

Elektrik Tahrikli Bir Geminin Güneş Enerjisi Destekli Tasarımı ve Analizi

Engin ÖZDEMİR¹, İsmail KAYA², Serkan SEZEN³

¹Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 41100, Kocaeli, Türkiye

²Gölcük Tersanesi Komutanlığı, 41950, Gölcük, Kocaeli, Türkiye

³Kocaeli Üniversitesi, Uzunçiftlik Nuh Çimento MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, 41180, Kocaeli, Türkiye

(Alınış / Received: 08.09.2025, Kabul / Accepted: 02.02.2026, Online Yayınlanma / Published Online: 24.04.2026)

Anahtar Kelimeler

Elektrikli Gemi,
Güneş Enerjisi,
Enerji Depolama,
Batarya Teknolojileri,
PVSOL,
Fotovoltaik Sistem

Öz: Deniz taşımacılığı, küresel sera gazı emisyonlarının önemli bir kaynağı olarak çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir tehlike olarak görülmektedir. Özellikle fosil yakıt kullanan dizel motorlu gemilerin, karbon salımı ve hava kirliliği üzerindeki olumsuz etkilerinin görülmesiyle birlikte Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO)'nün de yaptığı regülasyonların sonucu olarak alternatif, çevreci tahrik sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu çalışmada, elektrik tahrikli bir gemi güç sisteminin batarya enerji depolama sistemi içeren bir fotovoltaik (FV) sistem ile bütünleştirilmesi ve performans analizi ele alınmaktadır. Çalışma kapsamında ilk olarak enerji depolama sistemleri ve bu sistemler özelinde batarya teknolojileri ele alınmış, denizcilik sektörünün mevcut emisyon profili, elektrikli gemi teknolojisinin gelişimi ve günümüzden dikkat çeken örnekleri incelenmiştir. Sonraki kısımda ise örnek bir elektrikli vapur üzerinde yapılan konsept tasarım ve PVSOL programı kullanılarak yapılan analizlerle; güneş panellerinden yıllık üretilen enerji miktarı, bu enerjinin gemi elektrik sistemine katkısı, yıllık önlenen karbondioksit miktarı gibi hesaplamalar yapılmakta, potansiyel kazanımları ortaya konulmaktadır. Elde edilen bulgular, yenilenebilir enerji destekli elektrikli gemi teknolojisinin hem çevresel hem de operasyonel açıdan uygulanabilirliğini göstermekte; deniz taşımacılığında daha yeşil bir dönüşüm için önemli bir adım olduğunu ortaya koymaktadır.

Design and Analysis of An Electric Propulsion Ship with Solar Energy

Keywords

Electric Ship,
Solar Energy,
Energy Storage,
Battery Technologies,
PVSOL,
Photovoltaic System

Abstract: Maritime transport, a significant source of global greenhouse gas emissions, is considered a major threat to environmental sustainability. The negative impact of fossil fuel-burning diesel-powered ships, in particular, on carbon emissions and air pollution, coupled with regulations implemented by the International Maritime Organization (IMO), has necessitated the development of alternative, environmentally friendly propulsion systems. This study examines the integration of an electric ship power system with a photovoltaic (PV) system incorporating a battery energy storage system and its performance analysis. The study first examines energy storage systems and, specifically, battery technologies within these systems. The current emissions profile of the maritime sector, the development of electric ship technology, and notable examples from the past are examined. In the next section, a conceptual design of a sample electric ferry and analyses using PVSOL software are used to calculate the annual amount of energy generated from solar panels, its contribution to the ship's electrical system, and the annual amount of carbon dioxide avoided, demonstrating potential gains. The findings demonstrate the environmental and operational viability of renewable energy-powered electric ship technology, demonstrating that it represents a significant step toward a greener transformation in maritime transportation.

1. Giriş

Denizcilik sektörü, yıllar içerisinde; teknolojik gelişmeler, globalleşme ve dünya ticaret hacminin genişlemesiyle birlikte, önemini artırmaya devam etmektedir. Bu durum, gemi filolarının hızla artmasına yol açmaktadır. Dünya ticaretindeki taşımacılığın, ağırlık olarak yaklaşık %90'ı ve değer bazında %65'i gemilerle ile yapılmaktadır [1]. Bunun en büyük sebebi denizyolu taşımacılığının maliyet yönünden sunduğu avantajlardır. Artan gemi sayısı ise, yakıt tüketiminin artmasına ve bu da zehirli gazların salınımını önemli ölçüde artırarak çevre ve insan sağlığını olumsuz etkilemesine sebep olmaktadır.

Gelişen teknoloji sayesinde her ne kadar yeni sistemlerle daha verimli gemiler inşa edilmeye çalışılsa da karbondioksit (CO₂) salımında azalma yerine artış gözlemlenmiştir. Bundan dolayı Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO), 2018 yılında bu konudaki hedeflerini şu şekilde belirlemiştir: Uluslararası deniz taşımacılığında ortalama olarak nakliye işi başına emisyonları 2030 yılına kadar en az %40 azaltmayı ve 2050 yılına kadar 2008'e kıyasla %70'e varan azalmayı amaçlayan bir ilk sera gazı azaltma stratejisini benimsemiştir [2].

Bir geminin uzun ömrü göz önüne alındığında, bu regülasyonları yerine getirmek için yakın gelecekte teslim edilen gemilerde dahi radikal değişiklikler gerektirebilir. Bu kapsamda mevcut teknolojiler yeni yollarla birleştirilmeli, yeni icatlar yapılmalı veya klasik enerji depolama ve tahrik sistemleri yerine alternatif yakıtlar ve tahrik sistemleri küresel sahnede ön plana çıkarılmalıdır.

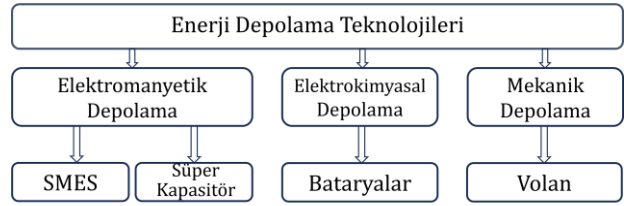
Gemilerde elektrifikasyon süreci bu nedenle çok önemli bir gelişme olmakla birlikte elektrik enerjisi depolama ve elektrikli gemi teknolojileri bu konuda en verimli ve gelişime açık alanlardır. Elektrikli gemiler, deniz taşımacılığının geleceği için önemli bir dönüm noktasıdır. Geleneksel dizel motorlarla çalışan gemiler, çevresel etkileri, yüksek enerji tüketimleri ve sürdürülebilirlik endişeleri gibi bir dizi soruna yol açmaktadır. Gelişen depolama teknolojileri ile birlikte elektrikli gemiler ise bu sorunlara çözüm getirebilecek önemli avantajlara sahiptir. Bu ihtiyaçlar ışığında, bu makalede, emisyonları azaltmanın olası yollarından birine; sırasıyla elektrik enerjisi depolama sistemleri, elektrikli gemi teknolojisi ve bir elektrikli gemi üzerine güneş panelleri monte edilerek yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisinden faydalanılması uygulanmasına odaklanılacaktır.

2. Enerji Depolama Teknolojileri

Enerji depolama sistemleri, modern endüstride enerji verimliliğini artırmak, enerji kaynaklarını optimize etmek ve yenilenebilir enerji entegrasyonunu sağlamak amacıyla giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Özellikle ulaşım sektöründe, enerji

depolama çözümleri, emisyonların azaltılması ve yakıt maliyetlerinin düşürülmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Bir enerji depolama sistemi, temel olarak enerjinin depolandığı bir depolama cihazı, gücün kontrol edildiği ve formunun dönüştürüldüğü bir güç dönüştürücü ve bir kontrol ünitesinden oluşur. Enerji depolama cihazları; bataryalar, volanlar, süperkapasitörler ve süper iletken manyetik enerji depolama sistemleri gibi teknolojilerden oluşur. Bu cihazlar şarj ve deşarj oranı, kullanım ömrü, enerji ve güç yoğunluğu, verimlilik vb. açılardan birbirlerinden farklılık gösterir. Çalışmada ele alınan enerji depolama teknolojilerinin genel sınıflandırması Şekil 1'de sunulmaktadır.



Şekil 1. Enerji depolama teknolojileri

2.1. Süper kapasitörler

Süper kapasitörler, elektrik enerjisini depolamak amacıyla kullanılan, elektro-kimyasal çift katmanlı yapıya sahip gelişmiş enerji depolama elemanlarıdır. Bu sistemler, genellikle nano boyutta tasarlanmış yüzeyel elektrotlar ile iyon geçişine izin veren, ancak fiziksel teması engelleyen bir ayırıcı zar içerir [3]. Elektrotların yüzey alanının yüksek olması, süper kapasitörlerin kapasitesini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu yapı, kimyasal reaksiyonlara dayalı bataryalardan farklı olarak, şarj ve deşarj işlemlerinin tamamen fiziksel süreçlerle gerçekleşmesini sağlar. Bu da süper kapasitörlerin son derece düşük iç dirençle sahip olmasına ve yüksek hızda şarj-deşarj kabiliyeti göstermesine olanak tanır. Ayrıca, çevrim ömürlerinin uzun olması, dayanıklılıklarının yüksekliği ve hava koşullarına karşı duyarlılıklarının azlığı da bu sistemlerin önemli avantajları arasında yer almaktadır.

Enerji dönüşüm verimliliği açısından değerlendirildiğinde, süper kapasitörlerin %90'a varan verimlilik değerlerine ulaşabildiği görülmektedir. Üretimlerinde çevre dostu malzemelerin tercih edilmesi ise, bu teknolojiyi özellikle sürdürülebilir enerji çözümleri açısından cazip hale getirmektedir [4].

Ancak tüm bu avantajlarına rağmen, süper kapasitörlerin sorun olarak görülebilecek bazı sınırları da mevcuttur. Özellikle enerji yoğunluklarının düşük olması, uzun süreli enerji depolama için yetersiz kalmalarına neden olmaktadır. Ayrıca, kendi kendine deşarj olma eğilimleri (self-

deşarj) ve göreceli olarak yüksek üretim maliyetleri, bu sistemlerin yaygın kullanımı önündeki başlıca engeller olarak değerlendirilmektedir [4]. Süper kapasitörler özellikle kısa süreli yüksek güç gereksinimlerinin karşılanmasında ve elektrikli taşıtlar gibi hızlı enerji dönüşümüne ihtiyaç duyan uygulamalarda önemli bir enerji depolama alternatifi olarak öne çıkmaktadır. Günümüzde bahse konu dezavantajlarından dolayı bu enerji depolama teknolojisinin gemilerde kullanımı henüz yaygınlaşmasa da kısa mesafe rotalarını takip eden bazı gemilerde örnekleri mevcuttur [5].

