
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

BATARYA ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN PRİMER FREKANS KONTROLÜ VE DENGESİZLİK YÖNETİMİNDE MODELLEME VE TEKNİK-EKONOMİK ANALİZİ

Ümit ŞENOL

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞUBAT 2026

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ümit ŞENOL

17/02/2026

BATARYA ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN PRİMER FREKANS KONTROLÜ VE DENGESİZLİK YÖNETİMİNDE MODELLEME VE TEKNİK-EKONOMİK ANALİZİ

(Doktora Tezi)

Ümit ŞENOL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2026

ÖZET

Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payının artması, sistem işletiminde üretim belirsizliği ve frekans kontrolü açısından önemli zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Batarya enerji depolama sistemleri (BEDS), yüksek tepki hızları ve çift yönlü güç akışı sağlayabilme yetenekleri sayesinde bu kapsamda etkin bir çözüm sunmaktadır. Bu bağlamda, BEDS'in primer frekans kontrolü (PFK) hizmetinde etkin kullanımı, hem şebeke kararlılığı hem de piyasa verimliliği açısından stratejik bir rol oynamaktadır. Bu çalışma, BEDS'in operasyonel verimliliğini artırmaya yönelik kontrol stratejileri geliştirerek sistemin ekonomik performansını maksimize etmeyi ve işletme kaynaklı riskleri minimize etmeyi amaçlamaktadır. Tez kapsamında iki farklı işletme senaryosu ele alınmıştır. İlk senaryoda, BEDS'in yalnızca PFK hizmetine katıldığı durum incelenmiş; ikinci senaryoda ise BEDS'in PFK hizmetine ek olarak rüzgar santralinin dengesizliklerinin giderilmesinde kullanıldığı yapı analiz edilmiştir. Bu amaçla, Türkiye elektrik iletim sistemine ait gerçek frekans verileri kullanılarak BEDS'in PFK performansını optimize eden bir şarj/deşarj kontrol algoritması geliştirilmiş olup bataryanın teknik sınırlamaları, çevrim ömrü ve yaşlanma dinamiklerini dikkate alacak şekilde tasarlanmıştır. Sistem modellemesi MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş, optimizasyon süreçleri ise MATLAB/m-file platformunda Genetik Algoritma, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu ve Guguk Kuşu Algoritması kullanılarak yürütülmüştür. Operasyonel strateji kapsamında ölü bant, şarj durumu ayar noktası ve deşarj derinliği gibi parametrelerin sistem performansı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. BEDS'in optimizasyon probleminde, batarya ömrünü uzatmayı ve yıllık ekonomik getiriyi artırmayı hedefleyen iki ayrı amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Bulgular, çoklu hizmet sunan batarya enerji depolama sistemlerinde ekonomik kazanç, batarya ömrü ve işletme riskleri arasında dengeli bir planlamanın gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Bilim Kodu : 92809
Anahtar Kelimeler : Batarya enerji depolama sistemi, primer frekans kontrolü, dengesizlik maliyeti, rüzgar enerji santrali, kapasite azalması
Sayfa Adedi : 128
Danışman : Prof. Dr. Fatih Emre BORAN

MODELING AND TECHNICAL-ECONOMIC ANALYSIS OF PRIMARY FREQUENCY CONTROL AND IMBALANCE MANAGEMENT IN BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS

(Ph. D. Thesis)

Ümit ŞENOL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2026

ABSTRACT

The increasing share of renewable energy sources in electricity generation today presents significant challenges to system operation in terms of production uncertainty and frequency control. Battery Energy Storage Systems (BESS) offer an effective solution in this context thanks to their high response speed and ability to provide bidirectional power flow. In this regard, the effective use of BESS in Primary Frequency Control (PFC) services plays a strategic role in terms of both grid stability and market efficiency. This study aims to maximize the economic performance of the system and minimize operational risks by developing control strategies to increase the operational efficiency of BESS. Two different operating scenarios are considered within the scope of the thesis. In the first scenario, the case where BESS participates only in PFC service is examined; in the second scenario, the structure where BESS is used in addition to PFC service to mitigate wind power plant imbalances is analyzed. For this purpose, a charge/discharge control algorithm that optimizes the PFC performance of BESS has been developed using real frequency data from the Turkish electricity transmission system and has been designed to take into account the technical limitations, cycle life, and aging dynamics of the battery. System modeling was performed in the MATLAB/Simulink environment, and optimization processes were carried out in the MATLAB/m-file platform using Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization, and Cuckoo Search Algorithm. Within the operational strategy, the effects of parameters such as deadband, state-of-charge setpoint, and depth of discharge on system performance were analyzed in detail. In the BESS optimization problem, two separate objective functions were defined aiming to extend battery life and increase annual economic return. The findings highlight the necessity of balanced planning among economic gain, battery life, and operational risks in multi-service battery energy storage systems.

Science Code : 92809
Key Words : Battery energy storage system, primary frequency control, unbalance cost, wind power plant, capacity reduction
Page Number : 128
Supervisor : Prof. Dr. Fatih Emre BORAN

TEŞEKKÜR

Tez çalışma dönemim boyunca bilgi birikimi, tecrübeleri ve yönlendirmeleriyle akademik gelişimime önemli katkılar sunan; çalışmamı dikkat ve özenle takip ederek her aşamada destek olan danışmanım Sayın Prof. Dr. Fatih Emre BORAN'a içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez çalışmalarım süresince katkılarını esirgemeyen ve tez izleme komitesinde yer alan kıymetli hocalarım Sayın Prof. Dr. Mustafa Bahadır ÖZDEMİR ve Sayın Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK'a değerli görüş ve destekleri için teşekkür ederim.

Bu uzun ve zorlu süreç boyunca her zaman yanımda olan, anlayışı ve desteğiyle bana güç veren sevgili eşim Kübra ŞENOL'a, varlıklarıyla hayatıma anlam katan çocuklarım Elif Neva ve Umut Kağan'a sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım süresince beni her zaman destekleyen, güvenen ve her konuda destek olmaya çalışan sevgili arkadaşlarım ile hayatım boyunca destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan ve her zaman desteğini hissettiğim anneme ve abilerime de sonsuz teşekkürleri sunarım.

Son olarak, bugünlere gelmemde büyük emeği olan rahmetli babam Faruk ŞENOL'a bu çalışmayı ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. BATARYA ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ 17

2.1. Batarya Kavramı 17

2.2. Bataryaların Tarihçesi 18

2.3. Batarya Türleri 21

2.3.1. Kurşun-asit bataryalar 23

2.3.2. Nikel-kadyum bataryalar (Ni-Cd) 23

2.3.3. Nikel-metal hidrit bataryalar (Ni-MH) 24

2.3.4. Lityum-iyon batarya (Li-ion) 25

2.3.5. Lityum-iyon polimer batarya (LiPo) 27

2.3.6. Lityum demir fosfat batarya (LiFePO4) 27

2.3.7. Lityum sülfür batarya (Li-S) 27

2.4. Bataryalarla İlgili Kavramlar 29

2.4.1. Gerilim değeri 29

2.4.2. Şarj kapasitesi 29

2.4.3. Enerji kapasitesi 30

2.4.4. Enerji yoğunluğu 30

Sayfa

2.4.5. Spesifik enerji ve spesifik güç 30
2.4.6. Batarya çalışma sıcaklığı 31
2.4.7. Deşarj derinliği 31
2.4.8. Batarya çevrim ömrü 31
2.5. Batarya Yönetim Sistemleri (BYS) 32
2.5.1. Batarya yönetim sisteminin görevleri 32
2.5.2. Batarya yönetim sistemi topolojileri 34
2.6. Şebekeye Bağlı Batarya Enerji Depolama Sistemlerinin Yapısı 35
3. TÜRKİYE ELEKTRİK PİYASASI 43
3.1. Türkiye Elektrik Piyasasının Tarihsel Gelişimi 43
3.2. Türkiye Elektrik Piyasasının Yapısı 44
3.3. Fiziksel Elektrik Ticareti 46
3.3.1. İkili anlaşmalar 46
3.3.2. Spot piyasalar 47
3.3.3. Gerçek zamanli piyasalar 51
4. MODELLEME VE YÖNTEM 59
4.1. Enerji Depolama Sistemleriyle Primer Frekans Kontrol Düzenlemesi 59
4.1.1. BEDS'in PFK hizmeti tedarik sürecine katılımı 59
4.1.2. BEDS'in PFK hizmeti sağlaması 60
4.1.3. Kontrol stratejisi 61
4.1.4. Döngü sayısı algoritmasi 63
4.1.5. Kapasite azalması 63
4.2. PFK Destekli Batarya Sistemlerinin Rüzgar Enerji Santrallerinde Dengesizlik Maliyeti Azaltimina Yönelik Uygulamasi 64
4.2.1. Dengesizlik algoritmasının çalışma prensibi 66
4.3. Matlab/Simulink Ortamında BEDS Modelinin Oluşturulması 71

Sayfa

4.3.1. BEDS model yapısı ve SOC yönetimi 71

4.3.2. Batarya enerji depolama sisteminin simulink tabanlı modellenmesi 74

4.4. Optimizasyon Yöntemleri 77

4.4.1. Guguk kuşu optimizasyon algoritması 78

4.4.2. Parçacık sürü optimizasyonu 81

4.4.3. Genetik algoritma 84

5. BULGULAR VE TARTIŞMA 89

5.1. Batarya Enerji Depolama Sisteminin Primer Frekans Kontrolü Amaçlı İşletimi 89

5.1.1. 2023 yılı şebeke frekansının analizi 89

5.1.2. 2023 yılı PFK-PTF-SMF fiyat analizi 91

5.1.3. PFK hizmeti kapsamında elde edilen gelirin değerlendirilmesi 91

5.1.4. PFK hizmeti kapsamında oluşan kapasite azalmasının değerlendirilmesi 101

5.2. BEDS'in PFK ve Dengesizlik Yönetimi Kapsamında Birlikte İşletimi 103

5.2.1. Rüzgar santralinin analizi ve dengesizlik miktarinin seçimi 104

5.2.2. PFK ve dengesizlik yönetimi kapsamında ekonomik değerlendirme 106

5.2.3. PFK ve dengesizlik yönetimi kapsaminda batarya kapasite azalmasinin değerlendirilmesi 111

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 115

KAYNAKLAR 119

ÖZGEÇMİŞ 127

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Pilin tarihçesi 20

Çizelge 2.2. Pil türlerinin karşılaştırılması 28

Çizelge 2.3. BYS topolojilerinin karşılaştırılması 35

Çizelge 5.1. Optimizasyonda kullanılan parametreler 93

Çizelge 5.2. Algoritma parametreleri ve değerleri 94

Çizelge 5.3. Optimizasyon algoritmalarının istatistiksel karşılaştırması 96

Çizelge 5.4. Parametre değerleri 96

Çizelge 5.5. Optimizasyon sonuçları 98

Çizelge 5.6. Optimizasyon algoritmalarının istatistiksel karşılaştırması 102

Çizelge 5.7. Parametre Değerleri 107

Çizelge 5.8. 04 Ocak 2023 tarihli sistem dengesizliği ve maliyet analiz sonuçları 107

Çizelge 5.9. RES ve BEDS+RES yapılarının ekonomik performans karşılaştırması..... 110

Çizelge 5.10. Optimizasyon algoritmalarının istatistiksel karşılaştırması 112

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Pil içerisindeki yapı; a) Pilin deşarj durumu b) Pilin şarj durumu 22

Şekil 2.2. Kurşun-asit batarya 23

Şekil 2.3. Nikel-kadyum batarya (Ni-Cd)..... 24

Şekil 2.4. Nikel-metal hidrit batarya (Ni-MH) 25

Şekil 2.5. Li-ion pil..... 26

Şekil 2.6. Lityum sülfür pil..... 28

Şekil 2.7. Batarya eşdeğer devresi 29

Şekil 2.8. Bazı pil türleri için ragone çizimi 31

Şekil 2.9. BYS görevleri 32

Şekil 2.10. Örnek batarya yönetim sistemi yapısı..... 37

Şekil 3.1. Elektrik piyasalarının yapısı 46

Şekil 3.2. Yıllık piyasa miktar dağılımı 47

Şekil 3.3. Gün öncesi piyasası yıllık piyasa eşleşme miktarları 49

Şekil 3.4. Piyasa takas fiyatının belirlenmesi 50

Şekil 3.5. Gün içi piyasası yıllık eşleşme miktarı 51

Şekil 3.6. Grafik 53: Aylık ortalama PTF - SMF grafiği 53

Şekil 3.7. Frekans kontrolü basamakları..... 55

Şekil 3.8. Primer frekans kontrol tepkisi 56

Şekil 3.9. Aylık ortalama PFK rezerv miktarı ve ağırlıklı ortalama fiyatı 57

Şekil 3.10. Aylık ortalama SFK rezerv miktarı ve ağırlıklı ortalama fiyatı 58

Şekil 4.1. PFK hizmeti sunan BEDS'in SOC aralığı..... 61

Şekil 4.2. BEDS PFK akış diyagramı..... 62

Şekil 4.3. BEDS'in dengesizlik kontrol stratejisi 68

Şekil 4.4. PFK hizmeti için geliştirilen Simulink modeli 75

Şekil 4.5. Guguk kuşu algoritması akış diyagramı 79

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.6. PSO akış şeması 84
Şekil 4.7. GA akış şeması 85
Şekil 5.1. 2023 yılı şebeke frekans profili 90
Şekil 5.2. 2023 yılı şebeke frekans değişimi (Δf) aralıkları 90
Şekil 5.3. 2023 yılı aylık ortalama PTF-SMF-PFK fiyatları 91
Şekil 5.4. BEDS çıkış gücü 99
Şekil 5.5. BEDS enerji değişimi 99
Şekil 5.6. BEDS enerji durumu 100
Şekil 5.7. BEDS SOC değişimi 100
Şekil 5.8. BEDS SOC durumu 101
Şekil 5.9. BEDS döngü sayısı 103
Şekil 5.10. RES için gerçek zamanlı üretim ve KGÜP karşılaştırması 105
Şekil 5.11. Dengesizlik miktarının dağılımı 106
Şekil 5.12. Dengesizlik maliyetlerinin karşılaştırılması 109
Şekil 5.13. BEDS+RES SOC durumu 111

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
Hz	Hertz
MW	Megawatt
MWh	Megavatsaat

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AC	Alternatif akım
AGTO	Yapay goril birlikleri optimizasyon algoritması
BEDS	Batarya enerji depolama sistemi
BYS	Batarya yönetim sistemleri
COA	Guguk Kuşu Optimizasyonu Algoritması
DB	Ölü bant
DC	Doğru akım
DGP	Dengeleme güç piyasası
DM	Dengesizlik maliyeti
DOD	Deşarj derinliği
ENTSO-E	Avrupa Elektrik İletim Sistemi İşleticileri Birliği
EPDK	Enerji Piyasası Denetleme Kurumu
EPİAŞ	Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.
EÜAŞ	Elektrik Üretim A.Ş.
GA	Genetik algoritma
GİP	Gün içi piyasası
GÖP	Gün öncesi piyasası
IEEE	Institute of electrical and electronics engineers
KGÜP	Kesinleşmemiş günlük üretim planı
KÜPST	Kesinleşmemiş üretim planı sapma tutarı

Kısaltmalar	Açıklamalar
LCC	Yaşam döngüsü maliyeti
LCOE	Seviyelendirilmiş elektrik maliyeti
LiFePO4	Lityum demir fosfat batarya
Li-ion	Lityum-iyon batarya
LiPo	Lityum-iyon polimer batarya
Li-S	Lityum sülfür batarya
MT	Mikro türbin
Ni-Cd	Nikel-kadyum bataryalar
Ni-MH	Nikel-metal hidrit bataryalar
PFK	Primer frekans kontrolü
PFR	Primer frekans regülasyonu
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
PTF	Piyasa takas fiyatı
PV	Fotovoltaik sistem
RES	Rüzgar enerji santrali
SFK	Sekonder frekans kontrolü
SMF	Sistem marjinal fiyatı
SOC	Şarj durumu
SOH	Batarya sağlığı
TEAŞ	Türkiye Elektrik Üretim ve İletim A.Ş.
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
TEK	Türkiye Elektrik Kurumu

1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji üretimi, dünya genelinde enerji sistemlerine giderek daha fazla entegre edilmekte; bu durum, daha temiz bir üretim kapasitesi oluşturmayı ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmayı amaçlamaktadır. Ancak, yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretim sistemlerine giderek daha fazla entegre edilmesi ve buna paralel olarak geleneksel senkron jeneratör temelli üretim yöntemlerinin sistemdeki payının azalması, elektrik sistemlerinin dinamik davranışları üzerinde birtakım teknik zorlukları da beraberinde getirmektedir. Bu zorlukların başında, elektrik sisteminin temel kararlılık unsurlarından biri olan kinetik enerji miktarının azalması yer almaktadır. Kinetik enerji, sistemdeki döner kütlelerin (senkron jeneratörlerin) frekans değişimlerine karşı gösterdiği atalet etkisini temsil eder ve ani üretim-tüketim dengesizliklerine karşı sistemin tepkisini yavaşlatarak kararlılığı artırır.

Yenilenebilir kaynakların çoğunlukla inverter tabanlı üretim birimleri ile sisteme bağlanması, bu doğal ataletin önemli ölçüde azalmasına neden olmaktadır. Bu durum, sistem frekansında meydana gelen dalgalanmaların daha hızlı ve ani gerçekleşmesine yol açmakta; dolayısıyla sistem güvenilirliği, operasyonel emniyet ve güç kalitesi gibi kritik performans göstergeleri olumsuz etkilenmektedir. Bu bağlamda, yüksek düzeyde işletme güvenilirliğinin sürdürülebilmesi için frekans kontrolüne yönelik yeni hizmet mekanizmalarının geliştirilmesi ve atalet ile kinetik enerji etkisini taklit edebilecek alternatif teknolojilerin araştırılması gerekmektedir.

Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payı hızla artmakta ve bu durum elektrik şebekesinin kalite standartları çerçevesinde işletilmesini her geçen gün daha karmaşık hale getirmektedir. Geleneksel elektrik sistemlerinde üretim tarafı büyük ölçüde kontrol edilebilirken, değişkenlik yalnızca talep tarafında gözlemlenmekteydi. Ancak rüzgâr ve güneş gibi doğaya bağlı yenilenebilir kaynakların sisteme entegrasyonu ile birlikte üretim tarafında da öngörülemeyen dalgalanmalar meydana gelmektedir. Rüzgâr ve güneş gibi kesintili ve değişken kaynaklardan enerji temini, enerji üretiminde dalgalanmalara neden olmaktadır [1]. Bu gelişme, sistem işletmeciliğini daha esnek, duyarlı ve çok boyutlu karar mekanizmalarına ihtiyaç duyan bir yapıya dönüştürmektedir. Son yıllarda güneş ve rüzgâr enerjisine dayalı kurulu güçte gözlenen artışın yanı sıra, yenilenebilir enerji üretiminin toplam üretim içindeki payı da dikkat çekici düzeylere ulaşmıştır.

Konvansiyonel enerji üretim kaynaklarının çevresel sürdürülebilirlik açısından taşıdığı riskler, yenilenebilir enerji teknolojilerinin teknik olarak olgunlaşması ve buna paralel olarak yatırım maliyetlerinin düşmesi, bu kaynakların şebekeye entegrasyonunu hızlandırmıştır. Yenilenebilir kaynakların artan penetrasyonu, sistemin kontrol edilebilirliğini ve kararlılığını doğrudan etkilemekte; bu durum, iletim sistemi operatörlerinin geleneksel kontrol ve işletme stratejilerini gözden geçirmelerini gerektirmektedir. Özellikle frekans ve gerilim regülasyonu gibi temel sistem hizmetlerinde yeni çözüm arayışları ön plana çıkmaktadır. Geleneksel üretim kaynaklarının sistemdeki payının azalmasıyla birlikte, frekans kontrolüne katkı sağlayacak esnek ve hızlı tepki verebilen kaynaklara olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu bağlamda, iletim şebekelerinde frekans kontrol rezervlerine olan talep, sistem güvenliğinin sürdürülebilirliği açısından kritik hale gelmiş ve gün geçtikçe daha fazla önem kazanmıştır.

Batarya Enerji Depolama Sistemleri (BEDS), elektrik arzı ile talep arasındaki zamanlama uyumsuzlukları nedeniyle modern güç sistemlerinde giderek daha önemli bir konuma gelmektedir. BEDS'lerin şebekeye sağladığı hizmetler, bir diğer deyişle kullanım senaryoları, frekans regülasyonu, gerilim desteği, sistemin toparlanması ve yenilenebilir kaynaklardan gelen üretim dalgalanmalarının dengelenmesi gibi çok çeşitli alanları kapsamaktadır [2]. Bu hizmetlerin çeşitliliği, yeni nesil enerji sistemlerinin teknik ihtiyaçlarını karşılamanın yanı sıra, enerji sektöründe ortaya çıkan yeni iş modellerine de fırsat sunmaktadır. Ancak bu durum, uygulama süreci ve sistem entegrasyonunu BEDS projelerinin hem teknik hem de ekonomik başarısı açısından temel kaygılardan biri haline getirmektedir. Bu nedenle, güç sistemlerinde batarya enerji depolama teknolojilerinin son gelişmelerini bütüncül bir yaklaşımla ele almak ve değerlendirmek büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, BEDS modern enerji sistemlerinde esneklik, güvenilirlik ve verimliliğin sağlanmasında kilit rol oynamaktadır [3, 4]. BEDS, elektrik enerjisini kimyasal formda depolayarak, ihtiyaç duyulan anda hızlı bir şekilde tekrar elektrik enerjisine dönüştürme kapasitesine sahiptir. Bu sistemler; frekans regülasyonu, voltaj kontrolü, yük dengeleme, pik talep yönetimi ve yedek enerji sağlama gibi birçok kritik uygulamada kullanılmaktadır [5]. Ayrıca, yenilenebilir enerji üretiminin yoğun olduğu bölgelerde enerji arz güvenliğini artırmak ve şebeke entegrasyonunu kolaylaştırmak adına BEDS, vazgeçilmez bir bileşen haline gelmiştir [6]. Günümüzde en yaygın kullanılan batarya teknolojisi lityum-iyon bataryalardır. Bu bataryalar, yüksek enerji ve güç yoğunluğu, uzun çevrim ömrü, düşük bakım gereksinimi ve hızlı yanıt süreleri ile öne çıkmaktadır [7].

Enerji depolama sistemleri yalnızca teknik değil, aynı zamanda ekonomik ve çevresel faydalar da sunmaktadır. Özellikle frekans regülasyonu, dengesizlik ve enerji arbitrajı yoluyla fiyat dalgalanmalarından kazanç sağlama ve karbon emisyonlarının azaltılması gibi hedeflere ulaşılmasında BEDS etkili bir araçtır [8, 9]. Avrupa Birliği başta olmak üzere birçok ülke, enerji depolama sistemlerini destekleyen teşvik ve düzenlemeleri hayata geçirmiştir [10]. Sürdürülebilir, dayanıklı ve yüksek penetrasyon seviyesine sahip yenilenebilir enerji ile karbonsuzlaştırılmış bir güç sistemi oluşturmak akıllı şebekenin hedefidir. Türkiye'de, üretim ve tüketim arasındaki dengenin korunmasında kritik bir rol oynayan primer frekans kontrolü (PFK) hizmeti kapsamında, hızlı tepki süresi ve sistem esnekliği sunan enerji depolama sistemlerinin kullanımına yönelik mevzuatsal çalışmalar devam etmektedir. Bu kapsamda, enerji depolama sistemlerinin yan hizmetlerinde entegrasyonunu düzenleyen mevzuatlar yayımlanmış, ardından teknik gereksinimleri tanımlayan tamamlayıcı düzenlemeler de kamuoyuna sunulmuştur. Bu gelişmeler, enerji altyapısının daha dayanıklı ve esnek bir yapıya kavuşması açısından önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. BEDS'in hız özelliklerini göz önünde bulundurarak ve hızlı eylem ve esnek ayarlama yöntemlerinin avantajlarını birleştirerek, onu yardımcı güç şebekesi frekans düzenlemesine uygulamak, güç şebekesi frekans düzenlemesi yeteneğini etkili bir şekilde iyileştirebilir [11].

Batarya depolama sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, bu sistemlerin enerji piyasalarında gelir elde edebilecekleri alanlara olan ilgisi artmaktadır. Bu doğrultuda, batarya sistemlerinin özellikle PFK hizmetine katılımı öne çıkmakta ve bu hizmetten ekonomik fayda sağlamak amacıyla çeşitli katılım stratejileri geliştirilmektedir. Ancak bu stratejiler oluşturulurken, batarya sistemlerinin en önemli teknik sınırlamalarından biri olan kapasite bozulması ve çevrim ömrü dikkate alınmakta; ekonomik getiri ile batarya ömrünün korunması arasında optimal bir denge sağlanması hedeflenmektedir.

Elektrik şebekelerinde frekansın dengede tutulması, sistemin kararlılığı ve işletme güvenilirliği açısından hayati öneme sahiptir. Frekans, üretim ve tüketim arasındaki anlık dengenin temel bir göstergesi olup, bu dengenin bozulması durumunda iletim sisteminin stabilitesi ciddi biçimde risk altına girebilmektedir. Bu nedenle primer frekans kontrolü, şebeke güvenliğinin sağlanmasında sistemin ilk ve en hızlı tepki mekanizması olarak kritik bir rol üstlenmektedir. PFK hizmeti, ani üretim-tüketim dengesizlikleri karşısında frekansın

nominal değere yakın tutulmasını sağlayarak, daha yavaş tepki veren sekonder ve tersiyer kontrol mekanizmalarının devreye girmesi için gerekli zaman aralığını oluşturmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik sistemlerine artan oranda entegrasyonu, senkron jeneratörlerin sistem içindeki payının azalmasına yol açmış; bu durum ise frekansın doğal olarak düzenlenmesinde önemli bir etkiye sahip olan atalet seviyesinin düşmesine neden olmuştur. Ataletin azalması, frekans sapmalarının daha hızlı ve daha büyük genlikte gerçekleşmesine yol açarak PFK hizmetlerinin önemini daha da artırmıştır. Bu bağlamda, şebeke ölçekli batarya enerji depolama sistemleri, yüksek esneklikleri ve çok kısa sürede aktif güç sağlayabilme kabiliyetleri sayesinde frekans kontrol hizmetlerinde güçlü ve etkin bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

BEDS'in PFK gibi sistem hizmetlerine etkin ve sürdürülebilir bir şekilde katılım sağlayabilmesi için hem teknik hem de ekonomik açıdan optimize edilmiş bir işletme stratejisinin tanımlanması gerekmektedir. Bu stratejinin temel hedefleri; şebeke gereksinimlerini karşılayacak performansı sağlarken bataryanın çevrim ömrünü korumak, sistemin kullanılabilirliğini sürdürülebilir kılmak ve ekonomik getiri potansiyelini maksimize etmek olarak özetlenebilir. Bu doğrultuda, batarya şarj durumu (State of Charge – SoC), ölü bant (dead band – DB), şarj durumu ayar noktası (SOC_set) ve deşarj derinliği (Depth of Discharge – DOD) gibi temel kontrol parametrelerinin uygun şekilde belirlenmesi kritik önem taşımaktadır. Söz konusu parametreler, bataryanın yaşlanma mekanizmaları ve çevrim ömrü üzerinde doğrudan etkili olup, yanlış belirlenmeleri durumunda hızlı kapasite kayıplarına ve ekonomik verimsizliğe yol açabilmektedir. Bu nedenle, enerji depolama sistemlerine yönelik çalışmalarda ekonomik getiri analizlerinin batarya yaşlanma ve döngüsel yıpranma modelleriyle birlikte ele alınması kaçınılmaz bir gereklilik hâline gelmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir paya sahip olan rüzgâr enerjisi santralleri, üretimlerinin doğası gereği kesintili ve öngörülemez bir karaktere sahiptir. Bu durum, elektrik sisteminde üretim-tüketim dengesizliklerine neden olmakta ve piyasa katılımcılarını dengesizlik bedelleri ile çeşitli ekonomik yaptırımlarla karşı karşıya bırakabilmektedir. Bu çerçevede, rüzgâr enerjisi santrallerinin batarya enerji depolama sistemleri ile entegre edilmesi, üretim dalgalanmalarının dengelenmesine olanak sağlayarak hem sistem esnekliğini artırmakta hem de piyasa kaynaklı ekonomik risklerin azaltılmasına katkı

sunmaktadır. BEDS, rüzgâr üretim profilinde meydana gelen ani değişimleri dengeleme ve şebekeye daha kararlı bir güç çıkışı sağlama potansiyeli sayesinde hibrit enerji sistemleri açısından da stratejik bir konuma sahiptir.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen araştırma ve analizlerin temel amacı, batarya enerji depolama sistemlerinin PFK hizmetlerinde etkin bir biçimde kullanılabilmesini sağlayacak işletme ve kontrol stratejilerinin geliştirilmesidir. Bu doğrultuda, şarj ve deşarj süreçlerini optimize eden bir kontrol algoritmasının tasarlanması, bataryanın teknik sınırlarının ve yaşlanma dinamiklerinin değerlendirilmesi, uluslararası uygulamaların incelenmesi ve enerji depolama sistemlerinin elektrik piyasalarında aktif bir katılımcı olarak konumlandırılmasına yönelik ihtiyaçların belirlenmesi hedeflenmiştir. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının iletim sistemine artan entegrasyonu sonucunda ortaya çıkan frekans sapmalarının sistem kararlılığı üzerindeki olumsuz etkilerini minimize edecek hızlı ve güvenilir kontrol algoritmalarının geliştirilmesi, çalışmanın temel motivasyonunu oluşturmaktadır.

Geliştirilen algoritma, batarya sistemlerinin çevrim ömrü, yaşlanma mekanizmaları, teknik sınırlamaları ve operasyonel riskleri dikkate alarak gerçekçi bir modelleme yapılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, sistem performansını doğrudan etkileyen DB, SOC_set ve DOD gibi kritik kontrol parametrelerinin optimize edilmesi yoluyla hem batarya ömrünün uzatılması hem de yıllık ekonomik getiri potansiyelinin artırılması amaçlanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşmasıyla birlikte enerji üretiminin daha dalgalı ve tahmin edilmesi güç bir yapıya bürünmesi, özellikle frekans regülasyonu gibi anlık tepki gerektiren hizmetlerde enerji depolama sistemlerini vazgeçilmez bir unsur hâline getirmiştir.

Bu çalışma, yalnızca elektrik sisteminin genel dengesine katkı sunmakla kalmamakta, aynı zamanda enerji depolama yatırımlarının ekonomik sürdürülebilirliğini destekleyen bütüncül bir yaklaşım ortaya koymaktadır. Türkiye elektrik iletim sistemine ait gerçek frekans verileri kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar, çalışmanın uygulamaya dönük yönünü güçlendirmekte ve geliştirilen modelin gerçek sistem koşullarına uyumunu göstermektedir. Batarya yaşlanması ile ekonomik performans analizlerinin birlikte ele alınması, literatürde çoğunlukla ayrı değerlendirilen iki kritik boyutun entegre edilmesi açısından çalışmanın özgünlüğünü ve önemini artırmaktadır.

Çalışmada kullanılan veriler, Türkiye'nin elektrik şebekesi ve piyasa yapısı dikkate alınarak seçilmiş ve analizler bu çerçevede gerçekleştirilmiştir. Frekans kontrolüne ilişkin elde edilen bulgular, farklı ülkelerdeki uygulamalarla karşılaştırılarak ulusal düzeyde politika ve uygulama önerileri geliştirilmiştir. Türkiye'de hâlihazırda iletim seviyesinde bağlı ve işletmede olan enerji depolama sistemlerinin sınırlı olması nedeniyle, yapılan analizler mevcut mevzuat ve literatür ile sınırlandırılmıştır. Bununla birlikte, önümüzdeki yıllarda batarya enerji depolama sistemlerinin yaygınlaşacağı öngörüsü doğrultusunda, PFK hizmetlerinin potansiyel bir gelir modeli olarak ele alınması ve rüzgâr enerjisi santrallerinin dengesizliklerinin giderilmesine yönelik çok boyutlu bir değerlendirme sunulması, çalışmanın önemli katkıları arasında yer almaktadır.

Bu kapsamda tezin giriş kısmında çalışmanın küresel ve ulusal ölçekteki gereksinimlere yanıt verme potansiyeli çerçevesinde ele alınan araştırma problemi kapsamlı biçimde tanımlanmıştır. Çalışmanın amacı, kapsamı ve özgün katkıları sistematik bir yaklaşımla ortaya konulmuş; ayrıca araştırma sürecinde dikkate alınan varsayımlar ile karşılaşılan metodolojik ve yapısal sınırlılıklar ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Devamında ise batarya enerji depolama sistemlerinin tarihçesi, yapısı ve çeşitleri anlatılmıştır. Bununla birlikte, batarya dünyadaki değişimi ve uygulamaları ele alınmıştır. Devamında ise Türkiye'nin elektrik piyasa yapısı detaylı olarak incelenmiştir. Bu bölümde, frekans kontrol yapısının bileşenleri açıklanmış, Türkiye'de uygulanan frekans kontrol blok yapısı ve piyasa yapısı hakkında bilgi verilmiştir. Tez çalışmasının dördüncü bölümünde, oluşturulan model ve optimizasyon modelleri ele alınmış olup hedef fonksiyonları anlatılmıştır. Oluşturulan kontrol stratejisinin yapısı hakkında temel bilgiler ve farklı varyasyonlar üzerindeki uygulama sonuçları analiz edilmiştir. Çalışmanın son kısmında elde edilen önemli sonuçlar ve değerlendirmeler sunulmuştur. Geliştirilen kontrol stratejileri ve modeller ile gelecekte yapılabilecek çalışmalar hakkında bilgi verilmiş, mevcut frekans kontrolünün değişen sistem yapısına uygun olarak parametre güncellemeleri için muhtemel gelecek çalışmalara değinilmiştir.

Stecca ve diğerleri, primer frekans regülasyonu (PFR) sağlayan şebekeye bağlı batarya enerji depolama sistemlerinin ömür tahminini, yalnızca elektrokimyasal batarya hücreleriyle sınırlı kalmayıp güç elektroniği bileşenlerini de kapsayacak şekilde ele almışlardır. Çalışmada, görev profiline dayalı bir yaklaşım kullanılarak lityum-iyon bataryalar, IGBT modülleri ve DC-link elektrolitik kapasitörlerin aşınma mekanizmaları modellenmiş; batarya için çevrim

ve takvim yaşlanması, güç elektroniği için ise ısıl gerilime bağlı yıpranma dikkate alınmıştır. Elde edilen ömür tahminleri, Almanya, Hollanda ve Birleşik Krallık için farklı PFR uygulama ve ödeme yapıları göz önünde bulundurularak net bugünkü değer analizine entegre edilmiştir. Sonuçlar, en hızlı bozulmanın batarya hücrelerinde gerçekleştiğini, PFR sırasında düşük güç seviyelerinde çalışılması nedeniyle güç elektroniği bileşenlerinin sınırlı ısıl zorlanmaya maruz kaldığını ve uygun şarj durumu yönetimi ile sistem ömrünün uzatılabildiğini göstermiştir. Ayrıca, üç ülke için de PFR hizmetinin ekonomik olarak uygulanabilir olduğu, ancak daha yüksek ücretlendirme mekanizmaları nedeniyle Hollanda'da elde edilen potansiyel net bugünkü değerinin diğer ülkelere kıyasla belirgin şekilde daha yüksek olduğu vurgulanmıştır [12].

Jia ve diğerleri, yeni enerji kaynaklarının (rüzgâr ve fotovoltaik) yüksek penetrasyona ulaştığı güç sistemlerinde birincil frekans düzenlemesi için ayrılması gereken yedek kapasitenin nasıl optimize edilebileceğini incelemişlerdir. Çalışmada, rüzgâr/PV ve termik üretimin birincil frekans kontrol performansları karşılaştırılarak rezerv kapasitesi, tepki hızı ve düzenleme oranının arıza sonrası frekans yörüngesini birlikte belirlediği vurgulanmış; frekans dağılımı, frekans sapması, düzenleme kapasitesi ve toparlanma süresi gibi göstergelerin birincil frekans düzenlemesine etkileri analiz edilmiştir. Ayrıca, hızlı frekans tepkisi ihtiyacını dikkate alarak, sistem frekans tepki performansı ile yeni enerji tüketim/kısıtlama gereksinimi arasında denge kuran bir rezerv yapılandırma optimizasyon yöntemi önerilmiş ve basitleştirilmiş gerçek bir güç sistemi üzerinde yapılan zaman-alanı simülasyonlarıyla, yeni enerji tarafından sağlanan uygun rezervin frekansın daha hızlı toparlanmasına katkı verdiği gösterilmiştir [13].

Marzebali ve diğerleri, bağımsız mikroşebekelerde yenilenebilir üretim ve yük değişimlerinden kaynaklanan frekans dalgalanmalarını bastırmak amacıyla, yakıt hücresi batarya tabanlı hibrit bir enerji depolama yapısı için uyarlanabilir düşüş tabanlı bir kontrol stratejisi önermişlerdir. Çalışmada, yalnızca batarya ile birincil frekans desteği sağlanmasının bataryayı sürekli ve derin şarj/deşarj çevrimlerine zorlayarak ömrünü kısalttığı vurgulanmış; bu sorunu azaltmak için yakıt hücresinin kullanım faktörü ve hidrojen akış hızı kavramlarıyla dinamik tepkisinin iyileştirilerek hızlı güç geçişlerine katkı verebilir hâle getirildiği gösterilmiştir. Önerilen kontrolör, birincil frekansı etkin biçimde desteklemek üzere güç paylaşımı gerçekleştirmekte; MATLAB/Simulink zaman-alanı benzetimleri sonucunda bu stratejinin, frekans sapmalarını daha etkili bastırırken bataryanın

çevrim yükünü azaltarak batarya ömrünü uzatmaya yönelik avantaj sağladığı raporlanmıştır [14].

Anastasiadis ve diğerleri, fotovoltaik (PV) ve mikro türbin (MT) ünitelerinin entegre edildiği bir mikro şebekede yakıt hücresi ünitelerinin ekonomik ve çevresel dağıtıma etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, yalnızca işletme maliyetine odaklanan yaklaşımların yetersiz olduğu vurgulanarak, işletme maliyeti ve CO_2 emisyonlarının eşzamanlı olarak optimize edildiği çok amaçlı bir yük dağıtım modeli geliştirilmiştir. Saatlik zaman ölçeğinde yürütülen optimizasyon problemi, meta-sezgisel Harmony Search algoritması kullanılarak çözülmüş ve Yunanistan'daki gerçek bir düşük gerilim mikroşebekesi üzerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, PV ve MT üniteleriyle birlikte çalışan yakıt hücrelerinin, mikro şebekenin yıllık işletme maliyetlerini yaklaşık %36 oranında düşürdüğünü ve aynı zamanda CO_2 emisyonlarında kayda değer bir azalma sağladığını göstermiştir. Ayrıca, mikro türbinlerin yakıt hücreleriyle ikame edilmesinin çevresel performansı daha da iyileştirdiği, yakıt hücrelerinin hem ekonomik rekabetçilik hem de düşük emisyonlu mikro şebeke yapıları açısından önemli bir rol oynadığı ortaya konmuştur [15].

Brivio ve diğerleri, yüksek yenilenebilir enerji penetrasyonuna sahip güç sistemlerinde batarya enerji depolama sistemlerinin birincil frekans kontrol rezervi ve enerji arbitrajı hizmetlerinde etkinliğini artırmayı amaçlamışlardır. Çalışmada, BEDS'in frekans regülasyonu sırasında durum doluluğu sınırlarına ulaşarak hizmet dışı kalmasını önlemek ve ekonomik getiriyi maksimize etmek amacıyla iki farklı işletme stratejisi ele alınmıştır: zamana bağlı olarak değişen değişken droop kontrolü ve piyasa fiyatlarına dayalı enerji arbitrajı. Önerilen yaklaşımda, droop katsayısı ve arbitraj set noktalarının belirlenmesi için iki ayrı bulanık mantık denetleyicisi geliştirilmiş ve 1 MW/1 MWh kapasiteli bir BEDS modeli MATLAB/Simulink ortamında, gerçek şebeke frekansı ve elektrik fiyatı verileri kullanılarak test edilmiştir. Simülasyon sonuçları, değişken droop kontrolünün BEDS'in frekans regülasyonu sürekliliğini artırdığını, enerji arbitrajının ise SOC'un geri kazanılmasına katkı sağlayarak regülasyon kayıplarını azalttığını göstermiştir. Ayrıca, her iki stratejinin birlikte kullanıldığı çoklu hizmet senaryosunda hem teknik performansın hem de ekonomik fizibilitenin iyileştirilebileceği ortaya konmuştur [16].

Mercier ve diğerleri, küçük ve izole (ataleti düşük) bir güç sisteminde frekans kontrolü/spinning reserve amacıyla kullanılan bir batarya enerji depolama sisteminin hem

optimal boyutlandırılması hem de işletiminin belirlenmesine yönelik bir yöntem önermiştir. Çalışmada, izole şebekenin yük-frekans kontrolü dinamik simülatörü üzerinde sayısal benzetimler yapılarak BEDS'in dinamik modeli test edilmiş; ayrıca ayarlanabilir SOC limitlerine dayalı yeni bir kontrol algoritması uygulanmıştır. Önerilen boyutlandırma prosedürü, BEDS'in frekans kontrol gereksinimlerini karşılamasını sağlarken aynı zamanda beklenen ekonomik kârlılığı maksimize etmeyi hedeflemekte; sonuçlar BEDS'in şebeke kararlılığını, güvenliğini ve planlama esnekliğini anlamlı biçimde artırabildiğini ve izole sistemlerde ekonomik açıdan da uygulanabilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir [17].

Oudalov ve diğerleri, birincil frekans kontrol rezervi sağlamak amacıyla kullanılan bir batarya enerji depolama sisteminin optimal boyutlandırılması ve kontrolünü ele almıştır. Çalışmada, şebeke işletme yönetmeliklerinin teknik gereksinimlerini karşılayan minimum olası BEDS kapasitesini (dolayısıyla en düşük maliyeti) belirlemek için geçmiş frekans ölçümlerine dayalı sayısal simülasyonlar kullanılmıştır. Ayrıca, BEDS'in frekans kontrol hizmeti sırasında doyuma ulaşmasını önlemek ve hizmet sürekliliğini artırmak amacıyla ayarlanabilir şarj durumu limitleri ve acil durum dirençlerini içeren yeni bir kontrol algoritması önerilmiştir. Avrupa elektrik piyasası fiyatları dikkate alınarak yapılan ekonomik analizler sonucunda, özellikle optimize edilmiş kurşun-asit BEDS çözümlerinin birincil frekans kontrolü için teknik açıdan uygulanabilir ve ekonomik olarak kârlı olabileceği gösterilmiştir [18].

Iurilli ve diğerleri, şebekeye bağlı Li-ion Batarya Enerji Depolama Sistemlerinin birincil kontrol rezervi sağlarken SOC yönetimini nasıl etkilediği teknik ve ekonomik açıdan incelenmiştir. Yazarlar, PCR hizmeti için BEDS davranışını daha gerçekçi değerlendirmek amacıyla; frekans sapması ve SoC'yi işleyip bataryaya güç set değeri üreten bir kontrolcü, basitleştirilmiş inverter modeli ve batarya modeli içeren bir simülasyon yaklaşımı geliştirmiş ve bunu Matlab/Simulink ortamında İtalya düzenleme çerçevesi ile test etmiştir. Çalışmada ampirik ve elektriksel (eşdeğer devre) batarya modelleri karşılaştırılmış; model seçiminin kayıplar ve doyum davranışı gibi çıktıları önemli ölçüde değiştirdiği gösterilmiştir. Ayrıca, hizmet sürekliliği için dead-band ile SoC toparlama, PCR kesilerek toparlama, PCR devam ederken ek güç set noktasıyla toparlama ve değişken droop gibi stratejiler denenmiş; bu stratejilerin daha fazla çevrim ve daha yüksek kullanım nedeniyle batarya ömrünü kısaltıp yatırım kârlılığını düşürebileceği sonucuna varılmıştır [19].

Arrigo ve diğerleri, yaptıkları çalışmada batarya enerji depolama sistemlerinin birincil frekans kontrolüne katkısını ve bu katkının şebeke frekansının geçici rejim davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, gerçek ölçümlere benzer frekans dalgalanmalarını elde edebilmek için Fourier Dönüşümüne (DFT) dayalı bir yöntemle sentetik ve "gerçekçi" frekans senaryoları üretilmiş; farklı BEDS kurulu gücü/kapasitesi ve regülasyon stratejileri (sabit droop ve değişken droop) altında benzetimler gerçekleştirilmiştir. Ayrıntılı dinamik modelin kullanıldığı İrlanda tüm ada iletim sistemi örneğinde yapılan analizler sonucunda, BEDS'lerin frekans dalgalanmalarını azaltarak frekans kalitesini iyileştirdiği; etkinliğin ise frekans sinyalinin değişim hızına ve BEDS'in müdahale hızına bağlı olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, değişken droop stratejisinin frekans istatistiklerini belirgin biçimde bozmadan bataryanın SoC seviyesini uç değerlere gitmekten koruyabildiği ve hizmet sürekliliğini destekleyebildiği belirtilmiş; bu etkiyi nicelleştirmek için BEDS performansını değerlendiren yeni bir indeks önerilmiştir [20].

Sandelic ve diğerleri, rüzgâr enerjisi penetrasyonunun yüksek olduğu güç sistemlerinde frekans kontrol rezervleri sağlayacak batarya enerji depolama sistemlerinin uygun boyutlandırılmasına yönelik pratik ve çok aşamalı bir yaklaşım önermişlerdir. Çalışmada üç aşamalı bir metodoloji geliştirilmiş; ilk aşamada zaman alanı simülasyonlarıyla BEDS'in dinamik tepkisi ve FCR sağlama kabiliyeti incelenmiş, ikinci aşamada kapasite azalımı üzerinden ömür ve bozulma davranışı değerlendirilmiş, üçüncü aşamada ise düzenleyici piyasa gelirleri ve maliyetler dikkate alınarak ekonomik uygulanabilirlik net bugünkü değer yaklaşımıyla analiz edilmiştir. Metodoloji, rüzgâr türbinlerinin kısıtlı çalıştırılmasıyla ortaya çıkan üretim kayıplarına alternatif olarak, BEDS'in frekans regülasyonunda etkin rol alabileceğini ve boyutun yalnızca kısa dönem performansa göre değil, uzun dönem bozulma ve ekonomik geri dönüş birlikte ele alınarak seçilmesi gerektiğini göstermiştir. Örnek uygulamada, küçük boyutlu depolama çözümlerinin frekans düzenlemesine anlamlı katkı sağlayamadığı, bazı orta ölçekli çözümlerin ise ekonomik olarak geri ödeme süresine ulaşamadan ömrünü tamamlayabildiği vurgulanmış; buna karşılık daha büyük bir BEDS seçeneğinin hem frekans performansı hem de ekonomik kriterleri sağlayarak daha uygun bir seçim olduğu sonucuna varılmıştır [21].

