T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BATARYALI DENİZ TAŞITLARI İÇİN YAŞLANMA ETKİSİ GÖZ ÖNÜNE ALINARAK BATARYA BOYUTUNUN OPTİMİZE EDİLMESİ

Mumin KARAOSMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Ali Rıfat BOYNUEĞRİ

Eş Danışman

Doç. Dr. Yavuz EREN

Ağustos, 2024

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BATARYALI DENİZ TAŞITLARI İÇİN YAŞLANMA ETKİSİ GÖZ ÖNÜNE ALINARAK BATARYA BOYUTUNUN OPTİMİZE EDİLMESİ

Mumin KARAOSMAN tarafından hazırlanan tez çalışması 12.08.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ali Rıfat BOYNUEĞRİ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Doç. Dr. Yavuz EREN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Ali Rıfat BOYNUEĞRİ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Ozan ERDİNÇ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Yusuf YAŞA, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Ali Rıfat BOYNUEĞRİ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Bataryalı Deniz Taşıtları için Yaşlanma Etkisi Göz Önüne Alınarak Batarya Boyutunun Optimize Edilmesi” 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.

Mumin KARAOSMAN

İmza

Bu çalışma, "…Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'nün 1234A…" numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Aileme

ve

eşime

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezim süresince yanımda olan, beni destekleyen ve teşvik eden tüm aileme, hocalarıma ve arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Öncelikle, hayatımın her anında yanımda olan ve beni destekleyen sevgili aileme minnettarım. Sevgili annem Müyesser Karaosman ve babam Vedat Karaosman'a, bana verdikleri sonsuz sevgi, sabır ve destekleri için teşekkür ederim. Sevgili ağabeyim Muhammed Karaosman ve kız kardeşim Sinem Karaosman Akyazı, sizlerin manevi desteğini olmasaydı bu yolda ilerlemem çok daha zor olurdu. Canım eşim Gamze Karaosman, bu zorlu süreçte bana gösterdiğin anlayış, sabır ve destek için sana özel olarak teşekkür ediyorum.

Ayrıca, bu süreçte bana moral veren ve her zaman yanımda olan sevgili arkadaşlarım İsmail Hakkı İri, Berat Dinçer ve Erhan Yılmaz'a gönülden teşekkür ediyorum. Sizlerin varlığı, bu süreci benim için çok daha kolay ve keyifli hale getirdi.

Sedef Tersanesi'ndeki değerli büyüklerim Basri Noyan Kocuk ve Savaş Köhrin'e de özellikle teşekkür etmek istiyorum. Çalışmalarım sırasında gösterdiğiniz destek ve yardım benim için çok kıymetliydi.

Tez çalışmam boyunca bilgi ve deneyimleriyle bana rehberlik eden danışman hocam Ali Rıfat Boynueğri ve eş danışman hocam Yavuz Eren'e en derin teşekkürlerimi sunuyorum. Sizlerin yol göstericiliği ve değerli katkıları olmasaydı, bu çalışmayı başarıyla tamamlamak mümkün olmazdı.

Son olarak, bu süreçte bana destek olan herkese, isimlerini tek tek zikredemediğim tüm dostlarıma ve çalışma arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

Mumin KARAOSMAN

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR v
SİMGE LİSTESİ viii
KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xi
ÖZET xii
ABSTRACT xivv
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 2
1.2 Tezin Amacı 7
1.2 Tezin Katkısı 7
2 DENİZ TAŞITLARI ve BATARYA SİSTEMLERİ 8
2.1 Deniz Taşıtları 8
2.1.1 Amaç İşleve Göre Sınıflandırma 8
2.1.2 Kullanım Türüne Göre Sınıflandırma 8
2.1.3 CE Düzenleyici Standartları 9
2.1.4 Tahrik Sistemleri 9
2.1.5 Elektrikli Deniz Araçları 10
2.1.6 Eletrikli Deniz Araçlarının Menziler Göre Sınıflandırılması 11
2.2 Batarya Sistemleri 11
2.2.1 Batarya Tipleri 12
2.2.1.1 Birincil (Şarj Edilemeyen) Bataryalar 12
2.2.1.1.1 Alkali Bataryalar 12
2.2.1.1.2 Çinko Karbon Bataryalar 12
2.2.1.1.3 Lityum İyon Bataryalar 13
2.2.1.1.4 Gümüş Oksit Bataryalar 13
2.2.1.1.5 Çinko Hava Bataryalar 13
2.2.1.2 İkincil (Şarj Edilebilen) Bataryalar 14
2.2.1.2.1 Kurşun Asit Bataryalar 14
2.2.1.2.2 Nikel Kadmiyum(NiCd) Bataryalar 15
2.2.1.2.3 Nikel Metal Hidrit(NiMH) Bataryalar 15
2.2.1.2.4 Lityum İyon Bataryalar 16

2.2.1.2.5 Lityum Polimer(Li-Po) Bataryalar 17
2.2.1.2.6 Sodyum Sülfür(NaS) Bataryalar 18
2.2.1.2.7 Akış Bataryalar 18
3 METODOLOJİ ve SİSTEM TANIMI 20
3.1 Metodoloji 20
3.2 Deniz Aracının Genel Özellikleri 20
4 BATARYA YAŞLANMA MODELİ ve YARARLANIMININ YAŞLANMA AÇISINDAN OPTİMAL BOYUTLANDIRILMASI 23
4.1 Batarya Yaşlanma Modeli 20
4.2 Batarya Yaşlanma Etkisine Göre Optimal Boytulandırılması 20
5 SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI
5.1 Batarya Yaşlanma Modeli 29
5.2 Kapasite Optimizasyon Test Sonuçları 38
6 SONUÇLAR, ÇIKTILAR ve GELECEK ÇALIŞMALAR 51
6.1 Çıktılar 51
6.2 Sonuçlar 52
6.3 Gelecek Çalışmalar 52
KAYNAKÇA 54
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 59

SİMGE LİSTESİ

α	Alfa
β	Beta
C_{cap}	Batarya Kapasitesi
C_{aging}	Yaşlanan Batarya Kapasitesi
C_{rate}, I_c	Ortalama Akımın Mevcut Kapasiteye Oranı
C_{use}	Kullanılan Kapasite
C_{ch}	Batarya şarj Kapasitesi
E_{use}	Bir Seyir için Kullanılan Kapasite
E_{init}	Bataryanın Başlangıç Enerjisi
R	Gaz Sabiti
θ	Sıcaklık
SOC	Batarya Şarj Durumu
ΔSOC	Bir Seyir için Tüketilen Batarya Kapasite Oranı
I_{avg}	Seyir Anında Tüketilen Ortalama Akım
i	Seyir Sayısı
V_{batt}	Batarya İşletme Gerilimi
σ	Sigma
γ, Γ	Gama

KISALTMA LİSTESİ

SOC	State of Charge
BYS	Batarya Yönetim Sistemi
SM	Seyir Maliyeti
BKM	Batarya Kurulum Maliyeti
TS	Trip Sayısı
ETM	Enerji Tüketim Maliyeti
HEA	Hibrit Elektrik Araçları

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1 Metodoloji Diyagramı 20
Şekil 5.1 Bir Seyire Ait Anlık Güç Talebi 29
Şekil 5.2 Enerji Dağıtım Tek Hat Diyagramı 30
Şekil 5.3 SOC Değerinin 73 Yolculuk Durumunda Değişimi 31
Şekil 5.4 SOC Değerinin Bütün Yolculuk Sırasında Değişimi 32
Şekil 5.5 ΔSOC Bütün Seyir Boyunca Değişimi 32
Şekil 5.6 C_{rate} Tüm Yolculuk Boyunca Değişimi 33
Şekil 5.7 Nominal Batarya Ömrü 34
Şekil 5.8 Farklı Yükler Altında Batarya Ömrü 34
Şekil 5.9 Tüm Yolculuklar Sırasında Toplam Döngü Yaşlanması 35
Şekil 5.10 Batarya Toplam Kapasite Kaybı 36
Şekil 5.11 Batarya Kapasite Kaybı 36
Şekil 5.12 Doğrusal Olmayan Fonksiyonların Parçalı Sürekli Gösterimi 39
Şekil 5.13 73000 Yolculuk Sonunda ΔSOC Parametresine Ait Doğrusal Grafik 40
Şekil 5.14 73000 Yolculuk Sonunda C_{rate} Parametresine Ait Doğrusal Grafik 41
Şekil 5.15 73000 Yolculuk Sonunda C_{aging} Parametresine Ait Doğrusal Grafik 43
Şekil 5.16 73000 Yolculuk Sonunda SM Parametresine Ait Doğrusal Grafik 44
Şekil 5.17 Batarya Kapasitelerine Göre Yolculuk Maliyet Grafiği 50

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 İlgili Araştırma Alanındaki Kategorilere Ayrılmış Literatür Çalışmaları 6

Tablo 5.1 Yaşlandırma Simülasyonu Yapılan Bataryalar 37

Tablo 5.2 3960,47 Ah Batarya Parametrelerinin Yolculuk Sayısı Aralığında Kullanılan Fonksiyonları 46

Tablo 5.3 Batarya Kapasitesine Göre Amaç Fonksiyon Sonuçları 47

ÖZET

BATARYALI DENİZ TAŞITLARI İÇİN YAŞLANMA ETKİSİ GÖZ ÖNÜNE ALINARAK BATARYA BOYUTUNUN OPTİMİZE EDİLMESİ

Mumin KARAOSMAN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Ali Rıfat BOYNUEĞRİ

Eş-Danışman: Doç. Dr. Yavuz EREN

Elektrik enerjisinin depolanması, taşınması ve etkin kullanımı, günümüz mühendisliğinin en kritik konuları arasında yer almaktadır. Özellikle, endüstriyel uygulamalardan başlayarak kara, hava ve deniz taşıtlarında içten yanmalı motorların yerini elektrikli motorlara bırakmasıyla bu alan daha da önem kazanmıştır. Bu geçişin temelinde, elektrikli motorların içten yanmalı motorlara olan üstünlükleri ve enerji bağımsızlığına yönelik artan talep yatmaktadır.

Elektrikli motorlar, yüksek verimlilikleri, düşük bakım maliyetleri ve çevre dostu çalışmalarıyla ön plana çıkmaktadır. Bu özellikler, ulaşım sektöründe elektrikli taşıtların kullanımının yaygınlaşmasını hızlandırmıştır. Taşımacılığın ve ulaşımın önemli faktörlerinden olan elektrikli feribotlar, enerji depolama sistemlerindeki gelişmeler ve batarya teknolojisindeki ilerlemeler sayesinde büyük bir dönüşüm yaşamaktadır.

Gelişen malzeme teknolojileri, batarya teknolojilerinin kapasitesini artırma, şarj/deşarj hızlarını iyileştirme ve ömürlerini uzatma konusundaki yeniliklere öncülük etmektedir. Bu ilerlemeler, elektrikli feribotların daha uzun menzillerde seyahat etmelerini ve daha hızlı şarj olmalarını sağlamaktadır. Ayrıca, bu teknolojik gelişmeler, feribot operatörlerinin enerji talebindeki dalgalanmaları daha etkili bir şekilde dengelemelerine ve enerji verimliliğini artırmalarına olanak tanımaktadır.

Bu bağlamda, bu araştırma, tamamen elektrikli RO-RO yolcu ve araç feribotları için enerji depolama sistemlerinin yaşlanmasını ve ömrünü göz önünde bulundurarak batarya sistemlerinin optimum boyutunu ve buna bağlı olarak optimum maliyetini bulmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli feribotlar, Elektrikli deniz araçları, Batarya boyutlandırılması, Batarya yaşlanması

ABSTRACT

Sizing Optimization of A Battery-Powered Marine Vessel Considering the Aging Effect

Mumin KARAOSMAN

Department of Electrical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ali Rıfat BOYNUEĞRİ

Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. Yavuz EREN

The storage, transportation, and efficient utilization of electrical energy are among the most critical issues in contemporary engineering. This field has gained even greater importance by replacing internal combustion engines with electric motors in industrial applications, particularly land, air, and sea vehicles. At the core of this transition lies the superiority of electric motors over internal combustion engines and the growing demand for energy independence.

Electric motors stand out due to their high efficiency, low maintenance costs, and environmentally friendly operation. These features have accelerated the widespread adoption of electric vehicles in transportation. Electric ferries, which are crucial components of transportation and logistics, are undergoing a significant transformation thanks to advancements in energy storage systems and battery technology.

Advancements in material technologies are pioneering innovations in battery technologies, increasing their capacity, improving charging/discharging speeds, and extending their lifespan. These developments enable electric ferries to travel longer distances and charge more rapidly. Additionally, these technological advancements allow ferry operators to balance fluctuations in energy demand and enhance energy efficiency more effectively.

In this context, this research aims to determine the optimal size of battery systems and consequently the optimal cost for fully electric RO-RO passenger and vehicle ferries, considering the aging and lifespan of energy storage systems.

Keywords: Electric ferries, Electric marine vessels, Battery sizing, Battery aging.

1
GİRİŞ

Günümüzde artan tüketici beklentileri, daha düşük emisyonlar ve daha yüksek yakıt ekonomisi talep eden yasalar ve petrolün sınırlı bir kaynak olduğunun farkına varılması, otomotiv endüstrisinde, elektrikli araçların ve hibrit hücreli araçların ticarileştirilmesi yönünde çığır açan değişimlere yol açtı. Elektrikli araçlar, çevresel sürdürülebilirlik açısından fosil yakıtlı alternatiflere kıyasla daha düşük karbon ayak izi sunarken, aynı zamanda enerji verimliliği ve maliyet avantajlarına kadar geniş bir yelpazede faydalar sunar [1] – [2]. Bu araçların yaygın kullanımının önündeki en büyük engel güç ve enerji taleplerini karşılayacak yeterli bir depolama sisteminin bulunmamasıdır. [1] – [3]. Dolayısıyla, elektrikli ulaşım teknolojilerinde batarya boyutlandırma konusu, araştırmacılar için hayati bir araştırma ve geliştirme alanı olarak öne çıkmaktadır.

Hibrit elektrikli araçların (HEA'lar) verimliliği ve elektrikli menzili, enerji depolama sistemlerinin (EDS) kapasitesine bağlıdır. EDS, büyük miktarda enerjiyi depolamakla kalmayıp, aynı zamanda yük taleplerine göre hızlı bir şekilde boşaltabilmelidir [4]. Araçlardaki EDS'lerin önemli özellikleri arasında enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu, ömür, maliyet ve bakım bulunmaktadır. Günümüzde, piller ve ultra kapasitörler (UK'ler) araçlarda kullanılan en yaygın EDS seçenekleridir. Piller genellikle yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ve araçtaki elektrik enerjisinin büyük bir kısmını depolar. Öte yandan, UK'ler yüksek güç yoğunluğuna sahiptir ve yüksek verimlilik ve hızlı şarj/deşarj tepkisi ile uzun bir yaşam döngüsü sunar [5], [6].

Farklı ulaşım araçları arasında, deniz taşımacılığı küresel sera gazı emisyonlarının %2-%3'ünden sorumludur. Eğer herhangi bir değişiklik olmazsa 2050 yılına kadar %17'ye çıkması öngörülmektedir. Bu nedenle, Uluslararası Denizcilik Organizasyonu, 2008 yılına kıyasla 2050 yılına kadar sera gazı emisyonlarını (SGE) %50 azaltmayı hedeflemiştir [7]. Bu katı SGE azaltma hedeflerine ulaşmak için alternatif enerji kaynaklarının kullanılması gerekmektedir; bu bağlamda, batarya ve hidrojenle çalışan enerji depolama sistemleri önemli bir rol oynayabilir. Deniz araçlarında kullanılan enerji depolama sistemleriyle ilgili araştırma ve geliştirme çalışmaları ile akademik incelemeler ivme kazanmıştır. Bu gelişmeler, deniz taşımacılığının daha sürdürülebilir ve verimli hale getirilmesi yolunda önemli bir adım olarak kabul edilmektedir.

Bu çalışmada, teknik özellikleri ve güzergahı belli olan Ro-Ro yolcu ve araç feribotu için tasarlanacak olan batarya sisteminin yaşlanması göz önünde bulundurularak minimum seyir maliyet ücreti elde edilecek optimum batarya boyutunun bulunmasını amaçlamaktadır. Ek olarak, bu süreçte doğrusal olmayan batarya yaşlanma davranışları doğrusal bir formda ele alınmaktadır.

1.1 Literatür Özeti

Son yıllarda gelişen batarya teknolojisi ile birlikte elektrikli deniz araçlarına yönelik ilgi ve yatırımların belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmektedir. Bu durum, konu ile ilgili araştırmaların sayısında da artışa yol açmıştır. Ancak, deniz araçlarının yapısal büyüklükleri, inşa maliyetleri, çeşitliliği ve kullanım tipleri göz önüne alındığında, bu artışın elektrikli kara araçlarına kıyasla sınırlı kaldığı görülmektedir. Bunun başlıca nedeni yapısal büyüklükleri ile orantılı olan yüksek yatırım maliyetleri ve ticari hacimleri gibi etkenlerdir.

Tablo 1.1'de yer alan çalışmalara kronolojik olarak bakıldığında klasik konvansiyonel deniz araçlarından ilk olarak hibrit araçlara geçildiği görülmektedir. Bunun nedeni araçların büyük yapıda olması ve günün şartlarındaki batarya teknolojisinin kaynak olarak bu tarz büyük yapılardaki araçlarda ekonomik olmayışıdır. Bu yüzden konvansiyonel deniz aracından elektrikli deniz araçlarına geçilmeden önce hibrit enerji kaynakları denenmiştir. Bu tarz çalışmalarda iki veya daha fazla enerji kaynağının kullanılarak en optimum kurulum ve işletme maliyeti bulmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır [8],[9],[10],[11],[12].

Ek olarak elektrikli ulaşım araçlarının, enerji verimliliği, düşük karbon salınımı ve maliyet etkinliği gibi avantajları nedeniyle adalara ve iç denizlere sahip deniz ülkelerinde son yıllarda da büyük ilgi görmektedir [13], [14].

Elektrikli deniz araçlarında kullanılacak enerji depolama sistemlerinin projeye özgü olarak tasarlanması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, batarya sisteminin tasarımı; deniz aracının ağırlığı, seyir süresi, seyir hızı, rota uzunluğu ve seyir güvenliği gibi birçok parametre dikkate alınarak gerçekleştirilmelidir. Her bir parametre, enerji depolama sisteminin verimliliğini ve güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir [15].

Özellikle, deniz aracının ağırlığı, batarya kapasitesi ve yerleşimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ağırlığın optimize edilmesi, aracın genel performansını ve enerji tüketimini doğrudan etkiler. Seyir süresi ve hızı, batarya sisteminin enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu gereksinimlerini belirlerken; rota uzunluğu, bataryaların menzil kapasitesi üzerinde belirleyici

bir faktördür. Seyir güvenliği ise, enerji depolama sisteminin dayanıklılığı ve güvenilirliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. Batarya sistemlerinin aşırı ısınma, darbe ve diğer dış etkenlere karşı korunaklı olması, deniz araçlarının güvenli bir şekilde işletilmesini sağlar [15].

Bu parametrelerin her biri, elektrikli deniz araçlarında kullanılacak enerji depolama sistemlerinin projeye özgü olarak tasarlanmasının gerekliliğini ve bu alanda yapılacak araştırmaların önemini vurgulamaktadır. Dolayısıyla, bu konunun detaylı bir şekilde araştırılması ve yenilikçi çözümler geliştirilmesi, elektrikli deniz araçlarının yaygınlaşması ve sürdürülebilir deniz taşımacılığına katkı sağlanması açısından kayda değer bir gerekliliktir [16],[17],[18].

Sonuç olarak, elektrikli deniz araçlarında kullanılacak batarya sistemlerinin projeye özgü parametreler göz önünde bulundurularak titizlikle tasarlanması, bu alandaki teknolojik ilerlemeleri ve uygulama potansiyelini artıracaktır. Bu durum, deniz taşımacılığının çevresel etkilerinin azaltılmasına ve enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir [19], [20], [21], [22].

[8] numaralı çalışma, minimum yaşam döngüsü maliyetlerini elde etmek için hibrit elektrikli araçların ve teknelerin optimum boyutlandırılmasını ve elektrik yönetim sisteminin gelişimini desteklemektedir. Bu bağlamda, batarya performans düşüşünün modeli, minimum genel düşük maliyetli trafik yüküne sahip elektrikli bir feribot gemisinin temel hibrit elektrikli aktarma organı bileşeninin boyutlarının optimize edilmesinde kullanılır.

