

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEMİ DİZEL-ELEKTRİK SEVK
SİSTEMLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN
ARTTIRILMASI

Murat PAMIK

Temmuz, 2021

İZMİR

GEMİ DİZEL-ELEKTRİK SEVK SİSTEMLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN ARTTIRILMASI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı,

Deniz Ulaştırma Sistemleri Mühendisliği Programı

Murat PAMIK

Temmuz, 2021

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

MURAT PAMİK, tarafından **DR. ÖĞR. ÜYESİ MUSTAFA NURAN** yönetiminde hazırlanan “**GEMİ DİZEL-ELEKTRİK SEVK SİSTEMLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN ARTTIRILMASI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa NURAN

Yönetici

.....
Dr. Öğr. Üyesi Güner ÖZMEN

Tez İzleme Komitesi Üyesi

.....
Prof. Dr. Aytunç EREK

Tez İzleme Komitesi Üyesi

.....
Doç. Dr. Görkem KÖKKÜLÜNK

Jüri Üyesi

.....
Doç. Dr. Hakan DEMİREL

Jüri Üyesi

.....
Prof. Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans döneminde de danışmanlığımı yapan, doktora sürecimde de her daim desteğini hissettiğim sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Mustafa NURAN'a, bana kattıkları için çok teşekkür ederim. Tezimin her aşamasında değerli katkılarıyla beni yönlendiren tez izleme jürisi hocalarım sayın Prof. Dr. Aytunç Erek ve sayın Dr. Öğr. Üyesi Güner Özmen'e de içtenlikle teşekkür ediyorum. Bu süreçte manevi destekleri ile bana güç katan bütün aile fertlerime ve en çok da varlığıyla en büyük motivasyon kaynağım olan biricik kızım Nehir PAMİK'a en büyük sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Murat PAMİK

GEMİ DİZEL-ELEKTRİK SEVK SİSTEMLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN ARTTIRILMASI

ÖZ

Elektrikli sevk sistemleri pek çok gemi türü için, yakıt tüketimi ve zararlı egzoz gazı emisyonlarını azaltabildiğini göstermiştir. Farklı gemi türleri için, elektrikli sevk sistemlerinin çeşitli avantajlarında yararlanmak için uzun yıllardır çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar genellikle kısa mesafe kıyı şeridi gemileri, elektrik ihtiyacı yüksek büyük yolcu gemileri, Dinamik Konumlandırma (DP) gerektiren özel ihtiyaç gemileri ya da askeri gemilerden oluşmuştur. Ancak elektrikli ekipmanların verimliliklerindeki artış, gemilerden kaynaklı çevresel kaygıların yükselmesi ve buna önlem alabilmek için getirilen uluslararası sınırlamalar, elektrikli sevk sistemlerinin daha geniş bir kullanım alanına sahip olabileceği çalışmaların yapılmasına sebep olmuştur.

Bu tez çalışmasında, bir açık deniz konteyner gemisi için, Dizel-Elektrik (DE) sevk sistemine sahip olma durumu simüle edilmiş, üç farklı senaryo üzerinden böyle bir sistemin yakıt tüketimi ve emisyonlar açısından değerlendirmesi yapılmıştır. Öncelikle geminin kırk günlük seyir bilgileri alınmış ve yük profili çıkarılmıştır. Bu yük profili elektrikli dönüşümlerin kayıplarını dikkate alarak, DE sevk sistemi için düzenlenmiş, geleneksel DE sevk sistemi, bataryalardan faydalanan hibrit güç kaynaklı DE sevk sistemi ve sıfır emisyon limanlara uyum sağlayabilecek bir DE sevk sistemi, bu konteyner gemisi ile aynı operasyonları yaptığı kabul edilerek oluşturulan bir matematiksel modelle simüle edilmiştir. Simülasyonda, jeneratörlerin optimum yükte çalışabilmesi için gerekli konfigürasyonlar ve bataryaların güç dengesine maksimum katkı sağlayabileceği bir yapı oluşturması hedeflenmiştir. Yapılan simülasyonlar ile bir açık deniz konteyner gemisi için farklı simülasyonlarda %2,9 ile %10,38 arasında değişen yakıt tasarrufu ve buna bağlı emisyonlardaki indirgenme oranı gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Elektrikli sevk sistemleri, dizel-elektrik sevk sistemi, yakıt tüketimi, egzoz gazı emisyonları, enerji verimliliği, dizel makineler

INCREASING ENERGY EFFICIENCY IN MARINE DIESEL-ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS

ABSTRACT

Electrical propulsion systems have shown that, they can reduce fuel consumption and harmful exhaust gas emissions from ships. Studies have been carried out for many years to take advantage of electrical propulsion systems on different ship types. The studies generally consisted of short-distance shoreline ships, large passenger ships with high electricity needs, special purposes ships that require Dynamic Positioning (DP) or military ships. However, the increase in the efficiency of electrical equipment, the increase in environmental concerns arising from ships and the international restrictions imposed to take measures against this have led to studies that can have a wider usage area of electrical propulsion systems.

In this thesis, having a Diesel-Electric (DE) propulsion system was simulated for an offshore container ship, and such a system was evaluated in terms of fuel consumption and emissions over three different scenarios. First of all, the ship's forty-day navigation information was obtained and the load profile was drawn. This load profile is adopted for the DE propulsion system, taking into account the losses of electrical conversions. By assuming that it performs the same operations as this container ship are simulated with a mathematical model for traditional DE propulsion system, a hybrid power sourced DE propulsion system using batteries, and a DE propulsion system that can adapt to zero emission ports. In the simulation, it is aimed to create the necessary configurations for the generators to operate at optimum load and to create a structure in which the batteries can contribute to the power balance. With the simulations made, the fuel savings varying between 2.9% and 10.38% and the reduction in emissions related to this in different scenarios for an offshore container ship are shown.

Keywords: Electrical propulsion systems, diesel-electric propulsion systems, fuel consumption, exhaust gas emissions, energy efficiency, diesel engine

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
1.1 Dizel-Elektrik Sevk Sistemi Kullanmaya İten Sebepler	1
1.2 Literatür.....	10
BÖLÜM İKİ - GEMİ ELEKTRİKLİ SEVK SİSTEMLERİ.....	19
2.1 Geleneksel DE Sevk Sistemi.....	21
2.1.1 Geleneksel Dizel Elektrik Sevk Sisteminin Faydaları ve Zorlukları	22
2.2 Hibrit Sevk Sistemi	23
2.2.1 Hibrit Sevk Sisteminin Faydaları ve Zorlukları	24
2.3 Hibrit Güç Kaynaklı DE Sevk Sistemi.....	25
2.3.1 Hibrit Güç Kaynaklı DE Sevk Sisteminin Faydaları ve Zorlukları	26
2.4 DC Dolaşım Hibrit Güç Kaynaklı DE Sevk Sistemi	28
2.4.1 DC Dolaşım Hibrit Güç Kaynaklı DE Sevk Sistemi Faydaları ve Zorlukları	29
BÖLÜM ÜÇ - VERİLERİN ANALİZİ.....	30

3.1 Model Alınacak Gemiye Karar Verilmesi	31
3.1.1 Gülbeniz A Gemisi Teknik Özellikleri	32
3.1.2 Gülbeniz A Gemisi Seyir Bilgileri	34
3.2 Simülasyonda Kullanılacak Sistem Elemanları	38
3.2.1 AC/DC Dolaşım	39
3.2.2 Jeneratör	43
3.2.3 Enerji Depolama Cihazları (EDC)	47
3.2.4 Dönüştürücüler	56
3.2.5 Elektrik Motoru	58
BÖLÜM DÖRT - METODOLOJİ	64
4.1 Senaryo 1	65
4.2 Senaryo 2	70
4.3 Senaryo 3	76
BÖLÜM BEŞ - BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	82
5.1 Senaryo 1 Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Öneriler	83
5.2 Senaryo 2 Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Öneriler	84
5.3 Senaryo 3 Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Öneriler	85
5.4 Sonuçların Genel Değerlendirmesi ve Gelecek Çalışmalara İçin Öneriler	86
BÖLÜM ALTI - SONUÇLAR	88
KAYNAKLAR	89

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Marpol Ek VI SO _x limitleri	4
Şekil 1.2 Marpol Ek VI NO _x emisyon limitleri	4
Şekil 1.3 Gemi tiplerine göre CO ₂ emisyonları ve 2050 yılı beklentisi	6
Şekil 2.1 Geleneksel DE sevk sistemi şeması	21
Şekil 2.2 Hibrit sevk sistemi şeması	24
Şekil 2.3 Hibrit güç kaynaklı DE sevk sistemi şeması	26
Şekil 2.4 DC dolaşım hibrit güç kaynaklı DE sevk sistemi	28
Şekil 3.1 Gülbeniz A gemisinin uğradığı limanlar	31
Şekil 3.2 Gülbeniz A	33
Şekil 3.3 Gülbeniz A gemisi seyir bilgileri (<i>noon report</i>) dokümanı	34
Şekil 3.4 Gülbeniz A gemisi makine hızı, skavenç basıncı ve makine yükü örnek grafikleri	35
Şekil 3.5 Ana makine yük değerleri <i>excell</i> tablosu	36
Şekil 3.6 Ana makine yük değerleri 40 günlük seyir grafiği	36
Şekil 3.7 Ana makine yük değerleri iki farklı seyir karşılaştırılması	37
Şekil 3.8 Ana makine günlük yük değerleri	38
Şekil 3.9 a) DE sevk sistemi AC dolaşım şeması, b) DE sevk sistemi DC dolaşım şeması	40
Şekil 3.10 Şaft hızlarına göre, dizel motor yükü-SYT grafiği	45
Şekil 3.11 Sabit ve değişken devirli jeneratör-doğrultucu sistemleri güç kayıpları ..	47
Şekil 3.12 EDC enerji ve güç yoğunlukları	48
Şekil 3.13 Farklı araştırmalardaki lityum-iyon bataryaların 2020 yılı için fiyat tahminleri	54
Şekil 3.14 Lityum-iyon batarya fiyatlarının (\$/kWh) yıllara göre değişimi	55
Şekil 3.15 Bir lityum iyon pile ait kapasite-gerilim eğrisi	55
Şekil 3.16 Tek yönlü diyot doğrultucu verimliliği	58
Şekil 3.17 Senkron motor verimliliği	63
Şekil 4.1 Referans değerlerden üretilen Yük-SYT grafiği	66
Şekil 4.2 Senaryo 1 simülasyon sonucu grafikleri	68
Şekil 4.3 Senaryo 2 batarya dizilimi	71

Şekil 4.4 Senaryo 1 simülasyon sonucu grafikleri	73
Şekil 4.5 Senaryo 1 ve Senaryo 2 arasındaki anlık yakıt tüketimleri karşılaştırılması	74
Şekil 4.6 Pi-Pj grafiği ve batarya şarj – deşarj gösterimi	75
Şekil 4.7 Senaryo 3 simülasyon sonucu grafikleri	78
Şekil 4.8 Avrupa birliği ülkelerinin endüstriyel elektrik fiyatları 2019.....	79



TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1 EFeNO _x değerleri hesaplama yöntemleri.....	5
Tablo 1.2 Gemilerde kullanılan bazı yakıtların karbon içeriği ve C _f	7
Tablo 1.3 Gemi güç sistemleri	9
Tablo 3.1 Gülbeniz A gemisi teknik özellikleri	33
Tablo 3.2 Batarya türlerine göre spesifik özellikleri ve maliyetleri	51
Tablo 3.3 Farklı frekans ve kutup sayılarındaki elektrik motoru senkron hızları.....	61
Tablo 4.1 Farklı yüklere göre SYT değerleri	67
Tablo 4.2 Kullanılan bataryanın özellikleri	76
Tablo 4.3 Gülbeniz A gemisinin limanlarda kalma süreleri, limandaki elektrik enerji ihtiyacı ve enerji birim maliyetleri	80
Tablo 5.1 Yakıt tüketimi, emisyonlar ve maliyetlerin kıyaslanması	82

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Dizel-Elektrik Sevk Sistemi Kullanmaya İten Sebepler

Deniz taşımacılığı, her yıl dünya denizlerinde 10 milyar tondan fazla konteyner, katı ve sıvı dökme yük taşıyarak, küresel ticaretin %80-90'ını yönlendirir. Tarih boyunca insanlar ve mallar, kıtalar ve okyanuslar arasında deniz yoluyla hareket etmiştir. Deniz taşımacılığı hemen hemen tüm malları etkili ve verimli bir şekilde taşıyabilir, ancak hava taşımacılığının ortaya çıkması, bozulabilir ve yüksek değerli mallar için tercih edilebilir bir seçenek olmuştur. Sanayi devrimi, içten yanmalı motor gücünün yeteneklerinden yararlanarak, gemi taşımacılığını daha da geliştirmiş ve ardından konteyner taşımacılığının benimsenmesi, deniz taşımacılığını verimlilik adına bir kez daha ön plana çıkmasını sağlamıştır (Schnurr ve Walker, 2019).

Deniz taşımacılığında gemiler çok uzun yıllardır, dizel motorların silindirler içerisinde yaktıkları yakıtın kimyasal enerjisini hareket enerjisine dönüştürerek, sahip oldukları bu enerjiyi doğrudan ya da bir redüksiyon dişlisi vasıtasıyla pervaneye ilettiği, konvansiyonel sevk sistemini kullanmıştır. Çeşitli teknolojik aşamalardan geçerek, verimliliğini de oldukça arttıran bu sistem, hala gemilerde en sık kullanılan ve pek çok gemi türü için en ekonomik ve en verimli sevk sistemi olma özelliğini korumaktadır.

Yıllar içerisinde pek çok ekonomik ve çevresel iyileştirmeden geçen bu sistem, sera gazı emisyonları (GHG) ve diğer kirleticilerin çevresel etkilerinin artmasıyla birlikte, Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) ve bazı kıyı devletlerinin yürürlüğe girmesini sağladığı regülasyonlara uyumluluk için, ek sistemlere ihtiyaç duymaya başlamışlardır. Yasal kısıtlamaların her geçen yıl artarak devam edecek olması araştırmacıları alternatif çözümler üzerinde çalışmaya itmiştir.

Elektrikli sevk sistemleri, çevresel kaygıları karşılayabilecek umut vadeden alternatif çözümler oluşturabileceğini göstermiştir. Yapılan pek çok çalışma ile yakıt

tüketimlerinin ve buna bağlı emisyonların, elektrikli sevk sistemleri ile etkili oranlarda indirgenebildiği çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir. Diğer pek çok emisyon indirgeme yönteminin aksine, elektrikli sevk sistemleri yakıt tüketimini düşürerek, geminin yaşam döngüsü içerisindeki toplam maliyetlerini de aşağı çekebilme özelliğine sahiptir (Nguyen ve diğer., 2020).

Yapılan çalışmalar ile pek çok gemi türü için farklı elektrik sevk sistemi uygulamaları denenmiş ve gemi türlerine uygun sevk sistemi tasarımları yapılmıştır. Bu tez çalışmasında da literatürde örneklerine pek rastlanmamış, açık deniz konteyner gemisi üzerinde Dizel-Elektrik (DE) sevk sistemi simülasyonu yapılarak, üç ayrı senaryo üzerinden incelenmiştir. Yapılan simülasyonla Arkas Denizciliğe ait Gülbeniz A gemisi verileri alınarak, geminin belirli bir seyir süresi içerisindeki gerçek yakıt tüketimleri, simülasyon verileri ile kıyaslanarak yakıt tüketimi ve buna bağlı olan egzoz gazı emisyonlarının indirgenmesi gösterilmiştir.

Böyle bir çalışmanın yapılmasındaki temel motivasyon çevresel kaygılar olmuştur. Eşi görülmemiş iklim değişikliğinin hayati ama kırılgan ekosistemlerimizi tehdit ettiğini görüyoruz. Karbondioksit (CO₂) gibi sera gazı emisyonlarının neden olduğu yükselen sıcaklıklar, küresel tarım ve ticaret üzerinde feci etkiler yaratabilir. Bu yüzden gelecek nesiller için bu etkileri sınırlamak son derece önemlidir. Bu bilinçle denizcilik sektörü de üzerine düşeni yapabilmek adına çalışmalarını sürdürmektedir.

İlk olarak 1997'de kabul edilen MARPOL Ek VI, kükürt oksitler (SO_x) ve azot oksitler (NO_x) dahil olmak üzere gemi egzoz gazında bulunan ana hava kirleticilerini sınırlar ve ozon tüketen maddelerin (ODS) kasıtlı emisyonlarını yasaklar. MARPOL Ek VI ayrıca gemilerde atıkların yakılmasını ve tankerlerden gelen uçucu organik bileşiklerin (VOC) emisyonlarını düzenler (IMO, 2010a).

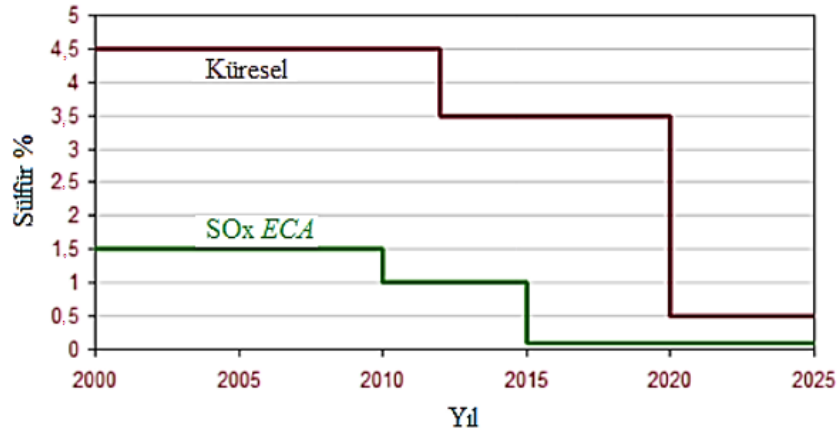
19 Mayıs 2005 tarihinde MARPOL Ek VI'nın yürürlüğe girmesini takiben, Deniz Çevresi Koruma Komitesi (MEPC) 53. oturumunda (Temmuz 2005), MARPOL Ek VI'yı teknolojik açıdan emisyon sınırlarını önemli ölçüde güçlendirmek amacıyla revize etmeyi kabul etti. Üç yıllık inceleme sonucunda MEPC 58 (Ekim 2008), 1

Temmuz 2010'da yürürlüğe giren revize MARPOL Ek VI ve ilgili NO_x Teknik Kodu 2008'i kabul etti (IMO, 2016).

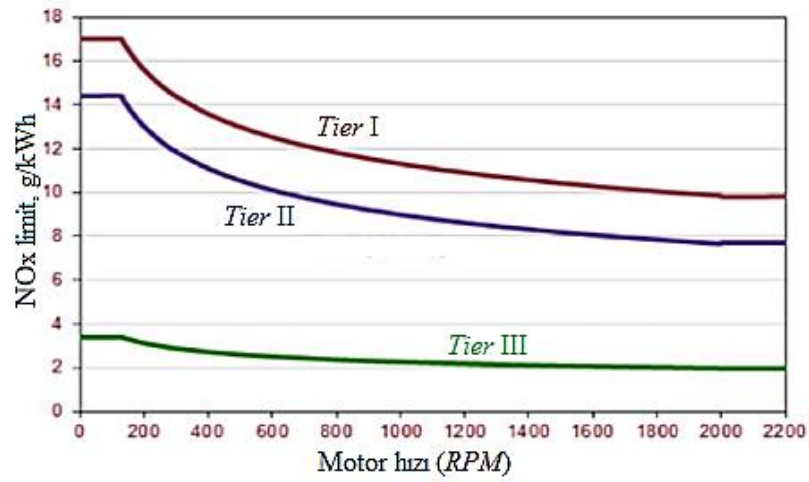
MARPOL Ek VI'daki ana değişiklikler, SO_x, NO_x ve partikül madde emisyonlarında küresel olarak giderek artan bir azalma sağlamak ve bu hava kirleticilerinin belirlenen deniz alanlarında emisyonlarını daha da azaltmak için emisyon kontrol alanlarının (ECA) oluşturulmasıdır. Bu faaliyetlerin sonucunda ortaya çıkan gerekliliklerin sağlanabilmesi için DE sevk sisteminin bir alternatif çözüm yöntemi olabileceğinin gösterilmesi çalışmanın ana hedeflerindendir.

SO_x emisyonlarını oluşturan temel sebep, kullanılan yakıtın içeriğindeki kükürttür. Yakıt içerisindeki kükürt oranı yükseldiğinde, üretilen SO_x emisyonları da artacaktır. MARPOL ek VI uyarınca Şekil 1.1 de görüldüğü gibi yakıt içeriğindeki kükürt miktarı limitleri %4,5 küresel ve %1,5 ECA olarak devam ederken 2010 yılı itibari ile ECA bölgesi kükürt oranı %1 olarak değiştirilmiştir. 2012 tarihinden itibaren küresel kükürt oranı %3,5 olmuş ve 2015 tarihinden itibaren ECA bölgesi için bu oran %0,1'e kadar düşürülmüştür (IMO, 2016). Nihayet 2020 yılında küresel kükürt oranlarının da %0,5 olması ile güncel kükürt koşulları oluşturulmuştur.

Denizcilik firmaları bu regülasyonlara uyum sağlayabilecek teknolojileri elde edebilmek için 2019 yılından itibaren taşımacılık ücretlerine %20-%30 zam yapılacağını duyurmuşlardır. Gemi işletmecilerinin 2020 yılı itibariyle önlerinde iki seçenekleri vardır. % 0,5 sülfür oranına sahip, çok düşük sülfürlü *fuel oil* (VLSFO) kullanmak ya da egzoz gazındaki sülfür içeriğinin yasal sınırlar altına indirgeyebilecek kapasiteye sahip *scrubber* sistemlerinin ile birlikte *heavy fuel oil* (HFO) kullanmak. İki seçenek de gemi işletmecileri üzerine oldukça yüksek maliyet getirmektedir (IMO, 2020). Şekil 1.1 de SO_x emisyon limitlerini gösterirken, Şekil 1.2 de NO_x emisyon limitlerini gösterir (IMO, 2016).



Şekil 1.1 Marpol Ek VI SOx limitleri (IMO, 2016)



Şekil 1.2 Marpol Ek VI NOx emisyon limitleri (IMO, 2016)

NOx emisyonlarını oluşturan temel sebep, yanma sırasında kullanılan hava içerisindeki azot ve oksijenin, yanma sıcaklığında (yüksek sıcaklıklarda) tepkimeye girerek azot oksit bileşiklerini oluşturmalarıdır. Marpol Ek VI da belirtilen NOx emisyonlarına ait zorunluluklar, bazı özel amaçlı gemiler dışında kalan ve 130kW ve üzerinde bir motora sahip bütün deniz taşıtlarını kapsar. Gemilerin inşa tarihleri dikkate alınarak üç aşamada oluşturulmuştur. Birinci aşama 2000 yılından itibaren başlayarak 2011 yılına kadar inşa edilen gemileri, ikinci aşama 2011 ile 2016 yılları arasında inşa edilen gemileri, üçüncü aşama ise 2016 yılı ve sonrasında inşa edilen gemilerin emisyon limitlerini belirtmektedir. NOx emisyonları yakıt temelli değil enerji temelli emisyonlar olduğu için, doğrudan bir emisyon faktör (EF_{eNOx}) değeri yoktur. Tablo 1.1 deki gibi hesaplanır (IMO, 2018).

Tablo 1.1 EFeNOx değerleri hesaplama yöntemleri (IMO, 2018)

Tier	Tarih	NOx limit g/kWh		
		n < 130	130 < n ≤ 2000	n ≥ 2000
Tier I	2000	17	45*n-0,2	9,8
Tier II	2011	14,4	44*n-0,23	7,7
Tier III	2016+	3,4	9*n-0,2	1,96

n: motor devir sayısı

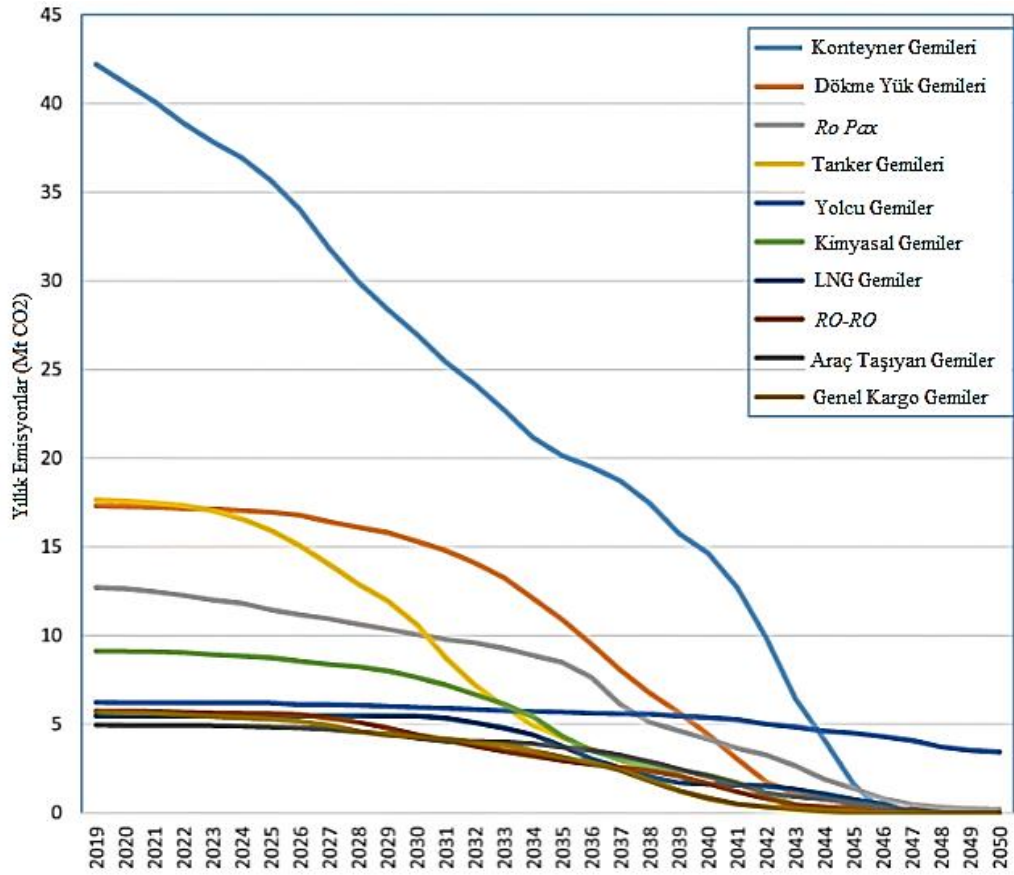
Deniz taşımacılığı, karayolu veya hava taşımacılığından çok daha verimli olan, üretilen karbon emisyonu oranı da, diğer taşımacılık türleri ile kıyaslandığında en düşük olan taşıma şeklidir. Bununla birlikte, denizcilik endüstrisi, gemilerinin yakıt verimliliğini ve karbon ayak izini daha da iyileştirmeyi amaçlamaktadır (IMO 2010a).

Günümüzün konteyner gemileri ve araç taşıyan gemileri dünya çapında muazzam miktarda malın hareket etmesini sağlıyor olmasına karşın uluslararası deniz taşımacılığı, 2012 yılında yıllık küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık yüzde 2,1'ini oluşturmuştur. Deniz taşımacılığının kabaca yüzde 52'sini oluşturan konteyner gemileri bu emisyon miktarın yaklaşık yüzde 25'ini oluşturmaktadır (Smith ve diğer., 2014).

şekil 1.3 deki grafik 2019 yılı gerçek verileri ile başlanarak 2050 yılına kadar olması taahhüt edilen yıllık emisyon değerlerinin, gemi türlerine göre dağılımını göstermektedir. Grafikte konteyner gemilerinin ürettiği CO₂ miktarının diğer gemilere göre çok daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumun ortaya çıkmasındaki en önemli sebep sayı olarak da konteyner gemilerinin fazla oluşudur. Yine de bu denli yüksek emisyon üreten bir gemi türü için, emisyon indirgeme yöntemleri üzerinde çalışılması gereklidir. Grafikte 2050 yılına kadar CO₂ emisyonları pek çok gemi türü için sıfırlanmış olacağı görülmektedir. Bu oldukça ciddi bir beklentidir ve henüz bunun nasıl olabileceği yönünde net bir yorum yapılamamaktadır (Bullock, 2020).

Elektrikli sevk sistemleri emisyonların bu denli indirgenebilmesi sürecinde bir ara basamak olabilir. Gelecekte bataryalar gibi enerji depolama cihazlarının, gerek verimlilik oranlarının yükseltilmesi, gerek enerji yoğunluğunun ve kullanım ömrünün

arttırılması, gerekse de maliyetlerinin düşürülmesi ile birlikte tamamen elektrikli, emisyon üretmeyen gemilerin dünya deniz ticaret filosunun büyük bir bölümünü kapsaması beklenebilir.



Şekil 1.3 Gemi tiplerine göre CO₂ emisyonları ve 2050 yılı beklentisi (Bullock, 2020)

Uluslararası denizcilikten kaynaklanan sera gazı emisyonlarının (GHG) azaltılması için zorunlu önlemler, 2011 yılında yapılan 62. oturumda IMO'nun MEPC'de temsil edilen taraflarınca Marpol ek VI ya dahil edilmesi kabul edilmiştir. Gemilerden kaynaklı hava kirliliğinin önlenmesi için var olan MARPOL Ek VI yönetmeliklerine, yeni bir bölüm 4 ile gemiler için enerji verimliliği ile ilgili düzenlemeler ilave edilmiştir. Bu kapsamda, yeni gemiler için Enerji Verimliliği Tasarım İndeksi (EEDI) ve tüm gemiler için Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı (SEEMP) zorunlu hale getirilmiş, Uluslararası Enerji Verimliliği Sertifikası formatı da dahil olmak üzere, yeni tanımlar ile tetkik ve sertifikasyon gereklilikleri belirtilmiştir (IMO, 2014).

SEEMP, gemilerin enerji verimliliğini artırmak adına geminin seyrini sağlayan personel için bir mekanizma oluşturur. EEDI, belirli bir gemi tasarımında kullanılacak teknolojilerin seçimini sektöre bırakan, kuralcı olmayan, performansa dayalı bir mekanizmadır. Gerekli enerji verimliliği seviyesine ulaşıldığı sürece, gemi tasarımcıları ve inşaatçıları, geminin düzenlemelere uyması için en uygun maliyetli çözümleri kullanmakta serbesttirler. Temel anlamıyla EEDI, Haziran 2013 tarihinden sonra kazığa alınan gemilerden kaynaklanan CO₂ gazı emisyonlarının kargo taşıma kapasitesine bölümüdür (IMO, 2014; IMO, 2010b).

$$EEDI = P_{ME} \times SYT \times C_f / DWT \times V \quad (1.1)$$

SYT - Spesifik yakıt tüketimi (g /kWh), bir saat boyunca bir kilovat enerji üretmek için kullanılan yakıt miktarını gram cinsinden temsil eder. Ölçülen değer NO_x Teknik Dosyasına kaydedilir, NO_x sertifikasının bir parçasıdır. P_{ME} ana makine gücünü (kW), V gemi hızını(*knot*)

Karbon faktörü (C_f), Yakılan yakıt kütlesi başına üretilen CO₂ miktarıdır. Kullanılan yakıt türü NO_x Sertifikasına (NO_x Teknik dosyası) karşılık gelir ve C_f dönüşüm faktörünün değerini belirler. Tablo 1.2, C_f (gCO₂ / gYakıt) farkına karşılık gelen yakıtların çeşitliliğini göstermektedir.

Tablo 1.2 Gemilerde kullanılan bazı yakıtların karbon içeriği ve C_f(IMO 2018)

Yakıt Türü	Karbon İçeriği	CF (CO ₂ /Yakıt)
HFO	0,8493	3,114
MDO	0,8744	3,206
LNG	0,7500	2,750
Metanol	0,3750	1,375
LSHFO %1,0	0,8493	3,114

DWT - Ölü Ağırlık Tonajı, Tam yük taşıyan geminin sabit ağırlıklar hariç ton cinsinden taşıma kapasitesidir, EEDI formülünde bütün gemiler için %100 konteyner için %70 alınır. Ayrıntılı EEDI formülü:

$$EEDI = \frac{\left(\prod_{j=1}^n f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}) + \left(\left(\prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{AE_{eff(i)}} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right) - \left(\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot f_c \cdot Kapasite \cdot f_w \cdot V_{ref}} \quad (1.2)$$

IMO' nun EEDI limitlerine göre 2025 yılına gelindiğinde, her yeni inşa edilecek geminin 2014 yılındakine göre %30 daha yüksek enerji verimliliğine sahip olması gerekmektedir. Mayıs 2019 daki Deniz Çevresini Koruma Komitesi'nin (MEPC) bir sonraki oturumda yürürlüğe sokma kararı aldığı EEDI faz III değişikliklerini güçlendirme kararlarını onaylayarak, bazı gemi türleri için 2022 yılından itibaren artarak devam edecek önlemler belirlendi.

Konteyner gemileri için 2022'den itibaren;

- 200000 DWT ve üzeri gemilerde EEDI azaltma oranı %50,
- 120000 DWT ve 200000 DWT arasındaki gemilerde EEDI azaltma oranı %45,
- 80000 DWT ve 120000 DWT arasındaki gemilerde EEDI azaltma oranı %40,
- 40000 DWT ve 80000 DWT arasındaki gemilerde EEDI azaltma oranı %35,
- 15000 DWT ve 40000 DWT arasındaki gemilerde EEDI azaltma oranı %30

olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada model alınan Gülbeniz A gemisin de 2022 yılındaki EEDI azaltma oranı %30 olacaktır.

2020 yılı Ocak ayından itibaren, hava kirliliğini ve kardiyovasküler ve solunum yolu hastalıkları gibi insan sağlığı üzerindeki etkileri azaltmak için gemilerde daha katı kükürt seviyeleri kuralları yürürlüğe girdi. Bu güçlü değişikliğin geleceği çok önceden bilinmesine rağmen gemi üreticileri, armatörler ya da deniz taşımacılığına teknolojik hizmet sağlayan taraflar bu kurala çok da hazırlıklı değillerdi.

2020 yılından itibaren deniz taşımacılığında sülfür emisyonlarını azaltabilmek, sülfür kurallarına uymak için kullanılan en hızlı ve pratik seçenek, yeni yakıt karışımları ile çok düşük sülfürlü akaryakıt kullanımı oldu. Sülfür emisyonlarının başlıca sebebi olan ağır akaryakıtın içerisindeki sülfür oranının düşürülmesi, son derece mantıklı bir seçenek olarak görülmüştür. Ancak yapılan bazı araştırmalar

sonucunda IMO ya sunulan raporda, gemiler tarafından kullanılan VLSFO içeriğinde, siyah karbon (karbon siyahı) emisyonlarında dalgalanmaya sebep olan aromatik bileşiklerin içeriğinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Siyah karbon, atmosferde en çok birkaç gün veya hafta kalabilen kısa ömrüne rağmen, karbondioksitten 3200 kat daha fazla ısı tutabilme kapasitesine sahiptir. Hâlihazırda deniz taşımacılığında kaynaklı küresel ısınmaya olan etkinin %21'ini oluşturduğu tahmin edilen siyah karbon, yeni çok düşük sülfürlü hibrit yakıtlarda, eski ağır akaryakıtlarla kıyaslandığında %10 ila %85 oranında bir artışa sebep olduğu sonucuna varılmıştır (Farand, 2020).

