T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEMİLER İÇİN YENİ BİR ELEKTRİK ENERJİSİ YÖNETİM SİSTEMİNİN AKILLI ŞEBEKE ALTYAPISINA UYGUN OLARAK GELİŞTİRİLMESİ

Kenan YİĞİT

DOKTORA TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Bora ACARKAN

Temmuz, 2019

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEMİLER İÇİN YENİ BİR ELEKTRİK ENERJİSİ YÖNETİM SİSTEMİNİN AKILLI ŞEBEKE ALTYAPISINA UYGUN OLARAK GELİŞTİRİLMESİ

Kenan YİĞİT tarafından hazırlanan tez çalışması 23.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Bora ACARKAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Bora ACARKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Selim AY, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Osman KILIÇ, Üye
Marmara Üniversitesi _____

Prof. Dr. İbrahim ŞENOL, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Nazmi EKREN, Üye
Marmara Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Bora ACARKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Gemiler İçin Yeni Bir Elektrik Enerjisi Yönetim Sisteminin Akıllı Şebeke Altyapısına Uygun Olarak 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

Kenan YİĞİT

İmza

Elektrik zabitlerine

TEŞEKKÜR

Doktora Tezi çalışmasında gemi ve elektrik sistemleri ile ilgili her türlü konuda destek veren Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği ve Elektrik Mühendisliği Bölümü'nün değerli akademisyenlerine; gemi sistemleri konusunda araştırma imkânı sunan ve teknik destek sağlayan "İnce Denizcilik A.Ş." firmasının başta yönetim kurulu olmak üzere tüm personeline; her zaman desteğini hissettiğim danışman hocam Sayın Bora ACARKAN'a ve maddi-manevi her daim yanımda olan tüm sevdiklerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kenan YİĞİT

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ **vii**

KISALTMA LİSTESİ **ix**

ŞEKİL LİSTESİ **xii**

TABLO LİSTESİ **xiv**

ÖZET **xv**

ABSTRACT **xvii**

1 Giriş **1**

1.1 Literatür Özeti 1

1.2 Tezin Amacı 6

1.3 Hipotez 7

2 Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Sistemi Temel Bileşenleri **9**

2.1 Gemi Elektrik, Elektronik ve Güç Sistemi 9

2.2 Yenilenebilir Enerji Sistemleri 13

2.2.1 Fotovoltaik Enerji Sistemi 13

2.2.2 Rüzgâr Türbini Enerji Sistemi 18

2.3 Enerji Depolama Sistemleri 22

2.3.1 Mekanik Enerji Depolama Sistemleri 23

2.3.2 Termal Enerji Depolama Sistemleri 24

2.3.3 Termokimyasal Enerji Depolama Sistemleri 25

2.3.4 Kimyasal Enerji Depolama Sistemleri 25

2.3.5 Elektrik Enerjisi Depolama Sistemleri 26

2.3.6 Elektrokimyasal Enerji Depolama Sistemleri 27

2.4 Kıyıdan Enerji Temini Sistemi 32
2.5 Akıllı Şebeke Sistemi 34
2.5.1 Akıllı Şebeke Mimarisi 35
2.5.2 Akıllı Şebeke Bilgi ve İletişim Mimarisi 38
2.5.3 Akıllı Şebeke Güvenlik Mimarisi 44
2.5.4 Akıllı Şebeke Enerji Ölçümü, Kontrolü ve Yönetimi Mimarisi . . . 44
2.5.5 Akıllı Şebeke Enerji Piyasası Mimarisi 47
2.5.6 Akıllı Şebeke Üretim, İletim ve Dağıtım Mimarisi 47

3 Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Sistemi 50
3.1 Gemi, Liman ve Akıllı Şebeke Bağlantısı 50
3.2 Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Algoritması 54
3.2.1 Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Algoritması I 54
3.2.2 Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Algoritması II 60
3.3 Gemi Enerji Yönetim Sistemi Modeli Maliyet Analizi 64

4 Veri Analizi ve Yöntem 66

5 Benzetim Çalışması 74
5.1 Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Algoritması I İçin Araştırma Bulguları 76
5.2 Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Algoritması II İçin Araştırma Bulguları 89

6 Sonuç ve Öneriler 97

Kaynakça 101

Tezden Üretilmiş Yayınlar 112

SİMGE LİSTESİ

A_{FV}	FV panel alanı, m^2
A_{RT}	RT sisteminin rotor süpürme alanı, m^2
C_P	RT sisteminin güç katsayısı
D	RT sisteminin rotor kanatlarının maksimum genişliği, m
$E_{DJ,ET}$	Emisyon tipine göre DJ'den kaynaklı emisyon salımı, ton
$E_{KET,ET}$	Emisyon tipine göre ulusal şebekeden kaynaklı emisyon salımı, ton
$EF_{DJ,ET}$	Emisyon tipine göre DJ'den kaynaklı emisyon faktörünün kWh değeri, g/kWh
$EF_{KET,ET}$	Emisyon tipine göre ulusal şebekeden kaynaklı emisyon faktörünün kWh değeri, g/kWh
EM_{DJ}	DJ'de üretilen kWh cinsinden birim elektrik enerjisinin maliyeti, TL/kWh
$EM_{Yakıt.Ton}$	Ton başına deniz yakıtı fiyatı, TL/ton
EM_{KET}	Ulusal şebekeden alınan kWh cinsinden birim elektrik enerjisinin maliyeti, TL/kWh
H	RT sisteminin rotor kanatlarının dikey maksimum yüksekliği, m
$I_{Güneş}$	Güneş ışınım şiddeti, W/m^2
$M_{DJ,Yakıt}$	DJ yakıt maliyeti, TL
$M_{KET,Enerji}$	KET sistemi ile sağlanan elektrik enerjisinin maliyeti, TL
$ÖYS$	Özgül yakıt sarfiyatı, g/kWh
P_{DJ}	DJ güç tüketimi, W
P_{EDS}	EDS güç kapasitesi, W
$P_{EDS,i}$	EDS'nin ilk andaki güç kapasitesi, W
P_{FV}	FV enerji sistemi çıkış gücü, W

P_{KET}	KET sistemi güç kapasitesi, W
P_{RT}	RT enerji sistemi çıkış gücü, W
P_{YEK}	YEK sistemi çıkış gücü, W
$P_{YÜK}$	Gemide ihtiyaç duyulan güç kapasitesi, W
R	RT sisteminin rotor çapı, m
SoC_{max}	Maksimum şarj seviyesi, %
SoC_{min}	Minimum şarj seviyesi, %
t	Birim zaman, saat
$V_{Rüzgâr}$	Rüzgâr hızı, m/s
YT	DJ yakıt tüketimi, ton
δ	FV panel ile güneş ışınımı arasındaki açı, (°) derece
Ø	Elektrik enerjisi besleme hattı faz sembolü
μ_{FV}	FV enerji sisteminin verimi, %
ρ	Hava yoğunluğu, kg/m^3

KISALTMA LİSTESİ

AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AC	Alternating Current
	Alternatif Akım
BAN	Building Area Network
	Bina Alan Ağı
CO_2	Karbon Dioksit
DC	Direct Current
	Doğru Akım
DJ	Dizel Jeneratör
DSL	Digital Subscriber Line
	Sayısal Abone Hattı
DWT	Dead Weight Tonnage
	Geminin Yük Taşıma Kapasitesi
ECAs	Emission Control Areas
	Emisyon Kontrol Alanları
EDS	Enerji Depolama Sistemi
EEDI	Energy Efficiency Design Index
	Enerji Verimliliği Tasarım Endeksi
EEOI	Energy Efficiency Operational Indicator
	Enerji Verimliliği Operasyonel Göstergesi
EURO	Avrupa Para Birimi
FV	Fotovoltaik Enerji

GEEYA	Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Algoritması
HAN	Home Area Network
	Ev Alan Ağı
IAN	Industrial Area Network
	Endüstriyel Alan Ağı
IFO	Intermediate Fuel Oil
	Hafif Fuel Oil
IMO	International Maritime Organization
	Uluslararası Denizcilik Örgütü
KET	Kıyıdan Enerji Temini
MARPOL	International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
	Denizlerin Gemilerden Kirlenmesini Önleme Uluslararası Sözleşmesi
MBWA	Mobile Broadband Wireless Access
	Mobil Genişbant Kablosuz Erişimi
MEPC	Marine Environment Protection Committee
	Deniz Çevresini Koruma Komitesi
MDO	Marine Diesel Oil
	Deniz Dizel Yağı
MGNİ	Maksimum Güç Noktası İzleme
MGO	Marine Gas Oil
	Deniz Gaz Yağı
NAN	Neighbourhood Area Network
	Semt Alan Ağları
NIST	National Institute of Standards and Technology
	Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü
NO_x	Nitrojen Oksit Türevleri

PLC	Power Line Communication
	Enerji Hattı Üzerinden İletişim
PM	Particulate Matter
	Partikül Madde
RT	Rüzgâr Türbini
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
	Merkezi Denetleme, Kontrol ve Veri Toplama
SEEMP	Ship Energy Efficiency Management Plan
	Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı
SO_x	Sülfür Oksit Türevleri
SO_2	Sülfür Dioksit
SoC	State of Charge
	Şarj Seviyesi
TL	Türk Lirası
USD	United States Dollar
	ABD Doları
WAN	Wide Area Network
	Geniş Alan Ağı
WiFi	Wireless Fidelity
	Kablosuz Bağlantı Alanı
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
	Mikrodalga Erişimi İçin Evrensel Uyumluluk
WMN	Wireless Mesh Network
	Kablosuz Örgü Ağlar
YEK	Yenilenebilir Enerji Kaynakları

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Gemi ana tablosunda bulunan üniteler 10
Şekil 2.2 Gemi güç sistemi tek hat şeması 12
Şekil 2.3 Fotovoltaik enerji sistem bileşenleri 14
Şekil 2.4 Fotovoltaik hücre tipleri 15
Şekil 2.5 Rüzgâr türbini sistem bileşenleri 20
Şekil 2.6 Rüzgâr türbini çeşitleri 21
Şekil 2.7 Enerji depolama sistemi çeşitleri 23
Şekil 2.8 KET sistemi mimarisi 33
Şekil 2.9 Akıllı şebeke mimarisi temel bileşenleri 37
Şekil 2.10 Akıllı şebeke haberleşme ağı mimarisi 39
Şekil 2.11 Akıllı şebeke iletişim teknolojileri 40
Şekil 2.12 Akıllı şebeke enerji ölçümü, kontrolü ve yönetimi mimarisi 45
Şekil 2.13 Geleneksel şebeke üretim, iletim ve dağıtım mimarisi 47
Şekil 2.14 Akıllı şebeke üretim, iletim ve dağıtım mimarisi 48
Şekil 3.1 Gemi elektrik enerjisi yönetim sistemi modeli 50
Şekil 3.2 Gemi ve liman tarafı enerji yönetim birimlerinin bağlantı şeması 51
Şekil 3.3 Gemi güç sistemi kontrol ve anahtarlama sistemi 52
Şekil 3.4 Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Algoritması I için akış şeması 55
Şekil 3.5 Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Algoritması II için akış şeması 60
Şekil 4.1 M/V İnce Hamburg gemisi 67
Şekil 4.2 M/V Auriga Leader gemisi fotovoltaik enerji uygulaması 70
Şekil 4.3 M/S Stena Jutlandica gemisi rüzgâr türbini uygulaması 71
Şekil 5.1 Gemi güç ihtiyacı, YEK ve EDS kapasitesi 75
Şekil 5.2 GEEYA I'de Senaryo I ve Senaryo II: Ekonomik öncelik için gerçekleşen elektrik enerjisi maliyeti 77
Şekil 5.3 GEEYA I'de Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (CO_2) öncelik için gerçekleşen elektrik enerjisi maliyeti 78
Şekil 5.4 GEEYA I'de Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (NO_x) öncelik için gerçekleşen elektrik enerjisi maliyeti 79
Şekil 5.5 GEEYA I'de Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (SO_2) öncelik için gerçekleşen elektrik enerjisi maliyeti 80
Şekil 5.6 GEEYA I'de Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (PM) öncelik için gerçekleşen elektrik enerjisi maliyeti 81

Şekil 5.7 GEEYA I'de Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (CO_2) öncelik için gerçekleşen CO_2 salımı 83

Şekil 5.8 GEEYA I'de Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (NO_x) öncelik için gerçekleşen NO_x salımı 84

Şekil 5.9 GEEYA I'de Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (SO_2) öncelik için gerçekleşen SO_2 salımı 85

Şekil 5.10 GEEYA I'de Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (PM) öncelik için gerçekleşen PM salımı 86

Şekil 5.11 GEEYA II'de Senaryo I, II, III ve IV için gerçekleşen elektrik enerjisi maliyeti 90

Şekil 5.12 GEEYA II'de Senaryo V için gerçekleşen elektrik enerjisi maliyeti 90

Şekil 5.13 GEEYA II'de Senaryo I, II, III, IV ve V için gerçekleşen CO_2 salımı 92

Şekil 5.14 GEEYA II'de Senaryo I, II, III, IV ve V için gerçekleşen NO_x salımı 93

Şekil 5.15 GEEYA II'de Senaryo I, II, III, IV ve V için gerçekleşen SO_2 salımı 94

Şekil 5.16 GEEYA II'de Senaryo I, II, III, IV ve V için gerçekleşen PM salımı 95

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Enerji depolama sistemlerinin teknik özellikleri 30

Tablo 2.2 Enerji depolama sistemlerinin ekonomik özellikleri 31

Tablo 2.3 Geleneksel elektrik şebeke sistemi ile akıllı şebeke sisteminin karşılaştırılması 36

Tablo 3.1 GEEYA I: EDS şarj ve deşarj kontrol algoritması 58

Tablo 3.2 GEEYA I: Enerji kaynağının belirlenmesi ve kullanmasına yönelik karar verme algoritması 59

Tablo 3.3 GEEYA II: EDS şarj ve deşarj kontrol algoritması 62

Tablo 3.4 GEEYA II: Enerji kaynağının belirlenmesi ve kullanmasına yönelik karar verme algoritması 63

Tablo 4.1 Ulusal elektrik şebeke sistemlerine ait birim emisyon salımı değerleri ve elektrik enerjisi maliyetleri 73

Tablo 5.1 GEEYA I için Senaryo I yerine Senaryo II'de belirtilen öncelik kriterlerinin kullanılması durumunda toplam elektrik enerjisi maliyetindeki değişimin yüzdesi 82

Tablo 5.2 GEEYA I için Senaryo I yerine Senaryo II'de belirtilen öncelik kriterlerinin kullanılması durumunda toplam emisyon salımındaki değişimin yüzdesi 87

Tablo 5.3 GEEYA I için hem ekonomik hem de çevresel önceliğin gerçekleşme olasılığı 88

Tablo 5.4 GEEYA II için gemide farklı yakıt tiplerinin kullanılması yerine KET sisteminin kullanılması durumunda toplam elektrik enerjisi maliyetindeki ve emisyon salımındaki değişimin yüzdesi 96

ÖZET

Gemiler İçin Yeni Bir Elektrik Enerjisi Yönetim Sisteminin Akıllı Şebeke Altyapısına Uygun Olarak Geliştirilmesi

Kenan YİĞİT

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Bora ACARKAN

Denizcilik sektörü temsilcileri uluslararası sözleşmelerin karşılanması, enerji maliyetlerinin azaltılması ve çevresel problemlerin en aza indirgenmesi için gemilerde alternatif enerji kaynaklarının kullanımına yönelik çalışmalar yapmaktadırlar. Bu çalışmalar daha ekonomik ve daha temiz enerji kaynaklarının kullanılabileceği yeni nesil gemi ve yeşil liman kavramları için önemli bir adımdır.

Geleceğin elektrik şebekesi olarak isimlendirilen "Akıllı Şebeke" sistemi ise gemi, liman ve şehir etkileşimi için yüksek bir öneme sahiptir. Özellikle gemiler, limanda iken akıllı şebeke altyapısını kullanarak ulusal elektrik şebekesine daha etkin bir şekilde bağlanabilecek ve ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisini daha verimli bir şekilde temin edebilecektir.

Gemilerin alternatif enerji kaynaklarını etkin bir şekilde kullanabilmesi ve akıllı şebeke sistemi ile uyumlu bir şekilde çalışabilmesi için ise bir enerji yönetim sistemine sahip olması gerekmektedir.

Tez çalışmasında, alternatif enerji kaynaklarına ve akıllı şebeke altyapısına sahip gemiler için yeni bir "Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Sistemi" önerilmiştir. Ayrıca, önerilen sistem için iki farklı "Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Algoritması" geliştirilmiştir. Gemi elektrik enerjisi yönetim sistemi için geliştirilen algoritmalar MATLAB programı ile test edilmiştir. Gemi için ihtiyaç duyulan veriler "M/V İnce Hamburg" isimli yük gemisinde çeşitli ölçüm ve analizler yapılarak elde edilmiştir. Liman ve ulusal elektrik şebekesi için ihtiyaç duyulan veriler ise literatürden temin edilmiştir. Çalışmada, farklı bölgelerde yer alan Amerika Birleşik Devletleri, Almanya, Türkiye Cumhuriyeti, Çin Halk Cumhuriyeti ve Avustralya limanları dikkate alınmıştır. Önerilen sistemin enerji tasarruf potansiyelini belirlemek için benzetim çalışması yapılmıştır. Benzetim çalışmasında, önerilen sistem enerji maliyetleri ve CO_2, NO_x, SO_2, PM emisyon salımları açısından geleneksel gemi sistemi ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca enerji yönetim sistemi bileşenlerinin kuruluş maliyetleri dikkate alınarak sistemin ekonomik analizi yapılmıştır.

Bu çalışma ile geminin limanda iken gemi personelinin belirlediği kriterler çerçevesinde gemi için en uygun enerji kaynağının seçilebilmesi ve devreye alınabilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, gemilerin akıllı şebeke kavramında elektrikli taşıtlar ve akıllı evler gibi ayrı bir çalışma konusu olarak literatürdeki yerini alması amaçlanmıştır.

Sonuç olarak önerilen elektrik enerjisi yönetim sisteminin gemi sahiplerine finansal ve çevresel açıdan önemli faydalar sağlayacağı görülmektedir. Bu sistemin yeni nesil gemi ve liman tasarımları için örnek bir model olacağı öngörülmektedir. Çalışmanın, denizcilik sektörünün sürdürülebilirliğine ve gelişimine katkı sunması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Gemi, elektrik enerjisi, alternatif enerji kaynakları, enerji yönetimi, akıllı şebeke

ABSTRACT

Development of a New Electrical Energy Management System for the Ships In Accordance With the Smart Grid Infrastructure

Kenan YİĞİT

Department of Electrical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. Bora ACARKAN

The representatives of maritime sector study on the use of alternative energy sources on the ships to meet international regulations, reduce energy costs, and minimize environmental problems. These studies are an important step for the concepts of next-generation ship and green port which can be used more economic and cleaner energy sources.

The "Smart Grid", which is called as next-generation electricity grid system, has also a high importance for the ship, port and city interactions. Especially, when the ships are at the port, they will be able to connect to the national electricity grid more effectively and provide the electrical energy needs more efficiently using the smart grid infrastructure.

The ships need to have an energy management system in order to be able to use alternative energy sources effectively and work in harmony with the smart grid system.

In the thesis study, a new "Ship Electrical Energy Management System" has been proposed for the ships having alternative energy sources and smart grid infrastructure. Also, two different “Ship Electrical Energy Management Algorithm" have been developed to the proposed system. The algorithms, which were developed for the ship electrical energy management system, have been tested with MATLAB program. The data needed for the ship have been acquired by performing various measurements and analysis on the bulk carrier ship named “M/V Ince Hamburg”. The data needed for the port and the national electricity grid have also been obtained from the literature. In the study, the ports of the United States of America, Germany, Turkey, China and Australia located in the different regions have been taken into account. The case study has been carried out to determine the energy saving potential of the proposed system. In the case study, the proposed system has been compared with the conventional ship system in terms of the energy costs and CO_2, NO_x, SO_2, PM emissions. Also, the economic analysis of the system has been made considering the installation costs of the components of the energy management system.

With this study, it is aimed to select and run the most suitable energy source for the ship within the framework of the determined criteria by the ship personnel when the ship is at port. Also, it has been aimed that ships take their place in the literature as a separate study area in the smart grid concept such as electric vehicles and smart homes.

As a result, it is seen that the proposed electrical energy management system will provide significant financial and environmental benefits to the ship owners. It is expected that this system is a reference model for the new generation ship and port designs. It is expected that this study contributes to the sustainability and development of the maritime sector.

Keywords: Ship, electrical energy, alternative energy sources, energy management, smart grid

1
Giriş

1.1 Literatür Özeti

Dünya taşımacılığının yaklaşık %80'i denizyolu ile gerçekleşmektedir. İstatistiklere göre karayolu, havayolu, demiryolu ve denizyolu taşımacılığının tümü küresel enerji tüketiminin %20'sini ve emisyon salımının %24'ünü oluşturmaktadır [1],[2]. Taşımacılık sektöründe harcanan toplam enerjinin yaklaşık %4'ü ise denizyolu taşımacılığında kullanılmaktadır [3]. Dahası, dünya genelindeki Karbon Dioksit (CO_2) salımının %3'ü, Nitrojen Oksit (NO_x) salımının %15'i ve Sülfür Oksit (SO_x) türevlerinden Sülfür Dioksit (SO_2) salımının %6'sı gemilerden kaynaklanmaktadır [4]. Ayrıca, dünya denizcilik filosunun %55'i limanlarda, %25'i kıyı bölgelerine yakın ve %20'si ise açık denizlerde bulunmaktadır [5]. Bu durum, gemilerden kaynaklı emisyon salımının yaklaşık %70'inin kıyı bölgelerinde ve özellikle limanlarda gerçekleştiğini göstermektedir [6]. İstatiksel veriler dikkate alındığında, denizyolu taşımacılığının enerji sektöründe önemli bir paya sahip olduğu ve çevre kirliliği problemlerine sebep olabileceği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, küresel anlamda enerji tüketimini azaltmak için gemilerde enerji verimliliği konusu kritik önem arz etmektedir.

Birleşmiş Milletlere bağlı ve denizcilik sektörün üst kurumu olarak tanımlanan Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO), gemilerde enerji verimliliğinin sağlanması açısından önemli rol oynamaktadır. IMO temiz denizlerde emniyetli, güvenli ve verimli denizcilik söyleminden yola çıkarak kazaların önlenmesi, çevre kirliliğinin en aza indirilmesi ve üst düzeyde enerji verimliliğinin sağlanması için uluslararası düzenlemeler yapmakta ve tavsiye kararları almaktadır. IMO'nun gemi kaynaklı deniz kirliliğinin önlenmesi için kurduğu Deniz Çevresini Koruma Komitesi (MEPC), 13-17 Temmuz 2009 tarihli "MEPC.1/Circ.684" sirkülerinde mevcut gemilerde operasyonel verimliliğin ölçülmesi için Enerji Verimliliği Operasyonel Göstergesi (EEOI) uygulamasını gönüllük esasına dayanarak tavsiye etmiştir [7].

MEPC'nin 11-15 Temmuz 2011 tarihlerinde düzenlediği 62. toplantısında ise gemilerde sera gazlarının azaltılmasına yönelik bazı düzenlemeler Denizlerin Gemilerden Kirlenmesini Önleme Uluslararası Sözleşmesi'ne (MARPOL) eklenmiştir. Bu kapsamda, yeni inşa edilen gemilerde CO_2 salımını azaltmak için Enerji Verimliliği Tasarım Endeksi (EEDI) ve tüm gemilerde operasyonel verimliliği sağlamak için Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı (SEEMP) 1 Ocak 2013 tarihi itibarı ile zorunlu hale gelmiştir [8]. 1997 yılı protokolü ile "MARPOL 73/78 Sözleşmesi"ne eklenen ve 19 Mayıs 2005 tarihinde yürürlüğe giren "Ek VI - Gemilerden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Önlenmesi İçin Kurallar" ile gemilerin egzoz gazı emisyonlarının sınırlandırılmasına yönelik düzenlemeler yapılmıştır. Bu ekte, özellikle NO_x ve SO_x emisyonları ile ilgili getirilen sınırlamalar dikkat çekmektedir. "MARPOL Ek VI, Kural 13" kapsamında, 01 Ocak 2000 tarihi itibarı ile inşa edilen veya büyük tadilata giren çıkış gücü 130 kW'ın üzerinde dizel makineye sahip gemiler için gemi inşa yılına bağlı olarak NO_x emisyonu değerlerine sınırlamalar getirilmiştir. "MARPOL Ek VI, Kural 14" kapsamında ise 01 Ocak 2020 tarihine kadar gemilerde kullanılan yakıtın SO_x içeriğinin maksimum %3,50 olacağı belirtilmiştir. Bu tarihten sonra ise deniz yakıtlarındaki sülfür limitlerinin en fazla %0,50 olacak şekilde sınırlandırılması kararlaştırılmıştır. Ayrıca, "MARPOL Ek VI" kapsamında hava kirliliğini azaltmak ve insan sağlığı üzerindeki etkileri en aza indirmek için gemi kaynaklı NO_x, SO_x ve Partikül Madde (PM) emisyon limitlerinin daha sıkı bir şekilde sınırlandırıldığı Emisyon Kontrol Alanları (ECAs) oluşturulmuştur. ECA bölgesi, Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ve Kanada'nın Pasifik kıyıları, ABD, Kanada, Fransa (Saint Pierre ve Miquelon) ve Meksika Körfezi'nin Atlantik sahilleri, Hawaii Adaları, Maui, Oahu, Molokai, Ni′ihau, Kauai, Lāna′i ve Kaho′olawe kıyıları, Karayip Denizi, Baltık Denizi ve Kuzey Denizi bölgesinde koordinatlarla belirtilmiş alanları kapsamaktadır. ECA bölgesinde bulunan gemilerin yakıtlarındaki sülfür oranının %0,10'u geçemeyeceği kararlaştırılmıştır [9]. Avrupa Birliği (AB) Deniz Yakıtlarının Sülfür İçeriği Yönetmeliği ile de AB limanlarında 01 Ocak 2010 tarihi itibarı ile 2 saatten daha fazla kalan gemilerin sülfür oranı %0,10'u geçmeyen deniz yakıtını kullanması ya da Kıyıdan Enerji Temini (KET) sistemi ile limandaki enerji ihtiyacını karşılaması kararlaştırılmıştır [10].

Denizcilik sektörü temsilcileri uluslararası düzenlemeleri karşılamak ve gemilerde enerji tasarruf potansiyellerini açığa çıkarmak için alternatif çözümlere yönelmişlerdir. Araştırmacılar uluslararası kuralların sağlanması, gemilerde egzoz gazı emisyonlarının en aza indirgenmesi, yakıt tüketiminin ve yakıt maliyetlerinin azaltılması için Fotovoltaik Enerji (FV) ve Rüzgâr Türbini (RT) gibi Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK) ile Enerji Depolama Sistemi (EDS) ve KET gibi alternatif enerji kaynakları konularında çalışmalar yapmışlardır.

Hua vd., gemilerde Dizel Jeneratör (DJ) kullanımına alternatif olarak farklı enerji kaynaklarının kullanılma potansiyelini belirlemek amacı ile denizcilik sektörü temsilcilerine yönelik anket çalışması yapmışlardır. Anket sonucuna göre, katılımcıların yaklaşık %70'i FV enerji sistemlerinin, %50'si ise RT sistemlerinin gemilerde kullanılabileceği yönünde görüş bildirmişlerdir [11]. Li vd., gemilerde uygulanan RT sistemleri hakkında bilgiler vererek gemilerde RT kullanım potansiyelini incelemişlerdir [12]. Glykas vd., ticari gemiler için FV/EDS/DJ hibrit enerji sisteminin ekonomik analizini ve uygulama potansiyelini araştırmışlardır [13]. Dedes vd., ticari gemilerde EDS'nin uygulanabilirlik potansiyelini ekonomik ve çevresel açıdan incelemişlerdir [14]. Sulaiman ve Saharuddin, Malezya Terengganu Üniversitesine ait "Discovery IX" isimli dalış teknesinde FV enerji sistemi uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında FV sistemin tasarruf potansiyelini teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir [15]. Babu ve Jain, Hindistan'daki kuruluşlarca desteklenen ve o bölgedeki balıkçı teknelerine uygulanan FV panel projesi üzerine araştırma yapmışlardır. FV enerji sistemlerinin karada olduğu gibi teknelerde de büyük bir uygulama potansiyeline sahip olduğunu belirtmişlerdir [16]. Kobougias vd., gemilerde FV sistem uygulamalarını incelemişlerdir. Ayrıca, farklı tipteki FV sistem uygulamalarının avantaj ve dezavantajlarını ortaya koymuşlardır [17]. Lee vd., Güney Kore'nin Geoje adasında prototip olarak üretilen FV/EDS/DJ hibrit enerjili geminin günlük hayatta kullanımı üzerine araştırmalar yapmışlardır. Hibrit sistemin gemi stabilite testini başarı ile geçtiğini ve yatırımın geri dönüş süresinin yakıt fiyatlarının artması ve FV sistemin kuruluş maliyetinin azalması ile daha da düşeceğini belirtmişlerdir [18]. Yufang vd., fosil yakıt kullanmadan sadece FV ve RT ile gidebilecek ve çeşitli ortamlarda kullanılabilecek gemi tasarımından

bahsetmişlerdir [19]. Alfonsín vd., yeni nesil yelkenli tekneler için model oluşturacak YEK/EDS/DJ hibrit enerjili tekne tasarımı sunmuşlardır [20]. Cristea vd., "N.S. Mircea" isimli eğitim gemisine yerleştirilen FV sistemin gerçek zamanda ve simülasyonla elde edilen performans değerlerini karşılaştırmışlardır [21]. Moustafa ve El-bokl, Nil nehrinde Kahire ve Asvan arasında hizmet veren gemiler için FV sistem uygulamasının finansal ve çevresel analizlerini yapmışlardır [22]. Peng vd., bir gemiye FV enerji sisteminin dâhil edilmesi durumu için simülasyon ve model çalışması yapmışlardır [23].

Gemilerde YEK ve EDS uygulamasının yanı sıra KET sistemi uygulaması da bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Hall, gemiler limanda iken elektrik enerjisi ihtiyacını kendi jeneratörleri yerine ulusal şebekeden karşılaması (KET sistemini kullanması) durumunda gemiden kaynaklı CO_2 emisyonlarının değişimini denizyolu taşımacılığının yoğun olduğu ülkeler için incelemiştir [24]. Tzannatos, AB'nin "2005/33/EU" numaralı direktifinin karşılanması için Yunanistan'ın Pire limanına gelen ve 2 saatten fazla kalan gemilerde sülfür oranı %0,10'dan düşük olan deniz yakıtı veya KET sistemini kullanması durumunda oluşabilecek maliyet potansiyelini incelemişlerdir [25]. Seddik vd., Mısır'ın Safaga limanında "Alkahera" isimli yüksek hızlı teknenin verilerini kullanarak KET sisteminin uygulanabilirliğini incelemiş ve ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir [26]. Adamo vd., İtalya'nın Taranto limanında KET sisteminin uygulanabilirliği ve çevresel analizi üzerine çalışmalar yapmışlardır [27]. Paul vd., KET sisteminin belirlenen standartlar ölçüsünde dizayn aşamalarını incelemişlerdir [28]. Zis vd., limanlarda gemi kaynaklı emisyonları azaltmak için KET sistemini incelemişlerdir [29]. Ballini ve Bozzo, Danimarka'nın Kopenhag şehrinde bulunan yolcu gemisi limanı için KET sisteminin uygulama potansiyelini finansal ve çevresel açıdan analiz etmişlerdir [30]. Sciberras vd., KET sisteminin ulusal şebeke üzerindeki etkilerini incelemişlerdir [31]. Sulligoi vd., KET sisteminin gereksinimlerini ve bileşenlerini teknik açıdan ele almışlardır [32]. Espinosa vd., İspanya'nın Barselona kentindeki yolcu gemilerini barındıran limanlar için KET sisteminin uygulanma potansiyeli üzerine çalışmışlardır [33]. Nyanguthii vd., Kenya'nın Mombasa limanında KET sisteminin uygulanabilirliğine yönelik simülasyon çalışması yapmışlardır [34]. Winkel vd., AB ülkelerinde KET sisteminin

uygulanma potansiyeli ve çevresel faydaları üzerine incelemeler yapmışlardır [35]. Kotrikla vd., Yunanistan'ın Midilli limanında KET sistemi kullanılarak CO_2 ve PM emisyonlarının azaltılma potansiyeli üzerine araştırmalar yapmışlardır [36]. Innes ve Monios, İskoçya'nın Aberdeen limanında KET sistemi için teknik ve finansal açıdan fizibilite çalışması yapmışlardır [37]. Prenc vd., Hırvatistan limanları için KET sistemi modelini incelemişlerdir [38]. Tarnapowicz ve German-Galkin, KET sistemi tasarımı için mevcut gereklilikler, standartlar ve düzenlemeler üzerine çalışmışlardır [39].

Denizcilik sektöründe, gemilerden kaynaklı çevresel ve finansal etkileri en aza indirmek ve enerji verimliliği potansiyellerini açığa çıkarmak için çözüm arayışları devam ederken, elektrik enerjisi sektöründe de mevcut şebekeyi daha verimli hale getirmek için geleceğin elektrik şebekesi olarak isimlendirilen "Akıllı Şebeke" kavramı ön plana çıkmıştır. Akıllı şebeke sisteminin yeni nesil gemi ve liman tasarımları için yenilikçi çözümler ortaya koyacağı ve denizcilik sektörü için de önemli bir rol oynayacağı öngörülmektedir. Akıllı şebeke sisteminin iki yönlü iletişim, iki yönlü güç akışı, gerçek zamanlı izleme, enerji yönetimi ve enerji yönetim algoritmaları gibi özelliklerinin KET sistemine dâhil edilmesi ile gemi ve liman arasındaki etkileşim sağlanacaktır.

Araştırmacılar akıllı şebekede enerji yönetimi konusunda farklı alanlar için birçok çalışma yapmışlardır. Ricalde vd., YEK ve EDS'nin akıllı şebekeye bağlantısı için enerji yönetim sistemi tasarlamışlardır [40]. Dahmane vd., şebekeden bağımsız evler için YEK/EDS/DJ hibrit enerjili sistemin enerji ihtiyacını karşılamasına yönelik enerji yönetim algoritması sunmuşlardır [41]. Koohi-Kamali vd., akıllı şebekeye bağlı olarak çalışan ve FV/EDS/DJ hibrit enerjili sistemi içeren "mikro şebeke" ünitesi için enerji yönetim algoritması önermişlerdir [42]. Asmar vd., YEK ve kojenarasyon sisteminin enerji üretimi ve şebekeye bağlantısı için enerji yönetim algoritması sunmuşlardır [43]. Elma ve Selamoğulları, akıllı şebekeye bağlı evlerde pik talebi azaltmak ve enerji verimliliğini artırmak için ev enerji yönetim algoritması önermişlerdir [44]. Khan vd., akıllı şebeke için talep tarafı yönetim modeli sunmuşlardır [45]. Rasheed vd., akıllı şebekede gerçek zamanlı fiyatlandırmaya yönelik talep tarafı yönetim algoritması

sunmuşlardır [46]. Aktas vd., akıllı şebeke uygulamalarında hibrit EDS için enerji yönetim algoritması önermişlerdir [47]. Fabrizio vd., akıllı şebeke için bir tarımsal gıda işletmesinde enerji izleme ve yönetim sisteminin oluşturulmasına yönelik çalışmalar yapmışlardır [48]. Javaid vd., konutlar için akıllı şebeke referans alınarak enerji yönetim sistemi ve kontrolü üzerine incelemelerde bulunmuşlardır [49]. Patel ve Sharma, elektrikli taşıttan şebekeye enerji aktarımı konusunda enerji yönetim algoritması geliştirmişlerdir [50]. Sujil ve Kumar, akıllı şebekede çoklu etmen sistemlerini temel alan enerji yönetim sistemi konusunda çalışmışlardır [51]. Kikusato vd., akıllı şebekede elektrikli taşıtların şarj ve deşarj durumuna yönelik enerji yönetim planı üzerinde çalışmışlardır [52]. Marah ve El Hibaoui, akıllı şebekede konutların pik yüklerinin azaltması ve öncelikli yüklerin yönetilmesi için enerji yönetim algoritması geliştirmişlerdir [53].

Literatürde, akıllı şebeke altyapısına uygun olarak meskenler, endüstri tesisleri, elektrikli taşıtlar ve şehirler için ihtiyaca göre enerji yönetim sistemi ve algoritması üzerine birçok çalışmanın yapıldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, denizcilik sektörüne yönelik literatürde çok az çalışma bulunmaktadır. Park ve Oh, YEK kullanan eğlence tekneleri için enerji yönetim sistemi önermişlerdir [54]. Tang vd., "M/V Cosco Tengfei" isimli Ro-Ro gemisine yerleştirilen 143 kW gücündeki FV panelin güç yönetim sistemini tanıtmışlardır [55]. Schoder vd., gemilerde otomatik güç yönetim sisteminin performansını değerlendirmeye yönelik araştırmalar yapmışlardır [56].

1.2 Tezin Amacı

Denizcilik sektörü temsilcileri, uluslararası çerçevede alınan kararları yerine getirebilmek için gemilerde FV, RT, EDS ve KET gibi alternatif enerji sistemlerinin kullanılmasına yönelik araştırmalar yapmaktadır. Elektrik enerjisi sektör temsilcileri ise geleceğin elektrik şebekesi olarak isimlendirilen "Akıllı Şebeke" sistemine yönelik önemli çalışmalar başlatmıştır. Literatür incelemesinde, gemilerde alternatif enerji kaynaklarının kullanımı konusunda yeteri kadar çalışma yapılmadığı, yapılan çalışmalarda FV, RT, EDS ve KET sistemlerinin genelde ayrı ayrı incelendiği gözlemlenmiştir. Dolayısı ile gemilerde elektrik enerjisi yönetimi konusunda da yeterli çalışmanın olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca,

elektrikli taşıtlar ve akıllı evler gibi birçok bileşenin akıllı şebeke sistemindeki rolü ve önemine yönelik çeşitli çalışmalar yapılmasına rağmen, gemilerin akıllı şebeke sistemine yeterince dâhil edilmediği ve incelenmediği tespit edilmiştir.

Bu nedenle tezin amacı, gemilerin limanda iken alternatif enerji kaynaklarını etkin şekilde kullanabileceği bir gemi elektrik enerjisi yönetim sisteminin akıllı şebeke altyapısına uygun olarak geliştirilmesi olarak belirlenmiştir.

1.3 Hipotez

Günümüzde, gemilerin büyük bir kısmı elektrik enerjisi ihtiyacını DJ'lerden karşıladığı için gemilerden kaynaklı çevresel problemler ve insan sağlığını olumsuz yönde etkileyen durumlar ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte denizcilik sektörü gemilerde enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik uluslararası sözleşmeler kapsamında ciddi kısıtlamalar ile karşı karşıya kalmaktadır. Bu nedenle, sektör temsilcileri uluslararası sözleşmeleri karşılamak ve daha çevreci sistemler geliştirmek için gemilerde alternatif enerji kaynaklarının kullanılmasına yönelik konulara odaklanmıştır. Literatürde, gemilerde alternatif enerji kaynaklarının kullanılması yönünde farklı çalışmalar mevcuttur. Fakat çoğu çalışmada alternatif enerji kaynaklarının ayrı ayrı incelendiği ve enerji yönetim sistemi konularına yeterince değinilmediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, elektrik enerjisi sektörünün ilgi duyduğu ve geleceğin elektrik şebekesi olarak isimlendirdiği "Akıllı Şebeke" sisteminde gemilerin rolünü açıklayacak yeterli çalışmanın olmadığı tespit edilmiştir.