[9] numaralı çalışmada, deniz aracının tam yük ile anma hızında çalışırken talep ettiği efektif güç, hidrostatik ve hız gücü analizlerinden hesaplanarak uygun bir pervanenin tasarımı tartışılmıştır. Güç aktarma sistemi, batarya ile çalışan elektrik tahrik sisteminin her bir bileşeni için güç derecelendirmesinin hesaplanmasıyla sunulur. Elektrikli araçlarda ticari olarak kullanılan farklı tipteki Li-ion piller ile pil sayısı ve toplam ağırlığı değerlendirilerek batarya sistemi ile çalışan elektrik tahrikli uygulamasına uygun batarya belirlenir. DC bağlantısı ve batarya tamponu için süper kapasitörün boyutlandırılması sunulmuştur.

[10] numaralı çalışma, batarya sisteminin boyutunu optimize etmek için bir elektrikli liman römorkörü için batarya hibrit enerji depolama sistemi (HES) incelenmektedir. Batarya hibridizasyonunun etkisi, maliyet, sistem verimliliği ve batarya ağırlığı dahil olmak üzere üç temel performans göstergesi üzerinde araştırıldı. Bu araştırmanın sonuçları, batarya hibridizasyonunun sistem maliyetini LTO ve NMC hücreli monotip bir bataryaya kıyasla sırasıyla yaklaşık %28 ve %14 oranında azaltabileceğini göstermektedir.

[11] numaralı çalışmada, sistem topolojisi kavramsallaştırma aşamasındaki temel tasarım gereksinimlerini karşılayan tam elektrikli denizcilik uygulamalarında jenerik bir hibrit batarya enerji depolama sistemi (HBESS) tasarım ve değerlendirme çerçevesi önererek doğrudan bu boşluğu doldurmaktadır. Bunu yaparken, pil hücresi modelleri, yaşlanma modelleri, güç dönüştürücü modelleri ve termal modeller gibi genelleştirilmiş temel bileşen modelleri oluşturulur.

[12] numaralı çalışmada, hibrit gemi tahrik sisteminin boyutlandırmasını ve enerji yönetimini optimize etmek için çok amaçlı, çift katmanlı bir optimizasyon metodolojisi uygulamaktadır. Sonuçlar, yalnızca batarya kullanarak dizel motor verimliliğini artırarak yaklaşık %10'luk küçük bir emisyon azaltma hedefinin elde edilebileceğini, daha büyük bir emisyon azaltma hedefinin elde edilmesinin ise esasen hidrojen miktarına ve/veya limanda şarj durumuna bağlı olduğunu kanıtlıyor.

[24] numaralı çalışma, eş zamanlı olarak yakıt tüketimini, sera gazı emisyonunu ve yaşam döngüsü maliyetini en aza indirme kapsamlı hedefini göz önünde bulundurarak hibrit elektrik tahrik sistemlerin optimum tasarımı için çok amaçlı bir optimizasyon metodolojisi önermektedir. NGSA-II optimizasyon modeli ile yakıt artışına rağmen sera gazı emisyonundaki düşüş görülmüştür.

[13] numaralı çalışmada, karbon emisyonunu azaltmak amaçlı konvansiyonel deniz araçlarına enerji depolama sistemleri kurularak CO2 emisyonu sıfıra yaklaştırılmaya ve batarya enerji depolama sistemi kurulum maliyetlerini düşürmeye ve operasyonları optimize etmeye çalışılmıştır. Ek olarak, batarya enerji depolama sistem araştırmaları ile gemilerde elde edilen gerçek batarya enerji depolama sistemlerinin entegrasyon sonuçları arasında ortaya çıkan büyük boşluklar olduğu görülmektedir.

[23] numaralı çalışmada, tahrik sisteminin motor, şanzıman ve pervane uyumu açısından optimizasyon çalışması yapılarak batarya ağırlığının 21 kg azaldığı görülmüştür.

[19] numaralı çalışmada, gemilerin elektrik tahrik sisteminin düzeltilerek yakıt tüketiminin azaltılmasına bağlı olarak emisyonun azaltılması amaçlanmıştır. Ayrıca genel bir elektrifikasyon çalışması yapılarak MARPOL'un uygulamış olduğu standartlara değinilmiştir.

[20] numaralı çalışmada, yakıt tüketimi, sera gazı emisyonu ve kullanım ömür maliyeti göz önüne alınarak elektrik elektrik tahrik sistemi ve yakıt tüketimi optimizasyonu yapılmıştır.

[21] numaralı çalışma, bir geminin hibridizasyon potansiyelini değerlendirmek için bir geminin boyutuna, rotasına, güç gereksinimlerine, yakıt tüketimine ve CO2 emisyonlarına bakacak bir derecelendirme sistemi geliştirilmiştir.

[9] numaralı çalışmada, deniz aracının tam yük ile anma hızında çalışırken talep ettiği efektif güç, hidrostatik ve hız gücü analizlerinden hesaplanarak uygun bir pervanenin tasarımı tartışılmıştır. Güç aktarma sistemi, batarya ile çalışan elektrikli tahrik sisteminin her bir bileşeni için güç derecelendirmesinin hesaplanmasıyla sunulmuştur. Elektrikli araçlarda ticari olarak kullanılan farklı tipteki Lityum iyon piller ile pil sayısı ve toplam ağırlığı değerlendirilerek batarya sistemi ile çalışan elektrik tahrik sistem uygulamasına uygun pil belirlenir. DC bağlantısı ve pil tamponu için süper kapasitörün boyutlandırılması sunulmuştur.

[24] numaralı çalışmada, boyutlandırmanın amacı, yakıt pili ve batarya sistemlerinin bakım ve değiştirme maliyetlerini dikkate alarak hem sistem önceliği hem de işletme maliyetlerini en aza indirmektir. Feribot güç gereksinimine göre, boyutlandırma hedefine göre en uygun kombinasyonu seçmek için farklı yakıt hücresi ve pil blok kombinasyonları modellenmiştir.

[25] numaralı çalışmada, tamamen elektrikli feribotun belirli bir rotada ve şartlarda gerçekleştirmiş olduğu seyir göz önünde bulundurularak batarya yaşlanma simülasyonu yapılmış ve bu çalışma sonucunda batarya yaşlanması incelenmiştir.

Tablo 1.1 İlgili araştırma alanındaki kategorilere ayrılmış literatür çalışmaları

	Enerji Kaynak Tipi					**Deniz Araç Tipi**										**B. Tipi**		
Referans	PV Panel	Dizel Gen.	Yakıt Hücresi	Süper Kap.	Batarya	Nehir Tipi Tekne	Kuru yük	Rmrk	Feribot	RoRo	Deniz Oto.	Tdrk Gem.	Tic. Deniz Aracı	Aç. Deniz Gem.	Deniz Taşıtı	LTO	NMC	Li-ion
[18]	X	✓	X	X	✓	X	X	X	✓	X	X	X	X	X	X	X	X	✓
[9]	X	X	X	✓	✓	X	X	✓	X	X	X	X	X	X	✓	X	X	✓
[10]	X	X	X	X	✓	X	X	✓	X	X	X	X	X	X	X	✓	✓	X
[11]	X	X	X	X	✓	X	X	✓	✓	✓	✓	X	X	X	X	✓	✓	X
[12]	X	✓	X	✓	✓	X	X	X	X	X	X	X	X	✓	X	X	X	✓
[24]	X	✓	X	X	✓	X	X	X	X	X	X	✓	X	X	X	X	X	✓
[13]	X	✓	X	X	✓	X	X	X	X	X	X	X	✓	X	X	X	X	✓
[23]	X	X	X	X	✓	✓	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	✓	X
[19]	X	✓	✓	X	✓	X	✓	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	✓
[20]	X	✓	X	X	✓	X	X	X	X	X	X	X	X	✓	X	X	X	✓
[21]	✓	✓	X	X	✓	X	X	X	X	✓	X	X	X	X	X	X	X	✓
[9]	X	X	X	✓	✓	X	X	✓	X	X	X	X	X	X	✓	X	X	✓
[24]	X	X	✓	X	✓	X	X	X	✓	X	X	X	X	X	X	X	X	✓
[25]	X	X	X	X	✓	X	X	X	✓	X	X	X	X	X	X	X	X	✓

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı; rotası, hızı ve kullanım yeri belli olan bataryalı bir deniz taşıtı için batarya yaşlanması da göz önüne alınarak en uygun birim yolculuk maliyetini sağlayacak batarya boyutunun belirlenmesidir. Bu amaçla çalışmada, gerçek zamanlı seyir verileri alınan rotası, hızı ve kullanım yeri belli olan tamamen elektrikli yolcu ve araç feribotunun (RO-RO) enerji depolama sisteminin gerçek zamanlı verileri kullanılmıştır. Ayrıca dinamik bir batarya yaşlanma modeli yardımıyla batarya sisteminin yaşlanmasını modelleyerek elektrikli feribotun bir yolculuk maliyetine bataryanın etkisi de detaylı olarak incelenmiştir. Bu bağlamda, bulunan optimum batarya boyutu ve bu batarya kapasitesi ile yapılabilecek seyir sayısı sonucunda seyir başına sistem maliyeti bulunmuştur.

1.3 Tezin Katkısı

Tablo 1.1'de görüldüğü üzere, genellikle hibrit araçlar ve enerji kaynakları üzerine yapılan araştırmaların aksine, bu çalışma tamamen elektrikli deniz taşıtlarına odaklanmaktadır. Bu çalışma, fiziksel ve operasyonel parametreleri bilinen tamamen elektrikli bir RO-RO yolcu ve araç feribotu için optimum batarya boyutunun belirlenmesini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, çalışmanın sağladığı katkılar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Optimum batarya boyutlandırılması ile fiziksel ve operasyonel parametreleri bilinen tamamen elektrikli bir RO-RO yolcu ve araç feribotu için optimum batarya boyutunun belirlenmesi, enerji verimliliği ve seyir-maliyet etkinliği açısından önemli bir katkı sunmaktadır.
- Tamamen elektrikli deniz taşıtları için rehberlik açısından hibrit sistemlerden ziyade tamamen elektrikli sistemler üzerine odaklanarak, bu alanda literatürdeki boşluğu doldurmakta ve gelecekteki araştırmalara yön vermektedir.
- Teknolojik gelişim ve yenilik alanında çalışmanın sonuçları, tamamen elektrikli deniz taşıtlarının tasarımı ve geliştirilmesi süreçlerinde yenilikçi yaklaşımların benimsenmesine katkı sunarak, sektörde teknolojik ilerlemeleri teşvik etmektedir.

2
DENİZ TAŞITLARI ve BATARYA SİSTEMLERİ

2.1 Deniz Taşıtları

Deniz taşıtları, amaçlanan işlevlerine, belirli kullanım türlerine ve Conformité Européenne (CE) düzenleyici standartlarına uygunluklarına göre sistematik olarak sınıflandırılır. Bu sınıflandırma, güvenlik ve operasyonel kurallara uygunluğun sağlanması için gereklidir [26].

2.1.1 Amaçlanan İşleve Göre Sınıflandırma

Deniz araçları, aşağıdakileri içeren birincil işlevlerine göre kategorize edilir:

- Malların Taşınması: Kargo ve malzemelerin taşınması için tasarlanmış gemiler.
- Yolcu Taşımacılığı: İnsanların taşınması için tasarlanmış gemiler.
- Ekonomik Faaliyetleri Destekleme: Açık deniz endüstrileri için tedarik gemileri gibi çeşitli ekonomik faaliyetlerde kullanılan gemiler.
- Turizm ve Rekreasyonel Kullanım: Turizm sektörüne hizmet veren gemiler, gezi gemileri ve tur tekneleri dahil olmak üzere kullanılan gemiler.
- Balıkçı Gemisi Taşımacılığı: Balıkçılık faaliyetleri ve avların taşınması için özel olarak inşa edilmiş gemiler [27].

2.1.2 Kullanım Türüne Göre Sınıflandırma

Özel uygulamalarına bağlı olarak, deniz taşıtları ayrıca birkaç türe ayrılır:

- Balıkçı Tekneleri: Ticari veya eğlence amaçlı balıkçılık için donatılmış tekneler.
- Kargo Tekneleri: Mal ve emtia taşımacılığı için tasarlanmış tekneler.
- Tankerler: Petrol veya kimyasallar gibi sıvı yük taşımak için kullanılan gemiler.
- Konteyner Tekneleri: Konteynerli yük taşımak için özel olarak inşa edilmiş gemiler.
- Feribotlar: Yolcuları, araçları ve yükleri kısa mesafelerde taşımak için kullanılan gemiler.

- Yolcu Tekneleri: Yolcuların eğlence amaçlı seyahatleri için, genellikle gemide kapsamlı olanaklar sunan gemiler.
- Askeri tekneler: Askeri amaçlı uçak gemileri, denizaltılar ve destroyerler gibi donanma gemilerini içerir [27].

2.1.3 CE Düzenleyici Standartları

Avrupa'da tasarlanan ve inşa edilen deniz araçları, gemiler yeteneklerine ve çalışma ortamlarına göre sınıflandıran Conformité Européenne (CE) standartlarına uymak zorundadır:

- Kategori A, Okyanus: Beaufort Force 8'i (40 knot'ın üzerinde) aşan rüzgarlarda ve 4 metrenin üzerindeki önemli dalga yüksekliklerinde çalışabilen, uzun yolculuklar için uygun gemilerdir.
- Kategori B, Açık Deniz: Beaufort Force 8'e (40 knot üzeri) kadar rüzgarlarda ve 4 metreye kadar önemli dalga yüksekliklerinde çalışmak üzere tasarlanmış, açık deniz seyri için tasarlanmış gemilerdir.
- Kategori C, Kıyı İçi: Kıyı suları, büyük körfezler, haliçler, göller ve nehirler için tasarlanmış, Beaufort Force 6'ya (27 knot'a kadar) kadar rüzgarlarda ve 2 metreye kadar dalga yüksekliklerinde çalışabilen gemilerdir.
- Kategori D, İç Kesimler veya Korunaklı Kıyı Suları: Küçük göller, nehirler ve korunaklı kıyı suları için tasarlanmış, Beaufort Kuvvet 4'e kadar rüzgarlarda ve 0,5 metreye kadar dalga yüksekliklerinde çalışmaya uygun gemilerdir [26].

Bu sınıflandırmalar, deniz araçlarının tasarım kabiliyetlerine ve mevzuat gerekliliklerine göre uygun şekilde kullanılmasını sağlayarak denizcilik operasyonlarının güvenliğini ve verimliliğini artırır.

2.1.4 Tahrik Sistemleri

Deniz araçlarının tahrik sistemi beş kategoriye ayrılabilir.

- Su gücü, bir nehir akıntısı veya gelgit akıntısı ile sürüklenerek kullanılır. Akıntının en iyi kısmını tutmaya yetecek kadar dümen sağlamak için bir çapa veya ağırlık indirilebilir (sürüklemede olduğu gibi) veya konumunu korumak için kürekler veya direkler kullanılabilir.

- Sığ suyun dibine doğru itilen bir sırık ya da su yüzeyinde hareket eden kürekler aracılığıyla insan çabası kullanılır.
- Rüzgar gücü yelkenler tarafından kullanılır.
- Karadan, örneğin bir kanalın kıyısından çekilerek kullanılan itici güç hayvan, insan ya da makine tarafından sağlanır ya da bir deniz aracı diğerini çekebilir.
- Mekanik tahrik, gücü yanan yakıttan veya batarya gibi depolanmış enerjiden elde edilen bir motor kullanır. Bu güç genellikle pervaneler ya da su jetleri tarafından tahrik gücüne dönüştürülür [28].

2.1.5 Elektrikli Deniz Araçları

Teknolojideki ilerlemeler ve artan çevresel kaygılar nedeniyle önem kazanan bir diğer deniz taşıtı kategorisi de elektrikli deniz taşıtlarıdır. İlk olarak 19. yüzyılda ortaya çıkan elektrikli deniz taşıtları, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlikleri nedeniyle giderek daha cazip hale gelmiştir. Bu deniz taşıtları bataryalar ve elektrik depolama sistemleri ile donatılmış olup, içten yanmalı motorlarla çalışan geleneksel deniz taşıtlarına kıyasla önemli ölçüde daha düşük emisyon ve daha az gürültü ile çalışmalarına olanak sağlamaktadır. Elektrikli deniz taşıtlarına örnek olarak şunlar verilebilir:[29]

- Elektrikli Feribotlar: Öncelikle kısa menzilli yolcu ve araç taşımacılığı için kullanılır.
- Elektrikli Balıkçı Tekneleri: Balıkçılık endüstrisinde balıkçılık operasyonlarının çevresel etkisini azaltmak için kullanılır.
- Elektrikli Yatlar: Azaltılmış operasyonel gürültü ve emisyon avantajlarıyla birlikte lüks bir deneyim sunar.
- Elektrikli Yolcu Gemileri: Yolcu deneyiminden ödün vermeden sürdürülebilirliğe odaklanan, eğlence amaçlı gemi seyahatleri için daha temiz bir alternatif olarak ortaya çıkmaya başlıyor.

Bu gelişmeler, denizcilik sektörünün daha sürdürülebilir uygulamalara yöneldiğinin altını çizmekte ve deniz taşıtları operasyonlarının çevresel ayak izini azaltmaya yönelik daha geniş bir taahhüdü yansıtmaktadır.[30]

2.1.6 Elektrikli Deniz Araçlarının Menzile Göre Sınıflandırılması

Elektrikli deniz taşıtları, çalışma menzillerine göre genel olarak iki ana kategoriye ayrılabilir: kısa mesafe ve uzun mesafedir.

- Kısa Mesafeli Elektrikli Deniz Taşıtları: Bu deniz taşıtları genellikle kıyı ve nehir geçişleri için kullanılır. Daha kısa şarj süreleri ve hızlı geri dönüşleri ile karakterize edilen bu araçlar, trafiğin yoğun olduğu kentsel su yolları için idealdir. Hızlı şarj etme kolaylığı, bu tekneleri şehir ortamlarında yaygın olarak bulunan sık ve kısa yolculuklar için uygun hale getirir.
- Uzun Mesafeli Elektrikli Deniz Taşıtları: Daha büyük kapasiteli bataryalarla donatılmış olan bu deniz taşıtları uzun mesafeli seyahatler için tasarlanmıştır. Çoğunlukla adalar veya şehirler arasında yolcu ve araç taşımak için kullanılırlar. Gelişmiş enerji yönetim sistemleri verimliliği artırır ve sık sık şarj etmeden uzun çalışma sürelerine izin verir.

Her iki kategori de sıfır emisyon ve düşük gürültü seviyeleri sayesinde çevresel sürdürülebilirliğe önemli ölçüde katkıda bulunur. Ayrıca, elektrikli deniz taşıtları genellikle fosil yakıtlı muadillerine göre daha düşük bakım ve yakıt maliyetlerine maruz kalarak ekonomik avantajlar ve çevresel faydalar sunmaktadır.[31]

2.2 Bataryalar Sistemleri

Batarya, aktif malzemelerindeki kimyasal enerjiyi elektrokimyasal oksidasyon-redüksiyon (redoks) reaksiyonu yoluyla doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren bir enerji sağlayıcısıdır [32]. Piller, elektrikli araçlar ve taşınabilir elektronik cihazlardan enerji depolama sistemleri ve yenilenebilir enerji çözümlerine kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır.

Batarya sistemleri, belirli voltaj ve kapasitelerde elektrik enerjisi üretmek üzere tasarlanmış, seri veya paralel bağlanmış münferit batarya gruplarıdır [33]. Bu sistemler, çeşitli teknolojik ve endüstriyel uygulamalarda güç depolama ve dağıtımının verimliliğini ve ölçeklenebilirliğini artırmada önemli bir rol oynamaktadır [34]. Farklı batarya türlerini, kimyalarını ve özel kullanımlarını anlamak, performansı optimize etmek ve belirli bir uygulama için doğru bataryayı seçmek için gereklidir.

2.2.1 Batarya Tipleri

2.2.1.1 Birincil (Şarj Edilemeyen) Bataryalar

2.2.1.1.1 Alkali Bataryalar

Alkalin piller ilk olarak 1960'larda piyasaya sürülmüştür. Çinko (Zn) ve manganez dioksitten (MnO_2) oluşurlar. Bu malzemeler sayesinde alkalin piller, daha yüksek enerji yoğunluğu ve daha uzun raf ömrü sağlayarak o zamanın pazar lideri olan çinko-karbon pili geride bırakmıştır. Kullanılabilirlikleri ve güvenilirlikleri nedeniyle dijital kameralar ve PDA'lar gibi taşınabilir cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar [32].

