulanan Bulanık TOPSIS yönteminin sonuçlarına göre, en iyi alternatif A_9 olmuştur. Yani oluşturulan Pareto optimum çözümler arasından 9. sıradaki özüm, SGS operatörü tarafından seçilmiştir.



3. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Bu çalışmada sunulan ve gün öncesi elektrik piyasasında yer alan SGS; RES, FVES, KIGS, İÜB ve BEDS'den oluşmaktadır. SGS işletiminin yapısı, Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. SGS işletiminin yapısı

Şekil 3.1'de görüldüğü üzere yenilenebilir enerji sistemlerinin çıkış gücünü etkileyen rüzgâr hızı, güneş radyasyonu ve sıcaklık bilgileri, elektriksel yük, termal yük, elektrik fiyatı, perakende satış fiyatı bilgileri, dağıtık enerji kaynaklarının teknik sınırları, emisyon ortaya çıkaran sistemlerin emisyon değerleri, sistemlerin maliyet parametreleri gibi bilgiler, SGS operatörü tarafından değerlendirilerek SGS'nin amaç fonksiyonuna göre optimum teklif ve işletim planlaması belirlenmektedir. Bu

planlamaya göre gün öncesi elektrik piyasasına saatlik olarak işletim ve teklif verileri sunulmaktadır. Bu model üzerinden 2 ayrı simülasyon çalışması yapılmıştır. Birinci simülasyon çalışmasında batarya bozulma maliyetinin ve emisyonun kâr üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından kaynaklanan belirsizlik dikkate alınmadığından deterministik bir model oluşturulmuştur. İkinci simülasyon çalışmasında ise birinci simülasyon çalışmasına belirsizlik ve risk analizi eklenmiştir. Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından kaynaklanan belirsizlik dikkate alındığından stokastik bir model oluşturulmuştur. Ayrıca düşük kâr senaryoları riskine karşı risk analizi de yapılmıştır. Aşağıda sırasıyla bu simülasyonlar açıklanmıştır.

3.1. Simülasyon Çalışması 1

Bu simülasyon çalışmasında, gün öncesi elektrik piyasasına katılan SGS'nin bir günlük optimum işletim ve teklif stratejisi saatlik olarak bulunmaya çalışılmıştır. 2018 yılının, bahar mevsiminin bir günü, çalışmanın günü olarak seçilmiştir. Bunun için, RES ve FVES çıkış güçlerinin hesaplanmasında gerekli olan rüzgâr hızı, güneş radyasyonu ve sıcaklık verileri olarak 2018 yılının Mart, Nisan ve Mayıs ayları verilerinin ortalamaları saatlik olarak alınmıştır.

Bu çalışmada 5 durum incelenmiştir. Bu durumlar aşağıda verilmiştir.

Durum A-1: SGS'nin batarya bozulma maliyetini göz önünde bulundurmadan kârı maksimum yapmak amacıyla optimum işletim planlaması

Durum A-2: SGS'nin emisyonu minimum yapmak amacıyla optimum işletim planlaması

Durum A-3: SGS'nin batarya bozulma maliyetini göz önünde bulundurmadan hem kârı maksimum yapmak hem de emisyonun minimum yapmak amacıyla optimum işletim planlaması

Durum A-4: SGS'nin batarya bozulma maliyetini göz önünde bulundurarak kârı maksimum yapmak amacıyla optimum işletim planlaması

Durum A-5: SGS'nin batarya bozulma maliyetini göz önünde bulundurarak hem kârı maksimum yapmak hem de emisyonun minimum yapmak amacıyla optimum işletim planlaması

Bu durumlardan batarya bozulma maliyetinin kâr üzerindeki önemli etkisi ve kârı maksimum yapmanın yanında çevresel sorunlardan dolayı emisyonun da minimum yapılmasının gerekliliği bu tezde öne çıkarılmaktadır.

3.1.1. Durum A-1 sonuçları

Bu durumda amaç fonksiyonu, batarya bozulma maliyetini ve emisyon minimizasyonunu dikkate almadan, SGS'nin kârını maksimum yapacak şekilde oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre SGS'nin günlük kâr miktarı 14663.541 \$ ve günlük emisyon miktarı 35332.534 kg olarak bulunmuştur.

SGS'nin optimum işletim ve teklif planlamasının sonuçları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Durum A-1 için SGS'nin optimum işletim ve teklif sonuçları

| t | P_{chp}^t | H_{chp}^t | H_{ho}^t | P_{ch}^t | P_{dis}^t | P_{mrkt}^t |
|----|-------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|
| 1 | 0.810 | 1.048 | 0.536 | - | - | -0.372 |
| 2 | 0.810 | 1.048 | 0.536 | 0.283 | - | -0.655 |
| 3 | 0.810 | 1.048 | 0.536 | 0.283 | - | -0.690 |
| 4 | 0.810 | 1.048 | 0.536 | 0.283 | - | -0.509 |
| 5 | 0.810 | 1.048 | 0.536 | 0.283 | - | -0.015 |
| 6 | 0.810 | 1.048 | 0.552 | 0.107 | - | 0.788 |
| 7 | 0.810 | 1.048 | 0.424 | - | - | 1.353 |
| 8 | 0.810 | 1.048 | 0.296 | - | - | 1.935 |
| 9 | 2.430 | 0.224 | 1.200 | - | - | 3.688 |
| 10 | 2.433 | 0.208 | 1.200 | - | 0.283 | 3.927 |
| 11 | 2.433 | 0.208 | 1.200 | - | 0.283 | 3.939 |
| 12 | 2.447 | 0.128 | 1.200 | - | 0.283 | 4.012 |
| 13 | 2.422 | 0.272 | 1.200 | 0.283 | - | 3.530 |
| 14 | 2.407 | 0.352 | 1.200 | - | 0.283 | 3.426 |
| 15 | 2.407 | 0.352 | 1.200 | - | 0.139 | 2.170 |
| 16 | 1.583 | 1.482 | 0.070 | - | - | - |
| 17 | 2.030 | 1.552 | - | - | - | - |
| 18 | 2.200 | 1.520 | - | - | - | -0.065 |
| 19 | 0.810 | 1.048 | 0.472 | - | - | -1.383 |
| 20 | 2.018 | 1.520 | - | - | - | - |
| 21 | 1.352 | 1.352 | 0.184 | - | - | - |
| 22 | 0.835 | 1.062 | 0.458 | - | - | - |
| 23 | 0.810 | 1.048 | 0.456 | - | - | -0.083 |
| 24 | 0.810 | 1.048 | 0.440 | - | - | -0.038 |

Çizelge 3.1 incelendiğinde, SGS operatörünün 1-5, 18-19 ve 23-24 saatlerinde elektrik piyasasından elektrik aldığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni bu saatlerde elektrik piyasa fiyatının düşük olmasıdır. SGS operatörü, piyasaya en fazla elektrik satışını ise 9-15 saatlerinde yapmıştır. Bunun nedeni ise de bu saatlerde elektrik piyasa fiyatının yüksek olmasıdır. O yüzden bu saatlerde KIGS'nin üretim miktarı diğer saatlere göre fazla olmuştur. KIGS, elektrik fiyatının düşük olduğu zamanlarda, piyasadan elektrik almak daha kârlı olacağından, üretimini 0.810 MW'a kadar düşürmüştür.

BEDS, elektrik fiyatının düşük olduğu durumlarda şarj modunda çalışmıştır. Çünkü kârını artırmak için depolanan elektriği, elektrik piyasa fiyatının yüksek olduğu zamanlarda piyasaya satmaktadır. Elektrik fiyatının yüksek olduğu zamanlarda ise daha fazla elektrik satışı yapmak ve kârını artırmak için deşarj modunda çalışmıştır.

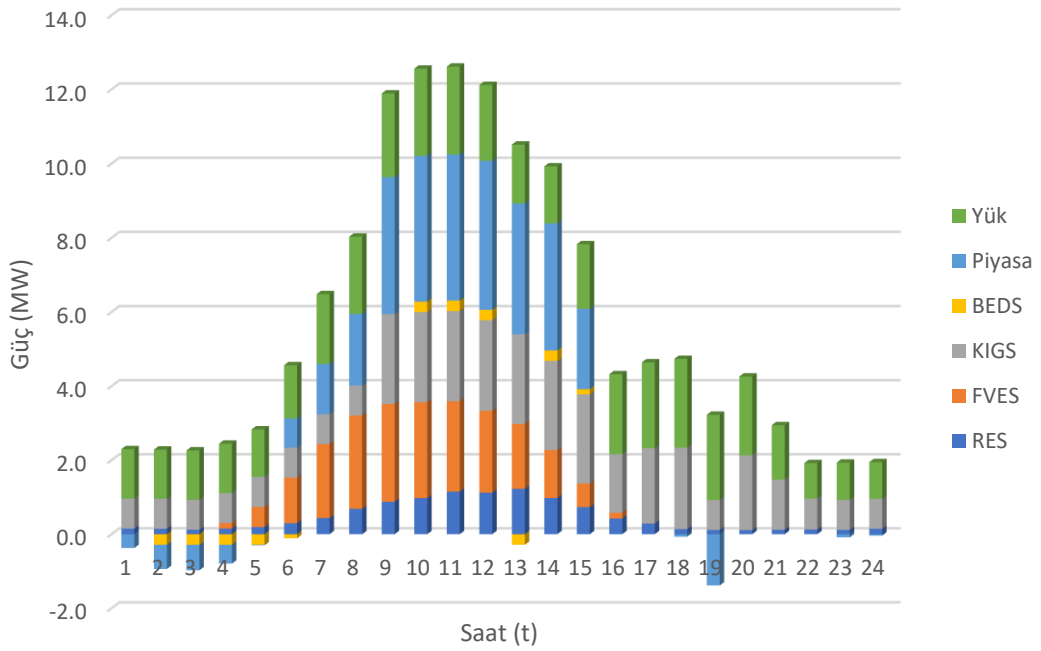
Simülasyon çalıştırıldığında saatlik elde edilen kâr ve ortaya çıkan emisyon miktarları bulunmuş ve Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Durum A-1 için saatlik kâr ve emisyon miktarları

| t | Kâr (\$) | Emisyon (kg) |
|----|----------|--------------|
| 1 | 100.401 | 1146.775 |
| 2 | 114.536 | 1409.152 |
| 3 | 118.877 | 1441.602 |
| 4 | 124.024 | 1273.792 |
| 5 | 128.318 | 815.790 |
| 6 | 164.522 | 808.311 |
| 7 | 212.969 | 756.888 |
| 8 | 406.225 | 705.465 |
| 9 | 1029.260 | 2241.867 |
| 10 | 2492.060 | 2243.927 |
| 11 | 2500.780 | 2243.927 |
| 12 | 2301.415 | 2254.225 |
| 13 | 748.146 | 2235.688 |
| 14 | 1950.782 | 2225.389 |
| 15 | 622.652 | 2225.389 |
| 16 | 287.339 | 1174.504 |
| 17 | 280.955 | 1469.990 |
| 18 | 273.899 | 1653.401 |
| 19 | 274.355 | 2058.390 |
| 20 | 122.651 | 1461.301 |
| 21 | 110.723 | 1052.882 |
| 22 | 99.194 | 788.639 |
| 23 | 99.717 | 846.695 |
| 24 | 99.741 | 798.547 |

Çizelge 3.2'ye göre en fazla kâr miktarının 9-15 saatlerinde elde edildiği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni bu saatlerde piyasaya yapılan elektrik satışının fazla olmasıdır. Emisyon miktarının 9-15 saatlerinde ve 19. saatte 2000 kg'nın üstünde olduğu ve diğer saatlerdeki emisyon miktarına göre fazla olduğu gözlemlenmiştir. Çünkü 9-15 saatlerinde, kombine ısı ve güç santralının çıkış gücü fazladır (yaklaşık 2.4 MW). 19. saatte piyasadan alınan elektrik miktarı en fazla değerdedir. Aynı zamanda 9-15 saatlerinde ısı üretim biriminin üretim miktarı fazladır. Emisyon miktarını, kombine ısı ve güç santralının üretimi, ısı üretim biriminin üretimi ve piyasadan elektrik satın alınması artırdığından, bu durumlar 9-15 saatlerinde emisyonun diğer saatlere göre fazla çıkmasına neden olmuştur.

Bu simülasyonda sistemin bir kısıtı olan elektriksel güç dengesi değişimi de Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Durum A-1 için elektriksel güç dengesi

Şekil 3.2’de Yük, elektriksel yük miktarını; RES, RES çıkış gücünü; FVES, FVES çıkış gücünü; KIGS, KIGS’nin elektriksel çıkış gücünü; BEDS, bataryanın şarj edip depoladığı güç miktarını (grafikte negatif olan kısım) ve bataryanın deşarj edilip verdiği güç miktarını (grafikte pozitif olan kısım); Piyasa; piyasaya satılan güç miktarını (grafikte pozitif olan kısım) ve piyasadan satın alınan güç miktarını (grafikte negatif olan kısım) göstermektedir. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi elektriksel yük miktarı RES, FVES ve KIGS’den karşılanmaktadır. Fazlası ya BEDS’de depolanmaktadır ya da piyasaya satılmaktadır. BEDS’deki güç miktarının pozitif olması depoladığı elektriği verdiği, negatif olması ise elektriği depoladığı anlamına gelmektedir. Piyasa güç miktarının pozitif olması, piyasaya elektrik satıldığını, negatif olması ise piyasadan elektrik satın alındığını ifade etmektedir.

3.1.2. Durum A-2 sonuçları

Bu durumda amaç fonksiyonu, SGS’nin işletiminde ortaya çıkan emisyonu minimum yapacak şekilde oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre SGS’nin günlük kâr miktarı 9926.852 \$ ve günlük emisyon miktarı 22220.371 kg olarak bulunmuştur.

SGS’nin optimum işletim ve teklif planlamasının sonuçları Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Durum A-2 için SGS'nin optimum işletim ve teklif sonuçları

| t | P_{chp}^t | H_{chp}^t | H_{ho}^t | P_{ch}^t | P_{dis}^t | P_{mrkt}^t |
|----|-------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|
| 1 | 1.182 | 1.257 | 0.327 | - | - | - |
| 2 | 1.182 | 1.257 | 0.327 | - | - | - |
| 3 | 1.217 | 1.276 | 0.308 | - | - | - |
| 4 | 1.036 | 1.175 | 0.409 | - | - | - |
| 5 | 0.810 | 1.048 | 0.536 | 0.268 | - | - |
| 6 | 0.810 | 1.048 | 0.552 | 0.283 | - | 0.612 |
| 7 | 0.810 | 1.048 | 0.424 | 0.283 | - | 1.070 |
| 8 | 0.810 | 1.048 | 0.296 | 0.283 | - | 1.652 |
| 9 | 0.810 | 1.048 | 0.376 | 0.122 | - | 1.946 |
| 10 | 0.810 | 1.048 | 0.360 | - | 0.164 | 2.185 |
| 11 | 0.810 | 1.048 | 0.360 | - | 0.164 | 2.197 |
| 12 | 0.810 | 1.048 | 0.280 | - | 0.084 | 2.176 |
| 13 | 0.810 | 1.048 | 0.424 | 0.283 | - | 1.918 |
| 14 | 0.810 | 1.048 | 0.504 | - | 0.060 | 1.606 |
| 15 | 0.810 | 1.048 | 0.504 | 0.283 | - | 0.151 |
| 16 | 1.583 | 1.482 | 0.070 | - | - | - |
| 17 | 1.778 | 1.552 | - | - | 0.242 | - |
| 18 | 1.982 | 1.520 | - | - | 0.283 | - |
| 19 | 1.910 | 1.520 | - | - | 0.283 | - |
| 20 | 1.792 | 1.520 | - | - | 0.226 | - |
| 21 | 1.352 | 1.352 | 0.184 | - | - | - |
| 22 | 0.835 | 1.062 | 0.458 | - | - | - |
| 23 | 0.893 | 1.095 | 0.409 | - | - | - |
| 24 | 0.848 | 1.069 | 0.419 | - | - | - |

Çizelge 3.3'deki sonuçlar incelendiğinde, KIGS'nin üretim miktarları ve BEDS'nin şarj ve deşarj güçleri saatlik olarak Durum A-1'e göre farklılık göstermiştir. Çünkü Durum A-2'de amaç, kârı düşünmeden, emisyonu minimum yapmaktır. SGS operatörünün, 1-5 ve 16-24 saatlerinde piyasa ile elektrik alış-satışı yapmadığı gözlemlenmiştir. Kârı maksimum yapmak hedeflenmediği için piyasaya elektrik satışı yapılmamıştır. Fakat 6-15 saatlerinde piyasaya elektrik satışı yapılmıştır. Çünkü fazla elektrik, BEDS'nin maksimum şarj kapasitesini aşmasından dolayı depolanamamıştır.

Piyasadan elektrik satın alınmama nedeni ise, piyasadaki üretim birimlerinin emisyon oranlarının, SGS'deki üretim birimlerinden fazla olmasıdır. 17-20 saatlerinde KIGS termal yükü karşılayacak ısı üretimini yaptığından bu saatlerde IÜB üretim yapmamıştır.

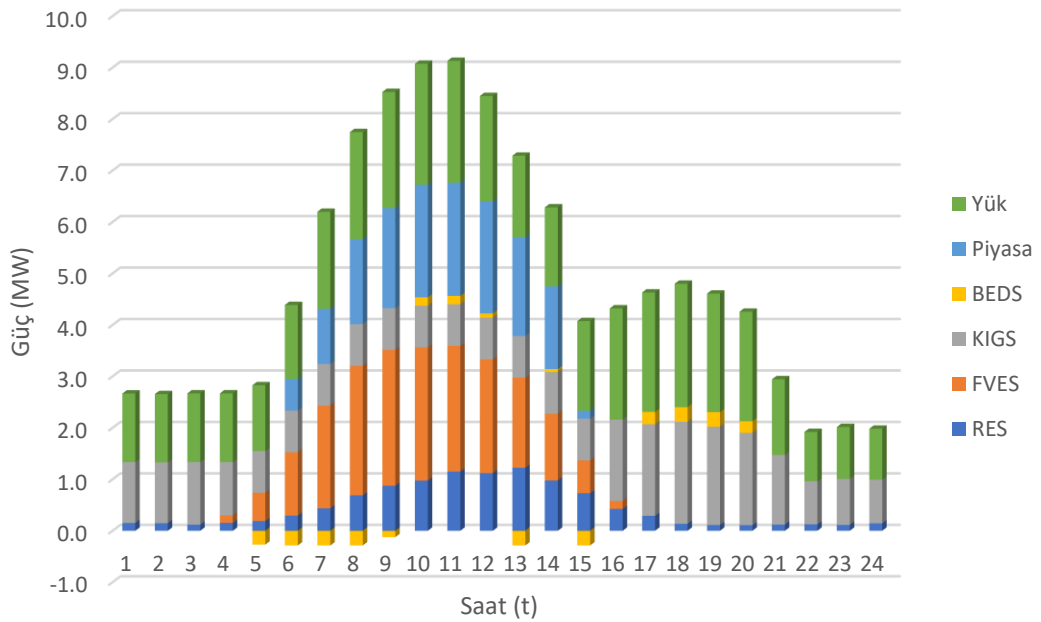
Simülasyon çalıştırıldığında saatlik elde edilen kâr ve ortaya çıkan emisyon miktarları bulunmuş ve Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Durum A-2 için saatlik kâr ve emisyon miktarları

| t | Kâr (\$) | Emisyon (kg) |
|----|----------|--------------|
| 1 | 92.317 | 987.391 |
| 2 | 111.861 | 987.391 |
| 3 | 110.400 | 1004.845 |
| 4 | 120.310 | 914.584 |
| 5 | 128.573 | 801.883 |
| 6 | 159.404 | 808.311 |
| 7 | 203.630 | 756.888 |
| 8 | 390.943 | 705.465 |
| 9 | 747.822 | 737.604 |
| 10 | 1589.060 | 731.176 |
| 11 | 1597.780 | 731.176 |
| 12 | 1345.429 | 699.037 |
| 13 | 494.070 | 756.888 |
| 14 | 1000.859 | 789.028 |
| 15 | 136.508 | 789.028 |
| 16 | 287.339 | 1174.504 |
| 17 | 294.571 | 1294.499 |
| 18 | 289.986 | 1435.232 |
| 19 | 282.895 | 1383.094 |
| 20 | 135.365 | 1297.429 |
| 21 | 110.723 | 1052.882 |
| 22 | 99.194 | 788.639 |
| 23 | 98.745 | 811.134 |
| 24 | 99.068 | 782.266 |

Çizelge 3.4 incelendiğinde 10-12, 14 saatlerinde kâr miktarının 1000 \$'ın üzerinde olduğu ve diğer saatlerdeki kâr miktarına göre fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni bu saatlerde elektrik piyasa fiyatının yüksek olmasıdır. 16-21 saatlerinde ise emisyon miktarının diğer saatlerdeki emisyon miktarına göre fazla olduğu gözlemlenmiştir. Çünkü bu saatlerde KIGS'nin elektriksel çıkış gücü diğer saatlere göre fazladır. Piyasadan elektrik satın alınmadığı için emisyon oranında önemli bir azalma olmuştur. Durum A-1 ile karşılaştırıldığında, Durum A-2'deki toplam kâr miktarında %32.3 oranında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, toplam emisyon oranı da %37.11 oranında düşmüştür.

