

## ARAŞTIRMA MAKALESİ

Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile Sıfır Emisyonlu bir  
Yelkenli Tekne Tasarımı ve Seyir SimülasyonlarıHamdi Sena NOMAK<sup>1</sup>, İsmail ÇİÇEK<sup>2</sup>

Yazışma yazarı:  
Hamdi Sena NOMAK,  
senanomak@gmail.com

<sup>1</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Deniz Ulaştırma Mühendisliği Programı, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0001-8469-2339.

<sup>2</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Bölümü, Tuzla, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0003-4850-1747.

## Referans:

Nomak, H.S. ve Çiçek, İ., (2022), Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile Sıfır Emisyonlu bir Yelkenli Tekne Tasarımı ve Seyir Simülasyonları, Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik, 23(1) 41–54.

Makale Gönderimi : 29 ARALIK 2021  
Online Kabul : 23 ŞUBAT 2022  
Online Basım : 30 MAYIS 2022

**Özet** Mevcut bir yelkenli deniz aracının karbon salınımı yapan sistemleri incelenmiş, tekne performans değerleri belirlenmiş ve "sıfır emisyon" hedefi ile yelkenli deniz aracına entegre yenilenebilir enerji sistemleri ve tasarım değişiklikleri çalışılmıştır. Gerçek meteorolojik şartlar ve işletim senaryoları ile enerji üretimi, depolanması ve tüketimi simülasyon analizleri ile gösterilmiştir. Yenilenebilir enerji üretim birimleri iki kaynak grubu olarak değerlendirilmiştir. İlk grupta, statik enerji üretim sistemleri olarak adlandırılan ve teknenin seyir, demirde bekleme veya limanda bağlı iken enerji üretebilen sistemleri içermektedir. Bu kısımda güneş enerji panelleri ile iki rüzgâr türbini tasarımda kullanılmıştır. Dinamik enerji üretim sistemleri olarak adlandırdığımız ikinci guruptaki birimler, teknenin yelkenli seyri esnasında su akışı enerjisinden faydalanmak amacıyla. Bunlar, iki adet su türbini ile itici ve aynı zamanda enerji üretici birimi olarak da çalışabilen bir elektrik motorunu içermektedir. Her bir enerji üretim sistemi tasarımları performans ve 3-boyutlu yerleşim bakımından değerlendirilmiştir.

Önerilen sistemin doğrulaması üç ayrı senaryo analizi ile gerçekleştirilmiştir. İlk iki senaryo ile Marmara denizinde tipik yelkenli tekne operasyonlarının yapılabilirdiği gösterilmiştir. Üçüncü senaryo olan acil durum senaryosu ile gün içerisinde, rüzgâr şiddeti sıfır iken ve tamamen dolu bataryalar ile, seyir senaryosu programı yürütülmüş ve bataryaların %35 enerji kullandığı hesaplanmıştır. Bu senaryo çalışmaları ile normal yat tipi bir teknenin tüm operasyonlarının tasarımı çalışılan yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılandığı gösterilmiştir. Teknenin tüm operasyonlarında karadan elektrik bağlantısı gerekmediği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Deniz Araçları, Sıfır Emisyon, Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Sevk Sistemi, Su Türbinleri

## Design and Navigation Simulation of a Zero Emission Sailboat Utilizing Renewable Energy Resources

**Abstract** The carbon emission systems of an existing sailing vessel were examined, the boat performance values were determined, and additional renewable energy systems and design changes were studied for obtaining "zero emission". Real meteorological conditions and operating scenarios have been determined and accordingly, energy production, storage and consumption have been demonstrated by simulations. Renewable energy production units are evaluated as two resource groups. In the first group, there are systems called static energy generation systems and that can generate energy both while the boat is underway, at anchor or in port. In this section, solar energy panels and two wind turbines are evaluated in the design. These units, called dynamic energy generation systems, are intended to benefit from the energy of the water flow during the sailing of the boat. These include two water turbines and an electric motor that can act as a propulsion and also an energy generating unit. Each power generation system has been evaluated for both performance and 3-dimensional positioning.

The verification of the proposed system was carried out with three different scenario analyses. With the first two scenarios, it has been shown that typical sailboat operations can be performed in the Sea of Marmara. With the third "emergency scenario", a navigation program was developed and simulated during the day, when the wind speed was zero and with fully charged batteries, and it was calculated that only 35% of battery energy was used. With these scenario studies, it has been shown that all operations of a normal yacht are covered by the renewable energy sources studied. It has been shown that no shore connection is required in any boat operation.

**Keywords:** Marine Vehicles, Zero Emission, Renewable Energy Resources, Propulsion System, Water Turbines.

## 1. Giriş

Fosil yakıt tüketiminin azaltılması konusunun her geçen gün önem kazanması, yenilenebilir enerji kaynakları üzerindeki çalışmaları hızlandırmaktadır. Deniz araçları işletiminde çevreye duyarlılık da finansal sebepler kadar önceliklidir. Ulusal ve uluslararası otoriteler içten yanmalı motorlardan kaynaklanan emisyonlar için çeşitli kural ve düzenlemeler ile NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO<sub>x</sub> gibi emisyonların en aza indirgenmesini sağlamaya çalışmaktadır. Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) Deniz Çevresini Koruma Komitesi tarafından MEPC 280(70) sayılı karar ile (Yang, et.al., 2018), 1 Ocak 2020 tarihinden itibaren gemilerde kullanılan yakıttaki kükürt içeriğinin en fazla %0,5 sınırına düşürülmesi, alınan önlemlere bir örnektir.

Yenilenebilir enerji, doğa tarafından sürekli olarak yenilenen ve doğrudan güneşten (termal, foto-kimyasal ve foto-elektrik gibi), dolaylı olarak güneşten (rüzgâr, hidroelektrik ve biokütlede depolanan fotosentetik enerji gibi) veya çevrenin diğer doğal hareketlerinden veya mekanizmalarından (jeotermal ve gelgit enerjisi gibi) üretilen enerji kaynaklarıdır (Ellabban vd., 2014). Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak fosil yakıt tüketiminin azaltılması üzerine çalışmalar pek çok sektörde gözlenmektedir. Gemiler için içten yanmalı makinelerden kaynaklı emisyonların azaltılması hedefiyle geliştirilen teknoloji çalışmaları hız kazanmıştır. Balestra ve Schjøberg (2020) sıfır emisyonlu bir geminin yakıt hücresi ve bataryalar ile modellemesini ve simülasyon çalışmasını yapmıştır. Bu çalışma ile mevcut dizel-elektrik sevk sistemi olan gemi için alternatif bir hibrit sevk modeli önerilmiştir. Yayınlanan çalışmadaki boyutlandırma ve simülasyon, geminin güvenlik regülasyonunu irdelemeyip, basitçe güç gereksinimi bakımından değerlendirilmiştir. Şenol (2020) gemi kökenli emisyonlara dayalı alternatif sevk sistemlerini değerlendirdiği çalışmasında yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı alternatif sistemlerin geliştirilmesinin, gemilerin ana makine ve güç sistemlerinde emisyon değerlerinin düşürüldüğü yeni nesil tasarımlara öncülük etmesi gerektiğini tespit etmiştir.

Bu çalışmada ise kara ile elektrik bağlantısı olmayan bir tekne hedeflenerek tamamen doğada bulunan rüzgâr ve güneş enerji kaynakları ile enerji elde edilmesi ve işletilebilmesi gösterilmiştir.

Yelkenli bir yat teknesinin ana sevk sistemi rüzgâr enerjisinden faydalanan yelkenlerdir. Ancak, yelkenli teknelerde de rüzgâr olmadığı durumlarda kullanım için ve manevra seyirlerinde geleneksel olarak kullanılan içten yanmalı motor ile seyir yapabilmeye kabiliyeti dolayısı ile çevreye zarar verilmektedir. Yelkenli tekneler için doğada bulunan güneş ve rüzgâr enerji kaynakları mevcut olduğu gibi, teknenin hareketinden dolayı oluşan akıntı da yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Modern yat tasarımlarında da artık güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik elde edilmesi ve depolanması için akademik çalışmalar yanında sektöre ait uygulamalar sıklıkla görülmektedir. Bu uygulamalara ait güneş fotovoltaik (FV) panelleri, rüzgâr türbinleri, yakıt hücresi kullanımı gibi enerji kaynaklarından elektrik elde eden sistemlere ek olarak bataryalar, batarya yönetim sistemleri, DC motorlu iticiler gibi bileşenler de sıklıkla yenilikçi ürünler olarak görülmeye başlanmıştır. Alfonsin vd. (2015) içten yanmalı motorlu (ICE) ticari bir yelkenlinin yakıt hücresi ve pilli bir hibrit tahrik sistemine dönüştürülmesi konusunda teknik bir çalışma sunmuşlardır. Malla (2020) lüks yatlar ve feribotlar için li-ion teknolojisini kullanan pil sistemi tasarımının kriterlerini ele almıştır.

Rüzgâr ve güneş gibi diğer enerji kaynaklarının da eklenmesiyle bir yatın tüm enerji ihtiyacı karbon emisyonlu motorlara ihtiyaç duymadan karşılanabilmektedir. Düzgün tasarlandığında bu uygulamalar güvenilir ve aynı zamanda ekonomik de olabilir. Reddy, J.B. ve Reddy, D.N. (2004) mevcut yerel rüzgâr/güneş ve yük verilerine dayalı bir rüzgâr ve güneş fotovoltaik (FV) hibrit enerji sisteminin istatistiksel performans değerlendirmesi hakkında bir rapor sunmuştur. Denizcilik alanında uygulanabilen FV panelleri ve dönüştürücüleri için merkezi (centralized), sicim (string), çoklu-sicim (multi-string) ve modüle entegre konvertör

(Module-integrated converter) olmak üzere dört teknoloji vardır (Kobougias vd., 2013). Aküler, rüzgâr ve FV panelleri, saatler boyunca kesintisiz güç sağlamak için tasarlanabilir (Reddy, 2004).

Yat uygulamalarına ve bu çalışma ile karşılaştırılabilecek bir çalışma örneği olarak, Bucci, vd. (2020) tarafından yapılan yelkenli bir yat için hibrit-elektrik çözümlerinin tartışıldığı çalışma görülmektedir. Bu çalışma, dizel-elektrik sevk sistemi olan lüks bir yatın seyir durumlarına göre enerji gereksinimlerini göstermesi bakımından değerlidir; ancak bu makalede sunulan yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji ihtiyacı karşılanması konusunda analiz ve simülasyon çalışmasını içermemektedir. Diğer bir örnek çalışma ise Eastlack vd. (2019) tarafından yelkensiz bir süper yat için yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanılması için önerileri içermektedir. Özbay vd. (2020) yatların enerji ihtiyaçlarının güneş enerjisi sistemleri sayesinde karşılanması konusunda ele almıştır. Tercan (2021) ise gerekli elektrik ihtiyacını güneş enerjisinden sağlayan bir tur teknesinin çevresel etkilerini önce simülasyon sonuçlarına göre sonra da teknenin 1 yıllık işletme süresi sonuçlarına göre değerlendirilmiş ve %16 yakıt tasarrufu gerçekleştiğini hesaplamıştır. Güç üretiminde rüzgâr enerjisinden faydalanan uçurtma yapısı ile hidrojen yakıt hücreleri, FV paneller, dikey kanatlı rüzgâr pervanesi, hidro-türbin ile mevcut dizel sevk sistemi birlikte değerlendirilmiştir ve tartışılmıştır. Eastlack vd. (2019)'nin yayınlandığı çalışmada, genel değerlendirme yapılmış olmakla birlikte, tasarım ve yat işletim senaryo analizleri yapılmamıştır. Mauro vd. (2018) ise bir yelkenli tekne için çevreye duyarlı farklı bir tasarım çalışması yaparak dizel motor sevk sistemi olan teknenin hibrit-elektrik amaçlı güç gereksinim çalışması Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile yapılmıştır. Yayınlanan bu çalışma ile bu makalede çalışılan HAD yöntemi ile güç gereksinim analizi benzerlik göstermektedir; ancak bu makale çalışmasında, diğer çalışmalardan farklı olarak, işletim senaryolarına göre tekneye ait hem sevk bakımından hem de diğer tüketicilerin içerildiği güç gereksinim değerlendirilmiş, su türbini ilave edilmiş ve yat işletim senaryoları ile uygulama gösterilmiştir.

