

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN GÜÇ
SİSTEMLERİNDEKİ TEKNOEKONOMİK İŞLETİMİ İÇİN
YENİ BİR YAKLAŞIMIN GELİŞTİRİLMESİ

Hüsna YILDIZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Prof. Dr. Ozan ERDİNÇ

Eş Danışman

Doç.Dr.Yavuz ATEŞ

Aralık, 2023

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN GÜÇ
SİSTEMLERİNDEKİ TEKNOEKONOMİK İŞLETİMİ İÇİN
YENİ BİR YAKLAŞIMIN GELİŞTİRİLMESİ

Hüsna YILDIZ tarafından hazırlanan tez çalışması 08.12.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Tesisleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ozan ERDİNÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Doç.Dr.Yavuz ATEŞ
Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ozan ERDİNÇ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ali Rıfat BOYNUEĞRİ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç.Dr. Sıtkı GÜNER, Üye
Eskisehir Technical University

Danışmanım Prof. Dr. Ozan ERDİNÇ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Enerji Depolama Sistemlerinin Güç Sistemlerindeki Teknoekonomik İşletimi İçin Yeni Bir Yaklaşımın Geliştirilmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Hüsna YILDIZ

İmza



Bu çalışma, “2210/C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı (TUBİTAK)” numaralı projesi ile desteklenmiştir.



Değerli Aileme

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitim sürecimde, danışmanım olarak sadece akademik alanda değil hayatımın her alanında karar verirken değerli tecrübe ve bilgi birikiminden yararlanma fırsatı bulduğum çizdiği vizyonla her zaman bir adım ilerisini görmemi sağlayan sayın Prof. Dr. Ozan Erdinç'e başta verdiği motivasyon olmak üzere her şey için teşekkür ederim. Bana gururla danışman hocamın Ozan Erdinç olduğunu söylememi sağlayacak imkânı verdiğiniz için kendimi şanslı hissediyorum. Bilgileri, deneyimleri ve anlayışları sayesinde karşılaştığım zorlukları aşmamda ve bu çalışmayı tamamlamamda bana yardımcı olduğu için Doç. Dr. Yavuz Ateş'e teşekkürü borç bilirim. Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca bana karşı sabırlı yaklaşımı ve hoşgörülü davranışı, sonsuz desteği, değerli bilgilerini benden esirgemeyen, hiçbir talebimi geri çevirmeyen ve karşılaştığım her zorlukta çözüm bulmak için çokça zaman ayıran Tayfur Gökçek'e çok teşekkür ederim.

Ayrıca, beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan, sonsuz güvenleri ve destekleri için aileme ve bu yolculuk boyunca yanımda olan, beni anlayan ve destekleyen değerli arkadaşlarıma da içten teşekkürlerimi sunarım.

Hüsna YILDIZ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	VIII
KISALTMA LİSTESİ	X
ŞEKİL LİSTESİ	XI
TABLO LİSTESİ	XIV
ÖZET	XV
ABSTRACT	XVII
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Taraması.....	2
1.2 Tezin Amacı.....	10
1.3 Orijinal Katkı	10
2 DAĞITIK ÜRETİME SAHİP DAĞITIM ŞEBEKESİNE ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNİN ENTEGRASYONUNUN İNCELENMESİ.....	12
2.1 Giriş	12
2.2 Dağıtık Üretime Sahip Güç Sistemlerindeki Güç Kalite Sorunları	13
2.3 Güç Sistemlerinde Optimizasyon Uygulamaları	14
2.4 Enerji Depolama Sistemleri	15
2.4.1 Batarya Tabanlı Enerji Depolama Sistemleri	15
3 DAĞITIM ŞEBEKESİ İÇİN KONUMSAL ANALİZ TEMELLİ DAĞITIK ÜRETİM VE DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ	18
3.1 Dağıtık Üretim ve Depolama Sistemlerinin Optimum Konumlandırılması	18
3.2 Önerilen Modelin Matematiksel Formülasyonu	18
3.2.1 Amaç Fonksiyonu	19
3.2.2 Güç dengesi ve Batarya Depolama Sistemi Formülasyonu.....	19
3.3 Test ve Sonuçlar.....	22
3.3.1 Giriş Verileri	22
3.3.2 Durum Analizleri ve Değerlendirilmeleri.....	25

4 DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE ÇOKLU ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN VE ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN VERİMLİ ENERJİ YÖNETİMİ İÇİN GERÇEK ZAMANLI OPTİMİZASYONU	35
4.1 Dağıtık Üretime Sahip Dağıtım Şebekesine Hidrojen Enerji Depolama (HEDS) ve Çoklu Batarya Enerji Depolama Sistemlerinin (ÇBEDS) Entegrasyonları	35
4.2 Dağıtık Üretime Sahip Dağıtım Şebekesine HDS ve ÇBDS Entegrasyonun Benzetim Çalışması Yardımıyla İrdelenmesi	36
4.2.1 Önerilen Enerji Yönetim Modelinin Matematiksel Modeli.....	38
4.3 Test ve Sonuçlar.....	44
4.3.1 Giriş Verileri	44
4.3.2 Durum Analizleri ve Değerlendirilmeleri.....	48
5 SONUÇ VE ÖNERİLER	70
KAYNAKÇA	72
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	78

SİMGE LİSTESİ

DE	Bataryanın Deşarj Verimliliği
$SoE_{i,ess}^{ESS,Max}$	Bataryanın Güvenli Bir Şekilde Şarj ve Deşarj Olması İçin En Yüksek Güç Seviyesi [kW]
$SoE_{i,ess}^{ESS,Min}$	Bataryanın Güvenli Bir Şekilde Şarj ve Deşarj Olması İçin En Düşük Güç Seviyesi [kW]
CE	Bataryanın Şarj Verimliliği
$N_{i,t}^{ESS}$	Batarya Tabanlı Depolama Sistemi İçin Belirlenen Yeterli Büyük Sabit Sayı
$N_{i,t}^{ESS}$	Batarya Tabanlı Depolama Sistemi İçin Belirlenen Yeterli Büyük Sabit Sayı
$SoE_{i,ess,t}^{ESS}$	Batarya Tabanlı Depolama Sistemi İçin T Zamanında ve İlgili Baradaki Depolama Sisteminin Enerji Durumu
ess	Batarya Tabanlı Depolama Sisteminin Kümesi
$SoE_{i,ess}^{ESS,Ini}$	Batarya Tabanlı Depolama Sisteminin Şarj Sürecine Başladığı Andaki Güç Miktarı [kW]
$P_{i,t}^{grid,sell,load,tot}$	Belirli Bir Zamanda Dağıtım Şebekesinin Sağladığı İlgili Baradaki Toplam Net Güç Miktarı [kW]
$P_{i,t}^{Grid,buy,tot}$	Belirli Bir Zamanda Dağıtım Şebekesine Sağlanan İlgili Baradaki Toplam Net Güç Miktarı [kW]
$DR_{i,ess}^{ESS}$	Birim Zamanda Batarya Depolama Sisteminin Ne Kadar Şarj Olacağını Gösteren Deşarj Oranı
$CR_{i,ess}^{ESS}$	Birim Zamanda Batarya Depolama Sisteminin Ne Kadar Şarj Olacağını Gösteren Şarj Oranı
$P_{i,pv,t}^{PV}$	Birim Zamanda Fotovoltaik Tabanlı Üretim Tesisinde Üretilen Güç Miktarı [kW]
i	Dağıtım Sistemindeki Baraların Kümesi
b	Dağıtım Sistemindeki Hatların Kümesi
$P_{i,t}^{bara,akış}$	Dağıtım Sistemi İçerisindeki Baralardan Akan Güç Miktarı [kW]
TL	Dağıtım Şebekesindeki Toplam Net Güç Kaybı [kW]
fv	Fotovoltaik Dağıtık Üretim Tesisinin Kümesi
$P_b^{Line,Cap}$	Hattın Maksimum Kapasitesi [kW]
ΔT	Her Saat İçin Alt Zaman Aralıkları Kümesi

$P_{i,ess,t}^{ESS,disch}$	İlgili Baradaki T Zamanında Batarya Tabanlı Depolama Sisteminin Deşarj Miktarı
$P_{i,ess,t}^{ESS,char}$	İlgili Baradaki T Zamanında Batarya Tabanlı Depolama Sisteminin Şarj Miktarı
$P_{i,load,t}^{Load}$	İlgili Baralardaki Yüklerin Güç Miktarı [kW]
$P_{i,t}^{grid,buy,load}$	Şebekeye Sağlanan Güç Miktarı [kW]
$P_{i,t}^{grid,sell,load}$	Şebekenin Sisteme Sağladığı Güç Miktarı [kW]
$P_{i,t}^{Loss,buy}$	t Anında ve i Barasındaki Şebekeye Enerji Sağlandığı Durumdaki Kayıp Miktarı
$P_{i,t}^{Loss,sell}$	t Anında ve i Barasındaki Şebekenin Enerji Sağladığı Durumdaki Kayıp Miktarı [kW]
$P_{b,t}^{Line}$	t Zamanında b Hattındaki Akan Güç Miktarı [kW]
HL_t	t Zamanında Dağıtım Sistemi İçerisindeki Toplam Kayıp [kW]
t	Zaman dilimi kümesi

KISALTMA LİSTESİ

BEA	Batarya Tabanlı Elektrikli Araç
BEDS	Batarya Tabanlı Enerji Depolama Sistemi
ÇEDS	Çoklu Batarya Tabanlı Enerji Depolama Sistemi
ÇBDS	Çoklu Batarya Depolama Sistemi
DS	Dağıtım Sistemi
DSO	Dağıtım Sistem Operatörü
DÜ	Dağıtık Üretim Sistemi
DÜG	Dağıtık Üretim Grupları
DES	Dağıtık Enerji Kaynakları
EA	Elektrikli Araç
EDS	Enerji Depolama Sistemi
FV	Fotovoltaik
HDS	Hidrojen Enerji Depolama Sistemi
HEDS	Hidrojen Tabanlı Enerji Depolama Sistemi
YES	Yenilenebilir Enerji Kaynakları
YH	Yakıt Hücresi
YHEA	Yakıt Hücreli Elektrikli Araç

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	EDS'nin çeşitleri	15
Şekil 3.1	Önerilen modelin gösterimi için kullanılan IEEE 33 bara sistemi	18
Şekil 3.2	Baralardaki evsel yük profili.....	22
Şekil 3.3	Zamanla değişen toplam yük talebi	23
Şekil 3.4	FV'lerin üretimleri için zamana bağlı değişim profili	24
Şekil 3.5	Şebeke alış ve satış fiyatlandırılması	24
Şekil 3.6	Temel durum için önerilen model görseli	26
Şekil 3.7	Bara 18'de bulunan EDS'nin şarj, deşarj ve enerji durumu	26
Şekil 3.8	Bara 25'de bulunan EDS'nin şarj, deşarj ve enerji durumu	27
Şekil 3.9	Temel durumda dağıtım şebekesindeki güç dengesi ve kayıp güç	27
Şekil 3.10	Durum-1 için önerilen model görseli	28
Şekil 3.11	Bara 3'te bulunan EDS'nin şarj, deşarj ve enerji durumu	28
Şekil 3.12	Bara 10'da bulunan EDS'nin şarj, deşarj ve enerji durumu	29
Şekil 3.13	Durum 1 için dağıtım şebekesindeki güç dengesi ve kayıp güç	29
Şekil 3.14	Durum 2 için önerilen model görseli	30
Şekil 3.15	Bara 3'te bulunan EDS'nin şarj, deşarj ve enerji durumu	30
Şekil 3.16	Bara 10'da bulunan EDS'nin şarj, deşarj ve enerji durumu	31
Şekil 3.17	Durum 2 için dağıtım şebekesindeki güç dengesi ve kayıp güç	31
Şekil 3.18	Durum-3 için önerilen model görseli	32
Şekil 3.19	Bara 2'de bulunan EDS'nin şarj, deşarj ve enerji durumu	32
Şekil 3.20	Bara 4'te bulunan EDS'nin şarj, deşarj ve enerji durumu	33
Şekil 3.21	Durum 3 için dağıtım şebekesindeki güç dengesi ve kayıp güç	33
Şekil 3.22	Farklı durumların temel duruma göre yüzdelik kayıp değişimi.....	34
Şekil 4.1	Geliştirilen sistemin örnek modeli	37
Şekil 4.2	Baralardaki evsel yük profili.....	45
Şekil 4.3	Zamanla değişen toplam yük talebi	45
Şekil 4.4	FV üretim için zamana bağlı değişim profili	46
Şekil 4.5	Batarya tabanlı EA'ların varış ve kalkış süreleri	47
Şekil 4.6	Yakıt hücreli elektrikli araçların varış ve kalkış süreleri	47
Şekil 4.7	Temel durum için önerilen model görsel	48
Şekil 4.8	Şebekenin sisteme sağladığı toplam ve net güç	49
Şekil 4.9	Bara 18'de bulunan BEDS-1 'nin şarj, deşarj ve enerji durumu	50

Şekil 4.10	Bara 18’de bulunan BEDS-2 ’nin şarj, deşarj ve enerji durumu	50
Şekil 4.11	Bara 18’de bulunan BEDS-3 ’ün şarj, deşarj ve enerji durumu	51
Şekil 4.12	Bara18’de bulunan BEDS-4 ’ün şarj, deşarj ve enerji durumu	51
Şekil 4.13	Hidrojen tankında bulunan ve araç tarafından talep edilen hidrojen miktarı	52
Şekil 4.14	Hidrojen tankındaki bulunan ve elektrolizle üretilen hidrojen miktarı	52
Şekil 4.15	Batarya tabanlı bir EA ’ın şarj, deşarj ve enerji durumu profili	53
Şekil 4.16	Yakıt hücreli iki farklı aracın yakıt tüketim ihtiyaçları ve yakıt durumu	53
Şekil 4.17	Temel durum için test sistemindeki güç dengesi	54
Şekil 4.18	Temel durum için i18 barasındaki güç dengesi	55
Şekil 4.19	Temel durum için i33 barasındaki güç dengesi	56
Şekil 4.20	Durum-1 için önerilen model görseli	57
Şekil 4.21	Durum 1 için Bara 18’de bulunan BEDS-1 ’nin şarj, deşarj ve enerji durumu	57
Şekil 4.22	Durum 1 için Bara 18’de bulunan BEDS-2 ’nin şarj, deşarj ve enerji durumu	58
Şekil 4.23	Durum 1 için Bara 18’de bulunan BEDS-3 ’nin şarj, deşarj ve enerji durumu	58
Şekil 4.24	Durum 1 için Bara 18’de bulunan BEDS-4 ’nin şarj, deşarj ve enerji durumu	59
Şekil 4.25	Durum 1 için Bara 18’deki toplam şarj, deşarj ve enerji durumu.....	59
Şekil 4.26	Durum 1 için şebekeden talep edilen güç ve şebekenin toplam sağladığı güç miktarı	60
Şekil 4.27	Durum 1 için hidrojen tankında bulunan ve araç tarafından talep edilen hidrojen miktarı.....	61
Şekil 4.28	Durum 1 için hidrojen tankındaki bulunan ve elektrolizle üretilen hidrojen miktarı.....	62
Şekil 4.29	Durum-1 için i18 barasındaki güç dengesi	62
Şekil 4.30	Durum-1 için i2 barasındaki güç dengesi	62
Şekil 4.31	Durum-2 için önerilen model görseli	63
Şekil 4.32	Durum 2 için bara 18 de bulunan BEDS’lerin şarj, deşarj ve enerji durumu	64
Şekil 4.33	Durum 2 için Şebekeden talep edilen güç ve şebekenin kayıp ile sağladığı güç miktarı.....	65
Şekil 4.34	Durum 2 için Hidrojen tankında bulunan ve araç tarafından talep edilen hidrojen miktarı.....	65

Şekil 4.35	Durum 2 için hidrojen tankındaki bulunan ve elektrolizle üretilen hidrojen miktarı.....	66
Şekil 4.36	Durum 2 için i2 barasındaki güç dengesi.....	67
Şekil 4.37	Durum 2 için i18 barasındaki güç dengesi.....	67
Şekil 4.38	Farklı durumların temel duruma göre yüzdelik kayıp değişimi.....	68



TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1	Batarya tabanlı enerji depolama sistemi için literatür çalışmalarının incelenmesi	9
Tablo 3.1	Optimum konumsal analiz için deterministik yaklaşımın sembol dizisi	19
Tablo 3.2	Batarya tabanlı enerji depolama sistemi teknik bilgiler	24
Tablo 3.3	Temel duruma göre toplam sistem güç kaybının yüzdelik değişimi	34
Tablo 4.1	Dağıtık üretime sahip dağıtım şebekesine HDS, ÇBDS ve EA'ların dahil edildiği gerçek zamanlı yaklaşımın sembol dizisi	38
Tablo 4.2	Batarya tabanlı enerji depolama sistemi teknik bilgiler	47
Tablo 4.3	HEDS'nin teknik bilgileri	48
Tablo 4.4	Araçların ve farklı depolama sistemlerinin eklenmesiyle birlikte gerçek zamanlı optimizasyon sonucunda temel duruma göre güç kaybının yüzdelik değişimi	68

Enerji Depolama Sistemlerinin Güç Sistemlerindeki Teknoekonomik İşletimi İçin Yeni Bir Yaklaşımın Geliştirilmesi

Hüsna YILDIZ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ozan ERDİNÇ

Eş-Danışman: Doç.Dr. Yavuz ATEŞ

Teknolojik ilerleme ve küreselleşme ile birlikte, enerjiye olan küresel talep sürekli olarak artmakta ve enerji arzının talebi karşılaması zorunlu olmaktadır. Bu durum, elektrik enerjisinin sürekli ve dengeli bir şekilde sağlanması gerekliliğini ortaya çıkarırken, güç sistemlerinin işleyişi, çeşitli faktörler nedeniyle zorlaşabilmekte ve enerji kesintileri gibi istenmeyen durumları tetikleyebilmektedir. Elektrik dağıtım sistemleri, evsel, ticari ve endüstriyel tüketicilere kesintisiz ve kaliteli enerji sağlama sorumluluğuna sahipken, bu sistemler, elektrik enerji sistemlerinin kritik bir parçası olarak kabul edilmektedir. Karbondioksit salımlarının azaltılması amacıyla modern dağıtım sistemlerinde artan yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı ve yeni yük türlerinin eklenmesi, güç sistemlerindeki operasyonel zorlukları daha da karmaşık hale getirmektedir. Bu zorluklar ışığında, Enerji Depolama Sistemleri, mevcut ve olası ağ sorunlarına esnek bir çözüm olarak ön plana çıkmaktadır. Bu tez çalışması, dağıtık üretime sahip bir dağıtım şebekesi içerisinde çeşitli enerji depolama sistemlerinin etkin yönetimi için optimizasyon

temelli bir karar destek mekanizması geliştirmeyi hedeflemektedir. Bu mekanizma, genel enerji sistemi verimliliğini ve güvenilirliğini artırma niyetinde olup, aynı zamanda güç kayıplarını en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Güç sistemlerinde, artan dağıtık enerji kaynaklarının entegrasyonu, bu tezde dikkate alınan güneş enerjisi tabanlı Fotovoltaik sistemler ve elektrikli araçlar gibi unsurların belirsiz operasyon süreçlerini gerektirir. Bu çalışma, bu belirsizlikleri hesaba katan gerçek zamanlı bir optimizasyon modeli sunmaktadır. Ayrıca, bu çalışma, enerji depolama sistemlerinin, özellikle batarya tabanlı depolama sistemlerinin, güç kalitesi sorunları üzerindeki etkisini incelemekte ve bunların güç kaybı üzerindeki etkisini analiz etmektedir. İlk olarak, batarya tabanlı enerji depolama sistemlerinin konumsal analizi ve güç kaybı üzerindeki etkileri incelenir. Daha sonra, bu çalışma, birden fazla batarya tabanlı ve yakıt hücresi enerji depolama sistemlerini, farklı yük türlerini ve yenilenebilir enerji sistemlerini kapsayan, gerçek zamanlı güç kaybı analizini sunar. Bu analiz, enerji sistemlerinin karmaşıklığı ve dinamiğini göz önünde bulundurarak, Enerji depolama sistemlerinin dağıtım şebekesinde etkin yönetimine yönelik optimizasyon yaklaşımları tabanlı karar verme mekanizması geliştirilmesi yeni bir yaklaşım sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çoklu batarya depolama sistemi, elektrikli araçlar, gerçek zamanlı optimizasyon, hidrojen depolama sistemi.

.

Development of a New Approach for the Techno-economic Operation of Energy Storage Systems in Power Systems

Hüsna YILDIZ

Department of Electrical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Ozan ERDİNÇ

Co-supervisor: Asst. Prof. Dr. Yavuz ATEŞ

With the progress of technology and globalization, the global demand for energy is continuously escalating, compelling energy supply to balance this ever-increasing demand. The dynamic hence engenders an imperative necessity for the consistent and well-regulated provision of electrical energy. However, the operation of power systems can be intricate due to various factors, potentially triggering undesired scenarios such as energy interruptions. Recognized as a critical component of electrical power systems, electric distribution systems bear the responsibility of supplying uninterrupted and high-quality energy to a variety of consumers including residential, commercial, and industrial. The increasing use of renewable energy sources in modern distribution systems, driven by the aim to reduce carbon dioxide emissions, alongside the introduction of new load types, further compounds the operational challenges in power systems. In light of these difficulties, Energy Storage Systems (ESS) have emerged as a flexible solution to existing and prospective network issues. Consequently, this thesis aims to develop an

optimization-based decision support mechanism for the effective management of various energy storage systems. This mechanism, while focusing on enhancing the overall efficiency and reliability of the energy system, also strives to minimize power losses. Given the growing integration of distributed energy resources in power systems, such as photovoltaic (PV) systems and electric vehicles, this study presents a real-time optimization model that accounts for the inherent operational uncertainties associated with these resources. In addition, the study investigates the impact of energy storage systems, particularly battery-based storage systems, on power quality issues and their effect on power loss. The research process begins with an examination of the positional analysis of battery-based energy storage systems and their influence on power loss. This analysis is followed by the presentation of a real-time power loss analysis that encompasses multiple battery-based and fuel cell energy storage systems, different types of loads, and renewable energy systems. Recognizing the complexity and dynamics of energy systems, this research proposes a novel approach for developing an optimization-based decision-making mechanism to effectively manage energy storage systems within the distribution network.

Anahtar Kelimeler: Multiple battery storage system, electric vehicles, real-time optimization, hydrogen storage system.

Enerji alanındaki teknolojik dönüşüm, elektrik enerjisinin sürekli ve yüksek kalitede teminini gerektiren modern toplumun ihtiyaçlarına yanıt vermeye yardımcı olmaktadır. Bu hizmetin sağlanması, özellikle enerji talebinin sürekli olarak arttığı bir dünyada, elektrik enerjisi dağıtım sistemlerinin sorumluluğunda olmaktadır [1]. Bu sistemler, kesintisiz ve kaliteli enerji sağlamanın yanı sıra, enerji arz ve talebini dikkatlice yönetme ve bir dizi karmaşık operasyonel süreci yönetme zorunluluğu ile karşı karşıyadır [2]. Bu süreçlerin artan karışıklığı, enerji dağıtım sistemlerinin performansını iyileştirmek ve operasyonel süreçlerini daha etkin hale getirmek için yeni çözümler arayışını tetiklemiştir. Bu çözümler arasında, enerji depolama sistemleri (EDS) ön plana çıkmaktadır [3].

EDS'ler, geniş bir uygulama yelpazesine sahip olmaları, arz-talep dengesini yönetme yetenekleri ve enerji kaynaklarının optimum kullanımını sağlama potansiyelleri nedeniyle büyük öneme sahip olmuştur. Özellikle batarya ve hidrojen depolama sistemleri, enerji dağıtım sistemlerine ve dağıtık enerji kaynaklarına entegre edilerek, enerji sisteminin genel performansını artırmakta ve güç kayıplarını azaltmaktadır [4]. Bu sistemlerin enerji dağıtım ağına entegrasyonu, güç kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir ve enerji sistemlerinin etkinliğini ve güvenilirliğini artırabilir.

Enerji sistemlerinin karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik çabalar, dağıtık üretim sistemlerinin ve özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini artırmaktadır. Özellikle, güneş enerjisi temelli FV sistemler, yüksek verimlilik ve karbondioksit emisyonlarını önemli ölçüde azaltma potansiyeli nedeniyle büyük önem kazanmıştır [5]. Bu sistemlerin enerji şebekesine entegrasyonu, enerji sisteminin genel verimliliğini ve güvenilirliğini artırabilir ve güç kayıplarını önemli ölçüde azaltabilir. Buna ek olarak, modern enerji sistemleri, bir dizi farklı yük türünün gerekliliklerini karşılamak için tasarlanmıştır. Bu yük türleri arasında, özellikle elektrikli ve hidrojenli araçlar önemli bir yer tutmaktadır. Bu araçların enerji

sistemine entegrasyonu, enerji talebinin yönetilmesinde önemli bir rol oynar ve enerji sisteminin genel verimliliğini ve güvenilirliğini artırabilir.

Bu bağlamda, literatürde enerji depolama sistemlerinin, dağıtık üretime sahip enerji dağıtım sistemlerinde etkin bir şekilde yönetiminin önem kazandığı gözlemlenmektedir. Bu sistemlerin çeşitliliği ve dağıtık üretime sahip bir şebeke içinde farklı yük tiplerinin güç sistemlerine entegrasyonu, birçok çalışmada ayrı ayrı incelenmiştir.

1.1 Literatür Taraması

Günümüzde, artan nüfus ve sanayileşmeden kaynaklanan enerji ihtiyacı kısıtlı enerji kaynaklarıyla karşılanamamakta, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki fark hızla büyümektedir. Bu durumda, mevcut enerji kaynaklarından daha etkili bir biçimde yararlanmak ve enerjinin sürekli olmasına duyulan ihtiyaç giderek artan bir önem kazanmaktadır. Elektrik şirketlerinin ve tüketicilerin en önemli endişelerinden biri de enerjide güç kalitesi ile ilgilidir. Son yıllarda bu konu elektrik şirketleri ve müşteriler için kritik bir konu haline gelmektedir. Tüketicilerin yaşadığı önemli sayıda kesinti, güç sistemindeki arızalardan kaynaklanmaktadır. Fakat bununla birlikte, güç kalitesiyle ilgili endişeler, güç sisteminin güvenilirliği artırılarak azaltılabilmektedir [6]. Dağıtım sistemi operatörünün (DSO) birincil amacı, güç kaynağının güvenilirliğini ve kalitesini minimum maliyetle sağlamaktır [7]. Uygun olmayan tahsis, gerilim yükselme etkisi, artan arıza seviyesi ve koruma bozulması gibi olumsuz etkilerden dolayı güç sistemlerinde EDS'lerin optimum planlaması ve entegrasyonu kritik bir öneme sahiptir. Stokastik optimizasyon modeli gibi çeşitli çözüm teknikleri kullanılarak güç sistemlerindeki belirsizlikler ve enerji kaybı gibi sorunlara çözüm önerileri bulunulabilmektedir [8]. Bunların yanı sıra, güç sisteminin pik yük talebini karşılamak, enerji verimliliğini artırmak, güç kalitesi yönetimini kolaylaştırmak için optimum boyutlandırılmış ve konumlandırılmıştır EDS'lere ihtiyacı duyulmaktadır.

Batarya tabanlı EDS'ler; teknik, ekonomik ve çevresel avantajlar sağlamak için güç sistemlerine giderek daha fazla entegre edilmektedir. Bu avantajlar arasında güç kalitesi iyileştirilmesi, gerilim sapsmasının azaltılması, frekans regülasyonu, yük kaydırma, yük dengeleme ve tepe noktası tıraşlama, yenilenebilir enerji kaynaklarının (YES) entegrasyonunun kolaylaştırılması, şebeke genişletme ve

işletme maliyetini azaltma, işletme rezervleri ve sera gazı azaltımı yer almaktadır. Hidrojen enerji depolama sistemlerinin ise sadece enerji sisteminin sürdürülebilirliğini ve güvenilirliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda sistemin esnekliğinde önemli bir işlevi yerine getirdiği varsayılmaktadır. Sürdürülebilir olmayan karbon bazlı bir ekonomiden sürdürülebilir bir hidrojen bazlı ekonomiye geçişin uygulanabilirliğini araştırma konularına hala eklenmektedir. Çok çeşitli EDS türleri arasında, elektrik-hidrojen dönüşüm sürecinin tamamının karbonsuz olması ve yalnızca su kullanılması hidrojenli EDS'lerin tercih edilebilirliğini artırmaktadır [9].

Batarya ve hidrojen tabanlı EDS'ler gerilim profilini belirli sınırlar içinde tutmak ve toplam enerji maliyetlerini azaltmak için önem arz eden birimlerden biri haline gelmektedir ve güç sistemine bağlantısı ve etkileri araştırılması gereken konulardan biridir. EDS maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı güç sistemlerindeki geniş uygulama alanlarını kolaylaştırmak için optimum tahsis yönteminin kullanılması gerekmektedir. EDS entegrasyonları bu bağlamda, optimum boyut ve konuma, bara gerilimi hassasiyetine, şebekeye bağlı yüklerin özelliğine ve kurulum maliyeti dahil olmak üzere birçok faktöre bağlı kalmaktadır. Literatürde EDS'lerin şebeke sistemi ile etkileşimini konu alan oldukça fazla sayıda çalışma bulunmaktadır.

Yapılan bir çalışmada dağıtım sisteminin gerilim regülasyonu ele alınarak dağıtım sistemi operatörü tarafından işletilen ilgili EDS kapasitesini elde etmek için bir optimizasyon problemi geliştirilmiştir. Önerilen hiyerarşik metotta, depolama yatırım maliyeti ile işletme ve bakım maliyetinden oluşan toplam maliyeti en aza indirmek ve farklı baraların gerilim seviyelerini sınırlar içerisinde tutmak amaçlanmıştır [10].

Azizivahed vd. [11], gerçekleştirdikleri çalışmada dağıtım sistemlerinde yenilenebilir enerji kaynakları ve EDS'lerin sistem güvenilirliğine etkisini araştırmışlardır. Dengeli ve dengesiz güç sisteminin yeniden yapılandırılmasında Expected Energy Not Supplied ve Voltage Stability Index metotları incelenip vaka çalışmalarında karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, FV üretimdeki belirsizlik de dikkate alınarak sistem güvenilirliği arttırılmıştır. 119 baralı bir sistemde yapılmış olan çalışmada, işletme maliyetlerinin minimizasyonu altında optimum şarj yönetimi ve şebeke topolojisi belirlenmiştir. Kalantar-Neyestanaki ve Cherkaoui [12] tarafından önerilen, güç sisteminde bulunan dağıtık üretim

kaynaklarının, ortak bağlantı noktasındaki güç esnekliği kavramının üzerinde duran çalışmada, talep ve yenilenebilir enerji üretim profillerindeki belirsizlik dikkate alınmıştır. Ortak bağlantı noktalarındaki dengesizliği azaltılması için batarya tabanlı EDS'nin güç esnekliği enjeksiyonunun yönetimi yapılmıştır. İşletme maliyetinin minimize edildiği çalışmada, gerçek zamanlı yönetim sırasında dağıtık enerji kaynakları ile EDS arasındaki koordineli işletme incelenmiştir. Wang vd. [3], tarafından yapılan çalışmada, dağıtım sistemi operatörü açısından Rüzgâr enerji kaynağının güç üretim ve kurulum belirsizliği de dikkate alınarak toplam aktif güç dengesizliğini minimize edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, güç dengesizliği ve gerilim yükselmesi sorunları giderilmiş olup, güç sistemlerinin barındırma kapasitesini (hosting capacity) arttıran optimum EDS konfigürasyonu geliştirilmiştir. Lakshmi ve Ganguly [8], güç sistemlerindeki enerji kayıplarının minimize edilmesi amacıyla, EDS'lerin FV inverterler ile koordineli çalıştığı ve FV üretimin olmadığı saatlerde inverterlerin optimum ayarının yapılarak reaktif güç desteğinin sağlandığı bir çalışma sunmuşlardır. Sun vd. [13], yaptığı çalışmada güç sistemlerindeki frekans regülasyonu için EDS'lerin hedef takibini içeren bir optimizasyon problemi üzerinde durulmuştur. Bu sayede, EDS'lerin çalışma bilgilerinin bilinmediği veya kısıtlı bilginin olduğu bir durumda frekans regülasyonunun sağlanabildiği bir çalışma sunulmuştur. Nazemi vd. [14], tarafından yüksek etkili düşük olasılıklı duruma sahip doğal afetlerin belirsizliği de dikkate alınarak dağıtım sistemlerinin ve elemanlarının doğal afetler karşısındaki dayanıklılığının artırılması sağlanmıştır. Bu yöntemde depremin sistem üzerindeki etkisi ve dağıtım sistemi elemanlarının kullanım durumları hakkında bilgilenmek için kırılma etkisi kavramı ele alınmıştır. Bu kavram ile birlikte sistem savunmasını desteklemek için batarya tabanlı EDS'lere odaklanıldığı ve EDS'lerin optimum kapasite ve konumunu belirlemek üzere esneklik indeksinin maksimize edildiği bir matematiksel model sunulmuştur. Yi vd. [15], gerçekleştirdikleri çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve yüklerin belirsizliği de dikkate alınmış olup aktif güç sistemlerindeki EDS'lerin ekonomik dağılımındaki hata minimize edilerek EDS'lerin optimum konum ve boyutlandırılması için bir matematiksel yöntem geliştirilmiştir. Haggi vd. [16] tarafından önerilen çalışmada, aktif güç sistemlerinde bulunan FV ve hidrojen tabanlı sistemlerinin riskten kaçınan işbirlikçi işletmesi için gün öncesi planlamadaki toplam işletme maliyetini minimize edilmesi ve güç kalitesinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Karthikeyan vd.