Tablo 1.3 de 2012-2018 yılları arasında, gemilerin sevk için kullandığı güç kaynağı çeşitlerini göstermektedir. Farklı devir sayılarında dizel makineler, 2012 yılında % 98,6 ve 2018 yılında % 98,3 gibi çok yüksek bir oranla gemiler tarafından tercih edilmektedir. Bu tabloda batarya kullanımının 2017 yılında bir önceki yıla göre yüzdesel oranını iki katından daha yüksek bir değere çıkarması, hemen sonraki yıl ise bu değer üç katından daha fazla olması dikkat çekicidir.

Tablo 1.3 Gemi güç sistemleri (IMO, 2020)

Makine Tipi	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Oran %							
Ağır Devirli Makineler	42,3	40,7	39,8	39,2	39,1	38,8	38,6
Orta Devirli Makineler	34,7	34,7	34,2	33,9	34,0	39,9	33,6
Hızlı Devirli Makineler	21,6	23,2	24,5	25,4	25,4	25,7	26,2
Oran (1*10 ⁻² %)							
LNG-Otto Ağır Devir Makineler	0,2	0,6	0,9	0,9	1,6	2,5	3,6
LNG-Otto Orta Devir Makineler	11,6	14,7	19,8	23,7	27,6	30,6	34,8
LNG-Dizel	0,2	0,2	0,2	0,6	2,4	4,6	7,6
Lean Burn Spark Ignition	3,8	4,2	5,1	6,0	5,7	6,0	5,7
Metanol	-	-	-	0,3	1,3	1,3	1,4
Gaz Türbin	11,3	11,0	11,0	10,6	11,2	10,3	9,8
Yelkenli	28,1	27,3	27,6	28,6	29,0	29,5	30,5
Buhar Türbin	54,9	50,3	48,9	46,3	42,5	41,7	42,0
Batarya	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,7	2,3
Sevk Sistemsiz	24,5	29,9	31,5	30,8	27,5	27,3	31,1

1.2 Literatür

Bu bölümde elektrikli sevk sistemlerinin son 20 yıldaki gelişim basamaklarını gösterebilmek adına, bu alanda yapılmış çalışmalardan yüksek atıf sayısına sahip olanları, kronolojik sıraya göre özetlenmiştir.

Adnanes (2003), bu konudaki en kapsamlı çalışmalardan birini yapmıştır. Dizel motorların yüke göre yakıt tüketimini gösteren grafiğe dayanarak, elektrik tahrik sistemlerinin geleneksel sistemlere göre yüksek güç aktarım kayıplarına rağmen daha verimli sistemler olarak kullanılabileceğini göstermeye çalışmıştır. Öncelikle elektrikli sevk sistemlerinin genel bir tanımını yapmış ve sahip olması gereken tüm bileşenleri ortaya çıkarmıştır. Farklı alternatifler arasında sistem bütünlüğüne katkı veren ya da dezavantaj oluşturan ekipmanlar ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Ardından güç ve tahrik kontrolü, elektrikli sevk sistemleri, sistem tasarımı, harmonik bozulmaya özgü yapısal ve matematiksel analizler sunulmuştur. Yaşam döngüsü analizi, arıza modu ve etki analizi, güvenilirlik analizi gibi yöntemlerle kullanılan tasarım kriterleri belirlenmiştir. Yapılan analiz ve değerlendirmeler son bölümde farklı gemi tipleri için örnek konfigürasyonlar oluşturmak amacıyla kullanılmıştır.

Soultatis (2004) tarafından hazırlanan doktora tezinde, DE ve Kombine Gaz ve Buhar Türbini Sevk Sistemleri (COGES) detaylı olarak incelenmiştir. Bu incelemelerde temsil olarak gaz türbini ve dizel motor üreticilerinin katalog verileri kullanılmıştır. Bu çalışmada öncelikle gaz türbinleri ve dizel motorlar ana makine olarak termodinamik ve akışkanlar dinamiği gibi farklı yaklaşımlarla karşılaştırılmıştır. Belirli bir gücü üretmek için gerekenler, iki ana makine türü için de ayrıntılı olarak incelenmiştir. Çalışmanın devamında her iki sistem için de elektrik motoruna verilen güç ile döndürülen pervaneye kadar olan kayıplar hesaplanmıştır. Her iki sistem için de Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi ve Güvenilirlik Analizi yapılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ticari gemiler için bir hız profili eğrisi oluşturulmuş ve buna göre bir verimlilik değerlendirmesi yapılmıştır. Her iki sistemin de askeri gemiler için kullanılabileceğini, ancak yüksek iletim kayıpları nedeniyle ticari gemilerde elektrikli tahrik sisteminin geleneksel sevk sistemlerin gerisinde

kalacağı belirtilmiştir. Bazı gemi türleri için, güç ve kontrol sistemleri üzerinde yapılacak optimizasyonlarla avantaj sağlanabileceğini ancak bu teknolojinin armatörler açısından henüz tam bir çözüm olmadığı öne sürülmüştür.

Guo ve diğer. (2005) çalışmalarında, bir römorkör için DE sevk sisteminin matematiksel modellemesini yapmışlardır. Enerji dönüşümleri üzerinden yapılan modellemede AC güç dağılımı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan ekipmanlar temel alınarak, hem çalışmanın yapıldığı tarih için hem de geleceğe yönelik tahminler ile pil gücü yoğunluğu, verimleri ve bunlara bağlı ekonomik değerlendirmeler yapılmıştır.

2006 ve 2010 yılları arasında, DE sevk sistemlerini içeren çalışmaların çoğunda, LNG, Çift Yakıt ve COGES ile birlikte incelendiği, ancak bu farklı sistemler ile birlikte etkili bir hale dönüşebileceği yorumları yapılmıştır. Bu çalışmalar, geleneksel dizel-mekanik sistemlerin daha verimli ve daha ekonomik olmasına rağmen, daha çevre dostu bir tahrik sisteminin tasarlanabileceğini göstermektedir (Benatmane ve Maltby, 2006; Hansen ve Lysebo, 2007; Chang ve diğer., 2008; Zuancang ve diğer., 2009).

Hansen ve diğer (2011), DE sevk sistemi için, bu tarihe kadar araştırmacılar tarafından öne sürülenin aksine ilk kez DC dolaşımın, AC dolaşıma göre avantajlı olabileceğini ortaya koymuştur. DC dolaşım ve AC dolaşım, sistem için gerekli donanımlar açısından karşılaştırılmış ve DC dolaşımın hem ağırlık, hem de hacim açısından daha avantajlı olduğu görülmüştür. Ayrıca toplam enerji iletim kayıplarının daha az olduğu gösterilmiştir. DC şebeke sisteminin değişken hızlı dizel motorlara ve batarya sistemlerine olan uyumluluğuyla, yakıt tüketimini yaklaşık % 20 azaltabileceği, ayrıca daha verimli operasyonlar sayesinde bakım maliyetlerinin de düşeceği belirtilmiştir. DP ihtiyaçlarını karşılamada son derece etkili olabileceği ve gelecekte farklı güç kaynaklarına kolayca adapte olabilme potansiyeline sahip olduğu vurgulanmıştır.

Dedes ve diğer. (2010) ve (2012) yıllarında iki çalışma yapmışlardır. 2010 yılında yaptıkları çalışma, DE sevk sisteminin matematiksel bir modellemesidir. Sistemi

iyileştirmeye açık bulmuşlar, ancak yüksek yatırım maliyeti, özellikle de batarya maliyeti nedeniyle yatırıma elverişli olmadığı sonucuna varmışlardır. 2012'de yaptıkları çalışma, farklı boyutlardaki kuru yük gemileri için hibrit sevk sistemi kurulum senaryolarından oluşmaktadır. Büyük kuru yük gemileri (*Capesize*) için, motorun çalışma yükü optimum seviyeye yakın olduğundan hibrit sistem gerektirmediğini, ancak daha küçük gemilerde (*Panamax* ve daha küçükler) elektrikli sevk sistemleri kullanılması ile, yakıt tüketiminin azaltılması sayesinde, 3 ila 25 yıl gibi süreler içinde yatırım maliyetlerini telafi edebileceğini hesaplamışlardır. Bu çalışmada, hibrit sevk sistemlerinin bataryalar ile birlikte kullanımı düşünülmüş ve çeşitli alternatifler arasından yapılan değerlendirmede, sodyum nikel-klorit piller, hibrit sistemler için en etkili seçenek olarak belirtilmiştir.

Kwasieckyj (2013) tarafından yılında yapılan çalışmada, dört farklı gemi türü üzerinde hibrit sistem optimizasyonu yapmıştır. Farklı gemi türleri ve bu gemilerin farklı güç gereksinimlerine göre, hibrit sistemler için kullanılan farklı durumları (bataryaları şarj etme, bataryalardan destek güç kullanımı ve sadece batarya kullanımı) simüle edilerek, bu gemi türleri için ne kadar verimlilik sağlayabildiklerini göstermiştir. Ayrıca sistem modellemesi için detaylı malzeme analizi de yapılmıştır.

Veksler ve diğer. (2013), DP operasyonları gerçekleştiren gemi tipleri için DE sevk sistemi kullanımının kaçınılmaz bir zorunluluk olduğunu belirtmişlerdir. DE sevk sistemine sahip bir enerji santrali için governor modellemesi incelenmiştir. Acil durum çalışma prensipleri ile normal zamanlarda çalışma prensibi ayrıştırılarak, normal durumlarda yakıt sarfiyatı ve emisyonların azaltılması ve acil durumlarda güvenli çalışmanın sağlanması hedeflenmiştir. Yeterli gerçek veri olmadığı için matematiksel modelleme ile yetinilmiş ve ileride yapılacak çalışmalarda gerçek verilere ulaşılarak bir simülasyon yapılabilmesi hedeflenmiştir.

Gåsemyr ve diğer. (2014), Hibrit deniz enerji santrali üzerinde, enerji depolama sistemlerinin detaylı incelemesi yapılmıştır. Farklı batarya tiplerinden, düşük fiyatı ve yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle lityum-iyon pillerin en umut verici tercih olduğu gösterilmiştir. Süper kapasitörlerle karşılaştırıldığında, tipik bir lityum-iyon pil, birim

ağırlık başına 20-40 kat daha fazla enerji depolayabilirken, süper kapasitörün 3-10 kat daha fazla güç sağlayabileceği ortaya konulmuş ve en yararlı çözüm olarak, bağlantı çizelgesi yönteminin, elektrik güç sistemlerindeki enerji akışını ve nedenselliğini gösterme yeteneği sayesinde bir arada inceleyebildiği, her iki enerji depolama yönteminin tek bir sisteme yerleştirilmiş simülasyonu ile etkileşimlerini farklı performans özelliklerine ve sınırlamalarına göre optimize ederek elde etmiştir.

Morales Vásquez (2014) doktora tezinde, petrol rezervlerinin bulunduğu Santos (Brezilya) Koyundaki petrol platformları için çalışan platform destek gemileri (PSV) için DE sevk sistemi tasarımı yaparak, bu gemilerin yapısına ve çalışma şartlarına göre optimizasyon yapmıştır. DE sevk sistemi için güç üretimi, güç dağıtımı, güç depolama ve itme elemanları verimlilik, maliyet ve sistem uyumluluğu açısından incelenmiş ve performans analizi yapılmıştır. DE sevk sistemi ile PSV için bir vaka çalışması uygulanmış, yakıt tüketim değerlerindeki değişim ve yakıt tüketimine dayalı emisyon değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra finansal parametreler çalışmaya dahil edilmiştir. Çalışmanın son bölümünde ağırlık, hacim, yakıt tüketimi, egzoz gazı emisyonları ve maliyetleri açısından farklı konfigürasyonlar karşılaştırılmış ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi kullanılmıştır. Biri ekonomik diğeri çevresel faktörler olan iki senaryo üzerinden yapılan değerlendirmede orta hızlı motorların ekonomik, yüksek hızlı motorların çevre açısından avantajlı olduğu görülmüştür. Sonuçta en uygun fiyatlı ve en verimli PSV sevk sistemini oluşturmaya çalışmıştır.

Sofras ve Prousalidis (2014), yaptıkları çalışmada yağ, yakıt, personel ve ekipmanlar, hem konvansiyonel sevk sistemi için hem de DE sevk sistemi için detaylı olarak fiyatlandırılmış ve bir kurvaziyer gemisi için vaka analizi yapılmıştır. Bu çalışmada, Tam Elektrikli Gemiler konseptine göre DE sevk sistemli gemilerin tasarımı için ayrıntılı bir metodoloji sunulmuştur. En uygun sevk sistemi seçimi için son derece önemli etkiye sahip teknik ve ekonomik parametrelerin dikkate alındığı, kapsamlı bir çalışmanın sonucu olması gerektiğini vurgulamışlardır. Çalışmanın sonuç bölümünde DE sevk sisteminin faydalı bir alternatif sevk sistemi olabileceğini açıklamışlardır.

Solem ve diğer. (2015) yük dağılımı ve yakıt tüketimini hesaplamak için bir yöntem belirlemek amacıyla, tümü Uluslararası Motor Hava Kirliliği Önleme Sertifikasına (EIAPP) sahip 400-11.600 (kW) güç aralığındaki birçok motoru incelemişlerdir. Maliyetleri en aza indirme hedefiyle, dört temel performans faktörünü ölçmek için matematiksel optimizasyon modeli oluşturmuşlardır. Bunlar yatırım maliyetleri, yakıt maliyetleri, NO_x emisyon vergileri ve makine dairesindeki alan kısıtlamalarıdır. Elde ettikleri çıktılar römorkör üzerinde uygulanarak vaka analizi yapılmıştır. Bu vaka çalışmasının sonuçları, gemi işletmecileri tarafından dikkate alınan maliyet hesaplamasıyla, 5 yılda yatırım maliyetini amorti edebilmekte yeterli görülmemiştir. Ancak ileriki yıllarda teknolojinin gelişerek ucuzlaması ile birlikte daha karlı olacağı vurgulanmıştır. Sonuç olarak, bir DE sevk sisteminde dizel motor konfigürasyonunun seçimine ilişkin karar desteği için gemi tasarımının yapılanma aşamasında kullanılacak bir optimizasyon modeli sunulmuştur.

Øverleir (2015) yaptığı çalışmada, hibrit sevk sistemleri ve kullanılan komponentler detaylı olarak incelenmiş, farklı hibrit sistemleri içerisinde, yapılan çalışmadaki gemi tipi olan, küçük kapasite ve yüksek hız gereksinimine sahip genel kargo gemilerine uygun hibrit sistem seçilmiştir. Bu sistem üzerinde uygun batarya seçimi yapılmıştır. Optimize edilen hibrit sistemin, belirlenen gemilerin EEDI değerlerini ne kadar aşağı çekebildikleri gösterilmiştir. Yapılan değişiklikler için artan maliyetlerin, yakıt tüketiminin düşürülmesi ile ne kadar zamanda amorti edilebileceği ölçülmüştür.

Mrzljak ve Mrakovčić (2016) çalışmalarında DE sevk sistemi ile sistemsel olarak birbirine çok benzer olan sadece ana güç üreticisi yönüyle birbirinden ayrılan, hem gaz hem buhar türbini ile güç üretebilen COGES sevk sistemini, ağırlık ve boyut, yatırım maliyetleri ve işletim maliyetleri, yakıt tüketimi, HFO yakıt kullanma imkânı, kısmi veya düşük yükte çalışma, çalışma modu değişim hızı, titreşim ve gürültü, hava kaynaklı gürültü, yağlama yağı tüketimi, NO_x emisyonu, SO_x emisyonu, CO₂ emisyonu ve diğer çevresel koşullar yönleriyle karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak ekonomik etkenler göze alındığında DE sevk sistemini avantajlı bulurken, çevresel faktörler göze alındığında COGES sisteminin daha avantajlı olduğunu savunmuşlardır.

Çalışmanın son bölümünde, bir kruvaziyer gemisinde her iki sistem için de yıllık maliyetlerin hesaplandığı bir vaka analizi yapılmış ve DE sevk sisteminin çok daha avantajlı olduğu gösterilmiştir.

Bø tarafından (2016) yılında yapılan çalışma, bir enerji platformuna destek sağlayan gemi için elektrikli sevk sistemi optimizasyonunu içermektedir. Yazar simülasyon için oluşturulan model üzerindeki tüm ekipmanları ve o ekipmanlara etki eden akışkanların ve yardımcı ekipmanların verimliliklerini detaylı olarak incelemiştir. Altı farklı vaka üzerinden oluşturulan model simülasyona sokulmuş ve belirtilen gemi için en uygun sevk sistemi oluşturulmaya çalışılmıştır.

Ameen (2017) yılında yaptığı çalışmada, gemilerin tekne formu üzerinden belirli bir rota ve hızda, farklı dirençler için Mat-lab Simulink programını kullanarak simülasyon yapmış ve yakıt pili teknolojisinin, bataryalarla entegre şekilde optimizasyonu üzerine çalışmıştır. Yapılan optimizasyonlar ile birlikte yakıt pillerinin kullanımının yakıt tüketimi ve emisyonlar açısından avantajları gösterilmiştir. Yakıt pillerinin yüksek yatırım ve işletim maliyetlerine rağmen, artan çevresel önlemler ile birlikte gemiler için daha fazla tercih edilebilir olacağı ifade edilmiştir.

Papalambrou ve diğer. (2017), son yıllarda güç sistemi dengeleme modellerinde ve güç elektroniğinde sıklıkla kullanılan bir yöntem olan 'Model Öngörülü Kontrol' kullanarak DE sevk sistemi kontrol modellemesi gerçekleştirmişlerdir. Oluşturdukları deneysel modeli, var olan konvansiyonel sistemle karşılaştırarak, gaz emisyonlarında ve yakıt tüketimindeki indirgemeyi göstermişlerdir.

Weintrit ve Neumann (2017) yaptıkları çalışma ile bir kruvaziyer gemisinin yük karakteristiği kaydedilmiştir. Geminin yük ihtiyacına uygun, en verimli bataryayı seçebilmek için Lityum-iyon, Kurşun-asit ve Nikel Metal Hidrit bataryalar, Simulink üzerinde optimize edilmiş ve Lityum-iyon bataryalar diğer alternatiflerine üstünlük sağlamıştır. Daha sonra dizel motorlar, kontrolör ve bataryalar ile daha önceden belirlenmiş yük karakteristiğine göre yakıt tüketimini minimuma düşürmek amacıyla bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Hibrit sevk sistemi teknolojisinin gemilerde

kullanımını olumsuz yönde etkileyen en önemli sebeplerden biri olarak, kara taşıtlarının aksine frenleme sisteminden tekrar enerji üretimi sağlanamaması olduğu belirtilmiş, gemi üzerinde buna alternatif oluşturabilecek bir sistem üzerinde çalışmanın önemi vurgulanmıştır.

Holt tarafından (2017) yılında yapılan araştırmada, Norveç'teki balık çiftliklerinde, balık besleme ünitesinin hibrit şekilde tasarlanmasını içermektedir. Araştırmada pek çok batarya incelenmiş özellikle lityum-iyon bataryalar kendi içinde detaylı araştırılmıştır. Dizel motor ile birlikte rüzgar enerjisinden faydalanılmış ve bataryalar da kullanılarak oluşturulan bu hibrit sistemde, rüzgar çeşitliliğine göre, dizel motorun çalışma yükü ve bataryaların doluluk oranları üzerinden bir optimizasyon yapılmıştır.

Geertsma ve diğer. (2017) literatürdeki farklı hibrit sistemlerini incelemişler ve bunlar arasından kontrol sistemlerine göre bir sınıflandırma yapmışlardır. Bir vaka analizi üzerinden hibrit sevk sistemi için kontrol sistemi optimizasyonu üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Wu (2017)'nin yaptığı çalışma, açık deniz inşaat gemisi üzerinde kullanılacak bir DE sevk sisteminin optimizasyonu ile ilgilidir. Araştırmacı aynı toplam gücü verecek farklı güç ve sayıdaki jeneratör gruplarından üç ayrı vaka kurgulamış ve bu üç vakayı aynı yük değerleri için yakıt tüketimlerinin değişkenliklerini gösterecek şekilde model oluşturmuştur. Daha sonra bu modellere hibrit enerji depolama sistemi de ilave edilerek optimum yakıt tüketimini hesaplamış ve kısıtlı bilgiye sahip olunan NOx emisyon haritalarından faydalanılarak, yakıt tüketimi ve emisyonlar açısından optimum değerleri hesaplayabilmek için genetik algoritma kullanmıştır.

Wang ve diğer. (2018) yaptıkları çalışmada, kısa mesafe yolcu taşımak için kullanılan bir feribotun verileri kullanılarak, farklı sevk sistemleri için yaşam döngüsü analizi ve yaşam döngüsü maliyet analizi yapmışlardır. Model alınan feribotun DM, DE ve hibrit sevk sistemine sahip olması durumları için karşılaştırmalı analiz yapılmıştır.

Satpati ve diğer. (2018) yaptıkları çalışmada, değişken hızlı jeneratörler ve DC gemi güç sistemi (SPS) kullanımının, gemi DE sevk sistemlerinde yakıt tüketimi ve egzoz gaz emisyonlarının azaltılması üzerindeki yüksek etkisine vurgu yapmışlardır. Önemli avantajlarına rağmen DE tahrik sistemlerinin ve bu sistemlerde DC SPS kullanımının yeterince yaygınlaşmadığı belirtilmiş ve bunun nedeni olarak gördükleri kısa devre arızaları için arıza yönetim sistemlerini incelemişlerdir. DC SPS kara tesislerindeki doğru akım sistemlerinden farklı olduğu için, koruma sistemi gereksinimleri, sistem konfigürasyonları, deniz görevleri ve yük koşulları gibi çeşitli gemi işletim faktörlerine bağlı olarak farklı arıza yönetim sistemleri önerilmiştir.

Sakalis ve diğer. (2018) yaptıkları çalışmada Sentez, Dizayn, Operasyon (SDO) yöntemini kullanmışlar ve çoklu hibrit sistemlerin optimizasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada model alınan geminin, doğrudan pervaneye bağlı ana makine olarak kullanılan iki dizel motoru, üç adet daha küçük dizel motorlardan elektrik üreten jeneratör grupları, bir yardımcı kazan, bir buhar türbini ve iki adet atık ısı geri kazanım buhar türbinine sahip olduğu varsayılmış ve buna göre modellenmiştir. Aynı yükler ve süreler için farklı kombinasyonlarda çalıştırılması üzerine yapılan simülasyonlardan, en uygun kombinasyonu bulmak için verimlilikler ile operasyon maliyetlerini tekrar değerlendirmişlerdir.

Jeong ve diğer. (2018) yılında yaptıkları çalışmada, kısa mesafe yolcu taşıyan hibrit sevk sistemine sahip bir feribot için risk değerlendirme yöntemi ile bir vaka analizi gerçekleştirmişlerdir. Hibrit sistemin yatırım maliyeti, bakım-tutum maliyeti, yakıt tüketimi maliyeti, güvenilirlik, güvenlik ve çevre kirliliğini indirmeye etkisi gibi temel kriterler üzerinden değerlendirilmiştir. Daha sonra bu değerlendirme, daha yaygın uygulanan çok kriterli karar analizine sokulmuş AHP yöntemi kullanılarak tekrarlanmıştır. Çalışma hibrit sistemin incelenen temel kriterlerdeki etkinliğini göstermesinin yanında, risk değerlendirmesi yönteminin, bu gibi problemlerde uygulanabilirliğini de test etmiş ve başarılı bir sonuç ortaya koymuştur.

Kumar ve diğer. (2019), Hindistan'da bir römorkör için tasarlanan modeller, sabit hızlı ve değişken hızlı dizel motorlarla aynı yük gereksinimlerini karşılamak ve bu

modellerin yakıt tüketimi ve emisyon açısından birbirlerine göre üstünlüklerini sağlamak ve geleneksel tahrik sistemi. Mat-Lab Simulink programı kullanılarak optimizasyon yöntemi ile gösterilmiştir. Değişken hızlı motor ile simülasyon en iyi sonuçları verirken, sabit hızlı DE tahrik sisteminin de geleneksel sisteme göre çok daha avantajlı olduğu gösterilmiştir.

Xiao ve Chen (2020) çalışmalarında, laboratuvar ortamında bir DE sevk sistemi modeli oluşturmuşlardır. Aynı modeli Mat-Lab Simulink programını kullanarak simülasyon üzerine aktarmışlar ve çalışma değerlerini kaydetmişlerdir. Deneysel sonuçlar ve simülasyon sonuçlarını karşılaştırarak, ikisi arasındaki marjları ve hatalı bölümleri tespit etmişlerdir.

Ammar ve Seddiek (2021) yaptıkları çalışmada, bir yolcu gemisi için iki farklı sevk sistemini modellemişlerdir. Modelini oluşturdukları, batarya kullanılmayan DE sevk sistemini ve COGES sevk sistemini çevresel ve ekonomik açıdan karşılaştırmışlardır. Ekonomik olarak yaklaşık % 20 daha yüksek maliyete sahip olsa da, COGES sisteminin çevresel açıdan daha iyi sonuçlar verebileceğini ortaya koymuşlardır.

BÖLÜM İKİ

GEMİ ELEKTRİKLİ SEVK SİSTEMLERİ

Yakıt tüketimini ve emisyonları azaltma baskısı artarken, gemilerin işletim profili giderek daha çeşitli hale geldi. Açık deniz gemileri, transit taşımacılık ve hassasiyet gerektiren Dinamik Konumlandırma (DP) operasyonları (MER, 2008) gibi çok sayıda görevi yerine getiriyor. Ağır vinç gemileri için çeşitli açık deniz operasyonlarında artan bir kapasite ve karmaşıklık, askeri gemiler ve onların hem açık denizlerde, hem de kıyı kesimlerinde geleneksel devriye operasyonlarını gerçekleştirebilme kabiliyetine sahip olma ihtiyacı, römorkörlerin taşıma ve bekleme sırasında sınırlı güç gereksinimlerine rağmen, çekme ve yedekleme operasyonları sırasında yüksek tam kapasiteye çıkabilmesi, konteynerler gemilerinin uzak mesafe seyirlerinde ve tasarım hızlarında optimum yük değerlerine ulaşırken, sık manevra yaptığı bölgelerde ve *slow streaming* seyir yapması gerektiğinde, dizel motor için verimsiz yük değerlerinde olması değişken işletim profillerinden bazılarını oluşturmaktadır (Volker, 2013). Bu çeşitli işletim profilleri nedeniyle, güç üretimi ve aktarımı aşağıdakiler gibi birçok performans kriterinde iyi sonuçlar göstermelidir:

- Yakıt tüketimi;
- Emisyonlar;
- Yayılan gürültü;
- Sevk sistemi kullanılabilirliği;
- Manevra kabiliyeti;
- Minimum gürültü, titreşim ve koku üretimi ile seyir konforu;
- Motorun ısı ve mekanik yüklenmesinden kaynaklanan bakım maliyeti;
- Satın alma maliyeti.
- İşletim maliyeti

Konvansiyonel sevk sistemlerinde, değişken işletim profillerine uyum sağlamakta yaşadığı zorluklar sebebiyle yukarıda belirtilen performans kriterlerine göre başarılı bir tasarım ortaya konulamamıştır. Elektrikli sevk sistemleri, giderek artan farklı gemi türlerindeki uygulamaları ile, değişken işletim profili ihtiyaçlarına başarılı bir çözüm

alternatifi oluşturabileceğini göstermişlerdir. Bununla birlikte, elektrikli sevk sistemleri, jeneratörler, güç dönüştürücüler, transformatörler ve elektrik motorları gibi elektrikli bileşenlerinde, üretilen gücün % 5-15'i kadar ek aktarma kayıplarına neden olur. Farklı gemi türleri ve onların farklı ihtiyaçlarına göre, bu kayıpların üstesinden gelebilecek farklı elektrikli sevk sistemi çeşitleri ortaya çıkmıştır. Bu sistemler temelde:

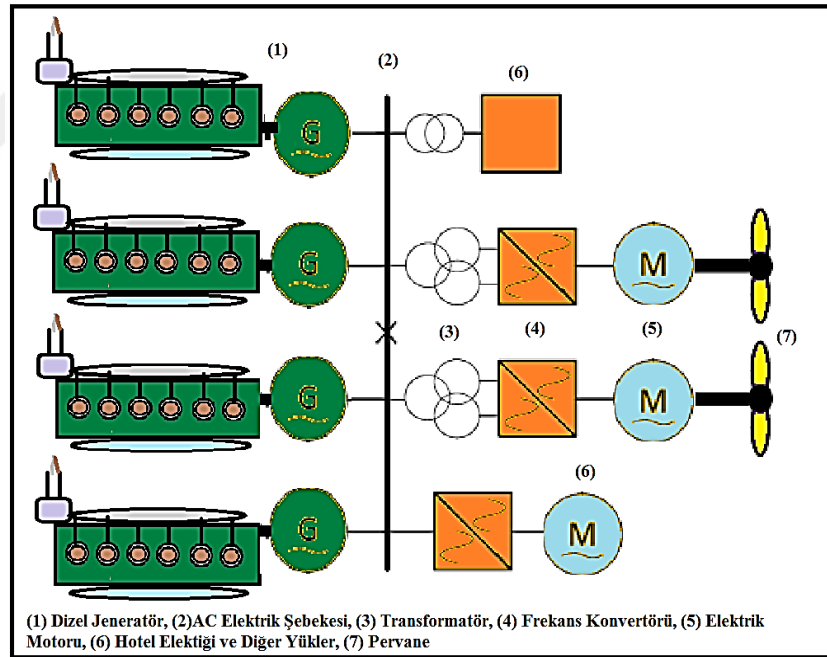
- Mekanik sevk sisteminin ve elektrikli sevk sisteminin hibrit kombinasyonu.
- Güç kaynağı olarak dizel motorlardan, buhar ya da gaz türbinlerinden, yakıt pillerinden ya da enerji depolama sistemlerinden veya bunların hibrit kombinasyonlarından faydalanılması
- Doğru Akım (DC) ya da Alternatif Akım (AC) elektrik dağılımı

Sistem yapısındaki karmaşıklık arttıkça, sistem kontrolü için farklı seçenekler de ortaya çıkar. Ancak pek çok alanda sevk sistemi kontrolünün hala geleneksel yöntemlere bağlı kaldığını görüyoruz. Otomotiv ve denizcilik alanında yapılan araştırmalarda ise, geleneksel kontrol yöntemlerine sahip gelişmiş sistemlerin, sistem maliyetini ve karmaşıklığını arttırmasına rağmen, yakıt tüketimi ve emisyonları indirgemedi yeterli olmadığını görebiliyoruz (Sciarretta, 2014). Denizcilik alanındaki gelişmiş kontrol sistemleri ile ilgili çalışmalar çok az olup var olan çalışmalar da, daha çok son yıllara aittir. Yine de sınırlı sayıdaki çalışmada, DC güç dağılımı ve batarya optimizasyonları ile akıllı kontrol stratejileri sayesinde yakıt tüketimi ve emisyonlarda %10 - %35 arasında indirgeme sağlanabildiğini biliyoruz (Zahedi ve Norum, 2012).

Otomotiv ve denizcilik alanındaki elektrikli sevk sistemleri, yakın gözükseler de, birbirlerinden oldukça farklıdır. Otomotivde paralel, seri, seri-paralel olarak yapılan sınıflandırma, denizcilik için oldukça yetersizdir. Gemilerde birden çok ana makine, elektrik motoru, jeneratör, yakıt pili ve farklı türde enerji depolama sistemlerine sahip olması sebebiyle, daha çeşitli sevk sistemi alternatifleri vardır (Silvas ve diğer., 2015). Literatürde genellikle hibrit ve DE sevk sistemi olarak ikiye ayrılmış olan elektrikli sevk sistemlerinin detayları ve denizcilik alanındaki örnekleri aşağıda açıklanmıştır.

2.1 Geleneksel DE Sevk Sistemi

Geleneksel DE sevk sistemi, deniz elektrikli sevk sistemlerinin en temel ve en eski halidir. Kullanılan ekipmanların teknolojik gelişimi ile halen aynı dizayn yapısına sahip sistemlerin varlığını korumasının yanı sıra, diğer elektrikli sevk sistemlerinin alt yapısını da geleneksel DE sevk sistemi oluşturur. Tipik bir DE sevk sistemi şeması Şekil 2.1 de gösterilmiştir. Konvansiyonel sevk sistemindeki tek ve büyük bir ana makine yerine, birden fazla daha küçük güç kapasitesine sahip dizel jeneratör setlerinden üretilen güç, sabit frekanslı, yüksek gerilimli bir elektrik şebekesini besler. Bu şebeke çoğu durumda bir transformatör vasıtasıyla elektrik motoru sürücüsünü ve sevk sistemi dışında kalan diğer elektrik yüklerini besler. Elektrik motoru sürücüsü shaftın hızını ve dolayısıyla sabit kanat açısı pervaneli sistemlerde, gemi hızını kontrol edebilmek için kullanılan elektronik güç dönüştürücülerinden oluşur.



Şekil 2.1 Geleneksel DE sevk sistemi şeması

DE sevk sistemini kullanan ilk gemi (Vandal) 1903 yılında denize indirildi (Adnanes, 2003). Bu tarihten itibaren DE sevk sistemi, çeşitli ihtiyaçlar ile farklı gemi türlerinde devamlı değişerek ve gelişerek günümüze kadar geldi.

2.1.1 Geleneksel Dizel Elektrik Sevk Sisteminin Faydaları ve Zorlukları

Bu sistem öncelikle sevk sistemi için değişken yük ihtiyacı olan ve sevk sistemine aktarılan gücün dışında da yüksek elektrik enerjisi ihtiyacı olan gemi türleri için oldukça uygundur. Jeneratörler tarafından üretilen güç, toplam ihtiyaç kadar üretilerek, ortak bir şebeke üzerinden dağıtılır ve böylece yakıt tüketimi azaltılabilir. Bunu başarabilmek için, toplam yük ihtiyacını belirleyerek, kaç jeneratör çalışması gerektiğine karar verecek bir "Güç Yönetim Sistemine" ihtiyaç vardır. Bu kontrol stratejisi, motorların kısmi yükte verimsiz çalışmamasını sağlar ve genellikle "Güç İstasyonu Konsepti" olarak adlandırılır (Sáiz ve López, 2007).