Bu simülasyonda sistemin bir kısıtı olan elektriksel güç dengesi değişimi de Şekil 3.3'de verilmiştir.



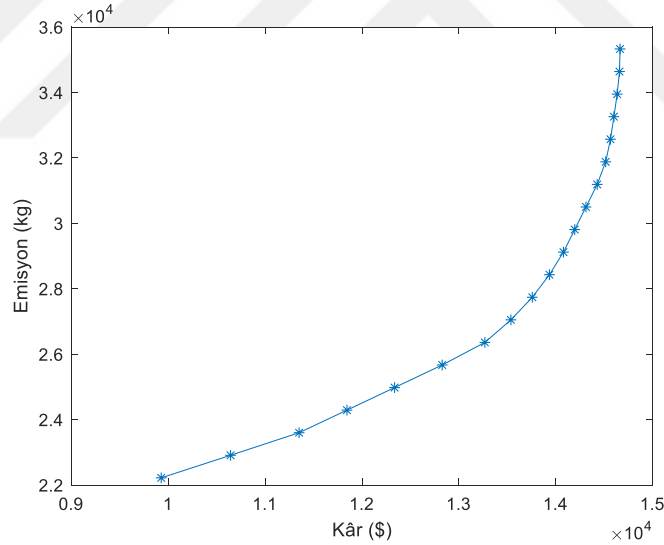
Şekil 3.3. Durum A-2 için elektriksel güç dengesi

Şekil 3.3'de görüldüğü gibi elektriksel yük miktarı RES, FVES ve KIGS'den karşılanmaktadır. Piyasa güç miktarının negatif değerde olmaması piyasadan elektrik

satın alınmadığını göstermektedir. BEDS güç miktarı 5-9, 13 ve 15 saatlerinde negatif değerdedir. Çünkü bu saatlerde BEDS şarj modunda çalışarak elektriği depolamaktadır. 10-12, 14 ve 17-20 saatlerinde ise BEDS güç miktarı pozitif değerdedir, yani BEDS deşarj modunda çalışarak elektrik vermektedir.

3.1.3. Durum A-3 sonuçları

Bu durumda amaç fonksiyonu, SGS'nin hem kârını maksimum yapacak hem de ortaya çıkan emisyonu minimum yapacak şekilde oluşturulmuştur. Batarya bozulma maliyeti bu durumda dikkate alınmamıştır. Optimum sonucu bulmak için Pareto tabanlı yaklaşım kullanılmıştır ve 20 adet çözümün olduğu set elde edilmiştir. Pareto-optimum çözümler Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Durum A-3 için Pareto optimum çözümler

Pareto optimum sonuçlar oluşturulduktan sonra SGS operatörü için çözümler arasından en iyi çözüm seçilmiştir. Bunun için Bulanık TOPSIS yöntemi kullanılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, SGS'nin günlük kâr miktarı 14195.442 \$ ve günlük emisyon miktarı 29811.624 kg olarak bulunmuştur.

SGS'nin optimum işletim ve teklif planlamasının sonuçları Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Durum A-3 için SGS'nin optimum işletim ve teklif sonuçları

| t | P_{chp}^t | H_{chp}^t | H_{ho}^t | P_{ch}^t | P_{dis}^t | P_{mrkt}^t |
|----|-------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|
| 1 | 1.182 | 1.257 | 0.327 | - | - | - |
| 2 | 1.182 | 1.257 | 0.327 | - | - | - |
| 3 | 1.217 | 1.276 | 0.308 | - | - | - |
| 4 | 1.143 | 1.235 | 0.349 | 0.107 | - | - |
| 5 | 1.143 | 1.056 | 0.528 | 0.283 | - | - |
| 6 | 0.810 | 1.048 | 0.552 | 0.283 | - | 0.612 |
| 7 | 0.810 | 1.048 | 0.424 | 0.283 | - | 1.070 |
| 8 | 0.810 | 1.048 | 0.296 | 0.283 | - | 1.652 |
| 9 | 2.217 | 1.424 | - | - | - | 3.475 |
| 10 | 2.287 | 1.030 | 0.378 | - | 0.283 | 3.781 |
| 11 | 2.287 | 1.030 | 0.378 | - | 0.283 | 3.793 |
| 12 | 2.296 | 0.977 | 0.351 | - | 0.283 | 3.861 |
| 13 | 2.208 | 1.472 | - | 0.283 | - | 3.316 |
| 14 | 2.270 | 1.125 | 0.427 | - | 0.283 | 3.289 |
| 15 | 2.194 | 1.552 | - | - | 0.139 | 1.957 |
| 16 | 1.708 | 1.552 | - | 0.125 | - | - |
| 17 | 2.030 | 1.552 | - | - | - | - |
| 18 | 2.177 | 1.520 | - | - | 0.088 | - |
| 19 | 2.177 | 1.520 | - | - | 0.016 | - |
| 20 | 2.018 | 1.520 | - | - | - | - |
| 21 | 1.352 | 1.352 | 0.184 | - | - | - |
| 22 | 0.835 | 1.062 | 0.458 | - | - | - |
| 23 | 0.893 | 1.095 | 0.409 | - | - | - |
| 24 | 0.848 | 1.069 | 0.419 | - | - | - |

Çizelge 3.5 incelendiğinde, 6-15 saatlerinde piyasaya elektrik satımı yapıldığı ve Durum A-2'ye göre piyasaya satılan elektrik miktarında artış gözlemlenmiştir. Çünkü emisyonu minimum yapmanın yanında kârı maksimum yapmak da bu durumun amacıdır. Daha fazla elektrik satabilmek için de KIGS'nin üretim miktarı artırılmıştır. Piyasadan elektrik alınmadığı gözlemlenmiştir. Çünkü piyasadan elektrik satın almak hem kârı düşürecek hem de piyasadaki üretim birimlerinin emisyon oranları fazla olduğundan emisyonu artıracaktır.

Simülasyon çalıştırıldığında saatlik elde edilen kâr ve ortaya çıkan emisyon miktarları bulunmuş ve Çizelge 3.6'da verilmiştir.

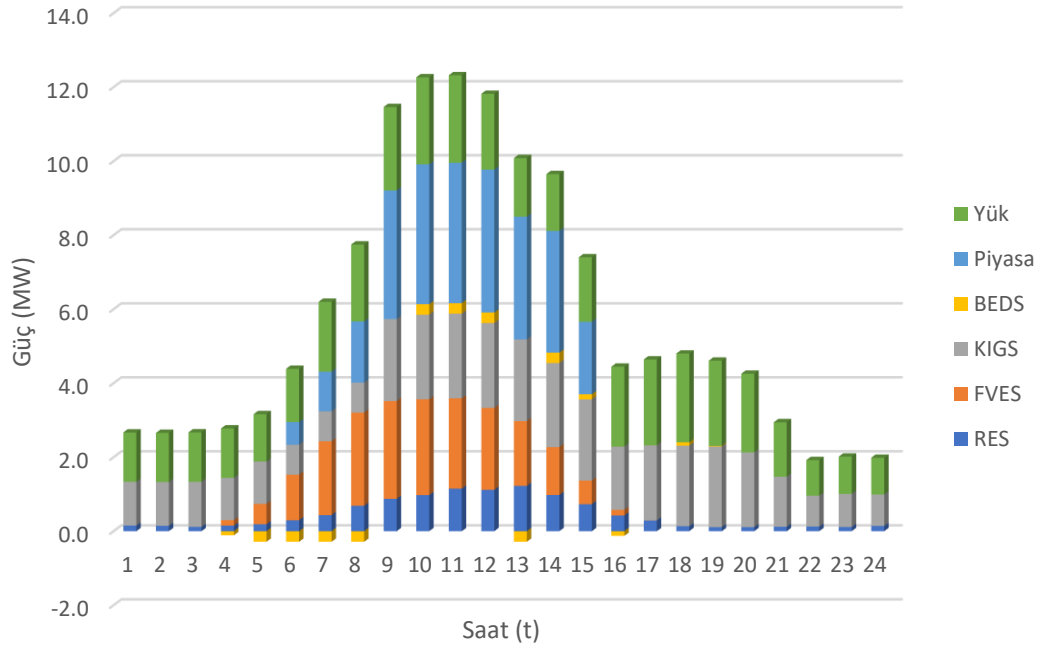


Çizelge 3.6. Durum A-3 için saatlik kâr ve emisyon miktarları

| t | Kâr (\$) | Emisyon (kg) |
|----|----------|--------------|
| 1 | 92.317 | 987.391 |
| 2 | 111.861 | 987.391 |
| 3 | 110.400 | 1004.845 |
| 4 | 114.479 | 967.699 |
| 5 | 127.752 | 809.364 |
| 6 | 159.404 | 808.311 |
| 7 | 203.630 | 756.888 |
| 8 | 390.943 | 705.465 |
| 9 | 998.334 | 1605.290 |
| 10 | 2418.763 | 1808.062 |
| 11 | 2427.483 | 1808.062 |
| 12 | 2225.716 | 1804.064 |
| 13 | 717.217 | 1599.111 |
| 14 | 1881.810 | 1815.260 |
| 15 | 576.571 | 1588.812 |
| 16 | 280.481 | 1236.881 |
| 17 | 280.955 | 1469.990 |
| 18 | 279.041 | 1576.258 |
| 19 | 267.905 | 1576.258 |
| 20 | 122.651 | 1461.301 |
| 21 | 110.723 | 1052.882 |
| 22 | 99.194 | 788.639 |
| 23 | 98.745 | 811.134 |
| 24 | 99.068 | 782.266 |

Şekil 3.6 incelendiğine, Durum A-3'deki toplam kâr miktarında, Durum A-1'deki toplam kâr miktarına göre %3.2 düşüş, Durum A-2'deki toplam kâr miktarına göre %43 artış gözlemlenmiştir. Durum A-3'deki toplam emisyon miktarında ise, Durum A-1'deki toplam emisyon miktarına göre %15.62 düşüş, Durum A-2'deki toplam emisyon miktarına göre %34.16 artış gözlemlenmiştir.

Bu simülasyonda sistemin bir kısıtı olan elektriksel güç dengesi değişimi de Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.5. Durum A-3 için elektriksel güç dengesi

Şekil 3.5 incelendiğinde, piyasadan elektrik satın alınmadığı ve 6-15 saatlerinde piyasaya elektrik satımı yapıldığı gözlemlenmiştir. BEDS; 4-8, 13 ve 16 saatlerinde şarj modunda çalışıp elektriği depolamıştır. 10-12, 14-15, 18-19 saatlerinde ise deşarj modunda çalışıp depolanan elektriği vermiştir.

3.1.4. Durum A-4 sonuçları

Bu durumda, batarya bozulma maliyeti kâr hesaplamasına dahil edilmiştir ve amaç fonksiyonu, batarya bozulma maliyetini de göz önünde bulundurarak, SGS'nin kârını maksimum yapacak şekilde oluşturulmuştur. Batarya bozulma maliyetinin dikkate alınması, SGS optimum işletim planlamasında daha gerçekçi bir karar verilmesi açısından önemlidir. Elde edilen sonuçlara göre SGS'nin günlük kâr miktarı 13984.77 \$ ve günlük emisyon miktarı 34477.186 kg olarak bulunmuştur.

SGS'nin optimum işletim ve teklif planlamasının sonuçları Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Durum A-4 için SGS'nin optimum işletim ve teklif sonuçları

| t | P_{chp}^t | H_{chp}^t | H_{ho}^t | P_{ch}^t | P_{dis}^t | P_{mrkt}^t |
|----|-------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|
| 1 | 0.810 | 1.048 | 0.536 | - | - | -0.372 |
| 2 | 0.810 | 1.048 | 0.536 | - | - | -0.372 |
| 3 | 0.810 | 1.048 | 0.536 | - | - | -0.407 |
| 4 | 0.810 | 1.048 | 0.536 | - | - | -0.226 |
| 5 | 0.810 | 1.048 | 0.536 | 0.283 | - | -0.015 |
| 6 | 0.810 | 1.048 | 0.552 | 0.283 | - | 0.612 |
| 7 | 0.810 | 1.048 | 0.424 | 0.283 | - | 1.070 |
| 8 | 0.810 | 1.048 | 0.296 | 0.283 | - | 1.652 |
| 9 | 2.430 | 0.224 | 1.200 | 0.107 | - | 3.582 |
| 10 | 2.433 | 0.208 | 1.200 | - | 0.283 | 3.927 |
| 11 | 2.433 | 0.208 | 1.200 | - | 0.283 | 3.939 |
| 12 | 2.447 | 0.128 | 1.200 | - | 0.209 | 3.938 |
| 13 | 2.422 | 0.272 | 1.200 | - | - | 3.813 |
| 14 | 2.407 | 0.352 | 1.200 | - | 0.121 | 3.264 |
| 15 | 2.407 | 0.352 | 1.200 | - | 0.045 | 2.077 |
| 16 | 1.568 | 1.474 | 0.078 | - | 0.015 | - |
| 17 | 2.017 | 1.552 | - | - | 0.013 | - |
| 18 | 2.200 | 1.520 | - | - | 0.012 | -0.053 |
| 19 | 0.810 | 1.048 | 0.472 | - | 0.011 | -1.372 |
| 20 | 2.008 | 1.520 | - | - | 0.010 | - |
| 21 | 1.343 | 1.347 | 0.189 | - | 0.009 | - |
| 22 | 0.826 | 1.057 | 0.463 | - | 0.009 | - |
| 23 | 0.810 | 1.048 | 0.456 | - | 0.008 | -0.075 |
| 24 | 0.810 | 1.048 | 0.440 | - | 0.007 | -0.031 |

Çizelge 3.7 incelendiğinde, Durum A-1 ile karşılaştırıldığında en önemli değişikliğin, BEDS'nin deşarj gücünde olduğu gözlemlenmiştir. Deşarj gücünde önemli bir azalma vardır. Çünkü fazla enerjinin deşarj edilmesi batarya ömrünü kısaltacaktır ve maliyeti artıracaktır.

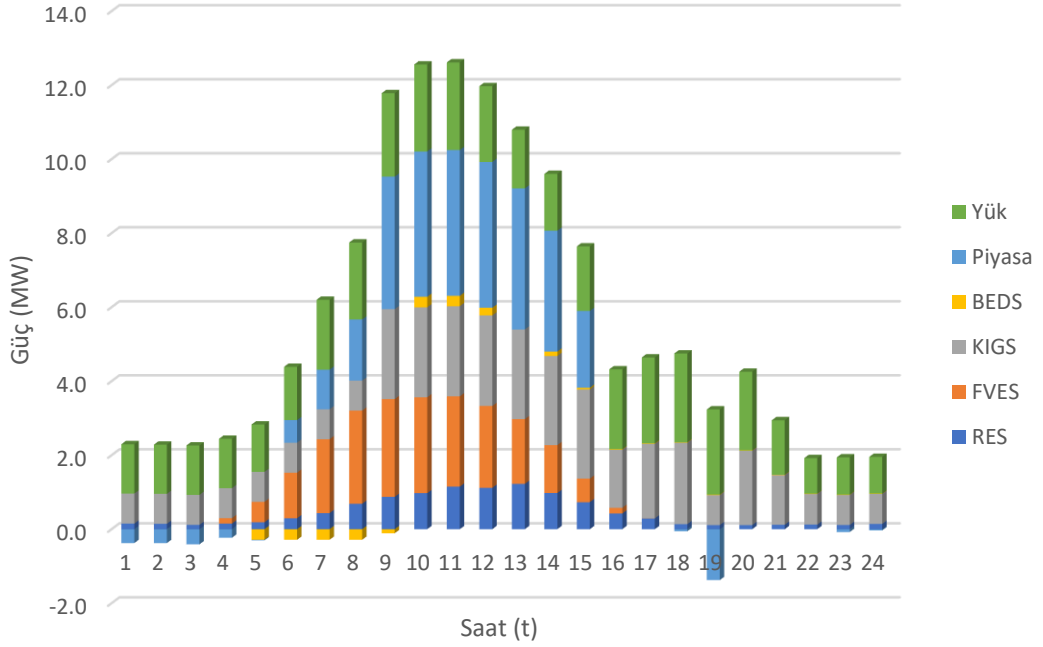
Simülasyon çalıştırıldığında saatlik elde edilen kâr ve ortaya çıkan emisyon miktarları bulunmuş ve Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Durum A-4 için saatlik kâr ve emisyon miktarları

| t | Kâr (\$) | Emisyon (kg) |
|----|----------|--------------|
| 1 | 100.401 | 1146.775 |
| 2 | 122.177 | 1146.775 |
| 3 | 124.537 | 1179.225 |
| 4 | 128.835 | 1011.414 |
| 5 | 42.807 | 815.790 |
| 6 | 126.980 | 808.311 |
| 7 | 186.706 | 756.888 |
| 8 | 380.573 | 705.465 |
| 9 | 1003.024 | 2241.867 |
| 10 | 2473.676 | 2243.927 |
| 11 | 2461.433 | 2243.927 |
| 12 | 2191.970 | 2254.225 |
| 13 | 808.991 | 2235.688 |
| 14 | 1778.855 | 2225.389 |
| 15 | 553.671 | 2225.389 |
| 16 | 272.768 | 1167.257 |
| 17 | 265.705 | 1460.316 |
| 18 | 257.839 | 1641.908 |
| 19 | 258.533 | 2048.393 |
| 20 | 105.813 | 1453.887 |
| 21 | 93.471 | 1048.218 |
| 22 | 81.434 | 784.340 |
| 23 | 82.299 | 839.655 |
| 24 | 82.289 | 792.158 |

Çizelge 3.8'e göre, Durum A-4'deki toplam kâr miktarı, Durum A-1'deki toplam kâr miktarından 678.574 \$ daha düşüktür. Bu değer bir günlük olduğu ve tüm yıl için sabit kabul edildiği düşünülürse bir yıllık kayıp yaklaşık 247745.21 \$ olacaktır. Bu durum, batarya bozulma maliyetinin hesaba katılmasının kâr miktarında önemli düşüşe neden olduğunu göstermiştir. Bu nedenle SGS'lerin optimum işletim planını yaparken, enerji depolama sisteminin maliyetinin dikkate alınması büyük önem taşımaktadır.