[17], FV sisteme sahip radyal güç sistemlerindeki ısı pompası yüklerinin, batarya tabanlı EDS'ler ile esnek bir şekilde yönetilmesi için yeni bir metod geliştirmişlerdir. Mehrjerdi ve Hemmati [18], güç sisteminin genişleme planlamasındaki yatırım ve şebeke maliyetinin minimize edildiği, yük ile rüzgâr enerjisi üretimindeki belirsizliğin dikkate alındığı stokastik bir model sunmuşlardır. Rüzgâr türbini ve hidrojen tabanlı EDS'nin optimum kapasitesinin ve konumunun belirlenmesinin de güç sistemi genişlemesindeki etkisi ayrıca incelenmiştir. Rajesh vd. [19] tarafından geliştirilen çalışmada, dengesiz bir radyal güç sisteminde rüzgâr enerjisi üretimi tamamen batarya tabanlı EDS'nin şarjında kullanılarak güç kayıpları minimize edilmiş olup, EDS'nin optimum konumu ve Chaotic-based Big Bang-Big Crunch algortması ile optimum anahtarlama darbesi belirlenmiştir. Mehrjerdi ve Hemmati [20], önerdikleri modelde batarya tabanlı EDS'lerin inverterler vasıtasıyla optimum işletimi sağlanarak sistem operatörü bakış açısıyla enerji üretim maliyeti ve yük atma maliyeti minimize edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, gerilim profilinin iyileştirildiği ve reaktif güç kayıplarının azaltıldığı, bunlara bağlı olarak da günlük maliyetin azaldığı görülmüştür. Adel A. vd. [21], radyal güç sistemlerinde FV'nin EDS ile denge optimizasyonuna dayalı koordineli işletimini ele almış olup, arz edilmeyen enerji maliyeti, FV ve EDS kurulumlarının yatırım maliyeti, işletme maliyetleri ve dağıtım hatlarındaki güç kayıpları minimize edilmiştir. Çalışmada ayrıca, dağıtım sistemlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının optimum dağılımının gerçekleştirilmesi ve dağıtım sistemlerinin güvenli çalışmasının sağlanması amaçlanmıştır. Thokar vd. [22], Corrected Moth Search tabanlı optimizasyon metodu ile dağıtım sistemlerinde birden fazla FV'nin ve EDS'nin çok amaçlı koordinasyonunu incelemişlerdir. Önerilen yöntem sayesinde sistemin gerilim profili ile güç/talep dengesinin iyileştirilmesi ve dağıtık üretim kaynaklarının ile EDS'lerin boyutlandırılması ve konumlandırılması ele alınmıştır. Ayrıca geliştirilen modelde, dağıtık üretim kaynaklarının maliyet etkinliği göz ardı edildiğinden, FV'lerin ve EDS'lerin optimum kapasitesini ve konumunu belirlemek için oldukça basitleştirilmiştir. Yuan vd. [23], lityum-iyon batarya tabanlı EDS'lerin FV sistemler ile işletimi için güç kayıplarını minimize etmeyi amaçlayan Cayote Optimizasyonu tabanlı bir algoritma geliştirmişlerdir. Stecca vd. [6], EDS'lerin güç sistemi içerisindeki işletimini tekno-ekonomik yönden araştırarak, güç kalitesi, gerilim kontrolü, pik traşlama-yük düzeltme, frekans kontrolü ve enerji arbitrajı açısından esnek yönetim faydalarını

incelemişlerdir. Pan vd. [24], FV ve rüzgâr enerjisi tabanlı yenilenebilir enerji kaynakları ile belirsizliğini ve hidrojen tabanlı EDS birimini içeren stokastik bir model geliştirmişlerdir. Mevsimsel hidrojen depolama teknolojisi modeli ile aktif güç sistemi modeli oluşturulmuş ve sistemde hidrojen depolama sisteminin dikkate alındığı durum çalışmalarında ekonomik avantaj sağlandığı görülmüştür. Bozorgavari vd. [25], şebeke esnekliğini artırmak için dağıtım sistemi bakış açısı ile batarya tabanlı EDS'lerin optimum boyut ve konum planlamasını sunmuştur. Problem, sistemdeki aktif/reaktif güçteki, şarj/deşarj fiyatlarındaki ve yenilenebilir enerji kaynaklarının çıkış gücündeki belirsizlik de dikkate alınarak Sınırlı Belirsizlik Tabanlı Sağlam (Robust) optimizasyona dayalı olarak modellenmiştir. Huang vd. [26], DC güç sisteminin güç talebi kontrolü için batarya ve ultrakapasitör tabanlı hibrit EDS yönetimi sunmuşlardır. Çalışmada, düşük frekansta temel güçü ve yüksek frekansta dalgalı gücü elde etmek için güç talebi örnek verilerinin ayrık Fourier Spektrum analizi gerçekleştirilmiştir. Tepki süresi 100 ms'den fazla fazla bataryalar ile düşük frekanslı güç talebi karşılanırken depolama süresi kısa ve tepki süresi milisaniye olan ultrakapasitör ile yüksek frekanslı güç talebi karşılanmıştır. Önerilen hibrit EDS sisteminin ayrıca DC gerilim dalgalanmasını azaltıp sistemin güç değişimini yumuşattığı gözlenmiştir. Dağıtım sistemlerinde dağıtım fideri boyunca zayıf gerilim regülasyonunun engellenmesi için Yükte Kademe Değiştirme Transformatörlerinin (OLTC) ve batarya tabanlı EDS'lerin koordineli işletimi Tewari vd. [27], tarafından önerilmiştir. Çalışmada, kademe konum değişikliği sayısı azaltılıp aynı zamanda bataryaömrünü artırılırken, sistemin gerilim profili iyileştirilmiştir. Ehsan ve Yang [28], önerdikleri stokastik modelde rüzgâr türbini, FV ve EDS'nin boyutlandırılmasını ve konumlandırılmasını incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, stokastik modelde deterministik modele göre daha fazla kazanç sağlanmış olup baralardaki gerilim dalgalanmalarının azaldığı gözlenmiştir. Radyal güç sistemine entegre edilmiş batarya tabanlı EDS'lerin optimum boyutu, konumu ve sayısı Zheng vd. [10], tarafından incelenmiş olup bara gerilim regülasyonu ve sistem güvenilirliği kısıtları önerilen modele dahil edilmiştir. Sedghi vd. [29], EDS'lerin rüzgâr enerjisinin belirsizliği ile birlikte çalıştığı durum için kapasite ve konum boyutlandırılmasını Parçacık Sürüsü Optimizasyonuna dayanan bir metotla ortaya koymuşlardır. Elde edilen sonuçlarda, depolama birimlerinin reaktif güç yeteneği dikkate alındığında kapasite ve maliyetin azaldığı görülmüştür. Dengesi güç sistemlerinde, EDS'lerin

aktif ve reaktif güç kayıplarına olan etkisi detaylı bir şekilde Watson vd. [30], tarafından incelenmiştir. Das vd. [31], EDS'lerin pik yüklenmedeki davranışını, enerji verimliliği ile güç kalitesine olan etkisini ve enerji kayıpları üzerindeki rolünü incelemişlerdir. Su vd. [32], enerji fiyatları ve esnek yüklerdeki belirsizliği de dikkate alarak EDS'ler için Kayıp Hassasiyet İndeksi tanımlamışlardır. Zidar vd. [33] ve Saboori vd. [9], EDS'lerin entegrasyon sorunları ve zorlukları kapsamında optimizasyon yöntemi, yük modeli, amaç fonksiyonu vb. kategorilendirmeleri içerecek şekilde detaylı bir inceleme makalesi sunmuşlardır. Wang vd. [34], önerdikleri merkezi olmayan dağıtık koordinasyon modelinde, FV sistemlerin sebep olduğu gerilim dalgalanmalarının EDS'ler tarafından kontrolünü ele almışlardır. Güneşli ve bulutlu havalarda gerçekleştirilen ölçümlere dayanan durum çalışmalarında EDS'lerin gerçek zamanlı takibi ile doluluk oranı istenen değerler arasında tutulmuştur. Jayasekara vd. [35], EDS'lerin gerilim regülasyonuna, kayıp ve tepe noktası azaltımına sağladıkları katkıları da göz önüne alarak gün öncesi planlamasına dayalı maliyet minimizasyonunu incelemişlerdir. Sisteme yapılan EDS entegrasyonunun, şebeke yük hacmini ve dağıtık üretim kapasitesini artırdığı sonucuna varılmıştır. Nick vd. [36] geliştirdikleri modelde, EDS'lerin optimum boyut ve konumu kapsamında gerilim saptmaları ve hat tıkanıklıkları sorunları giderilmiştir. Ayrıca, şebeke rekonfigürasyonu yapıldığında EDS'lerin kapasitelerinde, dolayısıyla maliyetlerde önemli ölçüde azalma görülmüştür. Khalid Mehmood vd. [37], batarya değişim maliyetini azaltmak için batarya ömrünü etkileyen çeşitli faktörleri dikkate alarak dağıtım sistemindeki gerilim regülasyonunu sağlamayı ve optimum konum ile boyutunu belirlemeyi planlamışlardır. Çok amaçlı optimizasyon modelinde birinci amaç enerji kayıplarının minimize edilmesi, ikinci amaç ise rüzgâr ve FV tabanlı dağıtık üretim birimleri ile batarya tabanlı EDS'lerin yatırım maliyetlerinin minimize edilmesi olarak belirlenmiştir. Azizivahed vd. [38] tarafından, dağıtık üretim kaynaklarının ve EDS'lerin bulunduğu bir güç sisteminin güvenilirliği ve ekonomik işletimi açısından işletme maliyetleri ile sağlanamayan enerji maliyetlerinin entegre minimizasyonu gerçekleştirilerek optimum tekno-ekonomik işletme yapısı önerilmiştir. Singh ve Bishnoi [39], aktif güç sisteminde yer alan yakıt hücresinin stratejik yerleşimini ele almışlardır. Çalışmada ayrıca yakıt hücresi, FV ve rüzhar türbini için optimum boyut ve konum analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonuçlarında, FV ve rüzgâr türbini bazlı dağıtık üretim kaynaklarının enerji

kayıplarını azalttığı, EDS'lerin ise gerilim dalgalanmalarındaki regülasyona önemli oranda destek verdiği görülmüştür. Khani vd. [40], hidrojen tabanlı enerji depolama sistemi ile hidrojenli araçlara enerji tedariki ve enerji piyasasına işletme rezervi tedarikinin optimum planlaması sağlanmıştır. Hidrojen yakıt istasyonlarının işletme rezerv piyasasına katılımı ile elde edilen kazanç artmaktadır. Elektrik güç sisteminde, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve elektrikli araçların artan ve belirsiz kullanımı nedeniyle gelecek talep planlamaları ciddi bir sorun haline gelmektedir. Bu açıdan da Tao vd. [41] önerdikleri stokastik sürdürülebilir ulaşım modeli ile işletme maliyeti ve karbon emisyonunu minimum seviyede tutarak hidrojen kaynaklı yakıt hücreli elektrikli araçların şarj yönetimini incelemişlerdir. Pan vd. [24] tarafından hidrojen üretimi ve mevsimsel hidrojen depolama teknolojileri dikkate alınarak bir elektrik-hidrojen entegre enerji sistemi için planlama modeli önerilmiştir. Üretim ve yük belirsizliğinin dikkate alındığı çalışmada entegre hibrit depolama sisteminin daha fazla ekonomik fayda sağladığı görülmüştür. Hidrojende depolamanın şebeke seviyesinde entegrasyonu için tekno-ekonomik değerlendirme çalışması Lei Li vd. [42] tarafından yapılmıştır. Çalışmada özellikle de hidrojen tedarik zinciri için hammadde sorunları üzerinde durulmuş olup dağıtım sisteminde alternatif hidrojen taşıyıcılara yer verilmesi teşvik edilmiştir. Xiao vd. [43], geliştirdikleri modelde yenilenebilir enerji tabanlı dağıtık üretimin, hidrojen enerjili araçların ve hidrojen tabanlı EDS'lerin bulunduğu bölgesel bir enerji ticareti yapısını incelemişlerdir. Teng vd. [44], güç sistemine entegre ettikleri çoklu enerji depolama sistemlerinin ekonomik analizi gerçekleştirmişler ve şebekeye bağlı yenilenebilir enerji kaynaklarının yüksek oranda olduğu durumlarda sadece batarya tabanlı depolamaya göre hibrit depolamanın daha fazla ekonomik kazanç sağlandığını gözlemlemişlerdir.

İncelenen ve analiz edilen literatür çalışmaları ışığında bu çalışma çeşitli enerji depolama türlerinin kullanıldığı literatüre şebeke tarafında hidrojen ve lityum-iyon bataryanın hibrit depolama sistemi olarak kullanıldığı, dağıtık üretime sahip dağıtım şebekesinin tüm belirsizlik durumları dikkate alınarak optimizasyon modeli katkı sağlayacaktır. Ayrıca BEDS, lityum-iyon (Li-ion) batarya, kurşun-asit batarya, sodyum-kükürt batarya, nikel-hidrojen batarya, redoks akışlı batarya(RFB) vb. gibi çeşitli batarya türlerine sahiptir. Hidrojen Depolama Sistemleri (HDS), enerji yoğunluğu yüksek, uzun vadeli enerji saklama kapasitesi sunan sistemlerdir.

Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının depolanması ve enerji arzının dengelenmesinde önemli bir rol oynarlar. Akademik çalışmalar, bu sistemlerin verimliliği, ölçeklenebilirliği ve çevresel etkilerini ele alır.

Batarya Enerji Depolama Sistemleri (BEDS), hızlı tepki süreleri ve yüksek güç kapasitesi ile dikkat çeker. Kısa süreli enerji talepleri ve yük dengelemesi için idealdir. BEDS üzerine yapılan akademik araştırmalar, bu sistemlerin enerji verimliliği, ömür süresi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından avantajlarını ve sınırlılıklarını inceler.

Tablo 1.1 Batarya tabanlı enerji depolama sistemi için literatür çalışmalarının incelenmesi

Ref.	Güneş Santrali	Rüzgar Santrali	Gerilim Reg.	Optimizasyon	Güç Sistem Esnekliği	Belirsizlik (yük,yenilenebilir enerji kaynakları)
[11]	✓	×	×	×	×	×
[12]	✓	×	×	Stokastik optimizasyon	✓	✓
[8]	✓	×	✓	Nonlinear optimizasyon	×	×
[13]	×	×	×	Bi-level optimization	×	×
[15]	✓	×	✓	Stokastik optimizasyon	×	✓
[18]	×	✓	✓	Stokastik optimizasyon	×	✓
[20]	×	×	✓	Lineer optimizasyon	×	×
[6]	✓	×	✓	Two-stage optimizasyon	✓	✓
[25]	✓	×	✓	Robust optimizasyon	✓	✓
[28]	✓	✓	✓	Stokastik optimizasyon	×	✓
[29]	✓	✓	✓	MILP	✓	×
[9]	×	✓	✓	Multi-objective optimizasyon	×	✓

Detaylı bir literatür taraması yapılarak, çeşitli akademik çalışmaların temel özellikleri ve sonuçları Tablo 1.1’de sınıflandırılmıştır. Analiz edilen çalışmaların genel bakışı, çeşitli açılardan enerji depolama sistemlerinin ve dağıtık üretim

birimlerinin konumsal analizi üzerine odaklanmaktadır. Bu kapsamlı literatür taraması, özellikle dağıtık üretim kaynakları ve enerji depolama sistemlerinin entegrasyonunun dağıtım şebekeleri üzerindeki etkilerini kapsamlı şekilde araştıran çalışmaların artmakta olduğunu göstermiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, dağıtık üretime sahip dağıtım şebekesine entegre edilen birden fazla batarya tabanlı depolama sistemi ve yakıt hücresi (YH) yeşil hidrojen sistemine sahip bir EDS olarak elektrolizör ve hidrojen tankına sahip depolama sistemi aracılığıyla, gerçek zamanlı güç kayıp minimizasyonunu ele alarak ağırlıklı olarak güç dengesizliğini gidermek, gerilim dalgalanmalarını azaltmak ve genel sistem güvenilirliğini ve güvenliğini artırmaktır. Bu amaç doğrultusunda, belirsiz enerji arz ve talebini karşılamak için karma tam sayılı doğrusal programlama ile optimum enerji yönetimi gerçekleştirildi. Bu modelin ana hedefi, güç sistemindeki toplam güç kaybını en aza indirmektir.

Bu araştırmanın diğer bir hedefi, farklı tipteki elektrikli araçlar gibi belirli yüklerin şebekeye eklenmesiyle sisteme olan etkisini dikkate alarak dağıtım şebekelerinin gerçek zamanlı güç kayıp minimizasyonunu gerçekleştirmektir. Bu çerçevede, tekno-ekonomik analizler yapılacak ve güç sistemlerindeki işlemler için yeni bir gerçek zamanlı optimizasyon modeli geliştirilecektir.

1.3 Orijinal Katkı

Bu çalışma, çoklu enerji depolama sistemlerinin (batarya ve hidrojen tabanlı) dağıtık üretime sahip bir dağıtım şebekesine entegrasyonunu ele alarak, bu konuda literatürde henüz tam olarak araştırılmamış bir alana ışık tutmaktadır. Önceki çalışmalar genellikle tek tip bir depolama sistemi üzerine yoğunlaşmışken, bu tez çoklu depolama sistemlerinin bir arada kullanımının getireceği avantajları ve zorlukları inceler.

Çalışma, yenilenebilir enerji üretimindeki belirsizliklerin üstesinden gelmek için gerçek zamanlı bir enerji yönetim yaklaşımı kullanmayı önerir. Bu yaklaşım, enerji talep ve arzını belirsizlikler dahilinde optimize ederek, enerji maliyetlerini ve toplam güç kaybını en aza indirmeyi hedefler. Enerji sistemlerinin verimliliği ve güvenilirliği açısından önemli bir katkı sağlar.

Farklı tiplerdeki dağıtım şebekeleri dikkate alınarak pilot uygulamalar gerçekleştirilip ve bu sayede genel uygulanabilirlik potansiyeli artırılmıştır. Bu, mevcut literatürde genellikle tek bir şebeke tipi üzerinde odaklanılan çalışmalardan farklıdır ve bu çalışmanın geniş uygulanabilirliğini artırır.

Dağıtım sistem operatörlerinin enerji depolama sistemlerini daha esnek bir şekilde kullanabilmesi için enerji yönetim sistemi önerilmiştir. Bu sistem, enerji depolama sistemlerinin operatörleri tarafından daha verimli kullanılmasını sağlayacak ve ekonomik dengeleri koruyacaktır.

Bu araştırma, enerji maliyetlerini azaltma ve yatırım eğilimini artırma amacıyla ekonomik faydaları artırma konusunda orijinal katkılar sunmaktadır.

Gerçek zamanlı işletme sırasında belirtilen birim güç miktarının ek maliyet oluşturmayacak şekilde nasıl karşılanacağı bu tezde incelenir. Bu yaklaşım, gerçek zamanlı enerji talep ve arz dengesinin daha verimli bir şekilde yönetilmesi için literatüre önemli bir katkı sağlar.

Bu çalışma, iletim sistemi ile dağıtım sistemi arasındaki koordinasyonu ele alarak, dağıtım sistemlerinin iletim sistemlerine sunduğu esnekliği artırma potansiyelini araştırır. Bu, literatürde yeterince ele alınmayan bir konudur. Çoğu çalışma, genellikle bu iki sistem arasındaki etkileşimi yeterince dikkate almaz. Ancak bu tezde, karma depolama sistemlerinin dağıtım sistemleri içindeki konumlandırılmasının ve kullanılmasının, iletim sistemi ile daha etkili bir koordinasyon sağlayabileceği ve bu sayede iletim sistemine daha yüksek oranda esneklik sunabileceği incelenir. Bu yaklaşım, enerji sistemlerinin genel verimliliğini ve esnekliğini artırma potansiyeli taşır ve bu alandaki literatüre önemli bir katkı sağlar.

Bu orijinal katkılar, bu tezin enerji depolama ve dağıtım sistemlerindeki mevcut boşlukları doldurma ve literatüre yenilikçi yaklaşımlar ve çözümler sunma potansiyelini artırır. Bu çalışma, ayrıca enerji sistemlerinin verimliliğini, güvenilirliğini ve sürdürülebilirliğini artırmak için yenilikçi ve uygulanabilir çözümler sağlama hedefiyle, alanındaki diğer araştırmacılara da yeni perspektifler sunar.

DAĞITIK ÜRETİME SAHİP DAĞITIM ŞEBEKESİNE ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNİN ENTEGRASYONUNUN İNCELENMESİ

2.1 Giriş

Elektrik güç sistemleri, enerjinin üretimi, iletimi ve dağıtımını kapsayan karmaşık ve çift yönlü yapılar olarak enerji sektörünün temel taşlarını oluşturur. İletim ve dağıtım şebekeleri aracılığıyla, elektrik enerjisi, genellikle büyük ölçekli enerji santrallerinde üretilir ve ardından endüstriyel, ticari ve konut tüketicilere dağıtılır. Bu süreç, her bir bileşenin dikkatli bir şekilde planlanmasını ve koordine edilmesini gerektirir. Elektrik dağıtım şebekeleri, enerjinin tüketicilere son noktada ulaştırıldığı, genellikle düşük voltaj seviyelerinde çalışan ağları ifade eder. Bu sistemler, geniş coğrafi bölgelerde yayılmış olan, sayıları milyonları bulan tüketicilere elektrik enerjisini güvenilir ve etkin bir şekilde sağlamak için tasarlanmıştır.

Dağıtık üretim, enerji üretiminin yerinde veya talebin olduğu yerde gerçekleştirilmesini ifade eder. Son yıllarda, dağıtık üretim teknolojilerinin gelişmesi ve yaygınlaşması ile, dağıtım şebekelerinin yapısı ve işletilme şekli önemli ölçüde değişmiştir. Bu teknoloji, yenilenebilir enerji kaynaklarından (örneğin güneş ve rüzgâr) yararlanarak, enerji üretimini daha çevre dostu ve sürdürülebilir hale getirebilir. Ancak, dağıtık üretim uygulamalarının artması, dağıtım şebekelerinin operasyonel ve planlama zorluklarına yol açmaktadır. Diğer yandan, enerji depolama sistemleri, enerji üretiminin ve tüketiminin arasındaki zaman farkını dengeleyerek, enerji tedarikinin sürekliliğini ve güvenliğini artırır ve enerji şebekelerinin operasyonel esnekliğini önemli ölçüde artırır.

Elektrik enerji şebekesi, büyük ölçüde yenilenebilir enerji kaynaklarına dayanan düşük karbon emisyonlu bir sisteme evrilmektedir. Bu dönüşüm süreci, yenilenebilir enerji portföy hedeflerini gerçekleştirirken şebeke verimliliğini ve güvenilirliğini iyileştirmek amacıyla, işletme ve planlama yaklaşımlarında önemli bir revizyonu zorunlu kılmaktadır [45].

Ancak, daşıtık üretim ve enerji depolama sistemlerinin entegrasyonu, enerji sistemlerinin planlaması ve operasyonlarına yeni zorluklar getirmektedir. Bu zorluklar arasında enerji sistemlerinin dayanıklılığının artırılması da bulunmaktadır. Özellikle, son on yılda, bir dizi ciddi kentsel enerji kesintisi yaşanmıştır ve bu durum, mevcut kentsel enerji sistemlerinin planlama ilkelerinin yeniden düşünülmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Sadece düşük etkili ve yüksek olasılıklı kesintilere karşı güvenilir olmasının yanı sıra, enerji sistemlerinin yüksek etkili ve düşük olasılıklı (HILP) olaylara dayanıklı olması gerekmektedir [46]. Bu çerçevede yaygın olarak şebekede meydana gelen gerilim düşümü vb sorunlar batarya tabanlı enerji depolama sistemlerinin kapasiteleri kullanılarak ve daşıtım şebekesinin işletimini optimize etmek ile iyileştirilebilir [47].

2.2 Daşıtık Üretime Sahip Güç Sistemlerindeki Güç Kalite Sorunları

Daşıtım ağları, elektrik enerjisi üreticilerinden tüketicilere kadar birçok aktörün katılımı ile karmaşık bir yapıya sahip olup, güç kalitesi sorunlarına yol açabilir. Gerilim dalgalanmaları, harmonik bozulmalar, düşük güç faktörü ve ağ dalgalanmaları gibi problemler, bu ağların karşılaştığı temel güç kalitesi sorunları arasında yer alır. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji sistemlerinin (YES) daşıtım ağlarına entegrasyonu, güç kalitesi sorunlarını azaltmak ve hatta gidermek için önemli bir strateji olarak görülür.

Enerji depolama sistemlerinin (EDS) ve özellikle batarya enerji depolama sistemlerinin (BEDS) frekans regölasyonu, optimum işletme ve enerji maliyetlerinin minimize edilmesi gibi konularda daşıtım ağlarına katkısı, farklı çalışmalarda incelenmiştir [48]. Ayrıca, EDS'lerin teknik ve ekonomik bakımdan enerji sistemi içerisindeki işletimleri üzerine yapılan çalışmalar, bu sistemlerin esnek yönetiminin, güç kalitesi, gerilim kontrolü, pik düzeltme-yük düzeltme, frekans kontrolü ve enerji arbitrağı gibi konularda belirgin faydalar sağladığını göstermiştir [49]. DC güç sistemleri için önerilen batarya ve ultrakapasitör tabanlı hibrit enerji daşıtım sistemi yönetimi, güç talebi örneklerinin ayrık Fourier spektrum analizi kullanılarak düşük ve yüksek frekansta temel ve dalgalı güç elde etme imkanı sunmaktadır [15].

Zayıf gerilim düzenlemesinin önlenmesi için önerilen koordineli işletim stratejileri ve EDS'lerin enerji verimliliği, güç kalitesi ve enerji kayıpları üzerindeki rolü,

dağıtım ağlarına entegre edilen enerji depolama sistemlerinin önemini daha da vurgular niteliktedir [50]. Bu genel bakış, BEDS'lerin ve genel olarak EDS'lerin, güç kalitesi sorunlarının çözümünde etkili bir araç olduğunu göstermektedir.

2.3 Güç Sistemlerinde Optimizasyon Uygulamaları

Optimizasyon, geniş bir uygulama alanına sahip olan ve en iyi, en etkin veya en uygun sonuçları elde etmeyi hedefleyen bir süreçtir. Bu, genellikle, belirli bir hedefin matematiksel modeller ve algoritmalar kullanılarak en iyi şekilde gerçekleştirilmesi anlamına gelir. Ayrıca, en düşük maliyetle en yüksek verimliliği, en az enerji kullanımıyla en yüksek performans ya da belirli bir sınırlama veya kısıtlama altında en uygun sonucu elde etme hedeflerini de içerebilir.

Enerji sektörü, optimizasyonun geniş uygulama potansiyeline sahip bir alanıdır ve özellikle dağıtım şebekelerinde bu önemli bir rol oynar. Dağıtım şebekeleri, enerji üretiminin, iletiminin ve dağıtımının koordinasyonunu sağlayan kritik sistemlerdir. Bu şebekeler, genellikle büyük ölçüde karmaşık ve dalgalı enerji talepleriyle karşı karşıya kalmaktadır. Bu talepleri karşılamak ve sistemin kararlılığını sağlamak için, bu sistemlerin optimum şekilde yönetilmesi ve planlanması gerekmektedir. Bu noktada, optimizasyon teknikleri devreye girer [51].

Optimizasyon teknikleri, dağıtık enerji kaynaklarından (Distributed Energy Sources - DES) elde edilen enerjiyi etkin bir şekilde kullanmayı, enerji maliyetlerini düşürmeyi ve çevre dostu uygulamaları teşvik etmeyi sağlar. Bu teknikler, enerji depolama sistemlerinin (EDS'ler) boyutlandırılması, yönetilmesi ve konumlandırılması konusunda kritik bir öneme sahiptir [52].

Dağıtık enerji üretimine sahip şebekeler, geleneksel merkezi üretim modellerine kıyasla çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte, dağıtık enerji üretiminin optimizasyonu da kendi zorluklarını beraberinde getirmektedir. Belirsizlikler ve enerji kaybı gibi sorunlar, dağıtık enerji üretimine sahip şebekelerde özellikle önemlidir. Stokastik optimizasyon gibi çeşitli çözüm teknikleri, bu tür sorunlara çözüm önerileri sunabilir [53].

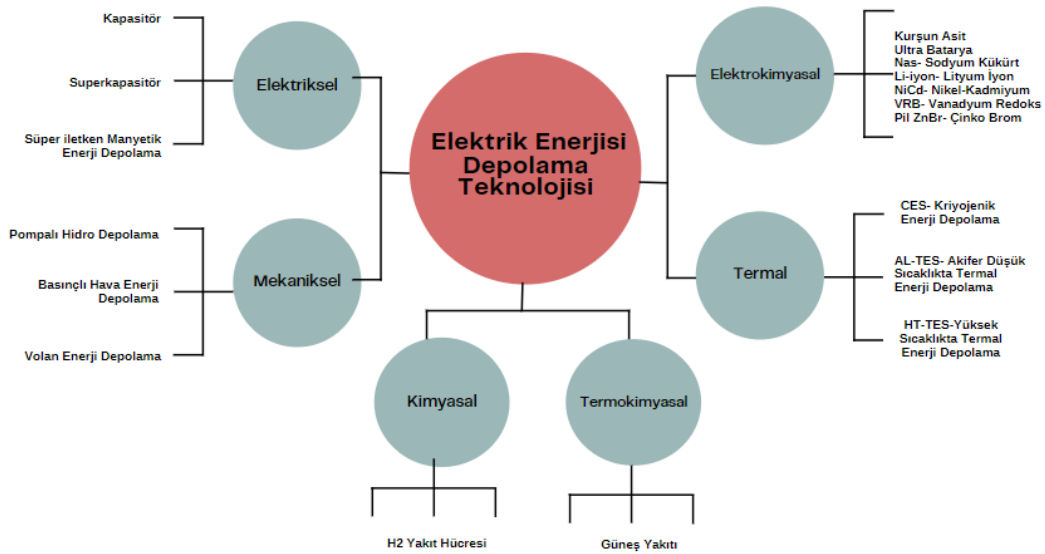
Dağıtık enerji üretimine sahip şebekelerin optimizasyonu, enerji sistemlerinin etkinliğinin artırılması ve enerji maliyetlerinin düşürülmesi için önemlidir. Enerji depolama sistemlerinin entegrasyonu için kullanılan optimizasyon teknikleri, bu

alanlarda büyük bir potansiyele sahiptir ve enerji sektörünün sürdürülebilirliğine önemli ölçüde katkı sağlamaktadır [54].

2.4 Enerji Depolama Sistemleri

Enerji Depolama Sistemleri (EDS), yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının arttığı günümüz enerji sektöründe hayati bir rol oynamaktadır. Bu sistemler, enerjiyi gerektiğinde kullanılmak üzere depolayarak, enerji kaynaklarının ve yüklerin zamanla değişkenliğini dengeleyerek daha etkili ve esnek bir enerji yönetimine yardımcı olur.

Şekil 2.1’de EDS’lerin uygulama teknolojilerine göre sınıflandırılması gösterilmektedir. EDS’ler; pompalı depolama, hidrojende depolama, basınçlı hava depolama, lityum bataryadepolama ve ultrakapasitör depolama vb. olarak çeşitlendirilebilmektedir.



Şekil 2.1 EDS’nin çeşitleri

2.4.1 Batarya Tabanlı Enerji Depolama Sistemleri

Batarya tabanlı enerji depolama sistemleri (BEDS) özellikle dikkat çeker çünkü taşınabilir teknolojiye elektrikli taşıtlara kadar geniş bir yelpazede kullanılırlar. Giderek artan bir şekilde, BEDS’lerin dağıtım şebekelerindeki enerji verimliliği, güç kalitesi ve güvenilirlik üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Bu

sistemler, şebeke dalgalanmalarını ve ani yük değişikliklerini yönetirken enerji dengesini sağlar ve genel şebeke güvenilirliğini artırır.

BEDS'lerin etkin bir biçimde uygulanması, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı dağıtık üretim tesislerinde, enerji üretim ve tüketim dengesini sağlama stratejisinin merkezine yerleştirilmiştir. Özellikle güneş ve rüzgar gibi doğal kaynakların değişken enerji sağlama kapasiteleri göz önünde bulundurulduğunda, BEDS'lerin enerji depolama kapasitesi bu kaynakları stabil ve sürekli enerji sağlayıcıları haline getirme potansiyeline sahiptir [55]. Aynı zamanda, dağıtım şebekeleri bağlamında BEDS'ler, enerji verimliliği ve genel şebeke performansı için büyük bir etkiye sahiptir. BEDS'ler, enerji yüklerinin zamanla değişkenliğini dengeleyerek ve gerilim ve frekans dalgalanmalarını azaltarak, hem enerji verimliliğini artırır hem de enerji tedarikinin genel güvenilirliğini ve stabilitesini geliştirir [56].

BEDS'lerin, özellikle enerji kalitesini artırma, gerilim dalgalanmalarını azaltma, frekans kontrolü, yük dengelemesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu sağlama gibi çeşitli teknik, ekonomik ve çevresel faydaları bulunmaktadır [57].