Bununla birlikte, alkalin piller aşağıdaki sorunlar da dahil olmak üzere çeşitli sorunlar ortaya çıkarmaktadır:

- Çevresel Etki: Yenilenemeyen kaynakları kullanırlar ve imha edildiklerinde zararlı kimyasallar açığa çıkarırlar [32].
- Sınırlı Şarj Edilebilirlik: Etkisiz hale gelmeden önce sadece birkaç kez şarj edilebildikleri için bu durum atıkların artmasına neden olur [35].
- Zaman İçinde Sızıntı: Sızıntı yapabilir ve güç verdikleri cihazlara zarar verebilirler [32].

Bu sorunlara rağmen, alkalin piller günlük uygulamalardaki performansları ve rahatlıkları nedeniyle popüler olmaya devam etmektedir.

2.2.1.1.2 Çinko Karbon Bataryalar

Kuru hücreler olarak da bilinen çinko-karbon piller galvanik hücrelerdir. Günümüzde halen iki tür çinko-karbon pil kullanılmaktadır: çinko klorür ve Leclanché sistemleri [36]. Çoğunlukla düşük maliyetleri ve hazır bulunmaları nedeniyle tercih edilmektedirler. Çinko-karbon pillerin kullanım alanları arasında el fenerleri, taşınabilir radyolar ve diğer düşük drenajlı uygulamalar bulunmaktadır.

Bu piller, alkalin pillere kıyasla daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olmalarına rağmen, temel enerji ihtiyaçları için uygun maliyetli bir çözüm sağlar. Daha kısa ömürlü ve daha düşük performanslı olmalarına rağmen uygun fiyatlı olmaları ve yaygın olarak bulunabilmeleri, bu pilleri birçok günlük uygulama için popüler bir seçenek haline getirmektedir [32].

2.2.1.1.3 Lityum İyon Bataryalar

Birincil lityum piller anot olarak lityum kullanır, bu da onlara piyasadaki diğer pillere kıyasla yüksek enerji yoğunluğu ve uzun raf ömrü sağlar [37]. Bu piller genellikle kameralar, hesap makineleri ve bazı tıbbi cihazlar gibi uzun süreli güç gerektiren cihazlarda kullanılır [38].

Bununla birlikte, birincil lityum piller çeşitli tehlikeler oluşturabilir:

- Hidrojen Gazı Üretimi: Su ile temas ettiklerinde yüksek derecede yanıcı hidrojen gazı üretebilirler [37].
- Termal Kaçak: Ekzotermik aktiviteden kaynaklanan, kendi kendine ısınmaya yol açabilen ve potansiyel olarak yangınlara veya patlamalara neden olabilen bir durum olan termal kaçağa karşı hassastırlar [37].

Bu risklere rağmen, birincil lityum pillerin yüksek enerji yoğunluğu ve güvenilirliği, onları yüksek talep gören birçok uygulama için paha biçilmez kılmaktadır.

2.2.1.1.4 Gümüş Oksit Bataryalar

Gümüş oksit piller, tüm pil sistemleri arasında en yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle küçük, "düğme" piller için mükemmel bir seçenektir. Bu nedenle, yüksek kapasiteli, uzun ömürlü pillere ihtiyaç duyan hesap makineleri ve saatler gibi cihazlarda enerji kaynağı olarak yaygın şekilde kullanılırlar. Öte yandan, gümüş oksit piller yüksek maliyetlidir ve bu da kullanımlarını performans avantajlarının masrafı haklı çıkardığı daha küçük boyutlarla sınırlar [32].

Maliyetlerine rağmen, uzun hizmet ömürleri ve yüksek enerji yoğunlukları, onları güvenilir ve kompakt güç kaynakları gerektiren uygulamalar için tercih edilen bir seçenek haline getirmektedir.

2.2.1.1.5 Çinko-Hava Bataryalar

Çinko-hava pilleri, havadaki oksijeni hücreye difüze ederek katot görevi görür. Birincil pil sistemleri arasında en yüksek enerji yoğunluğunu sunarlar ve düz deşarj voltajı, uzun raf ömrü ve ekolojik faydalar gibi çok sayıda avantaj sağlarlar. Son zamanlarda Bluetooth cihazlarında, askeri ve tıbbi uygulamalarda kullanılmışlardır

ve dizüstü bilgisayarlarda ve cep telefonlarında kullanılmak üzere geliştirilmektedirler [32].

Bununla birlikte, çinko-hava pillerinin bazı dezavantajları vardır:

- Çevresel Bağımlılık: Performansları çevresel koşullardan etkilenebilir.
- Sınırlı Güç Çıkışı: Yüksek güçlü uygulamalar için uygun değildirler.
- Kısa Aktif Ömür: Aktive edildikten sonra çalışma ömürleri nispeten kısadır. [32].

Bu sınırlamalara rağmen çinko-hava pilleri, yüksek enerji yoğunlukları ve diğer faydalarının dezavantajlarından daha ağır bastığı belirli uygulamalar için değerli bir seçenek olmaya devam etmektedir.

2.2.1.2 İkincil (Şarj Edilebilen) Bataryalar

2.2.1.2.1 Kurşun Asit Bataryalar

Şarj edilebilir akülerin en eski formu olan kurşun-asit (LA) akülerde elektrot olarak kurşun ve oksidi, elektrolit olarak da sülfürik asit çözeltisi kullanılır [39] [40]. Enerji depolama sistemleri arasında en olgun ve uygun maliyetli olanlardır [32].

Kurşun-asit bataryalar, operasyonel güvenilirlikleri nedeniyle enerji santrallerinde yedek güç olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, çeşitli sınırlamaları vardır:

- Kapasite Azalması: Hızlı veya derin deşarj ile kapasiteleri önemli ölçüde azalır.
- Düşük Enerji Yoğunluğu: Düşük enerji yoğunluğuna sahiptirler, yani diğer türlere kıyasla birim ağırlık başına daha az enerji depolarlar.
- Düşük Güç Yoğunluğu: Hızlı bir şekilde yüksek güç sağlayamazlar.
- Uzun Şarj Süreleri: Yeniden şarj etmek için daha uzun süreye ihtiyaç duyarlar.
- Kısa Çevrim Ömrü: Diğer bazı şarj edilebilir pillere kıyasla daha kısa çevrim ömrüne sahiptirler.
- Yüksek Kendi Kendine Deşarj Oranları: Kullanılmadıkları zaman nispeten hızlı bir şekilde şarj kaybederler [40].

Bu dezavantajlarına rağmen, kurşun-asit aküler düşük maliyetleri, güvenilir performansları ve hızlı tepki süreleri nedeniyle otomotiv sistemleri gibi alanlarda hala yaygın olarak kullanılmaktadır [39].

2.2.1.2.2 Nikel Kadmiyum (NiCd) Bataryalar

Waldemar Junger tarafından 1899 yılında icat edilen nikel-kadmiyum (Ni-Cd) pil, şarj edilebilir bir pil türüdür. Yüksek enerji yoğunluğu, iyi bir yaşam döngüsü, sürdürülebilir verimlilik, istikrarlı deşarj voltajı ve düşük sıcaklıklarda güvenilir performans özelliklerine sahiptir. Ni-Cd aküler, kurşun-asit akülerin kanıtlanmış bir alternatifi olarak kabul edilir [39].

Bir Ni-Cd hücresinin birincil bileşenleri şunlardır:

- Pozitif Aktif Malzeme: Nikel hidroksit.
- Negatif Elektrot: Kadmiyum ve demir kombinasyonu.
- Elektrolit: Sulu bir alkalin hidroksit (OH) çözeltisi [41].

Bununla birlikte, Ni-Cd pillerin çeşitli sorunları vardır:

- Yüksek Maliyet: Malzemeler, kadmiyum ve nikel, pahalıdır.
- Çevresel Endişeler: Bu ağır metallerin uygunsuz şekilde imha edilmesi, toksisiteleri nedeniyle önemli çevresel sorunlara neden olabilir.
- Hafıza Etkisi: Bu etki, akü sadece kısmen şarj edildiğinde ve boşaltıldığında akü kapasitesini azaltır.
- Kendi Kendine Deşarj: Ni-Cd piller kullanılmadığında nispeten hızlı bir şekilde şarj kaybeder.

Bu dezavantajlara rağmen, Ni-Cd piller yüksek enerji yoğunlukları, iyi yaşam döngüleri ve çeşitli koşullarda güvenilir performansları nedeniyle hala tercih edilmektedir [39].

2.2.1.2.3 Nikel Metal Hidrit (NiMH) Bataryalar

Nikel-metal hidrit (NiMH) piller nikel-kadmiyum (NiCd) pillere benzer, ancak kadmiyum bazlı bir elektrot yerine hidrojen emici bir negatif elektrot kullanır. Bu değişiklik toksik kadmiyumu ortadan kaldırır ve pilin elektrik kapasitesini artırır [42].

NiMH piller çeşitli avantajlar sunmaktadır:

- Daha Yüksek Kapasite: NiCd pillere kıyasla daha yüksek elektrik kapasitesi.
- Çevresel Faydalar: Toksik kadmiyumun ortadan kaldırılması [43].
- Azaltılmış Hafıza Etkisi: NiCd pillere kıyasla hafıza etkisine daha az duyarlıdır.
- Daha Uzun Yaşam Döngüsü: Li-ion pillerle karşılaştırıldığında.

Bu avantajlara rağmen NiMH pillerin, lityum-iyon pillere kıyasla daha yüksek kendi kendine deşarj oranları gibi bazı sınırlamaları da vardır [42]. Bununla birlikte, tüketici elektroniği, hibrit araçlar ve diğer taşınabilir cihazlar da dahil olmak üzere, faydalarının bu dezavantajlardan daha ağır bastığı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar [32].

2.2.1.2.4 Lityum İyon Bataryalar

Lityum-iyon (Li-ion) piller, yüksek enerji yoğunlukları (170-300 Wh/L), yüksek verimlilikleri ve hızlı şarj ve deşarj yetenekleri nedeniyle hem düşük hem de yüksek güçlü cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu özellikler onları tepki süresi ve ağırlığın kritik olduğu uygulamalar için ideal hale getirir. Li-ion piller 10 yıla kadar uzun bir kullanım ömrüne sahiptir ve kullanımlar arasında gücü iyi korur [42]. Lityum iyonlarının pozitif ve negatif elektrotlar arasındaki hareketiyle çalışırlar. Şarj sırasında lityum iyonları elektrolit aracılığıyla pozitif elektrottan negatif elektrota doğru hareket ederek negatif elektrotu lityumla zenginleştirir. Deşarj sırasında ise lityum iyonları ters yönde hareket eder [40].

Li-ion pillerin verimliliği neredeyse %100'dür ve bu da diğer pillere göre önemli bir avantajdır [42]. Bununla birlikte, yüksek başlangıç sermaye maliyetleri, şebeke enerji depolamasında yaygın kullanımın önündeki en büyük engeldir. Sık ve öngörülemeyen şarj-deşarj döngülerinin olduğu senaryolarda, sınırlı çevrim ömürleri önemli bir dezavantaj haline gelmektedir. Ayrıca, lityum-iyon piller aşırı şarj edildiğinde veya dahili kısa devreler meydana geldiğinde aşırı ısınabilir ve bu da bazı güvenlik riskleri oluşturur [40].

Çeşitli lityum-iyon pil türleri vardır:

1. **Lityum Kobalt Oksit (LCO):**

- Özellikleri: Hafiftir ancak kısa ömürlüdür ve düşük termal kararlılığa sahiptir.
- Uygulama: Akıllı telefonlarda ve dizüstü bilgisayarlarda yaygın olarak kullanılır.

2. **Lityum Manganez Oksit (LMO):**

- Özellikler: Hızlı şarj olur ve yüksek sıcaklıklarda etkilidir, ancak kısa bir kullanım ömrüne sahiptir.
- Uygulama alanı: Tıbbi aletlerde ve taşınabilir elektrikli aletlerde kullanılır.

3. **Lityum Demir Fosfat (LiFePO4 veya LFP):**

- Özellikler: Temiz enerji ve güvenlik, yüksek yaşam döngüsü ve düşük maliyet sağlar, ancak düşük güç yoğunluğu ile ağırdır.
- Uygulama: Enerji depolama sistemlerinde kullanılır: Enerji depolama sistemlerinde kullanılır.

4. **Nikel Manganez Kobalt Oksit (NMC):**

- Özellikler: Güçlü enerji ve güç yoğunluğu, termal kaçışlarda daha güvenli ancak maliyetli ve LFP'ye kıyasla daha düşük yaşam döngülerine sahiptir.

5. **Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (NCA):**

- Özellikler: NMC'den daha yüksek enerji yoğunluğu, ancak termal kaçışlara daha yatkın ve daha kısa bir yaşam döngüsüne sahiptir.

6. **Lityum Titanat Oksit (LTO):**

- Özellikler: Çok yüksek yaşam döngüsü, daha az kirletici, hızlı şarj olur, ancak daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptir, bu da onları daha pahalı hale getirir [44].

2.2.1.2.5 Lityum-Polimer (Li-Po) Bataryalar

Polimer Li-ion (Li-Po) piller, yüksek spesifik enerji ve yüksek enerji yoğunluğu dahil olmak üzere Li-ion pillerin performans özelliklerini sağlar. Mevcut katı polimer elektrolitlerin zayıf iletkenliği nedeniyle, mevcut "polimer" Li-ion piller, elektrolitin iletkenliğini artırmak için daha az viskoz, sıvı bileşenler içerir ve ortam sıcaklıklarında kullanılmalarını sağlar [32].

Li-polimer hücreler ultra hafif, ince dizüstü bilgisayarların, tabletlerin ve akıllı telefonların yaratılmasını sağlamıştır. Bu piller çeşitli özelliklere sahiptir:

- Dezavantajlar: Gövde üretimi için nispeten yüksek alet maliyetleri; kısıtlı boyutlar.
- Avantajlar: Sağlam, mekanik olarak güçlü gövde, pilin zarar görmesini zorlaştırır. Hücreler lazer kaynak işlemi kullanılarak kapatılır.
- Enerji Yoğunluğu: Diğer türlere göre daha yüksek enerji yoğunluğu, Li-ion hücrelere kıyasla toplam ağırlıklarına göre biraz daha yüksek enerji yoğunluğu. Daha yüksek kapasitelere izin vermek için kolayca paralel bağlanabilirler.
- Kendi Kendine Deşarj: Kendi kendine deşarj oranı düşüktür ancak aşırı şarj, derin deşarj ve aşırı sıcaklıklardan korunmalıdır.

Li-polimer bataryalar hassastır ve sağlam ve güvenli tepsilerde taşınmalıdır. Boyutlarındaki esneklik, yüksek enerji yoğunluğu ve elektrik performansı, hücre tasarımının çeşitlenmesine neden olmuştur. Akıllı telefonlarda, tabletlerde, dizüstü bilgisayarlarda ve akıllı saatlerde yaygın olarak kullanılırlar [45].

2.2.1.2.6 Sodyum Sülfür (NaS) Bataryalar

Sodyum sülfür bataryası, katı elektrolit kullanan yüksek sıcaklıkta bir bataryadır ve yaygın ikincil hücreler arasında benzersizdir. Sodyum, ucuz, bol, toksik olmayan, düşük yoğunluklu ve çok negatif bir elektrot potansiyeline (E00=2,71 V) sahip olması nedeniyle cazip bir elektrot malzemesidir. Mevcut geliştirme, özellikle yük dengeleme, güç kalitesi yönetimi ve pik tıraşlama gibi sabit uygulamalara odaklanmıştır. Muhtemelen artan önemi ile sodyum-sülfür piller, rüzgar veya güneş enerjisi dönüşüm sistemlerinin bulunduğu yerlerde yerel depolama için de geliştirilmektedir [46] [47].

2.2.1.2.7 Akış Bataryalar

Akış pili, bir veya daha fazla çözünmüş elektroaktif tür içeren elektrolitin, kimyasal enerjinin elektriğe dönüştürüldüğü bir güç hücresi/reaktöründen aktığı bir pil türüdür. Reaksiyon tersine çevrilebilir, bu da pilin şarj edilmesine, boşaltılmasına ve yeniden şarj edilmesine olanak tanır. Geleneksel bataryaların aksine, akış bataryaları enerjiyi elektrolit çözeltilerinde depolar. Bu nedenle güç ve enerji değerleri birbirinden bağımsızdır. Akış pilleri, 10 saate kadar yüksek deşarj hızında

sürekli olarak enerji açığa çıkarabilir. Enerji depolama sistemlerinde yük dengeleme, güç kalitesi yönetimi ve pik tıraşlama gibi uygulamalar için kullanılırlar [48].

3
METODOLOJİ ve SİSTEM TANIMI

3.1 Metodoloji



Şekil 3.1 Metodoloji diyagramı

Bu çalışma, batarya yaşlanması ve kapasite optimizasyonu olarak iki ana kısımdan meydana gelmekte olup çalışmada bir yolculuktan toplanan gerçek zamanlı veriler kullanılmıştır. Bu gerçek zamanlı veriler yolculuk koşullarında her saniye için elektrikli deniz taşıtının hızını ve talep gücünü vermektedir. Böylelikle incelenecek olan batarya yaşlandırma ve batarya boyutlandırma optimizasyon formülleri çalıştırıldığında gerçeğe uygun sonuçlar elde edilmesi beklenmektedir.

Yaşlanma durumu, yapılacak olan yolculuk başına incelenmiş olup optimum batarya seçimi bu yaşlandırma sonucundaki yaşlanma parametrelerinden elde edilen fonksiyonlar kullanılacaktır. Bu nedenle elde edilen her bir grafiğe ait fonksiyon yolculuk sayısına bağlı olmaktadır. Analiz edilecek olan tamamen elektrikli RO-RO yolcu ve araç feribotuna ait bir seyir için toplanan gerçek zamanlı enerji tüketim verileri ile yaşlandırma formülleri simülasyon ortamında çalıştırılır. Bu simülasyon 1. yolculuktan 73000.yolculuğa kadar bataryanın yaşlanma parametrelerini ve tüketim parametrelerini göstermektir.

Yaşlanma benzetim çalışmasında elde edilecek her bir grafik fonksiyonu yolculuk sayısına bağlı olarak değişmektedir. Ek olarak yolculuk sonunda bu parametrelerin her yolculuk sonunda elde edilen değerleriyle lineer ve lineer olmayan fonksiyon grafikleri elde edilir. Lineer olmayan fonksiyonlara ait grafikler ön görülen eşit sayıda parçalara ayrılarak lineer grafik çıktıları alınarak grafiklerin fonksiyonları

yazdırılır. Diğer bir deyişle yolculuk sayısına göre değişmektedir. Objektif fonksiyon ile beraber kısıt fonksiyonu optimizasyon işlemine sokulur. Kısıt fonksiyonları daha önceden belirlenmiş batarya yaşlanma parametreleri olarak belirlenir. Bu kısıt fonksiyonlarına bağlı parametreler ΔSOC, C_{rate} ve C_{aging}'dir. Bu parametreler aynı zamanda objektif fonksiyon değerinin belirlemektedir. Bu bağlamda yapılan optimizasyon işlemi sonucunda yolculuk sayısına bağlı olan fonksiyonlar için optimum yolculuk sayısını elde edilmektedir. Böylece elde edilen objektif fonksiyon parametreleri bulunarak yolculuk sayısı ile yolculuk başına maliyet işlemin yapıldığı batarya kapasitesi için bulunur. Bu işlem daha büyük ve daha küçük ön görülen batarya kapasiteleri için yapılır. Daha küçük batarya boyutları için ömrünü tamamladığı kabul edilen batarya kapasitesinin %20 kaybını ulaşılana kadar devam eder. Bu durum her bir batarya kapasitesi için yapılır ve ortaya çıkan en küçük seyir maliyet değeri veren batarya kapasitesi optimum batarya kapasitesi olarak alınır.

3.2 Deniz Aracının Genel Özellikleri

Bu çalışmada analiz edilen deniz aracı, uzunluğu 108 metre olan ve yaklaşık 120 araç taşıma kapasitesine sahip bir RO-RO (Roll-on/Roll-off) yolcu ve araç feribotudur. Bu tür feribotlar, araçların ve yolcuların güvenli ve verimli bir şekilde taşınmasını sağlayan, modern deniz taşımacılığının önemli bileşenlerinden biridir. Söz konusu feribot, 11,6 kilometrelik bir rotayı katetmekte ve bu mesafeyi 27 ile 33 dakika arasında değişen bir seyir süresi içinde tamamlamaktadır.