İkinci olarak egzoz gazı emisyonlarının birçoğu yakıt tüketimine bağlı olarak düşmesi beklenir. Özellikle SO_x gibi doğrudan yakıta bağlı emisyonların indirgenmesi kaçınılmazdır. Ayrıca NO_x gibi emisyonların da üretim aşamasında indirgenmesi beklenir. IMO tier III regülasyonuna göre, iki zamanlı büyük bir dizel ana makine için limit 3,4 g/kWs iken, orta hızlı bir jeneratör motoru için bu değer $9 \cdot n^{-0,2}$ olarak belirlenmiştir. 1000 devirli bir jeneratör için NO_x limit değeri 2,26 g/kWs hesaplanarak, emisyon indirgemesi net bir şekilde görülmektedir (IMO, 2008).

Geleneksel DE sevk sisteminin diğer bir avantajı olarak, sevk yükünü de diğer elektriksel yükleri de, jeneratörler üzerinde paylaştırabilme imkânıdır. Güç ihtiyacını karşılayacak kadar jeneratör çalıştırarak diğerlerinin kapatılması sağlanabilir ve bu makinelerin çalışma saatlerini düşürür. Böylece bakım süreleri arasındaki zaman artar. Daha az bakım maliyeti ortaya çıkar. Aynı zamanda bakım için sevk sistemini tamamen durdurmak zorunda kalmazsınız ve bakım için uygun bir yer aramanız gerekmez. Diğer jeneratörlerle normal seyir operasyonuna devam ederken, jeneratörlerden birinin bakımı yapılabilir. Bu, bakım kolaylığı ve maliyet için önemli olmasının yanında güvenilirliğe de ciddi bir katkı sunar. Jeneratörlerden birinde yaşanabilecek bir arıza, seyir güvenliğini tehdit etmez.

Son olarak, üretilen gücün motordan pervaneye mekanik bir aktarımı olmaması gürültü ve vibrasyonu azaltarak, daha konforlu bir seyir imkânı sağlar. Özellikle yolcu taşımacılığında önemli bir etken olarak, işletmeciler tarafından tercih edilir.

Bununla birlikte geleneksel DE sevk sisteminin zorlukları da vardır. Fazladan güç dönüşüm basamakları ve her basamakta kullanılan farklı elemanların iç dirençleri ile güç aktarımındaki kayıplar artar. Özellikle motorların optimum verimde çalışabilecekleri yük aralıklarında, bu kayıplar sayesinde hem yakıt tüketimi hem de emisyonlarda ciddi bir artış gözlemlenebilir.

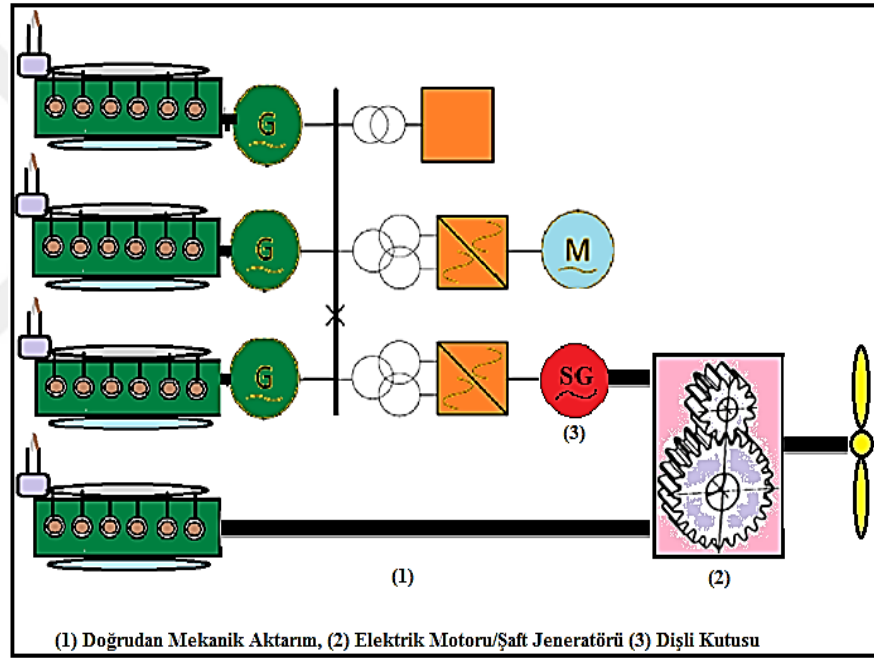
Elektrikli sevk sistemlerinin birçoğu ve dolayısıyla DE sevk sistemi, sabit kanat açılı pervane kullanır. Bunun sebebi elektrik motorları ile pervane şaftının hız değişimi ve terse döndürülmesinin kolay oluşudur. Ayrıca her hızda yüksek tork alınabilmesidir. Ancak yapılan çalışmalar, elektrik motoru ile birlikte kullanılan yüksek hızlı ve sabit kanat açılı pervanelerde, kavitasyon oranının daha fazla olduğunu ortaya koymuştur (Vrijdag ve diğer., 2009).

Bütün kontrol sisteminin tek bir şebekede toplanmış olması da, uygulama kolaylığı sağlamasına rağmen kontrol güvenilirliği açısından olumsuz bir durum oluşturur (Sulligoi ve diğer., 2016). Kontrol stratejisi bu zorlukları ele almayı hedeflemelidir. Alternatif olarak, kontrol stratejisi bu performans kriterlerinden herhangi birini yeterince iyileştiremediğinde, başka bir sistem mimarisi seçilebilir.

2.2 Hibrit Sevk Sistemi

Hibrit tahrik, geleneksel içten yanmalı motorlar ile batarya gücü ve güneş pilleri kullanan bir elektrik motorunun bir kombinasyonudur. Bu kombinasyonun en yaygın mekanizması, dizel motorlarla birleştirilmiş bir elektrik motorudur. Her çalışma modunda, elektronik kontrolörler, elektrik motorlarının veya içten yanmalı motorların ne zaman kullanılacağına, hangi motorun ne zaman senkron veya ayrı çalışacağına karar verir.

Hibrit bir sistemde geleneksel, doğrudan mekanik sevk sistemi, geminin yüksek hızlardaki seyri için en yüksek verimlilikte sevk sağlar. Bununla birlikte, bir dişli kutusu vasıtasıyla, pervaneye giden aynı şafta entegre edilmiş bir elektrik motoru vardır. Düşük hızlarda pervaneye iletilen hareketi bu elektrik motoru ile sağlayarak, doğrudan mekanik sevk sisteminin düşük hızlardaki verimsiz operasyonundan kurtulmuş olunur. Bu sistemde elektrik motoru, aynı zamanda bir şaft jeneratörü olarak da çalışarak, sisteme gerekli durumlarda elektrik enerjisi sağlayacak bir rol üstlenerek, dizel jeneratörlerin daha az çalışmasını sağlar. Ayrıca sevk motorunun daha verimli yük aralığında çalışabilmesine yardımcı olur (Barcellos, 2013). Böyle bir hibrit sevk sisteminin tipik yerleşim düzeni Şekil 2.4 ile gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Hibrit sevk sistemi şeması

2.2.1 Hibrit Sevk Sisteminin Faydaları ve Zorlukları

Hibrit sevk sistemi, konvansiyonel sevk sistemi ile elektrikli sevk sisteminin bir kombinasyonu olduğu için, her iki sistemin de avantajlarını içinde barındırır. Ancak bu sistem iki ayrı sistemin de benzer şekilde bazı avantajlarını engellemiş olur. Konvansiyonel sistemin sade ve ekonomik yapısı bozulup, elektrikli sevk sisteminin karmaşık ve maliyetli yapısına geçilmiş olunur. Aynı zamanda, elektrikli sevk

sisteminin esnek yapısından faydalanılamayarak, belirli yük durumlarındaki avantajını kullanabilmek üzerine bir sistem tasarımı yapılabilir (Wen ve diğer., 2016).

2.3 Hibrit Güç Kaynaklı DE Sevk Sistemi

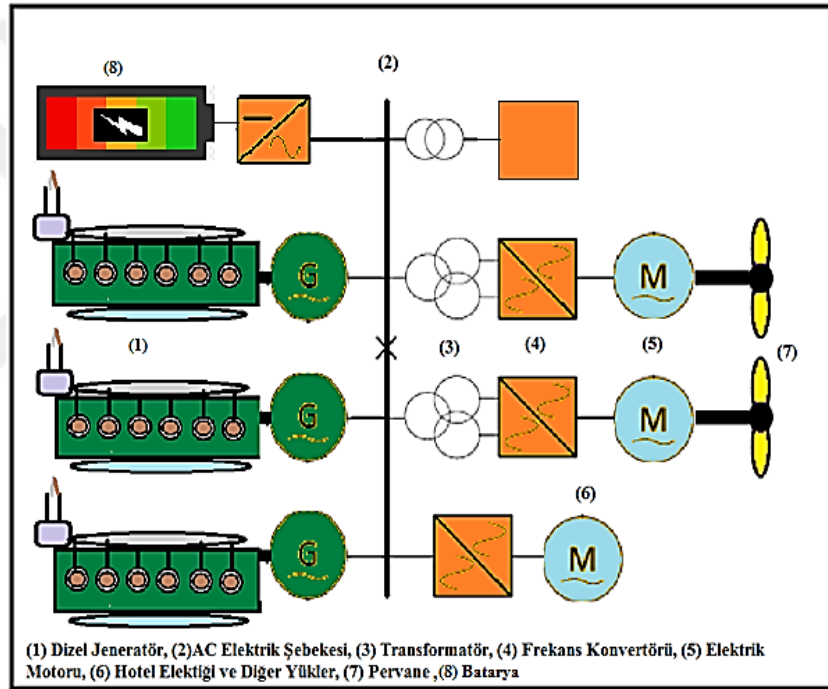
Hibrit güç kaynağı ile DE sevk sistemi, iki veya daha fazla güç kaynağının elektrik üretimi yapabildiği ve üretilen elektriğin elektrik motorları vasıtasıyla pervaneye hareket verdiği sistemdir. Bu sistemde kullanılabilen güç kaynakları:

- İçten yanmalı motorlar ya da dıştan yanmalı motorlar (dizel motorlar, gaz türbini, buhar türbini vb.),
- Elektrokimyasal güç üreticiler (Yakıt pilleri vb.),
- Enerji depolama sistemleri (Bataryalar ve süper kapasitörler vb.),
- Yenilenebilir güç kaynakları (güneş enerjisi panelleri, rüzgâr türbini vb.).

Hibrit güç kaynaklı DE sevk sistemi uygulamalarında en sık kullanılan kaynak dizel motorlar olmuştur. Genellikle dizel motorlar ile gaz veya buhar türbinleri, yakıt pilleri ya da batarya ve süper kapasitörler gibi enerji depolama sistemlerinin kombinasyonu ile hibrit güç kaynağı yapısı oluşturulmuştur. Ancak gaz ve buhar türbini aynı sistem içerisinde kullanılarak da (COGES) hibrit bir sistem oluşturduğu uygulamalar mevcuttur (Mrzljak ve Mrakovčić, 2016). Aynı şekilde sadece yakıt pili ve bataryalar kullanılarak da hibrit bir güç üretim sistemi oluşturulabilir (Wang ve diğer., 2018). Yenilenebilir güç kaynakları ise çoğu durumda yardımcı bir güç kaynağı rolü üstlenir ve etkisi diğer sistemlere göre daha azdır (Erginer, 2018).

Çalışmadaki literatür bölümünde detaylı olarak yer verilen, Soultatis (2004), Mrzljak ve Mrakovčić (2016), Ammar ve Seddiek (2021) yıllarındaki çalışmalarında, COGES ile DE sevk sistemi ya da diğer hibrit sistemler, farklı yönleriyle karşılaştırılmıştır. COGES çoğunlukla mali açıdan diğer sistemlerin gerisinde kalsa da çevresel faktörler dikkate alındığında önemli bir avantaj elde edebilmektedir.

Bir diğer önemli hibrit güç kaynaklı sevk sistemi elemanı da yakıt pilleridir. Metanol, sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG), *dizel oil* gibi farklı yakıtlardan üretilebilen yakıt hücrelerinin hibrit sevk sistemlerinde kullanımı, pek çok araştırmacı tarafından çalışılmıştır (Van Biert ve diğer., 2016). Yüksek maliyeti sebebiyle yaygınlaşmamış olan sistem, uygun gemi türü ve yapılan optimizasyon çalışmaları ile birlikte, emisyon indireme kapasitesinin yanı sıra, yakıt tüketimi ve bakım-onarım maliyetlerini de aşağı çekmesi ile ekonomik açıdan da faydalı olabileceği görülmüştür (Jeong ve diğer., 2018). Hibrit güç kaynaklı DE sevk sisteminin tipik yerleşim düzeni Şekil 2.5 ile gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Hibrit güç kaynaklı DE sevk sistemi şeması

Şekil 2.5 ile gösterilen Hibrit güç kaynaklı DE sevk sistemi şemasında, dizel motor yerine yakıt pili, gaz türbini ya da buhar türbini kullanılabilir. Batarya yerine de süper kapasitör kullanılabilir ve sistemdeki yeri, farklı ihtiyaç ve uygulamalara göre değişebilir.

2.3.1 Hibrit Güç Kaynaklı DE Sevk Sisteminin Faydaları ve Zorlukları

Hibrit güç kaynağı için kullanılan en yaygın ikili dizel motor ve bataryaların birlikte kullanılmasıdır. Geleneksel DE sevk sisteminin bütün avantajlarını kapsamakla birlikte, bataryaların varlığı bu sisteme yük geçişleri sırasında devreye alınan ve devreden çıkarılan jeneratörler açısından önemli bir esneklik sağlar. Dizel motorların en verimli çalıştığı yük aralığına yakın değerlerde değil tam da en verimli olduğu, yakıt tüketiminin en düşük olduğu değerlerde daha uzun süre çalışabilmesini sağlar. Bu sayede hem toplam yakıt tüketim değerlerinde, hem de yakıt tüketimine bağlı emisyonlarda önemli ölçüde indirgenme sağlanabilir (Zahedi ve diğer., 2014).

Bataryaların, çalışan jeneratörlerin üretebildikleri güç seviyesinin altında bir güç ihtiyacı olduğu zamanlarda şarj edilerek, jeneratörlerin toplam kapasitelerinin üzerindeki güç ihtiyaçları sırasında, güç takviyesi yapabilir olması ile de, gemideki fosil yakıt tüketerek güç üreten motorların toplam gücü azaltılabilir ve bu, EEDI gibi bazı regülasyonlara uyumluluk açısından avantaj sağlar (Dedes ve diğer., 2012). Bataryaların şarj edildiği güç yenilenebilir enerji kaynakları ile sağlanabildiğinde ise kazanç daha da yükselir.

Sevk sisteminde bataryaların kullanılması otomotiv sektöründe ortaya çıkmış bir uygulamadır. Kara taşıtlarında batarya kullanımındaki temel mantık, frenleme esnasında boşa giden enerjinin bataryalar tarafından depolanarak, ana tahrik motorunun desteklenmesi için kullanılmasıdır. Gemilerde ise frenleme ile enerji üretmek pek mümkün değildir. Çünkü gemilerin ani durma ihtiyacı dikkate alınamayacak kadar azdır. Ancak birden fazla motorun optimum yük değerlerinde çalışabilmesini desteklemesi açısından bataryalar, önemli bir rol üstlenmektedir (Volker, 2013). Ayrıca, ağır vinç tertibatlı gemilerde ve aşırı kompanzasyonlu açık deniz sondaj gemilerinde önemli miktarda enerji depolanabilir (Ovrum ve Bergh, 2015).

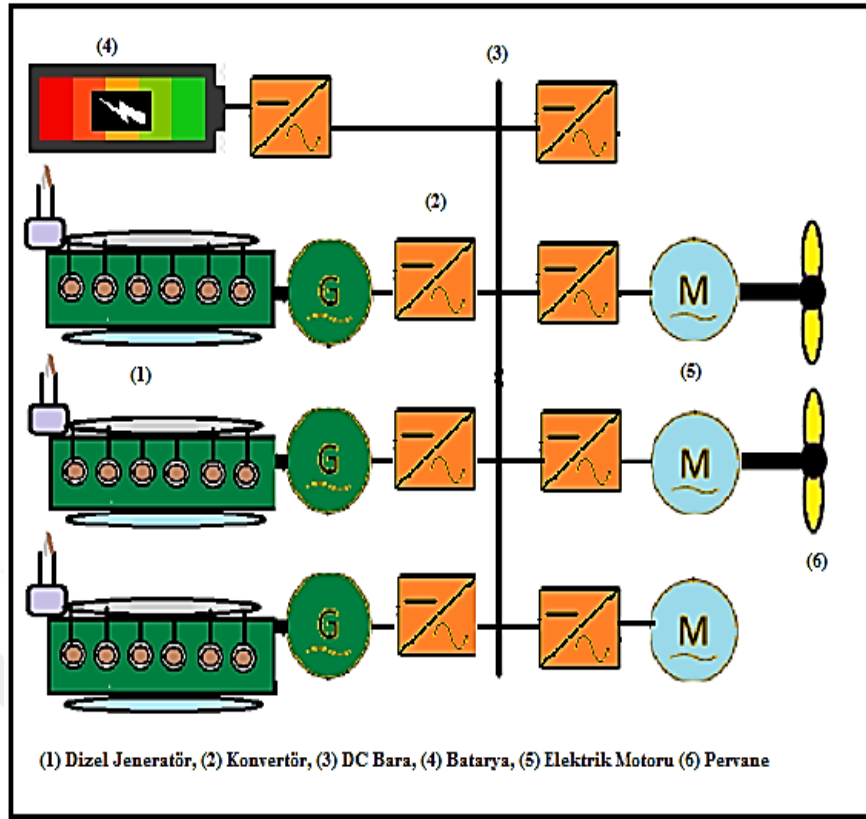
Jeneratörlerde oluşabilecek arızalar ya da planlı bakım-tutum zamanları, seyir güvenliğini tehlikeye atmadan, zamanında yapılabilir ve bu işlemler sırasında taşımacılık ya da destek işleri aksamadan devam edebilir. Bunu hem çalışan

jeneratörleri değiştirerek hem de jeneratör yerine bataryalardaki gücü kullanarak yapabilmek, operasyonel anlamda büyük bir avantaj sağlar (Zahedi ve diğer., 2014).

Bataryaların, jeneratörler ile paralel şekilde çalışmasını sağlamanın pek çok faydasının yanı sıra, bazı zorlukları da vardır. Güç dönüşümleri sırasında yaşanan kayıplar ve elektrikli sevk sistemlerinin ekstra maliyetleri dışında, batarya teknolojisinin yüksek fiyatlarının hesaba katılması ile bu maliyetleri karşılayabilmek adına çok daha verimli bir sistem oluşturabilmek gerekmektedir. Bunu yapabilmek için bataryaların doğru zamanda ve doğru miktarda şarj- deşarj edilebilmesinin kontrolü çok önemlidir. Ayrıca ihtiyaç duyulan gücün batarya ve jeneratörler arasında dağıtılması sırasında da uygulanan gemiye özgü bir optimizasyon yapılması gerekmektedir.

2.4 DC Dolaşım Hibrit Güç Kaynaklı DE Sevk Sistemi

Bu sistem temel işleyiş olarak AC dolaşım hibrit güç kaynaklı DE sevk sistemine çok benzemektedir. Tipik bir yerleşim düzeni Şekil 2.7 ile gösterilmektedir. DC dolaşım sayesinde, AC ana şalterler ve transformatörler kaldırılarak, jeneratörler tarafından üretilen AC güç, basit yapılı tek yönlü bir diyot dönüştürücü ile DC'ye dönüştürülerek, DC bataryaya bağlanır.



Şekil 2.4 DC dolaşım hibrit güç kaynaklı DE sevk sistemi

2.4.1 DC Dolaşım Hibrit Güç Kaynaklı DE Sevk Sistemi Faydaları ve Zorlukları

Elektrikli sevk sistemleri ilerlemesini uzunca bir süre AC dolaşım ile birlikte sürdürdü. DC dolaşımın tercih edilememesinin en önemli sebebi güvenlik kaygısıydı. Hata koruma sistemleri ve elektriksel yük dengesinin sağlanamaması, bu alandaki çalışmaları sınırlandırmıştır. Güç elektroniği teknolojileri ve akıllı devre şemaları ile bu sorunlar çözüme kavuşmuş ve DC dolaşımın elektrikli sevk sistemlerinde kullanımının önü açılmıştır (Butcher ve diğer., 2009).

AC dolaşım ile kurulan elektrikli sevk sisteminin en önemli ortak sorunu, sabit devirde çalışmak zorunda olan dizel motorlardır. DC dolaşım ile birlikte dizel motorlar değişken devirli olarak kullanılabilirler. Bu durum, optimum yük aralığını genişleterek, daha yüksek bir toplam verimlilik elde edilmesini sağlar. Yakıt tüketimlerinin ve pek çok egzoz emisyonunun indirgenmesine katkıda bulunur. Sadece NO_x emisyonları, motorun yanma sıcaklıklarındaki artıştan dolayı, diğer elektrikli

sevk sistemlerine oranla, bir miktar artış gösterir. Motorun üzerine binen mekanik ve termal yükler azalır. Gürültü seviyesi düşer (Zahedi ve diğer., 2014).

DC dolaşımın tek olumlu etkisi motor performansı ile ilgili değildir. Bir diğer önemli avantajı, bataryaların şarj-deşarj operasyonları için fazladan bir dönüşüme gerek kalmamasıdır. Böylelikle dönüşüm kayıpları da indirgenmiş olur (Mikheylov, 2012).

Güç elektroniği ile sağlanan hata korumaları ile yaşanabilecek hataların şalterin tümüne etki etmeden önüne geçilebilir ve AC sistem için gerekli olan hantal ve çok yer kaplayan şalterlerden kurtulmak, hem alandan kazanç sağlarken hem de bir elektriksel aktarma kaybının daha önüne geçilmiş olunur (Butcher ve diğer., 2009).

Eğer sistemde beslenmesi gereken AC güç miktarı yüksekse iki yönlü dönüştürücüler ve onlardan geçen güç miktarı da artar. Bu da dönüşüm kayıplarının artmasına, dolayısıyla maliyetlerin artmasına sebep olur (Parker ve diğer., 2009).

BÖLÜM ÜÇ

VERİLERİN ANALİZİ

Bir önceki bölümde elektrikli sevk sistemleri detaylı şekilde incelenmiş ve hepsinin faydaları, zorlukları, kontrol yöntemleri ve uygulama alanları açıklanmıştır. Bu bölümde de öncelikle Simüle edilecek geminin nasıl seçildiği açıklanacak, gemiden alınan ham verinin işleme süreçleri gösterilecektir. Gemiye uygun elektrikli sevk sistemini belirleyerek, sistem elemanları hakkında bilgi verilecek ve farklı alternatifler arasından seçim yapılacaktır. Son olarak simülasyonun nasıl yapıldığı bilgisi verilerek, kullanılan program açıklanacaktır.

3.1 Model Alınacak Gemiye Karar Verilmesi

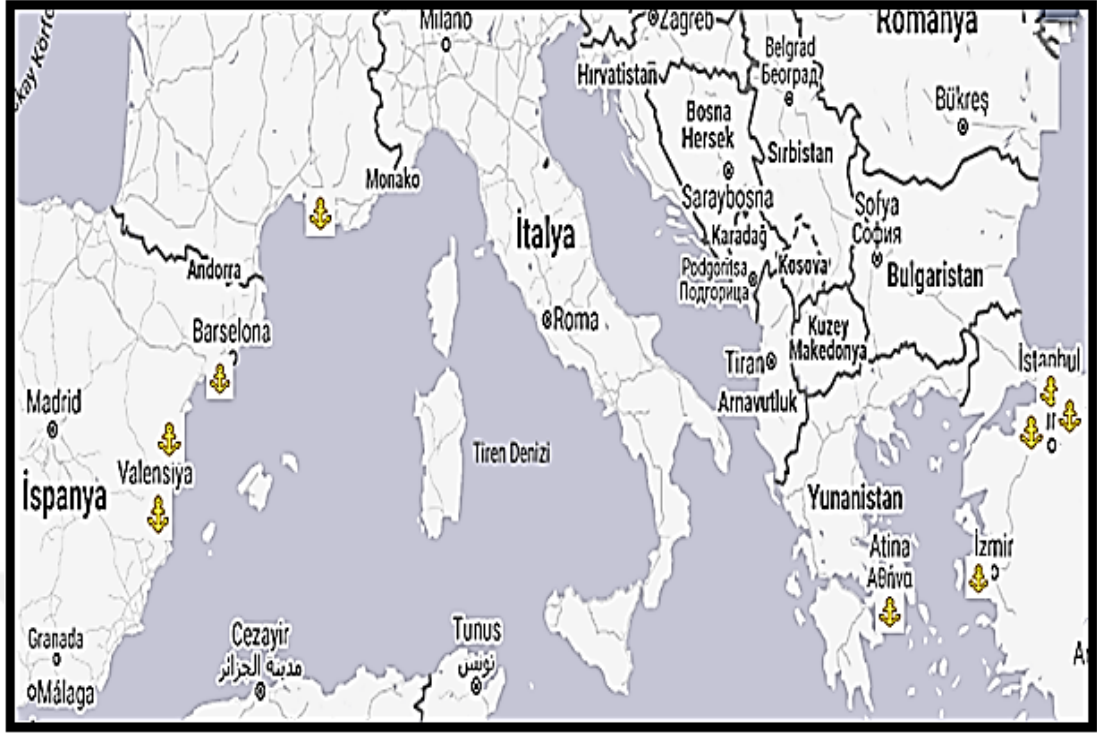
DE sevk sistemi pek çok yönden avantajları olan bir sevk sistemidir. Ancak bu avantajlarının yanında, başta ilk kurulum maliyeti olmak üzere, ekonomik yönden

değerlendirildiğinde, önemli dezavantajları da bulunmaktadır. Bu sebeple DE sevk sistemini uygulayabilmek için belli kriterleri göz önünde bulundurmak, doğru ekipman seçmek ve geminin yük profiline göre optimizasyon yapmak önemlidir.

DE sevk sistemi kullanacak gemiyi seçerken, ekonomik dezavantajı tolere edebilecek yada operasyonel verimliliği arttırarak, toplam maliyeti düşürebilecek yapıda bir gemi seçilmelidir. Bu konudaki en önemli kriter gemi ana makinesinin yük profilinin belirlenmesidir. Dizel motorların yakıt tüketiminin yüke göre değişimini göz önünde bulundurarak, düşük yüklerde çalışma süresi fazla olan makinelerin, yakıt tüketiminin yüksek olduğunu söyleyebiliriz. Bir geminin düşük yüklerde veya değişken yüklerde çalışmasını sağlayan en önemli etken sık manevra yapmasıdır. Manevra durumundaki bir gemi, daha kontrollü ve daha yavaş hareket etmek zorundadır. Bu da gemi ana makinesinin düşük yüklerde çalışması ihtiyacını doğurur.

Bir de gemilerin yakıt tasarrufu sağlayabilmek adına tercih ettikleri yavaş akış (*slow streaming*) seyri vardır. Gemi ana makinesinin verimsiz çalışmasına ve birim güce daha fazla yakıt tüketmesine rağmen, ihtiyaç olan gücün düşmesinden kaynaklanan, toplam yakıt tüketimindeki azalma, zaman sıkıntısı olmayan gemilerin bu yöntemi kullanmasına sebep olur. Bu gemilerde de yine DE sevk sistemi kullanılarak dizel motorların daha verimli çalışması sağlanıp, yakıt tüketimi daha düşük seviyelere çekilebilir (Halff, 2017).

Elektrikli sevk sistemlerinin avantajlarını kolayca ortaya çıkarabilen kıyı gemileri ve özel ihtiyaç gemileri için, DE veya hibrit sevk sistemi uygulamaları ve simülasyonları pek çok çalışmada yer almıştır. Ancak bu tez çalışmasında açık deniz yük taşımacılığı yapan bir gemi için, farklı senaryoların simülasyonu yapılması düşünülmüş ve yukarıda belirtilen özelliklere uygun bir konteyner gemisi olan Arkas Denizcilik'e ait Gülbeniz A konteyner gemisi seçilmiştir. Şekil 3.1 ile gösterilen haritada geminin uğradığı limanlar işaretlenmiştir.



Şekil 3.1 Gülbeniz A gemisinin uğradığı limanlar

Gemi, Yunanistan ve Türkiye’de birbirine oldukça yakın beş liman, İspanya ve Fransa’da da yine birbirine oldukça yakın dört limana yükleme ve tahliye yapmak üzere uğramaktadır. Bu limanların çevresinde gemi sıklıkla manevra modunda çalışmaktadır. İki liman arası mesafelerde de gemi sıklıkla, yavaş akış seyri ile yol almaktadır. Ana makinenin optimum yük aralığına yakın değerlerde çalışabildiği seyir sadece Aliğa-Valensiya limanları arası ve Fos-Pire limanları arasında kalan alanda sağlanabilmektedir. Messina ve Çanakkale boğazlarının geçişi sırasındaki bekleme ve yük düşümünü de hesaba katarsak, bu geminin DE sevk sistemine uygun olabileceği ve bu gemiden alınacak verilerin kullanıldığı bir simülasyonda uygulanacak olan bir optimizasyonun, yakıt tüketimini ve emisyonları düşürmede faydalı olabileceği sonucuna ulaşırız.

3.1.1 Gülbeniz A Gemisi Teknik Özellikleri

DE ve hibrit sevk sistemi optimizasyonu ile ilgili pek çok çalışma yapılmış ve bu çalışmalar yöntem ve içerik olarak 2. bölümde anlatılmıştır. Farklı gemi türleri üzerindeki çalışmalar görülmüş ancak açık deniz gemileri çok az tercih edilmiştir.

Açık deniz konteyner gemileri için ise yapılan herhangi bir elektrikli sevk sistemi örneğine rastlanmamıştır. Bu tez çalışmasında da, başlangıç aşamasında, araştırma gemisi ve feribot gibi farklı alternatifler de düşünülmüş ancak özgün değere katkı sağlamak adına daha zorlu olan açık deniz konteyner gemisi seçilmiştir.

Elektrikli sevk sistemlerinin avantajlarını ortaya çıkarabilecek olan düşük yüklerde seyir yapılması seçim için öncelikli bir kriter olurken, bu yüklerin anlık değerlerinin doğru şekilde tespit edilebilmesi de, önemli bir zorluk olmuştur. Geminin seyir yükü ile tasarımsal optimum yük arasındaki farkın en büyük olduğu gemiyi belirlemek için yapılacak ölçümlerin maliyeti oldukça yüksek çıkmış ve bunu karşılayacak bütçe temin edilememiştir. Bu sorunu aşabilmek için, bünyesinde makine yük değerlerini alıp kaydedebilen sistemlere sahip olan gemilere yönelinmiş ve bu konuda oldukça güvenilir bir sisteme sahip olan, Arkas Denizcilik'e ait Gülbeniz A gemisi seçilmiştir. Gülbeniz A gemisi Şekil 3.2 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Gülbeniz A (Maritime Telegraph, 2021)

Teknik özellikleri Tablo 3.1 ile gösterilen Gülbeniz A gemisi 21770 kW ana makine gücüyle ve acil durum jeneratörü dâhil 5960 kW servis gücü ile birlikte 27730 kW güç kapasitesine sahip bir gemidir. Avrupa limanları arasında çalışıyor olması, bu geminin

sürekli denetim altında olmasını ve bütün IMO regülasyonlarına tam uyum gerektirmesini zorunlu kılar. Gemi bugünün koşullarını sağlayabiliyor olsa da, geleceğe dönük olarak, böyle bir hatta çalışabilmek için, artacak çevresel önlemlere uyum sağlayabilecek farklı çözüm yolları düşünülmelidir. DE sevk sistemi bu konuda bir çözüm alternatifi olabilir.

Tablo 3.1 Gülbeniz A gemisi teknik özellikleri

Gemi Adı:	Gülbeniz A
İnşa Yılı ve Yeri:	04 / 2011 – Volkswerft Stralsund GmbH / Almanya
Bayrağı:	Türk
Grt / Nrt:	26195 / 12947
Deplasman:	45.569 T
Dwt:	34473
IMO No:	9491850
Sınıf:	+100 A5 EP IW NAV - OC BWM DG Konteyner Gemisi +MC AUT / GL
Tam boy:	210.54 m.
Genişlik:	29,80 m .
Yaz draftı:	11.4 0 mtrs.
Günlük Yakıt Tüketimi:	93,5 MT
Ana makine:	MAN-Diesel 7L 70 ME-C
Ana Makine maksimum gücü:	21770 kW
Jeneratör	3 Adet Hyundai Himsen 8H 25/33 H
Gemi Hızı:	21,7 knts.
Pervane:	MMG Naca Mod 5 bıçaklı, sabit kanatlı
İtici:	1 Adet Wartsila LT7000TTB 1100 kW Baş İtici
Ambar sayısı:	5
Kreyn:	3 x Liebherr SWL 45/40/36 tons x 23/26/29 mtrs
Soğutuculu konteyner kapasitesi:	306 (258 güverte-48 ambarda)
Konteyner boş kapasitesi:	2478

3.1.2 Gülbeniz A Gemisi Seyir Bilgileri

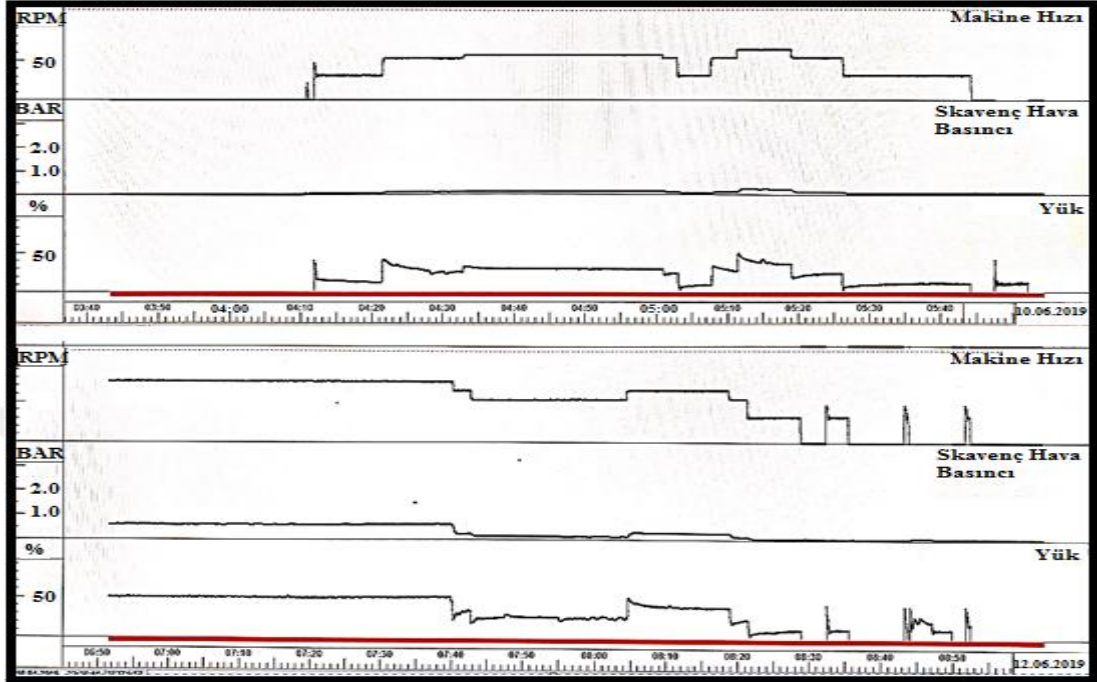
Gülbeniz A gemisine ait, gemi personeli tarafından düzenli bir şekilde kayıt altında tutulan ve geminin önemli seyir verilerini gösteren dokümana ait, simülasyon için verilerin kullanılacağı zaman aralığındaki örnek bir görsel Şekil 3.3 ile gösterilmektedir. Bu dokümanda; geminin yanaşma, kalkış, boğaz geçiş, demir atma ve demir alma, sürüklenme ve diğer manevra zamanları ile bu zamanlar arasındaki yağ, yakıt tüketimi ve türü, çalışan jeneratör sayısı, ana makine çalışma süresi ve ortalama kaç devirde çalıştığı, kazan çalışma süresi, gemide bulunan yağ ve yakıt miktarı gibi önemli bilgiler bulunmaktadır. Bu çizelgedeki pek çok veriden

[illegible]

Gülbeniz A gemisi 06 Haziran 2019 tarihinde, İzmir Aliğa limanından kalkıp, sırasıyla; Valencia-İspanya, Castellon-İspanya, Barcelona-İspanya, Fos-Fransa, Pire-Yunanistan, İstanbul-Türkiye, Gemlik-Türkiye ve Yarımcı-Türkiye limanlarına uğrayarak, 27 Haziran 2019 tarihinde tekrar Aliğa Limanına gelmiştir. Toplam 40 gün süren iki seyir için veriler toplanmıştır. Bu kayıtlar farklı gereklilikler ve farklı içeriklerle bütün ticari gemilerde bulunmakla birlikte, Gülbeniz A gemisinde diğer pek çok gemide bulunmayan ana makine yük profillerinin kayıt edildiği bir sistem vardır.