Enerji Depolama Sistemleri (EDS), enerji sektöründeki yenilenebilir enerji kaynaklarının artan kullanımı ile birlikte kritik bir öneme sahiptir. Bu sistemler arasında özellikle batarya enerji depolama sistemleri (BEDS), taşınabilir teknolojiden elektrikli taşıtlara kadar çok geniş bir alanda kullanılmaktadır [58].

EDS'ler, enerji dengesini sağlamak ve şebeke güvenilirliğini artırmak için şebeke dalgalanmalarını ve ani yük değişikliklerini yönetirken önemlidir. Bu sistemlerin, enerji kalitesini artırma, gerilim dalgalanmalarını azaltma, frekans kontrolü, yük dengelemesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu sağlama gibi birçok teknik, ekonomik ve çevresel avantajları bulunmaktadır [57]. Ancak, yüksek maliyetler nedeniyle, bu sistemlerin geniş çapta uygulanması optimum yerleşim stratejilerinin belirlenmesini gerektirir. Optimum performans ve entegrasyon için, BEDS'lerin en uygun konum ve boyutlandırılması, enerji sisteminin genel verimliliği ve maliyeti üzerinde kritik bir rol oynar. Optimizasyon çalışmaları, enerji maliyetlerini ve yatırımlarını en aza indirme, enerji kalitesini en üst düzeye çıkarma ve şebeke güvenilirliğini artırma amacıyla hayati öneme sahiptir. Bununla

birlikte, optimizasyon çabaları, bir dizi faktöre bağlıdır, bu faktörler arasında hattaki gerilim hassasiyeti, yük özellikleri ve kurulum maliyetleri gibi unsurlar yer alır [59].

BEDS, güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının doğal kesintisizliklerini dengelemekte ve şebeke bağlantılı hibrit sistemlerde enerji yönetiminde merkezi bir rol üstlenmektedir. BEDS, güç akışını düzenlerken enerji kayıplarını azaltma ve yük dengesini iyileştirme potansiyeline sahiptir. Bu sistem, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen fazla enerjiyi hidrojen üretimi için kullanarak, enerji depolama ve yönetim çözümlerinde yenilikçi yeşil enerji için bir yaklaşım sunar [60].

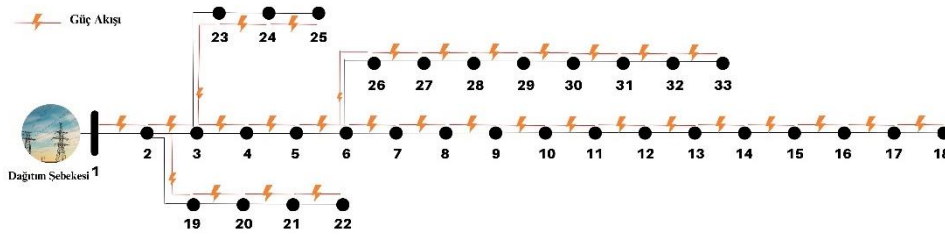
Batarya Enerji Depolama Sistemleri, enerji sektörünün çeşitli alanlarında - dağıtık üretim tesislerinden dağıtım şebekelerine - kritik bir öneme sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının daha geniş çapta kullanımını, enerji verimliliğini artırma ve şebeke güvenilirliğini güvence altına alma konularında BEDS'lerin rolü vazgeçilmezdir. Bu nedenle, bu sistemlerin enerji sistemlerine entegrasyonunu sağlama ve optimum yerleşim stratejilerini belirleme üzerine yapılan çalışmalar, enerji sektöründeki sürdürülebilir ve verimli gelişim açısından hayati öneme sahiptir.

DAĞITIM ŞEBEKESİ İÇİN KONUMSAL ANALİZ TEMELLİ DAĞITIK ÜRETİM VE DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

3.1 Dağıtık Üretim ve Depolama Sistemlerinin Optimum Konumlandırılması

Bir dağıtım şebekesinde, her bir barada bulunan yük miktarını dikkate alarak, depolama sistemlerinin ve dağıtık üretim tesislerinin optimum konumlandırılması üzerine kapsamlı bir analiz yapılmıştır. Bu çalışmada, güç kayıplarının minimize edilmesi hedeflenmiştir.

Konumlandırma sürecinde, baraların dağıtım şebekesine olan coğrafi yakınlığı ve uzaklığı gibi çeşitli faktörler göz önünde bulundurulmuştur. Bu çalışma, farklı durum analizleri ve örneklemeler ile desteklenmiştir, böylece teorik sonuçların gerçek dünya senaryolarıyla karşılaştırılmasına olanak sağlanmıştır. Önerilen model de IEEE 33 bara sistemi kullanılmış olup Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Önerilen modelin gösterimi için kullanılan IEEE 33 bara sistemi

3.2 Önerilen Modelin Matematiksel Formülasyonu

Dağıtım şebekesi için konumsal analiz bazlı enerji yönetim stratejisi için matematiksel modele dair detaylı sembol dizgisi Tablo 3.1’de görülmektedir.

Tablo 3.1 Optimum konumsal analiz için deterministik yaklaşımın sembol dizisi

Kümeler	$t, b, i, eds, yük, fv, Ldat, Ndat, p, pDat, sceds$
Parametreler	$CV, DV, CR_{i,eds}^{EDS}, DR_{i,eds}^{Eds}, N_{1,i,t}^{EDS}, N_{2,i,t}^{EDS}, P_{i,t}^{bara,akış}, P_{i,fv,t}^{FV},$ $SoE_{i,eds}^{EDS,Ini}, SoE_{i,eds}^{EDS,Min}, SoE_{i,eds}^{EDS,Max}, P_{i,yük,t}^{yük}, P_b^{L,kap}, \lambda_t^{alış}, \lambda_t^{satış},$ $\Delta T, \eta_n$
Karar Değişkenleri	$P_{i,eds,t}^{EDSdis}, P_{i,t}^{şebeke,yük}, P_{i,eds,t}^{EDS,şarj}, P_{i,t}^{şebeke,yük,al}, SoE_{i,eds,t}^{EDS}, P_{i,t}^{şeb,top},$ $, P_{i,t}^{Loss}, HL_t, P_{i,t}^{şebeke,top,satış}, P_{b,t}^{hat}, P_{b,t}^{Abs,hat}, cf_{b,t}^{plus}, cf_{b,t}^{minus},$ $P_{b,t}^{hat,squ}, TL$

3.2.1 Amaç Fonksiyonu

Batarya tabanlı depolama sistemi ve dağıtık üretim tesisinin şebekeyle olan enerji işlemleri göz önüne alınarak toplam güç kaybının minimize edilmesi hedeflenmiştir ve bu amaç doğrultusunda belirlenen denklem (3.1)'de sunulmuştur.

$$\text{Min. TL} = \sum_t HL_t \quad (3.1)$$

3.2.2 Güç dengesi ve Batarya Depolama Sistemi Formulasyonu

Systemin Güç denge denklemi (3.2)' de gösterilmiştir. Bir dağıtım şebekesinde dağıtık üretim FV birimlerinden üretilen gücü $P_{i,pv,t}^{PVcurrent}$, batarya tabanlı depolama sisteminin deşarj miktarı $P_{i,eds,t}^{EDSdis}$, baralardaki net güç akışı $P_{b,t}^{hat}$, ve şebekeye sağlanan güç miktarı $P_{i,t}^{şebeke,yük}$ eşitliğin sol tarafında gösterilmiştir. İlgili baralardaki yük miktarı $P_{i,yük,t}^{yük}$, batarya şarj miktarı $P_{i,eds,t}^{EDS,şarj}$, şebekeden sağlanan güç miktarı $P_{i,t}^{şebeke,top,satış}$ ise eşitliğin sağ tarafında gösterilerek enerji dengesi sağlanır.

$$\sum_{fv} P_{i,fv,t}^{FV} + \sum_{eds} P_{i,eds,t}^{EDSdis} + P_{i,t}^{bara,akış} + P_{i,t}^{şebeke,yük} = \sum_{yük} P_{i,yük,t}^{yük} + \sum_{ess} P_{i,eds,t}^{EDS,şarj}, \forall t \quad (3.2)$$

İlgili baralardaki BEDS sisteminin şarj olurken aynı zamanda deşarj olamayacağına ilişkin kısıtlar denklem (3.3) ve (3.5) ile sağlanmıştır. Sistemin toplam talep edilen güç miktarı FV , BEDS ve geri kalanı şebekeden karşılanmaktadır. Ve Birim zamanda bataryanın ne kadar şarj olacağını $CR_{i,eds}^{EDS}$ ile denklem (3.5)'de gösterilir. Bataryanın birim zamanda ne kadar deşarj olacağı $DR_{i,eds}^{EDS}$ ile denklem (3.6)'da gösterilmiştir. Bataryanın performansını değerlendirmede ve enerji yönetim stratejilerinin belirlenmesinde önemli rol oynayan şarj ve deşarj oranı kısıtları modele eklenmiştir. Bataryanın enerji depolama kapasiteleri çeşitli faktörler ile belirlenir bunlardan başlangıç gücü olarak adlandırılan $SoE_{i,eds}^{EDS,bas}$ bataryanın şarj sürecine başladığı andaki güç miktarı kısıtı denklem (3.7)'de, bir bataryanın güvenli bir şekilde şarj ve deşarj olması için en düşük güç seviyesini ifade eden $SoE_{i,eds}^{EDS,Min}$ ile gösterilmiş olup güç miktarı bu seviyenin altına düştüğünde kimyasal yapı zarar göreceği için kısıtlara eklenmiş şekilde denklem (3.8)'de ve aynı şekilde güvenli şarj deşarj olabileceği en yüksek güç seviyesini ifade eden $SoE_{i,eds}^{EDS,Max}$ ve bu seviyeyi aşmayacak şekilde modellenir, bu kısıt ise denklem (3.9)'da gösterilmiştir. Bataryanın enerji dengesi ise bir önceki enerji durumu $SoE_{i,eds,t-1}^{EDS}$ ve şarj/deşarj durumunun toplamına eşitliği denklem (3.10)'da gösterilmiştir.

$$P_{i,eds,t}^{EDS,char} \leq N_{1,i,t}^{EDS} \cdot u_{i,t}^{EDS} \quad (3.3)$$

$$P_{i,eds,t}^{EDS,dis} \leq N_{2,i,t}^{EDS} \cdot (1 - u_{i,t}^{EDS}) \quad (3.4)$$

$$P_{i,eds,t}^{EDS,char} \leq CR_{i,eds}^{EDS} \quad (3.5)$$

$$P_{i,eds,t}^{EDS,dis} \leq DR_{i,eds}^{EDS} \quad (3.6)$$

$$SoE_{i,eds,t}^{EDS} = SoE_{i,eds}^{EDS,Ini} \quad \text{if } t = 1 \quad (3.7)$$

$$SoE_{i,eds,t}^{EDS} \geq SoE_{i,eds}^{EDS,Min} \quad (3.8)$$

$$SoE_{i,eds,t}^{EDS} \leq SoE_{i,eds}^{EDS,Max} \quad (3.9)$$

$$SoE_{i,eds,t}^{EDS} = SoE_{i,eds,t-1}^{EDS} + \left(P_{i,eds,t}^{şarj} \cdot CV \cdot \Delta T - \frac{P_{i,eds,t}^{EDS,dis} \cdot \Delta T}{DV} \right) \quad (3.10)$$

Modellenen sistemde dağıtım şebekesine sağlanan toplam güç $P_{i,t}^{şebeke,top}$, bu işlem sırasında hatlardaki $P_{i,t}^{kayıp}$ ile gösterilen enerji kaybının da dikkate alınarak

hesaplandığı denklem (3.11), dağıtık üretim sisteminin şebekeye sağladığı enerji ise $P_{i,t}^{şebeke,al}$ ile gösterilmiştir ve şebekenin enerji alışverişi sırasında aynı anda hem sisteme enerji sağlayıp hem de sistemden enerji iletimi olamayacağı kısıtı ise eşitlik (3.12) ve (3.13) de gösterilmektedir. Şebekeye sağlanan ve şebekenin sisteme sağladığı enerji hatlarda kayıplara sebep olur. Bu kayıpların ayrı ayrı birim saat için toplamı HL_t ile gösterilmiş olup denklem (3.14) de modele eklenmiştir. Bir enerji hattı boyunca t zaman diliminde b barasındaki hattın güç akışını temsil eden $P_{b,t}^{Hat}$ ile sembolleştirilmiştir. Bir elektrik şebekesinde bir hat üzerindeki güç akışını sınırlayan yani belirli bir barada hattın üzerinde taşıdığı gücün hattın kapasitesi ile sınırlandırıldığı eşitsizlikler (3.15) ve (3.16) de, bir hat üzerindeki belirli bir t anında net güç akışını belirlemek için ise (3.17) ve (3.18) deki denklemler kullanılır.

$$P_{i,t}^{şebeke,top} = P_{i,t}^{şebeke,yük} + P_{i,t}^{kayıp} + P_{i,t}^{şebeke,sat} \quad (3.11)$$

$$P_{i,t}^{şebeke,sat} = K \cdot u_{i,t}^{şebeke} \quad (3.12)$$

$$P_{i,t}^{Grid,tot} = K \cdot (1 - u_{i,t}^{Grid}) \quad (3.13)$$

$$P_{i,t}^{Loss} += HL_t \quad (3.14)$$

$$P_{b,t}^{Line} \leq P_b^{Line,Cap} \quad (3.15)$$

$$P_{b,t}^{Line} \geq -P_b^{Line,Cap} \quad (3.16)$$

$$P_{b,t}^{Line} = cf_{b,t}^{plus} - cf_{b,t}^{minus} \quad (3.17)$$

$$P_{b,t}^{Abs,line} = cf_{b,t}^{plus} + cf_{b,t}^{minus} \quad (3.18)$$

Dağıtım sisteminde her bir düğüm noktasının belirli bir t zaman diliminde yalnızca 1 aktif noktaya bağlandığı denklem (3.19), belirli bir düğüm noktası ve zaman dilimi için hattın üzerinde taşıdığı toplam güç her bir aktif noktanın belirlenen değerlerle yapılan işlemler denklem (3.20), hattın üzerinde taşıdığı toplam güç miktarının karesini denklem (3.21) ve son olarak sistemdeki t anındaki toplam hat kaybını hesaplamak için kullanılan denklem (3.22) te gösterilmektedir.

$$\sum_{points} zAP_{t,b,points} = 1 \quad (3.19)$$

$$P_{b,t}^{Line} = \sum_{points} (PointData_{points,Xap} \cdot zAP_{t,b,points}) \quad (3.20)$$

$$P_{b,t}^{Line,squ} = \sum_{points} (PointData_{points, Faxap} \cdot zAP_{t,b,points}) \quad (3.21)$$

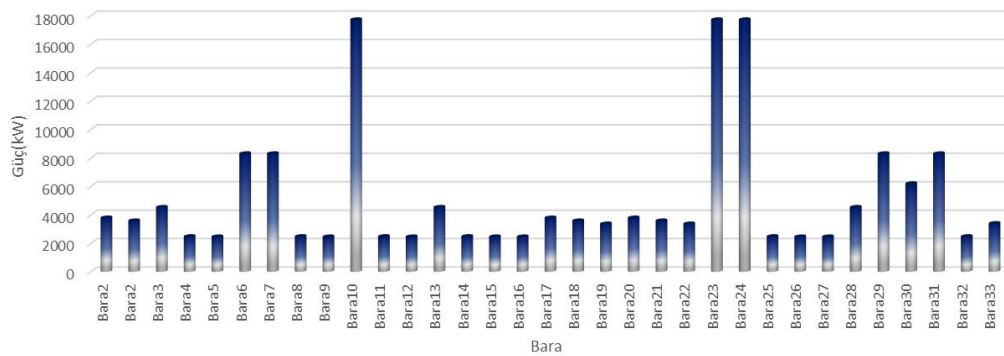
$$HL_t = \sum_b (0,001 \cdot P_{b,t}^{Abs,line} \cdot \Delta T + 0,0003 \cdot P_{b,t}^{Line,squ} \cdot \Delta T) \quad (3.22)$$

3.3 Test ve Sonuçlar

Dağıtık üretim sistemlerine sahip bir dağıtım şebekesine entegre edilen batarya tabanlı depolama sistemleri ve dağıtık üretim birimlerinin konumlarına dayalı olarak, toplam şebeke kayıplarının minimize edilmesini hedefleyen enerji yönetim algoritması, (3.1)-(3.22) denklemleri ile tanımlanmıştır. Bu çalışma kapsamında, batarya depolama sisteminin spesifik teknik özellikleri Tablo 3.1'de sunulmuş ve IEEE 33 baralı sistem kullanılarak bir analiz gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen modelde, farklı durum senaryoları ile sistemdeki toplam kaybın nasıl etkilendiği gözlemlenmiştir. Önerilen model CPLEX ile GAMS v.24.1.3 üzerinde çalışılmıştır.

3.3.1 Giriş Verileri

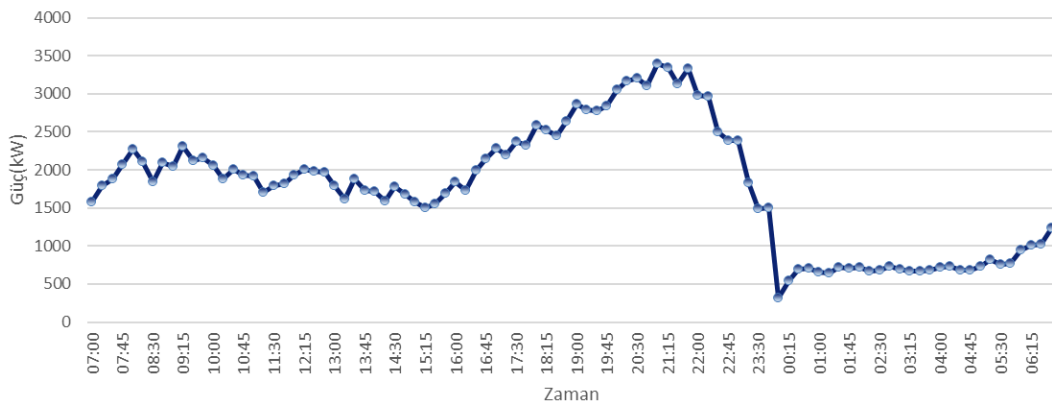
Bu çalışmada IEEE 33 baralı test sistemi kullanılmış olup her barada evsel yükler, aynı ve farklı baralarda birden fazla dağıtık üretim birimleri ve birden fazla batarya tabanlı depolama sistemi bulunmaktadır. Optimum enerji kaybının amaçlandığı bu test sisteminde 15'er dakikalık zaman aralığına sahip veriler kullanılmıştır. Baralardaki evsel yük profilleri Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Baralardaki evsel yük profili

Zamanla Değişen Toplam Yük Talebi Şekil 3.3'te verilmektedir. Şekilde, dağıtım şebekesinin farklı baralarında 15 dakikalık aralıklarla ölçülen toplam yük talebini göstermektedir. Bu süreç boyunca, talep profilinin dinamik doğası ve zamanla nasıl

değiştii hakkında anlamlı bilgiler sağlamaktadır. Ayrıca bu veriler, enerji yönetim algoritmasının geliştirilmesi ve optimizasyon sürecinin gerçekleştirilmesi için temel oluşturmuştur. Yük talebinin zamanla nasıl değiştiğinin anlaşılması, enerji depolama ve dağıtık üretim birimlerinin yerleştirilmesi ve işletilmesi için optimal stratejilerin belirlenmesinde önemlidir. Bu nedenle, bu grafik, toplam sistem kayıplarını minimize etmek amacıyla batarya depolama sistemlerinin ve dağıtık üretim birimlerinin etkin bir şekilde yönetilmesi stratejilerinin geliştirilmesine önemli bir katkı sağlamaktadır.

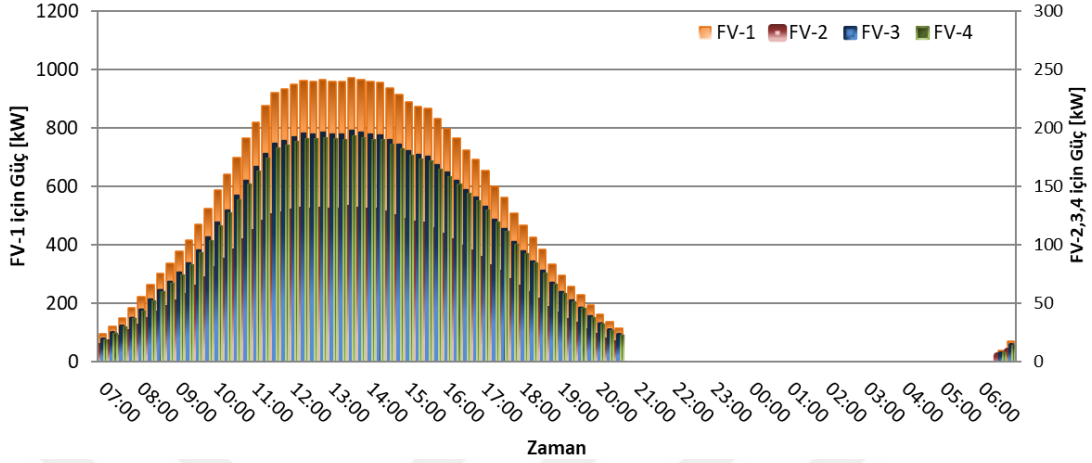


Şekil 3.3 Zamanla değişen toplam yük talebi

Dağıtık üretim birimlerinden biri olan fotovoltaik (FV) sistemlerin üretim profili Şekil 3.4'te sergilenmektedir. Grafik, belirli bir süre boyunca, özellikle güneş ışığına bağlı olarak, fotovoltaik sistemden elde edilen güç çıkışının nasıl değiştiğini gösterir. Bu dinamik veri seti, fotovoltaik üretim birimlerinin etkin bir şekilde entegrasyonu ve işletilmesi için gerekli enerji yönetim stratejilerinin geliştirilmesine önemli bir katkı sağlar.

Dağıtım şebekesine entegre edilen FV sistemlerinin güç üretimindeki bu zamanla değişen doğası, sistemdeki toplam güç kaybını minimize etmek amacıyla geliştirilen enerji yönetim algoritmasının uygulanmasında önemli bir parametredir. Batarya depolama sistemlerinin, FV sistemlerinin bu değişken üretim profilini dikkate alarak hem sistem kayıplarını azaltacak şekilde hem de enerji talebini karşılayacak şekilde nasıl yönetildiğini anlamak, bu tez çalışmasının ana hedeflerinden biridir. Bu nedenle, bu grafik, zamanla değişen fotovoltaik üretim

profilini anlama ve bu bilgiyi enerji yönetim stratejilerinin geliştirilmesinde kullanma konusunda kritik bir öneme sahiptir.

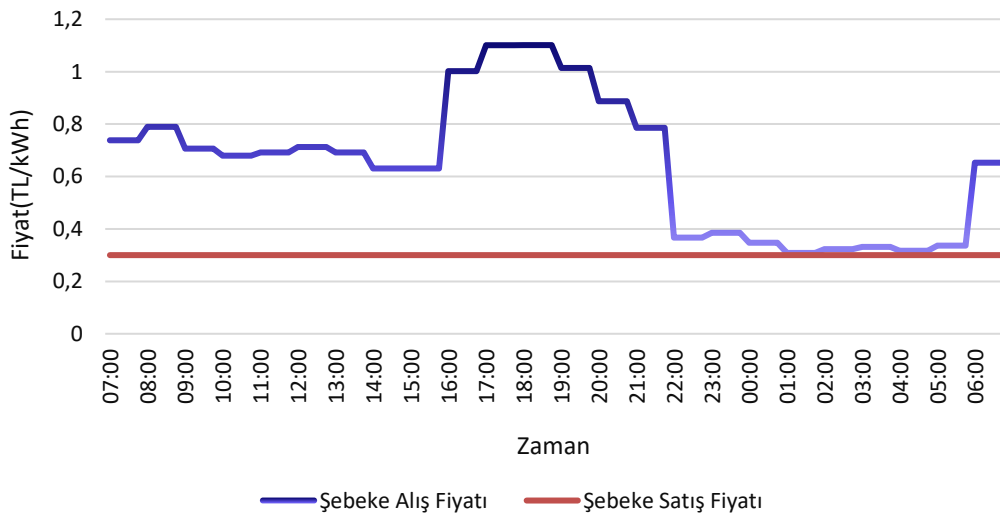


Şekil 3.4 FV'lerin üretimleri için zamana bağlı değişim profili

Bu çalışmada kullanılan batarya depolama sisteminin önemli teknik özellikleri Tablo 3.2 de sunulmaktadır.

Tablo 3.2 Batarya tabanlı enerji depolama sistemi teknik bilgiler

	SOE_MAX	SOE_MIN	SOE_INI	CR_EDS	DR_EDS	CE_EDS	DE_EDS
EDS	1000	200	300	300	300	0,95	0,95



Şekil 3.5 Şebeke alış ve satış fiyatlandırılması

Şekil 3.5’te, dağıtım şebekesinden enerji alımı ve enerji satışı sırasında karşılaşılan farklı fiyatlandırma seviyelerini belirtir.

Bu çizelge, alış ve satış fiyatlarının zamanla nasıl değiştiğini gözler önüne sererek, enerji yönetim stratejilerinin daha etkin bir şekilde planlanmasına olanak sağlar. Fiyatlandırma değişkenlikleri, enerji alış ve satış kararlarını etkileyebilir ve bu nedenle enerji yönetimi ve toplam güç kaybını minimize etme stratejilerinde kritik bir rol oynar.

Ayrıca, bu grafik batarya depolama sistemlerinin ve dağıtık üretim birimlerinin optimal çalıştırılmasına ve enerji alış-verişinin maliyet-etkin bir şekilde yönetilmesine yardımcı olur. Enerji alış-satış fiyatlarının bu şekilde görselleştirilmesi, hem mevcut enerji piyasasının anlaşılmasını kolaylaştırır, hem de gelecekteki enerji fiyatı trendlerinin tahmin edilmesine yardımcı olabilir. Bu sayede, enerji yönetimi stratejileri daha bilinçli ve etkin bir şekilde planlanabilir.

3.3.2 Durum Analizleri ve Değerlendirilmeleri

Temel Durum: EDS ve FV sistemleri bara 18, bara 22, bara 25 ve bara 33’te olduğu durum.

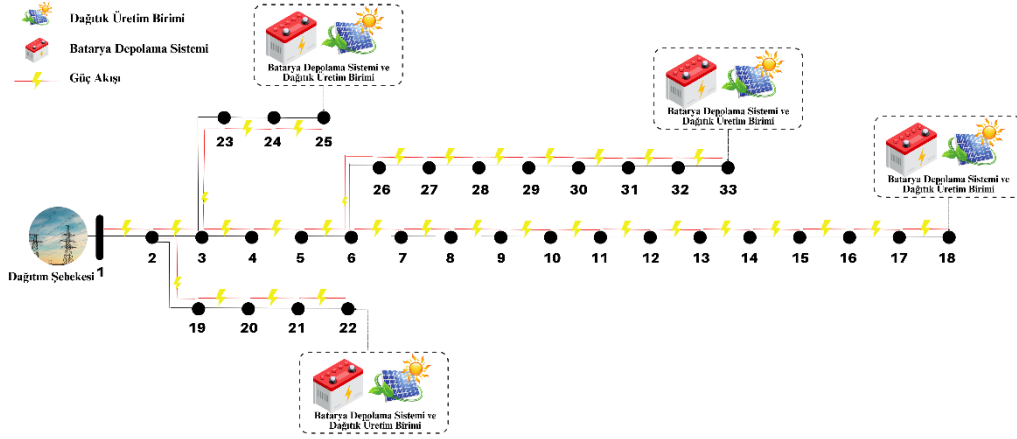
Durum 1: EDS sistemleri bara 3, bara 6, bara 10 ve bara 19 da fakat FV sistemleri ise bara 18, bara 22, bara 25 ve bara 33’te olduğu durum.

Durum 2: EDS ve FV sistemleri bara 3, bara 6, bara 10 ve bara 19 da olduğu durum.

Durum 3: EDS ve FV sistemleri bara 2, bara 3, bara 4 ve bara 5’te olduğu durum.

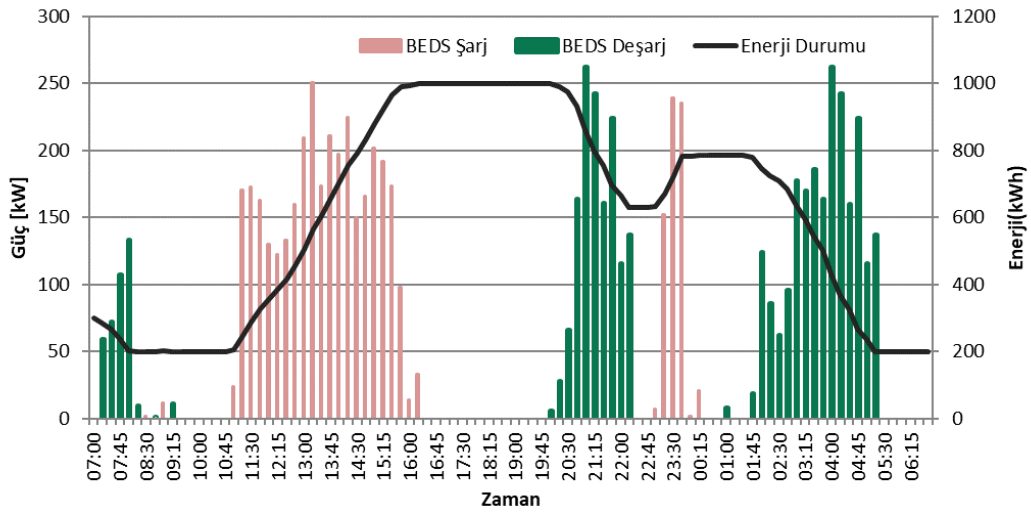
3.3.2.1 Temel Durum Analizi ve Değerlendirilmesi

Bu senaryo, EDS ve FV sistemlerinin bara 18, bara 22, bara 25 ve bara 33’te yerleştirildiği durumu temsil eder. Bu konumlandırma, çalışmanın başlangıç senaryosu olup hem EDS hem de FV sistemlerinin dağıtım şebekesi üzerindeki ilk etkilerini değerlendirmektedir. Bu durumda, EDS ve FV sistemlerinin belirli baralardaki konumlandırılmasının, toplam güç kayıplarına olan etkisini ölçmek için bir referans oluşturulmuştur. Şekil 3.6’da temel durum için önerilen model gösterilmektedir.



Şekil 3.6 Temel durum için önerilen model görseli

Modelde bara 18 ve bara 25'te bulunan batarya enerji depolama sistemleri şarj ve deşarj olmaktadır. Bara 22 ve bara 33'deki depolama sistemleri ise herhangi bir dolun görmemektedir. Toplam sistem kaybının minimiz edildiği bir amaçla ilerlendiği için optimum durumda dağıtım üretim sistemleri tüketici grupların tüketim miktarını karşılayıp fazlası depolama sistemlerinde depo edilmektedir. Batarya depolama sisteminin temel durumdaki şarj deşarj ve enerji durumları Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de gösterilmektedir.



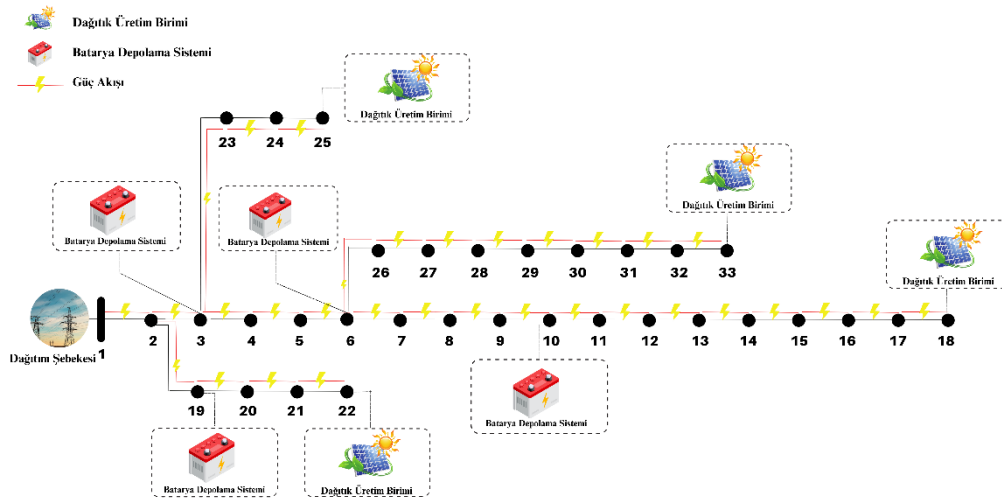
Şekil 3.7 Bara 18'de bulunan EDS'nin şarj, deşarj ve enerji durumu



The chart illustrates the power consumption profile of a building over a 24-hour period. The y-axis represents power in kW, ranging from 0 to 14000. The x-axis represents time in 15-minute intervals. The legend indicates three components: 'Kayıp' (Loss, red bars), 'DŞ'den Talep Edilen' (Requested from DŞ, blue bars), and 'DŞ'inden Çekilen' (Withdrawn from DŞ, black line). The total power consumption is the sum of the first two components. The consumption is relatively low during the night (07:00-17:00), peaking at around 4000 kW. It increases significantly during the day, reaching a maximum of approximately 12000 kW around 21:15 and 04:00. The 'DŞ'den Talep Edilen' component is the largest, followed by 'Kayıp'. The 'DŞ'inden Çekilen' component is a small, fluctuating line at the top of the stack.