Patil ve diğerleri, serbestleştirilmiş elektrik piyasasında güneş PV–batarya hibrit sisteminin rüzgâr santrali ile kullanılmasıyla kâr maksimizasyonu ve dengesizlik maliyetinin azaltılması problemini incelemişlerdir. Çalışmada, rüzgâr santralinin gün öncesi piyasada

beklenen rüzgâr hızına göre verdiği üretim teklifinin gerçek rüzgâr hızından sapması durumunda ISO tarafından uygulanan ceza/ödül mekanizmasının sistem kârlılığını düşürdüğü vurgulanmıştır. Bu olumsuz etkiyi azaltmak için PV ve batarya depolama, öncelikle yerel yükü besleyip kalan gücü şebekeye aktaracak şekilde değerlendirilmiş; böylece hem dengesizlikten kaynaklı zararların düşürülmesi hem de sistem riskinin azaltılması hedeflenmiştir. Risk değerlendirmesi için risk değeri ve koşullu risk değeri kullanılmış; uygulamalar modifiye IEEE 14 ve IEEE 30 baralı test sistemlerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, yöntemin başarımı Yapay Goril Birlikleri Optimizasyon Algoritması (Artificial Gorilla Troops Optimizer Algorithm-AGTO), Yapay Arı Kolonisi Algoritması ve Sıralı Kare Programlama optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırılmış ve AGTO'nun bu tür risk azaltma probleminde ilk kez kullanıldığı belirtilmiştir [22].

Chang ve diğerleri, rüzgâr–termal üretim içeren bir güç sisteminde optimum güç akışı problemini çözmek için Evrimsel Parçacık Sürü Optimizasyonu tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir. Modelde transformatör kademe ayarları ve şönt kapasitör enjeksiyonlarının iletim kayıpları ve yakıt maliyeti üzerindeki etkisi dikkate alınmış; ayrıca rüzgâr belirsizliği nedeniyle yukarı/aşağı dönen rezerv gereksinimleri kısıtlar olarak dahil edilmiştir. Modifiye IEEE 30 bara sisteminde yapılan benzetimler, rüzgârın konumu ve kurulu gücünün bara gerilim profilini ve iletim kayıplarını belirgin biçimde etkilediğini; yüksek rüzgâr penetrasyonunda ise rezerv yetersizliği riskinin artabildiğini göstermiştir [23].

Reddy, gerçekleştirdiği çalışmada enerji depolama sistemleri içeren termal-rüzgâr-güneş hibrit güç sistemleri için optimum üretim planlama problemini ele almıştır. Çalışmada, rüzgâr hızı, güneş ışınımı ve yük talebine bağlı belirsizlikler dikkate alınarak iki aşamalı bir optimizasyon yaklaşımı önerilmiştir. Gün öncesi üretim planlaması genetik algoritma kullanılarak gerçekleştirilirken, gerçek zamanlı işletme koşullarındaki belirsizliklerin etkisi iki noktalı tahmin yöntemine dayalı olasılıksal optimal güç akışı ile modellenmiştir. Önerilen yöntemin etkinliği, IEEE 30 ve IEEE 300 bara test sistemleri üzerinde yapılan benzetim çalışmalarıyla doğrulanmış; sonuçlar Monte Carlo simülasyonu ve iç nokta yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, enerji depolama entegrasyonu ile birlikte geliştirilen bu yaklaşımın, gün öncesi üretim maliyetinde sınırlı bir artışa karşılık gerçek zamanlı ayarlama maliyetlerinde önemli bir azalma sağladığını ve sistemin toplam işletme maliyetini düşürdüğünü göstermiştir [24].

Kusakana'nın çalışmasında batarya depolama birimi içeren PV–rüzgâr–dizel hibrit güç sistemi için gün içi optimum zamanlanmış güç akışı problemi ele alınmış ve amaç, kesintili güneş/rüzgâr üretimi, batarya şarj durumu ve değişken yük talebi altında sistemin işletme maliyetinin minimize edilmesi olarak tanımlanmıştır. Modellemede yük profilinin doğrusal olmayan karakteri, dizel jeneratörün yakıt tüketim fonksiyonundaki doğrusal olmayanlık ve bataryanın şarj/deşarj sınırları dikkate alınarak kısıtlı bir optimizasyon çerçevesi oluşturulmuştur. Çözüm aşamasında iki farklı kontrol yaklaşımı karşılaştırılmıştır: birinci yaklaşımda dizel jeneratör gücü zaman adımlarında sürekli bir karar değişkeni olarak ele alınmış ve problem doğrusal olmayan sürekli optimizasyon kapsamında çözülmüştür; ikinci yaklaşımda ise dizel jeneratörün devreye girme/çıkma kararı ayrık bir değişken olarak modellenmiş ve bu nedenle karma tamsayılı optimizasyon tabanlı bir çözüm uygulanmıştır. Yöntemler yaz ve kış koşullarını temsil eden iki farklı senaryo üzerinde test edilmiş, hibrit sistemin yalnız dizel jeneratörle besleme durumuna göre yakıt tüketimini ve işletme maliyetini belirgin biçimde düşürdüğü; ayrıca dizel jeneratörün çalışma süresini azaltarak daha verimli bir işletim sağladığı sonucuna ulaşılmıştır [25].

Eroğlu ve Kurtuluş, çalışmalarında rüzgâr enerji santrallerine entegre edilen batarya enerji depolama sistemlerinin teknik ve ekonomik etkilerini strateji temelli bir yaklaşımla incelemiştir. Gerçek işletme verilerine dayalı olarak 70 MW kapasiteli bir rüzgâr santrali için farklı işletme senaryoları geliştirilmiş; tepe tıraşlama, zaman kaydırmalı enerji aktarımı ve dengesizlik maliyetlerinin azaltılmasına yönelik çoklu operasyon stratejileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Çalışmada batarya kapasitesi 5–70 MW aralığında değerlendirilerek, farklı stratejiler altında sistemin gelir yapısı ve dengesizlik maliyetleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, batarya entegrasyonu sayesinde dengesizlik maliyetlerinde %15–40 oranında azalma sağlanabildiğini ve toplam gelirde yaklaşık %8–10'luk bir artış elde edildiğini göstermektedir. Bazı stratejiler altında sistemin net kârlılığa ulaştığı ve batarya kapasitesinin doğru seçiminin ekonomik performans üzerinde belirleyici olduğu ortaya konulmuştur. Bu çalışma, rüzgâr–batarya hibrit sistemlerinde operasyon stratejileri ile kapasite optimizasyonu arasındaki ilişkiyi nicel olarak ortaya koyarak, yenilenebilir enerji yatırımlarında batarya kullanımının ekonomik sürdürülebilirliğine yönelik önemli çıkarımlar sunmaktadır [26].

Jung ve arkadaşları rüzgâr türbinleri, güneş fotovoltaik panelleri ve lityum iyon bataryalardan oluşan hibrit şebekeden bağımsız bir enerji sisteminin kapasite

optimizasyonunu ele almıştır. Çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili yapısı dikkate alınarak sistemin hem ekonomik hem de güvenilir biçimde işletilebilmesi amaçlanmış; lityum iyon bataryalar için kapasite azalması ve hücre sıcaklığı değişimleri modele dâhil edilmiştir. Optimizasyon aşamasında, karar değişkenleri olarak karasal rüzgâr, açık deniz rüzgârı, güneş PV ve batarya kapasite değerleri seçilmiş; amaç fonksiyonu yaşam döngüsü maliyetini minimize edecek şekilde kurgulanırken kısıtlar elektrik talebinin karşılanması ve batarya SOC sınırlarının korunması üzerine kurulmuştur. Güney Kore'deki Jeju Adası için gerçekleştirilen vaka çalışmasında karasal rüzgâr, açık deniz rüzgârı ve güneş fotovoltaik enerjisinin kapasite faktörleri belirlenmiş, sistem bileşenlerinin optimum kapasiteleri yaşam döngüsü maliyeti (LCC) ve seviyelendirilmiş elektrik maliyeti (LCOE) esas alınarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, batarya kapasite azalmasının özellikle batarya boyutunu önemli ölçüde etkilediğini ancak toplam LCC ve LCOE değerlerinde sınırlı değişime yol açtığını göstermiştir. Ayrıca hücre sıcaklığına bağlı güvenlik riskleri analiz edilerek termal kaçışı önleyici soğutma koşulları önerilmiş; farklı yenilenebilir enerji penetrasyonları, elektrikli araç oranları ve yaz aylarındaki talep azalması için yapılan duyarlılık analizleriyle sistem tasarımının bu parametrelere olan hassasiyeti ortaya konulmuştur [27].

Aghamohammadi ve Abdolahinia, yapmış oldukları çalışmada adalı mikroşebekelerde birincil frekans kontrolü için batarya enerji depolama sisteminin optimum boyutlandırılmasına yönelik yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Çalışmada mikroşebeke; mikro türbin, dizel jeneratör, yakıt hücresi ve fotovoltaik sistemler içeren düşük ataletli bir yapı olarak modellenmiş ve frekans kontrolünde hızlı dinamik tepkiye sahip BEDS'in rolü incelenmiştir. Önerilen yöntemde, BEDS'in kısa süreli aşırı yüklenebilme kapasitesi frekans düzenlemesi amacıyla kullanılmış, bataryanın izin verilen aşırı yük süresi ve şarj durumu sınırları dikkate alınarak bir kontrol şeması geliştirilmiştir. Bu yaklaşımla, frekans sapması anında güç dengesizliğinin hızlı bir şekilde giderilmesi hedeflenmiş ve BEDS'in nominal gücünün, sistemde oluşabilecek maksimum güç uyumsuzluğuna bağlı olarak optimize edilmesi sağlanmıştır. PSCAD/EMTDC ortamında gerçekleştirilen benzetim sonuçları, aşırı yükleme özelliğinin kullanılması sayesinde daha küçük kapasiteli bir BEDS ile etkin frekans kontrolünün mümkün olduğunu ve frekans düzenlemesi sırasında bataryanın SOC değişiminin oldukça sınırlı kaldığını göstermiştir [28].

Datta ve diğerleri, rüzgâr enerjisi penetrasyonunun arttığı güç sistemlerinde birincil frekans kontrolünün sağlanmasında büyük ölçekli batarya enerji depolama sistemlerinin etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, artan rüzgâr penetrasyonu nedeniyle sistem ataletinin azalmasının frekans ve güç salınımlarını artırdığı gösterilmiş ve bu olumsuz etkinin BEDS kullanımıyla azaltılabileceği ortaya konmuştur. BEDS, DC/AC dönüştürücü yapısıyla modellenmiş ve frekans sapmalarına karşı hızlı aktif güç desteği sağlayacak şekilde droop tabanlı bir kontrol yapısıyla çalıştırılmıştır. DigSILENT/PowerFactory ortamında gerçekleştirilen benzetimlerde tek faz-toprak arızası, hat kesintisi ve ani yük artışı gibi farklı bozucu durumlar ele alınmış; BEDS'in frekans salınımlarını azalttığı, yerleşme süresini kısalttığı ve rüzgâr enerjisi penetrasyon seviyesinin artırılmasına olanak sağladığı gösterilmiştir. Çalışmada ayrıca, frekans kontrolü için yüksek güç–düşük enerji kapasiteli BEDS kullanımının sistem performansı açısından uygun olduğu vurgulanmış ve sistem kararlılığını sağlayacak şekilde BEDS kapasitesinin belirlenmesi optimizasyon problemi kapsamında değerlendirilmiştir [29].

Fleer ve Stenzel, çalışmalarında birincil frekans kontrolü sağlamak amacıyla kullanılan sabit batarya enerji depolama sistemlerinde farklı işletme stratejilerinin sistem performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Alman birincil kontrol rezervi piyasası çerçevesinde geliştirilen simülasyon modelinde, bataryanın şarj seviyesi yönetimi için aşırı karşılama, ölü bant kullanımı ve programlı enerji işlemleri gibi farklı stratejiler değerlendirilmiş; bu stratejilerin bataryanın enerji çevrimi, tam çevrim eşdeğeri ve şarj dağılımları üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. 2 MWh kapasiteli bir BEDS için gerçekleştirilen benzetim sonuçları, şarj seviyesi yönetiminde kullanılan strateji ve parametrelerin programlı enerji işlemleri yoluyla gerçekleşen enerji alışverişini önemli ölçüde etkilediğini, buna karşın toplam enerji çevrimi ve batarya çevrim sayısının ağırlıklı olarak sistem tasarımına bağlı olduğunu göstermiştir. Çalışmada elde edilen bulguların birincil frekans kontrolü uygulamalarında BEDS işletiminin optimize edilmesine ve batarya yaşlanma etkilerinin değerlendirilmesine katkı sağladığı vurgulanmıştır [30].

Johnston ve diğerleri, rüzgâr santrallerinin birincil frekans kontrolüne katılımını artırmak amacıyla, santral ile entegre edilecek bir enerji depolama sisteminin gücünü ve enerji kapasitesini ekonomik açıdan optimum olacak şekilde belirleyen bir yöntem önermiştir. Çalışmada, farklı depolama teknolojileri ve farklı piyasa koşullarına uyarlanabilecek esnek bir çerçeve hedeflenmiş; bu amaçla doğrusal programlama tabanlı bir optimizasyon

problemi kurulup çözülmüştür. Yöntem, Birleşik Krallık piyasası özelinde 50 MW'lık bir rüzgâr santralinin Vanadyum Redoks Akış Bataryası ile desteklenmesi senaryosuna uygulanmış; normal elektrik piyasası gelirleri ile frekans yanıtı piyasası gelirleri birlikte ele alınarak ESS'in türbinleri "gereksiz derating" yapmadan, frekans yanıtı için gerekli güç rezervini sağlaması ve santralin mümkün olduğunca mevcut maksimum rüzgâr enerjisine yakın üretim yapabilmesi amaçlanmıştır. Optimizasyon sonuçları, belirli varsayımlar altında WPP işletmecisi için EDS entegrasyonunun ekonomik olarak anlamlı olabileceğini ve bu hizmeti sağlarken gelirleri maksimize edecek şekilde yaklaşık 5.3 MW güç ve 3 MWh enerji kapasiteli bir EDS'in yeterli olabileceğini göstermiştir [31].

2. BATARYA ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

2.1. Batarya Kavramı

Batarya sistemleri, temel işlevleri bakımından kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen elektrokimyasal aygıtlardır. Bu dönüşüm süreci, bataryanın "deşarj" adı verilen kullanım safhasında gerçekleşmektedir. Buna karşılık, "şarj" modunda ise dış bir enerji kaynağından sağlanan elektrik enerjisi, batarya içerisindeki kimyasal yapıya geri kazandırılmaktadır. Bu iki yönlü enerji dönüşümünü sağlayan yapıların temelini ise hücreler oluşturmaktadır. Bu hücreler, belirli bir gerilim ve akım kapasitesi üretmekle birlikte, uygulamanın ihtiyaçlarına göre farklı şekillerde birbirine bağlanmaktadırlar. Daha yüksek voltaj gerektiğinde hücreler seri bağlanırken, daha fazla akım gerektiren durumlarda paralel bağlantı tercih edilmektedir. Böylece bataryanın toplam güç çıktısı ve enerji kapasitesi ayarlanabilir hâle gelmektedir. Bir bataryanın performansı yalnızca anlık güç sağlamasıyla değil, aynı zamanda uzun vadeli dayanıklılığıyla da değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, bataryaların teknik özelliklerini tanımlarken güç (W) ve enerji (Wh) kapasitesi en temel ölçütlerdir. Ancak bu teknik parametrelerin ötesinde, kullanım ömrü, verimlilik düzeyi, termal davranışları, kendi kendine deşarj oranı, deşarj derinliği ve enerji yoğunluğu gibi birçok faktör bataryanın sistem performansına olan etkisini belirgin biçimde ortaya koymaktadır. Özellikle yaşam döngüsü (cycle life) olarak adlandırılan kullanım süresi, bataryanın kaç kez şarj-deşarj döngüsüne dayanabildiğini göstermektedir ve bu değer batarya teknolojilerinin ekonomik sürdürülebilirliği açısından kritik bir göstergedir. Örneğin, lityum-iyon bataryalar yüksek enerji yoğunlukları ve uzun çevrim ömürleri nedeniyle pek çok uygulamada tercih edilirken, kurşun-asit bataryalar daha düşük maliyet avantajları nedeniyle kısa vadeli çözümlerde kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak, batarya sistemlerinin verimliliği de büyük önem taşımaktadır. Verimlilik, sisteme verilen enerji ile geri elde edilen enerji arasındaki orana işaret etmektedir ve özellikle yenilenebilir enerji sistemleriyle entegre uygulamalarda enerji kayıplarının minimize edilmesi açısından kritik bir faktördür. Çalışma sıcaklığı ise bataryaların kimyasal reaksiyon hızlarını ve güvenliğini etkileyen bir diğer önemli parametredir. Aşırı soğuk veya sıcak ortamlarda bataryaların performansı önemli ölçüde düşebilir ya da güvenlik riski oluşabilmektedir. Ayrıca, bataryaların bir süre kullanılmadan bırakıldıklarında kendiliğinden enerji kaybına uğraması (self-discharge) durumu da özellikle uzun süreli enerji depolama gerektiren sistemlerde göz önünde bulundurulmalıdır [5]. Batarya sistemlerinin tasarımı, seçimi ve uygulanması,

yalnızca enerji miktarına değil, aynı zamanda çok sayıda teknik ve çevresel parametrenin ayrıntılı bir biçimde değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bu çok boyutlu yapı, batarya teknolojilerinin günümüz enerji sistemlerindeki kritik rolünü açıkça ortaya koymaktadır.

2.2. Bataryaların Tarihçesi

Elektrik enerjisinin depolanabilir ve taşınabilir bir forma büründürülmesi, çağdaş teknolojik sistemlerin temel yapı taşlarından biri hâline gelmiştir. Günümüzde "pil" ya da "batarya" adı verilen bu güç kaynakları, yalnızca modern elektronik cihazlarda değil, aynı zamanda ulaşım, sağlık, savunma ve haberleşme gibi pek çok kritik alanda da vazgeçilmez bir rol oynamaktadır. Ancak bu sistemlerin tarihi gelişimi, sanıldığı gibi yalnızca son birkaç yüzyıla değil, çok daha eski zamanlara kadar uzanabilecek bir geçmişe sahiptir. Nitekim bazı tarihçiler ve araştırmacılar, Antik Mısır dönemine ait piramitlerin iç yüzeylerinde yer alan duvar kabartmalarında, elektriksel fenomenlere işaret eden simgesel figürlerin bulunduğunu öne sürmüşlerdir. Her ne kadar bu iddialar kesin bilimsel kanıtlarla desteklenmemiş olsa da, söz konusu duvar resimlerinin erken dönem elektriksel bilgi birikimini yansıttığı yönündeki yorumlar dikkat çekicidir. Tarihsel bağlamda ise ilk somut pil örneği olarak kabul edilen yapı, "Bağdat pili" adı verilen ve Mezopotamya topraklarında gün yüzüne çıkarılmış olan ilginç bir arkeolojik buluntudur. Arkeolojik kazılarla elde edilen verilere göre bu aygıtın yaklaşık olarak 2000 yıl öncesine, yani milattan önceki yüzyıllara dayandığı belirlenmiştir. Bağdat pilleri, iç içe yerleştirilmiş metal silindirler ve bu silindirlerin içine konulmuş sıvı elektrolit benzeri maddelerden oluşmakta olup, elektrik üretebilme potansiyeline sahip bir düzeneğe işaret etmektedir. Bu yönüyle, henüz modern elektrik kuramlarının ve teknolojilerinin ortaya çıkmadığı bir çağda, bu denli gelişmiş bir elektrokimyasal düzenek tasarımının varlığı bilim dünyası için hâlâ tartışma konusu olmayı sürdürmektedir. Kul'un (2020) aktardığına göre, söz konusu pillerin işlevine dair net bir görüş birliği olmasa da bazı araştırmacılar bu yapıların dini ritüellerde veya metal yüzeylerin kaplanması gibi işlemlerde kullanılabilecek bir tür enerji kaynağı olduğunu ileri sürmektedir [32].

Elektrik biliminin gelişiminde dönüm noktası olarak kabul edilen deneysel çalışmaların başlangıç noktası, 18. Yüzyılın son çeyreğinde İtalyan bilim insanı Luigi Galvani tarafından gerçekleştirilen sıra dışı gözlemlere dayanmaktadır [33]. Galvani, laboratuvar ortamında kurbağalar üzerinde yaptığı deneyler sırasında, metal cisimlerin temas ettiği kurbağa bacaklarında ani kasılmalar meydana geldiğini fark etmiş ve bu olguyu canlı organizmaların

kendi içinde barındırdığı bir tür elektriksel akışkanla açıklamıştır. “Hayvansal elektrik” olarak adlandırdığı bu kuram, dönemin bilim çevrelerinde büyük ilgi uyandırmış, elektrik enerjisinin doğası ve kaynaklarına ilişkin yeni bir bakış açısının doğmasına neden olmuştur [33, 34]. Ancak Galvani'nin bu açıklaması, başka bir İtalyan bilim insanı olan Alessandro Volta tarafından farklı bir biçimde yorumlanmıştır. Volta, bu fenomenin aslında canlı dokulardan değil, deneyde kullanılan farklı metallerin bir araya gelmesinden ve bu metaller arasında oluşan kimyasal etkileşimden kaynaklandığını ileri sürmüştür. Böylece Galvani “hayvansal elektrik” kavramına karşılık olarak “metalik elektrik” terimini ortaya koymuştur. Bu görüş ayrılığı, elektriğin kaynağına ilişkin bilimsel tartışmaları derinleştirirken, aynı zamanda Volta’nın elektrik üretimi konusundaki deneysel çalışmalarına ivme kazandırmıştır. Volta, 1795 yılında gerçekleştirdiği deneylerle, birbirinden farklı iki metalin –örneğin çinko ve bakır– aralarına sıvı bir iletken madde veya nemli bir bez yerleştirildiğinde, bu sistemin elektrik akımı üretme potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir [33, 34]. Bu bulgu, daha sonra bugünkü batarya sistemlerinin atası sayılabilecek bir aygıtın tasarımına zemin hazırlamıştır. Nitekim Volta, 1799 yılında ilk işlevsel elektrik kaynağını, yani modern anlamda ilk pili, başarıyla inşa etmiştir. Bu sistemde, çinko ve bakır plakalar, aralarına tuzlu su ile nemlendirilmiş mukavva disklerin yerleştirilmesiyle üst üste dizilmiştir. Her bir tabaka, küçük bir elektrik potansiyeli üretecek şekilde yapılandırılmış ve bu tabakaların seri bağlanmasıyla anlamlı bir gerilim elde edilmiştir [32-34].

1836 yılında Frederic Daniel tarafından, sonraki yüzyılda telefon, telgraf ve kapı zili gibi nesnelerde kullanılacak iki bölümden oluşan bu pil icat edilmiştir. Geliştirilen bu pilin bölmelerinden birinde çinko çubuk ve çinko sülfat eriyiği, diğerinde bakır çubuk ve bakır sülfat eriyiği bulunmaktadır [33].

1839 yılında William Robert Grove, pillerde bulunan su elektrolizi üzerindeki çalışmalarıyla ilk yakıt pilini ortaya çıkarmıştır [33, 34]. Bunun devamında 1859 yılında Gaston Planté ilk şarj edilebilir kurşun asit bataryayı icat etmiştir [33]. 1868 yılında Georges Leclanché taşınabilir el feneri, radyo gibi cihazlarda kullanılacak ağır kuru pilleri icat etmiştir [33]. İlk çinko karbon pil aküsü 1881 yılında Faure ve arkadaşları tarafından, ilk şarj edilebilir nikel kadmiyum pil Waldmar Junner tarafından 1899 yılında icat edilmiştir [32, 33, 35].

En yüksek elektrokimyasal potansiyele sahip ve en verimli pil olan Li-ion piller tarihine baktığımızda, ilk olarak 1912 yılında Gilbert Newton Lewis tarafından ortaya çıkarılmış,

ancak 1970'lerde uygulanabilir hale gelmiştir [6, 33]. Şarj edilebilir pil için 1900'lü yıllarda çeşitli çalışmalar yapılmış ve 1990 yılında Sony şirketi tarafından güvenlik problemleri çözülerek şarj edilebilir Li-ion piller satışa çıkarılmıştır [36]. Çizelge 2.1'de pillerin tarihsel gelişimi görülmektedir.

Çizelge 2.1. Pilin tarihçesi [33, 34]

1600	Gilbert (İngiltere)	Elektrokimya biliminin temelleri atıldı
1791	Galvani (İtalya)	"Hayvansal elektrik" bulundu
1800	Volta (İtalya)	Volta hücresini buldu
1802	Cruikshank (İngiltere)	Seri üretilebilen ilk pil
1820	Ampere (Fransa)	Manyetik alan ile elektrik üretimi
1833	Faraday (İngiltere)	Faraday kanunları
1836	Daniel (İngiltere)	Daniel hücresi bulundu
1839	Grove (İngiltere)	Yakıt hücresinin bulunuşu (H2/O2)
1859	Plante (Fransa)	Kurşun/Asit pilin bulunuşu
1868	Leclanche (Fransa)	Leclanche hücresinin bulunuşu
1888	Gassner (ABD)	Kuru pilin evriminin tamamlanması
1899	Jungner (İsveç)	Nikel-Kadmiyum pilin bulunuşu
1901	Edison (ABD)	Nikel-Demir pilin bulunuşu
1932	Schlecht ve Ackermann (Almanya)	Sinterlenmiş (külçelenmiş) kutup'un bulunuşu
1947	Neumann (Fransa)	Nikel-Kadmiyum pilin sızdırmaz hale getirildi
1960'lar	Union Carbide (ABD)	Alkalin pil geliştirildi
1970'ler	Gates Energy Products (ABD)	Valf kontrollü Kurşun/Asit pil geliştirildi
1990	Panasonic / Matsushita (Japonya)	Ni-MH piller piyasaya çıktı
1991	Sony (Japonya)	Li-ion piller piyasaya çıktı

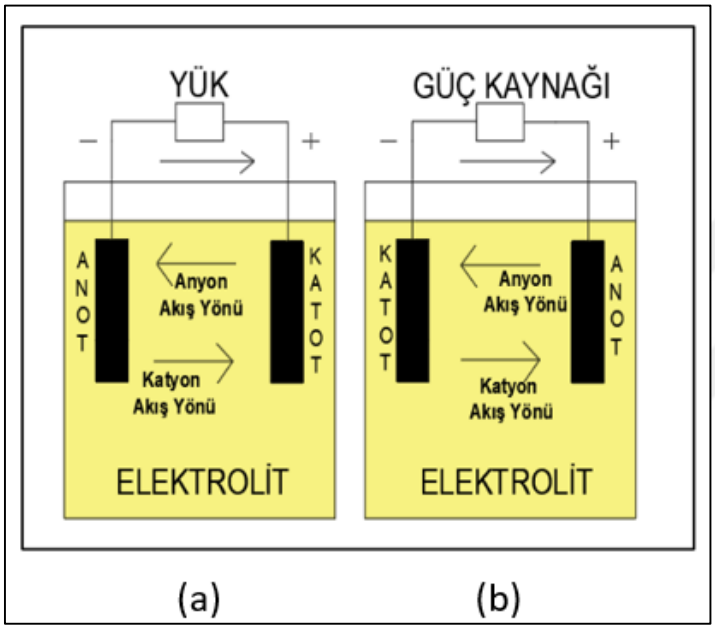
Elektrik enerjisinin kimyasal yollarla üretimi ve depolanması söz konusu olduğunda, bu sürecin temelini oluşturan yapı taşları "elektrik hücreleri"dir. Elektrik hücresi, genel hatlarıyla bir elektrolit çözeltisi içerisine yerleştirilmiş iki farklı türden elektrottan- yani bir pozitif (katot) ve bir negatif (anot) uçtan- oluşan elektrokimyasal bir düzendir. Bu sistemin işleyiş mantığı, elektrotlar ile elektrolit arasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlara dayanmaktadır. Elektrotlar ile elektrolit arasındaki etkileşimler sonucu ortaya çıkan iyon hareketleri, hücre dış devresine bir elektrik akımı gönderilmesine imkân tanımaktadır. Bu akım, hücreden dışarıya doğru aktığında "deşarj", tersine çevrildiğinde ise "şarj" süreci

gerçekleşmiş olmaktadır. Özellikle şarj edilebilir, yani yeniden kullanılabilir, batarya türlerinde, bu kimyasal tepkimeler çift yönlü olarak işlev göstermektedir. Hücreye dışarıdan uygulanan bir elektrik akımı sayesinde, deşarj sırasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonların ters yönlü gerçekleşmesi sağlanarak, hücre içerisinde biriken enerji kimyasal forma geri dönüştürülmektedir. Bu sayede hücre, daha sonra yeniden kullanılmak üzere enerji depolamış olmaktadır. Şarj edilemeyen birincil hücrelerin aksine, bu tür ikincil hücreler defalarca şarj edilip kullanılabilme avantajına sahiptir. Bireysel olarak sınırlı bir enerji kapasitesine sahip olan bu hücrelerin daha geniş ölçekli enerji ihtiyacını karşılaması için, belirli düzenlemelerle bir araya getirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, birden fazla elektrik hücresinin seri ya da paralel biçimde birleştirilmesiyle oluşturulan sistemlere "batarya" adı verilmektedir. Seri bağlama işlemi voltaj değerini artırırken, paralel bağlama akım kapasitesini yükseltmektedir. Böylece enerji sistemlerinin ihtiyacına göre özelleştirilmiş batarya yapıları elde edilebilmektedir [37].

2.3. Batarya Türleri

Pillerin temel işleyiş mekanizması, elektrokimyasal reaksiyonlar aracılığıyla kimyasal enerjinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesine dayanmaktadır. Bu dönüşüm süreci, biri pozitif (katot), diğeri negatif (anot) olmak üzere iki ayrı elektrotun iyon iletimine elverişli bir elektrolit ortamı içerisine yerleştirilmesiyle başlatılmaktadır. Söz konusu sistemde elektrik üretimi, elektrotlar arasında gerçekleşen redoks reaksiyonları sayesinde mümkün hâle gelmektedir. Daha açık bir ifadeyle, anot görevi gören metal elektrot, elektrolit ortamında elektron kaybederek oksitlenir; bu esnada katot olarak işlev gören metal oksit yapısı ise bu elektronları alarak indirgenmektedir. Elektronların bu yönlü hareketi dış devrede bir elektrik akımının oluşmasına neden olmaktadır. Anot elektrot, elektrokimyasal sürecin bir sonucu olarak elektroliz sıvısı içinde zamanla çözünmeye uğrar ve bu çözünme esnasında ortama elektron vermektedir. Öte yandan, katot elektrot ise bu elektronları çekerek, genellikle bir iyonik değişim reaksiyonu ile elektriksel yük aktarımını sağlamaktadır. Böylelikle iki elektrot arasında kurulan potansiyel farkı üzerinden bir elektrik devresi tamamlanmış olmaktadır. Bu redoks tepkimelerinin kontrollü bir biçimde gerçekleştirilmesi, pilin enerji üretim kapasitesini ve verimliliğini doğrudan etkileyen bir unsurdur. Pil teknolojilerinin gelişimi süresince, hem anot ve katot elektrotların malzeme bileşenleri hem de bu elektrotların yer aldığı elektrolit ortamları üzerinde çok sayıda araştırma ve deneysel çalışma yürütülmüştür. Malzeme biliminin ilerlemesiyle birlikte farklı

metaller, yarı metaller ve iletken sıvılar üzerinde yapılan bu araştırmalar, pil teknolojilerinin kapasite, ömür, güvenlik ve enerji yoğunluğu açısından daha işlevsel hâle gelmesini sağlamıştır. Dolayısıyla tarihsel süreç boyunca yapılan deneyler, pilin temel işleyiş mantığını korumakla birlikte, bu sistemi oluşturan bileşenlerin kimyasal özelliklerini çeşitlendirerek daha gelişmiş ve yüksek performanslı batarya sistemlerinin ortaya çıkmasına olanak tanımıştır [38]. Şekil 2.1'de bu elektrokimyasal süreçlerin şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.1. Pil içerisindeki yapı; a) Pilin deşarj durumu b) Pilin şarj durumu

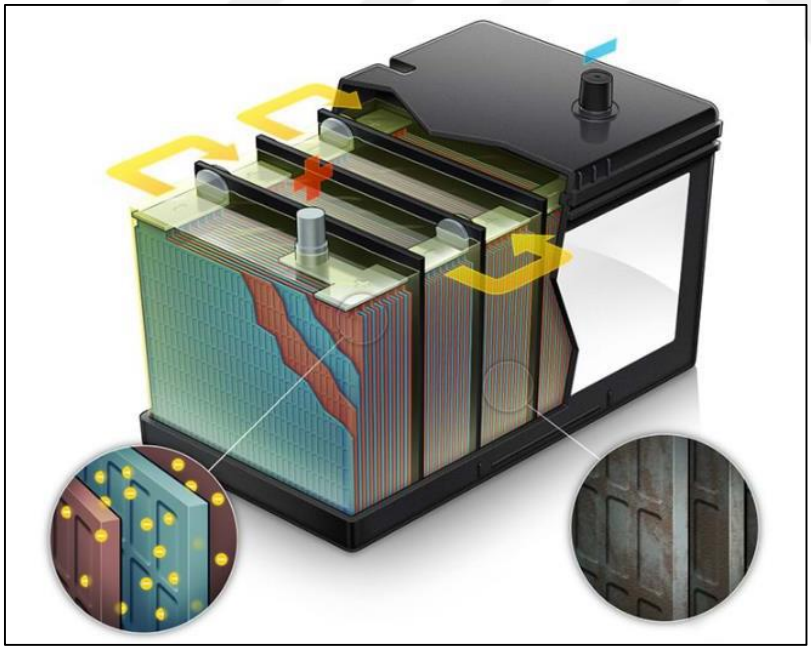
Pillerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan pil gruplarına batarya denmektedir. Bataryalar içerisinde depolanmış olan kimyasal enerjiyi istenildiğinde elektrik enerjisine dönüştürerek daha çok mobil sistemlerin enerji ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılmaktadır. Bataryalar şarj edilebilme durumuna göre birinci ve ikinci tip olmak üzere iki kısma ayrılır. Birincil tip bataryalar şarj edilemez nitelikte olup tek kullanımlıktır. İkincil bataryalar ise defalarca şarj-deşarj döngüsüne sahip bataryalardır [33].

Birincil tip bataryalar, genellikle akım tüketimi düşük olan ve kullanım sıklığı az olan sistemlerde tercih edilen batarya türleridir. Enerji yoğunlukları yüksek olmasına rağmen güç yoğunluğu düşük olan bu tip bataryalara alkali piller örnek olarak gösterilebilir.

İkincil tip bataryalar, güç tüketiminin yüksek ve toplam enerji ihtiyacının fazla olduğu sistemlerde tercih edilirler. Birçok tipte üretilmiş olan bu batarya tipi elektrikli araçlarda kullanılan batarya tipleridir. Kullanılan elektrot ve elektrolit çeşidine göre geliştirilmiş batarya tiplerinden bazıları hakkında aşağıda bilgi verilmektedir.

2.3.1. Kurşun-asit bataryalar

Enerji yoğunluğu ve çevrim ömrü çok düşük olan kurşun-asit bataryalar en eski batarya çeşitlerinden biridir. Elektrik üretmek için kurşun elektrotları ve asit kullanıldığından, kurşun asit batarya ismini almıştır. Kurşun-asit bataryalar olgunlaşmış bir teknoloji olduğundan, maliyet açısından oldukça avantajlıdır. Günümüzde araç elektrik sistemleri ve kesintisiz enerji kaynakları kurşun asit bataryaların yaygın olarak kullanıldığı alanlardan olmakla birlikte, düşük maliyetlerinden dolayı elektrikli scooter, forklift, golf arabası gibi araçlar için hâlen tercih edilmektedir [39]. Şekil 2.2'de bir kurşun asit batarya örneği görülmektedir [33].

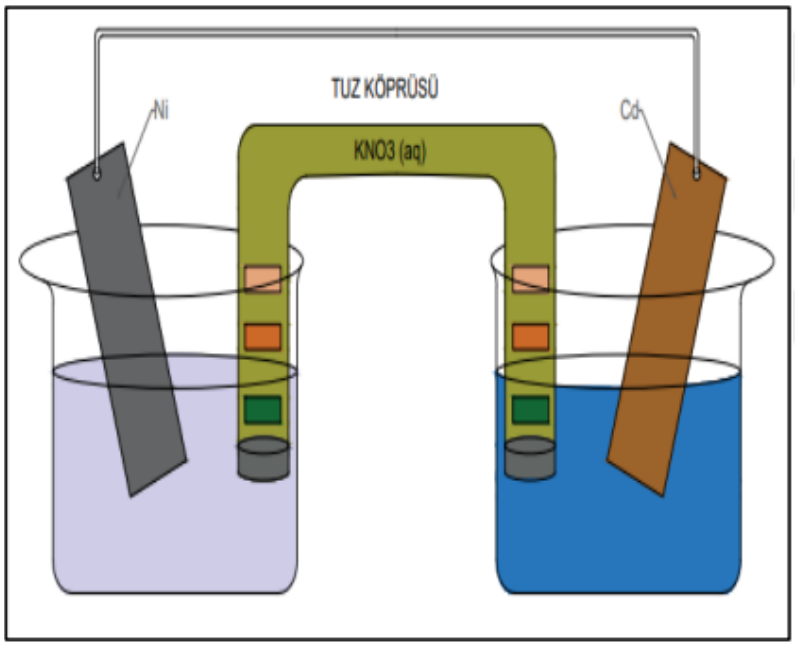


Şekil 2.2. Kurşun-asit batarya [33]

2.3.2. Nikel-kadyum bataryalar (Ni-Cd)

Kadyum ve nikel bileşiklerinden oluşan plakalar ve potasyum hidroksit kullanılarak oluşturulan batarya tipleridir. Maliyet bakımından uygun olması ve emniyetli olması

sebebiyle taşınabilir elektrikli el aletlerinde sıklıkla kullanılan bir batarya tipidir. Yüksek akımlarda sorunsuz şarj edilebilmeleri, çalışma esnasında ısı üretiminin az olması gibi avantajlarının yanında içeriğindeki kadyum ağır metalinin getirmiş olduğu çevresel sakıncalar, soğuk havalarda performansının düşmesi, kendi kendine deşarj olması ve hafıza etkisi gibi dezavantajları bulunmaktadır. Nikel-kadyum bataryalar yüksek güvenilirliğe, uzun çalışma ömrüne, daha hızlı şarj veya deşarj gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu batarya içerisinde kullanılan kadyum ağır metalinin vermiş olduğu çevresel zararlar düşünülerek, nikel metal hidrit bataryalar geliştirilmiş ve nikel-kadyum bataryaların kullanımı azalmıştır. Nikel-Kadyum batarya örneği Şekil 2.3'te görülmektedir [38].

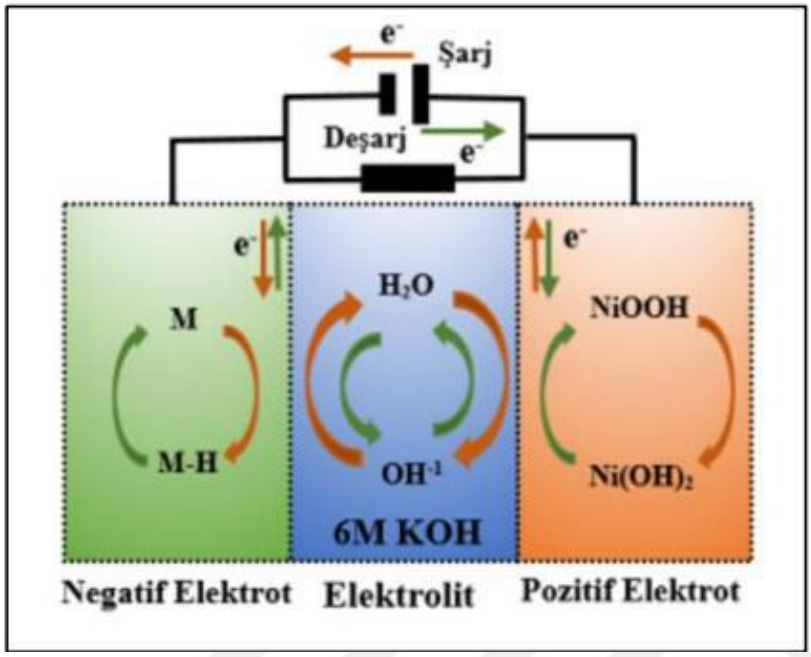


Şekil 2.3. Nikel-kadyum batarya (Ni-Cd)

2.3.3. Nikel-metal hidrit bataryalar (Ni-MH)

Nikel metal hidrit bataryalar nikel içeren bataryaların ana türü olarak görülmektedir. Nikel-Kadyum bataryalardaki kadyum yerine metal hidrit getirilerek oluşturulan bu batarya tipinin, çevre dostu olup ağır metal içermemesi, daha yüksek enerji yoğunluğunun olması, güvenlik açısından uygunluğu, uzun çevrim ömrü ve maliyetinin düşük olması avantajları kullanışlı ve tercih edilen bir enerji kaynağı olmasını sağlamıştır. Bu batarya tipinde anotta metal hidrür, katotta Ni (OH)2 bulunmakta ve elektrolit olarak potasyum çözeltisi kullanılmaktadır. Kendi kendine deşarj olma, hafıza etkisi ve daha uzun şarj olma süresi bu batarya tipinin dezavantajlarındandır [39]. Lityum-iyon batarya teknolojisinden önce, düşük

maliyetli ve olgunlaşmış bir teknoloji olması sebebiyle elektrikli araç sektöründe tercih sebebi olmuştur. Nikel-Metal hidrit bataryaların çalışma prensibi Şekil 2.4'te görülmektedir [38].



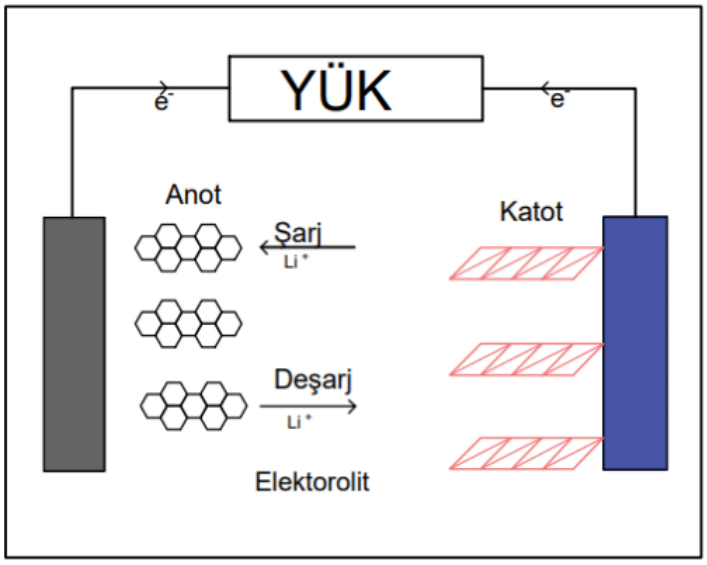
Şekil 2.4. Nikel-metal hidrit batarya (Ni-MH)

2.3.4. Lityum-iyon batarya (Li-ion)

Günümüzde modern enerji depolama sistemleri arasında yaygın olarak kullanılan ve performans açısından öne çıkan batarya türlerinden biri lityum iyon (Li-ion) bataryadır. Bu bataryalar, temel olarak lityum iyonlarının şarj ve deşarj işlemleri sırasında elektrotlar arasında hareket etmesi prensibine dayanmaktadır. Enerji depolama ve iletim süreci, hücre içerisinde iki elektrot arasında gerçekleşen iyon transferi ile sağlanmaktadır. Şarj işlemi sırasında, lityum iyonları pozitif elektrottan (katottan) ayrılarak elektrolit aracılığıyla negatif elektrota (anota) doğru göç etmektedir. Tersine, batarya deşarj edildiğinde, lityum iyonları bu kez anot bölgesinden katoda doğru hareket eder ve bu iyon akışı, dış devrede elektrik akımının oluşmasına neden olmaktadır [40]. Bu çift yönlü iyon hareketliliği, Li-ion bataryaların hem enerji depolama hem de tekrar kullanılabilirlik açısından son derece verimli çalışmasını sağlamaktadır.

Lityum iyon bataryaların tarihsel gelişimi, teknolojik açıdan önemli bir dönüm noktası olarak kabul edilmektedir. İlk kez 1991 yılında Sony firması tarafından ticari olarak piyasaya

sunulan bu bataryalar, kısa sürede taşınabilir elektronik cihazların vazgeçilmez enerji kaynağı hâline gelmiştir [33, 36]. Günümüzde başta cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, tabletler ve el aletleri olmak üzere birçok kompakt sistemin enerji ihtiyacı Li-ion bataryalarla karşılanmaktadır [33]. Bunun temel nedenlerinden biri, bu batarya teknolojisinin sağladığı sayısız avantajdır. Özellikle yüksek enerji yoğunluğu sayesinde küçük hacimlerde büyük miktarda enerji depolanabilmesi, taşınabilirlik açısından büyük kolaylık sağlamaktadır [36, 41]. Bunun yanı sıra, yüksek güç yoğunluğu, uzun çevrim ömrü (cycle life), düşük kendi kendine deşarj oranı ve hızlı şarj-deşarj kabiliyeti gibi teknik üstünlükleri, Li-ion bataryaların diğer batarya teknolojilerine kıyasla daha yaygın şekilde benimsenmesini sağlamıştır [36]. Bu avantajlarının yanı sıra, lityum iyon bataryaların bazı sınırlayıcı yönleri de bulunmaktadır. Özellikle aşırı şarj, kısa devre ya da yüksek sıcaklık gibi durumlarda termal kaçak riski taşıması ve buna bağlı olarak patlama ya da yangın tehlikesi oluşturabilmesi, güvenlik açısından dikkat edilmesi gereken başlıca hususlardan biridir [41]. Ayrıca, belirli bir kapasiteye ulaşmasının ardından enerji tutma performansında azalma yaşanması da bu bataryaların kullanım ömrünü sınırlayan bir diğer faktördür [33, 41]. Bu nedenle, batarya yönetim sistemleri (BMS) kullanılarak bu risklerin minimize edilmesi yaygın bir uygulamadır [41]. Sonuç olarak, lityum iyon bataryalar hem enerji yoğunluğu hem de kullanım kolaylığı açısından günümüz teknolojisinin vazgeçilmez enerji depolama çözümleri arasında yer almaktadır [33, 36] Bu sistemlerin temel çalışma mantığını yansıtan şematik gösterim Şekil 2.5'te sunulmuştur [36, 38].