Tez çalışmasında, gemilerin limanda iken en uygun enerji kaynağını kullanarak elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabileceği "Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Sistemi" önerilmiştir. Ayrıca, önerilen sistem için iki farklı "Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Algoritması" geliştirilmiştir. Geçmiş çalışmalarda yeterince incelenmeyen gemilerin akıllı şebeke sistemlerindeki rolü ve önemi vurgulanarak literatüre katkı sağlanmıştır.

Tez çalışması ile gelecekte inşa edilecek gemi ve liman tasarımlarına katkı sunulması hedeflenmiştir. Bu sayede sektör temsilcilerinin gemilerde enerji verimliliği konularına olan ilgisinin artırılması amaçlanmıştır.

Tez çalışmasının geri kalan kısmında şu konular ele alınmıştır: Bölüm 2'de gemi elektrik enerjisi yönetim sisteminin temel bileşenleri hakkında bilgi verilmiştir. Bu bölümde gemi elektrik, elektronik ve güç sistemleri, güneş enerji sistemleri, rüzgâr enerji sistemleri, enerji depolama sistemleri, kıyıdan enerji temini sistemleri ve akıllı şebeke sistemleri tanıtılmıştır. Bölüm 3'de önerilen gemi elektrik enerjisi yönetim sistemi incelenmiştir ve bu sistem için geliştirilen iki adet gemi elektrik enerjisi yönetim algoritması sunulmuştur. Bölüm 4'de çalışma kapsamında kullanılacak veriler ve analiz yöntemleri hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Bölüm 5'de önerilen gemi elektrik enerjisi yönetim sisteminin doğrulanması için benzetim çalışması yapılmış ve araştırma bulguları değerlendirilmiştir. Bölüm 6 tezin sonuç bildirgesinin bulunduğu sonuç ve önerilerden oluşmaktadır.

2
Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Sistemi Temel Bileşenleri

Bu bölümde gemi, liman ve akıllı şebeke tasarımını içeren gemi elektrik enerjisi yönetim sisteminin temel bileşenleri hakkında bilgi verilmiştir. İlk olarak gemi elektrik, elektronik ve güç sistemi tanıtılmıştır. İkinci olarak gün geçtikçe gemilerde kullanımı yaygınlaşan güneş ve rüzgâr enerji sistemleri hakkında değerlendirmeler yapılmıştır. Üçüncü olarak enerji depolama sistemleri ile ilgili tanımlamalar yapılmıştır. Dördüncü olarak kıyıdan enerji temini sistemi açıklanmıştır. Son olarak akıllı şebeke sistemi ayrıntılı incelenmiştir.

2.1 Gemi Elektrik, Elektronik ve Güç Sistemi

Gemi elektrik, elektronik ve güç sistemi, geminin normal çalışması ve personelin yaşamlarını sağlıklı bir şekilde sürdürmesi için gereken enerjiyi sağlayan kısımdır. Gemideki elektrik enerjisinin üretilmesi, dönüştürülmesi, depolanması, dağıtılması ve tüketilmesi ile ilgili tüm aşamaları kapsamaktadır.

Gemilerin her türlü faaliyeti ana makine ve yardımcı makineler ile sağlanmaktadır. Ana makine, geminin ilerlemesi için gereken gücü sağlayan ve pervaneleri tahrik eden kısımdır. Yardımcı makineler ise ana makinenin işletilmesine yardımcı olan ve geminin ilerlemesi dışındaki tüm faaliyetleri gerçekleştiren kısım olarak tanımlanır. Yardımcı makineler sınıflandırmasına dâhil olan jeneratörler genelde dizel motor ve alternatör grubundan oluşur ve gemideki elektrik enerjisi ihtiyacını karşılar. Gemilerde elektrik enerjisi ihtiyacı gemi tipine ve tahrik sistemine göre değişmektedir. Bu nedenle, gemilerde ana jeneratör, acil durum jeneratörü ve şaft jeneratörü olmak üzere üç çeşit jeneratör tipi ile karşılaşılması muhtemeldir. Genel olarak gemilerde en az iki adet ana jeneratör bulunur ve gemideki elektrik enerjisi ihtiyacı bu jeneratörlerden karşılanır. Ana jeneratörler, makine dairesine veya su sızdırmaz “ana perdeler” arasındaki özel yardımcı makine dairelerine yerleştirilirler. Ayrıca, ana jeneratörlerde herhangi bir nedenle arıza olması

durumunda önemli sistemlerin ve öncelikli yüklerin sağlıklı bir şekilde çalışmaya devam etmesi için bir adet acil durum jeneratörü bulunmaktadır. Acil durum jeneratörleri en üst devamlı güvertenin üzerinde ve çatışma perdesinin ön kısmında olmayan bir bölüme yerleştirilir. Geminin pervane şaftına iletilen gücü kullanarak normal zamanda elektrik enerjisi üreten sistemler ise şaft jeneratörü olarak isimlendirilir. Ana makinede arıza olması durumunda şaft jeneratörü motor konumuna geçip pervanenin dönmesini de sağlar. Şaft jeneratörü tüm gemilerde bulunmamakla beraber yeni gemilerde genelde sisteme dâhil edilmektedir.

Gemi jeneratörlerinde üretilen elektrik enerjisi, elektrik enerjisine ihtiyaç duyulan sistemlere ana tablodan dağıtılır. Ana tabloda ana jeneratörler, acil durum jeneratörü, şaft jeneratörü, sahil besleme panosu, farklı gerilim seviyelerindeki Alternatif Akım (AC) ve Doğru Akım (DC) karakteristikli yükler kontrol edilir ve gemi güç sisteminin etkin bir şekilde çalışması sağlanır.

Gemi ana tablosundan kontrol edilen temel üniteler Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Ana tablo, farklı gemi tipleri üzerinde yapılan araştırmalar referans alınarak oluşturulmuştur.

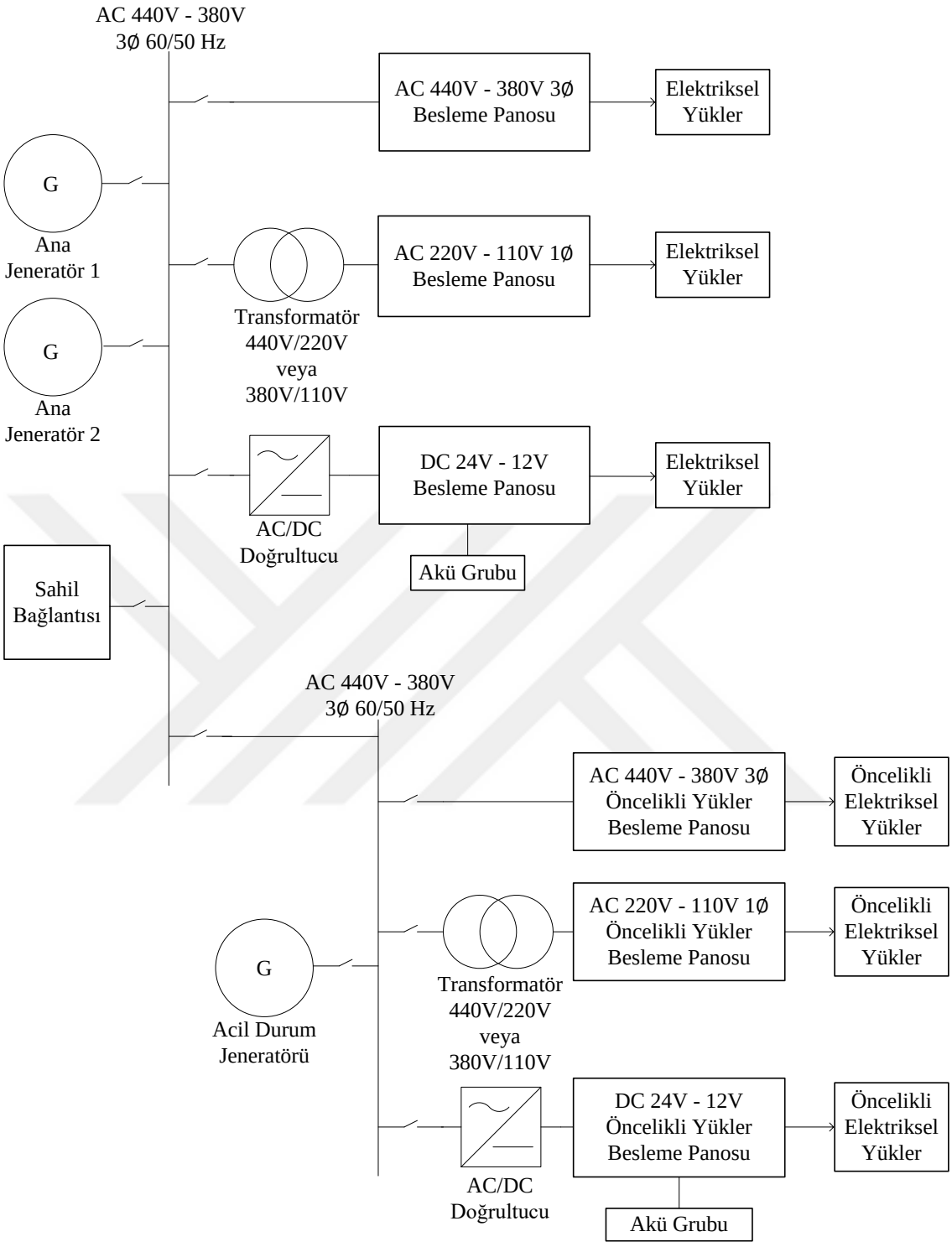
AC 440V-380V Besleme ve Kontrol Paneli	AC 220V-110V Besleme ve Kontrol Paneli	DC 24V-12V Besleme ve Kontrol Paneli	Ana Jeneratör 1 Paneli	Senkronizasyon Paneli	Ana Jeneratör 2 Paneli	Acil Durum Jeneratörü Paneli	Sahil Bağlantı Paneli
Pompa, Motor, İklimlendirme Sistemleri vb.	Aydınlatma, Haberleşme, Alarm sistemleri vb.	Şarj ve Deşarj Ünitesi, Sinyal, Navigasyon, Haberleşme, Aydınlatma Sistemleri vb.	Gerilim, Akım, Frekans, Hız, Sıcaklık Kontrol Sistemleri vb.	Güç Yönetim Ünitesi, Kontrol Paneli vb.	Gerilim, Akım, Frekans, Hız, Sıcaklık Kontrol Sistemleri vb.	Otomatik Başlatma, Akü Kontrol Ünitesi, Güç Kontrol Sistemleri vb.	Kıyıdan Enerji Temini Kontrol Ünitesi

Şekil 2.1 Gemi ana tablosunda bulunan üniteler

Gemiler türüne ve inşa edildiği ülkeye bağlı olarak 11 kV, 9 kV, 6,6 kV, 3,3 kV, 690 V, 480 V ve 440 V gibi farklı gerilim ve 400 Hz, 60 Hz ve 50 Hz gibi farklı frekans seviyelerinde çalışabilmektedirler. Toplam gücü 20 MW üzerindeki gemiler 11 kV ve 9 kV'luk gerilim seviyesine; 20 MW - 10 MW arasındaki gemiler

6,6 kV ve 3,3 kV gerilim seviyesine; daha düşük güçlü gemiler ise 690 V, 480 V, 440 V ve 380 V gerilim seviyesine sahiptirler. Günümüzde çoğu gemi 3 faz, 60 Hz, 440 V AC elektrik güç sistemine sahiptir. Aydınlatma ve tek fazlı sistemler gerilim düşürücü transformatörler ile genelde 220 V'a düşürülerek işletilmektedir. İletişim ve seyir gibi sistemler ise AC/DC doğrultucular ve akü grupları kullanılarak 24 V-12 V DC'ye dönüştürülür ve çalıştırılırlar [57]-[59].

Tipik bir geminin üretim, dağıtım ve tüketim aşamalarını içeren güç sistemi tek hat şeması Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Gemi güç sistemi, farklı gemi tipleri üzerinde yapılan araştırmalar referans alınarak oluşturulmuştur.



Şekil 2.2 Gemi güç sistemi tek hat şeması

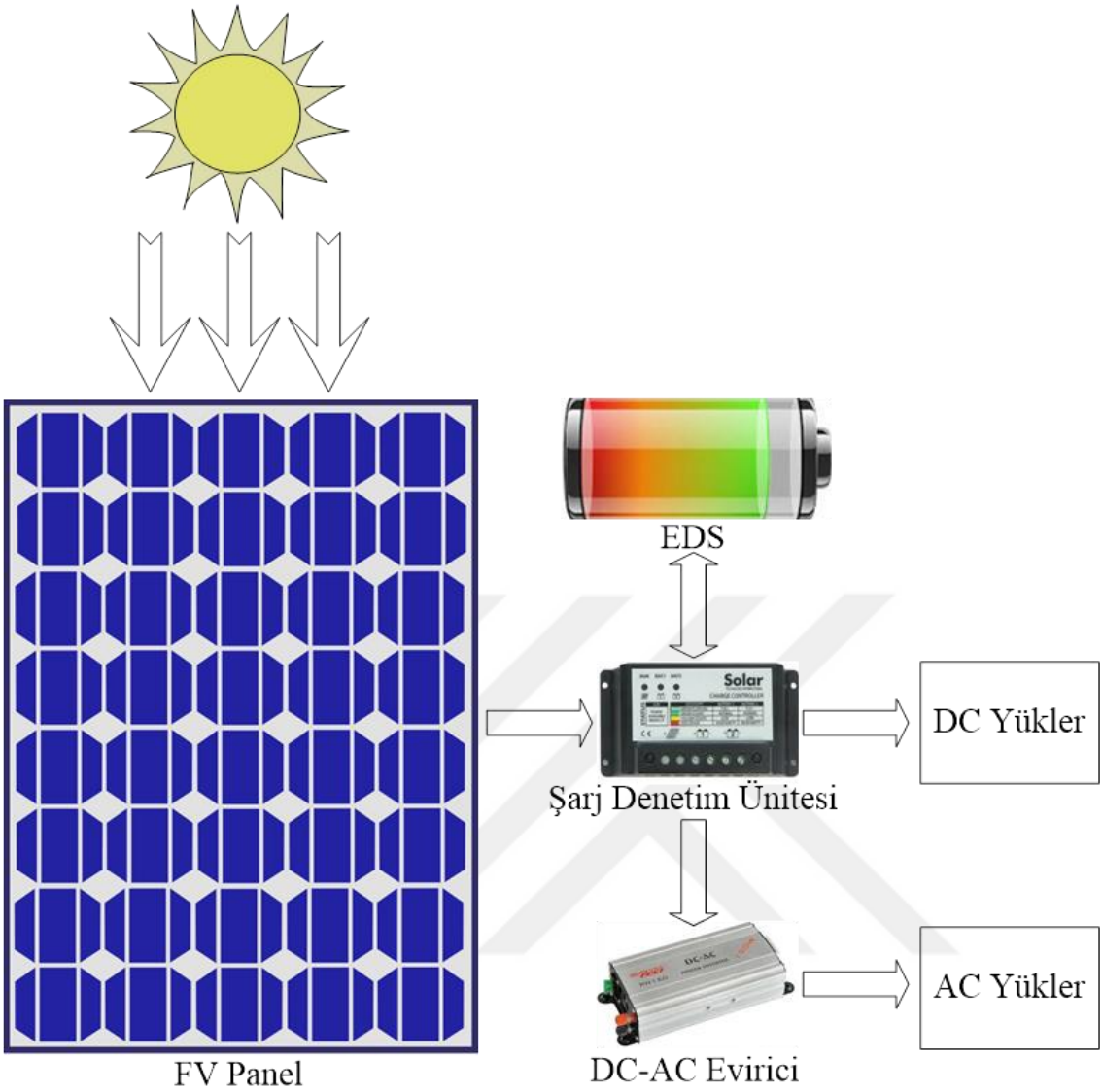
2.2 Yenilenebilir Enerji Sistemleri

Fosil kaynaklı yakıtların sürekli artan enerji talebini karşılamada yetersiz kalması, tükenme eğiliminde olması ve çevresel zararları nedeni ile YEK'lerin kullanımı kaçınılmaz hale gelmiştir. Özellikle yarı iletken malzeme ve güç elektroniği alanındaki yenilikçi yaklaşımlar, güneş ve rüzgâr enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesine önemli katkı sunmuştur [60].

Bu kısımda gemilerde diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına nazaran daha fazla uygulama alanı bulan FV ve RT enerji sistemleri hakkında bilgiler verilmiştir.

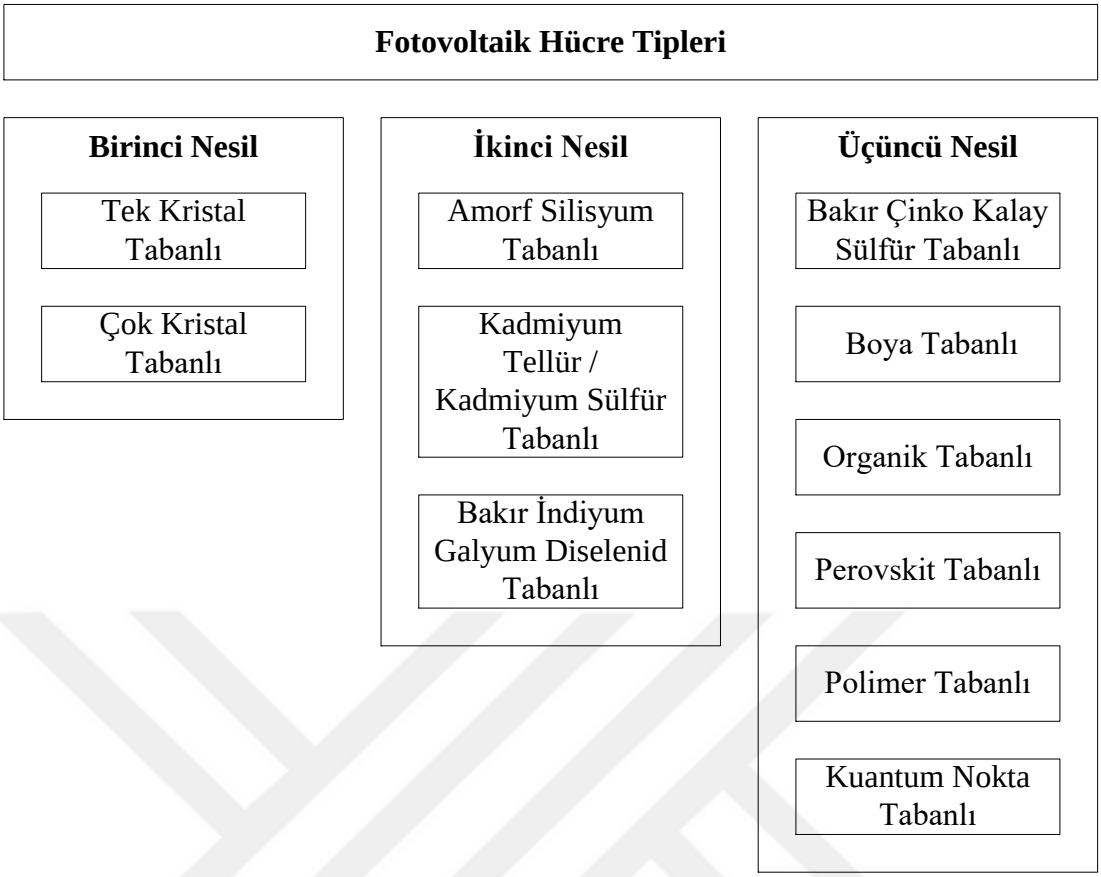
2.2.1 Fotovoltaik Enerji Sistemi

FV enerji sistemleri, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız çalışabilen iki farklı FV enerji sistemi mevcuttur. Şebekeye bağlı sistemlerde, FV'den üretilen enerji talep edilen enerjiden fazla ise, enerji çift yönlü elektrik sayacı kullanılarak ulusal şebekeye aktarılmaktadır. FV'den üretilen enerjinin talep edilen enerjiyi karşılayamaması durumunda aradaki fark ulusal şebekeden karşılanır. Şebekeden bağımsız sistemlerde ise, FV'den üretilen enerjinin talep edilen enerjiden fazla olması durumunda, enerji EDS'lerde depolanır. FV'den üretilen enerjinin talep edilen enerjiden az olması durumunda ise, aradaki fark EDS'lerden karşılanır [61]. Tipik bir FV enerji sistemi (Şekil 2.3) FV hücre, FV panel, EDS, şarj denetim ünitesi, evirici ve elektriksel yüklerden oluşmaktadır [62].



Şekil 2.3 Fotovoltaik enerji sistem bileşenleri

Fotovoltaik Hücre: Birinci nesil, ikinci nesil ve üçüncü nesil olmak üzere üç farklı FV hücre tipi (Şekil 2.4) tanımlanmaktadır. Birinci nesil FV hücreler kristal silisyum tabanlı, ikinci nesil FV hücreler ince film tabanlı, üçüncü nesil FV hücreler ise nano teknoloji tabanlı güneş hücresi teknolojisine dayanmaktadır. Birinci nesil FV hücreler nispeten yüksek verime (%16-21) ve yüksek maliyete sahip iken, ikinci nesil FV hücreler nispeten düşük verime (%12) ve düşük maliyete sahiptir. Üçüncü nesil FV hücrelerin ise nispeten yüksek verime (%30-50) ve düşük maliyete sahip olacak şekilde tasarlanması ve ticarileştirilmesi hedeflenmektedir.



Şekil 2.4 Fotovoltaik hücre tipleri

Birinci nesil FV hücre tipleri, tek kristal tabanlı ve çok kristal tabanlı olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Genel olarak kristal tabanlı FV hücreler silisyum maddesinden üretilmektedir. Güvenilirlik, ömür, dayanıklılık, kurulum ve performans konularında kendini kanıtlamış hücre tipleridir. Tek kristalli FV hücreler, tek kristalli silisyum maddesinden üretilmektedir. En eski FV sistem teknolojisidir. Çok kristalli FV hücreler ise, çok kristalli silisyum maddesinden üretilmektedir. Dünyada en yaygın kullanılan FV hücre tipidir.

İkinci nesil FV hücre tipleri, amorf silisyum tabanlı, kadmiyum tellür/kadmiyum sülfür tabanlı, bakır indiyum galyum diselenid tabanlı olmak üzere üç kısma ayrılmaktadır. İkinci nesil FV hücre tipleri, daha az malzeme kullanılarak birinci nesil FV hücrelerin verimliliğine ulaşmak için geliştirilen teknolojilerdir. Bu nedenle, birinci nesil FV hücre tiplerine kıyasla daha ince yapıdadır. Amorf silisyum FV hücreler, amorf silisyum maddesinden üretilen kristal formda olmayan, ince film yapıdaki FV hücre teknolojisidir. Kadmiyum tellür/kadmiyum

sülfür FV hücreler, kadmiyum tellürid ve kadmiyum sülfür maddelerinin karışımından üretilen ince film yapıdaki FV hücre teknolojisidir. Bu teknoloji birinci nesil FV hücre tiplerinden sonra en yaygın kullanılan FV hücre tipidir. Silisyum tabanlı FV hücre teknolojisinden daha ekonomik olmakla beraber yaklaşık %7'lik pazar payına sahiptir. Bakır indiyum galyum diselenid FV hücreler ise bakır, indiyum ve selenyum maddelerinin karışımından üretilen ince film yapıdaki FV hücre teknolojisidir. İkinci nesil FV hücre tipleri arasında en yüksek enerji üretimine sahiptir.

Üçüncü nesil FV hücre tipleri ise bakır çinko kalay sülfür tabanlı, boya tabanlı, organik tabanlı, perovskit tabanlı, polimer tabanlı ve kuantum nokta tabanlı olmak üzere altı kısma ayrılmaktadır. Üçüncü nesil FV hücrelerde, birinci ve ikinci nesil FV hücreden farklı olarak toksit içermeyen ve doğada bol bulunan malzeme tipleri kullanılarak daha fazla enerji üretiminin gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bakır çinko kalay sülfat tabanlı FV hücreler, bakır, çinko, kalay ve sülfür maddesinden üretilen ince film yapıdaki FV hücre teknolojisidir. Boya tabanlı FV hücreler, Gratzel hücresi olarak da bilinmektedir. Işığa duyarlı boya maddesinden üretilen ince film yapıdaki FV hücre teknolojisidir. Nispeten düşük maliyeti ile AB Fotovoltaik Yol Haritası dikkate alındığında 2020 yılına kadar temiz enerji üretimine önemli katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Organik tabanlı FV hücreler, plastik güneş hücresi olarak da isimlendirilmektedir. Karbon içeriği yüksek polimer malzemeler gibi organik tabanlı maddelerden üretilen ince film yapıdaki FV hücre teknolojisidir. Perovskit tabanlı FV hücreler, hibrit yapıda organik-inorganik kurşun veya kalay halojenür maddesinden üretilen ince film yapıdaki FV hücre teknolojisidir. Ekonomik maliyet, üretim kolaylığı ve yüksek verim özelliği ile araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Polimer tabanlı FV hücreler, polimer maddesinden üretilen esnek yapılı ince film FV hücre teknolojisidir. Kuantum nokta tabanlı FV hücreler ise, nano kristal ve yarı iletken özellikli kuantum nokta maddesinden üretilen ince film yapıdaki FV hücre teknolojisidir. Birinci ve ikinci nesil FV hücrelerde kullanılan malzeme yapılarına alternatif olarak düşünülmektedir [63]-[65].

Fotovoltaik Panel: FV sistemin en küçük birimi olarak tanımlanan güneş hücrelerinin bir araya getirilmesi ile oluşmaktadır. Güneş hücresi, elektrik enerjisinin üretildiği kısımdır. Üzerine düşen güneş ışıklarını, DC formunda elektrik enerjisine dönüştürür. Pozitif ve negatif özelliğe sahip p ve n tipi iki yarı iletken katmandan ve katmanlar arasında elektron geçişini sağlayan p-n ekleminden meydana gelir. Sistemden yeterli miktarda elektrik enerjisi üretilmesi için FV güneş hücreleri seri veya paralel bağlanarak FV modül haline getirilir. Bu modüllerin bir araya getirilmesi ile de FV panel elde edilir [66].

Enerji Depolama Sistemi: FV sistemlerde üretilen fazla enerjinin daha sonra kullanılmak üzere depolanmasını sağlayan depolama teknolojileridir. Bölüm 2.3'te enerji depolama sistemleri başlığı altında ayrıntılı bilgi verilmiştir.

Şarj Denetim Ünitesi: FV sistemlerde EDS'nin aşırı şarj ve deşarj olmasını engelleyen kontrol ünitesidir. Normal şarj denetim üniteleri, sabit bir referans geriliminde çalışmaktadır. Ayrıca, FV sistemde verimi arttırmak için, Maksimum Güç Noktası İzleme (MGNİ) özelliğine sahip şarj denetim üniteleri daha fazla ilgi görmektedir. Bu yöntemde, FV sistemin maksimum güç çıkışı sağlayacak referans gerilimde çalıştırılması için çeşitli algoritmalar kullanılmaktadır [67].

Evirici: FV sistemde üretilen elektrik enerjisi DC formundadır. Eviriciler sayesinde DC formundaki elektrik enerjisi AC'ye çevrilir. Bu sayede farklı özelliklere sahip elektrikli donanımların enerji talebi karşılanmış olur [68].

Elektriksel Yükler: FV sistem ile çalıştırılan elektrikli donanımların tamamı elektriksel yük olarak tanımlanmaktadır.

FV sistemden üretilen güç miktarı, kullanılan FV malzeme yapısı, FV sistem bileşenlerinin verimleri, seri veya paralel bağlanması, ortam sıcaklığı, panel ile ışınım arasındaki eğim açısı, güneş ışınım şiddeti ve gölgelenme durumu gibi birçok parametreye bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle, güneş geliş açısının FV panele dik gelecek şekilde tasarlanması ve gölgelenme olayının en aza indirgenmesi gibi ilave tedbirlerle FV çıkış gücünün dolaylı olarak artırılması sağlanabilmektedir [69].

Dünya genelinde, fosil kaynaklı yakıt tüketiminin azaltılması için FV enerji sistemlerinin kapasitesini artırmaya yönelik önemli hedefler konulmakta ve yatırımlar planlanmaktadır. FV enerji sistemlerinin ömürleri ve verimleri kullanılan malzeme tipine, ışık tutma kapasitesine, verimliliğine ve üretim maliyetine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Günümüzde, birinci ve ikinci nesil FV sistemlerin ömürleri 15 ila 30 yıl arasında, verimleri ise %12 ila 21 arasında değişmektedir. Yeni nesil FV sistem teknolojileri ile 2030 yılına kadar FV sistem ömürlerinin 40 yıl ve üzeri olacağı, verimliliğinin ise %30 ila 50 arasına ulaşacağı tahmin edilmektedir [70].

2.2.2 Rüzgâr Türbini Enerji Sistemi

RT enerji sistemleri, rüzgârdaki kinetik enerjiyi rotor vasıtası ile mekanik enerjiye daha sonra da jeneratörler aracılığı ile elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. İlk RT sistemi 1891 yılında Dane Paul La Cour tarafından elektrik enerjisi üretmek için kurulmuştur. I. ve II. Dünya Savaşı sırasında RT teknolojisi Danimarkalı mühendisler tarafından geliştirilerek modern RT sistemlerinin teknolojik gelişimine önemli katkı sağlanmıştır. İdeal şartlarda RT verimi Betz limitine göre %59,3'ü geçememektedir. Pratikte ise RT'lerin verimi %35 ila 50 arasında değişmektedir. Günümüzde de geliştirme çalışmaları devam etmektedir [71],[72].

RT'nin genel yapısı kule, kanatlar, kanat döndürme mekanizması, rotor, dişli kutusu, jeneratör, kontrol sistemi, elektriksel yükler, şebekeden bağımsız sistemler için enerji depolama sistemi, şebeke bağlantılı sistemler için ise transformatör, iletim hattı, kesici ve ayırıcı gibi devre elemanlarından oluşmaktadır [73]-[75].

Kule: Ana gövde ve rotoru taşıyan kısımdır.

Kanatlar: Rüzgârın kaldırma kuvveti etkisi ile dönme hareketinin gerçekleştiği kısımdır.

Kanat Döndürme Mekanizması: Rüzgârın hızına göre en uygun dönme açısını belirleyen kısımdır.

Rotor: Kanatlar, kanat döndürme mekanizması ve kanatların birleştiği göbek kısmıdır.

Dişli Kutusu: Rotorda gerçekleşen dönme hızının jeneratör çalışma hızına ayarlanmasını sağlayan yani dönüş hızını ayarlayan kısımdır. Günümüzde dişli kutusuna gereksinim duyan ve duymayan RT sistemleri mevcuttur. Az kutuplu ve yüksek devirli jeneratöre sahip sistemlerde dişli kutusuna ihtiyaç duyulurken, çok kutuplu ve düşük devire sahip doğrudan tahrikli sistemlerde dişli kutusuna ihtiyaç duyulmamaktadır. Dişli kutusuna sahip RT sistemi maliyet, boyut ve ağırlık açısından avantaj sağlar iken doğrudan tahrikli RT sistemi verimlilik, güvenilirlik ve bakım yönünden avantaj sağlamaktadır [76].

Jeneratör: Rotorda elde edilen mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü kısımdır.

Güç Kontrol Sistemi: Elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtım aşamalarında performansını, kalitesini, verimini ve uyumunu sağlayan kısımdır. Kontrol sistemlerindeki temel amaç elektrik enerjisi üretimini maksimum seviyeye çıkarmak, statik ve dinamik etki gösteren mekanik yükleri azaltmak ve son kullanıcıya kesintisiz güç sağlamaktır. Kontrol sistemleri kanat açısı kontrolü, jeneratör kontrolü ve şebeke bağlantı kontrolü olarak üç kısma ayrılır. Kanat açısı kontrolü ile kaliteli güç üretimi sağlamak ve mekanik yükleri azaltmak için dönme momentinin kontrolü sağlanır. Jeneratör kontrolü ile sistemin sorunsuz bir şekilde çalışması için belirlenen en düşük ve en yüksek rüzgâr hızı aralığında çalışması sağlanır. Şebeke bağlantı kontrolü ile de gerilim ve frekans gibi parametrelerin şebekeye uygunluğu sağlanır [77]. Günümüzde kullanılan gelişmiş yarı iletken donanımlar sayesinde, sistemde üretilen enerji tam ölçek güç dönüştürücüler kullanılarak düzenlenmekte ve güç kontrolü tam olarak sağlanmaktadır [78].

Elektriksel Yükler: RT sistemi ile çalıştırılan elektrikli donanımların tamamı elektriksel yük olarak tanımlanır.

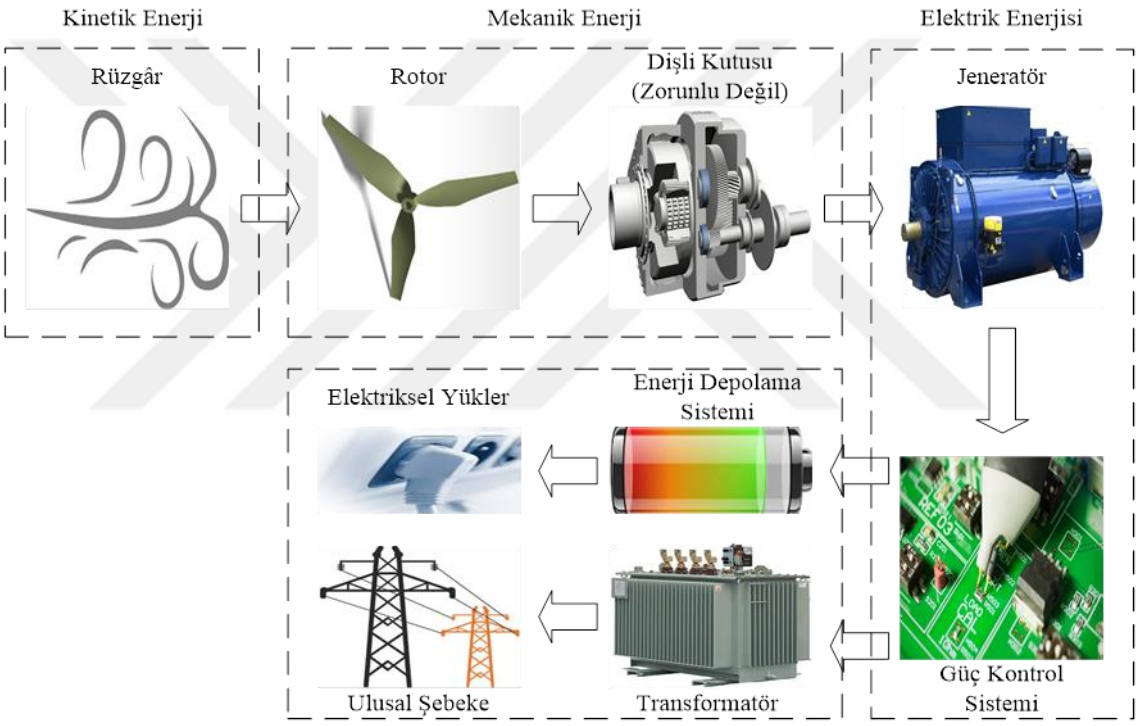
Enerji Depolama Sistemi: EDS'ler RT sisteminde üretilen fazla enerjinin daha sonra kullanılmak üzere depolanmasını sağlayan depolama teknolojileridir. EDS'ler şebekeden bağımsız RT sistemlerinde enerji dengesini sağlamak için önemlidir. Bölüm 2.3'te enerji depolama sistemleri başlığı altında ayrıntılı bilgi verilmiştir.

Transformatör: RT'de üretilen elektrik enerjisinin ulusal şebekeye aktarılması için gerekli gerilim seviyesini ayarlayan kısımdır.

İletim Hattı: RT'de üretilen elektrik enerjisinin ulusal şebekeye aktarılmasını sağlayan kısımdır.

Kesici ve Ayırıcı: RT siteminin güvenli çalışmasını ve sistemde gerçekleşecek herhangi bir arıza durumunda ulusal şebeke ile bağlantısının kesilmesini sağlayan kısımdır.

RT sisteminin temel bileşenleri ve enerji dönüşüm aşamaları Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Rüzgâr türbini sistem bileşenleri

RT'ler çalışma şekline göre sabit ve değişken hızlı, rüzgâr alış yönüne göre önden ve arkadan rüzgârlı, güç kontrol sistemine göre pasif stall, aktif stall, pitch ve sapma kontrollü, güç üretimine göre küçük, orta ve büyük güç kapasiteli, dönme eksenine göre ise yatay ve düşey eksenli olarak çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. RT'ler için birçok sınıflandırma yöntemi olsa da, RT'ler genelde dönme eksenine göre yatay eksenli ve düşey eksenli (Şekil 2.6) olmak üzere iki grupta sınıflandırılır [79], [80].



Şekil 2.6 Rüzgâr türbini çeşitleri

Yatay eksenli RT'ler rüzgâr yönünde ve rüzgâra karşı çalışabilirken, düşey eksenli RT'ler rüzgârı her yönde kabul ederler. Ayrıca, yatay eksenli RT'ler kanatları rüzgâra doğru döndürmek için kendiliğinden çalışma ve eğim mekanizmasına sahipken, düşey eksenli RT'ler (Darreus tipi hariç) bu tip mekanizmalara gerek duymadığı için daha basit yapıdadır. Yatay eksenli RT'ler gürültü, estetik, görsel ve kamu güvenliği endişeleri nedeniyle kentsel alanlar için nispeten uygun görülmezken, düşey eksenli RT'ler kentsel ve yarı kentsel alanlarda potansiyel bir çözüm olarak öne çıkmaktadır [81].

Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini: Yatay eksenli RT'lerde rotor ünitesi yeryüzüne göre yatay eksende çalışmaktadır. Dönme ekseni rüzgâr yönüne paralel iken kanatlar rüzgâr yönüne dik konumdadır. Rüzgârı hem önden hem de arkadan alarak çalışabilmektedirler. Kullanılan kanat sayıları farklılık göstermekle beraber, en yaygın kullanılan RT sistemi 3 kanatlı ve rüzgârı önden alan RT'lerdir. Tek kanatlı RT'ler ise denge problemi nedeni ile çok az kullanım alanına sahiptirler. Yatay eksenli RT'ler, düşey eksenli RT'lere göre yüksek verime, güvenilirliğe ve kullanım alanına sahiptirler [82],[83].

Düşey Eksenli Rüzgâr Türbini: Düşey eksenli RT'lerde rotor ünitesi yeryüzüne göre düşey eksende çalışmaktadır. Dönme ekseni rüzgâr yönüne dik konumdadır. Kanatların iç bükey ve dış bükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvvetinin farklı olmasından dolayı dönme hareketi sağlanır ve elektrik enerjisi üretimi

gerçekleştirilir. Düşey eksenli RT'ler yatay eksenli RT'lere kıyasla rüzgârı her yönden alarak çalışabilme özelliğine sahiptirler. Özellikle rüzgâr yönünün sık değiştiği alanlarda önemli avantaj sağlarlar. Ayrıca dişli kutusu ve jeneratör gibi temel parçaların zeminde olması, daha az yer kaplaması, daha basit yapıda olması ve kurulumunun nispeten daha kolay olması da avantajları arasında sayılır. Düşey eksenli RT'ler, çalışma kuvvetlerine göre Savonius, Lafond, Panemone, Darrieus, Giromill ve Helisel tipi olarak sınıflandırılırlar. Savonius, Lafond ve Panemone tipi düşey eksenli RT sistemleri sürükleme kuvveti ile çalışırken, Darrieus, Giromill ve Helisel tipi düşey eksenli RT sistemleri kaldırma kuvveti ile çalışmaktadırlar. Düşey eksenli RT'lerin geliştirme aşamaları devam ettiği için birçok çeşidi bulunmakla beraber, Savonius ve Darrieus tipi RT'ler en çok bilinen ve kullanılan düşey eksenli RT sistemleridir.