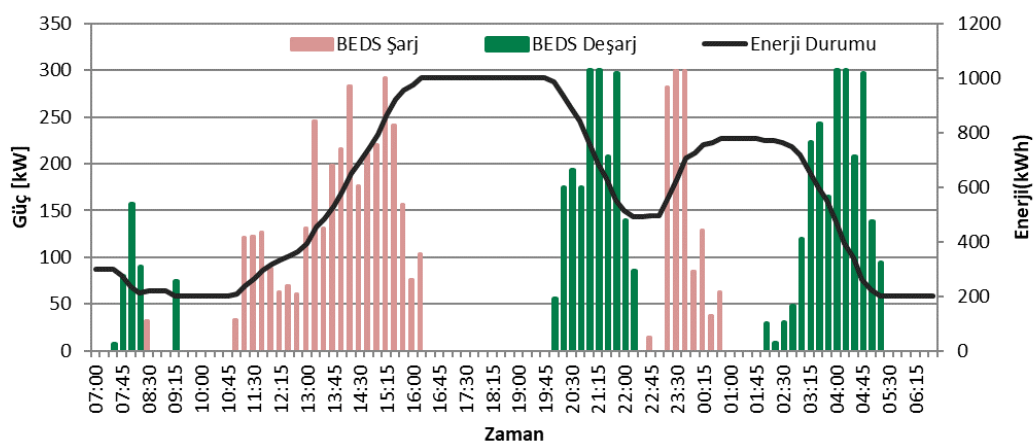
27

3.3.2.2 Durum 1 Analizi ve Değerlendirilmesi

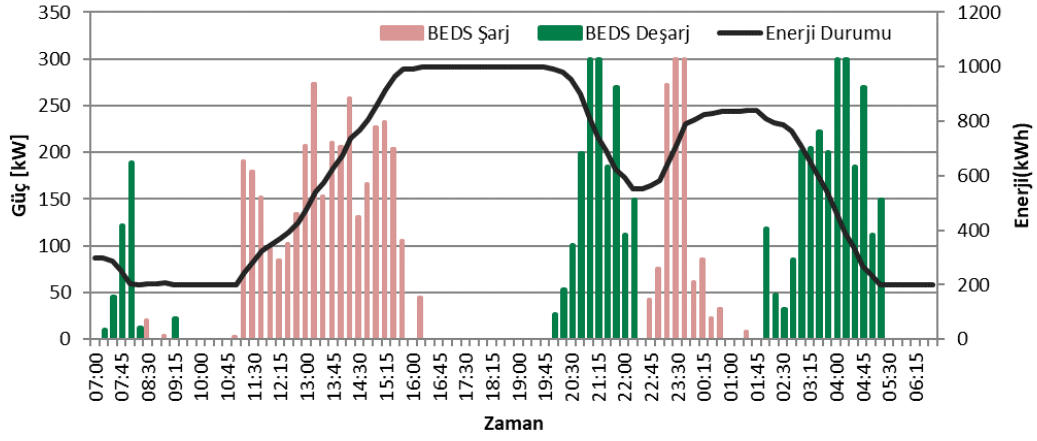


Şekil 3.10 Durum-1 için önerilen model görseli

Sistem de batarya depolama sistemi 3. Bara, 6. Bara, 10. Bara ve 19. Baralara eklenmiştir. Hat sonlarına dağıtık üretim sistemleri eklenmiştir. Durum-1 için sistemdeki batarya ve dağıtık üretim sistemlerinin konumlandırılması Şekil 3.10’da gösterilmektedir. Bu durumda sadece 3. Bara ve 10. Baradaki depolama sistemleri şarj/deşarj olmaktadır. Diğer depolama sistemlerinde herhangi bir şarj/deşarj durumu görülmemektedir. BEDS’leri öğle saatleri ve dağıtım şebekesine yüklenmenin az olduğu gece saatlerinde şarj olmaktadır. Durum 1 için BEDS’lerinin şarj,deşarj ve enerji durumları Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de gösterilmektedir.

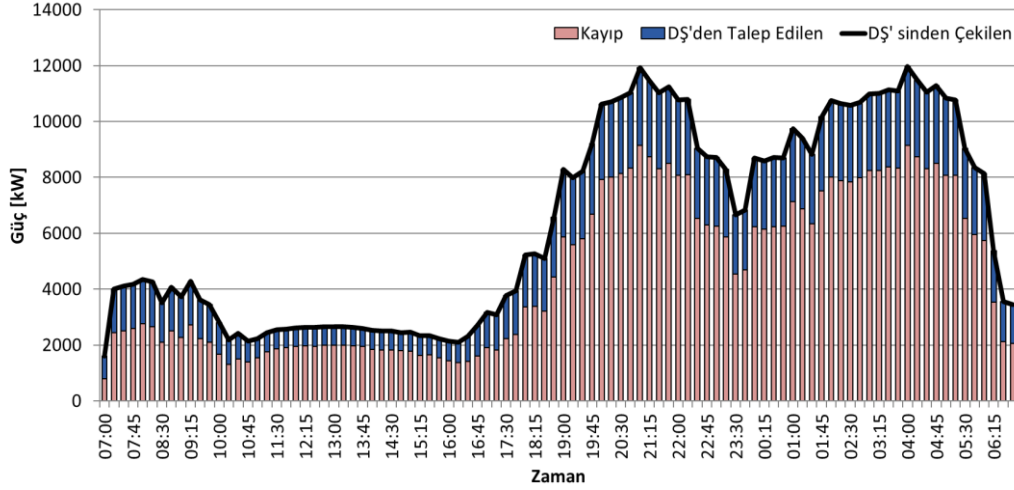


Şekil 3.11 Bara 3'te bulunan EDS'nin şarj,deşarj ve enerji durumu



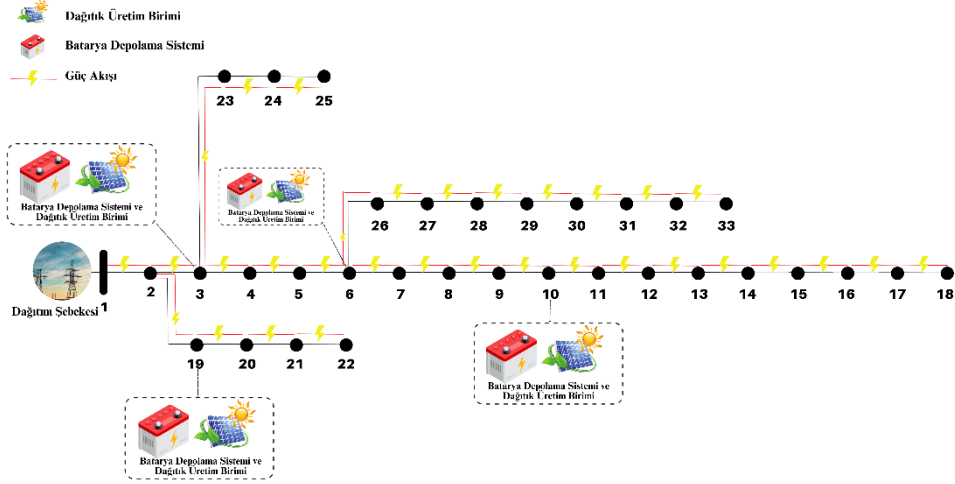
Şekil 3.12 Bara 10'da bulunan EDS'nin şarj, deşarj ve enerji durumu

Şekil 3.13'te Durum 1 için sistemin güç dengesi verilmektedir. Bu durum için enerji üretiminin başladığı sabah saatleri ve yoğun üretimin olduğu öğle saatlerinde hatlardaki toplam güç kaybı diğer saatlerdeki güç kaybına göre daha az olduğu görülmektedir. Aynı zamanda temel duruma göre de hatlardaki toplam güç kaybının arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.13 Durum 1 için dağıtım şebekesindeki güç dengesi ve kayıp güç

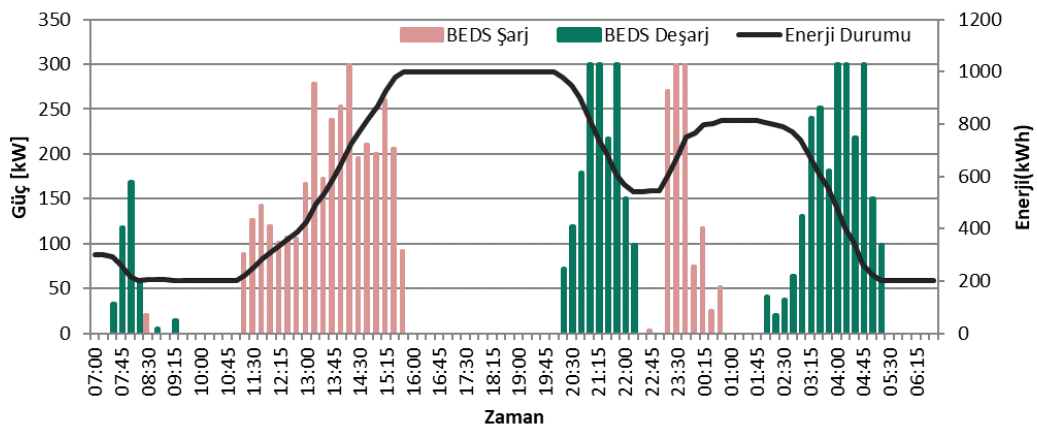
3.3.2.3 Durum 2 Analizi ve Değerlendirilmesi



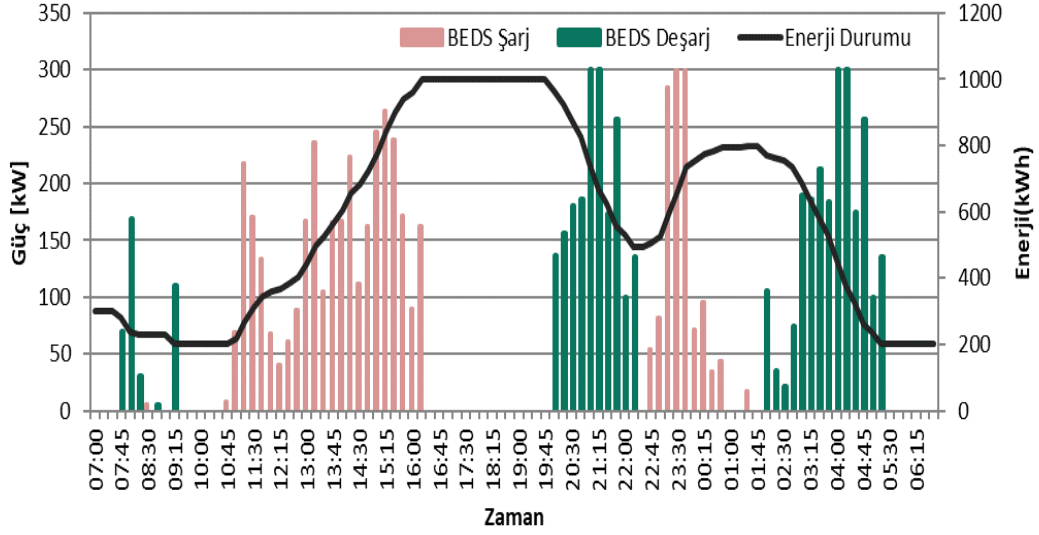
Şekil 3.14 Durum 2 için önerilen model görseli

Durum 2 modelde batarya depolama sistemi ve FV grupları aynı barada değerlendirilmiştir. Temel duruma göre dağıtık üretim sistemleri ve bataryalı depolama grupları şebekeye dahada yaklaştırılmıştır. Şekil 3.14’te önerilen model görseli gösterilmektedir.

BEDS’lerden 3. ve 10. Baraya bağlı olanlar şarj ve deşarj olmuş olup enerji denge durumları Şekil 3.15’te verilmiştir. Öğle saatlerinde FV üretiminin yoğunlukta olduğu ve buna bağlı olarak depolama sisteminin şarj olduğu ve akşam saatlerinde yoğun yük talebinden dolayı deşarj olduğu görülmektedir.

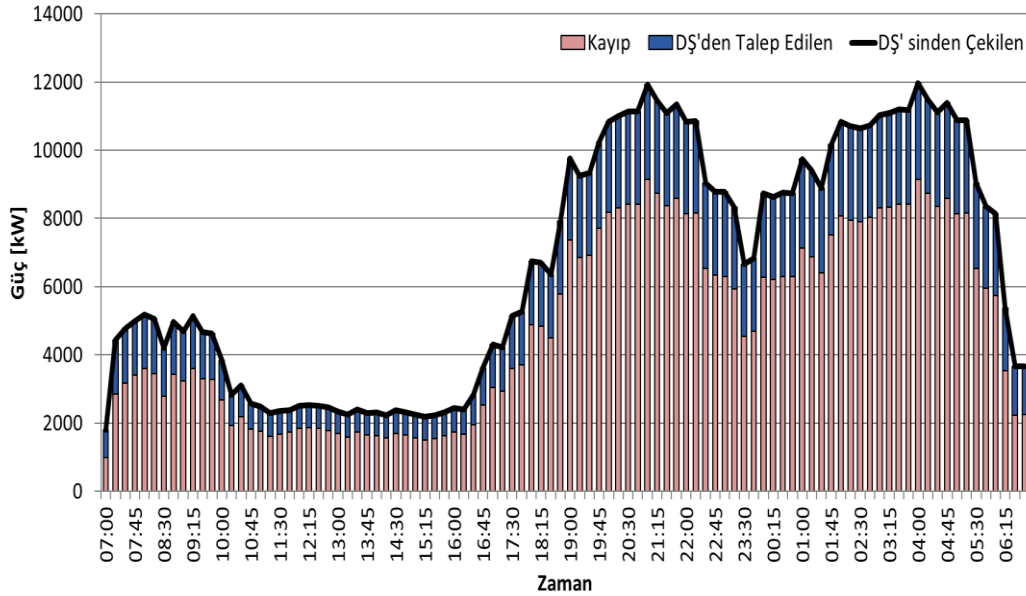


Şekil 3.15 Bara 3’te bulunan EDS’nin şarj, deşarj ve enerji durumu



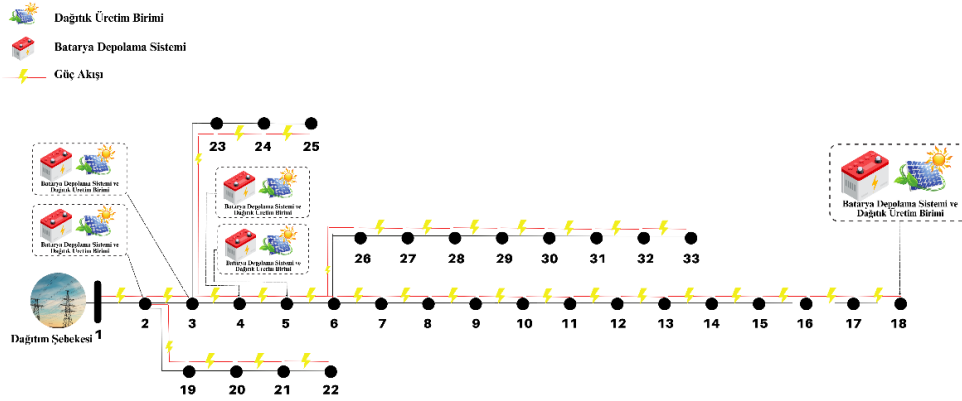
Şekil 3.16 Bara 10'da bulunan EDS'nin şarj, deşarj ve enerji durumu

Durum-2 için sistem toplam kaybı temel duruma göre artmış olup bu durum Şekil 3.17'de gösterilmektedir. Dağıtık üretim grupları ve BEDS'leri fazla yük yoğunluğuna sahip baralardan uzaklaştığı ve bu baralardaki tüketimin karşılanması için de uzun bir yol sarf edip gelen enerji hatlarda kayba uğradığı için kayıp oranı artmıştır. Ancak diğer durumlardada olduğu gibi üretim gruplarının enerji ürettiği öğle saatlerinde daha az bir kayıp ile karşılaşmıştır.



Şekil 3.17 Durum 2 için dağıtım şebekesindeki güç dengesi ve kayıp güç

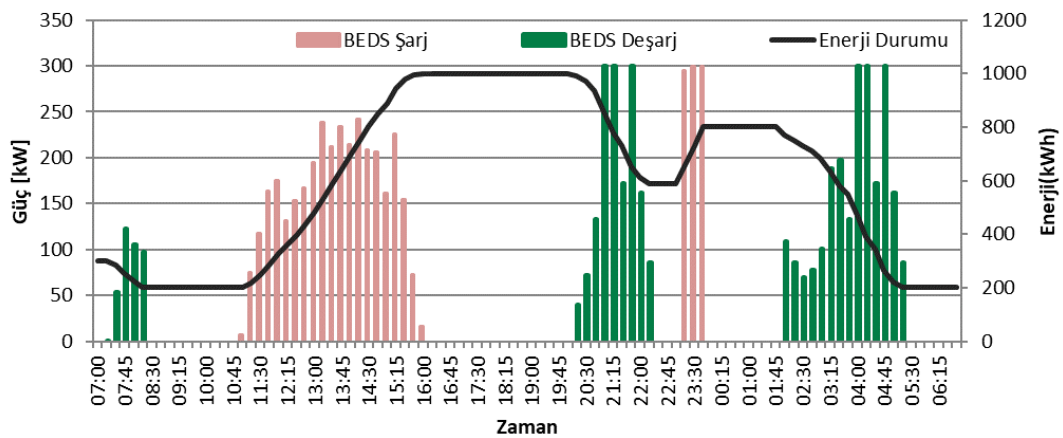
3.3.2.4 Durum 3 Analizi ve Değerlendirilmesi



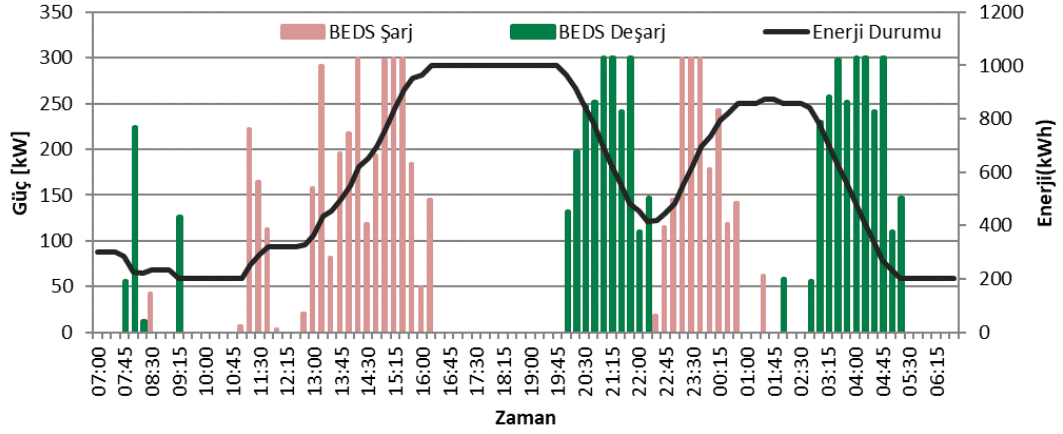
Şekil 3.18 Durum 3 için önerilen model görseli

Durum-3'e gelindiğinde ise BEDS'leri ve dağıtık üretim sistemleri tek hat üzerine konumlandırılmıştır. Diğer dallarda bulunan baralarda sadece tüketim grupları bulunuyor olup herhangi bir BEDS ve dağıtık üretim grupları bulunmamaktadır. Şekil 3.18'de durum-3 için önerilen modelin görseli verilmektedir.

Bu durumda bara 2 ve bara 4'te bulunan BEDS'lerinde şarj/deşarj olma durumu gözlemlenmiş ancak bara 3 de ve bara 18'de bulunan BEDS'lerinde herhangi bir şarj/deşarj gözlemlenmemiştir. Bara 2 ve bara 4'e ait BEDS'lerinin enerji dengesi Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de verilmiştir. Şekile bakıldığında bara 2'de bulunan BEDS için FV nin üretimini düzenli olarak öğle saatlerinde depolamış ve ardından tüketim yoğunluğuna göredeşarj olup yük gruplarının tüketimi karşılanmıştır. Bara 4'de bulunan depolama sisteminde ise daha düzenmiş bir şarj modeli yer almaktadır. FV daha çok hat kaybını minimize edildiği şartıyla yük gruplarının tüketimini karşılayıp ardından depolama sistemini doldurduğu bilinmektedir.

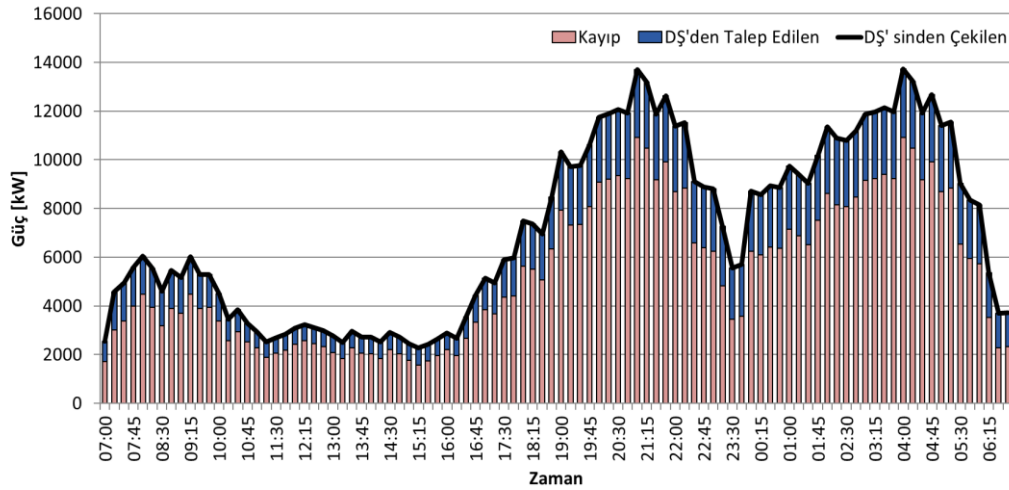


Şekil 3.19 Bara 2'de bulunan EDS'nin şarj,deşarj ve enerji durumu



Şekil 3.20 Bara 4'te bulunan EDS'nin şarj, deşarj ve enerji durumu

Durum-3 için sistem kaybının ve sistemin güç talep dengesi Şekil 3.21'de gösterilmiştir. Bu durumda da temel duruma ve durum 2 ye göre güç kaybı artmış olup yoğun tüketim gruplarından uzaklaşan FV sistemleri ve BEDS'leri toplam sistem kaybının artışına sebep olmuştur. Aynı zamanda sistemin tek hat üzerinde dağıtık üretim birimlerinin toplanmış olması bu kaybın artışının sebeplerinden bir diğeridir.



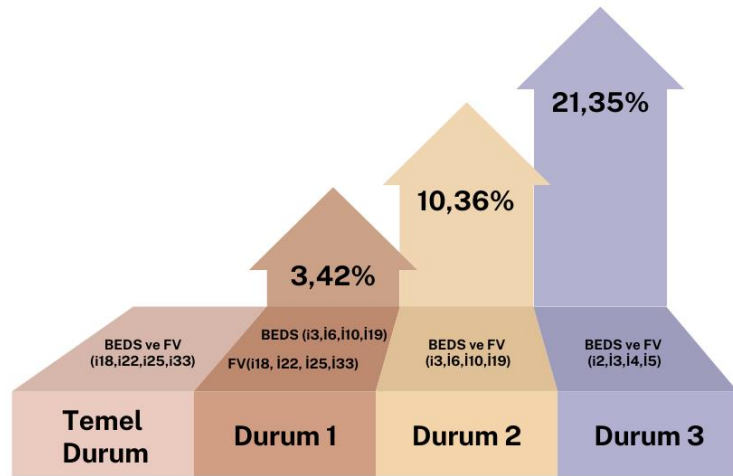
Şekil 3.21 Durum 3 için dağıtım şebekesindeki güç dengesi ve kayıp güç

Bu çalışmada, dağıtım şebekesinde farklı konumlandırma senaryolarının güç kaybı üzerindeki etkileri dört ayrı durum analizi ile incelenmiştir. Analizler, FV ünitelerinin, yük gruplarının ve BEDS'lerin yerleşimlerinin güç kayıpları üzerinde önemli etkileri olduğunu ortaya koymuştur. Her bir senaryo, temel duruma kıyasla değerlendirildiğinde; Durum 1'de %3,42, Durum 2'de %10,36 ve Durum 3'te ise

%21,35 oranında bir güç kaybı artışı saptanmıştır. Bu değişiklikler yüzdelik olarak Tablo 3.3'te sunulmuş ve Şekil 3.22'de görselleştirilmiştir. Sonuçlar, şebekenin farklı konfigürasyonlarının optimizasyon stratejilerine ve genel şebeke tasarımına etkilerini teknik olarak değerlendirerek enerji yönetimindeki önemli parametreleri belirlemektedir.

Tablo 3.3 Temel duruma göre toplam sistem güç kaybının yüzdelik değişimi

	Kayıp (kW)	Yüzdelik Kayıp Artışı (%)
Temel Durum	105069,4	_____
Durum-1	108672,6	%3,42
Durum-2	115957,5	%10,36
Durum-3	127510,5	%21,35



Şekil 3.22 Farklı durumların temel duruma göre yüzdelik kayıp değişimi

DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE ÇOKLU ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN VE ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN VERİMLİ ENERJİ YÖNETİMİ İÇİN GERÇEK ZAMANLI OPTİMİZASYONU

4.1 Dağıtık Üretime Sahip Dağıtım Şebekesine Hidrojen Enerji Depolama (HEDS) ve Çoklu Batarya Enerji Depolama Sistemlerinin (ÇBEDS)

Entegrasyonları

Günümüzde, enerji depolama teknolojileri, yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) maksimum verimlilikte kullanımını sağlamada ve enerji sistemlerinin güvenilirliğini artırmada hayati bir rol oynamaktadır. Özellikle dağıtık üretim (DU) modeline sahip dağıtım şebekelerinde, enerji depolama sistemlerinin entegrasyonu, enerji üretim ve tüketim arasındaki dengesizlikleri azaltma ve şebeke yüklerini efektif biçimde yönetme becerisini güçlendirebilir.

Bu çalışma, hidrojen enerji depolama (HED) ve çoklu batarya enerji depolama (CBED) sistemlerinin, dağıtık üretim özelliklerine sahip dağıtım şebekelerine nasıl entegre edilebileceğini ve bu entegrasyonun şebeke performansı üzerindeki muhtemel etkilerini detaylı olarak inceler.

Hidrojen enerji depolama sistemleri, potansiyel olarak yüksek enerji yoğunluğu ve uzun süreli depolama kapasitesi ile, düşük maliyetli ve çevresel sürdürülebilirlik prensiplerine uygun bir enerji depolama alternatifi sunabilir. Özellikle yüksek kapasiteli, uzun süreli enerji depolama ihtiyacı olan geniş ölçekli yenilenebilir enerji projeleri için HED, ideal bir çözüm sunabilir. Bu bağlamda, DÜ'e sahip dağıtım şebekelerinde HED entegrasyonu, enerji arz ve talep dengesini sağlama ve genel şebeke performansını iyileştirme potansiyeli taşımaktadır.

Diğer yandan, çoklu batarya enerji depolama sistemleri, çeşitli batarya teknolojilerinin birleşiminden oluşur ve bu sayede geniş bir operasyonel yelpaze ve üst düzey enerji kapasitesi sunar. CBED, yüksek enerji verimliliği ve hızlı yanıt süresi özellikleri ile DÜ'e sahip dağıtım şebekelerinde, özellikle de güneş ve rüzgar

gibi dalgalı YEK'lerinin neden olduğu hızlı yük değişikliklerini etkin bir şekilde dengeleme yeteneği sunar.

Bu çerçevede, HED ve CBED'nin entegrasyonu, dağıtık üretimli dağıtım şebekelerinin enerji yönetimi ve genel performansını önemli ölçüde iyileştirme potansiyeli taşır. Bu çalışma, bu entegrasyonun teknik ve ekonomik etkilerini analiz etmek ve optimum enerji yönetim stratejilerini belirlemek amacıyla gerçek zamanlı optimizasyon tekniklerini kullanmayı hedeflemektedir.

Çoklu Enerji depolama sistemlerinin kullanılması, yüksek oranda yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik şebekesine entegrasyonu sonrasında ortaya çıkan düşük düzenleme esnekliği sorununu gidermek için kritik bir rol oynamaktadır [14].

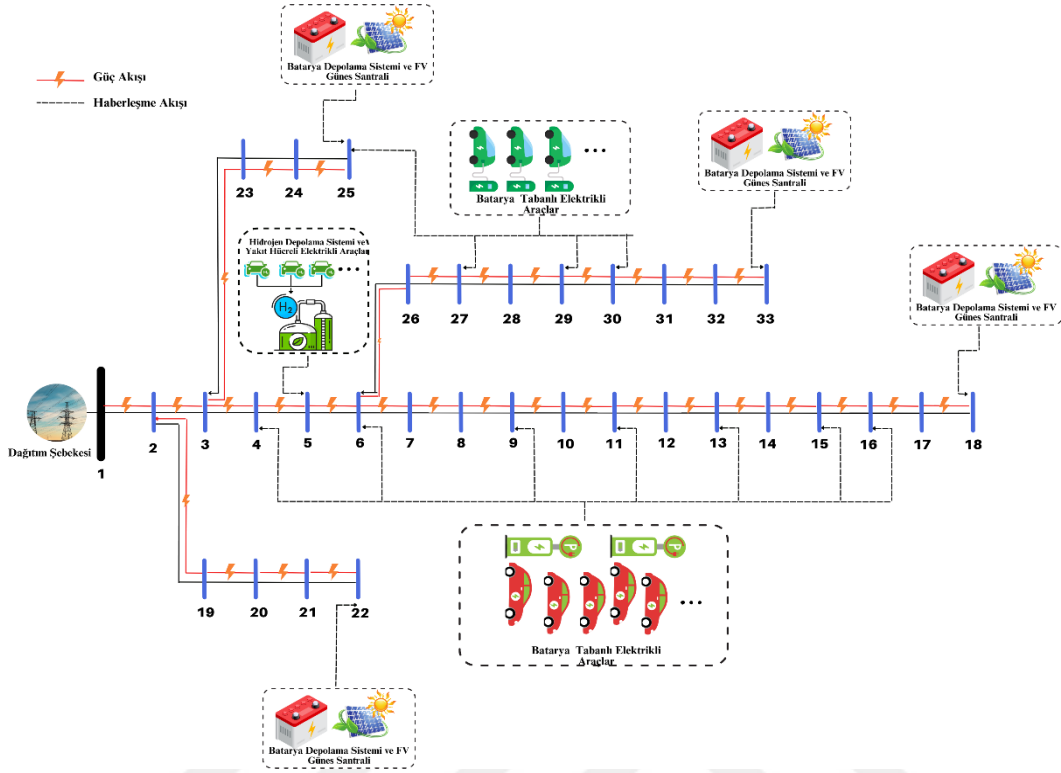
Enerji dengesini sürdürmek ve şebeke kullanımından ekonomik fayda sağlamak amacıyla, hidrojen tankındaki ve batarya depolama sistemindeki enerjiyi optimize etmek için kontrol ve enerji yönetim sistemleri geliştirilmektedir [15]. Hidrojen enerjisi penetrasyonunun hızla arttığı bu dönemde hidrojen enerjisi ve onunla ilgili altyapılar, hidrojen dolum istasyonları (HRS) ve mobil yakıt hücreli araçlar (MFCV) gibi, DS'nin kendini iyileştirme yeteneğini artırmada büyük potansiyele sahiptir [16].

4.2 Dağıtık Üretime Sahip Dağıtım Şebekesine HDS ve ÇBDS Entegrasyonun Benzetim Çalışması Yardımıyla İrdelenmesi

Dağıtım şebekesine farklı enerji depolama sistemlerinin entegrasyonu ve çeşitli tiplerdeki elektrikli araçların bu sistemlere dahil edilmesi ile oluşturulan modelin detayları, Şekil 4.1'de görselleştirilmiştir. Görsel incelendiğinde, çalışmanın temelinde dağıtık üretim kaynaklarına sahip bir dağıtım şebekesinin, hidrojen ve batarya depolama sistemleri ile entegrasyonunu modelleyen bir yapı olduğu görülebilir. Modelin temel hedefi ise, şebeke üzerindeki toplam güç kaybını en aza indirmektir. Çalışma kapsamında, enerji kaynakları ve yükler arasındaki interaksiyonlar detaylı bir biçimde incelenmiştir.

Farklı enerji talepleri, özellikle elektrikli araçların sisteme eklenmesiyle, incelenen enerji sisteminin performansı üzerinde belirleyici bir role sahip olmuştur. Bu çalışmada yakıt hücreli ve batarya tabanlı araçların enerji sistemine dahil edilmesi ile tüketim artışı ve bu artışın sistem üzerindeki etkileri detaylı bir biçimde analiz

edilmiştir. Yakıt hücreli araçların enerji ihtiyacı, model dahilinde yer alan hidrojen depolama tankından karşılanmıştır.



Şekil 4.1 Geliştirilen sistemin örnek modeli

Depolama sistemlerinin şebekede yer aldığı konumlar, toplam enerji kaybı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olabilmektedir. Bu nedenle, çeşitli enerji depolama sistemlerinin, FV sistemlerinin ve elektrikli araçların farklı konumlarda yer almasının sonuçları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çeşitli senaryolar oluşturularak yapılan bu analizler, enerji kayıplarının minimizasyonunu hedeflemiştir. Bu ayrıntılı analizler sonucunda, enerji kaybını en aza indirecek optimum konumlandırma senaryoları belirlenmiştir. Bu, enerji verimliliğini artırmak ve böylece sürdürülebilir bir enerji sistemi oluşturmak için hayati öneme sahip bir bulgudur. Bu bulgular, enerji sistemlerinin yönetilmesi ve planlanması konusunda karar vericilere kıymetli bilgiler sunmaktadır.