Şekil 2.5. Li-ion pil

2.3.5. Lityum-iyon polimer batarya (LiPo)

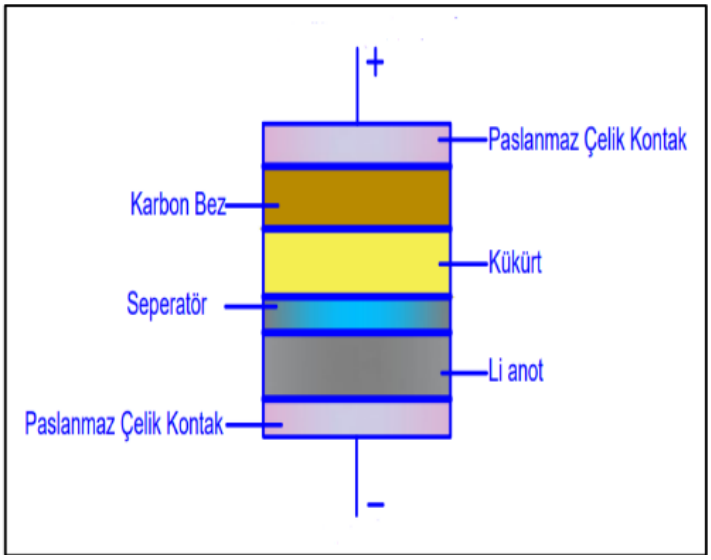
Pozitif ve negatif elektrot malzemeleri olarak Li-ion bataryalarla benzerlik gösterirken, bu batarya tipinde elektrolit olarak polimer malzeme yer almaktadır. Kendi kendine deşarj oranının az olması bu batarya tipinin öne çıkaran özelliklerindendir. Polimer elektrolit kullanımı sayesinde batarya üretim hızı ve çeşitli şekillerde üretim esnekliği sağlanmıştır [42].

2.3.6. Lityum demir fosfat batarya (LiFePO4)

Lityum Demir Fosfat bataryalar yüksek güç yoğunluğu, yüksek güvenlik ve yüksek çevrim oranı olan batarya türüdür. Li-ion bataryalarla kıyaslandığında daha düşük enerji yoğunluğuna, yani kapasiteye sahip olması dezavantaj olarak görülmektedir [39].

2.3.7. Lityum sülfür batarya (Li-S)

Lityum sülfür bataryalarda anotta lityum, katotta ise sülfür toz halinde bulunur. Lityum ve sülfür arasında çok aşamalı indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonları sayesinde enerji üretimi meydana gelir. Şekil 2.6'da bu durum görülmektedir. Lityum sülfür bataryaların lityum iyon bataryalardan daha yüksek enerji potansiyeline sahip olması, daha hafif olması, ani ısı değişimlerine daha dayanıklı olması bu bataryaları ön plana çıkarmaktadır. Ayrıca lityum sülfür bataryalar hiçbir bakım gerektirmemekle birlikte yüksek depolama kapasitelerine ve uzun raf ömrüne sahiptirler. Sülfür elementinin doğada rahatlıkla bulunması sebebiyle maliyetleri uygundur. Bütün bunların yanında, sınırlı çevrim ömürleri, düşük şarj verimi, yüksek kendi kendine deşarj oranı ve güvenlik açısından zayıf olması dezavantajları arasında görülmektedir [38].



Şekil 2.6. Lityum sülfür pil

Li-ion batarya teknolojisinde pek çok çalışma yapılmış ve bu çalışmalar doğrultusunda Li-ion bataryalar kendi içerisinde alt türlere ayrılmıştır. Bu batarya türlerinin ve diğer pil türlerinin karşılaştırması Çizelge 2.2'de görülmektedir.

Çizelge 2.2. Pil türlerinin karşılaştırılması [33, 39]

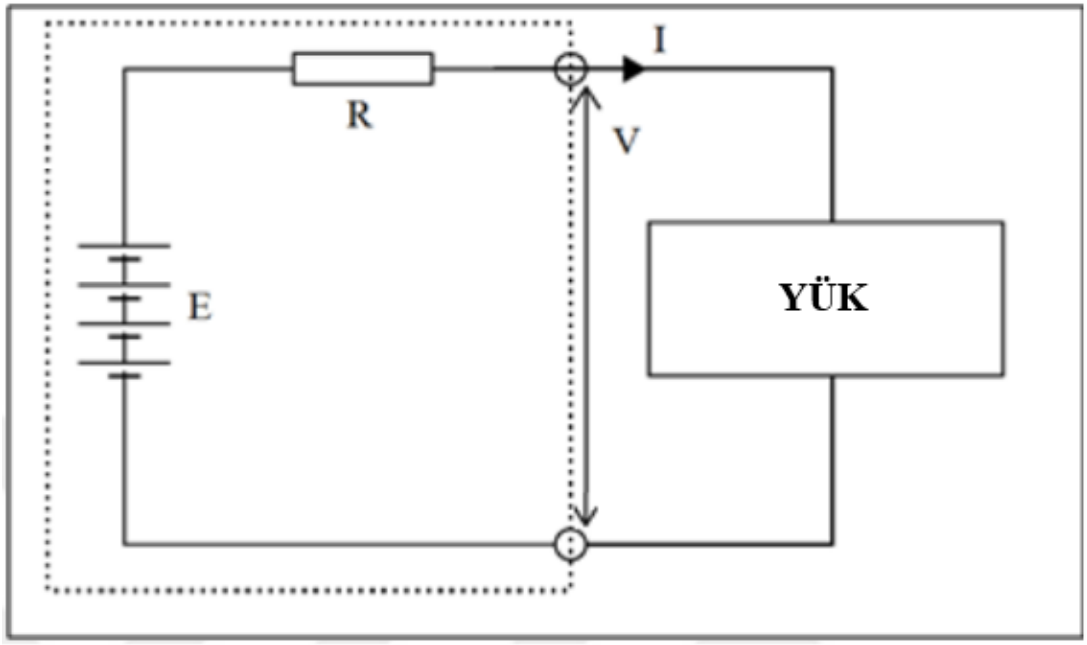
Kısaltma	İsim	Nominal Hücre Gerilimi (V)	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Çevrim Sayısı	Maliyet
Pb-acid	Lead acid	2,0	35	1 000	Düşük
Ni-Cd	Nickel cadmium	1,2	50-80	2 000	Düşük
Ni-MH	Nickel-metal hydride	1,2	70-95	<3 000	Düşük
ZEBRA	Zebra	2,6	90-120	>1 200	Düşük
Zn-air	Zinc-air	1,65	460	200	Düşük
LCO	Lithium cobalt oxide	3,7-3,9	150	500-1 000	Orta
NCA	Lithium nickel cobalt aluminium oxide	3,65	130	500	Orta
NMC	Lithium nickel, manganese cobalt oxide	3,8-4,0	170	1 000-2 000	Orta
LMO	Lithium manganese spinel	4	120	300-700	Orta
LFP	Lithium iron phosphate	3,3	130	1 000-2 000	Yüksek
LTO	Lithium titanate	2,3-2,5	85	3 000-7 000	Yüksek
Li-S	Lithium-sulfur	2,5	350-650	300	Düşük
Li-air	Lithium-air	2,9	1 300-2 000	100	Belirsiz

2.4. Bataryalarla İlgili Kavramlar

Bataryalar konusunda kullanılan kavramlar şunlardır; gerilim değeri, şarj kapasitesi, enerji kapasitesi, enerji yoğunluğu, spesifik enerji ve spesifik güç, batarya çalışma sıcaklığı, deşarj derinliği, batarya çevrim sayısı. Bu kavramlar sırasıyla bundan sonraki kısımlarda incelenmektedir.

2.4.1. Gerilim değeri

Genel olarak elektrik hücreleri nominal bir gerilim değerine sahiptir. Batarya üretimi yapılırken istenilen batarya gerilimini elde etmek için batarya hücreleri seri olarak bağlanır.



Şekil 2.7. Batarya eşdeğer devresi

Bataryanın eşdeğer devresi Şekil 2.7’deki gibi ifade edilmektedir.

2.4.2. Şarj kapasitesi

Bataryaların ne kadar süreyle ne kadar miktarda akım vereceğini ifade eden önemli parametrelerden biridir. 40 Ah bir batarya paketi için 1 saat boyunca 40 A akım veya 4 saat boyunca 10 A akım sağlayacak kapasitede olduğu düşünülür. Pratikte bu değerler arasında çeşitli faktörlerden kaynaklı değişimler meydana gelebilir.

Bataryalarda şarj ve deşarj akımları belirli oranlarda birbirinden farklı olabilmektedir. 40 Ah şarj kapasiteli bir batarya için dolum kapasitesi değeri deşarj için 2C, şarj için 0,8C şeklinde ifade edildiğinde 80 A deşarj akımı, 32 A de şarj akımı kullanılması gerektiği anlaşılmaktadır [43].

2.4.3. Enerji kapasitesi

Bataryaların enerji kapasitesi, batarya gerilimi ve şarj kapasitesinin çarpılmasıyla elde edilmekte olup birimi Wh'dir. Örneğin, 12 V bir bataryanın şarj kapasitesi 100 Ah ise, enerji kapasitesi bu ikisinin çarpımı olan 1200 Wh'dir [37].

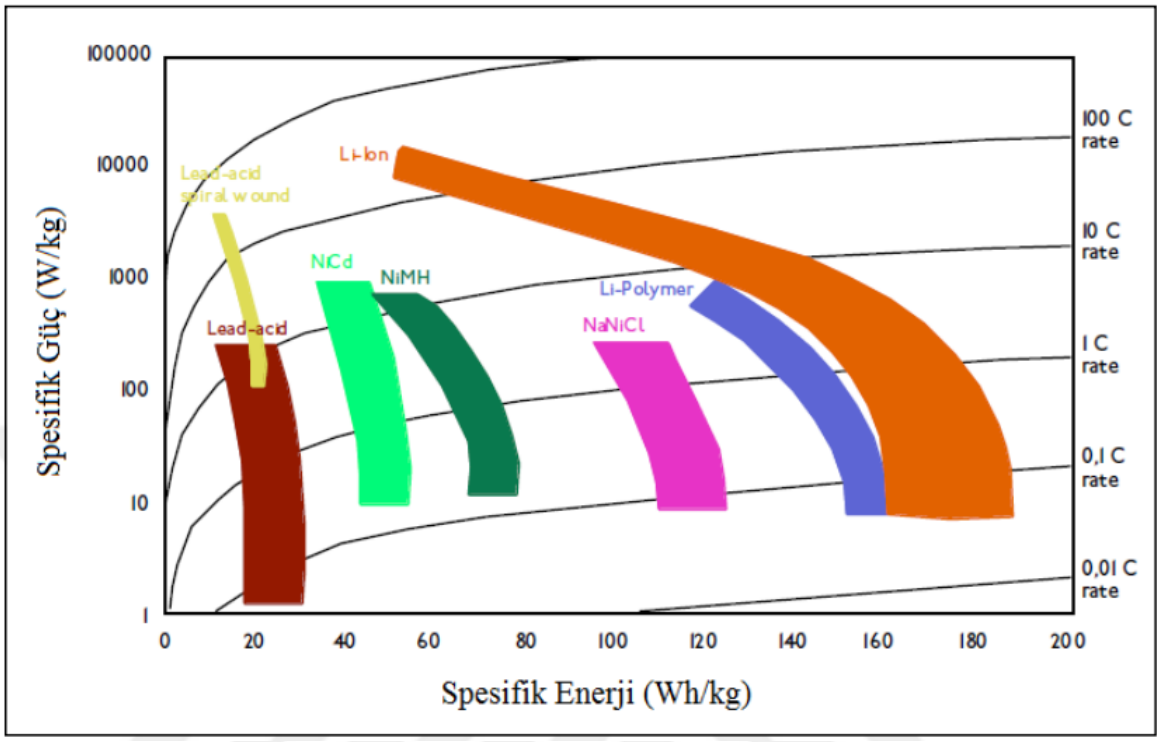
2.4.4. Enerji yoğunluğu

Bir pilin birim hacim başına depolayabileceği elektrik enerjisi miktarına enerji yoğunluğu denilmektedir. Birim hacim başına düşen enerji yoğunluğu W/L veya W/m³ birimi ile ifade edilmektedir. Az yer kaplaması ve hafif olması, bunun yanında yüksek enerji sunması, pillerde istenen bir durum olduğu için enerji yoğunluğu piller için önemli bir kavramdır [43].

2.4.5. Spesifik enerji ve spesifik güç

Bataryaların kullanımında önemli parametrelerden olan spesifik enerji, pilde depolanan enerjinin pil kütlesine bölünmesiyle elde edilip birimi Wh.kg-1 ile ifade edilirken, spesifik güç ise pilin gücünün ağırlığına bölümü ile elde edilip birimi W.kg-1 şeklinde ifade edilmektedir. Bataryaların yüksek akımla, yani maksimum güç ile çalışmaları verimli olmayıp, çekilen yüksek akım kısa sürede batarya enerjisini azaltacaktır. Bu yüzden bataryanın kullanımına göre spesifik enerji ile spesifik güç arasındaki dengeyi kurmak gerekir. Spesifik gücü yüksek olan bataryalar anlık olarak yüksek güç talebini karşılayabilirken, spesifik enerjisi yüksek bataryalar ise uzun süreli enerji talebinin karşılanmasında etkili olabilmektedir [37].

Spesifik güç ve spesifik enerji arasındaki bağlantıyı göstermek için Ragone çizimi denilen yöntem kullanılmaktadır. Şekil 2.8'de bazı batarya türlerinin Ragone çizimi verilmiştir [33, 34, 44, 45].



Şekil 2.8. Bazı pil türleri için ragone çizimi

2.4.6. Batarya çalışma sıcaklığı

Bataryaların türlerine göre farklı çalışma sıcaklıkları vardır. Yüksek verim elde etmek için bataryaların çalışma sıcaklıklarında çalıştırılması gerekir. Bu noktada batarya paketinin soğutulması veya duruma göre ısıtılması gerekebilmektedir.

2.4.7. Deşarj derinliği

Batarya paketinin %100 doluluk oranından %0 doluluk oranına kadar deşarj olması için meydana gelen deşarj oranına deşarj derinliği denilmektedir [43].

2.4.8. Batarya çevrim ömrü

Bataryalar şarj ve deşarj edildikleri sürece kimyasal ve fiziksel deformasyonlara uğrarlar. Piller normal Ah kapasitelerinin %80'ine kadar, yani verimli olarak çalışabilecekleri aralığa kadar belli bir şarj-deşarj döngüsüne sahiptirler. Bu deşarj döngüsü sayısı o pilin çevrim ömrüne eşittir.

2.5. Batarya Yönetim Sistemleri (BYS)

Çeşitli türdeki pil hücrelerinden meydana gelen bataryaların enerji sağlayıcı olarak kullanıldığı yerlerde BYS oldukça önemli bir bileşen olarak karşımıza çıkmaktadır. Hücrelerin yanı sıra birçok ek bileşenin de olduğu batarya paketinin güvenli ve istenilen şekilde çalışmasını sağlamak için elektronik sistemlerden ve gömülü yazılımlardan oluşan bir yapıya ihtiyaç duyulmaktadır. Bütün bu ihtiyaçları karşılamak için geliştirilen donanıma ve yazılıma sahip sisteme BYS denilmektedir.

2.5.1. Batarya yönetim sisteminin görevleri

Kullanılan alana ve bataryanın yapısına göre BYS'nin görevleri değişmekte olup genel itibarıyla bu görevler beş ana başlıkta toplanabilir. Şekil 2.9'da bu beş ana başlık ve bu başlıklar altında bulunan alt başlıklar görülmektedir [44].



Şekil 2.9. BYS görevleri

Batarya izleme

BYS'nin ana görevlerinden birisi batarya izlemedir. BYS tarafından gerilim, akım, sıcaklık, anahtarlama elemanlarının konumları gibi birçok detay sürekli olarak izlenmektedir. Ölçüm

yaptığı değerlerden en önemlilerinden biri de hücre gerilim değerleridir. Hücre gerilimleri, bataryanın güvenli ve verimli çalışması için oldukça önemli olup çalışma aralığının dışına çıkmamalıdır. En çok tercih edilen batarya türlerinden olan Li-ion bataryalarda çalışma sıcaklığının kontrol altında olması güvenlik açısından önemli olup çalışma sıcaklığı mümkünse her hücreden ölçüm alınarak veya batarya paketine homojen şekilde dağıtılmış sensörler yardımıyla sürekli kontrol altında tutulmalıdır.

Bataryayı koruma

BYS bataryada meydana gelen anormal durumlarda batarya paketi ile bağlı olduğu sistem arasındaki enerji akışını durduracak şekilde devreyi açar.

Şarj/deşarj yönetimi

Bataryanın şarj ve deşarj sırasında ilgili parametreleri kontrol ederek optimum verimle çalışmasını sağlar. Şarj esnasında batarya doluluk oranına göre şarj akımını regüle eder. Deşarj sırasında sisteme bataryadan anlık olarak çekilebilecek akımı bildirir. Batarya hücreleri arasında oluşan gerilim dengesizliklerini tespit edip çeşitli dengeleme yöntemleri ile bütün hücrelerin eşit gerilime gelmesini sağlar.

Teşhis ve kestirim

BYS, çeşitli sensörler yardımıyla batarya paketinden almış olduğu bütün verileri değerlendirerek batarya hakkında çeşitli bilgileri kullanıcıya sunmaktadır. Batarya doluluk oranı (State of Charge-SOC), batarya sağlığı (State of Health-SOH) bu bilgilerden bazılarıdır [44].

Veri yönetme

BYS, kullanıldığı elektronik yapı içerisinde bulunan diğer kontrol birimleri ile çeşitli protokoller kullanarak sürekli olarak haberleşen bir sistemdir. Batarya ile ilgili çeşitli bilgileri diğer sistemlerle veya dışarıdan bağlanan kullanıcı ile paylaşabilmeli ve dışarıdan veya diğer birimlerden gelen komutları alarak sağlıklı bir şekilde uygulayabilmelidir [44].

2.5.2. Batarya yönetim sistemi topolojileri

Batarya yönetim sistemleri 4 ana topolojide kategorize edilmektedir [44].

Merkezi topoloji

Tek bir elektronik kart üzerinden BYS'nin bütün görevlerinin gerçekleştirildiği modeldir. Merkezi topolojide, hücre terminallerinin bağlantıları, ölçümler, sensör bağlantıları gibi her şey tek bir kart üzerine bağlanır.

Merkezi topolojide tümleşik bir yapı olduğu için maliyet düşük, arızalara müdahale kolay olmaktadır. Ancak batarya paketindeki hücre sayısı arttıkça sistemin yönetimi yavaşlayarak karmaşık bir hal alacağı için yüksek hücre sayısına sahip bataryalarda bu yöntem tercih edilmemektedir [44].

Modüler topoloji

Aynı elektronik yapıya sahip birden fazla modülden oluşan BYS kartlarının olduğu sistemdir. BYS modülleri arasında haberleşme sağlanacak şekilde iş yükü eşit olarak kartlara paylaştırılmaktadır. Bu yöntemin merkezi topolojiye göre maliyeti biraz daha yüksektir.

Ana-uydu topoloji

Bu topolojide haberleşme, güvenlik, ölçüm değerlerinin toplanıp işlenmesi gibi ana görevleri yerine getiren bir kart ve hücrelerden gerilim değerlerinin, sıcaklıkların ve buna benzer bilgilerin ölçümlerinin yapıldığı yardımcı kartlar bulunmaktadır. Bu yöntem modüler topolojiye birçok yönden benzese de maliyet açısından daha avantajlıdır. Otomotiv sektöründeki BYS'lerde genellikle bu yöntem tercih edilmektedir [44].

Dağınık topoloji

Dağınık topoloji ana-uydu topolojisine benzeyen bir yapıya sahiptir. Ana işlemlerin gerçekleştirildiği tek bir kart ve yardımcı kartlardan oluşmaktadır. Dağınık topolojinin ana-uydu topolojisinden farkı, her hücre için bir uydu kartının bulundurulmasıdır. Her hücre için bir kart olması, ölçüm kabloları olmadığı için elektromanyetik gürültüden daha az

etkilenmesini ve daha sade bir bağlantı ile arızaların önüne geçilmesini sağlamaktadır. Dağınık topolojide kullanılan elektronik kart miktarı artacağı için maliyet diğer yöntemlere göre daha da artacaktır.

BYS topolojilerinin avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.3'te görülmektedir. Tabloda gösterilen artılar, ilgili topolojinin o alanda daha avantajlı olduğunu anlatmaktadır.

Çizelge 2.3. BYS topolojilerinin karşılaştırılması [44]

Topoloji	Ölçüm Kalitesi	Esneklik	Güvenlik	Elektronik Donanım Maliyeti	Kurulum Maliyeti	Bakım Maliyeti
Merkezi	++	+	+	+	+++	+++
Modüler	++	++	+	++	++	++
Ana-Uydu	+++	++	+	++	++	++
Dağınık	+++	+++	+++	+++	+	+

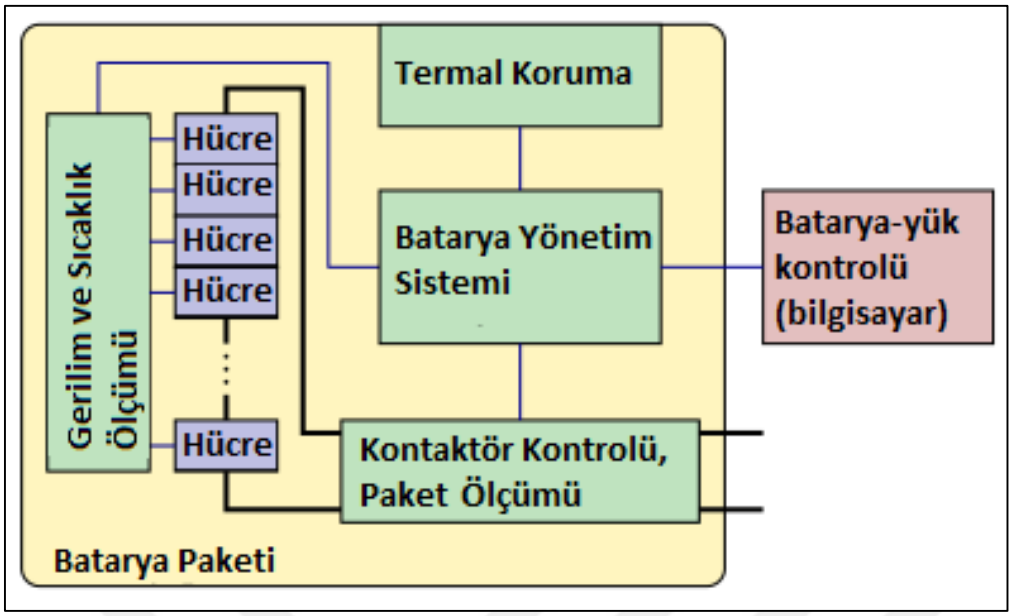
2.6. Şebekeye Bağlı Batarya Enerji Depolama Sistemlerinin Yapısı

Batarya enerji depolama sistemleri, elektrik enerjisinin daha esnek, güvenli ve verimli bir şekilde yönetilmesini sağlayan stratejik altyapılar arasında yer almaktadır. Özellikle modern güç şebekelerinde üretim, iletim ve dağıtım sistemleriyle entegre bir biçimde çalışan bu yapılar, enerji arz-talep dengesinin sağlanması açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Güç şebekeleri, üretim santrallerinden başlayan ve çok kademeli transformatörlerle desteklenen iletim hatları aracılığıyla dağıtım sistemlerine bağlanmakta; bu yapıya entegre edilen batarya sistemleri, şebekedeki dalgalanmalara karşı etkili bir dengeleme işlevi görmektedir. Batarya sistemleri, uygulama gereksinimlerine göre doğru akım (DA) şebekelerine doğrudan bağlanabilmekte ya da alternatif akım (AA) sistemlerine güç dönüştürücüler vasıtasıyla entegre edilebilmektedir. Bu sistemlerin teknik altyapısı; bataryaların kendisine ek olarak, çift yönlü güç dönüştürücüler, iletim hatlarına uygun gerilim seviyesini sağlayan yükseltici transformatörler, harmonik filtreleme amacıyla kullanılan LC süzgeçler, enerji ve batarya yönetim sistemleri ile tüm süreçlerin koordine edildiği merkezi bir denetim mekanizmasından oluşmaktadır. Batarya yönetim sistemleri aracılığıyla hücre düzeyinde sıcaklık kontrolü, yük durumu izleme, şarj-deşarj oranları ve hücre voltajları gibi değişkenler

sürekli olarak takip edilmekte; bu sayede sistemin optimum performansla çalışması ve bataryaların kullanım ömrünün maksimize edilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca çift yönlü güç akışı yeteneği sayesinde, bataryalar hem enerji depolayabilmektedir hem de ihtiyaç anında şebekeye enerji geri aktarabilmektedir. Bu durum, yük profillerinin esnek biçimde yönetilmesine olanak tanırken, aynı zamanda ani enerji taleplerine karşı hızlı yanıt verilmesini sağlar [46].

Batarya enerji depolama sistemleri, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonunda önemli avantajlar sunmaktadır. Rüzgâr ve güneş enerjisi gibi kesintili kaynakların çıkış gücünde meydana gelen ani dalgalanmalar, BEDS'ler sayesinde dengelenebilmekte; böylece sistem kararlılığı ve frekans regülasyonu sağlanmaktadır. Ayrıca döner rezerv işlevi görebilme yetenekleri sayesinde konvansiyonel üretim sistemlerindeki yedek güç ihtiyacını azaltmakta ve toplam üretim maliyetlerinin düşürülmesine katkı sunmaktadır. Bu kapsamda yapılan analizlerde, özellikle birim enerji maliyeti yüksek olan doğal gaz santrallerinin merit-order sıralamasındaki baskısı, batarya sistemleriyle azaltılabilmekte; bu da önemli ölçüde ekonomik tasarruf sağlamaktadır [46].

Batarya yönetim sistemlerinin temel işlevi, batarya hücrelerinde depolanan enerjinin emniyetli, verimli ve uzun ömürlü şekilde kullanılmasını garanti altına almaktır. Üretici firmalar, bataryaların güvenli biçimde çalışabileceği sınır parametrelerini (sıcaklık aralığı, maksimum gerilim, izin verilen deşarj oranı vb.) önceden tanımlar. Bu sınırların dışına çıkılması hâlinde, hücrelerde geri dönüşü olmayan kimyasal bozulmalar ya da termal kaçak gibi yıkıcı olaylar meydana gelebilir. Bu nedenle, BYS yazılımları ve donanımları, bu güvenli çalışma koşullarının sürekli denetimini sağlayarak batarya sistemlerinin hem işlevselliğini hem de güvenliğini garanti altına alır. Şekil 2.10'da tipik bir batarya yönetim sistemine ait genel diyagram sunulmaktadır.



Şekil 2.10. Örnek batarya yönetim sistemi yapısı

Batarya yönetim sistemlerinin bir diğer kritik bileşeni olan termal yönetim alt sistemi, enerji depolama sistemlerinin güvenli, verimli ve uzun ömürlü çalışabilmesi açısından vazgeçilmez bir rol oynamaktadır. Özellikle yüksek güçlü uygulamalarda, batarya paketleri içerisindeki sıcaklık dağılımının homojen olmaması, hücreler arasında şarj-deşarj dengesizliklerine yol açmakta; bu da sistem genelinde performans düşüşü ve potansiyel güvenlik riskleri oluşturabilmektedir. Eşit olmayan termal dağılım, hücrelerin yük durumlarının farklılaşmasına neden olarak, özellikle yüksek sıcaklıktaki hücrelerin daha hızlı yaşlanmasına ve kapasite kaybına uğramasına yol açmaktadır. Bu durum, sadece bireysel hücreleri değil, tüm batarya paketinin enerji sağlama kapasitesini olumsuz etkilemektedir. Nejad (2016) tarafından ortaya konulduğu üzere, batarya sistemlerinde termal eşitsizliklerin uzun vadede çevrim ömrü üzerinde ciddi bozulmalara neden olduğu çeşitli deneysel ve simülasyon çalışmalarıyla doğrulanmıştır [47].

Bununla birlikte, bataryaların kullanım ömrünü optimize edebilmek ve uygun şarj-deşarj stratejileri geliştirebilmek adına, hücrelerin yük durumu ve sağlık durumu gibi değişkenlerinin doğru biçimde tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda kullanılan yöntemler arasında özellikle yapısal yorulma analizlerinden türetilmiş algoritmalar dikkat çekmektedir. Matsuishi ve Endo tarafından ilk kez tanımlanan zaman tabanlı stres analizi tekniklerinden biri olan yağmur akışı döngü sayma algoritması, bu bağlamda yaygın biçimde uygulanmaktadır. Geleneksel olarak makine mühendisliği

alanında, döngüsel yükleme altında çalışan mekanik yapıların yorulma ömrünü analiz etmek için kullanılan bu yöntem, son yıllarda batarya teknolojilerinde çevrim ömrünün öngörülmesi amacıyla da kullanılmaya başlanmıştır [48].

Yağmur akışı algoritması, zaman serisine dayalı yük durumu verilerinin analiz edilmesine olanak tanır. Temel olarak, gerilim veya yük eğrisinin saat yönünde 90 derece döndürülmesiyle elde edilen grafiksel yapı, görsel olarak geleneksel bir pagoda çatısını andırır. Bu eğride oluşan her bir tepe ve çukur noktası, yarım bir döngünün başlangıcını temsil eder. Algoritma, söz konusu tepe ve çukur noktalarını takip ederek, bir yağmur damlasının çatıdan aşağı süzülüşünü modelleyen bir yol izler. Böylelikle her bir yarım döngü, eğrinin belirli bir segmentinde başlar ve bir önceki veya sonraki lokal maksimuma ya da minimuma ulaşarak tamamlanır. Bu yöntem, farklı boşalma derinlikleri için oluşan gerilim genliklerini dikkate alarak, kaç tam çevrimin gerçekleştiğini nicel olarak hesaplar. Ayrıca, bu çevrimlerin büyüklüğü ve sıklığı hakkında da ayrıntılı veri üretir; böylece batarya sistemlerinin yorulma davranışları detaylı biçimde analiz edilebilmektedir.

Bu yaklaşım, özellikle batarya sistemlerinin karmaşık ve değişken yüklere maruz kaldığı elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji sistemleri ve güç şebekesi uygulamalarında, bataryanın dayanıklılık analizinde uluslararası standartlara uygun bir çözüm yolu sunmaktadır. Nitekim ASTM E1049-85 (2017) standardı, yağmur akışı algoritmasını yorulma analizi bağlamında resmi bir döngü sayma yöntemi olarak tanımlamakta ve mühendislik uygulamalarında geniş çapta kullanılmasını önermektedir [48].

Batarya sistemlerinin döngüsel ömrü, yalnızca belirli sayıdaki şarj ve deşarj işleminin tekrarlanmasına değil, aynı zamanda bu işlemlerin gerçekleştirilme koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Özellikle sıcaklık düzeyi, DOD, yük profillerinin zamana yayılmış değişimi ve sistemin çevrim sayısı gibi değişkenler, batarya hücrelerinin kimyasal ve yapısal bütünlüğü üzerinde doğrudan etki yaratan başlıca parametrelerdir. Bu bağlamda, batarya enerji depolama sistemlerinin uzun vadeli performansının ve ekonomik ömrünün yönetimi, yalnızca depolama kapasitesi ya da anlık güç performansından ibaret değildir; aynı zamanda sistemin yaşlanma dinamiklerinin de doğru biçimde modellenmesini gerektirmektedir. Bu çalışma kapsamında yalnızca BEDS'in enerji yönetim algoritmaları çerçevesinde ortaya çıkan şarj ve deşarj desenleri değerlendirme altına alınmış olup, diğer termal, mekanik ya da çevresel faktörler dışarıda bırakılmıştır.

BEDS sistemleri, genellikle şebekeye yardımcı hizmet sağlayan operatörlerin yönlendirdiği komutlara göre çalıştıklarından, yük durumu değişimi sabit ya da düzenli bir çevrim profiline sahip olmaktan uzaktır. Bu tür sistemlerde şarj ve deşarj işlemleri, grid ihtiyacına bağlı olarak ani dalgalanmalar gösterebilir ve bu durum, geleneksel çevrim sayma yaklaşımlarıyla modellenmesi zor bir dizi yük durum örüntüsü ortaya çıkarır. Bu bağlamda, düzensiz ve karmaşık yük durumu eğilimlerini analiz edebilmek amacıyla özel olarak tasarlanmış çevrim sayma algoritmalarının kullanımı gerekli hâle gelmiştir. Bu algoritmalar sayesinde bataryaların kullanım yoğunluğu, çevrim derinliği ve yaşlanma hızları daha güvenilir biçimde takip edilmekte, böylece sistemin kalan ömrüne ilişkin öngörüler daha isabetli bir şekilde elde edilebilmektedir.

BEDS'in operasyonel başarımını sürdürebilmek ve sistem ömrünü optimize edebilmek için, batarya hücrelerinde zamanla meydana gelen bozulmaların etkisi göz ardı edilmemelidir. Uzun vadede gerçekleşen bu bozulmaların büyük bir kısmı, düzensiz şarj-deşarj profilleri ve sık tekrarlanan derin deşarj işlemlerinden kaynaklanmaktadır. Bu tür işlemler, bataryanın aktif malzemelerinde yapısal ve kimyasal aşınmalara neden olmakta, iyon geçiş süreçlerinde direnç oluşturarak toplam kapasitenin düşmesine yol açmaktadır. Bu nedenle BEDS sistemlerinin yaşam döngüsü planlanırken, yalnızca mevcut performans değil, aynı zamanda çevrim ömrünün sınırları da dikkate alınmalıdır. Üreticiler her batarya tipi için nominal koşullarda ulaşılabilecek ortalama bir çevrim ömrü belirlemektedir. Bu sınıra ulaşıldığında batarya modülünün değiştirilmesi gerekir. Ancak bu değer, yalnızca hücrenin kimyasal yapısına değil, aynı zamanda uygulama sahasındaki sıcaklık, yükleme hızı, çevrim derinliği gibi deneysel koşullara da bağlı olarak önemli sapmalar gösterebilir.

Batarya sistemlerinin yük durumu değerlerinin izlenmesi ve bu değerlere göre çevrim ömrü ya da kapasite kaybının öngörülmesi amacıyla geliştirilen modern yöntemler, özellikle son yıllarda yapay zekâ ve veri odaklı modelleme tekniklerinin yaygınlaşmasıyla birlikte daha karmaşık yapılar kazanmıştır. Uyarlamalı (adaptif) tahmin algoritmaları, genişletilmiş Kalman süzgeci (Extended Kalman Filter), gelişmiş coulomb sayımı teknikleri, yapay sinir ağları ve özellikle görüntü işleme temelli uygulamalarda öne çıkan evrişimli sinir ağları gibi yöntemler, batarya yük durumu ve sağlık tahmini konusunda literatürde önemli yer edinmiştir. Bu yöntemler, batarya dinamiklerinin doğrusal olmayan ve zamanla değişen karakteristiklerine duyarlı oldukları için klasik model tabanlı tahmin yöntemlerine göre daha yüksek doğruluk sunmaktadır. Ayrıca gerçek zamanlı izleme ve erken uyarı sistemleriyle

entegre edilerek, batarya sistemlerinin arıza öncesi davranışlarının tespiti ve önleyici bakım stratejilerinin geliştirilmesi açısından önemli avantajlar sağlamaktadır [47, 48]. Bataryanın sağlık durumu, enerji depolama sistemlerinin uzun vadeli performansını değerlendirme açısından temel bir göstergedir ve genel olarak, bir bataryanın ömrü boyunca nominal enerji kapasitesini sağlama yeteneğini ifade eder. Bu bağlamda SoH, bataryanın ilk üretildiği ve kullanılmaya başlandığı andaki referans kapasitesi ile zaman içerisinde gerçekleşen fiziksel ve kimyasal bozulmalar sonucu ortaya çıkan kapasite kaybının karşılaştırılmasıyla ölçülür. Kavramsal olarak, bir bataryanın kullanım öncesindeki SoH değeri %100 olarak kabul edilirken, zamanla şarj-deşarj döngüleri, çevresel koşullar, termal stres, akım yükleri ve diğer dışsal faktörler nedeniyle batarya yaşlandıkça bu değer kademeli olarak düşer. SoH, bataryanın enerji sağlama yeterliliği belirli bir eşiğin altına indiğinde %0'a ulaşmış kabul edilir ve bu noktada batarya işlevsel olarak kullanım dışı kalmaktadır.

Bazı gelişmiş batarya enerji depolama sistemleri uygulamalarında ise SoH yalnızca enerji kapasitesine indirgenmeden, bataryanın güç üretim performansı da dikkate alınarak tanımlanır. Bu bağlamda SoH, hem enerji (Wh) hem de güç (W) temelli değerlendirmelerle ilişkilendirilebilir. Geleneksel yaklaşımlarda SoH ölçümü genellikle kapasite düşüşü ya da hücre içi empedans artışı gibi metriklerin izlenmesiyle yapılmaktadır. Ancak bu parametrelerin doğrudan ölçümü çoğu zaman karmaşık ve zaman alıcıdır. Bu nedenle, son yıllarda daha pratik ve uygulanabilir yöntemlerin geliştirilmesine yönelik eğilim artmıştır. Örneğin, batarya hücreleri belirli bir yük altında çalıştırıldığında gözlemlenen gerilim düşüşleri, doğrudan empedans ölçümüne ihtiyaç duymadan SoH hakkında dolaylı bilgi sağlayabilmektedir. Bu yöntem, özellikle DC iç direnç temelli analizlerde tercih edilmektedir. Batarya sistemine uygulanan belirli bir akım yükü altında gerilim düşüşü gözlemlenerek elde edilen bu veriler, bataryanın güç çıkışıyla ilişkilendirilerek SoH değerlendirmesinde kullanılabilmektedir [49].

Bununla birlikte, bataryanın sağlık durumu tahmini üzerine yapılan son dönem çalışmalar, klasik modelleme yaklaşımlarının ötesine geçerek yapay zekâ ve makine öğrenimi tekniklerinin kullanımını ön plana çıkarmıştır. Özellikle sinir ağları, karar ağaçları, destek vektör makineleri ve derin öğrenme modelleri bataryanın zaman içindeki performans değişimlerini çok daha yüksek doğrulukla tahmin edebilme potansiyeline sahiptir. Bu algoritmalar, geçmiş operasyon verilerinden öğrenerek gelecekteki SoH değerlerini tahmin edebilir ve batarya sistemleri için kestirimci bakım stratejilerinin uygulanmasına olanak

tanır. Ancak bu tür yaklaşımların güvenilir bir biçimde uygulanabilmesi için büyük, dengeli ve çeşitli veri kümelerine ihtiyaç vardır. Yeterli sayıda örneklem içermeyen, dar kapsamlı ya da sınırlı deneysel koşullara sahip veri setleri ile eğitilmiş yapay zekâ modelleri genellenebilir sonuçlar üretmekte zorlanabilmektedir. Dolayısıyla yapay zekâ tabanlı SoH tahmini süreçlerinde veri kalitesi, model mimarisi ve öğrenme süreci büyük önem arz etmektedir.

3. TÜRKİYE ELEKTRİK PİYASASI

3.1. Türkiye Elektrik Piyasasının Tarihsel Gelişimi

19. yüzyılda elektriğin günlük yaşama girmesiyle birlikte, elektrik enerjisi modern yaşamın vazgeçilmez bir unsuru hâline gelmiştir [50]. Günümüzde elektrik, aydınlatma, ısıtma ve soğutma gibi temel ihtiyaçların karşılanmasının yanı sıra sanayi, iletişim ve ulaşım gibi birçok alanda yoğun şekilde kullanılmaktadır. Nüfus artışı, sanayileşme ve kentleşme süreçleriyle birlikte elektriğe olan talep sürekli artış göstermiştir. Elektrik tüketimindeki bu artış, enerjinin üretim aşamasından son kullanıcıya kadar olan iletim ve dağıtım altyapılarının geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Elektrik enerjisi, doğrudan depolanamayan bir enerji türü olması nedeniyle üretildiği anda tüketilmesi gereken bir yapıya sahiptir. Ayrıca, elektrik talebinin zaman içinde değişkenlik göstermesi ve belirli dönemlerde ani artışların yaşanması, enerji sistemlerinin yönetimini zorlaştırmaktadır.

Bu çerçevede elektrik piyasaları; artan talebin karşılanması, üretim ve tüketim dengesinin sağlanması, enerji kaynaklarının etkin kullanımı ve güvenilir enerji arzının sürdürülebilmesi amacıyla oluşturulmuştur. Elektrik piyasaları, üreticiler, dağıtım ve tedarik şirketleri ile son kullanıcılar arasında elektrik enerjisinin ticaretini ve dağıtımını düzenleyen kurumsal bir yapı sunmaktadır.

1920–1960 yılları arasında elektrik enerjisine olan talebin artmasıyla birlikte, Türkiye'de elektrik şebekelerinin kurulması ve mevcut altyapının genişletilmesi temel öncelik olarak öne çıkmıştır. Bu dönemde elektrik sektöründe ağırlıklı olarak kamu yatırımları gerçekleştirilmiş ve enerji arzının yaygınlaştırılmasına odaklanılmıştır [51]. 1960–2000 yılları arasında ise Türkiye elektrik sektöründe dikey bütünleşik bir piyasa yapısı hâkim olmuş; üretim, iletim, dağıtım ve ticaret faaliyetlerinin tamamı Türkiye Elektrik Kurumu (TEK) bünyesinde yürütülmüştür [52]. Bu yapı çerçevesinde, piyasada rekabet unsuru bulunmamış ve sektör kamu tekelinde faaliyet göstermiştir [52, 53]. Ancak 1982 yılında yürürlüğe giren 2705 sayılı Kanun ile özel sektöre elektrik üretim tesisi kurma hakkı tanınarak sektörde sınırlı da olsa rekabete yönelik ilk adımlar atılmıştır [53].

1993 yılında alınan Bakanlar Kurulu kararı ile TEK, Türkiye Elektrik Üretim ve İletim A.Ş. (TEAŞ) ve Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. olmak üzere iki ayrı yapıya bölünmüştür. Bu

kurumsal ayrışma, elektrik sektöründe serbestleşme ve özelleştirme sürecinin başlangıcı olarak değerlendirilmektedir. Özelleştirme uygulamalarının devreye alınmasıyla birlikte sektörde rekabet koşulları giderek güçlenmiştir.

2000'li yıllarla birlikte yürürlüğe giren Elektrik Piyasası Kanunu, Türkiye elektrik sektörünün düzenli, şeffaf ve rekabetçi bir yapıya kavuşturulmasını hedeflemiş ve sektörün yeniden yapılandırılması için temel bir çerçeve sunmuştur [54]. Kanun hükümleri, üretici, iletimci, dağıtımcı ve tedarikçiler başta olmak üzere tüm piyasa paydaşları için yol gösterici nitelik taşımaktadır [51, 54]. 5 Şubat 2001 tarihli Bakanlar Kurulu kararı doğrultusunda TEAŞ üç ayrı kamu tüzel kişiliğine ayrılmıştır. Bu kapsamda, iletim faaliyetleri Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ), üretim faaliyetleri Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ) ve toptan satış ile ticaret faaliyetleri Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt A.Ş. (TETAŞ) bünyesinde yapılandırılmıştır [51, 53].

2002 yılında Türkiye genelinde elektrik dağıtım bölgeleri belirlenmiş ve ülke, farklı dağıtım bölgelerine ayrılarak bu bölgeler için özelleştirme ihaleleri düzenlenmiştir. İlk dağıtım özelleştirmesi 2004 yılında Sakarya, Bursa ve Balıkesir illerini kapsayan Marmara Bölgesi'nde gerçekleştirilmiş; izleyen yıllarda diğer dağıtım bölgelerinin de özelleştirilmesiyle süreç kademeli olarak tamamlanmıştır. Türkiye'deki tüm elektrik dağıtım şirketlerinin özelleştirme süreci 2013 yılı itibarıyla sonuçlanmıştır [55].

Son olarak, 2015 yılında Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPİAŞ) kurulmuş ve elektrik piyasasında piyasa işletmecisi olarak faaliyete başlamıştır. EPİAŞ, elektrik piyasalarında güvenilir, şeffaf ve etkin bir ticaret ortamı oluşturmayı hedeflemekte olup, piyasa işlemlerinin merkezi bir yapı altında yürütülmesini sağlamaktadır.