Savonius tipi RT'ler iki yatay disk arasına yerleştirilmiş ve merkezleri birbirine simetrik iki yarım silindirden meydana gelen düşey eksenli RT sistemleridir. Silindirin iç kısmındaki moment dış kısmında meydana gelen momentten büyük olduğu için dönme hareketi sağlanarak elektrik enerjisi üretilir. Düşük rüzgâr hızlarında çalışabilme özelliğine sahiptirler.

Lafond tipi RT'ler 2,5 m/s'lik rüzgâr hızında dönme hareketine başlayıp elektrik üretebilmektedir.

Panemone tipi RT'ler en eski RT tasarımı olmakla beraber en düşük verime sahip düşey eksenli RT sistemleridir.

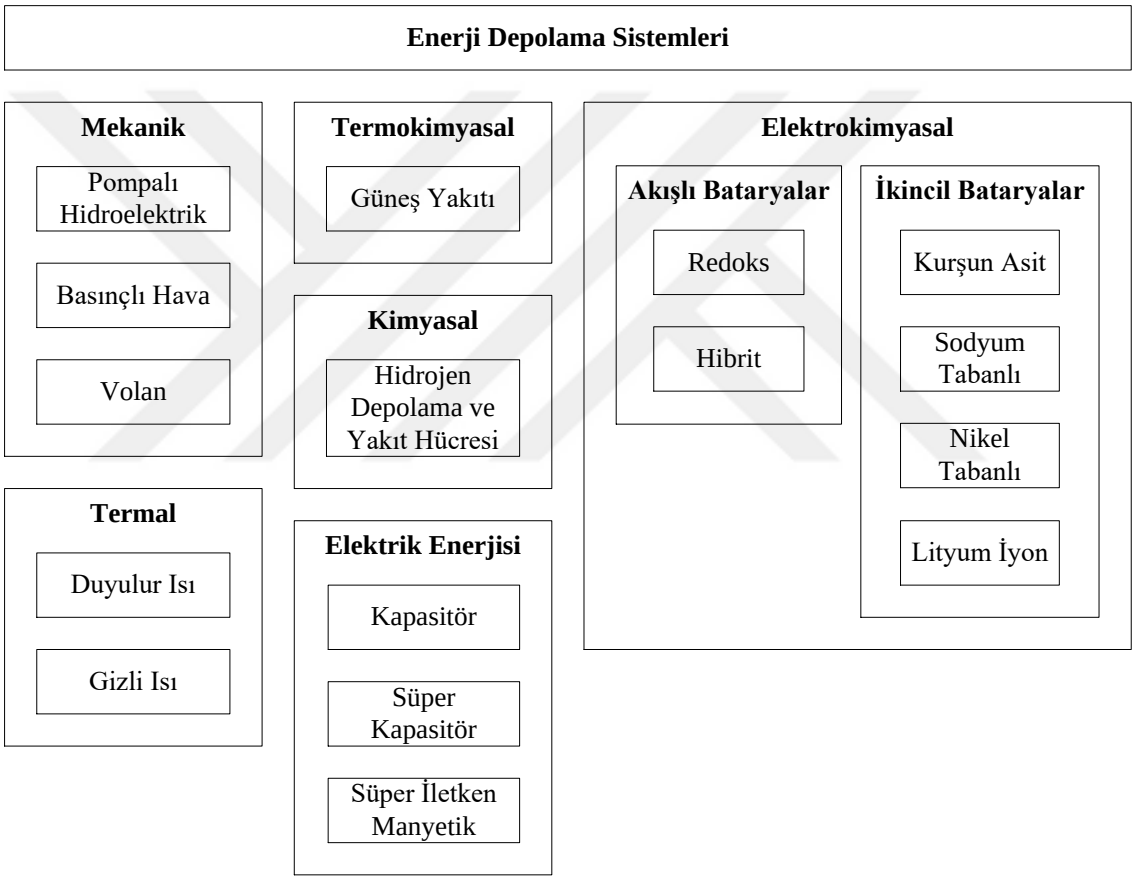
Darrieus tipi RT'ler geometrik biçimli aerodinamik kanat yapısı sayesinde yüksek performansa ve yüksek hızlarda çalışabilme özelliğine sahip düşey eksenli RT sistemleridir.

Giromill ve Helisel tipi RT'ler ise Darrieus tipi RT'lerle benzer yapıda olup kanat açılarının daha verimli olmasına yönelik araştırmalar devam etmektedir [84]-[86].

2.3 Enerji Depolama Sistemleri

Elektrik şebekesi farklı zaman dilimlerinde öngörülemeyen enerji talebi ile karşı karşıya kalabilmektedir. Bu durumda iletim ve dağıtım hatlarında zorlanmaların meydana gelmesi kaçınılmazdır. Enerjinin bir formdan başka bir forma

dönüştürülerek depolanması veya tüketilmesi olarak tanımlanan EDS, şebekede yaşanabilecek üretim ve tüketim dengesizliğini önlemede önemli bir potansiyele sahiptir. EDS'ler, şebekede üretim ve tüketim dengesini korumak, güç kalitesi ve güvenilirliğini artırmak, aşırı yüklenmeleri önlemek, yenilenebilir enerji ve dağıtılmış üretim kaynaklarından kesintisiz güç sağlamak, şebekenin anlık değişimlerini dikkate alarak enerji yönetimini gerçekleştirmek, elektrikli taşıtların enerjisini temin etmek ve akıllı şebeke sisteminde sürekliliği sağlamak gibi önemli özelliklere sahiptirler [87]. EDS'ler mekanik, termal, termokimyasal, kimyasal, elektrik enerjisi ve elektrokimyasal (Şekil 2.7) olarak sınıflandırılır.



Şekil 2.7 Enerji depolama sistemi çeşitleri

2.3.1 Mekanik Enerji Depolama Sistemleri

Mekanik enerji depolama sistemleri, pompalı hidroelektrik, basınçlı hava ve volan enerji depolama sistemlerinden oluşmaktadır [88].

Pompalı Hidroelektrik Depolama: Pompalı hidroelektrik depolama sistemleri olgunlaşmış ve yüksek enerji kapasitesine sahip enerji depolama teknolojisidir.

Sistem potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüştürülmesi prensibine dayanmaktadır. Enerji ihtiyacının az olduğu zamanlarda su düşük seviyedeki bir rezervuardan daha yüksek seviyedeki rezervuara pompalar vasıtası ile aktarılarak potansiyel enerji elde edilir. Şebekede enerji yoğunluğu arttığı zamanlarda su yüksek seviyedeki rezervuardan düşük seviyedeki rezervuara aktarılır. Suyun aktarılması esnasında jeneratörler vasıtası ile mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür.

Basınçlı Hava Depolama: Basınçlı hava depolama sistemlerinin pompalı hidroelektrik depolama sistemlerinden farkı, su yerine hava kullanan enerji depolama teknolojisine sahip olmasıdır. Sistem, motor ve jeneratör ünitesi, kompresör ve genişletme ünitesi, türbin ve depolama ünitesinden oluşmaktadır. Şebeke için üretilen fazla enerji havanın kompresörler vasıtası ile sıkıştırarak, yeraltı veya yerüstü depolama ünitelerine aktarılması için kullanılır. Şebekede enerji ihtiyacı arttığında, sıkışmış hava ısı değiştiriciler vasıtası ile ısıtılarak serbest bırakılır. Sonrasında, serbest bırakılan hava türbin ve jeneratör grubu vasıtası ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Ayrıca, sistem kesintisiz güç kaynakları ve yedek güç sistemleri gibi endüstriyel uygulamalarda aküye alternatif olarak kullanılmaktadır.

Volan Depolama: Volan enerji depolama sistemi, şebeke için üretilen fazla elektrik enerjisinin bir eksen etrafında döner hareket gerçekleştirerek, mekanik olarak depolanmasını sağlayan enerji depolama teknolojisidir. Fazla enerji motor vasıtası ile kinetik enerjiye dönüştürülür. Enerji ihtiyacı durumunda, elektrik motoru jeneratör moduna geçerek kinetik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Volan enerji depolama sisteminin enerji santrallerinde ve taşıtlarda kullanımı için de araştırmalar başlamıştır. Özellikle, ulaştırma sektöründe çevreci teknolojilerin gelişmesine katkı sağlaması ve taşıtlardaki yakıt tasarrufunu artırması beklenmektedir.

2.3.2 Termal Enerji Depolama Sistemleri

Termal enerji depolama sistemleri, mevcut ısı enerjisinin çeşitli yöntemler kullanılarak depolanmasını sağlayan enerji depolama teknolojisidir. İhtiyaç

durumunda ısı enerjisi ısıtma, soğutma, sıcak su ve elektrik üretimi için kullanılır. Sistem, depolama ünitesi, soğutucu sistemi, pompa grupları ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Günümüzde, konutlarda yaygın olarak kullanılmakla beraber, enerji santrallerinde de kullanımı yaygınlaşmaktadır. Isı enerjisi duyulur ısı, gizli ısı ve termokimyasal gibi farklı teknikler ile depolanmaktadır [89].

Duyulur Isı: Duyulur ısı depolama tekniği, en yaygın kullanılan ve en çok bilinen yöntemdir. Depolama ünitesinin içindeki maddenin sıcaklık değişimi prensibine dayanır. Sıvı veya katı haldeki madde ısıtılarak veya soğutularak depolanır veya tüketilir. İşlem sırasında maddenin fazında herhangi bir değişiklik meydana gelmez.

Gizli Isı: Gizli ısı depolama tekniği, depolama ünitesinin içindeki maddenin faz değişimi (buz kütlesinin sıvı fazına dönüşmesi gibi) prensibine dayanır. Bu durumda, sıcaklık değişimi olmadığı için gizli ısı olarak isimlendirilir. Maddenin faz değişimi gerçekleştirilerek enerji depolanır veya harcanır.

2.3.3 Termokimyasal Enerji Depolama Sistemleri

Termokimyasal enerji depolama sistemleri, ısı enerjisini kimyasal enerjiye dönüştüren enerji depolama teknolojisidir [90].

Güneş Yakıtı: Güneş yakıtı, enerji depolama sistemleri için yeni ve gelişen bir teknolojidir. Güneş enerjisini doğal fotosentez, yapay fotosentez veya termokimyasal yaklaşımlar ile karbon veya ısı kaynaklı yakıtlara dönüştürmesi, depolaması ve ihtiyaç halinde elektrik enerjisi üretmesi için tasarlanan enerji depolama teknolojisidir.

2.3.4 Kimyasal Enerji Depolama Sistemleri

Hidrojen depolama ve yakıt hücresi enerji depolama sistemi bu sınıflandırmada yer alan ve en çok bilinen yöntemdir [91].

Hidrojen Depolama ve Yakıt Hücresi: Hidrojen depolama ve yakıt hücresi enerji depolama sistemi, elektroliz, depolama ünitesi ve yakıt hücresinden oluşmaktadır. Yakıt hücreleri elektrolit tipine göre proton değişim yakıt hücresi, alkali yakıt hücresi, fosforik asit yakıt hücresi, eriyik karbonat yakıt hücresi ve katı oksit yakıt

hücresi olarak isimlendirilir. Elektroliz ünitesi vasıtası ile üretilen fazla enerjiden hidrojen elde edilerek özel yapılmış depolama ünitelerinde sıvı veya gaz formunda depolanması yöntemine dayanan enerji depolama teknolojisidir. İhtiyaç halinde elektroliz yönteminin tersini gerçekleştiren yakıt hücresi teknolojisinde depolanan hidrojen ile oksijen tepkimeye girer. Tepkime sonucunda su, ısı ve elektrik enerjisi üretilir.

2.3.5 Elektrik Enerjisi Depolama Sistemleri

Elektrik enerjisi depolama sistemleri kapasitör, süper kapasitör ve süper iletken manyetik enerji depolama sistemlerinden oluşmaktadır [92].

Kapasitör: Kapasitör enerji depolama sistemi, seramik, cam, plastik gibi yalıtkan bir malzemenin iki iletken tabaka arasına yerleştirilmesi sonucu, enerjinin yalıtkan malzemede elektrostatik bir alan meydana getirerek depolanmasını sağlayan enerji depolama teknolojisidir.

Süper Kapasitör: Süper kapasitör enerji depolama sistemi, ultrakapasitör veya elektrikli çift katmanlı kapasitör olarak da isimlendirilmektedir. Sistem, iki iletken elektrot, bir elektrolit ve bir ayırıcından oluşmaktadır. Enerjiyi kimyasal bir tepkimeye girmeden elektrolit ve iki iletken elektrotları arasındaki yüzeylerde statik olarak depolayan enerji depolama teknolojisidir. Hızlı şarj ve deşarj özelliği ile kısa süreli depolamalar için çok uygundur.

Süper İletken Manyetik: Süper iletken manyetik enerji depolama sistemi, soğutma ünitesi aracılığı ile süper iletkenliğin sağlandığı düşük sıcaklıklarda, bobin üzerinden geçen akımın oluşturduğu enerjinin manyetik alanda depolanmasını sağlayan enerji depolama teknolojisidir. Sistem, soğutma ünitesi, süper iletken bobin teli ve güç düzenleme ünitesinden oluşmaktadır. Soğutma ünitesi, bobinin süper iletkenliğinin sağlandığı kritik sıcaklık değerlerinde kalmasını sağlar. Güç düzenleme ünitesi ise bobin içine ve dışına enerji aktarımını gerçekleştirir. Şarj esnasında bobine doğru akım verilir, deşarj esnasında ise enerji alternatif akıma çevrilir.

2.3.6 Elektrokimyasal Enerji Depolama Sistemleri

Elektrokimyasal enerji depolama sistemleri, elektrik enerjisinin kimyasal formda depolanmasını sağlayan enerji depolama teknolojisidir. Sistem, elektrolit malzeme içinde bulunan pozitif ve negatif karakterli iki adet elektrot ile elektrotlar arasında elektron taşıyan bir aktif maddeden ve ayırıcıdan oluşmaktadır. Elektrik yüklerinin içinden geçtiği çözelti elektrolit, yüklerin geçişini sağlayan iletken çubuklar ise elektrot olarak tanımlanmaktadır. Şarj ve deşarj işlemi, elektrotlar ile elektrolit arasında gerçekleşen tepkime sonucuna göre gerçekleşir [93].

Elektrokimyasal enerji depolama sistemleri, elektrotlar ve elektrolit için kullanılan malzeme tipine göre akışlı bataryalar ve ikincil bataryalar olmak üzere iki ana gruptan oluşmaktadır.

Akışlı batarya sistemleri de redoks akışlı ve hibrit akışlı olarak kendi içinde ayrılmaktadır [94].

Redoks Akışlı Batarya: Redoks akışlı batarya sistemi, dışarıda bulunan sıvı elektrolit çözeltisi içeren anolit ve katolit özellikli iki adet depolama ünitesinden elektrokimyasal hücreye sıvı pompalanması ile elektron transferinin gerçekleşmesi sonucu enerjinin üretilmesini ve depolanmasını sağlayan enerji depolama teknolojisidir. Vanadyum redoks tipi akışkan enerji depolama sistemi, en yaygın kullanılan redoks akışlı enerji depolama sistemleridir.

Hibrit Akışlı Batarya: Hibrit akışlı batarya sistemi, aktif kütlelerden birinin elektrokimyasal hücre içinde dâhili olarak depolanmasını, diğerinin ise sıvı elektrolit içinde harici olarak depolanmasını sağlayan enerji depolama teknolojisidir. Bu nedenle, hem redoks akışlı batarya hem de ikincil batarya sistemlerinin özelliklerini taşımaktadır. Çinko-brom ve çinko-seryum tipi akışkan enerji depolama sistemleri en yaygın kullanılan hibrit akışlı enerji depolama sistemleridir. İki elektrolitik depolama ünitesi arasındaki geçiş hücresi içindeki geçirgen zar şarj ve deşarj durumuna göre çinko ile brom veya seryum iyonlarının diğer tarafa geçişini sağlar. Şarj esnasında çinko elektrotta birikirken, deşarj esnasında tekrar çözelti haline gelir.

İkincil batarya sistemleri, kurşun tabanlı, sodyum tabanlı, nikel tabanlı ve lityum tabanlı batarya sistemlerinden oluşmaktadır.

Kurşun Asit Batarya: Kurşun asit batarya sistemi, elektrik enerjisinin depolanması için kullanılan en yaygın enerji depolama teknolojisidir. Bataryada hücrenin anot kısmı kurşundan, katot kısmı kurşun oksitten, elektrolit sıvısı ise sülfirik asitten meydana gelmektedir. Nispeten düşük maliyetli ve bakımının kolay olması nedeniyle geniş kullanım alanına sahiptir [95].

Sodyum Tabanlı Batarya: Sodyum tabanlı batarya sistemi, sodyum sülfür batarya ve sodyum nikel klorit batarya olarak sınıflandırılmaktadır. Bu tip bataryalar yüksek çalışma sıcaklığına ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle çalışma sıcaklığını sabitlemek için ek donanımlar gerekmektedir.

Sodyum sülfür batarya sisteminde, hücrenin pozitif elektrotu sıvı sülfürden, negatif elektrotu sıvı sodyumdan, elektrolit kısmı ise katı beta alüminadan meydana gelmektedir. Elektrotların sıvı halde kalabilmesi için sistem 300°C ila 350°C arasında tutulur.

Sodyum nikel klorit batarya sisteminde ise hücrenin pozitif elektrotu nikel kloritten, negatif elektrotu sıvı sodyumdan, elektrolit kısmı ise erimiş sodyum tuzundan meydana gelmektedir. Aynı zamanda, bu bataryalar ZEBRA batarya olarak da bilinmektedir [96].

Nikel Tabanlı Batarya: Nikel tabanlı batarya sistemi, nikel kadmiyum batarya ve nikel metal hidrit batarya olarak sınıflandırılmaktadır.

Nikel kadmiyum batarya sisteminde, hücrenin pozitif elektrotu nikel hidroksitten, negatif elektrotu metalik kadmiyumdan, elektrolit kısmı ise potasyum hidroksitten meydana gelmektedir. Nispeten güvenilirliği yüksek ve maliyetli düşük olmasına rağmen kadmiyum maddesi toksik ağır metaller içerdiği için çevreyi olumsuz etkilemektedir.

Nikel metal hidrit batarya sisteminde, hücrenin pozitif elektrotu nikel hidroksitten, negatif elektrotu metal hidritten, elektrolit kısmı ise potasyum hidroksitten meydana gelmektedir. Nikel metal hidrit batarya, çevresel zararları azaltmak ve

verimliliği artırmak için nikel kadmiyum batarya sistemine alternatif olarak geliştirilmiştir [97].

Lityum İyon Batarya: Lityum iyon batarya sisteminde, hücrenin pozitif elektrotu lityum metal oksitten, negatif elektrotu grafit karbondan, elektrolit kısmı ise normalde çözünmüş lityum tuzları içeren sulu olmayan organik bir sıvıdan meydana gelmektedir. Lityum iyon batarya sistemi, diğer batarya tiplerine göre yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler. Bu nedenle, birçok alanda kolaylıkla kullanılması için çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle, elektrikli taşıt uygulamaları için yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir [98].

EDS'nin teknik ve ekonomik özellikleri Tablo 2.1 ve Tablo 2.2'de gösterilmiştir [99]-[103]. EDS'lerin kuruluş maliyeti birim güç (kW) başına kuruluş maliyetlerini göstermektedir. Tez çalışmasında gerçekleştirilen tüm ekonomik değerlendirmeler için Türk Lirası (TL) kullanılmıştır. İlgili para birimleri 1 Ocak 2019 tarihli döviz kuru üzerinden TL'ye çevrilmiştir. 1 USD (ABD Doları) için 5,286698 TL, 1 EURO (Avrupa Para Birimi) için ise 6,108582 TL değeri dikkate alınmıştır [104].

Tablo 2.1 Enerji depolama sistemlerinin teknik özellikleri

Teknoloji	Güç Kapasitesi (MW)	Güç Yoğunluğu (kW/m^3)	Özgül Güç (W/kg)	Özgül Enerji (Wh/kg)	Genel Verim (%)
Pompalı Hidroelektrik	100–5000	0,01–0,12	0,01–0,12	0.5–1.5	70–85
Basınçlı Hava	5–300	0,04–10	2,2–24	10–30	42–54
Volan	0–0,25	40–2000	400–1500	5–100	90–95
Termal	0,1–300	–	–	80–250	–
Güneş Yakıtı	0–20	–	–	$800–10^5$	–
Hidrojen Depolama ve Yakıt Hücresi	0,3–58,8	1–500	5–800	$150–10^4$	33–42
Kapasitör	0–0,05	15–4500	$3000–10^7$	0.01–0.1	60–95
Süper Kapasitör	0–0,3	15–4500	500–5000	2.5–15	85–98
Süper İletken Manyetik	0,1–10	300–4000	500–2000	0.5–5	95–98
Redoks Akışlı (Vanadyum)	0,03–3	2,5–33,4	80–150	30–50	65–85
Hibrit Akışlı (Çinko-Brom)	0,05–2	3–8,5	45–100	75–85	60–75
Kurşun Asit	0–20	10–400	75–300	30–50	85–90
Sodyum Sülfür	0,05–8	1,3–50	150–240	100–240	89–92
Sodyum Nikel Klorit	0–0,3	54,2–300	150–200	100–140	70–85
Nikel Kadmiyum	0–40	38–141	140–180	35–60	60–90
Nikel Metal Hidrit	0,01–3	8–588	6,02–1100	50–75	50–80
Lityum İyon	0–100	56–800	500–2000	100–200	85–100

Tablo 2.2 Enerji depolama sistemlerinin ekonomik özellikleri

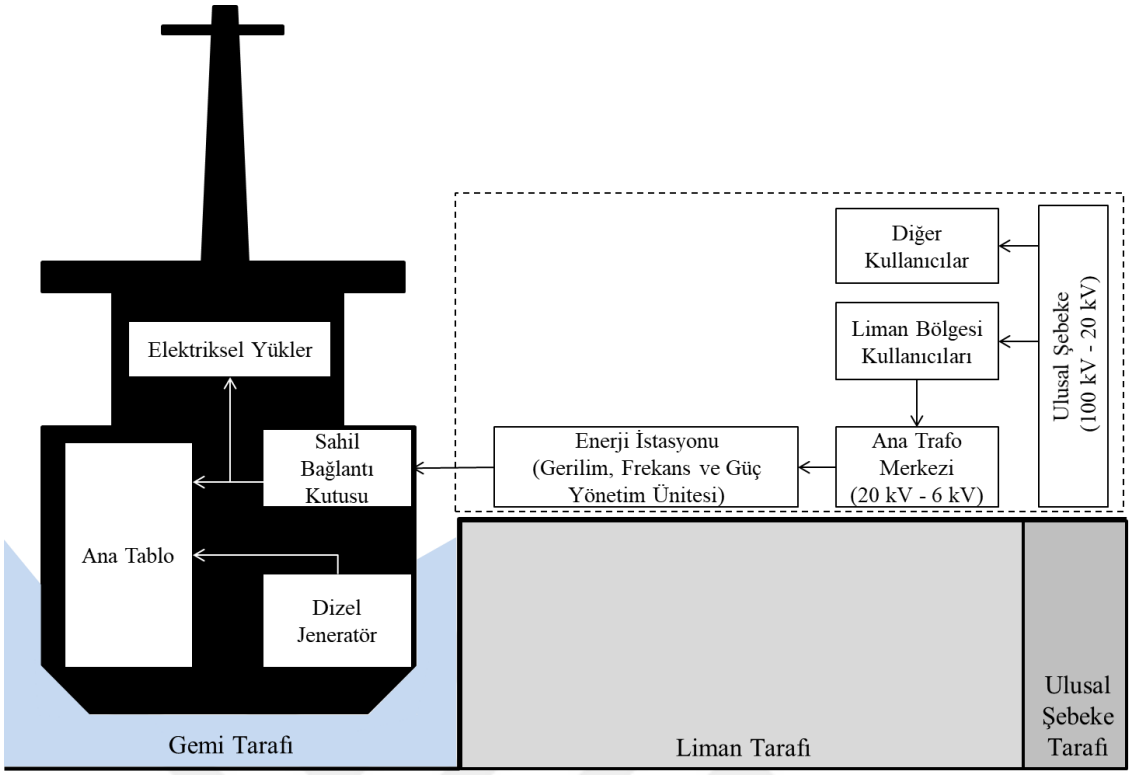
Teknoloji	Kuruluş Maliyeti (TL/kW)	İşletme ve Bakım Maliyeti	Ömür	
		TL/kW-yıl	Yıl	Çevrim
Pompalı Hidroelektrik	3172–10573	16	30–50	10000–30000
Basınçlı Hava	2115–4229	100–132	20–40	8000–12000
Volan	1322–1850	106	15–20	10^5–10^7
Termal	529–2115	–	5–30	–
Güneş Yakıtı	–	–	–	–
Hidrojen Depolama ve Yakıt Hücresi	2643–15860	98–269	5–20	1000–20000
Kapasitör	1057–2115	69	5–8	5000–10^6
Süper Kapasitör	529–1586	32	10–12	5000–10^6
Süper İletken Manyetik	1057–1586	98	15–20	Sonsuza Yakın
Redoks Akışlı (Vanadyum)	3172–7930	370	5–10	800–16000
Hibrit Akışlı (Çinko-Brom)	3701–13217	20–42	5–10	2000–3500
Kurşun Asit	1586–3172	264	5–15	200–2000
Sodyum Sülfür	1850–15860	423	10–15	1500–5000
Sodyum Nikel Klorit	793–1586	20–44	10–14	1000–3000
Nikel Kadmiyum	2643–7930	106	10–20	1500–3000
Nikel Metal Hidrit	1427–2802	–	2–15	1200–1800
Lityum İyon	6344–21147	12–84	5–15	3000–10000

2.4 Kıyıdan Enerji Temini Sistemi

Gemiler limanda iken yükleme, tahliye, aydınlatma, havalandırma ve haberleşme gibi birçok faaliyeti gerçekleştirmek için elektrik enerjisine ihtiyaç duyarlar. Gemilerde elektrik enerjisi ihtiyacı genelde gemi yardımcı makineleri sınıfına giren DJ'ler ile karşılanmaktadır. KET sisteminde ise gemiler limanda iken elektrik enerjisi ihtiyaçlarını kendi DJ'leri yerine ulusal şebekeden karşılar [105]. KET sisteminin kullanımı yaygın olmamakla beraber, uluslararası kuralların getirdiği kısıtlamalar ve gemilerde alternatif enerji kaynaklarının kullanılmasına yönelik faaliyetler neticesinde denizcilik sektörü için ilgi çeken bir konu haline gelmiştir. Günümüzde, KET sistemi dünya genelinde "22 limanda" uygulanmaktadır [106]. Ayrıca, 28 limanda daha KET sisteminin uygulanması planlanmaktadır [107].

KET sisteminin temel bileşenleri (Şekil 2.8) liman tarafı ve gemi tarafı olarak iki kısma ayrılmaktadır. Liman tarafında, ulusal şebekeden alınan elektrik enerjisi, liman bölgesini besleyen ana transformatör merkezine gelir. Enerji, ana transformatör merkezinden gemilerin yanaşacağı ve elektrik enerjisini karşılayacağı istasyonlara iletilir. Bu istasyonlarda gerilim seviyeleri, frekans değerleri, güç kontrol paneli ve anahtarlama elemanları bulunur. İstasyondaki frekans dönüştürücüler ile geminin frekansı ulusal şebekenin frekansına eşitlenir. Bu istasyonda kullanılacak ek bir transformatör ile gerilim seviyesi gemide istenilen seviyeye ayarlanabilir. İstasyonda ek bir transformatör bulunmaz ise gerilim seviyesi gemideki transformatör sistemine bağlanarak ihtiyaç duyulan gerilim seviyesini elde etmekte mümkündür. Gemi tarafında ise güç yönetim ve dağıtım sisteminin bulunduğu ana tabloda jeneratör sistemleri ile ulusal şebekenin senkronizasyonu sağlanır ve enerji ihtiyacı hem ulusal şebekeden hem de DJ'lerden karşılanmış olur [108].

KET sistemi ile gemi limanda iken ana makinenin yanı sıra yardımcı makineleri de çalışmayacaktır. Bu sayede gemideki gürültü, titreşim ve yakıt tüketimi azalacaktır. Bununla birlikte, gemi yardımcı makinelerinin kullanılmamasından dolayı birçok limanda egzoz gazı salımı ve gemilerdeki bakım, işletim ve enerji maliyetleri de dolaylı olarak azalacaktır [109].



Şekil 2.8 KET sistemi mimarisi

Türkiye'de de KET uygulaması ile ilgili farkındalık oluşmaya başlamıştır. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, Tersaneler ve Kıyı Yapıları Genel Müdürlüğü, "80635150-010-3004" sayılı Kıyıda Enerji Temini uygulama talimatı ile liman idari birimlerinin, terminal işletmecilerinin, donatanların, gemi işletmecilerinin ve diğer ilgililerin limanlardan gemilere enerji temini hususunda IMO tarafından yayımlanan "MEPC.1/Circ.794" sayılı sirküleri dikkate almalarını tavsiye etmiştir [110].

2.5 Akıllı Şebeke Sistemi

Günümüzde mevcut elektrik şebekesi fosil yakıtlar, su, doğalgaz ve nükleer enerji ile çalışan enerji santralleri ile beslenmektedir. Üretilen elektrik enerjisi iletim ve dağıtım hatları ile desteklenerek tüketicilerin kullanımına sunulmaktadır. Mevcut sistem enerji santralleri ile ulusal şebeke arasındaki sürekliliği, güvenirliliği ve piyasa dengesini sağlamak için sınırlı sayıda otomasyon sistemleri ile donatılmıştır. Bu nedenle oluşabilecek büyük çaplı elektrik enerjisi arızalarında şebeke sistemi ile enerji santrallerinin koordinasyonu yetersiz kalabilmektedir.

Hızlı gelişmelerin yaşandığı bilgi ve iletişim teknolojileri sayesinde "Akıllı Şebeke" kavramı elektrik enerjisi sektörüne yeni bir bakış açısı getirmiştir. Mevcut elektrik şebekesinin kapasite eksiklikleri, iletim ve dağıtım hatlarındaki termal kısıtlar, operasyonel kısıtlar, gerçek zamanlı izleme ve kontrol kısıtları gibi konular akıllı şebeke kavramı ile çözüme kavuşturulmaya başlanmıştır. Bu kapsamda, birçok ülke akıllı şebeke girişimlerini teşvik etmek, yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye bağlantısını sağlamak, ihtiyaç duyulacak ürünleri geliştirmek, ticari fırsatlar elde etmek ve mevcut elektrik şebekesini yenilemek için yol haritaları belirlemişlerdir.

AB tarafından Akıllı Şebeke Platformu oluşturularak geleceğin elektrik şebeke sistemleri için stratejik hedefler ortaya konmuştur. Belirlenen hedeflerde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, karbon salımlarının azaltılması ve enerji verimliliği konuları ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, hedeflerin gerçekleşmesi için gerekli düzenlemelerin 2050 yılına kadar yapılacağı belirtilmiştir.

ABD, mevcut elektrik şebekesinin bilgi ve iletişim teknolojileri ile modernize edilmesi, enerji kaynaklarının optimizasyonu, dağıtılmış üretim kaynaklarının sisteme bağlantısı ve enerji depolama teknolojilerinin geliştirilmesi gibi faaliyetleri gerçekleştirmek üzere çeşitli düzenlemeler yapmıştır.

Birleşik Krallık, düşük karbonlu, az maliyetli ve yüksek güvenlikli şebeke sistemine geçiş için yol haritası belirlemiştir. Öncelikli olarak fosil kaynaklı enerji santrallerinin azaltılması, yenilenebilir enerji kaynaklarından kesintisiz güç

sağlanması, dağıtılmış üretim ve enerji depolama sistemlerinin şebekeye bağlantısı ve elektrikli taşıtların yaygınlaştırılması hedeflenmiştir.

Japonya, 2020 yılına kadar karbon salımının 2005 yılına göre %65 oranında azaltılması için yüksek kapasiteli yenilenebilir enerji kaynaklarının ve özellikle güneş enerjisinin şebekeye bağlantısını planlamaktadır.

Çin Halk Cumhuriyeti ise 2020 yılına kadar 2008 yılındaki karbon emisyon salımını %40 ila 45 oranında azaltmak için orta ve uzun vadeli yol haritası belirlemiştir [111].

Türkiye'de de akıllı şebeke sistemine geçiş için gerekli çalışmalar başlamıştır. Türkiye Akıllı Şebekeler 2023 Vizyon ve Strateji Belirleme Projesi kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye bağlantısı, enerji verimliliğinin ve kalitesinin artırılması, tüketicilerin sistemde etkin rol oynaması gibi konular hedeflenmiştir [112].

2.5.1 Akıllı Şebeke Mimarisi

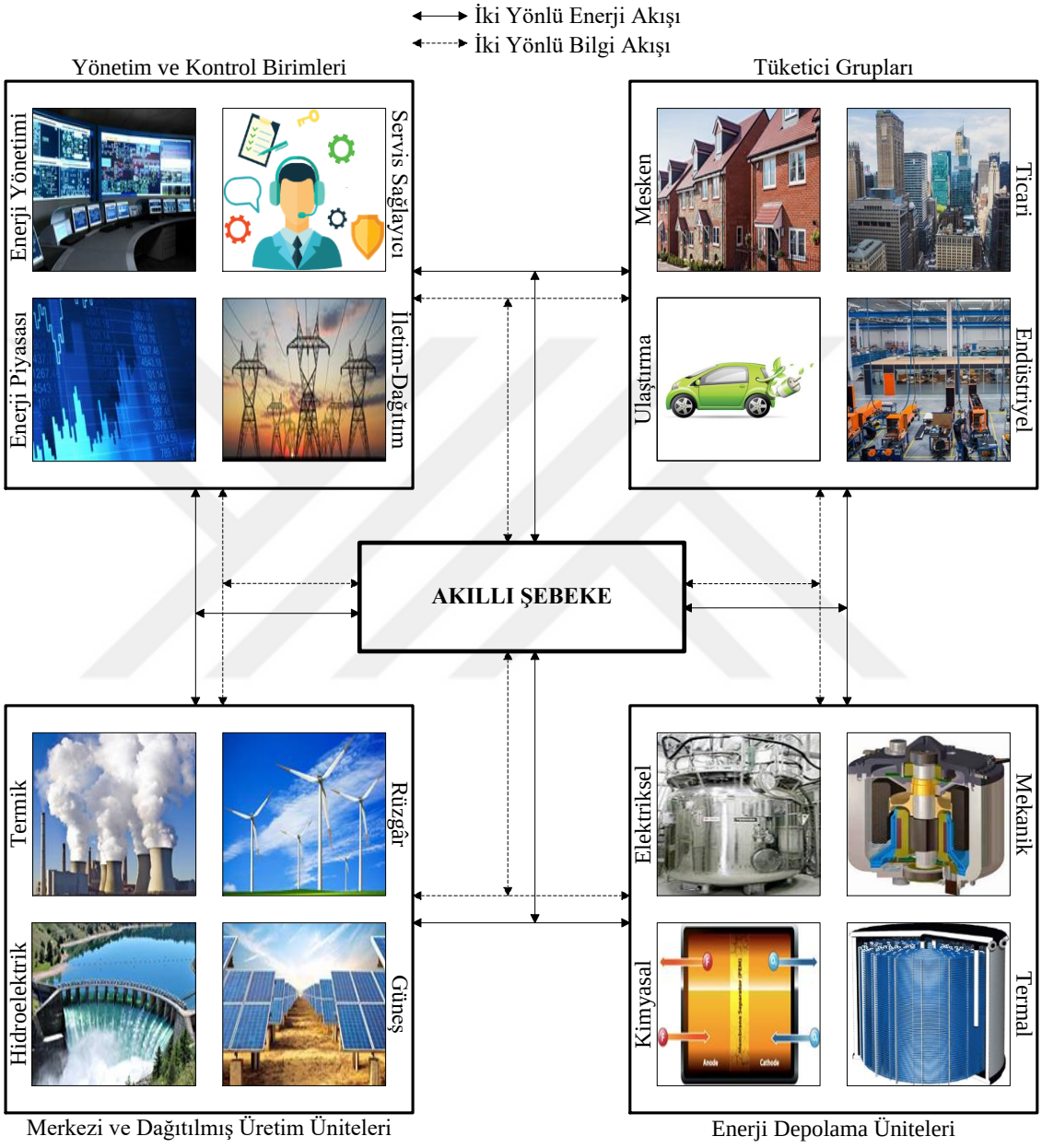
Literatürde akıllı şebeke kavramı ile ilgili çeşitli tanımlamalar yapılmıştır. Akıllı şebeke sistemi genel anlamda elektrik enerjisinin üretiminden tüketimine kadar tüm aşamalarında gerçek zamanlı izlenmesi ve kontrol edilmesidir. Şebeke güvenliğinin ve verimliliğinin artırılması, dağıtılmış üretim kaynaklarının, enerji depolama sistemlerinin ve elektrikli taşıtların şebekeye bağlanması, üretici ile tüketici arasında iki yönlü enerji ve iletişim akışının sağlanması için geleneksel elektrik şebekesinin ileri algılama, kontrol ve iletişim teknolojileri kullanılarak modernize edilmesidir. Bu kapsamda geleneksel elektrik şebeke sistemi ile akıllı şebeke sistemi arasında temel farklılıklar (Tablo 2.3) bulunmaktadır [113].

Tablo 2.3 Geleneksel elektrik şebeke sistemi ile akıllı şebeke sisteminin karşılaştırılması

Kriterler	Geleneksel Şebeke	Akıllı Şebeke
Enerji Üretimi ve Depolama	Büyük oranda merkezidir. Dağıtılmış üretim ve depolama azdır.	Merkezi değildir. Dağıtılmış üretim ve depolama yaygındır. Kullanımı kolaydır.
Güç Kalitesi	Öncelikle kesintilere odaklıdır. Sorunlara karşı yavaş tepki verir.	Öncelikle kalite odaklıdır. Sorunlara karşı hızlı tepki verir.
Doğal Felaketlere Karşı Dayanıklılık	Savunmasızdır. Yavaş tepki verir.	Dirençlidir. Hızlı tepki verir.
Siber Saldırılara Karşı Dayanıklılık	Savunmasızdır. Yavaş tepki verir.	Dirençlidir. Hızlı tepki verir.
Kendi Kendini İyileştirme	Arızanın büyümesini önler.	Arızayı tespit edip, iyileştirir.
Optimizasyon ve Verimlilik	Veri kullanımı ve verimlilik azdır.	Tüketiciye olumsuz etkiyi en aza indirmek için geniş veri kullanımı sağlar. Daha verimlidir.
Yeni Ürün, Hizmet ve Pazar Seçeneği	Ürün ve hizmet kısıtlıdır. Tüketici için sınırlı fırsatlar sunar.	Gelişmiş enerji piyasası ile tüketicilere geniş fırsatlar sunar.
Tüketici	Bilgilendirilmez ve katılımcı değildir.	Bilgilendirilir ve aktif katılımı sağlanır.