Bu simülasyonda sistemin bir kısıtı olan elektriksel güç dengesi değişimi de Şekil 3.6'da verilmiştir.



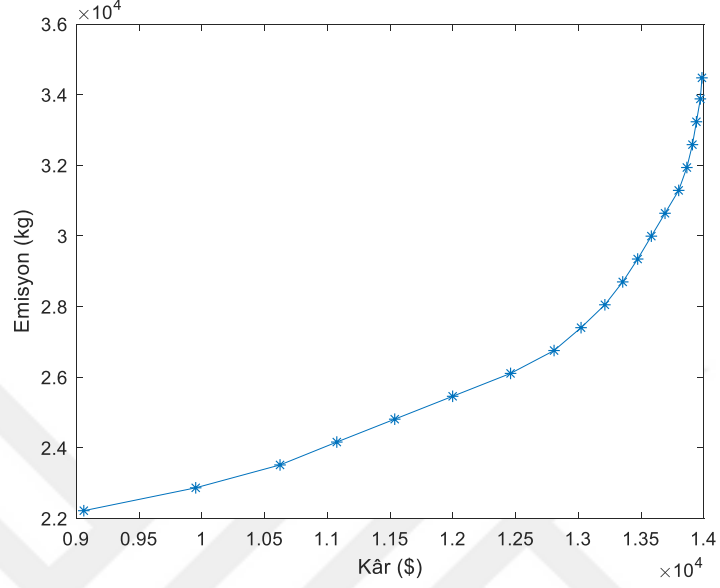
Şekil 3.6. Durum A-4 için elektriksel güç dengesi

Şekil 3.6 incelendiğinde, 1-5, 18-19, 23-24 saatlerinde piyasadan elektrik alımının yapıldığı, 6-15 saatlerinde ise piyasaya elektrik satımının yapıldığı gözlemlenmiştir. Batarya 5-9 saatlerinde şarj modunda, 10-12 ve 14-24 saatlerinde ise deşarj modunda çalıştırılmıştır.

3.1.5. Durum A-5 sonuçları

Bu durumda amaç fonksiyonu, batarya bozulma maliyeti göz önünde bulundurularak SGS'nin hem kârını maksimum yapacak hem de ortaya çıkan emisyonu minimum yapacak şekilde oluşturulmuştur. Optimum sonucu bulmak için Pareto tabanlı

yaklaşım kullanılmıştır ve 20 adet çözümün olduğu set elde edilmiştir. Pareto-optimum çözümler Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Durum A-5 için Pareto optimum çözümler

Pareto optimum sonuçlar oluşturulduktan sonra SGS operatörü için çözümler arasından en iyi çözüm seçilmiştir. Bunun için Bulanık TOPSIS yöntemi kullanılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, SGS'nin günlük kâr miktarı 13472.645 \$ ve günlük emisyon miktarı 29346.621 kg olarak bulunmuştur.

SGS'nin optimum işletim ve teklif planlamasının sonuçları Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Durum A-5 için SGS'nin optimum işletim ve teklif sonuçları

| t | P_{chp}^t | H_{chp}^t | H_{ho}^t | P_{ch}^t | P_{dis}^t | P_{mrkt}^t |
|----|-------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|
| 1 | 1.182 | 1.257 | 0.327 | - | - | - |
| 2 | 1.182 | 1.257 | 0.327 | - | - | - |
| 3 | 1.217 | 1.276 | 0.308 | - | - | - |
| 4 | 1.036 | 1.175 | 0.409 | - | - | - |
| 5 | 0.825 | 1.056 | 0.528 | 0.283 | - | - |
| 6 | 0.810 | 1.048 | 0.552 | 0.283 | - | 0.612 |
| 7 | 0.810 | 1.048 | 0.424 | 0.283 | - | 1.070 |
| 8 | 0.810 | 1.048 | 0.296 | 0.283 | - | 1.652 |
| 9 | 2.217 | 1.424 | - | 0.107 | - | 3.368 |
| 10 | 2.256 | 1.201 | 0.207 | - | 0.283 | 3.750 |
| 11 | 2.256 | 1.201 | 0.207 | - | 0.283 | 3.762 |
| 12 | 2.266 | 1.148 | 0.180 | - | 0.199 | 3.747 |
| 13 | 2.208 | 1.472 | - | - | - | 3.599 |
| 14 | 2.239 | 1.297 | 0.255 | - | 0.118 | 3.094 |
| 15 | 2.194 | 1.552 | - | - | 0.039 | 1.857 |
| 16 | 1.569 | 1.474 | 0.078 | - | 0.014 | - |
| 17 | 2.012 | 1.552 | - | - | 0.018 | - |
| 18 | 2.200 | 1.520 | - | - | 0.019 | -0.046 |
| 19 | 2.179 | 1.520 | - | - | 0.014 | - |
| 20 | 2.005 | 1.520 | - | - | 0.013 | - |
| 21 | 1.342 | 1.347 | 0.189 | - | 0.010 | - |
| 22 | 0.826 | 1.057 | 0.463 | - | 0.009 | - |
| 23 | 0.885 | 1.090 | 0.414 | - | 0.008 | - |
| 24 | 0.840 | 1.065 | 0.423 | - | 0.008 | - |

Çizelge 3.9 incelendiğinde sadece 18. saatte piyasadan elektrik satın alındığı gözlemlenmiştir. Piyasadaki üretim birimlerinin emisyon oranı fazla olduğundan piyasada elektrik satın alma tercih edilmemiştir. Bunun yerine KIGS'nin üretimi fazla olmuştur. Durum A-4'de olduğu gibi bataryanın deşarj gücünde batarya bozulma maliyetinden dolayı azalma olmuştur.

Simülasyon çalıştırıldığında saatlik elde edilen kâr ve ortaya çıkan emisyon miktarları bulunmuş ve Çizelge 3.10’da verilmiştir.

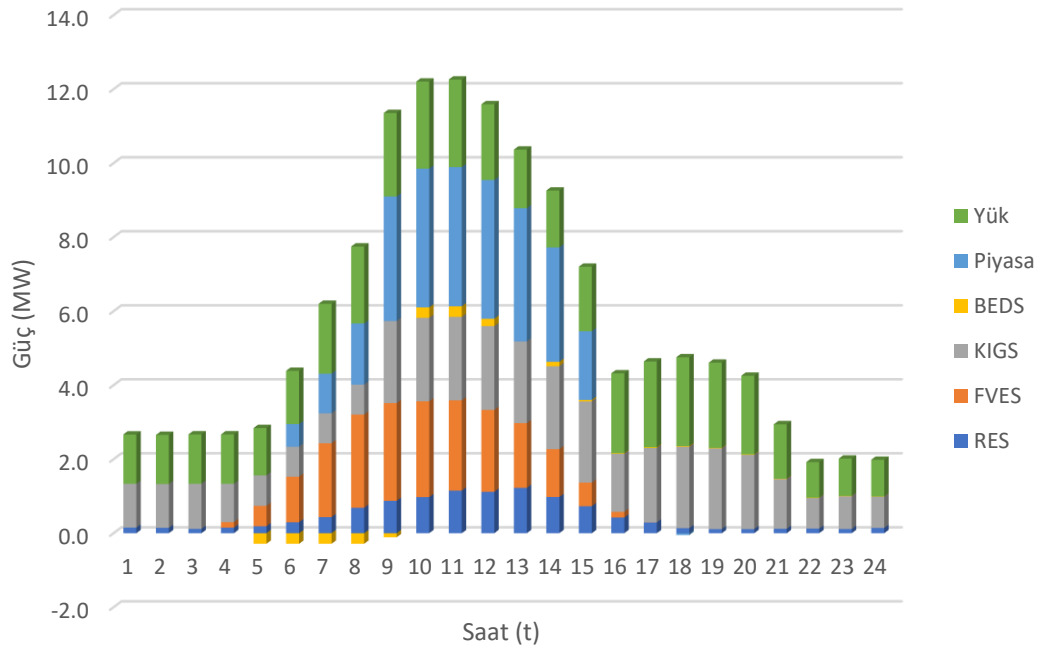
Çizelge 3.10. Durum A-5 için saatlik kâr ve emisyon miktarları

| t | Kâr (\$) | Emisyon (kg) |
|----|----------|--------------|
| 1 | 92.317 | 987.391 |
| 2 | 111.861 | 987.391 |
| 3 | 110.400 | 1004.845 |
| 4 | 120.310 | 914.584 |
| 5 | 42.242 | 809.364 |
| 6 | 126.980 | 808.311 |
| 7 | 186.706 | 756.888 |
| 8 | 380.573 | 705.465 |
| 9 | 972.098 | 1605.290 |
| 10 | 2385.042 | 1716.941 |
| 11 | 2372.800 | 1716.941 |
| 12 | 2101.488 | 1712.943 |
| 13 | 778.062 | 1599.111 |
| 14 | 1701.014 | 1724.139 |
| 15 | 516.650 | 1588.812 |
| 16 | 275.155 | 1167.322 |
| 17 | 263.583 | 1457.311 |
| 18 | 251.555 | 1636.016 |
| 19 | 247.390 | 1577.797 |
| 20 | 102.265 | 1452.095 |
| 21 | 93.131 | 1048.021 |
| 22 | 81.067 | 784.169 |
| 23 | 80.082 | 807.014 |
| 24 | 79.874 | 778.460 |

Çizelge 3.10’a göre, batarya bozulma maliyetinin dikkate alınmadığı hem kâr maksimizasyonunun hem de emisyon minimizasyonunun yapıldığı Durum A-3’deki toplam kâr miktarına göre, Durum A-5’deki toplam kâr miktarının 722.797 \$ düştüğü gözlemlenmiştir. Bu değer bir günlük olduğu hesaba katılırsa ve bu değer tüm yıl

için sabit kabul edildiğinde, bir yılda yaklaşık 263820.905 \$ düşüş olmaktadır. Bu durum da enerji depolama sistemi maliyetinin hesaba katılması gerekliliğinin önemini göstermiştir.

Bu simülasyonda sistemin bir kısıtı olan elektriksel güç dengesi değişimi de Şekil 3.8'de verilmiştir.



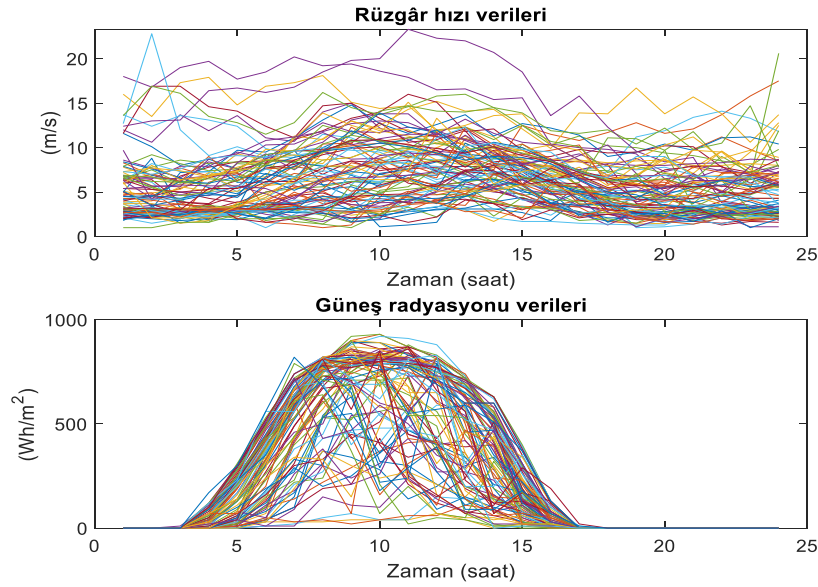
Şekil 3.8. Durum A-5 için elektriksel güç dengesi

Şekil 3.8 incelendiğinde 6-15 saatlerinde piyasaya elektrik satımının yapıldığı gözlemlenmiştir. Batarya 5-9 saatlerinde şarj, 10-12 ve 14- 24 saatlerinde ise deşarj modundadır. 15-24 saatlerindeki deşarj gücünde önemli azalma olmuştur.

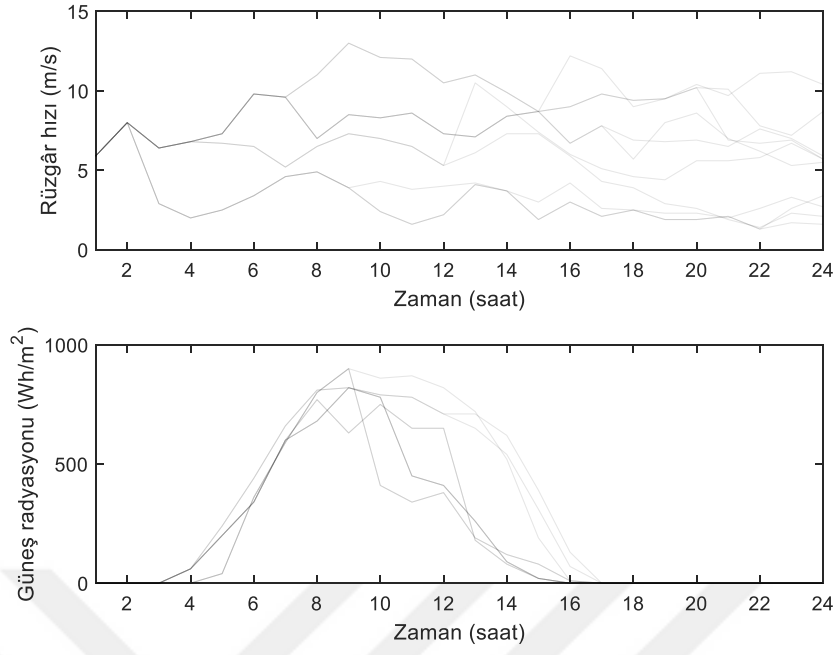
3.2. Simülasyon Çalışması 2

Bu simülasyon çalışmasında, RES ve FVES çıkış güçlerinin belirsizliğinden dolayı belirsizlik analizi yapılmıştır. Simülasyon çalışması 1'e belirsizlik analizi eklenmiştir. Belirsiz rüzgâr hızı ve güneş radyasyonu parametreleri, geçmiş verilerden elde edilen senaryolar ile analiz edilmiştir. Bunun için Senaryo Azaltma ve Senaryo Ağacı Oluşturma Algoritmaları (Scenario Reduction and Scenario Tree Construction Algorithms) kullanılmıştır.

Belirsizlik analizinde, rüzgâr hızı için Çanakkale iline ait 2018 yılı Mart, Nisan ve Mayıs aylarının saatlik rüzgâr hızı verileri kullanılmıştır. Güneş radyasyonu için de Muğla iline ait 2018 yılı Mart, Nisan ve Mayıs aylarının saatlik güneş radyasyonu verileri kullanılmıştır. Bu verilerin profilleri Şekil 3.9'da verilmiştir. 92 adet veri, senaryo azaltma ve senaryo ağacı oluşturma algoritmaları kullanılarak 10 senaryoya düşürülmüştür. Bunun için, her noktanın bir olasılığa sahip olduğu senaryo ağacı oluşturulmuştur. Ağacın tüm dallarındaki olasılıkları toplamı 1'e eşit olmaktadır. 10 senaryo için elde edilen rüzgâr hızı ve güneş radyasyonu değerleri Şekil 3.10'da verilmiştir [62].

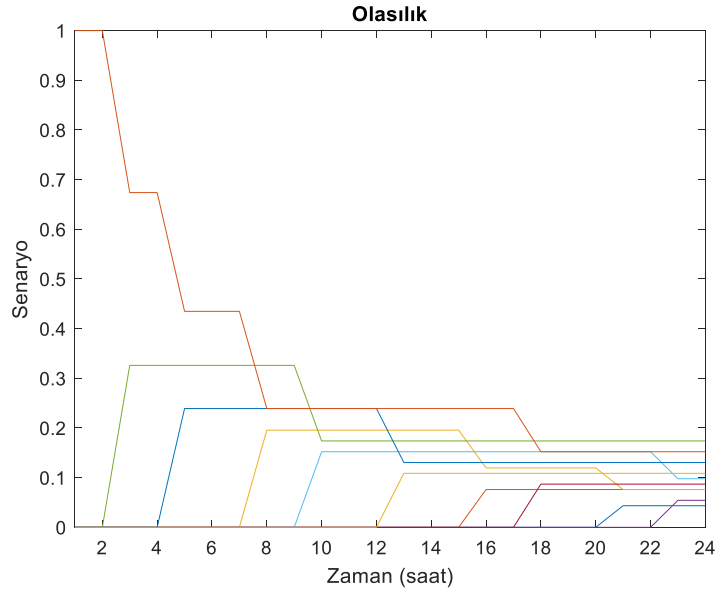


Şekil 3.9. Rüzgâr hızı ve güneş radyasyonu veri profilleri [62]



Şekil 3.10. 10 senaryo için edilen rüzgâr hızı ve güneş radyasyonu değerleri

Her bir senaryoya karşılık gelen olasılık değerleri Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11. Senaryoların olasılık değerleri

Bu simülasyon çalışmasında aynı zamanda risk analizi de yapılmıştır ve çalışmaya eklenmiştir. Risk analizi, düşük kâr senaryoları ile karşılaşma riskini kontrol etmek için yapılmıştır. Bunun için bir risk ölçüm metodu olan CVaR kullanılmıştır. Problemden, Eşitlik 1.38'deki α değeri 0.90 olarak alınmıştır.

Bu çalışmada 3 durum incelenmiştir. Bu durumlar aşağıda verilmiştir.

Durum B-1: SGS'nin riski dikkate almadan (risk neutral) optimum işletim planlaması ($\beta=0$)

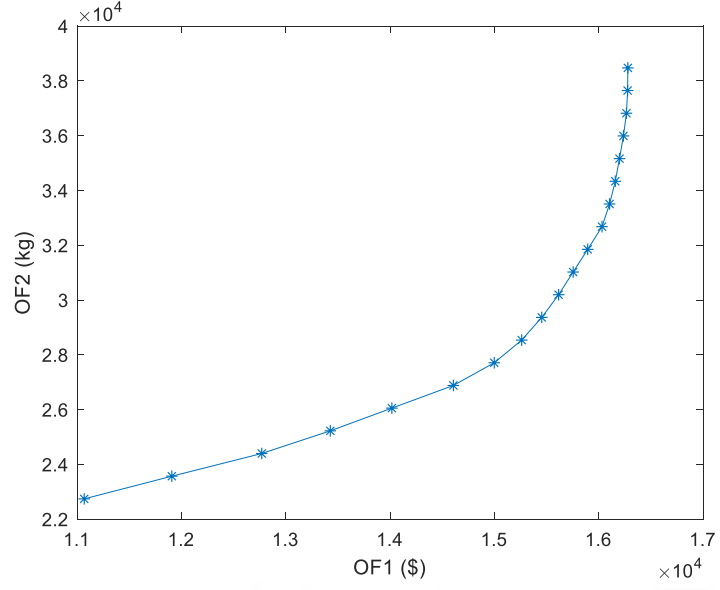
Durum B-2: SGS'nin kâra ve riske eşit önem vererek optimum işletim planlaması ($\beta=0.5$)

Durum B-3: SGS'nin riskten kaçınan (risk aversion) optimum işletim planlaması ($\beta=1$)

Aşağıda bu durumlar tek tek açıklanacaktır.