2.2. Volan

Volan enerji depolama sistemleri, kinetik enerjiyi dönen bir kütlede depolayan mekanizmalardır. Bu sistemler temel olarak; dönme hareketi yapan yüksek kütleli bir gövde, manyetik yataklar ve enerjinin aktarımını sağlayan bir iletim ünitesinden oluşur. Kinetik enerji, bu döner yapının hareketiyle biriktirilir ve ihtiyaç duyulduğunda sisteme geri kazandırılır.

Volan sistemleri, genellikle 6000 ila 50.000 devir/dakika aralığında çalışacak şekilde tasarlanabilir. Düşük devirli modellerde enerji yoğunluğu yaklaşık 5 Wh/kg iken, yüksek hızlı versiyonlarda bu değer 100 Wh/kg'a kadar çıkabilmektedir [6].

Bu sistemlerin öne çıkan avantajları arasında, uzun çevrim ömrü ve yüksek şarj-deşarj oranlarına uygunluk yer alır. Nominal işletim koşullarında verimleri genellikle %90 düzeyindedir. Bu nedenle volan sistemleri; ani güç taleplerine hızlı yanıt verebilme yetenekleri sayesinde, kesintisiz güç kaynakları, güç kalitesi yönetimi ve şebeke frekans dengelemesi gibi uygulamalarda kullanım potansiyeline sahiptir.

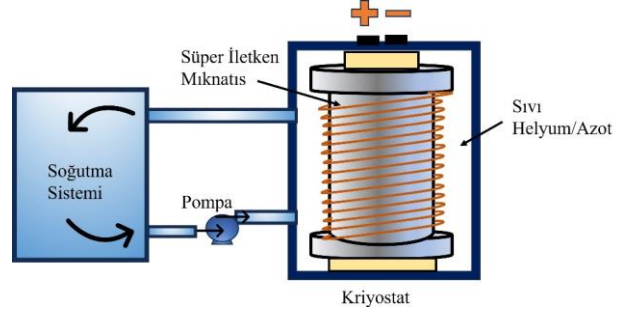
Bununla birlikte, bu sistem açısından bazı dezavantajlar da söz konusudur. Özellikle ilk yatırım maliyetlerinin yüksek oluşu ve boşta çalışırken yaşanan yaklaşık %20 oranındaki enerji kayıpları, bu sistemlerin yaygın kullanımında sınırlayıcı etkenler arasında sayılmaktadır.

Volan sistemi gemilerde hibrit olarak batarya ve süper kapasitör depolama sistemleri ile kullanımına dair örnekleri günümüzde mevcuttur [7].

2.3. Süper iletken manyetik enerji depolama (SMES)

Modern enerji depolama sistemleri arasında öne çıkan süper iletken manyetik enerji depolama (SMES) teknolojisi, elektrik enerjisinin manyetik alan formunda saklanması prensibine dayanmaktadır. Şekil 2'de sistemin yapısı gösterilmektedir. Bu sistemlerde; süper iletken malzemelerden üretilen, kritik sıcaklığın altında tutulan süper iletken bir bobin

içerisinde sürekli olarak dolaşan doğru akım, güçlü bir manyetik alan oluşturmakta ve enerji bu alanda depolanmaktadır. Kriyojenik soğutma ile süper iletkenlik özelliği kazandırılan bu sistemde, depolanan enerji gerekli durumlarda bobinin enerjisinin boşaltılması yoluyla elektrik şebekesine geri aktarılabilir.



Şekil 2. Süper iletken manyetik enerji depolama sistemi yapısı

Süper iletkenlik olgusunun keşfinden bu yana geçen yüzyıllık süreçte önemli teknolojik gelişmeler kaydedilmiştir. İlk dönemlerde süper iletkenlik özelliğinin gözlemlenebilmesi için malzemelerin -270°C'ye kadar soğutulması gerekmektedir, günümüzde yapılan araştırmalar sonucunda bu kritik sıcaklık değeri -170°C seviyelerine kadar yükseltilenmiştir [4]. Bu gelişme, sistemlerin uygulanabilirliğini önemli ölçüde artırmıştır.

SMES sistemlerinin temel bileşenleri şu şekilde sıralanabilir: Süper iletken malzemeden üretilen toroidal bobin, enerji giriş-çıkışı sağlayan güç dönüştürücü, süper iletkenliği sürdürmek için gerekli kriyojenik soğutma sistemi.

Bu teknolojinin diğer depolama teknolojilerine kıyasla başlıca dikkat çekici özellikleri şunlardır:

- Milisaniyeler mertebesinde şarj/deşarj kapasitesi [8],
- %90 ve üzeri enerji dönüşüm verimliliği [8],
- Geleneksel bataryalara kıyasla çok daha uzun kullanım ömrü [9].

Tüm bu avantajlarına rağmen sistemin güvenilirliği, kriyojenik soğutma ünitesinin kesintisiz çalışmasına bağlıdır. Soğutma sistemindeki herhangi bir aksama, süper iletkenlik özelliğinin kaybolmasına ve dolayısıyla depolanan enerjinin hızla tükenmesine yol açabilmektedir.

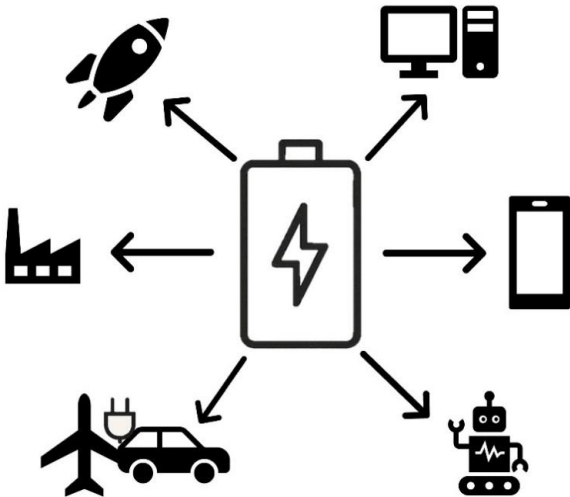
Uygulama alanlarına bakıldığında, 10MW ve üzeri büyük ölçekli sistemlerin genellikle yüksek enerji fiziki deneyleri ve nükleer füzyon araştırmalarında kullanıldığı görülmektedir. Daha küçük ölçekli sistemler ise özellikle yarı iletken üretim tesisleri gibi

enerji kalitesinin kritik önem taşıdığı endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu tür hassas üretim süreçlerinde, SMES sistemleri güç dalgalanmalarını önlemede ve enerji kalitesini korumada etkili bir çözüm sunma yeterliliğine sahiptir.

Süperiletken Manyetik Enerji Depolama Sistemleri (SMES), teorik olarak denizcilikte avantajlar sunabilecek olmasına rağmen, halen ticari gemi uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir teknoloji değildir. Bunun başlıca nedenleri yüksek maliyet, soğutma gereksinimi, enerji yoğunluğu düşüklüğü olarak gösterilebilir. Ancak askeri gemilerde bazı özel uygulamalarda kullanımına yönelik olarak çalışmalar devam etmektedir [10].

2.4. Bataryalar

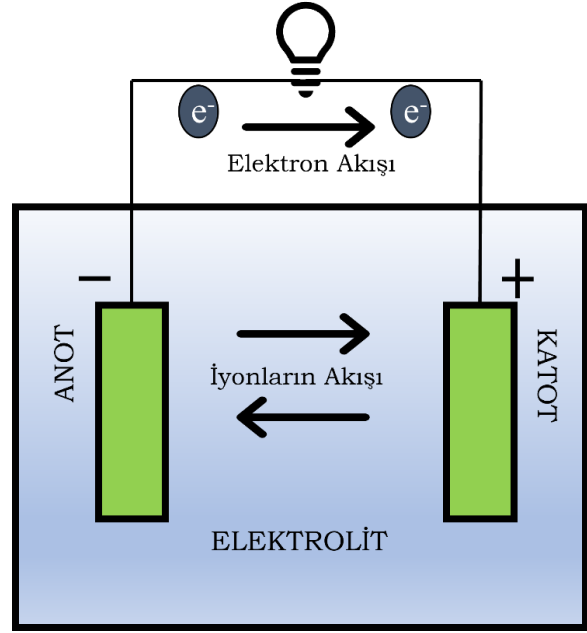
Elektrik enerjisinin depolanması ve yönetiminde kritik bir rol oynayan bataryalar, modern enerji sistemlerinin vazgeçilmez bileşenlerindedir. Şekil 3'te bataryaların iletişimden endüstriye, robotik sistemlerden ulaşıma birçok alanda kullanımı gösterilmektedir. Özellikle son yıllarda elektrikli araç ve yenilenebilir enerji depolama sistemleri teknolojilerinde yaşanan hızlı gelişmeler, batarya teknolojilerine yönelik yatırımları önemli ölçüde artırmıştır. Bu eğilim, sadece teknolojik ilerlemeyle sınırlı kalmayıp aynı zamanda enerji arz güvenliği, karbon emisyonlarının azaltılması ve sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle de doğrudan ilişkilidir. Artan talep doğrultusunda, daha yüksek enerji yoğunluğu,



Şekil 3. Bataryaların kullanım alanları

uzun çevrim ömrü, hızlı şarj imkânı ve düşük çevresel etkiye sahip batarya sistemleri geliştirmek hem akademik araştırmaların hem de sanayi uygulamalarının öncelikli gündem maddeleri arasında yer almaktadır.

Bataryaların temel çalışma prensibi, elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla elektrik enerjisinin kimyasal enerji formunda depolanması ve ihtiyaç duyulduğunda bu enerjinin tekrar elektrik enerjisine dönüştürülmesi esasına dayanmaktadır. Şekil 4'te de gösterilen bu süreç, genellikle bir anot (negatif elektrot), bir katot (pozitif elektrot) ve bu iki elektrot arasında iyon taşınımını sağlayan bir elektrolit vasıtasıyla gerçekleştirilir. Şarj esnasında, elektrik enerjisi kullanılarak elektrotlar arasında kimyasal potansiyel farkı oluşturulur; deşarj anında ise bu potansiyel fark, dış devreye elektrik akımı olarak geri iletilir.