3.2. Türkiye Elektrik Piyasasının Yapısı

Türkiye'de elektrik piyasasının kurumsal ve hukuki yapısı, 2001 yılında yürürlüğe giren 4628 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu ile birlikte kapsamlı bir dönüşüm sürecine girmiştir [54]. Bu kanun sonrasında yapılan mevzuat düzenlemeleri ve yapısal reformlar sayesinde elektrik piyasası, rekabetçi ve şeffaf bir işleyişe sahip olacak şekilde yeniden şekillendirilmiştir. Süreç boyunca, piyasaya katılımın artırılması ve farklı piyasa aktörlerinin etkin rol alabilmesi temel hedefler arasında yer almıştır. Günümüzde Türkiye'nin elektrik

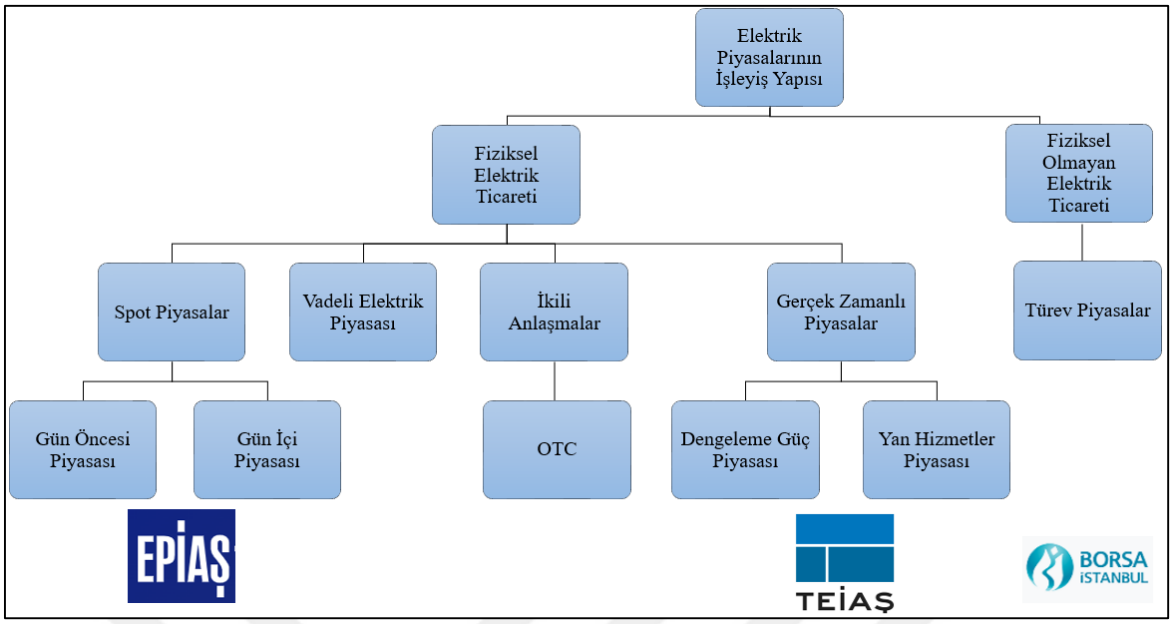
piyasasında elektrik ticareti, işlem zamanı ve ticaretin niteliğine bağlı olarak farklı piyasa yapıları altında gerçekleştirilmektedir. Fiziksel elektrik ticareti kapsamında yer alan gün öncesi, gün içi ve gerçek zamanlı piyasalar, elektrik enerjisinin fiilen teslim edilmesine dayalı mekanizmalar sunmaktadır. Buna karşılık, finansal elektrik ticareti kapsamında faaliyet gösteren türev piyasalar, piyasa katılımcılarına fiyat dalgalanmalarına karşı korunma ve risk yönetimi imkânı sağlamaktadır.

Elektrik ticaretinin fiziksel ve finansal boyutları ile bu boyutlara ait piyasa platformlarının hiyerarşik ilişkisi Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Bununla birlikte, mevzuat altyapısı geliştirilmeye devam eden batarya depolama sistemlerinin de yakın gelecekte elektrik piyasası içerisinde aktif birer katılımcı hâline gelmesi beklenmektedir. Bu durum, piyasa yapılarının ve işleyiş mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasını gerekli kılmaktadır.

Mevcut yapıda Türkiye elektrik piyasası, fiziksel elektrik ticareti ve fiziksel teslimat içermeyen elektrik ticareti olmak üzere iki ana başlık altında ele alınmaktadır. Fiziksel elektrik ticareti, elektrik enerjisinin belirli bir zaman diliminde üretilmesi ve tüketilmesi yükümlülüğünün taraflarca üstlenildiği, teslimata dayalı ticaret biçimidir. Bu kapsamda ikili anlaşmalar, vadeli elektrik piyasası, spot piyasalar ve gerçek zamanlı piyasalar yer almaktadır.

Fiziksel elektrik ticaretine ilişkin piyasalardan spot piyasalar, piyasa işletmecisi Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPİAŞ) tarafından yürütülmekte olup gün öncesi ve gün içi piyasaları kapsamaktadır. Gerçek zamanlı piyasalarda ise sistemin anlık dengesinin sağlanması amacıyla dengeleme güç piyasası ve yan hizmetler piyasası faaliyet göstermektedir ve bu piyasalar Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) tarafından işletilmektedir.

Fiziksel teslimat içermeyen elektrik ticareti ise elektrik enerjisi fiilen teslim edilmemekte, işlemler finansal uzlaşma esasına göre yürütülmektedir. Türkiye'de bu kapsamda gerçekleştirilen işlemler, Borsa İstanbul bünyesinde faaliyet gösteren türev piyasalar aracılığıyla yapılmaktadır.



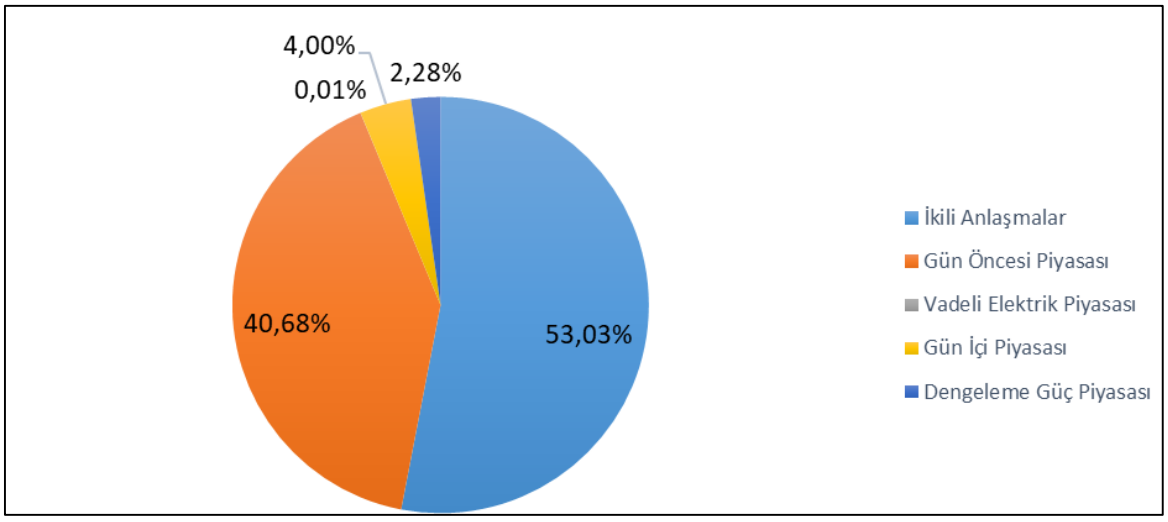
Şekil 3.1. Elektrik piyasalarının yapısı

3.3. Fiziksel Elektrik Ticareti

3.3.1. İkili anlaşmalar

İkili anlaşmalar, elektrik piyasasında fiziksel elektrik ticaretinin en yaygın olarak gerçekleştirildiği ticaret türlerinden biridir. Bu anlaşmalar, elektrik enerjisinin alıcı ve satıcı taraflar arasında doğrudan müzakere edilerek alınıp satılmasını kapsayan ve özel hukuk hükümlerine tabi ticari sözleşmeler niteliği taşımaktadır. Taraflar; elektrik enerjisinin miktarı, teslimat süresi ve fiyatı gibi koşulları karşılıklı anlaşma yoluyla belirlemektedir [56].

Türkiye elektrik piyasasında yapılan toplam ticaretin önemli bir bölümü ikili anlaşmalar aracılığıyla gerçekleşmekte olup, bu oran yaklaşık %50–60 seviyelerindedir (Şekil 3.2). Piyasa yapısında öncelikle ikili anlaşmalar yoluyla elektrik alım satımı yapılmakta, bu anlaşmalar dışında kalan miktarlar ise spot piyasa ve gerçek zamanlı piyasalarda işlem görmektedir. Bu durum, ikili anlaşmaların piyasa öngörülebilirliğine katkı sağladığını göstermektedir.



Şekil 3.2. Yıllık piyasa miktar dağılımı [57]

İkili anlaşmalar genellikle tezgâhüstü piyasa yapısında gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda işlemler, tarafların doğrudan iletişimi veya brokerlar aracılığıyla yapılmakta ve anlaşma tamamlanana kadar karşı taraf bilgisi gizli kalabilmektedir. Standart ürün yapılarının bulunmaması, tarafların ihtiyaçlarına göre kısa, orta veya uzun vadeli sözleşmeler oluşturulmasına olanak tanımaktadır [58].

İkili anlaşmalara ilişkin bildirimler, teslimat gününden en fazla 60 gün öncesine kadar piyasa işletmecisine yapılabilmekte olup, bildirimler 0,1 MWh'lik lotlar bazında ve 24 saatlik zaman dilimini kapsayacak şekilde gerçekleştirilmektedir. Alış yönlü işlemler pozitif, satış yönlü işlemler ise negatif değerler olarak bildirilmektedir. Bildirimler için son saat 17.00 olarak belirlenmiştir. Uzun yıllar boyunca ikili anlaşmalar tezgâhüstü piyasalarda yürütülmüş, ancak ileri tarihli elektrik ticaretinin daha düzenli bir yapı altında gerçekleştirilmesi amacıyla EPİAŞ bünyesinde fiziksel teslimatlı Vadeli Elektrik Piyasası 2021 yılında devreye alınmıştır [59]. Bu gelişme, ikili anlaşmaların piyasa yapısı içerisindeki önemini destekleyen bir adım olarak değerlendirilmektedir.

3.3.2. Spot piyasalar

Spot elektrik piyasaları, elektrik enerjisinin alıcı ve satıcılar arasında fiziksel teslimata dayalı olarak kısa vadeli şekilde alınıp satıldığı piyasalardır. Bu piyasalarda elektrik fiyatları, arz ve talep koşullarına bağlı olarak günlük ve saatlik zaman dilimlerinde belirlenmektedir [60].

Türkiye elektrik piyasasında spot elektrik ticareti, Gün Öncesi Piyasası (GÖP) ve Gün İçi Piyasası (GİP) olmak üzere iki temel organize piyasa altında yürütülmektedir.

Gün öncesi piyasası

Gün Öncesi Piyasası (GÖP), elektrik enerjisinin teslimatından bir gün önce gerçekleştirilen alım ve satım işlemlerini kapsayan organize bir toptan elektrik piyasasıdır. Bu piyasa, elektrik üretim ve tüketim miktarlarının önceden planlanmasına imkân tanıyarak sistemin dengeli bir şekilde işletilmesini amaçlamaktadır. Türkiye'de GÖP, Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPİAŞ) tarafından işletilmekte olup, piyasa katılımcılarının portföylerini bir gün öncesinden dengeleyebilmelerine olanak sağlamaktadır.

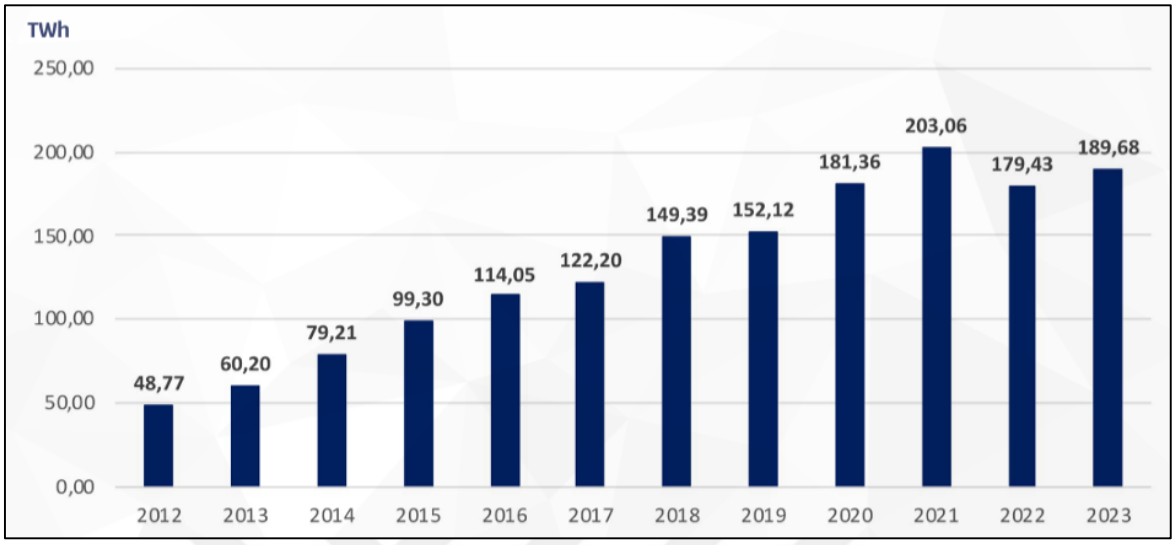
GÖP'te işlemler günlük periyotlar hâlinde ve saatlik zaman dilimleri esas alınarak yürütülmektedir. Piyasa katılımcıları bir sonraki günün her saati için alış ve satış yönlü miktar ve fiyat tekliflerini EPİAŞ'a iletmektedir. Sunulan bu teklifler doğrultusunda her saat için ayrı ayrı arz ve talep eğrileri oluşturulmakta; söz konusu eğrilerin kesiştiği noktada piyasa takas fiyatı (PTF) belirlenmektedir. Oluşan PTF, elektrik piyasalarında referans fiyat niteliği taşımakta ve uzlaştırma süreçlerinde kullanılmaktadır.

Gün Öncesi Piyasası, ikili anlaşmalar ve vadeli piyasalar kapsamında planlanan miktarların yetersiz kalması durumunda piyasa katılımcılarına ek bir ticaret ve dengeleme imkânı sunmaktadır. Bu yönüyle GÖP, elektrik sisteminin işletiminde ortaya çıkabilecek dengesizliklerin önlenmesine katkı sağlamakta ve gerçek zamanlı piyasalarda oluşabilecek ani fiyat dalgalanmalarına karşı katılımcıları koruyucu bir rol üstlenmektedir.

GÖP'e katılım zorunlu olmayıp, piyasada işlem yapmak isteyen lisans sahibi üretim, tedarik, dağıtım ve organize sanayi bölgesi tüzel kişilikleri, EPİAŞ ile gerekli piyasa katılım anlaşmalarını imzalayarak bu piyasada faaliyet gösterebilmektedir. Piyasanın portföy bazlı yapısı sayesinde her katılımcı kendi üretim ve tüketim dengesinden sorumlu olmakta ve bu dengeleme sürecini bağımsız şekilde yönetmektedir.

Gün öncesi piyasanın temel amaçları arasında: elektrik enerjisi için güvenilir bir referans fiyat oluşturmak, piyasa katılımcılarına kısa vadeli elektrik ticareti ve dengeleme imkânı sağlamak ve sistem işletmecisine bir gün öncesinden dengelenmiş bir elektrik sistemi

sunmak yer almaktadır [61]. Bu özellikleriyle GÖP, Türkiye elektrik piyasasının işleyişinde merkezi bir konuma sahiptir.



Şekil 3.3. Gün öncesi piyasası yıllık piyasa eşleşme miktarları [53]

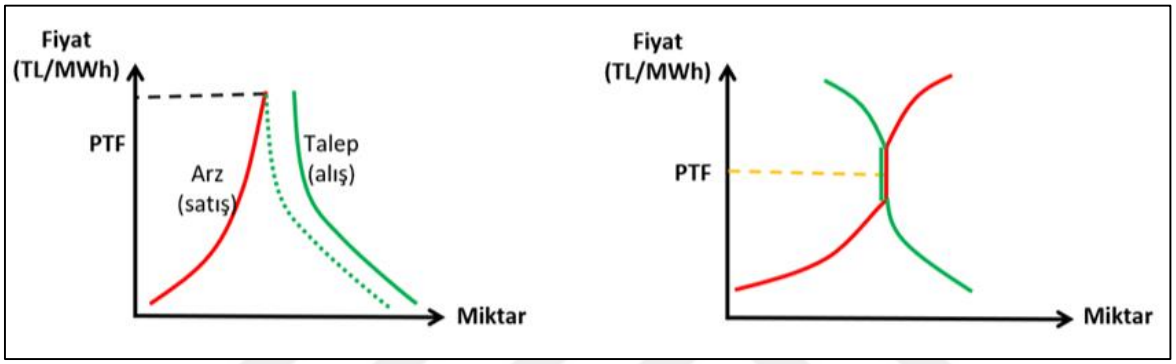
Şekil 3.3'te 2012-2021 yıllarına ait Gün Öncesi Piyasası eşleşme miktarı gösterilmektedir. Her yıl artış göstermekte, ancak 2022 yılında Gün Öncesi Piyasası'nda gerçekleşen yıllık eşleşme miktarı bir önceki yıla göre %11,6 azalarak 179,43 TWh olmuştur. 2023 yılında ise gerçekleşen yıllık eşleşme miktarı 2022 yılına göre %5,71 artarak 189,68 TWh olmuştur.

Piyasa takas fiyatı

Piyasa Takas Fiyatı (PTF), Gün Öncesi Piyasası'nda elektrik enerjisinin referans fiyatını temsil eden ve her gün saatlik bazda belirlenen bir fiyat göstergesidir. Bu fiyat, elektrik üreticileri tarafından sunulan arz teklifleri ile tedarikçiler ve tüketiciler tarafından iletilen talep tekliflerinin karşılaşması sonucunda oluşmaktadır. Arz ve talep arasındaki dengeye bağlı olarak PTF, gün ve saat bazında değişkenlik göstermektedir.

PTF'nin belirlenmesi sürecinde, piyasa katılımcıları bir sonraki günün her saati için üretim veya tüketim tahminlerine dayalı alış ve satış tekliflerini EPİAŞ Piyasa Yönetim Sistemi üzerinden iletmektedir. Bu teklifler, saatlik, esnek veya blok teklif biçiminde sunulabilmekte olup, saatlik teklifler alış ve satış yönünde belirli fiyat seviyeleri üzerinden tanımlanmaktadır [62]. Tüm tekliflerin toplanmasının ardından, piyasa işletmecisi tarafından bir optimizasyon süreci yürütülmektedir.

Optimizasyon aşamasında, arz ve talep eğrileri kesiştirilerek sistem dengesi sağlanmaktadır. Arz veya talep tarafında fazlalık oluşması durumunda, fazla olan tarafın miktarı tüm piyasa katılımcıları arasında oransal olarak azaltılmakta ve bu sayede denge noktası elde edilmektedir. Bu denge noktasına karşılık gelen fiyat, ilgili saat için Piyasa Takas Fiyatı olarak belirlenmektedir. Arz miktarının talebi aşması durumunda PTF düşme eğilimi gösterirken, talebin arzdan yüksek olması hâlinde fiyat artmaktadır. Bu yönüyle PTF, elektrik piyasasında arz-talep dengesini yansıtan temel bir gösterge olup, uzlaştırma işlemlerinde ve diğer elektrik piyasaları için referans fiyat olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.4. Piyasa takas fiyatının belirlenmesi [63]

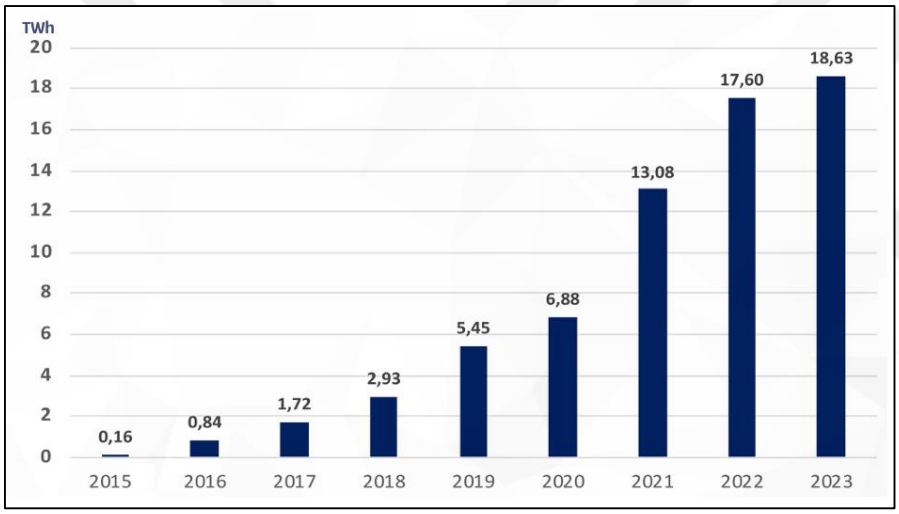
Gün içi piyasası

Gün İçi Piyasası (GİP), elektrik enerjisinin fiziksel teslimatına kısa bir süre kalana kadar işlem yapılmasına olanak tanıyan ve piyasa katılımcılarının gerçek zamana yakın dengesizliklerini gidermeyi amaçlayan organize bir elektrik piyasasıdır. Türkiye'de 1 Temmuz 2015 tarihinde faaliyete geçen GİP, EPİAŞ tarafından spot piyasa kapsamında işletilmekte olup Gün Öncesi Piyasası ile Dengeleme Güç Piyasası arasında tamamlayıcı bir işlev üstlenmektedir. GİP, sürekli ticaret metoduna göre çalışmakta ve uygun alış-satış teklifleri anlık olarak eşleşmektedir. İşlemler saatlik zaman dilimleri üzerinden yapılmakta; işlem miktarları LOT, fiyatlar ise TL/MWh cinsinden ifade edilmektedir. Piyasanın 7 gün 24 saat esasına göre çalışması, katılımcıların portföylerini gerçek zamana oldukça yakın bir şekilde dengeleyebilmesine imkân tanımaktadır.

GÖP'te yapılan üretim ve tüketim tahminlerine rağmen, arızalar, talep sapmaları ve özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken üretim yapısı nedeniyle dengesizlikler oluşturabilirler. GİP, bu tür belirsizliklerin etkisini azaltarak piyasa katılımcılarına fazla ya

da eksik kalan enerji miktarlarını dengeleme imkânı sunmaktadır. Bu yönüyle piyasa likiditesinin artmasına katkı sağlamakta ve fiyat oluşumunun daha istikrarlı hâle gelmesine destek olmaktadır [64].

Portföy bazlı yapıya sahip olan Gün İçi Piyasası'nda katılımcılar aynı anda hem üretim hem de tüketim tarafında yer alabilmektedir. Gerçek zamana yakın işlem yapılabilmesi sayesinde üretim tahminlerinin doğruluğu artmakta, bu durum özellikle yenilenebilir enerji santralleri açısından GİP'i önemli bir dengeleme mekanizması hâline getirmektedir. Ayrıca piyasa katılımcılara arbitraj imkânı sunarak elektrik ticareti açısından ek bir esneklik sağlamaktadır. Şekil 3.5'te ise 2015-2023 yıllarına ait Gün İçi Piyasası eşleşme miktarı gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Gün içi piyasası yıllık eşleşme miktarı [53]

3.3.3. Gerçek zamanli piyasalar

Dengeleme güç piyasası

Dengeleme Güç Piyasası (DGP), elektrik sisteminde gerçek zamanlı olarak ortaya çıkan arz ve talep dengesizliklerinin giderilmesi amacıyla işletilen bir piyasadır. Gün öncesi ve gün içi piyasalarında üretim ve tüketim planları dengelenmiş olsa dahi, gerçek zamanlı işletim sürecinde çeşitli teknik ve operasyonel nedenlerle sistem dengesinde sapmalar meydana gelebilmektedir. Bu dengesizliklerin giderilmesi, sistem işletmecisi olan TEİAŞ bünyesindeki Milli Yük Tevzi Merkezi tarafından DGP aracılığıyla sağlanmaktadır.

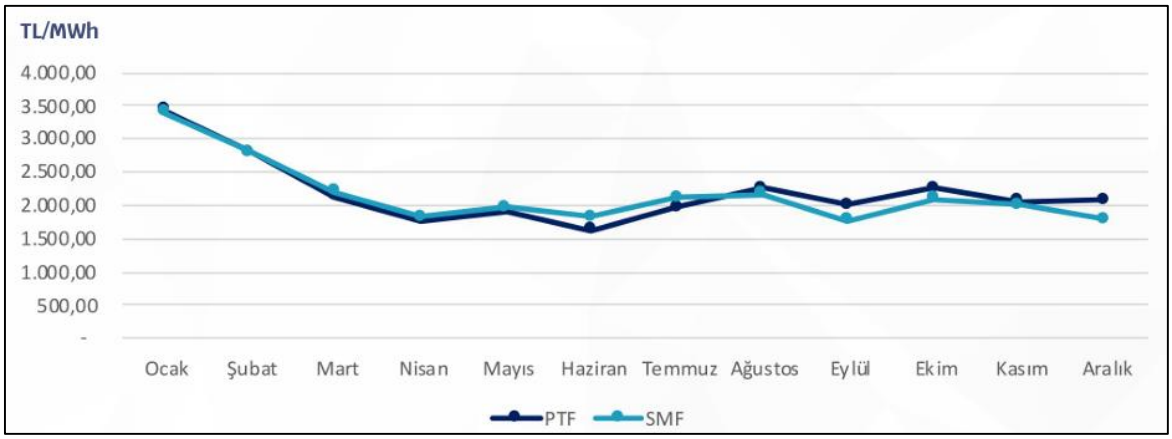
Gerçek zamanlı dengesizliklerin temel nedenleri arasında: üretim santrallerinde meydana gelen arızalar, iletim hatlarındaki kısıtlar, yakıt arzında yaşanan sorunlar, tüketim ve üretim tahminlerindeki sapmalar ile rüzgâr ve güneş gibi kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim değişkenliği yer almaktadır. Bu tür durumlar, gün öncesinde dengelenmiş olan sistemin gerçek zamanlı olarak yeniden dengelenmesini zorunlu kılmaktadır [65].

DGP kapsamında, sistemin dengede tutulabilmesi için az 10 MW yük alma veya yük atma kapasitesine sahip olan en fazla 15 dakika içerisinde devreye girebilecek yedek kapasiteye sahip üretim tesisleri dengeleme birimi olarak görev yapmaktadır. Yük alma veya yük atma yeteneği bulunmayan tesisler ise dengeleme birimi olma yükümlülüğünden muaftır. Kesintili üretim yapan yenilenebilir enerji santralleri dengeleme birimi olarak tanımlanmasa da, sistem güvenliği açısından TEİAŞ tarafından verilen talimatlara uymakla yükümlüdür [56].

DGP'de dengeleme işlemleri, sistem işletmecisi tarafından verilen yük alma ve yük atma talimatları aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bu talimatlar doğrultusunda devreye alınan dengeleme birimleri sayesinde sistem frekansı korunmakta, arz-talep dengesi sağlanmakta ve iletim kısıtları yönetilmektedir. Bu süreçte, dengeleme işlemlerine karşılık gelen fiyat olarak Sistem Marjinal Fiyatı (SMF) oluşmaktadır.

Piyasa katılımcıları, her gün belirlenen saatlere kadar emre amade kapasitelerini ve üretim programlarını TEİAŞ'a bildirmekle yükümlüdür. Gerçekleşen üretim veya tüketim değerlerinin taahhüt edilen programlardan sapması durumunda dengesizlik tutarları hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalarda, Piyasa Takas Fiyatı (PTF) ile Sistem Marjinal Fiyatı (SMF) arasındaki fark esas alınmakta ve belirlenen katsayılar aracılığıyla dengesizlik bedelleri piyasa katılımcılarına yansıtılmaktadır. Şekil 3.6'da 2023 yılında gerçekleşen PTF ve SMF aylık ortalama değerleri yer almaktadır. 2023 yılında PTF ortalaması 2189,30 TL/MWh olurken, SMF ortalaması ise 2160,84 TL/MWh olarak belirlenmiştir.

Sonuç olarak, DGP, elektrik sisteminin güvenli, sürekli ve kaliteli şekilde işletilmesini sağlayan temel piyasa mekanizmalarından biridir. Gerçek zamanlı dengeleme işlevi sayesinde, elektrik arz güvenliği sağlanmakta ve sistemin ani değişimlere karşı dayanıklılığı artırılmaktadır.



Şekil 3.6. Grafik 53: Aylık ortalama PTF - SMF grafiği [53]

Sistem marjinal fiyatı (SMF)

DGP kapsamında gerçek zamanlı olarak verilen dengeleme talimatları sonucunda oluşan ve sistemin marjinal dengeleme maliyetini temsil eden fiyattır. Sistem yönünün enerji açığı göstermesi durumunda, yük alma teklifleri en düşük fiyat seviyesinden başlayarak değerlendirilmekte; enerji fazlası söz konusu olduğunda ise yük atma teklifleri en yüksek fiyat seviyesinden itibaren sıralanmaktadır. Bu süreçte, dengeleme ihtiyacını karşılayan net talimat hacmine karşılık gelen teklif fiyatı, ilgili zaman dilimi için Sistem Marjinal Fiyatı olarak belirlenmektedir.

Piyasa işletmecisi, tahmin edilen üretim ve tüketim değerleri ile gerçekleşen değerler arasındaki sapmaları dikkate alarak dengesizlik tutarlarını hesaplamaktadır. Bu hesaplamada, Piyasa Takas Fiyatı (PTF) ile Sistem Marjinal Fiyatı (SMF) arasındaki fark esas alınmakta ve belirlenen katsayılar aracılığıyla enerji dengesizlik bedelleri piyasa katılımcılarına yansıtılmaktadır. Bu mekanizma, piyasa katılımcılarını üretim ve tüketim tahminlerini daha doğru yapmaya teşvik eden bir yapı sunmaktadır.

Yan hizmetler piyasası

Yan Hizmetler Piyasası, elektrik iletim ve dağıtım sisteminin güvenli, sürekli ve belirlenen kalite standartlarında işletilmesini sağlamak amacıyla sunulan hizmetleri kapsayan bir piyasa yapısıdır. Türkiye'de bu piyasa, sistem işletmecisi olan Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) tarafından yürütülmekte olup, elektrik sisteminin kararlı bir şekilde işletilmesine katkı sağlamaktadır. Yan hizmetler, iletim veya dağıtım sistemine bağlı üretim ve tüketim

tesisleri tarafından sağlanmakta ve elektrik ticaretinden bağımsız olarak sistemin sağlıklı çalışmasını hedeflemektedir. Bu hizmetler arasında primer frekans kontrolü, sekonder frekans kontrolü, talep tarafı katılımı, anlık talep kontrolü, sistem toparlanması ve reaktif güç kontrolü gibi uygulamalar yer almaktadır. Yan hizmetler, elektrik enerjisinin ticaretine konu olmamakla birlikte, arz güvenliğinin sağlanması ve sistem kararlılığının korunması açısından önemli bir rol üstlenmektedir.

Primer frekans kontrolü

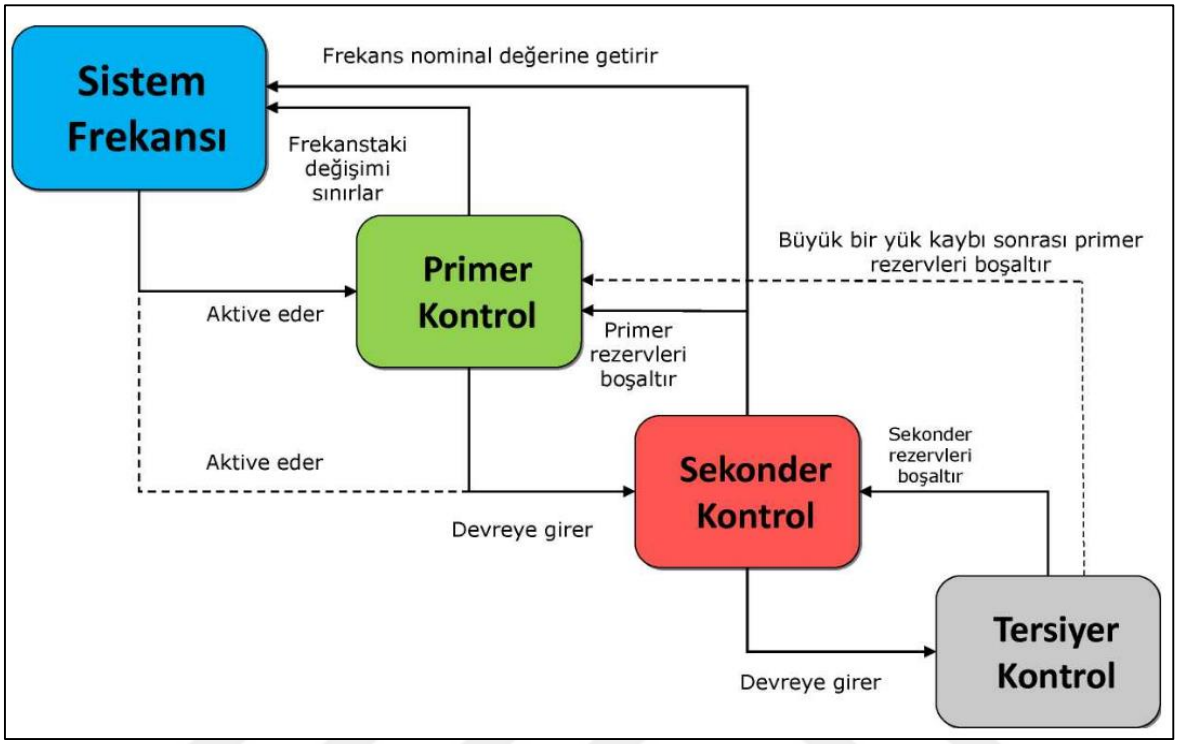
Primer frekans kontrolü, elektrik sisteminde frekansın anlık olarak artması veya azalması durumunda, üretim tesislerinin aktif güç çıkışlarının otomatik olarak ayarlanması yoluyla sistem frekansının yeni bir denge noktasında tutulmasını sağlayan ilk savunma mekanizmasıdır. Bu kontrol, üretim ünitelerindeki türbin hız regülatörleri aracılığıyla gerçekleştirilmekte olup, frekans sapmasına orantılı bir şekilde devreye girmektedir.

PFK hizmeti, sistem frekansında meydana gelen bir bozulmanın ardından birkaç saniye içerisinde etkisini göstermeye başlamakta ve yaklaşık 30 saniye içerisinde tam kapasiteye ulaşmaktadır. Sağlanan bu tepkinin en az 15 dakika boyunca sürdürülebilir olması esastır. Bu süre içerisinde frekans sapmasının devam etmesi hâlinde, sekonder frekans kontrolü (SFK) devreye girerek sistem dengesinin daha uzun vadede yeniden sağlanmasını üstlenmektedir. Bu yönüyle PFK, frekans sapmasının referans değere (50 Hz) geri getirilmesini değil, sapmanın kararlı bir noktada sınırlandırılmasını amaçlamaktadır [66, 67].

Türkiye'de primer frekans kontrol hizmeti, geçerli primer frekans kontrol test sertifikasına sahip ve belirli teknik yeterlilikleri sağlayan üretim tesisleri tarafından gönüllülük esasına göre sunulmaktadır. Bu kapsamda, kurulu gücü 30 MW ve üzerindeki üretim tesisleri primer frekans kontrolüne katılabilmekte; hizmetin temini TEİAŞ tarafından yürütülen ihale mekanizmaları aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Primer frekans kontrolü için ayrılan rezerv kapasiteleri, ilgili üreticiler tarafından başka piyasalarda teklif edilememekte veya ikili anlaşmalar yoluyla satılamamaktadır.

Sistem frekansının anma değerinde tutulabilmesi için frekans kontrolü hiyerarşik bir yapı içerisinde gerçekleştirilmektedir. Bu hiyerarşi Şekil 3.7'de gösterilmektedir. Sistem frekansında meydana gelen sapmalarda ilk olarak PFK devreye girerek frekans değişimini

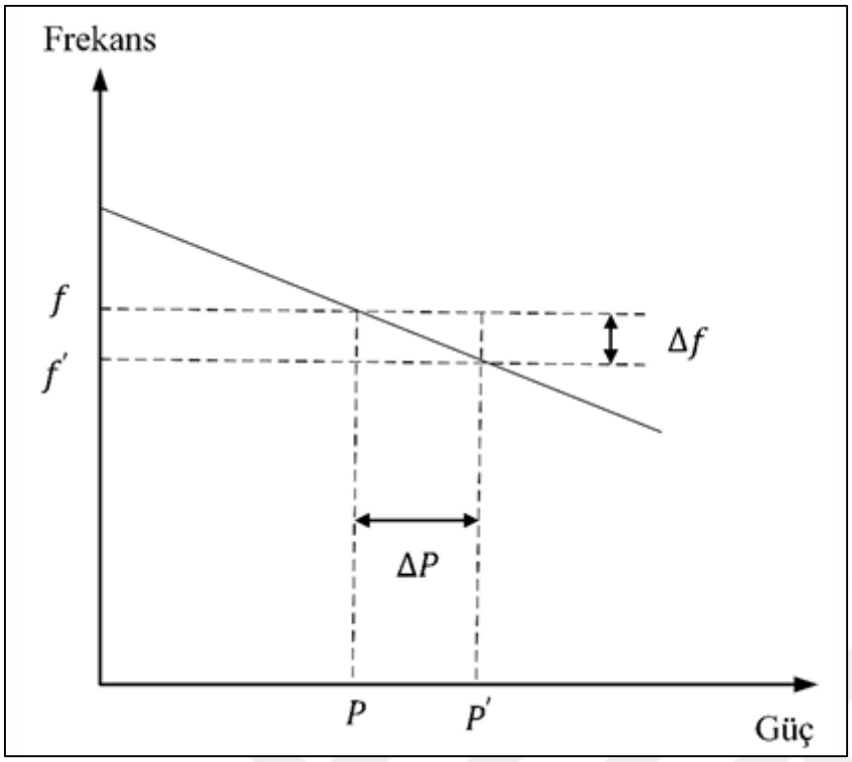
sınırlandırmaktadır. Ardından SFK devreye alınarak frekansın nominal değere yakınsaması sağlanmakta ve primer kontrol rezervleri serbest bırakılmaktadır [68].



Şekil 3.7. Frekans kontrolü basamakları

PFK, frekansa duyarlı rezerv olarak da adlandırılmakta olup, üretim birimlerinin güç çıkışlarının frekans sapması ve regülatör düşü (droop) karakteristiğine bağlı olarak otomatik şekilde ayarlanması esasına dayanmaktadır. Bu kontrol mekanizması, kararlı durum koşullarında frekans hatasının azaltılmasında önemli bir rol oynamakta ve ikincil frekans kontrolü devreye girene kadar sistemin dengede tutulmasına katkı sağlamaktadır.

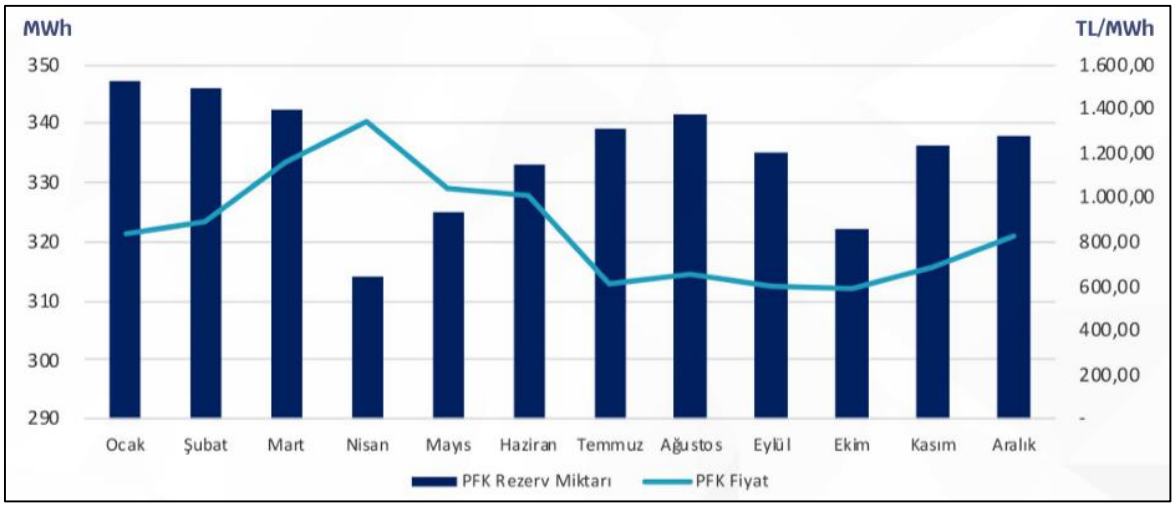
Şekil 3.8'de, primer frekans kontrolü sürecinde sistemin frekans–güç ilişkisini gösteren karakteristik eğri sunulmaktadır. Şekilden görüldüğü üzere, sistemin çıkış gücü P seviyesinde iken frekans değeri f'dir. Sistemde meydana gelen bir yük değişimi sonrasında, hız regülatörleri aracılığıyla sistemin çıkış gücü P′ değerine ayarlanmakta ve buna bağlı olarak çıkış gücünde ΔP kadar bir artış gerçekleşmektedir. Bu süreç sonucunda üretim ve tüketim arasındaki denge yeniden sağlanmakta ve sistem frekansı f′ değerine ulaşmaktadır [69]. Burada, frekansın nominal değerine tam olarak geri döndürülmesi için sekonder frekans kontrol mekanizmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 3.8. Primer frekans kontrol tepkisi [68]

Sonuç olarak, primer frekans kontrolü, elektrik güç sisteminin işletme güvenilirliğini sağlayan en temel yan hizmetlerden biri olup, ani üretim veya tüketim değişimlerine karşı sistemin dayanıklılığını artırmaktadır. Bu hizmet sayesinde, senkron alan genelinde frekans kararlılığı korunmakta ve olası sistem bozulmalarının yayılması önlenmektedir.

Primer ve sekonder yan hizmetler piyasalarına katılmak isteyen üretim tesisleri, ayıracakları primer ve sekonder rezervler için ilgili günün iki gün öncesinde düzenlenen ihale süreçlerine katılmaktadır. Bu ihalelerde, farklı üretim birimleri tarafından sunulan fiyat ve kapasite teklifleri doğrultusunda bir arz eğrisi oluşmakta ve ihaleyi kazanan üretim tesisleri belirlenmektedir. İhale sonucunda seçilen üretim birimleri, ilgili saat dilimlerinde sistem işletmecisi olan TEİAŞ tarafından iletilen anlık frekans kontrol talimatlarını yerine getirmekle yükümlüdür [70]. Şekil 3.9’da, 2023 yılına ait PFK rezervlerinin saatlik ortalama miktarları ile bu rezervlere ilişkin ağırlıklı ortalama birim fiyatlar sunulmaktadır.



Şekil 3.9. Aylık ortalama PFK rezerv miktarı ve ağırlıklı ortalama fiyatı

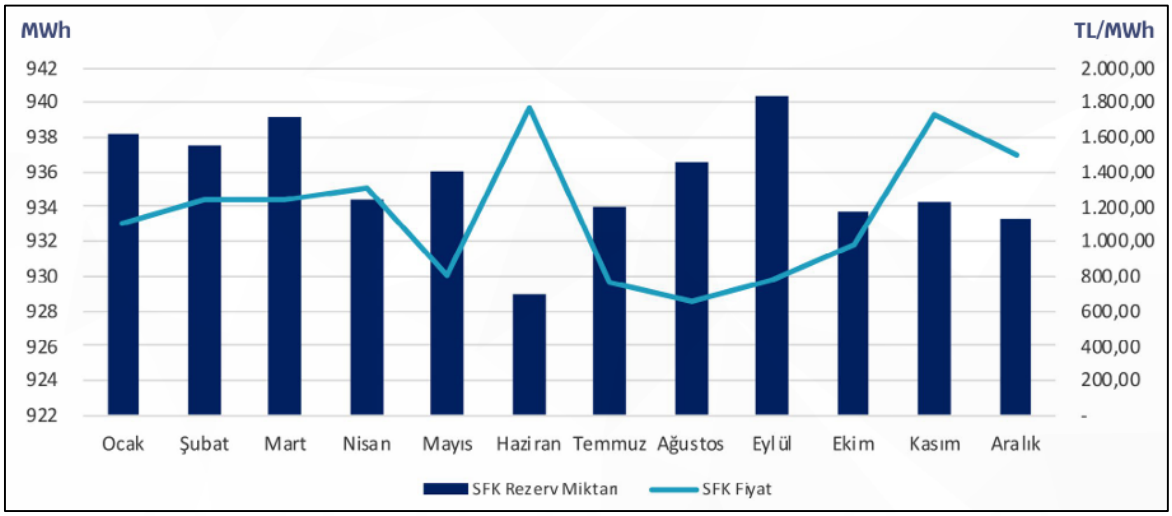
Sekonder frekans kontrolü

Sekonder Frekans Kontrolü (SFK), elektrik güç sisteminde frekansın anma değerine yaklaştırılması ve enterkonnekte şebekelerle gerçekleşen toplam enerji alışverişinin planlanan sınırlar içinde tutulması amacıyla uygulanan otomatik bir kontrol mekanizmasıdır. Bu mekanizma, sistem işletmecisi tarafından iletilen kontrol sinyalleri doğrultusunda üretim tesislerinin aktif güç seviyelerinin sürekli olarak ayarlanmasına dayanmaktadır.

Sekonder frekans kontrolü, primer frekans kontrolünün ardından sistemde kalan kalıcı frekans sapmasının giderilmesini hedeflemektedir. Bu süreç, otomatik üretim kontrolü (Automatic Generation Control – AGC) sistemi aracılığıyla yürütülmekte olup, frekans sapmasının oluşmasını takiben kısa bir süre içinde devreye girmektedir. SFK tepkisi genellikle 15–30 saniye içerisinde başlamaktadır ve yaklaşık 15 dakika boyunca devam ederek sistemin kararlı bir duruma ulaşmasını sağlamaktadır [69].

SFK kapsamında kullanılan rezerv kapasitesi, üretim tesislerinin primer frekans kontrolü için ayırdığı rezervler dışında kalan kullanılabilir kapasiteden oluşturulmaktadır. Bu rezervlerin miktarı, Avrupa elektrik sistemi işletme prensipleri (ENTSO-E) doğrultusunda sistem işletmecisi olan TEİAŞ tarafından belirlenmekte ve ilgili üretim tesislerine bildirilmektedir [71]. Bu sayede üreticiler sekonder frekans kontrolü için ayırmaları gereken kapasiteyi önceden planlayabilmektedir.