Akıllı şebeke mimarisinde, son kullanıcı akıllı sayaç ve akıllı uygulamalar sayesinde tüketim alışkanlıklarını şebekenin durumuna göre planlayabilecek, enerji piyasasından anlık fiyat ve teşvik bilgilerine erişebilecektir. Yenilenebilir enerji kaynakları, dağıtılmış üretim kaynakları ve enerji depolama sistemleri "bağlan ve kullan" mantığı temel alınarak basit bağlantı elemanları ile sisteme bağlanabilecektir. Bu sayede enerji kullanımının optimizasyonu ve verimliliği artırılmış olacaktır. Ayrıca, tahmin yöntemleri kullanılarak sistemdeki arızaların önüne geçilebilecek, elektrik şebekesi siber saldırılara ve doğal afetlere karşı daha güvenilir olacaktır [114].

Akıllı şebeke mimarisinin temel bileşenleri (Şekil 2.9) genel olarak elektrik enerjisinin izlendiği ve kontrol edildiği yönetim ve kontrol birimlerinden, merkezi ve dağıtılmış üretim kaynaklarından, enerji depolama sistemlerinden ve farklı alanlarda elektrik enerjisine ihtiyaç duyan tüketici gruplarından oluşmaktadır.



Şekil 2.9 Akıllı şebeke mimarisi temel bileşenleri

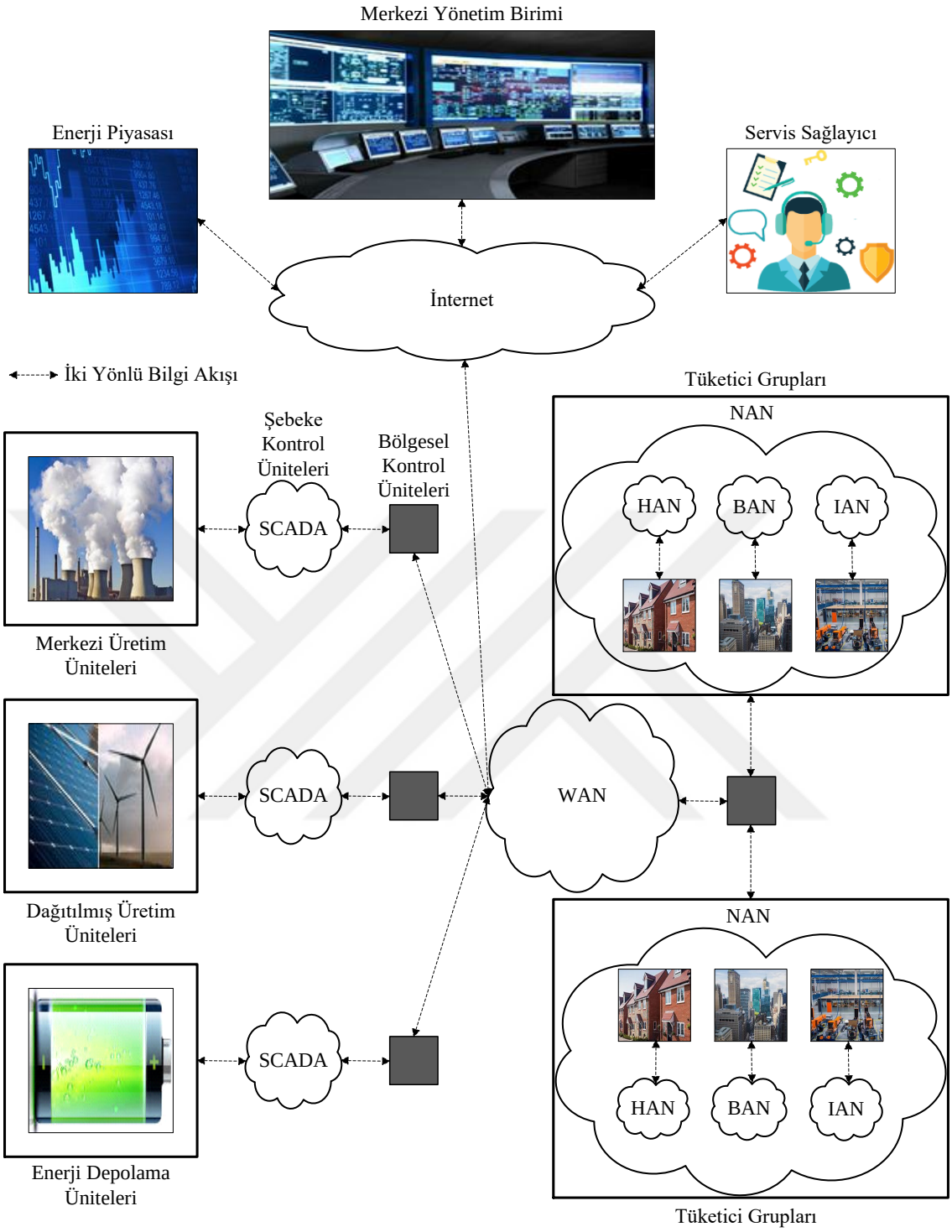
Teknolojide yaşanan hızlı gelişmeler, yenilenebilir enerji kaynaklarının ulusal şebeke sistemine dâhil edilmesi, enerji piyasasındaki değişimler ve farklı tipteki tüketici davranışlarının artması gibi konulardan dolayı mevcut elektrik

şebekesinde karşılaşılan zorluklar akıllı şebeke mimarisinin oluşmasını gerekli kılmaktadır. Geleceğin elektrik şebeke sistemi olarak isimlendirilen akıllı şebeke sistemi ile iki yönlü enerji ve bilgi akışı, gerçek zamanlı izleme, enerji yönetimi ve enerji tahmini gibi özellikler kullanılarak, mevcut elektrik şebekesinin ve enerji sektörünün yeniden yapılandırılması ve optimize edilmesi amaçlanmaktadır.

2.5.2 Akıllı Şebeke Bilgi ve İletişim Mimarisi

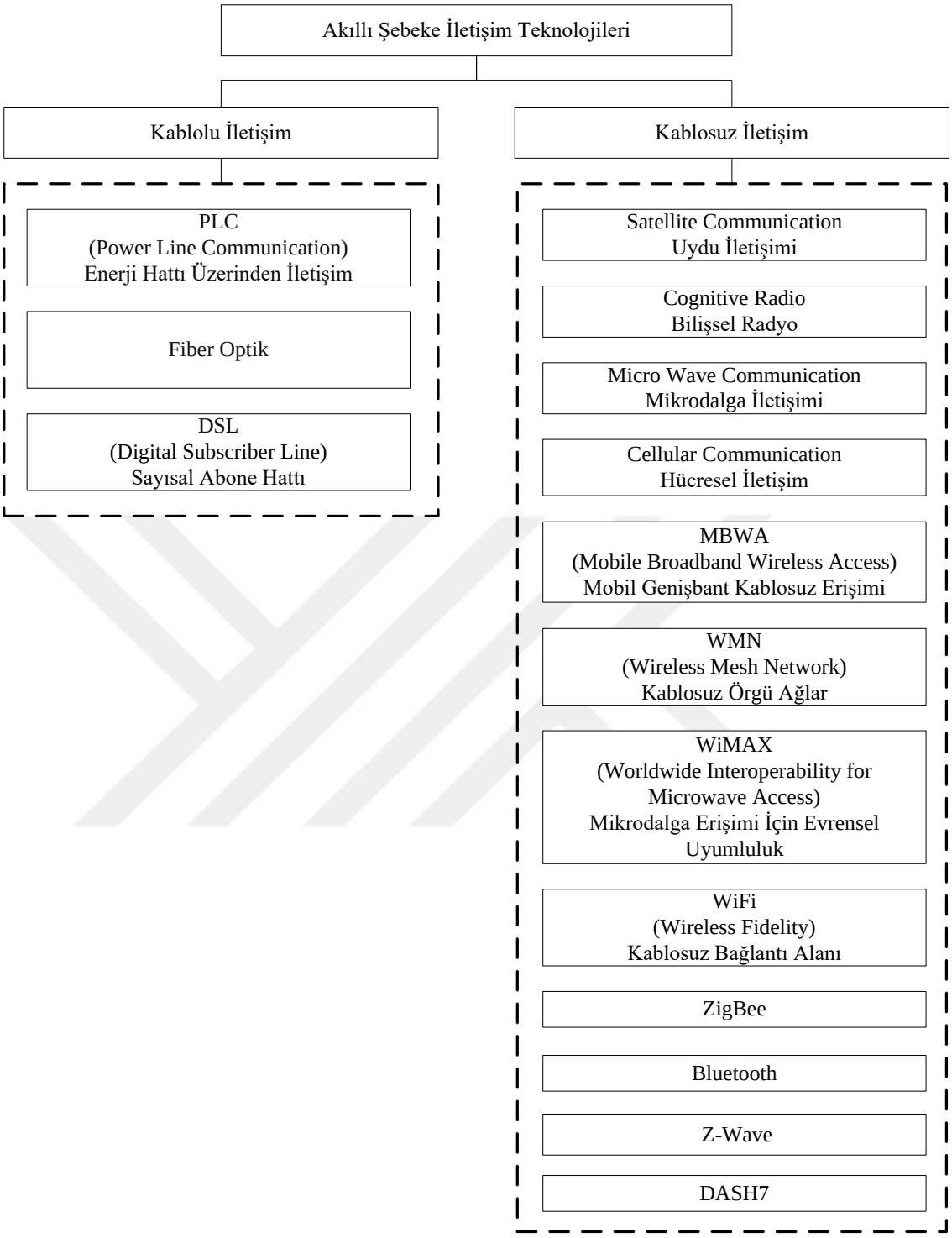
Akıllı şebeke kavramında elektrik enerjisinin üretiminden tüketimine kadar geçen sürede önemli görülen noktaların ölçülmesi, izlenmesi ve kontrol edilmesi gerekmektedir. Geleneksel elektrik şebekesinin iletişim altyapısı, merkezi denetleme, kontrol ve veri toplama sistemi olarak isimlendirilen SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistemi ve geniş alan ağı olarak isimlendirilen WAN (Wide Area Network) haberleşme ağından oluşmaktadır. SCADA sistemi ile merkezi üretim ve ana transformatör noktaları gibi büyük ölçekli güç ünitelerinin izlenmesi sağlanır. WAN haberleşme ağı ile de şebeke sisteminin ve enerji piyasasının koordinasyonu sağlanır.

Akıllı şebeke kavramında elektrik enerjisinin üretim, iletim, dağıtım ve tüketim aşamalarının kontrol edilmesi ve iki yönlü enerji ve bilgi akışının sağlanması için farklı haberleşme ağı teknolojileri (Şekil 2.10) bir arada kullanılmaktadır. Farklı teknolojilerin kullanılmasının en temel sebebi ise enerjinin üretiminden tüketimine kadar geçen sürede veri akışının aksamadan iletilmesi gerekliliğidir. Farklı bölgelerdeki enerji santrallerinin birbiri ile koordinasyonu için iletim hattında WAN tercih edilmektedir. Dağıtım hattı ile tüketici arasındaki bağlantı için semt alan ağları olarak isimlendirilen NAN (Neighbourhood Area Network) ön plana çıkmaktadır. Tüketici olarak tanımlanan endüstri tesisleri için endüstriyel alan ağı olarak isimlendirilen IAN (Industrial Area Network), binalar için bina alan ağı olarak isimlendirilen BAN (Building Area Network), evler için ise ev alan ağı olarak isimlendirilen HAN (Home Area Network) haberleşme ağı tercih edilmektedir [115].



Şekil 2.10 Akıllı şebeke haberleşme ağı mimarisi

Akıllı şebekede haberleşme ağları için kablolu ve kablosuz olmak üzere çeşitli iletişim teknolojileri (Şekil 2.11) tercih edilmektedir [116].



Şekil 2.11 Akıllı şebeke iletişim teknolojileri

Kablolu iletişim teknolojileri enerji hattı üzerinden iletişim, fiber optik ve sayısal abone hattı olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır.

Enerji Hattı Üzerinden İletişim (PLC): PLC teknolojisi ile enerji iletim hattı aynı zamanda veri iletimi için de kullanılmaktadır. Elektrik sayaçları ile doğrudan bağlanabildikleri için öncelikli tercih sebebidir. Akıllı şebeke açısından PLC iletişim teknolojisi, düşük maliyetli olması nedeniyle enerji iletim hatlarında tercih edilebilir.

Fiber Optik İletişim: Fiber optik iletişimde belirli dalga boylarındaki ışınım sinyalleri kullanılarak veriler bir noktadan başka bir noktaya taşınmaktadır. Güvenilir veri iletimi sağlayacak iletişim altyapılarından biridir. Bu teknoloji, radyo frekansı ve diğer elektromanyetik parazitlere karşı oldukça dayanıklıdır. Neredeyse sınırsız bant genişliği sağlayarak kaliteli hizmet sunar. Fiber optik bölücüler kullanılarak bir merkezden tüketiciye ulaşmayı sağlayan pasif optik ağ sistemleri sayesinde iletim ve dağıtım hatlarında kullanılması mümkündür. Akıllı şebeke açısından fiber optik iletişim teknolojisi, birkaç kilometrelik mesafelerde ekonomik ve güvenilir bir çözüm sunabilir.

Sayısal Abone Hattı (DSL): Sayısal abone hattı, mevcut telefon hatları üzerinden veri aktarımına izin veren iletişim teknolojisidir. Ses ve veri iletimi için farklı frekanslar kullanıldığından bakır telefon kabloları üzerinden hem ses hem de internet iletimi gerçekleştirilir. DSL iletişim teknolojisi, mevcut kablolu iletişim altyapısının kullanılması nedeniyle akıllı şebeke açısından avantajlı, basit ve ekonomik olabilir [117].

Kablosuz iletişim teknolojileri ise uydu iletişimi, bilişsel radyo, mikrodalga iletişimi, hücresel iletişim, mobil genişbant kablosuz erişimi, kablosuz örgü ağlar, mikrodalga erişimi için evrensel uyumluluk, kablosuz bağlantı alanı, zigbee, bluetooth, z-wave ve DASH7 olmak üzere oniki kısımdan oluşmaktadır.

Uydu İletişimi: Uydu iletişimi gerçek zamanlı uzaktan erişim, kontrol ve izleme için en iyi çözümü sağlamaktadır. Uydu iletişim teknolojisi, akıllı şebeke açısından özellikle dağıtılmış üretim kaynakları ve transformatör merkezlerinin iletişim ve koordinasyonu için uygun maliyetli bir çözüm sunabilir.

Bilişsel Radyo: Bilişsel radyo bulunduğu ortamı algılayabilen ve en iyi çıkarımı yapabilen akıllı radyo iletişim teknolojisidir. Bu sistemler bilgi tanımlaması, otomatik çıkarım ve makine öğrenme algoritmalarını kullanarak az kullanılan bir radyo spektrumunun dinamik, verimli ve güvenilir bir şekilde kullanımına imkân verir. Bilişsel radyo iletişim teknolojisi, akıllı şebeke açısından kontrol merkezi ile son kullanıcı arasındaki sensörlerin iletişimini sağlaması ve güvenliğini arttırması konularında çözüm sunabilir.

Mikrodalga İletişimi: Mikrodalga iletişim teknolojisi yüksek bant genişliklerinde bir noktadan diğer noktaya güvenli veri aktarımı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Mobil baz istasyonlarının yarıdan fazlası bu teknoloji ile donatılmıştır. Yaklaşık 80 km'lik mesafeye kadar iletişim sağlayabilir. Mikrodalga iletişim teknolojisi, akıllı şebeke açısından dağıtılmış üretim kaynakları ile akıllı sayaçlar arasındaki koordinasyon için çözüm sunabilir.

Hücresel İletişim: Hücresel iletişim teknolojisi, veri aktarımı konusunda gelişmiş altyapıya sahiptir. Günümüzde 2G, 2,5G, 3G, 4G, 4.5G, GSM, LTE ve WiMAX gibi hücresel iletişim teknolojileri mevcuttur. Hücresel iletişim teknolojisi, akıllı şebeke açısından enerji kontrol üniteleri ve akıllı sayaçlar arasındaki koordinasyon için iyi bir çözüm sunabilir.

Mobil Genişbant Kablosuz Erişimi (MBWA): Mobil genişbant kablosuz erişimi iletişim teknolojisi, "IEEE 802.20" standardını referans alan, yüksek bant genişliği, düşük gecikme ve yüksek hareket hızına sahiptir. MBWA iletişim teknolojisi, akıllı şebeke açısından SCADA sistemlerinde, şebekenin izlenmesinde ve elektrikli taşıt şarj istasyonlarında tercih edilebilir.

Kablosuz Örgü Ağlar (WMN): Kablosuz örgü ağlar iletişim teknolojisi, dinamik olarak kendini organize edebilen, iyileştirebilen ve yapılandırabilen yeni nesil kablosuz ağ iletişim teknolojisidir. Bu özellikleri sayesinde güvenilir şebeke kapsama alanı, yük dengeleme ve yüksek performans sağlar. WMN iletişim teknolojisi, akıllı şebeke açısından ev enerji yönetim sistemleri ve akıllı sayaçlar gibi ileri ölçüm altyapısında kullanılabilir.

Mikrodalga Erişimi İçin Evrensel Uyumluluk (WiMAX): Mikrodalga erişimi için evrensel uyumluluk iletişim teknolojisi, 10 km'ye kadar kapsama alanı sağlar. WiMAX iletişim teknolojisi, akıllı şebeke açısından dağıtım sisteminin kontrolünde hücresel ve kablolu iletişim teknolojilerine göre daha uygun ve etkili çözümler sunabilir.

Kablosuz Bağlantı Alanı (WiFi): Kablosuz bağlantı alanı, kablosuz yerel alan ağları için kullanılan iletişim teknolojileridir. Günümüzde dizüstü bilgisayarlar, akıllı cep telefonları gibi taşınabilir donanımların kablosuz olarak yerel alan ağına bağlanabilmesini sağlamaktadır. WiFi iletişim teknolojisi, akıllı şebeke açısından elektrikli taşıt ile şebeke arasındaki koordinasyonu sağlamada çözüm sunabilir.

ZigBee: ZigBee iletişim teknolojisi, 100 m'lik kapsama alanına kadar düşük veri hızı ile gerçekleştirilebilen uygulamalarda ideal bir çözüm sunar. Kurulum maliyeti ve güç tüketimi açısından önemli bir avantaja sahiptir. ZigBee iletişim teknolojisi, akıllı şebeke açısından enerji izleme, ev otomasyonu, yük kontrolü ve uzaktan sayaç okuma uygulamaları için kullanılabilir.

Bluetooth: Bluetooth iletişim teknolojisi, kısa mesafeli uygulamalarda düşük güçlü radyo frekansına sahip kişisel kablosuz alan ağı standardıdır. Bluetooth iletişim teknolojisi, akıllı şebeke açısından transformatör otomasyonunda bölgesel çevrimiçi izleme için çözüm sunabilir.

Z-Wave: Z-Wave iletişim teknolojisi, düşük maliyetli olması ve kullanım kolaylığı sunması ile özellikle ev otomasyonlarında ZigBee'ye alternatif olarak tercih edilmektedir. Z-Wave iletişim teknolojisi, akıllı şebeke açısından akıllı ev otomasyonunda elektrikli donanımların bağımsız olarak ya da grup halinde birbiriyle haberleşmesini sağlayarak etkin bir enerji yönetimi sunabilir.

DASH7: DASH7 iletişim teknolojisi, özellikle ticari uygulamalar için düşünülmüş kablosuz bir sensör ağı teknolojisidir. 5 km'ye kadar kapsama alanına sahiptir. DASH7 iletişim teknolojisi, akıllı şebeke açısından ZigBee'ye alternatif olarak tercih edilmekte ve şebekeden şarj edilen hibrit elektrikli taşıtlar için çözüm sunmaktadır [118].

Kablosuz iletişim teknolojisi hareket kabiliyeti, yenilenme ve maliyet gibi konularda kablolu iletişime göre daha avantajlıdır. Özellikle, uzaktan kontrol uygulamalarında önemli faydalar sağlamaktadır.

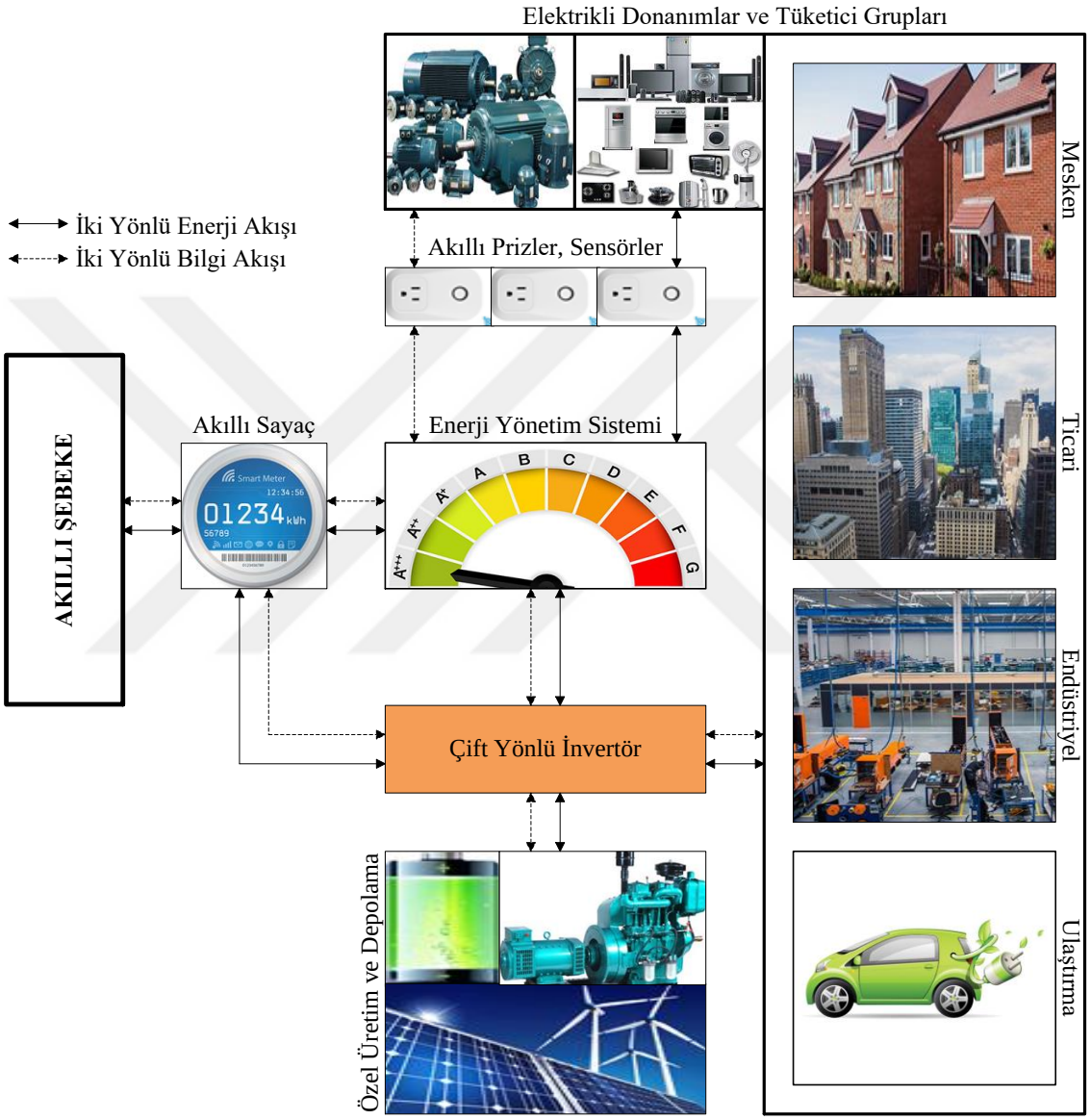
2.5.3 Akıllı Şebeke Güvenlik Mimarisi

Akıllı şebeke kavramı ile çok sayıda donanımın birbiri ile etkileşiminin sağlanması, iki yönlü enerji ve veri akışının desteklenmesi, etkin bir enerji ölçümünün yapılması ve en uygun enerji yönetiminin gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Bu nedenle, akıllı şebeke sistemi olası tüm tehditlere karşı etkin bir koruma sistemine sahip olmalıdır. En önemli güvenlik konuları erişilebilirlik, bütünlük ve gizlilik olarak sıralanabilir. ABD Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST), güvenlik konularını siber güvenlik ve fiziksel güvenlik olmak üzere iki ana başlıkta tanımlamıştır. Siber güvenlik konuları bilgi ve iletişim sistemlerinin gerekli yazılımlar ile korunmasını içermektedir. Fiziksel güvenlik konuları ise sisteme bağlı aygıtların, akıllı sayaçların ve güç sistemini oluşturan diğer bileşenlerin korunması konularını kapsar [119]. Akıllı şebeke sistemi için tehdit oluşturacak güvenlik problemleri iletişim veya aygıt kaynaklı olabilir. Protokol arızaları, fiziksel saldırılar ve doğal afetler gibi konular iletişim tabanlı güvenlik problemleridir. Aygıt tabanlı güvenlik problemleri ise sahte erişim noktası, sahte hizmet kullanımı, fiziksel saldırılar ve doğal afetlerdir. Bu kapsamda akıllı şebeke sistemi bileşenlerini güvenli hale getirmek için birçok şifreleme ve doğrulama yöntemi içeren güvenlik konuları araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Sistemdeki tehdit risklerini azaltan, anormal davranışları belirleyen, kendi kendini iyileştirebilen, geçmişte yaşanan arızaları analiz ederek veya öngörülere dayanarak oluşabilecek arızalara yönelik tedbir alan yöntemler geliştirilmektedir [120].

2.5.4 Akıllı Şebeke Enerji Ölçümü, Kontrolü ve Yönetimi Mimarisi

Akıllı şebeke, mevcut elektrik şebekesine ek olarak iki yönlü iletişim ve güç akışı sağlaması, dağıtılmış üretim kaynaklarını sisteme dâhil etmesi, sensörler aracılığı ile kendini kontrol etmesi, iyileştirmesi, uzaktan izlemesi ve ölçmesi için akıllı elektronik donanımlar ve dijital teknolojilerle donatılmıştır [121].

Akıllı şebeke enerji ölçümü, kontrolü ve yönetimi mimarisi (Şekil 2.12) genel olarak tüketici grupları ile akıllı şebeke sistemi arasındaki bağlantıyı sağlayan akıllı sayaç üniteleri ve tüketicinin elektrik enerjisi ihtiyacının üretim ve depolama ünitelerinden en uygun şekilde karşılanmasını sağlayan enerji yönetim sistemlerinden oluşmaktadır.



Şekil 2.12 Akıllı şebeke enerji ölçümü, kontrolü ve yönetimi mimarisi

Üretici ve tüketici arasındaki iki yönlü enerji ve bilgi akışı, ileri ölçüm altyapısına sahip akıllı sayaç teknolojisi ile sağlanır. Tüketiciden toplanan veriler akıllı sayaç aracılığı ile şebekeye iletilirken, şebeke tarafındaki bilgilerde güvenli bir şekilde tüketiciye aktarılır. Akıllı sayaçlar enerji kesintilerini tespit etme, uzaktan enerji

sağlama, enerjiyi açma ve kesme, güç kalitesini ölçme, enerji yönetimini sağlama ve şebeke durumuna göre farklı fiyat tarifeleri ve kampanyalar sunma işlemlerini gerçekleştirir.

Akıllı şebeke sistemleri için birçok ülkede ilk aşamada akıllı sayaç kullanımı teşvik edilmeye başlanmıştır. Bu durum akıllı şebeke sistemleri için önemli bir adımdır. İkinci aşamada akıllı sayaç kullanan tüketicilere, üretecekleri fazla enerjiyi satma imkânı sunulacak ve iki yönlü enerji ve bilgi akışı tam anlamıyla sağlanmış olacaktır.

Akıllı şebeke sistemi ile tüketici durumundaki ticari ve endüstriyel işletmelerin yanı sıra konutlar da enerji üretim ve tüketim planlamasında önemli bir yere sahiptir. Tüm tüketici grupları için enerjinin optimum kullanımı amaçlanmakta ve çeşitli ihtiyaçlara göre farklı enerji yönetim sistemleri geliştirilmektedir. Enerji yönetim sistemleri tüketicilerin enerji ihtiyacına göre şebeke sistemi, yenilenebilir enerji kaynakları, enerji depolama sistemleri ve jeneratörler gibi mevcut enerji üretim kaynaklarını dikkate alarak enerji akışının kontrolünü sağlamaktadır.

Genel olarak enerji yönetim sistemleri haberleşme yeteneğine sahip donanımlar, kablosuz sensör ağları ve yönetim panelinden oluşur. Enerji yönetim sistemleri üretim, tüketim ve depolama ünitelerini kontrol eder. Ayrıca, kullanıcı talebine göre geliştirilen algoritmalar ile enerji verimliliği, enerji kalitesi ve konfor sağlar.

Kullanılacak elektrikli donanım devreye bağlanmak için enerji yönetim paneline istek gönderir. Gelen istek üzerine yönetim paneli sensörler ve akıllı sayaç aracılığı ile mevcut enerji üretim kaynaklarını ve şebekeyi kontrol etmek, kapasitelerini hesaplamak ve kullanım uygunluğunu belirlemek için üretim kaynaklarına istek gönderir. Kaynaklardan gelen cevaba ve enerji yönetim sisteminde tanımlanan algoritmaya göre en uygun enerji üretim kaynağı belirlenerek tüketicinin enerji ihtiyacı karşılanır [122].

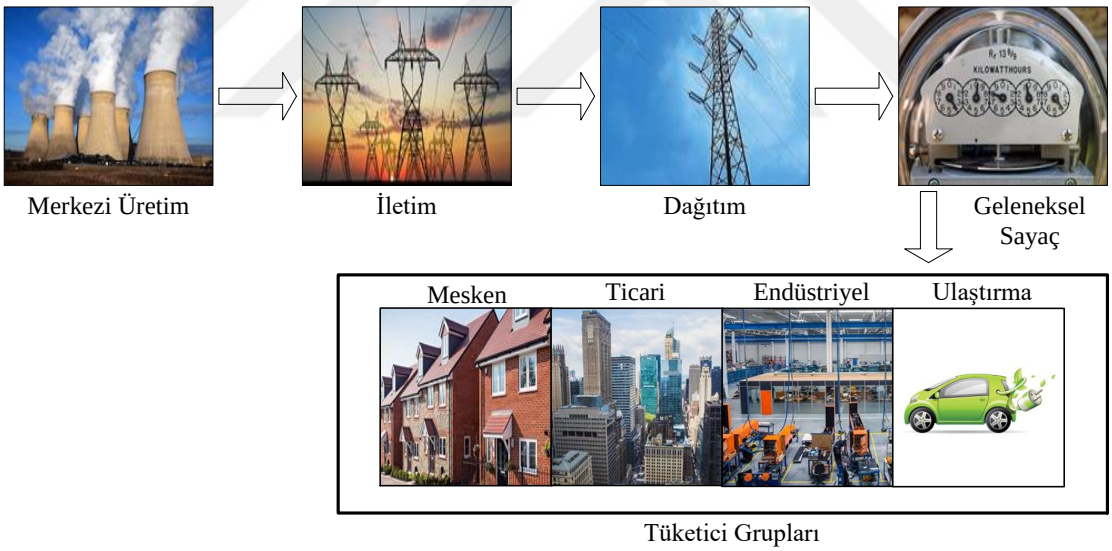
Akıllı şebeke sistemi yeni ve gelişen bir kavram olduğu için farklı alanlarda farklı ihtiyaçlara çözümler sunacak enerji yönetim sistemleri sürekli araştırılmakta ve geliştirilmektedir.

2.5.5 Akıllı Şebeke Enerji Piyasası Mimarisi

Akıllı şebeke sisteminde enerji piyasası mimarisi üretici ve tüketici menfaatlerini karşılıklı koruma prensibine dayanmaktadır. Bu mimaride, akıllı şebeke ve enerji piyasası arasında bilgi ve iletişim teknolojileri kullanılarak sürekli koordinasyon sağlanır. Yenilenebilir enerji kaynakları ile şebekeye enerji sağlayan üreticilerin aktif bir şekilde sistemde kalması sağlanır. Üretim ve tüketim dengesini gerçeğe yakın tahmin edecek yöntemler geliştirilir. Tüketicilerin enerji kullanım alışkanlıklarını ve enerji kullanım sürelerini değiştirmeye yönelik tarifeler ve kampanyalar planlanır. Üretici ve tüketicinin devlet teşvikleri ile motive edilmesi sağlanır [123].

2.5.6 Akıllı Şebeke Üretim, İletim ve Dağıtım Mimarisi

Geleneksel elektrik şebekesi üretim, iletim ve dağıtım mimarisinde (Şekil 2.13) elektrik enerjisi merkezi üretim ünitelerinden son kullanıcıya kadar tek yönlü olarak taşınmaktadır.



Şekil 2.13 Geleneksel şebeke üretim, iletim ve dağıtım mimarisi

Akıllı şebeke üretim, iletim ve dağıtım mimarisinde (Şekil 2.14) ise enerjinin üretimi, iletimi, dağıtımı, depolanması ve tüketimi gibi her aşamada bilgi ve iletişim teknolojisi kullanılarak enerji izlenmekte ve kontrol edilmektedir. Bu sayede, sistemde tüketiciye önemli bir rol verilerek, üretici ve tüketici etkileşimi

sağlanmaktadır. Ayrıca, elektrik enerjisi daha verimli, kaliteli, güvenli ve esnek bir yapıya kavuşmaktadır [124].



Şekil 2.14 Akıllı şebeke üretim, iletim ve dağıtım mimarisi

Üretim ve Depolama Alanı: Elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanması için petrol, kömür, su ve nükleer gibi geleneksel birincil enerji kaynaklarını, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını ve üretilen fazla enerjinin saklanmasını sağlayan enerji depolama sistemlerini oluşturan kısımdır.

İletim Alanı: Transformatör merkezleri ve iletim hatları ile elektrik enerjisini dağıtım hatlarına aktaran kısımdır. Küçük ölçekli enerji üretim ve depolama birimlerini de desteklemektedir.

Dağıtım Alanı: Son kullanıcıların enerji ihtiyacının karşılandığı kısımdır. Dağıtılmış üretim ve depolama ünitelerini de desteklemektedir.

Merkezi Yönetim Birimi: Enerji yönetim sistemleri ile iletim ve dağıtım alanlarındaki enerji akışının verimli bir şekilde izlendiği, yönetildiği ve kontrol edildiği kısımdır.

Enerji Piyasası Alanı: Elektrik enerjisinin üretim ve tüketim dengesinin finansal olarak sağlandığı kısımdır. Büyük enerji sağlayıcıları, perakende enerji sağlayıcıları, bireysel sağlayıcılar ve tüketicilerden oluşmaktadır.

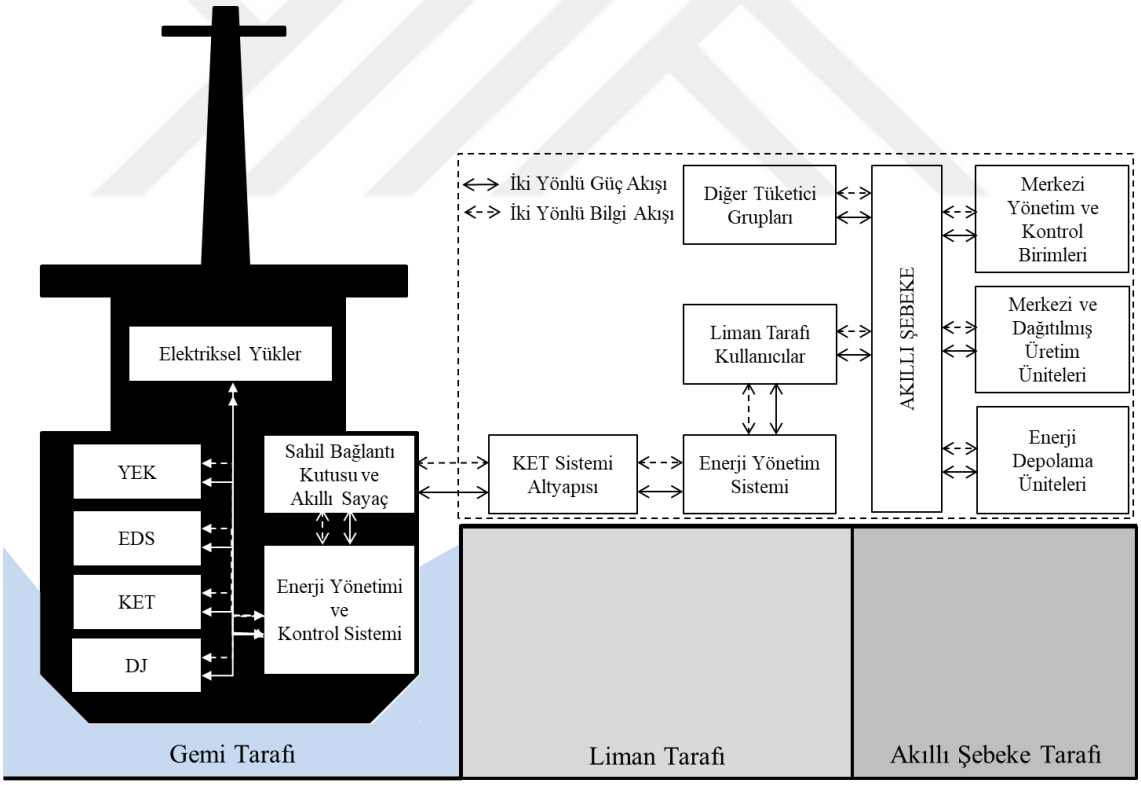
Servis Sağlayıcı Alanı: Tüketicilere elektrik enerjisinin kesintisiz sağlandığı ve faturalandırma işlemlerinin gerçekleştirildiği kısımdır.

Tüketici Alanı: Elektrik enerjisini tüketen, depolayan ve aynı zamanda şebekeye satan kısımdır [125].

3
Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Sistemi

3.1 Gemi, Liman ve Akıllı Şebeke Bağlantısı

Gemi, liman ve akıllı şebeke bağlantısındaki en önemli bileşen Kıyıdan Enerji Temini (KET) sistemidir. Önerilen modelde, akıllı şebeke sistemine ait iki yönlü veri akışı, iki yönlü güç akışı, gerçek zamanlı izleme ve enerji yönetimi gibi özellikler kullanılarak, gemi hem liman hem de akıllı şebeke ile anlık olarak iletişime geçebilecek ve elektrik enerjisi ihtiyacını etkin bir şekilde karşılamış olacaktır. Gemi, liman ve akıllı şebeke tasarımı için önerilen gemi elektrik enerjisi yönetim sistemi modeli Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

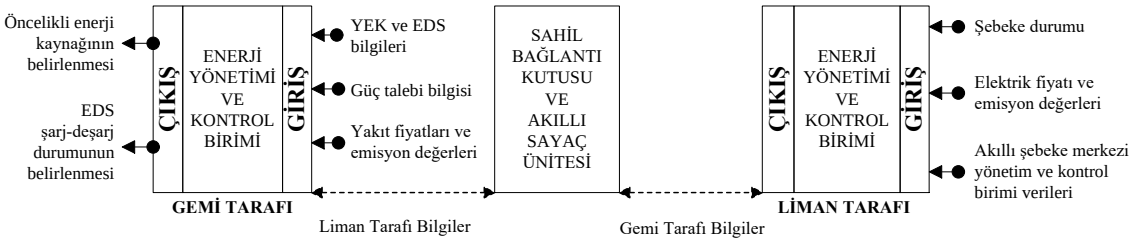


Şekil 3.1 Gemi elektrik enerjisi yönetim sistemi modeli

Önerilen gemi elektrik enerjisi yönetim sistemi modelinde gemi tarafı, liman tarafı ve akıllı şebeke tarafı olmak üzere üç bölge iletişim halinde olmaktadır. Gemi ve liman tarafında bulunan enerji yönetim birimleri gemi ve akıllı şebeke tarafından elektriksel, finansal ve çevresel verileri toplamakta, güç akışını kontrol etmekte ve mevcut enerji kaynaklarının durumunu izlemektedir.