Şekil 4. Bataryaların genel çalışma prensibi

Elektrik enerjisinin depolanmasında kullanılan batarya teknolojileri, günümüz enerji sistemlerinin temel taşlarından birini oluşturmaktadır. Bu teknolojiler, kimyasal bileşimlerine ve tasarımlarına göre farklı performans karakteristikleri sergilemekte olup, her biri belirli uygulama alanları için optimize edilmiştir. Günümüzde kullanılan başlıca pil teknolojileri arasında kurşun-asit, lityum-iyon, nikel-kadmiyum ve sodyum-sülfür gibi batarya çeşitleri öne çıkmaktadır.

Bu teknolojilerin değerlendirilmesinde en önemli parametreler arasında enerji yoğunluğu, döngü ömrü, güvenlik, çevresel etki ve maliyet bulunmaktadır. Her bir teknoloji, bu parametreler açısından farklı avantaj ve dezavantajlar sunmaktadır. Uygulama gereksinimlerine göre yapılacak doğru teknoloji seçimi, sistem performansını ve ekonomik verimliliği doğrudan etkilemektedir.

Gelecekte, malzeme bilimindeki gelişmeler ve üretim tekniklerindeki iyileştirmeler sayesinde batarya teknolojilerinin daha da gelişeceği öngörülmektedir. Özellikle katı hal, lityum-hava ve yeni nesil sodyum bazlı bataryalar gibi teknolojilerin, enerji depolama

alanında yeni standartlar oluşturması beklenmektedir. Bu gelişmeler, enerji depolama sistemlerinin verimliliğini artırırken, maliyetlerin düşmesine ve çevresel etkilerin azalmasına da katkı sağlayacaktır.

Denizcilik sektöründe ise, yaşanan gelişmelere paralel olarak, batarya teknolojilerinin seçiminde; enerji yoğunluğu, menzil, güvenlik, maliyet ve çevresel etkiler gibi faktörler belirleyici olmaktadır. Elektrikli gemilerin yaygınlaşmasıyla birlikte, özellikle lityum bazlı bataryaların kullanımı hızla artmaktadır. Bu teknolojiler, gemilerde dizel jeneratörlerle birlikte hibrit sistemlerde kullanılabilirdiği gibi, tam elektrikli tahrik sistemlerinde de başarıyla uygulanmaktadır. Liman bölgelerinde sıfır emisyonlu operasyon sağlaması, enerji verimliliğini artırması ve bakım maliyetlerini düşürmesi, elektrikli tahrik sistemlerini denizcilik sektörü için cazip kılan başlıca avantajlardır.

Gemicilik sektöründe batarya tabanlı enerji depolama sistemlerinin kullanımı son yıllarda dikkat çekici bir ivme kazanmıştır. Bu gelişmeye örnek olarak, Arjantin ile Uruguay arasında hizmet vermesi planlanan ve dünyanın en büyük tam elektrikli yüksek hızlı feribotu unvanını taşıyan proje gösterilebilir. Söz konusu feribot, 130 metre uzunluğa, 2.100 yolcu ve 225 araç taşıma kapasitesine sahip olup, 40 MWh kapasitesinde batarya sistemi ile donatılmıştır. Bu proje, elektrikli tahrik teknolojilerinin yüksek kapasiteli gemi uygulamalarına entegrasyonundaki ilerlemeyi somut biçimde ortaya koymaktadır [11].

Başka bir örnek olarak Çin'de üretilen 120 metre uzunluğu ve 10 000 tonluk yük taşıma kapasitesiyle üretilen dünyanın en büyük kargo gemisidir. Bu gemi 50 MWh batarya kapasitesi ile elektrikli gemilerin geldiği noktayı ve teknolojik atılımı gözler önüne sermektedir [12].

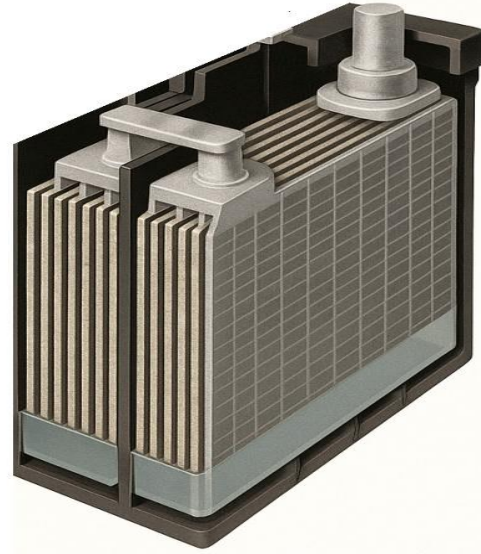
Söz konusu mega ölçekli batarya uygulamalarında da görüldüğü gibi, enerji depolama alanında kullanılan ve her biri kendine has avantajlar sunan batarya teknolojileri mevcuttur. Kurşun-asit, nikel-kadmiyum, sodyum sülfür, lityum-iyon ve katı hal bataryaları gibi farklı teknolojilerin temel çalışma prensipleri ve karakteristik özellikleri bakımından kısa bir değerlendirme yapılması denizcilik sektöründe kullanım alanlarına göre sınıflandırılması açısından gereklidir.

2.4.1. Kurşun asit

Kurşun asitli bataryalar 1890'lı yıllardan beri dünyada en çok kullanılan akülerdir. Sınırlı yaşam döngüsünün ve daha az enerji yoğunluğunun çok fazla önemsenmediği, maliyete duyarlı uygulamalarda hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe araç aküsü olarak, yenilenebilir enerji

sistemlerinde, kesintisiz güç kaynaklarında ve endüstride çok fazla uygulamada yer almaktadır.

Tipik olarak %0,3'ün altında küçük bir günlük kendi kendine deşarj oranına, hızlı yanıt süresine, düşük sermaye maliyetine ve nispeten yüksek çevrim verimliliğine sahiptirler. Çevrim ömrü %80 boşaltma derinliğinde yaklaşık 1500 çevrimdir ve verimlilik %80 ila 90 arasında değişir. Ayrıca kurşun-asit akü, daha düşük maliyetle, kolay geri dönüştürülebilirlikle ve daha basit şarj tekniğiyle temin edilebilen olgun bir teknolojidir [13]. şekil 5'te anot ve katotların sıralı dizilimiyle alakalı kurşun asit batarya yapısına ait bir kesit görülmektedir.



şekil 5. Kurşun asit batarya kesiti

Ancak bu tip pillerin dezavantajları enerji yoğunluğunun düşük olması ve tehlikeli bir madde olarak kurşun kullanılmasıdır. Ayrıca kullanım ömrünü daha da kısaltacağından nominal değerinin %20'sinin üzerindeki deşarjlara uygun değildir.

Kurşun-asit piller, uygun maliyeti ve güvenilirliği nedeniyle hala yaygın olarak kullanılan bir pil olmasına karşın lityum-iyon piller gibi daha hafif ve yüksek enerji yoğunluklu teknolojilerin gelişmesi ve ucuzlamasıyla, bu alanda bazı uygulamalarda yerini yeni nesil pillere bırakmaktadır.

Gemi uygulamaları olarak su üstü gemilerde doğru akımlı (DC) sistemlerde küçük boyutlarda kullanılmasına karşın denizaltı gemilerinde doğrudan ana tahrik sisteminde ana depolama birimi olarak kullanılmaktadır. Tüm dünyada birçok denizaltıda ve ülkemiz donanmasındaki tüm denizaltılarda kurşun asit bataryalar farklı boyutlarda ve formülasyonlarda gemi güç sistemlerinde kullanılmaktadır.

2.4.2. Nikel kadmiyum

Nikel Kadmiyum (NiCd) bataryalar 1915'lerden bu yana ticari olarak kullanılmaktadır. Bu pil teknolojisinde negatif elektrot (anot) olarak metalik kadmiyum (Cd), pozitif elektrot (katot) olarak ise nikel oksihidroksit (Ni(OH)) kullanılır. Elektrolit olarak ise genellikle potasyum hidroksit (KOH) içeren sulu bir çözelti tercih edilir. Kurşun-asit akülere kıyasla daha fazla çevrim sayısına, daha yüksek güce ve enerji yoğunluğuna sahiptir.

NiCd bataryaların derin deşarj aralığındaki ömrü 1500 ila 3000 çevrim arasında olup, kullanılan plakanın tipine bağlı olarak değişmektedir [14].

Nikel-Kadmiyum (NiCd) bataryalar, düşük sıcaklık koşullarında çalışma yetenekleri ile dikkat çeken bir enerji depolama teknolojisidir. Bu piller, -20°C ile -40°C gibi düşük sıcaklık aralıklarında dahi etkin şekilde çalışabilmektedir [15]. Ancak günümüzde, kadmiyumun toksik özellikleri ve nispeten yüksek maliyeti nedeniyle Avrupa Birliği başta olmak üzere birçok bölgede taşınabilir tüketici uygulamalarında kullanımı sınırlandırılmıştır. Bu kısıtlamalar doğrultusunda NiCd bataryalar, günümüzde ağırlıklı olarak sabit endüstriyel uygulamalarda (örneğin, acil aydınlatma sistemleri, UPS sistemleri) kullanılmaktadır.

Performans açısından değerlendirildiğinde, en yüksek verimlilik, pillerin nominal kapasitesinin %20 ila %50'si arasında deşarj edildiği durumlarda elde edilmektedir [16]. Bu durum, özellikle uzun ömür ve çevrim dayanımı açısından sistem tasarımlarında dikkate alınması gereken bir parametredir.

2.4.3. Sodyum sülfür

Sodyum Sülfür (NaS) bataryalar, yüksek sıcaklıklı bir enerji depolama teknolojisi olarak sınıflandırılmakta olup, negatif elektrot olarak sıvı sodyum (Na) ve pozitif elektrot olarak sıvı kükürt (S) içermektedir. Bu iki aktif elektrot malzemesi arasında, katı elektrolit görevi gören beta-alümina ($\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$) seramik bir ayırıcı bulunur.

NaS bataryalar, çalışma sıcaklığı aralığı olarak genellikle 300°C ile 350°C arasında tutulur; bu sıcaklıkların korunabilmesi için harici veya entegre ısıtma sistemleri gereklidir. Bu durum hem enerji tüketimini artırmakta hem de sistem verimliliğini etkileyebilmektedir.