Türkiye elektrik piyasasında sekonder frekans kontrol hizmeti, geçerli sekonder frekans kontrol test sertifikasına sahip ve toplam kurulu gücü 30 MW ve üzeri olan üretim tesisleri veya bu tesislere ait üniteler tarafından sağlanabilmektedir. Hizmetin temini, TEİAŞ tarafından yürütülen ihale süreçleri aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Piyasa katılımcılarının SFK'ya katılımı zorunlu olmayıp, gönüllülük esasına dayanmaktadır. Şekil 3.10'da, 2023 yılına ait sekonder frekans kontrolü rezervlerinin saatlik ortalama miktarları ile bu rezervlere ilişkin ağırlıklı ortalama birim fiyatlar sunulmaktadır.



Şekil 3.10. Aylık ortalama SFK rezerv miktarı ve ağırlıklı ortalama fiyatı

4. MODELLEME VE YÖNTEM

Bu bölümde, iletim şebekesine bağlı bir batarya enerji depolama sisteminin primer frekans kontrolü hizmeti ve rüzgâr enerji santraline ait üretim dengesizliklerinin giderilmesi kapsamındaki işletimi için kullanılan yöntemler açıklanmaktadır. Çalışma, BEDS'in yalnızca PFK hizmeti sunduğu durum ile rüzgâr enerji santrali (RES) ile birlikte işletildiği iki farklı senaryo üzerinden ele alınmıştır.

BEDS'in işletimi DB, SOC_set ve DOD parametreleri üzerinden modellenmiştir. Bataryanın şebeke frekansındaki sapmalara verdiği aktif güç tepkisi, gerçek frekans ölçümleri kullanılarak tanımlanmış; batarya yaşlanması ise şarj–deşarj çevrimleri temel alınarak değerlendirilmiştir. RES ile birlikte işletim senaryosunda, gün öncesi bildirilen ve gerçekleşen üretim arasındaki farklardan kaynaklanan dengesizliklerin azaltılması amacıyla bataryanın esnekliği kullanılmıştır.

Tüm sistem MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve yıllık benzetimler gerçek frekans, üretim ve piyasa verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan optimizasyon yöntemleri ve karar değişkenleri bu bölümde tanımlanmış olup, elde edilen sonuçlar bir sonraki bölümde sunulmaktadır.

4.1. Enerji Depolama Sistemleriyle Primer Frekans Kontrol Düzenlemesi

4.1.1. BEDS'in PFK hizmeti tedarik sürecine katılımı

PFK tedarik süreçlerine katılmak isteyen piyasa katılımcıları, PFK rezerv tekliflerini rezervin tutulacağı zamandan 2 gün öncesinde saat 15.00'e kadar sunar ve kazanan piyasa katılımcısı ilgili saat dilimlerinde bildirdiği rezerv miktarını tutmakla yükümlü olur [70]. Gerçek zamanda, sistem frekansının düşmesine veya yükselmesine bağlı olarak yan hizmet biriminin aktif çıkış gücünün otomatik artırılması veya düşürülmesi yoluyla hizmete katılır. PFK hizmetine katılan piyasa katılımcısı aynı anda dengeleme mekanizması kapsamında bir piyasaya katılabilir, ancak PFK kapsamında ayırmış oldukları rezervleri dengeleme mekanizması kapsamında başka bir piyasaya teklif edemez [70]. 2023-2024 yıllarına ait saatlik toplam PFK değerleri incelendiğinde Primer Kontrol Rezerv miktarı aritmetik ortalama ile yaklaşık 250-300 MW aralığında değiştiği görülmektedir [72].

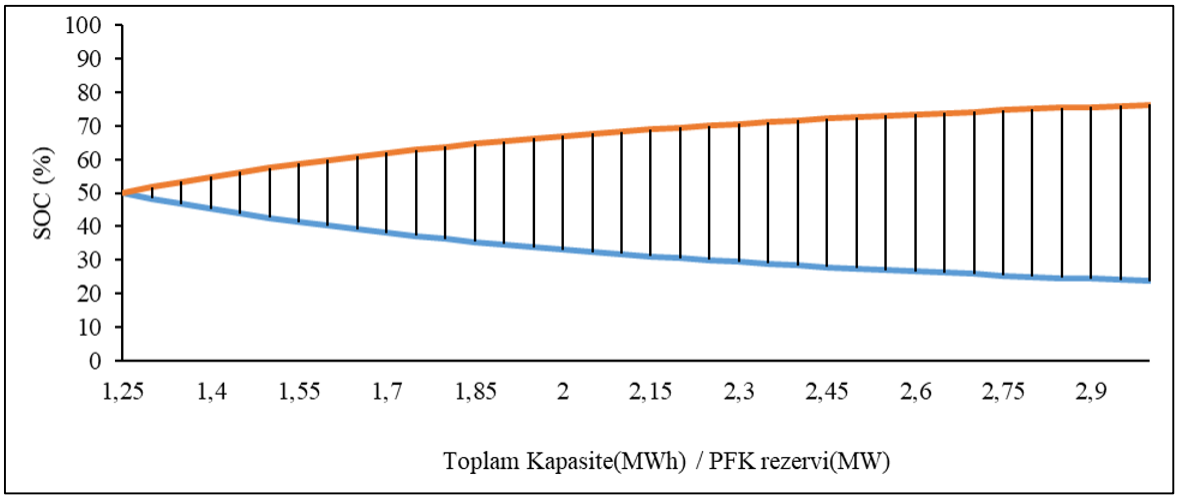
Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi tarafından ‘Elektrik Depolama Ünite ve Tesislerinin Yan Hizmetlerde Kullanılmasına Dair Teknik Kriterler ve Test Prosedürleri’ [73] yayımlanmış olup PFK hizmetine katılmak isteyen elektrik depolama ünite veya tesislerinin sağlamaları gereken kriterler aşağıda yer almaktadır:

- İletim sistemine bağlı ve kurulu gücünün 30 MW ve üzeri olması,
- Test sertifikasını TEİAŞ’a sunmuş olması,
- Rezervinin %50 sini en fazla 15 saniye içinde, tamamını en geç 30 sn içerisinde etkinleştirebilecek ve bu çıkış gücünü en az 15 dakika sürdürebilecek yeterlilikte olması,
- Hizmeti azami ±10 mHz’lik ölü bant ile sağlayabiliyor olması,
- Rezervi aşağı ve yukarı yönlü sağlayabilecek şekilde enerjisini hazır bulundurması,
- Rezervin sağlanacağı her bir saat için enerji kapasitelerinin, rezerv kapasitelerine oranının asgari 1,25 olması.

4.1.2. BEDS’in PFK hizmeti sağlaması

Önceki bölümlerde elektrik depolama sistemlerinin PFK hizmetini verirken sunulacak enerji rezervinin, şebeke frekans eğrisi normal aralıkta kaldığı sürece, teklif süresinin tamamı boyunca hazır olması gerektiği belirtilmişti. Söz konusu rezerv, pozitif ve negatif yönde ön yeterliliği alınmış yedek gücün tamamını en az 15 dakika süreyle sağlayabilecek kapasitede olmalıdır [74].

Normal frekans değişim sınırlarını aşmayacak şekilde izin verilen SOC seviyesi aralıkları, Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Bu aralıkların alt ve üst sınırları, batarya sisteminin kullanılabilir enerji içeriği ile ön yeterliliğe sahip PFK rezerv gücüne bağlıdır. Kayıplar göz ardı edildiğinde, BEDS'in PFK sağlayabilmesi için geçerli çalışma aralığı, sistemin toplam kapasitesi ile daha önce onaylanmış rezerv gücü arasındaki oranla sınırlanmaktadır.



Şekil 4.1. PFK hizmeti sunan BEDS'in SOC aralığı

Kayıplar ihmal edildiğinde, geçerli çalışma aralığının alt sınırı SOC_alt-limit Eş. 4.1 ve üst sınırı SOC_üst-limit ise Eş. 4.2 ile tanımlanır.

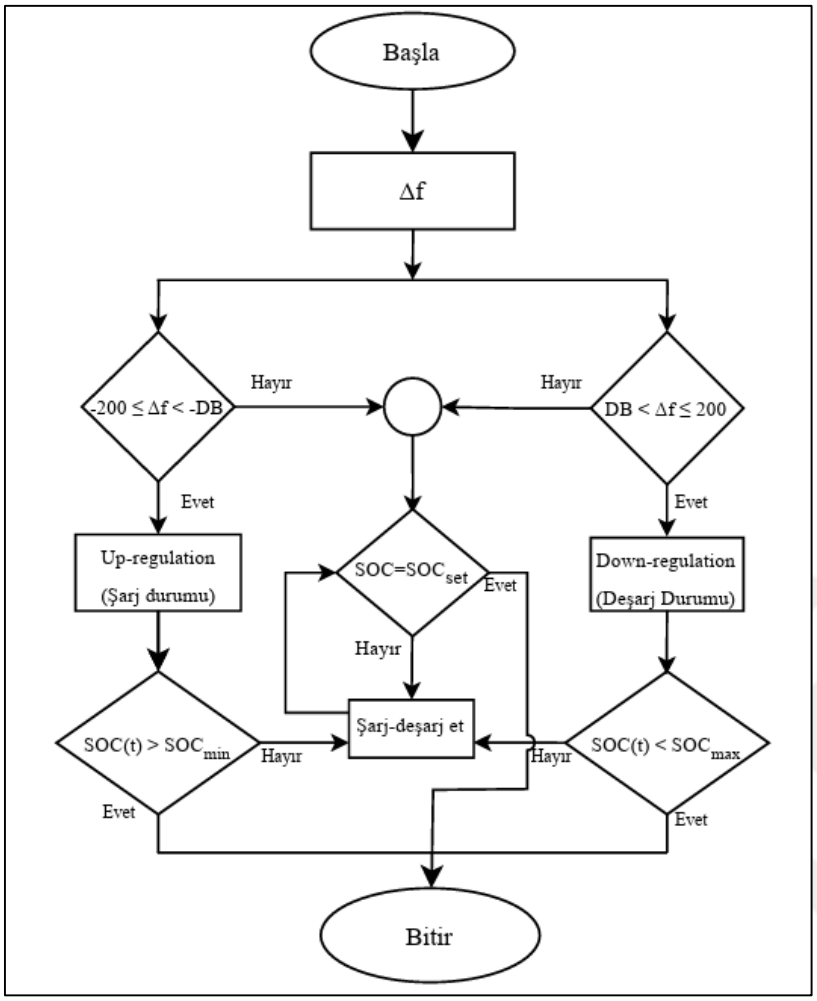
$$SOC_{alt_limit} = \frac{0{,}5*h*1{,}25-P_{PQ}}{Q} \quad (4.1)$$

$$SOC_{üst_limit} = 1 - \frac{0{,}5*h*1{,}25-P_{PQ}}{Q} \quad (4.2)$$

Burada Q toplam enerji kapasitesini, h sürdüreceği PFK hizmeti süresini ve PPQ ise rezerv gücünü temsil eder.

4.1.3. Kontrol stratejisi

PFK hizmeti kapsamında uygulanacak metot BEDS'lerin enerji yönetimini etkiler, dolayısıyla BEDS için farklı ömür süresi ve maliyetler ile sonuçlanır. Bu kapsamda, BEDS'e ait SOC kontrol stratejisi geliştirilmiş olup kontrol stratejisi Şekil 4.2'de sunulmaktadır. Sistem frekansı ölü bandın içerisinde ise, batarya herhangi bir tepki vermeyecek ve batarya doluluk oranını istenilen şarj seviyesine getirmek için etkinleştirecektir. BEDS kontrolü yalnızca şarj alt ve üst limitlerine ulaştığında hizmet devre dışı bırakılacak ve batarya istenilen SOC ayar noktasına geldiğinde şarj/deşarj edilerek hizmet yeniden başlatılacaktır. BEDS çalışma aralığı istenilen değer ya da rezerv yükümlülüğüne göre değişmektedir.



Şekil 4.2. BEDS PFK akış diyagramı

Bu çalışmada kullanılan benzetim modeli kapsamında, batarya SOC doluluk oranının takibi için tercih edilen yöntem Coulomb sayımı olmuştur [75]. Bu yöntemin tercih edilme nedeni, bataryanın Ah cinsinden kapasitesinin gerilim değişimlerinden bağımsız olması ve frekans kontrol rezervinin katılımının gerektirdiği güç aktivasyonundan türetilebilmesidir. SOC değeri, MATLAB/Simulink ortamında kurulan bir integrasyon bloğu aracılığıyla hesaplanmış olup batarya çıkış akımındaki değişim dikkate alınarak entegre edilir ve elde edilen değer, bataryanın toplam kapasitesine bölünerek yüzdelik SOC değeri elde edilir. Bataryanın SOC değeri enerji kapasitesine bağlı olarak hesaplanır.

$$\mathrm{SOC}_{out} = \mathrm{SOC}_0 - \frac{\int_0^t \Delta \mathrm{P}_{\mathrm{BEDS}} \mathrm{dt}}{3600 * \mathrm{Q}} \tag{4.3}$$

Burada, her bir bölge için zaman adımı başına (1 saniye) güç çıkışındaki değişiklik, bataryaya ait hız eğim değeri doğrultusunda hesaplanır. SOC_{out} ile SOC_0 bataryanın çıkıştaki

şarj durumu ile başlangıç durumunu, ΔP_{BEDS} ve Q değerleri ise anlık batarya gücünü ve batarya kapasitesini ifade etmektedir.

4.1.4. Döngü sayısı algoritmasi

Bir bataryanın ömrü, şarj-deşarj döngülerinin sayısı dahil olmak üzere bir dizi faktörden etkilenir; bozulmayı tahmin etmek özellikle şebeke ölçekli pil enerji depolama uygulamaları için önemlidir. Bu çalışmada, mikro döngülere tabi tutulan şebekeye bağlı BEDS için eşdeğer pil tam şarj-deşarj döngülerinin sayısını Gao ve diğerleri (2018) tarafından önerilen hızlı bir pil döngüsü sayısı metodu geliştirilerek MATLAB-Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir [76].

$$n_{cyc} = \left[\frac{\%\,\Delta SOC_{+}}{\%100} + \frac{\%\,\Delta SOC_{-}}{\%100} \right] / 2 \tag{4.4}$$

Eş. 4.4'te, n_{cyc} döngü sayısını, ΔSOC_{+} ve ΔSOC_{-} bataryanın PFK'ya katılımı esnasında bataryada meydana gelen yukarı ve aşağı yönlü SOC değişimini ifade eder. BEDS'in şebekeden enerji çekerken ya da şebekeye enerji verirken bataryadaki pozitif ve negatif yöndeki şarj değişiklikleri ayrı ayrı %100'e ulaştığında bir döngü oluşturur ve bu döngü bağımsız olarak her seferinde bir artırılır.

4.1.5. Kapasite azalması

Bataryanın zamanla bozulması, kullanım sürecinde kaçınılmaz olup uzun ömür gerektiren uygulamalarda kritik bir sorunsal teşkil etmektedir. Bataryalar çeşitli yaşlanma mekanizmalarına tabidir ve sistemin kapasite kaybı veya kapasite azalması birçok farklı faktörden etkilenir. Elektrokimyasal ve mekanik bozulma ve güç elektroniği aşınması, kullanım sonrasındaki performans kaybının değerlendirilmesinde önemli bir rol oynar. Bataryaların değişken kullanım koşullarında bozulmasını en aza indirmeye yönelik etkili bir pil yönetim stratejisinin tasarlanması ve uygulanması, sistem performansının sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır.

Bataryanın eskimesi üzerinde etkili olan başlıca parametreler arasında C oranı, çalışma sıcaklığı, amper-saat verimi, döngü sayısı, SOC çalışma aralığı ve DOD gibi birçok faktör yer almaktadır [76, 77]. Bu parametrelerin batarya ömrü üzerindeki etkilerini derinlemesine

anlamak, çalışma koşullarının optimize edilmesi yoluyla batarya ömrünün uzatılabilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Araştırmalar hem güç çevriminin hem de rölanti durumunun pillerin eskimesine katkıda bulunduğunu göstermiştir [12, 78]. Hem döngü sırasında hem de rölantide bekleme durumu bataryaların yaşlanmasına etki eden faktörlerdir. Lityum-iyon bazlı pillerin sınırlı bir ömrü vardır; döngü modelinden büyük ölçüde etkilenir ve lityum teknolojisine ve döngü koşullarına bağlı olarak genellikle 3 bin ila 10 bin döngü arasında değişir. Bu bağlamda, şebekeye bağlı BEDS paketlerinin ömrünün sonu için bir referans değeri olarak %20'lik bir kapasite azalmasının dikkate alınması yaygın bir uygulamadır. BEDS kullanım ömrünün sonu (End of life-EOL), nominal kapasitenin %80'in altına düştüğünde ulaşılır [79]. Takvim yaşlanması nedeniyle oluşan kapasite azalması C_{cal} ve döngüsel yaşlanma C_{cyc} nedeniyle oluşan kapasite azalması [78], yüzde (%) cinsinden sırasıyla Eş. 4.5 ve Eş. 4.6 numaralı denklemlere göre hesaplanmaktadır:

$$C_{cal} = 0{,}1723.\, e^{0{,}007388.SOC_l}\,.\, t^{0{,}8} \tag{4.5}$$

$$C_{cyc} = 0{,}021.\, e^{-0{,}01943.SOC_{avg}}\,.\, DOD^{0{,}7162}.\, nc^{0{,}5} \tag{4.6}$$

Burada SOC_avg bir döngü sırasındaki ortalama şarj seviyesini, DOD bir döngü sırasındaki döngü derinliğini, nc döngü sayısını, SOC_l bataryanın rölantide bekleme şarj seviyesi değerini ve t ay cinsinden depolama süresini temsil eder. Şebeke destek hizmetlerinde kullanılan lityum-iyon bataryalar, optimum performans ve uzun ömür sağlamak amacıyla genellikle iklimlendirme sistemleri aracılığıyla 25 °C çalışma sıcaklığında işletilmektedir. Bu nedenle verilen yaşlanma modelleri 25 °C depolama sıcaklığı için kapasite bozulmasını ifade etmektedir.

4.2. PFK Destekli Batarya Sistemlerinin Rüzgar Enerji Santrallerinde Dengesizlik Maliyeti Azaltimina Yönelik Uygulamasi

Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payının artmasıyla birlikte, üretim belirsizliği ve buna bağlı dengesizlik maliyetleri enerji piyasaları açısından daha belirgin hâle gelmiştir. Rüzgâr enerjisi gibi kesintili kaynakların üretim profilleri, kısa zaman ölçeklerinde önemli dalgalanmalar gösterebilmekte ve bu durum üretim programlarından sapmalara neden olmaktadır [80, 81]. Bu nedenle, yenilenebilir enerji tesislerine entegre

edilen batarya enerji depolama sistemleri (BEDS), hem sistem esnekliğinin artırılması hem de dengesizlik maliyetlerinin azaltılması açısından önemli bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Elektrik piyasasında gerçek zamanlı sistem dengesinin sağlanabilmesi için, üreticiler ve tedarikçilerin gün öncesinde taahhüt ettikleri üretim ve tüketim miktarlarının gerçekleşen değerlerle uyumlu olması gerekmektedir. Gün öncesinde yapılan bu planlamalar, öncelikle ikili anlaşmalar yoluyla oluşturulmakta; kalan dengesizlikler ise Gün Öncesi Piyasası (GÖP) ve Gün İçi Piyasası (GİP) aracılığıyla giderilmeye çalışılmaktadır. Ancak gerçek zamanlı işletimde üretim ve tüketim değerlerinin planlanan seviyelerden sapması durumunda sistemde dengesizlik oluşmakta ve bu durum piyasa katılımcıları için dengesizlik maliyetlerine yol açmaktadır.

Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği kapsamında, üretim veya tüketim programları ile gerçekleşen değerler arasındaki farklar belirli fiyatlama mekanizmaları aracılığıyla uzlaştırılmaktadır. Bu çerçevede, üreticilerin fazla üretim yapmaları durumunda uygulanacak satış fiyatı, gün öncesi piyasası piyasa takas fiyatı (PTF) ile dengeleme güç piyasası sistem marjinal fiyatının (SMF) asgari değeri esas alınarak belirlenmekte ve bu fiyata belirli bir oran indirimi uygulanmaktadır. Benzer şekilde, eksik üretim durumunda uygulanacak alış fiyatı ise PTF ve SMF değerlerinin azami olanı üzerinden hesaplanmakta ve bu fiyata ilave bir katsayı eklenmektedir. Bu yapı, pozitif ve negatif dengesizlikler için simetrik bir yaptırım mekanizması oluşturarak üreticileri üretim programlarına sadık kalmaya teşvik etmektedir.

Bu bağlamda, dengesizliklerin azaltılması yalnızca sistem güvenliği açısından değil, aynı zamanda piyasa katılımcılarının ekonomik performanslarının korunması açısından da kritik öneme sahiptir [82]. Dengesizlik maliyetlerinin azaltılabilmesi için üreticiler dengeden sorumlu gruplar, gün içi piyasa işlemleri veya esneklik sağlayan teknolojilerden yararlanabilmektedir. Özellikle hızlı tepki verebilen esneklik kaynaklarının, gerçek zamanlı dengesizliklerin yönetiminde etkin bir araç sunduğu görülmektedir.

Bu tez çalışmasının bu bölümünde, batarya enerji depolama sistemlerinin RES ile çalışarak hem PFK hizmetini kesintisiz biçimde sunma kabiliyeti hem de değişken üretim kaynaklı dengesizlikleri dengeleme potansiyeli ele alınmaktadır. Hibrit yapıdaki bu sistemin performansı, teknik yeterlilik ve ekonomik etkinlik boyutları birlikte değerlendirilerek

optimize edilmektedir. Amaç, rüzgâr üretimindeki belirsizliklerin sistem kârlılığı üzerindeki olumsuz etkilerini sınırlandırmak ve depolama sisteminin sunduğu esneklikten azami ölçüde faydalanmaktır.

Yenilenebilir enerji tesislerine bütünleşik depolama sistemlerinin kurulması, değişken üretim kaynaklı dengesizliklerin yönetilmesini mümkün kılmakla birlikte, yalnızca dengesizlik maliyetlerini azaltma amacıyla projelendirilen depolama tesislerinin ekonomik açıdan her zaman yeterli olmadığı görülmektedir. Bu nedenle, çalışmada ele alınan depolamalı üretim tesisinin PFK hizmeti sunarak ek gelir elde etmesi ve aynı zamanda üretim dengesizliklerinden kaynaklanan maliyetleri minimize etmesi hedeflenmiştir. Böylece depolama sistemi, yalnızca bir dengeleme aracı değil, çok amaçlı bir esneklik kaynağı olarak değerlendirilmiştir.

Bu kapsamda, gerçek zamanlı şebeke frekans verileri ile 2023 yılına ait rüzgâr üretim profilleri kullanılarak bir BEDS + RES hibrit enerji sistemi modellenmiştir. Geliştirilen matematiksel model, PFK hizmetinden elde edilen geliri en üst düzeye çıkarmayı, dengesizlik maliyetlerini en aza indirmeyi ve batarya yaşlanmasını sınırlamayı amaçlayan çok hedefli bir optimizasyon problemine dayanmaktadır. Modelde, batarya kapasitesinin büyük bir bölümü PFK hizmetine ayrılırken, kalan kapasite rüzgâr santralinin üretim dengesizliklerinin giderilmesi amacıyla kullanılmaktadır.

Modelleme sürecinde, rüzgâr üretim tahmin hatalarından kaynaklanan dengesizliklerin telafisi için şarj/deşarj kontrol stratejileri, batarya ömrü üzerindeki etkileri dikkate alan yaşlanma modelleri ve ölü bant genişliği, şarj eşik değerleri ve batarya kapasitesi gibi sistem parametreleri entegre edilmiştir. Tüm bu bileşenler, çok hedefli bir optimizasyon algoritması aracılığıyla birlikte değerlendirilmiş ve sistemin hem teknik performansı hem de ekonomik verimliliği iyileştirilmeye çalışılmıştır.

4.2.1. Dengesizlik algoritmasının çalışma prensibi

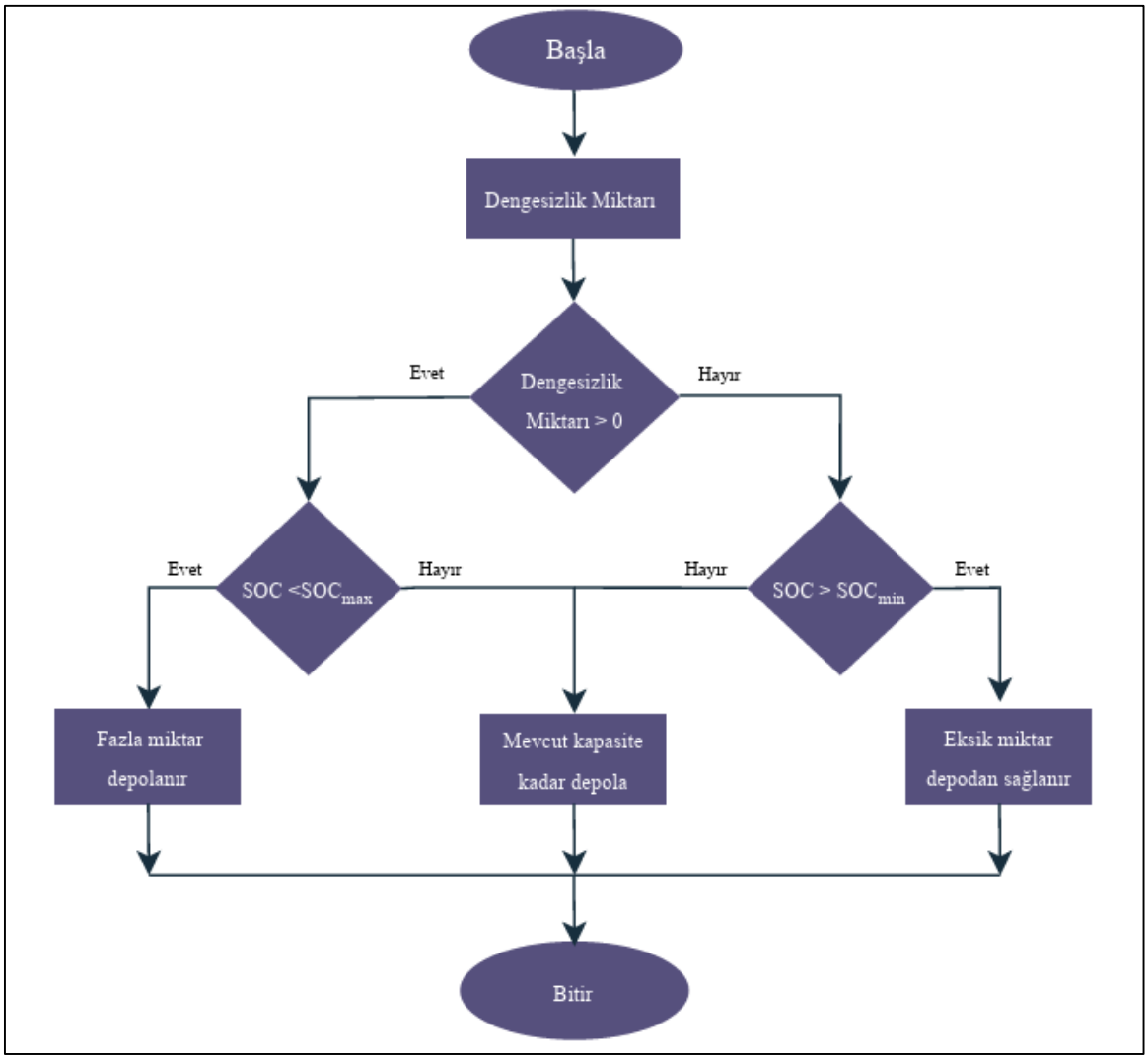
Elektrik üretiminde tahmin edilen değerler ile gerçek zamanlı olarak gerçekleşen üretim miktarları çoğu durumda tam olarak örtüşmemekte ve çeşitli nedenlere bağlı olarak sapmalar ortaya çıkmaktadır. Tahmin edilen üretim ile gerçekleşen üretim arasındaki bu fark, dengesizlik miktarı olarak tanımlanmaktadır. Dengesizliklerin etkin biçimde yönetilmesi,

elektrik sisteminin güvenli işletimi açısından olduğu kadar piyasa katılımcılarının maruz kaldığı ekonomik kayıpların sınırlandırılması açısından da büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizler doğrultusunda, dengesizliklerin azaltılması amacıyla batarya enerji depolama sisteminin belirli bir kapasitesi bu amaçla tahsis edilmiştir. Buna göre, depolama sisteminin bir bölümü dengesizlik yönetimine ayrılırken, kalan kapasite PFK hizmetinin sürdürülebilmesi için kullanılmıştır. Bu yapı sayesinde hem sistem esnekliği artırılmış hem de yan hizmet gelirleri ile dengesizlik maliyetleri birlikte ele alınabilmiştir.

Önerilen algoritma çerçevesinde, santralde enerji fazlası oluşması durumunda fazla enerji depolama sistemine yönlendirilmekte; depolama ünitesinde yeterli enerji bulunması hâlinde ise negatif dengesizlik durumlarında gerekli enerji şebekeye geri verilmektedir. Bu çift yönlü şarj–deşarj mekanizması sayesinde, üretimden kaynaklanan dengesizlikler belirlenen sınırlar içerisinde sönümlenmekte ve buna bağlı olarak dengesizlik maliyetlerinde anlamlı bir azalma sağlanmaktadır.

Dengesizlik miktarları, sistem işletimi sırasında sürekli olarak izlenmekte ve anlık olarak hesaplanan sapma değerleri doğrultusunda depolama ünitesinin çalışma durumu güncellenmektedir. Bu çalışmada tüm hesaplamalar saatlik zaman adımları esas alınarak gerçekleştirilmiş olup, depolama sisteminin dengesizlik yönetimindeki etkisi bu zaman çözünürlüğünde değerlendirilmiştir.



Şekil 4.3. BEDS'in dengesizlik kontrol stratejisi

Şekil 4.3'te, PFK hizmeti ile birlikte santral kaynaklı dengesizliklerin yönetilmesine yönelik depolama algoritmasının akış şeması sunulmaktadır. Algoritma, tahmin edilen üretim ile gerçekleşen üretim arasındaki farktan dengesizlik miktarının hesaplanmasıyla başlamaktadır. Hesaplanan dengesizliğin pozitif veya negatif olmasına bağlı olarak ilgili karar adımı uygulanmaktadır.

Pozitif dengesizlik durumunda, depolama sisteminin mevcut kapasitesi dikkate alınarak fazla üretim depolama ünitesine yönlendirilmektedir. Negatif dengesizlik durumunda ise, depolama sisteminde yeterli enerji bulunması hâlinde eksik üretim depolama ünitesinden karşılanmakta; yeterli enerji bulunmaması durumunda herhangi bir dengeleme işlemi gerçekleştirilmemektedir. Algoritma kapsamındaki tüm karar süreçleri saatlik zaman adımları esas alınarak değerlendirilmiştir.

Piyasa katılımcıları, gün öncesi piyasada bildirdikleri üretim programını takip eden gün gerçekleştirmekle yükümlüdür. Bildirilen programdan sapılması durumunda oluşan dengesizlik miktarı üzerinden uzlaştırma işlemi yapılmaktadır.

Dengesizlik pozitif yönde (fazla üretim) gerçekleştiğinde, fazla enerji miktarı Sistem Marjinal Fiyatı (SMF) ile Piyasa Takas Fiyatı (PTF) değerlerinden düşük olanı üzerinden ve 0,97 katsayısı uygulanarak hesaplanmakta ve ilgili tutar toplam gelire eklenmektedir. Dengesizlik negatif yönde (eksik üretim) gerçekleştiğinde ise eksik enerji miktarı SMF ile PTF değerlerinden yüksek olanı üzerinden ve 1,03 katsayısı uygulanarak hesaplanmakta ve bu tutar toplam gelirden düşülmektedir. Enerji dengesizlik fiyatı (EDT), üretim sapmasının yönüne bağlı olarak aşağıdaki şekilde belirlenmektedir:

$$EDT = \begin{cases} mak(PTF, SMF) * 1{,}03, & \text{Ü}retim < Tahmin \\ min(PTF, SMF) * 0{,}97, & \text{Ü}retim > Tahmin \\ 0 \quad\quad\quad\quad\quad\quad , & \text{Ü}retim = Tahmin \end{cases} \tag{4.7}$$

Üretim tahminleri ile gerçekleşen üretim arasındaki farktan kaynaklanan dengesizlik maliyeti aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$DM = EDT * (\text{Ü}retim - Tahmin) \tag{4.8}$$

Tanımlanan amaç fonksiyonu, PFK hizmetinden elde edilen gelirlerin artırılmasını teşvik ederken, aynı zamanda üretim tahminlerinden sapmalar nedeniyle oluşan dengesizlik maliyetlerini minimize etmeyi hedeflemektedir. Böylece model, hibrit RES+BEDS santralinin hem yan hizmetler piyasasında etkin şekilde yer almasını hem de enerji piyasalarındaki ekonomik performansının artırılmasını sağlayacak bir optimizasyon çerçevesi sunmaktadır.

Amaç fonksiyonu

Yıllık maksimum gelir: PFK hizmetinden elde edilen gelir, rüzgâr enerjisinin elektrik piyasalarındaki satışından sağlanan gelir ve üretim tahminlerinden sapmalar nedeniyle oluşan dengesizlik maliyetleri dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Bu kapsamda amaç fonksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$\text{maksimum } = PFK_{gelir} - DM \tag{4.9}$$

Burada PFK_{gelir}, PFK hizmetinden elde edilen yıllık geliri; DM ise üretim tahminleri ile gerçekleşen üretim arasındaki farktan kaynaklanan toplam dengesizlik maliyetini temsil etmektedir.

PFK hizmetinden elde edilen gelir, santralin PFK piyasasında sunduğu kapasite, rezerv yükümlülükleri ve enerji bazlı katkıları dikkate alınarak aşağıdaki şekilde modellenmiştir:

$$PFK_{gelir} = \sum_1^k (P_{PQ} * KB_{PQ}) - \sum_1^l (P_{PQ} * KB_{PQ} * 0{,}25) \pm \sum_1^m (P_{PQ} * 0{,}5 * EB) * b \tag{4.10}$$

Bu ifadede P_{PQ} santralin yükümlü olduğu PFK rezerv miktarını, KB_{PQ} PFK hizmeti sunarken oluşan kapasite bedelini, EB ise ilgili saatte SOC alt ve üst limitlere ulaştığında piyasaya satılan veya piyasadan alınan enerji bedelini, b değişkeni ise optimizasyon problemi içerisinde senaryo ayrımı yapılmasını sağlayan bir gösterge değişkeni olarak kullanılmıştır.

İkinci amaç fonksiyonu, BEDS'in işletimi sırasında ortaya çıkan yıllık kapasite azalmasının minimize edilmesidir. Batarya kapasite kaybı; şarj-deşarj çevrimleri, deşarj derinliği, ölü bant aralığı ve işletme SOC seviyesi gibi parametrelere bağlı olarak oluşmaktadır.

$$min_C = C_{cal} + C_{cyc} \tag{4.11}$$

Kapasite azalmasının minimize edilmesi, batarya ömrünün uzatılması ve uzun vadeli ekonomik sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, gelir maksimizasyonu ile batarya yaşlanması arasında bir denge kurulması hedeflenmiştir.

Kontrol parametrelerine ait sınırlar

Tanımlanan parametre sınırlamaları, optimizasyon probleminin karar uzayını oluşturmaktadır. Optimizasyon algoritması, bu karar uzayı içerisinde kalarak, amaç

fonksiyonunu maksimize eden kontrol parametreleri kümesini belirlemekte ve sistemin işletim performansını bu doğrultuda optimize etmektedir.

Frekans değişimi, mevzuatlarda tanımlanan bant aralıkları arasında tanımlanmıştır:

$$0 \leq \Delta f \leq 20 \tag{4.12}$$

Bataryanın doluluk oranı, güvenli işletim koşullarının sağlanabilmesi amacıyla alt ve üst sınırlar arasında tutulmaktadır:

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \tag{4.13}$$

Primer frekans kontrolü hizmetinin sürekliliğini sağlamak amacıyla, batarya başlangıç set değeri için çalışma aralığı belirlenmiştir:

$$\%40 \leq SOC_{set}(t) \leq \%60 \tag{4.14}$$

Batarya performasının maksimum düzeye çıkarılması amacıyla, deşarj derinliği ve şarj/deşarj oranları belirli bir aralık içerisinde tanımlanmıştır:

$$50 \leq DOD(t) \leq 100 \tag{4.15}$$

$$0{,}5 \leq C_{rate} \leq 1{,}5 \tag{4.16}$$

Tanımlanan bu sınırlamalar, PFK hizmet performansı, dengesizlik yönetimi ve batarya ömrü arasındaki dengeyi sağlamak amacıyla optimizasyon sürecinde birlikte değerlendirilmiştir.

4.3. Matlab/Simulink Ortamında BEDS Modelinin Oluşturulması

4.3.1. BEDS model yapısı ve SOC yönetimi

Bu çalışmada geliştirilen batarya enerji depolama sistemi (BEDS) modeli, şebeke frekansındaki değişimleri dikkate almakta ve buna bağlı olarak bataryanın şarj durumu (State of Charge – SOC) kontrolünü gerçekleştirmektedir. Modelde, sıcaklık etkileri ve detaylı

elektrokimyasal süreçler göz ardı edilerek sistemin frekans regülasyonu üzerindeki etkisi ön plana çıkarılmıştır.

Batarya sistemi, frekans sapmasının yönüne ve büyüklüğüne bağlı olarak şarj veya deşarj modunda çalışmakta ve belirlenen ölü band sınırları dışında primer frekans kontrolü hizmeti sunmaktadır. Bu kapsamda, şebeke frekansının nominal değerin üzerine çıkması durumunda batarya şarj moduna geçerek aşağı yönlü frekans regülasyonu sağlamakta; frekansın nominal değerin altına düşmesi halinde ise deşarj modunda çalışarak yukarı yönlü frekans regülasyonu gerçekleştirmektedir.

SOC kontrol mekanizması, bataryanın belirlenen alt ve üst sınırlar arasında güvenli bir şekilde işletilmesini sağlamakta ve bu sınırların aşılması durumunda bataryanın devre dışı kalmasını engelleyecek şekilde tasarlanmıştır. Böylece, model yalnızca frekans temelli bir kontrol yapısını esas almakta ve primer frekans kontrolü hizmetinin batarya enerji depolama sistemi aracılığıyla sağlanabilirliğini incelemeyi amaçlamaktadır.

Model, bataryanın kararlı durum esasına göre çalıştığını varsaymakta olup, batarya üzerinden akan enerji miktarını nicel olarak belirlemekte ve belirli bir zaman adımı boyunca bataryanın şarj durumundaki (State of Charge – SoC) değişimi güncellemektedir. Bu modellerde gerilim ve akım gibi elektriksel büyüklüklere doğrudan bir referans bulunmamakta; bunun yerine batarya, ideal olmayan davranışlar nedeniyle bir miktar enerji kaybına yol açan bir sistem olarak tanımlanmaktadır. Bu kapsamda, Enerji Durumu (State of Energy – SoE) aşağıdaki şekilde güncellenmektedir:

$$\mathrm{SOE}_{t+1} = \mathrm{SOE}_{\mathrm{t}} - \frac{\Delta \mathrm{E}_{\eta}}{\mathrm{E}_{\mathrm{n}}} \tag{4.17}$$

Burada E_{n}, BEDS'in nominal enerji kapasitesini; ΔE ise gerçek zaman adımındaki enerji değişimini ifade etmektedir. Modelde, verimin güce bağlı olduğu varsayılmakta olup, bataryaya enerji sağlandığında ΔE değeri verim ile çarpılmakta, bataryadan enerji çekildiğinde ise verime bölünmektedir.

Bu çerçevede, gidiş-dönüş verimi (ηRT), belirli bir çalışma oranı veya DOD için, deşarj sırasında sağlanan enerji ile şarj sırasında absorbe edilen enerji arasındaki oran olarak ampirik biçimde tanımlanabilmektedir. Gidiş-dönüş verimi sabit kabul edilebileceği gibi,

şarj/deşarj akımına veya gücüne bağlı olarak azalan bir fonksiyon şeklinde de ifade edilebilmektedir:

$$\mathrm{SOE}_{t+1} = 1 - \gamma(\mathrm{C_rate})^2 \tag{4.18}$$

C-rate, bir bataryanın deşarj edilme hızını ifade eden bir ölçüttür. C-rate, deşarj akımının, bataryanın nominal kapasitesini teorik olarak bir saat içerisinde sağlayacak akıma oranı olarak tanımlanmaktadır. Buna göre, 1C deşarj oranı, bataryanın anma kapasitesini bir saat içinde tamamen sağlayacağı anlamına gelmektedir. Bu çalışmada, C-rate'in enerji oranına eşit olduğu ve hücre veriminin talep edilen gücün bir fonksiyonu olduğu varsayılmıştır. Dolayısıyla model, her bir zaman adımında hücreye talep edilen gücü giriş olarak almakta ve hücrenin buna verdiği tepkiyi bu güç değerine bağlı olarak hesaplamaktadır [83].

Çalışma sırasında meydana gelen güç kayıplarını telafi etmek için, BEDS'in gerçek güç çıkışı her zaman şebeke tarafındaki talepten daha yüksek olmalıdır. Yani, bataryanın şarj (ηc) ve deşarj(ηd) sırasındaki gidiş-dönüş verimlilikleri de göz önüne alındığında gerçek güç(PNET) Eş.4.18'deki gibi belirlenir:

$$\mathrm{P_{NET}} = \begin{cases} \mathrm{PBEDS}.\eta\mathrm{c}\ , & \mathrm{P_{BEDS}} < 0 \\ \frac{\mathrm{P_{BEDS}}}{\eta_\mathrm{d}}, & \mathrm{P_{BEDS}} > 0 \end{cases} \tag{4.19}$$

Burada ηc ve ηd , sırasıyla hücrenin şarj ve deşarj süreçlerine ait değişken verim katsayılarını ifade etmekte olup, bu parametreler simülasyonda seçilen değişkenlere bağlı olarak hesaplanabilmektedir.

Batarya doluluk oranının (SOC) belirlenmesinde, uygulamada ve literatürde yaygın olarak kullanılan Coulomb sayımı yöntemi tercih edilmiştir [84, 85].

$$\mathrm{SOC}_{out} = \mathrm{SOC_0} - \frac{\int_0^\mathrm{t} \Delta \mathrm{P_{BEDS}} \mathrm{dt}}{3600 * \mathrm{Q}} \tag{4.20}$$

Bu ifadede 3600 katsayısı, birim dönüşümü sağlamak amacıyla MW cinsinden gücün MWh cinsine çevrilmesi için kullanılmaktadır. SOC güncellemesi, aşağıda verilen koşullu ifade doğrultusunda her saniye gerçekleştirilmektedir:

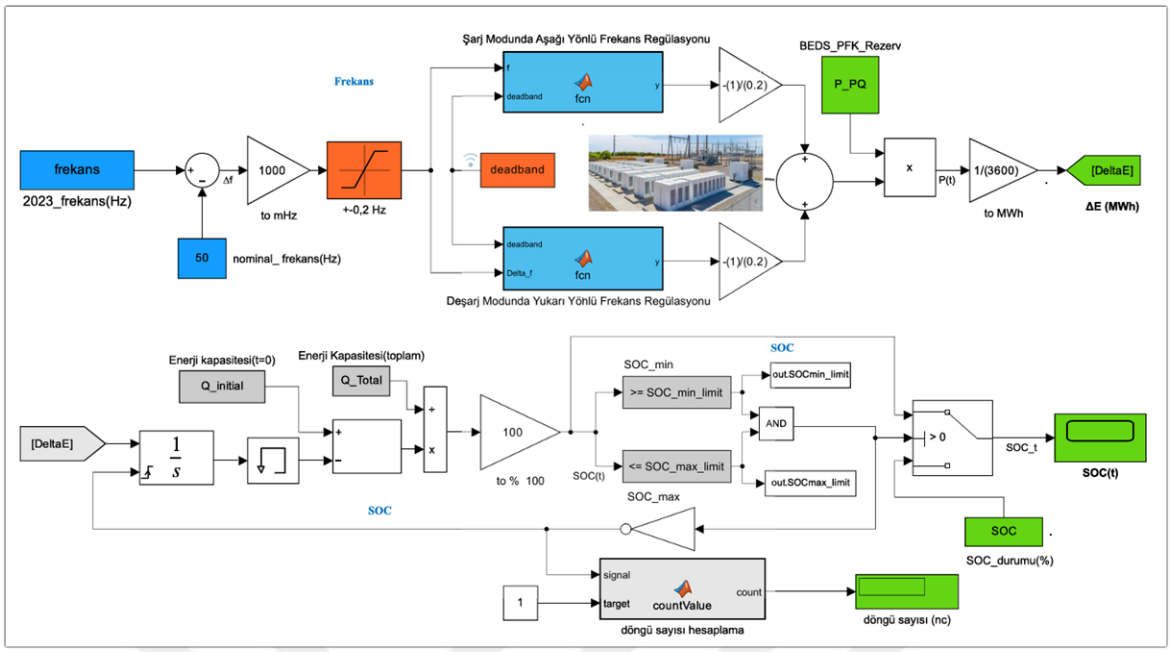
$$SOC(t) = \begin{cases} \mathrm{SOC(t-1)} + \Delta\mathrm{SOC(t)}\ , & \mathrm{SOC_{min}} < \mathrm{SOC(t-1)} + \Delta\mathrm{SOC(t)} < \mathrm{SOC_{max}} \\ SOC_set, & \text{Aksi halde} \end{cases} \quad (4.21)$$

Bataryanın şarj durumu, yalnızca mevcut SOC değerinin önceden belirlenen alt ve üst sınırlar arasında yer alması durumunda bir sonraki zaman adımına güncellenmektedir. SOC değerinin bu sınırların dışına çıkması halinde ise, bataryanın güvenli işletimini sağlamak amacıyla SOC değeri referans bir seviyeye (SOC_set) sabitlenmektedir. Bu yaklaşım, bataryanın fiziksel ve operasyonel sınırlarının aşılmasını önlemek amacıyla uygulanmış olup, primer frekans kontrolü sırasında SOC'un güvenli bir referans değerde tutulmasını sağlamaktadır.