35

edilebilir küçük boşluklar ile yapılan iki seyirlik veriler kullanılmıştır. Sistemden alınan grafiklere ait, iki örnek aşağıdaki Şekil 3.4 de gösterilmektedir.



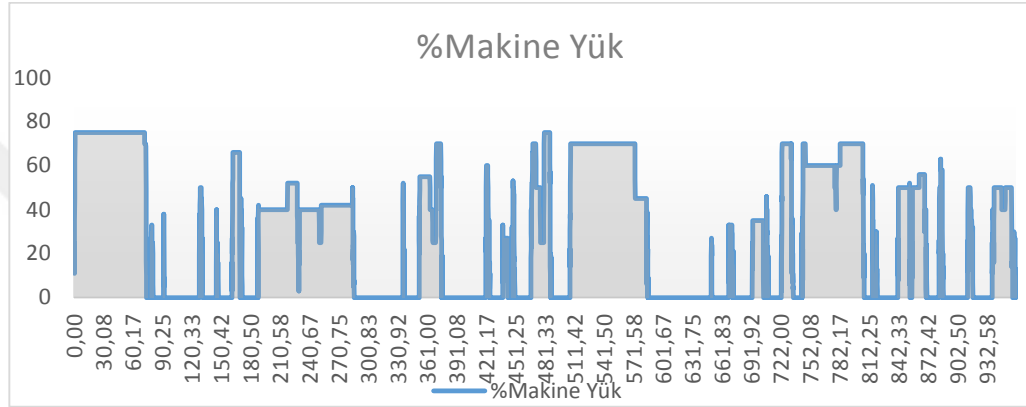
Şekil 3.4 Gülbeniz A gemisi makine hızı, skavenç basıncı ve makine yükü örnek grafikleri

Kırk günden oluşan iki tam seyir süresi boyunca tutulan bu kayıt bir *excell* tablosuna aktarılmıştır. Daha gerçekçi sonuçlara ulaşabilmek için aktarılan verilerin zaman aralıkları olabildiğince kısa tutulmuş, beşer dakika arayla veri girişi yapılmıştır. Oluşturulan *excell* tablosu örnek bir bölümünün gösterimi Şekil 3.5 ile aşağıda görülmektedir.

	14.06.2019	15.06.2019	16.06.2019	17.06.2019	18.06.2019	19.06.2019	20.06.2019	21.06.2019
18:00	0	0	40	42	42	0	0	55
18:05	20	0	40	42	42	0	0	55
18:10	37	0	40	42	42	0	0	55
18:15	42	0	40	42	42	0	0	55
18:20	52	0	40	42	50	0	0	55
18:25	52	0	40	42	45	0	0	55
18:30	52	0	40	42	50	0	0	55
18:35	52	0	40	42	45	0	0	55
18:40	52	0	40	42	45	0	0	55
18:45	52	0	40	42	45	0	0	55
18:50	52	0	40	42	27	0	0	55
18:55	52	0	40	42	17	0	0	55
19:00	52	0	40	42	22	0	0	55
19:05	52	0	40	42	15	0	0	55
19:10	52	0	40	42	24	0	0	55
19:15	52	0	40	42	23	0	0	55
19:20	52	0	40	42	22	0	0	55
19:25	52	0	40	42	5	0	0	55
19:30	52	0	40	42	12	0	0	55

Şekil 3.5 Ana makine yük değerleri *excell* tablosu

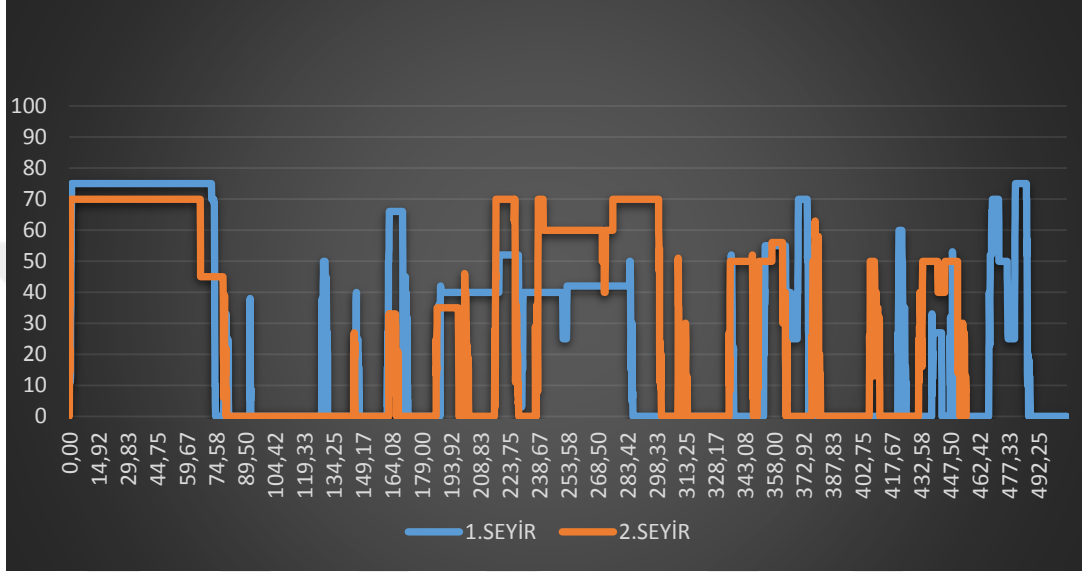
Simülasyonda kullanılmak üzere *excell* tablosuna aktarılan gemi ana makinesinin yük değerleri, toplu inceleme yapılabilmesi için, Şekil 3.6’da görüldüğü gibi tekrar grafiğe dökülmüştür. Bu grafikte toplam 960 saatlik veri olduğu görülmektedir. Grafikte görülen en önemli bulgu geminin ana makinesinin en verimli çalıştığı, yani kilovat saat başına en düşük yakıt tüketimi değerlerine ulaştığı aralık olan %70-%80 yük aralığındaki çalışma süresinin çok az oluşudur.



Şekil 3.6 Ana makine yük değerleri 40 günlük seyir grafiği

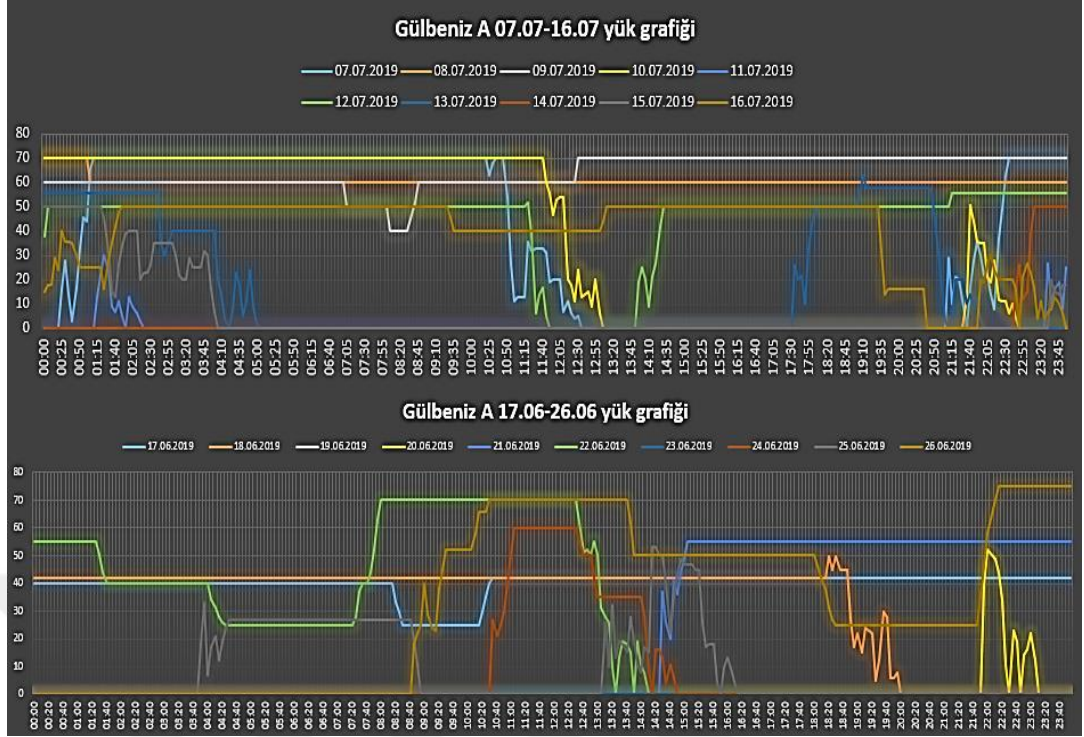
Ana makinenin en uygun yük değeri, dolayısıyla en az yakıt tükettiği yükteki seyir, geminin Aliğa limanından çıkıp, Valensiya ya vardığı bölümden oluşur. Bu bölüm, geminin hiç durmadan ve hiç hız kesmeden seyir yaptığı en uzun mesafedir. Bu mesafenin çok daha kısa olduğu gemiler için bu çalışmayı yapmak, DE sevk sisteminin ekonomik avantajlarını gösterebilmek adına daha faydalı olacaktır. Makine en çok %60-%40 yük aralığında çalışmış ve yakıt tüketimi bu bölümlerde yüksek olmuştur. Geminin manevraları esnasında ve boğaz geçişi yaptığı sırada ise çok değişken makine yük değerleri meydana gelmekte ve zaman zaman bu değer %25 seviyesinin bile altına düşmektedir. Ana makine yük değerinin bu kadar düşük olması yakıt tüketim değerlerinin maksimum noktaya yükselmesi anlamına gelmektedir. Verilerin kullanıldığı bu iki sefer süresince gemi hiç tam yükte çalışmamıştır. Tam yükte çalışan bir gemi ana makinesinin yakıt tüketimi, % 70-%80 aralığındaki optimum yük değerlerine göre daha yüksek olacaktır.

Şekil 3.7 de ise, iki tam seferdeki yük değerleri üst üste bindirilerek, iki sefer için de birbirine yakın yük değerleri olduğu görülmüştür. İki sefer arasında sadece liman süreleri ile demir ve sürüklenme sırasında bekleme süreleri farklılık göstermiştir. İlk sefer 488 saat 40 dakika sürerken, ikinci sefer 463 saat sürmüştür. Toplam süre arasındaki fark Aliğa limanındaki kalış süresidir.



Şekil 3.7 Ana makine yük değerleri iki farklı seyir karşılaştırılması

Kırk günlük süre çok uzun olduğu için, geminin yük karakteristiği toplu akan grafikte iyi anlaşılamamaktadır. Bu yüzden Şekil 3.8 de, onar günlük iki grafik yapılarak, her günün yük değerleri ayrı ayrı gösterilmiştir. Böylelikle geminin seyir ve manevra süreleri, yük değişkenliği net bir şekilde anlaşılabilir.



Şekil 3.8 Ana makine günlük yük değerleri

Yük karakteristiği çıkarılan geminin ana makine yakıt tüketim değerleri Şekil 3.3'de gösterildiği gibi gemiden alınmıştır. Bu yüzden yapılacak olan modellemede ana makine üreticisinin katalog değerleri üzerinden bir yakıt tüketimi hesaplaması yapılmasına gerek yoktur.

3.2 Simülasyonda Kullanılacak Sistem Elemanları

Yük karakteristiği belirlenen Gülbeniz A gemisi için, Matlab programı kullanılarak, DE sevk sistemi simülasyonu yapılmıştır. Simülasyonu oluşturabilmek için, DE sevk sisteminde kullanılacak ekipmanlar belirlenmelidir. DE sevk sistemi temel elemanları;

- AC/DC dolaşım
- Jeneratör
- Enerji Depolama Cihazı (EDC)
- Dönüştürücü, doğrultucu ve redresörler
- Elektrik motoru
- Pervane

3.2.1 AC/DC Dolaşım

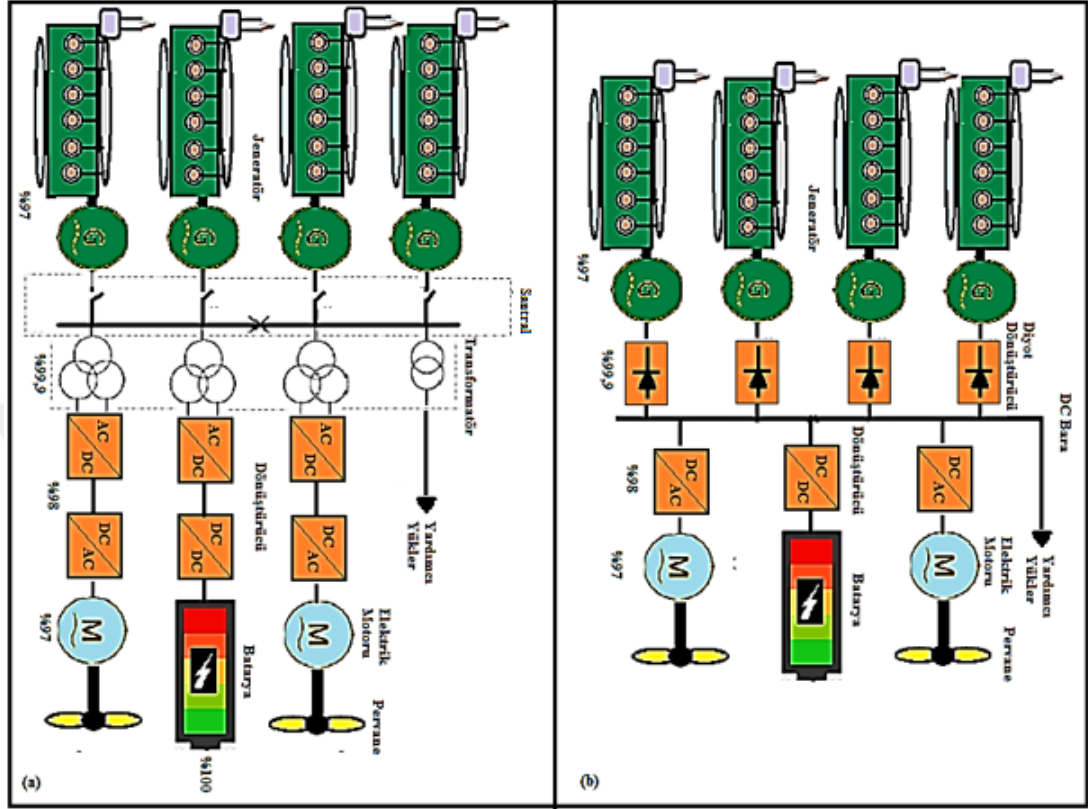
Konvansiyonel bir dizel-mekanik sevk sitemindeki dizel motordan çıkan g, Elektrikli sevk sistemlerine göre çok daha az kayıpla pervaneye iletilir. Dizel motordan çıkan gücün, redüksiyon dişlisi ve şaft boyunca toplam kaybının %3 civarında olduğu bilinmektedir (Oberhokamp, 2007). Elektrikli sevk sistemlerinde bu oran %10'a kadar yükselmektedir (Mrzljak ve Mrakovi, 2016). Aradaki bu farkı kapatarak, konvansiyonel sistem ile rekabet edebilmek için dizel motorların en verimli şekilde kullanılarak, minimum yakıt değerinde işletilebilmesi gereklidir.

Enerji kaynaklarının ve depolama cihazlarının DC ıkışları ile entegrasyonuna artan bir ilgi var. DC dağıtım sistemi, bu DC kaynaklarını ve cihazlarını birleştirirken dönüşüm aşamalarının sayısını azaltmaya yardımcı olur. Öte yandan, AC şebeke güç sistemlerinde, jeneratör setlerinin senkronizasyonu ihtiyaı, reaktif güç akışı, transformatörlerin ani akımları ve harmonik akımlar gibi zorluklar devam etmektedir (Wu, 2017).

İkinci bölümde elektrikli sevk sistemleri detaylı şekilde inceleniş ve mevcut gemilerin büyük bir çoğunluğunun AC dolaşım ağına sahip olduğu görülmüştür. Ancak bunun sebebi DC dolaşım ağının güvenlik konusunda daha tehlikeli ve daha ciddi tedbirler gerektiren bir yapıya sahip olması yatmaktadır. Güç elektroniği teknolojileri ve akıllı devre şemaları sayesinde güvenlik kaygılarının aşılması DC dolaşım ağının avantajları üzerine çalışmalar yapılabilmesine yol açmıştır (Butcher ve diğer., 2009).

DC dolaşım, alan ve ağırlık tasarrufu olarak avantajlar sağlar. AC dolaşım, çok sayıda anahtarlama ve dönüştürücü nedeniyle daha fazla alan kullanır. Buna ek olarak DC güç sistemi, DC jeneratör ünitelerinin senkronizasyonu gerektirmediğinden dizel motorların optimum hızlarında çalışmasına izin verebilir (Zahedi, 2014). Ayrıca DC sisteminin AC sistemde gerekli olan bazı dönüşüm aşamalarını ortadan kaldırdığını görebiliriz. şekil 3.9'da hem AC hem de DC dolaşım ağı için yan yana getirilen

ayrıntılı sistem elemanları şemasında, yapısal farklılıklar ve kullanılan sistem elemanlarının verimlilik (η) oranları gösterilmiştir.



Şekil 3.9 a) DE sevk sistemi AC dolaşım şeması, b) DE sevk sistemi DC dolaşım şeması (Zahedi ve diğer., 2014; Mikhaylov, 2012; Mrzljak ve Mrakovčić, 2016)

Santral (genellikle birden fazla), elektrik gücünü sevk sistemine ve gemiye dağıtacak olan, geminin elektrik sistemindeki bileşendir. Anahtarlar, devre kesiciler veya basit kontaktörlere sahip olabilirler (Kwasieckyj, 2013). Yedekleme gereksinimlerine uymak için normalde ikiye, üçe veya dörde bölünür (Ådnanes, 2003). Santral, geminin güç yönetim sistemi ile birlikte dağıtıcı olarak hibrit güç sisteminde önemli bir role sahiptir. DC dolaşım ağı sayesinde sistemden çıkarılan Santral ve transformatör grubu, sistem verimliliğinin artmasını sağlar. Jeneratörlerden sisteme aktarılan giriş gücü (P_g) ile pervaneye aktarılan çıkış gücü (P_φ) arasındaki fark, yani sistem elemanları üzerinde oluşan güç kayıpları (P_k) azalmış olur.

$$\eta = P_\varphi / P_g \quad (3.1)$$

P_g , aşağıdaki formüle göre P_ϕ ve P_k 'nin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir:

$$P_g = P_\phi + P_k \quad (3.2)$$

Bileşenlerin her biri için elektrik verimliliği hesaplanabilirken, nominal güçlerindeki tipik değerler Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Buna göre, dizel motor şaftından elektrikli tahrik motoru şaftına kadar bir dizel-elektrik sisteminin genel verimliliği tam yükte normalde 0,875 - 0,926'dır ve sistemin yüklenmesine bağlı olarak değişir.

Transformatörler, elektrik sistemini bölmek ve farklı voltajlar sağlamak için kullanılır. Faz kaydırmalı transformatörler, değişken hızlı tahrik için kullanılan frekans dönüştürücülerinden önce kullanılabilirler. Çok sayıda transformatör türü vardır; hava yalıtımlı, reçine yalıtımlı ve yağ / sıvı yalıtımlı (Ådnanes, 2003).

Güç sistemi, enerji depolama sisteminden, gemi sevk yüklerinden, gemi servis yüklerinden ve yardımcı yüklerden oluşan dört üniteden ibarettir. Her bir üretim ünitesinde, sisteme uygunluğu analiz edilmiş bir jeneratör, bir dizel motor ile bağlanır. Jeneratörün AC gücü, üç fazlı diyot doğrultucu (*rectifier*) ile DC güce dönüştürülür. Dizel motorun dönme hızı, yakıt tüketimini en aza indirmek için kontrol edilebilir olur. DC voltaj seviyesini düzenlerken jeneratörler arasındaki güç paylaşımını yönetmek için gerilim düşümü kontrolörleri ile koordine edilir. Enerji depolama sistemi, belirlenen sevk sistemine en uygun pilin kontrollü bir şekilde şarj edilmesini ve boşaltılmasını sağlayan çift yönlü bir DC-DC dönüştürücüyü (*bidirectional-converter*) içerir. Dizel motorların yakıt tüketimi ve jeneratör-redresör sistemlerinin verimliliği analiz edilerek modelleme yapılır. Aynı şekilde pil şarj ünitesi ve DC-DC dönüştürücünün (*converter*) verimliliği de analiz edilerek modellemeye dâhil edilir. Sistemdeki DC güç, hotel elektriği gibi AC güç ihtiyaçları için redresör (*inverter*) ile dönüştürülür.

Şekil 3.9'da gösterildiği gibi fazla yer kaplayan AC ana şalterleri ve transformatörler gemi makine dairesinden çıkarıldığından, DC sistemleri alan ve

ağırlık tasarrufu ve ekipmanın esnek şekilde konumlandırılması gibi avantajlar sağlar (Hansen, 2011). Elektrik üreten jeneratörlerin senkronizasyonu gerektirmeyen bir DC güç sistemi, dizel motorların optimum hızlarında çalışmasını ve önemli ölçüde yakıt tasarrufu yapılmasını sağlar.

Konteyner gemileri DC akım kullanabilen elektrikli sevk sistemleri için önemli bir ilgi alanı kategorisi oluşturabilir. DC elektrikli güç sistemleri, nominal yük koşulları altında sık yük değişimleri ve / veya uzun çalışma süresi yaşayan belirli gemi kategorileri için düşünülmektedir (Zahedi, 2014). Siemens tarafından sunulan “Edda Ferd”, değişken hızlı dizel motorlardan ve akülerden yararlanan ve geleneksel DE sevk sistemlerine kıyasla önemli bir yakıt tasarrufu sağlayan bir DC dolaşım DE sevk sistemine sahip ilk platform destek gemisi olmuştur (Ship Technology, 2013).

Bir içten yanmalı motorun yakıt tüketimi, motor devrini motor yüküne göre ayarlayarak geliştirilebilir. Bu, geleneksel AC güç sistemlerinin dezavantajına bir durumdur. AC sistemlerde jeneratör setleri, sabit hızda senkronize edilmelidir ve bu yüzden optimize edilmiş hız kontrolünden yapılamamaktadır. Bununla birlikte, bir DC güç sistemi, motorların bağımsız olarak dönmesini ve optimum hız ayarının yapılmasını sağlar. AC güç sistemlerinde, her jeneratör için arka arkaya dönüştürücüler kullanılarak motorların bağımsız dönüşü de sağlanabilir, fakat bu DC sistemle karşılaştırıldığında daha fazla maliyet ve karmaşıklık getirir. Ek olarak, önemli miktarda gemi elektrik gücü, birçok uygulamada ana yükler olan gemi sevk sistemi tarafından kullanılmak üzere DC' ye dönüştürülür. Arka arkaya dönüştürücülerin kullanımı, AC ve DC arasındaki dönüşüm aşamaları ile aktarma organları, sistem verimliliğinin azalmasına sebep olur. Bu nedenle DC sistemi, yakıt tasarrufu açısından gemi endüstrisi için daha cazip hale gelmiştir (Zahedi, 2014).

DC dolaşımın avantajları dizel motorların daha verimli çalıştırılması ve sistemden çıkarılabilen ekipmanların oluşturduğu kayıplardan kurtulmak değildir. Özellikle bataryalı sistemlerde, bataryaların şarj-deşarj için güç dönüşümüne ihtiyaç duymaması da, yine dönüşüm kayıplarını azaltarak, bataryaların çok daha etkili şekilde

kullanılmasının önünü açmıştır. Bu sayede toplam yakıt tüketimi ve emisyonların indirgenmesi artmıştır (Hansen, 2011).

3.2.2 Jeneratör

Jeneratörler hareket enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren makinelerdir. Jeneratörlere hareket enerjisini sağlayan çeşitli ana güç üreticileri vardır. Bunların gemide kullanılanları, buhar veya gaz tribünleri ve dizel motorlardır. Elektrikli sevk sistemlerinin en önemli ve en yaygın ana güç üreticisi ise dizel motorlardır. Dizel motorların kendi içlerinde pek çok sınıflandırması mevcuttur.

Dizel motorları temelde iki zamanlı ve dört zamanlı olarak ikiye ayırabiliriz. İki zamanlı motorlar, krank milinin bir devrinde yani 360 derecelik krank açısında, yanma için gerekli bütün evreleri tamamlarlar. Yüksek güç üretebilme kabiliyetine sahip olan iki zamanlı dizel motorlar gemilerde, konvansiyonel sistemlerde, doğrudan pervaneye bağlanarak ve ağır devirli olarak kullanılırlar. Elektrikli sevk sistemlerinde çok tercih edilmezler ama özellikle hibrit sevk sistemlerinin, mekanik tahrik motorları olarak kullanıldığı uygulamalar mevcuttur (Hunt ve diğer., 2002).

Dört zamanlı motorlar ise, yanma işleminin krank milinin iki devri sonunda yani 720 derecelik krank açısında tamamlanabildiği motorlardır. Gemilerde, hem pervaneye doğrudan bağlı, mekanik aktarımı sağlayan ana güç üreticisi olarak bulunur, hem de elektrik üretimi için jeneratör sistemlerinde kullanılır. Elektrikli sevk sistemlerinin hepsinde kullanılabilir ve hem elektrik üretimi hem de hibrit sistemler için doğrudan mekanik aktarım sağlamakta kullanılabilir (Hunt ve diğer., 2002).

Silindirlerin dizilişlerine göre "sıra motorlar", "V" ve "W" motorlar olarak adlandırılırlar. Güç etkisine göre, tek etkili, çift etkili ve karşıt pistonlu olarak sınıflandırılabilirler (Küçükşahin, 1999). Bunlar kapladıkları hacim ve performans kriterlerine göre tüketicinin tercihini etkileyen ancak sistemsel bir fark barındırmayan özelliklerdir ve her biri elektrikli sevk sistemlerinde kullanılabilir.

Piston yapısına göre de "trank pistonlu" ya da "kroshedli" olarak sınıflandırdığımız motorlarda, kroshedli motorun iki zamanlı motorlarda uygulanabilir oluşundan dolayı yukarıda bahsedilen sebeplerle, elektrikli sevk sistemleri için son derece sınırlı bir kullanım alanı vardır.

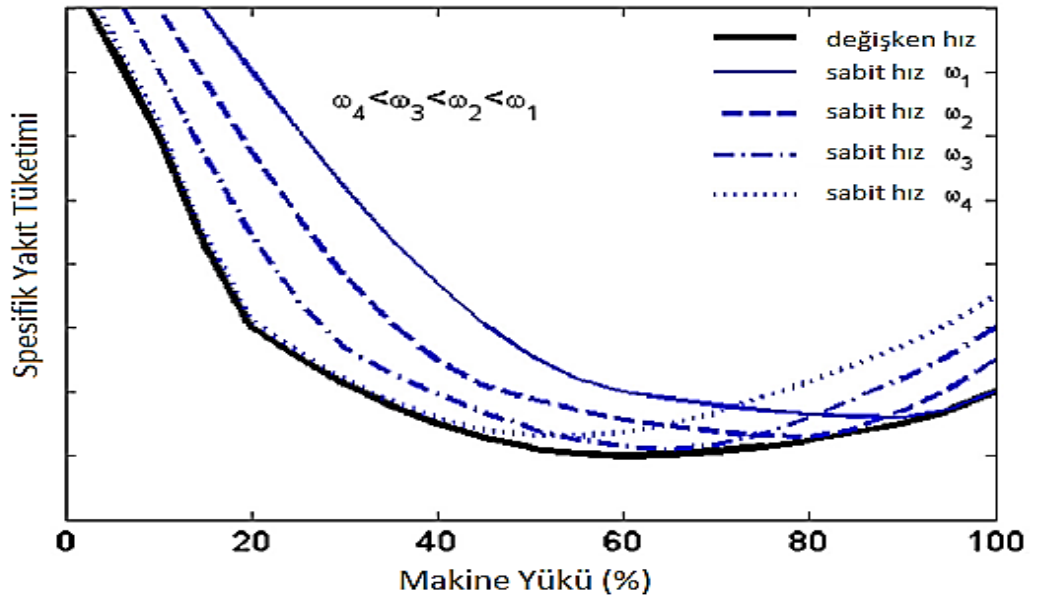
Bir diğer sınıflandırma motorun doğal emişli ya da turboşarjlı oluşudur. Çoğu modern dizel motor, daha fazla güç yoğunluğu sağlamak için turboşarjlıdır. Turboşarjlı bir dizel motorun sağlanan gücünü artırması gerektiğinde, eksik yanmayı ve egzozda görünür dumanı önlemek için silindirlere daha fazla hava girmesi gerekir. Bununla birlikte, turboşarjın dönen ataleti ve büyük hava ve egzoz alıcı hacimleri nedeniyle hava sisteminin tepkisi yavaştır. Bu turbo gecikmeye neden olur. Ek olarak, yakıt enjeksiyonunu arttırmak, silindir içindeki sıcaklığı yükseltir. Bu nedenle, yakıt enjeksiyonunun çok hızlı değiştirilmemesini sağlamak için motor üreticisi tarafından motor kontrol çıkışına kısıtlamalar eklenir. Bu, motorun hızlı bir sıcaklık değişiminden zarar görmesini ve giriş manifoldundaki hava basıncının tam yanmaya izin verecek kadar büyük olmasını önlemek için yapılır. Bu kısıtlamalar bazı durumlarda ihtiyatlıdır ve bu kısıtlamalar nedeniyle motor her zaman tam yanma ile çalışacağı için hava dinamikleri ihmal edilebilir (Bø, 2016).

Makine krankının devir sayısına göre de ağır devirli (300 dev/dk altında), orta devirli (300-1200 dev/dk) ve hızlı devirli (1200 dev/dk üzerinde) olarak sınıflandırılırlar. Ağır devirli motorların genellikle iki zamanlı olması bu motorların da elektrikli sevk sistemlerinde kullanımını sınırlandırmıştır. Orta ve hızlı devirli motorlar ise yakıt tüketimi ve emisyon değerlendirmelerinden geçirilerek, uygun görüldüğü şekilde elektrikli sevk sistemleri tarafından kullanılabilir. Dizel motorlar sabit devirli kullanılabildiği gibi değişken devirli olarak da kullanılabilir (Hunt ve diğer., 2002).

Bir içten yanmalı motor için saatlik yakıt tüketim eğrisi, denklem yükün ikinci dereceden fonksiyonu ile yaklaşık olarak tahmin edilebilir. Bu denklem, farklı polinom katsayıları seti kullanılarak değişken hızlı veya sabit hızlı çalışma için geçerlidir (Barsali, 2004).

Makine krankının devir sayısına göre de ağır devirli (300 dev/dk altında), orta devirli (300-1200 dev/dk) ve hızlı devirli (1200 dev/dk üzerinde) olarak sınıflandırılırlar. Ağır devirli motorların genellikle iki zamanlı olması bu motorların da elektrikli sevk sistemlerinde kullanımını sınırlandırmıştır. Orta ve hızlı devirli motorlar ise yakıt tüketimi ve emisyon değerlendirmelerinden geçirilerek, uygun görüldüğü şekilde elektrikli sevk sistemleri tarafından kullanılabilir.

Şekil 3.10'da görülen grafik aynı kapasitede bir dizel motorun farklı sabit devirler için ve değişken devirli olması durumundaki SYT eğrilerini göstermektedir. Bütün motorlarda, devir sayısına göre değişkenlik göstermekle birlikte, dizel motorlar için optimum yük, %70 - % 85 aralığındadır (Adnanes, 2003).



Şekil 3.10 Şaft hızlarına göre, dizel motor yükü-SYT grafiği (Barsali ve diğer., 2004)

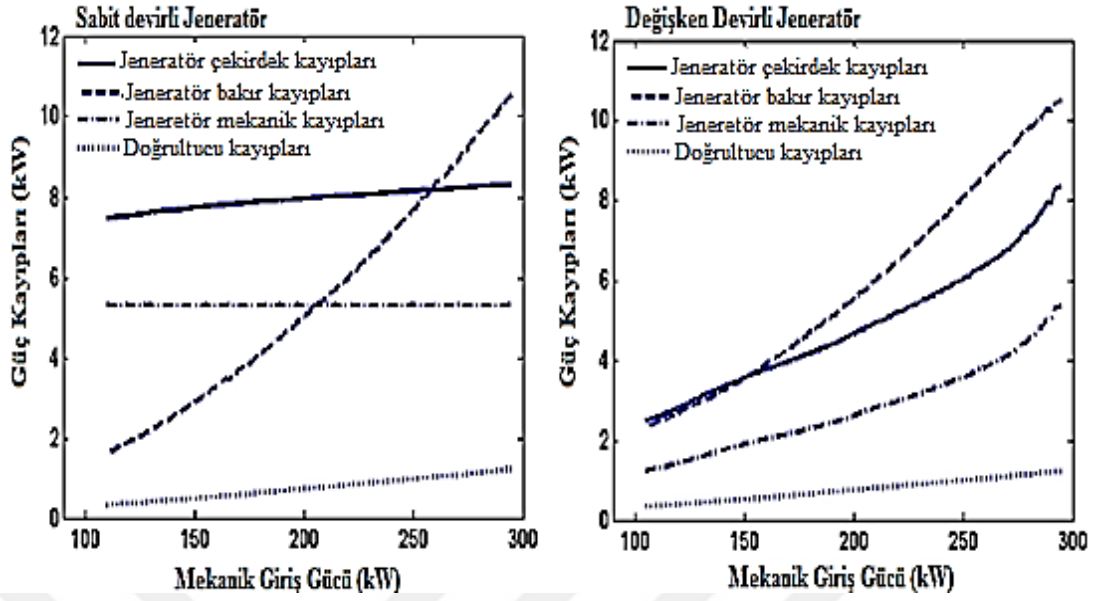
Grafikte gözüktüğü gibi motorun çalışma hızı değiştiğinde, optimum yakıt tüketimi değerinin olduğu yük aralığı da değişir. Motorun değişken devirli olması, yüke göre optimum yakıt tüketimini sağlamak konusunda daha geniş bir aralık sağlar yani her farklı sabit devir için var olan optimum yük değerine ulaşabilmeyi sağlar.