Gemi tarafındaki enerji yönetim sistemi, gemideki güç ihtiyacını, YEK ve EDS kapasitelerini, gerilim seviyesini, frekans değerini, jeneratörlerde kullanılan deniz yakıtı tipine göre birim enerji maliyetini ve birim egzoz gazı emisyonlarını hesaplamaktadır. Aynı zamanda sahil bağlantı noktasına yerleştirilen akıllı sayaç ile liman ve akıllı şebeke tarafına bağlanarak şebekenin müsaitliğini, birim enerji maliyetini ve birim emisyon salımı değerlerini kontrol etmekte ve ihtiyaç duyulan verileri temin etmektedir.

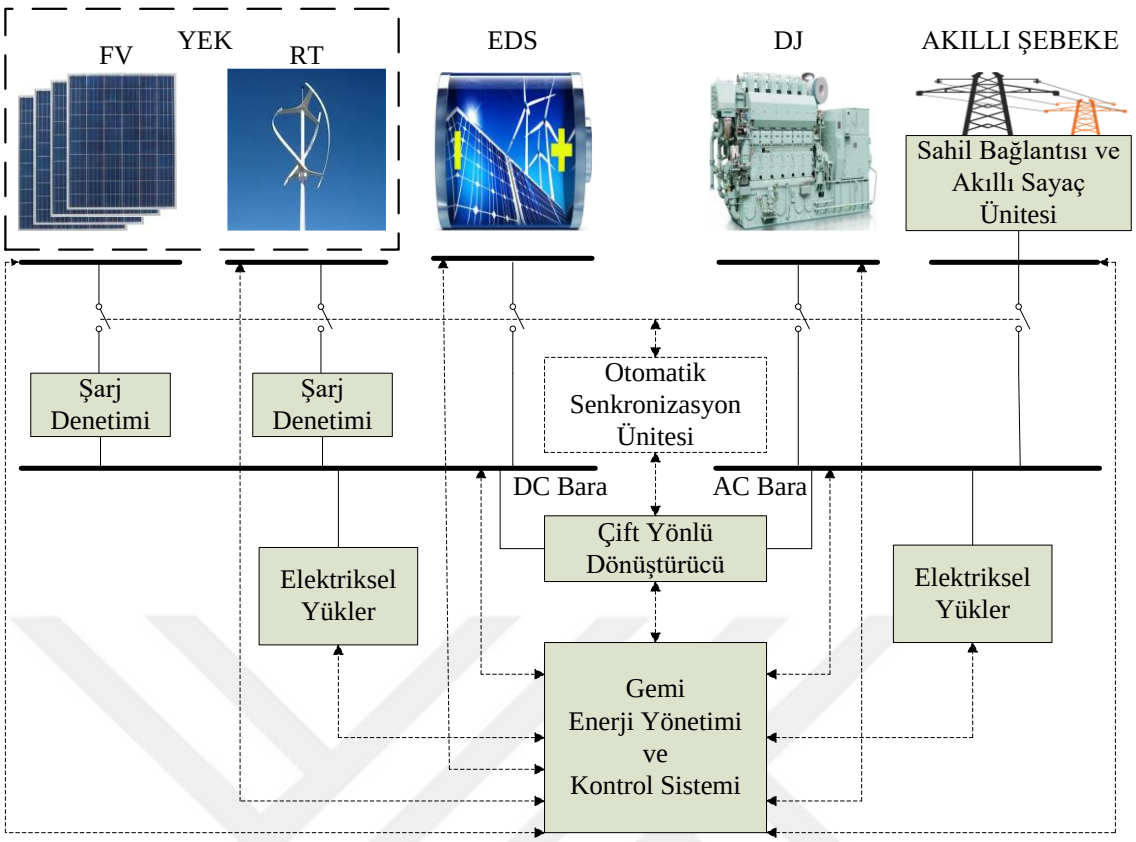
Liman tarafındaki enerji yönetim sistemi ise geminin güç ihtiyacını, gerilim ve frekans değerlerini gemideki akıllı sayaç üzerinden toplar. Aynı zamanda, akıllı şebekenin merkezi yönetim ve kontrol birimine bağlanarak şebekenin durumunu, anlık enerji maliyetini ve emisyon değerlerini gemi tarafına aktarır. Gemi ve liman arasındaki enerji ve bilgi akışı Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Gemi ve liman tarafı enerji yönetim birimlerinin bağlantı şeması

Gemi ve liman arasındaki iki yönlü enerji ve bilgi akışı, ileri ölçüm altyapısına sahip akıllı sayaç ve sensör teknolojisi ile sağlanarak güncel ve gerekli bilgiler enerji yönetim birimleri tarafına aktarılır. Sistemlere tanımlanan algoritmalar ile enerjinin verimli bir şekilde kullanılması sağlanır.

Gemi güç sistemi kontrol ve anahtarlama sistemi (Şekil 3.3) ise enerji yönetim sistemine tanımlanan algoritma sayesinde gemideki en uygun enerji kaynağının kullanılmasını sağlar.



Şekil 3.3 Gemi güç sistemi kontrol ve anahtarlama sistemi

Güç sistemleri arasındaki bağlantı çift yönlü dönüştürücü ve otomatik senkronizasyon ünitesi tarafından gerçekleştirilir. Gemideki enerji kaynaklarından alınan bilgiler ve sahil bağlantı panosundaki akıllı sayaç ünitesi aracılığı ile liman tarafından elde edilen veriler, gemi enerji yönetim sistemi tarafından değerlendirilir ve belirlenen enerji kaynağının gemi için gereken gücü temin etmesi sağlanır.

Bununla birlikte, gemi ve liman tarafının akıllı şebeke sistemine dâhil edilmesinde dört temel unsur dikkate alınmalıdır. Birincisi planlama ve bakım, ikincisi enerji piyasası, üçüncüsü sistemin işletilmesi, dördüncüsü ise sistem araçlarıdır.

Planlama ve Bakım: Karar vermede yetkili birimleri (liman yönetimi, ulusal elektrik enerjisi sağlayıcısı, gemi personeli ve firma yetkilisi) ilgilendiren konuların belirlenmesi, alternatif enerji kaynaklarının güç kapasitelerinin hesaplanması, gerçek zamanlı izleme ve kontrol sisteminin tasarlanması, enerji yönetim merkezinin oluşturulması, sistem güvenliğinin sağlanması ve periyodik bakımların planlanması konularını kapsar.

Bu sayede, limana yanaşan ve tüketici konumunda olan gemiler, liman tarafından sağlanacak elektrik enerjisi fiyatlarına ve vergi teşviklerine anlık olarak erişebilecektir. Gemi ve liman arasındaki güç bağlantı sistemine ait koruma, ölçüm, hata tanımlamaları akıllı elektronik donanımlar ile gerçekleştirilecek ve sistem güvenliği sağlanacaktır.

Enerji Piyasası: Enerji sağlayan firmaların artması ile gelişen serbest piyasa neticesinde liman tarafında en uygun enerjinin temin edilmesi konusunu kapsar.

Bu sayede, her limanın kendine özgü enerji piyasası, fiyatlandırması ve teşvik sistemi oluşacaktır. Teşvik sistemi ile gemi kalacağı her liman için farklı enerji tedarik planı geliştirecek ve en uygun enerji kaynağını seçecektir.

Sistemin İşletilmesi: Gemi, liman ve akıllı şebeke tarafındaki güç tüketim verilerinin anlık olarak izlenmesi, kontrol edilmesi, geleceğe yönelik kapasite tahmin sisteminin oluşturulması ve elektrikli taşıtlardaki gibi "bağlan ve kullan" (plug and play) mantığının geliştirilmesi konularını kapsar.

Bu sayede, ulusal şebeke gemilerdeki güç ihtiyacını karşılamak için gereğinden fazla veya az yüklenmeyecektir. Böylece, olası şebeke arızaları engellenmiş olacaktır. Ayrıca, akıllı şebeke kullanım kapasitesinin düşük olduğu anlarda elektrik fiyatlarında ekstra indirimler uygulanarak, gemilerin ulusal şebekeyi kullanması teşvik edilecektir. Şebeke kullanım kapasitesinin fazla olduğu anlarda ise liman tarafında elektrik enerjisi fiyatı artırılarak gemi enerji temini için farklı enerji kaynaklarına yönlendirilecektir. Bu sayede, ulusal elektrik şebekesi aşırı yüklenmelerden korunacaktır.

Sistem Araçları: Akıllı şebeke sistemine dâhil olan donanımların birbiri ile haberleşmesini ve uyumlu şekilde çalışmasını sağlayan bilgi, iletişim, algılama, ölçme, kontrol, otomasyon ve güç elektroniği konularını kapsar.

Bu sayede, donanımlar arasında iki yönlü iletişim ve enerji akışı sağlanacaktır. Gemi, liman ve akıllı şebeke arasında gerekli etkileşimin sağlanabilmesi için kontrol etme ve karar verme özelliğine sahip enerji yönetim birimleri ve algoritmaları geliştirilecektir. Böylece, ihtiyaç duyulan veriler anlık olarak

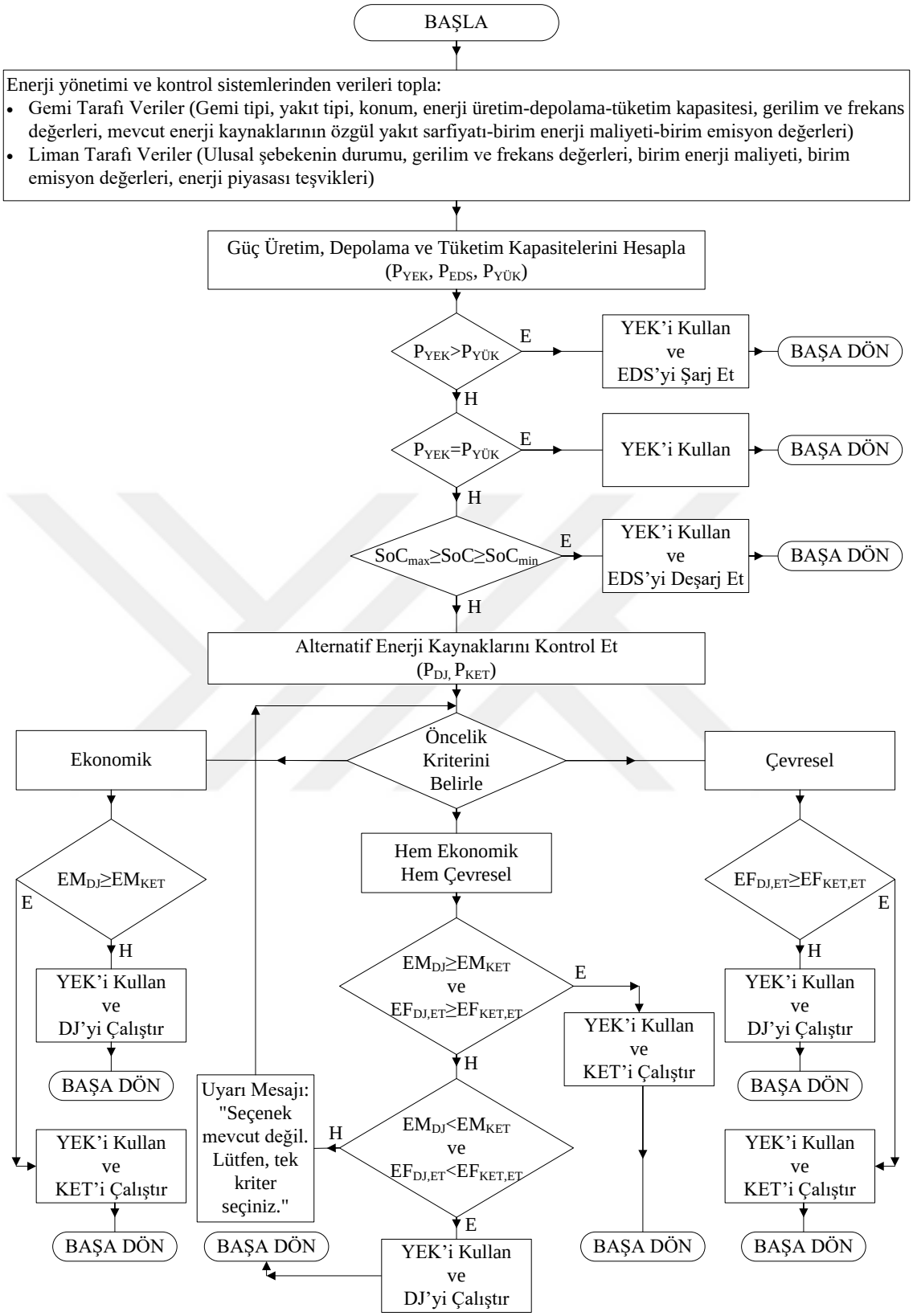
toplanacak, analiz edilecek ve en uygun enerji kaynağının kullanılmasına karar verilecektir.

3.2 Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Algoritması

Gemi, liman ve akıllı şebeke bağlantısına uygun olarak iki farklı Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Algoritması (GEEYA) önerilmiştir. GEEYA I'de en ekonomik veya en çevreci enerji kaynağının otomatik olarak belirlenmesi ön plana çıkmaktadır. GEEYA II'de ise gemide kullanılabilecek farklı yakıt tiplerinin enerji maliyeti ve çevresel etkileri ön plana çıkmaktadır. Bu sayede, gemide karşılaşılabilecek farklı durumlar için çeşitli analizlerin yapılması sağlanmıştır.

3.2.1 Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Algoritması I

Gemi, liman ve akıllı şebeke bağlantısında gemi elektrik enerjisi yönetim sisteminin verimli bir şekilde işletilmesi için geliştirilen GEEYA I'in akış şeması Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Algoritması I için akış şeması

GEEYA I akış şemasını özetlemek gerekirse; algoritma ilk olarak gemi ve liman tarafından gerekli verileri toplar.

Gemi tarafından gemi tipi, yakıt tipi, konum, enerji üretim, depolama ve tüketim kapasitesi, gerilim ve frekans değerleri, mevcut enerji kaynaklarının özgül yakıt sarfiyatı, birim enerji maliyeti ve birim emisyon değerleri gibi verileri alarak analiz eder.

Liman tarafından ise akıllı şebekenin durumu, gerilim ve frekans değerleri, birim enerji maliyeti, birim emisyon değerleri, enerji piyasası teşvikleri ve KET sisteminin kullanılma potansiyeli gibi verileri alarak analiz eder.

Daha sonra gemide bulunan YEK ve EDS kapasiteleri ile limanda iken ihtiyaç duyulan güç kapasitesini hesaplar. YEK üretimi gemi güç talebinden büyük ise enerji ihtiyacı YEK ile karşılanır ve fazla enerji EDS'de şarj edilir. YEK üretimi gemi güç talebi ile eşit ise YEK enerji ihtiyacını karşılar ve EDS şarj veya deşarj edilmez. YEK üretimi gemi güç ihtiyacından düşük ise öncelikle EDS'nin şarj seviyesi (SoC) için belirlenen güvenli çalışma aralığına bakılır. SoC değeri bataryaların doluluk oranını "%" olarak göstermektedir. EDS güvenli çalışma aralığında ise elektrik enerjisi ihtiyacı YEK ve EDS ile karşılanır.

YEK ve EDS'nin gemi güç ihtiyacını karşılayamaması durumunda, algoritma gemi DJ'lerini veya KET sistemini kullanmak üzere enerji kaynaklarının uygunluğunu kontrol eder. Bu aşamada algoritma DJ veya KET sistemini kullanmak için gemi personelinin öncelik kriterini belirlemesini ister. Kullanılacak enerji kaynağının en ekonomik, en çevreci veya hem ekonomik hem de çevreci olmasına yönelik gemi personeline üç temel seçenek sunulur. Gemi personeli bulunduğu limanı, bölgeyi ve uluslararası kriterleri göz önüne alarak seçimini yapar.

Algoritmada, DJ ve KET sistemi için karşılaştırma parametrelerinin eşit olması halinde diğer avantajlar (gürültü, titreşim, bakım maliyeti) dikkate alınarak KET sisteminin devreye girmesi sağlanır. Herhangi parametrede eşitlik olmaması durumunda ise belirlenen kriterlere en uygun enerji kaynağının devreye girmesi sağlanır.

En ekonomik seçenek tercih edildiğinde, algoritma DJ'den ve KET sisteminden elde edilecek enerjinin birim maliyetini hesaplar, birbiri ile karşılaştırır ve en ekonomik enerji kaynağını çalıştırır.

En çevreci seçenek tercih edildiğinde CO_2, NO_x, SO_2, PM veya tüm egzoz emisyonlarının hangisinin daha öncelikli olduğu gemi personeli tarafından belirlenir ve algoritma DJ ve KET sisteminden kaynaklı emisyon tiplerinin birim emisyon salımı değerlerini hesaplar, birbiri ile karşılaştırır ve en çevreci enerji kaynağını çalıştırır.

Hem ekonomik hem de çevresel seçenek tercih edildiğinde ise algoritma tüm ekonomik ve çevresel kriterlerin (birim enerji maliyeti ve birim emisyon salımı değerleri) sağlanıp sağlanmadığını kontrol eder, sağlanıyorsa DJ ve KET sistemi için karşılaştırma analizi yapar ve en uygun enerji kaynağını seçer. Tüm kriterler sağlanmıyor ise algoritma gemi personeline uyarı mesajı göndererek sadece bir kriterin ("en ekonomik" veya "en çevreci") tercih edilmesini ister.

Bu sayede gemi elektrik enerjisi yönetim sistemi, gemi personelinin talebine göre en uygun enerji kaynağını belirler ve gemi güç sisteminin etkin bir şekilde işletilmesini sağlar.

Bununla birlikte, GEEYA I'de EDS'nin şarj ve deşarj kontrolü ile gemi güç sistemi kontrol ve anahtarlama sistemi temel unsurlardandır. EDS'de şarj durumunu temel alan kontrol yöntemleri üreticiler tarafından belirtilen güvenli çalışma aralığını sağlamak için kullanılır [126],[127]. Bu tür kontrol yöntemleri ile YEK kapasitesine uygunluk sağlanır, verimlilik artar, şarj ve deşarj durumu hızlıca belirlenir. Ayrıca, EDS'nin enerji kullanımı, kullanım ömrü, güvenlik ve güvenilirlik gibi işletme durumları da belirli kontrol yöntemleri ile algılanmış olur.

GEEYA I'de EDS'nin şarj ve deşarj süreci için geliştirilen kontrol algoritması (Tablo 3.1) ile EDS'nin daha verimli çalışması ve daha hızlı tepki vermesi sağlanır.

Tablo 3.1 GEEYA I: EDS şarj ve deşarj kontrol algoritması

1	Initialize parameters (P_{YEK}, P_{EDS}, $P_{YÜK}$)
2	if $P_{YÜK}(t) = P_{YEK}(t)$
3	$P_{EDS}(t+1) = P_{EDS}(t)$
4	elseif $P_{YÜK}(t) < P_{YEK}(t)$
5	charge EDS
6	if $P_{EDS}(t) \geq SoC_{max}(t)$
7	stop charge
8	end
9	elseif $P_{YÜK}(t) > P_{YEK}(t)$
10	if $P_{EDS}(t) > SoC_{min}(t)$
11	discharge EDS
12	else
13	stop discharge and switch DJ or KET according to priority
14	end
15	end

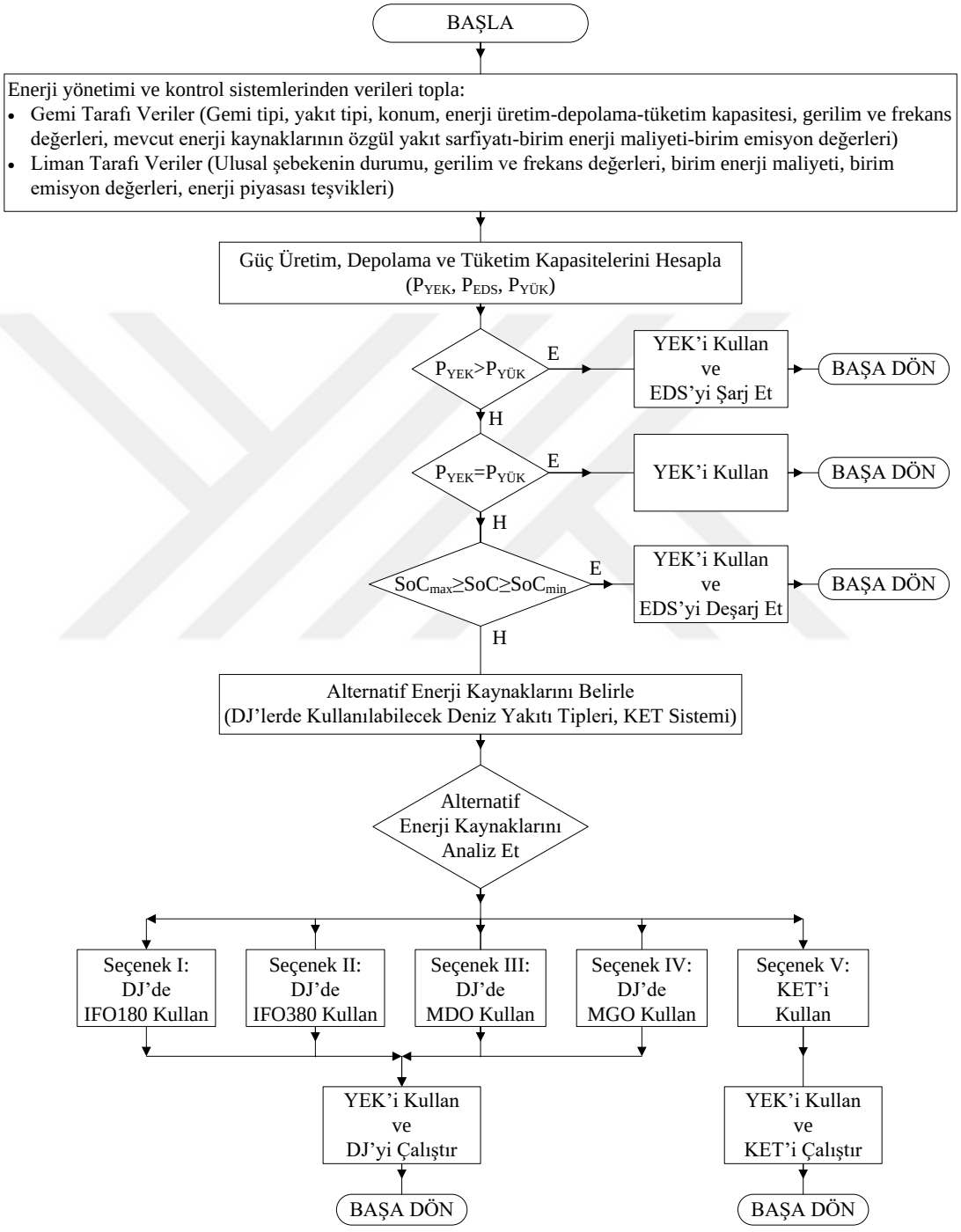
GEEYA I'de gemi güç sistemi kontrol ve anahtarlama sisteminin karar verme süreci için geliştirilen kontrol algoritması (Tablo 3.2) ile gemi personeli tarafından belirlenen öncelik kriterleri dikkate alınarak gemideki elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanması ve en uygun enerji kaynağının çalıştırılması amaçlanmıştır.

Tablo 3.2 GEEYA I: Enerji kaynağının belirlenmesi ve kullanmasına yönelik karar verme algoritması

1	Initialize parameters (EM_{DJ}, EM_{KET}, $EF_{DJ,ET}$, $EF_{KET,ET}$)
2	select priority
3	if priority = economic
4	if $EM_{DJ} \geq EM_{KET}$
5	start KET
6	else
7	start DJ
8	end
9	elseif priority = environmental
10	if $EF_{DJ,ET} \geq EF_{KET,ET}$
11	start KET
12	else
13	start DJ
14	end
15	elseif priority = both economic and environmental
16	if $EM_{DJ} \geq EM_{KET}$ and $EF_{DJ,ET} \geq EF_{KET,ET}$
17	start KET
18	elseif $EM_{DJ} < EM_{KET}$ and $EF_{DJ,ET} < EF_{KET,ET}$
19	start DJ
20	else
21	show warning message: "Seçenek mevcut değil. Lütfen, tek kriter seçiniz."
22	end
23	end

3.2.2 Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Algoritması II

Gemi, liman ve akıllı şebeke modelinde gemi elektrik enerjisi yönetim sisteminin verimli bir şekilde işletilmesi için geliştirilen GEEYA II'nin akış şeması Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Algoritması II için akış şeması

GEEYA II akış şemasını özetlemek gerekirse; algoritma ilk olarak GEEYA I'de olduğu gibi gemi ve liman tarafından gerekli verileri toplar.

Gemi tarafından gemi tipi, yakıt tipi, konum, enerji üretim, depolama ve tüketim kapasitesi, gerilim ve frekans değerleri, mevcut enerji kaynaklarının özgül yakıt sarfiyatı, birim enerji maliyeti ve birim emisyon değerleri gibi verileri alarak analiz eder.

Liman tarafından ise akıllı şebekenin durumu, gerilim ve frekans değerleri, birim enerji maliyeti, birim emisyon değerleri, enerji piyasası teşvikleri ve KET sisteminin kullanılma potansiyeli gibi verileri alarak analiz eder.

Daha sonra gemide bulunan YEK ve EDS kapasiteleri ile limanda iken ihtiyaç duyulan güç kapasitesini hesaplar. YEK üretimi gemi güç talebinden büyük ise enerji ihtiyacı YEK ile karşılanır ve fazla enerji EDS'de şarj edilir. YEK üretimi gemi güç talebi ile eşit ise YEK enerji ihtiyacını karşılar ve EDS şarj veya deşarj edilmez. YEK üretimi gemi güç ihtiyacından düşük ve EDS'nin SoC değeri belirlenen güvenli çalışma aralığında ise enerji ihtiyacı YEK ve EDS ile karşılanır.

YEK ve EDS'nin gemi güç ihtiyacını karşılayamaması durumunda, algoritma gemi DJ'lerini veya KET sistemini kullanmak üzere enerji kaynaklarının uygunluğunu kontrol eder. Bu aşamada algoritma DJ veya KET sistemini kullanmak için gemi personeline beş farklı seçenek sunar.

Birinci seçenek, DJ'lerde deniz yakıtı olarak IFO180 (maksimum viskozitesi 180 santistok ve maksimum sülfür oranı %3,5 olan yakıt) kullanılmasıdır. İkinci seçenek DJ'lerde deniz yakıtı olarak IFO380 (maksimum viskozitesi 380 santistok ve maksimum sülfür oranı %3,5 olan yakıt) kullanılmasıdır. Üçüncü seçenek, DJ'lerde deniz yakıtı olarak düşük sülfür oranına sahip MDO (Marine Diesel Oil) kullanılmasıdır. Dördüncü seçenek, DJ'lerde deniz yakıtı olarak düşük sülfür oranına sahip MGO (Marine Gas Oil) kullanılmasıdır. Beşinci seçenek ise KET sistemi ile geminin elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanmasıdır.

Algoritma tüm seçeneklerin kullanılma potansiyelini dikkate alarak ekonomik ve çevresel etkilerini hesaplar ve karşılaştırma analizi yapar. Gemi personeli, karşılaştırma analizlerini göz önünde bulundurarak gemide kullanılacak enerji

kaynağını belirler. Bu sayede gemi enerji yönetim sistemi, gemi personelinin belirlediği kriterlere göre en uygun enerji kaynağını belirler ve gemi güç sisteminin daha verimli bir şekilde işletilmesini sağlar.

GEEYA II'de EDS'nin şarj ve deşarj süreci için geliştirilen kontrol algoritması (Tablo 3.3) genel anlamda GEEYA I'deki ile benzerlik göstermektedir. Algoritma ile EDS'nin daha verimli çalışması ve daha hızlı tepki vermesi sağlanır.

Tablo 3.3 GEEYA II: EDS şarj ve deşarj kontrol algoritması

1	Initialize parameters (P_{YEK}, P_{EDS}, $P_{YÜK}$)
2	if $P_{YÜK}(t) = P_{YEK}(t)$
3	$P_{EDS}(t+1) = P_{EDS}(t)$
4	elseif $P_{YÜK}(t) < P_{YEK}(t)$
5	charge EDS
6	if $P_{EDS}(t) \geq SoC_{max}(t)$
7	stop charge
8	end
9	elseif $P_{YÜK}(t) > P_{YEK}(t)$
10	if $P_{EDS}(t) > SoC_{min}(t)$
11	discharge EDS
12	else
13	stop discharge and switch DJ or KET according to options
14	end
15	end

GEEYA II'de gemi güç sistemi kontrol ve anahtarlama sisteminin karar verme süreci için geliştirilen kontrol algoritması ise Tablo 3.4'te gösterilmiştir. Algoritma ile gemi personeli tarafından mevcut seçenekler dikkate alınarak gemideki elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanması ve gemi personelinin dikkate aldığı kriterlere en uygun enerji kaynağının çalıştırılması amaçlanmıştır.

Tablo 3.4 GEEYA II: Enerji kaynağının belirlenmesi ve kullanmasına yönelik karar verme algoritması

1	Initialize parameters ($EM_{DJ,IFO180}$, $EM_{DJ,IFO380}$, $EM_{DJ,MDO}$, $EM_{DJ,MGO}$, EM_{KET}, $EF_{DJ,IFO180,ET}$, $EF_{DJ,IFO380,ET}$, $EF_{DJ,MDO,ET}$, $EF_{DJ,MGO,ET}$, $EF_{KET,ET}$)
2	Calculate parameters ($M_{DJ,IFO180}$, $M_{DJ,IFO380}$, $M_{DJ,MDO}$, $M_{DJ,MGO}$, $M_{AŞ}$, $F_{DJ,IFO180,ET}$, $F_{DJ,IFO380,ET}$, $F_{DJ,MDO,ET}$, $F_{DJ,MGO,ET}$, $F_{KET,ET}$)
3	Compare parameters ($M_{DJ,IFO180}$, $M_{DJ,IFO380}$, $M_{DJ,MDO}$, $M_{DJ,MGO}$, $M_{AŞ}$, $F_{DJ,IFO180,ET}$, $F_{DJ,IFO380,ET}$, $F_{DJ,MDO,ET}$, $F_{DJ,MGO,ET}$, $F_{KET,ET}$)
4	select option
5	if option = IFO180
	start DJ
6	elseif option = IFO380
7	start DJ
8	elseif option = MDO
9	start DJ
10	elseif option = MGO
11	start DJ
12	elseif option = KET
13	start KET
14	end

3.3 Gemi Enerji Yönetim Sistemi Modeli Maliyet Analizi

Gemi, liman ve akıllı şebeke bağlantısında kullanılması için önerilen gemi elektrik enerjisi yönetim sistemi temel bileşenlerinin maliyet analizi gemi sahipleri, karar vericiler, üretici firmalar ve devletler için önem arz etmektedir. Alternatif enerji kaynağı konumundaki FV, RT ve EDS'nin güç kapasiteleri geminin uygunluk alanına göre değişecektir. Bu yüzden, her gemi tipi için kuruluş maliyetlerinin yatırımın geri ödeme süresinin farklı olması beklenir. Bunun için her gemi tipi ve liman için gerekli ekonomik analizler ayrı ayrı yapılmalıdır. Bu sayede yatırımın akıllı şebekeye entegrasyonuna yönelik fizibilite çalışmalarının ekonomik olup olmadığı anlaşılabilecektir.

Örneğin; yılda 200 gün limanda kalan bir yük gemisinin saatlik güç ihtiyacının 150 kW olması durumunda geminin elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanması için 270000 kWh elektrik enerjisi tüketmesi gerekmektedir. Gemi jeneratörlerinin özgül yakıt sarfiyatının 200 g/kWh olduğu varsayıldığında gemide elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanması için 144 ton gemi yakıtı kullanılmalıdır. Yakıt maliyetinin 1500 TL/ton olduğu düşünüldüğünde gemideki yıllık elektrik enerji maliyeti 216000 TL olacaktır. Bu gemide akıllı şebeke altyapısına uygun olarak önerilen elektrik enerjisi yönetim bileşenlerinin ve gemi personelinin ihtiyaçlarına cevap verebilecek bir elektrik enerjisi yönetim algoritmasının bulunması durumunda gemide kullanılacak alternatif enerji kaynaklarının kapasitesine ve bulunduğu limana bağlı olarak geminin elektrik enerjisi maliyetinde farklı oranlarda azalma gerçekleşecektir. Elektrik enerjisi maliyetindeki azalma oranının %25 olması durumunda yıllık 54000 TL, %50 olması durumunda yıllık 108000 TL, %75 olması durumunda ise yıllık 162000 TL tasarruf sağlanacaktır. Verilen örnek için yıllık elektrik enerjisinden %50 oranında tasarruf edilmesi ve önerilen sistemin kuruluş maliyetinin 2 Milyon TL olması durumunda yatırımın basit geri ödeme süresi ise ortalama 18 yıl olacaktır.

Gemi özelinde yapılacak kuruluş maliyetleri sayesinde önerilen sisteminin ekonomik olup olmadığı görülebilecektir. Bununla birlikte gemi elektrik enerjisi yönetim sistemine ait temel bileşenlerin kuruluş maliyetleri hakkında genel değerlendirmeler yapılabilir. Özellikle birim güç başına hesaplanan kuruluş

maliyetleri ile gemi sahiplerinin kullanabileceği alternatif enerji kaynaklarının güç kapasitesine bağlı olarak fizibilite çalışması yapması mümkündür.

Bu kapsamda, FV enerji sisteminin kuruluş maliyeti 10573 ila 14803 TL/kW arasında değişmektedir. RT sisteminin kuruluş maliyeti ise 6608 ila 8987 TL/kW arasındadır [128].

EDS'ler ise boyut ve kuruluş maliyeti açısından belirsizlik ve karmaşıklık içeren sistemlerdir. EDS'lerin kuruluş maliyeti sürekli geliştirme ve deneme aşamasında olmasından dolayı güç aralığı, boyut, pazar payı ve hesaplama yöntemi gibi etkenlere göre değişiklik göstermektedir. Örneğin, boyutu ve kuruluş maliyeti aynı olan EDS'lerin güç kapasitelerinde farklılık gözlenebilmektedir. YEK ve enerji yönetim sistemleri için özellikle elektrokimyasal enerji depolama sistemleri geniş kullanım alanına sahiptir. Kurşun tabanlı EDS'lerin güç kapasitesi 0 ila 20 MW arasında, nikel tabanlı EDS'lerin güç kapasitesi 0 ila 40 MW arasında, lityum tabanlı EDS'lerin güç kapasitesi ise 0 ila 100 MW arasındadır. Ayrıca kurşun tabanlı EDS'lerin kuruluş maliyeti 1586 ila 3172 TL/kW arasında, nikel tabanlı EDS'lerin kuruluş maliyeti 2643 ila 7930 TL/kW arasında, lityum tabanlı EDS'lerin kuruluş maliyeti ise 6344 ila 21147 TL/kW arasında değişmektedir [99]-[103].

Günümüzde KET sistemi 22 limanda gerçek anlamda uygulanmaktadır. Bu limanlar incelendiğinde KET sistemi kuruluş maliyetinin gemi tarafı ve liman tarafı olmak üzere iki kısma ayrıldığı görülmektedir. Gemi tarafı kuruluş maliyeti geminin tipine, büyüklüğüne, güç gereksinimine ve elektrik sistemi altyapısına göre değişmektedir. Bu nedenle, KET sisteminin gemi tarafı kuruluş maliyeti yaklaşık 1,6 ila 10,6 Milyon TL arasında değişmektedir. Liman tarafı kuruluş maliyeti ise limanın konumuna, ulusal şebekenin kapasitesine, limana yanaşacak gemi tipine göre değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle, KET sisteminin liman tarafı kuruluş maliyeti yaklaşık 1,6 ila 21,1 Milyon TL arasındadır [129].

KET sistemini akıllı şebeke altyapısına uygun hale getirmek için ise iki yönlü enerji ve bilgi akışı sağlama, gerçek zamanlı izleme ve enerji yönetimi gibi ileri teknolojilerin gemi ve liman tarafına dâhil edilmesi gerekmektedir. Akıllı şebeke sistemi altyapısının mevcut KET sistemi yatırımına %10 ila 20 arasında ek maliyet getireceği öngörülmektedir [130],[131].

4
Veri Analizi ve Yöntem

Veri analizi ve yöntem bölümünün temel amacı gemi elektrik enerjisi yönetim sistemi modeli için gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında güvenilir ve gerçeğe yakın sonuçlar elde etmektir.

Gemi elektrik, elektronik ve güç sistemini tanımlamak ve ihtiyaç duyulan verileri elde etmek için "M/V İnce Hamburg" gemisinde incelemeler yapılmıştır. "M/V İnce Hamburg" gemisi uluslararası sularda seyir yapan "İnce Denizcilik A.Ş." firmasına ait Türk bayraklı bir dökme/kuru yük gemisidir. 2010 yılında inşa edilen gemi 28189 DWT (Dead Weight Tonnage) yük taşıma kapasitesine (yük, yakıt, su, kumanya, yolcu, personel ve kişisel eşyaların ağırlıklarının toplamı) sahiptir. Gemide her biri 550 KVA kapasitesinde 3 adet ana jeneratör bulunmaktadır. "M/V İnce Hamburg" gemisine ait görseller Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 M/V İnce Hamburg gemisi

YEK kullanımı için uygun alanları belirlemek, yakıt tüketimini takip etmek ve Özgül Yakıt Sarfiyatını (ÖYS) hesaplamak için gemide çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca, benzetim çalışmasında kullanılmak üzere geminin limanda iken 24 saatlik güç ihtiyacı izlenmiş ve ölçülmüştür.

(4.1) eşitliği yardımıyla gemide elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak için DJ'lerde kullanılan yakıt miktarı hesaplanabilir.

$$YT(t) = P_{DJ}(t) \times \text{Ö}YS(t) \tag{4.1}$$

Burada, YT, DJ yakıt tüketimini (ton); P_{DJ}, DJ güç tüketimini (W); ÖYS, özgül yakıt sarfiyatını (g/kWh); t, ise birim zamanı (saat) ifade eder.

(4.2) eşitliği yardımıyla DJ'lerde kullanılan yakıtın maliyeti hesaplanabilir.

$$M_{DJ,Yakıt}(t) = YT(t) \times EM_{Yakıt,Ton} \tag{4.2}$$

Burada, $M_{DJ,Yakıt}$, DJ yakıt maliyetini (TL); $EM_{Yakıt,Ton}$ ise ton başına yakıt fiyatını (TL/ton) ifade eder.

(4.3) eşitliği yardımıyla DJ'lerde üretilen enerjinin birim maliyeti hesaplanabilir.

$$EM_{DJ}(t) = \text{Ö}YS(t) \times EM_{Yakıt,Ton} \tag{4.3}$$

Burada, EM_{DJ}, DJ'lerde üretilen kWh cinsinden birim elektrik enerjisinin maliyetini (TL/kWh) ifade eder.

(4.4) eşitliği yardımıyla geminin DJ'lerinden kaynaklı emisyon salımı hesaplanabilir.

$$E_{DJ,ET}(t) = P_{DJ}(t) \times EF_{DJ,ET} \tag{4.4}$$

Burada, $E_{DJ,ET}$, emisyon tipine göre DJ'den kaynaklı emisyon salımını (ton); $EF_{DJ,ET}$, ise emisyon tipine göre DJ'den kaynaklı emisyon faktörünün "kWh" değerini (g/kWh) ifade eder.