Seyir halinde olan bir yelkenli için teknenin altındaki su akışı da bir başka yenilenebilir enerji kaynağıdır. Suyun hareketi kinetik enerji yaratır. Bu enerjinin bir kısmı elektrik üretmek ve depolamak için kullanılabilir. Su gücü yaklaşık 2000 yıldır kullanılmaktadır (Bredariol vd., 2010). İlk zamanlarda en ilkel kullanımlarından birisi tahıl üretmekti ancak o günden bu yana su gücü kullanım teknolojisinin verimi artarak ve boyutları küçülerek gün geçtikçe yaygınlaştı. 1933 yılında, bir teknenin kıç tarafında suyun içerisine yerleştirilen bir jeneratör ile ilk defa bir deniz aracında su gücü elektrik enerjisine çevrilmiştir (Lansing, 1933). 1978 yılında yelkenli bir tekne için elektrik jeneratörü Sebald (1978) tarafından patentlendi. Bu jeneratör, elektrik üretmek için yelkenli teknenin su içerisindeki hareketinden kaynaklı oluşan akıntıyı kullanmaktaydı. Bu türbin bugün LVM firması tarafından Aquagen 24 volt "aqua4gen" ve "aqua6gen" olmak üzere iki farklı modelde kullanılmaktadır (Bredariol vd., 2010). Modern türbin tasarımlarında değişken hızlı makineler kullanılmaya başlamıştır. Değişken hızlı tasarımlar türbinin dönen kütlelerini elektrik sisteminden ayırarak daha önceki türbin tasarımlarına göre bir dizi güç kalitesi avantajı sunarak gerçek ve reaktif gücün yanı sıra, operasyonel olarak arıza durumlarından geçiş kolaylığı sağlayabilmektedir (Ellabban vd., 2014). Literatürde son yıllarda HAD yöntemleri ile su türbini ve sevk sistemi tasarım ve analizlerinde önemli ilerlemeler görmekteyiz. Bal vd. (2015) yatay eksenli türbinlerin performans tahminlemesi konusunda çalışarak örnekler vermiştir. Literatürdeki çalışmalardan bazıları Moody 41 DS teknesi için su türbini tasarımı çalışmasıdır (Alvar, 2016; Ekinci ve Alvar, 2017). Bu makalede su türbini seçim ve entegrasyonu konusunda Ekinci ve Alvar (2017)'in çalışma yöntemi incelenmiş ve makale sonuçlarından faydalanılmıştır. Ayrıca, HAD uygulamasının metodolojisi, Carlton (1994), Bal ve Güner (2009), Çelik vd. (2010), Ekinci (2011), Alvar (2016), Ekinci ve Alvar (2017), Yılmaz ve Çiçek (2018), Sukas vd. (2019), Soydan ve Bal (2021) gibi çeşitli yazarlar tarafından sunulan çalışmalar, su altı sevk ve su türbini çalışmaları için bu çalışmaya örnek teşkil

etmiştir.

Bu çalışmada ise mevcut bir yelkenli tekne için, sıfır emisyonlu işletim ile tüm tekne operasyonlarının yapılabilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan bir sistem tasarımı geliştirilmesi hedeflenmiştir. Kaynak olarak rüzgâr ve güneş enerjisinden faydalanılarak elektrik enerjisi üretimi daha geleneksel olarak görülebilir ancak bu çalışmada ilave olarak, tekne altında suyun dinamik hareketinden faydalanılarak elektrik üretimi ile yenilikçi bir çalışma yapılması da düşünülmüştür. Deniz araçları için farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının ayrı ayrı ele alındığı çalışmalar sıklıkla görülmesine rağmen, mevcut bir yatın rüzgâr, güneş ve akıntı enerjisi ile başarılı bir sıfır emisyonlu tekne işletimi göstermesi bakımından bu makale literatürdeki diğer çalışmalardan farklı entegre bir sistem sunmuştur. Ayrıca, bu çalışmada yapılan seyir senaryoları ile enerji kullanımı analizleri sonraki çalışmalara da örnek olabilecek niteliktedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik üretimi ve teknenin operasyonu için gerekli enerji ihtiyacı iki farklı rotada gösterilmiştir. Bu iki senaryo ile tasarlanan elektrik üretim ve yine bu çalışma ile önerilen motor-itki sistemi üretim ve tüketim analizleri ile gösterilmiştir. İşletim senaryolarında tarihsel meteorolojik verilere bağlı olarak enerji kaynak seviyelerine göre senaryo analizleri ile tasarım doğrulaması yapılmıştır. Üçüncü senaryo olarak acil durum senaryosu yürütülmüş ve rüzgârsız deniz ortamında tekne ile ne kadar seyir yapabileceği gösterilmiştir.

## 2. Metot

### 2.1 Ana Hedefler

Bu çalışmada Moody 41DS adlı geleneksel yat tipi bir yelkenli teknenin mevcut tasarımı incelenmiş ve 'sıfır emisyonlu' tekne genel amacı için 3 boyutlu bir tasarım modeli oluşturulmuştur (bkz. Şekil 1 ve Şekil 2).



Şekil 1. Moody 41DS yelkenlisinin yandan görünüşü.

Enerji bileşenlerinin tasarım ve analiz çalışmalarının başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için aşağıdaki ana hedefler ile çalışma yapılmıştır. Bunlar, mevcut deniz aracı karakteristiklerine göre doğru tasarım oluşturma, itme sisteminin analizi ve raf ürünü birim seçimlerinde kullanılacak teknik kriterleri belirlemede kullanılmıştır. Belirlenen bu maddeler aynı zamanda bu tasarım çalışmasının anahtar başarı ölçütlerini belirler. Çalışmanın analiz sonuçlarına göre tasarım girdisi oluşturabilmek için ve simülasyon sonuçlarının değerlendirilebilmesi amacıyla bu ölçülebilir ana hedefler kullanılmıştır. Bu hedefler tasarım kısıtları ve performans kriterleri olarak iki kısımda değerlendirilmiştir. Performans kriter veya ölçütleri, tasarım sonucu ürünün analizler ile doğrulanmasında kullanılacak kriterler; tasarım kısıtları ise yapılacak olan tasarımdaki limitleri belirler. Bunlar aşağıda gruplandırılarak listelenmiştir:

#### A) Performans Ölçütleri

- Tüm tekne operasyonlarında emisyon sıfır olmalıdır.
- Enerji üretim ve depolama sistemi ile minimum deniz şartlarında (rüzgârsız ve pürüzsüz deniz şartları veya Marmara Denizi yıllık çevre şartları ortalamasına göre) en

az 2 saat kesintisiz yelkensisiz seyir, 3,1 m/s (6 knots) nominal tekne hızı ile sağlanabilmelidir.

- Manevra esnasında sıfır emisyonlu yeni sevk sistemi yukarıda belirtilen performans özelliğini sağlamalıdır.
- Enerji kaynaklarından faydalanarak bataryalar şarj edilmeli ve tüketiciler için yeterli enerji gerektiğinde sadece bataryalardan en az 2 saat süre ile sağlanabilmelidir.
- Yapılacak değişiklikler ile önerilen bileşenler, rüzgâr türbini ve su türbinleri, tekne seyirinde oluşturacakları dirençlerinden dolayı, mevcut tekne performans değerlerini en fazla %25 oranında etkilememelidir.

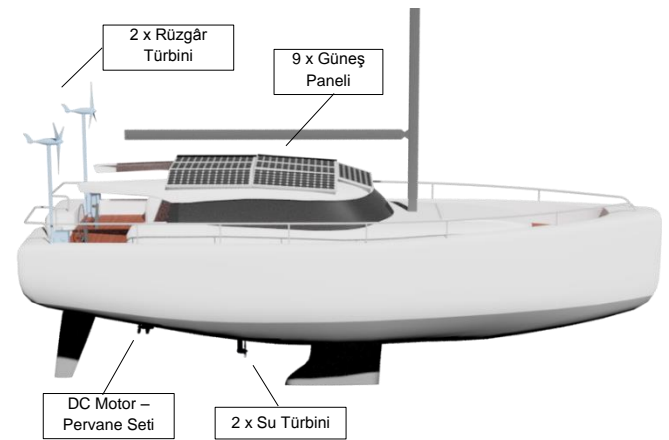
#### B) Tasarım Kısıtları

- Enerji depolamada kullanılacak bataryalar, kara tarafından şarj edilmemeli, sahil bağlantısı devre dışı bırakılmalıdır.
- Tüm elektrik enerjisi gereksinimi, rüzgâr, güneş ve seyir esnasında tekne altında oluşan akıntıdan faydalanılarak sağlanmalıdır.
- Yerleştirilecek sistemlerin toplam ağırlığı, önceki sistemde bulunan tam dolu yakıt miktarına karşılık gelen ağırlıktan daha fazla olmamalıdır.
- Yerleştirilecek sistemler ve bileşenleri, tekne içi insan hareketlerini kısıtlamayacak özelliklerde olmalıdır.
- Bataryalar, şarj eden enerji kaynakları ve DC Motor-Pervane seti bileşenleri, 48 DC ana voltaj hattına bağlanabilecek özelliklerde seçilmeli, buna göre dönüştürücü ve benzeri devre elemanları kullanılmalıdır.
- Enerji yönetim sistemi, üretilebilen enerjinin depolanmasını ve aynı anda batarya guruplarından elektrik enerjisi kullanımını sağlayabilmelidir.

### 2.2 Yöntem

Yukarıda belirtilen hedeflere ulaşabilmek için bu makalede sunulan çalışmalar için izlenen yöntem ve çalışma basamakları Şekil 2'de gösterilmiştir. Enerji bileşenleri tasarımlarında mevcut tekneye ait direnç analizleri yapılmış ve buna göre itme sistemi tasarlanmıştır (bkz. Bölüm 3.1). İtme sisteminin analizleri bataryalardan sağlanan enerji ile seyir amaçlı enerji kullanım özelliklerini tanımlamıştır.