Ek olarak, bu çalışmada enerji sistemlerinin gerçek zamanlı işletimine odaklanılmıştır. Gerçek zamanlı işletim, FV gruplarının enerji üretimindeki belirsizlikler ve elektrikli araçların varış/kalkış zamanları gibi dinamikleri simüle etme yeteneğine sahip olması gerekmektedir. Bu dinamikler, enerji talebini ve arzını önemli ölçüde etkileyebilmektedir ve bu nedenle, enerji sistemlerinin etkin

ve verimli bir biçimde yönetilmesi için bu unsurların gerçek zamanlı işletim modellemesine dahil edilmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım, enerji sistemlerinin işletimini ve enerji kaynaklarının en etkin şekilde nasıl kullanılacağını anlamamıza yardımcı olabilir, enerji verimliliği ve sürdürülebilir enerji sistemleri üzerindeki potansiyeli açığa çıkarır.

4.2.1 Önerilen Enerji Yönetim Modelinin Matematiksel Modeli

Dağıtık Üretime Sahip Dağıtım Şebekesine HDS ve ÇBDS Entegrasyonun aynı zamanda çeşitli tiplerdeki elektrikli araçların da dahil edildiği bu sistemdeki enerji yönetim stratejisi için matematiksel modele dair detaylı sembol dizgisi Tablo 4.1’de görülmektedir.

Tablo 4.1 Dağıtık üretime sahip dağıtım şebekesine HDS, ÇBDS ve EA’ların dahil edildiği gerçek zamanlı yaklaşımın sembol dizisi

Kümeler	$t, h, b, i, m, hyd, ess, pv, yük, TL$
Parametreler	$CE, DE, CR_{i,ess}^{ESS}, DR_{i,ess}^{ESS}, N_{1,i,t}^{ESS}, N_{2,i,t}^{ESS}, P_{i,pv,t}^{PV}, SoE_{i,ess}^{ESS,Ini},$ $SoE_{i,ess}^{ESS,Min}, SoE_{i,ess}^{ESS,Max}, P_{i,load,t}^{Load}, P_b^{Line,Cap}, \lambda_t^{buy}, \lambda_t^{sell}, \Delta T, \eta_n$ $, N_3, lim^{P^{ELC}}, N_5, m_i^{Hyd_{storage,Ini}}, m_i^{Hyd_{storage,Max}},$ $m_i^{Hyd_{storage,Min}}, K_2, \eta_h, \eta_e, m_{i,d}^{Hyd_{EV,Ini}}, m_{i,d}^{Hyd_{EV,min}},$ $m_{i,d}^{Hyd_{EV,max}}, m_{i,d}^{Hyd_{EV,des}}, CR_{i,m}^{EV}, SoE_{i,m}^{EV,min}, SoE_{i,m}^{EV,Ini},$ $SoE_{i,m}^{EV,max}, SoE_{i,m}^{EV,des}, CE_{i,m}^{EV}$
Karar Değişkenleri	$P_{i,ess,t}^{ESS_{disch}}, P_{i,t}^{grid,buy,load}, P_{i,ess,t}^{ESS,char}, P_{i,t}^{grid,sell,load}, SoE_{i,ess,t}^{ESS},$ $P_{i,t}^{Grid,tot}, P_{i,t}^{Loss,buy}, HL_t, Node_{num}, P_{i,t}^{grid,sell,load,tot},$ $P_{i,t}^{Loss,sell}, P_{b,t}^{Line}, P_{b,t}^{Abs,line}, cf_{b,t}^{plus}, cf_{b,t}^{minus}, P_{b,t}^{Line,squ},$ $m_{i,t}^{Hyd,Prod}, P_{i,t}^{ELC}, u_{i,t}^{Hyd_{storage}}, m_{i,t}^{Hyd_{storage}}, m_{i,t}^{Hyd,Dis,tot},$ $m_{i,t}^{Hyd,Dis}, m_{i,d,t}^{Hyd,Dis,EV}, P_{i,t}^{fuelcell}, m_{i,d,t}^{Hyd_{EV}}, m_{i,d,t}^{Hyd,Dis,EV},$ $P_{i,t}^{EV,CH,tot}, P_{i,m,t}^{EV,CH}, SoE_{i,m,t}^{EV}$

4.2.1.1 Amaç Fonksiyonu

Dağıtık üretime sahip dağıtım şebekesine entegre edilen çoklu batarya tabanlı depolama sistemiyle yakıt hücresi (YH) hidrojen sistemine sahip bir EDS olarak hidrojen depolama sistemi ve yakıt hücresi/batarya tabanlı elektrikli araçlar gibi yüklere sahip dağıtım şebekesi için gerçek zamanlı sistem toplam güç kaybını minimize etme amaçlanmış ve belirlenen bu amaç fonksiyonu (4.1)'de sunulmuştur.

$$\min TL = \sum HL_t \quad (4.1)$$

4.2.1.2 Genel Güç dengesi ve Batarya/Hidrojen Depolama Sistemi Formülasyonu

Sistemin genel güç denge denklemi (4.2) de gösterilmektedir. Üçüncü bölümde modelin formülasyonuna eklenen $P_{i,t}^{fuelcell}$ hidrojen depolama sisteminin yakıt hücresinin güç miktarı, elektroliz süreci sırasında tüketilen güç miktarı $P_{i,t}^{electrolysis}$ ve batarya tabanlı elektrikli aracın toplam şarj miktarı $P_{i,t}^{EV,CH,tot}$ ile eşitliğe eklenerek sistemdeki enerji dengesi sağlanmaktadır.

$$\begin{aligned} \sum_{pv} P_{i,pv,t}^{PVcurrent} + \sum_{ess} P_{i,ess,t}^{ESS_disch} + P_{i,t}^{hat,akış} + P_{i,t}^{grid,load} + P_{i,t}^{fuelcell} \\ = P_{i,t}^{electrolysis} + \sum_{load} P_{i,load,t}^{Load} + \sum_{ess} P_{i,ess,t}^{ESS,char} + P_{i,t}^{EV,CH,tot} \end{aligned} \quad (4.2)$$

İlgili baralardaki BEDS sistemine ilişkin denklemler aşağıda gösterilmektedir. Denklemler (4.3) ve (4.4), BEDS'nin eş zamanlı şarj ve deşarj olamayacağını belirtir. Bu, enerji depolama ve dağıtım dinamiklerinin gerçek dünya işleyişini temsil eder.

Denklem (4.5) ve (4.6), BEDS'in birim zamanda ne kadar enerji şarj edebileceğini ve deşarj edebileceğini belirtiyor.

BEDS'in enerji depolama kapasitesi, çeşitli parametreler tarafından belirlenir. Bunlara başlangıç enerji durumu ve güvenli çalışma limitleri dahildir. Başlangıç enerji durumu, BEDS'in enerji depolama sürecinin başlangıcındaki enerji miktarını ifade eder. Güvenli çalışma limitleri ise, BEDS'in enerji durumunun, kimyasal

yapıyı korumak için belirli bir minimum ve maksimum arasında kalması gerektiğini belirtir. Bu limitler denklem (4.7), (4.8) ve (4.9)'da gösterilmektedir. Denklem (4.10) bir BEDS'in enerji dengesini ifade eder. Bu denge, bir önceki enerji durumu ile sistemin şarj ve deşarj durumlarının toplamına eşittir. Bu, BEDS'in enerji durumunun zaman içinde nasıl değiştiğini belirtir.

$$P_{i,ess,t}^{ESS,char} \leq N_{1,i,t}^{ESS} \cdot u_{i,t}^{ESS} \quad (4.3)$$

$$P_{i,ess,t}^{ESS,dis} \leq N_{2,i,t}^{ESS} \cdot (1 - u_{i,t}^{ESS}) \quad (4.4)$$

$$P_{i,ess,t}^{ESS,char} \leq CR_{i,ess}^{ESS} \quad (4.5)$$

$$P_{i,ess,t}^{ESS,dis} \leq DR_{i,ess}^{ESS} \quad (4.6)$$

$$SoE_{i,ess,t}^{ESS} = SoE_{i,ess}^{ESS,Ini} \text{ if } t = 1 \quad (4.7)$$

$$SoE_{i,ess,t}^{ESS} \geq SoE_{i,ess}^{ESS,Min} \quad (4.8)$$

$$SoE_{i,ess,t}^{ESS} \leq SoE_{i,ess}^{ESS,Max} \quad (4.9)$$

$$SoE_{i,ess,t}^{ESS} = SoE_{i,ess,t-1}^{ESS} + \left(P_{i,ess,t}^{Char} \cdot CE \cdot \Delta T - \frac{P_{i,ess,t}^{ESS,dis} \cdot \Delta T}{DE} \right) \quad (4.10)$$

Yenilenebilir enerji kaynaklarının giderek daha fazla kullanımı, enerji depolama sistemlerine olan ihtiyacı artırmaktadır. Bu enerji depolama sistemlerinden biri de hidrojen depolama sistemleridir. Hidrojen, genellikle elektrik enerjisi kullanılarak su moleküllerinin elektrolizi yoluyla üretilir ve enerji talebinin olduğu zamanlarda yakıt hücrelerinde tekrar elektriğe dönüştürülür. Hidrojen enerjisi, yüksek enerji yoğunluğu, çevresel dostluğu ve yenilenebilir enerji kaynakları ile entegrasyonu açısından önemli bir potansiyele sahiptir.

Matematiksel olarak hidrojen depolama sisteminin dinamiklerini modellemek, bu sistemlerin optimizasyonunu ve etkin yönetimini sağlamak için önemlidir. Aşağıda belirtilen denklemler, hidrojen depolama sistemini matematiksel olarak modellemesini içermektedir.

Denklem (4.11)'de birim zamanda (ΔT), belirli bir elektrolizör verimliliği η_e ile ne kadar hidrojenin üretileceğini belirtir. Burada $P_{i,t}^{ELC}$, elektrolizör tarafından

kullanılan elektrik gücüdür. (4.12)'de elektrolizörün tükettiği elektrik gücünün bir üst sınır olan $lim^{P^{ELC}}$ 'e tabi olduğunu belirtir. Bu, elektrolizörün maksimum çalışma kapasitesini temsil eder. Denklem (4.13) ve (4.14)'te hidrojen tankına hidrojen aktarımı olurken tanktan aynı anda hidrojen sağlanamayacağının kısıtları verilmiştir. HDS' nin tankında t zamanında bulunan hidrojen miktarı durumu $m_{i,t}^{Hyd_{storage}}$ ile gösterilmiş olup, başlangıçta tankta bulunan hidrojen miktarı $m_i^{Hyd_{storage,Ini}}$, tankın belirli bir maksimum ve minimum kapasitede olması gerektiği kısıtları denklem (4.16) ve (4.17)'de verilmiştir. Tankın hidrojen dengesi denklemini (4.18)'de verilmiş olup belirli t anından bir önceki durumda tankta bulunan hidrojen miktarı $m_{i,t-1}^{Hyd_{storage}}$, elektroliz sonucunda elde edilen hidrojen miktarı $m_{i,t}^{Hyd,Prod}$ ve tanktan sağlanan toplam hidrojen miktarını $m_{i,t}^{Hyd,Dis,tot}$ eşitlikte göz önüne alınmıştır. Denklem (4.19)'da tanktan sağlanan toplam hidrojen miktarı, hidrojen depolama sisteminde yakıt hücresinin kullandığı miktar $m_{i,t}^{Hyd,Dis}$ ile aynı barada bulunan yakıt hücreli elektrikli araçların talep ettiği hidrojen miktarının $m_{i,d,t}^{Hyd,Dis,EV}$ toplamına eşitliği gösterilmektedir. Sistemdeki enerji ihtiyacına destek olmak amaçlı hidrojen depolama sistemindeki η_{fc} verimliliğine sahip yakıt hücresi tarafından kullanılan hidrojen miktarı $m_{i,t}^{Hyd,Dis}$ ile gösterilmiş ve denklem (4.20)'de verilmiştir.

$$m_{i,t}^{Hyd,Prod} = P_{i,t}^{ELC} \cdot N_3 \cdot \Delta T / \eta_e \quad (4.11)$$

$$P_{i,t}^{ELC} \leq lim^{P^{ELC}} \quad (4.12)$$

$$m_{i,t}^{Hyd,Prod} \leq u_{i,t}^{Hyd_{storage}} \cdot N_4 \quad (4.13)$$

$$m_{i,t}^{Hyd,Dis,tot} \leq (1 - u_{i,t}^{Hyd_{storage}}) \cdot N_5 \quad (4.14)$$

$$m_{i,t}^{Hyd_{storage}} = m_i^{Hyd_{storage,Ini}} \quad \text{if } t = 1 \quad (4.15)$$

$$m_{i,t}^{Hyd_{storage}} \leq m_i^{Hyd_{storage,Max}} \quad (4.16)$$

$$m_{i,t}^{Hyd_{storage}} \geq m_i^{Hyd_{storage,Min}} \quad (4.17)$$

$$m_{i,t}^{Hyd_{storage}} = m_{i,t-1}^{Hyd_{storage}} + m_{i,t}^{Hyd,Prod} - m_{i,t}^{Hyd,Dis,tot} \quad (4.18)$$

$$m_{i,t}^{Hyd,Dis,tot} = m_{i,t}^{Hyd,Dis} + \sum_d m_{i,d,t}^{Hyd,Dis,EV} \quad (4.19)$$

$$m_{i,t}^{Hyd,Dis} = \frac{K_2}{\eta_{fc}} \cdot \Delta T \cdot P_{i,t}^{fuelcell} \quad (4.20)$$

4.2.1.3 Yakıt Hücreli Ve Batarya Tabanlı Elektrikli Araçların Modellenen Sistemdeki Formülasyonu

Enerji sektörü, özellikle ulaştırma alt sektöründe artan elektrikli araç (EV) penetrasyonunun elektrik dağıtım şebekesine olan etkileri konusunda önemli bir dönüşüm sürecine girmiştir. Bu yeni paradigma, enerji talep ve arzını yönetirken, hem elektrik dağıtım ağının operasyonel verimliliği hem de enerji güvencesi konularında çeşitli zorlukları beraberinde getirmektedir. Bu tezde hem batarya tabanlı hem de hidrojen yakıt hücreli EV'lerin birlikte kullanılmasının, belirsiz varış ve kalkış zamanlarının sisteme yol açtığı zorlukları gerçek zamanlı bir şekilde güç kayıp optimizasyonun yapılmasının olumlu katkıları sonuçlarıyla birlikte gösterilmektedir.

Bu çalışmadaki hidrojen yakıt hücreli EA'lar enerji ihtiyacı için gerekli hidrojen miktarını aynı barada bulunan hidrojen depolama sistemine ait tanktan karşılamaktadır. Sunulan modelde hidrojen yakıt hücreli ve batarya tabanlı EV'lerin bir arada kullanılması ve varış ve ayrılış zamanlarının etkin bir şekilde yönetilmesi, enerji dağıtım şebekesinin gerçek zamanlı olarak optimize edilmesini sağlayabilir. Bu, araçların enerji depolama kapasitelerini ve enerji taleplerini en uygun şekilde dikkate alır. Bu modelin uygulanması, elektrik dağıtım şebekesinin işletilmesi ve planlanmasında verimlilik, esneklik ve enerji güvencesi sağlar, enerji maliyetlerini azaltır ve çevresel sürdürülebilirliği artırır.

Önerilen modeldeki Batarya tabanlı EA'lar için oluşturulan denklemler (4.21)-(4.30) aralığında verilmektedir. $P_{i,m,t}^{EV,CH}$ i barasında bulunan araçların t zamanındaki şarj gücünü ve i barasındaki araçların toplam şarj gücünü $P_{i,t}^{EV,CH,tot}$ belirterek denklem (4.21) de eşitliği yer almaktadır. EA m' ler için şarj gücü talebi belirlenen

$CR_{i,m}^{EV}$ ile gösterilen şarj oranı ile sınırlandırılıp denklem (4.22) de gösterilmektedir. (4.23), (4.24), (4.25) ve (4.26) denklemleri, aracın bataryasının şarj durumunun ($SoE_{i,m,t}^{EV}$), başlangıçta ($SoE_{i,m}^{EV,Ini}$) belirli bir değere eşit olacağını, belirli bir minimum ($SoE_{i,m}^{EV,Min}$) ve maksimum ($SoE_{i,m}^{EV,Max}$) arasında olması gerektiğini ve belirli bir zamanda istenen değere ($SoE_{i,m}^{EV,Des}$) eşit olacağını belirtir. Bu denklemler aracın park alanında olduğu zaman dilimlerinde ($T_{i,m}^{Arr} \leq t \leq T_{i,m}^{dep}$) geçerli olduğu da belirtilmektedir. Denklem (4.27) ve (4.28) de aracın park alanında olmadığı durumlarda şarj talebinin olmayacağını ve enerji durumun sifıra eşit olduğu görülmektedir. EA' lardan her bir m aracının şarj gücü talebinin, aracın varış zamanına ve şarj hızı kapasitesine veya şarj oranına ($CR_{i,m}^{EV}$) bağlı olarak belirlendiğini denklem (4.29) belirtir. Ve son olarak EA' ların bataryasının şarj durumunun bir önceki zaman diliminde ($SoE_{i,m,t-1}^{EV}$) değeri ve aracın şarj gücü talebinin ($P_{i,m,t}^{EV,CH}$) şarj verimliliği ($CE_{i,m}^{EV}$) ile belirlenen zaman dilimi (ΔT) boyunca geçen süreye bağlı olarak bulunduğu denklem (4.30)'da gösterilmektedir.

$$P_{i,t}^{EV,CH,tot} = \sum_m P_{i,m,t}^{EV,CH} \quad (4.21)$$

$$P_{i,m,t}^{EV,CH} \leq CR_{i,m}^{EV} \quad (4.22)$$

$$SoE_{i,m,t}^{EV} = SoE_{i,m}^{EV,Ini} \quad \text{if } t = 1 \quad (4.23)$$

$$SoE_{i,m,t}^{EV} \geq SoE_{i,m}^{EV,Min} \quad T_{i,m}^{Arr} \leq t \leq T_{i,m}^{dep} \quad (4.24)$$

$$SoE_{i,m,t}^{EV} \leq SoE_{i,m}^{EV,Max} \quad T_{i,m}^{Arr} \leq t \leq T_{i,m}^{dep} \quad (4.25)$$

$$SoE_{i,m,t}^{EV} = SoE_{i,m}^{EV,Des} \quad (4.26)$$

$$SoE_{i,m,t}^{EV} = 0 \quad T_{i,m}^{dep} < t < T_{i,m}^{Arr} \quad (4.27)$$

$$P_{i,m,t}^{EV,CH} = 0 \quad T_{i,m}^{dep} < t < T_{i,m}^{Arr} \quad (4.28)$$

$$P_{i,m,t}^{EV,CH} \leq T_{i,m}^{Arr} \cdot CR_{i,m}^{EV} \quad (4.29)$$

$$SoE_{i,m,t}^{EV} = SoE_{i,m,t-1}^{EV} + (P_{i,m,t}^{EV,CH} \cdot CE_{i,m}^{EV} \cdot \Delta T) \quad T_{i,d}^{Arr} < t \leq T_{i,d}^{dep} \quad (4.30)$$

4.3 Test ve Sonuçlar

Dağıtım şebekesi üzerine entegre edilmiş dağıtık üretim sistemlerini içeren, ayrıca çoklu batarya tabanlı depolama sistemleri ve hidrojen depolama sistemlerinin yanı sıra farklı türden elektrikli araçların da bulunduğu bir altyapı üzerinde gerçekleştirilen bu çalışmada, en uygun enerji yönetim stratejisinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu strateji, toplam şebeke kayıplarının en aza indirilmesi amacını taşırken, ilgili süreçler (4.1)-(4.30) denklemleri kullanılarak gerçek zamanlı enerji yönetim algoritması ile formüle edilmiştir.

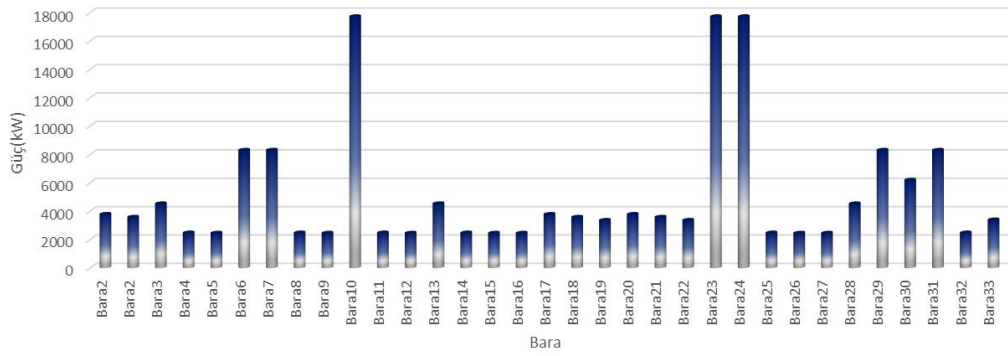
Çalışma çerçevesinde, batarya tabanlı depolama sistemi teknik özellikleri Tablo 4.2'de, hidrojen depolama sistemlerinin teknik özellikleri Tablo 4.3'te detaylı bir şekilde sunulmuştur. Tüm bu elemanların bir arada işletildiği bir sistem üzerinde yapılan analiz, IEEE 33 baralı sistem kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu analitik çerçevede geliştirilen model, çeşitli durum senaryoları altında toplam kayıpların nasıl etkilendiğini açıkça gösterir. Bu çeşitlilik, sistemin farklı koşullar ve gereksinimler altında nasıl tepki verdiğini, hangi stratejilerin en az enerji kaybı ile sonuçlandığını ve hangi senaryoların enerji yönetimini en iyi şekilde optimize ettiğini anlamayı sağlar. Bu model, CPLEX optimizasyon aracı ve GAMS v.24.1.3 programlama dilinde çalıştırılmış ve analiz edilmiştir. Bu sayede, gerçek zamanlı enerji yönetim algoritması, çok çeşitli senaryoları ve sistem özelliklerini dikkate alarak en uygun çözümü bulma kapasitesine sahip olmuştur. Bu kapsamlı analiz ve modelleme yaklaşımı, enerji yönetiminin karmaşıklığını ve çok boyutluluğunu yansıtmakta ve enerji kaynaklarının ve dağıtım altyapısının en etkili şekilde nasıl kullanılabileceğini göstermektedir.

4.3.1 Giriş Verileri

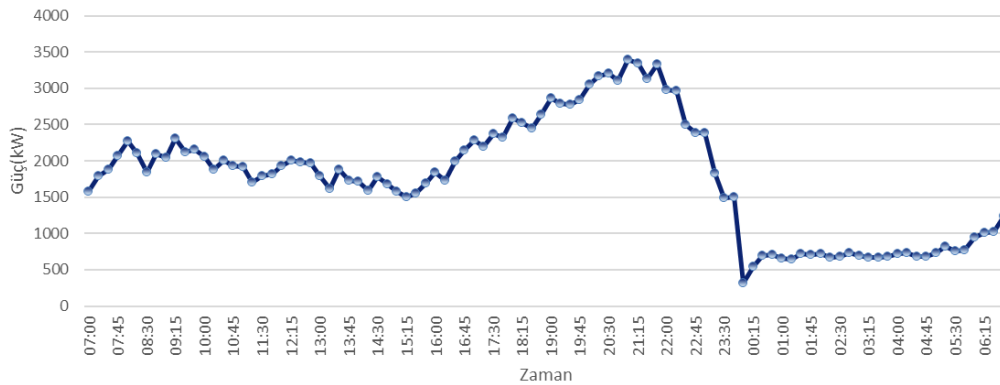
Bu çalışmada IEEE 33 baralı test sistemi kullanılmış olup her barada evsel yükler, aynı ve farklı baralarda birden fazla dağıtık üretim birimleri ve birden fazla batarya tabanlı depolama sistemi bulunmaktadır. Optimum enerji kaybının amaçlandığı bu

test sisteminde 15 er dakikalık zaman aralığına sahip veriler kullanılmıştır. Baralardaki evsel yük profilleri Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.2 Baralardaki evsel yük profili

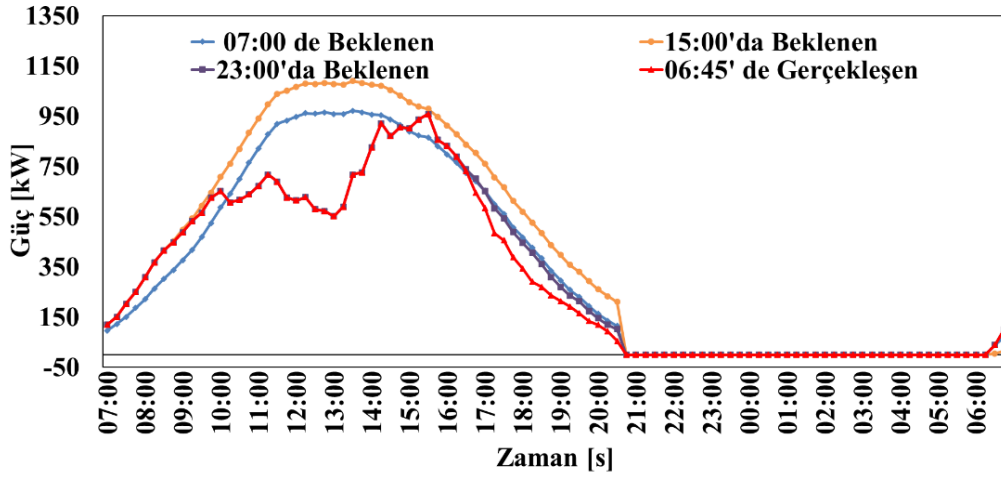
Zamanla Değişen Toplam Yük Talebi Şekil 3.3'te verilmektedir. Şekilde, dağıtım şebekesinin farklı baralarında 15 dakikalık aralıklarla ölçülen toplam yük talebini göstermektedir. Bu süreç boyunca, talep profilinin dinamik doğası ve zamanla nasıl değiştiği hakkında anlamlı bilgiler sağlamaktadır. Ayrıca bu veriler, enerji yönetim algoritmasının geliştirilmesi ve optimizasyon sürecinin gerçekleştirilmesi için temel oluşturmuştur. Yük talebinin zamanla nasıl değiştiğinin anlaşılması, enerji depolama ve dağıtık üretim birimlerinin yerleştirilmesi ve işletilmesi için optimal stratejilerin belirlenmesinde önemlidir.



Şekil 4.3 Zamanla değişen toplam yük talebi

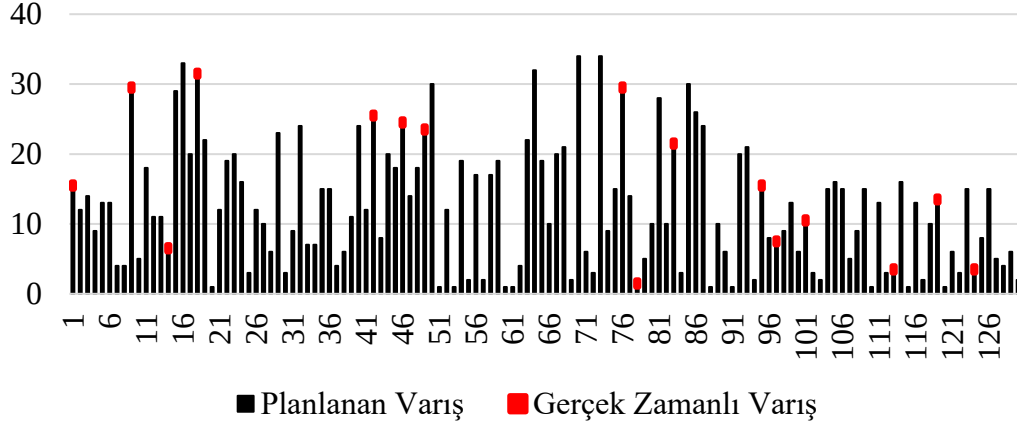
Dağıtık üretim birimlerinden biri olan fotovoltaik (FV) sistemlerin üretim profili Şekil 3.4'te sergilenmektedir.

Dağıtım şebekesine entegre edilen FV sistemlerinin güç üretimindeki bu zamanla değişen doğası, sistemdeki toplam güç kaybını minimize etmek amacıyla geliştirilen enerji yönetim algoritmasının uygulanmasında önemli bir parametredir.

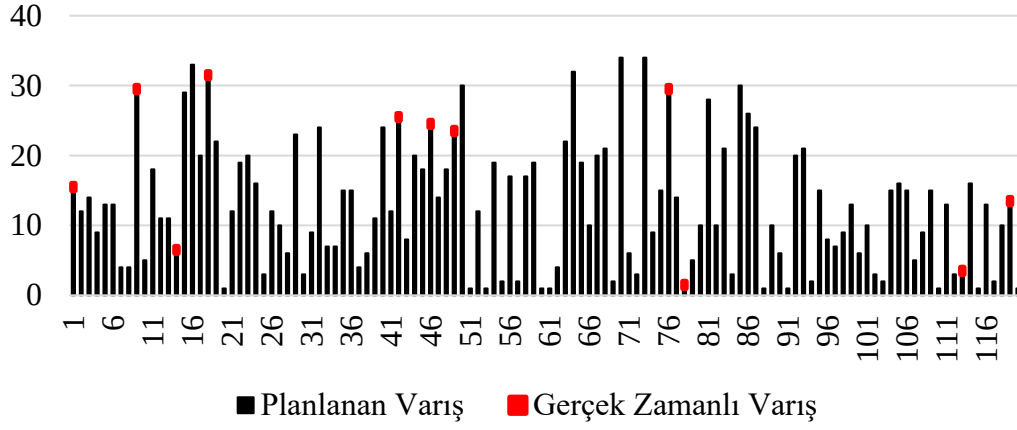


Şekil 4.4 FV üretim için zamana bağlı değişim profili

Elektrikli araçların penetrasyonundaki artış, enerji talep ve tedarik dengesi üzerinde ciddi etkilere neden olmaktadır. Özellikle araçların şebekeye bağlandığı ve enerji talebinde bulunduğu zaman dilimleri, enerji talebinin artmasına ve yer yer enerji talebinin yoğunlaşmasına yol açmaktadır. Bu bağlamda bu tezde gerçek zamanlı bir optimizasyon yaklaşımı kullanılarak elektrikli araçların varış/ayrılış sürelerini dikkate alarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu model örneğin bir aracın planlanan saati olan 13:00'da gelmesi gerekirken 13:45'te gelmesi gibi beklenmedik durumların enerji dağıtım sistemine olan etkisini daha ayrıntılı ve gerçekçi bir şekilde değerlendirebilmeyi sağlamaktadır. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te batarya tabanlı ve hidrojenli araçların varış/kalkış süreleri verilmektedir.



Şekil 4.5 Batarya tabanlı EA'ların varış ve kalkış süreleri



Şekil 4.6 Yakıt hücresi elektrikli araçların varış ve kalkış süreleri

Bu çalışmada kullanılan batarya depolama sisteminin önemli teknik özellikleri Tablo 4.1'de sunulmaktadır.

Tablo 4.2 Batarya tabanlı enerji depolama sistemi teknik bilgiler

	Max kapasite	Min kapasite	Başlangıç değeri	Şarj oranı	Deşarj oranı	Şarj verimliliği	Deşarj verimliliği
EDS	1000	200	300	300	300	0,95	0,95

Tablo 4.3 HEDS'nin teknik bilgileri

	Max Kapasite	Min Kapasite	Başlangıç Değeri	Elektroliz Sabit	Max Elektroliz Gücü (kW)
HEDS	1000	100	200	0,65	4000

4.3.2 Durum Analizleri ve Değerlendirilmeleri

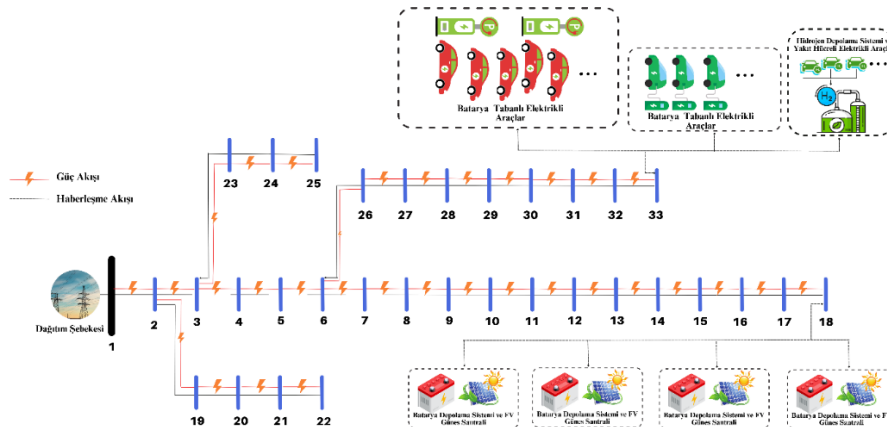
Temel Durum: BEDS ve FV sistemlerinin bara 18, hidrojen depolama sistemi, yakıt hücresel araçlar ve batarya tabanlı araçlar bara 33’te olduğu durum.

Durum 1: BEDS ve FV sistemlerinin bara 18 ve yakıt hücresel/batarya tabanlı araçlar ve hidrojen depolama sisteminin bara 2 de olduğu durum.

Durum 2: BEDS ve FV sistemlerinin bara 2 ve yakıt hücresi/batarya tabanlı araçlar ve hidrojen depolama sisteminin bara 18 de olduğu durum.