4.3.2. Batarya enerji depolama sisteminin simulink tabanlı modellenmesi

Bu bölümde, önceki bölümlerde açıklanan matematiksel modeller ve kontrol yapıları doğrultusunda, bataryanın PFK hizmeti kapsamında vereceği tepki, enerji ve SOC değişimi, döngü sayısı, SOC alt-üst limitleri ve buna bağlı olarak değişen rezerv gücü MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur (Şekil 4.4). Bu kapsamda, depolama santralinin PFK hizmeti sunduğu durumlarda ortaya koyduğu tepkiler değerlendirilmiş olup, DB, SOC_set ve DOD parametreleri tanımlanarak model üzerinde konumlandırılmıştır.

Bu modelde, 100 MW/100 MWh kapasiteye sahip bir BEDS tanımlanmış olup, girdi verisi olarak Türkiye ulusal elektrik şebekesinden elde edilen 2023 yılına ait gerçek frekans ölçümleri kullanılmıştır. Modelde, giriş frekansının nominal frekans değeri olan 50 Hz'den sapmasına göre tanımlanan dB, frekans düşüş eğrisi ve batarya verimliliği dikkate alınarak bataryanın vermesi ya da çekmesi gereken güç miktarı ve PFK rezerv yükümlülüğüne bağlı olarak SOC değişimi kurgulanmıştır. Simulink ortamında geliştirilen bu modelde, BEDS'in frekans sapmalarına verdiği tepkiler, döngü sayısı, SOC takibi, şarj/deşarj karar mekanizması ve SOC limit kontrolleri tanımlanmıştır.



Şekil 4.4. PFK hizmeti için geliştirilen Simulink modeli

Şekil 4.4'te üst kısımda konumlanan frekans kontrol bloğu, gerçek zamanlı frekans ölçümlerinin nominal frekans değeri (50 Hz) ile karşılaştırılması sonucunda elde edilen sapma büyüklüğüne bağlı olarak bataryanın şarj ve deşarj kararlarını düzenlemektedir. Burada uygulanan ölü bant yapısı, belirlenen frekans değişimlerinde gereksiz enerji akışını önleyerek sistemin hem verimliliğini hem de kararlılığını artıran kritik bir unsur olarak dikkat çekmektedir. Alt kısımda yer alan SOC hesaplama ve limit kontrol bloğu, bataryanın anlık enerji durumunun matematiksel olarak izlenmesini sağlamakta ve SOC değerinin belirlenen alt/üst limitler arasında tutulmasını garanti etmektedir. SOC limit kontrol blokları aracılığıyla, bataryanın şarj seviyesi belirlenen aralığın dışına çıktığında sistem otomatik olarak enerji alışverişi yaparak bataryayı istenilen SOC seviyesine geri döndürmekte ve böylece model döngüsel şekilde işlemeye devam etmektedir. Bu limit kontrol mekanizması, bataryanın ömrünün korunması ve sistem güvenliğinin sürdürülebilirliği açısından önemli bir rol üstlenmektedir. Ayrıca döngü sayısının hesaplanması ve SOC durumuna bağlı olarak rezerv güç kapasitesinin belirlenmesi, modelin uzun dönemli performans değerlendirmelerinde kullanılabilirliğini güçlendirmektedir.

BEDS modeli MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Modellenen sistem aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır:

Frekans girişi

Bu çalışmada girdi olarak, 2023 yılının tamamında her saniye örneklenen Türkiye'deki bir yıllık frekans verileri kullanılmaktadır.

SOC sınırlama bloğu

Bu bloktaki pratiklik bakış açısına göre, kapasitenin yarısı, pil için maksimum şarj veya deşarj oranı olarak kabul edilir.

SOC hesaplama bloğu

Bu blok her saniyede bir güç girişi alır ve bunu her saniye için enerjiye dönüştürdükten sonra, pilin mevcut şarjını nominal miktarına bölerek her saniye için şarj durumunu hesaplar. Bu simülasyonda pilin başlangıç kapasitesi belirlenen şarj değerini dikkate alır.

Frekans droop kontrolü

Bu blokta, giriş frekansı ile nominal frekans (50 Hz) arasındaki sapma esas alınarak batarya hücresine ait güç referansı belirlenmektedir. Kontrol yapısı, frekans sapmasına duyarlı bir ölüband mekanizmasına dayalı olup, sistem yalnızca tanımlanan ölüband sınırlarının aşılması durumunda aktif hale gelmektedir.

Konvansiyonel üretim ünitelerinde yaygın olarak kullanılan sabit droop karakteristiğinden farklı olarak, bu çalışmada droop tabanlı bir kontrol uygulanmamıştır. Bunun yerine, batarya enerji depolama sisteminin primer frekans kontrolü kapsamında sağlayacağı güç tepkisi, ilgili sertifikasyon dokümanlarında belirtilen teknik gereklilikler doğrultusunda tanımlanan parametrelere göre belirlenmiştir. Bu yaklaşım, batarya sisteminin gerçek saha uygulamalarındaki çalışma prensibini yansıtmayı amaçlamaktadır.

İzin verme anahtarı

Bu blokta, frekans kontrol algoritması sonucunda elde edilen güç referansının işaretine bağlı olarak bataryanın çalışma modu belirlenmektedir. Güç referansının pozitif olması durumunda batarya deşarj modunda çalışmakta ve ilgili güç çıktısı sisteme iletilmektedir.

Güç referansının negatif olması halinde ise batarya şarj moduna geçmekte ve şebekeden enerji çekmektedir. Tanımlanan koşulların sağlanmaması durumunda batarya çıkışı sıfır olarak kabul edilmekte ve sistem pasif konumda tutulmaktadır. Bu yapı sayesinde bataryanın şarj ve deşarj modları net bir şekilde ayrıştırılmakta ve eşzamanlı çalışma engellenmektedir.

İnvertör kayıpları

Batarya enerji depolama sistemi ile şebeke arasındaki güç alışverişi sırasında invertör kaynaklı kayıplar dikkate alınmıştır. Bu amaçla, invertörün hem şarj hem de deşarj modlarında sabit bir verimle çalıştığı varsayılmıştır. Modelde invertör verimi %97 olarak alınmış olup, invertörün dinamik davranışını temsil etmek amacıyla 40 ms'lik bir zaman sabiti kullanılmıştır [86]. Bu yaklaşım, primer frekans kontrolü gibi hızlı dinamiklerin incelendiği çalışmalarda yeterli doğruluğu sağlarken model karmaşıklığını da sınırlı tutmaktadır.

Güç çıkışı

Modelde bataryanın güç çıktısı üç ayrı bileşen üzerinden izlenmektedir. Bunlardan ilki bataryanın şebekeye enerji sağladığı deşarj durumundaki pozitif güç çıktısını, ikincisi bataryanın şebekeden enerji çektiği şarj durumundaki negatif güç çıktısını temsil etmektedir. Üçüncü bileşen ise enerji depolama sisteminin net güç çıktısını göstermektedir. Bu ayrım sayesinde bataryanın çalışma modu, enerji akış yönü ve primer frekans kontrolüne katkısı detaylı olarak analiz edilebilmektedir.

4.4. Optimizasyon Yöntemleri

Optimizasyon, belirli kısıtlar ve amaçlar doğrultusunda bir problem için mümkün olan çözümler arasından en uygun olanın belirlenmesini amaçlayan bir yöntemler bütünüdür. Teknolojik gelişmelerle birlikte veri miktarının artması ve sistemlerin daha karmaşık hâle gelmesi, çözüm gerektiren problemlerin boyutunu önemli ölçüde genişletmiştir. Bu gelişmeler, yalnızca doğru çözümlerin değil, aynı zamanda hızlı ve etkin çözümlerin elde edilmesini de zorunlu kılmıştır. Bu nedenle optimizasyon, farklı disiplinlerde yoğun biçimde araştırılan temel bir çalışma alanı hâline gelmiştir.

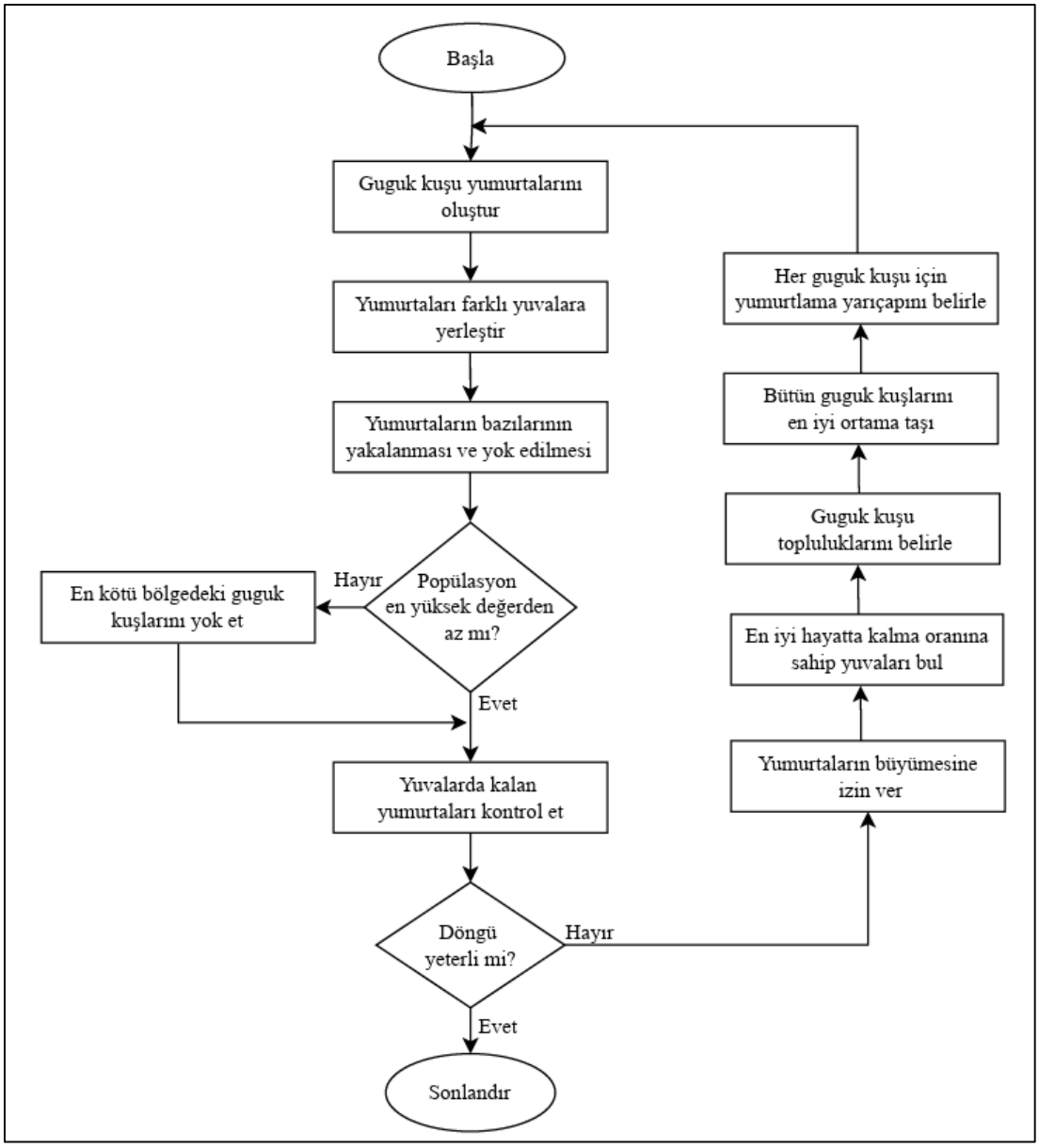
Problemlerin karmaşıklık düzeyinin artması, klasik optimizasyon yöntemlerinin birçok durumda yetersiz kalmasına yol açmış; bu durum sezgisel ve meta-sezgisel optimizasyon yöntemlerinin geliştirilmesini beraberinde getirmiştir. Sezgisel optimizasyon yöntemleri, kesin çözüm garantisi sunmamakla birlikte, özellikle büyük ve karmaşık problemlerde kabul edilebilir çözümlere kısa sürede ulaşılmasını sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında, Guguk Kuşu Optimizasyonu Algoritması (COA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Genetik Algoritmalar (GA) kullanılarak problemlerin çözümü gerçekleştirilmiştir. Seçilen bu yöntemler, farklı arama mekanizmalarına sahip olmaları nedeniyle karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmasına olanak sağlamaktadır.

4.4.1. Guguk kuşu optimizasyon algoritması

Guguk Kuşu Optimizasyon Algoritması, doğadan esinlenmiş bir metasezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma, guguk kuşlarının üreme stratejilerinden esinlenmiştir; özellikle başka kuşların yuvalarına yumurta bırakma davranışı temel alınmıştır. Ayrıca Levy uçuşları adı verilen rastgelelik temelli arama stratejisi ile çözüm uzayında etkili bir keşif-sömürü dengesi kurar [87, 88]. COA, klasik optimizasyon tekniklerinin zorlandığı karmaşık, çok boyutlu ve türevlenemez problemlerde yüksek başarı gösterir. Rastgelelik içermesine rağmen, uygun parametrelerle çalıştırıldığında küresel optimuma yakın sonuçlar elde edebilir. COA, dinamik değişikliklere karşı dayanıklılığı ve geniş uygulanabilirliği nedeniyle çok modlu hedef fonksiyonları için çeşitli optimizasyon algoritmalarından üstündür [89, 90].

Yang ve Deb (2009) tarafından önerilen guguk kuşu arama algoritması, Lévy uçuşu ile birlikte bazı guguk kuşu türlerinin zorunlu yavru parazit davranışına dayanmaktadır [87]. COA'nın temel varsayımlarına göre, her guguk kuşu rastgele seçilen bir konak yuvaya yalnızca bir yumurta bırakır; kalitesi düşük olan çözümlerin bulunduğu yuvalar bir sonraki nesle aktarılmazken, yüksek kaliteli çözümler korunur. Ayrıca her yumurtanın ev sahibi kuş tarafından keşfedilme olasılığı $P\alpha \in [0, 1]$ aralığında tanımlanmakta olup, keşfedilen yumurtalar yuva tarafından reddedilir ve sistem yeni bir çözüm üretme sürecine girer [91]. Guguk kuşu arama algoritmasında yuva çözüme atıfta bulunur ve guguk kuşunun uçma ve yeni konak yuvaları bulma süreci yeni çözümler üretme sürecine atıfta bulunur. Benzer şekilde, yumurtanın keşfedilme olasılığı çözümün terk edilme olasılığına atıfta bulunur. Uygun bir ev sahibi kuş yuvası aramak, guguk kuşu üreme yönteminin önemli bir parçasıdır.

Normalde, yuva arayışı, rastgele veya yarı rastgele bir biçimde gerçekleşen bir yiyecek arayışına benzer. Genel olarak, yiyecek ararken, hayvanlar belirli matematiksel fonksiyonlarda modellenebilecek yönleri veya yörüngeleri seçerler. En yaygın modellerden biri Lévy uçuşudur [92]. COA algoritması, yerel maksimum noktaları elde etmesini sağlayan ve aynı zamanda global maksimum güç noktasına ulaşmak için gereken izleme süresini kısaltan Lévy uçuşunu kullanmaktadır [93]. Matematiksel olarak, bir Lévy uçuşu adım boyutlarının belirli bir olasılık dağılımına sahip adım uzunlukları cinsinden tanımlandığı rastgele bir yürüyüştür [92] Bu algoritmada yuvalardaki her yumurta bir çözümü temsil etmekte ve potansiyeli yüksek olan çözümlerin tutulması amaçlanmaktadır [94].



Şekil 4.5. Guguk kuşu algoritması akış diyagramı

Şekil 4.5'te sunulan akış diyagramı, guguk kuşu algoritmasının temel yapı taşlarını ortaya koymaktadır. Algoritmanın uygulanabilmesi için ilk adımda, yapay bir yaşam alanı oluşturularak guguk kuşlarının bireyleri bu alana yerleştirilir. Bu aşamada, başlangıç popülasyonunu temsil eden guguk kuşu yumurtaları rastgele biçimde oluşturulur. Ardından, bu yumurtalar sistem üzerinde test edilir ve belirli bir hedef fonksiyon doğrultusunda değerlendirilir.

Algoritmanın sonraki adımında, ev sahibi kuşların bir bölümü yuvalarındaki yabancı yumurtaları fark ederek bunları sistemden çıkarır. Bu süreçte, algoritmanın hedeflediği en uygun çözüme ulaşma amacıyla düşük performans gösteren bireyler elenirken, yüksek başarı sağlayanlar popülasyonda kalır. Her iterasyon sonunda, mevcut çözümler tekrar değerlendirilir ve istenilen amaç fonksiyonuna ulaşılmışsa algoritma sonlandırılır. Aksi durumda, süreç yeni populasyonla devam eder. Bu yöntemde yaşam alanı, her biri bir çözüm adayını temsil eden bireylerden oluşan çok boyutlu bir vektör kümesi olarak tanımlanır ve matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$yaşam\ alanı = [\, X_1\ X_2\ X_3 \dots \dots \dots \dots\ X_{N_{var}}] \tag{4.22}$$

Burada, her X_i, bir bireyin parametre değerlerini temsil etmektedir. Oluşturulan habitat 1*Nvar boyutlu bir diziden meydana gelmektedir. Bu bireylerin her biri, ilgili uygunluk fonksiyonu aracılığıyla değerlendirilir ve başarı düzeyleri hesaplanır. Bu habitatın uygunluğu f_b kazanç fonksiyonu (kâr) ile değerlendirilir. Eş. 4.22'de kazanç fonksiyonu verilmiştir.

$$kâr = f_b\ (yaşam\ alanı) = f_b\ (\, X_1\ X_2\ X_3 \dots \dots \dots \dots\ X_{N_{var}}) \tag{4.23}$$

Algoritmanın daha etkin çalışabilmesi için, sistemdeki bireylerin sayısı ve her bireyin sahip olduğu yumurta sayısı dikkate alınarak bir yumurta matrisi oluşturulur. Bu matris, guguk kuşlarının her biri için bırakılacak yumurtaların dağılımını belirler. Matrisin her satırı bir bireyi, sütunları ise o bireyin bıraktığı yumurtaları temsil eder. Doğadaki gerçek guguk kuşları yumurtalarını gerçek yaşam alanlarından en uzun mesafeye kadar bırakırlar. Bu en uzun mesafe "Yumurtlama Yarıçapı" olarak adlandırılır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir [95]:

$$YY = \frac{mevcut\ guguk\ yumurta\ sayısı}{Toplam\ yumurta\ sayısı} * \ (\ var_{\text{üst}} - \ var_{alt}) \quad (4.24)$$

Burada $var_{\text{üst}}$ ve var_{alt} optimizasyon probleminde alt ve üst limitleri ifade eder. Her bir guguk kuşu, yumurtalarını Yumurtlama Yarıçapı aralığındaki bazı yuva sahibi kuşlarına yuvalarına keyfi olarak bırakmaya başlar [96].

COA, son yıllarda çeşitli mühendislik problemlerinde yüksek başarı göstermesiyle öne çıkmış ve özellikle doğrusal olmayan, çok boyutlu arama uzaylarında tercih edilen sezgisel bir optimizasyon aracı haline gelmiştir.

4.4.2. Parçacık sürü optimizasyonu

Parçacık Sürü Optimizasyonu, balık, kuş ve böcek gibi canlıların sürü hâlinde gerçekleştirdikleri kolektif hareketlerden esinlenilerek Kennedy ve Eberhart tarafından 1995 yılında ortaya konulan bir optimizasyon tekniğidir. Temelinde sürü zekâsı bulunan bu yaklaşım, doğadaki toplu davranışların özellikle besin arama ve güvenli hareket etme süreçlerinde ortaya çıkan uyumlu fakat kısmen rastlantısal manevraların, grubun hedefe daha hızlı ve etkili biçimde ulaşmasını sağladığı gözlemine dayanmaktadır. PSO, bu doğal süreçten hareketle bireyler arasında bilgi paylaşımını merkeze alan sosyal temelli bir optimizasyon yöntemi olarak yapılandırılmıştır [97].

Balık ve kuş sürülerinin sergilediği kolektif davranış örüntülerinden esinlenen PSO, farklı disiplinlerde ortaya çıkan doğrusal olmayan optimizasyon problemlerinin çözümünde yaygın şekilde kullanılan güçlü bir meta-sezgisel yöntemdir. Algoritmanın kuramsal temeli, özellikle kuş topluluklarının belirli avantajlar elde etmek amacıyla sürü hâlinde hareket ederken gösterdikleri sosyal etkileşim modeline dayanmaktadır. Sürü yapısının bireylerin çevresel kaynaklara ilişkin bilgiyi paylaşmasını mümkün kıldığı ve bu sayede grubun temel amacı olan besine en kısa sürede erişmeyi kolaylaştırdığı gözlenmiştir. PSO, bu doğal mekanizmayı hesaplamalı bir sürece uyarlayarak, evrimsel algoritmalardaki gibi düşük uygunluk değerine sahip bireylerin elenmesi yerine, tüm parçacıklar arasında sürekli bilgi alışverişi ve iş birliğini teşvik eden bir arama stratejisi benimser. Bu yaklaşım, ajanların belirli bir alanda hareket ederken karşılıklı mesafe koruyarak potansiyel küresel optimum noktalarına yönelmelerini sağlayan birleşme dinamiklerine dayanmaktadır [98]. PSO'nun önemli avantajlarından biri hem kavramsal yapısının hem de uygulama adımlarının görece

sade ve anlaşılır olmasıdır. Bunun yanı sıra, amaç fonksiyonunda gürültü veya belirsizlik bulunması durumunda dahi yüksek düzeyde dayanıklılık sergilemesi, algoritmayı gerçek dünya problemlerinin çözümünde son derece etkili hâle getirmektedir. Parçacık popülasyonunun sağladığı dağıtılmış örnekleme kapasitesi, PSO'nun karmaşık, çok modlu ve düzensiz hedef uzaylarını etkin biçimde taramasına olanak tanır. Bu özellik, belirsizlik içeren sistemlerin modellemesinde ve dinamik problemlerde algoritmaya önemli bir üstünlük kazandırmaktadır. Ek olarak PSO, birçok optimizasyon yöntemine kıyasla hızlı yakınsama davranışı sergileyerek optimum çözüme daha kısa sürede ulaşmayı mümkün kılmakta ve bu sayede hesaplama maliyetini önemli ölçüde azaltmaktadır [99].

PSO'da sürü, çok boyutlu arama uzayında hareket eden belirli sayıda parçacıktan oluşur. Her parçacık konumunu, hem kendi geçmişte elde ettiği en iyi çözümü hem de sürüdeki diğer parçacıkların performansını dikkate alarak günceller. Parçacığın yalnızca kendi deneyimlerine dayanarak yön değiştirmesi bilişsel etkiyi, sürünün ortak bilgisinden yararlanması ise sosyal etkiyi ifade eder. Bu süreçte parçacığın yeni konumu, mevcut konumu ve hızı ile kişisel en iyi konumu ve sürü liderinin konumu arasındaki mesafeler temel alınarak belirlenir. Parçacığın hangi bireylerden etkileneceğini belirleyen yapı komşuluk topolojisi olarak adlandırılır. PSO çalışmalarında çoğunlukla sosyal etkinin sürüdeki en iyi parçacıktan geldiği "tüm topoloji" kullanılsa da farklı etkileşim düzenleri sunan alternatif topolojiler de bulunmaktadır [100].

PSO'nun temel matematiksel yapısı, arama uzayında yer alan bir parçacık sürüsünün hareket dinamikleri ve güncelleme kurallarına dayanmaktadır. Her parçacığın hareketi, o anki konumu, sahip olduğu hız değeri ve şimdiye kadar elde ettiği en iyi konum bilgisi doğrultusunda belirlenir. PSO'da her bir parçacığın konumu ve hızı, optimizasyon problemindeki değişken sayısıyla aynı boyutta vektörler kullanılarak ifade edilir. n değişkenli bir minimize etme problemi ele alındığında,

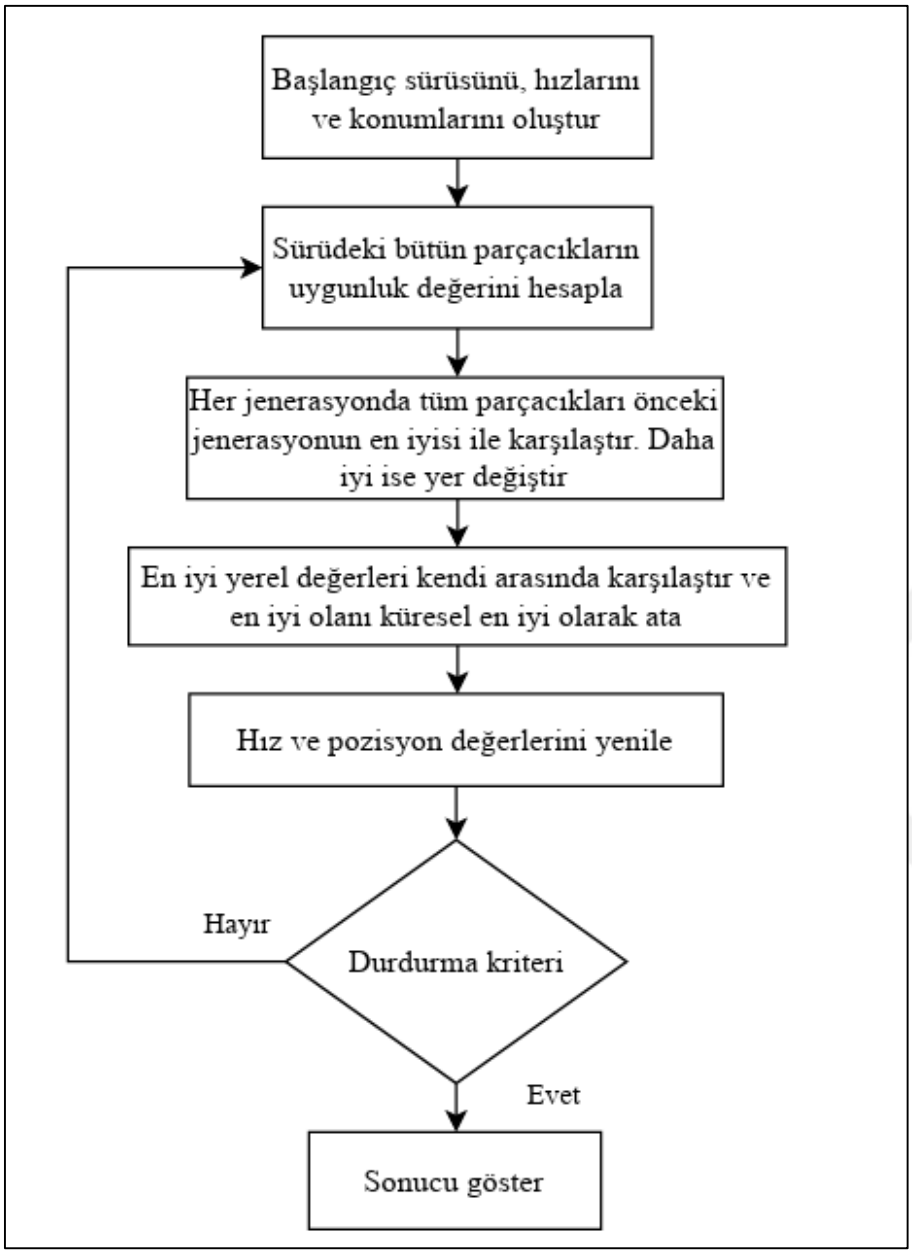
x_i ve v_i sırasıyla i'nci parçacığın konum ve hız vektörlerini göstermektedir. Bu bağlamda, i'nci parçacığın konumunun t+1 zaman adımındaki güncellemesi için kullanılan ifade Eş. 4.24'te sunulmuştur [101].

$$x_\mathrm{i}^{\mathrm{t}+1} = x_\mathrm{i}^{\mathrm{t}} + v_\mathrm{i}^{\mathrm{t}+1} \tag{4.25}$$

Bu ifadede x_i^t, i'nci parçacığın t zaman adımındaki konumunu; v_i^{t+1} ise aynı parçacığın t+1 anındaki güncellenmiş hızını ifade etmektedir. Her bir parçacığın hız bileşeni, mevcut hız değerine ek olarak, parçacığın şimdiye kadar elde ettiği en iyi konuma olan uzaklığı ve sürüdeki herhangi bir parçacığın ulaştığı en iyi konuma göre güncellenmektedir. Bu doğrultuda, i'nci parçacığın hızının t+1 zaman adımındaki güncellenmesini tanımlayan matematiksel ifade Eş. 4.25'te verilmiştir:

$$v_i^{t+1} = [\, w.\, v_i^{t+1} + \, c_1\, U_2\big(P_{best,i} - \, x_i^t\big) + \, \, c_2\, U_2(G_{best} - \, x_i^t) \tag{4.26}$$

Bu ifadede w, parçacığın önceki hızının mevcut hız üzerindeki etkisini belirleyen atalet ağırlığıdır. c_2 ve c_2, parçacığın kendi en iyi konumuna ve sürünün en iyi konumuna yönelimini kontrol eden bilişsel ve sosyal katsayılardır. U_1 ve U_2, 0–1 aralığında üretilen rastgele sayıları; $P_{best,i}$ ve G_{best} ise sırasıyla parçacığın kendi en iyi konumunu ve sürünün en iyi konumunu ifade eder. PSO'daki hız güncelleme denklemi, önceki hızın etkisiyle parçacığın kendi en iyi konumuna ve küresel en iyi konuma yönelim bileşenlerinin birleşiminden oluşur. Bu nedenle PSO iteratif bir yapıya sahiptir. Her iterasyonda parçacıkların konumları ve hızları güncellenir ve sürünün en iyi çözümü yeniden değerlendirilir. Süreç, belirlenen durma koşulu sağlanıncaya kadar devam eder. Şekil 4.6'da standart bir PSO algoritması için akış şeması gösterilmektedir.



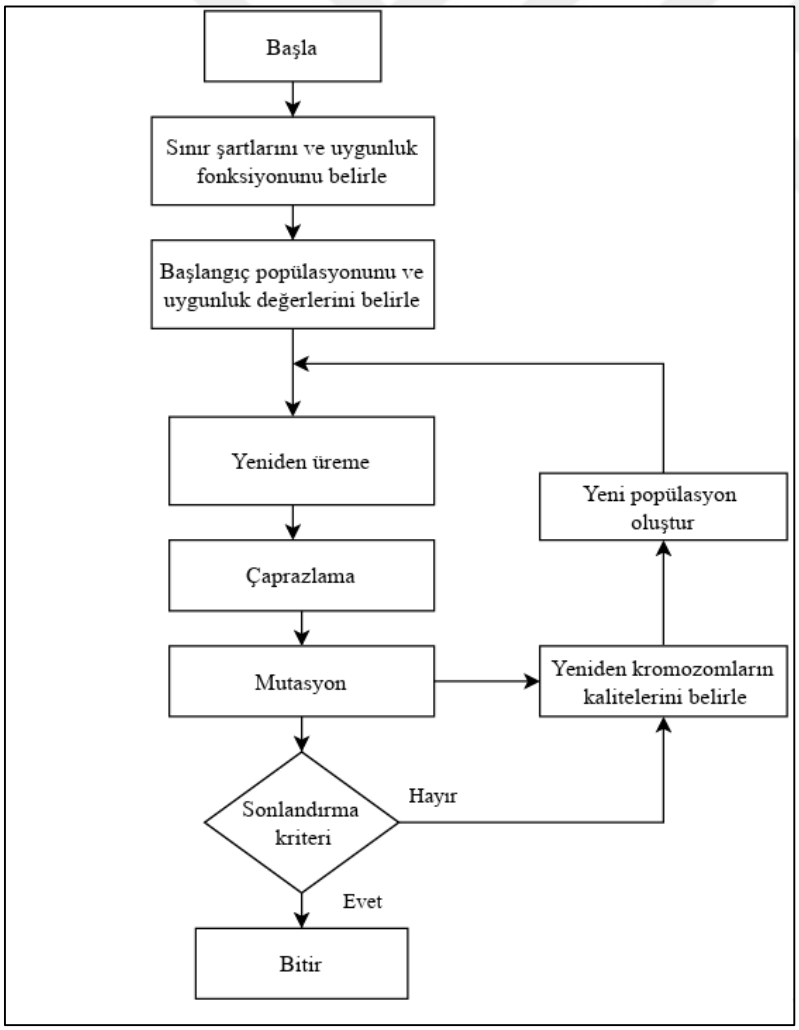
Şekil 4.6. PSO akış şeması

4.4.3. Genetik algoritma

Genetik algoritma , doğal seçilim mekanizmalarından esinlenen bir arama ve optimizasyon tekniği olup çözüm uzayında etkin bir şekilde gezinmeyi amaçlar [102]. Genellikle rastgele oluşturulan bir başlangıç popülasyonu ile sürece başlanır ve algoritma, bu popülasyonu nesiller boyunca geliştirerek optimizasyon probleminin hedef fonksiyonuna uygun çözümler üretir. Bu süreçte mevcut popülasyondaki bireylerden uygunluk değerlerine göre ebeveynler seçilir; ardından bu ebeveynlere çaprazlama ve mutasyon gibi genetik operatörler uygulanarak yeni bireyler oluşturulur. Üretilen bu yeni bireylerin, amaç fonksiyonu

açısından ebeveynlerinden daha yüksek performans göstermesi beklenir. GA, kullanıcı tarafından belirlenen yakınsama ya da durdurma kriteri sağlanıncaya kadar bu evrimsel döngüyü çok sayıda nesil boyunca tekrarlar.

Seçim aşaması, uygunluk değeri yüksek olan bireylerin bir sonraki nesle aktarılmasını sağlayarak popülasyonun daha nitelikli çözümler etrafında yoğunlaşmasına katkıda bulunur. Genetik algoritmalar temel olarak her iterasyonda üç ana işlem içerir: üreme (seçim), çaprazlama ve mutasyon [103-105]. Bu işlemler hem popülasyon içi çeşitliliğin korunmasını hem de çözüm uzayının etkin şekilde taranmasını sağlar. GA, genel sistem performansını iyileştirmek ve aşma, yükselme zamanı ve yerleşme zamanı gibi dinamik sistem parametrelerini optimize etmek amacıyla da geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Genetik algoritmanın genel işleyişini gösteren akış diyagramı Şekil 4.7'de sunulmaktadır [106].



Şekil 4.7. GA akış şeması

Genetik algoritmaların yapısı, kromozom gösterimi, seçim mekanizması, çaprazlama, mutasyon ve uygunluk fonksiyonunun hesaplanması gibi temel bileşenlerden oluşmaktadır. Algoritma, arama uzayının farklı bölgelerine yayılmış genetik çeşitliliğe sahip bireyleri temsil eden kromozomlardan meydana gelen rastgele bir başlangıç popülasyonunun (N büyüklüğünde) oluşturulmasıyla başlar. Popülasyondaki her birey, probleme özgü tanımlanan uygunluk fonksiyonu aracılığıyla değerlendirilir ve böylece her kromozomun çözüm kalitesi nicel olarak ölçülmüş olur.

Bu değerlendirme aşamasının ardından, doğal seçilim sürecini temsil edecek şekilde yüksek uygunluk değerine sahip bireylerin seçilmesine öncelik verilir. Seçim operatörü, popülasyondan uygunluklarına göre iki kromozom belirleyerek bu bireyleri çaprazlama işlemine hazırlar. Çaprazlama, ebeveynlerin genetik bilgilerini belirli bir kurala göre yeniden birleştirerek yeni çözümler (yavrular) üretir ve arama uzayının farklı bölgelerinde potansiyel olarak daha iyi çözümlerin keşfedilmesine olanak tanır.

Yeni üretilen bireyler üzerinde, popülasyon çeşitliliğini korumak ve algoritmanın yerel minimum noktalarına takılmasını engellemek amacıyla mutasyon operatörü uygulanır. Mutasyon, yavru kromozomun bir veya daha fazla geninin rastgele değiştirilmesi yoluyla gerçekleştirilir ve bu nedenle mutasyon oranı aşırı rastlantısallığın önüne geçmek için genellikle düşük tutulur. Mutasyona uğrayan yeni bireyler oluşturulmakta olan bir sonraki popülasyona eklenir.

Bu aşamalar, yeni popülasyon tamamen oluşuncaya kadar iteratif olarak tekrarlanır. Süreç boyunca çaprazlama ve mutasyon oranlarının dinamik biçimde ayarlanabilmesi, algoritmanın optimum çözümlere ulaşma başarısını artıran önemli bir özelliktir [106, 107].

Genetik algoritmalar, klasik optimizasyon yöntemlerinden dört temel noktada ayrılmaktadır [108]:

- GA, problemin parametreleri üzerinde doğrudan işlem yapmaz; bunun yerine bu parametrelerin kodlanmış temsilini kullanır.
- Arama sürecine tek bir başlangıç noktasından değil, bir popülasyon kümesinden başlanır; bu sayede algoritma yerel minimumlara saplanmadan daha geniş bir çözüm uzayını inceleyebilir.

- GA, türev bilgisine ihtiyaç duymaz; yalnızca amaç fonksiyonunun değerini kullanarak ilerler.
- Algoritmanın geçiş kuralları deterministik değil, rastlantısal yapıdadır ve bu özellik keşif yeteneğini artırır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

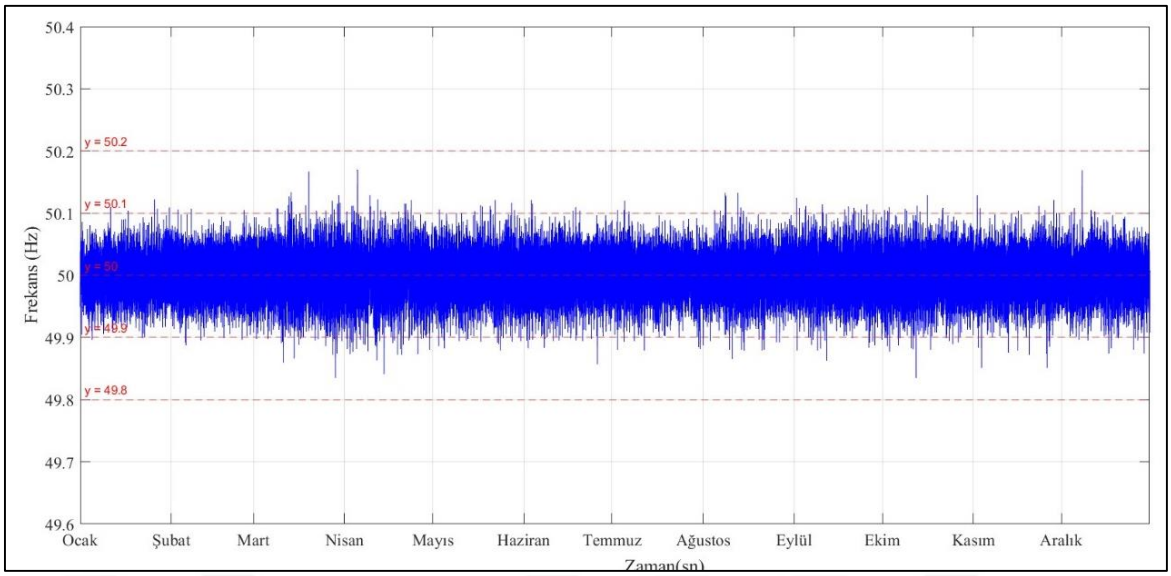
Bu çalışmada, şebekeye bağlı olarak işletilen bir mikroşebeke yapısı içerisinde batarya enerji depolama sistemi ve rüzgâr enerji santralinin teknik ve ekonomik performansı incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, sistemin yıllık ekonomik getirisinin maksimize edilmesi ve batarya kapasite azalmasının minimum seviyede tutulmasıdır. Analizlerde, Türkiye elektrik iletim sistemine ait frekans ölçümleri, rüzgâr santraline ait üretim verileri ile PTF ve SMF fiyatlarına ait veri setleri kullanılmıştır. Bu veriler Türkiye elektrik sistemi işletmecisinin veritabanından elde edilmiştir.

Bölüm 3'te anlatılan model çerçevesinde MATLAB/Simulink ortamında geliştirilen batarya depolama sistemi üzerinden optimizasyon yöntemleri uygulanmıştır. Çalışma iki farklı işletme senaryosu altında ele alınmıştır. İlk senaryoda, batarya santralinin yalnızca PFK hizmetine katıldığı durum incelenmiş; bu kapsamda DOD, SOC_set ve DB parametreleri üzerinden sistemin yıllık ekonomik getirisinin maksimize edilmesi ve batarya kapasite azalmasının minimize edilmesi hedeflenmiştir. İkinci senaryoda ise, batarya sisteminin rüzgâr enerji santrali ile işletildiği bir yapı değerlendirilmiş; PFK hizmetine ek olarak santralin üretimden kaynaklanan enerji dengesizliklerinin giderilmesi de analiz kapsamına dâhil edilmiştir. Bu senaryoda da aynı parametreler kullanılarak sistemin ekonomik ve teknik performansı yıllık bazda değerlendirilmiştir.

5.1. Batarya Enerji Depolama Sisteminin Primer Frekans Kontrolü Amaçlı İşletimi

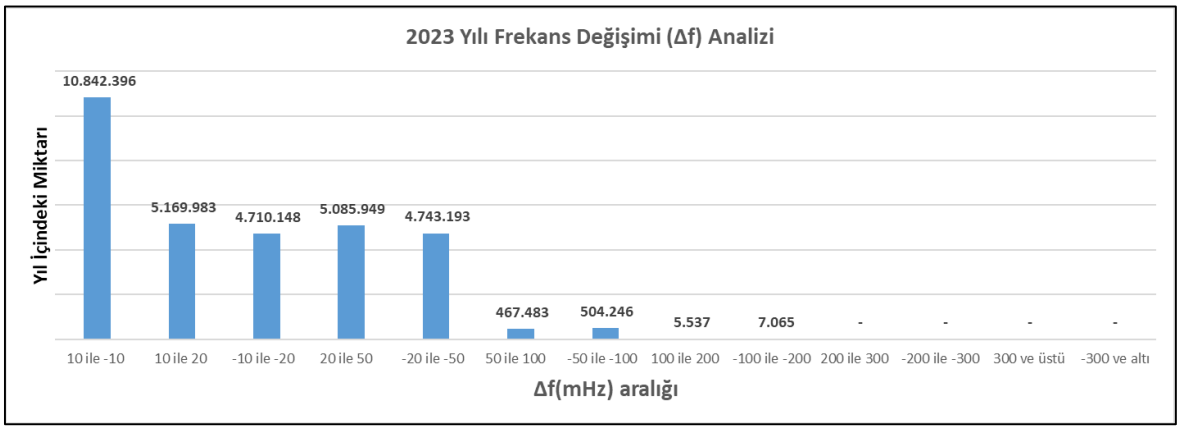
5.1.1. 2023 yılı şebeke frekansının analizi

Bu çalışmada, Türkiye elektrik iletim şebekesine ait 2023 yılı gerçek frekans ölçüm verileri kullanılmıştır. Şekil 5.1'de şebeke frekansının zaman alanındaki değişimi gösterilmektedir. İncelenen dönem boyunca frekansın genel olarak nominal değer olan 50 Hz etrafında seyrettiği, ancak kısa süreli ve rastgele sapmaların meydana geldiği görülmektedir. Frekansın büyük bir bölümde ±50 mHz aralığında kaldığı, buna karşın belirli zaman dilimlerinde bu sınırların dışına çıkan sapmaların oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum, iletim sisteminde anlık güç dengesizliklerinin varlığına ve sistemin dinamik karakterine işaret etmektedir.



Şekil 5.1. 2023 yılı şebeke frekans profili

Şekil 5.2'de ise frekans sapmalarının büyüklüklerine göre yıllık dağılımı sunulmaktadır. Dağılım incelendiğinde, küçük genlikli frekans sapmalarının yıl boyunca baskın olduğu, daha büyük genlikli sapmaların ise sınırlı sayıda gerçekleştiği görülmektedir. Özellikle ±10 mHz ve ±50 mHz aralıklarında yoğunlaşan frekans değişimleri, sistemin çoğunlukla nominal çalışma koşullarına yakın bir bölgede işletildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, daha geniş sapma aralıklarında meydana gelen frekans değişimleri, primer frekans kontrol mekanizmalarının sistem güvenliği açısından taşıdığı önemi ortaya koymaktadır.



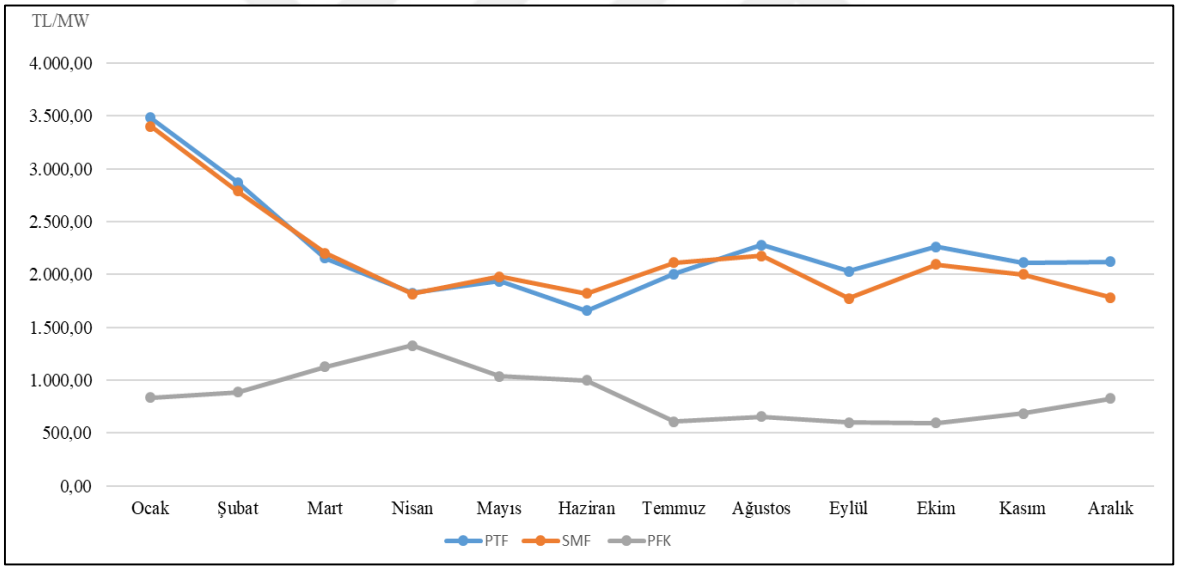
Şekil 5.2. 2023 yılı şebeke frekans değişimi (Δf) aralıkları

Elde edilen bu sonuçlar, batarya enerji depolama sistemlerinin (BEDS) primer frekans kontrolü hizmetindeki işletme davranışını doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, kullanılan

gerçek frekans verileri, kontrol parametrelerinin belirlenmesi ve BEDS'in PFK hizmetindeki performansının değerlendirilmesi açısından gerçekçi bir temel sunmaktadır.