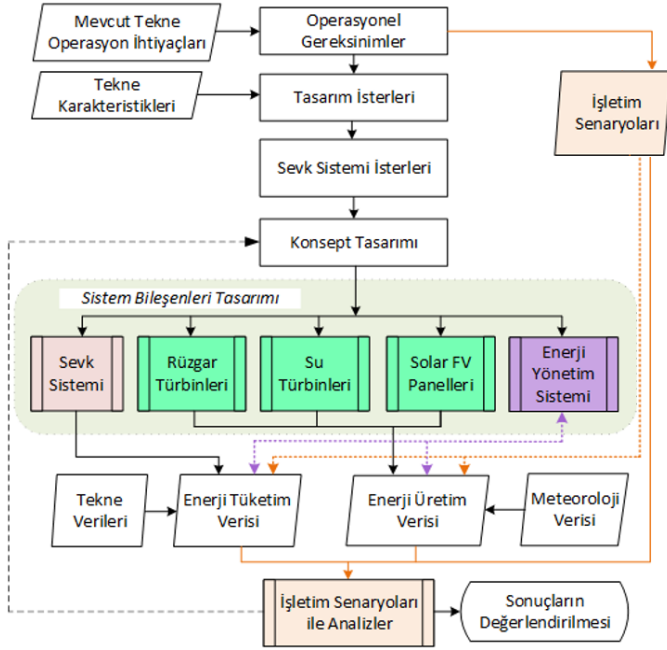
Ana hedefler doğrultusunda tasarım çalışması için güneş panelleri, rüzgâr türbinleri ve seyir esnasında su altı akıntısından faydalanılması en temel yöntem olarak değerlendirilmiştir (bkz. Bölüm 3.2). Bu bileşenlerin tekne uygulaması için ön tasarım, tasarım ve analiz çalışmaları Bölüm 3'te gösterilmiştir. Oluşturulan işletim senaryoları ile (Bölüm 4) seyir simülasyonları gerçekleştirilmiş ve üç ayrı senaryo analizi koşturulmuştur.



Şekil 2. Tasarlanan bileşenlerin mevcut tekne üzerinde görünümü.

Teknede bulunan tüm tüketici enerji ihtiyaçları ile itme amaçlı DC motor-pervane enerji gereksinimleri hesaplanarak analizlerde kullanılmıştır.





Şekil 3. İzlenen yöntem ve çalışma aşamaları.

Şekil 3'te gösterilen akış yolları, bir çalışma ile elde edilen verilerin diğer bir çalışma veya analizde nasıl kullanıldığını göstermektedir. Mevcut teknenin operasyon ihtiyaçları ile şekillenen gereksinimler, tekne karakteristiklerinden kaynaklanan tasarım isterlerini belirlemekte; bunun sonucunda ortaya çıkan sevk sistemi isterleri ile birlikte konsept tasarım ortaya çıkmaktadır. Tasarlanan sistem bileşenlerinin toplamı, tekne ve meteoroloji verilerinden etkilenecek enerji tüketim ve enerji üretim verilerini ortaya çıkartmakta; bu veriler ise işletim senaryoları ve analizlerde kullanılmaktadır.

### 2.3. Mevcut Sistem Tanımı

Moody 41 DS, 12,52 m tam boya ve 4,20 m genişliğe sahip; 11,2 ton ortalama deplasmanda; 41,9 kW gücünde dizel yakıtlı ana sevk sistemi motoruna sahip güverte-salon tipinde bir yelkenli teknedir.

Çalışmada kullanılmak üzere Moody 41 DS teknesinin seçilmesinin birincil nedeni güneş panellerinin yerleştirilebileceği geniş güverte alanlarının olmasıdır. Teknenin adındaki DS'nin tanımladığı "Güverte Salon" kavramı yeni bir yaklaşım değildir. Bu tasarım ile geniş ve ferah iç mekanlar ortaya çıkarılabilmektedir. Teknenin, keskin köşeli, neredeyse dik bordalı, dolgun baş kesitleri olan, geniş kış aynalı formu, su altına yerleştirilmesi planlanan su türbinleri için de tekneyi son derece uygun hale getirmektedir.

Moody 41 DS teknesine ait içten yanmalı motor YANMAR 4JH57 üzerinde yakıttan elde edilen kimyasal enerji, mekanik düzenlemeler vasıtası ile hareket enerjisine dönüştürülmektedir.

Hareket enerjisi, şaft ve dişliler ile pervane sistemine aktarılmaktadır. Teknenin mevcut konfigürasyonunda ana sevk sistemi için 3000 rpm maksimum devire sahip 57 beygir gücünde (41,9 kW) bir dizel motor kullanılmaktadır. Motor seyirinde durgun denizde 1500 rpm devirde 6.3 knot hız, 2100 rpm devirde ise 7 knot hız elde edilmektedir. Tekneye ait performans verileri çalışmada değerlendirilmiş ve kullanılan veriler Bölüm 3.1'de sunulmuştur. Yelkenli tekne performans verileri Tablo 1'de sunulmuş olup, çalışmadaki işletim senaryoları planlamasında faydalanılmıştır.

Tablo 1. Tekne performans verileri.

Seyir Pozisyonu	GRA* (derece)	GRH** (knot)	Tekne Hızı (knot)
Orsa (Close Hauled)	400	20 - 23	6,4 - 6,6
Dar Apaz (Fetch or Close Reach)	600	16-20	6,8 - 7,3
Apaz (Beam Reach)	900	13-15	7,7 - 8,2
Geniş Apaz (Broad Reach)	1200	10-13	S7,1 - 7,5

\*GRA: Görünür Rüzgâr Açısı

\*\*GRH: Görünür Rüzgâr Hızı

### 2.4. Önerilen Sistem Tanımı ve Ön Tasarım

Bu tekne tasarımına uygun olarak enerji bileşenleri iki ayrı grupta değerlendirilmiş olup dört ayrı yenilenebilir enerji kaynağı alt sisteminden faydalanılmıştır. Bunlar Şekil 3'te görsel olarak gösterilmiş ve aşağıda listelenmiştir:

Statik Enerji Üretim Bileşenleri Grubu:

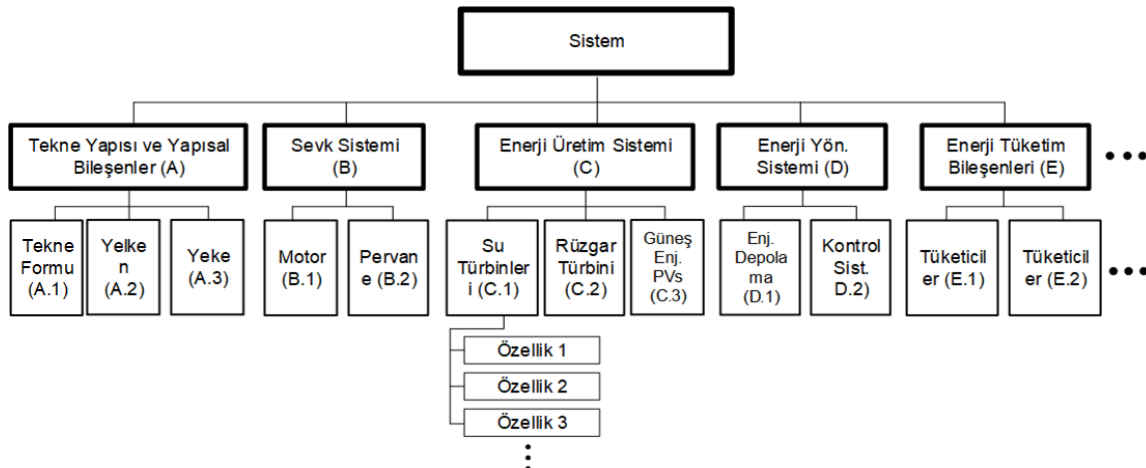
- FV panel grubu
- 2 adet rüzgâr türbini

Dinamik Enerji Üretim Bileşenleri Grubu:

- 2 adet su türbini
- İki kullanım amaçlı (itici veya yelkenli seyir esnasında elektrik üreten) 1 adet DC motor / su türbini

Yukarıdaki listede 'statik enerji üretim grubu' olarak belirtilen yenilenebilir enerji kaynağı sistemleri, seyir, liman ve demirde bekleme esnasında bahsedilen enerji kaynaklarından enerji üretebilen sistemlerdir. Dinamik grup ile adlandırılan grup ise su altındaki akıntı enerjisinden faydalanmak için ilave edilecek su türbinleridir.

Bu çalışmada önerilen yenilenebilir enerji bileşenleri ile sıfır atık konseptini içeren deniz aracı sistemi yapısal bileşenleri, mekanik, elektrik ve yazılım bileşenlerinden ve bunların çalışmalarını destekleyici alt bileşen veya elemanlardan oluşmakta ve birçok dinamik değişken içermektedir. Ana hedefler ile belirtilen gereksinimlerin başarılı bir şekilde alt sistem, bileşen, birim veya elemanlara uygulanabilmesi için Sistem Mühendisliği yaklaşımı ile Şekil 4'te gösterilen Kırılım Diyagramı oluşturulmuştur. Özellikle karmaşık yapıda olan sistemlerin geliştirilmesi çalışmalarında



Şekil 4. Sistem kırılım diyagramı.

sistemi basitleştirerek gereksinimlerin çalışılmasına imkân tanıması bakımından kırılım diyagramları çok önemlidir (NASA, 2007; INCOSE, 2015; Steward, 1981). Şekil 4'te, uygulanacak tüm bileşenler ve buna bağlı ekipmanlar 'Sistem' olarak tanımlanmış ve sistem alt sistem ve bileşenlerine ayrılarak kırılım diyagramı ile gösterilmiştir. Şekil 2'de gösterilen bileşenlere ait alt kırılım diyagramları hazırlanmış, bu makalede sadece en üst kırılım seviyesi gösterilmiştir.

Sisteme ait alt sistemler veya alt bileşenler arasında etkileşimler veya diğer bir adıyla arayüz bağlantıları bulunmaktadır. Sistem mühendisliği yaklaşımı ile kavramsal tasarım ve sistem mimarisi ön tasarımı geliştirilmesi aşamalarında bu diyagramın tanımlanarak kullanılması ve bundan sonraki aşamalarda da tutarlı olarak diyagramın bileşenler için detaylandırılması yapılabilmektedir. Yeni konulacak bataryalardan motora elektrik sağlanması için elektrik arayüzü, güneş enerji panellerinin yerleştirilmesi için mekanik bağlantı arayüzleri, yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji yönetim sistemi arasındaki elektrik arayüzü, enerji yönetim sistemi ile sistemlerin durumunu bilgilendiren algılayıcı veya iletilicilerden gelen bilgileri içeren veri arayüzleri bu etkileşimlere veya arayüzlere örnek olarak gösterilebilir.

Sistem bileşenleri ile mevcut tekne ve bileşenlerinin aralarındaki arayüz tanımları yapılmış; mekanik veya yapısal ara bağlantı, elektrik veya elektronik donanım arayüzü ile data veya sayısal veri iletim arayüzü olarak tüm etkileşimler belirlenmiştir.

### 2.5 Tekne operasyonları ve enerji üretim bileşenleri

Sistem için ana ister olan sıfır emisyon gereksinimini sağlamak amacıyla, mevcut deniz aracındaki karbon emisyonlu içten yanmalı motor çıkartılarak, rüzgârdan faydalanan geleneksel yelken ile seyir haricinde, enerji beslemesi bataryalardan gerçekleştirilen motor-pervane itki sistemi ile diğer elektrik tüketicilerinin taleplerini karşılayabilmek amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarını içermesi gerekmektedir. Bölüm 2.1'de belirtilen ana gereksinimler dikkate alınarak, liman durumunda, seyir esnasında veya demirde bekleme durumlarında mevcut olan yenilenebilir enerji kaynaklarının uygulanması çalışılmış ve Tablo 2'de alt ister tanımları yapılmıştır. Bileşen tasarımları, analizleri veya raf ürün seçimleri aşağıdaki belirtilen ve Tablo 2'de tanımlanan operasyonları içerecek şekilde yapılmıştır:

L: Limanda Bekleme                      M: Manevra  
D: Açıkta Demirde Bekleme            S: Yelken Seyri

Tablo 2. Enerji üretim sistemi bileşenleri ve tekne operasyonları.