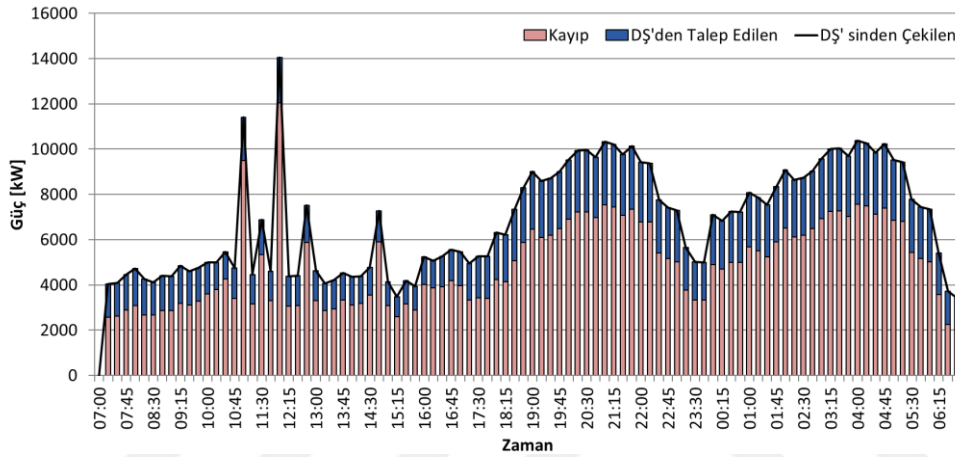
4.3.2.1 Temel Durum Analizi ve Değerlendirilmesi

Bu senaryo, BEDS ve FV sistemlerinin bara 18, hidrojen depolama sistemi, yakıt hücresel araçlar ve batarya tabanlı araçlar bara 33'e yerleştirildiği durumu temsil eder. Bu konumlandırma, çalışmanın başlangıç senaryosu olup dağıtık üretim ve elektrikli araçlara sahip bir şebeke için çoklu ve farklı tip depolama sistemlerinin gerçek zamanlı entegrasyonu ile güç kaybı minimizasyonunun yapıldığı durumu temsil eder.



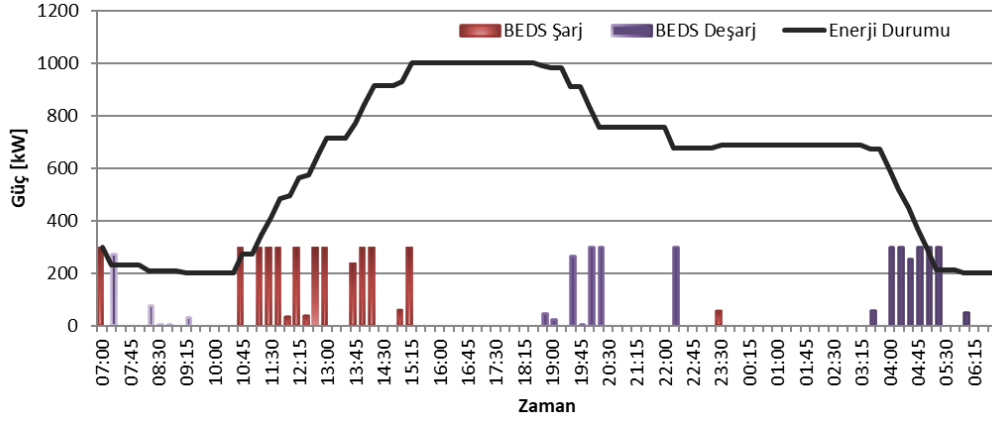
Şekil 4.7 Temel durum için önerilen model görsel

Test sistemi 1 günlük süre zarfında 15'er dakikalık periyot aralığında kurulmuştur. Şekil 4.8'de şebekeden talep edilen güç miktarı, şebekeden çekilen toplam güç miktarı ve bu talepler dorultusunda sistemdeki toplam kayıp belirlenen periyotlarda verilmiştir. Talep edilen güç miktarının pik yaptığı zaman aralıklarından biri olan 11:00'da baralardaki toplam yük, hidrojen depolama sistemi elektroliz gücü ve araçlarında yoğun talebi üzerine pik yapmış olup en yüksek kayıp olduğu zaman aralıklarından biri olmaktadır.

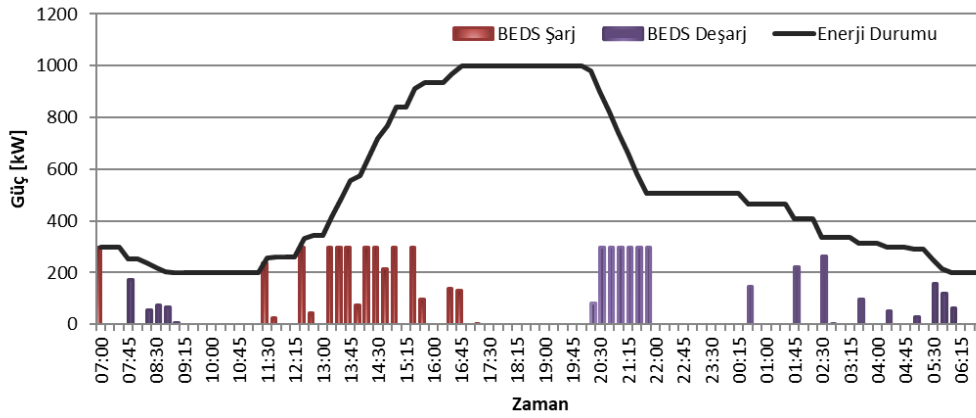


Şekil 4.8 Şebekenin sisteme sağladığı toplam ve net güç

Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de batarya tabanlı enerji depolama sisteminin (BEDS) şarj/deşarj dinamikleri ve enerji durumu değişikliklerini detaylı olarak göstermektedir. BEDS'nin konumlandırıldığı barada, fotovoltaik (FV) sistemler aracılığıyla öncelikle enerji talepleri karşılanmıştır. FV sistemlerinin karşılayamadığı enerji ihtiyaçları ise enerji depolama sisteminden temin edilerek hatlarda meydana gelen enerji kayıplarının en aza indirgenmesi amaçlanmıştır. Bu entegre yönetim yaklaşımı, dağıtım şebekesinin genel enerji verimliliğini artırmaya yönelik kritik bir adımı temsil etmektedir.



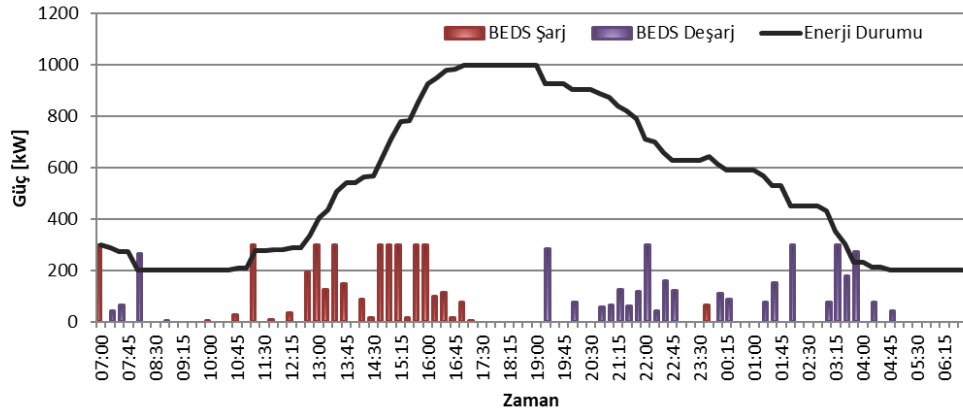
Şekil 4.9 Bara 18'de bulunan BEDS-1 'nin şarj, deşarj ve enerji durumu



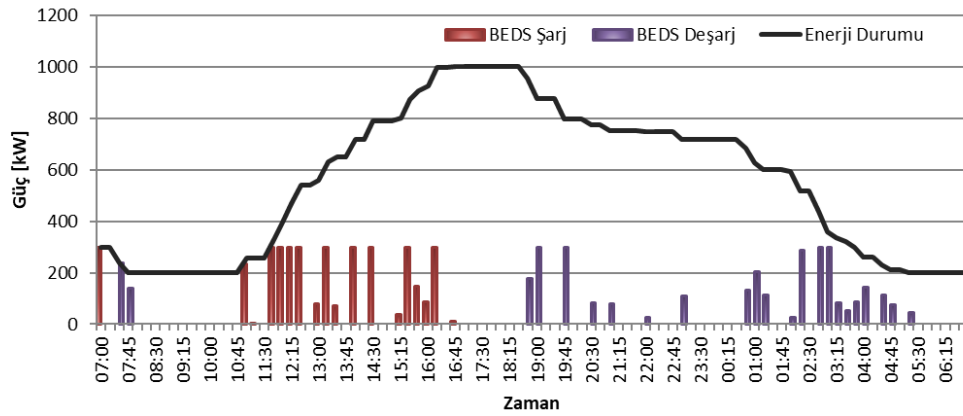
Şekil 4.10 Bara 18'de bulunan BEDS-2 'nin şarj, deşarj ve enerji durumu

Sistem içerisinde yer alan tüm batarya depolama sistemleri ve dağıtık üretim sistemleri, Bara 18'de merkezi bir noktada birleşmektedir. Bu depolama sistemleri, şarj ve deşarj işlemlerini gerçekleştirmek üzere tasarlanmıştır. Sistemin maksimum kapasitesini aşmayacak ve minimum kapasitenin altına düşmeyecek şekilde enerji depolama işlevini sürdürmektedirler. BEDS-1, 03:00-05:00 saat aralığında yoğun bir deşarj sürecine girmekte; BEDS-2 ise 19:00-21:30 saatleri arasında yoğun bir deşarj sürecine geçmektedir. Diğer yandan, BEDS-3 ve BEDS-4, hem deşarj hem de şarj işlemlerini daha düzensiz ve sürekli bir şekilde gerçekleştirmektedirler, bu işlemler sistemdeki zamanı geniş bir aralığa yayılmıştır. Sonuç olarak, tüm depolama sistemleri, istenen zaman aralıklarında fotovoltaik (FV) kaynaklı enerji

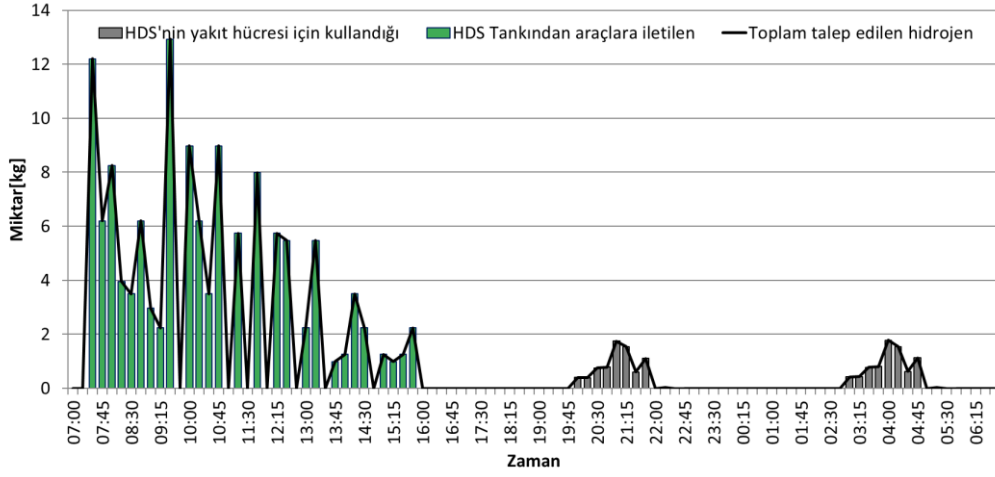
ile şarj olmakta ve sistemdeki enerji tüketim gruplarının yoğun olduğu saatlerde deşarj olmaktadır.



Şekil 4.11 Bara 18'de bulunan BEDS-3 'ün şarj, deşarj ve enerji durumu

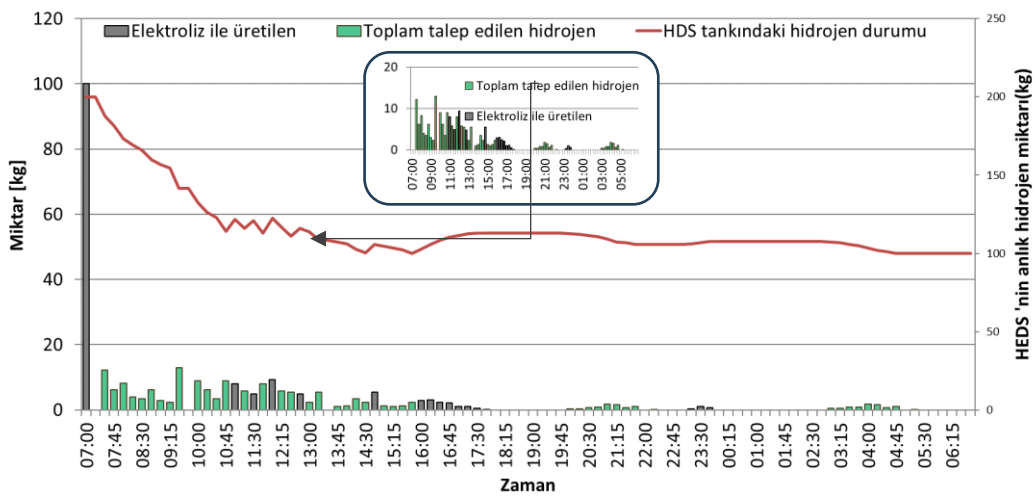


Şekil 4.12 Bara 18'de bulunan BEDS-4 'ün şarj, deşarj ve enerji durumu

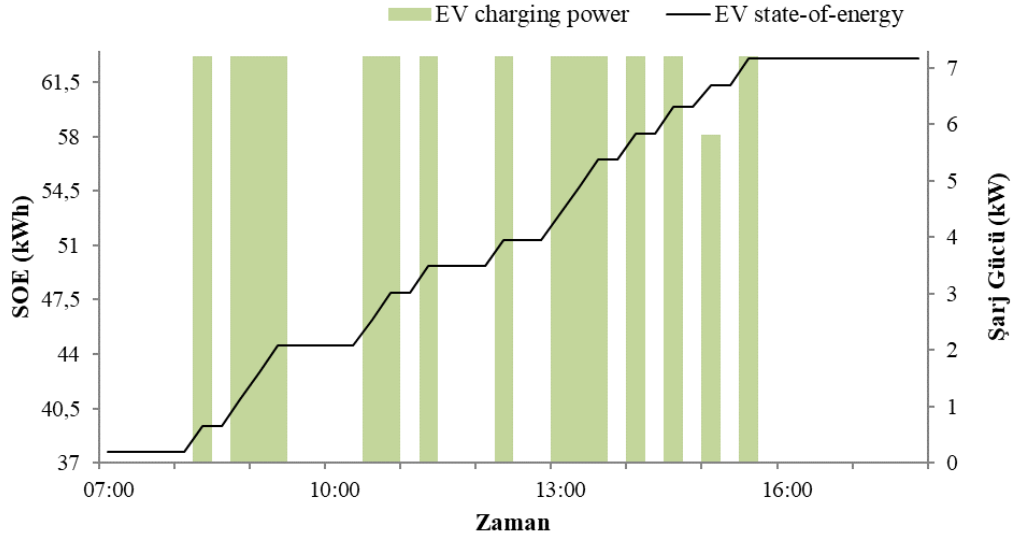


Şekil 4.13 Hidrojen tankında bulunan ve araç tarafından talep edilen hidrojen miktarı

Sistemde enerji taleplerini karşılamak için Hidrojen Depolama Sistemi (HDS) elektroliz prosesi aracılığıyla hidrojen üretmekte ve bu hidrojeni özel tanklarda muhafaza etmektedir. Talepler doğrultusunda, bu hidrojen doğrudan araçların enerji ihtiyaçlarını karşılamak üzere kullanılabilir; alternatif olarak, yakıt hücresi teknolojisi ile hidrojen, elektrik enerjisine dönüştürülerek sistemin enerji taleplerini karşılamak amacıyla da kullanılabilir. Şekil 4.13, tankta bulunan ve araçların talep ettiği hidrojen miktarı, Şekil 4.14 HDS'nin mevcut kapasitesini, toplamda talep edilen hidrojen miktarını ve elektroliz ile ne kadar hidrojen üretildiğini grafiksel olarak detaylandırmaktadır.

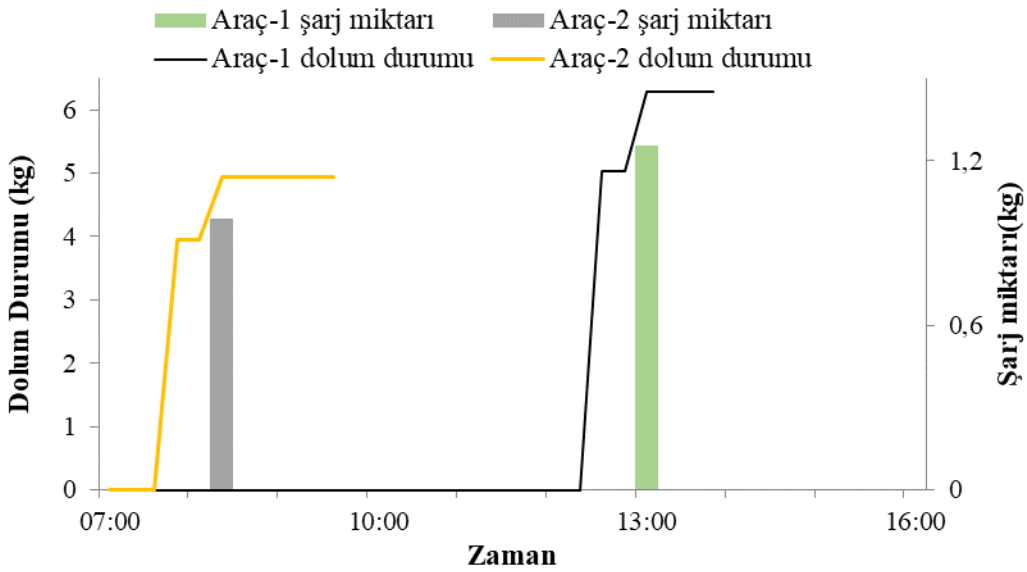


Şekil 4.14 Hidrojen tankındaki bulunan ve elektrolizle üretilen hidrojen miktarı



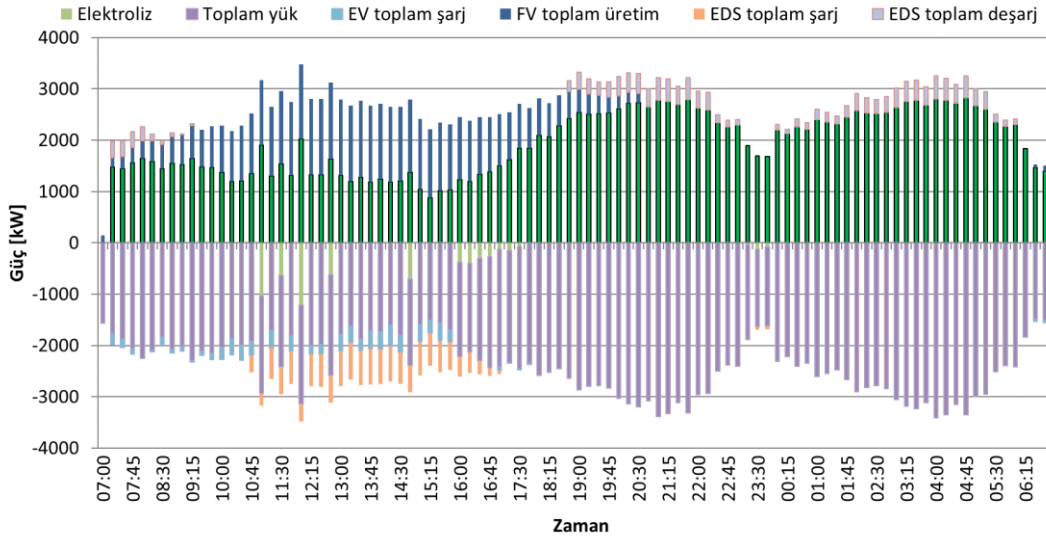
Şekil 4.15 Batarya tabanlı bir EA 'ın şarj, deşarj ve enerji durumu profili

Dağıtım şebekesinin performansı, entegre edilen batarya tabanlı elektrikli araçlar ve yakıt hücresel araçların artan sayısı ile doğrudan etkilenmektedir. Son yıllarda elektrikli araç teknolojisinin hızla ilerlemesi, bu araçlara olan talebin sürekli olarak artmasına neden olmuştur. Bu evrimsel değişimin getirdiği enerji talebi ve tüketimi üzerindeki etkileri değerlendirmek adına, seçilen test şebekesine elektrikli araçlar da dahil edilmiş ve böylelikle şebeke üzerindeki enerji kayıplarının dinamikleri incelenmiştir. Şekil 4.15, batarya tabanlı bir elektrikli aracın şarj-deşarj süreçlerini ve enerji durumunu detaylı bir şekilde sunarken; Şekil 4.16 ise yakıt hücresel iki farklı aracın yakıt tüketim ihtiyaçlarına ve enerji bilgilerine odaklanmaktadır.



Şekil 4.16 Yakıt hücresel iki farklı aracın yakıt tüketim ihtiyaçları ve yakıt durumu

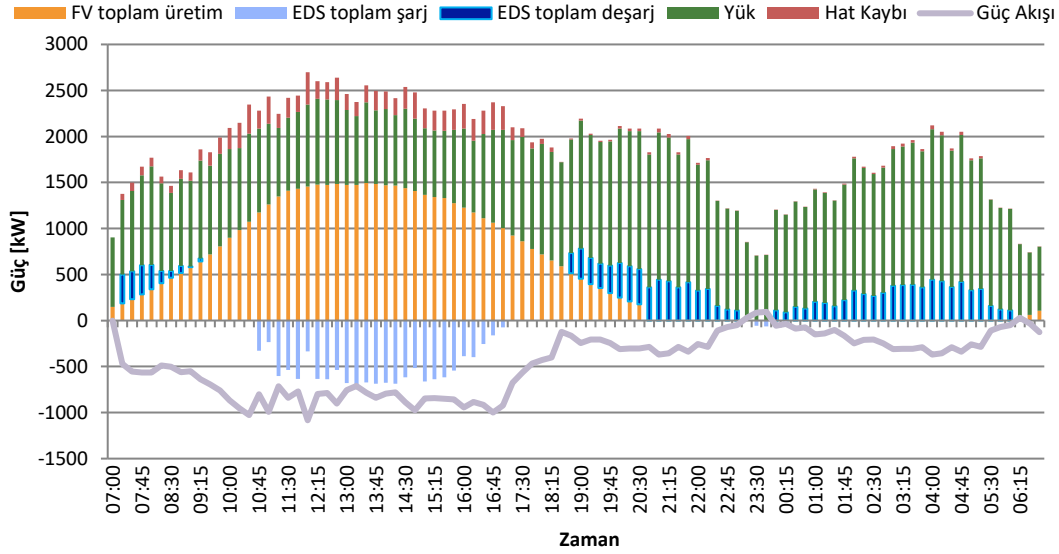
Temel senaryoda, güç dengesi denklemleri, dağıtım şebekesindeki belirli bir barada meydana gelen enerji alışverişlerini kapsar. Bu denge, fotovoltaik (FV) sistemler tarafından üretilen enerji miktarını, batarya enerji depolama sistemlerinin (BEDS) deşarj miktarını, iletim hatlarındaki güç kayıplarını, şebeke tüketicilerine iletilen enerji miktarını, yakıt hücrelerinin talep ettiği enerji ile elektrolizerler tarafından kullanılan enerjiyi ve son olarak barada bulunan yüklerin talep ettiği enerji miktarını, BEDS'nin şarj durumunu ve elektrikli araçların (EV'ler) şarj ihtiyaçlarını içerir. Bu enerji akışları ve dengeler Şekil 4.17'de detaylı olarak görülmektedir.



Şekil 4.17 Temel durum için test sistemindeki güç dengesi

IEEE 33 bus sistemine ait 18 düğümünde güç dengesi, Şekil 4.18'de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Belirli bir düğümde güç dengesinin sağlanması, farklı enerji bileşenleri ve değişkenlerin entegrasyonunu gerektirir. Bu bağlamda, öğle saatlerinde maksimum seviyede üretilen fotovoltaik enerji, enerji depolama sistemlerinde akümüle edilmiş ve daha sonra günün ilerleyen saatlerinde, özellikle enerji tüketiminin pik yaptığı akşam vakitlerinde, depolanan enerji sisteme geri verilmiştir. Bu süreç, güç akışının yönetildiği ve analiz edildiği modelin temel dinamiklerinden biridir. İncelenen saatlerde, enerji depolama sistemlerinin şarj olduğu zaman dilimlerinde gözlemlenen güç kaybı oranı, beklenildiği üzere, yüksek seviyededir. Ancak, şebeke tüketiminin zirve yaptığı ve güç kaybının maksimum olması muhtemel zamanlarda, depolanan enerjinin sisteme entegrasyonu, şebekenin esnekliğini artırarak ve dolayısıyla güç kayıplarını azaltarak önemli bir

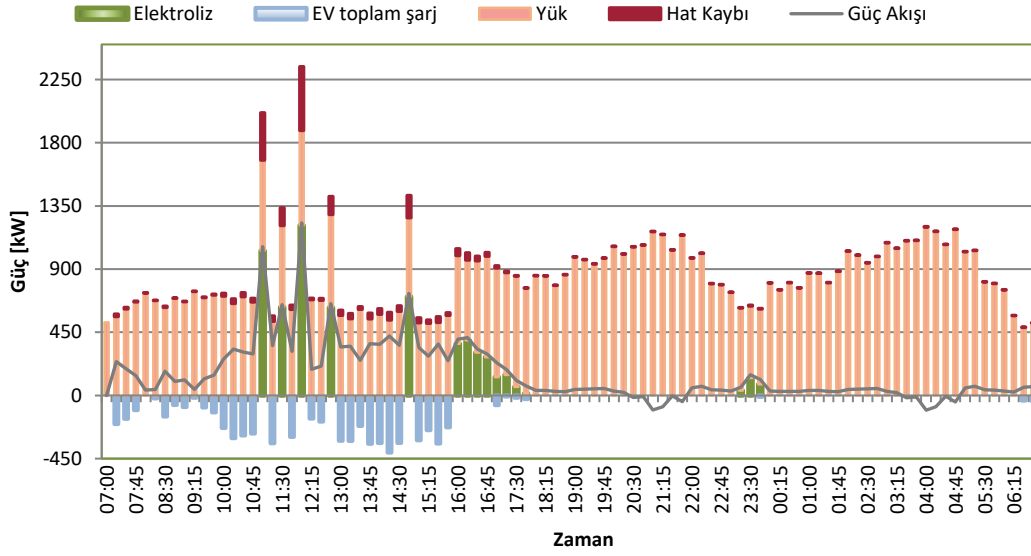
rol oynamıştır. Bu durum, enerji depolama sistemlerinin, yük yönetimi ve şebeke stabilitesine katkıda bulunma potansiyelini vurgulamaktadır.



Şekil 4.18 Temel durum için i18 barasındaki güç dengesi

Şekil 4.7'de gösterilen modele göre, i33 barasında elektrikli araçlar (EA) ve bir hidrojen depolama sistemi bulunmaktadır. Bara i33'teki yük, elektroliz için gerekli enerji, elektrikli araçlar için toplam gereken enerji, iletim hatlarındaki güç akışı ve toplam güç kaybının zamanla değişimi Şekil 4.19'de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Yakıt hücreli araçların hidrojen ihtiyacı, depolama tankındaki hidrojen ile karşılanmaktadır; bu hidrojen elektroliz yoluyla üretilmektedir. Elektroliz süreci, talep edilen hidrojen miktarına ve tanktaki mevcut hidrojen seviyesine göre düzenlenmektedir. Elektroliz için gerekli güç, sistemin operasyonel esnekliğini maksimize ederek dağıtık üretim sistemleri (DÜS), batarya enerji depolama sistemleri (BEDS) gibi çeşitli kaynaklardan dinamik olarak talep edilmekte ve şebekenin enerji tüketim ihtiyacını karşılamak için yönlendirilmektedir. Özellikle öğle saatlerinde, yakıt hücreli araçların artan hidrojen talebine cevap vermek için tanktaki hidrojen seviyesi azalmakta ve elektroliz yoluyla üretilen hidrojen tekrar tankta depolanarak talebi karşılamaktadır. Ayrıca, sistemde aşırı yüklenme durumları olmadığında ve hidrojen talep edilmediğinde, tankta depolanan hidrojen yakıt hücreleri aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülerek şebekeye ek enerji

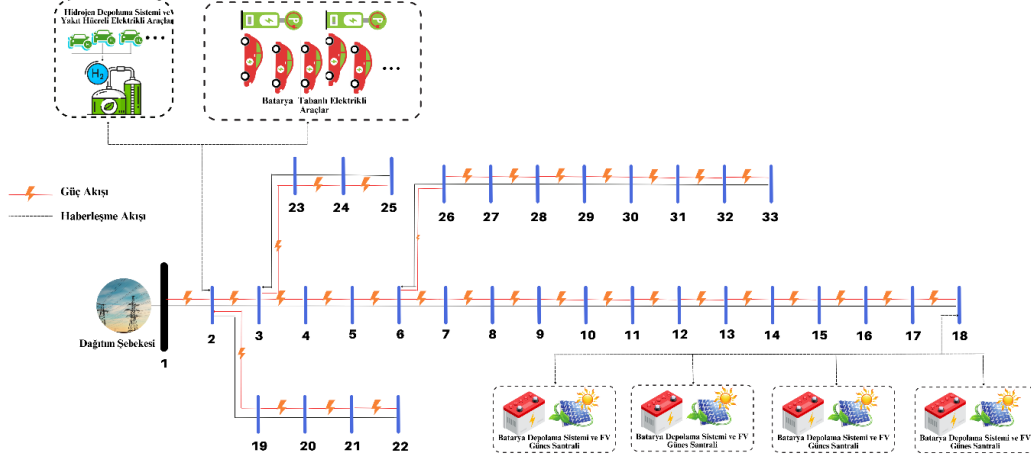
sağlamaktadır. Ancak, elektroliz işleminin sistemdeki güç kaybı üzerindeki etkisi, grafikte gözlemlendiği üzere, toplam kaybın artmasına yol açmıştır.



Şekil 4.19 Temel durum için i33 barasındaki güç dengesi

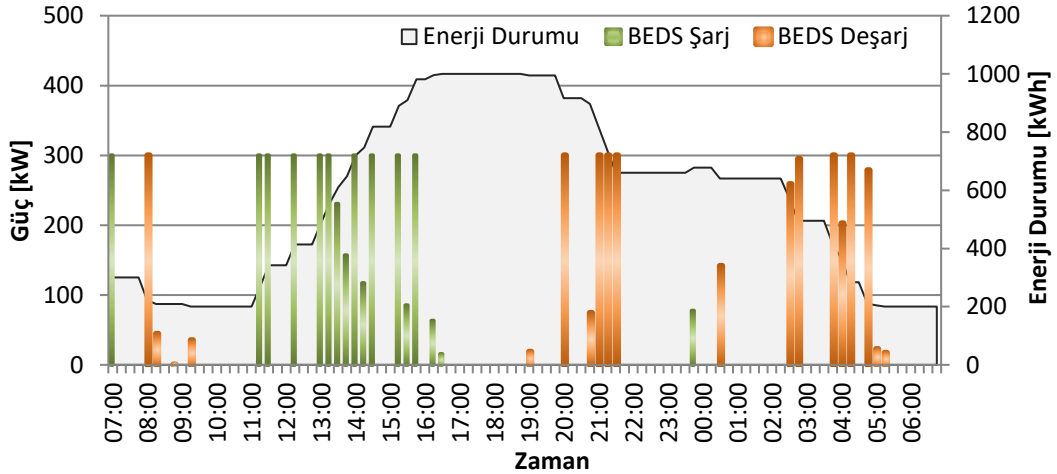
4.3.2.2 Durum-1 Analizi ve Değerlendirilmesi

Sunulan ilk senaryo, enerji depolama ve üretim birimlerinin dağıtım şebekesindeki farklı konumlandırma stratejilerinin etkilerini incelemektedir. Standart durumda, hidrojen depolama sistemi, yakıt hücreli araçlar ve batarya tabanlı elektrikli araçlar 33. barada yer alırken, bu senaryoda söz konusu birimler stratejik bir kararla 2. baraya taşınmıştır. Bu yer değişikliği, enerji transfer ve dağıtım dinamiklerinde önemli değişikliklere neden olmakta ve 2. barada konumlandırılan birimlerin, şebekenin genel performansına olan etkilerini değerlendirmek amacıyla analiz edilmektedir. Batarya Tabanlı Enerji Depolama Sistemi (BEDS) ve Fotovoltaik (FV) üretim birimlerinin konumlarının 18. barada sabit tutulması, enerji talebi ile enerji üretimi arasındaki ilişki ve bu değişikliğin şebekenin güç kayıpları üzerindeki potansiyel etkilerini analiz etme imkanı sunmaktadır. Hidrojen depolama ve enerji üretim birimlerinin 2. baraya taşınmasıyla ilgili olarak, lokal ve genel şebeke performansı üzerindeki etkilerin derinlemesine incelenmesi, bu senaryonun odak noktalarından birini oluşturmaktadır.