Feribotun operasyonel döngüsü sırasında, sürekli olarak enerji deşarjı gerçekleşmektedir. Her liman durağında, önceki deşarj kapasitesine eşdeğer miktarda enerji şarj edilmektedir. Bu döngü, enerji yönetimi ve optimizasyonu açısından önem arz etmektedir. Feribotun bu özelliği, operasyonel sürdürülebilirliği ve enerji verimliliği konularında önemli avantajlar sağlamaktadır.

Planlanan operasyonel program doğrultusunda, feribotun günde 20 sefer yapması öngörülmektedir. Bu seferler, yılın her günü düzenli olarak gerçekleştirilecektir. Bu durumda, feribotun yıllık bazda 7300 sefer gerçekleştireceği anlamına gelmektedir. On yıllık bir operasyonel süre zarfında ise toplamda 73000 sefer yapması hedeflenmektedir. Bu uzun vadeli planlama, feribotun teknik ve yapısal

dayanıklılığı, bakım programları ve operasyonel etkinliği açısından kritik öneme sahiptir.

Feribotun takvimsel ömrü boyunca gerçekleştireceği sefer sayısı, batarya performansı açısından önemli bir göstergesidir. Modern RO-RO feribotlarının tasarımında, enerji tüketimi ve emisyon azaltımı gibi çevresel faktörler de göz önünde bulundurulmakta olup, bu araçlar deniz taşımacılığının çevresel etkilerini minimize etmeyi hedeflemektedir.

Sonuç olarak, 108 metre uzunluğunda ve yaklaşık 120 araç taşıma kapasiteli bu RO-RO yolcu ve araç feribotu, belirlenen operasyonel ve teknik kriterler doğrultusunda önemli bir model teşkil etmektedir. Bu tür feribotların performans değerlendirmesi, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından ileriye dönük önemli bilgiler sunmakta ve deniz taşımacılığı sektörünün gelişimine katkıda bulunmaktadır. Uzun vadeli operasyonel planlama ve enerji yönetimi stratejileri, feribotun etkin ve verimli bir şekilde hizmet vermesini sağlamakta, böylece deniz taşımacılığının genel performansını artırmaktadır.

4
BATARYA YAŞLANMA MODELİ ve YARARLANIMININ YAŞLANMA AÇISINDAN OPTİMAL BOYUTLANDIRILMASI

4.1 Batarya Yaşlanma Modeli

Çalışmanın bu bölümü, belirli bir rota üzerinde çalışan tamamen elektrikli deniz aracının batarya yaşlanma sürecini simüle etmek için bir modelleme yaklaşımı formüle etmeyi amaçlamaktadır. Başlangıçta, bu aracın modellenmesinde kullanılan talep yükleri iki gruba ayrılmıştır: iki elektrik motorunu kapsayan tahrik sistemi yükleri ve araç içi ihtiyaçlara iç ihtiyaç yükleridir. İç ihtiyaç yükleri sabit kalırken tahrik sistemi yükü, elektrik motorlarının çalışma durumuna göre değişkenlik göstermektedir. Bu talep yüklerini karşılamak için acil durumlar için yedek güç kaynağı olarak dizel jeneratörlerin kullanıldığı bir enerji depolama sistemi mevcuttur.

Deniz aracının batarya sistemi, her yolculuğun sonunda şarj edilecek ve deşarj olduktan sonra tekrar şarj edilecek şekilde tasarlanmıştır. Sonuç olarak, denklem bazlı dinamikler bu operasyonel senaryonun sırasına uygun olacak şekilde yapılandırılacaktır.

Elektrikli deniz taşıtının i. seyirde harcayacağı elektrik enerjisi ($E_{use,i}$), işletme gerilimi (V_{batt}) sabit olduğu için aynı seyirde kullanılacak olan batarya kapasitesini ($C_{use,i}$) (4.1)'deki gibi bulunabilir. Aynı zamanda operasyon kurgusundan yani seyir durumunda deşarj, liman durumunda şarj kurgusundan dolayı bataryanın şarj kapasitesi ($C_{ch,i}$) $C_{use,i}$'ye eşit olacaktır.

$$C_{ch,i} = C_{use,i} = \frac{E_{use,i}}{V_{batt}} \tag{4.1}$$

Bataryanın seyir başlangıç kapasitesi ($C_{init,i}$) seyir başlangıcında batarya kapasitesine ($C_{cap,i}$) eşit veya $C_{cap,i}$'den küçüktür. Diğer bir deyişle i. seyirde yaşlanmaya başlayan dolayısıyla kapasite kaybına uğrayan $C_{cap,i}$ bataryayı şarj

edebilecek kapasite miktarını göstermektedir. Diğer taraftan $C_{init,i}$ seyire başındaki veya deşarj öncesi kapasiteyi ifade eder. Bu bağlamda her seyir başında $C_{init,i}$, $C_{cap,i}$' ye eşit ya da küçük olmak durumundadır. Başlangıç için eşit kabul edildiği ve her seyir sonrası şarj ve deşarj durumunda tam kapasite kullanıldığı kabul edildiğinde her iki parametre de (4.2)'de bulunur. Burada $E_{init,i}$ i. sefer için harcanacak olan enerjiyi ifade etmektedir.

$$C_{cap,i} = C_{init,i} = \frac{E_{init,i}}{V_{batt}} \tag{4.2}$$

Bataryanın doluluk oranını ise SOC ile ifade edilmektedir. SOC_i i. seyir sonunda deşarj olmuş bir şekilde liman durumuna yani şarj durumuna geçer bir sonraki seyre şarj olmuş bir şekilde devam eder. Deşarj durumunda $C_{init,i}$'den seyir durumun da kullanılacak olan kapasite kadar eksilme olur ve kalan kapasitenin o an ki $C_{cap,i}$'ye oranı bize SOC_i değerini verir. Bu durum (4.3)'de gösterilir. Şarj durumda ise deşarj durumunun aksine $C_{cap,i}$'de $C_{use,i}$ kadar kapasite eksilmesi olur ve durum (4.4)'de gösterilir.

$$SOC_i = \frac{C_{init,i} + C_{ch,i}}{C_{cap,i}} \tag{4.3}$$

$$SOC_{i-1} = \frac{C_{init,i-1} - C_{use,i}}{C_{cap,i-1}} \tag{4.4}$$

$\boldsymbol{\Delta SOC}$ değeri seyir sırasında kullanılması amaçlanan kapasitenin mevcut batarya kapasitesine oranını temsil eder. Bir yolculukta tüketilen kapasiteyi gösterir ve (4.5)'de gösterilir.

$$\Delta SOC = \frac{C_{use,i}}{C_{cap,i}} \tag{4.5}$$

Şarj ve deşarj durumları sırasıyla uygulanması durumunda SOC değerinin sınırlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu durumda SOC değerinin alabileceği minimum değer bir seyir için gerekli olan kapasitedir. Başka bir deyişle minimum SOC değeri $\boldsymbol{SOC_{min,i}}$ (4.6)'de verildiği gibi $\boldsymbol{\Delta SOC}$'a eşit olacaktır. SOC de minimum değer bir seyir için gerekli olan kapasitedir. Üst sınır değeri olarak SOC

değişkeninin maksimum değeri $\boldsymbol{SOC_{max,i}}$ (4.7)'de verildiği gibi bataryanın yüklenme kapasitesine eşit olacaktır.

$$\Delta SOC_i = SOC_{min,i} = \frac{C_{use,i}}{C_{cap,i}} \tag{4.6}$$

$$SOC_{max,i} = \frac{C_{init,i}}{C_{cap,i}} \tag{4.7}$$

$\boldsymbol{C_{rate}}$ değeri talep gücüne bağlı olan ortalama akımın toplam batarya kapasitesine oranınıdır ve (4.8)'de gösterilir. Burada ortalama akım bir seyirdeki talep gücünde elde edilmiş ortalama akımdır.

$$C_{rate,i} = I_{c,i} = \frac{I_{avg}}{C_{cap,i}} \tag{4.8}$$

Batarya nominal çevrim ömrü $\boldsymbol{\Gamma_i}$ ile (4.11)'da olduğu gibi gösterilir ve denklem sonucu nominal yükler altında bataryanın kaybetmiş olduğu çevrimi verir. Denklemde $\boldsymbol{\alpha}$ ve $\boldsymbol{\beta}$ sabit olup SOC değerine göre değişmi (4.9) ve (4.10)'da gösterilmektedir. Diğer taraftan gaz sabiti ($\boldsymbol{R = 8.314}$), nominal sıcaklık ($\boldsymbol{\theta_{nom}} = \boldsymbol{25}$ ℃), nominal SOC ($\boldsymbol{SOC_{nom} = 0.9}$), nominal $\boldsymbol{C_{rate}}$ ($\boldsymbol{C_{rate,nom} = I_{c,nom} = 2.5}$) olarak kabul edilir[49].

$$\alpha = \begin{cases} 1287.6, & \text{SOC} \leq 0.45 \\ 1385.5, & \text{SOC} > 0.45 \end{cases} \tag{4.9}$$

$$\beta = \begin{cases} 6356.3, & \text{SOC} \leq 0.45 \\ 4193.2, & \text{SOC} > 0.45 \end{cases} \tag{4.10}$$

$$\Gamma_i = \left[\frac{20}{(\alpha * \text{SOC}_{\text{nom}} + \beta) * \exp\left(\frac{-31700 + 163.3 * \text{I}_{\text{c,nom}}}{\text{R} * \theta_{\text{nom}}}\right)} \right]^{\frac{1}{0.57}} \tag{4.11}$$

Bataryanın farklı yükler altındaki çevrim ömrü ($\boldsymbol{\gamma_i}$), bataryanın seyir anında farklı yük koşullarında kullanabilirliğini değerlendirmede çok önemli bir faktördür. $\boldsymbol{\gamma_i}$

farklı yük koşullarında bataryanın içinde bulunduğu seyirde kaybetmiş olduğu çevrim sayısını verir. Bu amaç için kullanılan birçok matematik denklemi mevcut olup çalışma için en yaygın olan (4.12)'de gösterilen denklem kullanılacaktır[49].

$$\gamma_i = \left[\frac{20}{(\alpha * \Delta SOC_i + \beta) * \exp\left(\frac{-31700 + 163.3 * I_{c,i}}{R * \theta}\right)} \right]^{\frac{1}{0.57}} \tag{4.12}$$

Bir seyirde yaşlanan çevrim sayısı($\boldsymbol{\sigma_i}$) (4.13)'de verilmiştir. Burada $\boldsymbol{\sigma_i}$ değerini, $\boldsymbol{\Gamma_i}$ değeri nominal değerlerinden dolayı sabit kalacağı için her seyir için farklı değer alan $\boldsymbol{\gamma_i}$ belirlemektedir. Bundan dolayı $\boldsymbol{\sigma_i}$ değeri, $\boldsymbol{\Gamma_i}$ değerinin sabit kalması $\boldsymbol{\gamma_i}$ değerinin seyir sayısı ilerledikçe küçüleceğinden arttığı görülecektir. Bu nedenle seyir esnasında yaşlanan çevrim sayısının kullanılan yüklere bağlı olduğunu ve batarya kullanımının yaşlanma için önem arz ettiği gözlemlenebilir.

$$\sigma_i = \frac{\Gamma_i}{\gamma_i} \tag{4.13}$$

Diğer taraftan $\boldsymbol{\sigma_i}$ değerinin i. seyirde yaşalanan çevrim sayısı $\boldsymbol{\Delta SOC}$ kadar olacağından (4.14)'deki gibi gösterilir.

$$\sigma_i = \frac{\Gamma_i}{\gamma_i} * \Delta SOC \tag{4.14}$$

Seyir sırasındaki yaşlanma, elektrikli deniz aracının yolculuk sırasında tamamladığı çevrimin ve batarya başlangıç kapasitesinin($\boldsymbol{C_{cap,init}}$) %20'sinin öngörülen toplam çevrim sayısına oranıyla belirleniyor. Dolayısıyla i. seyahatindeki kapasite yaşlanma değeri ($\boldsymbol{C_{aging,i}}$) (3.15)'de hesaplanır.

$$C_{aging,i=} \left(\frac{C_{cap_{init}} * 0.2}{5000}\right) * \sigma_i * 0.5 \tag{4.15}$$

Özetle, model geminin yük taleplerini ve batarya yaşlanmasını dikkate alarak elektrikli gemilerin batarya yaşlanma sürecini özetlemektedir. Öncelikle ilgili geminin ihtiyaç duyduğu güç talebi yolculuk sırasında gerçek zamanlı olarak ölçülür. Daha sonra bu talebi karşılamak için gerekli olan batarya kapasitesi ve akü parametreleri belirlenir. Bir sonraki adımda pilin çalışması sırasında dinamik olarak değişen şarj durum bilgisi ve pil ömrü parametreleri hesaplanır. Bu aşamada

gemilerin çok sefer yaptığı senaryo dikkate alınarak parametre hesaplamalarındaki hatalar en aza indirilmeye çalışılır. Son olarak tüm bu değerler ışığında pil yaşlanma parametresi hesaplanır.

4.2 Batarya yaşlanma etkisine göre optimal boyutlandırılması

Bir seyir için talep gücü ve seyir şartları belli olan model feribot için uygun bir batarya kapasitesi seçilir. Bu batarya kapasitesi miktarından belli aralıklarla yukarı ve aşağı değerler seçilir. Seçilen batarya kapasitesine göre batarya yaşlandırılması yapılır. Yapılan batarya yaşlandırması sonucunda elde edilen doğrusal olmayan denklemler ve (4.16)'da gösterilen objektif fonksiyonun yaşlandırma programından çıktı olarak alınan doğrusal olmayan denklemler parçalı sürekli fonksiyonlar (affine model) haline getirilerek doğrusal bir fonksiyon olarak yazılır. Kısıt fonksiyonları olarak bataryanın yaşlanması direkt etkileyecek olan parametreler ΔSOC, C_{rate} ve C_{aging} parametreleri seçilir. Kısıtların alt ve üst limitleri parametrelerin 1. ve 73000. seyirde almış olduğu değerler göz önünde bulundurularak verilir.ΔSOC parametresine ait lineer fonksiyonun alt değeri ilk seyirde yapmış almış olduğu değer olacaktır. Diğer bir değişle ΔSOC minimum ilk seyirde almış olduğu değeri alabilir. Üst sınır değeri ise bir seyirde kullanabileceği maksimum değer olarak seçilebilir.C_{rate} parametrine ait lineer fonksiyonun alt değeri ise ilk seyirde almış olduğu değer seçilir, üst değeri ise minimum son seyirde almış olduğu değer seçilir. Son olarak C_{aging} parametresine ait lineer fonksiyonun alt değeri ise son seyire kadar yaşlanmış olan kapasite miktarı yazılır, üst sınır değerine ise minimum bataryanın toplam kapasitesinin bittiği kabul edilen yüzdelik değere karşılık gelen kapasite olarak seçilir. Bu durum listesi yapılan her bir batarya kapasitesi için yapılır. Program çalıştığında bu kısıtlar ve sınırlar doğrultusunda batarya kapasiteleri için ayrı ayrı optimum seyir sayısını verecektir. (4.16)'da objektif fonksiyonda seyir sayıları yazıldığında kapasitelere göre seyir maliyet (SM) hesabı çıkacaktır. Bu seyir-maliyet hesabı en düşük değer sahip batarya kapasitesi model feribot için en optimum batarya boyutu olacaktır. Rota sabit bu yüzden her bir kapasite boyutu için harcanacak enerji tüketim maliyeti (ETM) aynı olacağından belirleyici kısım batarya boyutuna bağlı batarya kurulum maliyeti (BKM) ve buna bağlı olarak yaşlanma faktörü ile beraber yapabileceği toplam seyir (TS) miktarı olacaktır.

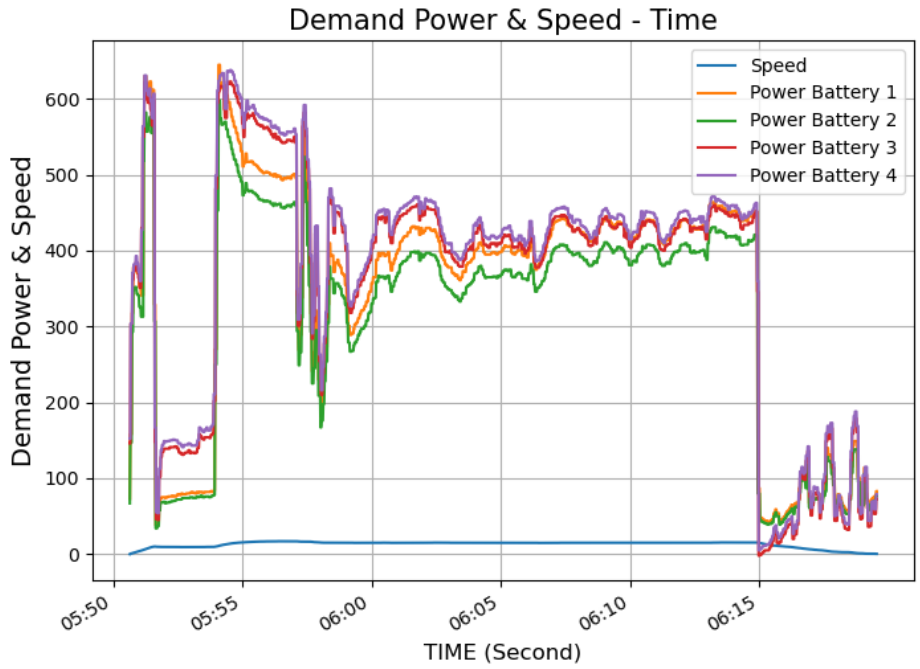
$$SM = \left(\frac{B.K.M}{T.S} + \frac{E.T.M}{T.S}\right) \quad (4.16)$$

Özetle (4.16) numaralı denklemden elde edilen doğrusal olmayan fonksiyon parçalı sürekli fonksiyon haline getirilir. ΔSOC,C_{rate} ve C_{aging} parametrelerinin grafikleri sırasıyla (4.6), (4.8) ve (4.15) numaralı denklemler çalıştırılarak doğrusal olmayan kısıt fonksiyonları bulunur. Bu kısıt fonksiyonları (4.16) numaralı denklemdeki gibi parçalı sürekli fonksiyon haline getirilir. Bu amaç ve kısıt fonksiyonlarının her bir doğru parçası için yolculuk sayısını gösteren x_i parametresi kullanılır. Diğer bir deyişle bütün bu parçalı sürekli fonksiyonların birinci segmentinde x_1 yolculuk sayısını ifade etmektedir. Parçalı sürekli fonksiyonların 5 segmenti için de ayrı ayrı yolculuk sayısını ifade eden parametreler sırasıyla x_1, x_2, x_3, x_4 ve x_5 ile ifade edilir. Bu değerler toplanarak toplam yolculuk sayısı elde edilir. Bu bağlamda yaşlanma simülasyonu sonucu kısıt fonksiyonlarının üst ve alt sınır değerleri belirlenir. Amaç fonksiyonunun minimum değerini verecek olan her bir doğru parçası için optimum yolculuk sayısı simülasyon programı yardımı ile elde edilir. Elde edilen yolculuk sayısı bataryanın belirtilen şartlar ve kısıt değerlerinde yapabileceği maksimum seyir sayısıdır. (4.16) amaç fonksiyonu incelendiğinde ulaşılabilecek maksimum seyir sayısı minimum seyir maliyetini verecektir. Böylelikle belirli seyir şartlarına sahip tam elektrikli feribot için optimum batarya seçimi için yapılabilmektedir.

5
SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

5.1 Batarya Yaşlanması Test Sonuçları

Öncelikle tam elektrikli model feribotun enerji depolama sistemlerinden beslenen elektriksel anlık talep gücünü oluşturan faktörler belirlenir. Bunlar iç ihtiyaç yükleri ve tahrik sistemine ait yüklerdir. İç ihtiyaç yükleri; güvenli seyir yapabilmek için model feribota ait gerekli sistemler olup bu sistemler her seyirde aynı olacağından sabit olarak kabul edilir. Tahrik yükleri ise feribotun hızına bağlı olarak değişmektedir. Yaşlanma çalışmasında dinamik olan parametrelerden bir tanesi de hıza bağlı olarak değişen tahrik sisteminin anlık talep gücüdür. Gerçek bir seyirden saniyelik kayıt altına alınan gerçek zamanlı anlık talep gücü ve aracın hız verileri Şekil 5.1'de gösterilmektedir.