No	Enerji Kaynağı	Alt Bileşen	Enerji Üretimi Yapılan Tekne Operasyonu
C.1	Güneş	Güneş (fotovoltaik) panelleri	L, M, S, D
C.2	Rüzgâr	2 adet (iskele- sancak) rüzgâr türbini	L, M, S, D
C.3	Akıntı	2 adet su türbini	S
C.4	Akıntı	İtici pervane, aynı zamanda seyir esnasında su türbini	S

### 2.6. 3-boyutlu görsel tasarım

Sistemin ön tasarımı olarak, SolidWorks kullanılarak sistem ve alt bileşenlerinin gerçek ölçülerinde 3 boyutlu tekne modeli geliştirilmiştir. Bu çalışmada 3 boyutlu tasarım aşağıda belirtilen faydalarından dolayı önemli olmuştur:

- Görsel yerleşimin endüstriyel tasarım bakımından genel değerlendirilebilmesi (görüntü bakımından uygunluk, uygulanacak kısımda monte edilebilirlik, hareket alanının daraltılması, vb.)

- Seçilecek güneş enerji paneli sayısının belirlenmesi
- Analiz çalışmalarında 3 boyutlu modelin analiz ortamına aktarılabilmesi
- 3 boyutlu çizimden sonradan yapılabilecek üretim için 2 boyutlu üretim çizimlerine geçilebilmesi

3-boyutlu görsel tasarım, Bölüm 3'te sunulan bileşen tasarım ve analizlerinin anlatımlarında görsel olarak kullanılmıştır.

## 3. Tasarım ve Analiz

### 3.1 Sevk sistemi

Sevk sistemi bu çalışma kapsamında 2 ayrı bakımdan değerlendirilmiştir, bunlar:

- Mevcut gereksinimlere göre raf ürün teknoloji çözümü, ve
- Seçilen teknoloji çözümüne bağlı pervane tasarımı ve analiz çalışmasıdır.

Tasarımda kullanılan sevk sistemi 1 adet DC motor-pervane pod sisteminden oluşmaktadır. Bu sistem elektrik motoru ile döndürülen sabit kanatlı bir pervaneyi içerir. Podlu tipte L-transmisyon dişlileri ile elektrik motorundan pervaneye aktarılan dönme gücünü itmeye dönüştüren sistemin bu özelliği, yelkenli bir tekne için yer tasarrufu sağlamasından dolayı tercih edilmiştir.

#### 3.1.1 DC Motor-Pervane Seti Seçimi

Benzer tekneler için itme amaçlı geliştirilen ve aynı zamanda teknenin yelken seyrinde geri dönüş sağlayan pervanesi sayesinde türbin olarak çalışarak elektrik üretme özelliğine sahip (hydrogeneration) bir raf ürünü sistem seçilmiştir. Pod Drive 6.0 Evo adı verilen bu sisteme ait bir görüntü Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Sevk sistemi: Pod Drive 6.0 Evo (ePropulsion, 2021)

Sistemde motor hareketlerini kontrol eden bir ünite vardır. Bağlantı arayüzü CAN Bus iletişimi kullanacak ve diğer bileşenler ile haberleşecektir (Gaz kolu, göstergeler, vb.). Seçilen sevk sistemi teknik özellikleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Pod Drive 6.0 Evo teknik özellikleri.

Özellik	Tanım
Anma Voltajı	48 Volts
Anma Akımı	125 Amper
Pervaneye İletilen Güç	9.9 HP
Maksimum Genel Verim	%55
Nominal Devir Sayısı	1500 rpm
Kontrol Sistemi	Uzaktan Kontrol Modülü
İletişim Mesafesi	Kablosuz ≤ 10m / Kablolu ≤ 15m
Net Ağırlık	31 kg
Pervane (Çap / Hatve)	320 mm / 8.73"

#### 3.1.2 Sevk Sistemi: 2-Kanatlı Pervane Tasarım ve Analizi

Moody 41 DS tipi mevcut yelkenli teknenin halihazırda içten yanmalı motora entegre sevk sistemi incelenmiştir. Kullanılan içten yanmalı motor ve Z-drive sevk sistemi genel görünümü Şekil 6'da, genel özellikleri Tablo 4'te, performans karakteristiği ise Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 6. Moody 41DS teknesinde mevcut dizel motor ve sevk sistemi.

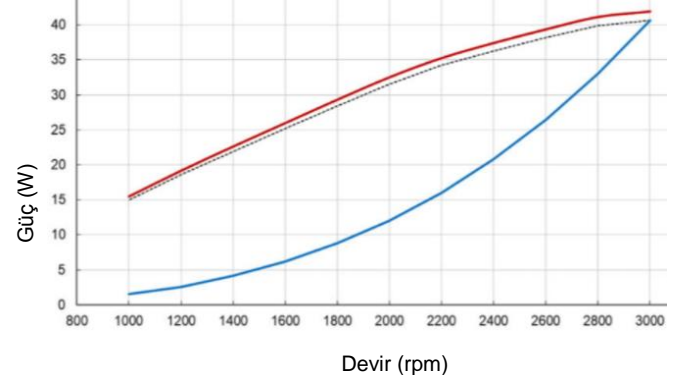
Bu çalışma kapsamında montaj kolaylığı, tekne iç hacminde yer kazanma gibi nedenler ile içten yanmalı motorun yerini elektrik motoru alacak olup elektrik motorunun konumunun pod içinde olması düşünülmüştür. Sonuç olarak pod içindeki elektrik motorunun mili doğrudan pervaneye bağlanacak olup arada devir değiştiren bir düzenek olmayacak, bu da mekanik verimi olumlu yönde etkileyecektir.

Tablo 4. Moody 41 DS sevk sistemi özellikleri.

<b>Güç</b>	41.9 kW
<b>Devir</b>	3000 rpm
<b>Motor Hacmi</b>	2.19 L
<b>Silindir Sayısı</b>	4
<b>Havalandırma</b>	Doğal
<b>Alternatör</b>	12 V. – 125 A.
<b>Ağırlık</b>	220 kg
<b>Ana Boyutları</b>	870 x 589 x 627 mm

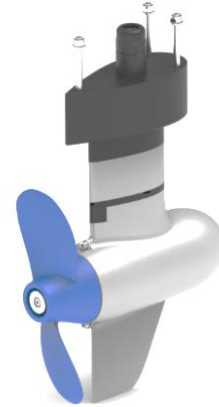
Hali hazırda var olan sistem gücü 41.9 kW olup makine devri 3000 rpm'dir. Buna karşılık kullanılan yelkenli sevk sisteminde devir düşürme oranı 2,49 olup bu da pervane devrinin 1204 rpm olduğunu göstermektedir. Tekne, durgun denizdeki motor seyirinde 533 mm çapındaki 3 kanatlı pervane ile 1500 rpm devir ile 6.3 knot hıza, 2100 rpm devirde ise 7 knot hıza ulaşmaktadır. Şekil 8 ile verilen motora ait bu grafik, 1500 rpm devir için yaklaşık 6 kW güç ihtiyacı olduğunu göstermektedir. Bu devirde elde edilen hız, teknenin gerek manevra operasyonu için gerekse de acil durumlarda güç ihtiyacını karşılayabilecek düzeydedir. Bu nedenle sevk sistemi tasarımında, bu devire ulaşmasını sağlayacak 6 kW güç değeri kullanılmıştır. Bu bilgiler ile pervane tasarımındaki en kritik bilginin yani tasarlanacak pervanenin tüketmesi gereken en yüksek tork değerininin 38 Nm olması gerektiği hesaplanmıştır. Devrin elektrik motorunun pervaneye doğrudan bağlanacağı bilgisi ile 1500 rpm olacağı düşünüldüğünde çapı daha küçük ve kanat sayısı 2 olan bir pervane ile ön tasarıma başlanması uygun görülmüştür. Bu bilgiler ile pervane ön tasarımı için seri pervane tasarımı yöntemi kullanılarak bir başlangıç pervane tasarımı yapılmıştır. Wageningen seri pervanesi kullanılarak pervane ön tasarımı gerçekleştirilmiş, pervanenin performans kontrolleri ön tasarımda kaldırıcı yüzey metodu, detay tasarımda ise hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiş olup her iki aşamada da geometrik değişiklikler yapılarak verimi yaklaşık %54 olan pervane geometrisine ulaşılmıştır. Pervane tasarımı sonrası elektrik motoru doğrudan pervaneye bağlı olan pod tipinde bir sevk sistemi önerilmiştir.

Şekil 5'te gösterilen DC motor tahrik ünitesini kullanan ve 2-kanatlı bir pervaneden oluşan bu sevk sistemi görsel tasarım görünümü Şekil 8'de gösterilmiştir. Yapılan tasarım ve optimizasyon çalışmasında, aynı çap ve hatvede ve sadece 2 kanattan oluşan pervane tasarlanmış ve analizleri ile performans karakteristikleri gösterilmiştir. Ön tasarım için kullanılan pervane tasarım parametreleri Tablo 5'te sunulmuştur.



Şekil 7. Moody 41 DS, performans (güç -devir) grafiği.

2-kanatlı pervane için bu çalışmada yapılan analiz ve optimizasyon çalışması, literatürde son yıllarda yapılan pervane analiz çalışmaları (Yılmaz ve Cicek, 2018; Ekinci ve Alvar, 2018; Ekinci ve Alvar, 2016; Soydan ve Bal, 2021) ile çok benzer bir metodoloji ve hesaplama yöntemlerini içermiştir. Bu sebeple bu makalede pervane tasarım, analiz ve optimizasyon detayları verilmeyerek, çalışmanın diğer kısımlarında gerekli olan sonuç grafikler sunulmuştur. Özet olarak, mevcut 3-kanatlı pervaneye ait kanat ölçüleri baz alınarak ve NACA 16 profili kullanılarak 2-kanatlı pervane tasarımı yapılmış, Tablo 6'da gösterilen pervane tasarım parametreleri oluşturulmuştur.



Şekil 8. Önerilen sevk sistemi, 2-kanatlı pervane görsel tasarımı ile örnek görüntü.

Tablo 5. Pervane ön tasarım parametreleri.

Özellik	Değer	Birim
Kanat Sayısı	2	[-]
Pervane Çapı	0.34	[m]
Göbek Çapı	0.08	[m]
EAR	0.22	[-]
Ortalama Hatve	0.226	[m]
Ortalama Hatve Oranı	0.666	[-]

Elde edilen tasarım modeli, Ansys Fluent kullanılarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ortamına aktarılmış pervanenin tekne üzerindeki hidrodinamik analizleri yapılmıştır. Ansys Fluent, kütle korunumu ve momentum korunumu prensipleri ile Navier-Stokes denklemlerini kullanmakta olup Ekinci ve Alvar (2018)'in çalışmalarında detaylı olarak anlatılmıştır.