NaS pillerin çevrim ömrü yaklaşık 4.500 şarj-deşarj döngüsü olup, bu değer kurşun-asit bataryalara kıyasla oldukça yüksektir ve enerji dönüşüm verimlilikleri %85'in üzerindedir [17]. Bu pillerin en yaygın kullanım alanlarından biri şebeke enerji yönetimi ve pik yük dengelemesidir (peak shaving).

Özellikle Japonya'da 200'ün üzerinde endüstriyel tesiste NaS piller bu amaçla aktif şekilde kullanılmaktadır.

Uzun ömürleri, yüksek enerji yoğunlukları ve istikrarlı performansları sayesinde NaS piller, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve enerji güvenliği uygulamalarında önemli bir rol oynamaktadır.

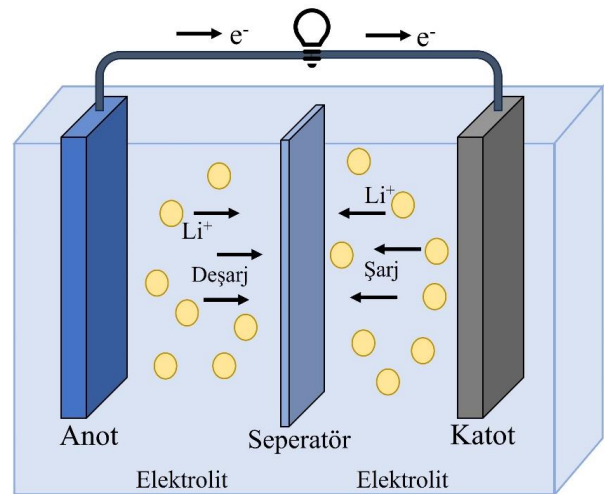
NaS bataryalar çevre açısından zararsızdır. Batarya malzemelerinin %99'dan fazlası geri dönüştürülebilir. Sadece sodyumun, tehlikeli madde olarak işlenmesi gerekmektedir.

2.4.4. Lityum iyon

Lityum-iyon (Li-ion) bataryalar, özellikle taşınabilir elektronik cihazlar, tıbbi ekipmanlar ve elektrikli araçlar gibi uygulamalarda 2000'li yılların başından itibaren yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu, hafiflik ve uzun çevrim ömrü gibi avantajları nedeniyle geleneksel kurşun-asit veya nikel-kadmiyum pillere göre üstün performans sergilemektedir.

Lityum-iyon bataryalarda enerji depolama ve iletimi, pozitif elektrot (katot) ve negatif elektrot (anot) arasında lityum iyonlarının geri dönüşümlü hareketine dayanır. Bu bataryaların pozitif elektrodu genellikle metal oksit türevlerinden, negatif elektrodu ise karbon esaslı malzemelerden, çoğunlukla grafitten oluşur. Elektrotlar arasındaki iyonik iletimi sağlamak amacıyla, elektrolit adı verilen ve iyon taşıma işlevi gören bir ortam bulunur. Elektrolit hem şarj hem de deşarj süreçlerinde iyonların hareketine olanak sağlayarak bataryanın çalışmasını mümkün kılar.

Lityum iyon batarya çeşitlerini birbirinden ayıran temel özellik katot malzemesidir. Bu malzeme, bataryanın enerji yoğunluğu, güç kapasitesi, çevrim ömrü, termal kararlılığı, güvenlik düzeyi ve maliyet gibi pek çok teknik özelliğini doğrudan etkiler.



Şekil 6. Lityum iyonlarının şarj ve deşarj esnasında hareketleri

Lityum İyon batarya çeşitlerinden en çok kullanılanları ve özellikleri şöyledir [19]: Lityum Kobalt Oksit (LCO) kimyasının başlıca avantajı, nispeten yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasıdır. Ancak bu hücre tipi, genellikle daha düşük güç kapasitesi ve daha kısa çevrim ömrü sergilemektedir. LCO tipi hücreler, genellikle üç yıllık kullanım süresi ve orijinal kapasitenin %80'ine kadar birkaç yüz çevrim ömrünün yeterli görüldüğü taşınabilir tüketici elektroniği ürünlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Lityum Mangan Oksit (LMO), katot kimyası açısından kendine özgü bir yapıya sahiptir; spinel kristal yapısı, yüksek güç kapasitesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu bileşik aynı zamanda yüksek termal kararlılığı sayesinde ek güvenlik avantajlarına da sahiptir. Ancak, kobalt bazlı bileşiklerle kıyaslandığında belirgin şekilde daha düşük enerji kapasitesine sahiptir ve özellikle yüksek sıcaklıklarda çevrim ömrünün daha kısa olduğu bilinmektedir.

Nikel Mangan Kobalt Oksit (NMC) katot kimyası, en yeni lityum-iyon batarya teknolojilerinden biri olup, büyük ölçekli uygulamalarda günümüzde pazar lideri konumundadır. Bu teknolojinin en önemli avantajı, içerdiği elementlerin özelliklerini bir araya getirmesidir: Nikel yüksek özgül enerji sağlar, kobalt yüksek özgül enerjiye ek olarak kararlılık sunar ve mangan ise tabakalı yapıya katkı sağlayarak kimyasal stabiliteyi artırır. Bu bileşimdeki elementlerin oranları değiştirilerek, güç yoğunluğu, enerji yoğunluğu, maliyet ve güvenlik açısından farklı özellikler elde edilebilmektedir; böylece hücreler belirli uygulamalar ya da uygulama gruplarına özel şekilde özelleştirilebilmektedir.

Lityum Demir Fosfat (LFP) katot kimyası da yapısal olarak çoğu diğer katot malzemesinden önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bu yapının en belirgin avantajı, termal kaçak durumunda potansiyel riskin daha düşük seviyede olmasıdır. Ayrıca, bu hücreler sıcaklık dalgalanmalarına karşı daha dayanıklıdır. Bununla birlikte, LFP malzemesinin özgül enerjisi göreceli olarak düşüktür. LFP bazlı hücrelerin güç kapasitesi doğal olarak düşüktür; ancak, bu malzemenin az miktarda başka elementlerle katılanması ve iletken kaplamaların kullanılması sayesinde, yüksek güçlü batarya hücrelerinin geliştirilmesi mümkün hale gelmiştir.

Lityum iyon pil paketi fiyatları 2023'ten itibaren %20 düşerek kilovatsaat başına 115 dolarlık rekor düşük seviyeye gerilemiştir. Düşüşe neden olan faktörler arasında hücre üretim kapasitesi fazlası, düşük metal ve bileşen fiyatları, daha düşük maliyetli lityum-demir-fosfat (LFP) pillerin benimsenmesi ve elektrikli araç satış büyümesindeki yavaşlama gösterilmektedir [20]. Bu düşüşün ilerleyen yıllarda devam etmesi tüm sektör tarafından beklenmektedir.

Lityum-iyon batarya teknolojileri, yüksek enerji yoğunlukları, uzun çevrim ömürleri ve hızlı şarj/deşarj kapasiteleri sayesinde yalnızca otomotiv sektörlerinde değil, aynı zamanda denizcilik sektöründe de önemli bir dönüşümün temelini oluşturmaktadır. Artan çevresel kaygılar, Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından belirlenen sera gazı azaltım hedefleri ve fosil yakıt kullanımının sınırlandırılmasına yönelik küresel eğilimler doğrultusunda, lityum-iyon bataryalar, geleneksel enerji depolama sistemlerine kıyasla çevreci ve sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıkmaya devam edecektir.

Teknolojinin olgunlaşmasıyla birlikte maliyetlerin düşmesi, farklı kimyasal yapıların (LFP, LMO vb.) denizcilik uygulamalarına göre optimize edilmesi ve enerji güvenliğine yönelik sağladığı avantajlar, gelecekte geleneksel batarya sistemlerinin büyük ölçüde yerini lityum-iyon teknolojilerine bırakacağını göstermektedir.

2.4.5. Katı hal batarya

Katı hal bataryaları (Solid-State Batteries, SSB), günümüzde özellikle elektrikli taşıtlar ve yüksek enerji gerektiren mobil uygulamalar için umut vadeden enerji depolama sistemleri arasında yer almaktadır. Bu batarya teknolojisi, geleneksel lityum-iyon bataryalardan farklı olarak sıvı elektrolitler yerine katı elektrolitlerin kullanılmasıyla öne çıkmaktadır. Katı elektrolitlerin kullanımı, bataryaların enerji yoğunluğu, güvenliği, çevresel dayanıklılığı ve döngü ömrü gibi birçok önemli özelliğini doğrudan etkilemekte ve geliştirmektedir.

Katı hal bataryalarının en dikkat çekici avantajlarından biri, yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmalarıdır. Lityum iyon bataryaların piyasayı domine ettiği, enerji yoğunluğu sınırına ulaşıldığı ve yeni bir teknoloji arayışına girildiği günümüzde katı hal bataryalar umut vadeci olarak görülmekte, bu konudaki çalışmalar ve yatırımlar yoğunlaşmaktadır. Özellikle lityum metal anotların kullanımıyla birlikte yüksek enerji yoğunluklarına ulaşılması mümkündür. Yapılan çalışmalar ilerleyen yıllarda farklı materyallerin kullanımıyla katı hal batarya teknolojisinde enerji yoğunluğunun 500 kW/s değerlerinin üzerine çıkılabileceğini göstermektedir [21]. Bu değer, geleneksel lityum-iyon bataryalar sunduğu enerji yoğunluğunun çok üzerinde olup elektrikli gemiler, elektrikli araçlar gibi menzil kaygısı yaşanan araçların menzilinı ciddi ölçüde artırabilecektir. Aynı zamanda, katı hal bataryalar sıvı elektrolitli sistemlere kıyasla daha hafif ve kompakt bir yapı sunarak, alandan ve ağırlıktan tasarruf sağlamayı vadetmektedir.

Güvenlik açısından da katı hal bataryaları önemli avantajlar taşımaktadır. Yanıcı olmayan katı elektrolitler, termal kaçak riskini ciddi oranda

azaltmakta, bu da özellikle elektrikli araçlar gibi yüksek enerji yoğunluğu gerektiren uygulamalarda kritik bir güvenlik faktörü sunmaktadır. Ancak ne var ki teorik olarak vad edilen yüksek güvenlik özellikleri henüz test edilememiş ve gelişme aşamasında olan bu batarya teknolojisinde yaşanacak somut gelişmelerle birlikte kendini ispatlamaya muhtaçtır [22].