3.2.1. Durum B-1 sonuçları

Bu durumda, belirsizlik analizi yapılarak, batarya bozulma maliyeti de dikkate alınarak, hem elde edilen kârın maksimum olması hem de ortaya çıkan emisyonun minimum olması hedeflenerek, SGS'nin optimum işletme ve teklif planlaması yapılmıştır. Bu durumda risk analizinde amaç fonksiyonunun belirtildiği Eşitlik 1.2'deki β değeri 0 alınarak, riski dikkate almeyan bir problem oluşturulmuştur. Optimum sonucu bulmak için Pareto tabanlı yaklaşım kullanılmıştır ve 20 adet çözümün olduğu set elde edilmiştir. Pareto-optimum çözümler Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Durum B-1 için Pareto optimum çözümler

Pareto optimum sonuçlar oluşturulduktan sonra SGS operatörü için çözümler arasından en iyi çözüm seçilmiştir. Bunun için Bulanık TOPSIS yöntemi kullanılmıştır.

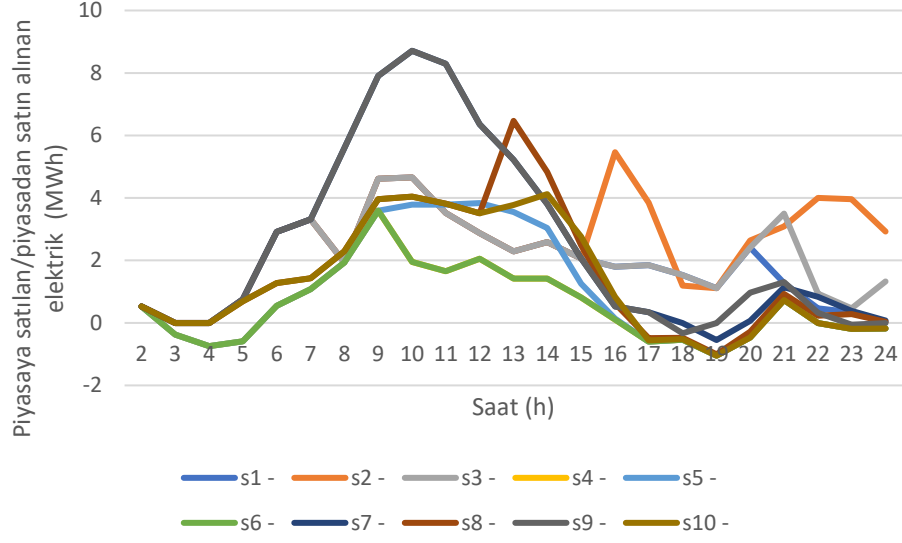
Elde edilen sonuçlara göre, SGS'nin günlük kâr miktarı 15894.379 \$ ve günlük emisyon miktarı 31850.161 kg olarak bulunmuştur.

SGS'nin optimum işletim planlamasının sonuçları Çizelge 3.11'de verilmiştir.

Çizelge 3.11. Durum B-1 için SGS'nin optimum işletim sonuçları

| t | P_{chp}^t | H_{chp}^t | H_{ho}^t | P_{ch}^t | P_{dis}^t |
|----|-------------|-------------|------------|------------|-------------|
| 1 | 1.086 | 1.203 | 0.381 | - | - |
| 2 | 0.810 | 1.048 | 0.536 | - | - |
| 3 | 0.960 | 1.132 | 0.452 | - | - |
| 4 | 0.871 | 1.082 | 0.502 | 0.283 | - |
| 5 | 0.810 | 1.048 | 0.536 | 0.283 | - |
| 6 | 0.810 | 1.048 | 0.552 | 0.283 | - |
| 7 | 0.810 | 1.048 | 0.424 | 0.283 | - |
| 8 | 0.810 | 1.048 | 0.296 | 0.107 | - |
| 9 | 2.217 | 1.424 | - | - | - |
| 10 | 2.361 | 0.613 | 0.795 | - | 0.283 |
| 11 | 2.361 | 0.613 | 0.795 | - | 0.283 |
| 12 | 2.370 | 0.560 | 0.768 | - | 0.197 |
| 13 | 2.208 | 1.472 | - | - | - |
| 14 | 2.344 | 0.709 | 0.843 | - | 0.118 |
| 15 | 2.194 | 1.552 | - | - | 0.037 |
| 16 | 2.194 | 1.552 | - | - | 0.030 |
| 17 | 1.708 | 1.552 | - | - | 0.016 |
| 18 | 1.848 | 1.520 | - | - | 0.015 |
| 19 | 1.245 | 1.292 | 0.228 | - | 0.011 |
| 20 | 1.651 | 1.520 | - | - | 0.011 |
| 21 | 2.197 | 1.536 | - | - | 0.011 |
| 22 | 0.951 | 1.127 | 0.393 | - | 0.009 |
| 23 | 0.810 | 1.048 | 0.456 | - | 0.008 |
| 24 | 0.810 | 1.048 | 0.440 | - | 0.007 |

SGS'nin gün öncesi elektrik piyasasında sunulan optimum teklif planlaması, her senaryo için Şekil 3.13'de verilmiştir.



Şekil 3.13. Durum B-1 için 10 senaryoya göre piyasaya satılan/piyasadan satın alınan elektrik miktarları

Şekil 3.13’de görüldüğü üzere, bazı senaryoların bazı zamanlarında (örneğin 6. senaryonun 3-5, 17-20, 23-24 saatlerinde), piyasadan elektrik satın alındığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, bu zamanlarda rüzgâr çıkış gücünün çok düşük olmasıdır. Elektriksel yükü karşılamak için, SGS operatörü kâr ve emisyonu da düşünerek elektriğin bir kısmını piyasadan karşılamaktadır.

Saatlik elde edilen kâr ve ortaya çıkan emisyon miktarları Çizelge 3.12’de verilmiştir.

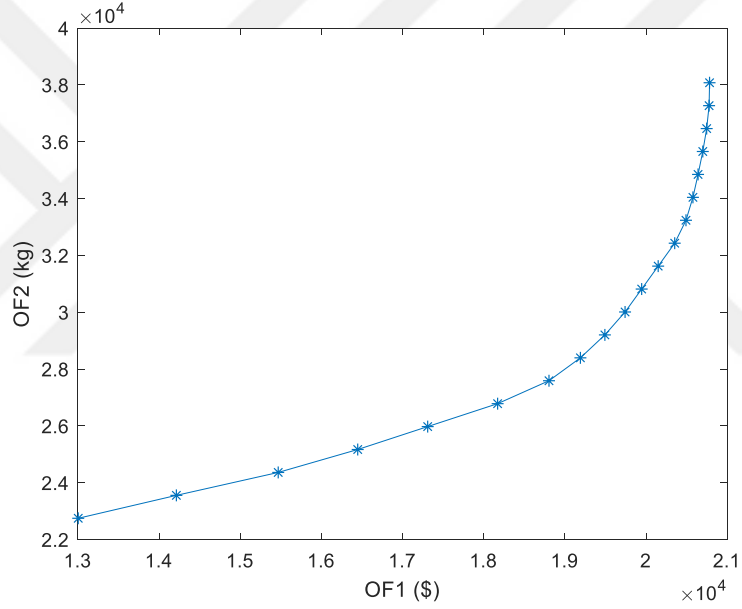
Çizelge 3.12. Durum B-1 için saatlik kâr ve emisyon miktarları

| t | Kâr (\$) | Emisyon (kg) |
|----|----------|--------------|
| 1 | 97.573 | 939.518 |
| 2 | 146.531 | 801.883 |
| 3 | 122.031 | 989.724 |
| 4 | 39.695 | 1057.777 |
| 5 | 101.288 | 980.207 |
| 6 | 175.587 | 808.311 |
| 7 | 228.491 | 756.888 |
| 8 | 454.682 | 705.465 |
| 9 | 1307.244 | 1605.290 |
| 10 | 3044.310 | 2029.011 |
| 11 | 2784.144 | 2029.011 |
| 12 | 2184.896 | 2025.012 |
| 13 | 817.522 | 1599.111 |
| 14 | 1777.705 | 2036.208 |
| 15 | 521.747 | 1588.812 |
| 16 | 493.873 | 1588.812 |
| 17 | 304.603 | 1531.898 |
| 18 | 273.935 | 1657.636 |
| 19 | 282.885 | 1581.098 |
| 20 | 150.396 | 1417.255 |
| 21 | 276.789 | 1589.281 |
| 22 | 116.771 | 845.850 |
| 23 | 99.212 | 852.554 |
| 24 | 92.468 | 833.547 |

Durum B-1 için sonuçlar incelendiğinde, belirsizlik analizi ile kâr miktarında artış gözlemlenmiştir. Risk analizinde $\beta=0$ alındığından, fazla kârlı fakat yüksek riskli çözüm elde edilmiştir.

3.2.2. Durum B-2 sonuçları

Bu durumda, belirsizlik analizi yapılarak, batarya bozulma maliyeti de dikkate alınarak, hem elde edilen kârın maksimum olması hem de ortaya çıkan emisyonun minimum olması hedeflenerek, SGS'nin optimum işletme ve teklif planlaması yapılmıştır. Bu durumda risk analizinde $\beta=0.5$ alınarak, kâr ve riski eşit ağırlıkta düşünen bir problem oluşturulmuştur. Optimum sonucu bulmak için Pareto tabanlı yaklaşım kullanılmıştır ve 20 adet çözümün olduğu set elde edilmiştir. Pareto-optimum çözümler Şekil 3.14'de verilmiştir.



Şekil 3.14. Durum B-2 için Pareto optimum çözümler

Pareto optimum sonuçlar oluşturulduktan sonra SGS operatörü için çözümler arasından en iyi çözüm seçilmiştir. Bunun için Bulanık TOPSIS yöntemi kullanılmıştır.

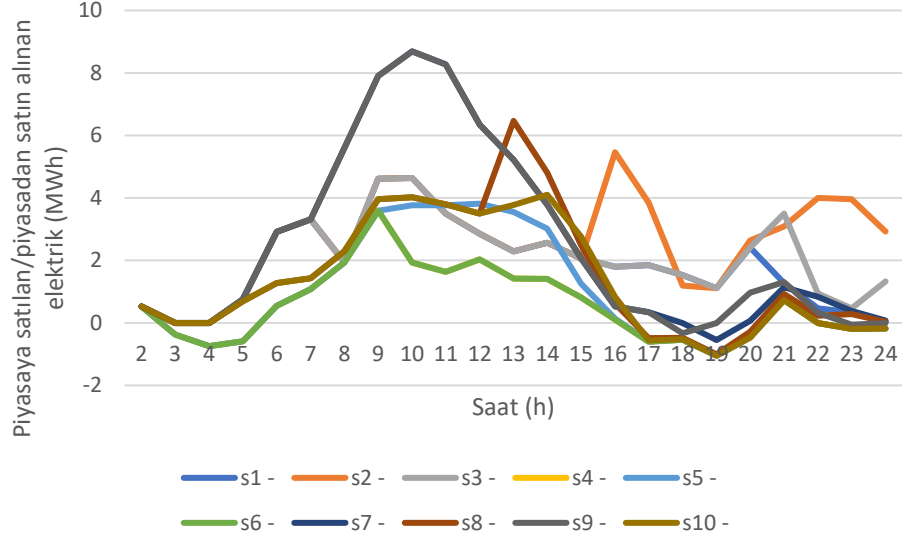
Elde edilen sonuçlara göre, SGS'nin günlük kâr miktarı 15856.528 \$ ve günlük emisyon miktarı 31625.101 kg olarak bulunmuştur.

SGS'nin optimum işletim planlamasının sonuçları Çizelge 3.13'de verilmiştir.

Çizelge 3.13. Durum B-2 için SGS'nin optimum işletim sonuçları

| t | P_{chp}^t | H_{chp}^t | H_{ho}^t | P_{ch}^t | P_{dis}^t |
|----|-------------|-------------|------------|------------|-------------|
| 1 | 1.086 | 1.203 | 0.381 | - | - |
| 2 | 0.810 | 1.048 | 0.536 | - | - |
| 3 | 0.960 | 1.132 | 0.452 | - | - |
| 4 | 0.871 | 1.082 | 0.502 | 0.283 | - |
| 5 | 0.810 | 1.048 | 0.536 | 0.283 | - |
| 6 | 0.810 | 1.048 | 0.552 | 0.283 | - |
| 7 | 0.810 | 1.048 | 0.424 | 0.283 | - |
| 8 | 0.810 | 1.048 | 0.296 | 0.107 | - |
| 9 | 2.217 | 1.424 | - | - | - |
| 10 | 2.342 | 0.719 | 0.689 | - | 0.283 |
| 11 | 2.342 | 0.719 | 0.689 | - | 0.283 |
| 12 | 2.352 | 0.666 | 0.662 | - | 0.197 |
| 13 | 2.208 | 1.472 | - | - | - |
| 14 | 2.325 | 0.815 | 0.737 | - | 0.118 |
| 15 | 2.194 | 1.552 | - | - | 0.037 |
| 16 | 2.194 | 1.552 | - | - | 0.030 |
| 17 | 1.708 | 1.552 | - | - | 0.016 |
| 18 | 1.848 | 1.520 | - | - | 0.015 |
| 19 | 1.245 | 1.292 | 0.228 | - | 0.011 |
| 20 | 1.651 | 1.520 | - | - | 0.011 |
| 21 | 2.197 | 1.536 | - | - | 0.011 |
| 22 | 0.951 | 1.127 | 0.393 | - | 0.009 |
| 23 | 0.810 | 1.048 | 0.456 | - | 0.008 |
| 24 | 0.810 | 1.048 | 0.440 | - | 0.007 |

SGS'nin gün öncesi elektrik piyasasında sunulan optimum teklif planlaması, her senaryo için Şekil 3.15'de verilmiştir.



Şekil 3.15. Durum B-2 için 10 senaryoya göre piyasaya satılan/piyasadan satın alınan elektrik miktarları

Saatlik elde edilen kâr ve ortaya çıkan emisyon miktarları Çizelge 3.14’de verilmiştir.

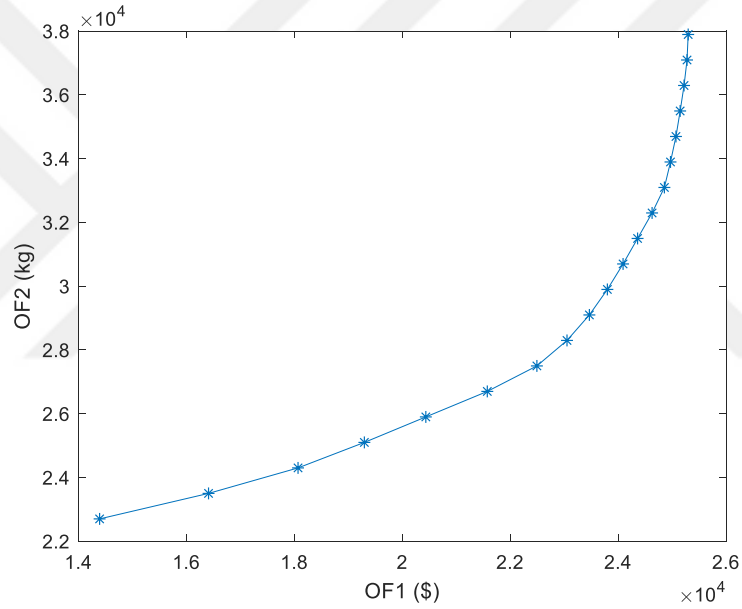
Çizelge 3.14. Durum B-2 için saatlik kâr ve emisyon miktarları

| t | Kâr (\$) | Emisyon (kg) |
|----|----------|--------------|
| 1 | 97.573 | 939.518 |
| 2 | 146.531 | 801.883 |
| 3 | 122.031 | 989.724 |
| 4 | 39.695 | 1057.777 |
| 5 | 101.288 | 980.207 |
| 6 | 175.587 | 808.311 |
| 7 | 228.491 | 756.888 |
| 8 | 454.682 | 705.465 |
| 9 | 1307.244 | 1605.290 |
| 10 | 3044.310 | 1972.745 |
| 11 | 2744.681 | 1972.745 |
| 12 | 2175.433 | 1968.746 |
| 13 | 817.522 | 1599.111 |
| 14 | 1768.235 | 1979.942 |
| 15 | 521.736 | 1588.812 |
| 16 | 493.860 | 1588.812 |
| 17 | 304.584 | 1531.892 |
| 18 | 273.913 | 1657.630 |
| 19 | 282.862 | 1581.093 |
| 20 | 150.372 | 1417.252 |
| 21 | 276.815 | 1589.281 |
| 22 | 116.802 | 845.860 |
| 23 | 99.245 | 852.562 |
| 24 | 92.502 | 833.554 |

Durum B-2 için sonuçlar incelendiğinde, $\beta=0.5$ alındığından, kâr ve riski eşit ağırlıkta düşünen çözüm elde edilmiştir. Kâr miktarında Durum B-1'deki kâr miktarına göre düşme gözlemlenmiştir.

3.2.3. Durum B-3 sonuçları

Bu durumda, belirsizlik analizi yapılarak, batarya bozulma maliyeti de dikkate alınarak, hem elde edilen kârın maksimum olması hem de ortaya çıkan emisyonun minimum olması hedeflenerek, SGS'nin optimum işletme ve teklif planlaması yapılmıştır. Bu durumda risk analizinde $\beta=1$ alınarak, riskten kaçınan bir problem oluşturulmuştur. Optimum sonucu bulmak için Pareto tabanlı yaklaşım kullanılmıştır ve 20 adet çözümün olduğu set elde edilmiştir. Pareto-optimum çözümler Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16. Durum B-3 için Pareto optimum çözümler

Pareto optimum sonuçlar oluşturulduktan sonra SGS operatörü için çözümler arasından en iyi çözüm seçilmiştir. Bunun için Bulanık TOPSIS yöntemi kullanılmıştır.

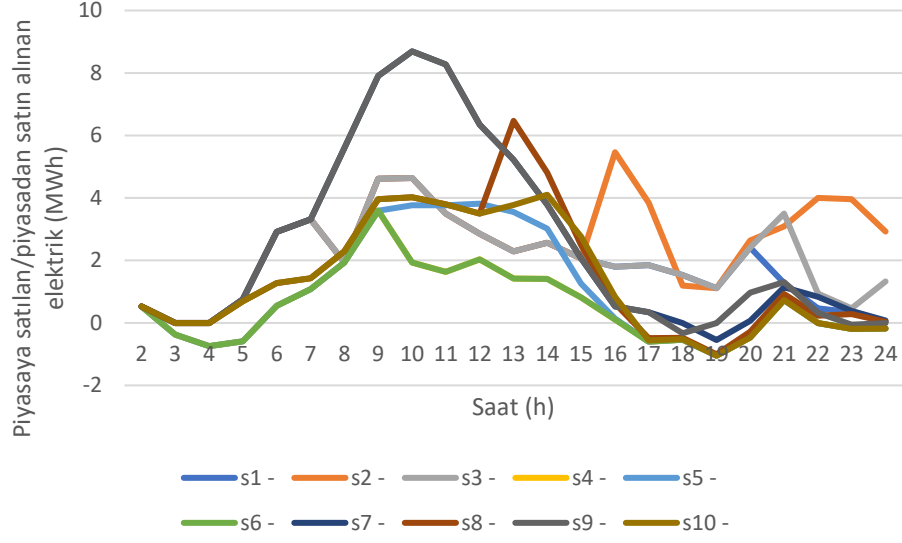
Elde edilen sonuçlara göre, SGS'nin günlük kâr miktarı 15812.825 \$ ve günlük emisyon miktarı 31494.645 kg olarak bulunmuştur.

SGS'nin optimum işletim planlamasının sonuçları Çizelge 3.15'de verilmiştir.