Tablo 6. Pervane tasarım parametreleri.

r/R	c/D	P/D	F <sub>max</sub> /c	T <sub>max</sub> /c	Skew <sub>0</sub>	Rake/D	rLe/c
0.2	64.75	226.35	2.69	12.53	-18.46	0.00	1.34
0.3	68.96	226.35	2.93	11.79	-19.89	0.00	1.11
0.4	76.15	226.35	3.41	9.99	-20.92	0.00	0.72
0.5	81.42	226.35	3.77	8.32	-19.57	0.00	0.47
0.6	84.44	226.35	3.71	6.77	-15.08	0.00	0.30
0.7	84.59	226.35	3.05	5.36	-6.97	0.00	0.19
0.8	80.26	226.35	2.21	4.13	5.51	0.00	0.12
0.9	67.68	226.35	1.37	3.14	22.75	0.00	0.08
0.95	56.58	226.35	0.96	2.42	34.49	0.00	0.06
0.98	44.46	226.35	0.72	1.96	42.33	0.00	0.05
1	22.59	226.35	0.53	1.72	48.09	0.00	0.07

Tablo 6'da kullanılan kısaltmalar şunlardır:

- r/R: Kesit yarıçap oranı
- c/D: Kesit kord boyunun çapa oranı
- P/D: Kesit hatvesinin çapa oranı
- F<sub>max</sub>/c: Kesit maksimum sehim değerinin kord boyuna oranı
- T<sub>max</sub>/c: Kesit maksimum kalınlık değerinin kord boyuna oranı
- Skew<sub>0</sub>: Açılmal olarak kesitin çalıklık değeri (kesit orta noktasının dik eksene göre açısı)

Çözüm ağ yapısı oluşturulmasında 2.773.350 eleman kullanmış, ağ yapısı kalite değerleri ise Skewness 0.829, Orthogonal Quality 0.20, ve aspect ratio 11,925 olarak ayarlanmıştır. Sınır koşulları için k- $\omega$  SST türbülans modeli kullanılarak akışkan hızı 3.086 m/s girilmiştir. Bu değer, tekne hız istemleri olarak çalışma başında gereksinim olarak belirlenen değerdir. Çıkış basıncı 0 Pascal olarak tanımlanmış ve pervane ve shaft yüzeylerinin tümü wall (duvar) sınır koşulu ile tanımlanmıştır. Analizler, DC motorun nominal açılmal hızı olan 1500 devir/dakika için yapılmıştır ve sonrasında 1250, 1000 ve 750 devir/dakika dönüş hızlarında tekrar edilerek Tablo 7'de gösterilen akışkan analiz sonuçları elde edilmiştir.

Tablo 7. Akışkan analizi sonuçları.

Devir	Hız (Va)	İtme	Tork	$\mu 0$	J	10KQ	KT
[rpm]	[knot]	[N]	[Nm]	[%]	[-]	[-]	[-]
1500	1	1495	53	9,2	0,061	0,174	0,0182
	2	1419	50	18,6	0,121	0,166	0,0172
	3	1347	48	27,6	0,182	0,157	0,0165
	4	1250	45	36,4	0,242	0,146	0,0154
	5	1142	42	44,5	0,303	0,133	0,0144
	6	1025	38	54	0,363	0,12	0,013
1250	1	1097	37	11,7	0,073	0,184	0,0183
	2	1013	35	22,7	0,145	0,17	0,0173
	3	917	32	33,8	0,218	0,154	0,0158
	4	823	29	44,6	0,291	0,138	0,0143
	5	686	26	51,8	0,363	0,115	0,0129
	6	579	23	59,4	0,436	0,097	0,0114
1000	1	707	23	15,1	0,091	0,186	0,0178
	2	630	21	29,5	0,182	0,165	0,0162
	3	521	19	40,4	0,272	0,137	0,0147
	4	439	17	50,7	0,363	0,115	0,0131
	5	354	15	58	0,454	0,093	0,0116
	6	265	12	65,1	0,545	0,07	0,0093
750	1	365	12	19,9	0,121	0,17	0,0165
	2	307	11	36,6	0,242	0,143	0,0151
	3	247	9	53,9	0,363	0,115	0,0124
	4	182	8	59,6	0,484	0,085	0,011
	5	115	6	62,8	0,605	0,054	0,0082
	6	43	4	42,2	0,726	0,02	0,0055

Analizler sonucunda elde edilen itme ve tork değerleri kullanılarak, pervanenin performans karakteristiklerini simgeleyen itme katsayısı (KT), tork katsayısı (KQ) ve pervane verimi ( $\mu 0$ ) değerleri hesaplanmıştır.

HAD analizlerinde ayrıca, tekne altına yerleştirilecek olan 2 adet türbin ilavesinin tekne direncine etkisi çalışılmış ve direnç artışının yaklaşık %10 seviyelerinde olduğu görülmüştür (bkz. Tablo 8).

Tablo 8. Değişik tekn e hızlarında türbin ve tekne dirençleri.

Hız (Va)	Türbin Direnç	Tekne Direnç	Tekne + Türbinler	Artış
[knot]	[N]	[N]	[N]	%
1	1,3	26,6	29,3	10,14
2	5,4	114,3	125,2	9,48
3	11,7	248,8	272,2	9,42
4	20,3	439,1	479,6	9,23
5	31,0	675,2	737,3	9,19
6	44,0	964,8	1052,9	9,13
7	59,3	1293,6	1412,2	9,17

## 3.2 Enerji üretim bileşenleri

### 3.2.1 Güneş Enerji Panelleri

Güneş fotovoltaik elektrik üretim prensibine dayanan bu sistem için Moody 41DS teknesinin üst kısmında bulunan gölgelik alan yaklaşık 10 metrekare olarak hesaplanmış ve bu alan için güneş enerji panelleri Solidworks kullanılarak 3 boyutlu tasarım ortamında yerleştirilmiştir.

Güneş enerjisi panel seçimi, 3-boyutlu tasarım üzerinde yerleşim çalışması ile toplamda en fazla enerji kapasitesi sağlayabilmek ve aynı zamanda konumlanacak alan dışına çıkmayacak geometri düşünülerek seçilmiştir. Panel boyutları 674 mm ve 1504 mm olup ağırlığı 12 kg olan 150 WP kapasitesi olan 9 adet polikristal hücreli güneş paneli teknenin salon üstü kısmına yerleştirilmiştir. Standart testler sonucu panel verimi, üreticisi tarafından %14,6 olarak verilmiştir.

Güneş panellerinden elde edilen güç (P), Denklem 1 ile verilmiştir. Direkt Normal Işıma (DNI), birim alana gelen güneş ışınlarının enerjisini ifade eder. Güneş panel verimi ( $\eta$ ) üreticinin belirlediği verim olup, toplam güneş panel alanı (A) tekne üzerine yerleştirilen panel alanını ifade eder.

$$P = DNI * \eta * A \quad (1)$$

### 3.2.2 Rüzgâr Türbinleri

Benzer uygulamalarda kullanılan 2 ayrı rüzgâr türbini; D400 (Electric Energy Ltd., 2021) ve Ruthland 1200 (Marlec Engineering, 2021) bu çalışmada da değerlendirilmiştir. Rutland 1200'ün daha küçük dönme açısına sahip olması, düşük rüzgâr hızlarında da elektrik üretebilir olması ve özellikle 0-20 knot arası güç eğrisi ve güç üretim karakteristiği değerlendirilerek daha düşük rüzgâr hızlarında da enerji üretmesi tercih sebepleri olmuştur.



Şekil 9. Rüzgâr türbinlerinin tekne güvertesi üzerinde yerleşimi.

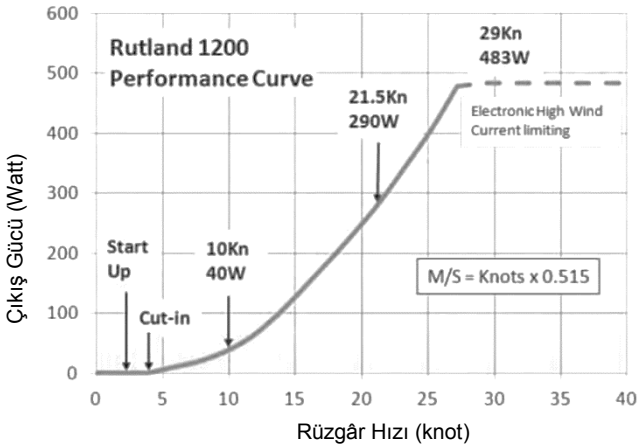


## Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

Tasarımda, rüzgâr türbini teknenin kış kısmında güverte üzeri iskele ve sancak olmak üzere 2 adet yerleştirilmiştir. Şekil 9'da gösterildiği gibi, türbin yapıları insan hareketlerini kısıtlamayacak şekilde, güvertenin köşe kısımlarına yerleştirilmiştir.

Şekil 10, kullanılan bu türbine ait performans eğrisini göstermektedir. Performans eğrisi MS Excel kullanılarak sayısal tabloya dönüştürülmüş ve 3. dereceden polinom ile denklem (2) elde edilmiştir. Bu denklem, tekne operasyon senaryolarının programlanmasında kullanılmıştır.

$$P(x) = -0.0125 x^3 + 1,34 x^2 - 11,1 x + 32,3 \quad (2)$$



Şekil 10. Ruthland 1200 rüzgâr türbini performansı (Marlec Engineering, 2021).

### 3.2.3 Su Türbinleri

Literatürde mevcut olan benzer su türbini çalışmaları incelenmiştir. Bal, vd. (2015) yatay eksenli türbinlerin performans tahminlemesi konusunda çalışarak örnekler vermiştir. Literatür çalışmalarından bazıları Moody 41DS için su türbini tasarımı çalışması olup bu çalışma öncesi tamamlanmıştır (Alvar, 2016; Ekinci ve Alvar, 2017). Önerilen sistemde kullanılmak üzere, Alvar (2016) ve Ekinci ve Alvar (2017) tarafından çalışılan yatay eksenli su türbini tasarımı değerlendirilmiştir.

Türbinlerin tekne üzerinde konumlandırılması Şekil 11'te gösterilmiştir. Önerilen sistemde bu türbinden tekne altında 2 adet iskele ve sancak konumlarında kullanılacak şekilde tasarım ve analiz çalışması yapılmıştır. Genel konsepti anlatıldığı şekli ile yatay eksenli su türbinlerinin teknik istekleri, Alvar (2017)'in çalışmasından da faydalanılarak aşağıda listelenmiştir:

i. Uygulanacak türbinlerin çapı tekne boyutları, gövde tasarımı ve montaj kısıtları dikkate alınarak 700 mm.'yi geçmeyecek şekilde, tekne üzerindeki konumu; tekne içi yerleşim, su altındaki akışta türbinlerinin diğer takımlar ile etkileşimi (sevk sistemi, salma vb.) dikkate alınarak belirlenmiştir.

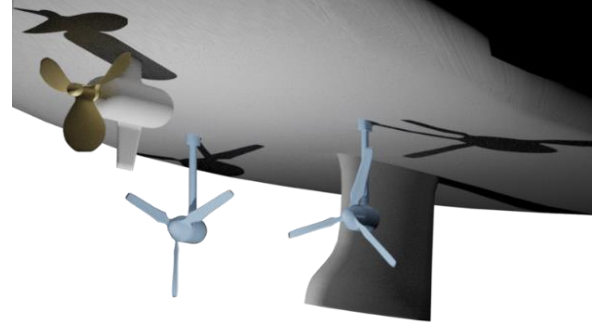
ii. Türbinlerin çalışması sırasında tekne yelken seyri yapmaktadır. Türbin kanatlarının dönmelerinden dolayı sürtünme ve itme kaynaklı ek direnç oluşturmakta ve aracın hızını düşürme eğiliminde olmaktadır. Yapılan analiz çalışması, türbinlerin oluşturduğu ek direncin tekne direnç değerinin %25'sini geçmediğini göstermektedir.

iii. Türbin, teknenin tasarım hızında (3.1 m/s) en az 750 W elektrik üretecek şekilde tasarlanmıştır.

iv. Türbin kullanımda olmadığı durumda en az takıntı direnci oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Bir adet türbin için toplam takıntı direnci motor seyriinde tekne direncinin %5'ni geçmeyecek şekilde tasarım gerçekleştirilmiştir.