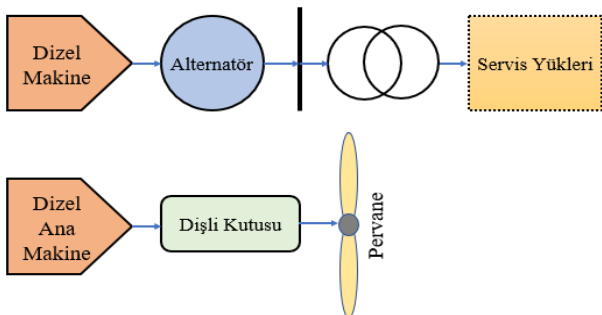
Katı hal bataryaların teorik olarak bir diğer üstün yönü, kimyasal kararlılıkları sayesinde hızlı şarj/deşarj özellikleri göstermeleridir. Bu özellik, kullanıcılar açısından şarj süresinin kısalması, endüstriyel uygulamalarda ise yüksek güç talebine kısa sürede cevap verilebilmesi anlamına gelmektedir. Ayrıca, katı hal bataryaların çevrim ömrü oldukça uzundur; bu da uzun vadede bakım ve değişim maliyetlerini düşürür.

Bunlarla birlikte, bu teknolojinin olgunlaşmasının önünde şimdilik bazı engeller bulunmaktadır. Özellikle katı elektrolitlerin üretimi ve işlenmesi yüksek maliyetlidir. Ayrıca elektrolit ve elektrotlar arasındaki ara yüzey stabilitesi, iyon iletkenliği, şarj-deşarj döngüsü, üretim ölçeklenebilirliği gibi konular, bu bataryaların ticari ölçekte yaygınlaşması için gelişime muhtaç konular olarak durmaktadır [23]. Fakat bu sorunlara rağmen, katı hal batarya geleceğin enerji depolama teknolojisi olarak görülmekte, dünya çapında birçok akademik araştırma yapılmakta ve büyük batarya üreticisi firmalar, katı hal batarya teknolojisinin geliştirilmesine yatırım yapmaktadır.

3. Gemi Tahrik Sistemleri

3.1. Geleneksel dizel tahrik sistemleri

Şekil 7'de şematik gösterimi verilen geleneksel dizel güç sistemleri; dizel ana makine ve dizel jeneratörlerden oluşan mekanik-elektrik paralel mimarisi ile denizcilik endüstrisinde uzun yıllar hakimiyetini sürdürmüştür. Bu sistemlerin yaygın altyapı desteği ve nispeten düşük ilk yatırım maliyetleri gibi avantajları bulunmakla birlikte, %30-45 bandında kalan düşük enerji verimliliği ve yüksek emisyon değerleri gibi önemli dezavantajları mevcuttur. Mekanik şanzıman kayıpları ve yük değişimlerine yavaş tepki verme gibi teknik sınırlamalar da bu sistemlerin performansını olumsuz etkileyen faktörler arasında sayılabilir.

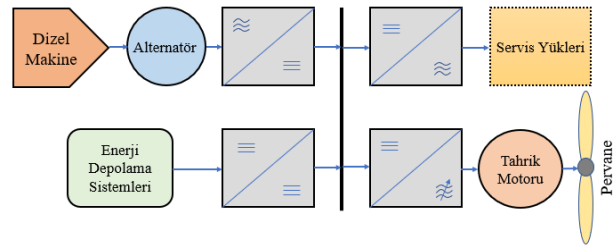


Şekil 7. Geleneksel dizel ana makine ve dizel jeneratör ile gemi güç sistemi

Dizel makinelerin kullanıldığı geleneksel gemi güç sistemleri, sera gazı emisyonlarının azaltılması için yürürlüğe giren regülasyonlar sebebiyle yerini yeni sistemlere bırakma eğilimindedir.

3.2. Hibrit tahrik sistemleri

Hibrit güç sistemleri, dizel jeneratörler ile farklı enerji depolama sistemlerinin entegrasyonu sonucu ortaya çıkan ara çözümler olarak değerlendirilebilir. Bu sistemler, dizel jeneratörlerin optimum yük aralığında çalıştırılmasına imkan vererek %15-25 oranında yakıt tasarrufu sağlayabilmektedir. Ancak batarya ömrü, termal yönetim gereksinimleri ve karmaşık kontrol algoritmaları ihtiyacı gibi teknik zorluklar bu sistemlerin yaygınlaşmasını sınırlandıran faktörler olarak karşımıza çıkmaktadır. Geleneksel sistemlere kıyasla daha düşük emisyon değerleri sunmalarına rağmen, hibrit sistemler tam elektrikli moda geçiş sürecinde bir ara aşama olarak değerlendirilmektedir. Şekil 8'de dizel makine ile enerji depolama sistemlerinin birlikte çalıştığı hibrit bir sistemin şematik gösterimi sunulmaktadır.

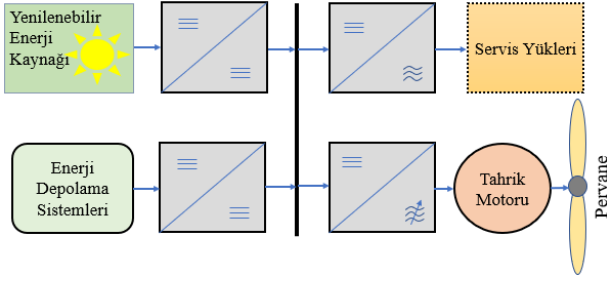


Şekil 8. Dizel jeneratör ve enerji depolama sistemi ile hibrit güç sistemi

Dizel jeneratör ve enerji depolama sistemlerinin hibrit kullanımıyla; elektrik enerjisi depolama sistemleri, sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG) depolama sistemleri, yakıt hücresi gibi diğer enerji sistemlerinin birlikte kullanımı son yıllarda gözlemlenmektedir.

3.3. Elektrikli tahrik sistemleri

Tam elektrikli güç sistemleri ise; yenilenebilir enerji kaynakları, yüksek kapasiteli enerji depolama çözümleri ve elektrikli tahrik motorlarının entegrasyonu ile oluşturulan en gelişmiş konfigürasyonlardır. Sisteme ait temel şematik gösterim Şekil 9'da verilmiştir. Bu sistemlerin en önemli avantajları arasında sıfır emisyon özelliği, %80-90 bandına ulaşan yüksek enerji verimliliği ve modüler tasarım esnekliği sayılabilir. Özellikle liman operasyonlarında çevresel etkilerin minimize edilmesi açısından büyük önem taşıyan bu sistemlerin yüksek ilk yatırım maliyetleri ve şarj altyapısı bağımlılığı gibi sınırlamaları bulunmaktadır. Hibrit ve geleneksel dizel sistemlerden temel farkı, tamamen fosil yakıtsız çalışma imkânı sunmasıdır.



Şekil 9. Yenilenebilir enerji kaynağı (güneş) ve enerji depolama sistemi ile bütünleşik bir elektrikli güç sistemi

Elektrik enerjisi depolama sistemleri ve güneş, rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklarının birlikte kullanılması tamamen karbon nötr bir deniz taşımacılığı için en önemli kilometre taşlarından biri olarak değerlendirilmektedir.

Son yıllarda deniz taşımacılığında elektrifikasyon süreci hız kazanmış ve 2025 itibarıyla yeni sipariş verilen feribotların %70'i elektrikli sistemlere sahip olmuştur [24]. Bu artış, yalnızca teknolojik gelişmelerin bir sonucu değil, aynı zamanda çevresel kaygılar, uluslararası regülasyonlar ve kamu destekli teşvik mekanizmalarının bir yansımasıdır. Özellikle kısa ve orta menzilli hatlarda faaliyet gösteren feribotlar, elektrikli tahrik sistemlerinin sunduğu menzil ve şarj süresi gibi teknik avantajlardan daha verimli şekilde yararlanabilmektedir. Geleneksel dizel motorlu sistemlerin sebep olduğu hava ve gürültü kirliliğine alternatif olarak geliştirilen elektrikli çözümler, başta Norveç, Çin ve Kanada olmak üzere birçok ülkede yaygınlaşmakta hem çevresel sürdürülebilirlik hem de işletme maliyetlerinde tasarruf açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Elektrikli gemilere olan talebin bu denli artması, denizcilik sektöründe köklü bir dönüşümün habercisi olarak değerlendirilmektedir.

4. Güneş Enerjisi Destekli ve Batarya Depolamalı Bir Elektrikli Yolcu Vapurunun Tasarım, Modelleme ve Performans Analizi

İklim krizi, fosil yakıtların azalması ve artan enerji maliyetleri, ulaşım sektöründe sürdürülebilir alternatiflerin önemini her geçen gün artırmaktadır. Deniz ulaşımı da bu dönüşümden payını almakta; özellikle şehir içi ve kıyıya yakın turistik hatlarda sıfır emisyonlu çözümler öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, tamamen elektrikli tahrik sistemine sahip ve güneş enerjisiyle desteklenen yolcu vapurları, çevre dostu ve yenilikçi bir çözüm olarak dikkat çekmektedir.

Bu çalışmada, yaklaşık 100 kişilik, güneş panelleri entegre edilmiş, elektrikli bir yolcu vapurunun teknik gereksinimleri, enerji sistemi tasarımı ve sürdürülebilirlik avantajları ele alınmaktadır. Çalışma kapsamında tasarlanan elektrikli vapurun üç boyutlu konsept modeli, Şekil 10'da sunulmaktadır.



Şekil 10. Tasarlanan konsept elektrikli vapura ait görsel

4.1. Vapur tasarım özellikleri ve boyutları

Tasarımı yapılan vapur, 100 yolcu kapasiteli olup, şehir içi hatlarda yolcu taşımacılığı veya kısa mesafeli turistik geziler amacıyla kullanılmak üzere planlanmıştır. Vapurun yaklaşık 25 metre uzunluğa ve 7 metre genişliğe sahip olması öngörülmektedir. Gövde yapısı olarak katamaran tipi tercih edilmiştir; bu yapı, sağladığı yüksek denge performansının yanı sıra güneş panellerinin yerleştirilmesine elverişli geniş yüzey alanı sunması bakımından uygun bir seçenektir. Tekne ağırlığının azaltılması ve buna bağlı olarak enerji tüketiminin en aza indirgenmesi amacıyla, gövde yapımında hafif kompozit veya alüminyum malzeme kullanılması planlanmaktadır.