Çizelge 3.15. Durum B-3 için SGS'nin optimum işletim sonuçları

| t | P_{chp}^t | H_{chp}^t | H_{ho}^t | P_{ch}^t | P_{dis}^t |
|----|-------------|-------------|------------|------------|-------------|
| 1 | 1.086 | 1.203 | 0.381 | - | - |
| 2 | 0.810 | 1.048 | 0.536 | - | - |
| 3 | 1.243 | 1.291 | 0.293 | - | - |
| 4 | 0.810 | 1.048 | 0.536 | 0.283 | - |
| 5 | 0.810 | 1.048 | 0.536 | 0.283 | - |
| 6 | 0.810 | 1.048 | 0.552 | 0.168 | - |
| 7 | 0.810 | 1.048 | 0.424 | 0.283 | - |
| 8 | 0.810 | 1.048 | 0.296 | - | - |
| 9 | 2.217 | 1.424 | - | - | - |
| 10 | 2.325 | 0.816 | 0.592 | - | 0.283 |
| 11 | 2.325 | 0.816 | 0.592 | - | 0.283 |
| 12 | 2.334 | 0.763 | 0.565 | - | 0.197 |
| 13 | 2.208 | 1.472 | - | - | - |
| 14 | 2.308 | 0.912 | 0.640 | - | 0.118 |
| 15 | 2.194 | 1.552 | - | - | 0.037 |
| 16 | 2.194 | 1.552 | - | - | 0.030 |
| 17 | 1.708 | 1.552 | - | - | 0.016 |
| 18 | 1.848 | 1.520 | - | - | 0.015 |
| 19 | 1.245 | 1.292 | 0.228 | - | 0.011 |
| 20 | 1.651 | 1.520 | - | - | 0.011 |
| 21 | 2.197 | 1.536 | - | - | 0.011 |
| 22 | 0.951 | 1.127 | 0.393 | - | 0.009 |
| 23 | 0.810 | 1.048 | 0.456 | - | 0.008 |
| 24 | 0.810 | 1.048 | 0.440 | - | 0.007 |

SGS'nin gün öncesi elektrik piyasasında sunulan optimum teklif planlaması, her senaryo için Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.17. Durum B-3 için 10 senaryoya göre piyasaya satılan/piyasadan satın alınan elektrik miktarları

Saatlik elde edilen kâr ve ortaya çıkan emisyon miktarları Çizelge 3.16'da verilmiştir.

Çizelge 3.16. Durum B-3 için saatlik kâr ve emisyon miktarları

| t | Kâr (\$) | Emisyon (kg) |
|----|----------|--------------|
| 1 | 97.573 | 939.518 |
| 2 | 146.531 | 801.883 |
| 3 | 21.027 | 1130.849 |
| 4 | 98.307 | 1027.357 |
| 5 | 121.025 | 945.302 |
| 6 | 178.637 | 808.311 |
| 7 | 229.999 | 756.888 |
| 8 | 463.769 | 705.465 |
| 9 | 1307.244 | 1605.290 |
| 10 | 3026.174 | 1921.180 |
| 11 | 2766.007 | 1921.180 |
| 12 | 2166.759 | 1917.182 |
| 13 | 817.522 | 1599.111 |
| 14 | 1759.557 | 1928.378 |
| 15 | 521.731 | 1588.812 |
| 16 | 493.853 | 1588.812 |
| 17 | 304.574 | 1531.889 |
| 18 | 273.902 | 1657.626 |
| 19 | 282.850 | 1581.091 |
| 20 | 150.359 | 1417.250 |
| 21 | 276.828 | 1589.281 |
| 22 | 116.817 | 845.864 |
| 23 | 99.261 | 852.567 |
| 24 | 92.519 | 833.558 |

Durum B-3'deki sonuçlar incelendiğinde, $\beta=1$ alındığından riskten kaçınan bir çözüm elde edilmiştir. Durum B-1 VE B-2'ye göre çözüm düşük risklidir fakat kâr miktarı da düşmüştür.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, dağıtık enerji kaynaklarının entegrasyonu ile oluşturulan SGS modeli, gün öncesi elektrik piyasasına katılım için tasarlanmış ve SGS'nin optimum işletim ve teklif planlaması bir gün öncesinde saatlik olarak yapılmıştır. SGS'nin optimum işletme ve teklif planlaması, elektriksel ve termal yükü karşılamak ve maksimum kâr elde etmek amacıyla yapılmıştır. Enerji santrallerinden kaynaklanan NO_x, SO₂ ve CO₂ gibi emisyonlar, çevreye zarar verip küresel ısınmaya neden olmaktadır ve en önemli çevresel sorunlardan birisidir. Bu yüzden, SGS'nin optimum işletme ve teklif planlaması yapılırken, açığa çıkan emisyonun minimum yapılması da ele alınmıştır. Bu çalışmada dikkate alınan bir diğer önemli konu ise batarya bozulma maliyetidir. Bataryanın ömrü kullanıldıkça azalmaktadır ve bir süre sonra bataryanın değiştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, batarya boşaldıkça veya bittikçe bir maliyeti söz konusu olacaktır. Batarya bozulma maliyetinin, amaç fonksiyonuna dahil edilmesi, SGS'lerin optimizasyonu için daha gerçekçi bir model oluşturulması açısından önemli bir konudur.

SGS işletimindeki belirsizlikler, SGS'nin araştırma ve uygulama alanlarında önemli konulardandır. Yenilenebilir enerjinin belirsizliği, genelde rüzgâr ve güneş enerjisinin aralıklı ve zamanla değişen olması özelliklerinden dolayı kaynaklanmaktadır. SGS'nin kararlı bir şekilde işletimini sağlamak için, değişken özelliklerinin tasarım sürecinde dikkate alınması gerekmektedir. Bu yüzden bu çalışmada, rüzgâr çıkış gücünü etkileyen rüzgâr hızı ve güneş çıkış gücünü etkileyen güneş radyasyonu parametreleri için belirsizlik analizi yapılmıştır. Belirsizlik analizi için, rüzgâr hızı ve güneş radyasyonu parametrelerinin geçmiş verilere dayanan senaryolarla modellenmesi yapılmıştır. Bunun için senaryo azaltma ve senaryo ağacı oluşturma algoritmaları kullanılmıştır.

SGS'nin optimum işletim ve teklif planlamasına karar verme, söz konusu belirsizlikler nedeniyle riskli olabilmektedir. Kâr değişkenliği riskini değerlendirmek için belirsizlikler uygun bir şekilde ifade edilerek, riskten bağımsız probleme uygun bir

risk ölçütü dahil edilmelidir. Bu yüzden bu çalışmada, düşük kâr senaryoları riski, bir risk ölçütü olan CVaR kullanılarak değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada 2 simülasyon çalışması yapılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmalarında, önerilen KTDOP modelinin problemi, GAMS 25.1.3 yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Bu yazılım, problemi hem kısa sürede çözmüştür hem de global optimum çözümü bulmuştur.

İlk simülasyon çalışmasında, 5 farklı durum analiz edilerek emisyon ve batarya bozulma maliyetinin kâr üzerindeki etkileri incelenmiştir. Durum A-1’de, batarya bozulma maliyeti dikkate alınmadan, sadece maksimum kâr elde etmek amacıyla modellenen problemin çözümünde elde edilen günlük kâr miktarı 14663.541 \$ ve salınan emisyon miktarı 35332.434 kg olarak bulunmuştur. Durum A-2’de ise, batarya bozulma maliyeti dikkate alınmadan, sadece çevreye salınan emisyonu minimum yapmak amacıyla elde edilen sonuçlara göre, günlük kâr miktarı 9926.852 \$ ve çevreye salınan emisyon miktarı 22220.371 kg olarak bulunmuştur. Durum A-2’de, Durum A-1’e göre emisyon miktarının %37.11 oranında düştüğü gözlemlenmiştir. Fakat kâr miktarı da %32.3 oranında azalmıştır, bu da SGS katılımcıları için istenmeyen bir durumdur. Durum A-3’de, batarya bozulma maliyeti dikkate alınmadan, hem maksimum kâr elde etmek hem de minimum emisyonun açığa çıkmasını sağlamak amaçlanmıştır. Kâr miktarı, 14195.442 \$ olarak bulunmuştur. Bu miktar, Durum A-1’deki kâr miktarına göre %3.2 düşmüştür ve Durum A-2’deki kâr miktarına göre ise %43 artmıştır. Emisyon miktarı ise, 29811.624 kg olarak bulunmuştur. Bu miktar, Durum A-1’deki emisyon miktarına göre %15.62 azalmıştır ve Durum A-2’deki emisyon miktarına göre ise %34.16 artmıştır.

Durum A-1, A-2 ve A-3’de batarya bozulma maliyeti ve bunu etkileyen batarya boşalma derinliği ve sıcaklık parametreleri dikkate alınmamıştır. Bunlar, Durum A-4 ve Durum A-5’de göz önünde bulundurularak, bunların kâr ve emisyon üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Durum A-4’de batarya bozulma maliyeti dikkate alınarak, sadece maksimum kâr elde etmek amaçlanmıştır ve kâr miktarı 13984.787 \$, emisyon miktarı ise 34477.186 kg olarak bulunmuştur. Durum A-5’de, batarya bozulma maliyeti göz önünde bulundurularak hem maksimum kâr elde etmek hem de atmosfere

salınan emisyonu minimum yapmak hedeflenmiştir ve kâr miktarı 13472.645 \$, emisyon miktarı ise 29346.621 kg olarak bulunmuştur. Hem kârı maksimum yapmanın hem de emisyonu minimum yapmanın amaçlandığı Durum A-3 ve Durum A-5 sonuçları karşılaştırıldığında, batarya bozulma maliyetinin kâr üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Batarya bozulma maliyetinin göz önünde bulundurulması, günlük kâr miktarında 722.797 \$ azalmaya neden olmuştur. Bu değer yılda yaklaşık 263820.905 \$ etmektedir. Bu sonuçlar, batarya bozulma maliyetinin SGS'lerin optimizasyonunda önemli bir yere sahip olduğunu göstermektedir. Bu yüzden, SGS optimum işletim ve teklif problemlerinde amaç fonksiyonuna mutlaka dahil edilmelidir. Durum A-4 ve Durum A-5 sonuçları karşılaştırıldığında, Durum A-5'te emisyon minimizasyonunun da amaç fonksiyonuna eklenmesiyle emisyon miktarında, Durum A-4'deki emisyon miktarına göre %14.88 azalma gözlemlenmiştir. Kâr miktarında ise sadece %3.66 düşüş gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışmada Durum A-5'de sunulan model, diğer durumlardaki modeller arasında en doğru gerçekliği olan ve en çok kâr ve emisyonu aynı anda düşünen model olduğundan bu çalışmada önerilmektedir. Aynı zamanda, tüm sonuçlar, batarya bozulma maliyetinin ve emisyonun, SGS'nin gün öncesi elektrik piyasasında optimum işletim ve teklif planlamasındaki kâr maksimizasyonu problemlerinde elen alınması gerektiğini göstermektedir. Sonuçları daha iyi karşılaştırmak ve gözlemlmek için, simülasyon çalışması 1'deki durumlara ait kâr ve emisyon miktarları Çizelge 4.1'de verilmektedir.

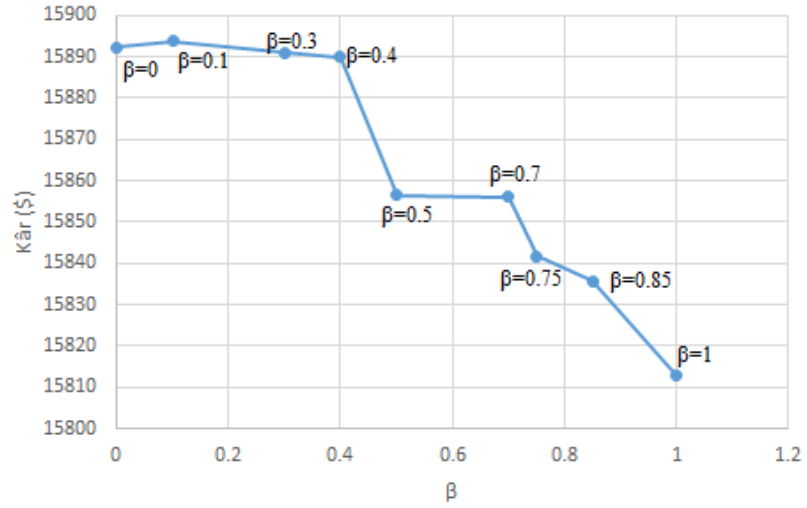
Çizelge 4.1. Simülasyon çalışması 1'deki durumlar için elde edilen kâr ve emisyon miktarları

| Durumlar | Kâr (\$) | Emisyon (kg) |
|----------------------------|-----------|--------------|
| Durum A-1 | 14663.541 | 35332.534 |
| Durum A-2 | 9926.852 | 22220.371 |
| Durum A-3 | 14195.442 | 29811.624 |
| Durum A-4 | 13984.787 | 34477.186 |
| Durum A-5 (önerilen durum) | 13472.645 | 29346.621 |

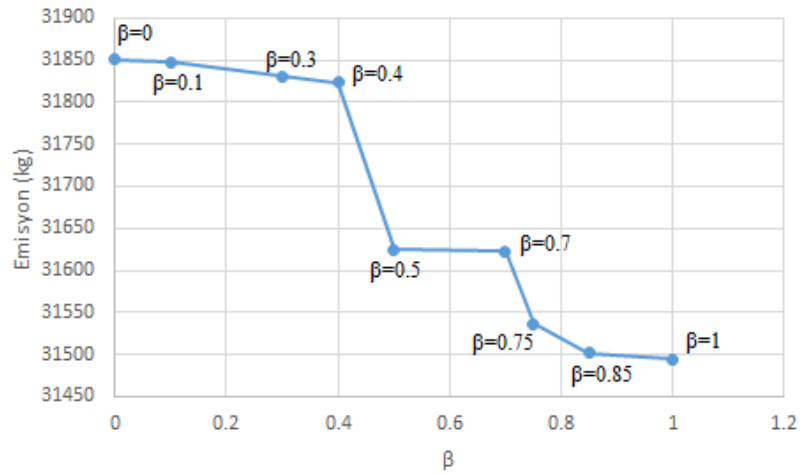
İkinci simülasyon çalışmasında ise, kâr maksimizasyonunun yanında emisyon minimizasyonunu ve batarya bozulma maliyetini de dikkate alan amaç fonksiyonumuza belirsizlik analizi ve risk analizi eklemiştir. Bu simülasyon çalışmasında, her durumda belirsizlik analizi yapılmıştır ve risk analizinin etkilerini gözlemek için 3 farklı durum analiz edilmiştir. Durum B-1’de, $\beta=0$ alınarak, riskten bağımsız bir problem modeli oluşturulmuştur. Kâr miktarı 15894.379 \$, emisyon miktarı ise 31850.161 kg olarak bulunmuştur. Durum B-2’de $\beta=0.5$ alınarak, hem kâra hem de riske eşit önem veren bir problem modeli oluşturulmuştur. Kâr miktarı 15856.528 \$ ve emisyon miktarı ise 31625.101 kg olarak bulunmuştur. Durum B-3’de ise $\beta=1$ alınarak, riskten kaçınan bir problem modeli oluşturulmuştur. Kâr miktarı 15812.825 \$ ve emisyon miktarı ise 31494.645 kg olarak bulunmuştur. Sonuçları daha iyi karşılaştırmak ve gözlemek için, simülasyon çalışması 2’deki durumlara ait kâr ve emisyon miktarları Çizelge 4.2’de verilmektedir. Farklı β değerlerine göre SGS’nin kâr miktarındaki değişikliği Şekil 4.1’de, emisyon miktarındaki değişikliği Şekil 4.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.2. Simülasyon çalışması 2’deki durumlar için elde edilen kâr ve emisyon miktarları

| Durumlar | Kâr (\$) | Emisyon (kg) |
|----------------------------|-----------|--------------|
| Durum B-1 | 15894.379 | 31850.161 |
| Durum B-2 (önerilen durum) | 15856.528 | 31625.101 |
| Durum B-3 | 15812.825 | 31494.645 |



Şekil 4.1. Farklı β değerlerine göre kâr miktarları



Şekil 4.2. Farklı β değerlerine göre emisyon miktarları

Simülasyon Çalışması 2'deki sonuçlar incelendiğinde, belirsizlik analizinin dahil edilmesiyle, Simülasyon Çalışması 1'deki sonuçlara göre kâr miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Risk analizinde riski azaltmanın önemini gösteren β değerinin artmasıyla ise kâr miktarında azalma gözlemlenmiştir. Fakat kârın azalmasıyla risk de azalmaktadır. Aynı zamanda emisyon miktarında da azalma olduğu gözlemlenmiştir. Bu simülasyon çalışmasında önerilen durum, hem kârı hem de riski eşit ağırlıkta göz önünde bulunduran Durum-B2'dir.

Simülasyon Çalışması 1 ve Simülasyon Çalışması 2 sonuçları analiz edildiğinde, Durum B-2, batarya bozulma maliyetini dikkate alan, maksimum kâr elde etmek yanında minimum emisyon sağlamayı hedefleyen, yenilenebilir enerjinin belirsizliklerini analiz eden ve düşük kâr senaryolarına karşı risk analizini de kâr ile eşit ağırlıkta hesaba katan problem modeline sahip olarak, bu tez çalışmasında önerilen durum olmuştur. Bu problem modeli, gün öncesi elektrik piyasasına katılan SGS katılımcılarının optimum işletim planlaması yapması ve SGS operatörünün optimum teklif planlaması yapması konularında büyük fayda sağlayacaktır.

Bundan sonraki çalışmalar için bu tezde yapılan çalışmanın genişletilmesi önerilmektedir. Bunun için SGS içerisine Biyogaz Enerji Santrali, Biyokütle Enerji Santrali, Hidroelektrik Santral gibi farklı dağıtık enerji teknolojileri dahil edilebilir. PDHS gibi farklı enerji depolama sistemleri kullanılabilir. Günümüzün ve geleceğin teknolojisi olan elektrikli araçlar SGS yapısına katılabilir. Daha gerçekçi bir planlama için hat kayıpları kısıtı da problem modelinde düşünülebilir. Emisyon oranının belirli bir sınırdan tutulması ve bu sınırı geçmeyecek şekilde işletim planlaması yapılması için emisyon kısıtı problem modeline eklenebilir. Bu sınırın aşılması durumunda para cezası maliyet olarak amaç fonksiyonunda yer alabilir.