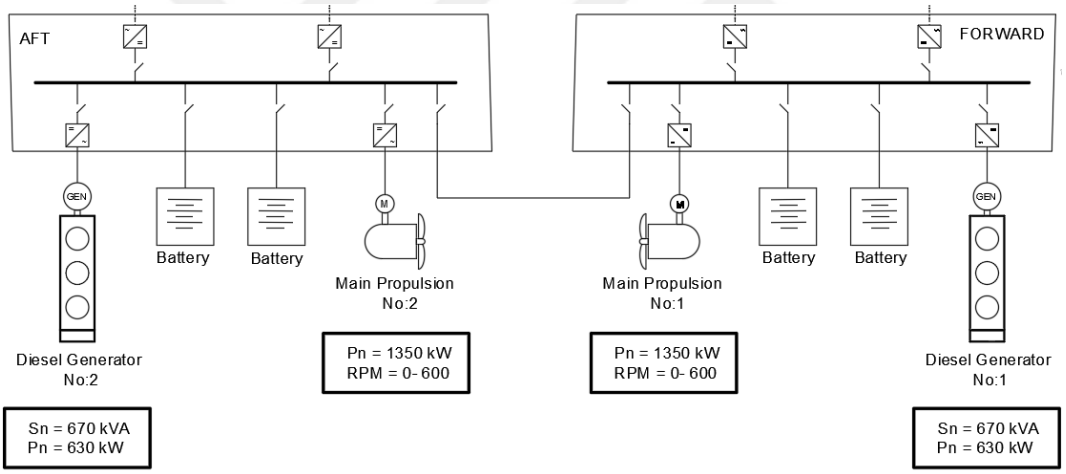
Şekil 5.1 Bir seyire ait anlık güç talebi

Şekil 5.1'de sunulan seyir esnasında saniye cinsinden kaydedilen talep güç ve hız grafiği verilerinden elde edilen sonuçlara göre ortalama akımın $\boldsymbol{I_{avg}}$=1337,9 A ve

ortalama hızın 12,91 knot olduğu tespit edilmiştir. Bu bilgilere göre bir yolculuk ortalama 28,91 dakikada tamamlandığı sonucuna varılmıştır. Bu şartlarda seyir sırasında kullanılacak elektrik enerjisi $\boldsymbol{E_{use}}$= 686 kWh olacaktır.

Model feribot enerji tüketimde dinamik olarak kabul edilen tahrik sistemleri 2 adet 1350 kW güce sahip itici motordan oluşmaktadır. Aynı zaman da model feribot seyir güvenliği için başta ve kıçta olmak üzere 2 adet dizel jeneratöre sahiptir. Ek olarak araç içi enerji dağıtımı da birbirine iştirakli 2 adet ana tevzi panosundan sağlanmaktadır.

Enerji depolama sistemi 4 adet batarya paketinden oluşmaktadır. İşletme gerilimi ($\boldsymbol{V_{batt}}$) 932,4 Volt olan sistemde kurulan batarya sistemine ait başlangıç enerji depolama kapasitesi ($\boldsymbol{E_{init}}$) 3441 kWh olarak belirlenmiştir. Bu durumda batarya başlangıç kapasitesi ($\boldsymbol{C_{cap,init}}$) 3960,47 Ah olarak hesaplanmatadır.Sisteme ait tek hat diyagramı Şekil 5.2'de verilmektedir.



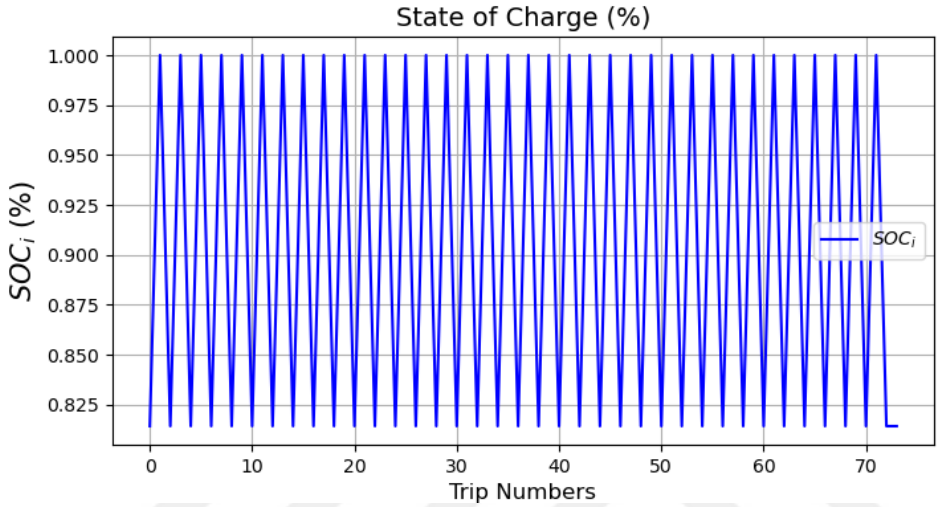
Şekil 5.2 Enerji dağıtım tek hat diyagramı

Batarya grupları kullanım ömürlerinin sonuna gelindiğinde kolaylıkla değiştirilebilecek bir yapıya sahiptir. Bu batarya grupları tek batarya olarak görev yapmakta ve seyir sonrasında kıyı bağlantı paneline bağlanarak yaklaşık yedi dakikada şarj edilebilmektedir. Deşarj kapasitesi ve şarj kapasitesi arasında eşitlik sağlanarak bu batarya gruplarının performansı homojen olarak simüle edilmiştir.

Elektrikli deniz aracı tamamen elektrikle çalışsa da denizde güvenli seyir için elektrik sisteminde iki adet dizel jeneratör bulunuyor. Bu jeneratörler, akü sistemlerinde herhangi bir sorun olması durumunda veya acil durumlarda akü sisteminin devre dışı kalması durumunda devreye girecek ve yolculuğu güvenli bir

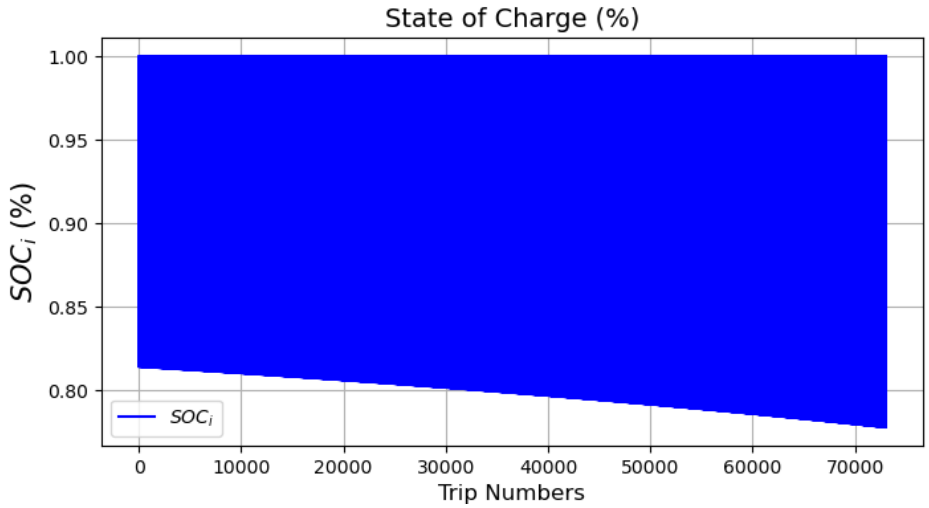
şekilde tamamlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede elektrikli deniz aracı her türlü acil durumda güvenle seyredebiliyor ve operasyonel sürekliliğin sağlanmasında önemli bir emniyet mekanizması sağlıyor.

Tüm bu veriler yola çıkarak öncelikle %100 ile başlayan SOC değerinin şarj-deşarj durumunda yorumlanabilmesi için sadece 73 yolculuk için değişimi Şekil 5.3'de verilir.



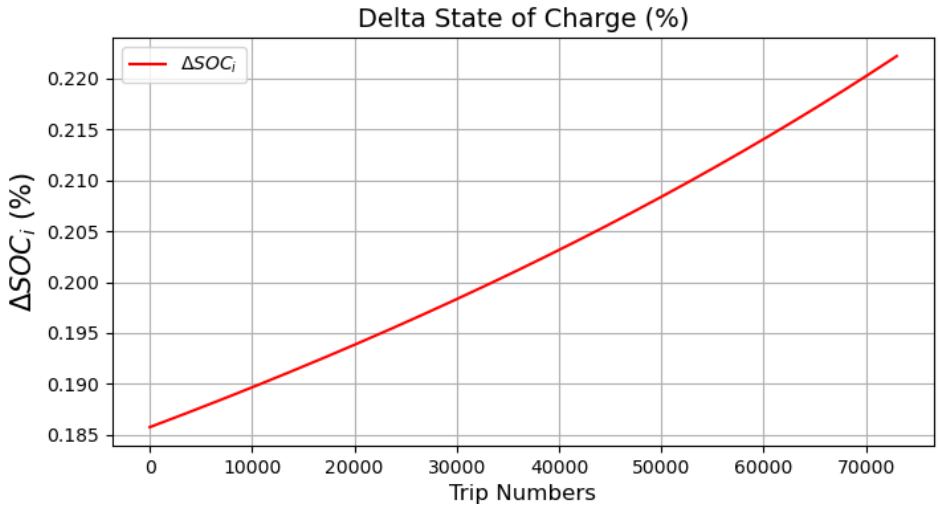
Şekil 5.3 SOC değerinin 73 yolculuk durumunda değişimi

Şekil 5.3'de 74 yolculuk gerçekleşmiş feribot bataryasının SOC değerinin değişimi yakından gösterilmektedir. Öngörülen batarya ömrünün sonuna doğru yolculuk boyunca bu durum devam etmektedir. Değer değişimi (4.3) ve (4.4) numaralı denklemlerinin simülayon programı tarafından çalıştırılmasıyla oluşturulmaktadır. Şekil 4.4 73000 yolculuk boyunca SOC değerinin değişimini göstermektedir. Şekil 5.4'e bakıldığında 60000. yolculuktan sonra SOC değerinin belirgin bir şekilde arttığı açıkca görülmektedir. Bu gözlem, bataryanın toplam kapasitesini gösteren parametre olan $\boldsymbol{C_{cap}}$ değerinin kademeli olarak azaldığını ve bataryanın daha hızlı eskidiğini göstermektedir. 1. yolculukta SOC değeri %100 ile %81,42 arasında değişirken 73000. yolculukta %100 ile %77,78 arasında değişmektedir. Yani her sefer için kullanılan kapasite 735,73 Ah olarak kabul edilirse bu kapasite, sefer başına %18,58 olması gerekmektedir. Fakat son sefer göz önünde bulundurulduğunda SOC değerinin %22,21 olduğu görülmektedir.



Şekil 5.4 SOC değerinin bütün yolculuk sırasında değişimi

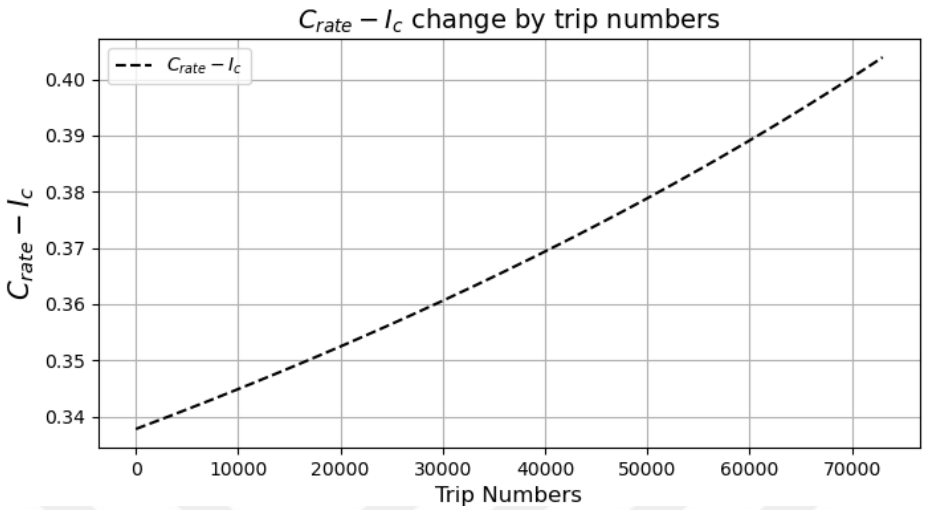
Şekil 5.5'de görüldüğü gibi ΔSOC değeri ilk yolculukta %18,58 son yolculukta ise %22,21'dir. Bu bağlamda (4.6) numaralı eşitlik incelendiğinde C_{use} değeri sabit kaldığından ve C_{cap} değerinin azalmasıyla ΔSOC değerinin üstel bir şekilde arttığı görülmektedir. Diğer bir deyişle batarya aynı kapasiteyi tüketmesine rağmen ΔSOC değeri %18,58'den %22,21 değerine çıkmıştır.



Şekil 5.5 ΔSOC bütün seyir boyunca değişimi

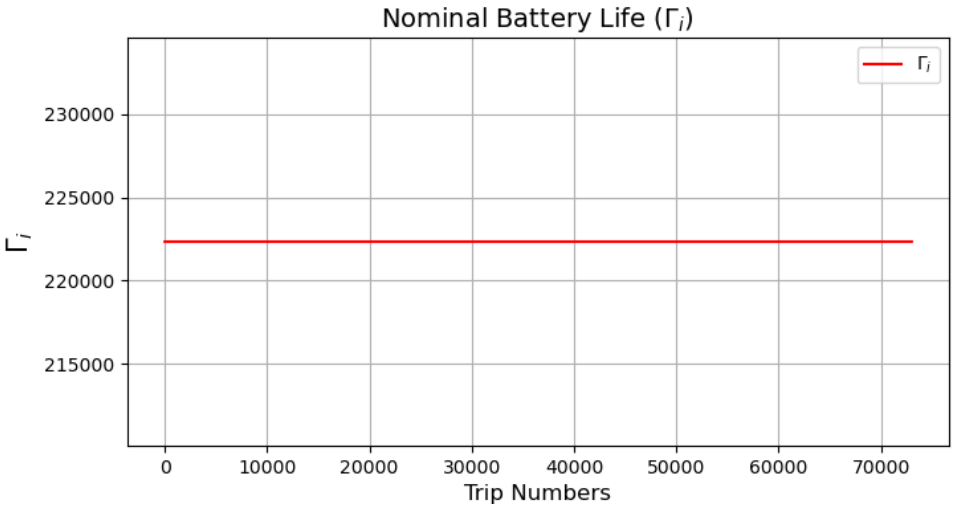
(4.8) numaralı denklem çalıştırıldığında Şekil 5.6'de görüldüğü gibi I_{avg} değerinin sabit olması C_{cap} değerinin yaşlanma faktörüne bağlı olarak azalmasının sonucu C_{rate} değerinin arttığı görülmektedir. Dolayısıyla C_{rate} ilk yolculukta 0,3377 iken

son yolculukta 0,4039'a yükselmektedir. Böylece yaşlanma sürecinde $\boldsymbol{C_{cap}}$ değerininde benzer şekilde yaşlandığı görülür.



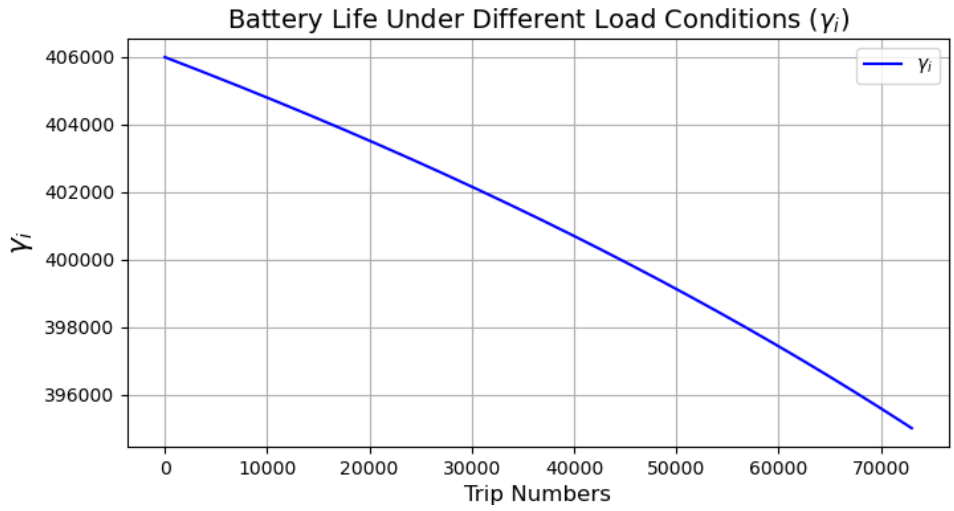
Şekil 5.6 $\boldsymbol{C_{rate}}$ tüm yolculuk boyunca değişimi

(4.11) numaralı denklem incelendiğinde denkleme ait parametrelerin nominal değerlerinden dolayı Şekil 5.7'da verilen grafikte ilk seyirden son seyire kadar nominal çevrim ömrünün sabit olduğu görülmektedir.$\boldsymbol{\gamma_i}$ ilk yolculuktan son yolculuğa kadar 22341,39 olarak kalır. (4.9) ve (4.10) numaralı denklemler göz önünde bulundurulduğunda $\boldsymbol{\alpha}$ ve $\boldsymbol{\beta}$ değerileri $\boldsymbol{SOC_{nom}}$ değerinin 0,9 kabul edilmesinden dolayı sırasıyla 1385,5 ve 4193,2 olarak değer alırlar. Ayrıca R ve $\boldsymbol{\theta}$ sırasıyla 8,314 ve 25 ℃ olark alınmıştır. Bu durum, çalışma koşullarında nominal yüklerde batarya yaşlanma eğrisinin doğrusal veya doğrusala yakın olduğu şeklinde yorumlanabilir.



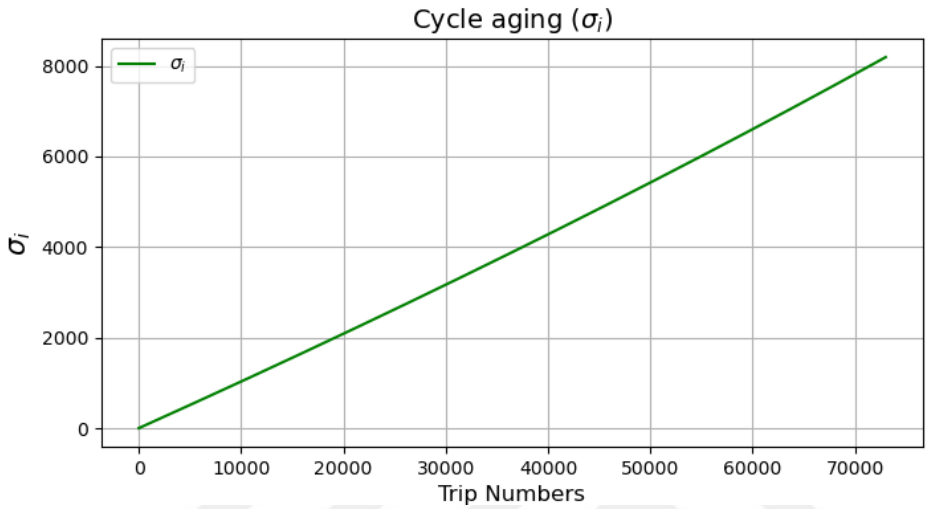
Şekil 5.7 Nominal batarya ömrü.

Farklı yükler altında batarya ömrü Şekil 5.8'de gösterilmiştir. $\boldsymbol{\alpha}$ ve $\boldsymbol{\beta}$ değişkenlerinin değerleri $\boldsymbol{\Delta SOC_i}$ değişkenin değerine göre (4.9) ve (4.10) numaralı denklemlerde belirtildiği gibi değer almaktadır. Seyir sayısı arttıkça $\boldsymbol{\Delta SOC_i}$ ve $\boldsymbol{C_{rate,i}}$ değişimleri sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'de gösterilmektedir. Şekil 5.7'de nominal batarya ömrü $\boldsymbol{SOC_{nom}}$ ve $\boldsymbol{C_{rate,nom}}$ parametrelerinin sabit ilerlemesi sonucunda nominal batarya ömrünün sabit ilerlediği görülmekte olup, farklı yükler altında batarya ömür değeri ilk seyirde 405997,6 son seyirde ise 395019,8 olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 5.8 incelendiğinde grafiğin son yolculuklara doğru doğrusal olmayan bir şekil aldığı görülmektedir. Dolayısıyla farklı yükler altında çalışan bir bataryanın doğrusal olmayan bir şekilde yaşlandığı yorumu yapılabilir.