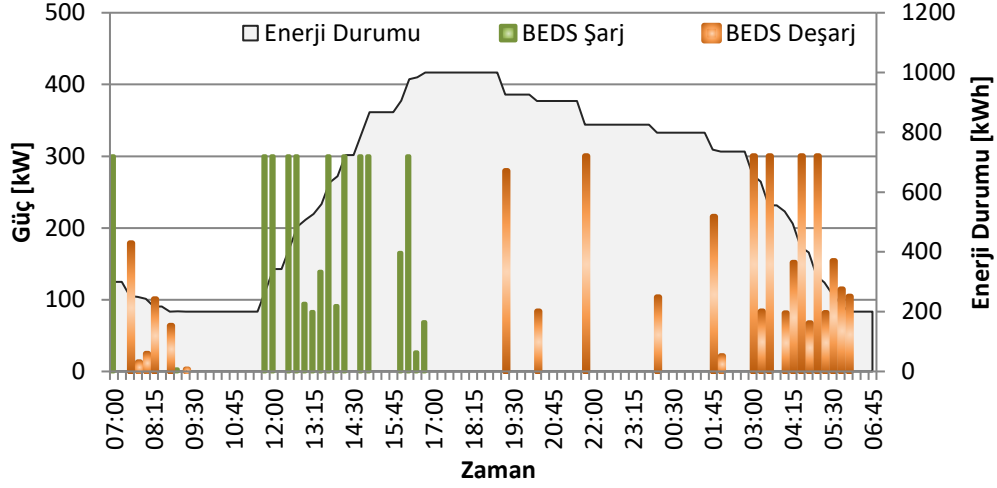


Şekil 4.20 Durum-1 için önerilen model görseli

Analiz edilen senaryoya göre, hidrojen enerji depolama sistemleri (HEDS) ve ilgili araçlar başlangıçta i33 barasında konumlandırılmışken, bu çalışmada i2 barasına taşınmıştır. Bu taşınma ile, HEDS ve araçların şebeke üzerindeki etkisinin daha merkezi bir konumda incelenmesi mümkün olmuştur. Batarya Enerji Depolama Sistemleri (BEDS) ile ilgili şarj, deşarj ve enerji durumları Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te gösterilmiştir. BEDS'lerin aynı barada bulunması sebebiyle, zaman içindeki şarj-deşarj ve enerji durumu toplamaları Şekil 4.25'te sunulmuştur.

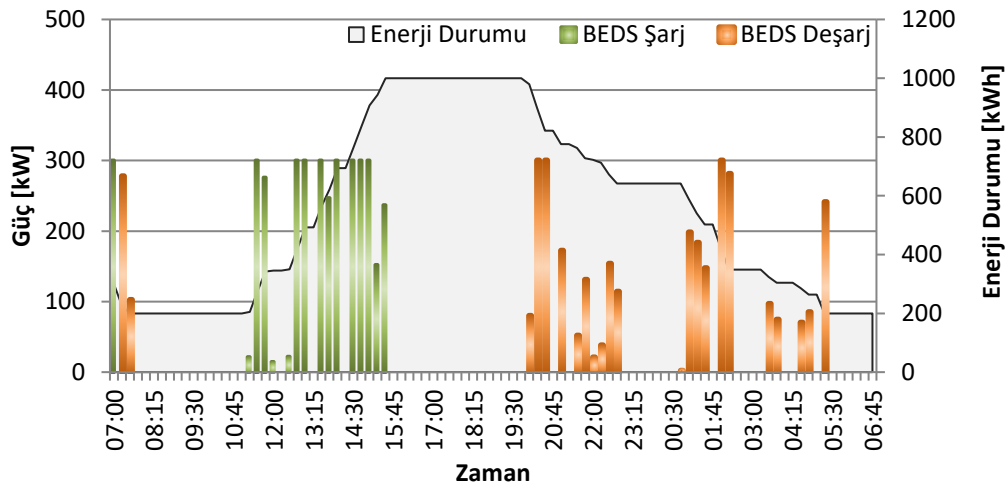


Şekil 4.21 Durum 1 için Bara 18'de bulunan BEDS-1 'nin şarj, deşarj ve enerji durumu

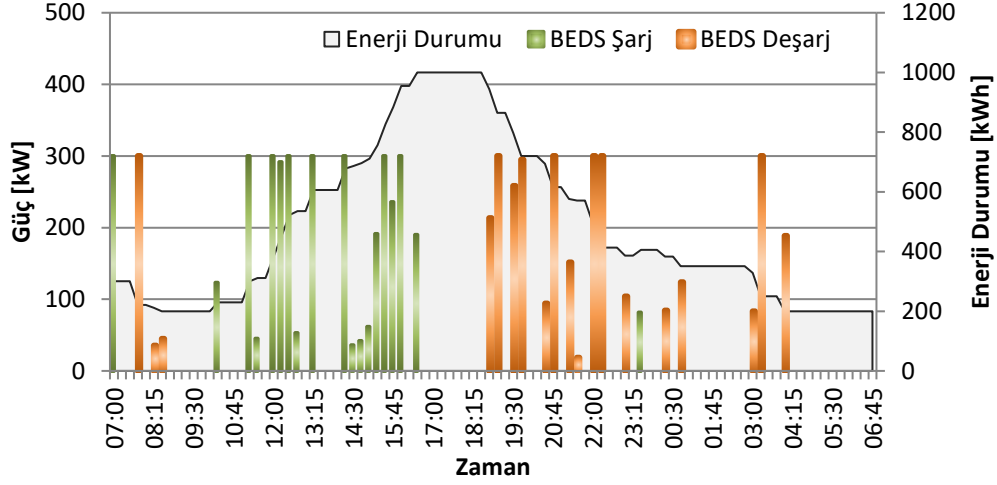


Şekil 4.22 Durum 1 için Bara 18'de bulunan BEDS-2'nin şarj, deşarj ve enerji durumu

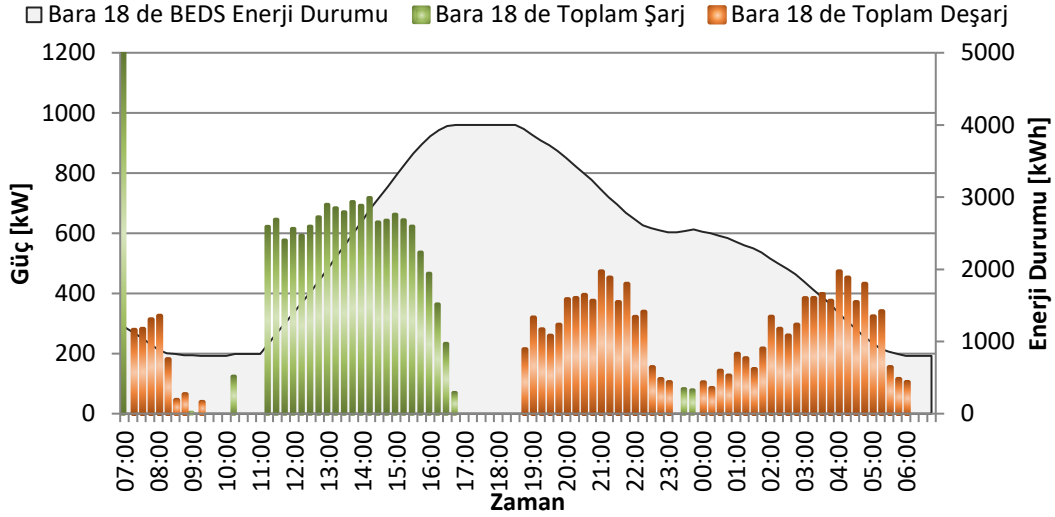
Grafik analizine göre, BEDS'lerin şarj profili, günlük fotovoltaik (FV) üretim desenleri ile uyumlu bir biçimde artış göstermiş, özellikle güneş ışınımının yüksek olduğu öğle saatlerinde maksimum şarj kapasitesine ulaşmıştır. Akşam saatlerinde ise sistemdeki yük artışına bağlı olarak BEDS'lerden yapılan deşarj miktarında belirgin bir yükselme gözlemlenmiştir. Bu durum, BEDS'lerin şebeke üzerindeki frekans ve voltaj düzenleme kapasitelerinin yanı sıra zirve yük kesintisindeki potansiyel rolünü göstermektedir. Şarj ve deşarj döngülerinin sıklığı ve büyüklüğü, BEDS'lerin şebeke operasyonlarına entegrasyonu ve enerji kalitesinin yönetimi açısından önemli bir parametre olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 4.23 Durum 1 için Bara 18'de bulunan BEDS-3'nin şarj, deşarj ve enerji durumu

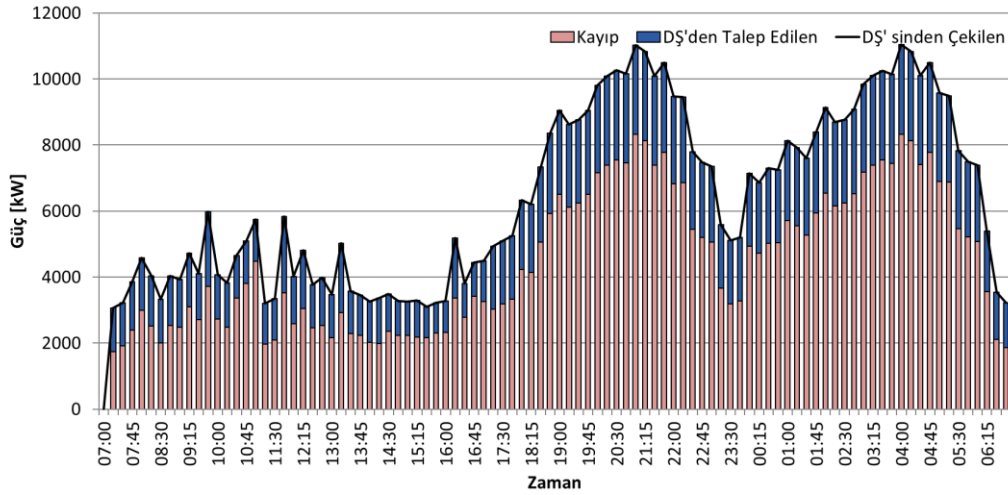


Şekil 4.24 Durum 1 için Bara 18'de bulunan BEDS-4'nin şarj, deşarj ve enerji durumu



Şekil 4.25 Durum 1 için Bara 18'deki toplam şarj, deşarj ve enerji durumu

Elektrik dağıtım şebekesinden talep edilen güç, sistem içerisindeki yüklerin ve enerji kayıplarının dinamiklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Sistemdeki dağıtık enerji üretim kaynaklarının şebekeye sağlamış olduğu enerji miktarı bu dinamiklerin bir parçasıdır ve toplam enerji dengesinde kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle, şebekeden talep edilen pik enerji miktarlarına baktığımızda; saat 19.00 ile 22.45 arasında en yüksek enerji talebinin gerçekleştiğini görmekteyiz. Ayrıca, sistem yüklerinde bir diğer belirgin pik tüketim saat 04:00'te meydana gelmektedir.



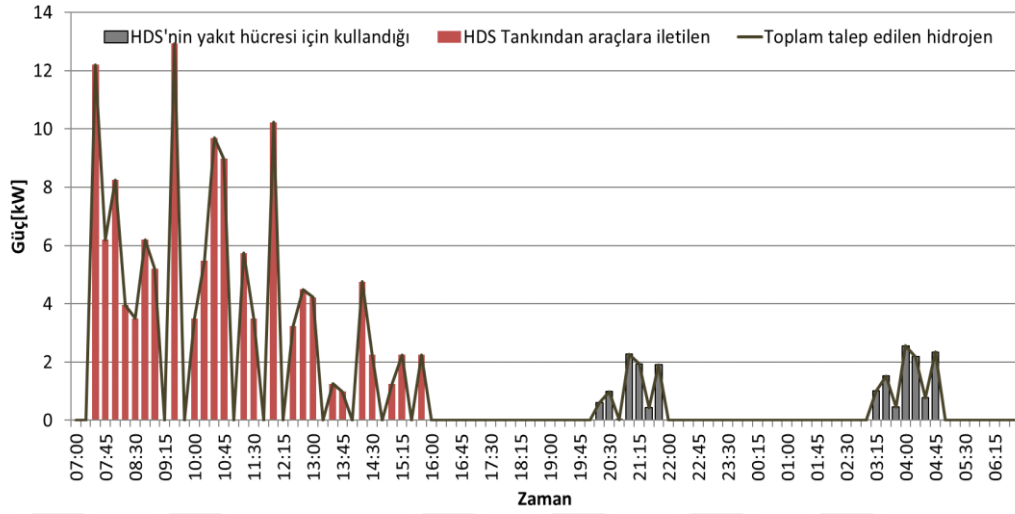
Şekil 4.26 Durum 1 için şebekeden talep edilen güç ve şebekenin toplam sağladığı güç miktarı

Şekil 4.26, dağıtım şebekesinden çekilen toplam gücün analitik bir değerlendirmesini sunmaktadır. Grafik incelendiğinde, şebekeden çekilen toplam güç, enerji kayıpları ve tüketim gruplarının talep ettiği gücün toplamından oluştuğu açıkça görülmektedir. Burada, enerji kayıpları (gri alan), şebekeden kaynaklanan zorunlu enerji dağılımı ve iletim sırasındaki kayıplarını temsil ederken, şebekeden talep edilen güç (mavi çizgi), tüketim gruplarının enerji ihtiyacını yansıtmaktadır.

Bu gözlemler, dağıtım şebekesinde enerji akışının yönetimi ve optimizasyonu için kritik parametrelerin belirlenmesi açısından önemlidir. Şebeke operatörleri, bu verileri kullanarak enerji kaynaklarının tahsisini, talep yönetimini ve kayıp azaltma stratejilerini optimize edebilir. Şebekeden çekilen toplam gücün bu iki bileşenin dikkatli bir şekilde analizi, enerji verimliliği ve sistem güvenilirliği için gerekli olan şebeke planlamasını ve işletmesini geliştirecek bilgiler sağlar.

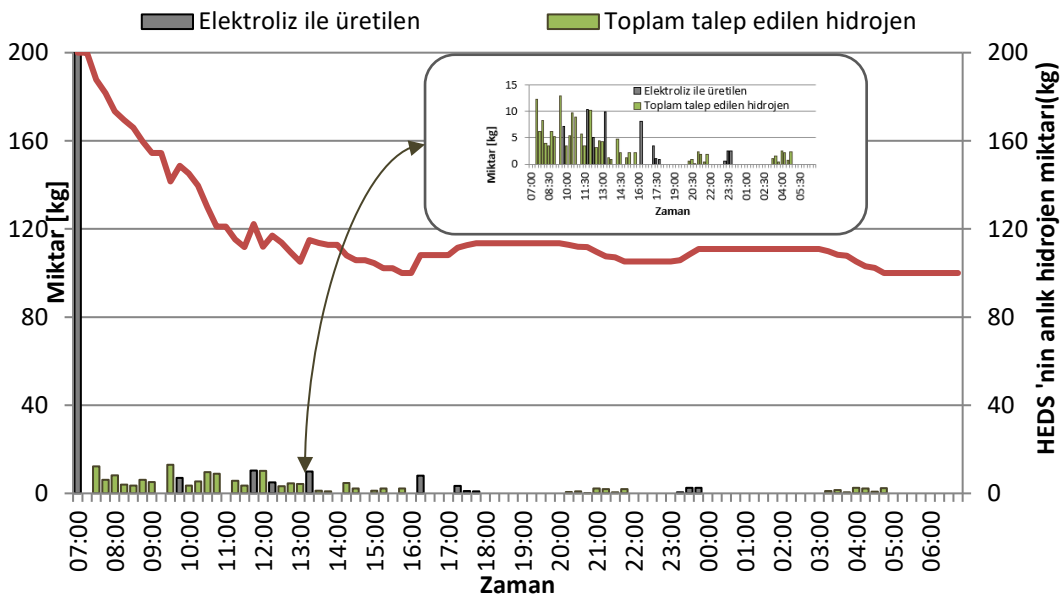
Şekil 4.27, hidrojen enerji depolama sistemi (HEDS)'nin dağıtım şebekesine entegrasyonunun etkilerini ve bu sistemden güç alışverişini göstermektedir. HEDS, hem araçlara doğrudan hidrojen sağlamakta hem de yakıt hücreleri aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülen hidrojeni şebekeye aktarmakta ve böylece sisteme

esneklik kazandırmaktadır. Elektroliz yoluyla üretilen hidrojen, talep üzerine depolanır ve gerektiğinde kullanım için erişilebilir durumda tutulur.



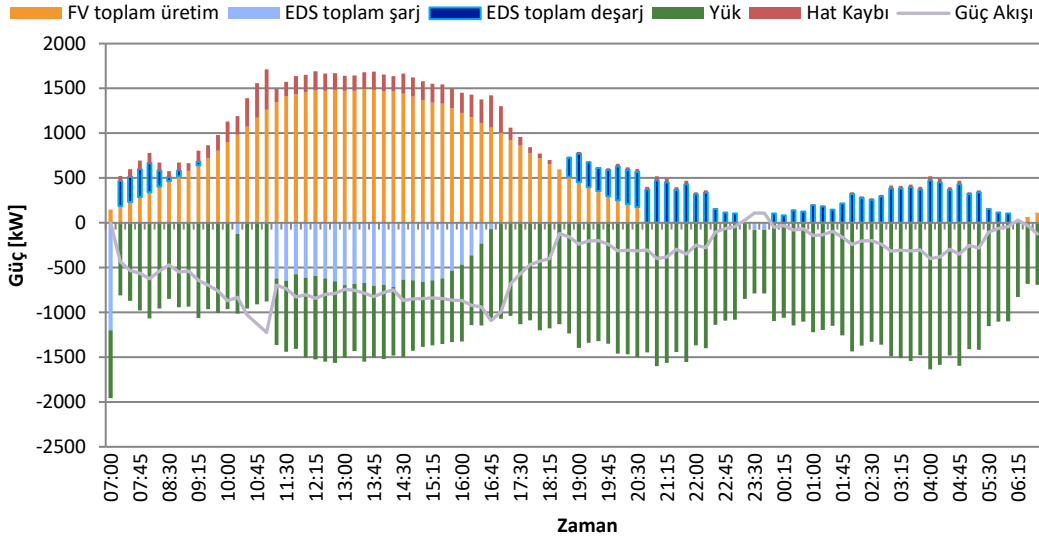
Şekil 4.27 Durum 1 için hidrojen tankında bulunan ve araç tarafından talep edilen hidrojen miktarı

Şekil 4.28, elektroliz süreci ile üretilen hidrojen miktarını, talep edilen hidrojen miktarını ve HEDS tankındaki hidrojen stoğunu zaman aralıklarına göre detaylandırmaktadır. Şekilde, hem üretim hem de tüketim açısından HEDS'in işlevselliğini ve şebekedeki etkileşimini ortaya koymaktadır. Elektroliz işlemiyle üretilen hidrojen miktarının, belirli zaman dilimlerinde talep edilen hidrojen miktarı ile uyumlu olduğu ve HEDS tankındaki hidrojen seviyelerinin sistem gereksinimlerini karşılayacak şekilde yönetildiği görülmektedir.

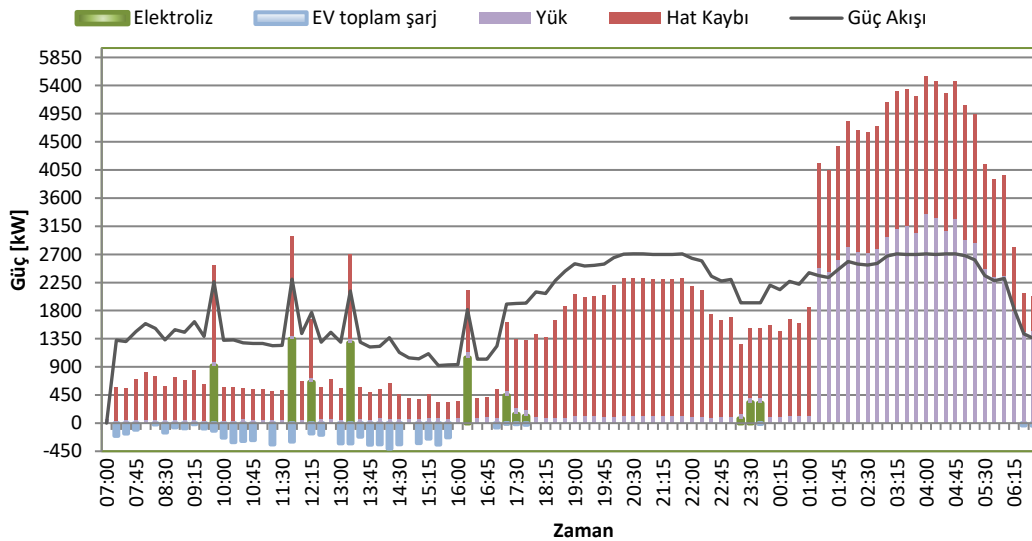


Şekil 4.28 Durum 1 için hidrojen tankındaki bulunan ve elektrolizle üretilen hidrojen miktarı

33 baralı bu test sisteminde tüketim ve üretim gruplarıyla birlikte gerçek zamanlı optimizasyon ile güç kayıp analizi gerçekleştirilmiştir. Bu durumda i2 ve i18 barası için dağıtık üretim sistemlerinin, tüketim grupları ve depolama sistemlerine sahip oldukları için güç dengesi grafikleri bu iki bara için analiz edilmekte ve i18 barası için güç dengesinin grafiği Şekil 4.29’da ve i2 barasındaki güç dengesi Şekil 4.30’da verilmektedir. Bu grafiklere göre hatlardaki en yüksek kayıp i1 ve i2 barasındaki hat olup temel duruma göre %0.5 güç kaybı artmıştır. Bir diğer hat olan i18 ve i17 baraları arasındaki hat kaybı ise temel duruma göre %1 artmıştır.

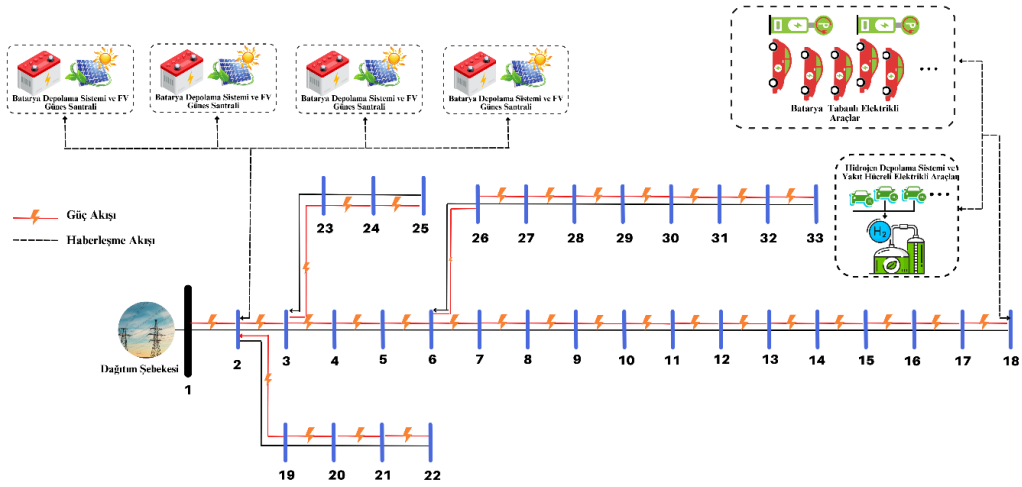


Şekil 4.29 Durum-1 için i18 barasındaki güç dengesi



Şekil 4.30 Durum-1 için i2 barasındaki güç dengesi

4.3.2.3 Durum-2 Analizi ve Değerlendirilmesi



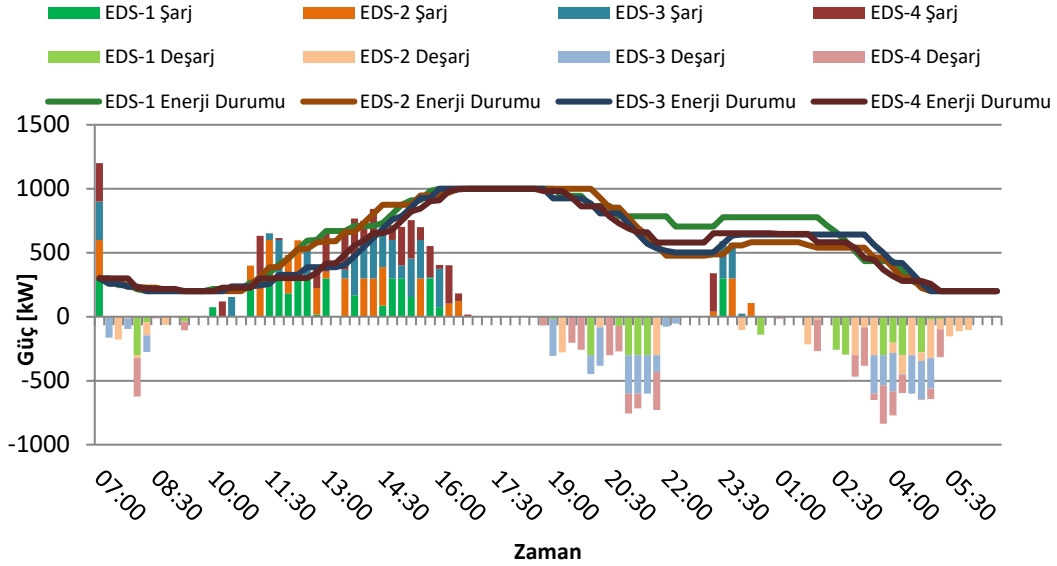
Şekil 4.31 Durum-2 için önerilen model görseli

İkinci senaryo, enerji depolama sistemleri ve dağıtık üretim kaynaklarının dağıtım şebekesi içerisinde nasıl konumlandırılacağına dair farklı stratejik yaklaşımları değerlendiren bir analiz sunmaktadır. Temel durumda, hidrojen depolama sistemi, yakıt hücre tabanlı araçlar ve batarya tabanlı elektrikli araçlar 33. bara konumlandırılmışken, bu senaryo kapsamında bu birimler 18. bara taşınmıştır. Bu konumlandırma değişikliği, enerji transferi ve dağıtım süreçlerine doğrudan etki ederken, 2. barada konumlandırılan birimlerin şebeke genelindeki enerji dengesi ve verimlilik üzerindeki etkilerini derinlemesine incelemek amacıyla tasarlanmış ve bu yeni senaryonun görseli Şekil 4.31’de gösterilmektedir.

Bu senaryoda, Batarya Tabanlı Enerji Depolama Sistemi (BEDS) ve Fotovoltaik (FV) üretim birimleri stratejik olarak 2. baraya yerleştirilmiştir. Bu yeniden konumlandırma, şebeke içerisinde enerji talebi ile üretiminin nasıl bir etkileşim içerisinde olduğunu ve bu etkileşimin sonucunda oluşabilecek potansiyel güç kayıplarını ortaya koyan kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır. Özellikle, birinci duruma kıyasla, hidrojen bazlı birimlerin ve BEDS ile dağıtık üretim kaynaklarının konum değiştirmesi, şebekenin lokal ve genel performansı üzerindeki etkileri anlamak adına bu senaryonun merkezinde bulunan kritik değerlendirme unsurlarından biridir.

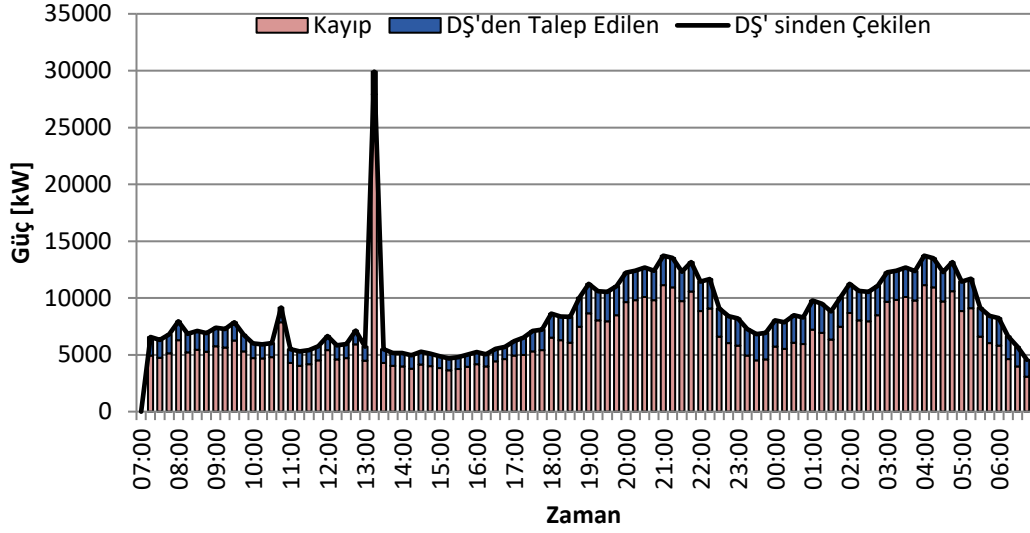
BEDS lerinin bu değişikliklerden sonra şarj, deşarj ve enerji durumları tek grafikte toplanmış ve Şekil 4.32’de gösterilmiştir. 4 adet teknik olarak benzer verilere sahip depolama gruplarının sistemdeki üretim ve tüketim gruplarına bağlı olarak enerji

durumundaki değişim analiz edilmiştir. Üretim gruplarının pik üretim yaptığı anlardan olan saat 11.00 – 15.00 aralığında depolama sisteminin şarj olduğu ve tüketim gruplarının pik yaptığı zaman aralıklarından olan 19.00-22.00 ve 02.00-05.00 aralığında deşarj olarak sistemdeki enerji talebi karşılanmaktadır.



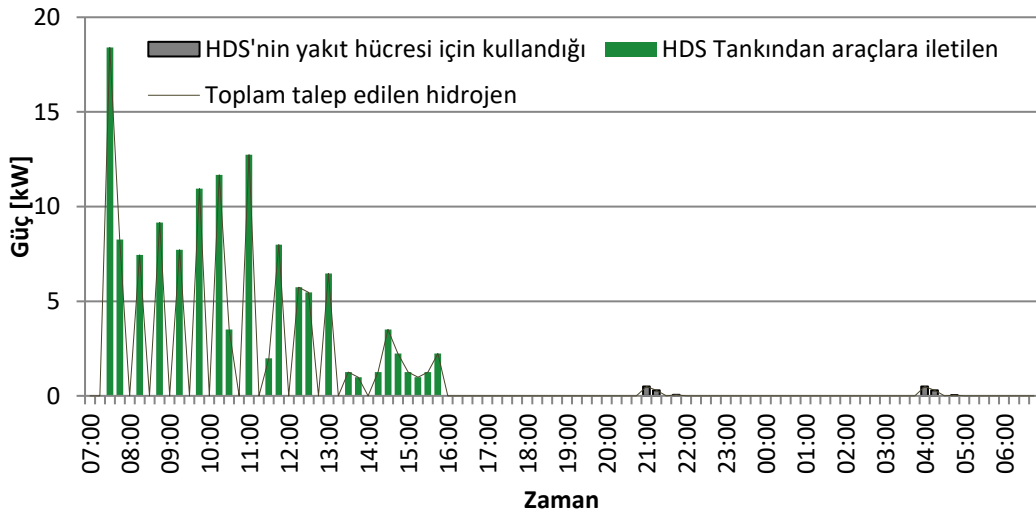
Şekil 4.32 Durum 2 için bara 18 de bulunan BEDS'lerin şarj, deşarj ve enerji durumu

Yüksek enerji talebinin olduğu dönemlerde, enerji depolama sistemlerinin kapasitesi, dağıttık üretim tesislerinin gerçek zamanlı üretim miktarı ve olası enerji kayıpları kritik bir öneme sahip olmaktadır. Bu yüzden, bu dönemlerde enerji yönetimi stratejilerinin belirlenmesi, özellikle dağıtım şebekesinin optimizasyonunu gerektirmektedir. Şekil 4.33'te, dağıtım şebekesi hatlarında oluşan toplam enerji kayıplarıyla birlikte, yüklerin şebekeden talep ettiği toplam enerji miktarının, şebekenin sağladığı toplam enerjiyle nasıl bir denge içinde olduğu gösterilmektedir.



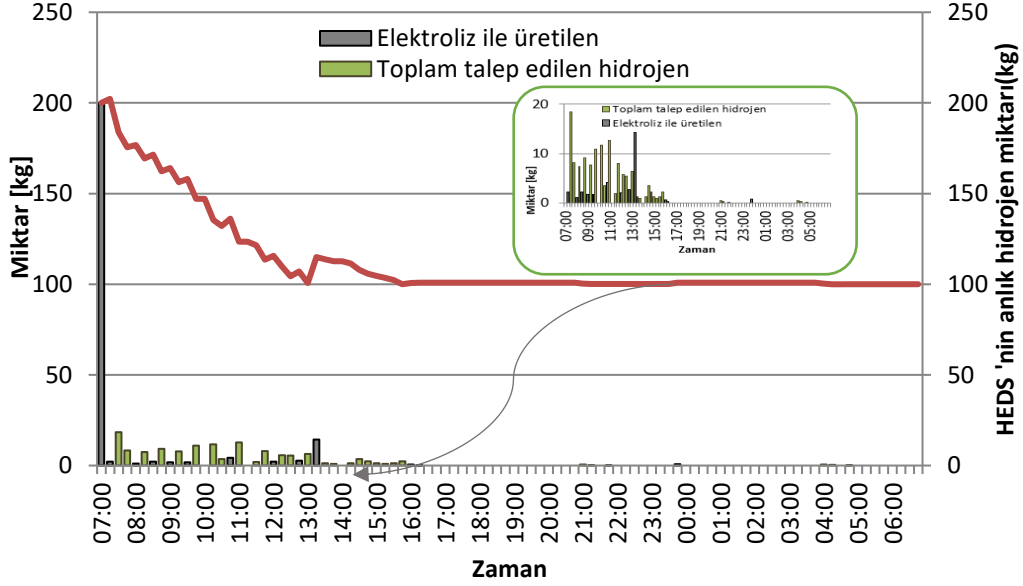
Şekil 4.33 Durum 2 için Şebekeden talep edilen güç ve şebekenin kayıp ile sağladığı güç miktarı

Dağıtım şebekesine entegre edilen Hidrojen Tabanlı Enerji Depolama Sistemi (HEDS) de bu analizlerin kritik bir parçasıdır. HEDS, elektroliz süreci ile hidrojen üretimi gerçekleştirip bu hidrojeni depolama kapasitesinde muhafaza etmektedir. Depolanan bu hidrojen, elektrikli araçların doğrudan kullanımı için hazır halde bekletilirken, diğer tüketim grupları için yakıt hücresi teknolojisi aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülerek şebekeye katkıda bulunmaktadır. Tank içerisindeki hidrojen miktarı, dinamik enerji talebine yanıt olarak gerçek zamanlı olarak üretilip depolanmaktadır.