EKLER

EK 1

2018 yılı Mart ayı saatlik rüzgâr hızı verileri (m/s):

| Gün | Saat | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 1 | 11.6 | 10.1 | 8 | 8.7 | 7.6 | 7 | 6.7 | 5.8 | 6.2 | 5.9 | 8.5 | 7.4 | 6.3 | 6.4 | 5 | 4.8 | 4.7 | 3.7 | 3.3 | 3.3 | 3.3 | 2.4 | 2.5 | 2.6 |
| 2 | 2 | 2.5 | 2 | 6.1 | 7.1 | 6 | 7.9 | 7.3 | 12.3 | 10.7 | 11.1 | 11.4 | 8.6 | 7.5 | 12.5 | 11.5 | 10.8 | 11.7 | 12.8 | 11.6 | 12.1 | 13.7 | 15.8 | 17.5 |
| 3 | 16 | 13.5 | 17.3 | 17.9 | 14.8 | 16.9 | 17.3 | 18.1 | 15.1 | 14.4 | 14.7 | 12 | 12.3 | 11.2 | 8.5 | 7.3 | 6.8 | 3.8 | 5 | 7.2 | 6.6 | 6.9 | 9.5 | 12.8 |
| 4 | 12 | 10.6 | 13.7 | 11.9 | 13.6 | 11.1 | 10.7 | 14 | 15 | 12.2 | 10.9 | 9.6 | 9.3 | 7.2 | 5.9 | 8.6 | 9.3 | 7.9 | 8.8 | 7.3 | 8 | 7.4 | 7 | 6.2 |
| 5 | 6.5 | 7.5 | 6 | 6.8 | 7.2 | 8.6 | 8.4 | 7.9 | 7.8 | 8.1 | 9.8 | 11.9 | 12.3 | 10.9 | 12.5 | 10.3 | 11.3 | 10.2 | 10 | 9.4 | 9.1 | 8.5 | 8 | 9.8 |
| 6 | 6.8 | 6.1 | 3.7 | 7.1 | 5 | 8.8 | 8.3 | 8 | 5.8 | 8.7 | 7.5 | 6.1 | 6.7 | 8 | 7.6 | 7.1 | 6.4 | 7.3 | 11.2 | 11.9 | 13.4 | 14.1 | 13.3 | 11.8 |
| 7 | 11.6 | 16.9 | 16.9 | 14.6 | 14.1 | 12.4 | 11.1 | 14.7 | 15 | 13.3 | 11.8 | 11.2 | 12.1 | 10 | 7.9 | 5.7 | 5.6 | 5.5 | 3.9 | 4.9 | 2.9 | 4 | 3.5 | 3.1 |
| 8 | 1.8 | 3.4 | 1.5 | 2.3 | 3.2 | 9.2 | 9.7 | 5.8 | 4.5 | 1.1 | 1.3 | 1.6 | 6.1 | 8.1 | 7 | 5 | 5.6 | 3.4 | 2.4 | 2.1 | 2.4 | 3.6 | 3.4 | 4.1 |
| 9 | 3 | 3.2 | 3 | 3.4 | 2.9 | 3 | 5 | 3.7 | 4.1 | 4.8 | 3.7 | 4 | 4.8 | 3.7 | 3.4 | 3.3 | 2.5 | 3.1 | 2.8 | 3.3 | 2.8 | 2 | 2.8 | 2.7 |
| 10 | 2.6 | 3.1 | 2.9 | 2.8 | 2.7 | 2.7 | 3.5 | 4.3 | 4.4 | 4.7 | 4.4 | 3.8 | 3 | 1.7 | 3.3 | 3.4 | 2.8 | 1.8 | 1.4 | 1.5 | 2.6 | 2.7 | 2.7 | 2.5 |
| 11 | 2.2 | 2.7 | 2.7 | 2.9 | 2.8 | 2.9 | 2.3 | 2.7 | 1.6 | 2 | 5 | 5.9 | 5.6 | 5 | 4.8 | 3.3 | 3.4 | 3.1 | 2.5 | 2.3 | 3 | 2.6 | 3 | 3.1 |
| 12 | 3.1 | 2.8 | 3.3 | 1.9 | 3.1 | 2.9 | 3 | 2.4 | 1.6 | 5.2 | 5.6 | 7.7 | 7 | 6.3 | 10.4 | 8.4 | 7.5 | 7.4 | 6.6 | 9.7 | 11.8 | 8.5 | 5.5 | 11.9 |
| 13 | 13.7 | 12.4 | 13.6 | 13.1 | 12.4 | 9.9 | 9.1 | 9.6 | 7.6 | 8.5 | 8.9 | 8.6 | 9.1 | 8.7 | 8.6 | 7.5 | 7.5 | 7.9 | 7.5 | 7.8 | 6.9 | 6.7 | 6.9 | 5.7 |
| 14 | 5.4 | 5.3 | 5 | 4.3 | 3.8 | 5 | 5.7 | 5.1 | 6.1 | 7 | 7.6 | 7.8 | 7.9 | 7.8 | 7.3 | 5.1 | 5.1 | 4.4 | 3.4 | 3.6 | 3.3 | 2.6 | 2.6 | 2.8 |
| 15 | 5 | 8.8 | 3.2 | 1.8 | 3.3 | 5.9 | 6.5 | 4.2 | 3 | 2.4 | 2.8 | 3 | 3.2 | 3.9 | 4.4 | 3.4 | 2.8 | 2.1 | 2.1 | 1.6 | 1.7 | 2.5 | 3 | 2.8 |
| 16 | 2.8 | 2.9 | 2.8 | 2.4 | 3.2 | 1.6 | 1.4 | 1 | 1.3 | 4.4 | 8.1 | 7 | 11 | 9.6 | 10.4 | 8.7 | 5.5 | 5.4 | 6.3 | 5.8 | 9.8 | 11.2 | 9.8 | 8.5 |
| 17 | 7.8 | 6.7 | 5.8 | 6.8 | 9.3 | 8.6 | 8.6 | 8.2 | 11.5 | 12.5 | 14.3 | 15.2 | 14.1 | 14.3 | 12.1 | 9.9 | 13.9 | 13.8 | 16.7 | 13.8 | 15.7 | 13.8 | 10.6 | 13.7 |

2018 yılı Mart ayı saatlik rüzgâr hızı verileri (m/s) (devam):

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| 18 | 18 | 16.8 | 19 | 19.7 | 17.7 | 18.5 | 20.2 | 19.2 | 19.4 | 18.6 | 17.9 | 16.5 | 16.6 | 15.4 | 15.6 | 10.4 | 10 | 9.8 | 9.3 | 6.5 | 6.9 | 4.9 | 6.9 | 7.7 |
| 19 | 6.7 | 5.5 | 4.1 | 2.8 | 3.6 | 5 | 5.4 | 5.6 | 6.2 | 6.1 | 6.4 | 4.7 | 4.8 | 5.8 | 4.6 | 5.1 | 3.7 | 3.4 | 2.8 | 4.6 | 3.7 | 6.5 | 6.5 | 20.6 |
| 20 | 12.7 | 22.8 | 12 | 9.1 | 10.1 | 9 | 8.9 | 11.5 | 11.1 | 9.7 | 9 | 9.2 | 8.1 | 9.1 | 8.1 | 7.5 | 7 | 5.2 | 5.2 | 5 | 5.1 | 6.6 | 5.7 | 4.7 |
| 21 | 4.2 | 4.5 | 5.4 | 6.6 | 7.5 | 8.3 | 10.9 | 11.9 | 13.3 | 14 | 16 | 15.1 | 11.8 | 12.1 | 9.7 | 8.6 | 8.4 | 8.1 | 3.7 | 3.5 | 3 | 3.1 | 2.6 | 2.6 |
| 22 | 2.6 | 3.1 | 7.2 | 7.3 | 9.7 | 9.5 | 11.1 | 13.1 | 14.8 | 12.7 | 11.6 | 12.6 | 13.7 | 11.3 | 12.7 | 12.2 | 11.4 | 9 | 9.5 | 10.4 | 9.7 | 11.1 | 11.2 | 10.4 |
| 23 | 8.3 | 6.9 | 7.7 | 6.8 | 7.2 | 3.3 | 3.7 | 5.1 | 3.4 | 2.5 | 4.7 | 4.7 | 5.3 | 5.5 | 6.4 | 6.3 | 7.2 | 2.9 | 4.5 | 4.8 | 4.2 | 7.1 | 7.2 | 5.6 |
| 24 | 5.1 | 4.5 | 6.3 | 6.8 | 5.5 | 5.9 | 6 | 9.4 | 10.4 | 9.2 | 10.2 | 8.6 | 8 | 9.2 | 10 | 8.7 | 8.6 | 8.3 | 8.5 | 8.6 | 8 | 8 | 8.2 | 8 |
| 25 | 8.6 | 7.7 | 6.6 | 8.4 | 7.6 | 9.3 | 7.5 | 9.6 | 8.7 | 8.8 | 9.6 | 7.4 | 9.7 | 7.1 | 5.3 | 4.8 | 5.1 | 5.1 | 3.9 | 4.5 | 4.6 | 4.6 | 4.7 | 7.3 |
| 26 | 13.6 | 16.9 | 16.1 | 13.5 | 12.8 | 11.5 | 12.8 | 16.2 | 14.5 | 13.7 | 14.6 | 15.8 | 16 | 14.5 | 13.9 | 11.9 | 11.6 | 12 | 10.4 | 12.2 | 9.8 | 10.5 | 14.7 | 7.8 |
| 27 | 3.8 | 3.7 | 2.2 | 2.7 | 2.3 | 1 | 2.5 | 3.6 | 7 | 9.9 | 9.6 | 9.2 | 9.2 | 8.3 | 6.5 | 6 | 4.3 | 4.1 | 1 | 1.1 | 1.4 | 2.1 | 2.8 | 3.2 |
| 28 | 4.6 | 4.2 | 6.8 | 7.8 | 8.4 | 8.5 | 8.5 | 7 | 8.5 | 8.3 | 8.6 | 7.3 | 7.1 | 8.4 | 8.7 | 9 | 9.8 | 9.4 | 9.5 | 10.2 | 10.1 | 7.8 | 7.2 | 8.7 |
| 29 | 7.9 | 6.9 | 6.2 | 8.1 | 6.1 | 6.1 | 8.3 | 7.9 | 6.9 | 5.6 | 6.9 | 6.9 | 8.1 | 6.4 | 6.4 | 5 | 2.3 | 2.5 | 2.7 | 1.9 | 2.2 | 3.1 | 2.6 | 3.4 |
| 30 | 3 | 2.9 | 3.2 | 2.9 | 3.6 | 3.1 | 3.5 | 2.6 | 2.7 | 2.8 | 2.9 | 4.2 | 5.1 | 5.9 | 4.7 | 3.6 | 3.3 | 1.7 | 1.5 | 2.2 | 2.1 | 2.3 | 2.8 | 2.7 |
| 31 | 2.7 | 2.6 | 2.4 | 2.5 | 3 | 2 | 3.3 | 3.3 | 2.4 | 2.8 | 4.9 | 5.5 | 5.4 | 5.3 | 5.9 | 6.9 | 7 | 6.5 | 6.9 | 8.9 | 7.7 | 9.6 | 7.5 | 12.5 |

2018 yılı Nisan ayı saatlik rüzgâr hızı verileri (m/s):

| Gün | Saat | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 1 | 12.4 | 13 | 13.1 | 16.4 | 16.7 | 16.2 | 16.8 | 18.5 | 19.8 | 20 | 23.3 | 22.3 | 22 | 20.7 | 18.5 | 13.6 | 15.8 | 12.3 | 9.6 | 8.4 | 8.9 | 3.8 | 3.5 | 1.8 |
| 2 | 3.1 | 3 | 2.3 | 1.6 | 3.6 | 3.2 | 1.7 | 1.4 | 3.3 | 2.5 | 3.3 | 2.2 | 4.8 | 2.3 | 4.4 | 3.2 | 2.7 | 2.7 | 2.4 | 2.2 | 3.5 | 3.2 | 3.3 | 3.3 |
| 3 | 3.6 | 3.2 | 2.8 | 3.3 | 2.6 | 3.3 | 3 | 4.2 | 4.7 | 5.7 | 6.3 | 5.9 | 5.3 | 6.3 | 6.6 | 6.9 | 5.2 | 3.4 | 3.4 | 1.8 | 2.7 | 3.1 | 2.7 | 3.2 |
| 4 | 2.8 | 3.1 | 2.9 | 2 | 2.5 | 3.4 | 4.6 | 4.9 | 3.9 | 4.3 | 3.8 | 4 | 4.2 | 3.7 | 3 | 4.2 | 2.6 | 2.5 | 2.3 | 2.3 | 2 | 2.6 | 3.3 | 2.7 |
| 5 | 2.9 | 2.5 | 2 | 2.8 | 2.5 | 2.1 | 3.4 | 3.2 | 1.7 | 1.9 | 2.5 | 3.1 | 3.1 | 3.1 | 2.7 | 1.8 | 4.4 | 1.6 | 2.7 | 2.3 | 2.4 | 2.5 | 3.3 | 2.7 |
| 6 | 2.7 | 2.8 | 2.8 | 2.6 | 2.2 | 3.8 | 3.8 | 4.6 | 3.6 | 3.2 | 4.5 | 3.8 | 3.5 | 7 | 6.8 | 5.1 | 4.8 | 4.3 | 4.1 | 6.5 | 5.5 | 6.4 | 7.3 | 6.8 |
| 7 | 4.8 | 4.9 | 5.3 | 7.2 | 6.8 | 6.7 | 11.3 | 10.9 | 13 | 11.9 | 11.3 | 10.4 | 10.5 | 9.2 | 7.5 | 6.7 | 7 | 6.5 | 5.9 | 5.6 | 6.2 | 5.2 | 4.3 | 4.3 |
| 8 | 6.8 | 6.6 | 6.5 | 6.8 | 6.9 | 8.7 | 10.9 | 12.8 | 11.8 | 11.7 | 12.3 | 11.9 | 10.8 | 9.5 | 8.1 | 7.8 | 9.1 | 10.3 | 7.1 | 5.1 | 6.8 | 5.6 | 6.8 | 8 |
| 9 | 6.3 | 7.8 | 8.6 | 8.2 | 8.4 | 8.2 | 6.7 | 8.6 | 8.9 | 10.1 | 11.1 | 10.8 | 9.5 | 10 | 8.2 | 5.3 | 5.1 | 4.5 | 5.1 | 4.4 | 3.1 | 3 | 2.8 | 2.3 |
| 10 | 2.1 | 1.5 | 2 | 3 | 2.9 | 3.4 | 4.1 | 4 | 4.1 | 4.2 | 4.7 | 5.3 | 4.7 | 3.1 | 3.4 | 2.4 | 4.3 | 3.7 | 1.1 | 2 | 3.4 | 3.3 | 3.5 | 2.2 |
| 11 | 2 | 2.5 | 2.8 | 3 | 3.9 | 3.6 | 3.6 | 2.6 | 2.1 | 2.4 | 1.6 | 2.2 | 4.1 | 3.7 | 1.9 | 3 | 2.1 | 2.5 | 1.9 | 1.9 | 2.1 | 1.3 | 1.7 | 1.6 |
| 12 | 2.2 | 2 | 1.8 | 2 | 1.9 | 2.8 | 2.7 | 2.6 | 2 | 2.2 | 3 | 3.3 | 4.5 | 5.4 | 5.2 | 3.8 | 2.5 | 1.7 | 2.7 | 2.8 | 2.6 | 3 | 3.3 | 2.2 |
| 13 | 2.6 | 2.5 | 2.7 | 2.1 | 3.3 | 3.8 | 4.7 | 4 | 4.3 | 3.8 | 5.1 | 4.1 | 4.8 | 4.2 | 3.1 | 3.4 | 4.1 | 3.9 | 3.5 | 4 | 3.9 | 3.1 | 4.1 | 3.2 |
| 14 | 3.9 | 4 | 5.6 | 5.1 | 5.1 | 5.7 | 6.1 | 6.3 | 7.1 | 8.4 | 8.2 | 8.6 | 8.5 | 10.2 | 9.7 | 10.3 | 8.6 | 8 | 7.6 | 8.2 | 9.7 | 9.5 | 7 | 6.5 |
| 15 | 6.5 | 6.5 | 7.9 | 7.9 | 9.5 | 8.8 | 9.7 | 10.6 | 13.1 | 13.8 | 13.8 | 11.2 | 11 | 10.4 | 9.3 | 8.5 | 7.5 | 8.2 | 8 | 8 | 8.2 | 8.3 | 8.7 | 8.6 |
| 16 | 7.9 | 9.2 | 8.2 | 7.4 | 7.6 | 9.2 | 9.7 | 9.5 | 10.9 | 9.7 | 9.9 | 9.4 | 8.1 | 7.1 | 6.7 | 5.5 | 6.1 | 11.1 | 11 | 9.7 | 3.3 | 4.7 | 4.7 | 5.8 |
| 17 | 6.3 | 8.2 | 7.3 | 7.3 | 6.8 | 6 | 5.9 | 7 | 6.4 | 6.2 | 7.6 | 6.4 | 7.3 | 7.4 | 5.8 | 5.5 | 4.2 | 3.7 | 4.2 | 3.8 | 4.9 | 4 | 5 | 5.3 |
| 18 | 6 | 6.4 | 3.9 | 3.7 | 5.6 | 8.2 | 9.6 | 9.8 | 10.5 | 12.8 | 10.6 | 10.9 | 11.9 | 8.2 | 8 | 6.4 | 6.9 | 5.5 | 5.8 | 7.5 | 7.9 | 7.9 | 6 | 7.3 |
| 19 | 8.4 | 7.6 | 6.6 | 5.5 | 4.8 | 7.1 | 6.4 | 10 | 11.4 | 13.9 | 12.3 | 11.7 | 9.3 | 8.9 | 7.8 | 6.7 | 4.6 | 3.4 | 3.6 | 2.2 | 3.1 | 2.3 | 2.6 | 3.1 |
| 20 | 3.3 | 2.8 | 2.5 | 2.8 | 2.6 | 3.1 | 5.9 | 10.4 | 10.5 | 8.3 | 6.2 | 11.7 | 10.2 | 8.2 | 8.3 | 7.9 | 7 | 6.8 | 6.2 | 6.1 | 5 | 4.5 | 5.1 | 4.6 |
| 21 | 3.7 | 2.2 | 1.5 | 1.8 | 3.8 | 4.2 | 5.4 | 6.1 | 7.7 | 8.7 | 9.8 | 9.5 | 8.2 | 7.8 | 8.4 | 7.8 | 5.6 | 4.2 | 2.1 | 1.9 | 2.3 | 3.1 | 3 | 3.3 |

2018 yılı Nisan ayı saatlik rüzgâr hızı verileri (m/s) (devam):

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 22 | 3.2 | 3.5 | 3.6 | 3.3 | 3.3 | 2.5 | 2.1 | 1.7 | 2.6 | 3.8 | 3.9 | 5 | 5.9 | 5.4 | 4.2 | 3 | 2.7 | 1.3 | 2.7 | 3.1 | 2.3 | 2.8 | 3.3 | 3.4 |
| 23 | 3.4 | 2.1 | 2.6 | 2.6 | 2 | 2 | 2.1 | 1.4 | 1 | 2.5 | 4.2 | 3.8 | 4.6 | 3.9 | 3.3 | 3.1 | 1.8 | 2 | 1.5 | 2.9 | 1.8 | 2.2 | 2 | 2.2 |
| 24 | 2.3 | 2.6 | 2.3 | 2.2 | 2.5 | 3.1 | 2.8 | 2.9 | 2.9 | 5 | 2.8 | 3.4 | 3 | 2.1 | 1.7 | 1.7 | 1.5 | 1.4 | 1.3 | 1.3 | 2.5 | 3.6 | 4.5 | 3.2 |
| 25 | 5 | 3.6 | 2.7 | 3.1 | 2.8 | 3.1 | 3.1 | 3 | 4.1 | 5.8 | 6.6 | 5.7 | 6.2 | 5.1 | 4.3 | 3.7 | 3.5 | 3 | 2.8 | 2.4 | 2.9 | 2.3 | 2.5 | 2.3 |
| 26 | 2.5 | 2.9 | 2.8 | 2.8 | 3.2 | 3.8 | 3.7 | 4.5 | 4.4 | 7.1 | 7.6 | 8.4 | 9 | 7.3 | 6.6 | 6.4 | 4.8 | 4.1 | 2.5 | 2.8 | 3.2 | 2.6 | 2.3 | 2.7 |
| 27 | 2.6 | 2.7 | 3.8 | 2.9 | 2.6 | 3.9 | 4.7 | 5.3 | 8.3 | 7.7 | 7.4 | 10 | 9 | 8 | 8.4 | 6.9 | 3.6 | 3.9 | 3.5 | 4.9 | 6.1 | 6.3 | 5.8 | 6.5 |
| 28 | 7.2 | 5.7 | 4 | 6.9 | 7.4 | 7.9 | 11 | 13.9 | 12.5 | 11.6 | 15.1 | 11.8 | 12.5 | 13.6 | 13.8 | 10.3 | 9.7 | 6.4 | 6.8 | 8.7 | 7.1 | 9.6 | 7.5 | 6.7 |
| 29 | 6.9 | 5.7 | 5.6 | 8.7 | 9.3 | 10.8 | 11.2 | 11.8 | 12.7 | 13 | 12.8 | 11.5 | 13.2 | 11.6 | 10.6 | 10.3 | 8.6 | 6.9 | 6.8 | 6.9 | 6.5 | 7.6 | 7 | 5.9 |
| 30 | 6.8 | 6.2 | 6.1 | 5.9 | 8.2 | 8 | 7.6 | 9.5 | 10.7 | 10.9 | 9.1 | 8.4 | 7.1 | 8.8 | 8.7 | 7.5 | 5.8 | 4.3 | 4.5 | 4.2 | 5.4 | 6.3 | 3 | 2.8 |