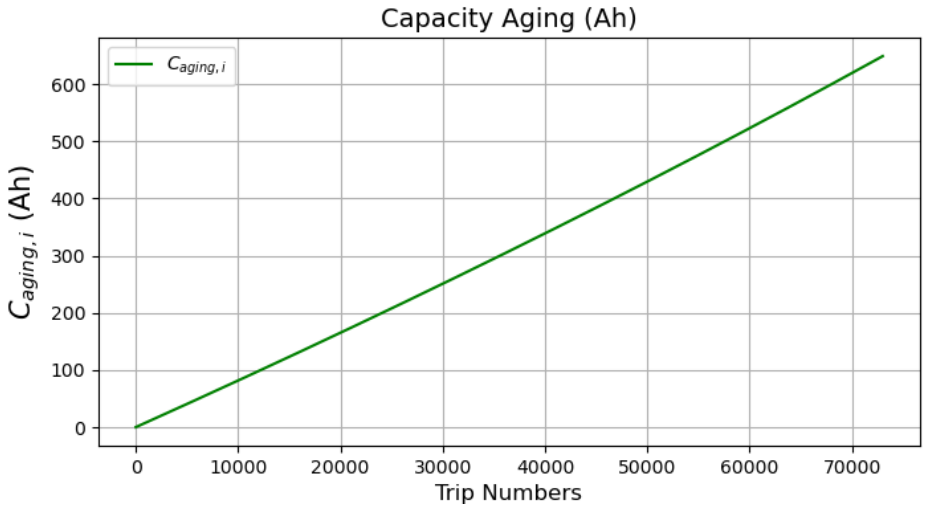
Şekil 5.8 Farklı yükler altında batarya ömrü.

Şekil 5.9'da 73000 yolculuk için $\boldsymbol{\sigma_i}$ verilmiştir. Farklı yükler altında $\boldsymbol{\gamma_i}$'nin doğrusal olmayan değişimi nedeniyle, $\boldsymbol{\sigma_i}$ değeri doğrusal olmayan kümülatif bir şekilde artar.Bu, bataryanın son yolculuklara doğru daha hızlı yaşlanmasına neden olur. İlk yolculukta $\boldsymbol{\sigma_i}$ değeri 0,1017 çevrim iken, son yolculukta toplam 8190,67 çevrim olur.



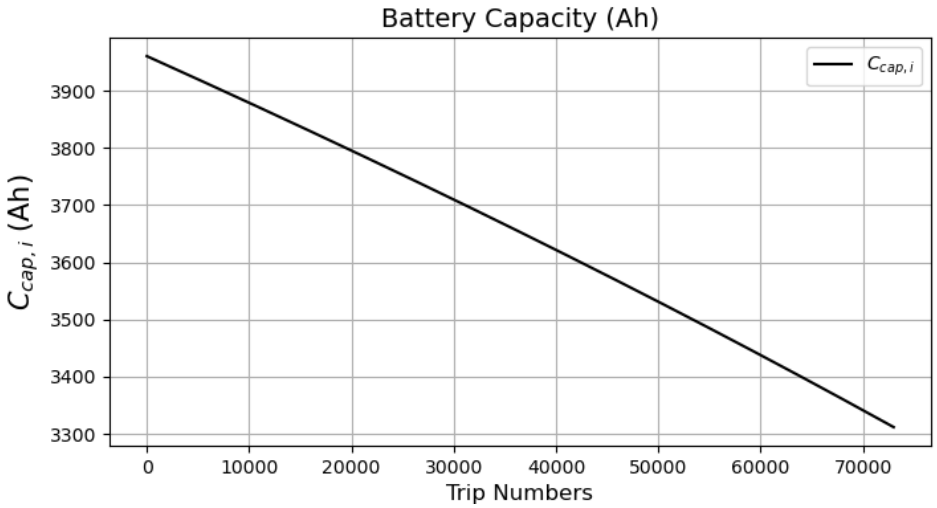
Şekil 5.9 Tüm yolculuklar sırasında toplam döngü yaşlanması.

Her bir yolculuk için (4.15) numaralı denklemden yararlanılarak, batarya yaşlanma eğrisi Şekil 5.10'da gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde (4.15) numaralı denklemin verdiği yaşlanma değerinin etkisi açıkca görülmektedir. İlk yolculukta 0,00805 Ah olan kapasite kaybının sonraki seferlerde arttığı görülmektedir.Batarya 73000 yolculukta toplam 648,77 Ah kapasite kaybetmiştir. Bu çevrim yaşlanması doğrusal olarak devam etseydi diğer bir deyişle ilk yolculuktaki kapasite kaybı dikkate alınarak bir hesaplama yapılsaydı toplam kapasite kaybı 587,65 Ah olacaktı. Ancak kapasite kaybı doğrusal olmayan bir karakteristiğe sahip olduğundan Şekil 5.10'da %10'luk fazladan bir kapasite kaybı görülmektedir.



Şekil 5.10 Batarya toplam kapasite kaybı.

Şekil 5.11'de gösterilen batarya kapasitesi, $\boldsymbol{C_{aging}}$ parametresinin aşamalı bir şekilde şarj deşarj döngüsü içerisinde artmasıyla birlikte $\boldsymbol{C_{cap}}$ değeri azalmaya başlar ve her batarya eskimesinden sonra $\boldsymbol{C_{cap}}$ değişkenin döngü sonundaki değeri batarya kapasitesinin yeni değeri olur.Sonuç olarak, doğrusal olmayan bu sonuçlar, batarya kapasitesini içeren bütün denklemlerde görülebilir.



Şekil 5.11 Batarya kapasite kaybı.

Tüm bu süreç 73000 yolculuk boyunca kümülatif bir şekilde devam etmektedir.Başlangıç kapasitesi 3960,47 Ah olan batarya kapasitesi, tahmin edilen yolculuk sayısını 3311,69 Ah kapasiteyle tamamlıyor.

Yapılan bu simülasyon çalışması Tablo 5.1'de verilen her bir batarya kapasitesi için yapılmış olup optimizasyon için kullanılacak olan kısıt parametrelerine ait değerler verilmiştir.

Tablo 5.1 Yaşlandırma simülasyonu yapılan bataryalar.

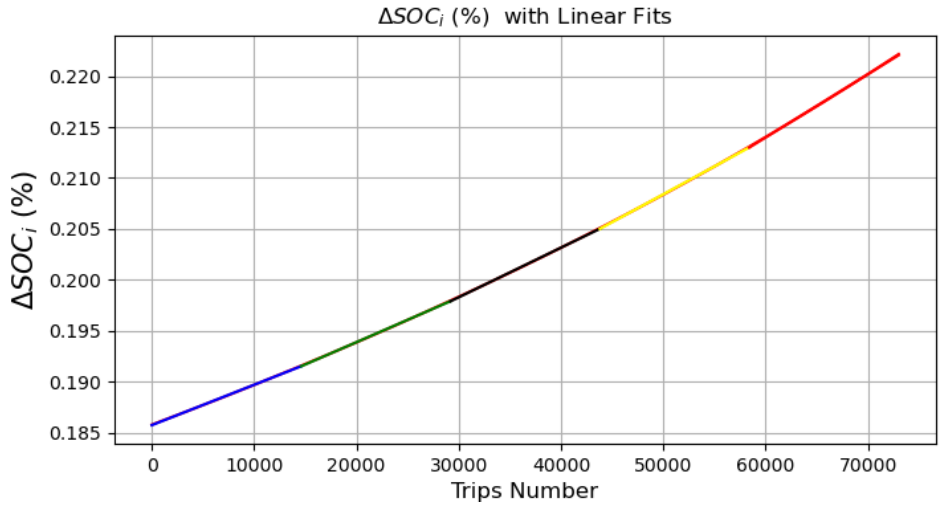
Batarya Kapasitesi (Ah)	ΔSOC ilk değer (%)	ΔSOC son değer (%)	C_{rate} ilk değer	C_{rate} son değer	C_{aging} ilk değer (Ah)	C_{aging} son değer (Ah)
4160	0,176858	0,209018	0,321560	0,380033	0,008004	640,0797
4110	0,179010	0,212157	0,325472	0,385740	0,008017	642,1536
4060	0,181214	0,215396	0,329480	0,391628	0,008031	644,2961
4010	0,183474	0,218739	0,333589	0,397708	0,008044	646,5105
3960.47	0,185768	0,222161	0,337760	0,403928	0,008058	648,7788
3910	0,188166	0,225764	0,342120	0,410481	0,008073	651,1708
3860	0,190604	0,229458	0,346552	0,417196	0,008088	653,625
3810	0,193105	0,233281	0,351100	0,424146	0,008103	656,1681
3760	0,195673	0,23724	0,355769	0,431345	0,008119	658,8051
3710	0,19831	0,241344	0,360563	0,438807	0,008135	661,5415
3660	0,201019	0,245601	0,365489	0,446548	0,008152	664,3831
3610	0,203803	0,250021	0,370551	0,454583	0,008169	667,3364
3560	0,206666	0,254613	0,375756	0,462932	0,008186	670,4081
3510	0,20961	0,259388	0,381108	0,471615	0,008205	673,606
3460	0,21263	0,26435	0,38651	0,48065	0,00822	676,937

Tablo 5.1 Yaşlandırma simülasyonu yapılan bataryalar.(devamı)

Batarya Kapasitesi (Ah)	ΔSOC ilk değer (%)	ΔSOC son değer (%)	C_{rate} ilk değer	C_{rate} son değer	C_{aging} ilk değer (Ah)	C_{aging} son değer (Ah)
3410	0,21575	0,26953	0,39228	0,49	0,00824	680,413
3360	0,21896	0,27493	0,39812	0,49988	0,00826	684,041
3310	0,22227	0,28057	0,40413	0,51014	0,00828	687,832

5.2 Kapasite Optimizasyon Test Sonuçları

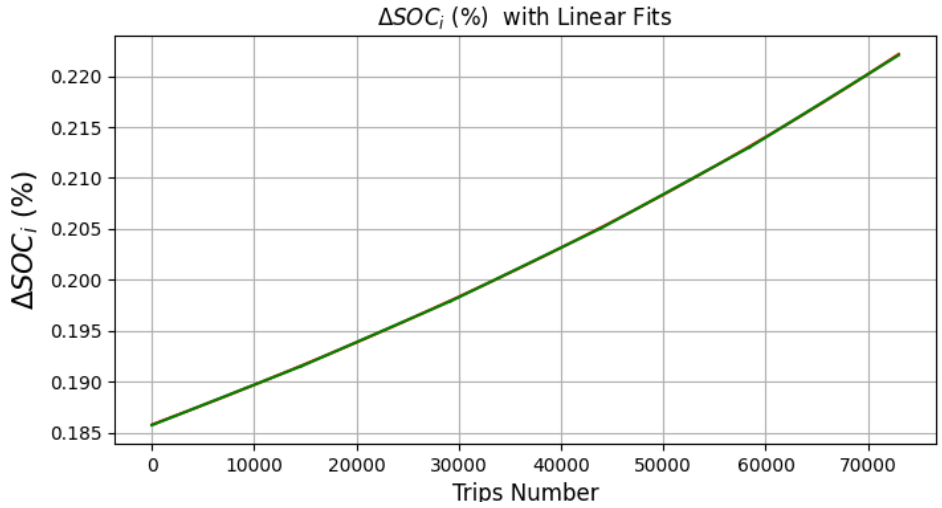
Optimum kapasite seçimi çalışması için Tablo 5.1'de yaşlandırma simülasyonu yapılan bataryalardan 3960,47 Ah'lik bataryanın kısıt fonksiyonu olarak batarya yaşlanmasını doğrudan etkileyen ΔSOC, C_{rate} ve C_{aging} parametlerine bağlı kısıt fonksiyonları ve bunlara ait denklemler bulunmuştur. Öncelikle bu fonksiyonlar lineer olmaması nedeniyle grafikleri ön görülen 5 segmente ayrılarak daha sonra bu ayrılan küçük ve lineer parçaların birbiriyle birleştirilerek daha doğrusal bir grafik ve bu grafiğe ait denklemler elde edilir. Diğer bir deyişle yaşlandırma simülasyonu sonucunda elde edilen doğrusal olmayan fonksiyonlar parçalı sürekli fonksiyon formuna getirilerek doğrusal fonksiyonlar elde edilir. Bu durum Şekil 5.12'de daha detaylı incelenmesi üzere ΔSOC parametresi için gösterilmiştir.



Şekil 5.12 Doğrusal olmayan fonksiyonların parçalı sürekli gösterimi

Şekil 5.5'de gösterilen ΔSOC parametresine ait grafik detaylı incelendiğinde tam bir doğrusal olmadığı görülmektedir. Bu nedenle doğrusal olmayan bu grafik ön görülen segment sayısına bölünerek doğrusal bir fonksiyon formuna getirilir. Bu küçük doğrular diğer bir deyişle segmentler birbiri ile birlereşek lineer bir fonksiyon oluşur. Şekil 5.12'de, Şekil 5.13'deki 5 segmentin nasıl birleştiği gösterilmiştir.

ΔSOC parametresine ait bu grafik 5 segmente bölünüp Şekil 5.13'de gösterilmekte ve toplam yolculuk sayısının 73000 olmasından dolayı her bir doğru paraçası 14600 yolculuk arasında kalmaktadır. Her bir küçük doğru parçası bu yolculuk sayısının katlarında başlayıp bitmektedir. Şekil 5.13'de gösterilen grafiğe ait denklemler Tablo 5.2'de yolculuk aralığı ile birlikte verilmektedir. Yapılan bu işlem Tablo 5.2'de verilmiş olan optimum batarya boyutunu bulmak için kullanılacak diğer parametreler için de gerçekleştirilir.



Şekil 5.13 73000 yolculuk sonunda ΔSOC parametresine ait doğrusal grafik

Yaşlanma simülasyonu sonucunda Şekil 5.13'de beş küçük doğru parça birleştirilerek doğrusallaştırılmış ΔSOC parametresine ait grafik verilmektedir. Bu grafiğe ait parçalı fonksiyon (5.1)'de verilmektedir.

$$\Delta SOC_{reg} = \begin{cases} 3{,}9649127e-07 * x_1 + 0{,}1857225 * w_1 + \\ 4{,}3813217e-07 * x_2 + 0{,}1851077 * w_2 + \\ 4{,}8777826e-07 * x_3 + 0{,}1836493 * w_3 + \\ 5{,}4779317e-07 * x_4 + 0{,}1810092 * w_4 + \\ 6{,}2152931e-07 * x_5 + 0{,}1766876 * w_5 \geq 0{,}185 \end{cases} \quad (5.1)$$

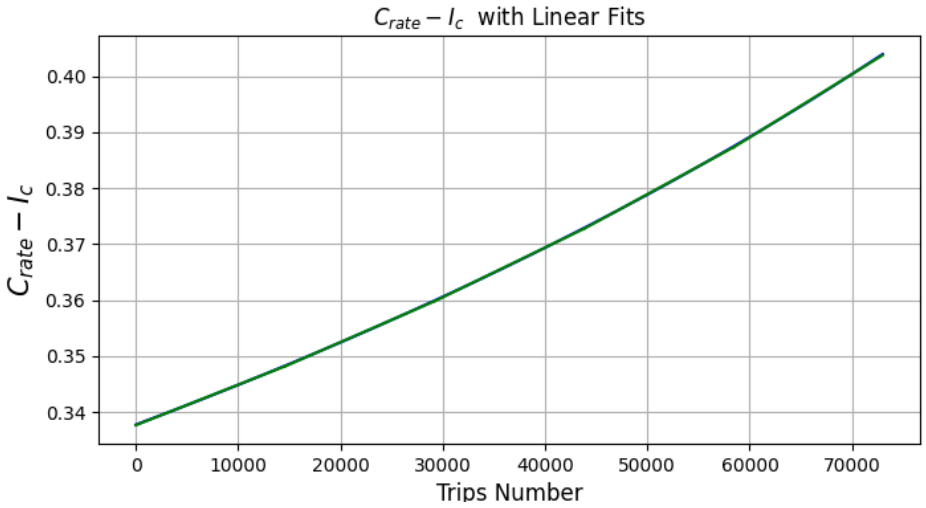
(5.1) numaralı denklemde alt sınır değerimiz ΔSOC parametresinin ilk yolculukta almış olduğu değer olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan aynı denklemin üst sınır değeri (5.2) numaralı denklemde bir yolculuk için batarya kapasitesinin %90 kullanılabileceği ön görülerek 0.9 olarak alınmıştır.

$$\Delta SOC_{reg} = \begin{cases} 3{,}9649127e-07 * x_1 + 0{,}1857225 * w_1 + \\ 4{,}3813217e-07 * x_2 + 0{,}1851077 * w_2 + \\ 4{,}8777826e-07 * x_3 + 0{,}1836493 * w_3 + \\ 5{,}4779317e-07 * x_4 + 0{,}1810092 * w_4 + \\ 6{,}2152931e-07 * x_5 + 0{,}1766876 * w_5 \leq 0{,}9 \end{cases} \quad (5.2)$$

(5.1) numaralı denklemde ΔSOC parametresine ait alt sınır değeri verildiği için parametrenin alması gereken en küçük değer belirlenmiştir. Diğer bir deyişle bir yolculuk için batarya minimum %18.5 kapasitesi kullanılabilir. (5.2) numaralı denklem için üst sınır değeri kapasitenin maksimum kullanım değeri 0,9 olarak belirlenmiştir. Denklemde x_1, x_2, x_3, x_4 ve x_5 ile gösterilen değerler sırasıyla

segment-1, segment-2, segment-3, segment-4 ve segment-5 doğru parçalarındaki x değerlerini diğer bir deyişle yolculuk sayısını ifade etmektedir. W katsayısı ise işlem yapılacak olan doğru parçasını seçmekte olup 0 değeri ya da 1 değerini almaktadır. Kullanılan doğru parçasına ait W katsayısı 1 değerini aldığında diğer doğru parçaları 0 değerini almaktadır. Böylelikle minimum seyir maliyet ücretini yani amaç fonksiyonunun minimum değerini verecek olan seyir sayısının bulunduğu doğru parçasında parametre 1 değerini alarak bu seyir maliyetini minumum yapacak olan seyir sayısını vermektedir.

$\boldsymbol{C_{rate}}$ parametresine ait lineer grafik Şekil 5.14'de gösterilmiş grafiğe ait fonksiyonlar Tablo 5.2'de verilmiştir. $\boldsymbol{\Delta SOC}$ için uygulanan doğrusalaştırma işlemi $\boldsymbol{C_{rate}}$ parametresine ait fonksiyon için de gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.14 73000 yolculuk sonunda $\boldsymbol{C_{rate}}$ parametresine ait doğrusal grafik.

Yaşlanma simülasyonu sonucunda Şekil 5.13'de beş küçük doğru parça birleştirilerek doğrusallaştırılmış $\boldsymbol{C_{rate}}$ parametresine ait grafik verilmektedir. Bu grafiğe ait parçalı fonksiyon (5.3)'de verilmektedir.