Elektrikli sevk sistemine sahip bir gemi enerji üretiminde, ana güç üreticisi ile mekanik enerjiyi elektriksel forma dönüştürmek için tipik bir senkron jeneratör bağlanır. DC dağılımı göz önüne alındığında, üç fazlı AC gücü, üç fazlı doğrultucular yoluyla DC gücüne dönüştürülür. Böyle bir uygulamada çift yönlü güç akışı gerekli olmadığından, üç fazlı diyot doğrultucular yapısal basitlikleri, yüksek enerji verimliliği ve düşük maliyetleri nedeniyle önemli seçeneklerdir. Bilezikli senkron jeneratörlerle kolayca kullanılabilirler (Bash, 2009).

Doğrultucu bir AC'yi DC'ye dönüştürür. Geleneksel bir elektrikli sevk sistemde, bataryalar gibi DC cihazlarla entegrasyonu nedeniyle çok sayıda dönüşüm aşaması olacaktır. Üç fazlı doğrultucular, elektrik enerjisinin dağıtımında bir kayıp ve bir maliyet gibi düşünülse de, geleneksel elektrikli sevk sistemlerinde, elektrik motoru sürücülerin DC bağlantılarını sağlamak için zaten kullanılmaktadır. Jeneratörlerden üretilen AC gücü, DC güce çevirerek yapılan dağıtımda, önemli bir yer kaplayabilen AC santrallerinin (*switchboard*), AC trafolarının (*transformers*) ve bunlara bağlı kayıpların önüne geçilmiş olur (Bash, 2009). Mekanik kayıplar P_{km} , dönme hızı karesiyle orantılı olan sürtünme ve hava sürüklenme kayıplarından kaynaklanmaktadır.

$$P_m = c_m \omega_m^2 \quad (3.3)$$

P_m motorun mekanik gücüdür. Diyot doğrultuculardaki güç kayıpları esas olarak iletim kayıplarından kaynaklanır ve ihmal edilebilir. Şekil 3.11, sabit devirde çalışan jeneratör-doğrultucu sisteminin güç kaybı bileşenlerini ve minimum SFC'ye ulaşmak için kontrol edilebilen değişken hızlı jeneratör-doğrultucu sisteminin güç kaybı bileşenlerini göstermektedir. İki grafik kıyaslandığında, değişken hızlı jeneratörde çekirdek ve mekanik kayıpların azaldığı, bakır kayıplarının ise biraz arttığı görülmektedir. Bununla birlikte, toplam kayıp azalması, bakır kayıplarındaki artıştan daha ağır basar ve bu da değişken hızlı jeneratörlerde daha yüksek verimlilik sağlar (Zahedi, 2014).



Şekil 3.11 Sabit ve değişken devirli jeneratör-doğrultucu sistemleri güç kayıpları (Zahedi, 2014)

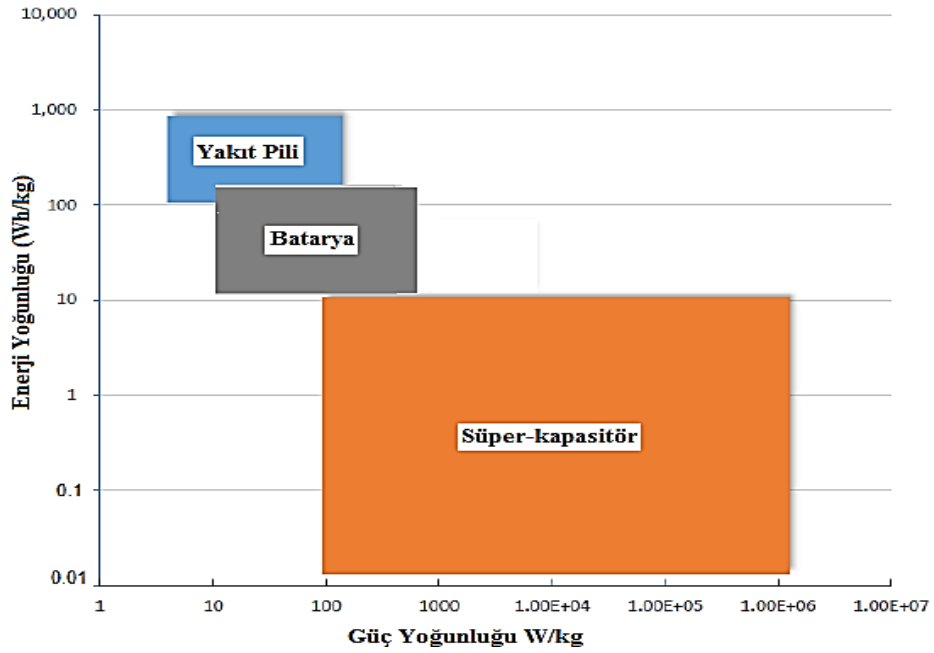
3.2.3 Enerji Depolama Cihazları (EDC)

Elektrikli sevk sistemlerinde, daha verimli şekilde güç üretimi sağlamak için bazı durumlarda ihtiyaç fazlası güç üretilir. Fazla güç genellikle elektrik enerjisi olarak depolanır. Elektrikli sevk sistemlerinde EDC olarak en çok bataryalar ve süper-kapasitörler kullanılır.

Bir süper-kapasitör, sıradan bir kapasitörden binlerce kat daha fazla enerji depolayabilen çift katmanlı bir elektrokimyasal kapasitördür. Hem bataryalarla hem de kapasitörlerle ortak karakteristik özellikleri vardır. Yüksek güç çıkışı sebebiyle tercih edilirler. Ancak, depolanan enerjinin kendi kendine deşarj olma hızı çok yüksektir. Yine de güç dalgalanmalarına karşı dayanıklı, güvenilir bir EDC olarak kullanılabilir (Wu, 2017). Şekil 3.12, EDC'lerin enerji ve güç yoğunluklarını göstermektedir.

Bataryaların kullanımı geleneksel DE sevk sistemlerinin enerji verimliliğini arttıran en önemli hususlardan biridir. Dizel motordaki düşük yük kayıplarını azaltan DE sevk sistemi, bataryalar sayesinde bunu daha ileri taşımaktadır. Ancak bataryalar için de bir kayıp vardır. Bataryalardan alınan enerji, bataryayı şarj etmek için kullanılan enerjiden

her zaman daha azdır. Hücrenin elektrokimyası içinde oluşan parazit reaksiyon, verimin yüzde 100'e ulaşmasını engeller. Ultra hızlı şarj ve fazla yükleme de enerji verimliliğini azaltır. Bu aynı zamanda bataryanın zorlanmasına ve döngü ömrünün azalmasına sebep olur. Dinamik bir simülasyon yaparken, batarya kayıplarını da göz önünde bulundurarak, sistemin ne zaman ve ne kadar şarj edileceğinin tespiti yapılmalıdır.



Şekil 3.12 EDC enerji ve güç yoğunlukları (Wu, 2017)

Batarya verimliliği akademik çalışmalarda çokça üzerinde durulan önemli konulardan biridir. Özellikle elektrikli araçlar, enerji depolama sistemleri ve uydulardaki büyük batarya sistemlerinde kritik öneme sahiptir. Verimlilik faktörü genellikle “kulomb verimliliği” ile ölçülür. Bir kulomb (C), bir elektrik yükü birimidir. Bir kulomb, bir amper-saniyeye (1Ah) eşittir. Faradaik verimlilik veya akım verimliliği olarak da adlandırılan kulomb verimliliği (CV), bataryalarda elektronların transfer edildiği şarj verimliliğini tanımlar. CV, bataryadan çekilen toplam deşarj enerjisinin, tam bir döngü boyunca bataryaya verilen toplam şarj enerjisine oranıdır (Liu, 2010).

Voltaik verimlilik, ortalama deşarj voltajının ortalama şarj voltajına oranını temsil eden batarya verimliliğini ölçmenin başka bir yoludur. Batarya içindeki kimyasal reaksiyonu etkinleştirmek için şarj voltajının her zaman nominal voltajdan yüksek olması nedeniyle kayıplar meydana gelir (Hawthorne, 2014).

Bir bataryanın şarj ve deşarj hızları, “C” oranına göre belirlenir. Bir bataryanın kapasitesi genellikle 1C olarak derecelendirilir, yani bir amper-saat (A_s) değerinde tam olarak şarj edilmiş bir batarya bir saat boyunca 1A sağlamalıdır. 0.5C'de deşarj olan aynı batarya iki saat için 500 mili-amper (mA) sağlamalıdır. 2C'de 30 dakika için 2A verir. Aynı miktarda enerji daha kısa sürede dağıtıldığı için toplam aynı olması beklenir. Gerçekte ise, dâhili kayıplar enerjinin bir kısmını ısıya dönüştürür ve sonuçta ortaya çıkan kapasiteyi yaklaşık yüzde 95'e veya daha aza indirir. Hızlı deşarjlardaki kayıplar deşarj süresini azaltır ve bu kayıplar şarj sürelerini de etkiler. 0,2C veya C/5, 5 saatlik bir deşarjdır. Bazı yüksek performanslı bataryalar, orta derecede stresle 1C'nin üzerinde şarj edilebilir ve boşaltılabilir (Sangwan ve diğer., 2016).

Batarya kapasitesi veya bir bataryanın tutabileceği enerji miktarı bir batarya analizörü ile ölçülebilir. Analizör, kalibre edilmiş bir akımda pili deşarj ederken, deşarj sonu voltajına ulaşılan kadar geçen süreyi ölçer. Kurşun asit için, tipik deşarj sonu voltajı 1,75V / hücre, nikel-kadmiyum ile nikel metal hidrit 1,0V / hücre ve lityum-iyon 3,0V / hücredir. 1 A_s batarya bir saat için 1A sağlarsa, sonuçları nominal derecelendirmenin yüzdesi olarak görüntüleyen bir analizör % 100 gösterecektir. Deşarj, deşarj sonu kesme gerilimine ulaşmadan önce 30 dakika sürerse, bataryanın kapasitesi yüzde 50'dir. Yeni bir batarya bazen % 100'den fazla kapasite üretebilir; bazıları ise kullanıma hazırlandıktan sonra bile asla % 100'e ulaşmaz . (Lam ve Bauer, 2012).

Oldukça iyi bir kapasite okuması elde etmek için, üreticiler genellikle alkalin ve kurşun asit bataryalarda 0,05 C (20 saatlik) gibi çok düşük bir deşarj oranı belirler. Bu yavaş deşarj oranında bile, kurşun asit bataryalar nadiren % 100 kapasiteye ulaşır (Sangwan ve diğer., 2016).

Literatürde, özellikle deneysel, elektrokimyasal ve elektrik devresi tabanlı olmak üzere bildirilen üç tür batarya modeli vardır. Deneysel ve elektrokimyasal modeller, batarya paketlerinin şarj durumu tahminleri amacıyla hücre dinamiklerini temsil etmeye pek uygun değildir. Bununla birlikte, elektrik devresi tabanlı modeller, bataryaların elektriksel özelliklerini temsil etmek için yararlı olabilir. En basit elektrik modeli, bir iç dirençle seri olarak ideal bir voltaj kaynağından oluşur (Dürr, 2006). Ancak bu model, batarya şarj durumunu hesaba katmaz. Diğer bir model, Warburg empedansı (Kuhn, 2006) olarak adlandırılan direnç ve paralel RC devreleriyle seri olarak açık devre voltajına dayanmaktadır. Bu modelin tüm parametrelerinin tanımlanması, empedans spektroskopisi adı verilen oldukça karmaşık bir tekniğe dayanmaktadır.

Shepherd (1965), bir bataryanın elektrokimyasal davranışını doğrudan terminal voltajı, açık devre voltajı, iç direnç, deşarj akımı ve şarj durumu açısından tanımlamak için bir denklem geliştirdi ve bu model deşarj için olduğu kadar şarj için de uygulandı. Shepherd modeli ilgi çekici bir model olmakla birlikte, modüler modellerin kapalı döngü simülasyonunda bir cebirsel döngü problemine neden olur (Tremblay, 2007). Durum değişkeni olarak sadece şarj durumuna sahip batarya modellerinde tartışılmıştır (Plett, 2004). Bu modeller Shepherd'inkine çok benzer, ancak cebirsel bir döngü oluşturmazlar.

DE ve hibrit sevk sistemleri ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, batarya modellemesi ile ilgili önemli bir durumda, batarya şarj durumunun doğru tespit edilebilmesidir. Batarya şarj durumunun doğru tespit edilememesi bataryanın ömrünün kısılmasına ve verimliliğinin düşmesine neden olabilir (Hu, 2012).

Literatürdeki pek çok çalışma incelenmiş ve elektrikli sevk sistemlerinde kullanılabilecek bataryaların özellikleri Tablo 3.2' de belirtilmiştir.

Tablo 3.2 Batarya türlerine göre spesifik özellikleri ve maliyetleri

Batarya Türü	Enerji Yoğunluğu	Kulomb Verimliliği	Batarya Ömrü Çevrim – (Yıl)	Maliyet (\$/)
Kurşun-asit	30-40 Wh/kg 50-80 Wh/l	% 90	200-2000 (2-15)	150 - 250

Nikel-kadmiyum	50-75 Wh/kg 60-150 Wh/l	%70- %90	1500-3000 (5-20)	800-1500
Nikel-metal hidrit	30-110 Wh/kg 140-435 Wh/l	%70- %90	1200-2000 (3-15)	350-500
Lityum iyon	75-250 Wh/kg 200-600 Wh/l	%99,1- %99,9	3000-10000 (5-20)	125-2500
Sodyum-sülfür	150-240 Wh/kg 150-240 Wh/l	%100	1500-5000 (15)	300-500
ZEBRA	100-140 Wh/kg 150-280 Wh/l	-	(8-14)	100-200
Çinko-Bromür	60-85 Wh/kg 30-60 Wh/l	%75- %82	2000-3500(5-20)	150-1000

Kurşun-asitli piller, en eski ve en olgun şarj edilebilir pil teknolojisidir. Soğurulmuş cam keçe seperatörlü, (AGM), valf ayarlı kurşun-asit (VRLA) bataryaların büyük ölçekli üretimi için temel faydaları yaklaşık 150 \$ / kW'sa olan düşük fiyattır. Depolama verimliliği % 90'a kadar çıkabilir. Ana dezavantajlar, 20-40 W'sa / kg'lık zayıf enerji yoğunluğu ve % 80 deşarj derinliğinde (DOD), 300-500 çevrimlik çok sınırlı döngü ömrüdür. En önemli dezavantajı %90 gibi düşük bir CV'ye sahip olmasıdır (De Breucker ve diğer., 2009). AGM VRLA bataryalar sulu kurşun asit bataryalara göre, batarya şarj durumunu (SOC) göstermesi ve yüksek termal kararlılığa sahip olması açısından iyidir ancak yine de bu çalışmada kullanılacak batarya türü için yeterli değildir (Edition, 2011).

Nikel-metal hidrit (NiMH) bataryalar, kurşun asitli bataryalara göre daha yüksek enerji yoğunluğuna (30-110 W'sa / kg) sahiptir ve güç / enerji oranı da önemli ölçüde daha yüksektir. Nikel-metal hidrit bataryaların ana dezavantajı, % 65-75 olan düşük depolama verimliliğidir. Maliyetleri 350-500 \$/kW'sa aralığındadır. Bu bataryalar hem yüksek enerji orta güç, hem de orta enerji yüksek güç uygulamalarında kullanılabilir. 1 Megavat-saat (MWh) referans batarya şaşırtıcı bir şekilde 29 MW verebilir. Bununla birlikte, bu yüksek güç dağıtımının yalnızca % 100 ve % 45 şarj arasında elde edilebileceği unutulmamalıdır. Deşarj derinliği arttıkça, güç çıkışı düşecek, ancak yine de çok yüksek kalacaktır. Yüksek enerji / orta güç modülü,% 80 deşarj derinliğinde kullanıldığında 2000'den fazla döngü ömrüne sahiptir. Bu bataryaların şarj edilme hızları da oldukça yüksektir (Kalhammer ve diğer., 2007).

Zebra bataryalar, erimiş sodyum (Na) anot ve nikel (II) klorür (NiCl_2) katot temel alınarak üretilmiştir. Bu bataryaların ana dezavantajı, 270 ile 350 ° C arasında çalışmasıdır. Enerji yoğunluğu kurşun asit ve nikel-metal hidrit bataryalardan daha yüksek olup 140 W'sa / kg'a kadar çıkabilmektedir. Güç / enerji oranı nikel-metal hidrit bataryalardan çok daha düşüktür. Bu bataryaların maliyetleri 200 \$ / kW'sa civarındadır. Bu pilin bir diğer faydası da 15 yıllık yüksek takvim ömrüdür. Bekleme kayıplarının yüksek oluşu ise önemli dezavantajlarından biridir (Kalhammer ve diğer., 2007).

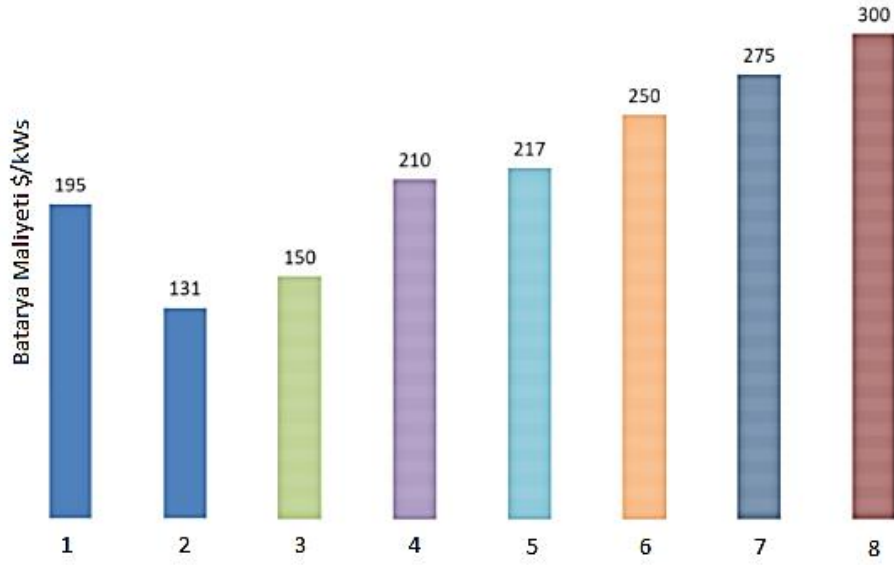
Yeterli reaksiyon kinetiğini ve elektrolit iletkenliğini sağlamak için sodyum bataryalar 300–350 ° C sıcaklık aralığında çalıştırılır. Sodyum ileten β - alümina elektrolitinin yüksek seçiciliği sayesinde, yüksek sıcaklıktaki sodyum bataryalar % 100 oranında CV sahiptir. Sodyum-sülfür bataryaların avantajları, yüksek CV, düşük maliyetli malzeme kullanımı ve beklenen yüksek çevrim ömürleridir. Ana dezavantajlardan biri, bekleme koşullarında bile bataryanın sıcaklığının korunması gerekli olduğundan, termal kendi kendine deşarjdır. Ayrıca, sıvı aktif materyallerin katılaşmasının neden olduğu mekanik stres nedeniyle donma-çözülme döngülerinin sayısı sınırlıdır. Bir hücre arızası durumunda, sodyum sülfür bataryası yüksek empedans modunda arızalanır, böylece sadece bir hücrenin arızalanması üzerine seri olarak bağlanmış bir hücre dizisinin tamamını devre dışı bırakır (Wen, 2018). Çinko bromür bataryalar ise düşük maliyetlerine rağmen, düşük enerji yoğunluğu ile dezavantaj oluştururlar. CV ise elektrolit ilaveleri ile %75-%82 seviyelerine ulaşabilir (Wu, 2018).

Lityum-iyon bataryalar, tüm şarj edilebilir bataryalar arasında en yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahiptir. Çevrim ömürleri diğer bataryalardan daha uzundur ve nikel-metal hidrit ve zebra bataryaların iki katı olan % 80 deşarj derinliği ile kullanıldığında 3000-10000 döngü ömrüne ulaşır. Diğer batarya teknolojilerine kıyasla yüksek depolama verimliliği (>% 90) ve düşük kendi kendine deşarj olma değeri de çok faydalıdır. Çünkü dizel motorun yüksek verimlilikte çalıştığı yüklerde, batarya ve batarya ile DC barasını birbirine bağlayan DC/DC dönüştürücülerin kayıpları daha yüksek olur. Bu durumda batarya devre dışı bırakılarak, sadece üzerindeki enerjiyi

muhafaza etmesi beklenir. 600 \$/kWs değerinden başlayan yüksek maliyetinden sonraki en büyük dezavantajı, güvenlik ve güvenilirlik gibi konularda henüz kendini kanıtlamamış, daha yeni bir teknoloji olmasıdır. Güvenliği artırmak ve bataryayı aşırı şarj ve aşırı deşarja karşı korumak için bataryanın bir enerji yönetim sistemi (EYS) ile donatılmış olması gerekir ki bu zaten elektrikli sevk sisteminin optimizasyonu için olmazsa olmazdır (De Breucker., 2009).

Henüz çok yaygınlaşmamış olan, ama yüksek enerji yoğunluğu (650 Wh/kg) ile gelecek vadeden bir batarya çeşidi de Lityum-metal (*Licerion*) bataryalardır (NASA, 2018).

Yukarıda yapılan batarya incelemelerinin ardından açıkça ortaya çıkan sonuç, bu çalışmada kullanılması gereken batarya çeşidinin lityum-iyon olması gerekliliğidir. Lityum iyon bataryaların yüksek maliyetleri, gemilerde elektrikli sevk sistemlerinin kullanımı konusunda armatörler tarafından temkinli yaklaşılmamasına sebep olmaktadır. Ancak literatürde Lityum-iyon bataryaların incelendiği ve gelecekteki fiyatlarının tahmin edildiği çalışmalara bakıldığında, maliyetin her geçen gün daha aşağı çekilebildiği ve silikon bazlı lityum-iyon bataryaların piyasaya sürülmesiyle çok daha ekonomik hale gelmesi beklendiği görülmektedir. Berckmans ve diğer. (2017) yaptıkları çalışmada, araştırmacılar tarafından li-ion bataryaların fiyatlarının 2020 yılı için tahminleri Şekil 3.13'deki gibi gösterilmiştir.

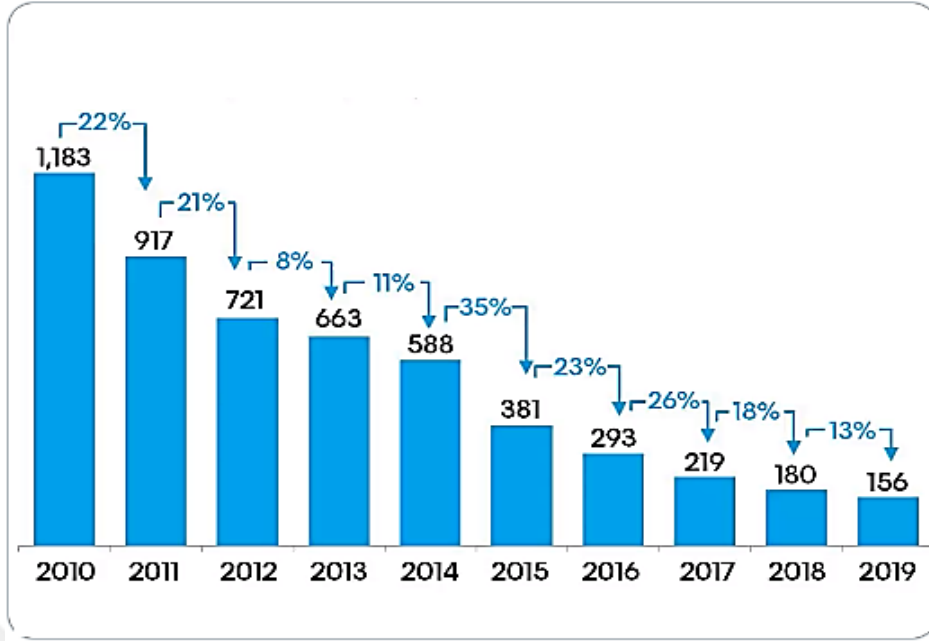


Şekil 3.13 Farklı araştırmalardaki lityum-iyon bataryaların 2020 yılı için fiyat tahminleri (Berckmans ve diğer., 2017)

Şekil 3.13, 2020 yılı için lityum iyon pillerin literatürdeki tahmini fiyatlarının karşılaştırmasını göstermiştir. Boston Consulting Group (2010), listelenen karşılaştırmadaki en eski ve en yüksek fiyat olan ortalama 300 \$/kWh fiyat öngörmüştür. Berger ve Solotar (2012), sırasıyla 275 \$/kWh ve 250 \$/kWh olarak öngörmüşlerdir. 2016 yılına gelindiğinde ise, P3 Consulting 210 \$/kWh ve 217 \$/kWh gibi daha düşük maliyetler olabileceği yönünde görüş beyan etmişlerdir. Tesla, (2015) ise yaptığı tahmin ile 150 \$/kWh olabileceğini öngörmüştür. Berckmans ve diğer. (2017) yaptıkları çalışma ile lityum-iyon bataryaların 2020 yılı itibari ile 195-131 \$/kWh arasında bir maliyete sahip olabileceğini göstermişlerdir.

The Verge, 2019 yılı itibari ile lityum-iyon bataryaların maliyetlerinin 156 \$/kWh olduğu yazılmış ancak 2020 yılı fiyatlarına ulaşamamıştır. Aynı dergiye bir demeç veren Elon Musk, 2023 yılından önce bu fiyatın 100 \$/kWh değerinin altına düşeceğini belirtmiştir (The Verge, 2020).

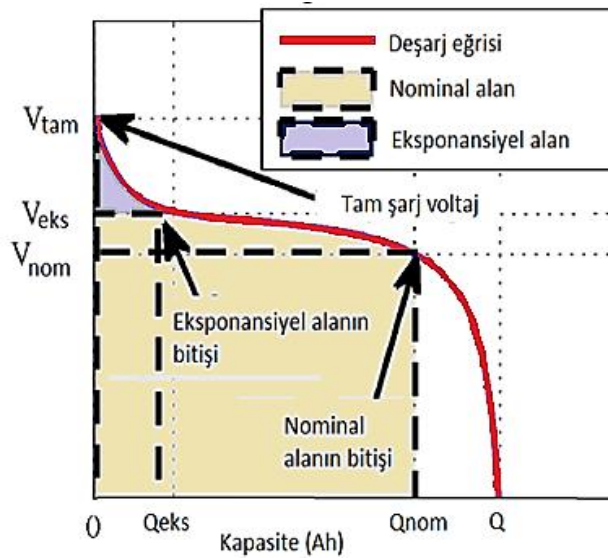
Şekil 3.14 de 2010 ile 2019 yılları arasındaki lityum iyon bataryaların fiyatlarındaki değişim grafiğini göstermektedir.



Şekil 3.14 Lityum-iyon batarya fiyatlarının (\$/kWh) yıllara göre değişimi (Bloomberg NEF, 2019)

Figür Y’de açıkça görüldüğü gibi lityum-iyon bataryaların fiyatları, geçmişte bu konu ile ilgili yapılan tahminlerden bile daha hızlı şekilde düşmüştür. Bu grafiğe dayanarak birkaç yıl içerisinde 100 \$/kWh değerinde altında olması çok büyük olasılıktır.

Lityum-iyon bataryaların karakteristik kapasite grafiği Şekil 3.15 de gösterilmiştir.



Şekil 3.15 Bir lityum iyon pile ait kapasite-gerilim eğrisi

Bir lityum iyon bataryanın maksimum gerilimi (V_{tam}) 4,2 V olur. Bu değer kısa bir sürede 3,7 V (V_{eks}) seviyesine iner ve nominal voltajı (V_{nom}) 3,2 V olarak kabul edilir. Bataryanın kapasitesi (Q) sağlayabildiği maksimum Ah değeri ile ölçülür. Bataryanın gerilim (V_B) değeri aşağıdaki formülle hesaplanır (Tremblay ve diğer., 2007).

$$V_B = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} + A.eksp(-B.it) - R.I \quad (3.4)$$

Burada E_0 bataryanın sabit gerilimini gösterir ve birimi V'dir. Sıcaklığa bağlı olarak bir miktar değişebilir. K ise polarizasyon sabitidir ve birimi V/Ah olur. Kısaca polarizasyon kayıplarını ifade eder. Bataryadan çekilen amper it olarak gösterilir ve dolayısı ile $Q/(Q-it)$ ifadesi bize SOC^{-1} değerini verir. B (Ah^{-1}), eksponansiyel kapasiteyi gösterir ve A ise eksponansiyel voltaj olarak tanımlanır ve V_{tam} ile V_{eks} arasındaki fark olarak ifade edilir.

3.2.4 Dönüştürücüler

Elektrikli sevk sistemlerindeki enerji yönetimi, bir çalışma yükünde üretilen enerjiyi depolamak ve daha sonra farklı bir yük koşulunda tahrik gereksinimlerini desteklemek için kullanılabilmesi ile elde edilir. Yani yük dengeleme işleminin yapılmasını sağlar. Güç dönüştürücüler ve depolama sistemleri aracılığıyla işlenen enerjinin her zaman bununla ilişkili kayıpları vardır. Bu nedenle, hibrit bir elektrik enerji yönetim sistemi, bir aracın toplam yakıt verimliliğini, enerji depolama ve boşaltma işlemlerinin kayıplarını dengelemek için yeterli bir miktarda geliştirilmiş bir verimlilik yük durumuna getirerek artırabilir.

Pervaneye güç aktaran elektrik motoru sabit devirle çalışıp, değişken kanat açılı pervaneler ile birlikte kullanılabilir ya da değişken devirle çalışıp, sabit kanatlı pervaneler ile kullanılabilir. Rols Roys (2010), tarafından, bir platform destek gemisinde yapılan uygulamada, değişken devirli motor kullanımının %5 yakıt tasarrufu sağladığı gösterilmiştir. Elektrik motoru değişken devirli kullanılmak isteniyorsa, değişken frekanslı bir sürücüye ihtiyaç vardır. DE sevk sistemlerinde

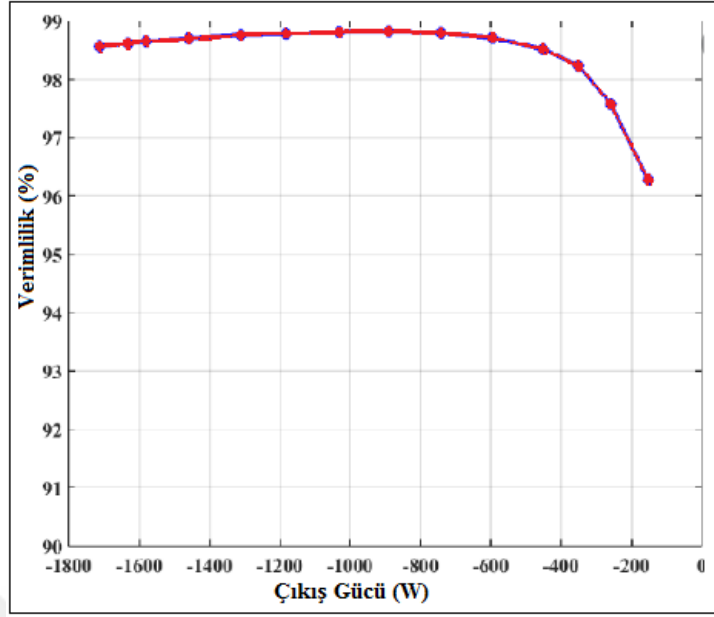
elektrik motorunu değişken hızda sürmek için kullanılan en yaygın iki dönüştürücü, sinyal genişlik modülasyonu (PWM) ve akım kaynağı çeviricisi (CSI) dönüştürücüleridir (Kwasieckyj, 2013).

Bir PWM konvertörü normalde kapasitörlü kontrolsüz bir redresörden ve bir PWM invertörden oluşur. Bu dönüştürücüde voltaj sabit tutulur. DC bağlantısındaki kapasitör, bir miktar enerji biriktirerek voltajı düzeltir. Bu nedenle, bu tip dönüştürücüye genellikle voltaj kaynağı invertörü denir. Bir dönüştürücü, kontrolsüz bir doğrultucu köprü ile negatif voltaj üretemez (Kolar, 2007).

PWM dönüştürücüdeki DC tampon bağlantısındaki kapasitör, reaktif güç sağlayabilir. Dönüştürücü bunu yaptığı için jeneratörler daha küçük boyutlandırılabilir. Bu, PWM dönüştürücüyü hem asenkron motorlara hem de senkron motorlara uygulanabilir hale getirir. PWM dönüştürücülerdeki güç limiti eskiden 8 MW civarındaydı, ancak modern transistörler sayesinde 30 MW'a kadar çıkabilmektedir (Adnanes, 2003). Ancak PWM dönüştürücü genellikle bir asenkron motorla birlikte seçilir ve ekonomik nedenlerden dolayı bu motor boyutu 7 MW ile sınırlıdır.

CSI dönüştürücü çok hızlı anahtarlama elemanlarına ihtiyaç duymaz ve sıradan tristörlerle donatılabilir. Bu da 100 MW'a kadar çok yüksek güçlere çıkabilmeyi mümkün kılmaktadır (Adnanes, 2003). Özetle, genellikle PWM dönüştürücüler, yaklaşık 7 MW'a kadar olan endüksiyon motorları ile kombinasyon halinde seçilir ve bunun üzerine, bir senkron motorla kombinasyon halinde bir CSI dönüştürücü seçilir.

Jeneratörler tarafından üretilen AC gücün DC güce doğrultulmasını sağlayan, tek yönlü diyot dönüştürücülerdir. Yüksek verimlilikleri sebebiyle tercih edilen bu tür dönüştürücülerin verimlilik grafiği Şekil 3.16 ile gösterilmiştir (Wang, 2016).