Benzetim çalışmasında, deniz yakıtı fiyatlarının 2018 yılı ortalaması dikkate alınmıştır. $EM_{Yakıt,Ton}$ değeri IFO180 için 2524 TL/ton, IFO380 için 2405 TL/ton, MDO için 3167 TL/ton ve MGO için 3835 TL/ton olarak alınmıştır [132],[133].

Gemide DJ'lerden kaynaklı emisyon salımlarını hesaplamak için ENTEC firmasının Avrupa Komisyonu Gemi Emisyonları Sözleşmesi kapsamında hazırladığı rapor dikkate alınmıştır. Raporda, 2015 yılı projeksiyonu kapsamında bir dökme/kuru yük gemisi limanda iken $EF_{DJ,ET}$ değeri CO_2 için 690 g/kWh, NO_x için 11,5 g/kWh, SO_2 için 1,6 g/kWh ve PM için 0,5 g/kWh olarak verilmiştir [134]. Hazırlanan raporda, gemide DJ'den kaynaklı emisyon salımı tahmini için 29 ülke limanını kapsayan gemi tipi, emisyon bölgesi, yakıt tüketimi, kalkış ve varış limanı gibi bir çok parametre dikkate alınmıştır. Literatürde, emisyon faktörlerinin yakıt tipine göre değişimi konusunda yeterli bilgi bulunamamıştır. Bu nedenle, benzetim çalışmasında gemi tipi ve geminin limanda olma kriterleri dikkate alınarak ENTEC firması tarafından hesaplanan emisyon faktörü değerleri kullanılmıştır.

(4.5) eşitliği yardımıyla gemide kullanılma potansiyeli bulunan FV enerji sisteminin güç kapasitesi hesaplanabilir [135].

$$P_{FV}(t) = I_{Güneş}(t) \times A_{FV} \times cos\,\delta \times \mu_{FV} \tag{4.5}$$

Burada, P_{FV}, FV enerji sistemi çıkış gücünü (W); $I_{Güneş}$, güneş ışınım şiddetini (W/m^2); A_{FV}, FV panel alanını (m^2); δ FV panel ile güneş ışınımı arasındaki açıyı (°, derece); μ_{FV} ise FV enerji sisteminin verimini (%) ifade eder.

Benzetim çalışmasında, $I_{Güneş}$ değerinin gün içerisinde 0 ila 1000 W/m^2 arasında rastgele değiştiği kabul edilmiştir. A_{FV} değeri için gemideki müsait alan 100 m^2 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, δ değeri 0°, μ_{FV} değeri ise %20 olarak alınmıştır.

"M/V Auriga Leader" isimli kargo gemisi (Şekil 4.2) FV enerji sistemi uygulaması için önemli ve güzel bir örnek teşkil etmektedir. Uygulama ile gemideki elektrik enerjisi ihtiyacının yaklaşık %10'luk kısmının karşılandığı ifade edilmiştir [136].



Şekil 4.2 M/V Auriga Leader gemisi fotovoltaik enerji uygulaması

(4.6) eşitliği yardımıyla gemide kullanılma potansiyeli bulunan RT enerji sisteminin güç kapasitesi hesaplanabilir [135].

$$P_{RT}(t) = \frac{1}{2} \times \rho \times A_{RT} \times V^3_{Rüzgâr}(t) \times C_p \quad (4.6)$$

Burada, P_{RT}, RT enerji sistemi çıkış gücünü (W); ρ hava yoğunluğunu (kg/m^3); A_{RT}, rotor süpürme alanını (m^2); $V_{Rüzgâr}$, rüzgâr hızını (m/s); C_p ise güç katsayısını ifade eder.

Rotor süpürme alanı RT'nin eksen tipine göre değişiklik göstermekle beraber, yatay eksenli RT için rotor süpürme alanı (4.7) kullanılarak hesaplanabilir.

$$A_{RT}(t) = \frac{\pi}{4} \times R^2 \quad (4.7)$$

Burada, R, rotor çapını (m) ifade eder.

(4.8) eşitliği yardımıyla düşey eksenli RT için rotor süpürme alanı hesaplanabilir.

$$A_{RT}(t) = \frac{2}{3} \times D \times H \quad (4.8)$$

Burada, D, rotor kanatlarının maksimum genişliğini (m); H ise rotor kanatlarının dikey maksimum yüksekliğini (m) ifade eder.

"M/S Stena Jutlandica" isimli gemi (Şekil 4.3) RT enerji sistemi uygulaması için önemli ve güzel bir örnek teşkil etmektedir. Yolcu ve araç taşımacılığında kullanılan geminin pruva kısmına yerleştirilen iki adet düşey eksenli RT sistemi ile yıllık 23 MWh'lik elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanması hedeflenmiştir [137].



Şekil 4.3 M/S Stena Jutlandica gemisi rüzgâr türbini uygulaması

Benzetim çalışmasında $V_{Rüzgâr}$ parametresinin gün içerisinde 3,5 ila 30 m/s arasında rastgele değiştiği kabul edilmiştir. Ayrıca, iki adet RT sistemi için ρ değeri 1,225 kg/m^3, A_{RT} değeri 13,8 m^2, C_p değeri ise 0,4 olarak alınmıştır.

YEK kapasitesi ise FV ve RT enerji sistemlerinin toplam güç kapasitesini ifade etmektedir. YEK güç kapasitesi (4.9) kullanılarak belirlenmiştir.

$$\sum P_{YEK}(t) = P_{FV}(t) + P_{RT}(t) \tag{4.9}$$

Burada, P_{YEK}, YEK sisteminin çıkış gücünü (W) ifade eder.

Gemide kullanılma potansiyeli bulunan EDS'ler ise enerji üretim ve tüketim dengesini sağlaması açısından enerji yönetim sistemlerinde önemli bir yere sahiptir. Özellikle kurşun, sodyum, nikel ve lityum tabanlı elektrokimyasal enerji depolama sistemleri YEK ve elektrikli taşıt uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Her bir EDS çeşidinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Yüksek güç kapasitesi, yüksek verim, uzun ömür ve düşük kuruluş maliyeti gibi en iyi şartların aynı anda sağlanması pek mümkün değildir. Bu nedenle, EDS seçimi her bir uygulama için farklılık göstermektedir. EDS'nin performansı güç kapasitesi, boyut, verim, kuruluş maliyeti, ömür ve SoC gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Gemi uygulamalarında geminin tipine ve müsait alanına göre güç kapasitesi, boyut, kuruluş maliyeti ve işletme şartları dikkate alınarak seçim yapılmalıdır [138].

Toplam EDS kapasitesi (4.10) kullanılarak belirlenmiştir.

$$\sum P_{EDS}(t) = \begin{cases} P_{EDS,i}(t-1) + [P_{YEK}(t) - P_{YÜK}(t)], şarj\ modu \\ P_{EDS,i}(t-1) + [P_{YÜK}(t) - P_{YEK}(t)], deşarj\ modu \end{cases} \quad (4.10)$$

Burada, P_{EDS}, EDS güç kapasitesini (W); $P_{EDS,i}$, EDS'nin ilk andaki güç kapasitesini (W); $P_{YÜK}$ ise gemide ihtiyaç duyulan güç kapasitesini (W) ifade eder.

Benzetim çalışmasında, maksimum P_{EDS} değeri 50 kW, $P_{EDS,i}$ değeri 25 kW, SoC_{min} değeri %20 ve SoC_{max} değeri %100 olarak kabul edilmiştir. Elektrokimyasal enerji depolama sistemleri için belirlenen güvenli çalışma aralığı batarya tipine göre değişiklik göstermektedir. Bu nedenle, SoC_{min} ve SoC_{max} değerleri için literatürde belirtilen en uygun değerler dikkate alınmıştır [139]-[141].

Gemide kullanılma potansiyeli bulunan KET sistemi ile sağlanan enerjinin maliyeti (4.11) kullanılarak belirlenmiştir.

$$M_{KET,Enerji}(t) = P_{KET}(t) \times EM_{KET}(t) \quad (4.11)$$

Burada, $M_{KET,Enerji}$, KET sistemi ile sağlanan elektrik enerjisinin maliyetini (TL); P_{KET}, KET sistemi güç kapasitesini (W); EM_{KET} ise ulusal şebekeden alınan "kWh" cinsinden birim elektrik enerjisinin maliyetini (TL/kWh) ifade eder.

KET sisteminden kaynaklı emisyon salımı (4.12) kullanılarak belirlenmiştir.

$$E_{KET,ET}(t) = P_{KET}(t) \times EF_{KET,ET}(t) \quad (4.12)$$

Burada, $E_{KET,ET}$, emisyon tipine göre ulusal şebekeden kaynaklı emisyon salımını (ton); $EF_{KET,ET}$ ise emisyon tipine göre ulusal şebekeden kaynaklı emisyon faktörünün kWh değerini (g/kWh) ifade eder.

Benzetim çalışmasında ABD, Almanya, Türkiye Cumhuriyeti, Çin Halk Cumhuriyeti ve Avustralya limanları dikkate alınmıştır. Bu limanların bağlı bulunduğu ulusal elektrik şebeke sistemlerine ait emisyon salımı değerleri literatürden elde edilmiştir. Ulusal elektrik şebekesine ait elektrik enerjisi maliyetleri için ise 2018 yılı elektrik enerjisi birim fiyatlarının ortalaması kullanılmıştır. Ülkelerin ulusal elektrik şebeke sistemlerine ait birim emisyon salımı değerleri ve elektrik enerjisi maliyetleri Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Ulusal elektrik şebeke sistemlerine ait birim emisyon salımı değerleri ve elektrik enerjisi maliyetleri

Ülke	Emisyon Salımı (g/kWh)				Elektrik Enerjisi Birim Fiyatı (TL/kWh)	Referans
	CO_2	NO_x	SO_2	PM		
ABD	498,45	0,45	0,64	0,07	0,69	[142],[143],[144],[145]
Almanya	471,82	0,49	0,42	0,04	1,74	[142],[143],[145]
Türkiye	**464,43**	**0,95**	**2,07**	**0,15**	**0,48**	**[142],[143],[145]**
Çin	590,25	1,40	2,10	0,20	0,42	[142],[146],[145]
Avustralya	813,60	1,79	3,68	0,28	1,37	[142],[143],[145]

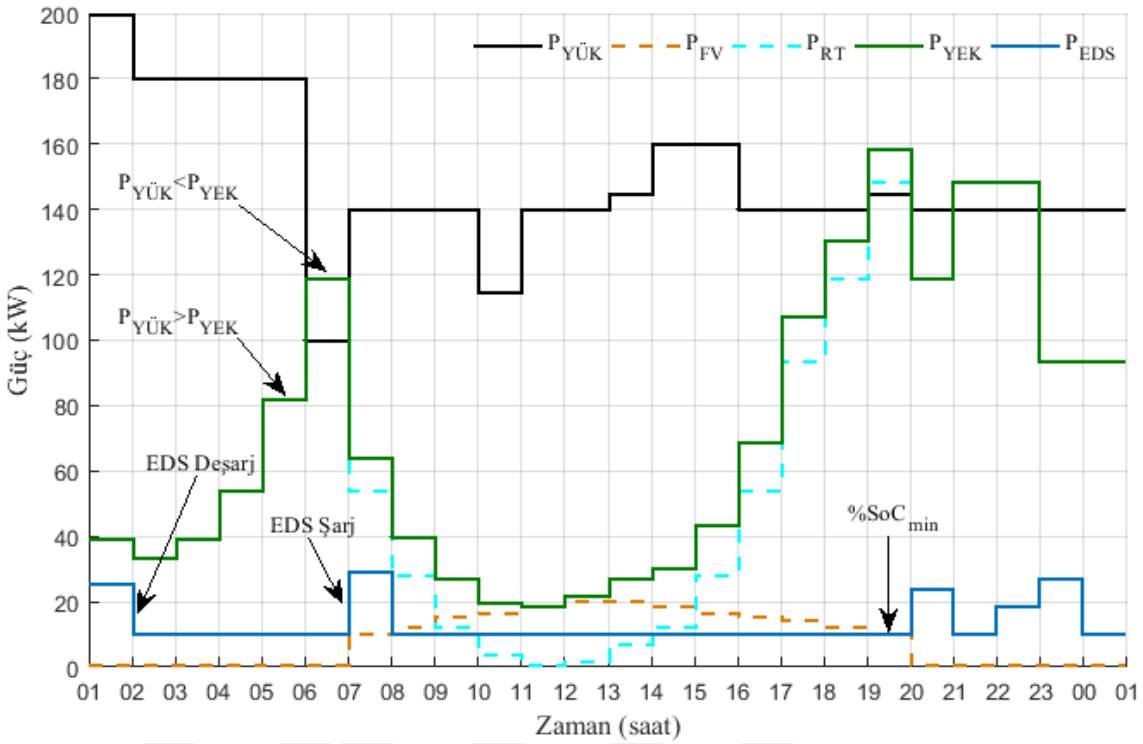
Tez çalışmasında gerçekleştirilen tüm ekonomik değerlendirmeler için TL kullanılmıştır. İlgili para birimleri 1 Ocak 2019 tarihli döviz kuru üzerinden TL'ye çevrilmiştir. 1 USD için 5,286698 TL, 1 EURO için ise 6,108582 TL değeri dikkate alınmıştır [104].

5
Benzetim Çalışması

Akıllı şebeke sistemi altyapısına uygun olarak inşa edilecek gemi ve liman tasarımları için önerilen gemi elektrik enerjisi yönetim sisteminin ve algoritmaların etkilerini gözlemlemek için MATLAB programı ile benzetim çalışması yapılmıştır. Çalışmada, gemi tarafının YEK, EDS ve KET sistemi uygulaması için gerekli altyapıya sahip olduğu düşünülmüştür. Aynı zamanda, liman tarafının da KET ve akıllı şebeke sistemi altyapısına sahip olduğu varsayılmıştır. Önerilen enerji yönetim sistemi ve geliştirilen algoritmaların etkisi, geminin ABD, Almanya, Türkiye Cumhuriyeti, Çin Halk Cumhuriyeti ve Avustralya limanlarında bulunması durumu için incelenmiştir.

Enerji yönetim sisteminde, gemi limanda iken birincil enerji kaynağı olarak YEK sisteminin kullanılması, ihtiyacın karşılanamaması durumunda EDS'nin kullanılması sisteme tanımlanmıştır. YEK ve EDS'nin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayamaması durumunda DJ ve KET sistemlerinin ikincil enerji kaynağı olarak devreye girmesi istenmiştir. Gemi elektrik enerjisi yönetim sisteminin etkinliğini açıklamak için ise iki farklı enerji yönetim algoritması önerilmiştir. GEEYA I'de en ekonomik, en çevreci veya hem ekonomik hem de çevreci olabilecek ikincil enerji kaynağının seçilmesi hedeflenmiştir. GEEYA II'de ise gemide farklı yakıt tiplerinin bulunması durumunda en uygun ikincil enerji kaynağının seçilmesi amaçlanmıştır.

Bu kapsamda her iki algoritma için tanımlanan enerji üretim, tüketim ve depolama dengesi Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Geminin güç tüketim değerleri, gemi limanda iken gece 01.00'den başlayarak 24 saat boyunca ölçülerek belirlenmiştir. YEK kapasitesi ve EDS değişimi ise gemide uygulanabilirlik kapasitesine göre belirlenmiştir.



Şekil 5.1 Gemi güç ihtiyacı, YEK ve EDS kapasitesi

Şekil 5.1 geminin limanda kaldığı 24 saatlik sürede gerçekleşen üretim, tüketim ve depolama dengesini göstermektedir. Saat 06.00-07.00, 19.00-20.00 ve 21.00-23.00 arasında gemideki YEK üretimi talep edilen güç ihtiyacından fazla olmuştur. Bu durumda, elektrik enerjisi tüketimi sadece YEK ile karşılanmış ve fazla enerji de EDS'de depo edilmiştir. Saat 01.00-02.00, 07.00-08.00, 20.00-21.00 ve 23.00-00.00 arasında ise YEK kapasitesi gemideki güç ihtiyacını tek başına karşılayamadığı için EDS'de depo edilen enerji de kullanılmıştır. Bu süre boyunca YEK'ten 1726 kW ve EDS'den 64 kW güç sağlamıştır. Geminin 24 saatlik güç talebi ise 3565 kW olarak ölçülmüştür. YEK ve EDS'nin yeterli olmadığı zaman aralıklarında DJ veya KET sistemi ikincil enerji kaynağı olarak devreye girmiş ve enerji talebi karşılanmıştır.

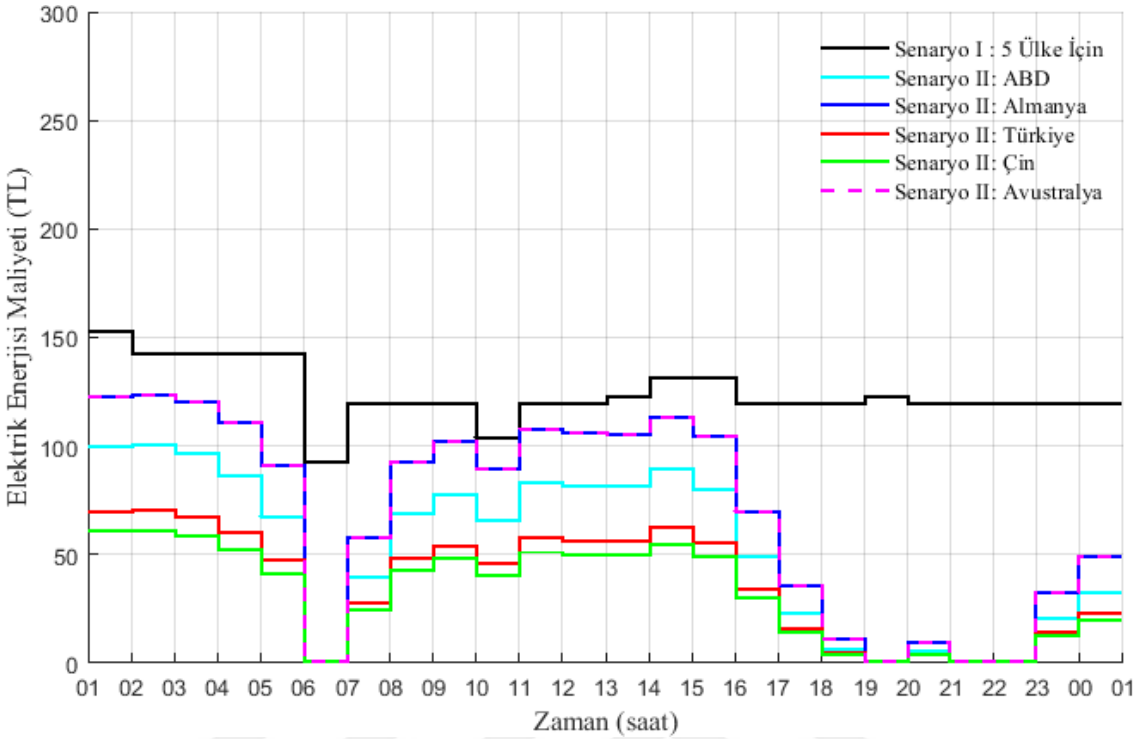
5.1 Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Algoritması I İçin Araştırma Bulguları

GEEYA I için iki farklı ana senaryo düşünülerek benzetim çalışması yapılmıştır. Senaryo I'de gemide herhangi bir alternatif enerji kaynağının (FV, RT, EDS, KET) ve enerji yönetim sisteminin olmadığı düşünülmüştür. Bu durumda, gemi limanda iken güç ihtiyacı sadece DJ'lerde MDO yakıtı kullanılarak karşılanmaktadır. Senaryo II'de ise geminin alternatif enerji kaynaklarına ve akıllı şebeke altyapısına uygun bir enerji yönetim sistemine sahip olduğu düşünülmüştür. Senaryo II'de Şekil 5.1'de verilen üretim, tüketim ve depolama dengesi dikkate alınmıştır. Gemideki güç ihtiyacını karşılamada YEK ve EDS'nin yetersiz kalması durumunda öncelik kriterine göre DJ veya KET sistemi ikincil enerji kaynağı olarak devreye girmektedir. Senaryo II'de ekonomik, çevresel (CO_2), çevresel (NO_x), çevresel (SO_2) ve çevresel (PM) olmak üzere beş farklı önceliğin seçilmesi durumu dikkate alınmıştır.

GEEYA I'in önemini açıklamak için oluşturulan senaryolarda geminin ABD, Almanya, Türkiye, Çin ve Avustralya limanlarında 24 saat kalması durumunda gerçekleşecek elektrik enerjisi maliyetleri ve CO_2, NO_x, SO_2, PM emisyon salımları hesaplanmış, karşılaştırma analizleri yapılmış ve enerji tasarruf potansiyelleri ortaya çıkarılmıştır.

Farklı senaryolar için GEEYA I'in uygulanması durumunda ülke limanlarında 24 saat boyunca gerçekleşecek elektrik enerjisi maliyetleri Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir.

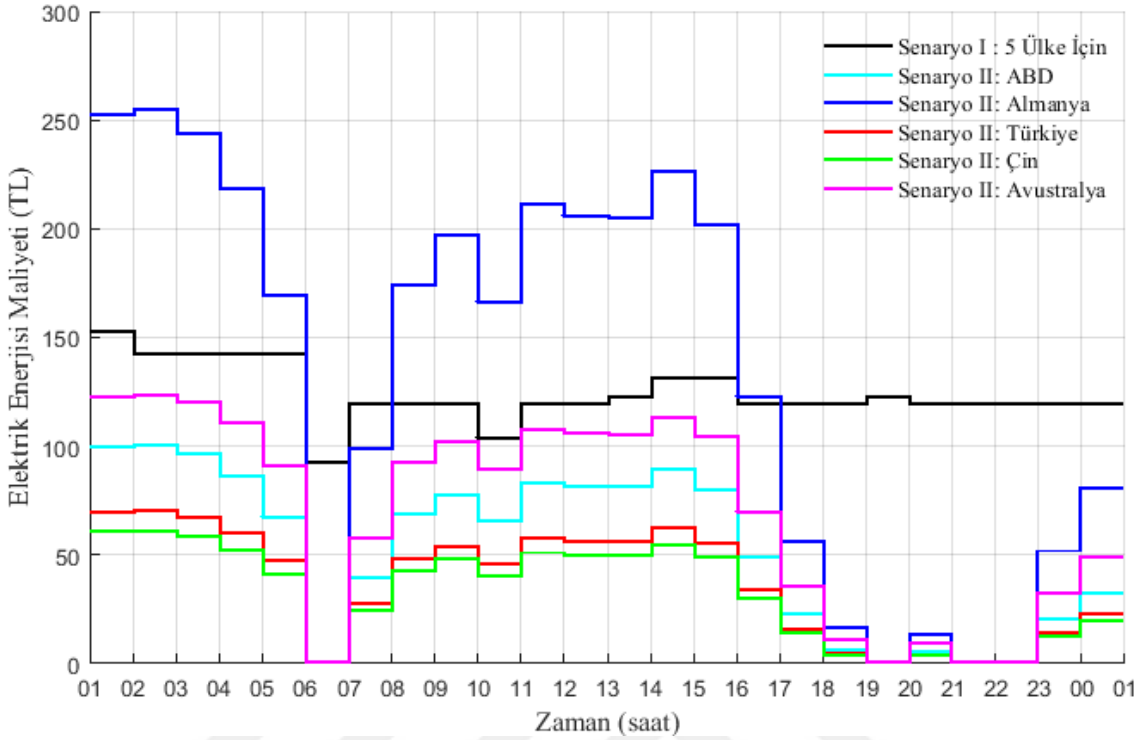
Senaryo I ve Senaryo II: Ekonomik öncelik için gerçekleşen elektrik enerjisi maliyetleri Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2 GEEYA I'de Senaryo I ve Senaryo II: Ekonomik öncelik için gerçekleşen elektrik enerjisi maliyeti

Senaryo II'de ekonomik önceliğin seçilmesi durumunda, Senaryo I'e oranla minimum elektrik enerjisi maliyeti Çin limanlarında gerçekleşmektedir. Elektrik enerjisi maliyetindeki azalma oranı ise beş ülkenin limanlarında %45 ila %74 arasında değişmektedir. Almanya ve Avustralya limanları için aynı değerler elde edildiğinden dolayı Avustralya verileri diğer verilerden farklı biçimde gösterilmiştir.

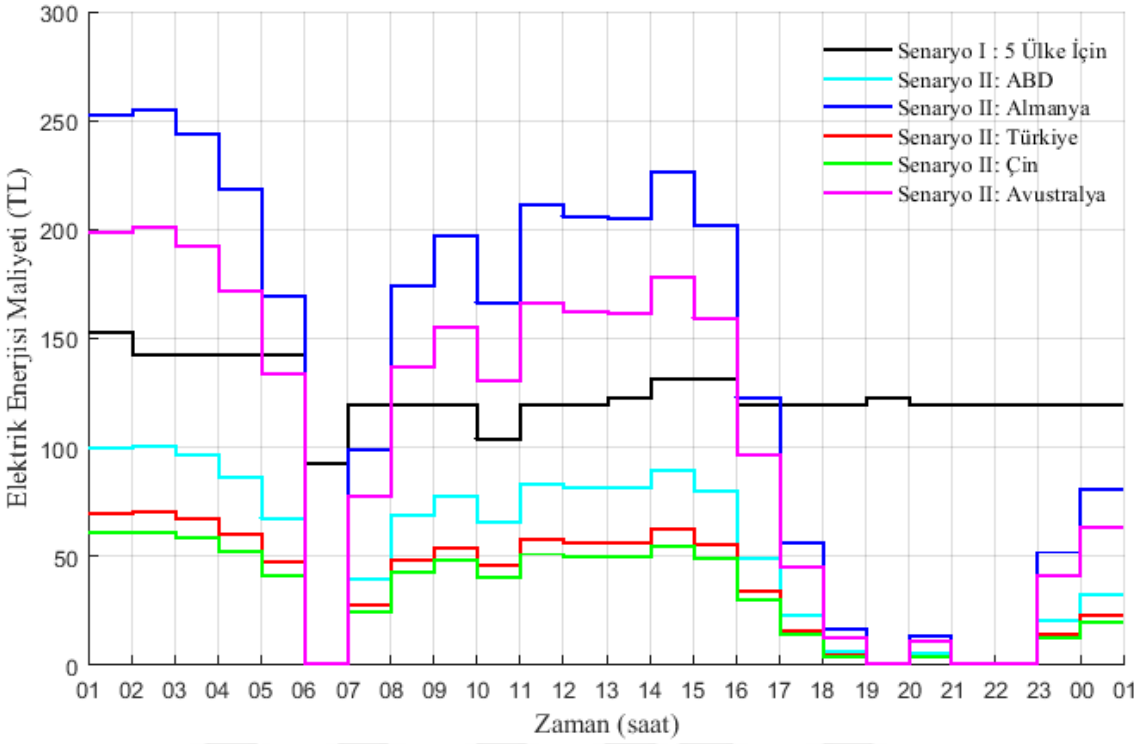
Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (CO_2) öncelik için gerçekleşen elektrik enerjisi maliyetleri Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3 GEEYA I'de Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (CO_2) öncelik için gerçekleşen elektrik enerjisi maliyeti

Senaryo II'de CO_2 emisyonunun öncelikli kriter seçilmesi durumunda, Senaryo I'e oranla minimum elektrik enerjisi maliyeti Çin limanlarında gerçekleşmektedir. Elektrik enerjisi maliyetindeki azalma oranı ise ABD, Türkiye, Çin ve Avustralya limanlarında %45 ila %74 arasında değişmektedir. Almanya limanlarında ise emisyon salımı kriteri önceliği nedeni ile en çevreci kaynağın kullanılması sağlanmıştır. Bu durum ise enerji maliyetinde Senaryo I'e göre %6'lık bir artışa neden olmuştur.

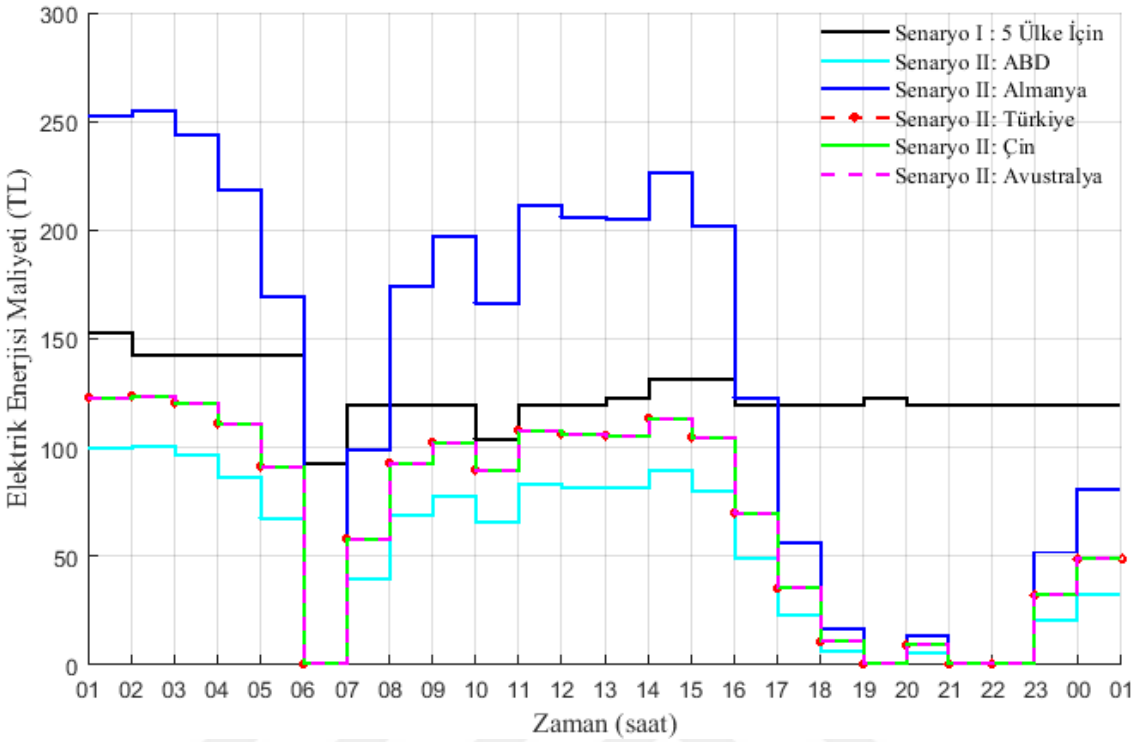
Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (NO_x) öncelik için gerçekleşen elektrik enerjisi maliyetleri Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4 GEEYA I'de Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (NO_x) öncelik için gerçekleşen elektrik enerjisi maliyeti

Senaryo II'de NO_x emisyonunun öncelikli kriter seçilmesi durumunda, Senaryo I'e oranla minimum elektrik enerjisi maliyeti Çin limanlarında gerçekleşmektedir. Elektrik enerjisi maliyetindeki azalma oranı ise ABD, Türkiye, Çin ve Avustralya limanlarında %17 ila %74 arasında değişmektedir. Almanya limanlarında ise emisyon salımı kriteri önceliği nedeni ile en çevreci kaynağın kullanılması sağlanmıştır. Bu durum ise enerji maliyetinde Senaryo I'e göre %6'lık bir artışa neden olmuştur.

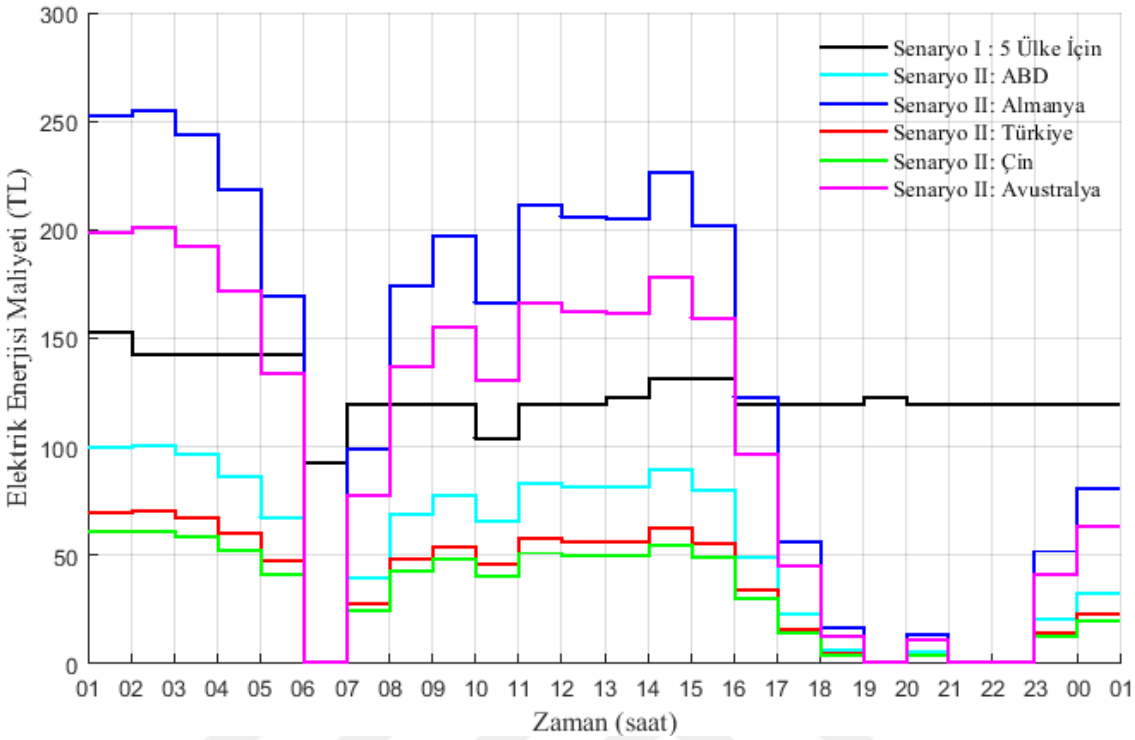
Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (SO_2) öncelik için gerçekleşen elektrik enerjisi maliyetleri Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5 GEEYA I'de Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (SO_2) öncelik için gerçekleşen elektrik enerjisi maliyeti

Senaryo II'de SO_2 emisyonunun öncelikli kriter seçilmesi durumunda, Senaryo I'e oranla minimum elektrik enerjisi maliyeti ABD limanlarında gerçekleşmektedir. Elektrik enerjisi maliyetindeki azalma oranı ise ABD, Türkiye, Çin ve Avustralya limanlarında %45 ila %58 arasında değişmektedir. Almanya limanlarında ise emisyon salımı kriteri önceliği nedeni ile en çevreci kaynağın kullanılması sağlanmıştır. Bu durum ise enerji maliyetinde Senaryo I'e göre %6'lık bir artışa neden olmuştur. Türkiye, Çin ve Avustralya limanları için aynı değerler elde edildiğinden dolayı Türkiye ve Avustralya verileri diğer verilerden farklı biçimde gösterilmiştir.

Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (PM) öncelik için gerçekleşen elektrik enerjisi maliyetleri Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6 GEEYA I'de Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (PM) öncelik için gerçekleşen elektrik enerjisi maliyeti

Senaryo II'de PM emisyonunun öncelikli kriter seçilmesi durumunda, Senaryo I'e oranla minimum elektrik enerjisi maliyeti Çin limanlarında gerçekleşmektedir. Elektrik enerjisi maliyetindeki azalma oranı ise ABD, Türkiye, Çin ve Avustralya limanlarında %17 ila %74 arasında değişmektedir. Almanya limanlarında ise emisyon salımı kriteri önceliği nedeni ile en çevreci kaynağın kullanılması sağlanmıştır. Bu durum ise enerji maliyetinde Senaryo I'e göre %6'lık bir artışa neden olmuştur.

Gemide sadece DJ kullanılması yerine alternatif enerji kaynaklarının ve enerji yönetim sisteminin kullanılması durumunda farklı öncelik kriterleri için toplam elektrik enerjisi maliyetindeki değişimin yüzdesi Tablo 5.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1 GEEYA I için Senaryo I yerine Senaryo II'de belirtilen öncelik kriterlerinin kullanılması durumunda toplam elektrik enerjisi maliyetindeki değişimin yüzdesi

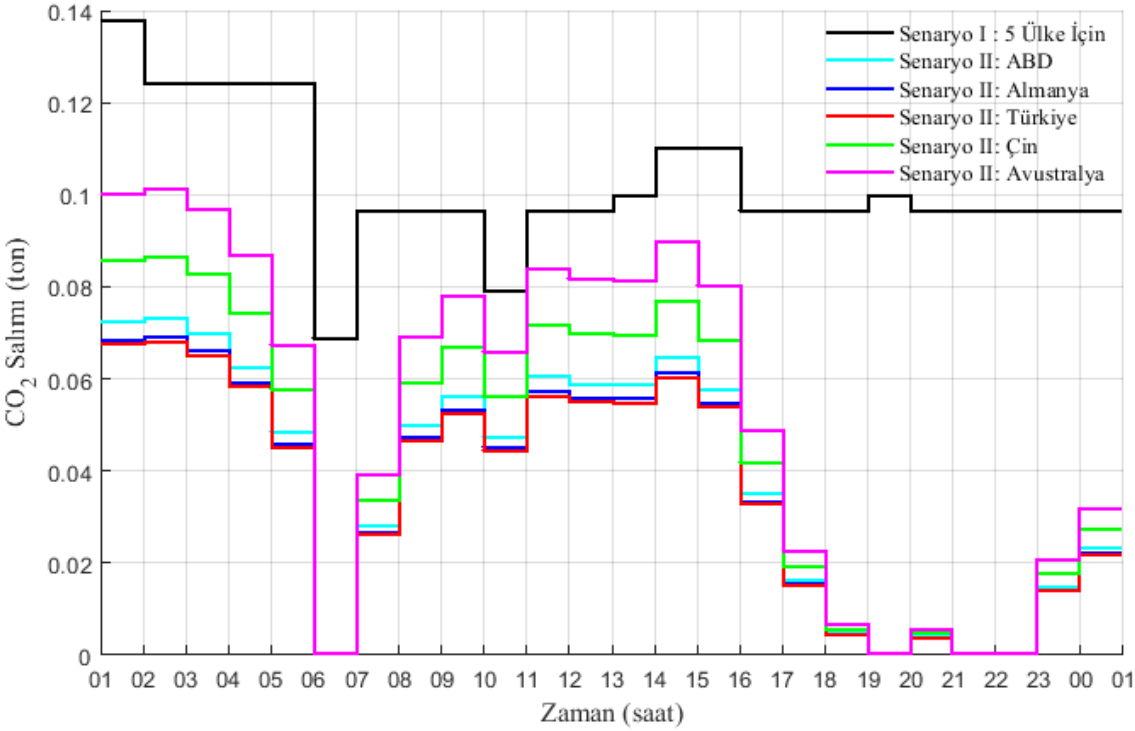
Ülke	**% Değişim**				
	Ekonomik Öncelik	**Çevresel (CO_2) Öncelik**	**Çevresel (NO_x) Öncelik**	**Çevresel (SO_2) Öncelik**	**Çevresel (PM) Öncelik**
ABD	-58	-58	-58	-58	-58
Almanya	-45	+6	+6	+6	+6
Türkiye	**-71**	**-71**	**-71**	**-45**	**-71**
Çin	-74	-74	-74	-45	-74
Avustralya	-45	-45	-17	-45	-17

"+" elektrik enerjisi maliyetindeki artışı, "-" ise elektrik enerjisi maliyetindeki azalışı ifade etmektedir.