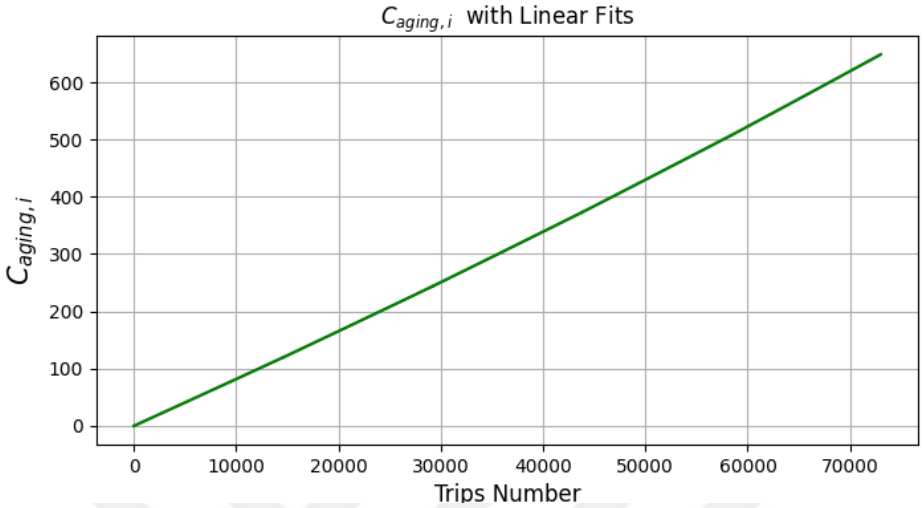
$$C_{rate,reg} = \begin{cases} 7{,}2089274e-07 * x_1 \ + \ 0{,}3376772 * w_1 + \\ 7{,}9660340e-07 * x_2 \ + \ 0{,}3365593 * w_2 + \\ 8{,}8686896e-07 * x_3 \ + \ 0{,}3339076 * w_3 + \\ 9{,}9598691e-07 * x_4 \ + \ 0{,}3291074 * \ w_4 + \\ 1{,}1300525e-06 * x_5 * \ + 0{,}3212500 * w_5 \geq 0{,}337 \end{cases} \quad (5.3)$$

(5.3) numaralı denklemde alt sınır değerimiz $\boldsymbol{C_{rate}}$ parametresinin ilk yolculukta almış olduğu değer olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan aynı denklemin üst sınır değeri (5.4) numaralı denklemde 0,9 olarak alınmıştır.

$$C_{rate,reg} = \begin{cases} 7{,}2089274e-07 * x_1 \ + \ 0{,}3376772 * w_1 + \\ 7{,}9660340e-07 * x_2 \ + \ 0{,}3365593 * w_2 + \\ 8{,}8686896e-07 * x_3 \ + \ 0{,}3339076 * w_3 + \\ 9{,}9598691e-07 * x_4 \ + \ 0{,}3291074 * \ w_4 + \\ 1{,}1300525e-06 * x_5 * \ + 0{,}3212500 * w_5 \leq 0{,}9 \end{cases} \quad (5.4)$$

(5.3) numaralı denklemde $\boldsymbol{C_{rate}}$ parametresine ait alt sınır değeri verildiği için parametrenin alması gereken en küçük değer belirlenmiştir. Diğer bir deyişle parametre bir yolculuk için minimum 0,337 değeri ile başlayacaktır. (5.4) numaralı denklem için üst sınır değeri 0,9 olarak belirlenmiştir. Denklemde $\boldsymbol{x_1}$, $\boldsymbol{x_2}$, $\boldsymbol{x_3}$, $\boldsymbol{x_4}$ ve $\boldsymbol{x_5}$ ile gösterilen değerler sırasıyla segment-1, segment-2, segment-3, segment-4 ve segment-5 doğru parçalarındaki x değerlerini diğer bir deyişle yolculuk sayısını ifade etmektedir. W katsayısı ise işlem yapılacak olan doğru parçasını seçmekte olup 0 değeri ya da 1 değerini almaktadır. Kullanılan doğru parçasına ait W katsayısı 1 değerini aldığında diğer doğru parçaları 0 değerini almaktadır. Böylelikle minimum seyir maliyet ücretini yani amaç fonksiyonunun minimum değerini verecek olan seyir sayısının bulunduğu doğru parçasında parametre 1 değerini alarak bu seyir maliyetini minumum yapacak olan seyir sayısını vermektedir.

$\boldsymbol{C_{aging}}$ parametresine ait lineer grafik 5.15'de gösterilmiş grafiğe ait fonksiyonlar Tablo 5.2'de verilmiştir. $\boldsymbol{\Delta SOC}$ ve $\boldsymbol{C_{rate}}$ parametleri için uygulanan doğrusalaştırma işlemi $\boldsymbol{C_{aging}}$ parametresine ait fonksiyon için de gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.15 73000 yolculuk sonunda $\boldsymbol{C_{aging}}$ parametresine ait doğrusal grafik.

Yaşlanma simülasyonu sonucu Şekil 5.15'de beş küçük doğru parça birleştirilerek doğrusallaştırılmış $\boldsymbol{C_{aging}}$ parametresine ait grafik verilmektedir. Bu fonksiyona ait (5.13) numaralı denklem alt sınır değeri ile birlikte verilmektedir. Alt sınır değeri son yolculuğa kadar toplam kapasite kayıp değeri olan 648,7788 Ah olarak alınır.

$$C_{aging,reg} = \begin{cases} 0{,}0081991 * x_1 - 0{,}3380468 * w_1 \\ 0{,}0085026 * x_2 - 4{,}8007672 * w_2 \\ 0{,}0088422 * x_3 - 14{,}7557779 * w_3 \\ 0{,}0092257 * x_4 - 31{,}5996752 * w_4 \\ 0{,}0096633 * x_5 - 57{,}2182324 * w_5 \geq 648{,}77 \end{cases} \quad (5.5)$$

Üst sınır değeri ise (5.6) numaralı denklemde 3960.47 Ah bataryanın ömrünün bitiği kabul edilen %20 kapasite kaybı 792,094 Ah olarak alınır.

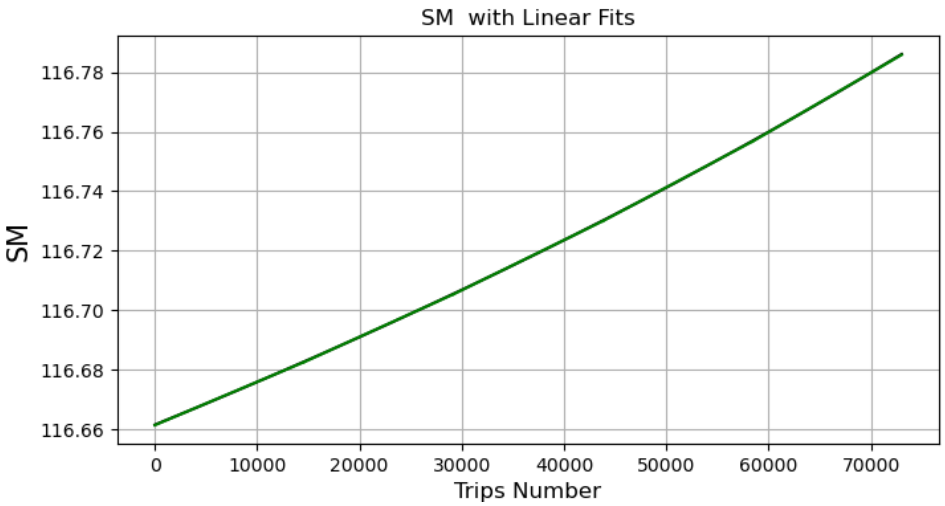
$$C_{aging,reg} = \begin{cases} 0{,}0081991 * x_1 - 0{,}3380468 * w_1 \\ 0{,}0085026 * x_2 - 4{,}8007672 * w_2 \\ 0{,}0088422 * x_3 - 14{,}7557779 * w_3 \\ 0{,}0092257 * x_4 - 31{,}5996752 * w_4 \\ 0{,}0096633 * x_5 - 57{,}2182324 * w_5 \leq 792 \end{cases} \quad (5.6)$$

$\boldsymbol{C_{aging}}$ parametresine ait fonksiyonun alt sınır değeri, diğer bir deyişle deniz aracı için seçilecek olan bataryanın minimum kapasite kaybı 73000.yolculuk sonunda

elde edilen toplam kapisite kaybı 648,7788 Ah olarak belirlenir. Fonksiyonun üst sınır değeri ömrünün bittiği kabul edilen, bataryanın %20 kapasite kaybına uğraması durumundaki değeri 792,094 Ah olarak belirlenir.

Şekil 5.16'da (4.16) numaralı denkelemin, amaç fonksiyonun bütün yolculuk boyunca almış olduğu değerler için grafik verilmektedir. Tablo 5.2'de amaç fonksiyonun denklemleri (5.7) numaralı denklemde verilmiştir. Amaç fonksiyonun değeri kısıt fonksiyonlar tarafından belirlenmiş olan ana fonksiyon olduğu için (5.7) numaralı denklem detaylı incelendiğinde hiçbir kısıt değerinin olmadığı görülmektedir. Objektif fonksiyona ait her bir küçük doğru parçası kısıt fonksiyonları ile beraber minimum değer alacak şekilde simüle edilmiştir.

$$SM_{reg,min} = \begin{cases} 1{,}4514090e-06 * x_1 + 116{,}6615296 * w_1 \\ 1{,}5587821e-06 * x_2 + 116{,}6599515 * w_2 \\ 1{,}6819556e-06 * x_3 + 116{,}6563469 * w_3 \\ 1{,}8246815e-06 * x_4 + 116{,}6500935 * w_4 \\ 1{,}9955173e-06 * x_5 + 116{,}6401090 * w_5 \end{cases} \quad (5.7)$$



Şekil 5.16 73000 yolculuk sonunda SM parametresine ait doğrusal grafik.

Tablo 5.2'de 3960,47 Ah kapasiteye sahip batarya için verilen fonksiyonlar ön görülen segmentlere ayrılır. Yolculuk sayısı aralığı, içinde bulunduğu yolculuğu göstermekte olup o yolculukta kullanılacak olan fonksiyonu gösterilmektedir. Fonksiyonlar yolculuk sayısına bağlı olup x değişkeni yolculuk sayısını

göstermektedir. Kısıt fonksiyonlarından ΔSOC için alt sınır değer ilk yolculukta ΔSOC değişkenin almış olduğu değer sınır değer olarak alınır. Üst sınırı ise 0,9 olarak belirlenmiştir. Diğer bir kısıt fonksiyonu olan C_{rate} değişkeni için oluşturulan fonksiyonun alt sınır değeri ise ilk yolculukta almış olduğu değer olup Tablo 5.1'de olduğu gibi 0,337 olarak alınmıştır. Üst sınır değeri ise 0,9 olarak alınmıştır. C_{aging} ise alt sınır değeri bataryanın son seyire kadar kaybetmiş olduğu kapasite değeri, diğer bir deyişle tüm ömrü boyunca kaybetmiş olduğu kapasite değeri 648,7788 Ah'dir. Üst sınır değeri ise batarya ömrünün sonu olarak kabul edilen batarya kapasitesinin %20 olup bu değer 792,094 Ah olarak alınır.

Tablo 5.2 3960,47 Ah batarya parametrelerinin yolculuk sayısı aralığında kullanılan fonsiyonları

Batarya Parametresi	Yolculuk Sayı Aralığı	Parametre Fonksiyonu
$\Delta SOC_{reg,seg1}$	0-14600	3,9649127987465253e-07*x_1 + 0,1857225875060454
$\Delta SOC_{reg,seg2}$	14600-29200	4,381321721260538e-07*x_2 + 0,18510778765635266
$\Delta SOC_{reg,seg3}$	29200-43800	4.877782621816758e-07*x_3 + 0,18364934692937673
$\Delta SOC_{reg,seg4}$	43800-58400	5,477931779003047e-07*x_4 + 0,1810092182109762
$\Delta SOC_{reg,seg5}$	58400-73000	6,215293171348103e-07*x_5 + 0,17668767133868504
$C_{rate,reg,seg1}$	0-14600	7,208927462188899e-07*x_1 + 0,3376772023445577
$C_{rate,reg,seg2}$	14600-29200	7,966034079503731e-07*x_2 + 0,3365593851956911
$C_{rate,reg,seg3}$	29200-43800	8,868689648890242e-07*x_3 + 0,3339076765851035
$C_{rate,reg,seg4}$	43800-58400	9,959869193120712e-07*x_4 + 0,3291074458138728
$C_{rate,reg,seg5}$	58400-73000	1,1300525359004768e-06*x_5 + 0,3212500932040904
$C_{aging,reg,seg1}$	0-14600	0,008199137576216329*x_1 – 0,338046827369387
$C_{aging,reg,seg2}$	14600-29200	0,008502622835769767*x_2 – 4,800767252663705
$C_{aging,reg,seg3}$	29200-43800	0,00884223324726876*x_3 – 14,755777963276968
$C_{aging,reg,seg4}$	43800-58400	0,009225724394284061*x_4 – 31,599675282663387
$C_{aging,reg,seg5}$	58400-73000	0,00966339606872546 4*x_5 – 57,21823240217344
$SM_{reg,seg1}$	0-14600	1,4515457267116968e-06*x_1 + 116,66152900148005
$SM_{reg,seg2}$	14600-29200	1,5592384875194828e-06*x_2 + 116,65994267429888
$SM_{reg,seg3}$	29200-43800	1,6829916006623036e-06*x_3 + 116,65631183182039
$SM_{reg,seg4}$	43800-58400	1,8266741577958524e-06*x_4 + 116,64999695822834
$SM_{reg,seg5}$	58400-73000	1,9955173933461062e-06*x_5 + 116,64010902032378

Tüm bu x'e yani yolculuk sayısına bağlı kısıt fonksiyonlarının objektif fonksiyonun bütün segmentlerini minimum yapacak x değeri 81016 olarak bulunur. Diğer bir deyişle bu kısıtlar içerisinde objektif fonksiyonun minumum değerini verecek olan yolculuk sayısı 81016 olarak bulunmuştur.

Tablo 5.3 Batarya kapasitelerine göre amaç fonksiyon sonuçları

Batarya Kapasitesi (Ah)	Toplam Yolculuk Sayısı	Toplam Tüketilen Enerji Maliyeti(euro)	Yolculuk Birim Maliyeti (yolculuk/euro)
4160	80518	8428061,695	112,4228333
4110	80645	8428061,695	112,1527893
4060	80771	8428061,695	111,8849797
4010	80894	8428061,695	111,6221437
3960	81016	8428061,695	111,3614804
3910	81237	8428061,695	110,9662062
3860	81456	8428061,695	110,5757918
3810	81569	8428061,695	110,3306611
3760	81681	8428061,695	110,0875564
3710	81891	8428061,695	109,7136644
3660	82097	8428061,695	109,3470126
3610	82301	8428061,695	108,9848446
3560	82502	8428061,695	108,6284174
3510	82699	8428061,695	108,2789598
3460	82894	8428061,695	107,9337672
3410	83182	8428061,695	107,4699057
3360	82318	8428061,695	108,506787
3310	81280	8428061,695	109,8002177

Bu simülasyon çalışması Tablo 5.1'de verilen bütün batarya kapasite değerleri için yapılır. Optimizasyon sonuçlarından yolculuk sayısı ve yaşlandırma simülasyonundan (4.16) numaralı denklemde bulunan değişkenler elde edilir ve yerine yazılarak objektif fonksiyon değeri bulunur. Diğer bir deyişle bu değer

yolculuk başına birim maliyeti verir. Bu bağlamda Tablo 5.3'de yer alan veriler elde edilir.

Tablo 5.3'de elde edilen sonuçlar doğrultusunda Şekil 5.17'deki grafik elde edilir. Bu grafik incelendiğinde batarya kapasite miktarına göre değişen yolculuk sayısına bağlı olarak 3310 Ah batarya kapasitesinde 109,8 yolculuk/euro olan yolculuk birim maliyeti 3410 Ah kapasiteli bataryaya kadar düşmekte olup sonrasında yükselmektedir. Bu bağlamda 107,46 yolculuk/euro maliyet ile 3410 Ah batarya kapasitesinin uygun batarya kapasitesi olduğu görülmektedir.

Bu bağlamda optimizasyon süreci özetlenecek olursa amaç fonksiyonu (5.8)'de gösterilir. $\Delta\boldsymbol{SOC}$, $\boldsymbol{C_{rate}}$ ve $\boldsymbol{C_{aging}}$ parametrelerine ait kısıt fonksiyonlarının ise minimum ve maksimum değerleri ile birlikte alt ve üst değerler belirlenmiş olur. Böylelikle amaç fonksiyonunu minimize edecek olan yolculuk sayısı elde edilir. $\Delta\boldsymbol{SOC}$ parametresine ait fonksiyonun alt ve üst sınır değerleri sırasıyla (5.9) ve (5.10) numaralı, $\boldsymbol{C_{rate}}$ parametresine ait fonksiyonun alt ve üst sınır değerleri sırasıyla (5.11) ve (5.12) numaralı, $\boldsymbol{C_{aging}}$ parametresine ait fonksiyonun alt ve üst sınır değerleri sırasıyla (5.13) ve (5.14) numaralı denklemlerde gösterilmektedir. $\Delta\boldsymbol{SOC}$ ve $\boldsymbol{C_{rate}}$ fonksiyonlarına ait alt sınır değeri yaşlandırma simülasyonun sonucunda ilk yolculukta elde edilen değerlerdir. Üst sınır ise bataryanın kullanım durumu göz önünde bulundurularak bataryanın tam kapasite kullanılması durumundaki değerleridir. $\boldsymbol{C_{aging}}$ fonksiyonu için ise alt sınır değeri 73000. yolculuğun sonunda yaşlanmış olan batarya kapasitesi olup üst sınır değeri batarya ömrünün kabul edildiği toplam batarya kapasitesinin %20'si olarak belirlenir.

$$SM_{reg,min} = \begin{cases} 1{,}4514090e-06 * x_1 + 116{,}6615296 * w_1 \\ 1{,}5587821e-06 * x_2 + 116{,}6599515 * w_2 \\ 1{,}6819556e-06 * x_3 + 116{,}6563469 * w_3 \\ 1{,}8246815e-06 * x_4 + 116{,}6500935 * w_4 \\ 1{,}9955173e-06 * x_5 + 116{,}6401090 * w_5 \end{cases} \quad (5.8)$$

$$\Delta SOC_{reg,min} = \begin{cases} 3{,}9649127e-07 * x_1 + 0{,}1857225 * w_1 + \\ 4{,}3813217e-07 * x_2 + 0{,}1851077 * w_2 + \\ 4{,}8777826e-07 * x_3 + 0{,}1836493 * w_3 + \\ 5{,}4779317e-07 * x_4 + 0{,}1810092 * w_4 + \\ 6{,}2152931e-07 * x_5 + 0{,}1766876 * w_5 \geq 0{,}185 \end{cases} \quad (5.9)$$

$$\Delta SOC_{reg,max} = \begin{cases} 3{,}9649127e-07 * x_1 + 0{,}1857225 * w_1 + \\ 4{,}3813217e-07 * x_2 + 0{,}1851077 * w_2 + \\ 4{,}8777826e-07 * x_3 + 0{,}1836493 * w_3 + \\ 5{,}4779317e-07 * x_4 + 0{,}1810092 * w_4 + \\ 6{,}2152931e-07 * x_5 + 0{,}1766876 * w_5 \leq 0{,}9 \end{cases} \quad (5.10)$$

$$C_{rate,reg,min} = \begin{cases} 7{,}2089274e-07 * x_1 + 0{,}3376772 * w_1 + \\ 7{,}9660340e-07 * x_2 + 0{,}3365593 * w_2 + \\ 8{,}8686896e-07 * x_3 + 0{,}3339076 * w_3 + \\ 9{,}9598691e-07 * x_4 + 0{,}3291074 * w_4 + \\ 1{,}1300525e-06 * x_5 * + 0{,}3212500 * w_5 \geq 0{,}337 \end{cases} \quad (5.11)$$

$$C_{rate,reg,max} = \begin{cases} 7{,}2089274e-07 * x_1 + 0{,}3376772 * w_1 + \\ 7{,}9660340e-07 * x_2 + 0{,}3365593 * w_2 + \\ 8{,}8686896e-07 * x_3 + 0{,}3339076 * w_3 + \\ 9{,}9598691e-07 * x_4 + 0{,}3291074 * w_4 + \\ 1{,}1300525e-06 * x_5 * + 0{,}3212500 * w_5 \leq 0{,}9 \end{cases} \quad (5.12)$$

$$C_{aging,reg,min} = \begin{cases} 0{,}0081991 * x_1 - 0{,}3380468 * w_1 \\ 0{,}0085026 * x_2 - 4{,}8007672 * w_2 \\ 0{,}0088422 * x_3 - 14{,}7557779 * w_3 \\ 0{,}0092257 * x_4 - 31{,}5996752 * w_4 \\ 0{,}0096633 * x_5 - 57{,}2182324 * w_5 \geq 648{,}77 \end{cases} \quad (5.13)$$

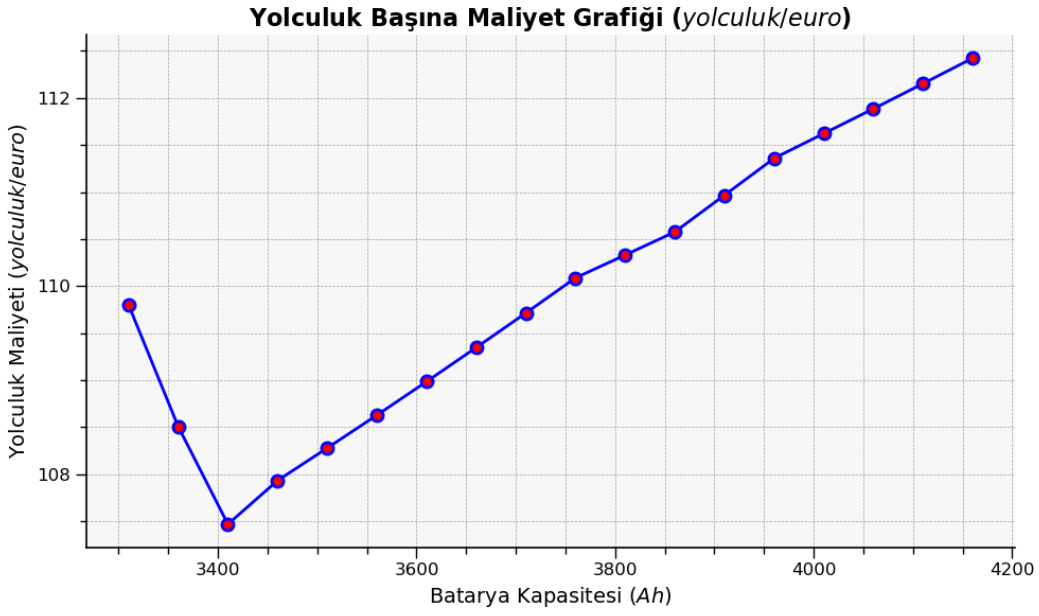
$$C_{aging,reg,max} = \begin{cases} 0{,}0081991 * x_1 - 0{,}3380468 * w_1 \\ 0{,}0085026 * x_2 - 4{,}8007672 * w_2 \\ 0{,}0088422 * x_3 - 14{,}7557779 * w_3 \\ 0{,}0092257 * x_4 - 31{,}5996752 * w_4 \\ 0{,}0096633 * x_5 - 57{,}2182324 * w_5 \leq 792 \end{cases} \quad (5.14)$$

$$\begin{cases} 0 \leq x_1 \leq 20000 \\ 20000 \leq x_2 \leq 40000 \\ 40000 \leq x_3 \leq 60000 \\ 60000 \leq x_4 \leq 80000 \\ 80000 \leq x_5 \leq 100000 \end{cases} \quad (5.15)$$

$$x = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \tag{5.15}$$

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 = 1 \tag{5.16}$$

Bu amaç ve kısıt fonksonlarıyla işletilen bu süreç Tablo 5.3'de geçen bütün batarya kapasiteleri için uygulanır. Sonuçlar Şekil 5.7'de gösterlir ve belirlenen şartlar altında en düşük seyir maliyet ücretini verecek olan optimum batarya kapasitesi elde edilir.