Alvar, M. (2016) tarafından yapılan çalışmadan elde edilen veriler ve bu çalışmada hesaplanan değerler sonucunda, bu su

türbininin, sektörde yaygın olarak bulunan Watt & Sea Cruising modeline göre 2,5 m/s akış hızında 3 kat, 4 m/s akış hızında ise 5 kata kadar daha iyi bir güç üretim karakteristiği sağladığı görülmüştür.



Şekil 11. Türbinlerin tekne üzerindeki konumu.

Su türbinlerinden her biri teknenin 6 knot (3,1 m/s) seyir hızında 890 W enerji üretmektedir. Bu da çift türbin için 1780 W güç elde etmeyi mümkün kılmaktadır. Sistem ağırlığı DC motor dahil toplamda 33 kg olarak bulunmuş olup bu boyutlarda bir tekne için makul bir ağırlık olarak değerlendirilmiştir. Su jeneratörünün detaylı üretim verileri kullanılarak oluşturulan genel güç üretim grafiği Şekil 21 ve 22'de verilmiştir. Genel güç üretim veri grafiği MS Excel Trendline fonksiyonu ile üçüncü dereceden polinom olarak ifade edilmiştir. Tekne hızına bağlı su akış hızı,  $v$  (knot), ve üretilen enerji üretim büyüklüğü,  $P(x)$  (watt), ilişkisini gösteren bu ifade aşağıdaki gibi bulunmuştur ve işletim senaryolarında kullanılmıştır:

$$P(x) = 1,647 v^3 - 54,509 v^2 + 863,65 v - 2681 \quad (3)$$

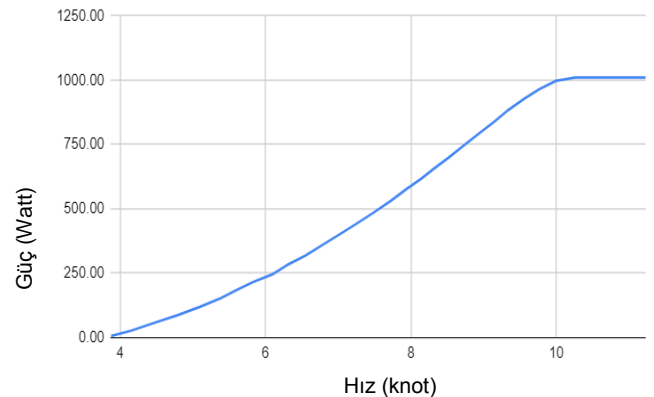
### 3.2.4 Sevk Motoru: Su Jeneratörü Fonksiyonu

DC Motor - Pervane seti (Pod Drive 6.0 Evo), motor seyri sırasında itici motor olarak kullanılmasının yanı sıra teknenin yelken seyri esnasında türbin görevi göreceği şekilde kullanılabilir. Sıfır emisyon amacı bu seçimin yapılmasının başlıca nedenidir. Su jeneratörü fonksiyonlu sevk motoru teknenin altında, diğer su jeneratörlerini ortalayacak ve 1 adet olacak şekilde yerleştirilmiştir.

Söz konusu 1010 W kapasiteli su jeneratörü fonksiyonu sevk motorunun üretici firma tarafından verilen enerji üretim grafiği (Şekil 12) sayısallaştırılarak hız ve güç tablosu elde edilmiş, sonrasında bu tablo MS Excel Trendline fonksiyonu ile dördüncü dereceden polinom ile aşağıda verilen denklem ile ifade edilmiştir:

$$P(x) = -1,22 x^4 + 31,7 x^3 - 285 x^2 + 1187 x - 1886 \quad (4)$$

Denklem (4), tekne senaryoları yürütme programında güç üretim hesaplamalarında kullanılmıştır. Denklem 4'te " $x$ " akıntı hızını (knot), " $P(x)$ " ise güç üretimini (Watt) ifade etmektedir.



Şekil 12. Su jeneratörü fonksiyonlu sevk motoru güç üretim eğrisi.



### 3.3 Enerji Yönetim Sistemi

Enerji yönetim sistemleri benzer uygulamalarda son yıllarda en fazla ilgi odağı olan ve aynı zamanda en fazla çözüm üretilen sistemlerdir. Enerji yönetim sistemi, enerji üretim, depolama ve tüketim trafiğini sağlayacak sistemdir. Bu tasarım konsepti ile teknolojinin gelişimine paralel olarak yüksek verimli enerji çeviricilerin yanında elde edilen enerjinin doğru yönlendirilmesi, kayıplar düşük seviyelerde tutulacak şekilde depolanması ve ihtiyaç duyulduğunda gerek itki gerekse diğer tüketicilere elektrik enerjisi verilebilmesi sağlanacaktır. Bahsedilen bu sistem birden fazla enerji üreten sistemlerden gerektiğinde enerji depolanabilmesi ve aynı zamanda tüketicilere şarj edilen veya anlık üretilen enerjinin sağlanabilmesi gereksinimlerini karşılaması gerekir. Bu amaçla bu çalışmada, enerji yönetim sistemi ön tasarım çalışması yapılmıştır.

Tasarlanan enerji yönetim sistemi, tasarım yöntemi, çalışma prensibi ve diğer teknik detay çalışmaların gösterilmesi sonraki makale çalışmalarına bırakılarak, bu makalede enerji gereksinimlerinin senaryo analizleri ile sağlanması konusuna odaklanılmıştır.

Üretilen enerjinin depolanmasında klasik kurşun-asit bataryaları veya lityum batarya kullanılabilir. Özellikle son yıllarda lityum bataryaların gelişmiş olması bu tür bataryaların da kullanılmaya başlandığını göstermektedir. Modülerlik sağlamak bakımından yapılan tasarım her iki tür batarya kullanımına uygun olarak ve gruplara ayrıştırılarak oluşturulmuştur. Harici akü gereksinimi, DC motorlu sevk sistemi için 48V lityum batarya ile sağlanmaktadır.

Senaryo çalışmalarında ise ePropulsion E175 8960 Wh kapasiteli, Lityum-iyon batarya kullanılmıştır. Batarya sayısının bulunmasında ise önceden teknede var olan 210 litre kapasiteli yakıt tankının artık boş olmasından dolayı kazanılan 189 kg'lık ağırlık hesaplanmış ve tasarımı bu ağırlığı geçmeyen acil durum bataryaları dahil olmak üzere toplam 4 adet batarya grubu kullanılmıştır.

### 4. Senaryo Analizleri

Tasarımı yapılan sistemler ile sıfır emisyonlu tekne, aşağıdaki listede belirtilen denizcilik operasyonlarını içerecek şekilde gösterilmiştir:

- L: Limanda Bekleme
- M: Manevra
- D: Açıkta Demirde Bekleme
- S: Yelken Seyri

Marmara Denizi'nin seyir yapılacak bölgelerinde Ağustos ayı gün içerisindeki ölçülen verilere göre teknenin gerçek ortamda maruz kalacağı rüzgâr ve güneş verileri kullanılmış ve Tablo 10'da genel özellikleri gösterilen 3 senaryo yürütme programı oluşturulmuş ve bu programlar yürütülerek enerji üretim ve kullanım analizleri yapılmıştır. Senaryo programını oluşturmada Google Sheets kullanılmış ve tüm detay tablolar her bir senaryo için Tablo 10'da referansı verilen bölümde verilmiştir. Rota planlaması çalışmasında, OpenSeaMap yazılımının Trip Planner fonksiyonu kullanılmıştır.

Senaryo 1, Tuzla-Büyükada Gidiş, Bekleme ve Dönüş; Senaryo 2, Tuzla-Büyükada Gidiş, Bekleme ve Dönüş olmak üzere 23'er saatlik tipik yelkenli seyir senaryolarıdır. Senaryo 3 ise tekne Marmara denizi Büyükada mevkiinde bulunurken rüzgârın olmadığı, yani yelken seyri yapılamayacak olup, DC motor-pervane setinin sevk sistemi olarak bataryalardaki enerji ile Tuzla'ya kadar 1 saat 26 dakikalık seyir senaryosudur. Bu senaryo ile buna benzer acil durumlarda tekne ile yaklaşık ne kadar mesafe seyir yapılabileceği gösterilmiştir. Alt bölümlerde her bir senaryo sonuçları grafikler ile gösterilmiş, bu senaryolar esnasında enerji üretim, batarya şarj-deşarj, ve enerji kullanım durumları sunulmuştur.

Senaryolarda kullanılan meteorolojik rüzgâr hızı ve yön verileri 1 Ocak – 31 Aralık 2018 tarih aralığına ait olup saatlik bazda İTÜ Tuzla Güney Mendirek Feneri Veri İstasyonu için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden MS Excel formatında alınmıştır.

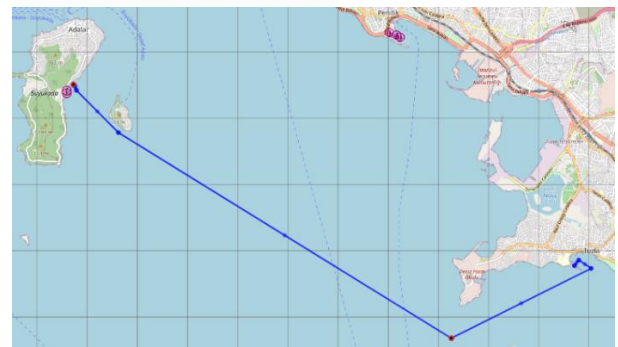
Deniz aracı elektrik güç tüketicileri Tablo 9'da gösterilmiştir. Bu tüketicilerin programlanmasında deniz aracı işletim durumu ile, gün içindeki saatin gece-gündüz olması durumlarına göre tüketici sarfiyatı olup olmaması 1 ya da 0 olarak belirlenmiş (Tablo 10) ve simülasyon programlanması buna göre yapılmıştır.

Tablo 9. Elektrik güç tüketicileri.