5.1.2. 2023 yılı PFK-PTF-SMF fiyat analizi

2023 yılında SMF'nin aylık ortalaması, PTF'nin aylık ortalamasından daha düşük seviyede seyretmiştir. 2023 yılında PTF ortalaması 2 189,30 TL/MWh, SMF ortalaması ise 2 160,84 TL/MWh olarak hesaplanmıştır. 2023 yılında en yüksek aylık SMF ortalaması ocak ayında gerçekleşmiş olup, SMF 3 401,55 TL/MWh olarak hesaplanmıştır. 2023 yılında en düşük aylık SMF ortalaması 1 772,61 TL/MWh ile eylül ayında oluşmuştur. PFK ağırlıklı ortalama birim fiyatı ise 845,57 TL/MWh olmuştur. Maksimum PFK rezerv birim fiyatı 1 345,94 TL/MWh ile Nisan ayında, minimum PFK rezerv birim fiyatı ise 589,79 TL/MWh ile Ekim ayında gerçekleşmiştir.



Şekil 5.3. 2023 yılı aylık ortalama PTF-SMF-PFK fiyatları

5.1.3. PFK hizmeti kapsamında elde edilen gelirin değerlendirilmesi

Bu çalışmada, iletim sistemine entegre edilmiş, 100 MW güce ve 100 MWh enerji kapasitesine sahip, maksimum PFK rezervi sunabilecek şekilde tasarlanmış bir batarya enerji depolama sistemi modeli esas alınmıştır. Analizlerde kullanılan DOD, SOC_set ve DB parametreleri, uygulanan optimizasyon süreci sonucunda elde edilen ve sistemin yıllık ekonomik performansını maksimize ederken batarya kapasite azalmasını minimize eden optimal değerler olarak belirlenmiştir. Bu parametreler, literatürde ve endüstriyel

uygulamalarda kabul edilen işletme sınırları içerisinde yer almakta olup, sistemin PFK hizmetindeki temel işletme davranışını temsil etmektedir. Analizlerde GA, PSO ve COA olmak üzere üç farklı meta-sezgisel yöntem kullanılmıştır. Batarya SOC kısıtları gözetilerek enerji arz ve talep dengesinin korunması, PFK hizmetinden elde edilen yıllık gelirin maksimize edilmesi ve bataryanın yıllık kapasite bozulmasının en düşük seviyede tutulmasıdır.

Bu bölümde, tanımlanan amaçlar doğrultusunda gerçekleştirilen analiz sürecine ilişkin ayrıntılar ve elde edilen benzetim sonuçları sunulmaktadır. Çalışma kapsamında, batarya enerji depolama sisteminin PFK hizmetindeki performansını iyileştirmek amacıyla DB, SOC_set ve DOD parametreleri dikkate alınmıştır. Bu parametreler üzerinden sistemin yıllık ekonomik getirisinin maksimize edilmesi ve bataryanın yıllık kapasite azalmasının minimize edilmesi hedeflenmiştir. Belirlenen hedefler doğrultusunda, tanımlı parametre aralıkları içerisinde MATLAB/m-file ortamında geliştirilen kontrol algoritması kullanılarak kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar; yıllık döngü sayısı, toplam kapasite bozulması ve ekonomik performans göstergeleri açısından değerlendirilerek sistemin etkinliği ortaya konulmuştur.

Çalışma kapsamında ele alınan parametre aralıkları; DB için 0–20 mHz, DOD için %50–100 ve SOC_set değeri için %40–60 olacak şekilde tanımlanmıştır. Bu aralıklar belirlenirken, batarya enerji depolama sisteminin PFK rezerv yükümlülüğü ile bataryanın şarj alt ve üst sınırları, yürürlükteki mevzuat hükümleri dikkate alınmıştır. Analizlerde kullanılan BEDS, 100 MW nominal güce ve 100 MWh enerji kapasitesine (Çizelge 5.1) sahip olup, şarj ve deşarj oranları birim değer olarak kabul edilmiştir. Seçilen parametre aralıkları, sistemin hem teknik performans göstergeleri (kapasite azalması ve döngü sayısı) hem de ekonomik çıktıları (yıllık gelir) açısından dengeli bir değerlendirme yapılmasına imkân sağlamaktadır.

Çizelge 5.1. Optimizasyonda kullanılan parametreler

Parametre	Değer
BEDS gücü (MW)	100
BEDS Kapasitesi (MWh)	100
C-rate	1
PFK rezerv (MW)	0-100 MW
DOD (%)	50-100
SOC_set (%)	40-60
Ölüband(mHz)	0-20

Kullanılan tüm meta-sezgisel algoritmalarda, başlangıç popülasyon büyüklüğü (npop) 50 olarak belirlenmiştir. Buna göre, her algoritma için başlangıçta 50 farklı parametre kombinasyonu rastgele oluşturulmuş ve çözüm uzayına dağıtılmıştır. İlerleyen iterasyonlarda, söz konusu parametreler kullanılan algoritmanın güncelleme mekanizmasına bağlı olarak farklı oranlarda değiştirilmiştir. Bu güncelleme süreçleri, algoritmaların çözüme yakınsama hızını ve elde edilen sonuçların hassasiyetini doğrudan etkilemektedir. Bazı algoritmalar daha yüksek doğrulukta çözümler üretebilirken, yakınsama süreçleri görece uzun sürebilmekte; bazı algoritmalar ise daha hızlı yakınsama sağlasa da çözüm kalitesi açısından değişken sonuçlar verebilmektedir. Algoritmalarda kullanılan parametreler, yakınsama hızının artırılması ve çözüm hassasiyetinin iyileştirilmesi amacıyla belirlenmiştir. Bu kapsamda, popülasyon büyüklüğü 50 ve maksimum iterasyon sayısı 200 olarak seçilmiştir. Geliştirilen enerji yönetim algoritması, BEDS'in ilgili saat dilimindeki ekonomik koşullara bağlı olarak PFK hizmetini kesintisiz bir şekilde sunmasını hedeflemektedir. Bu doğrultuda sistem gerekli durumlarda şebekeden enerji talep edebilmekte veya şebekeye enerji verebilmektedir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen tüm benzetim ve analizler MATLAB R2022b yazılım ortamında gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar, Windows 10 işletim sistemine sahip, Intel Core i7 işlemcili ve 16 GB RAM kapasiteli bir bilgisayar üzerinde yürütülmüştür. Optimizasyon sürecinde kullanılan GA, PSO ve COA'ya ait parametreler Çizelge 5.2'de sunulmaktadır. Söz konusu parametreler, benzer problemlerde yaygın olarak kullanılan değerler esas alınarak belirlenmiş olup, elde edilen sonuçların literatürle uyumlu ve karşılaştırılabilir olmasını sağlayacak şekilde seçilmiştir.

Çizelge 5.2. Algoritma parametreleri ve değerleri

PSO	MaxIt=200	Toplam iterasyon sayısı
	nPop=50	Popülasyon sayısı
	w=1	Atalet katsayısı
	wdamp=0.99	Atalet katsayısı sönüm oranı
	c1=2,5	İvme oranı 1 (bireysel hız bileşeni)
	c2=2,5	İvme oranı 2 (sosyal hız bileşeni)
GA	MaxIt = 200	Toplam iterasyon sayısı
	nPop = 50	Popülasyon sayısı
	pC = 1	Çaprazlama oranı
	μ = 0,04	Mutasyon oranı
COA	MaxIt=200	Toplam iterasyon sayısı
	nPop=50	Popülasyon sayısı
	Pa =0,25	Yuva terk etme olsalığı
	Step size =1	Levy uçuşu adım büyüklüğü

Çizelge 5.2, bu çalışmada kullanılan PSO, GA ve COA meta-sezgisel algoritmalarına ait kontrol parametrelerini ve karşılık gelen anlamlarını göstermektedir. Tüm algoritmalar için maksimum iterasyon sayısı 200 ve popülasyon büyüklüğü 50 olarak belirlenmiştir. Bu ortak parametreler, algoritmalar arasında adil bir karşılaştırma yapılabilmesini sağlamak ve çözüm uzayının yeterli düzeyde taranmasına imkân vermek amacıyla seçilmiştir. PSO algoritmasında, ataleti temsil eden w = 1 değeri başlangıçta küresel aramayı destekleyecek şekilde belirlenmiş, ataletsel sönüm oranı wdamp = 0,99 ile iterasyonlar ilerledikçe yerel aramaya yönelim sağlanmıştır. Bireysel ve sosyal hız bileşenlerini temsil eden c1 ve c2 katsayıları 2,5 olarak seçilerek, parçacıkların hem kendi deneyimlerinden hem de sürü bilgisinden dengeli şekilde faydalanması amaçlanmıştır. GA için çaprazlama oranı pC = 1 olarak tanımlanmış olup, her iterasyonda bireyler arası genetik çeşitliliğin maksimum düzeyde korunması hedeflenmiştir. Mutasyon oranı μ = 0,04 seçilerek, çözüm uzayında yerel minimumlara sıkışmanın önüne geçilmesi ve arama sürecinin çeşitlendirilmesi amaçlanmıştır. Guguk Kuşu Algoritması'nda, yuva terk etme olasılığı Pa = 0,25 olarak belirlenmiş ve bu sayede kötü çözümlerin belirli bir olasılıkla sistemden elenerek yeni çözüm adaylarının üretilmesi sağlanmıştır. Levy uçuşu adım büyüklüğü 1 olarak seçilerek, çözüm uzayında hem yerel hem de küresel arama kabiliyetinin dengeli bir biçimde gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

İstatistiksel açıdan değerlendirme

Çizelge 5.3'te, batarya enerji depolama sisteminin PFK hizmetinden elde edilen yıllık gelirler açısından GA, PSO ve COA meta-sezgisel algoritmalarının istatistiksel karşılaştırması sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, algoritmaların ortalama, minimum ve maksimum gelir değerleri ile standart sapmaları dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde, GA en yüksek ortalama yıllık gelir değerine ulaşarak diğer algoritmalara kıyasla üstün bir performans sergilemiştir. GA için elde edilen ortalama gelir 442 077 726,12 TL olup, bu değer PSO ve COA algoritmalarının ortalama gelirlerinden belirgin biçimde yüksektir. Ayrıca GA'nın 565 296 153,00 TL ile en yüksek maksimum gelir değerine ulaşması, algoritmanın uygun koşullar altında yüksek getirili çözümler üretebildiğini göstermektedir. Standart sapma değerinin 76 991 652,34 TL olması ise GA'nın kabul edilebilir düzeyde bir değişkenliğe sahip olduğunu ve istikrarlı bir yakınsama davranışı sergilediğini ortaya koymaktadır.

PSO algoritması, 412 685 952,27 TL ortalama gelir değeri ile GA'nın gerisinde kalmakla birlikte rekabetçi bir performans sunmuştur. PSO'nun minimum ve maksimum gelir değerlerinin GA'ya yakın aralıklarda gerçekleşmesi, çözüm uzayında benzer bölgelerde sonuçlar üretildiğini göstermektedir. Ayrıca, 85 285 256,85 TL ile en yüksek standart sapma değerine sahip olması, PSO algoritmasının çalıştırmalar arasında daha değişken sonuçlar ürettiğini ve yakınsama kararlılığının görece daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır.

COA ise 387 756 549,80 TL ortalama gelir değeri ile üç algoritma arasında en düşük ekonomik performansı göstermiştir. Buna karşın, COA'nın 66 991 652,34 TL ile en düşük standart sapma değerine sahip olması, algoritmanın daha tutarlı ve kararlı sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Bu durum, COA'nın çözüm istikrarı açısından avantajlı olmakla birlikte, yüksek ekonomik getiri elde edilmesi bakımından sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır.

Genel değerlendirme sonucunda, GA, hem en yüksek ortalama ve maksimum gelir değerlerini üretmesi hem de makul düzeyde bir standart sapma sergilemesi nedeniyle bu çalışma kapsamında en başarılı optimizasyon yöntemi olarak öne çıkmaktadır. PSO algoritması daha değişken bir performans sergilerken, COA algoritması daha istikrarlı ancak görece düşük gelirli çözümler üretmiştir.

Çizelge 5.3. Optimizasyon algoritmalarının istatistiksel karşılaştırması

Algoritma	Ortalama Değer (TL)	Minimum Değer (TL)	Maksimum Değer (TL)	Standart Sapma (TL)
GA	442 077 726,12	163 050 484,59	565 296 153,00	76 991 652,34
PSO	412 685 952,27	153 586 584,28	542 391 542,20	85 285 256,85
COA	387 756 549,80	195 084 893,20	509 193 428,36	66 991 652,34

Çizelge 5.4'te sunulmuş olan optimizasyon sonuçları incelendiğinde, elde edilen en yüksek yıllık ekonomik getirilerin belirli parametre aralıklarında yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, BEDS'in primer frekans kontrolü kapsamındaki işletme davranışının kontrol parametrelerinin seçimine oldukça duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 5.4. Parametre değerleri

Algoritma	PFK_rezerv	PFK_kapasite	DB	DOD	SOC_set	C-rate
GA	78 MW	97,5 MWh	18-20 mHz	%97-99	%52-54	1

DB parametresi açısından değerlendirildiğinde, optimum çözümlerde DB değerinin ağırlıklı olarak 18–20 mHz aralığında seçildiği gözlemlenmiştir. Daha dar ölü bant değerleri, sistemin nominal frekanstan sapmalara daha erken ve daha sık müdahale etmesine olanak tanımaktadır. Ancak ölü bandın aşırı daraltılması, bataryanın daha sık devreye girmesine ve dolayısıyla kullanım yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır. Bu durumun uzun vadede batarya kapasite kaybını artırabileceğinden, elde edilen optimum DB aralığının ekonomik getiri ile batarya ömrü arasında dengeli bir işletme noktasını temsil ettiği söylenebilir.

DOD parametresi açısından değerlendirildiğinde, optimum çözümlerin büyük çoğunluğunda DOD değerinin %100'e yakın seviyelerde gerçekleştiği görülmektedir. Yüksek DOD değerleri, bataryanın daha geniş bir enerji aralığında çalışmasına imkân tanıyarak frekans regülasyonuna sağlanan güç katkısını artırmaktadır. Bu durum, özellikle primer frekans kontrolü gibi hızlı ve çift yönlü güç değişimlerinin gerekli olduğu hizmetlerde, yıllık ekonomik getirinin maksimize edilmesine olanak sağlamaktadır.

SOC_set parametresine ilişkin sonuçlar değerlendirildiğinde, optimum çözümlerde bu parametrenin genellikle %50'nin üzerinde seçildiği dikkat çekmektedir. Gerçek frekans ölçümleri incelendiğinde, şebeke frekansının yılın önemli bir bölümünde nominal değer olan 50 Hz'in altında seyrettiği, buna karşılık 50 Hz'in üzerinde kalan sürelerin görece daha sınırlı olduğu görülmektedir. Bu frekans dağılımı, BEDS'in PFK hizmeti kapsamında ağırlıklı olarak enerji veren (deşarj modunda çalışan) bir işletme davranışı sergilemesine neden olmaktadır. Bu bağlamda, SOC_set değerinin %50'nin üzerinde belirlenmesi, bataryanın aşağı yönlü frekans sapmalarına karşı yeterli enerji rezervine sahip olmasını sağlayarak, primer frekans kontrol hizmetinin sürekliliğini desteklemektedir.

Sonuç olarak, optimizasyon süreci DB, DOD ve SOC_set parametrelerinin, şebeke frekansının istatistiksel dağılımı ile birlikte oluşturduğu etkileşimli yapı üzerinden en uygun işletme noktalarını belirlemiştir. Elde edilen bulgular, BEDS'in primer frekans kontrolü hizmetinde maksimum ekonomik fayda sağlayabilmesi için; kontrol hassasiyeti, bataryanın aktif kullanım aralığı ve işletme şarj seviyesinin, frekansın ağırlıklı olarak düşük seyrettiği koşulları dikkate alan dengeli bir parametre kombinasyonu ile belirlenmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Batarya Enerji Depolama Sisteminin PFK hizmetindeki işletme performansının değerlendirilmesinde, SOC alt ve üst limitlerine ulaşma sıklığı önemli bir gösterge olarak öne çıkmaktadır (Çizelge 5.5). Özellikle SOC_min limitine ulaşma sayısının artması, bataryanın belirli zaman aralıklarında minimum izin verilen şarj seviyesine geldiğini ve bu koşullarda PFK hizmeti için ayrılan rezerv kapasitesinin tam olarak sağlanamayabileceğini göstermektedir. Bu durum, santralin PFK yükümlülüklerini yerine getirememe riskini artırmakta; piyasa işletim kuralları kapsamında PFK yükümlülüklerini yerine getirmeme bedeline maruz kalınmasına ve eksik kalan regülasyon kapasitesinin telafisi amacıyla piyasadan enerji temin edilmesine neden olabilmektedir.

Çizelge 5.5. Optimizasyon sonuçları

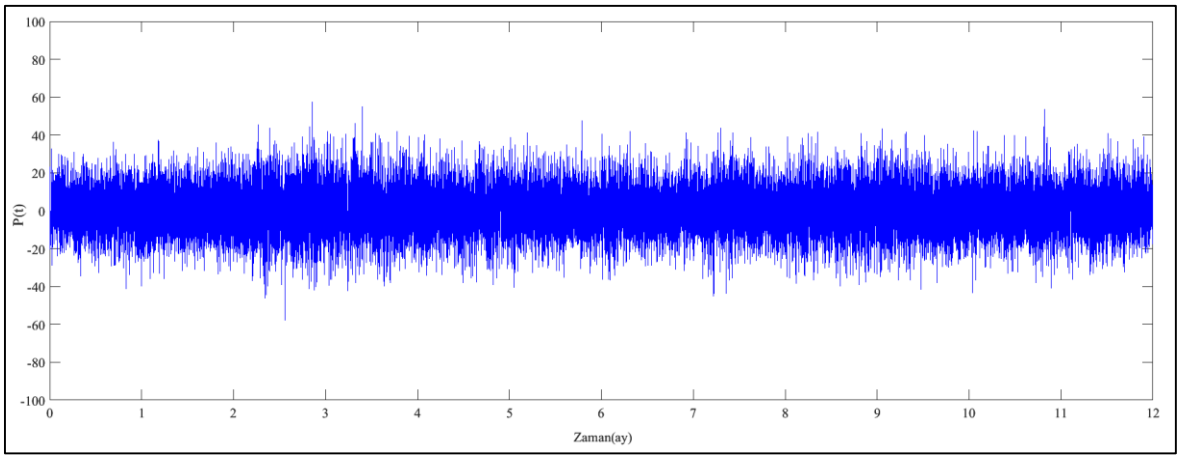
Algoritma	SOC_min_adet	SOC_max_adet	Döngü Sayısı
GA	65	54	168

Batarya enerji depolama sistemlerinin (BEDS) kullanım ömrünü belirlemede temel göstergelerden birisi de döngü sayısıdır. Döngü sayısı, bataryanın şarj ve deşarj süreçlerine maruz kalma sıklığını ifade etmekte olup, batarya yaşlanması üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Elde edilen sonuçlar, yüksek DB aralıkları ve yüksek DOD seviyelerinde bataryada gerçekleşen döngü sayısının azaldığını göstermektedir. Bu durum, bataryanın primer frekans kontrolü kapsamında daha seyrek kontrol hareketleriyle çalıştığını ve regülasyon katılım sıklığının sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır.

Buna karşılık, SOC_set değeri ile DOD'a bağlı olarak belirlenen SOC alt ve üst sınırları arasındaki mesafenin daralması, bataryanın daha sık devreye girmesine neden olmaktadır. Sistem frekansının büyük ölçüde nominal değer olan 50 Hz'nin altında seyretmesi, bataryanın ağırlıklı olarak enerji veren bir işletme davranışı sergilemesine yol açmakta ve bu durum SOC sınırlarına daha sık yaklaşılmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak, bu işletme koşullarında döngü sayısının arttığı gözlemlenmektedir. Döngü sayısındaki artış, bataryanın frekans regülasyonuna daha aktif katılım sağladığını göstermekle birlikte, batarya yaşlanmasını hızlandırabilecek bir etki de yaratabilmektedir.

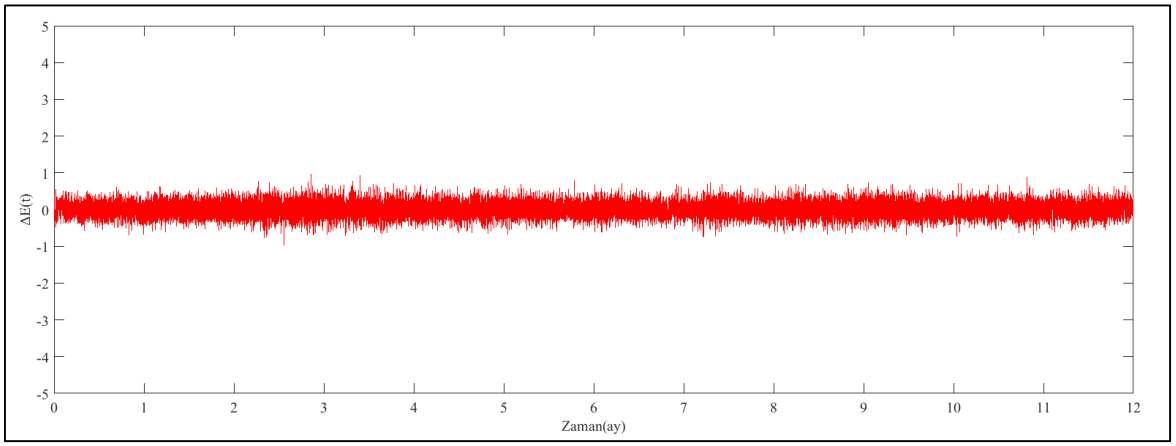
Bu bölümde sunulan tüm sonuçlar, meta-sezgisel optimizasyon süreci sonunda maksimum yıllık ekonomik getiriyi sağlayan optimal parametre seti kullanılarak elde edilmiştir. Optimizasyon sonucunda belirlenen DB aralığı, SOC_set ve DOD değerleri Simulink modeline uygulanmış; bu parametreler altında BEDS'in PFK hizmeti kapsamındaki zamansal güç, enerji ve batarya durumu davranışları ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Optimizasyon sonucunda elde edilen parametre seti altında BEDS'in şebekedeki frekans sapmalarına verdiği çıkış gücü tepkisi Şekil 5.4'te sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, BEDS'in büyük ölçüde kısmi yük seviyelerinde çalıştığını ve yalnızca belirlenen ölü bant aralığının dışına çıkan frekans sapmalarına tepki verdiğini göstermektedir. Frekans sapmalarının yıl boyunca çoğunlukla ±50 mHz sınırları içerisinde kalması, BEDS'in emre amade kapasitesinin tamamını sürekli olarak kullanmamasına neden olmuştur.

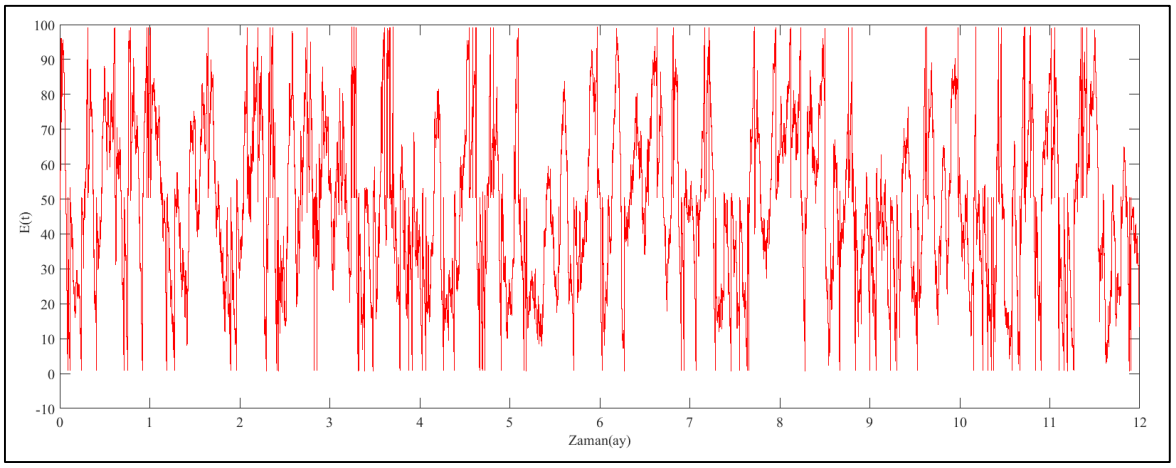


Şekil 5.4. BEDS çıkış gücü

BEDS'in frekans regülasyonu süresince gerçekleştirdiği enerji değişimi Şekil 5.5'te gösterilmektedir. Bataryanın kısa süreli ve düşük genlikli enerji alışverişleri ile PFK hizmetini sağladığı anlaşılmaktadır. BEDS'in toplam enerji durumu ise Şekil 5.6'da sunulmuştur. Enerji seviyesinin yıl boyunca belirlenen sınırlara ulaşması durumunda, geliştirilen kontrol stratejisi doğrultusunda ayarlanan set değerine tekrar geldiği ortaya koymaktadır. Bu davranış, bataryanın uzun süreli aşırı şarj veya deşarj koşullarına maruz kalmadığını ve sistemin güvenli çalışma bölgesinde tutulduğunu göstermektedir.

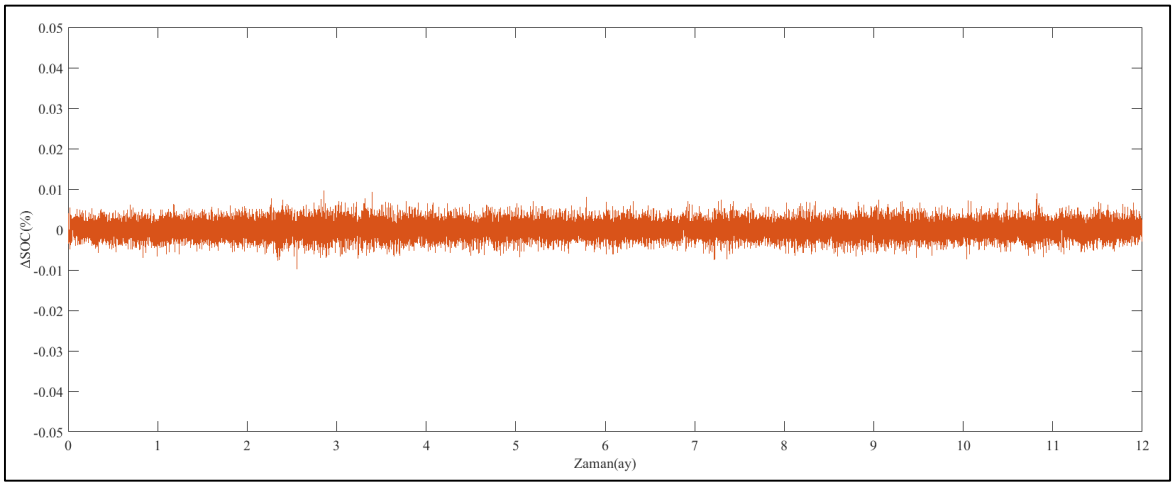


Şekil 5.5. BEDS enerji değişimi

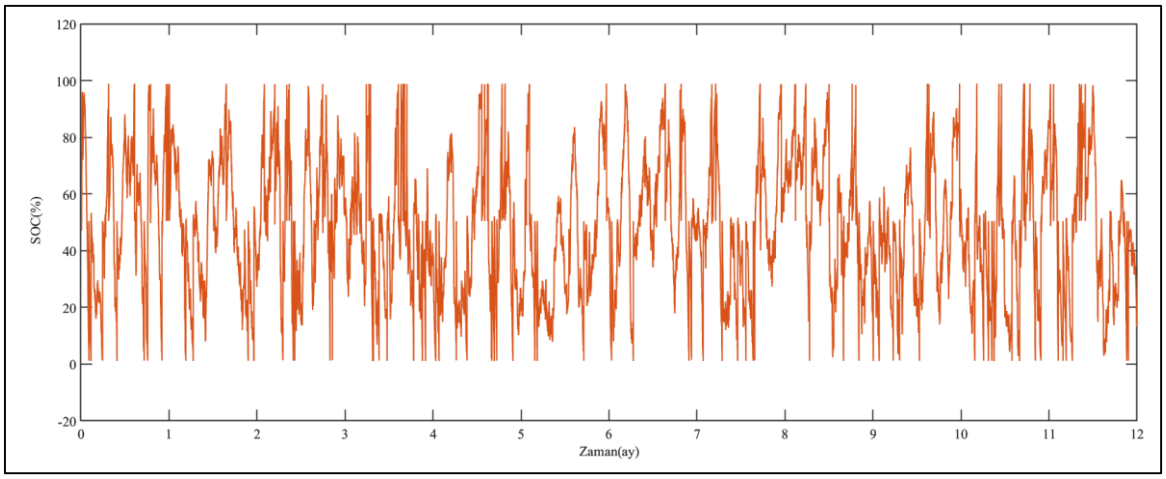


Şekil 5.6. BEDS enerji durumu

Bataryanın anlık SOC değişimleri Şekil 5.7'de, zaman içerisindeki SOC durumu ise Şekil 5.8'de sunulmaktadır. Optimizasyon sonucunda SOC_set değerinin %50'nin üzerinde seçilmesiyle, bataryanın çoğunlukla orta ve yüksek SOC seviyelerinde çalıştığı görülmektedir. Bu durum, frekansın yıl boyunca 50 Hz'in altında kaldığı sürelerin 50 Hz'in üzerinde kaldığı sürelere kıyasla daha baskın olmasıyla ilişkilidir. Dolayısıyla, bataryanın sistemde çoğunlukla enerji sağlayan tarafta konumlandığı ve bu nedenle daha yüksek SOC seviyelerinde tutulmasının operasyonel açıdan uygun olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 5.7. BEDS SOC değişimi



Şekil 5.8. BEDS SOC durumu

5.1.4. PFK hizmeti kapsamında oluşan kapasite azalmasının değerlendirilmesi

Bu çalışmada batarya enerji depolama sisteminin PFK hizmeti kapsamındaki işletimi sırasında ortaya çıkan yıllık kapasite azalması, yüzde (%) cinsinden ifade edilmiştir. Optimizasyon sürecinde, sistemin ekonomik performansı ile birlikte batarya ömrünü doğrudan etkileyen bu kapasite kaybının minimize edilmesi temel hedeflerden biri olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda, bataryanın işletme davranışını belirleyen DB, SOC_set ve DOD parametreleri karar değişkenleri olarak kullanılmıştır.

Bu doğrultuda, farklı metasezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılarak elde edilen yıllık kapasite azalması değerleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Amaç, PFK hizmeti kapsamında yüksek ekonomik getiri sağlanırken, batarya ömrünü doğrudan etkileyen kapasite kaybının mümkün olan en düşük seviyede tutulabildiği parametre kombinasyonlarının belirlenmesidir.

Çizelge 5.6'da batarya enerji depolama sisteminin PFK hizmeti sunarken bataryanın kapasite azalmasını GA, PSO ve COA meta-sezgisel algoritmalarının istatistiksel karşılaştırması sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, algoritmaların ortalama, minimum ve maksimum gelir değerleri ile standart sapmaları dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, kapasite azalmasının minimize edilmesi açısından GA algoritmasının daha avantajlı bir performans sergilediği görülmektedir. PSO algoritması ise kapasite azalması bakımından GA'ya yakın sonuçlar üretmiş olup, düşük minimum değerler

elde edilmesine rağmen ortalama kapasite kaybı açısından sınırlı ölçüde daha yüksek sonuçlar vermiştir.

COA algoritması ile elde edilen sonuçlarda ise kapasite azalmasının hem ortalama hem de maksimum değerler açısından daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca daha yüksek standart sapma değerleri, bu yöntemin kapasite bozunması açısından daha değişken ve öngörülemez sonuçlar ürettiğine işaret etmektedir. Bu durum, COA algoritmasının batarya ömrünün korunması hedefi açısından diğer yöntemlere kıyasla daha az uygun olduğunu göstermektedir.

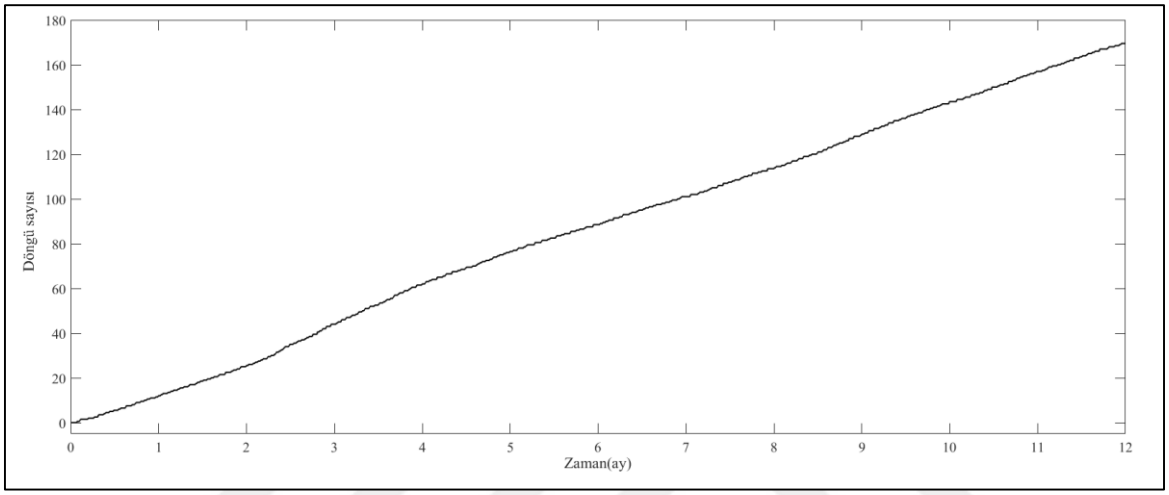
Genel olarak değerlendirildiğinde, kapasite azalmasının minimize edilmesi hedefi doğrultusunda GA algoritması öne çıkarken, PSO yöntemi rekabetçi bir alternatif olarak değerlendirilebilir. Bu bulgular, PFK hizmeti kapsamında yalnızca ekonomik kazancın değil, batarya ömrünün korunmasına yönelik göstergelerin de optimizasyon sürecinde dikkate alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 5.6. Optimizasyon algoritmalarının istatistiksel karşılaştırması

Algoritma	Ortalama Değer (%)	Minimum Değer (%)	Maksimum Değer (%)	Standart Sapma (%)
GA	3,45	3,027	3,832	0,23
PSO	3,47	3,017	3,654	0,24
COA	3,63	3,480	4,158	0,31

Elde edilen optimizasyon sonuçları, batarya kapasite azalmasının minimum seviyede gerçekleştiği çözümlerin belirli parametre aralıklarında yoğunlaştığını göstermektedir. Bu durum, BEDS'in PFK hizmeti kapsamındaki işletimi için bir optimum işletme bölgesinin tanımlanabileceğini ortaya koymaktadır. Analizler sonucunda, DB değerinin yaklaşık 18–20 mHz, SOC_set değerinin %50'nin üzerinde ve DOD değerinin yüksek seviyelerde seçildiği durumlarda kapasite azalmasının belirgin şekilde sınırlandığı tespit edilmiştir. DOD çoğunlukla üst sınıra yakın değerlerde görüldüğü, DOD'un bu aralıkta seçilmesi, bataryanın kullanılabilir doluluk bandının geniş tutulduğunu ve frekans regülasyonu sırasında oluşan enerji değişimlerinin daha rahat karşılanabildiğini göstermektedir. Böylece batarya, doluluk sınırlarına sıkça ulaşmadan çalışabilmekte ve kontrol kaynaklı ani zorlanmalar azaltılabilmektedir.

BEDS'in PFK hizmeti süresince gerçekleştirdiği döngü sayısının zamansal değişimi Şekil 5.9'da gösterilmektedir. Bir yıllık simülasyon süresi sonunda bataryanın yaklaşık 180 döngü gerçekleştirdiği belirlenmiştir. Görece düşük döngü sayısı, optimize edilen DB aralığı ve DOD değerlerinin batarya üzerinde aşırı çevrim yükü oluşturmadığını göstermektedir. Bu sonuç hem batarya ömrünün korunması hem de PFK hizmetinin uzun vadeli ekonomik sürdürülebilirliği açısından olumlu bir gösterge olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 5.9. BEDS döngü sayısı

Optimum işletme bölgesi, bataryanın küçük frekans sapmalarına karşı gereksiz şekilde devreye girmesini önleyerek enerji alışverişini azaltmakta ve aşırı SOC sınırlarına ulaşılmasını engellemektedir. Böylece, PFK hizmetinin gerektirdiği dinamik güç tepkisi sağlanırken, batarya yaşlanması kontrol altında tutulabilmektedir. Tanımlanan bu işletme bölgesi, hem ekonomik performansın korunması hem de batarya ömrünün uzatılması açısından BEDS'in sürdürülebilir işletimi için kritik bir referans sunmaktadır.

5.2. BEDS'in PFK ve Dengesizlik Yönetimi Kapsamında Birlikte İşletimi

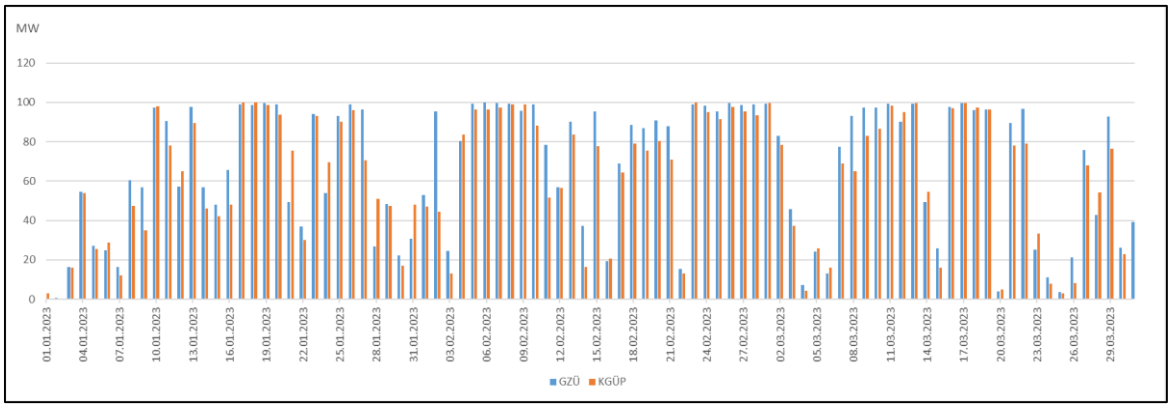
Bu bölümde, batarya enerji depolama sistemi ile RES'in birlikte işletildiği bir yapı ele alınmış ve sistemin hem PFK hizmetine katılımı hem de RES kaynaklı üretim dengesizliklerinin giderilmesi amacıyla optimize edilmesi incelenmiştir. Birinci bölümden farklı olarak, bu bölümde BEDS yalnızca PFK hizmeti sunmakla kalmayıp, aynı zamanda rüzgâr santralinin bildirilen ve gerçekleşen üretim miktarları arasındaki farktan doğan dengesizliklerin azaltılmasında da aktif rol üstlenmiştir.

Tüm benzetimler, yıllık zaman dilimini kapsayacak şekilde MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş ve sistemin gerçek işletme koşullarına mümkün olduğunca yakın bir yapı altında incelenmesi hedeflenmiştir. Bu bölümde uygulanan optimizasyon sürecinde, BEDS'in PFK rezerv yükümlülüğü korunurken, depolama kapasitesinin belirli bir kısmı rüzgâr santralinin dengesizlik yönetimi için ayrılmıştır. Böylece, bataryanın hem sistem frekansının dengelenmesine katkı sağlaması hem de dengesizlik maliyetlerinin azaltılmasına yönelik bir esneklik kaynağı olarak kullanılması mümkün olmuştur. Bu çift amaçlı kullanım, bataryanın enerji kapasitesinin daha etkin değerlendirilmesi ve sistemin toplam ekonomik performansı üzerinde belirleyici bir etki oluşturmuştur.

Birinci bölümde optimizasyon sonucunda elde edilen parametreler esas alınarak daha kapsamlı bir işletme yapısı analiz edilmiştir. Söz konusu yapıda, batarya enerji depolama sistemi, PFK hizmetinin yanı sıra rüzgâr enerji santralinin üretimden kaynaklanan dengesizliklerinin giderilmesinde de aktif olarak kullanılmıştır. Bu doğrultuda, santralin maruz kaldığı dengesizlik maliyetlerinin azaltılması temel hedeflerden biri olarak ele alınırken, dengesizlik giderimi sırasında bataryanın daha yoğun kullanılmasıyla ortaya çıkabilecek kapasite azalması da dikkate alınmıştır. Bu kapsamda, rüzgâr santraline ait yıllık dengesizlik miktarının mümkün olan en yüksek oranda karşılanabilmesi amacıyla, depolama santralinin PFK hizmeti ile dengesizlik yönetimi arasında tahsis edilecek rezerv miktarı ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Geliştirilen GA tabanlı model, bir yandan dengesizlik maliyetlerini minimize ederken, diğer yandan PFK gelirlerini maksimize edecek şekilde çok amaçlı bir optimizasyon yaklaşımı sunmaktadır.

5.2.1. Rüzgar santralinin analizi ve dengesizlik miktarinin seçimi

Trakya bölgesinde yer alan ve iletim şebekesine bağlı bir rüzgâr enerji santraline ait 2023 yılı gün öncesi piyasasında bildirilen üretim değerleri ile gerçek zamanlı gerçekleşen üretim verileri kullanılmıştır. Rüzgâr santralinin ilgili yıl boyunca gerçekleşen üretimi ile KGÜP kapsamında bildirilen üretim değerleri arasındaki farklar Şekil 5.10'da sunulmaktadır. Analiz edilen dönem boyunca, bildirilen ve gerçekleşen üretim değerleri arasındaki dengesizlik miktarının zaman içerisinde değişkenlik gösterdiği görülmektedir.



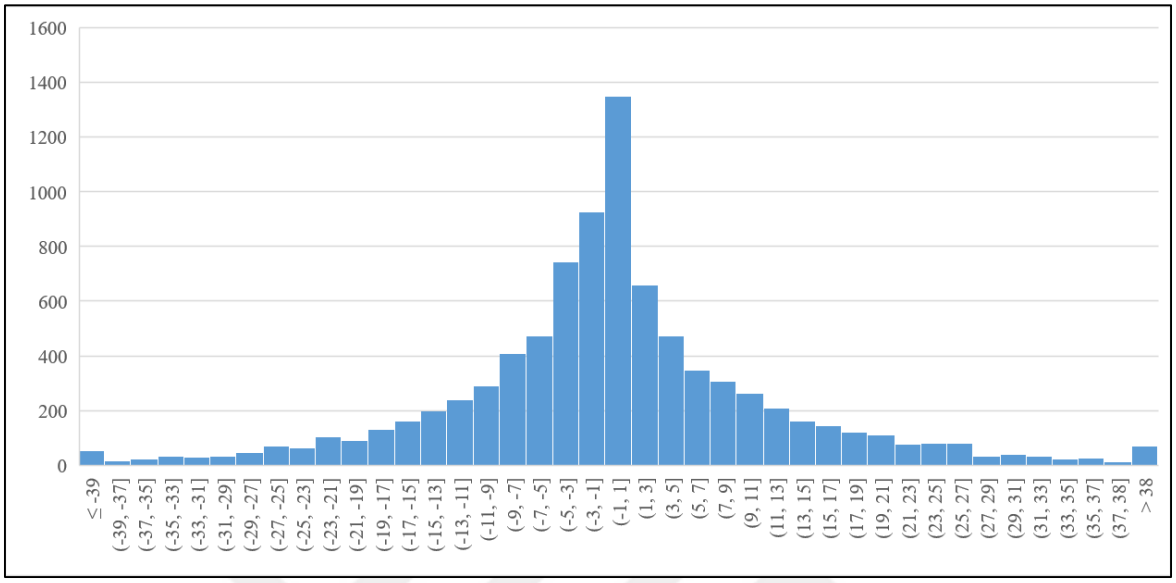
Şekil 5.10. RES için gerçek zamanlı üretim ve KGÜP karşılaştırması

Elde edilen sonuçlar, dengesizlik miktarının büyük bir bölümünün 0–8 MW (Şekil 5.11) aralığında gerçekleştiğini, ancak belirli zaman dilimlerinde bu aralığın dışına çıkan sapmaların da meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, rüzgâr santrallerinin doğası gereği üretim tahminlerindeki belirsizliklerden kaynaklanan anlık güç dengesizliklerinin iletim sistemi üzerinde önemli etkiler oluşturabildiğini göstermektedir. Özellikle kısa zaman ölçeklerinde ortaya çıkan bu sapmalar, iletim sisteminin dengede tutulmasını zorlaştırmakta ve dengesizlik maliyetlerinin artmasına neden olabilmektedir.

Bu tür üretim sapmaları, rüzgâr santrallerinin gün öncesi piyasasında taahhüt ettikleri üretim miktarları ile gerçek zamanlı üretimleri arasındaki farkların artmasına yol açmakta ve bu durum santral için dengesizlik maliyetlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Özellikle bildirilen üretimin altında veya üzerinde gerçekleşen üretimler, ilgili piyasa mekanizmaları kapsamında cezai fiyatlandırmalara tabi tutulmakta ve santralin ekonomik performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, rüzgâr enerjisi gibi değişken üretim karakteristiğine sahip kaynakların şebekeye entegrasyonunda, üretim belirsizliklerinden kaynaklanan dengesizliklerin etkin bir şekilde yönetilmesi kritik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu bağlamda, batarya enerji depolama sistemlerinin rüzgâr santrallerine entegre edilmesi, söz konusu dengesizliklerin azaltılmasında etkili bir çözüm sunmaktadır. Depolama sistemleri sayesinde, kısa süreli üretim fazlaları veya eksiklikleri esnek bir şekilde dengelenebilmekte; böylece hem iletim sisteminin işletme güvenliği artırılmakta hem de rüzgâr santralinin maruz kaldığı dengesizlik maliyetleri önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Bu yaklaşım, rüzgâr santrallerinin piyasa katılımını daha öngörülebilir hâle getirirken, aynı

zamanda depolama sistemlerinin çoklu hizmet sunumu kapsamında ekonomik değerini artırmaktadır.