Şekil 5.17 Batarya kapasitelerine göre yolculuk maliyet grafiği.

6
SONUÇLAR,ÇIKTILAR ve GELECEK ÇALIŞMALAR

6.1 Çıktılar

Ardışık bir şekilde yapılan yaşlandırma ve optimizasyon simülasyon çalışmalarında, farklı kapasitelere uygulanan yaşlandırma sonucunda elde edilen sonuçlar batarya kapasitesinin yaşlanma parametresi ve grafik formları incelendiğinde 50 Ah değer ile sıralanan batarya kapasiteleri aralarındaki yaşlanma farkının sabit olmadığı görülmektedir. Bu bağlamda batarya yaşlanmasının doğrusal olmadığı, batarya kapasitesine ve parametrelerine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. 73000 yolculuk sonunda 3410 Ah kapasite değerine sahip bataryanın ilk yolculukta yaşlanan kapasitesi 0,00824 Ah iken son yolculukta 680,413 Ah olup bu batarya kapasitesi ile 83182 yolculuk yapabileceği elde edilmektedir. Bu durumda aynı batarya kapasitesi ile %13,62 daha fazla yolculuk yapılabileceği ve elde edilen sonuçlar neticesinde amaç fonksiyonu çalıştırıldığında 3410 Ah kapasiteye sahip batarya kullanımının seyir maliyeti 107,46 yolculuk/euro olduğu bulunmaktadır. Diğer bir alt kapasite değere sahip 3360 Ah batarya incelediğinde ise bataryanın ilk yolculukta yaşlanan kapasitesi 0,0824 Ah iken son yolculukta 684,041 Ah olup 82318 yolculuk yapabileceği elde edilmektedir. Bu durumda aynı batarya kapasitesi ile aynı kapasite ile %12,62 daha fazla yolculuk yapılabileceği ve elde edilen sonuçlar neticesinde amaç fonksiyonu çalıştırıldığında 3360 Ah kapasiteye sahip batarya kullanımının seyir maliyeti 108.5 yolculuk/euro olduğu bulunmaktadır. Bir üst 3460 Ah kapasiteye sahip batarya incelendiğinde ise bataryanın ilk yolculukta yaşlanan kapasitesi 0,00822 Ah iken son yolculukta 676,937 Ah olup bu batarya kapasitesi ile 82894 yolculuk yapabileceği bulunmaktadır. Diğer bir deyişle aynı batarya kapasitesi ile %13,55 daha fazla yapılabileceği ve bu yolculuk seyir maliyetinin 107,93 yolculuk/euro olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, çalışma konusu olan farklı kapasitelere sahip bataryaların tamamı incelendiğinde 3410 Ah kapasiteye sahip bataryanın tamamen elektrikli Ro-Ro yolcu ve araç gemisi için optimum batarya olduğunu göstermektedir.

6.2 Sonuçlar

Bu çalışmada, belirli bir batarya kapasitesine sahip tamamen elektrikli Ro-Ro yolcu ve araç feribotunun bir yolculuk süresince gerçek zamanlı talep gücü verileri kullanılarak batarya yaşlanma süreci ve optimum batarya seçimi simüle edilmektedir. Simülasyon, incelenen bataryanın yolculuklar boyunca çeşitli parametrelerinde meydana gelen değişiklikleri sayısal ve görsel olarak analiz etmeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, batarya performansını etkileyen temel parametrelerin yolculuk boyunca nasıl değiştiği incelenmiş ve sonuçlar görsel grafiklerle gösterilmiştir. Bu analiz, bataryanın seyahat sırasında yaşlandıkça kaybettiği kapasite gibi önemli özellikleri ortaya koymaktadır. Bulgular, batarya yaşlanma modellerinin gerçek dünya uygulamaları hakkında anlayışımızı geliştirmekte ve saha koşulları altında batarya davranışına dair içgörü sağlamaktadır. Bu yaşlanma göz önünde bulundurularak en uygun batarya kapasite seçimi ortaya koymaktadır.

6.3 Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmada, bataryalı deniz taşıtları için yaşlanma etkisi göz önüne alınarak batarya boyutunun optimize edilmesi üzerine odaklanılmıştır. Ancak, bu konunun daha derinlemesine incelenmesi ve farklı açılardan ele alınması gerekliliği, gelecekte yapılacak araştırmalar için birçok fırsat sunmaktadır.

Öncelikle, bu çalışmada kullanılan yaşlanma modelleri ve optimizasyon algoritmaları, farklı deniz taşıtları ve kullanım senaryoları için genişletilebilir ve daha genel geçer sonuçlar elde edilebilir. Farklı batarya kimyaları, kullanım profilleri ve çevresel koşullar göz önünde bulundurularak daha kapsamlı modeller geliştirilebilir. Ayrıca, gerçek dünya verileriyle model doğrulaması yapılarak, teorik sonuçların pratikteki geçerliliği ve güvenilirliği artırılabilir.

Bunun yanı sıra, batarya yönetim sistemlerinin (BYS) geliştirilmesi ve bu sistemlerin optimizasyon sürecine entegre edilmesi önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. BYS'nin gerçek zamanlı veri analizi yaparak batarya performansını ve ömrünü optimize etme potansiyeli, deniz taşıtlarının operasyonel verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırabilir. Bu bağlamda, makine öğrenimi ve

yapay zeka tekniklerinin kullanımıyla daha akıllı ve adaptif yönetim sistemleri oluşturulabilir.

Son olarak, ekonomik ve çevresel etkilerin değerlendirilmesi, gelecekteki çalışmalar için bir diğer önemli araştırma konusu olarak belirtilmelidir. Optimum batarya boyutunun belirlenmesi, sadece teknik açıdan değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirlik ve çevresel faydalar açısından da analiz edilmelidir. Bu doğrultuda, yaşam döngüsü analizleri ve maliyet-fayda değerlendirmeleri yapılarak, en uygun çözümlerin belirlenmesi ve bu çözümlerin deniz taşımacılığı sektöründe yaygınlaştırılması hedeflenmelidir.

Yukarıda belirtilen araştırma alanları, bataryalı deniz taşıtlarının etkinliğini artırmak ve sürdürülebilir bir deniz taşımacılığına katkı sağlamak amacıyla gelecekte yapılacak çalışmalar için yol gösterici niteliktedir.

KAYNAKÇA

[1] A. Affanni, A. Bellini, G. Franceschini, P. Guglielmi and C. Tassoni, "Battery choice and management for new-generation electric vehicles", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 52, no. 5, pp. 1343-1349, Oct. 2005.

[2] C. C. Chan and Y. S. Wong, "Electric vehicles charge forward", IEEE Power Energy Mag., vol. 2, no. 6, pp. 24-33, Nov./Dec. 2004.

[3] J. F. Donoghue and J. H. Burghart, "Constant power acceleration profiles for electric vehicles", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. IE-34, no. 2, pp. 188-191, May 1987.

[4] S. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez and A. Emadi, "Energy storage systems for automotive applications", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 6, pp. 2258-2267, Jun. 2008.

[5] Y. Zhang, L. Wu, X. Hu and H. Liang, "Model and control for supercapacitor-based energy storage system for metro vehicles", Proc. Int. Conf. Elect. Mach. Syst., pp. 2695-2697, 2008-Oct.

[6] Y. Lu, H. Hess and D. Edwards, "Adaptive control of an ultracapacitor energy storage system for hybrid electric vehicles", Proc. IEEE Elect. Mach. Drives Conf., vol. 1, pp. 129-133, 2007-May.

[7] A. Haxhiu, A. Abdelhakim, S. Kanerva and J. Bogen, "Electric Power Integration Schemes of the Hybrid Fuel Cells and Batteries-Fed Marine Vessels—An Overview," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 8, no. 2, pp. 1885-1905, June 2022, doi: 10.1109/TTE.2021.3126100.

[8] Chen, L.; Tong, Y.; Dong, Z. Li-Ion Battery Performance Degradation Modeling for the Optimal Design and Energy Management of Electrified Propulsion Systems. Energies 2020, 13, 1629. https://doi.org/10.3390/en13071629

[9] V. Tummakuri, T. R. Chelliah and U. S. Ramesh, "Sizing of Energy Storage System for A Battery-Operated Short Endurance Marine Vessel," 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020), Cochin, India, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/PESGRE45664.2020.9070268.

[10] Akbarzadeh, M.; De Smet, J.; Stuyts, J. Battery Hybrid Energy Storage Systems for Full-Electric Marine Applications. Processes 2022, 10, 2418. https://doi.org/10.3390/pr10112418.

[11] Tao, Z.; Barrera-Cardenas, R.; Akbarzadeh, M.; Mo, O.; De Smet, J.; Stuyts, J. Design and Evaluation Framework for Modular Hybrid Battery Energy Storage Systems in Full-Electric Marine Applications. Batteries 2023, 9, 250. https://doi.org/10.3390/batteries9050250.

[12] X. Wang, U. Shipurkar, A. Haseltalab, H. Polinder, F. Claeys and R. R. Negenborn, "Sizing and Control of a Hybrid Ship Propulsion System Using Multi-Objective Double-Layer Optimization," in IEEE Access, vol. 9, pp. 72587-72601, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3080195.

[13] He, W.; Mo, O.; Remøy, A.; Valøen, L.O.; Såtendal, H.; Howie, A.; Vie, P.J.S. Accelerating Efficient Installation and Optimization of Battery Energy Storage System Operations Onboard Vessels. Energies 2022, 15, 4908. https://doi.org/10.3390/en15134908.

[14] Haibin Wang, Evangelos Boulougouris, Gerasimos Theotokatos, Peilin Zhou, Alexandros Priftis, Guangyu Shi, “Life cycle analysis and cost assessment of a battery powered ferry”, 2021.

[15] M. Akbarzadeh, J. D. Smet and J. Stuyts, "Cost Assessment of Battery Hybrid Energy Storage System for Full-Electric Marine Applications," 2022 22nd International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech Republic, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/EPE54603.2022.9814114.

[16] Zhang, Y.; Sun, L.; Ma, F.; Wu, Y.; Jiang, W.; Fu, L. Collaborative Optimization of the Battery Capacity and Sailing Speed Considering Multiple Operation Factors for a Battery-Powered Ship. World Electr. Veh. J. 2022, 13, 40. https://doi.org/10.3390/wevj13020040.

[17] M. D. A. Al-Falahi, S. D. G. Jayasinghe, H. Enshaei, C. Baguley and U. Madawala, "Diesel, Hybrid or Fully Electric Ferry: A Method For Operating Cost Analysis And Battery Size Optimisation," 2019 9th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), Perth, WA, Australia, 2019, pp. 1-9, doi: 10.1109/ICPES47639.2019.9105602.

[18] Lukas Kistner, Astrid Bensmann, Richard Hanke-Rauschenbach, “Optimal Design of Power Gradient Limited Solid Oxide Fuel Cell Systems with Hybrid Storage Support for Ship Applications”, Energy Conversion and Management, Volume 243, 1 September 2021, 114396.

[19] A. Haxhiu, A. Abdelhakim, S. Kanerva and J. Bogen, "Electric Power Integration Schemes of the Hybrid Fuel Cells and Batteries-Fed Marine Vessels—An Overview," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 8, no. 2, pp. 1885-1905, June 2022, doi: 10.1109/TTE.2021.3126100.

[20] Jianyun Zhu, Li Chen, Xuefeng Wang, Long Yu, “Bi-level optimal sizing and energy management of hybrid electric propulsion systems”, Applied Energy, 2020.

[21] Somera J.D.C., Parado S.P.E., Castro M.T., Ocon J.D., 2021, Techno-economics of Hybrid System Electrification of Roll-on/Roll-off Vessels in the Philippines, Chemical Engineering Transactions, 88, 559-564.

[22] Jianyun Zhu, Li Chen, Bin Wang, Lijuan Xia, “Optimal design of a hybrid electric propulsive system for an anchor handling tug supply vessel”, Applied Energy, Volume 226, 2018.

[23] J.-D. Mira, F. Mendoza, E. Betancur, T. Manrique and R. Mejía-Gutiérrez, "A Propulsion System Design Methodology Based on Overall Efficiency Optimization for Electrically Powered Vessels," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 8, no. 1, pp. 239-250, March 2022, doi: 10.1109/TTE.2021.3104763.

[24] A. M. Bassam, A. B. Phillips, S. R. Turnock and P. A. Wilson, "Sizing optimization of a fuel cell/battery hybrid system for a domestic ferry using a whole ship system simulator," 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Toulouse, France, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/ESARS-ITEC.2016.7841333.

[25] Mumin Karaosman, Ali Rıfat Boynueğri and Yavuz Eren, "Battery Aging Simulation for a Fully Electric RO-RO Passenger and Vehicle Ferry", 6th Global Power, Energy and Communication Conference (IEEE GPECOM2024), Budapest/Hungary , July 2024.

[26] "CE CATEGORIES EXPLAINED," Return to Bates Wharf, new and used boats for sale in the UK, https://www.bateswharf.co.uk/news/ce-categories-explained/ (accessed Jun. 26, 2024).

[27] "Types of boats and their functions," PT Honda Power Products Indonesia, https://www.hondapowerproducts.co.id/news-informations/articles/types-of-boats (accessed Jun. 26, 2024).

[28] S. McGrail, Early Ships and Seafaring: European Water Transport. Barnsley: Pen & Sword Archaeology, 2014.

[29] Agis G.Koumentakos, "Developments in Electric and Green Marine Ships", Applied System Innovation,Energy and Environmental Policy Laboratory, University of Piraeus, Greece, October 2019.

[30] Maja Percic, Marija Korican, Ivana Jovanovic and Nikola Vladimir, "Environmental and Economic Assessment of Batteries for Marine Applications: Case Study of All-Electric Fishing Vessels", Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Batteries, December 2023.

[31] Zhi Yung Tay, Dimitrios Konovessis, "Sustainable energy propulsion system for sea transport to achieve United Nations sustainable development goals: a review", Discover Sustainability,March 2023.

[32] D. Linden and T. B. Reddy, Handbook of Batteries, New York: McGraw-Hill, 2002, p. 20.

[33] F. Torabi and P. Ahmadi, "Techno-Economic Assessment of Battery Systems," in Simulation of Battery Systems, pp. 311–352, 2020, p. 314. doi: 10.1016/b978-0-12-816212-5.00013-1.

[34] A. G. Abo-Khalil and M. Alobaid, "A guide to the integration and utilization of energy storage systems with a focus on demand resource management and Power Quality Enhancement," Sustainability, vol. 15, no. 20, p. 1, Oct. 2023. doi: 10.3390/su152014680.

[35] P. Gallagher, “Battery chargers-what you need to know”, Which?, https://www.which.co.uk/reviews/rechargeable-batteries/article/battery-chargers-what-you-need-to-know-al20C7H5R93B (accessed Jul. 1, 2024).

[36] K. Kordesch and W. Taucher-Mautner, “Primary batteries – aqueous systems, Leclanché and zinc–carbon,” *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, pp. 43–54, 2009, p. 43. doi: 10.1016/b978-044452745-5.00097-6.

[37] D. Lisbona and T. Snee, “A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 89, no. 6, pp. 434–442, Nov. 2011. doi:10.1016/j.psep.2011.06.022.

[38] J. Yamaki, “Secondary batteries – lithium rechargeable systems – lithium-ion, overview,” *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, pp. 183–191, 2009, p. 184. doi: 10.1016/b978-044452745-5.00186-6.

[39] M. Yekini Suberu, M. Wazir Mustafa, and N. Bashir, “Energy Storage Systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 35, pp. 499–514, Jul. 2014, p. 504. doi: 10.1016/j.rser.2014.04.009.

[40] C. Zhang, Y.-L. Wei, P.-F. Cao, and M.-C. Lin, “Energy Storage System: Current studies on batteries and power condition system,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 1–16, Feb. 2018, p. 4. doi: 10.1016/j.rser.2017.10.030.

[41] P.-J. Tsais and L. I. Chan, “Nickel-based batteries: Materials and chemistry,” *Electricity Transmission, Distribution and Storage Systems*, pp. 309–397, 2013, p. 336. doi: 10.1533/9780857097378.3.309.

[42] S. T. Revankar, “Chemical Energy Storage,” *Storage and Hybridization of Nuclear Energy*, pp. 177–227, 2019, p. 198. doi: 10.1016/b978-0-12-813975-2.00006-5.

[43] M. Skyllas-Kazacos, “Electro-Chemical Energy Storage Technologies for wind energy systems,” *Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems*, pp. 323–365, 2010, p. 344. doi: 10.1533/9781845699628.2.323.

[44] S. Melançon, “Comparing six types of lithium-ion battery and their potential for BESS Applications,” Energy, https://www.energy-storage.news/comparing-six-types-of-lithium-ion-battery-and-their-potential-for-bess-applications/ (accessed Jul. 3, 2024).

[45] J. Heydecke, Introduction to Lithium Polymer Battery Technology, https://www.jauch.com/downloadfile/5c5050fa5b6510e9a8ad76299baae4e53/white_paper_introduction_to_lipo_battery_technology_11-2018_en.pdf (accessed Jul. 3, 2024).

[46] P. Breeze, “Large-scale batteries,” *Power System Energy Storage Technologies*, pp. 33–45, 2018, p. 41. doi: 10.1016/b978-0-12-812902-9.00004-3.

[47] R. Holze, “Secondary batteries – high temperature systems | Sodium–Sulfur,” *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, pp. 302–311, 2009, pp. 302, 308. doi: 10.1016/b978-044452745-5.00179-9.

[48] H. Chen, Y. Xu, C. Liu, F. He, and S. Hu, “Storing energy in China—an overview,” *Storing Energy*, pp. 509–527, 2016, p. 522. doi: 10.1016/b978-0-12-803440-8.00024-5.

[49] Li Tang, Giorgio Rizzoni and Simona Onori “Energy Management Strategy for HEVs Including Battery Life Optimization”. IEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 1, pp. 211-222, August 2015.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. "Battery Aging Simulation for a Fully ElectricRO-RO Passenger and Vehicle Ferry "6th Global Power, Energy and Communication Conference (IEEE GPECOM2024), June 4-7, 2024, Budapest/Hungary