Bu vapur tamamen elektrikli tahrik sistemiyle çalışacak şekilde projelendirilmiştir. Bu nedenle, tahrik sistemine ek olarak servis yükleri ve yardımcı sistemler de dahil olmak üzere tüm ekipmanlar elektrikli olarak seçilecek ve bu doğrultuda bir güç (yük) analizi gerçekleştirilecektir. Yapılacak bu yük analizi batarya kapasitesi, evirici ve diğer elektrikli ekipmanların seçiminde yol gösterici olması açısından önemlidir.

4.2. Güç (Yük) analizi

Güç analizi dizel tahrikli, hibrit, elektrikli vb. tüm gemilerde tasarım aşamasından önce yapılması gereken bir analizdir. Elektrikli tahrik sistemine sahip gemi tasarımlarında güç analizi, gemide yer alan tüm elektrikli sistemlerin enerji gereksinimlerinin sistematik biçimde belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmektedir. Bu analiz, hem sistemlerin güvenilir biçimde çalışmasını sağlamak hem de enerji depolama birimlerinin (örneğin batarya sistemlerinin) ve diğer bazı sistem bileşenlerinin doğru boyutlandırılmasına olanak tanıması açısından kritik bir adımdır.

Güç analizi süreci, öncelikle gemide yer alacak tüm elektrikli yüklerin tanımlanmasıyla başlar. Bu yükler, ana tahrik motorları, yardımcı sistemler, servis donanımları, aydınlatma, iklimlendirme ve seyir ekipmanları gibi bir dizi bileşeni içermektedir. Her bir

yük için nominal güç değerleri ile günlük operasyon süresi dikkate alınarak, tüketilecek enerji miktarları belirlenir. Bu veriler, enerji depolama sistemlerinin uygun şekilde boyutlandırılması için temel teşkil eder.

Güç analizi, yalnızca teknik tasarım açısından değil, aynı zamanda işletme verimliliği, ekonomik fizibilite çalışmaları, karbon emisyon hesaplamaları ve klas kuruluşları tarafından talep edilen teknik uygunluk onaylarının alınması açısından da önem arz etmektedir. Bu bağlamda, gemilerde güç analizi, bütünlük sistem mühendisliği yaklaşımı içerisinde hem enerji yönetimi hem de sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda vazgeçilmez bir mühendislik süreci olarak öne çıkmaktadır.

Gemilerde elektrik yükleri genellikle; tahrik sistemleri 2000 grubu, elektrik sistemleri 3000 grubu, seyir sistemleri 4000 grubu, yardımcı sistemler 5000 grubu, genel donatım 6000 grubu ve silah sistemleri (savaş gemilerinde) 7000 grubu olmak üzere altı grup halinde ve rakamlı kodlarla belirtilir [4]. Bu kodlar gemide kullanılacak tüm alıcıların hangi grupta kodlanacağını belirler.

Tablo 1’de yapılan yük analizinde toplam elektrik yükü 139,3 kW olarak bulunmuştur. Vapurun itici gücü, iki adet 50 kW elektrik motoru ile sağlanacaktır. Bu motorlar toplamda 100 kW güç üretimi ile yaklaşık 8–10 knot (15–19 km/h) hız sağlayacağı tahmin edilmektedir. Elektrik motorlarının enerji ihtiyacı, yüksek yoğunluklu lityum-iyon bataryalar ile karşılanacaktır. Ortalama bir günde 5 saatlik çalışma süresi baz alındığında, motorların ve yardımcı sistemlerin toplam minimum enerji ihtiyacı yaklaşık 700 kWh olarak hesaplanmaktadır. Bu ihtiyacı en iyi karşılayacak batarya türü olarak lityum-iyon batarya kullanılması hedeflenmiştir.

4.3. Yöntem

Analiz sürecine geçilmeden önce, kullanılan simülasyon yazılımının belirli metodolojik ve teknik kısıtlamalara sahip olduğunun vurgulanması gerekli görülmektedir:

PVSOL ve benzeri ticari fotovoltaik simülasyon yazılımları, temel olarak sabit yüzeyli ve karasal uygulamalar için geliştirilmiştir. Bu tür yazılımlar, en yüksek doğruluğu statik geometriye ve sabit coğrafi konuma sahip sistemlerde sağlamaktadır. Buna karşılık, bir gemi üzerine entegre edilen fotovoltaik sistemlerin performans analizi; platformun sürekli hareket halinde olması, panel eğim ve yönelim açılarının zamana bağlı olarak değişmesi, meteorolojik koşulların mekânsal farklılık göstermesi gibi dinamik değişkenleri içermektedir. Bu nedenle, söz konusu yazılımların gemi uygulamalarında kullanılabilmesi için, hareketli platform davranışının ihmal edildiği sabit referans konumlarına dayalı yaklaşık modelleme yaklaşımlarının benimsenmesi gerekmektedir.

Tablo 1. Tasarımı yapılan vapura ait elektrik yük analizi

No	Grup No	Tüketici	Adet	Güç (kW)	Toplam Güç (kW)
1	2000	Ana Tahrik Motoru	2	50	100
2	3000	Deniz Fenerleri	1	0,15	0,15
3	3000	Güç Yönetim Sistemi	1	0,15	0,15
4	3000	İklimlendirme Ünitesi	1	20	20
5	3000	İklimlendirme (Batarya Odası)	1	5	5
6	3000	Kamera Sistemi	1	2	2
7	3000	Televizyon	2	0,6	1,2
8	3000	Buzdolabı	1	0,8	0,8
9	3000	Yangın Pompası	1	4	4
10	4000	Seyir Ekipmanları	1	2	2
11	3000	Aydınlatma Sistemi	1	1	1
12	3000	Priz	2	1,5	3
TOPLAM					139,3

Bu sınırlamalar dikkate alındığında, açık denizlerde uzun menzilli seyir yapan gemiler yerine, rota ve çevresel koşulları daha öngörülebilir olan iç sularda veya kısa mesafeli hatlarda çalışan yolcu vapurları için yapılan hesaplamaların daha güvenilir sonuçlar üreteceği değerlendirilmektedir. Bu kapsamda, çalışmada hareket ve çevresel belirsizliklerin etkisini azaltmak amacıyla, Kocaeli ili Başiskele ilçesi referans alınarak kısa mesafeli vapur seferleri senaryosu oluşturulmuş ve ilgili sistem parametreleri PVSOL yazılımına bu coğrafi konuma göre tanımlanmıştır.

Ayrıca PVSOL yazılımında tasarlanan elektrikli gemi sistemine birebir uygun bir seçenek bulunmadığından, “3D, Elektrikli Cihazlı, Şebekeye Bağlı PV Sistemi ve Elektrikli Araçlar” sekmesinde bir elektrikli aracı besleyecek şekilde modelleme yapılmıştır.

4.4. Fotovoltaik sistemin boyutlandırılması

Vapurun üst kısmına yerleştirilecek yaklaşık 19,4x6,4=124,3 m²'lik bir alana, %22,21 verimli, monokristal yapıda, 690 Wp maksimum gücünde, 40 adet güneş paneliyle elektrik üretimi yapılacak ve toplamda 27,6 kWp kurulu güce ulaşılabacaktır. Bu sistemin üreteceği günlük enerji miktarı konuma, yaz-kış aylarına ve hava durumuna göre, ışınım seviyesiyle orantılı olarak değişkenlik gösterecektir.

Yaz aylarında ve güneşli günlerde elektrik üretimi artacağı için, fotovoltaik sistemin geminin enerji ihtiyacını karşılamada daha fazla katkı sağlayacağı, kış aylarında veya kapalı havalarda ise katkının daha kısıtlı olacağı öngörülmektedir.

Simülasyon, Tablo 2'de belirtilen verilerin işlenmesiyle yapılmış olup Kocaeli ili Başiskele ilçesine ait 2001-2020 yılları arası iklim verilerine (Meteonorm 8.2) göre hazırlanmıştır. 124,3 m² toplam alana yerleştirilen, 40 adet fotovoltaik modül ile 27,6 kWp kurulu güce sahip elektrik üretimi hedeflenmiş; modüllerin, iki adet evirici aracılığıyla devreye entegrasyonu planlanmıştır. Şekil 11'de fotovoltaik sisteme ilişkin devre şeması gösterilmektedir.

FV (PV) jeneratör çıkışı nominal tepe gücünü 27,6 kWp olarak ifade eder ve standart test koşulları (1000 W/m² ışınım, 25°C hücre sıcaklığı, AM 1.5 spektrumu) altında ölçülen maksimum kapasiteyi yansıtmaktadır.

Vapur, PVSOL yazılımında mevcut seçenekler arasında doğrudan uyumlu bir model bulunmaması nedeniyle, özel bir elektrikli otomobil modeline ait parametrelerin revize edilmesi yoluyla modellenmiştir. Tablo 2'de görülen vapurun toplam enerji tüketimi, güç analizinde belirtildiği gibi 139,3 kW olup, bunun 100 kW'lık kısmı ana tahrik motorları, kalan 39,3 kW'lık kısmı ise seyir sistemleri ve yardımcı sistemler tarafından tüketilmektedir. Sistemde kullanılan enerji depolama birimi, 750 kWh kapasiteli lityum-iyon bataryalar olup bu batarya kapasitesi vapurun 5 saatlik operasyonu için yeterli olacaktır. Şarj işlemi 100 kW gücünde alternatif akım tip 2 (endüstriyel tip) şarj teknolojisi ile gerçekleştirilecektir. Şarj yönetimi, Tablo 2'de görülen "optimize edilmiş PV" modu esas alınarak, mümkün olan en yüksek oranda fotovoltaik sistemden şarj yapılacak şekilde ayarlanmıştır.

Vapura ait tüketim verileri, PVSOL programında elektrikli araç formatı bağlamında simüle edilme zorunluluğu nedeniyle kilometre (km) cinsinden girilmiştir. Haftalık mesafe verileri, vapurun günde 5 saat seyir yapacağı ve vapurun bir saatte ortalama 18 km hız yapacağı verisi ile 139,3 kWh enerji tüketeceği varsayımına göre hesaplanmış, bu doğrultuda 7 × 5 × 18 = 630 km/hafta değeri Tablo 2'de sunulmuştur.