Ayrıca, geminin 24 saat boyunca ABD, Almanya, Türkiye, Çin ve Avustralya limanlarında kalması durumunda toplam elektrik enerjisi maliyeti Senaryo I'de 2993 TL olmaktadır. Senaryo II: Ekonomik öncelik için toplam elektrik enerjisi maliyeti ABD limanlarında 1295 TL, Almanya limanlarında 1658 TL, Türkiye limanlarında 876 TL, Çin limanlarında 766 TL, Avustralya limanlarında ise 1658 TL olmaktadır. Senaryo II: Çevresel (CO_2) öncelik için toplam elektrik enerjisi maliyeti ABD limanlarında 1259 TL, Almanya limanlarında 3174 TL, Türkiye limanlarında 876 TL, Çin limanlarında 766 TL, Avustralya limanlarında ise 1658 TL olmaktadır. Senaryo II: Çevresel (NO_x) öncelik için toplam elektrik enerjisi maliyeti ABD limanlarında 1259 TL, Almanya limanlarında 3174 TL, Türkiye limanlarında 876 TL, Çin limanlarında 766 TL, Avustralya limanlarında ise 2499 TL olmaktadır. Senaryo II: Çevresel (SO_2) öncelik için toplam elektrik enerjisi maliyeti ABD

limanlarında 1259 TL, Almanya limanlarında 3174 TL, Türkiye limanlarında 1658 TL, Çin limanlarında 766 TL, Avustralya limanlarında ise 2499 TL olmaktadır.

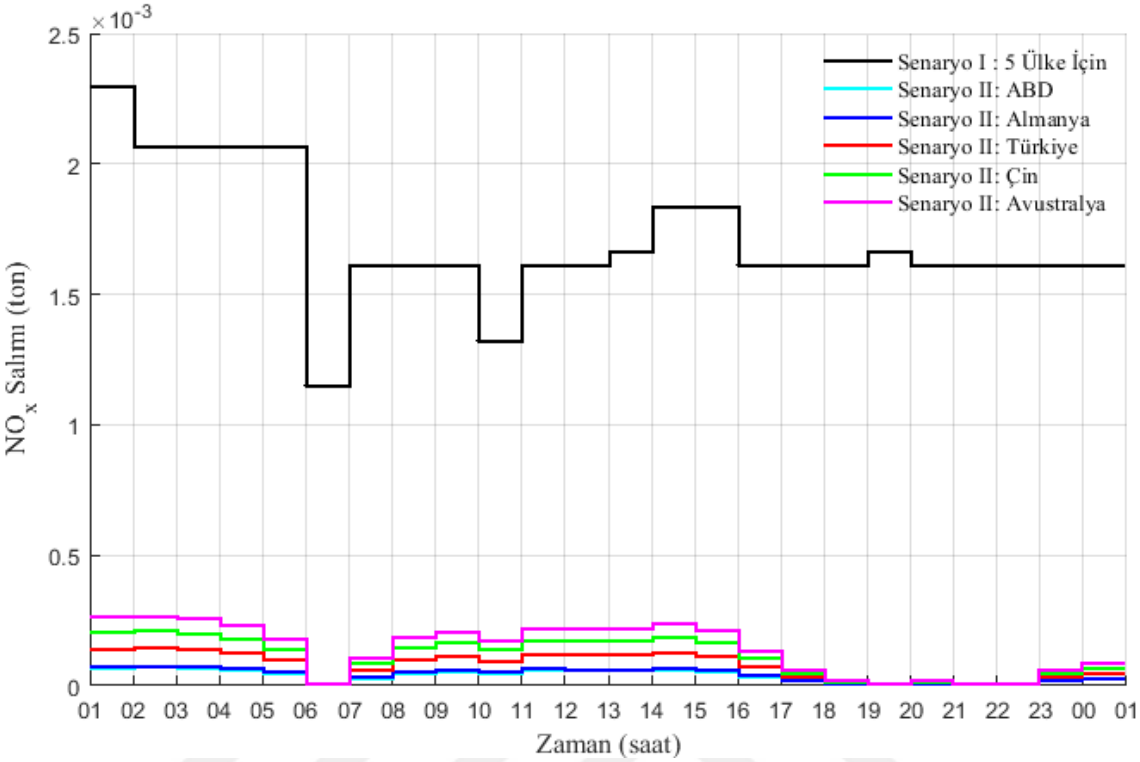
Farklı senaryolar için GEEYA I'in uygulanması durumunda ülke limanlarında 24 saat boyunca gerçekleşecek emisyon salımları Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (CO_2) öncelik için gerçekleşen CO_2 salımı Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 GEEYA I'de Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (CO_2) öncelik için gerçekleşen CO_2 salımı

Senaryo II'de çevresel öncelik olarak CO_2'nin seçilmesi durumunda, Senaryo I'e oranla minimum CO_2 salımı Türkiye limanlarında gerçekleşmektedir. CO_2 salımındaki azalma oranı ise beş ülkenin limanlarında %49 ila %66 arasında değişmektedir.

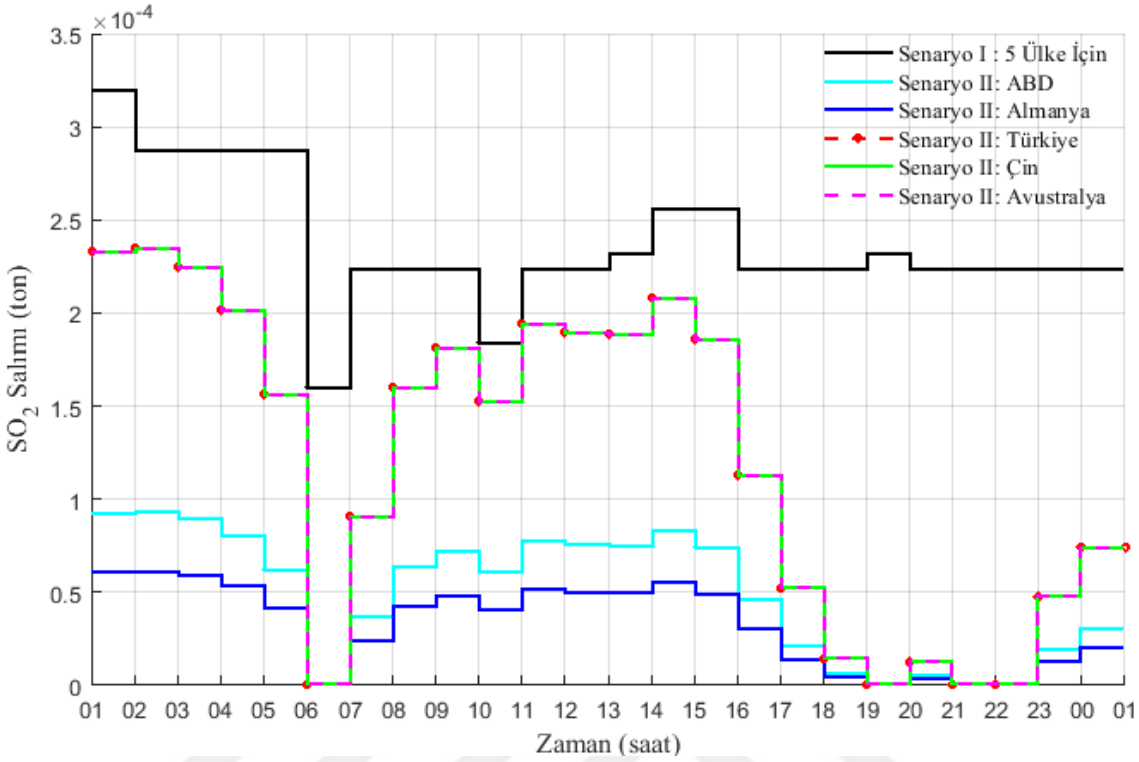
Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (NO_x) öncelik için gerçekleşen NO_x salımı Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



Şekil 5.8 GEEYA I'de Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (NO_x) öncelik için gerçekleşen NO_x salımı

Senaryo II'de çevresel öncelik olarak NO_x'in seçilmesi durumunda, Senaryo I'e oranla minimum NO_x salımı ABD ve Almanya limanlarında gerçekleşmektedir. NO_x salımındaki azalma oranı ise beş ülkenin limanlarında %92 ila %98 arasında değişmektedir.

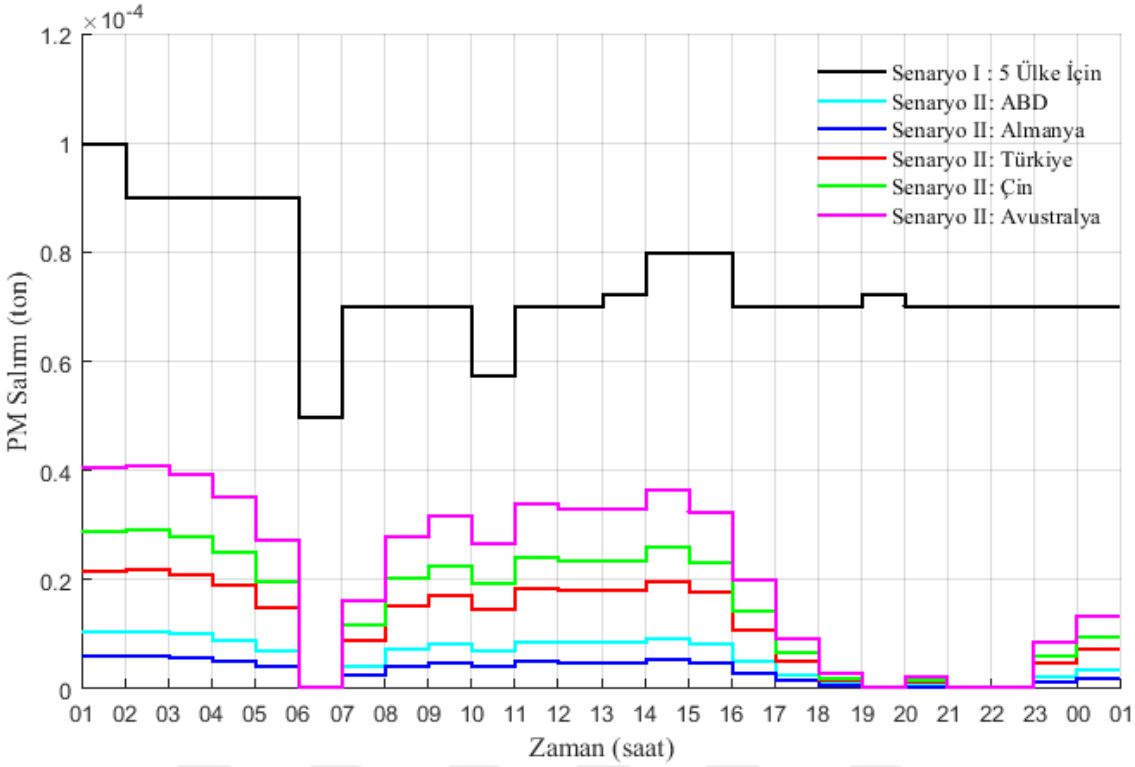
Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (SO_2) öncelik için gerçekleşen SO_2 salımı Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9 GEEYA I'de Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (SO_2) öncelik için gerçekleşen SO_2 salımı

Senaryo II'de çevresel öncelik olarak SO_2'nin seçilmesi durumunda, Senaryo I'e oranla minimum SO_2 salımı Almanya limanlarında gerçekleşmektedir. SO_2 salımındaki azalma oranı ise beş ülkenin limanlarında %49 ila %87 arasında değişmektedir. Türkiye, Çin ve Avustralya limanları için aynı değerler elde edildiğinden dolayı Türkiye ve Avustralya verileri diğer verilerden farklı biçimde gösterilmiştir.

Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (PM) öncelik için gerçekleşen PM salımı Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10 GEEYA I'de Senaryo I ve Senaryo II: Çevresel (PM) öncelik için gerçekleşen PM salımı

Senaryo II'de çevresel öncelik olarak PM'in seçilmesi durumunda, Senaryo I'e oranla minimum PM salımı Almanya limanlarında gerçekleşmektedir. PM salımındaki azalma oranı ise beş ülkenin limanlarında %71 ila %96 arasında değişmektedir.

Gemide sadece DJ kullanılması yerine alternatif enerji kaynaklarının ve enerji yönetim sisteminin kullanılması durumunda farklı öncelik kriterleri için toplam emisyon salımındaki değişimin yüzdesi Tablo 5.2'de gösterilmiştir.

Tablo 5.2 GEEYA I için Senaryo I yerine Senaryo II'de belirtilen öncelik kriterlerinin kullanılması durumunda toplam emisyon salımındaki değişimin yüzdesi

Ülke	**% Değişim**			
	Çevresel (CO_2) Öncelik İçin CO_2 Salımı	**Çevresel (NO_x) Öncelik İçin NO_x Salımı**	**Çevresel (SO_2) Öncelik İçin SO_2 Salımı**	**Çevresel (PM) Öncelik İçin PM Salımı**
ABD	-63	-98	-80	-93
Almanya	-65	-98	-87	-96
Türkiye	**-66**	**-96**	**-49**	**-85**
Çin	-56	-94	-49	-80
Avustralya	-49	-92	-49	-71
"+" emisyon salımındaki artışı, "-" ise emisyon salımındaki azalışı ifade etmektedir.				

Ayrıca, GEEYA I ile gemi limanda iken yetkililer tarafından hem ekonomik hem de çevresel önceliğin aynı anda istenilmesi durumu analiz edilebilmekte, seçeneğin mümkün olup olmadığı belirlenebilmekte ve mümkün olması durumunda sistem bu seçeneğe göre çalıştırılabilmektedir.

Hem ekonomik hem de çevresel önceliğin hangi ülkelerin limanlarında gerçekleşip gerçekleşemeyeceği Tablo 5.3'te gösterilmiştir.

Tablo 5.3 GEEYA I için hem ekonomik hem de çevresel önceliğin gerçekleşme olasılığı

Ülke	**Hem Ekonomik Hem Çevresel (CO_2) Öncelik**	**Hem Ekonomik Hem Çevresel (NO_x) Öncelik**	**Hem Ekonomik Hem Çevresel (SO_2) Öncelik**	**Hem Ekonomik Hem Çevresel (PM) Öncelik**	**Hem Ekonomik Hem Çevresel (Tüm Emisyon Türleri) Öncelik**
ABD	+	+	+	+	+
Almanya	-	-	-	-	-
Türkiye	**+**	**+**	**-**	**+**	**-**
Çin	+	+	-	+	-
Avustralya	+	-	+	-	-
"+" her iki olasılığın mümkün olduğunu, "-" ise her iki olasılığın mümkün olmadığını ifade etmektedir.					

Tablo 5.3'e göre ABD limanlarında hem ekonomik hem de çevresel (CO_2, NO_x, SO_2 ve PM için) öncelik seçilebilmektedir. Almanya limanlarında hem ekonomik hem de çevresel öncelik aynı anda seçilememektedir. Türkiye ve Çin limanlarında hem ekonomik hem de çevresel (CO_2, NO_x ve PM için) öncelik seçilebilmektedir. Avustralya limanlarında ise hem ekonomik hem de çevresel (CO_2 ve SO_2 için) öncelik aynı anda seçilebilmektedir.

GEEYA I ile gemi personeli öncelik kriterlerini dikkate alarak gemideki elektrik enerjisi maliyeti ve emisyon salımı potansiyeli hakkında detaylı analiz yapma ve karşılaştırma imkânı bulacaktır. Geminin yanaştığı limanda özel kısıtlamaların bulunup bulunmadığına bakılarak en uygun öncelik seçilebilecektir. Örneğin, geminin bulunduğu liman ECA bölgesinde veya AB limanlarında ise geminin düşük sülfürlü yakıt veya KET sistemini kullanması tercih edilecektir. Bu durumda, gemi personeli çevresel önceliği seçerek, bu kritere en uygun ikincil enerji kaynağının devreye girmesini sağlayacaktır. Gemi herhangi bir kısıtlamaya tabi olmayan bir limana yanaştığında ise gemi personeli ekonomik önceliği seçerek en ekonomik ikincil enerji kaynağının devreye girmesini sağlayacaktır.

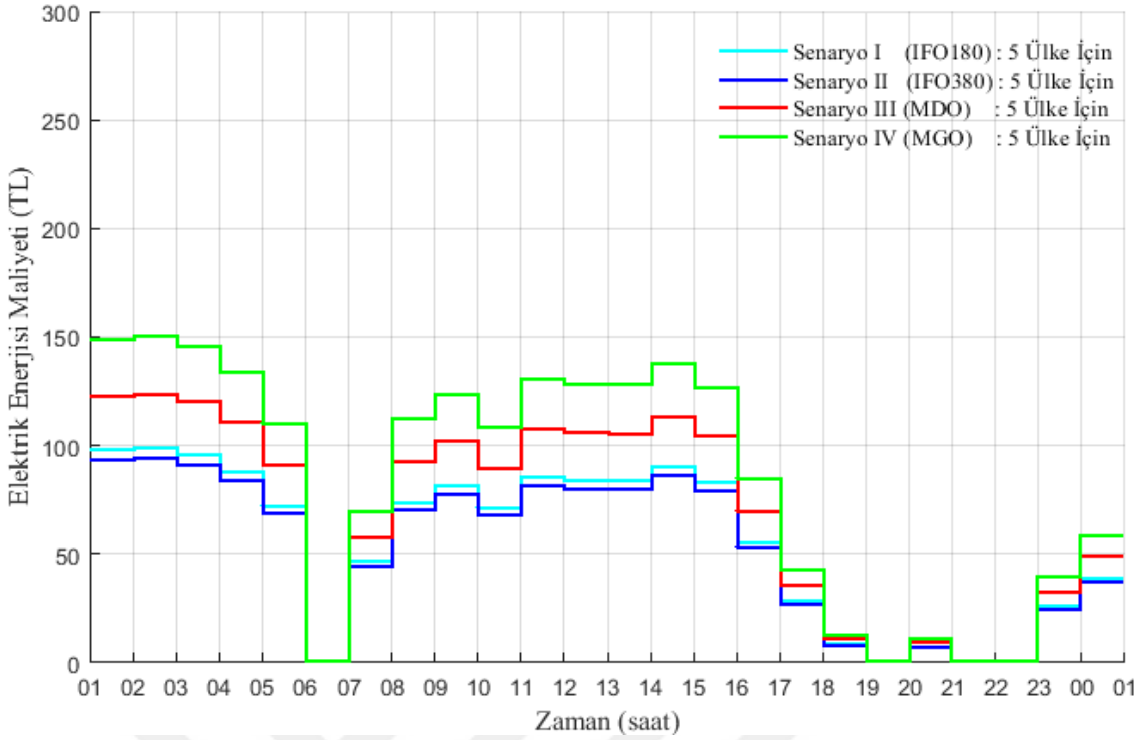
5.2 Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Algoritması II İçin Araştırma Bulguları

GEEYA II için yapılan benzetim çalışmasında beş farklı senaryo düşünülmüştür. Tüm senaryolarda geminin alternatif enerji kaynaklarına ve akıllı şebeke altyapısına uygun bir enerji yönetim sistemine sahip olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, senaryolar için Şekil 5.1'de verilen üretim, tüketim ve depolama dengesi dikkate alınmıştır. Gemideki güç ihtiyacını karşılamada YEK ve EDS'nin yetersiz kalması durumunda DJ veya KET sistemi ikincil enerji kaynağı olarak devreye girmektedir. Bu aşamada beş farklı senaryo gerçekleşmektedir. Senaryo I'de DJ'lerde deniz yakıtı olarak IFO180 kullanılmaktadır. Senaryo II'de DJ'lerde deniz yakıtı olarak IFO380 kullanılmaktadır. Senaryo III'te DJ'lerde deniz yakıtı olarak MDO kullanılmaktadır. Senaryo IV'te DJ'lerde deniz yakıtı olarak MGO kullanılmaktadır. Senaryo V'te ise geminin elektrik enerjisi ihtiyacı KET sistemi ile karşılanmaktadır.

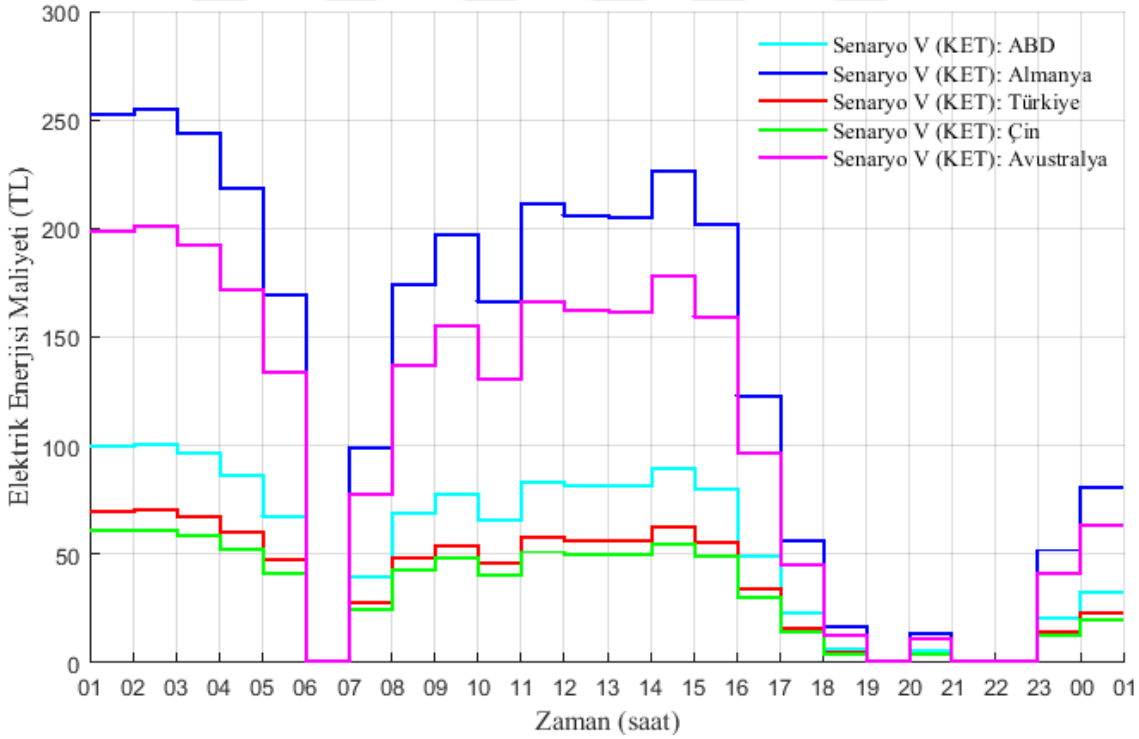
GEEYA II'nin önemini açıklamak için oluşturulan senaryolarda, geminin ABD, Almanya, Türkiye, Çin ve Avustralya limanlarında 24 saat kalması durumunda gerçekleşecek elektrik enerjisi maliyetleri ve CO_2, NO_x, SO_2, PM emisyon salımları hesaplanmış, karşılaştırma analizleri yapılmış ve enerji tasarruf potansiyelleri ortaya çıkarılmıştır. Farklı senaryolar için GEEYA II'in uygulanması durumunda ülke limanlarında 24 saat boyunca gerçekleşecek elektrik enerjisi maliyetleri Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de gösterilmiştir.

Senaryo I: IFO180, Senaryo II: IFO380, Senaryo III: MDO ve Senaryo IV: MGO için gerçekleşen elektrik enerjisi maliyetleri Şekil 5.11'de gösterilmiştir.

Senaryo V: KET için gerçekleşen elektrik enerjisi maliyetleri ise Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.11 GEEYA II'de Senaryo I, II, III ve IV için gerçekleşen elektrik enerjisi maliyeti



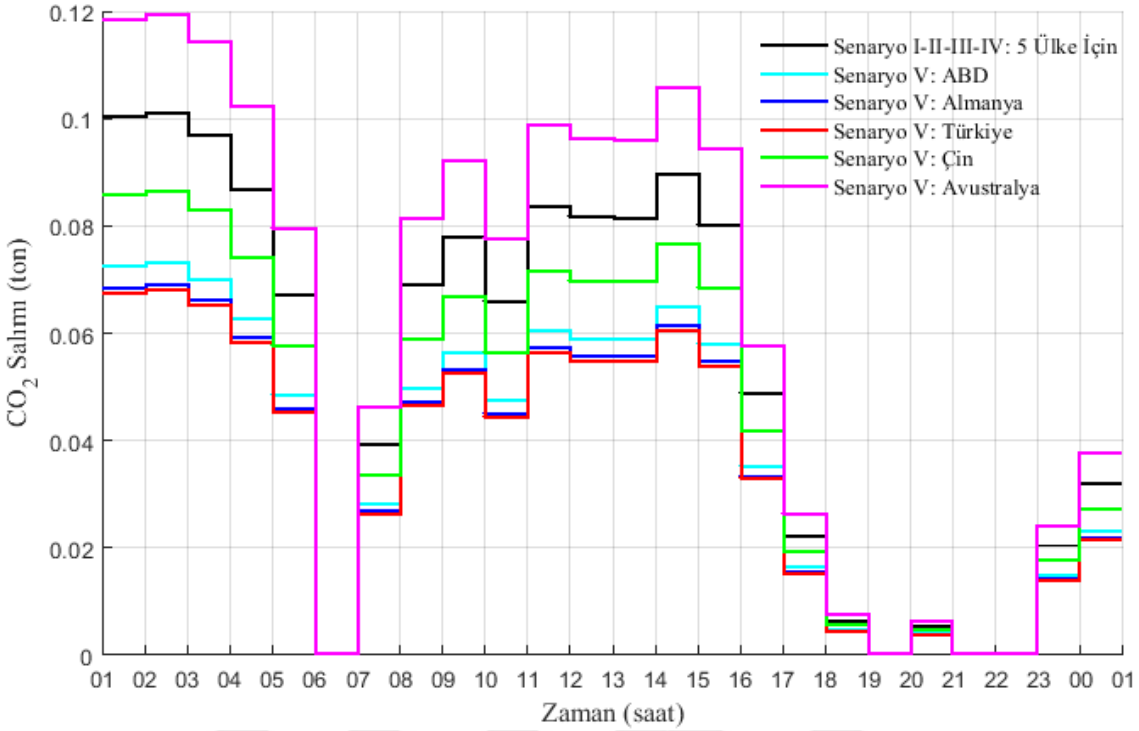
Şekil 5.12 GEEYA II'de Senaryo V için gerçekleşen elektrik enerjisi maliyeti

Şekil 5.11 ve Şekil 5.12, gemideki en ekonomik elektrik enerjisi temininin Çin limanlarında ikincil enerji kaynağı olarak Senaryo V: KET'in seçilmesi durumunda, gemideki en pahalı elektrik enerjisi temininin ise Almanya limanlarında ikincil enerji kaynağı olarak Senaryo V: KET'in seçilmesi durumunda gerçekleştiğini göstermektedir.

Geminin 24 saat boyunca ABD, Almanya, Türkiye, Çin ve Avustralya limanlarında kalması durumunda toplam elektrik enerjisi maliyeti Senaryo I: IFO180'de 1321 TL, Senaryo II: IFO380'de 1259 TL, Senaryo III: MDO'da 1658 TL ve Senaryo IV: MGO'da 2007 TL olmaktadır. Senaryo V: KET için toplam elektrik enerjisi maliyeti ise ABD limanlarında 1259 TL, Almanya limanlarında 3174 TL, Türkiye limanlarında 876 TL, Çin limanlarında 766 TL ve Avustralya limanlarında 2449 TL olmaktadır.

Farklı senaryolar için GEEYA II'in uygulanması durumunda 24 saat boyunca ülke limanlarında gerçekleşen emisyon salımları Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da gösterilmiştir.

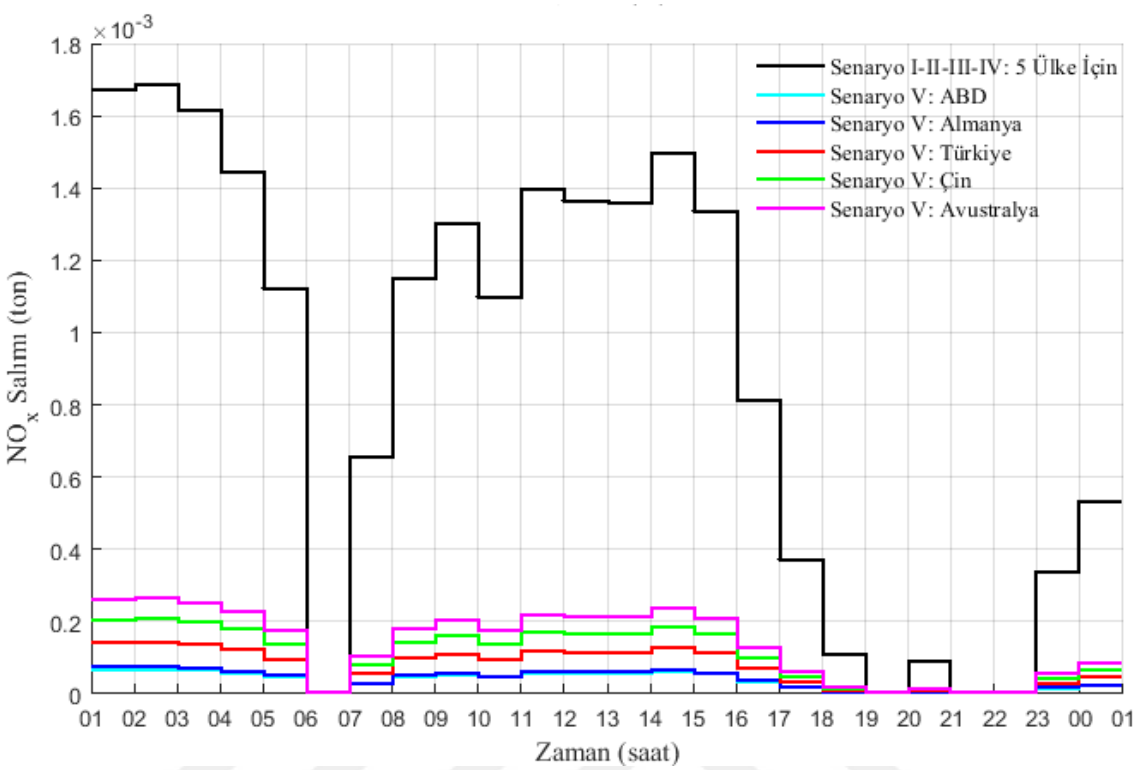
Senaryo I: IFO180, Senaryo II: IFO380, Senaryo III: MDO, Senaryo IV: MGO ve Senaryo V: KET için gerçekleşen CO_2 salımı Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13 GEEYA II'de Senaryo I, II, III, IV ve V için gerçekleşen CO_2 salımı

Minimum CO_2 salımı Türkiye limanlarında, maksimum CO_2 salımı ise Avustralya limanlarında Senaryo V: KET ile gerçekleşmektedir. CO_2 salımı açısından DJ'lerde deniz yakıtı kullanımı yerine KET sisteminin tercih edilmesi ABD, Almanya, Türkiye ve Çin limanları için daha çevreci bir yaklaşım olacaktır.

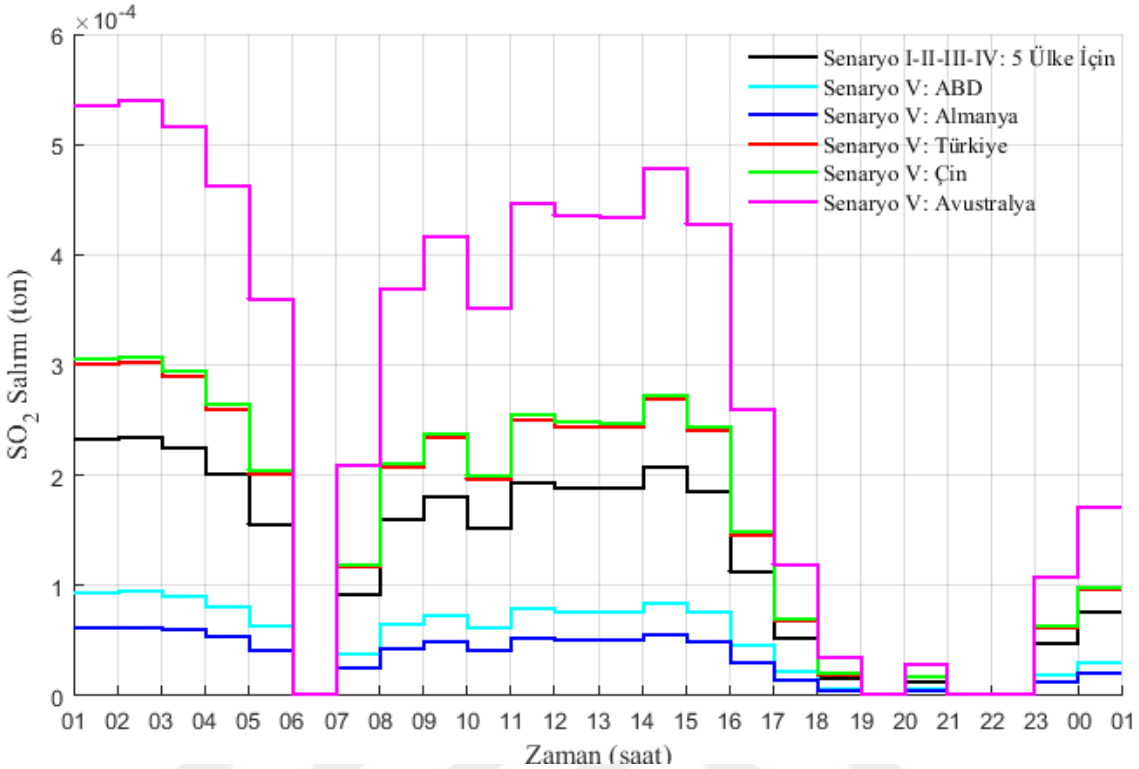
Senaryo I: IFO180, Senaryo II: IFO380, Senaryo III: MDO, Senaryo IV: MGO ve Senaryo V: KET için gerçekleşen NO_x salımı Şekil 5.14'te gösterilmiştir.



Şekil 5.14 GEEYA II'de Senaryo I, II, III, IV ve V için gerçekleşen NO_x salımı

Minimum NO_x salımı ABD limanlarında Senaryo V: KET ile gerçekleşmektedir. Maksimum NO_x salımının ise gemide DJ'nin kullanılması durumunda gerçekleşmektedir. NO_x salımı açısından DJ'lerde deniz yakıtı kullanımı yerine KET sisteminin tercih edilmesi beş ülke limanında daha çevreci bir yaklaşım olacaktır.

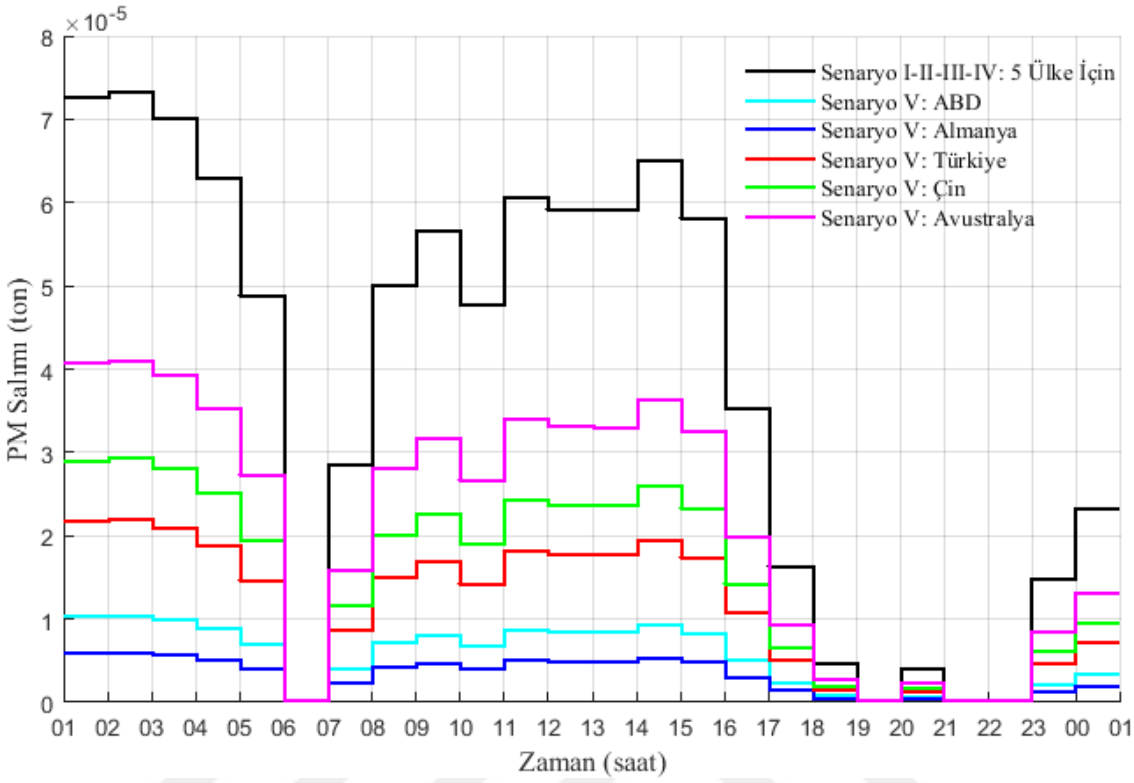
Senaryo I: IFO180, Senaryo II: IFO380, Senaryo III: MDO, Senaryo IV: MGO ve Senaryo V: KET için gerçekleşen SO_2 salımı Şekil 5.15'te gösterilmiştir.



Şekil 5.15 GEEYA II'de Senaryo I, II, III, IV ve V için gerçekleşen SO_2 salımı

Minimum SO_2 salımı Almanya limanlarında, maksimum SO_2 salımı ise Avustralya limanlarında Senaryo V: KET ile gerçekleşmektedir. SO_2 salımı açısından DJ'lerde deniz yakıtı kullanımı yerine KET sisteminin tercih edilmesi ABD ve Almanya limanlarında daha çevreci bir yaklaşım olacaktır.

Senaryo I: IFO180, Senaryo II: IFO380, Senaryo III: MDO, Senaryo IV: MGO ve Senaryo V: KET için gerçekleşen PM salımı Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



Şekil 5.16 GEEYA II'de Senaryo I, II, III, IV ve V için gerçekleşen PM salımı

Minimum PM salımı ABD ve Almanya limanlarında Senaryo V: KET ile gerçekleşmektedir. Maksimum PM salımı ise tüm ülke limanlarında DJ'lerde deniz yakıtı kullanılması durumunda gerçekleşmektedir. PM salımı açısından DJ'lerde deniz yakıtı kullanımı yerine KET sisteminin tercih edilmesi beş ülke limanında da daha çevreci bir yaklaşım olacaktır.

Gemide farklı yakıt tiplerinin kullanılması yerine KET sisteminin kullanılması durumunda toplam elektrik enerjisi maliyetindeki ve emisyon salımındaki değişimin yüzdesi Tablo 5.4'te gösterilmiştir.

Tablo 5.4 GEEYA II için gemide farklı yakıt tiplerinin kullanılması yerine KET sisteminin kullanılması durumunda toplam elektrik enerjisi maliyetindeki ve emisyon salımındaki değişimin yüzdesi

Ülke	**% Elektrik enerjisi maliyeti değişimi**				**Senaryo I, II, III ve IV'e göre emisyon salımının % değişimi**			
	Senaryo I (IFO180)'e göre	**Senaryo II (IFO380)'e göre**	**Senaryo III (MDO)'ya göre**	**Senaryo IV (MGO)'ya göre**	**CO_2**	**NO_x**	**SO_2**	**PM**
ABD	-5	0	-24	-37	-28	-96	-59	-86
Almanya	+140	+152	+91	+58	-32	-96	-74	-92
Türkiye	**-34**	**-30**	**-47**	**-56**	**-33**	**-92**	**+31**	**-70**
Çin	-42	-39	-54	-62	-14	-88	+31	-60
Avustralya	+89	+99	+51	+25	+18	-84	+131	-44
"+" elektrik enerjisi maliyetindeki ve emisyon salımındaki artışı, "-" ise elektrik enerjisi maliyetindeki ve emisyon salımındaki azalışı ifade etmektedir.								