2018 yılı Mayıs ayı saatlik rüzgâr hızı verileri (m/s):

| Gün | Saat | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 1 | 4.2 | 2.9 | 2.5 | 2.6 | 2.6 | 4.4 | 6 | 7.4 | 7 | 6 | 8 | 7.9 | 6.8 | 6.9 | 6.6 | 8.1 | 7.3 | 6.1 | 6.6 | 6.9 | 5.8 | 6.3 | 6 | 5.1 |
| 2 | 6.4 | 5.3 | 5 | 5.3 | 6.3 | 7.7 | 8.1 | 9.2 | 9.9 | 10.1 | 8.9 | 9.7 | 7.8 | 9.7 | 6.6 | 6.3 | 7.4 | 6.6 | 5.8 | 5.4 | 6 | 5.1 | 4.3 | 4.3 |
| 3 | 4.2 | 4.5 | 6.2 | 6 | 6.7 | 6.5 | 5.2 | 6.5 | 7.3 | 7 | 6.5 | 5.3 | 10.5 | 9 | 7.4 | 6 | 5.1 | 4.6 | 4.4 | 5.6 | 5.6 | 5.8 | 6.7 | 5.7 |
| 4 | 6.3 | 7 | 6.2 | 9 | 6.3 | 7.6 | 7.8 | 9.8 | 10.2 | 10.5 | 10.4 | 9.3 | 8.3 | 9.1 | 9.2 | 9.7 | 10.3 | 5.9 | 5.8 | 5.8 | 7.8 | 7.2 | 7.2 | 6.1 |
| 5 | 5.9 | 8 | 6.4 | 6.8 | 7.3 | 9.8 | 9.6 | 11 | 13 | 12.1 | 12 | 10.5 | 11 | 9.9 | 8.7 | 6.7 | 7.8 | 5.7 | 8 | 8.6 | 7 | 6.2 | 5.3 | 5.5 |
| 6 | 6.3 | 4.3 | 4.7 | 4.6 | 5.7 | 4.8 | 3.6 | 4.2 | 3.6 | 3.4 | 4 | 5.1 | 7.4 | 5.4 | 4.2 | 3.4 | 5.8 | 2.7 | 2.2 | 1.6 | 2 | 2.3 | 1.1 | 1.1 |
| 7 | 1 | 1 | 1.6 | 1.6 | 2.5 | 3.6 | 3.1 | 3.1 | 4.8 | 4.8 | 6.5 | 7.3 | 5.6 | 3.8 | 6.7 | 6.1 | 5.3 | 4.9 | 7.1 | 2.7 | 3.1 | 2.5 | 2.2 | 2.2 |
| 8 | 2.5 | 2.5 | 3 | 2.3 | 2.6 | 2.8 | 2 | 2.8 | 2.8 | 3.2 | 3.4 | 5.7 | 5.6 | 6.2 | 4.1 | 4.1 | 2.6 | 3 | 2.4 | 3.5 | 3.5 | 3.6 | 2.6 | 3.2 |
| 9 | 2.1 | 2.3 | 2.5 | 3.7 | 2 | 1.6 | 2 | 2.9 | 4.5 | 4.7 | 4.8 | 5.9 | 7.3 | 7 | 7.6 | 6.1 | 5.9 | 3 | 2.7 | 2.6 | 1.7 | 1.5 | 1.9 | 2.2 |
| 10 | 2.7 | 2.3 | 2.5 | 3 | 2.8 | 3 | 3.3 | 3.3 | 3.1 | 4 | 4.2 | 4.3 | 4.5 | 5.9 | 5.9 | 3.7 | 5 | 4.7 | 5.2 | 4.7 | 3.8 | 4.6 | 3.9 | 2.9 |
| 11 | 4.3 | 4.1 | 3.6 | 3.4 | 2.6 | 4 | 5.5 | 6.3 | 7.5 | 8.7 | 7.3 | 6.6 | 12.3 | 10.3 | 5.9 | 4.7 | 4.8 | 5.1 | 6.2 | 6.4 | 5.2 | 6.5 | 6.9 | 7.2 |
| 12 | 7.3 | 7.7 | 7.4 | 6.7 | 7.8 | 8.6 | 9.2 | 8.6 | 8.9 | 10 | 8.8 | 10 | 11.3 | 9.5 | 9.7 | 7.8 | 6.7 | 5.4 | 6 | 4.6 | 4.6 | 3.6 | 2.1 | 2.1 |
| 13 | 2.5 | 2.1 | 2.8 | 3.2 | 2.9 | 3.1 | 4.4 | 6.2 | 6.6 | 6.7 | 6.9 | 7.3 | 7 | 5.6 | 6.4 | 4.8 | 3.5 | 2.8 | 1.1 | 2.1 | 2 | 2.5 | 2.7 | 3.4 |
| 14 | 3 | 3.1 | 3 | 3.5 | 3.2 | 1.8 | 2.3 | 1.9 | 5.8 | 5 | 5.3 | 5.7 | 6.1 | 6.6 | 5.4 | 4.2 | 3.9 | 4.2 | 3.6 | 2.3 | 2.7 | 2.4 | 2.5 | 2.4 |
| 15 | 2.5 | 3.3 | 2.7 | 2.2 | 2.9 | 2.9 | 3.3 | 3 | 4.9 | 8.1 | 8.4 | 7.5 | 6.1 | 7.3 | 7.3 | 5.9 | 4.3 | 3.9 | 2.9 | 2.6 | 1.9 | 1.4 | 2.3 | 2.1 |
| 16 | 2.4 | 2.1 | 3.2 | 2.9 | 3.2 | 3 | 3.1 | 3.5 | 4.6 | 8 | 6 | 5.6 | 7.5 | 7.4 | 5.8 | 6.3 | 4.1 | 3.5 | 3.3 | 3.2 | 3.3 | 2 | 1.8 | 2 |
| 17 | 1.9 | 2.4 | 2.4 | 3 | 2.6 | 2 | 3 | 5.3 | 5.6 | 4.5 | 4.6 | 3.7 | 6.4 | 6.4 | 5.7 | 3.8 | 3.5 | 3.7 | 2.6 | 2.6 | 1.7 | 2.9 | 1 | 2 |
| 18 | 2.7 | 2.7 | 2.2 | 3.1 | 3.1 | 3 | 3.5 | 3 | 2.8 | 3 | 3.6 | 3.8 | 2.8 | 2.9 | 2.1 | 5.9 | 5.6 | 3.8 | 2 | 1.7 | 1.4 | 2.1 | 1.8 | 2 |
| 19 | 3.7 | 3.7 | 3.2 | 3.2 | 3.4 | 4.7 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 5.1 | 5.1 | 5.1 | 5.8 | 5.8 | 4.7 | 2.6 | 3 | 3.2 | 6 | 6.5 | 6.6 | 7 |
| 20 | 9.7 | 4.1 | 5 | 4.9 | 8.3 | 10.3 | 10.4 | 11.7 | 10.3 | 11 | 11.5 | 11.5 | 10.9 | 10.1 | 8.2 | 8.7 | 6.3 | 4.8 | 5.1 | 5.5 | 6.3 | 6.3 | 6.4 | 7.2 |
| 21 | 6.9 | 6.7 | 6.1 | 6.5 | 6.2 | 8.1 | 9.6 | 12.5 | 11.6 | 14.1 | 14.7 | 14.1 | 14 | 14.5 | 12.5 | 10.7 | 10.1 | 7.2 | 7.9 | 7.1 | 6.4 | 9 | 7.2 | 8 |

2018 yılı Mayıs ayı saatlik rüzgâr hızı verileri (m/s) (devam):

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|
| 22 | 7.3 | 7 | 7.6 | 8.8 | 9.1 | 8.9 | 9.6 | 10 | 9.7 | 9.5 | 7.9 | 11.1 | 12.3 | 8.4 | 7.5 | 6.5 | 6.5 | 4.7 | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 4.9 | 4.2 | 3.8 |
| 23 | 4 | 4.7 | 3.9 | 3.6 | 4.6 | 6.2 | 6.2 | 7.7 | 8.5 | 7.4 | 7.9 | 8.5 | 7.4 | 8 | 5.8 | 7.7 | 6.5 | 6.3 | 4.2 | 4.1 | 4.3 | 5 | 4.8 | 5.9 |
| 24 | 5.1 | 3.5 | 4.1 | 4.7 | 4.6 | 7.9 | 8.9 | 9.6 | 11.9 | 10.6 | 10.8 | 12 | 9.5 | 10.6 | 10 | 8.5 | 7.4 | 6.3 | 6.5 | 4.7 | 5.6 | 6.3 | 5.6 | 5.8 |
| 25 | 4.7 | 4.9 | 3 | 2.9 | 3.1 | 5.7 | 7.1 | 6.7 | 5.1 | 5.5 | 6.6 | 5.7 | 4.8 | 7 | 5.8 | 3.5 | 2.2 | 3.1 | 2.1 | 2.1 | 5 | 3.9 | 5.4 | 5.7 |
| 26 | 6.1 | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 3.4 | 4.4 | 6.6 | 7.9 | 8 | 6.7 | 7.5 | 13.3 | 10.1 | 5.9 | 7.3 | 8 | 8.5 | 6.9 | 8.7 | 10.3 | 11.2 | 8.8 | 9.7 | 8.9 |
| 27 | 5.4 | 5.6 | 5.8 | 5.7 | 5.7 | 5.4 | 4.2 | 6.6 | 7.5 | 9.1 | 9.4 | 9.2 | 11.4 | 9.3 | 8.1 | 8.7 | 6.6 | 5.3 | 5.6 | 4.5 | 7.1 | 5 | 7.9 | 7.1 |
| 28 | 6.6 | 5.6 | 4.6 | 5 | 6.5 | 8.6 | 8.3 | 10.4 | 11.4 | 10.8 | 10 | 10.5 | 9.8 | 10.1 | 9.4 | 8.5 | 7.4 | 6.3 | 6.2 | 6.5 | 5.6 | 4.6 | 6.5 | 5.5 |
| 29 | 4.5 | 4.2 | 4.2 | 4.9 | 5.6 | 7.6 | 6.7 | 7.9 | 10 | 7.9 | 9.4 | 7.1 | 10.2 | 10.5 | 9.8 | 9.5 | 7.1 | 6.6 | 9 | 9 | 6.8 | 6.7 | 6.7 | 3.6 |
| 30 | 3.1 | 3.2 | 3 | 5.4 | 5.4 | 6.5 | 8.6 | 9.6 | 10.8 | 10.9 | 10.3 | 9.9 | 9.4 | 10.1 | 9.1 | 8.4 | 7.2 | 6.2 | 5.7 | 5.7 | 5.6 | 5.7 | 5.2 | 6.1 |
| 31 | 4.5 | 4.6 | 4.3 | 4.9 | 4.4 | 6.7 | 7.9 | 9.6 | 10 | 10.5 | 10.1 | 9.4 | 8.6 | 9 | 8.9 | 8.2 | 6.4 | 5 | 4.7 | 3.5 | 3.2 | 3.6 | 3.1 | 3.7 |

EK 2**2018 yılı Mart ayı saatlik güneş radyasyonu verileri (W/m²):**

| Gün | Saat | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|------|---|---|---|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 30 | 150 | 540 | 680 | 750 | 780 | 710 | 560 | 190 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 100 | 140 | 220 | 290 | 370 | 410 | 420 | 360 | 140 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30 | 30 | 30 | 30 | 40 | 40 | 40 | 70 | 50 | 50 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 90 | 300 | 240 | 310 | 430 | 270 | 270 | 230 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 100 | 220 | 240 | 530 | 560 | 590 | 370 | 140 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 210 | 270 | 470 | 480 | 480 | 590 | 580 | 370 | 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 40 | 100 | 190 | 210 | 430 | 210 | 120 | 80 | 60 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 | 100 | 530 | 550 | 360 | 550 | 270 | 110 | 160 | 60 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 40 | 410 | 610 | 440 | 160 | 310 | 390 | 320 | 150 | 90 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 70 | 440 | 570 | 770 | 830 | 840 | 770 | 570 | 290 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 90 | 420 | 620 | 780 | 830 | 860 | 770 | 580 | 370 | 140 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 100 | 440 | 630 | 790 | 840 | 810 | 720 | 450 | 290 | 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 20 | 50 | 70 | 40 | 40 | 150 | 140 | 140 | 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 130 | 310 | 630 | 430 | 510 | 730 | 410 | 390 | 400 | 110 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30 | 80 | 170 | 370 | 340 | 280 | 140 | 200 | 300 | 340 | 180 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 140 | 430 | 630 | 750 | 850 | 840 | 720 | 420 | 260 | 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30 | 160 | 330 | 530 | 690 | 580 | 570 | 310 | 470 | 300 | 130 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 110 | 180 | 310 | 540 | 560 | 450 | 400 | 420 | 280 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 150 | 230 | 530 | 750 | 840 | 780 | 790 | 640 | 420 | 150 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

2018 yılı Nisan ayı saatlik güneş radyasyonu verileri (W/m²):

| Gün | Saat | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|------|---|---|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 300 | 460 | 500 | 800 | 860 | 840 | 790 | 620 | 460 | 180 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 | 330 | 590 | 790 | 920 | 930 | 870 | 830 | 730 | 530 | 190 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30 | 370 | 610 | 810 | 880 | 920 | 910 | 880 | 730 | 530 | 170 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 | 360 | 590 | 800 | 900 | 860 | 870 | 820 | 720 | 520 | 190 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 360 | 580 | 770 | 890 | 890 | 830 | 800 | 690 | 500 | 170 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 | 380 | 580 | 700 | 790 | 790 | 780 | 810 | 740 | 530 | 210 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 | 300 | 430 | 750 | 900 | 890 | 800 | 710 | 510 | 450 | 80 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 10 | 130 | 330 | 560 | 750 | 770 | 850 | 740 | 610 | 540 | 80 | 110 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 10 | 90 | 330 | 570 | 780 | 900 | 680 | 880 | 810 | 720 | 520 | 30 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 10 | 130 | 360 | 560 | 780 | 860 | 830 | 810 | 760 | 650 | 550 | 230 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 10 | 70 | 160 | 300 | 330 | 450 | 410 | 340 | 380 | 190 | 120 | 80 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 20 | 130 | 300 | 520 | 710 | 820 | 820 | 780 | 730 | 680 | 480 | 220 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 20 | 140 | 330 | 530 | 700 | 820 | 810 | 770 | 690 | 600 | 470 | 220 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 20 | 160 | 380 | 570 | 780 | 870 | 860 | 800 | 730 | 670 | 510 | 240 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 30 | 170 | 390 | 610 | 780 | 860 | 780 | 730 | 720 | 520 | 400 | 130 | 40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 30 | 130 | 260 | 440 | 600 | 710 | 710 | 720 | 390 | 200 | 140 | 100 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 30 | 170 | 370 | 570 | 750 | 830 | 820 | 800 | 720 | 680 | 550 | 260 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 30 | 190 | 400 | 570 | 780 | 850 | 830 | 810 | 750 | 670 | 560 | 270 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 30 | 100 | 190 | 270 | 530 | 630 | 290 | 550 | 720 | 590 | 350 | 220 | 60 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

2018 yılı Mayıs ayı saatlik güneş radyasyonu verileri (W/m²):

| Gün | Saat | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|------|---|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 60 | 220 | 420 | 640 | 800 | 820 | 800 | 800 | 780 | 580 | 240 | 80 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 50 | 230 | 430 | 620 | 730 | 710 | 400 | 230 | 150 | 240 | 510 | 120 | 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 60 | 240 | 440 | 660 | 810 | 820 | 790 | 780 | 710 | 650 | 540 | 310 | 70 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 30 | 190 | 420 | 570 | 790 | 800 | 780 | 750 | 700 | 640 | 240 | 230 | 70 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 60 | 200 | 340 | 600 | 770 | 630 | 750 | 650 | 650 | 180 | 80 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 20 | 40 | 10 | 10 | 150 | 110 | 100 | 240 | 140 | 80 | 20 | 20 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 60 | 140 | 390 | 610 | 640 | 370 | 70 | 200 | 70 | 50 | 320 | 140 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 70 | 200 | 400 | 680 | 700 | 400 | 550 | 470 | 440 | 200 | 200 | 350 | 120 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 80 | 260 | 480 | 710 | 820 | 830 | 830 | 870 | 690 | 230 | 120 | 130 | 70 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 70 | 250 | 450 | 680 | 820 | 780 | 780 | 550 | 570 | 590 | 510 | 370 | 120 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 70 | 70 | 200 | 600 | 300 | 70 | 800 | 570 | 820 | 500 | 70 | 170 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 90 | 290 | 490 | 710 | 810 | 800 | 840 | 680 | 530 | 280 | 440 | 340 | 120 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 100 | 300 | 520 | 740 | 820 | 780 | 810 | 810 | 770 | 700 | 630 | 390 | 130 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 100 | 310 | 530 | 720 | 810 | 780 | 790 | 790 | 750 | 720 | 630 | 400 | 130 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 110 | 290 | 510 | 740 | 820 | 780 | 790 | 790 | 750 | 710 | 620 | 390 | 130 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 100 | 290 | 500 | 700 | 810 | 790 | 800 | 860 | 660 | 560 | 70 | 170 | 130 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 90 | 280 | 490 | 710 | 780 | 650 | 220 | 240 | 790 | 460 | 470 | 120 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 70 | 250 | 440 | 670 | 820 | 740 | 800 | 430 | 410 | 140 | 60 | 70 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 30 | 110 | 240 | 340 | 330 | 150 | 490 | 770 | 720 | 460 | 430 | 230 | 90 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

KAYNAKLAR

- [1] S. Awerbuch and A. Preston, *The virtual utility: Accounting, technology & competitive aspects of the emerging industry*, vol. 26. Springer Science & Business Media, 2012.
- [2] S. Yu, F. Fang, Y. Liu, and J. Liu, "Uncertainties of virtual power plant: Problems and countermeasures," *Appl. Energy*, vol. 239, no. February, pp. 454–470, 2019.
- [3] D. Pudjianto, C. Ramsay, and G. Strbac, "Virtual power plant and system integration of distributed energy resources," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 1, no. 1, pp. 10–16, 2007.
- [4] S. Barrett, "CFCL BlueGen units for virtual power plant project in Netherlands," *Fuel Cells Bull.*, 2012.
- [5] M. Loßner, D. Böttger, and T. Bruckner, "Economic assessment of virtual power plants in the German energy market—A scenario-based and model-supported analysis," *Energy Econ.*, vol. 62, pp. 125–138, 2017.
- [6] H. Saboori, M. Mohammadi, and R. Taghe, "Virtual power plant (VPP), definition, concept, components and types," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, 2011.
- [7] "Mevzuat Bilgi Sistemi".
<https://www.mevzuat.gov.tr/Metin.Aspx?MevzuatKod=7.5.12985&MevzuatIliski=0&sourceXmlSearch=dengeleme> (Erişim tarihi: 18.12.2019)
- [8] "Türkiye Elektrik Piyasası | Türkiye Elektrik İletim A.Ş.". <https://www.teias.gov.tr/tr/yayinlar-raporlar/piyasa-raporlari> (Erişim tarihi: 18.12.2019)
- [9] H. Pandžić, I. Kuzle, and T. Capuder, "Virtual power plant mid-term dispatch

- optimization,” *Appl. Energy*, vol. 101, pp. 134–141, 2013.
- [10] H. Pandžić, J. M. Morales, A. J. Conejo, and I. Kuzle, “Offering model for a virtual power plant based on stochastic programming,” *Appl. Energy*, vol. 105, pp. 282–292, 2013.
- [11] A. Shayegan-Rad, A. Badri, and A. Zangeneh, “Day-ahead scheduling of virtual power plant in joint energy and regulation reserve markets under uncertainties,” *Energy*, vol. 121, pp. 114–125, 2017.
- [12] A. G. Zamani, A. Zakariazadeh, and S. Jadid, “Day-ahead resource scheduling of a renewable energy based virtual power plant,” *Appl. Energy*, vol. 169, pp. 324–340, 2016.
- [13] S. Hadayeghparast, A. SoltaniNejad Farsangi, and H. Shayanfar, “Day-ahead stochastic multi-objective economic/emission operational scheduling of a large scale virtual power plant,” *Energy*, vol. 172, pp. 630–646, 2019.
- [14] M. Peik-Herfeh, H. Seifi, and M. K. Sheikh-El-Eslami, “Decision making of a virtual power plant under uncertainties for bidding in a day-ahead market using point estimate method,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 44, no. 1, pp. 88–98, 2013.
- [15] Z. Tan, Q. Tan, and Y. Wang, “Bidding strategy of virtual power plant with energy storage power station and photovoltaic and wind power,” *J. Eng. (United Kingdom)*, vol. 2018, 2018.
- [16] A. Tascikaraoglu, O. Erdinc, M. Uzunoglu, and A. Karakas, “An adaptive load dispatching and forecasting strategy for a virtual power plant including renewable energy conversion units,” *Appl. Energy*, vol. 119, pp. 445–453, 2014.
- [17] O. Arslan and O. E. Karasan, “Cost and emission impacts of virtual power plant formation in plug-in hybrid electric vehicle penetrated networks,” *Energy*, vol.