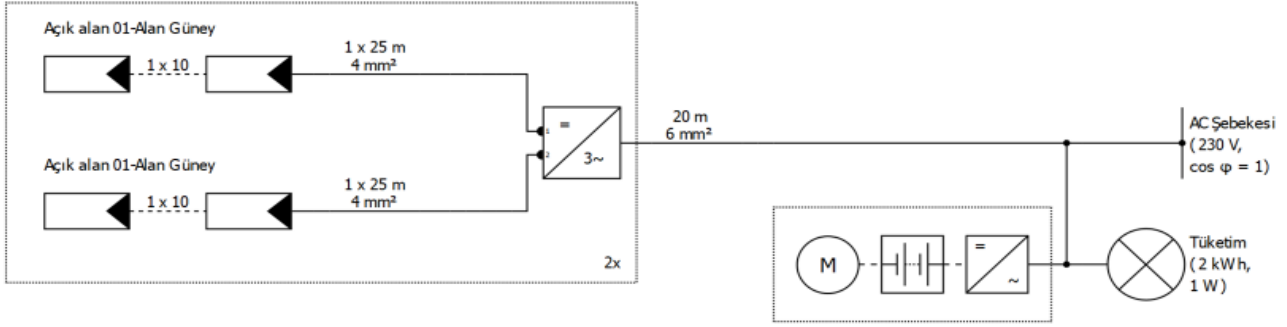
Tablo 2. Tasarıma ilişkin teknik parametreler

FV Sistem	
FV sistem türü - Boyut	Elektrikli araç (vapur) içeren şebeke bağlantılı FV sistem- 3 Boyutlu analiz
Konum	Kocaeli / Başiskele Enlem:40° 42' 55" - Boylam: 29° 55' 2"
Meteorolojik veri kaynağı	Meteonorm 8.2
FV Panel Marka/Model	CW Enerji / CWT690-132TNB 12-V (690Wp@STC)
FV Panel teknolojisi	Mono kristal
FV Panel montaj sistemi	Zemine paralel - sabit
FV Panel sayısı	40
FV Panel eğim açısı	0°
FV panel yüzeyi	124,3 m ²
FV panel çıkış gücü	27,6 kWp
FV panel performans garantisi	10 yıl sonunda %94,6 - 30 yıl sonunda %87,4
Evirici Marka/Model	TommaTech / Trio - Plus K-Series Trio-Plus-K-12.0
Evirici sayısı	2
Evirici konfigürasyonu (MPPT girişi sayısı:2)	MPPT 1: 1 x 10, MPPT 2: 1 x 10
Evirici boyutlandırma faktörü	%115
AC Şebekesi	3 faz (Faz nötr arası gerilim: 230V)
DC Kablolama	100m / 4mm ² / Bakır
AC Kablolama	20m / 6mm ² / Bakır
Elektrikli Araç (Vapur)	
Akü tipi	Li-ion
Akü kapasitesi	750 kWh
Tüketim	139,3 kWh/18 km
Günlük tüketim	700 kWh/90 km
Şarj gücü	100 kW
Şarj teknolojisi	AC Tip 2 (endüstriyel)
Şarj modu	Optimize edilmiş FV
Haftalık istenen menzil	630 km
Günlük çalışma süresi	5 saat

4.5. Analiz sonuçları

Projede, elektrik tahrikli bir yolcu vapurunun enerji ihtiyacının kısmen güneş enerjisi ile karşılanmasını hedefleyen bir fotovoltaik (FV) sistem tasarımı ve simülasyon analizini kapsamaktadır.

PVSOL yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonda, vapur üzerine yerleştirilmiş güneş panellerinin enerji üretim potansiyeli ve sistem performansı değerlendirilmiştir. PVSOL yazılımında araç/vapur üzerine fotovoltaik modül entegrasyonuna yönelik bir modelleme seçeneği bulunmadığından, paneller karada sabit bir alana monte edilmiş gibi simüle edilmiştir. Bu nedenle, yazılımın zorunlu tuttuğu ek tüketici gereksinimi, Şekil 11'de yer alan devre şemasında görülen 1 W'lık temsili bir yük ile karşılanmıştır.



Şekil 11. Fotovoltaik sisteme ait devre şeması

Bu değer, toplam 139,3 kW'lık yük göz önünde bulundurulduğunda ihmal edilebilir düzeyde olup, analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde dikkate alınmayacaktır. Ayrıca, sistem şemasında AC şebekesi olarak gösterilen bağlantı noktası, şarj güç girişini ifade etmektedir.

Tablo 3. PVSOL benzetim sonuçları

Sistem Parametresi	Değer
Yıllık özgül kazanç	1256,44 kWh/kWp
Sistem kullanım (Performans) oranı (PR)	% 88,10
Gölgelemeden dolayı oluşan kazanç kaybı	% 1,2
Kablolama kayıpları	% 0,7
Önlenen CO ₂ salımı	16299 kg/Yıl
FV sistem enerjisi	34700 kWh/Yıl
Elektrikli aracın (Vapur) şarjı	34443 kWh/Yıl
Şebekeye verilen enerji	257 kWh/Yıl
Öztüketim oranı	%99,3
Otarşi derecesi	%11,8

Kullanılan modüllere ilişkin performans düşüş bilgisi Tablo 3'te verilmektedir. Tabloda üretici verisi olarak modüllerin 10 yıl sonunda %94,6, 30 yıl sonra ise %87,4 verimle çalışacağı bilgisi görülmektedir. Buna paralel olarak modüllerden üretilen elektrik miktarı yıllar içinde azalacaktır.

Fotovoltaik sisteme ait hesaplamalar, PVSOL programında yapılan standart kara tesisi kurulumlarından farklı olarak, modüllerin bir kara yapısına değil vapura entegre edileceği göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle ufuk çizgisi, Başiskele ilçesi sahili bölgesinde deniz üzerindeki bir referans noktasına göre belirlenmiştir.

Bu durum, ufuk çizgisi etkisinin oldukça düşük olmasına ve dolayısıyla gölgelemeden kaynaklanan kazanç kaybının minimum seviyede gerçekleşmesine yol açmıştır. Gölgelemeden kaynaklı kazanç kaybı, aynı zamanda sistemin deniz üzerinde, güneye dönük ve 0° eğimli olarak konumlandırılması sayesinde %1,2 seviyesinde gerçekleşmiş olup, bu durum ufuk çizgisi etkilerinin oldukça minimal düzeyde olduğunu göstermektedir. Kara tesislerine monte edilen fotovoltaik modüllerde bu oranın, konuma bağlı olarak genellikle %5'in altına düşmediği bilinmektedir.

Tablo 3'te görülen modül başına üretim verileri bir modülün yıllık ürettiği enerjiyi ifade etmektedir. Analiz sonuçlarına bakıldığında bir modül üzerine düşen yansımaz ışınım miktarı (1426,43 kWh/m²), sistem kullanım oranı (%88,16) ile çarpıldığında yıllık özgül kazanç miktarı 1257,26 kWh/kWp olarak elde edilmiştir. Bu ifade modüllere gelen 1426,43 kWh/m²'lik ışınımın 1257,26 kWh/kWp olarak enerjiye çevrildiğini göstermektedir.

Yıllık özgül kazanç, 1 kWp kurulu güç başına yıllık değeri ifade etmektedir. Dolayısıyla 27,6 kWp'lik güç çıkışı ile çarpıldığında yıllık net üretim miktarı 34.700 kWh/yıl olarak ortaya çıkmaktadır.

Bir modülün yıllık ürettiği enerji miktarını hesaplamak için 0,690 kWp olan panel gücü ile 1257,26 kWh/kWp çarpımından 868 kWh/yıl, bu değer 365'e bölünmesiyle de 2,38 kWh/gün olarak günlük enerji miktarı elde edilmektedir.

Yıllık özgül kazanç, bir fotovoltaik (PV) sistemin birim tepe gücü (kWp) başına yıllık enerji üretimini ifade eden ve doğrudan konuma özgü ışınım verileriyle ilişkili önemli bir performans göstergesidir. Simülasyon için gerekli verilerin temin edildiği Meteorolog veri tabanına göre, Kocaeli ili Başiskele ilçesi için yıllık toplam ışınım miktarı yaklaşık olarak 1426 kWh/m²'dir. Analiz sonucunda elde edilen 1256,44 kWh/kWp değeri ise, sistemin tüm kayıplar (kablo, termal, gölgeleme vb.) dikkate alınarak net enerji üretimini göstermektedir. Bu sonuç, sistem kayıplarının düşük seviyede olduğunu ve FV sisteminin yüksek verimlilikle çalıştığını ortaya koymaktadır.

Sistem kullanım (performans) oranı (PR) olarak ifade edilen %88,10'luk değer, yıllık özgül kazanç ile birlikte değerlendirilmesi gereken, sistem verimliliğini temsil eden kritik bir göstergedir. Sistem kullanım oranı inverter, kablo, sıcaklık, gölgeleme ve diğer sistemsel kayıpların etkileri düşüldükten sonra elde edilir. İncelenen sistemde %88,10'luk değer, düşük kayıplı ve optimize edilmiş bir tasarımın uygulandığını göstermekte olup, verimli bir sistem tasarımına işaret etmektedir.

Tablo 3'te yer alan FV jeneratör enerjisi değeri, Özgül Kazanç \times Tepe Gücü formülü ile doğrulanabilmektedir:
 $1.256,44 \text{ kWh/kWp} \times 27,60 \text{ kWp} \approx 34.700 \text{ kWh}$

Bu hesaplama sonucu, Tablo 3'de görülen elde edilen değer ile yüksek uyum göstermekte olup, kişisel güç tüketimi olarak ifade edilen %99,3'lük oran (34.443 kWh/yıl), üretilen enerjinin büyük ölçüde vapur bataryalarının şarjında veya doğrudan vapurun güç sistemlerinde kullanıldığını ortaya koymaktadır.

Şebekeye aktarılan 257 kWh/yıl'lık enerji ise, PVSOL yazılımının vapur sistemine tam olarak uyum sağlamayan elektrikli araç modeli üzerinden yapılan analizden kaynaklanmakta olup, toplam üretim içindeki %0,7'lik bu pay değerlendirme kapsamında tutulmuştur.

Sistemin otarşi derecesi, toplam enerji tüketiminin ne kadarının fotovoltaik paneller tarafından karşılandığını göstermektedir. Elde edilen otarşi oranı, tüketilen enerjinin %11,8'inin güneş enerjisi ile temin edildiğini, geri kalan kısmın ise şebeke üzerinden şarj edilen bataryalardan karşılandığını ortaya koymaktadır.