Şekil 3.16 Tek yönlü diyot doğrultucu verimliliği (Wang, 2016)

Güç dönüştürücülerinin enerji yönetimindeki temel özellikleri yüksek güçlü DC-DC dönüşümünü sağlamak ve çift yönlü güç akışına izin vermektir. Geleneksel DC-DC dönüştürücüler, mikroişlemci ve telekomünikasyon uygulamaları gibi düşük güç için tasarlanmıştır. Anahtarlama cihazlarının ve pasif bileşenlerin kolayca bulunmadığı yüksek güçlü tasarımlarda zorluklar beklenebilir. Çift yönlü güç akışının kara taşıtlarındaki önemi, klasik frenleme sisteminde ısı olarak dışarı atılan enerjinin geri kazanımını sağlamasıdır. Deniz taşıtlarında ise böyle bir imkan yoktur, fakat deniz taşıtlarında birden fazla motor kullanılan büyük güç sistemlerinde, motorların minimum sayıda ve optimum yükte çalışmasına olanak sağlar (Kolar, 2007).

Bataryalar, DC bağlantısının pozitif ve negatif tarafı arasına bağlanır. DC-bağlantı voltajının sabit kalması gerekir, bu da bir DC-DC dönüştürücü ihtiyacına neden olur. DC-DC dönüştürücü, EDC'den gelen çıkış voltajının, DC baranın voltaj seviyesiyle eşleşmesini sağlar (Kolar, 2007).

3.2.5 Elektrik Motoru

Elektrik motoru seçilirken, simüle edilecek geminin sevk gücünü karşılayabilecek kapasitede olması öncelikle dikkate alınması gereken durumdur. Bu tez çalışmasında

nicel verileri alınan Gülbeniz A gemisinin, daha öncede belirtildiği gibi, 21770 kW kapasiteye sahip bir ana makinesi vardır. Simülasyonda bu güç iki adet elektrik motoru ile sağlanacaktır.

Elektrik motorları DC motorlar ve AC motorlar olarak ikiye ayrılır. DC motorlar DC gücü mekanik enerjiye dönüştüren motorlardır. Doğru akım motorlarında hızı kontrol etmek için voltaj kullanılır. Torku kontrol etmek için de akım kullanılır. Kolay kontrol yöntemleri sayesinde geniş bir kullanım alanları vardır ancak DC motorların elektrikli sevk sistemlerinde kullanımı bazı tam elektrikli sevk sistemleri ile sınırlıdır.

Bir elektrik motoru, elektrik gücünü mekanik güce çevirir. Dış stator, bir manyetik alan oluşturmak için elektrikle beslenir. Bir akım aynı zamanda iç rotoru besler, böylece dönen manyetik alan, çıkış şaftı üzerinde tork üretir. Stator ve rotorun sağlanma şekli, motor tipini ayırt eder (Burt ve diğer., 2008).

Elektrikli makinelerin hepsi aynı prensipte çalışır; rotor üzerinde bir "*Lorentz kuvveti*" (FL) oluşturarak. Akım taşıyan bir iletken manyetik bir alana yerleştirildiğinde, bu iletkene bir kuvvet etki edecektir. Bu kuvvetin boyutu, iletkenin geçen akıma (I) ve manyetik akı yoğunluğuna Φ bağlıdır. Rotorun her iki tarafındaki iletkenler zıt yönde akım taşır. FL daha sonra ters yönde hareket ederek çıkış torkunu (T_{EM}) oluşturur:

$$T_{EM} = K_{EM} \cdot \Phi \cdot I \quad (3.5)$$

K_{EM} , motordaki boyuta, sargı sayısına (kutup çifti) ve akı yoğunluğu değişimlerine bağlı olarak motor için bir sabittir. Örneğin pervaneye güç aktaran bir motor için yüksek tork gerektiğinde, K_{EM} 'yi etkilediği için ya akımlar artmalı ya da kutup çifti sayısı artmalıdır. Her iki durumda da makinenin daha büyük bir yapıya ve daha fazla bakıra ihtiyacı vardır. Bu, üretim maliyetlerini artırır. Akı yoğunluğu " Φ " malzemeye bağlıdır ve farklı motor tipleri için kabaca aynı kalır.

Bir iletken (rotor) bir manyetik alanda hareket ettiğinde, bir endüksiyon voltajı V_E üretilir. Bu sözde elektromotor kuvvet (EMK), elektrikli makinenin jeneratör modunda çalışmasına imkan verir. Rotor daha sonra bir dizel motorun çıkış miline bağlanır. V_E , şu şekilde verilir:

$$V_E = K_{EM} \cdot \Phi \cdot n \quad (3.6)$$

K_{EM} , bobindeki boyut, sarım sayısı ve akı yoğunluğu değişimlerine bağlı olarak belirli bir makine için bir sabittir ve n , bobinin manyetik alandaki dönüş hızıdır (rotor hızı). Dolayısıyla, sağlanan bir akımdan çıkış milinde bir tork oluşturduğunda, bu bir elektrik motorudur. Rotorun sağlanan dönüşü nedeniyle bir voltaj indüklendiğinde, bu bir jeneratördür.

AC motorlar da kendi içerisinde iki temel başlıkta değerlendirilir. Senkron motorlar ve indüksiyon (asenkron) motorlar. İndüksiyon motorlar senkron hızdan daha düşük bir hızda çalıştığında, rotor üzerinde bir tork oluşur. Motor senkron hızdan daha yüksek bir hızda çalıştığında ise, kayma negatif olur ve motor jeneratör olarak çalışır. Hibrit sevk sistemlerindeki şaft jeneratörleri buna bir örnektir.

Senkron bir motorda stator, endüksiyon motoru gibi AC ile enerjilendirilir. Aradaki fark, rotor sargılarının kısa devre olmaması, ancak şaft üzerindeki kayma halkaları aracılığıyla DC tarafından uyarılmasıdır. Modern elektrikli makinelerde motora bağlı küçük bir uyarıcı jeneratör bulunur. Bu jeneratörün voltajı düzenlenebilir ve bir diyot köprüsü aracılığıyla gerekli DC gücü üretilebilir. Bu yapı, kayma halkaları ihtiyacını ortadan kaldırır (Burt ve diğer., 2008).

Elektrikli makinelerin gücünü, teminal voltajı (V_T) ve hat akımı (I) belirler. 3 fazlı bir sistem için, çoğunlukla birbirine bağlı bir üçgen konfigürasyon olmak üzere üç hat vardır. U ve I çizgi değerleriyle bir elektrik makinesinin toplam aktif gücü:

$$P_E = \sqrt{3} \cdot V_T \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3.7)$$

$\cos\phi$, güç faktörü olarak adlandırılır ve gerilim ile akım arasındaki faz kaymasının bir sonucudur. Faz açısı ϕ ne kadar büyükse güç faktörü o kadar küçük olur. Senkron makineler için rotor üzerindeki kutuplar, stator kutuplarının tam tersi olduğunda tork sıfır olur. Tork artarsa, rotor manyetik alanı stator manyetik alanının gerisinde kalmaya başlar. Rotora aktarılan DC'nin, güç faktörünü kontrol edebilen bir uyarma ünitesi tarafından sağlanması gerekir.

Yaklaşık 25 MW güç kapasitesine kadar asenkron motorlar bulunurken, bu değer senkron motorlarda yaklaşık 50 MW'a kadar çıkmaktadır. Senkron motorun verimi biraz daha iyidir, ancak daha pahalıdır. Bu faktörler arasındaki bir denge genellikle endüksiyon motorlarının 7 MW'ın altında bir güç aralığı için seçilmesiyle sonuçlanmıştır. Bu sınır aynı zamanda bir sinyal genişlik modülasyonu dönüştürücüsünün kullanılmasıyla da ilgilidir, ancak dönüştürücüler için teknoloji yıllar içinde geliştikçe bu durumda biraz değişti (Kwasieckyj, 2013).

Elektrik motorunun çıkış hızı n_{EM} , AC beslemesinin frekansı (f) ve kutup sayısı (p) ile belirlenir:

$$n_{EM} = \frac{2.60.f}{p} \quad (3.8)$$

Frekans, birimi Hz (s^{-1}) ve elektrik motoru çıkış hızı birimi dev/dk olduğu için 60 ile çarpılır. Bu denklem bize senkron hızı verir. Asenkron hız, frekans ve kutup sayısına bağlı olarak %1 ila %4 arasında daha düşüktür. Aradaki farka kayma hızı denilmektedir. Tablo 3.3'de, farklı f ve p değerleri olan elektrik motorlarının senkron hızları görülmektedir.

Tablo 3.3 Farklı frekans ve kutup sayılarındaki elektrik motoru senkron hızları

	2	4	6	8	10	12	p
50Hz	3000	1500	1000	750	600	500	dev/dk
60Hz	3600	1800	1200	900	720	600	dev/dk

Jeneratör olarak çalıştığında, giriş hızı ve kutup sayısı, frekansı belirler. Büyük senkron motorlar, yüksek kutup sayıları sayesinde yaklaşık 80 dev/dk düşük devirlere

ulaşabilirler. Bu özellik onları, redüksiyon dişlisi kullanmadan, pervaneye doğrudan sevk edebilme kabiliyeti sağlar ve elektrikli sevk sistemleri için önemli bir konuma getirir. Ayrıca bir frekans dönüştürücüsü ile çıkış AC frekansı değiştirilerek, istenilen devirde dönüş sağlanabilir (Kwasieckyj, 2013).

Elektrik motorlarında hiçbir zaman giriş gücü (P_{Ei}), çıkış gücüne (P_{Eo}) eşit olmaz. Aradaki fark kayıplardan kaynaklanmaktadır. Çıkış gücünün giriş gücüne oranı bize motorun verimliliğini verir. Elektrik motorundaki kayıplar; rotor ve stator üzerindeki bakır kayıpları (P_{cu1} ve P_{cu2}), manyetizasyon sebebiyle demir kristallerinin yönünü değiştirmesinden kaynaklı demir kayıpları (P_{Fe}) ve de sürtünme kayıplarıdır (P_f). Yatak kayıpları, hava sürtünme kayıpları, rotordaki hava direnci ve motor soğutucu fan için sağlanan güç sürtünme kayıplarını meydana getirir. Daha büyük motorlar, su soğutmalı olur ve pompa gücü de hesaplanmalıdır. Sürtünme kayıpları hızla doğru orantılı olarak artar (Burt ve diğer., 2008).

Bakır kayıpları yük yani akımla doğru orantılı olarak artar:

$$P_{cu1} = m \cdot I_1^2 \cdot R_1 \quad (3.9)$$

$$P_{cu2} = m \cdot I_2^2 \cdot R_2 \quad (3.10)$$

"R" sargı direncidir ve aynı malzeme ve aynı ölçüdeki sargı için sabittir. "m" sargı sayısıdır. Demir kayıpları da yüke bağlıdır ama voltaj değişmediği sürece aşağı yukarı sabit kabul edilir.

$$P_{Fe} = m \cdot \frac{U_1^2}{R_{Fe}} \quad (3.11)$$

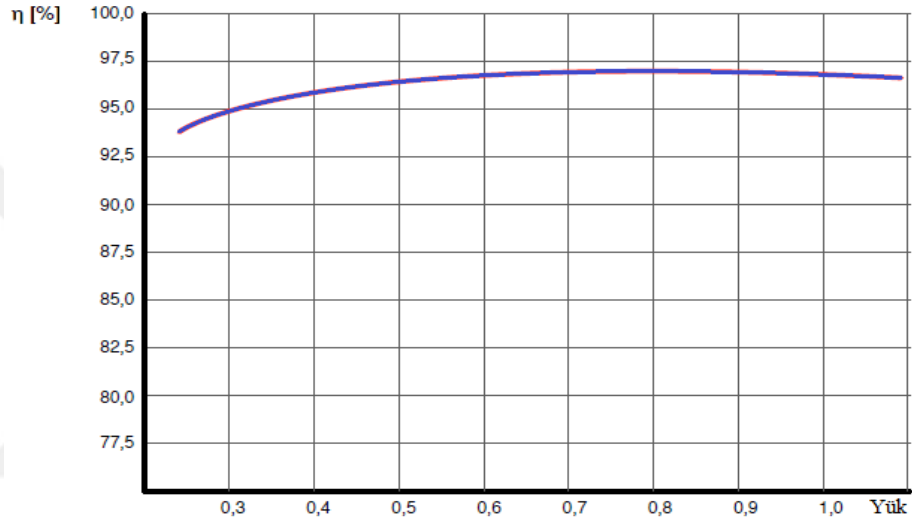
Toplam güç kaybı:

$$P_k = P_{cu1} \cdot P_{cu2} \cdot P_{Fe} \cdot P_f \quad (3.12)$$

Böylelikle elektrik motorunun verimliliği:

$$\eta_{EM} = \frac{P_{Ei} - P_k}{P_{Ei}} \quad (3.13)$$

Senkron motorların nominal verimleri, indüksiyon motorlara göre biraz daha yüksektir. Bu durum, rotor içi harici uyarmanın çok hassas bir şekilde yapılabilmesine bağlı olarak açıklanabilir. Bu tez çalışmasındaki simülasyonda yer alacak senkron motorların nominal verimliliği %97 olarak alınmıştır. Şekil 3.17, senkron motor verimliliğinin yüke göre değişim grafiğini göstermektedir.



Şekil 3.17 Senkron motor verimliliği (Kwasieckyj, 2013)

BÖLÜM DÖRT

METODOLOJİ

Bir önceki bölümde sunulan nicel veriler düzenlenerek bu bölümde matematiksel bir model oluşturmak için kullanılmıştır. Konvansiyonel sevk sistemine sahip Arkas Denizciliğe ait Gülbeniz A gemisi MATLAB programı kullanılarak, farklı DE sevk sistemi konfigürasyonlarına uyarlanmış ve üç farklı senaryo üzerinden simülasyon yapılmıştır. Simülasyon sonuçları ile Gülbeniz A gemisinden alınan gerçek değerler karşılaştırılmıştır. Gülbeniz A gemisi Avrupa limanlarında zorunlu olarak yakıt değiştirerek, *Heavy Fuel Oil* (HFO) yerine *Marine Gas Oil* (MGO) kullanmaktadır. Simülasyonda zaman bir değişken olarak alınamadığından, geminin yakıt değiştirdiği anlar hesaba katılamamış, bunun yerine DO yakıt tüketim iki yakıt arasındaki kalorifik değerleri oranında arttırılarak HFO değerine eklenmiştir (DNV GL, 2017; Oberhokamp, 2007).

MATLAB, mühendislerin ve bilim adamlarının çeşitli sistemleri ve ürünleri analiz etmesi ve tasarlaması için oluşturulmuş bir programlama platformudur. MATLAB kullanılmasının sebebi bu alandaki en sık kullanılan, güvenilir bir yapıya sahip olmasıdır. Henüz tamamlamadığımız 2021 yılı akademik çalışmaları içerisinde taratıldığına yaklaşık 28800 sonuçla karşılaşılmaktadır.

Gemi sevk sistemleri gibi yüksek maliyetli alanlarda deneysel çalışma yapabilmek hiç kolay değildir. Gemiden verilerin alınması için gemiye ulaşabilmek bile oldukça zor olmuştur. Bu sebeple yapılan simülasyonlar, bu alanda çalışanların bir fikir edinebilmesi açısından çok önemlidir. Yapılan üç senaryonun ilki geleneksel DE sevk sistemi, ikincisi bataryaların sisteme dahil edildiği hibrit güç kaynaklı DE sevk sistemi son senaryo ise yüksek batarya kapasitesi ile sıfır emisyonlu limanlara uyum sağlayabilecek DE sevk sistemi modellenmiştir.

Bu üç senaryo için de jeneratörlerin dizel motoru olarak, DE sevk sistemlerinde sıklıkla kullanılan 5850 kW gücünde, Wartsila 6L46 seçilmiş ve bu makinenin katalog verileri kullanılmıştır (Wartsila, 2007).

4.1 Senaryo 1

Yapılan ilk senaryoda geleneksel DE sevk sistemi modellenmiştir. Bataryaların kullanılmadığı bu sistemde, 4 jeneratör tarafından paylaşılan yükün, dizel motorlar için minimum yakıt tüketimine karşılık gelen yük değerlerinde tutabilmeyi amaçlamıştır. Dizel motorların yüke göre spesifik yakıt tüketimini gösteren karakteristik grafik Şekil 3.10' da gösterilmiştir. Şekilde gözüken yakıt tüketim değerleri makine üreticilerine göre farklılık gösterebilir ancak eğri çok yüksek oranla benzer olur. Spesifik yakıt tüketimi grafiğini oluşturan eğrinin denklemi de:

$$SYT = C_0 + aP_m + bP_m^2 \quad (4.1)$$

Gülbeniz A gemisinden alınan yük değerlerinin bir örneği Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Daha sonra bu değerler, doğruluğu yüksek tutabilmek için 5 dakikalık kısa aralıklarla sayısal verilere dönüştürülerek, Şekil 3.5'de örneği gösterilen bir tablo oluşturulmuştur. Oluşturulan tabloda kırk gün için toplamda 11520 sayısal veri girişi yapılmıştır. Bu veriler, Gülbeniz A gemisinin ana makine üreticisi olan MAN tarafından hazırlanan katalog verilerine uygun olarak, belirtilen yüke karşılık gelen güç değerlerine dönüştürülmüştür. Bu değerler Gülbeniz A gemisinin ana makinesinde üretilen ve geminin pervanesine iletilen anlık güç (P_{GA}) değerleridir. Bu değerler aynı geminin DE sevk sisteminin modellenmesinde direkt olarak kullanılamaz. Çünkü DE sevk sisteminde jeneratörler tarafından üretilen sevk gücünün (P_{js}), pervaneye iletilene kadar geçtiği aktarma ve güç dönüşümü elemanlarında yaşadığı kayıplar, konvansiyonel sistemden fazladır. Pervaneye eşit miktarda güç aktarabilmek için jeneratörler tarafından üretilecek güç aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P_{js} = P_{GA} \frac{\eta_K}{\eta_j * \eta_{dd} * \eta_d * \eta_{EM}} \quad (4.2)$$

Burada η_j , jeneratör verimliliği, η_{dd} diyot doğrultucu verimliliği, η_d dönüştürücü verimliliği, η_{EM} elektrik motoru verimliliği ve η_K konvansiyonel sistem doğrudan aktarım verimliliğidir.

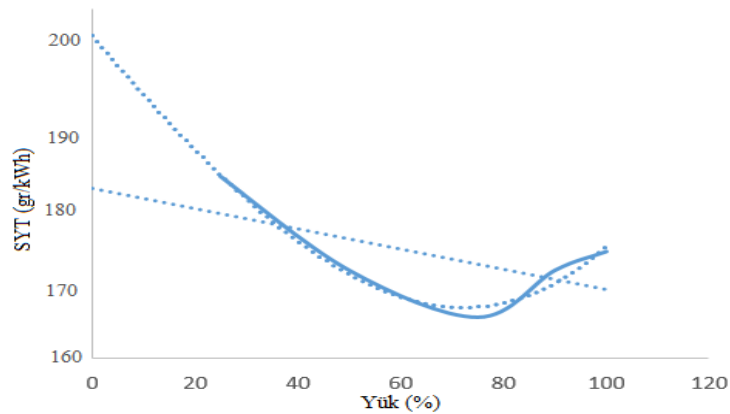
DE sevk sisteminde anlık üretilecek güç yine de P_{js} 'ye eşit olamaz. Çünkü konvansiyonel sistemde yardımcı makineler ve hotel yükünü karşılayabilmek için elektrik üreten dizel jeneratörler mevcuttur. Oluşturulan DE sevk sistemi modelinde ise üretilecek güç hem sevk (P_{js}), hem de diğer yardımcı yükleri (P_y) karşılayabilmek zorundadır. Bu yüzden öncelikle bu yardımcı yükler tespit edilmeli ve P_{js} 'ye eklenmelidir. Jeneratörlerin toplam gücü karşılayabilmek için ürettikleri, ihtiyaç duyulan güç (P_i), aşağıdaki gibidir.

$$P_i = P_{js} + P_y \quad (4.3)$$

Burada P_y gücüyle alakalı, maalesef P_{GA} gücünü hesaplayabilmemizi sağlayan yük değerleri mevcut değildir ve P_y gücünün P_i gücüne yapacağı anlık katkı bilinmemektedir. Ancak elimizde 40 günlük seyir süresince Gülbeniz A gemisine ait toplam jeneratör çalışma saati (J_{hG}), bu jeneratörlerin toplam yakıt tüketimi (TYT_{jG}) ve jeneratörlerin spesifik yakıt tüketim (SYT_{jG}) değerleri mevcuttur. Bu değerleri kullanarak aşağıdaki formülden, ortalama bir P_y değeri hesaplanarak, bütün simülasyon boyunca P_y değeri sabit kabul edilmiştir.

$$P_y = \frac{TYT_{jG}}{J_{hG} * SYT_{jG}} \quad (4.4)$$

SYT denklemini kullanılarak, modelde kullanacağımız motorun referans değerleri ile oluşturulan SYT eğrisi Şekil 4.1' deki gibi olmuştur.



Şekil 4.1 Referans değerlerden üretilen Yük-SYT grafiği

Grafikte açıkça görüldüğü gibi, eğri bütün referans değerleri ile örtüşmemektedir. Özellikle Senaryo 2’de (S2) motorun en düşük yakıt tüketimini uzun süre kullanabileceği bir algoritma yazmak için yüke göre değişen SYT değerlerini, motor kataloğundan alınan referans değerlerinin interpolasyonu ile bütün yük değerlerine karşılık gelecek SYT değerleri bir tabloya aktarılmıştır. Değerlerin bir kısmı rastgele kW için Tablo 4.1 ile gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Farklı yüklere göre SYT değerleri

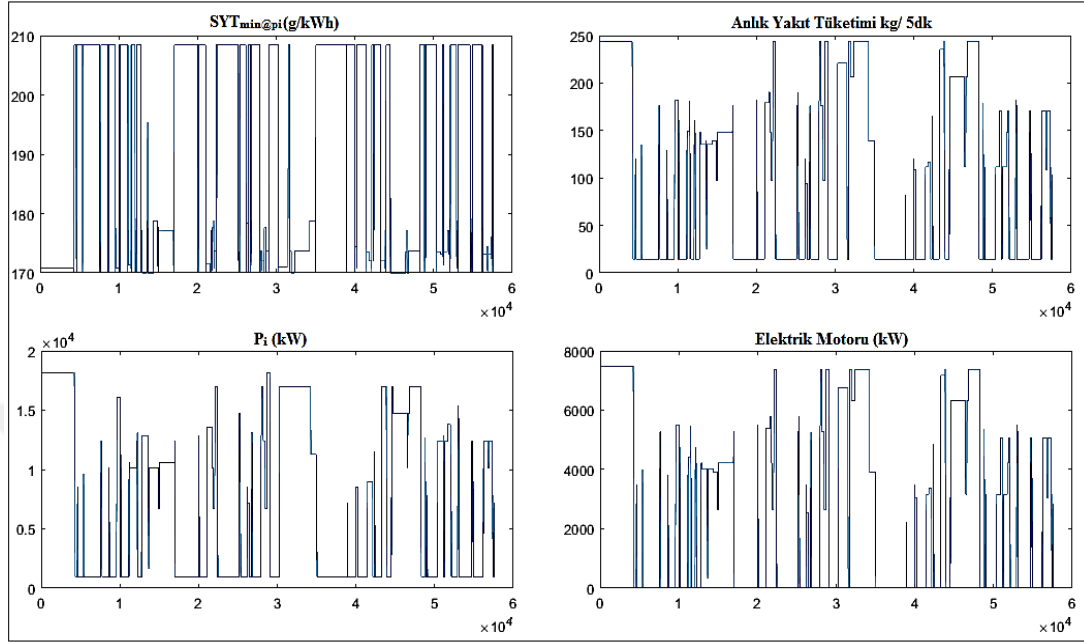
1 Jeneratör		2 Jeneratör		3 Jeneratör		4 Jeneratör	
kW	SYT	kW	SYT	kW	SYT	kW	SYT
526,5	214,08	1053	214,08	1579,5	214,08	2106	214,08
936	206,17	1872	206,17	2808	206,17	3744	206,17
1345,5	198,26	2691	198,26	4036,5	198,26	5382	198,26
1813,5	192,16	3627	192,16	5440,5	192,16	7254	192,16
2281,5	187,04	4563	187,04	6844,5	187,04	9126	187,04
2632,5	183,2	5265	183,2	7897,5	183,2	10530	183,2
2866,5	180,64	5733	180,64	8599,5	180,64	11466	180,64
3217,5	178	6435	178	9652,5	178	12870	178
3451,5	176,4	6903	176,4	10354,5	176,4	13806	176,4
3744	174,4	7488	174,4	11232	174,4	14976	174,4
3978	172,8	7956	172,8	11934	172,8	15912	172,8
4270,5	170,8	8541	170,8	12811,5	170,8	17082	170,8
4738,5	170	9477	170	14215,5	170	18954	170
5148	170,999	10296	170,999	15444	170,999	20592	170,999
5440,5	172,664	10881	172,664	16321,5	172,664	21762	172,664
5733	174,329	11466	174,329	17199	174,329	22932	174,329
5850	175	11700	175	17550	175	23400	175

Yazılan algoritma ile P_i değerlerine göre kaç jeneratör çalışması gerektiği belirlenir ve Birinci senaryoda amaç, her P_i değeri için minimum SYT_{min} (g/kWh) değerlerinin seçilerek toplam yakıt tüketimi (TYT_1) hesaplanmasıdır. Aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$TYT_1 = \sum_{k=1}^n P_{ik} * SYT_{mink} / 12 \quad (4.5)$$

Formüldeki 12, P_i değerlerinin her 5 dakikada bir alınmasından kaynaklanmaktadır. MATLAB programında yapılan simülasyon sonucunda elde edilen bulguları gösteren grafikler Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Kırk günlük seyir boyunca, kesintisiz bir şekilde 5 dakikalık kısa aralıklarla girilen verilerden, güç üretimi için çalışan jeneratörlerin,

çalıştıkları yük aralığındaki SYT değerleri, anlık yakıt tüketimleri ve ürettikleri güç miktarı ile elektrik motorlarının çıkış gücü grafikleri alınmıştır.



Şekil 4.2 Senaryo 1 simülasyon sonucu grafikleri

Grafikleri birlikte değerlendirecek olursak, değişken P_i değerlerine karşılık gelen, jeneratörlerin SYT değerlerini ve yine aynı P_i değerinde anlık olarak tüketilen yakıt değerlerini görebiliriz. P_i 'nin minimum olduğu değerlerde SYT'nin maksimum olduğunu görmekteyiz. Çünkü P_i 'nin minimum olduğu değerler, gerçekte Gülbeniz A gemisinin ana makinelerinin durdurulduğu liman ve demir bölgelerine ait değerlerdir. Burada P_i değerini sadece P_y oluşturur ve bu değer senaryodaki jeneratörler için oldukça küçük bir değerdir ve SYT'yi maksimum noktaya taşır. Tabi ki bu noktalardaki anlık yakıt tüketimi grafiği SYT'nin tam tersini gösterir. Yani P_i değerleri çok küçük olduğu için toplam yakıt tüketimine etkisi azdır.

SYT'nin minimum olduğu değerler ise P_i 'nin maksimum olduğu değerler etrafında toplanmıştır. Bu aynı zamanda anlık yakıt tüketiminin de maksimum olduğu değerleri ifade eder. Gülbeniz A gemisi de bu zaman aralığında en düşük SYT değerlerine ulaşmıştır ve bu yüzden senaryodaki anlık yakıt tüketimi değerleri güç dönüşüm kayıplarından kaynaklı olarak gerçek yakıt tüketim değerlerinden fazla olmuştur.

Senaryodaki DE sevk sisteminin yakıt tüketimini aşağı çekebilmek için ara değerlerdeki yakıt tüketim kazançları etkili olmalıdır. P_1 değerlerinde yaşanan kayıplardan sonra elektrik motorlarının da pervaneye aktardıkları çıkış gücü (P_{E0}) 'da grafikte gösterilmiştir

TYT_1 hesaplandıktan sonra, Gülbeniz A gemisinin toplam yakıt tüketimi (TYT_{GA}) değeri ile arasındaki fark (ΔYT_1) bulunur. Tasarruf edilen yakıt miktarı, 05.06.2021 tarihinde alınan çok düşük sülfürlü (VLSFO) yakıt fiyatları (Y_F , \$/MT) kullanılarak, tasarruf miktarı (K) hesaplanır.

$$\Delta YT_1 = TYT_{GA} - TYT_1 \quad (4.6)$$

$$K = \Delta YT_1 \cdot Y_F \quad (4.7)$$

IMO'nun belirlediği yakıt bazlı emisyon faktörleri (EF_f) kullanılmış, emisyon miktarlarındaki değişim hesaplanmıştır. Karbon dioksit (CO_2) emisyonlarının indirgenme miktarı (ΔE_{CO_2}) ölçülebilmesi için, karbon emisyon faktör (EF_{fCO_2}) kullanılmıştır (IMO 2018).

$$\Delta E_{CO_2} = \Delta YT_1 * EF_{fCO_2} \quad (4.8)$$

Sülfür oksit (SO_x) emisyonları, yakıt tüketimine ve yakıtın kükürt içeriğine veya takılıysa egzoz gazı temizleme sistemlerinin kullanılmasına göre değişir. Yakıt bazlı SO_x emisyon faktörü (EF_{fSO_x}) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$EF_{fSO_x} = 2 * 0,97753 * S \quad (4.9)$$

Bu denklem, yakıttaki sülfürün %97.753'ünün SO_x 'e dönüştürüldüğü (geri kalanının sülfat/sülfid ayrosol dönüştürüldüğü ve partikül maddenin bir parçası olarak sınıflandırıldığı) varsayımını yansıtır ve 2, yakıtın moleküler ağırlığının oranını yansıtır. Çünkü gemi emisyonları için SO_x 'in büyük çoğunluğu SO_2 'dir. İndirgenen SO_x miktarı (ΔE_{SO_x}) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Delta E_{SOx} = \Delta Y_{T1} * EF_{fSOx} \quad (4.10)$$

NO_x emisyonlarını hesaplamak için IMO tarafından, enerji temelli emisyon faktörü (EF_e) belirlenmiştir. Dizel motorları devir sayısına (n) göre sınıflandırarak, üç ayrı grup için farklı bir formül verilmiştir. Bizim modelimizdeki orta devirli dizel motorlar (EF_{eNOx}) için aşağıdaki formül geçerlidir (IMO 2018).

$$EF_{eNOx} = 9 * n^{-0.2} \quad (4.11)$$

IMO tarafından yapılan üçüncü ve dördüncü sera gazları çalışmasının ikisinde de orta devirli motorlar için n, 500 alınmıştır. Bu çalışmada da yine aynı yapılabacaktır. Gülbeniz A gemisi için ise ağır devirli bir motora sahip olduğundan, IMO'nun belirttiği NO_x emisyon faktör (EF'_{eNOx}) değeri (3,4 g/) kullanılmalı ve karşılaştırma yapabilmek için ikisi arasındaki fark (ΔE_{NOx}) bulunmalıdır (IMO 2018).

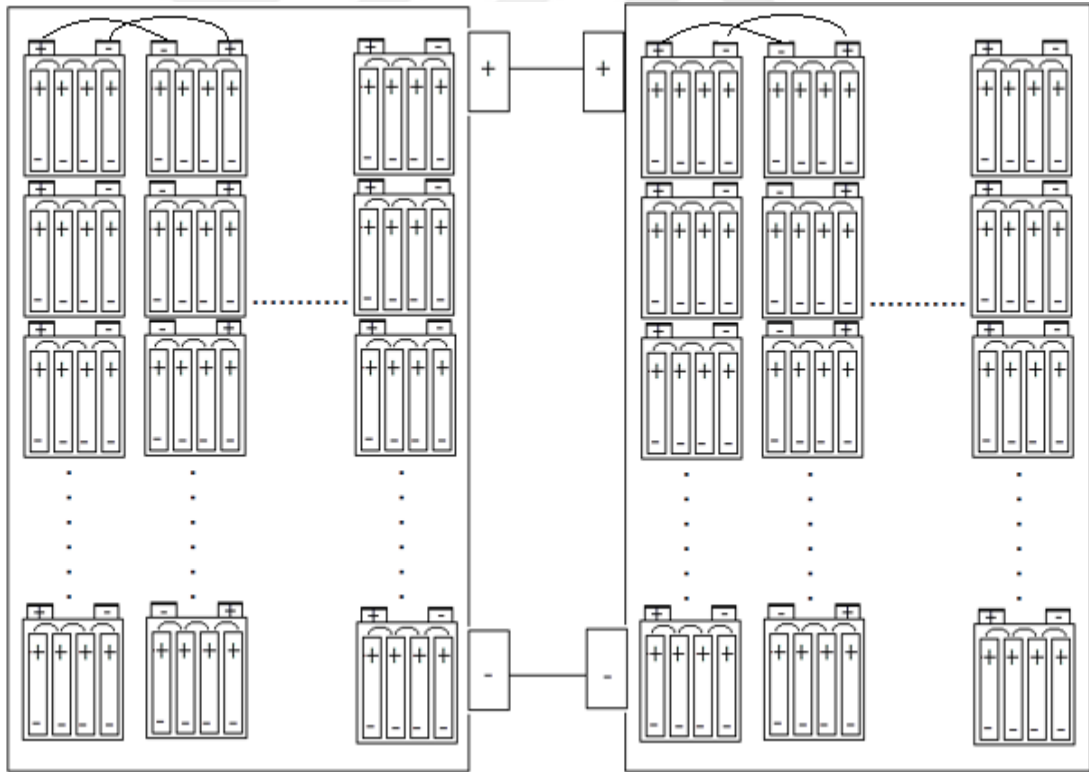
4.2 Senaryo 2

Birinci senaryoda geleneksel DE sevk sistemi simülasyonu gösterilmişti. Geleneksel sevk sisteminde jeneratörler, konvansiyonel sevk sistemine göre daha verimli kullanılabilirler de hala bazı yükleri karşılayabilmek için oldukça yüksek SYT'ye sahip oldukları durumlar ifade edilmiştir. Güç aktarım kayıplarını hesaba kattığımızda TYT₁ değerini indirmek daha da zorlaşmıştır.

Bu senaryoda bataryaları kullanarak, jeneratörlerin çalışma süresinin, mümkün olduğunca optimum yük aralığında çalışabilmesini sağlamak hedeflenmiştir. Bataryalar jeneratörlerin üreteceği fazla gücü depolayacak ve daha sonra jeneratörlerin optimum yük aralığında ürettiği güç yeterli gelmediğinde, aradaki farkı sağlayacaktır. Ayrıca bataryalar kapasiteleri doğrultusunda bazı küçük yükleri herhangi bir jeneratörün çalışmasına gerek kalmadan karşılayabilirler.