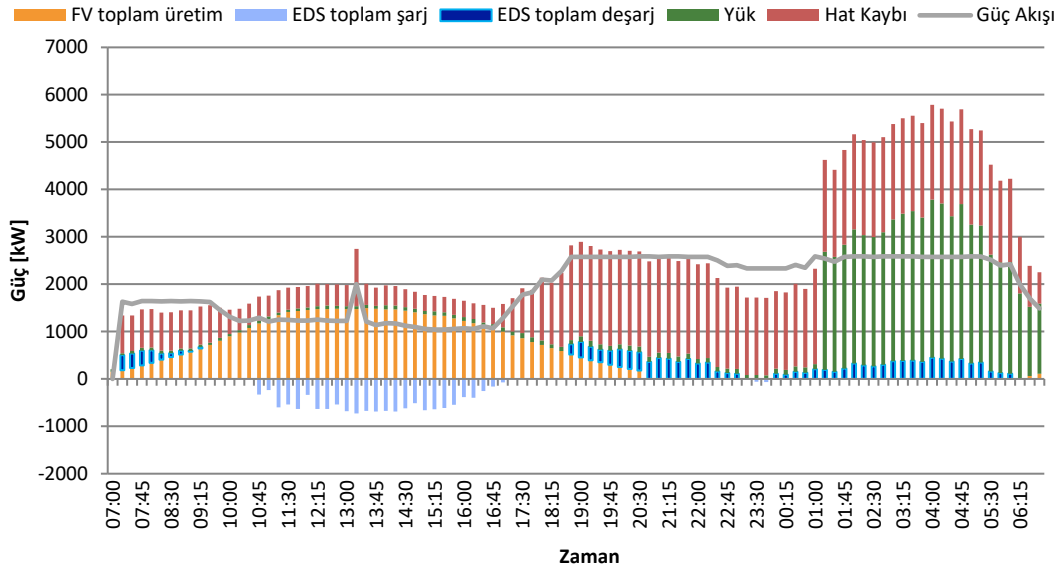
Şekil 4.34 Durum 2 için Hidrojen tankında bulunan ve araç tarafından talep edilen hidrojen miktarı

İlk başta 33. barada konumlandırılan HEDS'in, 18. baraya taşındıktan sonraki performans değişikliği Şekil 4.34'te görselleştirilmiştir. Elektroliz yoluyla üretilen hidrojenin miktarı, belirlenen zaman aralıklarında talep edilen hidrojen miktarına ve depo tankındaki hidrojen seviyelerine göre Şekil 4.35'te detaylandırılmıştır.

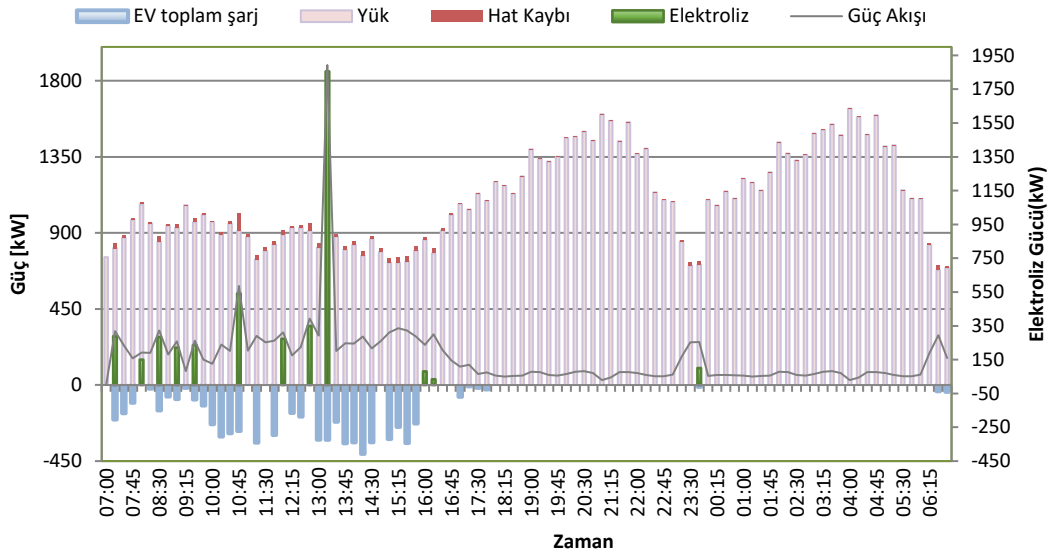


Şekil 4.35 Durum 2 için hidrojen tankındaki bulunan ve elektrolizle üretilen hidrojen miktarı

Dağıtım şebekesinde, tüketim ve üretim grupları dikkate alınarak gerçek zamanlı optimizasyon yöntemiyle detaylı bir güç kayıp analizi yapılmıştır. Bu analiz kapsamında, i2 ve i18 baralarının, dağıtık üretim sistemleri, tüketim grupları ve enerji depolama sistemleriyle olan entegrasyonları nedeniyle güç dengesi grafikleri bu iki bara için özel olarak ele alınmıştır. İ2 barasına ait güç dengesinin grafiği Şekil 4.36'de, i18 barası için olan güç dengesi ise Şekil 4.37'de sunulmuştur. Elde edilen grafikler ışığında, en yüksek güç kaybı i2 ve i3 baralarını bağlayan hatta gözlemlenmiş ve temel durumdaki en yüksek hat kaybına göre %15 lik bir artış olmuştur. Temel duruma kıyasla i1 ve i2 baraları arasındaki bu hat üzerindeki güç kaybında %0.12'lik bir artış saptanmıştır. Öte yandan, i18 ve i17 baralarını birbirine bağlayan hat üzerindeki kayıp da temel duruma göre %22 oranında bir azalış göstermiştir.



Şekil 4.36 Durum 2 için i2 barasındaki güç dengesi

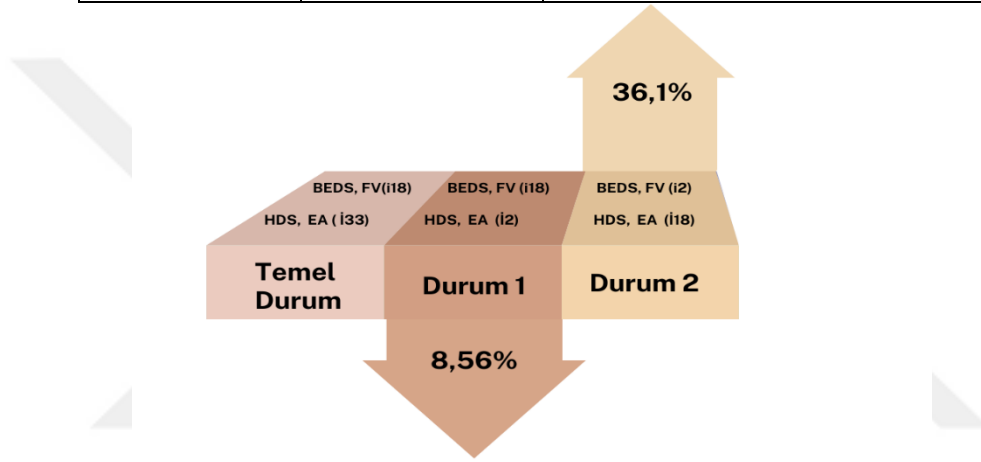


Şekil 4.37 Durum 2 için i18 barasındaki güç dengesi

Tüm bu analizlerin ışığında temel duruma göre toplam sistemdeki güç kaybının üretim ve tüketim gruplarının eklenmesi ve konumlandırılmasıyla nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak durum 1 de temel duruma göre güç kaybı %8,56 oranında düşmüş, durum 2 de ise güç kaybı %36,1 oranında artış göstermektedir. Bu kayıpların kW cinsinden değeri ve yüzdelik gösterimi Tablo 4.4'te toplu olarak verilmiş Şekil 4.38'de görselleştirilmiştir.

Tablo 4.4 Araçların ve farklı depolama sistemlerinin eklenmesiyle birlikte gerçek zamanlı optimizasyon sonucunda temel duruma göre güç kaybının yüzdelik değişimi

	Kayıp (kW)	Yüzdelik Kayıp Artışı (%)
Temel Durum	116617,8	_____
Durum-1	106629,9	-%8,56
Durum-2	158717,5	%36,1



Şekil 4.38 Farklı durumların temel duruma göre yüzdelik kayıp değişimi

Bu çalışmada gerçekleştirilen analitik inceleme, enerji üretim ve tüketim birimlerinin dağıtım şebekesine entegrasyonunun güç kaybı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Temel durum, hidrojen depolama sistemleri (HDS) ve elektrikli araçlar (EA) 33. bara konumlandırılırken, Batarya Tabanlı Enerji Depolama Sistemleri (BEDS) ve Fotovoltaik (FV) üretim birimleri 18. barada yer almaktadır. İlk senaryo (Durum 1) altında, HDS ve EA'lar 2. bara taşınmış ve bu değişiklik, temel duruma kıyasla toplam güç kaybında %8,56'lık bir düşüşe yol açmıştır. İkinci senaryo (Durum 2) ise, BEDS ve FV birimlerinin 2. bara, HDS ve EA'ların ise 18. bara yerleştirilmesiyle karakterize edilmiş ve bu senaryo, güç kaybında %36,1'lik bir artışa sebep olmuştur. Tüm senaryoların güç kaybı değerleri ve yüzdesel ifadeleri Tablo 4.4'te özetlenmiş ve Şekil 4.39'da görsel olarak sunulmuştur.

Önceki bölümde, FV ve elektrikli araçların konumlandırılması gibi belirsiz durumlar işleme alınmamışken, bu analizde gerçek zamanlı işletim dikkate alınarak güç kayıpları hesaplanmıştır. Böylece, temel duruma göre toplam hat kaybı karşılaştırılarak, farklı senaryoların şebeke performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu karşılaştırma, enerji depolama sistemlerinin ve dağıtık üretim birimlerinin stratejik konumlandırmasının güç kayıpları üzerinde belirleyici etkileri olduğunu ortaya koymakta, böylece şebeke tasarımı ve işletme stratejileri için önemli bilgiler sağlamaktadır.



Bu çalışmanın temel amacı, dağıtık üretime sahip dağıtım şebekesine entegre edilen birden fazla batarya tabanlı depolama sistemi ve yakıt hücresiyle yeşil hidrojen sistemine sahip bir enerji depolama sistemini (EDS) ele alarak, gerçek zamanlı güç kayıp minimizasyonu, güç dengesizliğinin giderilmesi, gerilim dalgalanmalarının azaltılması ve genel sistem güvenilirliği ile güvenliğinin artırılmasıdır. Bu amaçla, belirsiz enerji arz ve talebini karşılamak için karma tam sayılı doğrusal programlama kullanılarak optimum enerji yönetimi gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın diğer bir hedefi, farklı tipteki elektrikli araçların şebekeye eklenmesinin etkilerini dikkate alarak dağıtım şebekelerinin gerçek zamanlı güç kayıp minimizasyonunu sağlamaktır. Bu çerçevede, tekno-ekonomik analizler yapılacak ve güç sistemlerindeki işletimler için yeni bir gerçek zamanlı optimizasyon modeli geliştirilecektir.

Bu çalışma, çoklu enerji depolama sistemlerinin dağıtık üretime sahip bir dağıtım şebekesine entegrasyonunu ele alarak, bu konuda literatürde henüz tam olarak araştırılmamış bir alana ışık tutmaktadır. Önceki çalışmalar genellikle tek tip bir depolama sistemi üzerine yoğunlaşırken, bu tez çoklu depolama sistemlerinin bir arada kullanımının getireceği avantajları ve zorlukları inceler. Çalışma, yenilenebilir enerji üretimindeki belirsizliklerin üstesinden gelmek için gerçek zamanlı bir enerji yönetim yaklaşımı kullanmayı önerir ve bu yaklaşım enerji talep ve arzını belirsizlikler dahilinde optimize ederek, enerji maliyetlerini ve toplam güç kaybını en aza indirmeyi hedefler. Farklı tiplerdeki dağıtım şebekeleri dikkate alınarak yapılan pilot uygulamalar, bu çalışmanın genel uygulanabilirlik potansiyelini artırır. Dağıtım sistem operatörlerinin enerji depolama sistemlerini daha esnek bir şekilde kullanabilmesi için bir enerji yönetim sistemi önerilmiştir. Bu sistem, enerji depolama sistemlerinin operatörleri tarafından daha verimli kullanılmasını sağlayacak ve ekonomik dengeleri koruyacaktır. Araştırma, enerji maliyetlerini azaltma ve yatırım eğilimini artırma amacıyla ekonomik faydaları artırma konusunda orijinal katkılar sunmaktadır. Gerçek zamanlı işletme sırasında belirtilen birim güç miktarının ek maliyet oluşturmayacak şekilde nasıl

karşılanacağı bu tezde incelenir, bu yaklaşım gerçek zamanlı enerji talep ve arz dengesinin daha verimli bir şekilde yönetilmesi için literatüre önemli bir katkı sağlar.

Bu tez, dağıtık üretim sistemlerine entegre edilen batarya ve hidrojen tabanlı depolama sistemlerinin optimizasyonunu ve bu sistemlerin elektrik dağıtım şebekelerine entegrasyonunun etkilerini inceler. Öncelikle, dağıtık üretim kaynaklarından kaynaklanan güç dengesizliklerini gidermek, gerilim dalgalanmalarını azaltmak ve genel sistem güvenilirliğini artırmak amaçlanmıştır. Bu bağlamda, batarya tabanlı depolama sistemleri ve hidrojen enerji depolama sistemlerinin entegrasyonu, enerji arz ve talep dengesini optimize ederek enerji maliyetlerini ve toplam güç kaybını en aza indirmeyi hedefler. Ayrıca, elektrikli araçların sisteme entegrasyonunun enerji yönetimine etkileri de dikkate alınmıştır. Bu entegrasyon, şebekede yer alan enerji kaynakları ve yükler arasındaki etkileşimlerin detaylı bir şekilde incelenmesini gerektirir. Çalışma, bu entegrasyonun teknik ve ekonomik etkilerini analiz ederek, enerji sistemlerinin verimliliğini ve esnekliğini artırma potansiyelini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda, enerji depolama sistemlerinin konumlandırılması, enerji taleplerinin yönetimi ve gerçek zamanlı optimizasyon tekniklerinin kullanımı gibi konular ele alınmıştır. Çalışma, elektrik dağıtım şebekelerinin işletilmesi ve planlanmasında verimliliği, esnekliği ve enerji güvencesini artırma yönünde önemli katkılar sunmaktadır.

- [1] A. Aghahosseini, D. Bogdanov, ve C. Breyer, “A Techno-Economic Study of an Entirely Renewable Energy-Based Power Supply for North America for 2030 Conditions”, *Energies*, c. 10, sy 8, s. 1171, Ağu. 2017, doi: 10.3390/en10081171.
- [2] Y. Li vd., “Supply Function Game Based Energy Management Between Electric Vehicle Charging Stations and Electricity Distribution System Considering Quality of Service”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, c. 56, sy 5, ss. 5932-5943, Eyl. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.2988196.
- [3] H. Zhao, Q. Wu, S. Hu, H. Xu, ve C. N. Rasmussen, “Review of energy storage system for wind power integration support”, *Appl. Energy*, c. 137, ss. 545-553, Oca. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.04.103.
- [4] A. Kumar vd., “A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, c. 69, ss. 596-609, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.191.
- [5] S. Pineda-Morente, J. M. Morales-González, ve Y. Dvorkin, “Learning the price response of active distribution networks for TSO-DSO coordination”, 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3127343.
- [6] M. Stecca, L. Ramirez Elizondo, T. Batista Soeiro, P. Bauer, ve P. Palensky, “A Comprehensive Review of the Integration of Battery Energy Storage Systems into Distribution Networks”, *IEEE Open J. Ind. Electron. Soc.*, ss. 1-1, 2020, doi: 10.1109/OJIES.2020.2981832.
- [7] A. Tabares, J. F. Franco, M. Lavorato, ve M. J. Rider, “Multistage Long-Term Expansion Planning of Electrical Distribution Systems Considering Multiple Alternatives”, *IEEE Trans. Power Syst.*, c. 31, sy 3, ss. 1900-1914, May. 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2448942.
- [8] S. Lakshmi ve S. Ganguly, “Coordinated Operational Optimization Approach for PV Inverters and BESSs to Minimize the Energy Loss of Distribution Networks”, *IEEE Syst. J.*, c. 16, sy 1, ss. 1228-1238, Mar. 2022, doi: 10.1109/JSYST.2020.3041787.
- [9] H. Saboori, R. Hemmati, S. M. S. Ghiasi, ve S. Dehghan, “Energy storage planning in electric power distribution networks – A state-of-the-art review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, c. 79, ss. 1108-1121, Kas. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.171.
- [10] Y. Zheng, Y. Song, A. Huang, ve D. J. Hill, “Hierarchical Optimal Allocation of Battery Energy Storage Systems for Multiple Services in Distribution Systems”, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, c. 11, sy 3, ss. 1911-1921, Tem. 2020, doi: 10.1109/TSTE.2019.2946371.
- [11] A. Azizivahed vd., “Energy Management Strategy in Dynamic Distribution Network Reconfiguration Considering Renewable Energy Resources and Storage”, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, c. 11, sy 2, ss. 662-673, Nis. 2020, doi: 10.1109/TSTE.2019.2901429.

- [12] M. Kalantar-Neyestanaki ve R. Cherkaoui, "Coordinating Distributed Energy Resources and Utility-Scale Battery Energy Storage System for Power Flexibility Provision Under Uncertainty", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, c. 12, sy 4, ss. 1853-1863, Eki. 2021, doi: 10.1109/TSTE.2021.3068630.
- [13] Y. Sun, S. Bahrami, V. W. S. Wong, ve L. Lampe, "Chance-Constrained Frequency Regulation with Energy Storage Systems in Distribution Networks", *IEEE Trans. Smart Grid*, c. 11, sy 1, ss. 215-228, Oca. 2020, doi: 10.1109/TSG.2019.2920362.
- [14] M. Nazemi, M. Moeini-Aghtaie, M. Fotuhi-Firuzabad, ve P. Dehghanian, "Energy Storage Planning for Enhanced Resilience of Power Distribution Networks Against Earthquakes", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, c. 11, sy 2, ss. 795-806, Nis. 2020, doi: 10.1109/TSTE.2019.2907613.
- [15] J. H. Yi, R. Cherkaoui, ve M. Paolone, "Optimal Allocation of ESSs in Active Distribution Networks to Achieve Their Dispatchability", *IEEE Trans. Power Syst.*, c. 36, sy 3, ss. 2068-2081, May. 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3025991.
- [16] H. Haggi, W. Sun, J. M. Fenton, ve P. Brooker, "Risk-Averse Cooperative Operation of PV and Hydrogen Systems in Active Distribution Networks", *IEEE Syst. J.*, c. 16, sy 3, ss. 3972-3981, Eyl. 2022, doi: 10.1109/JSYST.2021.3106309.
- [17] N. Karthikeyan, J. R. Pillai, B. Bak-Jensen, ve J. W. Simpson-Porco, "Predictive Control of Flexible Resources for Demand Response in Active Distribution Networks", *IEEE Trans. Power Syst.*, c. 34, sy 4, ss. 2957-2969, Tem. 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2898425.
- [18] H. Mehrjerdi ve R. Hemmati, "Wind-hydrogen storage in distribution network expansion planning considering investment deferral and uncertainty", *Sustain. Energy Technol. Assess.*, c. 39, s. 100687, Haz. 2020, doi: 10.1016/j.seta.2020.100687.
- [19] P. Rajesh, C. Naveen, A. K. Venkatesan, ve F. H. Shajin, "An optimization technique for battery energy storage with wind turbine generator integration in unbalanced radial distribution network", *J. Energy Storage*, c. 43, s. 103160, Kas. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.103160.
- [20] H. Mehrjerdi ve R. Hemmati, "Modeling and optimal scheduling of battery energy storage systems in electric power distribution networks", *J. Clean. Prod.*, c. 234, ss. 810-821, Eki. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.06.195.
- [21] A. A. A. El-Ela, R. A. El-Seheimy, A. M. Shaheen, W. A. Wahbi, ve M. T. Mouwafi, "PV and battery energy storage integration in distribution networks using equilibrium algorithm", *J. Energy Storage*, c. 42, s. 103041, Eki. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.103041.
- [22] R. A. Thokar, N. Gupta, K. R. Niazi, A. Swarnkar, ve N. K. Meena, "Multiobjective nested optimization framework for simultaneous integration of multiple photovoltaic and battery energy storage systems in distribution networks", *J. Energy Storage*, c. 35, s. 102263, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102263.

- [23] Z. Yuan, W. Wang, H. Wang, ve A. Yildizbasi, "A new methodology for optimal location and sizing of battery energy storage system in distribution networks for loss reduction", *J. Energy Storage*, c. 29, s. 101368, Haz. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101368.
- [24] G. Pan, W. Gu, Y. Lu, H. Qiu, S. Lu, ve S. Yao, "Optimal Planning for Electricity-Hydrogen Integrated Energy System Considering Power to Hydrogen and Heat and Seasonal Storage", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, c. 11, sy 4, ss. 2662-2676, Eki. 2020, doi: 10.1109/TSTE.2020.2970078.
- [25] S. A. Bozorgavari, J. Aghaei, S. Pirouzi, A. Nikoobakht, H. Farahmand, ve M. Korpås, "Robust planning of distributed battery energy storage systems in flexible smart distribution networks: A comprehensive study", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, c. 123, s. 109739, May. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109739.
- [26] A. Huang, H. Bai, X. Zhang, Q. Cheng, Z. Lin, ve T. Xia, "Hybrid Energy Storage System Planning Method of DC Distribution Network Based on Energy Storage Battery and Super Capacitor", içinde *2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia)*, Tem. 2020, ss. 369-374. doi: 10.1109/ICPSAsia48933.2020.9208512.
- [27] T. Tewari, A. Mohapatra, ve S. Anand, "Coordinated Control of OLTC and Energy Storage for Voltage Regulation in Distribution Network With High PV Penetration", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, c. 12, sy 1, ss. 262-272, Oca. 2021, doi: 10.1109/TSTE.2020.2991017.
- [28] A. Ehsan ve Q. Yang, "Coordinated Investment Planning of Distributed Multi-Type Stochastic Generation and Battery Storage in Active Distribution Networks", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, c. 10, sy 4, ss. 1813-1822, Eki. 2019, doi: 10.1109/TSTE.2018.2873370.
- [29] M. Sedghi, A. Ahmadian, ve M. Aliakbar-Golkar, "Optimal Storage Planning in Active Distribution Network Considering Uncertainty of Wind Power Distributed Generation", *IEEE Trans. Power Syst.*, c. 31, sy 1, ss. 304-316, Oca. 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2404533.
- [30] J. D. Watson, N. R. Watson, ve I. Lestas, "Optimized Dispatch of Energy Storage Systems in Unbalanced Distribution Networks", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, c. 9, sy 2, ss. 639-650, Nis. 2018, doi: 10.1109/TSTE.2017.2752964.
- [31] C. K. Das, O. Bass, G. Kothapalli, T. S. Mahmoud, ve D. Habibi, "Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, c. 91, ss. 1205-1230, Ağu. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.068.
- [32] X. Su vd., "Sequential and Comprehensive BESSs Placement in Unbalanced Active Distribution Networks Considering the Impacts of BESS Dual Attributes on Sensitivity", *IEEE Trans. Power Syst.*, c. 36, sy 4, ss. 3453-3464, Tem. 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3051629.
- [33] M. Zidar, P. S. Georgilakis, N. D. Hatziaargyriou, T. Capuder, ve D. Škrlec, "Review of energy storage allocation in power distribution networks: applications, methods and future research", *IET Gener. Transm. Distrib.*, c. 10, sy 3, ss. 645-652, Şub. 2016, doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0447.

- [34] Y. Wang, K. T. Tan, X. Y. Peng, ve P. L. So, “Coordinated Control of Distributed Energy-Storage Systems for Voltage Regulation in Distribution Networks”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, c. 31, sy 3, ss. 1132-1141, Haz. 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2462723.
- [35] N. Jayasekara, M. A. S. Masoum, ve P. J. Wolfs, “Optimal Operation of Distributed Energy Storage Systems to Improve Distribution Network Load and Generation Hosting Capability”, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, c. 7, sy 1, ss. 250-261, Oca. 2016, doi: 10.1109/TSTE.2015.2487360.
- [36] M. Nick, R. Cherkaoui, ve M. Paolone, “Optimal Planning of Distributed Energy Storage Systems in Active Distribution Networks Embedding Grid Reconfiguration”, *IEEE Trans. Power Syst.*, c. 33, sy 2, ss. 1577-1590, Mar. 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2734942.
- [37] K. Khalid Mehmood, S. U. Khan, S.-J. Lee, Z. M. Haider, M. K. Rafique, ve C.-H. Kim, “Optimal sizing and allocation of battery energy storage systems with wind and solar power DGs in a distribution network for voltage regulation considering the lifespan of batteries”, *IET Renew. Power Gener.*, c. 11, sy 10, ss. 1305-1315, 2017, doi: 10.1049/iet-rpg.2016.0938.
- [38] A. Azizivahed, E. Naderi, H. Narimani, M. Fathi, ve M. R. Narimani, “A New Bi-Objective Approach to Energy Management in Distribution Networks with Energy Storage Systems”, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, c. 9, sy 1, ss. 56-64, Oca. 2018, doi: 10.1109/TSTE.2017.2714644.
- [39] P. Singh ve S. K. Bishnoi, “Modified moth-Flame optimization for strategic integration of fuel cell in renewable active distribution network”, *Electr. Power Syst. Res.*, c. 197, s. 107323, Ağu. 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107323.
- [40] H. Khani, N. A. El-Taweel, ve H. E. Z. Farag, “Supervisory Scheduling of Storage-Based Hydrogen Fueling Stations for Transportation Sector and Distributed Operating Reserve in Electricity Markets”, *IEEE Trans. Ind. Inform.*, c. 16, sy 3, ss. 1529-1538, Mar. 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2926779.
- [41] Y. Tao, J. Qiu, S. Lai, X. Zhang, ve G. Wang, “Collaborative Planning for Electricity Distribution Network and Transportation System Considering Hydrogen Fuel Cell Vehicles”, *IEEE Trans. Transp. Electrification*, c. 6, sy 3, ss. 1211-1225, Eyl. 2020, doi: 10.1109/TTE.2020.2996755.
- [42] L. Li, H. Manier, ve M.-A. Manier, “Hydrogen supply chain network design: An optimization-oriented review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, c. 103, ss. 342-360, Nis. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.12.060.
- [43] Y. Xiao, X. Wang, P. Pinson, ve X. Wang, “A Local Energy Market for Electricity and Hydrogen”, *IEEE Trans. Power Syst.*, c. 33, sy 4, ss. 3898-3908, Tem. 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2779540.
- [44] Y. Teng, Z. Wang, Y. Li, Q. Ma, Q. Hui, ve S. Li, “Multi-energy storage system model based on electricity heat and hydrogen coordinated optimization for power grid flexibility”, *CSEE J. Power Energy Syst.*, c. 5, sy 2, ss. 266-274, Haz. 2019, doi: 10.17775/CSEEJPES.2019.00190.

- [45] D. Razmi, T. Lu, B. Papari, E. Akbari, G. Fathi, ve M. Ghadamyari, “An Overview on Power Quality Issues and Control Strategies for Distribution Networks With the Presence of Distributed Generation Resources”, *IEEE Access*, c. 11, ss. 10308-10325, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3238685.
- [46] A. K. Erenoğlu ve O. Erdinç, “Real-Time Allocation of Multi-Mobile Resources in Integrated Distribution and Transportation Systems for Resilient Electrical Grid”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, c. 38, sy 2, ss. 1108-1119, Nis. 2023, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3206272.
- [47] N. Pompern, S. Premrudeepreechacharn, A. Siritaratiwat, ve S. Khunkitti, “Optimal Placement and Capacity of Battery Energy Storage System in Distribution Networks Integrated With PV and EVs Using Metaheuristic Algorithms”, *IEEE Access*, c. 11, ss. 68379-68394, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3291590.
- [48] L. Argiolas, M. Stecca, L. M. Ramirez-Elizondo, T. B. Soeiro, ve P. Bauer, “Optimal Battery Energy Storage Dispatch in Energy and Frequency Regulation Markets While Peak Shaving an EV Fast Charging Station”, *IEEE Open Access J. Power Energy*, c. 9, ss. 374-385, 2022, doi: 10.1109/OAJPE.2022.3198553.
- [49] O. S. Nduka vd., “Field Trial of Coordinated Control of PV and Energy Storage Units and Analysis of Power Quality Measurements”, *IEEE Access*, c. 8, ss. 1962-1974, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2961134.
- [50] P. Yu, C. Wan, Y. Song, ve Y. Jiang, “Distributed Control of Multi-Energy Storage Systems for Voltage Regulation in Distribution Networks: A Back-and-Forth Communication Framework”, *IEEE Trans. Smart Grid*, c. 12, sy 3, ss. 1964-1977, May. 2021, doi: 10.1109/TSG.2020.3026930.
- [51] V. Vahidinasab vd., “Overview of Electric Energy Distribution Networks Expansion Planning”, *IEEE Access*, c. 8, ss. 34750-34769, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2973455.
- [52] R. H. Byrne, T. A. Nguyen, D. A. Copp, B. R. Chalamala, ve I. Gyuk, “Energy Management and Optimization Methods for Grid Energy Storage Systems”, *IEEE Access*, c. 6, ss. 13231-13260, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2741578.
- [53] X. Zhou, E. Dall’Anese, ve L. Chen, “Online Stochastic Optimization of Networked Distributed Energy Resources”, *IEEE Trans. Autom. Control*, c. 65, sy 6, ss. 2387-2401, Haz. 2020, doi: 10.1109/TAC.2019.2927925.
- [54] F. Liu, C. Chen, C. Lin, G. Li, H. Xie, ve Z. Bie, “Utilizing Aggregated Distributed Renewable Energy Sources With Control Coordination for Resilient Distribution System Restoration”, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, c. 14, sy 2, ss. 1043-1056, Nis. 2023, doi: 10.1109/TSTE.2023.3242357.
- [55] M. J. E. Alam, K. M. Muttaqi, ve D. Sutanto, “Battery Energy Storage to Mitigate Rapid Voltage/Power Fluctuations in Power Grids Due to Fast Variations of Solar/Wind Outputs”, *IEEE Access*, c. 9, ss. 12191-12202, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3051283.
- [56] S. Sommerville, G. A. Taylor, ve M. Abbod, “Voltage Fluctuations of Battery Storage Systems Providing Fast Frequency Response Services in the UK”,

içinde 2022 57th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Ağu. 2022, ss. 1-6. doi: 10.1109/UPEC55022.2022.9917929.

- [57] J. Lopez-Lorente, X. A. Liu, R. J. Best, G. Makrides, ve D. J. Morrow, “Techno-Economic Assessment of Grid-Level Battery Energy Storage Supporting Distributed Photovoltaic Power”, *IEEE Access*, c. 9, ss. 146256-146280, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3119436.
- [58] L. Tong, S. Zhao, H. Jiang, J. Zhou, ve B. Xu, “Multi-Scenario and Multi-Objective Collaborative Optimization of Distribution Network Considering Electric Vehicles and Mobile Energy Storage Systems”, *IEEE Access*, c. 9, ss. 55690-55697, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3026204.
- [59] A. Muqbel, A. T. Al-Awami, ve M. Parvania, “Optimal Planning of Distributed Battery Energy Storage Systems in Unbalanced Distribution Networks”, *IEEE Syst. J.*, c. 16, sy 1, ss. 1194-1205, Mar. 2022, doi: 10.1109/JSYST.2021.3099439.
- [60] P. M. de Quevedo, G. Muñoz-Delgado, ve J. Contreras, “Impact of Electric Vehicles on the Expansion Planning of Distribution Systems Considering Renewable Energy, Storage, and Charging Stations”, *IEEE Trans. Smart Grid*, c. 10, sy 1, ss. 794-804, Oca. 2019, doi: 10.1109/TSG.2017.2752303.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. H.Yildiz, T.Gokcek, O.Erdinc, Y.Ates, “Batarya Tabanlı Enerji Depolama Sistemlerinin Dağıtım Şebekesinde Kullanımına Yönelik Genel Bir Bakış,” 5. Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Multidisipliner Yaklaşımlar Kongresi, İstanbul, 2023