5. Tartışma ve Sonuç

Yapılan simülasyon ve analizler, gemi tahrik sistemlerinde güneş enerjisi uygulamalarının, tam elektrikli gemilerin enerji ihtiyacını tamamen karşılayamasa da karbon ayak izinin azaltılması, fosil yakıt bağımlılığının düşürülmesi ve enerji otarşisinin artırılması açısından önemli katkılar sunduğunu göstermektedir. İncelenen senaryoda, gemi çatısına entegre edilen toplam 27,60 kWp kurulu güce sahip fotovoltaik sistem, yıllık özgül kazanç değeri 1257,26 kWh/kWp olarak hesaplanmış ve bu sayede yılda 34.700,26 kWh net enerji üretimi sağlanmıştır. Bu miktar, geminin yıllık toplam enerji tüketiminin yaklaşık %11,8'ine karşılık gelmekte olup, yılda 16,3 ton CO₂ emisyonunun önlenmesi anlamına gelmektedir. Bu çevresel katkı, ortalama bir ağacın yıllık 25 kg CO₂ tutma kapasitesi dikkate alındığında yaklaşık 650 ağacın yıllık karbon tutumuna eşdeğerdir [25].

Literatürde benzer çalışmalar incelendiğinde; İzmir ili Çeşme ilçesine göre analizi yapılan çalışmada, 8-10 metrelik bir yatta kullanılan 6 metrekairelik bir FV sistemiyle elde edilen elektrik enerjisiyle, yattaki seyir ekipmanları, makine dairesi ihtiyaçları ve diğer otel yüklerinin büyük oranda karşılandığı görülmektedir [26].

Bir diğer çalışmada, Myanmar'ın Bago Nehri üzerinde günlük yaklaşık 28 mil (yaklaşık 45 km) güzergahta çalışan, 30 yolcu kapasiteli ve 10,8 m uzunluğundaki bir bot üzerine entegre edilen toplam 68,79 m² fotovoltaik panel alanı ile enerji üretimi

gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonuçları, söz konusu botun toplam güç gereksiniminin nispeten düşük olması nedeniyle, fotovoltaik sistem tarafından üretilen enerjinin teknenin enerji ihtiyacının büyük bir bölümünü karşılayabildiğini göstermektedir [27].

Bu çalışma, literatürde yer alan benzer araştırmalardan farklı olarak, fotovoltaik destekli deniz araçları için yalnızca teorik enerji potansiyeli değerlendirmesi yapmakla kalmamış, aynı zamanda ticari bir simülasyon yazılımı kullanılarak gerçekçi bir operasyon senaryosu altında sistem performansını nicel olarak ortaya koymuştur. Bunun yanında, PVSOL yazılımının gemi uygulamalarındaki metodolojik sınırlılıkları açıkça tartışılmış ve elektrikli gemi sisteminin mevcut yazılım modülleri aracılığıyla yaklaşık olarak modellenebileceği gösterilmiştir. Bu yönüyle çalışma, yalnızca sistem tasarımına değil, aynı zamanda deniz platformlarında fotovoltaik sistem modellemesine ilişkin pratik bir yaklaşım sunarak literatüre özgün bir katkı sağlamaktadır.

Fotovoltaik sistemin entegrasyonu sayesinde bataryaların şebekeden şarj edilme gereksinimi azalmış, bu durum hem işletme maliyetlerini hem de çevresel etkileri azaltmıştır. Mevcut tekne yapısı yerine daha geniş üst güverte alanına sahip farklı gövde tasarımlarının tercih edilmesi veya güneş paneli montaj alanının artırılması, fotovoltaik sistemden elde edilen enerji miktarını artıracaktır. Ayrıca, gemi kullanım amacının yolcu vapuru yerine gezinti teknesi veya yat gibi daha düşük enerji tüketimine sahip platformlar yönünde değiştirilmesi, güneş enerjisinin toplam enerji talebine katkısını artırarak otarşi derecesini yükseltecektir.

Gelecek projeksiyonlarında, bifacial (çift yüzü) fotovoltaik panel teknolojilerinin kullanımı ve yüksek verimli hücre yapılarının ticarileşmesiyle birlikte, gemi üzerindeki kısıtlı kurulum alanlarından elde edilen birim güç miktarının artırılması öngörülmektedir. Ayrıca, yapay zekâ destekli enerji yönetim sistemlerinin meteorolojik veriler ve rota planlaması ile entegre edilmesi sayesinde, güneş enerjisinin gemi içi elektrik şebekesindeki anlık kullanım veriminin maksimize edilmesi mümkün olacaktır. Batarya teknolojilerinde beklenen gelişmeler kapsamında ise, yüksek enerji yoğunluğuna sahip daha hafif enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesiyle platform toplam ağırlığının azaltılması, buna bağlı olarak toplam enerji tüketiminin düşürülmesi ve sonuç olarak daha yüksek otarşi derecesine sahip gemi tasarımlarının gerçekleştirilmesi mümkün hale gelecektir.

Bu bağlamda, gelecekte bu tür yenilenebilir enerji destekli tahrik çözümlerinin yaygınlaştırılması, denizcilik sektöründe sera gazı emisyonlarının azaltılması ve uluslararası çevre regülasyonlarına uyum sağlaması açısından stratejik bir gereklilik haline gelecektir.

Kaynakça

- [1] Öçal, B. 2023. Türkiye ve G8 Ülkelerinin Deniz Ticaret Filoları ve Limanlarının Karşılaştırılması. *Yalvaç Akademi Dergisi*, 8(1). 20-30.
- [2] MEPC. I. 2018. Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. *International Maritime Organization*, 304(72).
- [3] Kötz, R., Carlen M. 2000. Principles and applications of electrochemical capacitors. *Electrochimica Acta*, 45(15-16), 2483-2498.
- [4] International Electrotechnical Commission. 2011. *Electrical Energy Storage*, 32s.
- [5] Supercapacitor Energy Storage System for an all electric ferry – Case study. <https://www.nidec-conversion.com/document/supercapacitor-energy-storage-system-electric-ferry-case-study/> (Erişim Tarihi: 28.05.2025).
- [6] Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., Efthimiou, V. 2009. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1513-1522.
- [7] Hou, J., Sun, J., Hofmann, H. 2017. Battery/flywheel Hybrid Energy Storage to mitigate load fluctuations in electric ship propulsion systems. *American Control Conference*, 1296-1301.
- [8] Kumar, N. 2015. Superconducting magnetic energy storage (smes) system. *Optimization in Power System; Woodhead Publishing Series in Energy*, 1-4.
- [9] Adetokun, B. B., Oghorada, O., Abubakar, S. J. A. 2022. Superconducting magnetic energy storage systems: Prospects and challenges for renewable energy applications. *Journal of Energy Storage*, 55, 105663.
- [10] Hernando, C., Munilla, J., García-Tabarés, L., Pedraz, G. 2023. Optimization of high power SMES for naval applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 33(5), 1-5.
- [11] Case Incat Tasmania. <https://www.wartsila.com/marine/products/ship-electrification-solutions/case-incat-tasmania> (Erişim Tarihi: 28.05.2025).
- [12] Largest Electric Battery-Powered Containerships Commissioned in China. <https://maritime-executive.com/article/largest-electric-battery-powered-containerships-commissioned-in-china> (Erişim Tarihi: 28.05.2025).
- [13] Olson, J. B., Sexton, E. D. 2000. Operation of lead-acid batteries for HEV applications. In *Proceedings of the Battery Conference on Applications and Advance*, 11-14 Ocak, Long Beach, CA, ABD, 205-210.
- [14] Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., Efthimiou, V. 2009. Overview of current and future energy storage Technologies for electric power applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 13, 1513-1522.
- [15] Lukic, S. M., Cao, J., Bansal, R. C., Rodriguez, F., Emadi, A. 2008. Energy storage systems for automotive applications. *IEEE Trans. Ind. Electron*, 55, 2258-2267.
- [16] Wehrey, M. C. 2004. What's new with hybrid electric vehicles. *IEEE Power Energy Mag.*, 2, 34-39.
- [17] Oshima, T., Kajita, M., Okuno, A. 2004. Development of sodium-sulfur batteries. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 1(3), 269-276.
- [18] Açıkgöz, İ. C. 2019. Volan ve Lityum-İyon Batarya Enerji Depolama Sistemlerinin Kıyaslanması ve Hibrit Enerji Depolama Sisteminin Farklı Yük Profilleri Üzerinde Performans Analizi. *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, 18s, İstanbul.
- [19] DNV, G. 2016. DNV GL handbook for maritime and offshore battery systems. *DNV GL. Report*, 2016-1056.
- [20] Lithium-Ion Battery Pack Prices See Largest Drop Since 2017, Falling to \$115 per Kilowatt-Hour, BloombergNEF. <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-see-largest-drop-since-2017-falling-to-115-per-kilowatt-hour-bloombergnef/> (Erişim Tarihi: 28.05.2025).
- [21] Wu, D., Wu, F. 2023. Toward better batteries: Solid-state battery roadmap 2035+. *Etransportation*, 16, 100224.
- [22] Janek, J., Zeier, W. G. 2023. Challenges in speeding up solid-state battery development. *Nature Energy*, 8(3), 230-240.
- [23] Joshi, A., Mishra, D. K., Singh, R., Zhang, J., Ding, Y. 2025. A comprehensive review of solid-state batteries. *Applied Energy*, 386, 125546.
- [24] Global Ferry Electrification Accelerates: 70% Of New Orders Go Electric. <https://cleantechnica.com/2025/05/05/global-ferry-electrification-accelerates-70-of-new-orders-go-electric/> (Erişim Tarihi: 28.05.2025).
- [25] How much CO2 does a tree absorb? <https://ecotree.green/en/how-much-co2-does-a-tree-absorb> (Erişim Tarihi: 28.05.2025).
- [26] Günay, O., Gülmez, Y., Atik, O. 2016. *Yatlarda Kullanılan Güneş Enerjisi Sistemlerinin Tasarımı*

Üzerine Bir Araştırma. III. Ulusal Deniz Turizmi Sempozyumu, 103-112.

- [27] Kasaieian, A., Zarkhah, N., Dezfouli, P. A., Samankan, S., Yan, W. M. 2025. A review of the applications of solar photovoltaic in marine vessels and ships. *Applied Energy*, 396, 126178.