GEEYA II ile gemi personeli mevcut ikincil enerji kaynaklarını dikkate alarak gemideki elektrik enerjisi maliyeti ve emisyon salımı potansiyeli hakkında ayrıntılı analiz yapma ve karşılaştırma imkânı bulacaktır. Geminin yanaştığı limanda özel kısıtlamaların bulunup bulunmadığına bakılarak en uygun ikincil enerji kaynağı seçilebilecektir. Örneğin, geminin bulunduğu liman ECA bölgesinde veya AB limanlarında ise geminin düşük sülfürlü yakıt (MDO ve MGO) veya KET sistemini kullanması tercih edilecek ve alternatif enerji kaynakları arasında ekonomik ve çevresel karşılaştırma analizleri yapılabilecektir. Gemi herhangi bir kısıtlamaya tabi olmayan bir limana gittiğinde ise karşılaştırma analizine yüksek sülfürlü yakıtlarda (IFO180 ve IFO380) dâhil edilecek ve alternatif enerji kaynakları arasında daha kapsamlı ekonomik ve çevresel karşılaştırma analizleri yapılabilecektir.

6
Sonuç ve Öneriler

Tez çalışmasında, yeni nesil gemi ve yeşil liman tasarımları ile akıllı şebeke sistemlerinin bir bütün olarak etkileşiminin sağlanabileceği "Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Sistemi" önerilmiştir. Ayrıca, önerilen gemi elektrik enerjisi yönetim sistemi için farklı ihtiyaç ve gereksinimleri karşılayacak iki farklı "Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Algoritması" geliştirilmiştir.

Algoritma I'de geminin limanda iken sahip olduğu alternatif enerji kaynaklarından en ekonomik, en çevreci veya hem ekonomik hem de çevreci olanı seçebilmesi ve elektrik enerjisi ihtiyacını karşılaması hedeflenmiştir.

Algoritma II'de geminin limanda iken sahip olduğu alternatif enerji kaynaklarına ek olarak dizel jeneratörlerinde farklı yakıt tiplerinin kullanılması durumunda en uygun enerji kaynağının ekonomik ve çevresel açıdan belirlenmesi hedeflenmiştir.

Geliştirilen enerji yönetim algoritmaları ile gemilerde enerji verimliliğinin sağlanması ve tasarruf potansiyellerinin açığa çıkarılması amaçlanmıştır. Ayrıca, gemi elektrik enerjisi yönetim sisteminin temel bileşenleri incelenerek önerilen model için maliyet analizi yapılmıştır.

Gemi elektrik enerjisi yönetim sisteminin ekonomik ve çevresel etkilerini incelemek amacı ile MATLAB programında benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmasında gemi tarafına ait verileri elde etmek için "M/V İnce Hamburg" gemisi model alınmıştır. Bu kapsamda gemide çeşitli incelemeler ve ölçümler yapılmıştır. Liman tarafına ait veriler için farklı bölgelerde yer alan Amerika Birleşik Devletleri, Almanya, Türkiye Cumhuriyeti, Çin Halk Cumhuriyeti ve Avustralya limanları dikkate alınmıştır. Akıllı şebeke kısmı ile ilgili güncel veriler ise literatürden temin edilmiştir.

Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Algoritması I'in etkinliğini gözlemlemek için gerçekleştirilen benzetim çalışmasında, geminin bulunduğu limanda Uluslararası

Denizcilik Örgütü ve Avrupa Birliği kuralları kapsamında yakıt kalitesine ve emisyon salımına getirilen sınırlamalar dikkate alınarak öncelik kriterleri (en ekonomik, en çevresel, ekonomik ve çevresel) belirlenmiş ve bu kriterlere göre en uygun enerji kaynağının seçilmesi sağlanmıştır.

Geminin sadece dizel jeneratörleri ile elektrik enerjisi ihtiyacını karşılaması yerine alternatif enerji kaynakları ve enerji yönetim sistemine sahip olması durumunda oluşacak elektrik enerjisi maliyetleri ve CO_2, NO_x, SO_2, PM emisyon salımları analiz edilmiştir.

Analiz sonuçları, gemide ekonomik öncelik kriterinin seçilmesi durumunda elektrik enerjisi maliyetindeki en yüksek azalmanın geleneksel gemi güç sistemine göre %74 ile Çin limanlarında, en düşük azalmanın ise %45 ile Almanya ve Avustralya limanlarında gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca, gemide çevresel (CO_2) öncelik kriterinin seçilmesi durumunda CO_2 salımındaki en yüksek azalma %66 ile Türkiye limanlarında, en düşük azalma ise %49 ile Avustralya limanlarında gerçekleşmiştir. Çevresel (NO_x) öncelik kriterinin seçilmesi durumunda NO_x salımındaki en yüksek azalma %98 ile ABD ve Almanya limanlarında, en düşük azalma ise %92 ile Avustralya limanlarında gerçekleşmiştir. Çevresel (SO_2) öncelik kriterinin seçilmesi durumunda SO_2 salımındaki en yüksek azalma %87 ile Almanya limanlarında, en düşük azalma ise %49 ile Türkiye, Çin ve Avustralya limanlarında gerçekleşmiştir. Çevresel (PM) öncelik kriterinin seçilmesi durumunda ise PM salımındaki en yüksek azalma %96 ile Almanya limanlarında, en düşük azalma ise %71 ile Avustralya limanlarında gerçekleşmiştir.

Gemi Elektrik Enerjisi Yönetim Algoritması II'nin etkinliğini gözlemlemek için gerçekleştirilen benzetim çalışmasında ise geminin bulunduğu limanda Uluslararası Denizcilik Örgütü ve Avrupa Birliği kuralları kapsamında yakıt kalitesine ve emisyon salımına getirilen sınırlamalar dikkate alınarak alternatif enerji kaynakları arasından en uygun olanının ikincil enerji kaynağı olarak gemide kullanılabilmesi sağlanmıştır.

Gemide alternatif enerji kaynakları ve enerji yönetim sisteminin olması ve ikincil enerji kaynağı olarak dizel jeneratörlerde IFO180, IFO380, MDO ve MGO gibi deniz

yakıtlarının kullanılması veya kıyıdan enerji temini sisteminin tercih edilmesi durumunda oluşacak elektrik enerjisi maliyetleri ve CO_2, NO_x, SO_2, PM emisyon salımları analiz edilmiştir.

Analiz sonuçları, gemide kıyıdan enerji temini sisteminin seçilmesi durumunda elektrik enerjisi maliyetindeki en yüksek azalmanın MGO tipi deniz yakıtı kullanımına göre %62 ile Çin limanlarında, en yüksek artışın ise IFO380 tipi deniz yakıtı kullanımına göre %152 ile Almanya limanlarında gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca, gemide kıyıdan enerji temini sisteminin kullanılması durumunda CO_2 salımındaki en yüksek azalma %33 ile Türkiye limanlarında, en yüksek artış ise %18 ile Avustralya limanlarında gerçekleşmiştir. NO_x salımındaki en yüksek azalma %96 ile ABD ve Almanya limanlarında, en düşük azalma ise %84 ile Avustralya limanlarında gerçekleşmiştir. SO_2 salımındaki en yüksek azalma %74 ile Almanya limanlarında, en yüksek artış ise %131 ile Avustralya limanlarında gerçekleşmiştir. PM salımındaki en yüksek azalma ise %92 ile Almanya limanlarında, en düşük azalma ise %44 ile Avustralya limanlarında gerçekleşmiştir.

Sonuçlar, önerilen gemi elektrik enerjisi yönetim sisteminin, gemilerin enerji maliyetlerini ve emisyon salımlarını önemli derecede azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Önerilen yaklaşım ile alternatif enerji kaynaklarına sahip gemiler gemi personelinin belirlediği kriterlere en uygun enerji kaynağını kullanarak elektrik enerjisi ihtiyacını temin etme imkânına kavuşacaktır. Bu durum denizcilik sektöründe güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, enerji depolama sistemi ve kıyıdan enerji temini gibi farklı enerji kaynaklarının gemilerde kullanımına yönelik yeni bir bakış açısı kazandıracaktır. Gemiler geleceğin elektrik şebekesi olarak isimlendirilen akıllı şebeke kavramında elektrikli taşıtlar ve akıllı evler gibi ayrı bir akıllı şebeke bileşeni olarak yer almaya başlamıştır; gün geçtikçe de elektrik enerji sistemindeki önemini ve payını artıracaktır.

Günümüzde, denizcilik sektörü temsilcileri uluslararası düzenlemeler ve kısıtlamalar nedeni ile gemilerde alternatif enerji kaynaklarının etkin şekilde kullanılması ve yönetilmesine yönelik bir eğilim içerisindeler. Bu alandaki yatırımların gerçekleşmesinin önündeki en büyük engel ise kuruluş maliyetleri

olarak göze çarpmaktadır. Bu nedenle, sürdürülebilir gemi, liman ve şehir tasarımları için devletlerin gerekli bütçeleri sağlaması ve ilgili projelerde öncü olması büyük önem arz etmektedir.

Türkiye'de de bu konular ile ilgili uluslararası gündem takip edilmekte ve önemli girişimlerde bulunulmaktadır. Denizcilik sektörü açısından özellikle Tersaneler ve Kıyı Yapıları Genel Müdürlüğü, limanlarda hava kalitesini artırmak ve gemilerde alternatif enerji kaynaklarının kullanımını sağlamak amacıyla liman yetkililerini, gemi işletmecilerini, gemi donatanlarını ve sektörün diğer temsilcilerini yeni gelişmelerden haberdar etmekte, yeşil liman uygulamaları için yol göstermekte ve tavsiye kararları almaktadır. Elektrik enerjisi sektörü açısından ise özellikle Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu ve Elektrik Dağıtım Hizmetleri Derneği gibi kuruluşlar, akıllı şebeke sistemlerine geçiş için gerekli altyapıları sağlamak ve diğer ülkeler ile eş zamanlı olarak sisteme adapte olmak için pilot projeler hayata geçirmektedir.

Dünyada ve Türkiye'de Ar-Ge çalışmaları için gerekli desteklerin sağlanması ile akıllı gemi, yeşil liman ve akıllı şehirler kavramı gündelik hayatta hızlı bir şekilde yerini almış olacaktır. Bu sayede denizcilik sektörü daha sürdürülebilir bir yapıya kavuşacaktır.

Kaynakça

[1] T.C. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, *Türkiye Ulaşım ve İletişim Stratejisi: Hedef 2023*. Ankara, 2011.

[2] K. Holmberg, P. Andersson ve A. Erdemir, "Global energy consumption due to friction in passenger cars", *Tribology International*, vol. 47, pp. 221–234, Mar. 2012.

[3] S. E. Williams, S. C. Davis ve R. G. Boundy, "Transportation Energy Data Book: Edition 36", Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States), ORNL/TM-2017/513, Dec. 2017.

[4] D. H. Samosir, M. Markert ve W. Busse, "The technical and business analysis of using shore power connection in the Port of Hamburg", *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, no. 2, Feb. 2017.

[5] H. Saraçoğlu, C. Deniz ve A. Kılıç, "An investigation on the effects of ship sourced emissions in Izmir Port, Turkey", *The Scientific World Journal*, 2013.

[6] S. López-Aparicio, D. Tønnesen, T. N. Thanh ve H. Neilson, "Shipping emissions in a Nordic Port: Assessment of mitigation strategies", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 53, pp. 205–216, Jun. 2017.

[7] Marine Environment Protection Committee, *MEPC.1/Circ.684, Guideline for Voluntary Use of the Ship Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI).* London: International Maritime Organization, 2009.

[8] Marine Environment Protection Committee*, MEPC, 62nd Session*. London: International Maritime Organization, 11-15 July 2011.

[9] International Maritime Organization, *The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL), Consolidated Edition.* London: IMO Press, 2011.

[10] The European Parliament and the Council of the European Union, *Directive 2012/33/EU of the European Parliament and of the Council, Amending Council Directive 1999/32/EC as Regards the Sulphur Content of Marine Fuels*. Strasbourg, 2012.

[11] J. Hua, Y. H. Wu ve P. F. Jin, "Prospects for renewable energy for seaborne transportation—Taiwan example", *Renewable Energy*, vol. 33, no. 5, pp. 1056–1063, May 2008.

[12] Y. Li, H. Wan ve X. Meng, "Research on wind power generation application on the ships and offshore structures", in *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2009, pp. 1–3.

[13] A. Glykas, G. Papaioannou ve S. Perissakis, "Application and cost–benefit analysis of solar hybrid power installation on merchant marine vessels", *Ocean Engineering*, vol. 37, no. 7, pp. 592–602, May 2010.

[14] E. K. Dedes, D. A. Hudson ve S. R. Turnock, "Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping", *Energy Policy*, vol. 40, pp. 204–218, Jan. 2012.

[15] O. Sulaiman ve A. H. Saharuddin, "Feasibility of using solar as a supporting hybrid power system for marine diesel engine: UMT vessel experimentation experience", *Global Journal for Information Technology and Computer Science*, vol. 1, pp. 1–7, 2012.

[16] S. Babu ve J. V. Jain, "On-board solar power for small-scale distant-water fishing vessels", in *IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*, 2013, pp. 1–4.

[17] I. Kobougias, E. Tatakis ve J. Prousalidis, "PV systems installed in marine vessels: Technologies and specifications", *Advances in Power Electronics*, 2013.

[18] K. J. Lee, D. Shin, D. W. Yoo, H. K. Choi ve H. J. Kim, "Hybrid photovoltaic/ diesel green ship operating in standalone and grid-connected mode – Experimental investigation", *Energy*, vol. 49, pp. 475-483, Jan. 2013.

[19] Z. Yufang, Q. Peng ve Y. Hong, "Fuel free ship, design for next generation", in *Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2013, pp. 1–5.

[20] V. Alfonsín, A. Suarez, A. Cancela, A. Sanchez ve R. Maceiras, "Modelization of hybrid systems with hydrogen and renewable energy oriented to electric propulsion in sailboats", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 22, pp. 11763–11773, Jul. 2014.

[21] O. Cristea, M. Popescu ve A. S. Calinciuc, "A correlation between simulated and real PV system in naval conditions", in *International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*, 2014, pp. 1–6.

[22] M. M. Moustafa ve E. E. El-bokl, "Solar energy for River Nile cruisers", *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*, vol. 65, no. 2, pp. 61–72, Jun. 2014.

[23] C. Peng, S. Shounan, L. Hai ve Z. Qiang, "Modeling and simulation of ship power system integration of solar energy", in *IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 2014, pp. 1-5.

[24] W. J. Hall, "Assessment of CO_2 and priority pollutant reduction by installation of shoreside power", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 54, no. 7, pp. 462–467, May 2010.

[25] E. Tzannatos, "Cost assessment of ship emission reduction methods at berth: The case of the Port of Piraeus, Greece", *Maritime Policy & Management*, vol. 37, no. 4, pp. 427–445, Jul. 2010.

[26] I. S. Seddiek, M. A. Mosleh ve A. A. Banawan, "Fuel saving and emissions cut through shore-side power concept for high-speed crafts at the Red Sea in Egypt", *Journal of Marine Science and Application*, vol. 12, no. 4, pp. 463-472, Dec. 2013.

[27] F. Adamo, G. Andria, G. Cavone, C. De Capua, A. M. L. Lanzolla, R. Morello ve M. Spadavecchia, "Estimation of ship emissions in the Port of Taranto", *Measurement*, vol. 47, pp. 982–988, Jan. 2014.

[28] D. Paul, K. Peterson ve P. R. Chavdarian, "Designing cold ironing power systems: Electrical safety during ship berthing", *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 20, no. 3, pp. 24–32, May 2014.

[29] T. Zis, R. J. North, P. Angeloudis, W. Y. Ochieng ve M. G. Harrison Bell, "Evaluation of cold ironing and speed reduction policies to reduce ship emissions near and at ports", *Maritime Economics & Logistics*, vol. 16, no. 4, pp. 371–398, Dec. 2014.

[30] F. Ballini ve R. Bozzo, "Air pollution from ships in ports: The socio-economic benefit of cold-ironing technology", *Research in Transportation Business & Management*, vol. 17, pp. 92–98, Dec. 2015.

[31] E. A. Sciberras, B. Zahawi ve D. J. Atkinson, "Electrical characteristics of cold ironing energy supply for berthed ships", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 39, pp. 31–43, Aug. 2015.

[32] G. Sulligoi, D. Bosich, R. Pelaschiar, G. Lipardi ve F. Tosato, "Shore-to-ship power", *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 12, pp. 2381–2400, Dec. 2015.

[33] S. Espinosa, P. Casals-Torrens ve M. Castells, "Hoteling cruise ship's power requirements for high voltage shore connection installations", *Journal of Maritime Research*, vol. 13, no. 2, 2016.

[34] K. C. Nyanguthii, D. Murage ve C. M Muriithi, "Shore to ship power for Mombasa Port possibilities and challenges", In *Proceedings of Sustainable Research and Innovation Conference,* 2016, pp. 150-157.

[35] R. Winkel, U. Weddige, D. Johnsen, V. Hoen ve S. Papaefthimiou, "Shore side electricity in Europe: Potential and environmental benefits", *Energy Policy*, vol. 88, pp. 584–593, Jan. 2016.

[36] A. M. Kotrikla, T. Lilas ve N. Nikitakos, "Abatement of air pollution at an Aegean Island Port utilizing shore side electricity and renewable energy", *Marine Policy*, vol. 75, pp. 238–248, Jan. 2017.

[37] A. Innes ve J. Monios, "Identifying the unique challenges of installing cold ironing at small and medium ports – The case of Aberdeen", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 62, pp. 298–313, Jul. 2018.

[38] R. Prenc, D. Vučetić ve A. Cuculić, "High voltage shore connection in Croatia: Network configurations and formation of the connection point to the utility power grid", *Electric Power Systems Research*, vol. 157, pp. 106-117, Apr. 2018.

[39] D. Tarnapowicz ve S. German-Galkin, "International standardization in the design of 'Shore to Ship' - power supply systems of ships in port", *Management Systems in Production Engineering*, vol. 26, no. 1, pp. 9–13, Mar. 2018.

[40] L. J. Ricalde, E. Ordoñez, M. Gamez ve E. N. Sanchez, "Design of a smart grid management system with renewable energy generation", in *IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications in Smart Grid (CIASG)*, 2011, pp. 1–4.

[41] M. Dahmane, J. Bosche, A. El-Hajjaji ve M. Dafarivar, "Renewable energy management algorithm for stand-alone system", in *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2013, pp. 621–626.

[42] S. Koohi-Kamali, N. A. Rahim ve H. Mokhlis, "Smart power management algorithm in microgrid consisting of photovoltaic, diesel, and battery storage plants considering variations in sunlight, temperature, and load", *Energy Conversion and Management*, vol. 84, pp. 562–582, Aug. 2014.

[43] J. A. Asmar, R. Kouta, K. Chaccour, J. E. Assad, S. Laghrouche, E. Eid ve M. Wack, "Power generation and cogeneration management algorithm with renewable energy integration", *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 1394-1401, Aug. 2015.

[44] O. Elma ve U. S. Selamoğulları, "A new home energy management algorithm with voltage control in a smart home environment", *Energy*, vol. 91, pp. 720–731, Nov. 2015.

[45] M. A. Khan, N. Javaid, A. Mahmood, Z. A. Khan ve N. Alrajeh, "A generic demand-side management model for smart grid", *International Journal of Energy Research*, vol. 39, no. 7, pp. 954–964, Jun. 2015.

[46] M. B. Rasheed, N. Javaid, A. Ahmad, M. Awais, Z. A. Khan, U. Qasim ve N. Alrajeh, "Priority and delay constrained demand side management in real-time price environment with renewable energy source", *International Journal of Energy Research*, vol. 40, no. 14, pp. 2002–2021, Nov. 2016.

[47] A. Aktas, K. Erhan, S. Ozdemir ve E. Ozdemir, "Experimental investigation of a new smart energy management algorithm for a hybrid energy storage system in smart grid applications", *Electric Power Systems Research*, vol. 144, pp. 185–196, Mar. 2017.

[48] E. Fabrizio, V. Branciforti, A. Costantino, M. Filippi, S. Barbero, G. Tecco, ... ve A. Molino, "Monitoring and managing of a micro-smart grid for renewable sources exploitation in an agro-industrial site", *Sustainable Cities and Society*, vol. 28, pp. 88–100, Jan. 2017.

[49] N. Javaid, M. Naseem, M. B. Rasheed, D. Mahmood, S. A. Khan, N. Alrajeh ve Z. Iqbal, "A new heuristically optimized home energy management controller for smart grid", *Sustainable Cities and Society*, vol. 34, pp. 211-227, Oct. 2017.

[50] R. Patel ve A. Sharma, "Design and implementation of a novel energy management algorithm in vehicle to grid system design", in *Recent Developments in Control, Automation Power Engineering (RDCAPE)*, 2017, pp. 343–347.

[51] A. Sujil ve R. Kumar, "Multi agent based energy management system for smart microgrid", in *Recent Developments in Control, Automation Power Engineering (RDCAPE)*, 2017, pp. 125–130.

[52] H. Kikusato, K. Mori, S. Yoshizawa, Y. Fujimoto, H. Asano, Y. Hayashi, ... ve T. Suzuki, "Electric vehicle charge-discharge management for utilization of photovoltaic by coordination between home and grid energy management systems", *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. 1–1, 2018.

[53] R. Marah ve A. El Hibaoui, "Algorithms for smart grid management", *Sustainable Cities and Society*, vol. 38, pp. 627–635, Apr. 2018.

[54] D. Y. Park ve J. S. Oh, "Smart power management system for leisure-ship", *Journal of Navigation and Port Research*, vol. 35, no. 9, pp. 749–753, 2011.

[55] X. Tang, T. Wang, C. Zhi ve Y. Huang, "The design of power management system for solar ship", in *International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*, 2015, pp. 548–553.

[56] K. Schoder, M. Stanovich, T. Vu, H. Vahedi, C. Edrington, M. Steurer, ... ve F. Ferrese, "Evaluation framework for power and energy management shipboard distribution controls", in *IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*, 2017, pp. 388–393.

[57] W. Maes, *Marine Electrical Knowledge.* Belgia: Antwerp Maritim Academy, 2013.

[58] B. Yıldız, "Ticari bir gemide kısa devre akımı hesapları", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2015.

[59] Türk Loydu, "Kısım 5: Elektrik Kuralları", [Online]. http://www.turkloydu.org/pdf-files/turk-loydu-kurallari/cilt-b/kisim-5-elektrik-kurallari-2015.pdf [Erişim: 13 Haz. 2018].

[60] A. Q. Al-Shetwi ve M. Z. Sujod, "Grid-connected photovoltaic power plants: A review of the recent integration requirements in modern grid codes", *International Journal of Energy Research*, vol. 42, no. 5, pp. 1849–1865, 2018.

[61] S. Alkan, "Düzce şartlarında bir evin enerji ihtiyacını karşılayacak fotovoltaik sistemin kurulumu", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, 2015.

[62] P. B. Patel ve N. B. Patel, "An analysis of 2 MW PV solar power plant design", *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, vol. 3, no. 1, pp. 5, 2016.

[63] A. K. Shukla, K. Sudhakar ve P. Baredar, "A comprehensive review on design of building integrated photovoltaic system", *Energy and Buildings*, vol. 128, pp. 99–110, Sep. 2016.

[64] N. D. Kaushika, A. Mishra ve A. K. Rai, *Solar Photovoltaics: Technology, System Design, Reliability and Viability*. Cham: Springer International Publishing, 2018.

[65] K. R. T. Kumar, M. Ramakrishna ve G. D. Sukumar, "A review on PV cells and nanocomposite-coated PV systems", *International Journal of Energy Research*, vol. 42, no. 7, pp. 2305–2319, 2018.

[66] S. T. Cer, "Gölgeleme bileşeni olarak kullanılan fotovoltaik panellerin enerji etkinliğinin değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2015.

[67] K. Ç. Gürgen, "Aydın'daki bir yapının elektrik enerjisi gereksiniminin fotovoltaik sistemler ile karşılanma olanakları", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adnan Menderes Üniversitesi, Aydın, 2016.

[68] J. Kanchikere ve S. K. Jha, "A review of 100KW roof-top solar PV plant", *International Journal of Engineering Technology Science and Research,* vol. 5, no. 1, pp. 6, 2018.

[69] M. Jamil, M. Rizwan, D. P. Kothari, M. Rizwan ve D. P. Kothari, *Grid Integration of Solar Photovoltaic Systems*. CRC Press, 2017.

[70] F. Obeidat, "A comprehensive review of future photovoltaic systems", *Solar Energy*, vol. 163, pp. 545–551, Mar. 2018.

[71] K. Üzüm, "Yeni nesil teknoloji kullanarak küçük güçlü rüzgâr türbini tasarımı ve bilgisayar destekli analizi", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, 2015.

[72] N. Singh ve R. Singh, "Evolution of wind turbine technologies", *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*, vol. 5, pp. 465-469, 2017.

[73] E. Hau, *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Springer Science & Business Media, 2013.

[74] K. Demirci, "Rüzgâr türbini kanadının genetik algoritmayla optimizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2016.

[75] T. M. Letcher, *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*. Academic Press, 2017.

[76] A. G. Aissaoui ve A. Tahour, *Wind Turbines: Design, Control and Applications.* InTechOpen, 2016.

[77] E. J. Novaes Menezes, A. M. Araújo ve N. S. Bouchonneau da Silva, "A review on wind turbine control and its associated methods", *Journal of Cleaner Production*, vol. 174, pp. 945–953, Feb. 2018.

[78] K. Ma, *Power Electronics for the Next Generation Wind Turbine System*. Springer International Publishing, 2015.

[79] M. Adaramola, *Wind Turbine Technology: Principles and Design*. CRC Press, 2014.

[80] M. Esen, "Rüzgâr türbini ve güneş pilinden oluşan bir güç üretim sisteminin tasarımı ve kontrolü", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elâzığ, 2016.

[81] R. Kumar, K. Raahemifar ve A. S. Fung, "A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, pp. 281–291, Jun. 2018.

[82] İ. H. Seri, "Rüzgâr türbini tasarım parametrelerinin incelenmesi ve türbin kanat tasarımlarının analiz edilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay, 2016.

[83] M. L. Surve, "A comprehensive review of developing horizontal axis wind turbine rotor blade for domestic applications", *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, pp. 984-990, 2017.

[84] O. Şamdan, "Darrieus tipi rüzgâr türbini tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2016.

[85] M. S. Gaikwad, M. V. Patil, M. A. Patil ve R. S. Kulkarni, "A review on the savonius VAWT", *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, pp. 1021-1024, 2017.

[86] R. Ahire, S. Gawli, K. Geedh ve A. Gade, "Review on vertical axis wind turbine", *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, vol. 3, pp. 5-9, 2017.

[87] IE Commission, "Electrical Energy Storage", International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, White Paper, 2011.

[88] P. Nikolaidis ve A. Poullikkas, "A comparative review of electrical energy storage systems for better sustainability", *Journal of Power Technologies*, vol. 97, pp. 220, 2017.

[89] T. Erkınacı, "Paketlenmiş gözenekli bir yatakta duyulur ısıl enerji depolamanın sayısal olarak incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2017.

[90] İ. Ceylan, S. Zuhur ve A. E. Gürel, "Isı depolama yöntemleri ve uygulamaları", *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, pp. 38-47, 2017.

[91] D. Turan ve A. Yönetken, "Enerji depolama sistemlerinin araştırılması ve analizi", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 16, pp. 113-121, 2016.

[92] H. Zhao, Q. Wu, S. Hu, H. Xu ve C. N. Rasmussen, "Review of energy storage system for wind power integration support", *Applied Energy*, vol. 137, pp. 545–553, Jan. 2015.

[93] S. M. Tercan, "Elektrikli araç bataryalarının akıllı şebekeler kapsamında depolama ünitesi olarak yeniden değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2015.

[94] A. Poullikkas, "A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 778–788, Nov. 2013.

[95] A. Ergün, "Hibrit enerji depolama sistemli elektrikli araçlar için çift yönlü DA-DA dönüştürücü tasarımı ve gerçekleştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2014.

[96] Energy Storage Sense, "Electrochemical Batteries", [Online]. http://energystoragesense.com/electrochemical-batteries/ [Erişim:13 Haz. 2018].

[97] F. Keskin, "Yakıt pilli - bataryalı hibrid bir elektrikli araçta enerji yönetiminin sağlanması", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2014.

[98] G. Ren, G. Ma ve N. Cong, "Review of electrical energy storage system for vehicular applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 225–236, Jan. 2015.

[99] S. Sabihuddin, A. E. Kiprakis ve M. Mueller, "A numerical and graphical review of energy storage technologies", *Energies*, vol. 8, no. 1, pp. 172–216, Jan. 2015.

[100] X. Luo, J. Wang, M. Dooner ve J. Clarke, "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation", *Applied Energy*, vol. 137, pp. 511–536, Jan. 2015.

[101] B. Zakeri ve S. Syri, "Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 569–596, Feb. 2015.

[102] P. Nikolaidis ve A. Poullikkas, "Cost metrics of electrical energy storage technologies in potential power system operations", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. *25*, pp. 43-59, 2018.

[103] Hornsdale Power, "HPR Selected by SA Government to host world's biggest Li-Ion Battery", [Online]. https://hornsdalepowerreserve.com.au/hpr-selected-by-sa-government-to-host-worlds-biggest-li-ion-battery/ [Erişim: 13 Haz. 2018].

[104] X-RATES, "Currency Calculator Historic Lookup", [Online]. https://www.x-rates.com/historical/?from=TRY&amount=1&date=2019-01-01 [Erişim: 05 May. 2018].

[105] N. H. Pekşen, D. Y. Pekşen ve A. Ölçer, "Cold ironing yöntemi: Marport limanı uygulaması", *Journal of ETA Maritime Science*, vol. *2*, pp. 11-30, 2014.

[106] World Ports Climate Initiative (WPCI), "Ports Using OPS", [Online]. http://www.ops.wpci.nl/ops-installed/ports-using-ops/ [Erişim: 13 Haz. 2018].

[107] World Ports Climate Initiative (WPCI), "Ports Planning to Use OPS", [Online]. http://www.ops.wpci.nl/ops-installed/ports-planning-to-use-ops/ [Erişim: 13 Haz. 2018].

[108] R. Winkel, U. Weddige, D. Johnsen, V. Hoen ve G. Papaefthymiou, "Potential for shore side electricity in Europe", ECOFYS, Kanaalweg, Utrecht, Netherlands, Final Report, 7 Jan. 2015.

[109] A. Ölçer ve F. Ballini, "The development of a decision making framework for evaluating the trade-off solutions of cleaner seaborne transportation", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 37, pp. 150–170, Jun. 2015.

[110] T.C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, Tersaneler ve Kıyı Yapıları Genel Müdürlüğü, "Kıyıda Enerji Temini Uygulama Talimatı", [Online]. http://imo.udhb.gov.tr/dosyam/Dokumanlar/2013_156.pdf [Erişim: 13 Haz. 2018].

[111] J. B. Ekanayake, N. Jenkins, K. Liyanage, J. Wu ve A. Yokoyama, *Smart Grid: Technology and Applications*. John Wiley & Sons, 2012.

[112] Elektrik Dağıtım Hizmetleri Derneği (ELDER), "Türkiye Akıllı Şebekeler 2023 Vizyon ve Strateji Belirleme Projesi", [Online]. https://www.akilliseb ekelerturkiye.org/hakkinda [Erişim: 13 Haz. 2018].

[113] J. A. Momoh, *Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis*. John Wiley & Sons, 2012.

[114] C. Greer, D. A. Wollman, D. E. Prochaska, P. A. Boynton, J. A. Mazer, C. T. Nguyen, ... ve V. Y. Pillitteri, "NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 3.0", *Special Publication (NIST SP) - 1108r3*, Oct. 2014.

[115] M. Erol-Kantarci ve H. T. Mouftah, "Energy-efficient information and communication infrastructures in the smart grid: A survey on interactions and open issues", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 179–197, 2015.

[116] M. Garau, G. Celli, E. Ghiani, F. Pilo ve S. Corti, "Evaluation of smart grid communication technologies with a co-simulation platform", *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 2, pp. 42–49, Apr. 2017.

[117] Y. Kabalci, "A survey on smart metering and smart grid communication", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 302–318, May 2016.

[118] N. Shaukat, S. M. Ali, C. A. Mehmood, B. Khan, M. Jawad, U. Farid, ... ve M. Majid, "A survey on consumers empowerment, communication technologies, and renewable generation penetration within Smart Grid", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1453–1475, Jan. 2018.

[119] J. Ketchledge, *Successful Smart Grid Implementation*. PennWell Corporation, 2015.

[120] S. Tan, D. De, W. Song, J. Yang ve S. K. Das, "Survey of security advances in smart grid: A data driven approach", *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 397–422, Firstquarter 2017.

[121] I. Colak, S. Sagiroglu, G. Fulli, M. Yesilbudak ve C. F. Covrig, "A survey on the critical issues in smart grid technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 396–405, Feb. 2016.

[122] H. T. Mouftah ve M. Erol-Kantarci, *Smart Grid: Networking, Data Management, and Business Models*. CRC Press, 2016.

[123] B. M. Buchholz ve Z. Styczynski, *Smart Grids: Fundamentals and Technologies in Electricity Networks.* Springer Vieweg, 2016.

[124] H. Gabbar, *Smart Energy Grid Engineering*. Academic Press, 2016.

[125] T. Jiang, L. Yu ve Y. Cao, *Energy Management of Internet Data Centers in Smart Grid*. Springer Berlin Heidelberg, 2015.

[126] Q. Yang, C. Gu, S. L. Blond ve J. Li, "Control scheme for energy storage in domestic households", in *49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2014, pp. 1–6.

[127] L. Ungurean, G. Cârstoiu, M. V. Micea ve V. Groza, "Battery state of health estimation: A structured review of models, methods and commercial devices", *International Journal of Energy Research*, vol. 41, no. 2, pp. 151-181, 2017.

[128] LAZARD, "Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis - Version 10.0", [Online]. https://www.lazard.com/media/438038/levelized-cost-of-energy-v100.pdf [Erişim: 13 Haz. 2018].

[129] World Ports Climate Initiative (WPCI), "Investments of Onshore Power Supply", [Online]. http://wpci.iaphworldports.org/onshore-power-supply/cost/investments.html [Erişim: 13 Haz. 2018].

[130] NY Times, "Industry Study Says: Smart Grid Costs Are Massive, But Benefits Will Be Larger", [Online]. https://archive.nytimes.com/www.nytimes.com/cwire/2011/05/25/25climatewire-smart-grid-costs-are-massive-but-benefits-wi-48403.html?pagewanted=all%2526mcubz=1 [Erişim: 13 Haz. 2018].

[131] P. L. Joskow, "Creating a smarter U.S. electricity grid", *Journal of Economic Perspectives*, vol. 26, no. 1, pp. 29–48, Feb. 2012.

[132] Ship and Bunker, "2018 Yılı Ortalama Deniz Yakıtı (IFO180, IFO380, MGO) Fiyatı", [Online]. https://shipandbunker.com/prices/av/global/av-glb-global-average-bunker-price [Erişim: 01 Şub. 2019].

[133] Hapag-Lloyd, "2018 Yılı Ortalama Deniz Yakıtı (MDO) Fiyatı", [Online]. https://www.hapag-lloyd.com/en/ir/publications/investor-reports.html#tabnav [Erişim: 01 Şub. 2019].

[134] European Commission Directorate General Environment, "Service contract on ship emissions: Assignment, abatement and market-based instruments. Task 1 - Preliminary assignment of ship emissions to European Countries", ENTEC UK Limited, London, UK, Final Report, 2005.

[135] M. R. Patel, *Shipboard Propulsion, Power Electronics, and Ocean Energy*. CRC Press, 2012.

[136] Marineinsight, "Auriga Leader: The World's First Partially Propelled Cargo Ship", [Online]. https://www.marineinsight.com/types-of-ships/auriga-leader-the-worlds-first-partially-propelled-cargo-ship/ [Erişim: 20 Haz. 2018].

[137] Maritimejournal, "Stena: Hopes for Wind Turbines Pay-Off", [Online]. http://www.maritimejournal.com/news101/vessel-build-and-maintenance/vessel-repair-and-maintenance/stena-hopes-for-wind-turbines-pay-off [Erişim: 20 Haz. 2018].

[138] M. A. M. Ramli, A. Hiendro ve S. Twaha, "Economic analysis of PV/diesel hybrid system with flywheel energy storage", *Renewable Energy*, vol. 78, pp. 398–405, Jun. 2015.

[139] Electropaedia, "Battery and Energy Technologies", [Online]. https://www.mpoweruk.com/lithium_failures.htm#soc [Erişim: 15 Haz. 2018].

[140] Patent, "A battery power control method suitable for rail passenger", China Patent, CN104442436B, 25-Aug-2017.

[141] B. Meng, Y. Wang, J. Mao, J. Liu, G. Xu ve J. Dai, "Using SoC online correction method based on parameter identification to optimize the operation range of NI-MH battery for electric boat", *Energies*, vol. 11, no. 3, p. 586, Mar. 2018.

[142] Creative IG Tools, "CO_2 Emission Conversion Factors Used on the Creative IG Tools for the Purposes of Calculating an Organisation's Carbon Footprint", [Online]. https://ig-tools.com/files/International_elec_2015.pdf [Erişim: 05 May. 2018].

[143] W. Knörr, M. Schmied, R. Anthes, S. Seum ve F. Kutzner, "Ecological transport information tool for worldwide transports - Methodology and data update", EcoTransIT World Initiative (EWI), Berne, Hannover, Heidelberg, 2014.

[144] Energy Information Administration (EIA), "NO_x and SO_2 Emission Factors for Electricity Grid in USA", [Online]. https://www.eia.gov/electricity/state/unitedstates/ [Erişim: 05 May. 2018].

[145] Global Petrol Prices, "Global Electricity Prices in 2018", [Online]. https://www.globalpetrolprices.com/electricity_prices/ [Erişim: 15 Ocak 2019].

[146] Hong Kong General Chamber of Commerce (HKGC), "NO_x, SO_2 and PM Emissions Estimation from Electricity in China", [Online]. http://www.cleanair.hk/eng/business_guideline03.htm [Erişim: 05 May. 2018].

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgisi: kyigit@yildiz.edu.tr

SCI, SSCI, AHCI İndekslerine Giren Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. K. Yiğit ve B. Acarkan, "A new ship energy management algorithm to the smart electricity grid system", *International Journal of Energy Research*, vol. 42, no. 8, pp. 2741–2756, Apr. 2018.

2. K. Yigit ve B. Acarkan, "A new electrical energy management approach for ships using mixed energy sources to ensure sustainable port cities", *Sustainable Cities and Society*, vol. 40, pp. 126–135, Jul. 2018.

Diğer Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. K. Yiğit ve B. Acarkan, "Gemi ve liman etkileşimi için önerilen enerji yönetim sistemi modelinin incelenmesi", *Dokuz Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Dergisi*, cilt 10, sayı 2, s. 169–181, Ara. 2018.

Konferans Bildirileri

1. K. Yiğit ve B. Acarkan, "The role of the ships in the smart electric grid systems", In *2nd International Conference on Energy Systems (ICES),* 21-23 Dec. 2016, pp.16-22.

Kitap ve Kitap Bölümleri

1. K. Yiğit ve B. Acarkan, "Chapter 1.10 - The importance of ships in the next-generation electric power systems", in *Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions*, I. Dincer, C. O. Colpan, and O. Kizilkan, Eds. Academic Press, 2017, pp. 167–178.