Bataryaların güvenli çalışmasını sağlamak için önerilen enerji yönetim sisteminde bazı sınırlamalar tanımlanmıştır. Dikkate alınması gereken ilk sınırlama, şarj

durumudur (SOC). Bataryanın voltajı deşarj sırasında azalacaktır. Bu, sabit bir güç çıkışı sağlamak için bataryadan çekilen akımı artıracaktır. Sonuç olarak, bataryanın aşırı ısınma riski ortaya çıkacaktır. Bataryanın düşük SOC değerlerine kadar deşarj edilmesi, batarya yaşam döngüsünün kısalması nedeniyle önerilmez. Bu nedenle, SOC değeri için daha düşük sınırlar gereklidir. Bu çalışmada bataryaların en düşük SOC değeri %20 olarak alınacaktır. En yüksek SOC değeri de %100 olarak alınarak pilin aşırı şarj edilmesi engellenmiş olacaktır. Modellenen sistemde toplam bataryaların toplam enerji kapasitesi (E_{BT}) yaklaşık olarak bir jeneratör kapasitesindedir ve bu da 5000kWh olarak alınmıştır. Kullanılan bataryaların kapasitesi (Q_B) 100Ah, nominal voltajı ise (V_{nom}), lityum iyon bataryalar için genel olarak kullanılan 3,2 V alınmıştır. Bataryaları seri ve paralel bağlayarak ihtiyaç duyulan güce, gerekli voltaj değerinde sahip olunur. Bu çalışmada batarya gruplarının sınıflandırılması Şekil 4.3'deki gibi gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Senaryo 2 batarya dizilimi

Şekil X'de görüldüğü gibi öncelikle her biri 3,2 nominal voltaja (V_{Pnom}) sahip lityum-iyon pil hücresi (B_h), dörtlü şekilde paralel (n_p) bağlanarak aynı nominal

voltajda (V_{Bnom}) bir batarya setini oluşturur. Bu bataryalarla DC bara (DC_b) güç ihtiyacını karşılayacak voltaj değeri için, iki paralel grup, 1954 seri bağlantı (n_s) yapılır. Aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$DC_b = V_{Bnom} * n_s \quad (4.12)$$

Batarya setinin enerji kapasitesi (E_{BS});

$$E_{BS} = V_{Pnom} * Q_B * n_p \quad (4.13)$$

Bataryaların toplam enerjisi (E_{BT});

$$E_{BT} = (E_{BS} * n_s) n_p \quad (4.14)$$

Bu denklemlerde yapılan seri bağ sayısı n_s ve paralel bağ sayısı n_p ile ifade edilmiştir.

Sistemin güç akışının, enerji tasarrufu sağlayacak şekilde belirlenmesi gerekiyor. Gemi sevk sistemi ve diğer elektrik enerjisi ihtiyacından kaynaklı yük tarafından tüketilen güç (P_i), güç kaynaklarının sağladığı güce eşit olmalıdır. EDC olarak bu sistemde yüksek kapasitesi ve verimliliği sebebiyle LifePO4 batarya kullanılmıştır. Kaynak, yani jeneratörler tarafından üretilen güç (P_j), yük tarafından tüketilen güç (P_i) ve bataryalardan (P_B) gelen güç akışı arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilir:

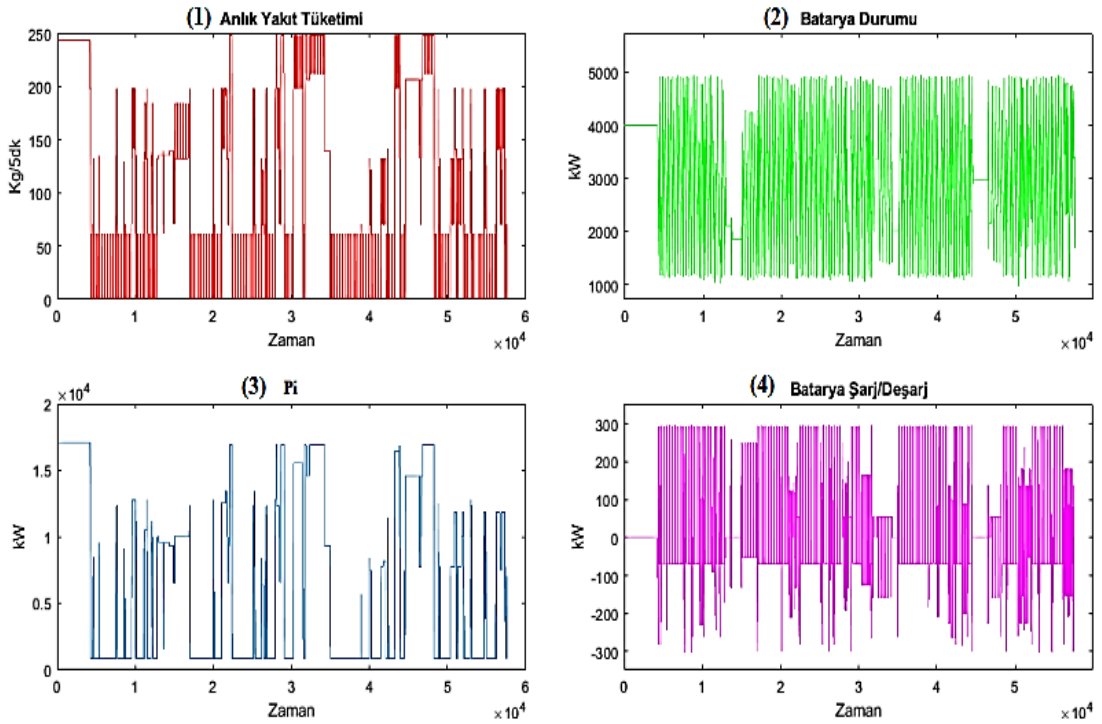
$$P_i = P_j + P_B \quad (4.15)$$

P_B 'ler, güç akışının yönüne bağlı olarak, bir güç kaynağı olduğu kadar bir yük olarak da hareket edebilir. P_B 'lerin ne zaman şarj edilip, ne zaman deşarj edileceğini belirlemek için, jeneratör tarafından sağlanması gereken bir güç sınır değeri, (P_{Jlim}) olmalıdır. Yükün güç talebinin P_{Jlim} 'den yüksek olması durumunda, P_B 'ler jeneratör ile birlikte güç sağlayacaktır. Yükten gelen güç talebi P_J 'den düşük ise; P_J 'den gelen gücün fazlası P_B 'leri şarj etmek için kullanılabilir. Bu şekilde jeneratör tarafından

karşılanan yük dalgalanmaları azaltılır. P_{Jlim} , dizel motorun yakıt verimliliğinin maksimum olduğu çalışma aralığına ayarlanmalıdır. P_B 'lerin boş olması ya da çalışır durumdaki jeneratörlerle birlikte tüketilen gücü karşılayamaması durumunda, güç sınırlaması göz ardı edilmeli ve gerekirse güç şebekesine ek jeneratörler bağlanabilmelidir.

$$TYT_2 = \sum_{k=1}^n (P_{ik} - P_{Bk}) SYT_{mink} / 12 \quad (4.16)$$

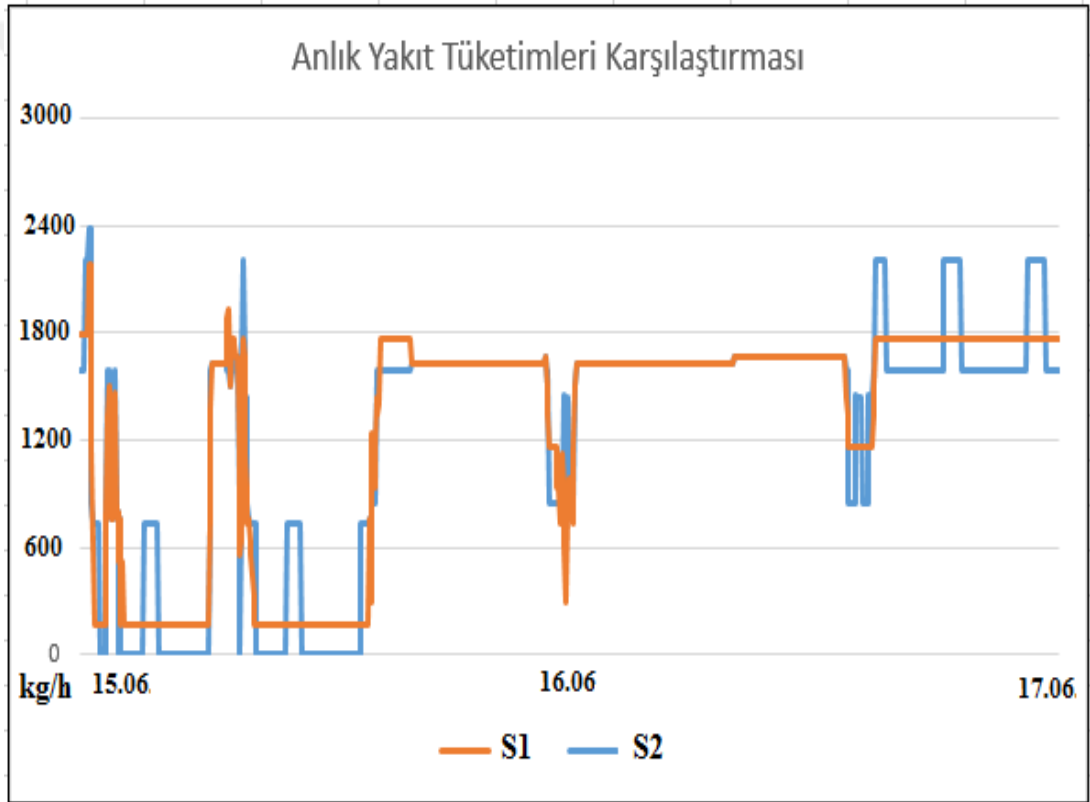
Formüldeki 12, P_i değerlerinin her 5 dakikada bir alınmasından kaynaklanmaktadır. Bataryanın şarj (P_{Bi}) – deşarj (P_{Bo}) verimliliği (0,98), simülasyondaki her şarj basamağına ilave edilerek hesaba katılmıştır. MATLAB programında yapılan simülasyon sonucunda elde edilen bulguları gösteren grafikler Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Kırk günlük seyir boyunca, kesintisiz bir şekilde 5 dakikalık kısa aralıklarla girilen verilerden aşağıdaki grafikler basılmıştır. İkinci senaryoya ait emisyon değerleri, birinci senaryo ile aynı şekilde hesaplanır. TYT_2 değeri formül 4.7 de yerine konularak ΔYT_2 bulunur. Bu değer de formül 4.8 ve 4.10 da yerine konulur.



Şekil 4.4 Senaryo 1 simülasyon sonucu grafikleri

İkinci senaryonun çıktılarını en iyi özetleyecek grafikler Şekil 4.4'deki gibi seçilmiştir. Bu Senaryo 2'nin Senaryo 1'e göre en önemli farkını bataryalar oluşturmaktadır. 1 numaralı grafikteki anlık yakıt tüketiminin oldukça benzer olduğu görülmektedir. Bu beklenen bir durumdur. Çünkü 3 numaralı grafik, yani ihtiyaç duyulan güç hiç değişmemiştir.

Yakıt tüketim miktarlarındaki küçük değişimleri, kırk günlük seyir süresini kapsayan toplamda 11520 veriden oluşan bir grafikte anlayabilmek çok mümkün değildir. Daha iyi anlaşılabilmesi için sonuç değerleri daha kısa bir aralıkta alınarak iki senaryo arasında farklar Şekil 4.5'deki gibi gösterilmiştir.

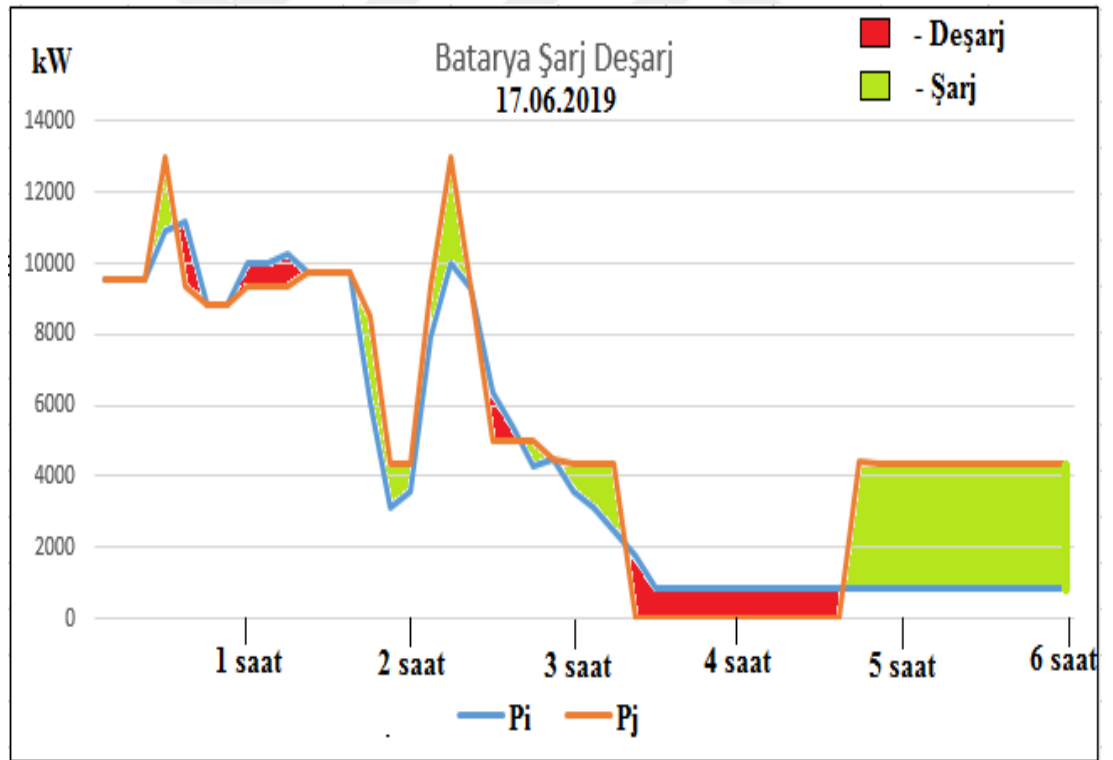


Şekil 4.5 Senaryo 1 ve Senaryo 2 arasındaki anlık yakıt tüketimleri karşılaştırılması

Şekil 4.5'de görüldüğü gibi, ikinci senaryonun anlık yakıt tüketimleri bazen daha fazla bazen, bazen daha az olabilir. Bu durumu etkileyen faktör bataryaların şarj ya da deşarj oluşudur. Bataryaların devreye girmediği durumlarda ise iki senaryonun da anlık yakıt tüketim değerleri birbirine eşit olur. Çünkü iki senaryoda da jeneratörler ihtiyaç duyulan gücü tek başlarına karşılar ve çalışan jeneratör sayısı optimum yük koşullarını oluşturacak şekilde seçilir.

Grafiğe dikkatli bakarsak, ikinci senaryonun yakıt tüketiminin fazla olduğu bölümlerin çok kısa aralıklar olduğunu görürüz. Bataryaları şarj edebilmek için ihtiyaç duyulanan üzerinde bir güç üreterek, diğer zamanlarda düşük yüklerle inmeye gerek duymamış ve bazen de hiç çalışmayarak anlık yakıt tüketimini sıfırlamıştır. Bu sayede toplam yakıt tüketimi (TYT_2) azalmıştır.

Bataryaların sahip oldukları ve sisteme aktarabilecekleri enerjinin değişimini gösteren 2 numaralı grafikte başlangıç değeri 4000 olarak belirlenmiştir. Anlık şarj ve deşarj miktarları da 4 numaralı grafikte görülmektedir. 3 numaralı grafik ihtiyaç duyulan gücü gösteren grafikdir. Grafiklerin çok büyük bir zaman dilimini kapsıyor oluşu sebebiyle yine daha küçük bir aralık için inceleme yapılmış ve Şekil 4.6 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Pi-Pj grafiği ve batarya şarj – deşarj gösterimi

Bataryaların etkisinin en iyi anlaşılabilceği grafik Şekil W ile gösterilmiştir. Bu grafikte ihtiyaç duyulan güç ve bu gücün nasıl karşılandığı, jeneratörlerin ürettiği

gücün ihtiyaç duyulan güce göre çok daha düzenli olabildiği görülmektedir. Dizel motorların düzensiz yük profillerinde artan yakıt tüketiminin önüne geçilmiş, aynı zamanda optimum yük aralığında çalışma süresini arttırarak, birim enerji başına tüketilen yakıt miktarı düşürülmüştür. Şekilde ihtiyaç duyulan güç ve jeneratörler tarafından üretilen gücün zamana göre eğrileri verilmiştir. 6 saatlik süreyi kapsayan grafikte, iki eğri arasında kalan alanlardan yeşil alan bataryaların şarj edildiğini, yani jeneratörlerin ihtiyaç duyulandan daha fazla güç ürettiklerini gösterir. Kırmızı alan ise bataryaların deşarj olduğunu, yani jeneratörlerin ihtiyaç olandan daha az güç ürettiklerini, geri kalanın bataryalar tarafından tamamlandığını gösterir. Jeneratörler bazen hiç çalışmayarak bütün yükün bataryalar tarafından karşılanması sağlanır. Senaryoda kullanılan bataryanın özellikleri Tablo 4.2 ile gösterilmiştir (Alibaba, 2021).

Tablo 4.2 Kullanılan bataryanın özellikleri

Marka	Lithtech	Tip	LifePO4 3,2 V
Nominal Kapasite	100 Ah	Döngü Ömrü	3500-5000
Ağırlık	2,3 kg	Ölçüler	173,9*48*127,6 mm
Fiyat	35 \$		

Bataryaların satın alma maliyetleri (M_B) dışında ekstra ağırlıklarının da yük taşıma kapasitesini düşürdükleri değerlendirilmelidir. Bu değerlendirme formül 1.2 ile hesaplanan EEDI değerlerinin indirgemesini belirlemek için kullanılır. Ancak toplam batarya ağırlığı, 34973 DWT olan geminin yaklaşık %0,1'ine karşılık gelmektedir. Senaryolardaki döngü sayısı tam döngüler üzerinden hesaplanmış, tamamlanmamış kısa şarj deşarj döngülerinin yüzbinlerce kez tekrar edilebileceği konu ile ilgili diğer çalışmalarda belirtilmiştir (Ovrum ve Bergh, 2015).

4.3 Senaryo 3

Üçüncü senaryo limanlarda gemi kaynaklı emisyonların azaltılması yönündeki çabaların sonucu olarak ortaya çıkan sıfır, emisyon limanlara uyum sağlayabilmek adına yapılacak bir yaklaşımdan oluşmaktadır. Bu senaryoda geminin yanaştığı limanlardaki enerji ihtiyacının, karadan beslenmesi durumu tartışılacaktır.

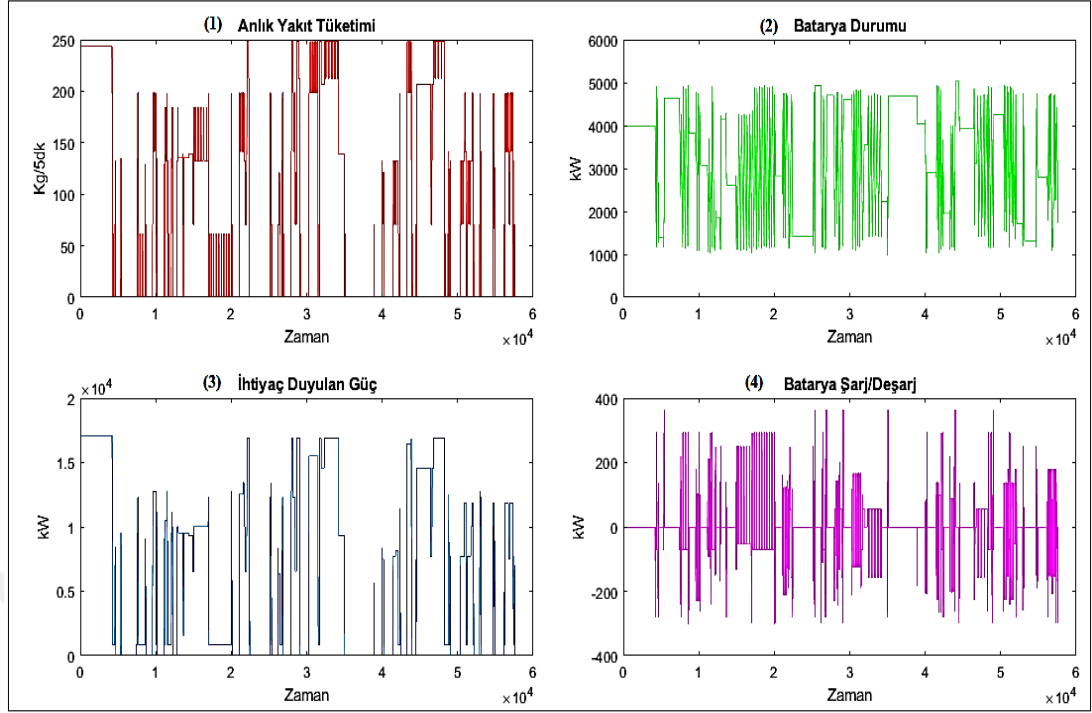
Sahil besleme gemilerin yanaştıkları liman ve gemi arasındaki frekans ve güç aktarımı uyumsuzluklarından dolayı oldukça karmaşık bir iştir. Konvansiyonel gemilerin ve AC dolaşıma sahip hibrit yada DE gemilerin büyük bir çoğunluğu 50 Hz frekans kullanırlar. Bu gemilerin sahil beslemeden faydalanabilmek için, önce sahilden gelen elektriğin bir AC-DC doğrultucu yardımıyla DC'ye dönüştürülmesi, sonra da bir DC-AC invertör ile tekrar AC'ye dönüştürülmesi gerekmektedir (Jaspreet ve diğer., 2011).

Limanda alan genellikle çok önemli olduğundan, gerekli dönüşümlerin yapılabilmesine olanak sağlayacak bir adaptasyon ünitesi rıhtımlardan uzak bir yere yerleştirilebilir. Rıhtımlarda, gemi güç yönetim kontrol ünitesi ve gemiye elektrik ihtiyacını doğrudan karşılayan trafolardan oluşan bir sahil terminal ünitesi kurulur. (Jaspreet ve diğer., 2011). Bizim oluşturduğumuz modelde DC dolaşım olmasından dolayı, tıpkı sevk sisteminde olduğu gibi burada da aktarma kayıplarından kurtulmuş olunur. Ayrıca yine trafo gibi yer kaplayan ekipmanlardan da kurtulunur.

Bu senaryoda, gemi limana yanaştığı andan itibaren sahilden güç alacak ve jeneratörlerin tamamı kapatılacaktır. Limanda geçirdiği süre boyunca yakıt tüketimi olmayacak ve buna bağlı olarak herhangi bir egzoz emisyonu da üretilmeyecektir. Bu senaryodaki toplam yakıt tüketimi (TYT_3) aynı ikinci senaryodaki gibi yapılmıştır. Ancak, geminin yanaştığı limanlardaki birim elektrik ücreti ile limanlarda bulunduğu zamanlardaki ihtiyaç duyduğu kabul edilen enerjiyi ne kadara mal ettiği hesaplanıp, (TYT_3) değerine eklenerek bir maliyet değerlendirmesi yapılabilmesi sağlanmıştır.

$$TYT_3 = \sum_{k=1}^n (P_{ik} - P_{Bk}) SYT_{min k} / 12 \quad (4.17)$$

İkinci senaryoya ait emisyon değerleri için, birinci senaryo ile aynı şekilde hesaplanır. TYT_2 değeri formül 4.7 de yerine konularak ΔYT_2 bulunur. Bu değer de formül 4.8 ve 4.10 da yerine konulur. Senaryo 3'e ait grafikler Şekil 4.7 ile gösterilmiştir.



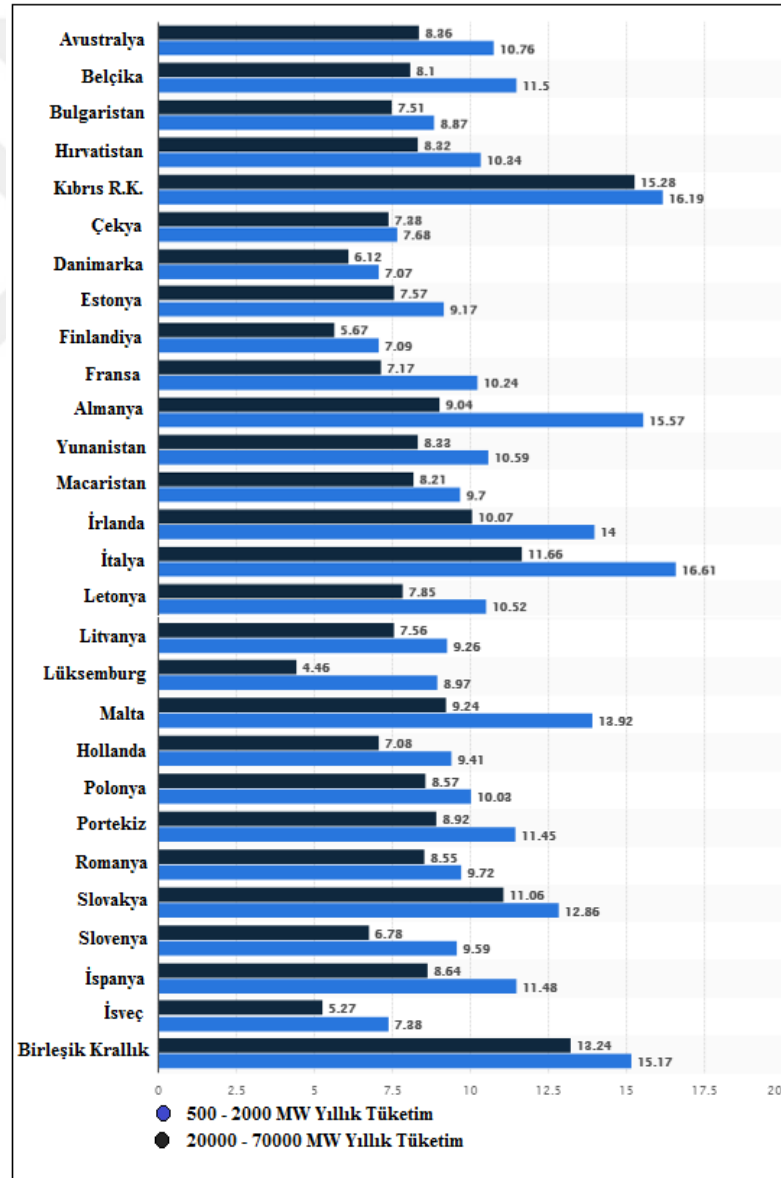
Şekil 4.7 Senaryo 3 simülasyon sonucu grafikleri

Senaryo 3 için 1 numaralı grafiğe baktığımızda, anlık yakıt tüketimlerinin maksimum ve minimum değerlerinin değişmediğini, ancak yakıt tüketiminin sıfır olduğu bölümlerde ciddi görülür bir artış olduğunu görüyoruz. Limanlarda çalıştırılmayan jeneratörler sayesinde bu beklendik bir durum. Bu durum TYT_3 değerinin de azalmasını sağlayarak, yakıt tüketimine bağlı egzoz emisyonlarının da indirgenmesine yol açar.

2 ve 3 numaralı grafiklere baktığımızda ise bataryaların, Senaryo 2'ye oranla çok daha az kullanıldığını rahatlıkla anlayabiliyoruz. Bataryaların az kullanılması, daha az şarj-deşarj döngüsü yapmasına ve bataryaların döngü ömrünün uzamasına sebep olur. Döngü ömrü bataryaların kullanımı konusunda çok önemli bir etkidir. Gemi sahipleri ve işletmecileri, kısa sürede değiştirmek zorunda oldukları bataryaları, hiç gemiye almamayı tercih edebilirler.

Yakıt tüketim değerleri net bir şekilde düşürülmüş olsa da, bu kesin bir kazanç demek değildir. Geminin gittiği limanlardan sahil besleme elektriğini kullanmasının da, beraberinde getirdiği bir maliyet vardır. Bu maliyet her liman için farklılık

gösterebilir. Gülbeniz A gemisinin uğradığı limanların hiçbirinde devamlı sahil besleme yapabilecek bir altyapı mevcut değildir. Bu senaryo geleceğe yönelik bir tahmin senaryosudur. Gemilere devamlı sahil besleme yapabilecek alt yapıya sahip limanlar: İsveç (2), Avustralya (2), Amerika (2) ve Danimarka'da bulunur. Yıllar içinde bu sayının artacağına yönelik çalışmalar yada liman sahasındaki emisyonların azaltılmasına yönelik, bu sayının artırılması gerektiğini savunan çalışmalar mevcuttur (Jaspreet ve diğer., 2011). Senaryo 3 için tahmini sahil besleme maliyetlerini belirleyebilmek adına, Avrupa Birliği ülkeleri endüstriyel elektrik fiyatları grafiği Şekil 4.8 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Avrupa birliği ülkelerinin endüstriyel elektrik fiyatları 2019 (Statista, 2021)

Şekil 4.8’de gösterilen grafikler, ülkelere göre endüstriyel elektriğin birim fiyatını göstermektedir. Tüketilen elektrik miktarı arttığında birim maliyetlerin düştüğü görülmektedir. Sahil beslemesi yapabilen limanların kapasitesine bakıldığında, çoğunun 50-350 MW aralığına olduğunu görürüz (Jaspreet ve diğer., 2011). Bu da bize en ucuz birim fiyattan elektrik sağlanabileceği anlamına gelir.

Gülbeniz A gemisinin uğradığı limanların bağlı bulunduğu ülkelerin birim elektrik fiyatlarına bakacak olursak, en uygun elektriğin 7,17 *cent/* olarak Fransa’da olduğunu görürüz. Daha sonra 8,22 *cent/* ile Yunanistan gelmektedir. En yüksek endüstriyel elektrik ücretine sahip ülke ise 8,64 *cent/* ile İspanya olmuştur. Türkiye’de ise sanayi elektriğinin birim fiyatı 2020 yılı verilerine göre 49,2 kuruş olarak alınmıştır (Enerji Portalı, 2020). 4 Haziran 2021 tarihine ait Euro/TL paritesi de 10,55 olarak alınmıştır. Dolayısıyla Türk limanlarındaki birim elektrik maliyeti, 4,66 *cent* ile en düşük değere sahip olmuştur. Tablo 4.3 ile Gülbeniz A gemisinin uğradığı bütün limanlar ve birim maliyetler gösterilmiştir.

Tablo 4.3 Gülbeniz A gemisinin limanlarda kalma süreleri, limandaki elektrik enerji ihtiyacı ve enerji birim maliyetleri

Liman	Süre		Alınan Enerji (kWh)	Elektrik Enerjisi Birim Maliyeti (Cent)
	Saat	Dakika		
Valensiya	126	40	105766,7	8,64
Castellon	34	-	28390	8,64
Barselona	28	50	24075,8	8,64
Fos	17	10	14334,1	7,17
Pire	36	10	30199,1	8,22
Ambarlı	69	20	57893,3	4,66
Gemlik	25	50	21570,8	4,66
Yarımca	37	-	30895	4,66
Aliğa	20	15	16978,3	4,66

Gülbeniz A gemisinin verilerini aldığımız tarihler arasında, limanlarda geçirdiği süre Tablo 4.3’de görülmektedir. Limanda kalma süreleri taşınan yüke göre değişiklik gösterebilir. Bu tabloda geminin 189,5 saat ile en çok İspanya limanlarında kaldığı görülmektedir. Geminin en uzun süre kaldığı bu ülkede birim elektrik enerjisi fiyatları en yüksektir. İspanya’dan sonra en fazla süreyi geçirdiği Türkiye ‘de ise elektrik enerjisi fiyatları en düşüktür. Birim fiyatlar daha sonra güncel kur üzerinden dolara dönüştürülmüş ve hesaplamalara dahil edilmiştir (Enerji Portalı, 2020).

Çalışmanın son bölümünde, yaptığımız simülasyonun, Gülbeniz A gemisine göre yaklaşık yatırım maliyetleri (M_y) tespit edilerek, bu maliyetlerin geri kazanım süreleri belirlenmiştir. Bunun için MAN firmasından alınan görüşte, Gülbeniz A gemisinin sahip olduğu gibi iki zamanlı, ağır devirli, elektronik valf ve ateşleme kontrollü bir ana makinenin birim fiyatının 350 €/kW olarak kabul edilebileceği, Wartsila firmasından alınan görüşte ise, spesifik verilerini kullandığımız gibi bir jeneratörün birim maliyetinin 440 €/kW kabul edilebileceği yönünde olmuştur. Simülasyondaki diğer elektriksel maliyetler de, literatürde bu tür çalışmalar için kullanılan, toplam makine maliyetinin %6 oranında arttırılması olarak kabul edilmiştir (Dedes ve diğer., 2012).

BÖLÜM BEŞ

BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Gülbeniz A gemisinden alınan değerler MATLAB programında simüle edilmiş, üç ayrı senaryoda incelenmiştir. Bütün senaryolarda DC güç dağıtımı kullanılmış, Birinci senaryoda geleneksel DE sevk sistemi, ikinci senaryoda bataryalardan faydalanılan hibrit güç kaynaklı DE sevk sistemi, üçüncü senaryoda da sıfır emisyon limanlara uyum sağlayabilecek, hibrit güç kaynaklı DE sevk sistemi modellenmiştir.

MATLAB programında yapılan simülasyon ile oluşturulan 3 senaryonun sonuçları ve model olarak seçilen Gülbeniz A gemisinin gerçek değerleri Tablo 5.1 de gösterilmiştir. Yakıt fiyatları 05.06.2021 tarihinde, güncel olarak alınmıştır (Bunkerworld, 2021).

Tablo 5.1 Yakıt tüketimi, emisyonlar ve maliyetlerin kıyaslanması

	Gülbeniz A	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3
TYT (T)	1102,03	1070,07	1044,23	987,62
ΔYT (T)	-	31,96	57,8	114,41
ΔYT (%)	-	2,9	5,25	10,38
Ek Enerji Maliyeti (\$)	-	0	0	28.200,7
ΔYT (\$) 40gün	-	17.258,4	31.212	33.580,7
ΔYT (\$) 1 yıl	-	157.590,77	285.005	306.633,77
ΔYT (\$) 5 yıl	-	787.953,83	1.425.022,88	1.533.168,85
ΔYT (\$) 10 yıl	-	1.575.907,65	2.850.045,75	3.066.337,7
ΔCO₂ (T) 40 gün	-	99,52	179,99	356,27
ΔCO₂ (T) 1 yıl	-	908,74	1643,53	3253,19
ΔSO_x (T) 40 gün	-	31,24	56,5	111,84
ΔSO_x (T) 1 yıl	-	285,26	515,91	1021,24
NO_x (T) 40 gün	19,872	15,872	15,872	15,017
NO_x (T) 1 yıl	181,45	144,93	144,93	137,12
ΔEEDI %	-	25,03	24,95	24,95
Batarya Döngü 40 gün	-	0	106	84
Batarya Döngü 5 yıl	-	0	4839	3835
≈ Mb (\$) (5 yıl)	-	0	547.120	547.120
≈ Mb (\$) (10 yıl)	-	0	1.094.240	1.094.240
≈ My (\$)	12.184.680	13.096.512	13.096.512	13.096.512
≈ ΔMT (\$)	-	911.832	1.458.952	1.458.952
≈ ΔKZ (1 yıl) \$	-	-754.241,23	-1.173.947	-1.152.318,2
≈ ΔKZ (5 yıl) \$	-	-123.878,17	-33.929,12	+74.216,85
≈ ΔKZ (10 yıl) \$	-	+664.075,65	+843.973,75	+1.060.265,7

Tablo 5.1, çalışmanın bütün çıktılarını kapsayacak şekilde hazırlanmıştır. Gülbeniz A gemisinin gerçek değerleri ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmış, üç ayrı senaryo için farklılıklar ortaya konulmuştur.