Tüketiciler	Güç (W)	Gündüz				Gece			
		M	S	L	D	M	S	L	D
Buzdolabı	310	1	1	1	1	1	1	1	1
Ana Yelken Sarma Donanımı	1.500	0	1	0	0	0	1	0	0
Cenova Sarma Donanım	1.500	0	1	0	0	0	1	0	0
Elektrikli Cenova Irgatlar	3.000	0	1	0	0	0	1	0	0
Irgat	1.000	0	0	0	1	0	0	0	1
Seyir Fenerleri	48	0	0	0	0	1	1	0	0
Demirleme Lambası	10	0	0	0	0	0	0	0	1
Gv Aydınlatma Lambaları	130	0	0	0	0	1	1	1	1
Kabin Aydınlatma	30	1	1	1	1	1	1	1	1
Radar	30	1	1	0	0	1	1	0	0
Anten	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Gösterge Tablosu Ekipmanları	100	1	1	0	0	1	1	0	0
Su Pompaları	46	1	1	1	1	1	1	1	1
Kirli Su Pompası	72	1	1	1	1	1	1	1	1
Atık Su Pompası	72	1	1	1	1	1	1	1	1
Tuvalet Vakum P.	250	1	1	1	1	1	1	1	1
Duş Tahliye Pompası	48	1	1	1	1	1	1	1	1
Sintine Pompası	200	1	1	1	1	1	1	1	1
Elektrik Panosu	50	1	1	1	1	1	1	1	1
İklimlendirme Sistemi	1.700	1	1	1	1	1	1	1	1
Su Isıtıcısı	2.200	1	1	1	1	0	0	0	0
Televizyon	235	1	1	1	1	0	0	0	0
Ses sistemi	220	1	1	1	1	0	0	0	0
Fırın	2.400	0	0	1	1	0	0	0	0
Mikrodalga Fırın	1.200	0	0	1	1	0	0	0	0

### 4.1 Senaryo 1: Tuzla-Büyükada Gidiş-Bekleme-Dönüş Senaryosu

Tuzla-Büyükada senaryosu, Şekil 13'te gösterilmiştir. Tuzla-Büyükada senaryosu 1. gün saat 13:00'da bataryaların %50 doluluk oranı ile başlatılmış ve 2. gün saat 12:00'da, 23 saatlik senaryo sonunda %28 batarya doluluk oranı ile tamamlanmıştır.

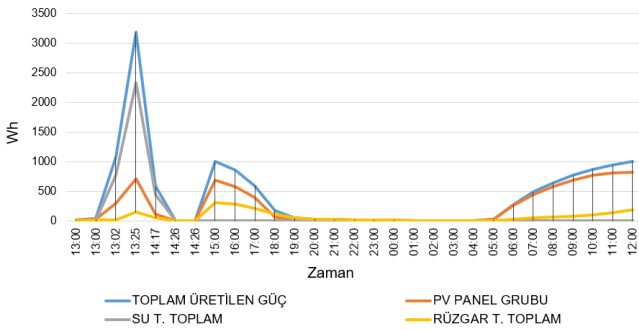


Şekil 13. Senaryo 1: Tuzla - Büyükada seyir planı.

## Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

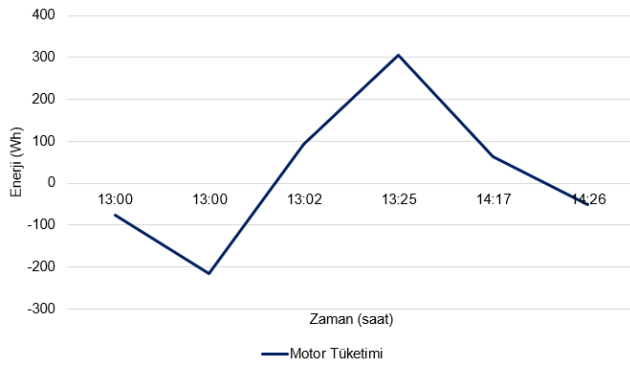
Şekil 14, 1. senaryo süresince her bir yenilenebilir enerji sistemi ile üretilen enerji miktarlarını ve toplam üretilen enerjiyi Watt-saat (Wh) birimi ile göstermektedir. Marmara bölgesinde yaz aylarında rüzgâr hızlarının düşük olmasından dolayı rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminin de düşük olduğu ve gece saatlerinde güneş panellerinden elektrik üretiminin olmadığı görülmektedir.

Genel olarak rota üzerinde 1 saatlik ilerleme aralıkları ile hesaplama yöntemi kullanılmış ve rüzgâr yönü, hızı vektörel olarak hesaplanarak programda kullanılmıştır. Ancak, seyir başlangıç ve tamamlanması sırasında senaryonun ilerlemesi rota değişikliklerine göre yapıldığından, bu noktalarda çok daha kısa sürelerde hesaplama yapılmıştır. Bu sebeple, Şekil 20'nin okunmasında, bazı noktalarda çok daha kısa zamanda toplam üretimler gösterildiğinden bu zaman aralığında izafi olarak örneğin güneş enerjisi üretimi çok daha az seviyelerde olmuştur.



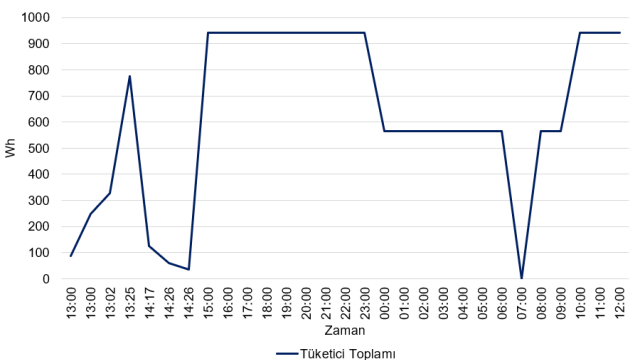
Şekil 14. Senaryo 1: Yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji üretimi.

Şekil 15, DC-motor pervane setinin enerji üretim ve tüketim seviyelerini göstermektedir. İlk başta manevra esnasında DC motor ile sevk yapıldığından enerji kullanımı ve yelkenli seyir esnasında bu sistemin türbin modunda çalışarak enerji üretimi yaptığı görülmektedir.



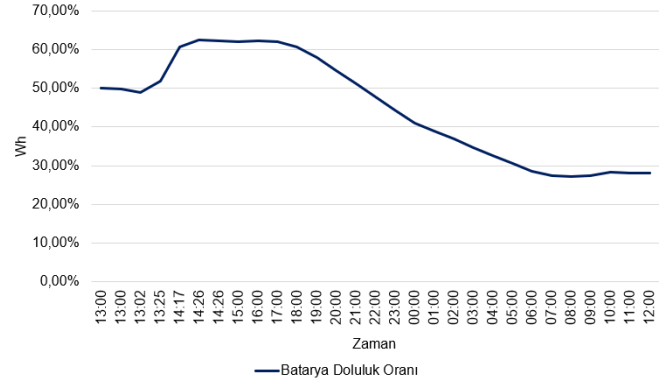
Şekil 15. Senaryo 1: Sevk sistemi enerji üretim ve tüketim değişimi.

Şekil 16, tüketicilerin toplam enerji kullanım seviyelerini göstermektedir. Senaryo programlamasında tüketicilerin güç gereksinimi Tablo 9'da gece ve gündüz ve teknenin işletim durumuna göre gösterilen değerler programlanarak senaryo yürütülmüştür.



Şekil 16. Senaryo 1: Tüketicilerin zamana göre toplam enerji kullanımı.

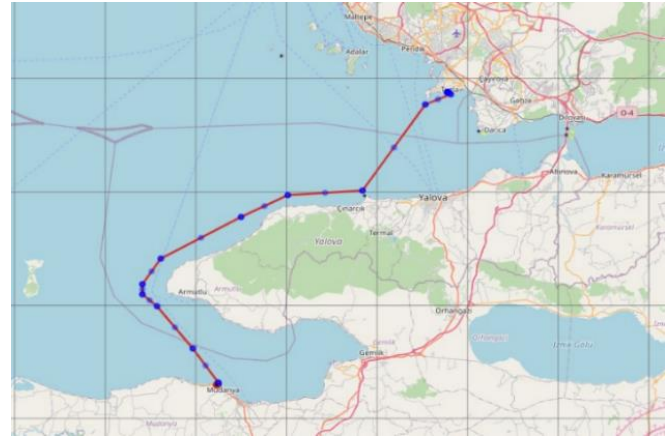
Şekil 17, Senaryo 1 sırasında zamana göre batarya gruplarının toplam yüzde doluluk seviyesini göstermektedir. %50 doluluk oranı ile başlatılan ve 23 saat devam eden senaryo sonrasında, %28 batarya doluluk oranı ile senaryo tamamlanmıştır.



Şekil 17. Senaryo 1: Zamana göre batarya gruplarının yüzde şarj seviyesi değişimi.

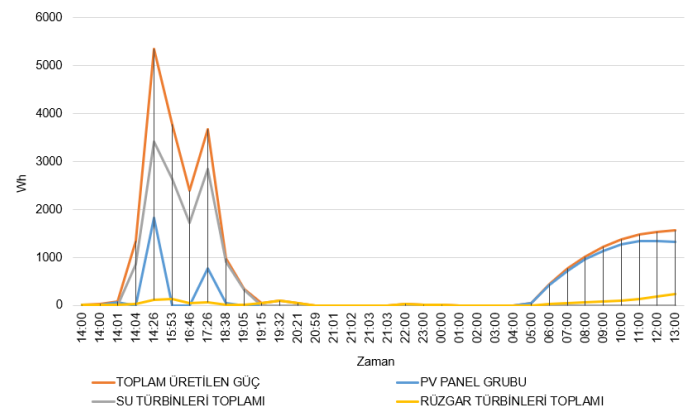
## 4.2 Senaryo 2: Tuzla-Mudanya Gidiş-Kalma ve Dönüş Seyri Senaryosu

Tuzla-Mudanya senaryosu, Şekil 18'de gösterilmiştir. Bu senaryo 1. gün saat 14:00'da bataryaların %60 doluluk oranı ile başlatılmış ve 22 saatlik senaryo sonunda 2. gün saat 12:00'da %44 batarya doluluk oranı ile tamamlanmıştır.



Şekil 18. Senaryo 2: Tuzla-Mudanya seyir planı.

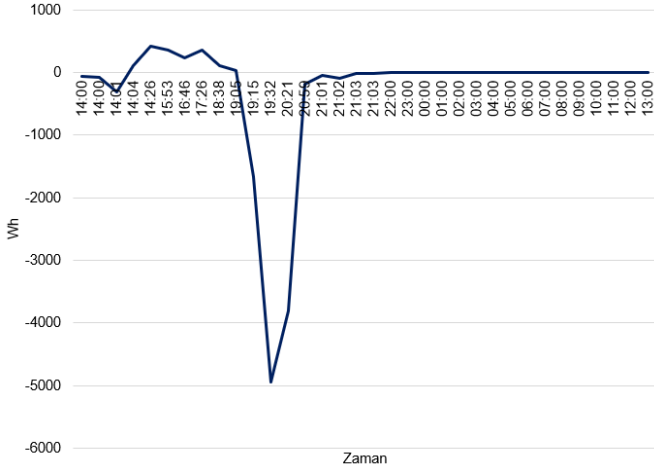
Şekil 19, 1. senaryo süresince her bir yenilenebilir enerji sistemi ile üretilen enerji miktarlarını ve toplam üretilen enerjiyi göstermektedir. Marmara bölgesinde yaz aylarında rüzgâr hızlarının düşük olmasından dolayı rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminin de düşük olduğu ve gece saatlerinde güneş panellerinden elektrik üretiminin olmadığı görülmektedir.



Şekil 19. Senaryo 2: Yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji üretimi değişimi.