Şekil 5.11. Dengesizlik miktarının dağılımı

5.2.2. PFK ve dengesizlik yönetimi kapsamında ekonomik değerlendirme

Bu bölümde, PFK hizmetine katılan santral için en yüksek performansı sağlayan GA kullanılmıştır. Buna ek olarak, santralin üretimden kaynaklanan dengesizlik miktarı da analiz edilerek optimize edilmiş ve sistemin hem ekonomik performansının artırılması hem de dengesizliklerin etkin bir şekilde yönetilmesi hedeflenmiştir. Model, 2023 yılına ait saatlik üretim ve piyasa verileri kullanılarak yıllık bazda uygulanmıştır.

Çizelge 5.7'de sunulmuş olan optimizasyon sonuçları incelendiğinde, elde edilen en yüksek yıllık ekonomik getirilerin belirli parametre aralıklarında yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, BEDS'in PFK ve dengesizliğin giderilmesindeki işletme davranışının kontrol parametrelerinin seçimine oldukça duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 5.7. Parametre Değerleri

Algoritma	PFK_rezerv	DM_rezerv	DB	DOD	SOC_set
GA	70,4 MW	± 4 MW	16-20 mHz	%96-99	%50-53

Optimizasyon sonuçlarının ayrıntılı olarak değerlendirilebilmesi amacıyla, yıllık analizden seçilen örnek bir güne ait saatlik sonuçlar Çizelge 5.8'de sunulmuştur. 04 Ocak 2023 tarihine ait saatlik sistem dengesizliği, dengesizlik fiyatları ve buna bağlı maliyet bileşenlerini göstermektedir. Tablo kapsamında, dengesizlik miktarı, sistem yönü (enerji açığı veya enerji fazlası), dengesizlik maliyetleri ve KÜPST öncesi ve sonrası oluşan maliyetler birlikte verilmiştir. Bu yapı, optimizasyon sürecinin sistem maliyetleri üzerindeki etkisinin saatlik düzeyde izlenmesine olanak sağlamaktadır. Çizelge 5.8 incelendiğinde, gün boyunca farklı saatlerde enerji açığı ve enerji fazlası durumlarının oluştuğu görülmektedir. Dengesizlik miktarları ve dengesizlik fiyatlarının saatlik değişimi, dengesizlik maliyetleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. GA optimizasyonu öncesinde hesaplanan dengesizlik maliyetlerinin, KÜPST mekanizması ve optimizasyon süreci sonrasında önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmektedir. Özellikle dengesizlik fiyatlarının yüksek olduğu saatlerde, optimizasyonun maliyet azaltıcı etkisinin daha belirgin olduğu anlaşılmaktadır.

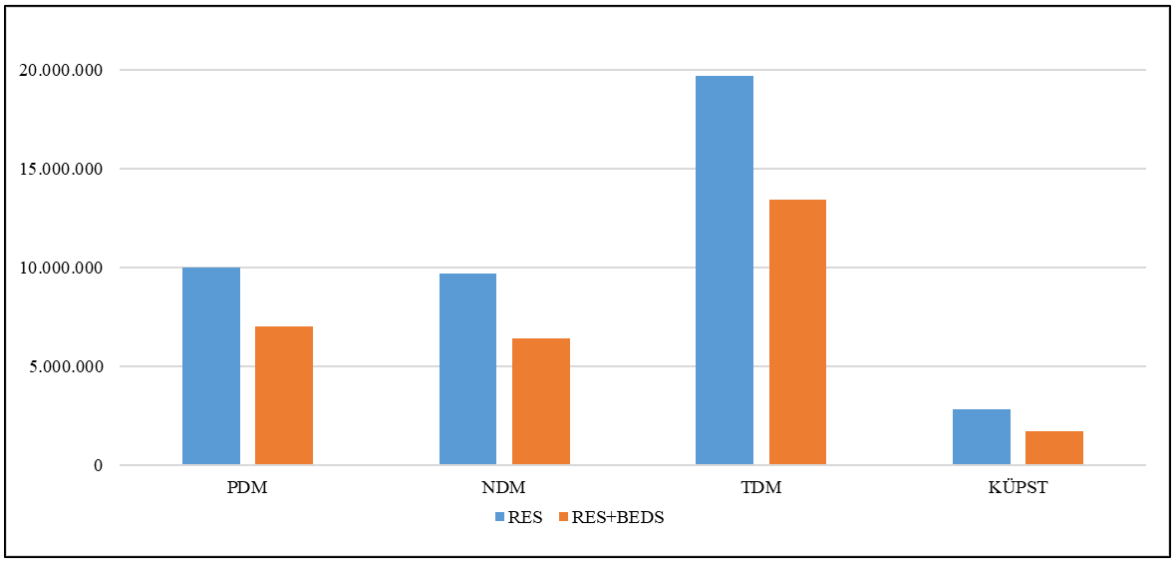
Çizelge 5.8. 04 Ocak 2023 tarihli sistem dengesizliği ve maliyet analiz sonuçları

Tarih	Dengesizlik Miktarı (MW)	Dengesizlik Fiyatı (TL/MWh)	Sistem yönü	Dengesizlik maliyeti öncesi(TL)	KÜPST Maliyeti (TL)	Dengesizlik maliyeti sonrası(TL)	KÜPST sonrası (TL)
00:00	-4,84	3 345,45	Enerji Açığı	471,61	206,57	81,85	0,00
01:00	-8,02	3 167,25	Enerji Açığı	3 947,85	504,61	1 978,85	135,61
02:00	-8,66	3 697,60	Enerji Açığı	4 395,70	694,65	2 365,36	263,86
03:00	-6,57	2 987,00	Enerji Açığı	3 199,59	423,69	1 251,59	75,69
04:00	-8,55	3 612,20	Enerji Açığı	3 011,31	738,57	1 602,51	317,73
05:00	-6,89	3 244,51	Enerji Açığı	3 407,11	538,65	1 429,11	160,65
06:00	-5,67	3 706,98	Enerji Açığı	2 880,19	502,06	848,31	70,18
07:00	-6,68	4 017,00	Enerji Açığı	3 453,56	642,33	1 385,56	174,33
08:00	-2,92	4 326,00	Enerji Açığı	367,92	303,66	0,00	0,00
09:00	-2,34	4326,00	Enerji Açığı	294,84	230,58	0,00	0,00
10:00	-4,64	4326,00	Enerji Açığı	584,64	471,11	80,64	0,00

Çizelge 5.8. (devam) 04 Ocak 2023 tarihli sistem dengesizliği ve maliyet analiz sonuçları

Tarih	Dengesizlik Miktarı (MW)	Dengesizlik Fiyatı (TL/MWh)	Sistem yönü	Dengesizlik maliyeti öncesi (TL)	KÜPST Maliyeti (TL)	Dengesizlik maliyeti sonrası (TL)	KÜPST sonrası (TL)
11:00	-4,26	4 326,00	Enerji Açığı	536,76	408,24	32,76	0,00
12:00	-2,03	3 388,70	Enerji Açığı	200,36	27,54	0,00	0,00
13:00	4,95	3 150,57	Enerji Açığı	482,33	200,73	92,57	0,00
14:00	-7,81	3 687,40	Enerji Açığı	1 428,14	144,99	696,70	0,00
15:00	2,37	3 490,81	Enerji Açığı	255,87	0,00	0,00	0,00
16:00	18,55	4 074,00	Enerji Açığı	2 337,30	1 566,18	1 833,30	1 062,18
17:00	-13,07	4 326,00	Enerji Açığı	1 646,82	490,14	1 142,82	0,00
18:00	-3,32	3 914,00	Enerji Fazlası	378,48	0,00	0,00	0,00
19:00	-12,8	3 640,58	Enerji Fazlası	1 357,26	603,77	933,12	179,63
20:00	-13,99	3 649,64	Enerji Fazlası	1 487,14	807,67	1 061,94	382,47
21:00	-14,34	3 646,12	Enerji Fazlası	1 522,87	925,30	1 098,08	500,51
22:00	-10,23	3 484,47	Enerji Fazlası	1 038,24	612,08	632,28	206,12
23:00	-10,27	3 166,65	Enerji Açığı	947,23	652,45	578,30	283,52
Toplam				39 633,12	11 695,58	19 125,63	3 812,48

Şekil 5.12’de, dengesizlik maliyetlerinin optimizasyon öncesi ve sonrası durumları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Şekil incelendiğinde, GA tabanlı optimizasyon uygulanmasıyla birlikte tüm piyasa yapılarında dengesizlik maliyetlerinde belirgin bir azalma sağlandığı görülmektedir. Bu sonuçlar, geliştirilen optimizasyon modelinin sistem dengesizliğini azaltma konusunda etkin bir performans sergilediğini göstermektedir. Dengesizlik miktarlarının ve buna bağlı maliyetlerin düşürülmesi, sistemin daha dengeli bir işletim yapısına yöneldiğini ve piyasa koşullarına daha uyumlu bir üretim stratejisi benimsendiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda Şekil 5.12, GA tabanlı yaklaşımın dengesizlik yönetimi açısından sağladığı kazanımları açık bir biçimde yansıtmaktadır.



Şekil 5.12. Dengesizlik maliyetlerinin karşılaştırılması

Çizelge 5.9'da, optimizasyon öncesi ve sonrası durumlar için dengesizlik maliyetleri, KÜPST maliyetleri ve PFK hizmeti kapsamında elde edilen gelirler birlikte değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, toplam dengesizlik maliyetinde 6 281 405,30 TL, KÜPST maliyetlerinde ise 1 133 801,44 TL tutarında bir azalma sağlanmıştır. Bu bulgular, geliştirilen GA tabanlı optimizasyon modelinin dengesizlikten kaynaklanan maliyetleri etkin bir biçimde azalttığını göstermektedir. Buna karşılık, PFK hizmeti kapsamında elde edilen gelirlerde bir azalma gözlemlenmiştir. Ancak bu durum, optimizasyon sürecinde dengesizliklerin azaltılmasına yönelik alınan kararların, PFK mekanizmasına olan ihtiyacı düşürmesinin doğal bir sonucu olarak değerlendirilmelidir. Nitekim dengesizlik ve KÜPST maliyetlerindeki azalış, sistemin daha dengeli bir işletim yapısına yöneldiğini ve piyasa müdahale ihtiyacının azaldığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, yalnızca PFK gelirlerine odaklanmak yerine, toplam ekonomik performansın birlikte değerlendirilmesi daha sağlıklı bir yaklaşım sunmaktadır.

Sonuç olarak, Çizelge 5.9'da sunulan bulgular, rüzgâr santrali ile entegre batarya enerji depolama sisteminin birlikte işletilmesinin, sistemin ekonomik yapısını tek boyutlu gelir artışı yerine çok boyutlu bir denge perspektifi ile yeniden şekillendirdiğini göstermektedir. Optimizasyon sonrası durumda, dengesizlik maliyetlerinde 6 281 405,30 TL, KÜPST maliyetlerinde ise 1 133 801,44 TL tutarında azalma sağlanmış olması, geliştirilen GA tabanlı yaklaşımın dengesizlikten kaynaklanan maliyetleri etkin biçimde düşürdüğünü ortaya koymaktadır.

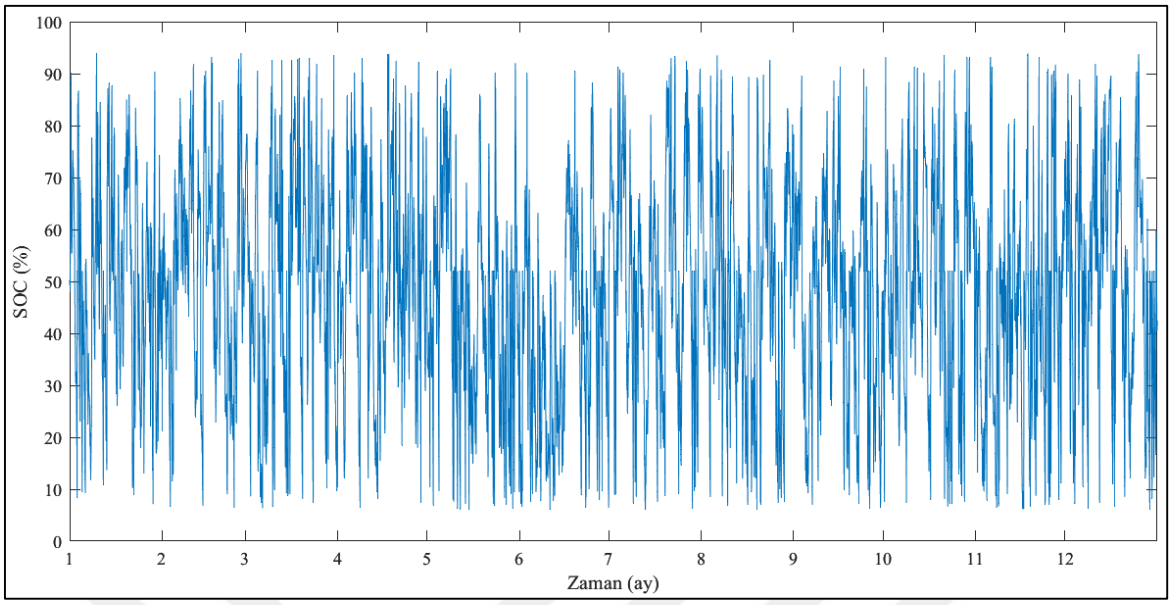
Çizelge 5.9. RES ve BEDS+RES yapılarının ekonomik performans karşılaştırması

	Öncesi	Sonrası	Fayda-Zarar
Dengesizlik Maliyeti Toplam(TL)	-19 706 961,35	-13 425 556,04	6 281 405,30
KÜPST(TL)	-2 856 468,15	-1 722 666,71	1 133 801,44
PFK hizmeti geliri(TL)	565 296 153,00	503 350 320,00	-61 945 833,00
Toplam gelir(TL)	542 732 723,51	488 202 097,25	-54 530 626,25

PFK hizmeti kapsamında elde edilen gelirlerde 61 945 833,00 TL tutarında bir azalma gözlemlenmiştir. Bu durum, optimizasyon sürecinde batarya kapasitesinin bir bölümünün dengesizlik yönetimine tahsis edilmesi nedeniyle, PFK hizmetine ayrılabilen rezerv miktarının azalmasının doğal bir sonucu olarak değerlendirilmektedir.

Toplam gelir kalemi incelendiğinde, optimizasyon sonrası durumda 54 530 626,25 TL tutarında bir azalma söz konusu olsa da bu azalma yalnızca kısa vadeli gelir perspektifiyle değerlendirilmemelidir. Dengesizlik ve KÜPST maliyetlerindeki belirgin düşüş, sistemin piyasa müdahalelerine olan bağımlılığını azaltmakta, dengesizlik cezası risklerini sınırlamakta ve uzun vadede işletme güvenilirliğini artırmaktadır. Bu bağlamda, elde edilen sonuçlar, yalnızca PFK gelirlerinin maksimize edilmesine odaklanan tek amaçlı bir yaklaşım yerine, toplam sistem maliyetlerinin ve risklerinin birlikte ele alındığı çok amaçlı optimizasyon yaklaşımının daha gerçekçi ve sürdürülebilir bir ekonomik yapı sunduğunu göstermektedir.

Bataryanın zaman içerisindeki SOC değişimi Şekil 5.13'te sunulmaktadır. Dengesizlik yönetiminin problem tanımına dâhil edilmesiyle birlikte, bataryanın belirlenen SOC alt ve üst sınırlarına daha sık ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, bataryanın PFK hizmeti kapsamında ayrılan rezervi belirli zaman dilimlerinde sürdürememesine yol açarak santralin PFK yükümlülüklerini yerine getirememesi riskini artırmaktadır. Aynı zamanda, SOC sınırlarına daha sık temas edilmesi bataryanın şarj-deşarj çevrimlerini artırmış ve dolayısıyla toplam döngü sayısında belirgin bir artışa neden olmuştur.



Şekil 5.13. BEDS+RES SOC durumu

5.2.3. PFK ve dengesizlik yönetimi kapsaminda batarya kapasite azalmasinin değerlendirilmesi

Bu bölümde, Trakya bölgesinde yer alan ve iletim şebekesine bağlı bir rüzgâr enerji santraline ait 2023 yılı gün öncesi piyasasında bildirilen üretim değerleri ile gerçek zamanlı gerçekleşen üretim verileri kullanılarak gerçekleştirilen piyasa işlemleri sonucunda bataryada gerçekleşen yıllık kapasite azalması, yüzde (%) cinsinden ifade edilmiştir. Bu kapsamda, bataryanın işletme davranışını belirleyen DB, SOC_set, DOD parametreleri ile dengesizlik miktarı karar değişkenleri olarak kullanılmıştır.

Amaç, PFK hizmeti ve dengesizlik miktarının giderilmesi kapsamında yüksek ekonomik getiri sağlanırken, batarya ömrünü doğrudan etkileyen kapasite kaybının mümkün olan en düşük seviyede tutulabildiği parametre kombinasyonlarının belirlenerek yıllık kapasite bozulmasının minimum seviyede tutulmasıdır. PFK hizmetine katılan santral için en yüksek performansı sağlayan GA kullanılmıştır. Buna ek olarak, santralin üretimden kaynaklanan dengesizlik miktarı da analiz edilerek optimize edilmiş ve sistemin hem ekonomik performansının artırılması hem de dengesizliklerin etkin bir şekilde yönetilmesi hedeflenmiştir.

Çizelge 5.10. Optimizasyon algoritmalarının istatistiksel karşılaştırması

Algoritma	BEDS	BEDS+RES	Artış
Kapasite Bozulması(%)	3,45	4,552	%31,94
Döngü sayısı	168	427	%154,17
SOC limitlere ulaşma	119	191	%75,23

Çizelge 5.10'da sunulan sonuçlar, BEDS ve BEDS+RES yapılandırmalarının enerji depolama sistemi üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır. BEDS+RES durumunda, BEDS'e kıyasla sistem işletiminde belirgin değişiklikler gözlemlenmiştir. Döngü sayısında %154,17 oranında artış meydana gelmesi, RES entegrasyonu ile birlikte dengesizliğin giderilmesinde enerji depolama sisteminin daha yoğun bir şekilde kullanıldığını göstermektedir. Yani, RES'in dengesizliğinin giderilmesinde kullanılacak olan BEDS'in daha aktif kullanıldığı, bu durumun da bataryanın kapasite azalmasını artırdığı görülmüştür.

Benzer şekilde, SOC limitlerine ulaşma sıklığındaki %75,23'lük artış, sistemin daha geniş bir SOC aralığında çalıştığını ve sınır değerlere daha sık yaklaşıldığını ortaya koymaktadır. Aslında bu durum, bataryanın limitlere ulaştığı saatlerde yükümlü olduğu PFK hizmetini yerine getiremediği, bundan dolayı da PFK hizmetinden elde edeceği gelirde kayıp oluşturduğu anlamına gelmektedir.

Artan işletim yoğunluğunun bir sonucu olarak, kapasite bozulma oranında %31,94'lük bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, BEDS+RES yapısında sistem performansının artmasına karşılık, batarya yaşlanma mekanizmalarının daha belirgin hale geldiğini göstermektedir. Ancak bu artış, enerji depolama sisteminin daha etkin ve esnek bir şekilde işletilmesinin doğal bir sonucu olarak değerlendirilmelidir.

Sonuç olarak, tabloda elde edilen bulgular, RES entegrasyonunun enerji depolama sistemi üzerindeki etkilerinin çok boyutlu olduğunu ve sistem tasarımında performans kazanımları ile batarya ömrü arasında bir denge kurulması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, BEDS+RES yapılandırması, artan işletim yoğunluğu ve kapasite bozulmasına rağmen, sistemin genel esnekliğini ve kullanım etkinliğini artıran bir çözüm olarak

değerlendirilmesine rağmen, bataryanın ömrü üzerinde PFK hizmetine nazaran daha fazla kayıp oluşturduğu sonucunu ortaya koymaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payının artması, güç sistemlerinde toplam atalet seviyesinin azalmasına ve frekans dengesinin korunmasının giderek zorlaşmasına neden olmaktadır. Bu durum, özellikle ani üretim ve tüketim değişimlerine hızlı tepki verebilen esnek kaynakların önemini artırmaktadır. Batarya enerji depolama sistemleri, hızlı ve çift yönlü güç tepkisi sağlayabilme kabiliyetleri sayesinde başta PFK olmak üzere yan hizmetler kapsamında etkin bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, bataryaların işletme safhası öncesinde teknik ve ekonomik açıdan bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi; kapasite ölçeklendirmesi, batarya yaşlanmasının öngörülmesi ve piyasa teklif stratejilerinin doğru biçimde oluşturulması açısından kritik öneme sahiptir.

Bu tez çalışmasında, iletim şebekesine bağlı bir batarya enerji depolama sisteminin teknik ve ekonomik performansı iki farklı işletme senaryosu altında incelenmiştir. İlk senaryoda BEDS'in yalnızca primer frekans kontrolü hizmeti sunduğu durum ele alınmış; ikinci senaryoda ise BEDS'in bir RES ile işletilerek PFK hizmetine ek olarak üretim tahmini ile gerçekleşme arasındaki farklardan kaynaklanan dengesizliklerin azaltılmasında kullanıldığı yapı değerlendirilmiştir. Her iki senaryoda da sistem performansı; yıllık ekonomik getiri, dengesizlik ve KÜPST maliyetleri, SOC limit davranışı, döngü sayısı ve batarya kapasite azalması göstergeleri üzerinden yıllık bazda analiz edilmiştir.

PFK odaklı işletim senaryosunda, Türkiye elektrik iletim sistemine ait 2023 yılı gerçek frekans ölçüm verileri, piyasa fiyatları (PTF/SMF) ve PFK birim fiyatları kullanılarak 100 MW/100 MWh kapasiteli bir BEDS modeli değerlendirilmiştir. Frekansın yıl boyunca büyük ölçüde nominal değer etrafında ve küçük genlikli sapmalarla değişmesi, BEDS'in çoğunlukla kısmi yük seviyelerinde çalışmasına neden olmuş; sistem yalnızca ölü bant dışına çıkan frekans sapmalarına tepki vermiştir. Bu durum, gereksiz enerji alışverişlerinin sınırlandırılmasını sağlayarak bataryanın güvenli işletme aralığında çalışmasına katkı sunmuştur.

BEDS'in PFK hizmetindeki performansını artırmak amacıyla DB, SOC_set ve DOD parametreleri karar değişkenleri olarak ele alınmış; yıllık ekonomik getirinin maksimize edilmesi ve batarya kapasitesinin azalmasının minimize edilmesi hedeflenmiştir. Tanımlanan parametre aralıkları içerisinde MATLAB ortamında geliştirilen kontrol

algoritması ile kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiş; elde edilen sonuçlar ekonomik ve teknik performans göstergeleri açısından değerlendirilmiştir. Meta-sezgisel yöntemler arasında yapılan karşılaştırmalar sonucunda, PFK geliri açısından GA en yüksek ortalama ve maksimum değerlere ulaşarak diğer yöntemlere kıyasla üstün bir performans sergilemiştir.

Optimum çözümlerde DB değerinin 18–20 mHz, DOD'un %97–99 ve SOC_set'in %52–54 aralığında yoğunlaştığı görülmüştür. Bu sonuçlar, şebeke frekansının yıl boyunca 50 Hz'in altında kaldığı sürelerin baskın olması nedeniyle bataryanın ağırlıklı olarak enerji veren yönde çalışmasıyla uyumludur. Dolayısıyla SOC_set değerinin %50'nin üzerinde seçilmesi, aşağı yönlü frekans sapmalarına karşı yeterli enerji rezervinin korunmasını sağlayarak PFK hizmetinin sürekliliğini destekleyen uygun bir işletme stratejisi olarak öne çıkmaktadır. Teknik göstergeler açısından, GA için yıllık döngü sayısının 168 seviyesinde kalması ve SOC limit davranışının yönetilebilir düzeylerde gerçekleşmesi, PFK odaklı işletimde batarya ömrü açısından dengeli ve sürdürülebilir bir performans elde edildiğini göstermektedir. Bu senaryoda yıllık kapasite azalmasının %3,45 seviyesinde gerçekleşmesi, söz konusu işletme yaklaşımının batarya yaşlanması üzerindeki etkisinin sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır.

İkinci senaryoda, Trakya bölgesinde yer alan bir rüzgâr enerji santraline ait 2023 yılı gün öncesi bildirimi ile gerçek zamanlı üretim verileri kullanılmış ve RES kaynaklı dengesizliklerin büyük ölçüde 0–8 MW aralığında yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Bu dengesizliklerin piyasa mekanizmaları kapsamında maliyet oluşturması nedeniyle, BEDS'in PFK hizmetine ek olarak dengesizlik yönetiminde kullanılması ekonomik açıdan önemli bir esneklik sağlamıştır. Bu senaryoda, PFK performansında en başarılı yöntem olarak belirlenen GA kullanılmış ve optimum parametreler DB: 16–20 mHz, DOD: %96–99, SOC_set: %50–53 ve dengesizlik rezervi: ±4 MW olarak elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, dengesizlik yönetiminin batarya işletim yoğunluğunu belirgin biçimde artırdığını göstermektedir. BEDS+RES senaryosunda yıllık döngü sayısının 427'ye yükselmesi, SOC alt ve üst limitlerine ulaşma sıklığının artması ve yıllık kapasite azalmasının %4,552 seviyesine çıkması, dengesizlik gideriminin batarya yaşlanması üzerinde daha belirgin bir yük oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşın, ekonomik açıdan dengesizlik ve KÜPST maliyetlerinde sırasıyla 6,28 milyon TL ve 1,13 milyon TL tutarında azalma sağlanmıştır. Batarya kapasitesinin bir bölümünün dengesizlik yönetimine tahsis edilmesi nedeniyle PFK hizmet gelirinde yaklaşık 61,95 milyon TL azalma

gözlemlenmiş olup, bu durum PFK geliri ile dengesizlik maliyeti azaltımı arasında doğal bir ödünleşim bulunduğunu göstermektedir.

Toplam gelirde gözlenen azalma kısa vadeli bir perspektiften olumsuz gibi değerlendirilse de, dengesizlik cezası risklerinin azalması, piyasa müdahalelerine olan bağımlılığın düşmesi ve sistem işletme güvenilirliğinin artması açısından sonuçların bütüncül biçimde ele alınması gerekmektedir. Bu bağlamda, yalnızca PFK gelirinin maksimize edilmesine odaklanan tek amaçlı yaklaşımlar yerine, toplam ekonomik performans, batarya ömrü ve yükümlülük risklerinin birlikte değerlendirildiği çok amaçlı bir yaklaşımın daha gerçekçi ve sürdürülebilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, gerçek frekans ve üretim verileri kullanılarak batarya enerji depolama sistemlerinin PFK ve dengesizlik yönetimi kapsamındaki birlikte işletiminin teknik ve ekonomik etkilerini bütüncül bir çerçevede ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, çoklu hizmet sunan BEDS'lerin işletiminde rezerv tahsisi kararlarının yalnızca kısa vadeli gelir hedefleriyle değil, batarya yaşlanması, SOC limit davranışı ve yükümlülük riskleri gibi göstergelerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Gelecek çalışmalarda, dengesizlik rezervinin sabit yerine mevsimsel veya saatlik adaptif olarak belirlenmesi, batarya yaşlanmasının farklı işletme koşulları altında daha ayrıntılı modellerle incelenmesi ve PFK–dengesizlik birlikte işletimine ilişkin ceza mekanizmalarının duyarlılık analizleriyle değerlendirilmesi önerilmektedir. Bu tür yaklaşımlar, çoklu hizmet sunan enerji depolama sistemlerinin teknik ve ekonomik açıdan daha sürdürülebilir biçimde planlanmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Behabtu, H. A., Messagie, M., Coosemans, T., Berecibar, M., Anlay Fante, K., Kebede, A. A., Van Mierlo, J. (2020). A review of energy storage technologies' application potentials in renewable energy sources grid integration. *Sustainability*, 12(24), 10511.

2. Zhao, C., Hashemi, S., Andersen, P. B., Træholt, C. (2021, 26–28 Şubat). *Data-driven state of health modeling of battery energy storage systems providing grid services.* Proceedings of the 11th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering (CPEEE), Tokyo, Japonya, 43–49.

3. Luo, X., Wang, J., Dooner, M., Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 137, 511–536.

4. Zakeri, B., Syri, S. (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 569–596.

5. Divya, K. C., Østergaard, J. (2009). Battery energy storage technology for power systems—An overview. *Electric Power Systems Research*, 79(4), 511–520.

6. International Renewable Energy Agency. (2017). *Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030*. Abu Dhabi: IRENA.

7. Dunn, B., Kamath, H., Tarascon, J. M. (2011). Electrical energy storage for the grid: A battery of choices. *Science*, 334(6058), 928–935.

8. Olabi, A. G., Wilberforce, T., Sayed, E., Abo-Khalil, A., Maghrabie, H., Elsaid, K., Abdelkareem, M. (2022). Battery energy storage systems and SWOT analysis of batteries in power transmission. *Energy*, 254, 123987.

9. Schmidt, O., Melchior, S., Hawkes, A., Staffell, I. (2019). Projecting the future levelized cost of electricity storage technologies. *Joule*, 3(1), 81–100.

10. European Association for Storage of Energy. (2020). *Energy storage: A key enabler for the European Green Deal*. Brussels: EASE.

11. Su, D., Lei, Z. (2021). Optimal configuration of battery energy storage system in primary frequency regulation. *Energy Reports*, 7, 157–162.

12. Stecca, M., Soeiro, T. B., Elizondo, L. R., Bauer, P., Palensky, P. (2021). Lifetime estimation of grid-connected battery storage and power electronics inverter providing primary frequency regulation. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 2, 240–251.

13. Jia, Y., Chen, N., Zhang, L., Qian, M., Tang, B., Liu, Y., Zhou, C., Peng, P. (2026). Optimization of reserve capacity for new energy participating in primary frequency regulation of the power system. *Energies*, 19(3), 718.

14. Marzebali, M. H., Mazidi, M., Mohiti, M. (2020). An adaptive droop-based control strategy for fuel cell-battery hybrid energy storage system to support primary frequency in stand-alone microgrids. *Journal of Energy Storage*, 27, 101127.

15. Anastasiadis, A. G., Konstantinopoulos, S. A., Kondylis, G. P., Vokas, G. A., and Papageorgas, P. (2017). Effect of fuel cell units in economic and environmental dispatch of a microgrid with penetration of photovoltaic and micro turbine units. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(5), 3479–3486.

16. Brivio, C., Mandelli, S., Merlo, M. (2016). Battery energy storage system for primary control reserve and energy arbitrage. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 6, 152–165.

17. Mercier, P., Cherkaoui, R., Oudalov, A. (2009). Optimizing a battery energy storage system for frequency control application in an isolated power system. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(3), 1469–1477.

18. Oudalov, A., Chartouni, D., Ohler, C. (2007). Optimizing a battery energy storage system for primary frequency control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(3), 1259–1266.

19. Iurilli, P., Brivio, C., Merlo, M. (2019). SoC management strategies in battery energy storage system providing primary control reserve. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 19, 100230.

20. Arrigo, F., Bompard, E., Merlo, M., Milano, F. (2020). Assessment of primary frequency control through battery energy storage systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 115, 105428.

21. Sandelic, M., Stroe, D. I., Iov, F. (2018). Battery storage-based frequency containment reserves in large wind penetrated scenarios: A practical approach to sizing. *Energies*, 11(11), 3065.

22. Patil, G. S., Mulla, A., Dawn, S., Ustun, T. S. (2022). Profit maximization with imbalance cost improvement by solar PV-battery hybrid system in deregulated power market. *Energies*, 15(14), 5290.

23. Chang, Y. C., Lee, T. Y., Chen, C. L., Jan, R. M. (2014). Optimal power flow of a wind-thermal generation system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 55, 312–320.

24. Reddy, S. S. (2017). Optimal scheduling of thermal-wind-solar power system with storage. *Renewable Energy*, 101, 1357–1368.

25. Kusakana, K. (2015). Optimal scheduled power flow for distributed photovoltaic/wind/diesel generators with battery storage system. *IET Renewable Power Generation*, 9(8), 916–924.

26. Eroğlu, H., Kurtuluş, O. (2025). Strategic design of wind energy and battery storage for efficient and sustainable energy systems. *Scientific Reports*, 15, 34976.

27. Jung, W., Jeong, J., Kim, J., Chang, D. (2020). Optimization of hybrid off-grid system consisting of renewables and Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 451, 227754.

28. Aghamohammadi, M. R., Abdolahinia, H. (2014). A new approach for optimal sizing of battery energy storage system for primary frequency control of islanded microgrid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 54, 325–333.

29. Datta, U., Kalam, A., Shi, J. (2019). The relevance of large-scale battery energy storage application in providing primary frequency control with increased wind energy penetration. *Journal of Energy Storage*, 23, 9–18.

30. Fleer, J., Stenzel, P. (2016). Impact analysis of different operation strategies for battery energy storage systems providing primary control reserve. *Journal of Energy Storage*, 8, 320–338.

31. Johnston, L., Díaz-González, F., Gomis-Bellmunt, O., Corchero-García, C., Cruz-Zambrano, M. (2015). Methodology for the economic optimisation of energy storage systems for frequency support in wind power plants. *Applied Energy*, 137, 660–669.

32. Kul, B. (2020). Geçmişten günümüze piller. *Takvim-i Vekayi*, 8(2), 104–115.

33. Linden, D., Reddy, T. B. (2002). *Handbook of batteries* (3rd ed.). New York: McGraw-Hill, 1200 s.

34. Husain, I. (2010). *Electric and hybrid vehicles: Design fundamentals* (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press, 526 s.

35. Ibrahim, H., Ilinca, A., Perron, J. (2008). Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(5), 1221–1250.

36. Tarascon, J. M., Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 414, 359–367.

37. Yeşilbudak, M. (2013). *Rüzgâr Gücü Tahmin Sistemi Tasarımı ve Uygulaması*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

38. Efe, Ş., ve Güngör, Z. A. (2021). Geçmişten günümüze batarya teknolojisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (28), 947–955.

39. Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M., Mithulananthan, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365–385.

40. Horiba, T. (2014). Lithium-ion battery systems. *Proceedings of the IEEE*, 102(6), 939–950.

41. Rahn, C. D., Wang, C. Y. (2013). *Battery systems engineering* (1st ed.)**.** Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 256 s.

42. Rigan, M. (2020). *Battery Management System Design of Electric Vehicles*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.

43. Erdoğan, B. (2020). *Active Balancing System for Large Battery Pack*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

44. Gül, H. S. (2018). *Elektrikli Araçlar İçin Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

45. Van den Bossche, P., Vergels, F., Van Mierlo, J., Matheys, J., Van Autenboer, W. (2006). SUBAT: An assessment of sustainable battery technology. *Journal of Power Sources*, 162(2), 913–919.

46. Abdullah, W. S. W., Osman, M., Ab Kadir, M. Z. A., Verayiah, R. (2020). Battery energy storage system design for peak demand reduction, energy arbitrage and grid ancillary services. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 11(2), 869–878.

47. Nejad, S. (2016). *Adaptive Techniques For Estimation And Online Monitoring of Battery Energy Storage Devices*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Sheffield Üniversitesi, Birleşik Krallık.

48. American Society for Testing and Materials. (2017). *Standard practices for cycle counting in fatigue analysis (ASTM E1049-85)*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

49. Ranjbar, A. H., Banaei, A., Khoobroo, A., Fahimi, B. (2011). Online estimation of state of charge in Li-ion batteries using impulse response concept. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1), 360–367.

50. Kavaz, İ. (2020). Analysing the industrial electricity demand for Turkey. *Bingöl Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 4(1), 187–218.

51. İnternet: Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ). (2023). *Türkiye elektrik üretim-iletim istatistikleri*. URL: https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-istatistikleri , Son Erişim Tarihi: 28.05.2025.

52. İnternet: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK). (2023). *Türkiye elektrik piyasası gelişim raporu.* URL: https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/4-14475/2023yilisektorraporlariyayinlanmistir, Son Erişim Tarihi: 25.05.2025.

53. İnternet: Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPİAŞ). (2023). *2023 yılı elektrik piyasaları özet bilgiler raporu*. URL: https://www.epias.com.tr/tr/seffaflik/raporlar, Son Erişim Tarihi: 09.05.2025.

54. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2001). *Elektrik Piyasası Kanunu (4628 sayılı kanun)*. Resmî Gazete, 03.03.2001.

55. Ertilav, M., ve Aktel, M. (2015). Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi özelleştirmesi. *Uluslararası Alanya İşletme Fakültesi Dergisi*, 7(3).

56. İnternet: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2025). *Elektrik piyasası dengeleme ve uzlaştırma yönetmeliği*. URL: https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-0/mevzuat, Son Erişim Tarihi: 25.05.2025.

57. İnternet: Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPİAŞ). (2025). *EPİAŞ Şeffaflık Platformu*. URL: https://seffaflik.epias.com.tr, Son Erişim Tarihi: 28.05.2025.

58. Yiğit, H. V. (2018). *Türkiye Elektrik Piyasasında Kapasite Mekanizması Uygulaması ve Santral Gelirlerine Katkısı*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

59. İnternet: Shura Enerji Dönüşüm Merkezi. (2021). *Yenilenebilir enerji entegrasyonunu hızlandırmak için Türkiye organize toptan elektrik piyasalarında iyileştirmeler*. İstanbul. URL: https://www.shura.org.tr, Son Erişim Tarihi: 28.05.2025.

60. Özgül, A. U. (2022). Piyasa nitelikleri ile elektrik ve Türkiye'nin serbestleşme süreci. *Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 24(44), 363–392.

61. Korkmaz, O. (2024). *Türkiye Gün Öncesi Elektrik Piyasasında Saatlik Fiyatların Uzun Dönemli Tahmini*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

62. İnternet: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2016). *Elektrik piyasası dengeleme ve uzlaştırma yönetmeliği*. URL: https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-0/mevzuat, Son Erişim Tarihi: 28.05.2025.

63. Yalçınkaya, A. (2024). *Türkiye Elektrik Piyasalarında Talep Tarafı Katılımının Değerlendirilmesi*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

64. Koç, H. (2021). *Elektrik Enerjisi Toptan Satış Sözleşmeleri*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.

65. Özpınar, A. (2020). Dinamik tüketici talep yönetimi yapabilen blokzincir tabanlı elektrik piyasası modeli. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (Özel Sayı), 63–69.

66. Wood, A. J., Wollenberg, B. F., and Sheblé, G. B. (2013). *Power generation, operation, and control* (3rd ed.). Hoboken, NJ: Wiley. 656 s.

67. Gómez-Expósito, A., Conejo, A. J., and Cañizares, C. (2018). *Electric energy systems: Analysis and operation* (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press. 722 s.

68. Can, Ö. (2024). *Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçeren Güç Sistemleri İçin Yük Frekans Denetleyici Tasarımı*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.

69. İnternet: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2025). *Elektrik şebeke yönetmeliği*. URL: https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-0/mevzuat, Son Erişim Tarihi: 28.05.2025.

70. İnternet: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2025). *Elektrik piyasası yan hizmetler yönetmeliği*. URL: https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-0/mevzuat, Son Erişim Tarihi: 28.05.2025.

71. Ippolito, M. G., Musca, R., Zizzo, G. (2021). Analysis and simulations of the primary frequency control during a system split in continental Europe power system. *Energies*, 14(5), 1456.

72. İnternet: Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ). (2025). *Piyasa yönetim sistemi modülü*. URL: https://tpys.teias.gov.tr, Son Erişim Tarihi: 28.05.2025.

73. İnternet: Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ). (2024). *Elektrik depolama tesislerine ilişkin teknik kriterler*. URL: https://www.teias.gov.tr, Son Erişim Tarihi: 25.05.2025.

74. Thien, T., Schweer, D., vom Stein, D., Moser, A., Sauer, D. U. (2017). Real-world operating strategy and sensitivity analysis of frequency containment reserve provision with battery energy storage systems in the German market. *Journal of Energy Storage*, 13, 143–163.

75. Ndeche, K. C., Ezeonu, S. O. (2021). Implementation of Coulomb counting method for estimating the state of charge of lithium-ion battery. *Physical Science International Journal*, 25(2), 1–8.

76. Gao, Y., Jiang, J., Zhang, C., Zhang, W., Jiang, Y. (2018). Aging mechanisms under different state-of-charge ranges of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 400, 641–651.

77. Hoke, A., Brissette, A., Maksimović, D., Kelly, D., Pratt, A., Boundy, D. (2013, February 24–27). *Maximizing lithium ion vehicle battery life through optimized partial charging*. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Washington, DC, USA, 1–5.

78. Stroe, D. I. (2014). *Lifetime Models For Lithium-İon Batteries Used in Virtual Power Plant Applications*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Aalborg Üniversitesi, Danimarka.

79. Maheshwari, A., Paterakis, N. G., Santarelli, M., Gibescu, M. (2020). Optimizing the operation of energy storage using a non-linear lithium-ion battery degradation model. *Applied Energy*, 261, 114360.

80. Cao, Y., Zhang, Y., Zhang, H., Shi, X., Terzija, V. (2017). Probabilistic optimal PV capacity planning for wind farm expansion. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(3), 1291–1300.

81. Yang, Y., Yan, G., Mu, G. (2022). Bi-level decentralized control of electric heating loads considering wind power accommodation in electricity markets. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 135, 107536.

82. Yao, D. L., Choi, S. S., Tseng, K. J., Lie, T. T. (2009). A statistical approach to the design of a dispatchable wind power-battery energy storage system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24(4), 916–925.

83. Rancilio, G., Lucas, A., Kotsakis, E., Fulli, G., Merlo, M., Delfanti, M., Masera, M. (2019). Modeling a large-scale battery energy storage system for power grid application analysis. *Energies*, 12(17), 3312.

84. Ng, K. S., Moo, C. S., Chen, Y. P., Hsieh, Y. C. (2009). Enhanced coulomb counting method for estimating state of charge of lithium-ion batteries. *Applied Energy*, 86(9), 1506–1511.

85. Kim, T., Qiao, W., Qu, L. (2013, September 15–19). *Online SOC and SOH estimation for multicell lithium-ion batteries.* IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Denver, CO, USA, 292–298.

86. Brivio, C. (2017). *Battery Energy Storage Systems: Modelling, Applications and Design Criteria*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Doktora Tezi, Milano Politeknik Üniversitesi, İtalya.

87. Yang, X. S., Deb, S. (2009, December 09–11). *Cuckoo search via Lévy flights.* World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC), Coimbatore, India, 210–214.

88. Makeen, P., Swief, R. A., Abdel-Salam, T. S., El-Amary, N. H. (2018). Smart hybrid micro-grid integration for optimal power sharing based on water cycle optimization technique. *Energies*, 11(5), 1083.

89. Rajabioun, R. (2011). Cuckoo optimization algorithm. *Applied Soft Computing*, 11(8), 5508–5518.

90. Pentapalli, V. V. G., Varma, R. K. (2016). Cuckoo search optimization and its applications: A review. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 5(12).

91. Yang, X. S., Deb, S. (2010). Engineering optimisation by cuckoo search. *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, 1(4), 330–343.

92. Ahmed, J., Salam, Z. (2013, May 13–17). *A soft computing MPPT for PV system based on cuckoo search algorithm.* International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Istanbul, Turkey, 558–562.

93. Pant, S., Saini, R. P. (2019, November 08–10). *Comparative study of MPPT techniques for solar photovoltaic system.* International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON), Aligarh, India, 1–6.

94. Ayas, S., Doğan, H., Gedikli, E., Ekinci, M. (2018). Sürü zekâsı optimizasyon algoritmaları tabanlı mikroskobik görüntü segmentasyonu. *Akıllı Sistemler ve Uygulamaları Dergisi*, 1(1), 291–297.

95. Mamizadeh, A., Genç, N., Rajabioun, R. (2018, October 14–17). *Optimal tuning of PI controller for boost DC-DC converters based on cuckoo optimization algorithm.* International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Paris, France, 677–680.

96. Hasseni, S. E. I., Abdou, L., Glida, H. E. (2021). Parameters tuning of quadrotor PID controllers using nature-inspired algorithms. *Evolutionary Intelligence*, 14, 61–73.

97. Kennedy, J., Eberhart, R. (1995, 27 November–1 December). *Particle swarm optimization.* Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, WA, Australia, 1942–1948.

98. Bansal, J. C., Singh, P. K., Saraswat, M., Verma, A., Jadon, S. S., Abraham, A. (2011, 19–21 October). *Inertia weight strategies in particle swarm optimization.* World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC), Salamanca, Spain, 633–640.

99. Abdelaziz, A. Y., Almoataz, Y. (2020). *Modern maximum power point tracking techniques for photovoltaic energy systems*. Cham: Springer, 305 s.

100. Mendes, R., Kennedy, J., Neves, J. (2004). The fully informed particle swarm: simpler, maybe better. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 8(3), 204–210.

101. Çiçek, İ. (2024). *Sezgisel Algoritmalar Kullanarak Sanal Atalet Moment Kontrolü İçeren Yük Frekans Kontrol Sistemleri İçin Denetleyici Tasarımı*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

102. Meena, D. K., Chahar, S. (2017). *Speed control of DC servo motor using genetic algorithm.* Proceedings of the International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC), Indore, India, 1–7.

103. Man, K. F., Tang, K. S., Kwong, S. (1996). Genetic algorithms: Concepts and applications in engineering design. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 43(5), 519–534.

104. Kristinsson, K., Dumont, G. A. (1992). System identification and control using genetic algorithms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 22(5), 1033–1046.

105. Khater, F., Shaltout, A., Hendawi, E. (2008). *Tuning of PI controller based on genetic algorithm.* Proceedings of the International Conference on Advanced Control Circuits and Systems (ACCS), Cairo, Egypt.

106. Rathore, N. S., Singh, V. P., Chauhan, D. P. S. (2015, 24–26 September 2015). ISE-based PID controller tuning for position control of DC servo motor. *Proceedings of the International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPCC)*, Solan, India, 125–128.

107. Katoch, S., Chauhan, S. S., Kumar, V. (2021). A review on genetic algorithm: Past, present, and future. *Multimedia Tools and Applications*, 80(5), 8091–8126.

108. Tang, K. S., Man, K. F., Kwong, S., He, Q. (1996). Genetic algorithms and their applications. *IEEE Signal Processing Magazine*, 13(6), 22–37.



Gazili olmak ayrıcalıktır