5.1 Senaryo 1 Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Öneriler

Geleneksel DE sevk sistemi simülasyonu yapılan birinci senaryoda, yakıt tüketimi %2,9 oranında düşürülmüştür. Yakıt temelli emisyonlardan CO₂ ve SO_x emisyonları da aynı oranda indirgenmiş ve net indirgenme miktarları tabloda gösterilmiştir. NO_x emisyonları ise enerji temelli olduğundan, Gülbeniz A gemisi için de hesaplanarak, üretilen emisyon değerleri gösterilmiştir.

Bu simülasyonda kullanılan eşit güçteki 4 adet jeneratör ile %2,9 oranında azaltılan yakıt tüketimi, gelecek çalışmalarda artırılabilir. Jeneratörlerin özellikle düşük güç ihtiyaçlarını karşılayabilmek için hala yüksek kapasitede kalması yakıt tüketiminin bu durumlarda düşürülememesi hatta artmasına, dolayısıyla toplam yakıt tüketimindeki azalmanın belirli bir seviyede kalmasına sebep olmuştur. Gelecek çalışmalarda, farklı güç seçeneklerine sahip jeneratörlerin kullanılması ve güç ihtiyacına göre kullanılan jeneratörlerin sadece biri ile yük dengesinin düzenlenebilmesine imkân verecek bir algoritma oluşturularak, toplam yakıt tüketim değerinin daha çok azaltılabileceği düşünülmektedir.

Azaltılan emisyon miktarları oldukça yüksek olmasına rağmen, daha düşük seviyelere inebilmek mümkündür. Konvansiyonel sistemde uygulanan bütün yöntemler, bu tür bir sevk sisteminde de kullanılabilir. Ancak böyle bir sevk sisteminde tasarruf edilecek yakıt miktarı ve buna bağlı emisyonlar, geminin operasyonlarına göre değişiklik gösterebileceği için, hiçbir zaman bu sistem tabloda verilen oranlar kadar daha etkili olacaktır denilemez. EEDI hesaplamasının temelini oluşturan, taşınan yük başına üretilen CO₂ miktarının azaltılabildiği görülmüştür. Formül 1.2 de verilen P_{ME} ve P_{AE} 'nin toplam değerlerinin azaltılabilmesi, EEDI oranını Tablo 5.1'de görüldüğü gibi %25,03 düşürebilmemizi sağlar.

Çalışmada belirtilen güçler için hazırlanabilecek bir sistemin yaklaşık maliyetleri hesaplanmış ve bu maliyetlerin yakıt tüketiminin azaltılması yoluyla elde edilen kar ile 1 yıl, 5 yıl ve 10 yıllık süreçlerde ne kadar geri kazanılabildiği, yani belirtilen sürelerdeki kar-zarar dengesi ($\approx \Delta KZ$) gösterilmiştir. Birinci senaryo için 1 ve 5 yıllık hesaplamalara göre, DE sevk sistemi maliyetleri daha yüksek olmuştur. Ancak 10 yıllık süreçte, konvansiyonel sisteme göre daha karlı bir yatırım olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

5.2 Senaryo 2 Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Öneriler

Senaryo ikide ise bataryalar kullanılarak, yakıt tüketimi ve buna bağlı emisyonların daha da indirgenmesi düşünülmüş ve sonuçlara bakıldığında toplam yakıt tüketiminin % 5,2 oranında azaltıldığı görülmüştür. Yakıt temelli emisyonlar olan CO₂ ve SO_x emisyonları da aynı oranda azalmış ve miktar olarak da tabloda gösterilmiştir. Enerji temelli bir emisyon türü olan NO_x ise birinci senaryoya göre aynı kalmış ve değeri yine tabloda belirtilmiştir.

Farklı gemi türleri için böyle bir senaryoda yakıt tüketimi ve buna bağlı emisyonların %20'ye kadar indirgenebildiği çeşitli çalışmalarda görülmektedir (Hansen ve diğer., 2011). Ancak bu çalışmanın uygulandığı konteyner gemi türü için %5,25 gibi bir oran da oldukça iyidir. Bu senaryo özelinde de, yine birinci senaryoda belirtildiği gibi farklı güç kapasitelerine sahip jeneratörlerin kullanılması gelecek çalışmalar için daha iyi sonuçlar ortaya koyulmasını sağlayacaktır. Ayrıca ESD olarak sadece bataryaların değil, süper-kapasitörlerinde tek başına veya bataryalar ile birlikte hibrit bir sistem olarak kullanılması, daha verimli bir operasyona sebep olabilir.

Birinci senaryo için de bahsettiğimiz gibi yakıt tüketimi ve emisyonlardaki değişim, ikinci senaryoda da sadece bu gemiyi ya da tamamen aynı koşullardaki benzer gemileri kapsar. Gemilerin operasyon modlarındaki değişiklik, sonuçları olumlu ya da olumsuz şekilde etkileyebilir. Ancak gemi üzerindeki sabit güç ve kargo kapasitesi ile hesaplanan EEDI, kurulu gücün düşürülmesi ile birlikte azalır. Tablo 5.1'de gösterilen ikinci senaryo için %24,95 oranındaki azalma oldukça etkilidir. Birinci senaryo ile

aradaki fark, bataryaların geminin toplam kargo kapasitesine etkisi dâhil edildiği için olmuştur.

Birinci senaryo için bahsedilen yaklaşık yatırım maliyetlerine, ikinci senaryoda batarya maliyetleri de dâhil edilmiştir. Özellikle ilk yıl için daha yüksek bir ekonomik yük getirdiği Tablo 5.1 de açıkça gözükmemektedir. Bataryalar sayesinde yakıt tüketiminden daha fazla tasarruf edilmesi ile birlikte 5 yıllık sürenin sonunda ekonomik olarak hala ekside kalırsa da, aradaki fark çok azalmış, birinci senaryodan daha iyi bir sonuca ulaşılmıştır. 5 yılın sonunda batarya ömrü sona erdiği için, batarya maliyetlerinin değişmediği kabul edilerek, aynı miktarda batarya maliyeti eklenmiş, buna rağmen 10 yıllık süreçte oldukça yüksek bir ekonomik kazanç sağlanabilmektedir.

5.3 Senaryo 3 Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Öneriler

Üçüncü senaryoda da, yine ikinci senaryodaki gibi bataryaların kullanıldığı DE sevk sisteminin, sıfır emisyon limanlara uyum sağlayabilme kapasitesi gösterilmiştir. Limanlarda enerji ihtiyacını kendisi üretmeyen, sahil besleme yoluyla karşılayan bir sistem simüle edilmiştir. Böyle bir sistemle çalışabilecek geminin yakıt tüketimini %10,38 oranında düşürebileceği gösterilmiştir. Gemi kaynaklı emisyonlarda yine diğer senaryolarda olduğu gibi SO_x ve CO₂ için yakıt tüketimine paralel olmuştur. Ancak NO_x emisyonu, gemide üretilen toplam enerjinin azalmasının etkisiyle daha da indirgenebilmiştir.

Bu senaryo ile insanların yaşam alanlarına yakın olan liman bölgelerinde, gemi kaynaklı emisyonların sıfırlanması, böylelikle insan sağlığına katkı sağlanabilmesi mümkündür. Tabi ki bu enerjinin üretim aşamalarında da bir emisyon oluşacağı gerçeğini değiştirmemekte ancak ülkelerin kendi enerji politikaları doğrultusunda, yenilenebilir yada daha temiz enerji kaynakları kullanılarak, emisyon potansiyeli çok daha alt seviyelere indirilebilir.

Limanlardan kullanılacak enerjinin maliyeti de, senaryoda hesaplanan gibi sadece o ülkenin endüstriyel elektrik fiyatlarına bağlı kalmaz. Bu hizmeti sağlayan limanın

da giderleri düşünölmelidir. Ancak hedef emisyonların azaltılması ise bu ek maliyetler; liman, liman devleti ve gemi arasında paylaşılarak düşürölebilir.

Üçüncü senaryonun yaklaşık yatırım maliyeti, ikinci senaryo ile aynıdır. Bu yüzden, daha fazla yakıt tasarrufu sağlanan bu senaryoda yatırım maliyetinin geri dönüş süresi daha kısadır. 5 yıl sonunda ekonomik olarak kazanç sağlanabilen tek senaryo bu olmuştur. Böylece, 5 yılın sonundaki ek batarya maliyetlerine rağmen, 10 yıllık süreçteki en büyük kazanç yine bu senaryo ile gerçekleşmiştir.

Bu senaryoda geminin limanlara giriş ve çıkış yaptığı manevralar tamamen bataryalarla, sıfır emisyonlu olacak şekilde simüle edilememiştir. Bunun sebebi, yapılan simölasyonun güç değişkenine bağılı olarak modellenmesi ve belirli bir zaman ya da konuma göre değişken atayamamak olmuştur. Ancak ileriki çalışmalarda, gemilerin limana girmeden sıfır emisyon moda geçebileceğı simölasyonlar yapılması, bu alanda literatüre önemli katkılar sunacaktır. Bu senaryodaki EEDI hesaplanması, ikinci senaryo ile aynıdır.

5.4 Sonuçların Genel Değerlendirmesi ve Gelecek Çalışmalara İçin Öneriler

Bu çalışma ile DE sevk sisteminin, açık deniz konteyner gemilerinde de yakıt tüketimi ve emisyonlar açısından daha verimli bir sistem olabildiğı gösterilmiştir. Yatırım maliyetlerinin geri dönüş süresi uzun gözükse de, emisyonların indirgenmesi için kullanılan diğer yöntemlerinde benzer yüksek maliyetlere sahip olduğı, ayrıca operasyonel maliyetleri sayesinde zamanla artan ekonomik kayıplara sebep oldukları bilinmektedir. SOx emisyonlarının indirgenmesi için en sık kullanılan yöntem olan *Scubber* sistemleri, makine kapasitesine göre değişen 3-6 M\$ seviyelerindeki yatırım maliyetlerine ek olarak, makine yakıt tüketimini de arttırdığı bilinmektedir. Bu yöntemim de, yerine tercih edilebilecek VLSFO'ya göre uzun vadede avantaj sağladığı yönünde çalışmalar mevcuttur (Andersson, 2020).

Çalışmanın geneline bakıldığında, incelenebilecek daha pek çok önemli konu vardır. İleriki çalışmalarda;

DE sevk sisteminin yük dalgalanmalarını en aza indirgeyen, optimum yük aralığında çalışmayı sağlayan yapısı sayesinde, bakım-tutum maliyetlerini düşürebilmesi, ve buna ek olarak ana makinede bakım-tutum yapabilmek için geminin açık denizde durdurulması ya da limanda bekletilmesi gibi gecikmelerin ve ek maliyetlerin düşürülmesi,

Yakıt tüketimindeki azalmaya bağlı olarak yağlama yağı tüketiminin ve buna bağlı emisyonların da azaltılabilmesi,

Yapılacak simülasyona örnek olarak seçilen geminin, ana makine yük profili çıkarılırken, farklı mevsim ve hava koşullarından örnekler olması, ayrıca yük profilleri, konvansiyonel sistemdeki jeneratörler için de alınabilirse, hata payının daha aşağıya çekilebilmesi

DE sevk sistemi, seyir emniyeti açısından değerlendirilerek, makine arızalarından kaynaklanan kaza oranlarını düşürme konusundaki etkisi de araştırılabilir.

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR

DE sevk sistemleri, farklı gemi türleri ve ihtiyaçları için farklı konfigürasyonlarla oluşturularak, yakıt tüketimi ve emisyonların indirgenmesi konusunda oldukça önemli bir alternatif olduğunu ispatlamıştır. Bu tez çalışmasında da yapılan simülasyonlar ile açık deniz konteyner gemileri için de bu alandaki etkisi gösterilmiştir. Farklı simülasyonlarda %2,9 ile %10,38 arasında değişen yakıt tasarrufu ve buna bağlı emisyonlardaki indirgenme oranı beklentilerin üzerindedir. 2022 yılından itibaren EEDI faz 4 kapsamında değerlendirilecek olan yeni inşa konteyner gemileri için de, toplam kurulu gücün düşürülebilmesinin avantajıyla, sınırlamalara uyumluluğu sağlayabilecek bir teknoloji olarak görülebilir.

Geçmiş çalışmalarda öngörülenin aksine, elektriksel ekipmanların ve bataryaların maliyetlerinin azalması ve verimliliklerinin artması ile birlikte, uzak yol konteyner gemileri için de, yatırım maliyetlerini karşılayabilecek bir tasarruf sağlanabileceği gösterilmiş, özellikle batarya fiyatlarının daha da aşağı inebileceği düşünüldüğünde geri kazanım süresinin de kısalabileceği görülmüştür. Ayrıca DE sevk sisteminin, sayıları her geçen gün artan sıfır emisyon limanlara adaptasyon için önemli avantajlara sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

DE sevk sisteminin belirtilen avantajları geminin operasyon modundaki değişikliklerden önemli ölçüde etkilenir. Bu yüzden böyle bir sistem tercih edilirken, geminin seyir bölgesi, ihtiyaç duyacağı ortalama hız ve bu hızı sağlayacak makine yükü doğru tespit edilmelidir. Aksi taktirde yatırım maliyetleri artan geminin, işletim maliyetlerinde de artış görülebilir.

KAYNAKLAR

- ABB. (2010). *ABB shore connections: Effectively reducing emissions from ports*. 21 Mart 2021, <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21403729>.
- Alibaba. (2021). *Hot Sale Factory 3.2V 50Ah 100ah 120ah 150ah Li-Ion Battery ion Lithium Lifepo4 Cells Battery*. 1 Haziran 2021, https://www.alibaba.com/product-detail/3-2v-100ah-120ah-150ah-Battery_1600229053081.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_image.2a175975rZM7Xx&s=p.
- Amgai, R., ve Abdelwahed, S. (2014). Power management of shipboard power systems using Interaction Balance Principle. *North American Power Symposium (NAPS)* (1. Baskı) içinde (1-6). Pullman: IEEE.
- Andersson, K., Jeong, B., ve Jang, H. (2020). Life cycle and cost assessment of a marine scrubber installation. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 4(4), 162-176.
- Barcellos, R. (2013). The hybrid propulsion system as an alternative for offshore vessels servicing and supporting remote oil field operations. *Offshore Technology Conference* (1. Baskı) içinde (1-10). Rio de Janeiro: OTC Brasil
- Barsali, S., Miulli, C., ve Possenti, A. (2004). A control strategy to minimize fuel consumption of series hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(1), 187-195.
- Bash, M., Chan, R. R., Crider, J., Harianto, C., Lian, J., Neely, J., ... ve Vaks, N. (2009). A medium voltage DC testbed for ship power system research. *Electric Ship Technologies Symposium* (1. Baskı) içinde (560-567). Baltimore: IEEE.
- Bassam, A. (2017). *Use of voyage simulation to investigate hybrid fuel cell systems for marine propulsion*. Doktora Tezi, University of Southampton, Southampton.

- Berckmans, G., Messagie, M., Smekens, J., Omar, N., Vanhaverbeke, L., ve Van Mierlo, J. (2017). Cost projection of state of the art lithium-ion batteries for electric vehicles up to 2030. *Energies*, 10(9), 1314.
- Berger, R., ve Solotar, A. (2012). *A criterion for homogeneous potentials to be 3-Calabi-Yau*. 20 Mart 2021, <https://arxiv.org/pdf/1203.3029.pdf>.
- BloombergNEF. (2019). *Battery pack prices fall as market ramps up with market average at \$156/kWh in 2019*. 5 Mayıs 2021, <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-as-market-ramps-up-with-market-average-at-156-kwh-in-2019/?sf113554299=1>.
- Bø, T. I. (2016). *Scenario-and optimization-based control of marine electric power systems*. Doktora Tezi, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Breijts, A., ve Amam, E. E. (2016). Energy management—adapt your engine to every mission. *Proceedings of the 13th International Naval Engineering Conference* (1. Baskı) içinde (1-8). London: Imarest
- Bullock, S., Mason, J., Broderick, J., ve Larkin, A. (2020). Shipping and the Paris climate agreement: a focus on committed emissions. *BMC Energy*, 2(1), 1-16.
- Bunkerworld. (2021). *Fuel prices*. 6 Haziran 2021, https://www.bunkerworld.com/prices/bunkerworldindex/point_one_percent.
- Burt, C. M., Piao, X., Gaudi, F., Busch, B., ve Taufik, N. F. (2008). Electric motor efficiency under variable frequencies and loads. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(2), 129-136.

Butcher, M., Maltby, R., ve Parvin, P. S. (2009). Compact DC power and propulsion systems-the definitive solution? *Electric Ship Technologies Symposium* (1. Baskı) içinde (521-528). Baltimore: IEEE.

De Breucker, S., Peeters, E., ve Driesen, J. (2009). Possible applications of plug-in hybrid electric ships. *Electric Ship Technologies Symposium* (1. Baskı) içinde (310-317). Baltimore: IEEE.

Dedes, E. K., Hudson, D. A., ve Turnock, S. R. (2012). Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping. *Energy Policy*, 40, 204-218.

DNV-GL (2017). *Fuels and fuel converters*. 3 Mart 2021, https://www.ntnu.edu/documents/20587845/1266707380/01_Fuels.pdf/1073c862-2354-4ccf-9732-0906380f601e 10.05.2021.

Dürr, M., Cruden, A., Gair, S., ve McDonald, J. R. (2006). Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system. *Journal of Power Sources*, 161(2), 1400-1411.

Edition, S. (2011). *Technical manual*. 5 Şubat 2021, http://www.trailercharge.eu/dl-6154-1-41727/download/odyssey_tech_manual_2012_usa.pdf.

Enerji Portalı (2020). *Elektrik fiyatları*. 5 Haziran 2021, <https://www.enerjiportali.com/elektrik-fiyatlari-8/>.

Erginer K.E., Gulmez Y., Konur O., Fikir E., Göksu B., Kaya K.D., Pamık M., Yüksel O. ve Korkmaz S.A. (2018). An improved system design for solar boats. *7th Global Conference on Global Warmings*. İzmir: GCGW.

- Farand, C. (2020). *IMO under pressure to regulate new ship fuels over Arctic warming*. 10 Nisan 2021, <https://www.climatechangenews.com/2020/01/27/imo-under-pressure-to-regulate-new-ship-fuels-over-arctic-warming/>.
- Gåsemyr, Ø. R. (2014). *Modeling of hybrid marine electric propulsion systems*. Yüksek Lisans Tezi, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Geertsma, R. D., Negenborn, R. R., Visser, K., ve Hopman, J. J. (2017). Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. *Applied Energy*, 194, 30-54.
- Grimmelius, H., de Vos, P., Krijgsman, M., ve van Deursen, E. (2011). Control of hybrid ship drive systems. *10th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries* (1. Baskı) içinde (1-15). Delft: Tudelft
- Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., De Vicuña, L. G., ve Castilla, M. (2010). Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 158-172.
- Halff, A. (2017). Slow streaming to 2020: innovation and inertia in marine transport and fuels. *Center on Global Energy Policy*, 10, 1-34.
- Hansen, J. F., Lindtjorn, J. O., Odegaard, U. U., ve Myklebust, T. A. (2011). Increased operational performance of OSVs by Onboard DC Grid. In *4th International Conference on Technology and Operation of Offshore Support Vessels* (1. Baskı) içinde (79-84). Singapore: Research Publishing
- Haseltalab, A., Botto, M. A., ve Negenborn, R. R. (2019). Model predictive DC voltage control for all-electric ships. *Control Engineering Practice*, 90, 133-147.

- Hawthorne, K. L., Wainright, J. S., ve Savinell, R. F. (2014). Maximizing plating density and efficiency for a negative deposition reaction in a flow battery. *Journal of Power Sources*, 269, 216-224.
- Holt, M. (2017). *Feasibility studies on a stand-alone hybrid wind-diesel system for fish farming applications*. Yüksek Lisans Tezi, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Hu, X., Li, S., Peng, H., ve Sun, F. (2012). Robustness analysis of State-of-Charge estimation methods for two types of Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 217, 209-219.
- Hunt, E. C., Harbach, J. A., ve Rowen, A. L. (2002). *Modern marine engineer's manual, volume II*. Centreville: Cornell Maritime Press
- IMO. (2008). *Nitrogen oxides (NOx) – regulation 13* 10 Ocak 2021, [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93Regulation-13.aspx).
- IMO. (2010a). *IMO train the trainer (TTT) course on energy efficient ship operation*. 2 Şubat 2021, <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/IMO-Train-the-Trainer-Course.aspx>.
- IMO. (2010b). *Preventions of air pollution from ships*. 9 Mart 2021, <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/M-EPC%2059-4-7-Corr.1%20-%20Second%20IMO%20GHG%20Study%202009.pdf>.
- IMO. (2014). *2014 Guidelines on the method of calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships*. 10 Ocak 2021, <http://shippingregs.org/LinkClick.aspx?fileticket=rVcS1icqnCg%3D&portalid=2>.

IMO. (2018). *Initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships*. 5 Şubat 2021, <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx>.

IMO. (2020). *New IMO 2020 regulation*. 12 Şubat 2021, <https://www.dbgroup.net/en/news/new-imo-2020-regulation>.

Jaspreet, S. D., Adnanes, A. K., Lee, K. M., ve Kennedy, L. (2011). Electrification of port and port operations. *Proceedings of MTEC2011*, 13, 15.

Jeong, B., Oguz, E., Wang, H., ve Zhou, P. (2018). Multi-criteria decision-making for marine propulsion: Hybrid, diesel electric and diesel mechanical systems from cost-environment-risk perspectives. *Applied Energy*, 230, 1065-1081.

Kalhammer, F. R., Kopf, B. M., Swan, D. H., Roan, V. P., ve Walsh, M. P. (2007). Status and prospects for zero emissions vehicle technology. *Report of the ARB Independent Expert Panel*, 1(1), 12-36.

Kolar, J. W., Drofenik, U., Biela, J., Heldwein, M. L., Ertl, H., Friedli, T., ve Round, S. D. (2007). PWM converter power density barriers. *Power Conversion Conference-Nagoya* (1. Baskı) içinde (1-9). Nagoya: IEEE.

Küçükşahin, F. (1999). *Gemi dizel makinelerinin yapıları ve çalışma ilkeleri*. İstanbul: Avcıol Basım Yayın.

Kuhn, E., Forgez, C., Lagonotte, P., ve Friedrich, G. (2006). Modelling Ni-mH battery using Cauer and Foster structures. *Journal of Power Sources*, 158(2), 1490-1497.

Kwasieckyj, B. (2013). *Efficiency analysis and design methodology of hybrid propulsion systems*. Yüksek Lisans Tezi, Marine Engineering and Marine Technology at Delft University of Technology, Delft.

- Lai, J. S., ve Nelson, D. J. (2007). Energy management power converters in hybrid electric and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 766-777.
- Lam, L., ve Bauer, P. (2012). Practical capacity fading model for Li-ion battery cells in electric vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(12), 5910-5918.
- Letafat, A., Rafiei, M., Ardeshiri, M., Sheikh, M., Banaei, M., Boudjadar, J., ve Khooban, M. H. (2020). An efficient and cost-effective power scheduling in zero-emission ferry ships. *Complexity*, 2020, 1-12.
- Litwin, W., Leśniewski, W., Piątek, D., ve Niklas, K. (2019). Experimental research on the energy efficiency of a parallel hybrid drive for an inland ship. *Energies*, 12(9), 1675.
- Liu, Y. C. (2010). Battery management systems for improving battery efficiency in electric vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 4(2), 351-357.
- Mahon, L. L. J. (1992). *Diesel generator handbook*. Boston: Newnes.
- Maritime Telegraph. (2021). Vessel identification. 17 Kasım 2020, <http://mtelegraph.com/gulbeniz-a-imo-9491850.html>
- MER. (2008). Offshore propulsion: powering the offshore industry. *Marine Engineers Review*. 18–22.
- Mikhaylov, K., Tervonen, J., ve Fadeev, D. (2012). Development of energy efficiency aware applications using commercial low power embedded systems. *Embedded Systems-Theory and Design Methodology*, 407-430.
- Mrzljak, V., ve Mrakovčić, T. (2016). Comparison of COGES and diesel-electric ship propulsion systems. *Pomorski Zbornik*, (1), 131-148.

NASA (2018). *NASA aerospace battery workshop*. 16 Mart 2021, <https://www.nasa.gov/batteryworkshop>.

Nguyen, H. P., Hoang, A. T., Nizetic, S., Nguyen, ve. P., Le, A. T., Luong, C. N., ... ve Pham, V. V. (2020). The electric propulsion system as a green solution for management strategy of CO2 emission in ocean shipping: A comprehensive review. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, e12580.

Oberhokamp, F. (2007). *Diesel-electric propulsion concepts-How to match environmental and economical challenges?* 10 Aralık 2020. <https://www.stg-online.org/onTEAM/shipefficiency/programm/OBERHOKAMP.pdf>.

O'Rourke, R. (2009). *Navy DDG-1000 and DDG-51 destroyer programs: background, oversight issues, and options for congress*. 3 Şubat 2021, <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA500951.pdf>.

Øverleir, M. A. (2015). *Hybridization of general cargo ships to meet the required energy efficiency design index*. Yüksek Lisans Tezi, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

Ovrum, E., ve Bergh, T. F. (2015). Modelling lithium-ion battery hybrid ship crane operation. *Applied Energy*, 152, 162-172.

P3 Consulting Group. (2016). *Cost developments of battery systems*. 11 Ocak 2021. <http://www.p3cg.com/>.

Parker, M. N., Geertsma, R. D., Hodge, C. G., Macalindin, A., ve Simmonds, O. J. (2009, June). The impact of future combat system loads on power system design. *Proceedings of "The Engine as a Weapon III" Symposium* (1. Baskı) içinde (23-24). Portsmouth: Rand C.

- Plett, G. L. (2004). Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 2. Modeling and identification. *Journal of Power Sources*, 134(2), 262-276.
- Rolls Royce. (2010). *Hybrid shaft generator propulsion system upgrade*. 25 Nisan 2021, http://www.cargos-paquebots.net/Revue%20de%20presse/0000_IMAGES-05/225-HSG_Rolls-Royce.pdf.
- Sáiz, V. M. M., ve López, A. P. (2007). Future trends in electric propulsion systems for commercial vessels. *Journal of Maritime Research*, 4(2), 81-100.
- Sakalis, G. N., ve Frangopoulos, C. A. (2018). Intertemporal optimization of synthesis, design and operation of integrated energy systems of ships: General method and application on a system with diesel main engines. *Applied Energy*, 226, 991-1008.
- Sangwan, V., Sharma, A., Kumar, R., ve Rathore, A. K. (2016). Equivalent circuit model parameters estimation of li-ion battery: C-rate, SOC and temperature effects. *International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)* (1. Baskı) içinde (1-6). Trivandrum: IEEE.
- Schnurr, R. E., ve Walker, T. R. (2019). *Marine transportation and energy use*. 20 Nisan 2021, https://www.researchgate.net/profile/Tony-Walker-5/publication/335403999_Marine_Transportation_and_Energy_Use/links/5d9c77c6299bf1c363ff4737/Marine-Transportation-and-Energy-Use.pdf.
- Sciarretta, A., Serrao, L., Dewangan, P. C., Tona, P., Bergshoeff, E. N. D., Bordons, C. ve Wu, M. (2014). A control benchmark on the energy management of a plug-in hybrid electric vehicle. *Control Engineering Practice*, 29, 287-298.
- Sciberras, E. A., ve Norman, R. A. (2012). Multi-objective design of a hybrid propulsion system for marine vessels. *IET Electrical Systems in Transportation*, 2(3), 148-157.

- Shepherd, C. M. (1965). Design of primary and secondary cells: II. An equation describing battery discharge. *Journal of the Electrochemical Society*, 112(7), 657.
- Silvas, E., Hofman, T., Serebrenik, A., ve Steinbuch, M. (2015). Functional and cost-based automatic generator for hybrid vehicles topologies. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(4), 1561-1572.
- Smith, T. W. P., Jalkanen, J. P., Anderson, B. A., Corbett, J. J., Faber, J., Hanayama, S., ve Pandey, A. (2014). *Third IMO Greenhouse Gas Study 2014* (1. Baskı) içinde (1-327). London: Micropress Printers.
- Solem, S., Fagerholt, K., Erikstad, S. O., ve Patricksson, Ø. (2015). Optimization of diesel electric machinery system configuration in conceptual ship design. *Journal of Marine Science and Technology*, 20(3), 406-416.
- Sortland, S. (2008). Hybrid propulsion system for anchor handling tug supply vessels. *Wartsila Technical Journal*, 45-48.
- Statista. (2020). *Electricity prices for industries in the European Union in 2019, by country*. 20 Nisan 2021, <https://www.statista.com/statistics/1046605/industry-electricity-prices-european-union-country/#statisticContainer>.
- Sulligoi, G., Vicenzutti, A., Arcidiacono, V., ve Khersonsky, Y. (2016). Voltage stability in large marine-integrated electrical and electronic power systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(4), 3584-3594.
- Tesla (2015). *Battery prices*. 5 Mayıs 2021, <https://electrek.co/>.
- The Boston Consulting Group. (2010). *Batteries for electric cars: Challenges opportunities, and the outlook to 2020*. 21 Eylül 2020,

<https://www.bcg.com/publications/2010/sustainability-automotive-batteries-electric-cars>

The Verge. (2020). *Tesla's Elon Musk said a \$25,000 electric car with next-gen battery in the works.* 30 Mayıs 2021, <https://www.theverge.com/2020/9/22/21450916/tesla-battery-pack-elon-musk-price-kilowatt-hour-ev-cost-tabless>.

Topaloglou, S., Paplambrou, G., ve Kyrtatos, N. (2016). Energy management controller design for hybrid ship propulsion during transient operation. *Proceedings of 28th CIMAC Congress* (50. Baskı) içinde (1-9). Rhodes: ISOPE

Tran, T. A. (2017). Reducing greenhouse gas emissions from ships through analyzing of marginal abatement cost (mac) curves. *Global Journal of Science Frontier Research: E Marine Science*. 2249-4626

Tremblay, O., Dessaint, L. A., ve Dekkiche, A. I. (2007, September). A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. *Vehicle Power and Propulsion Conference* (1.Baskı) içinde (284-289). Arlington: IEEE.

Trzynadlowski, A. M. (2013). *The field orientation principle in control of induction motors*. New York: Springer Science & Business Media.

Unamuno, E., ve Barrena, J. A. (2015). Hybrid ac/dc microgrids—Part II: Review and classification of control strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 52, 1123-1134.

Van Biert, L., Godjevac, M., Visser, K., ve Aravind, P. V. (2016). A review of fuel cell systems for maritime applications. *Journal of Power Sources*. 327, 345-364.

- Van Loon, P. T., ve van Zon, P. (2016). From operational profile to hybrid propulsion. *Proceedings of the 24th international HISWA symposium on yacht design and yacht construction* (14. Baskı) içinde (1-13). Amsterdam: RAI
- Vásquez, C. M. (2014). *A methodology to select the electric propulsion system for platform supply vessels (psv)*. Yüksek Lisans Tezi, Universidade de São Paulo, Sao Paulo.
- Veksler, A., Johansen, T. A., Mathiesen, E., & Skjetne, R. (2013, July). Governor principle for increased safety and economy on vessels with diesel-electric propulsion. *European Control Conference (ECC)* (1.Baskı) içinde (2579-2584). Zurich: IEEE.
- Vie, R. (1998). Commercial experience with electric propulsion on passenger cruise vessels. *Transactions-Institute of Marine Engineers-Series c-*, 110, 1-10.
- Visser, K., Geertsma, R. D., Hasseltalab, A., ve Negenborn, R. R. (2017). Marine engineering at the heart of the autonomous vessel. *SWZ Maritime*, 18-22.
- Volker T. (2013). Hybrid propulsion concepts on ships. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, 79, 66–76.
- Vrijdag, A., Stapersma, D., ve Van Terwisga, T. (2009). Systematic modelling, verification, calibration and validation of a ship propulsion simulation model. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 8(3), 3-20.
- Wang, C., Xiong, R., He, H., Ding, X., ve Shen, W. (2016). Efficiency analysis of a bidirectional DC/DC converter in a hybrid energy storage system for plug-in hybrid electric vehicles. *Applied Energy*, 183, 612-622.

- Wang, H., Oguz, E., Jeong, B., ve Zhou, P. (2018). Life cycle cost and environmental impact analysis of ship hull maintenance strategies for a short route hybrid ferry. *Ocean Engineering*, 161, 20-28.
- Wartsila, (2007). *Wartsila 3146 ship diesel engine service manual*. 20 Eylül 2020. <https://ebooksgift.com/book-details.php?book=4IEE>
- Weintrit, A., ve Neumann, T. (2017). *Miscellaneous problems in maritime Navigation, transport and shipping: marine navigation and safety of sea transportation*. Gdynia: CRC Press.
- Wen, S., Lan, H., Hong, Y. Y., David, C. Y., Zhang, L., ve Cheng, P. (2016). Allocation of ESS by interval optimization method considering impact of ship swinging on hybrid PV/diesel ship power system. *Applied Energy*, 175, 158-167.
- Wen, Z., Cao, J., Gu, Z., Xu, X., Zhang, F., ve Lin, Z. (2008). Research on sodium sulfur battery for energy storage. *Solid State Ionics*, 179(27-32), 1697-1701.
- Wu, M. C., Zhao, T. S., Wei, L., Jiang, H. R., ve Zhang, R. H. (2018). Improved electrolyte for zinc-bromine flow batteries. *Journal of Power Sources*, 384, 232-239.
- Wu, Z. (2017). *Comparison of fuel consumption on a hybrid marine power plant with low-power versus high-power engines*. Yüksek Lisans Tezi, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Zahedi, B., Norum, L. E., ve Ludvigsen, K. B. (2014). Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems. *Journal of Power Sources*, 255, 341-354.

Zahedi, B., ve Norum, L. E. (2012). Modeling and simulation of all-electric ships with low-voltage DC hybrid power systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(10), 4525-4537.