60, pp. 116–124, 2013.

- [18] S. Seyyed Mahdavi and M. H. Javidi, “VPP decision making in power markets using Benders decomposition,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 24, no. 7, pp. 960–975, 2014.
- [19] L. Ju, Q. Tan, Y. Lu, Z. Tan, Y. Zhang, and Q. Tan, “A CVaR-robust-based multi-objective optimization model and three-stage solution algorithm for a virtual power plant considering uncertainties and carbon emission allowances,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 107, no. December 2018, pp. 628–643, 2019.
- [20] K. Dietrich, J. M. Latorre, L. Olmos, and A. Ramos, “Modelling and assessing the impacts of self supply and market-revenue driven Virtual Power Plants,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 119, no. 2015, pp. 462–470, 2015.
- [21] A. Alahyari, M. Ehsan, and M. S. Mousavizadeh, “A hybrid storage-wind virtual power plant (VPP) participation in the electricity markets: A self-scheduling optimization considering price, renewable generation, and electric vehicles uncertainties,” *J. Energy Storage*, vol. 25, no. June, p. 100812, 2019.
- [22] A. G. Zamani, A. Zakariazadeh, S. Jadid, and A. Kazemi, “Stochastic operational scheduling of distributed energy resources in a large scale virtual power plant,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 82, pp. 608–620, 2016.
- [23] Y. Liu, M. Li, H. Lian, X. Tang, C. Liu, and C. Jiang, “Optimal dispatch of virtual power plant using interval and deterministic combined optimization,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 102, no. December 2017, pp. 235–244, 2018.
- [24] L. Ju, R. Zhao, Q. Tan, Y. Lu, Q. Tan, and W. Wang, “A multi-objective robust scheduling model and solution algorithm for a novel virtual power plant connected with power-to-gas and gas storage tank considering uncertainty and

- demand response,” *Appl. Energy*, vol. 250, no. September 2018, pp. 1336–1355, 2019.
- [25] F. Luo, Z. Y. Dong, K. Meng, J. Qiu, J. Yang, and K. P. Wong, “Short-term operational planning framework for virtual power plants with high renewable penetrations,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 10, no. 5, pp. 623–633, 2016.
- [26] B. Zhou, X. Liu, Y. Cao, C. Li, C. Y. Chung, and K. W. Chan, “Optimal scheduling of virtual power plant with battery degradation cost,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 3, pp. 712–725, 2016.
- [27] S. Fan, Q. Ai, and L. Piao, “Fuzzy day-ahead scheduling of virtual power plant with optimal confidence level,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 1, pp. 205–212, 2016.
- [28] O. Sadeghian, A. M. Shotorbani, and B. Mohammadi-Ivatloo, “Generation maintenance scheduling in virtual power plants,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 13, no. 12, pp. 2584–2596, 2019.
- [29] S. Skarvelis-Kazakos, E. Rikos, E. Kolentini, L. M. Cipcigan, and N. Jenkins, “Implementing agent-based emissions trading for controlling Virtual Power Plant emissions,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 102, pp. 1–7, 2013.
- [30] C. Giron and S. Omran, “Virtual power plant for a smart grid: A technical feasibility case study,” *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 8, no. 2, pp. 830–837, 2018.
- [31] Y. Xia and J. Liu, “Optimal scheduling of Virtual Power Plant with risk management,” *J. Power Technol.*, vol. 96, no. 1, pp. 49–56, 2016.
- [32] Y. Kang, K. Lo, and I. Kockar, “Optimal Energy Management for Virtual Power Plant with Renewable Generation,” *Energy Power Eng.*, vol. 09, no. 04, pp. 308–316, 2017.

- [33] C. Dong, X. Ai, S. Guo, K. Wang, Y. Liu, and L. Li, "A study on short-term trading and optimal operation strategy for virtual power plant," in *2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, 2015, pp. 2672–2677.
- [34] Z. Tan, G. Wang, L. Ju, Q. Tan, and W. Yang, "Application of CVaR risk aversion approach in the dynamical scheduling optimization model for virtual power plant connected with wind-photovoltaic-energy storage system with uncertainties and demand response," *Energy*, vol. 124, pp. 198–213, 2017.
- [35] L. Ju, H. Li, J. Zhao, K. Chen, Q. Tan, and Z. Tan, "Multi-objective stochastic scheduling optimization model for connecting a virtual power plant to wind-photovoltaic-electric vehicles considering uncertainties and demand response," *Energy Convers. Manag.*, vol. 128, pp. 160–177, 2016.
- [36] A. T. Al-Awami, N. A. Amleh, and A. M. Muqbel, "Optimal demand response bidding and pricing mechanism with fuzzy optimization: Application for a virtual power plant," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 5, pp. 5051–5061, 2017.
- [37] A. Baringo and L. Baringo, "A Stochastic Adaptive Robust Optimization Approach for the Offering Strategy of a Virtual Power Plant," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 5, pp. 3492–3504, 2017.
- [38] M. Giuntoli and D. Poli, "Optimized thermal and electrical scheduling of a large scale virtual power plant in the presence of energy storages," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 942–955, 2013.
- [39] S. R. Dabbagh and M. K. Sheikh-El-Eslami, "Risk Assessment of Virtual Power Plants Offering in Energy and Reserve Markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 5, pp. 3572–3582, 2016.
- [40] G. C. Lazaroiu, V. Dumbrava, M. Roscia, and D. Zaninelli, "Energy trading optimization of a virtual power plant on electricity market," *2015 9th Int. Symp.*

Adv. Top. Electr. Eng. ATEE 2015, pp. 911–916, 2015.

- [41] M. A. Tajeddini, A. Rahimi-Kian, and A. Soroudi, “Risk averse optimal operation of a virtual power plant using two stage stochastic programming,” *Energy*, vol. 73, pp. 958–967, 2014.
- [42] M. Javad Kasaei, M. Gandomkar, and J. Nikoukar, “Optimal Operational Scheduling of Renewable Energy Sources Using Teaching–Learning Based Optimization Algorithm by Virtual Power Plant,” *J. Energy Resour. Technol.*, vol. 139, no. 6, pp. 1–8, 2017.
- [43] L. Ju, Z. Tan, J. Yuan, Q. Tan, H. Li, and F. Dong, “A bi-level stochastic scheduling optimization model for a virtual power plant connected to a wind-photovoltaic-energy storage system considering the uncertainty and demand response,” *Appl. Energy*, vol. 171, pp. 184–199, 2016.
- [44] M. Rahimiyan and L. Baringo, “Strategic Bidding for a Virtual Power Plant in the Day-Ahead and Real-Time Markets: A Price-Taker Robust Optimization Approach,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 4, pp. 2676–2687, 2016.
- [45] M. J. Kasaei, M. Gandomkar, and J. Nikoukar, “Optimal management of renewable energy sources by virtual power plant,” *Renew. Energy*, vol. 114, pp. 1180–1188, 2017.
- [46] M. Shabanzadeh, M. K. Sheikh-El-Eslami, and M. R. Haghifam, “The design of a risk-hedging tool for virtual power plants via robust optimization approach,” *Appl. Energy*, vol. 155, pp. 766–777, 2015.
- [47] H. Sharma and S. Mishra, “Techno-economic analysis of solar grid-based virtual power plant in Indian power sector: A case study,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, no. August, pp. 1–19, 2019.
- [48] M. Shafiekhani, A. Badri, M. Shafie-khah, and J. P. S. Catalão, “Strategic bidding of virtual power plant in energy markets: A bi-level multi-objective

approach,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 113, no. December 2018, pp. 208–219, 2019.

- [49] Y. Li, W. Gao, and Y. Ruan, “Feasibility of virtual power plants (VPPs) and its efficiency assessment through benefiting both the supply and demand sides in Chongming country, China,” *Sustain. Cities Soc.*, 2017.
- [50] S. M. Nosratabadi, R.-A. Hooshmand, and E. Gholipour, “A comprehensive review on microgrid and virtual power plant concepts employed for distributed energy resources scheduling in power systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 341–363, 2017.
- [51] A. Evans, V. Strezov, and T. J. Evans, “Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 6, pp. 4141–4147, 2012.
- [52] R. Carter, A. Cruden, and P. J. Hall, “Optimizing for efficiency or battery life in a battery/supercapacitor electric vehicle,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 4, pp. 1526–1533, 2012.
- [53] E. Schaltz, A. Khaligh, and P. O. Rasmussen, “Influence of battery/ultracapacitor energy-storage sizing on battery lifetime in a fuel cell hybrid electric vehicle,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 8, pp. 3882–3891, 2009.
- [54] Ü. Başaran, “Türkiye’deki 38 kV’luk enterkonnekte güç sisteminde çeşitli güç akışı ve ekonomik dağıtım analizleri.” Yüksek Lisan Tezi. Anadolu Üniversitesi, 2004.
- [55] “T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı - Rüzgâr.” <https://enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Ruzgar> (Erişim tarihi:31.12.2019)
- [56] S. Nojavan, K. Zare, and B. Mohammadi-Ivatloo, “Application of fuel cell and

electrolyzer as hydrogen energy storage system in energy management of electricity energy retailer in the presence of the renewable energy sources and plug-in electric vehicles,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 136, pp. 404–417, 2017.

- [57] B. Ozerdem, S. Ozer, and M. Tosun, “Feasibility study of wind farms: A case study for Izmir, Turkey,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 94, no. 10, pp. 725–743, 2006.
- [58] W. Ko and J. Kim, “Generation expansion planning model for integrated energy system considering feasible operation region and generation efficiency of combined heat and power,” *Energies*, vol. 12, no. 2, p. 226, 2019.
- [59] M. Nazari-Heris, S. Abapour, and B. Mohammadi-Ivatloo, “Optimal economic dispatch of FC-CHP based heat and power micro-grids,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 114, pp. 756–769, 2017.
- [60] M. Nazari-Heris, M. Mehdinejad, B. Mohammadi-Ivatloo, and G. Babamalek-Gharehpetian, “Combined heat and power economic dispatch problem solution by implementation of whale optimization method,” *Neural Comput. Appl.*, vol. 31, no. 2, pp. 421–436, 2019.
- [61] A. J. Conejo, M. Carrión, and J. M. Morales, *Decision making under uncertainty in electricity markets*, vol. 1. Springer, 2010.
- [62] “Meteoroloji Genel Müdürlüğü” <https://mgm.gov.tr/> (Erişim tarihi: 30.12.2019)
- [63] “GAMS - Cutting Edge Modeling.” <https://www.gams.com/> (Erişim tarihi: 12.12.2019)
- [64] M. Collan and P. Luukka, “Evaluating R&D projects as investments by using an overall ranking from four new fuzzy similarity measure-based TOPSIS variants,” *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 22, no. 3, pp. 505–515, 2013.

- [65] A. Soroudi, *Power system optimization modeling in GAMS*. Springer, 2017.
- [66] A. A. Khan, M. Naeem, M. Iqbal, S. Qaisar, and A. Anpalagan, “A compendium of optimization objectives, constraints, tools and algorithms for energy management in microgrids,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1664–1683, 2016.
- [67] “GAMS - Optimization Solvers.” <https://www.gams.com/optimization-solvers/> (Erişim tarihi:16.12.2019)
- [68] A. K. Varkani, A. Daraeepour, and H. Monsef, “A new self-scheduling strategy for integrated operation of wind and pumped-storage power plants in power markets,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 12, pp. 5002–5012, 2011.
- [69] H. Nezamabadi and M. S. Nazar, “Arbitrage strategy of virtual power plants in energy, spinning reserve and reactive power markets,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 3, pp. 750–763, 2016.
- [70] C.-T. Chen, “Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment,” *Fuzzy sets Syst.*, vol. 114, no. 1, pp. 1–9, 2000.
- [71] A. Yıldız and Y. Demir, “Bulanık TOPSIS Yöntemiyle Türkiye’nin Yerli Otomobili için En Uygun Fabrika Yerinin Seçimi,” *Bus. Manag. Stud. An Int. J.*, vol. 7, no. 4, pp. 1427–1445, 2019.
- [72] P. Luukka, “Fuzzy similarity in multicriteria decision-making problem applied to supplier evaluation and selection in supply chain management,” *Adv. Artif. Intell.*, vol. 2011, 2011.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Özge Pınar AKKAŞ

Doğum Tarihi : 26.08.1989

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu : (Kurum ve Yıl)

Lisans : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi/Elektrik-Elektronik
Mühendisliği (2007-2012)

Yüksek Lisans : Kırıkkale Üniversitesi/Elektrik-Elektronik
Mühendisliği (2013-2015)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl/Yıllar: Kırıkkale Üniversitesi (2013-Devam)

Yayımları (SCI/SCI-E İndekslerinde Yer Alan Dergiler):

AKKAŞ Ö.P., ÇAM E. “Optimal Operational Scheduling of a Virtual Power Plant Participating in Day Ahead Market with Consideration of Emission and Battery Degradation Cost”, International Transactions on Electrical Energy Systems (kabul edildi).

AKKAŞ Ö. P., ERTEN M. Y., ÇAME., İNANÇ N. "Optimal Site Selection for a Solar Power Plant in the Central Anatolian Region of Turkey", International Journal of Photoenergy, vol. 2017, Article ID 7452715, 13 pages, 2017. doi:10.1155/2017/7452715.

Yayımları (Diğer Dergiler):

AKKAŞ Ö. P., ÇAM E., EKE İ., ARIKAN Y. "New Optimization Algorithms for Application to Environmental Economic Load Dispatch in Power Systems", Electrica, Vol. 18, No. 2, pp. 133-142, 2018.

AKKAŞ Ö. P., ARIKAN Y., ÇAM E. "Application of AHP Method for Solving the Unit Commitment Problem in a Day Ahead Market", Technological Applied Sciences, Vol. 13, No. 4, pp. 310-317, 2018.

AKKAŞ Ö. P., ARIKAN Y., ÇAM E. "Offering Model for Optimization of Virtual Power Plant Operation in Electricity Market", International Journal of Engineering Research and Development, Volume 10, Issue 3, December 2018.

AKKAŞ Ö. P., ARIKAN Y., ÇAM E. "Load Dispatch for a Power System in terms of Economy and Environment by Using VIKOR Method", Dokuz Eylül University-Faculty of Engineering, Journal of Science and Engineering, Volume 19, Issue 57, September 2017, 733-741. DOI: 10.21205/deufmd.2017195766.

AKKAŞ Ö. P., ARIKAN Y., ÇAM E. "Selection of a Solar Power Plant Location by Using AHP Method", International Journal of Energy Applications and Technologies, vol. 4, issue 3, pp. 122-128, 2017.

ARSLAN Ö. P., ARIKAN Y., ÇAM E., EKE İ., "An Application of Environmental Economic Dispatch Using Genetic Algorithm", The Online Journal of Science and Technology, Volume 6, Issue 1, January 2016.

ARSLAN Ö.P., ARIKAN Y., ERTEN M. Y., ÇAM E., "Kırıkkale Üniversitesi'ne Kurulacak Olan Rüzgâr Türbini İçin Enerji ve Maliyet Analizinin Yapılması", International Journal of Engineering Research and Development, Vol.6, No. 2, June 2014.

Uluslararası Kongreler:

AKKAŞ Ö. P., ÇAM E. "Optimal Operation of Virtual Power Plant in a Day Ahead Market", 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, 11-13 October 2019, Ankara, Turkey.

AKKAŞ, Ö. P., ARIKAN, Y., ÇAM, E. (2018). Elektrik Piyasasında Sanal Güç Santrali İşletiminin Optimizasyonu için Modelleme Önerisi. II. International Scientific and Vocational Studies Congress, s. 1139-1145, July 5-8, 2018, Nevşehir.

AKKAŞ, Ö. P., ARIKAN, Y., ÇAM, E. (2018). Türkiye Gün Öncesi Elektrik Piyasasında Piyasa Takas Fiyatının Yapay Sinir Ağları ile Tahmin Edilmesi. II. International Scientific and Vocational Studies Congress, s. 1134-1138, July 5-8, 2018, Nevşehir.

AKKAŞ Ö. P., ARIKAN Y., ÇAM E. "Selection of a Solar Power Plant Location by Using AHP Method", 5th International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'17), s. 415-419, May 09-12, 2017, İstanbul.

AKKAŞ Ö. P., ARIKAN Y., ÇAM E. "Application of AHP Method in the Unit Commitment Problem with Day Ahead Market", I. International Scientific and Vocational Studies Congress, s. 699-704, October 5-8, 2017, Nevşehir.

AKKAŞ Ö. P., ARIKAN Y., ÇAM E., "Economic and Environmental Dispatch of Power Systems by Using Analytic Hierarchy Process (AHP) Method", 8th International Ege Energy Symposium, May 11-13, 2016, Afyonkarahisar.

ARSLAN Ö. P., ARIKAN Y., ÇAM E., EKE İ., "An Application of Environmental Economic Dispatch Using Genetic Algorithm", International Science and Technology Conference, St. Petersburg, RUSSIA, September 2-4, 2015.

Ulusal Kongreler:

ARSLAN Ö. P., ARIKAN Y., ÇAM E., EKE İ., "Genetik Algoritma Kullanarak Örnek Bir Güç Sistemi İçin Ekonomik Dağıtım Analizi", Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, TOK'2015, 10-12 Eylül 2015, Denizli.

Araştırma Alanları : Birim Yüklenme, Çevresel Ekonomik Yük Dağıtımı, Ekonomik Yük Dağıtımı, Güç Sistemleri, Optimizasyon.