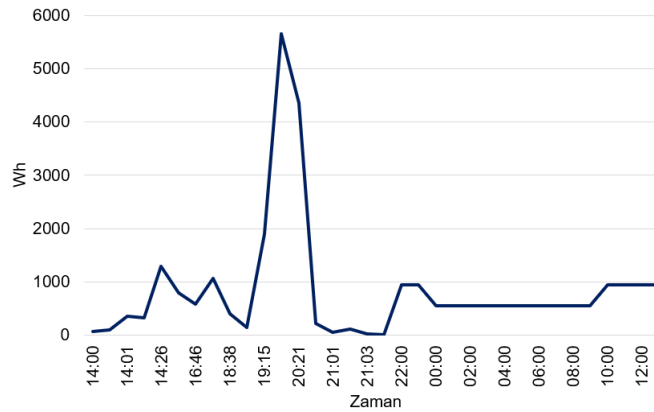
## Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

Şekil 20, DC-motor pervane setinin enerji üretim ve tüketim seviyelerini göstermektedir. Manevra esnasında DC motor ile sevk yapıldığından enerji kullanımı ve yelkenli seyir esnasında bu sistemin türbin modunda çalışarak enerji üretimi yaptığı görülmektedir.



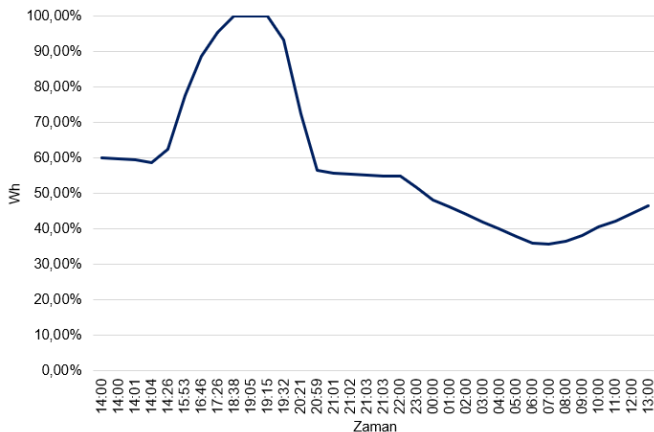
Şekil 20. Sevk sistemi enerji üretim ve tüketim değişimi.

Şekil 21, tüketicilerin tamamının toplam enerji kullanım seviyelerini göstermektedir. Senaryolara göre hangi tüketicilerin ne miktarlarda enerji kullanılacağı belirtilen tablolardan faydalanarak (Tablo 11) ve bu seviyeler programlanmış ve senaryo yürütülmüştür.



Şekil 21. Senaryo 2: Tüketicilerin zamana göre enerji kullanımı.

Şekil 22, Senaryo 2'de zamana göre batarya gruplarının toplam yüzde doluluk seviyesini göstermektedir. %60 doluluk oranı ile başlatılan ve 23 saat devam eden senaryo sonrasında, %44 batarya doluluk oranı senaryo tamamlanmıştır.



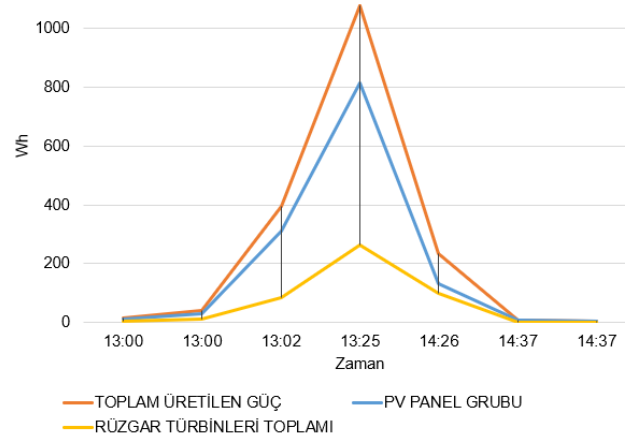
Şekil 22. Senaryo 2: Zamana göre batarya gruplarının yüzde şarj seviyesi değişimi.

### 4.3 Senaryo 3 - Acil Durumda, Yelkensiz Seyir (DC Motor ile) Sevk Senaryosu

Acil durum senaryosu olan Senaryo 3, tekne Marmara denizi Büyükada mevkiinde bulunurken rüzgârın olmaması durumunda, yani yelkenli seyir yapılamayacak olup, DC motor- pervane setinin sevk sistemi olarak bataryalardaki enerji ile Tuzla'ya kadar teknenin seyir yapması senaryosudur. Bu senaryo ile buna benzer acil durumlarda tekne ile yaklaşık ne kadar mesafe seyir yapılabileceği ve bu esnada batarya durumlarında azalma miktarının ne kadar olacağı hakkında fikir verilmiştir.

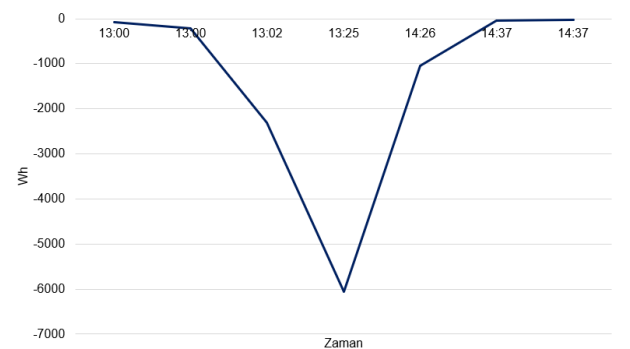
Senaryo 3, acil durum senaryosu olarak yürütülmüş; rüzgâr hızı sıfır kabul edilmiş, sadece DC motor ile sevk programlanmıştır. Senaryo, başlangıç noktası olan Büyükada bölgesinden Ağustos ayında, saat 13:00 itibari ile başlatılmış; Büyükada-Tuzla rotasından elde edilen veriler senaryo planlayıcısında işlenmiştir. Senaryo, bataryalar %100 dolu olarak başlatılmış, Tuzla'ya varış 1 Saat 26 dakikalık motor seyri ile ve bataryaların %69 doluluk oranı ile tamamlanmıştır.

Şekil 23, 3. senaryo esnasında her bir yenilenebilir enerji sistemi ile üretilen enerji miktarlarını ve toplam üretilen enerjiyi Watt-saat (Wh) birimi ile göstermektedir. DC motor sevk edici kullanım modunda olduğundan bu senaryoda DC-motor pervane setinin türbin olarak elektrik eldesi yoktur. Ayrıca, rüzgâr hızı sıfır olduğundan, rüzgâr türbinleri ile enerji üretimi de 0 olacaktır. En fazla enerjinin güneş panelleri ile elde edildiği görülmektedir. İç deniz olan Marmara denizinde Türkiye diğer bölgelerine, Karadeniz, Ege ve Akdeniz kıyılarına, göre istatistiksel olarak rüzgârın daha az olduğundan ve ağustos aylarında bu bölgede rüzgârın diğer bölgelere göre daha az olmasından dolayı bu sonuç yenilenebilir enerji kaynakları ile en verimsiz enerji üretim şartları olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 23. Senaryo 3: Tuzla-Büyükada senaryosunda yenilenebilir enerji kaynakları ile zamana ve şartlara göre enerji üretimi grafiği.

Şekil 24, DC motor-pervane setinin enerji tüketim seviyelerini göstermektedir. Tüm değerlerin negatif olması, sevk sistemi ile seyir yapılmasından dolayı senaryo süresince enerji kullanıldığını göstermektedir.

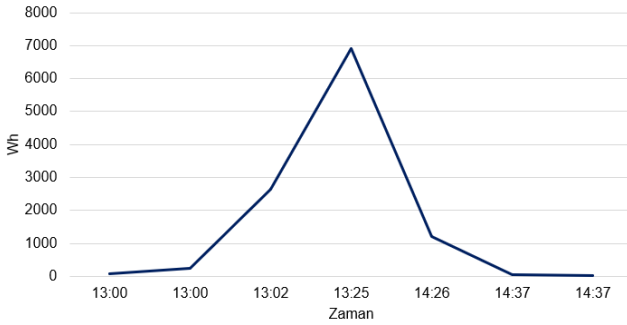


Şekil 24: DC motor-pervane sevk sistemi enerji üretim ve tüketim değişimi.



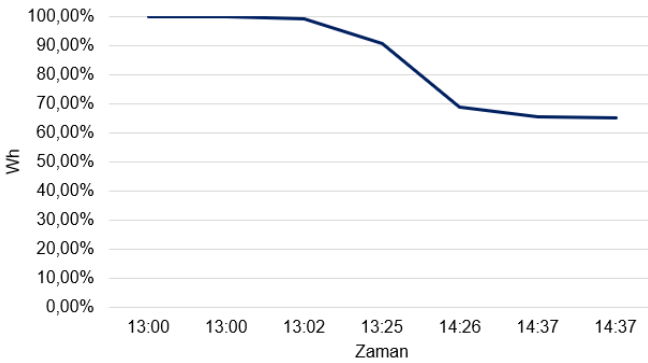
## Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

Şekil 25, tüketicilerin tamamının toplam enerji kullanım seviyelerini göstermektedir. Senaryo programlamasında tüketicilerin güç gereksinimi Tablo 11'de gece ve gündüz ve teknenin işletim durumuna göre gösterilen değerler programlanarak senaryo yürütülmüştür.



Şekil 25. Senaryo 3: Tüketicilerin zamana göre enerji kullanımı.

Şekil 26, zamana göre batarya gruplarının toplam yüzde doluluk seviyesini göstermektedir. %100 doluluk oranı ile başlatılan senaryo sonrasında, %65 batarya doluluk oranı ile senaryo tamamlanmıştır. 1 saat 37 dakika devam eden gündüz seyri esnasında batarya gruplarından toplam %35 enerji kullanılmıştır. Bu da göstermektedir ki, önerilen bu sistem ile acil durumda, yani rüzgârsız bir havada gün içerisinde bataryaların tam dolu olma durumunda, DC motor-pervane seti ile maksimum 4,5 saat seyir yapılabilecektir.



Şekil 26. Senaryo 3: Zamana göre batarya gruplarının yüzde doluluk seviyesi değişimi

## 5. Tartışma

Bu çalışmanın tasarım çalışması konusunda savunma, uzay ve havacılık sektöründe uygulanan sistem mühendisliği yöntemi uygulanmıştır. Uygulanan yöntem mantıksal olarak basit olup faydasının yüksek katkısı olduğu görülen sistemin alt bileşenlerine ayrıştırılması yöntemidir. Bu yöntem ile oluşturulan sistem tasarımı sonrasında, en son teknenin operasyonel senaryoları yürütülerek, ilk başta oluşturulan anahtar performans parametreleri doğrulanmıştır.

Önerilen sistemin sevk sistemi mevcut tekne formu ve yapısına göre çalışacak bir DC motor-pervane seti düşünülmüş ve son yıllarda benzer teknelerle uygulanabilen raf ürünü olarak piyasaya sürülen bir ürün seçilmiş ve bu sisteme ait pervane 3-kanatlı iken 2-kanatlı bir pervane tasarlanmıştır. Tasarlanan yeni pervane analizleri ile tekne sevk sistemi karakteristikleri belirlenmiştir. Sevk sistemi seçimi ve tasarımında en önemli çalışma da bu analizler ile pervanenin motor dönüş hızlarında ne kadar itme sağlayacağı, teknenin oluşan dirençlere göre hangi hızlara çıktığının belirlenmesi ve bu esnada DC motor sürücüsünün sistemden ne kadar elektrik gücü harcayacağı çalışılmıştır. Ürün seçimleri ve tasarım çalışmalarında elde edilen performans eğrileri, denklemlere dönüştürülerek senaryo çalışmalarında teknenin DC motor ile sevkli kısımlarında kullanılmıştır.

Enerji üretim sistemi, güneş enerji panelleri, rüzgâr türbinleri, yelkenli seyir esnasında oluşan akıntı ile elektrik üreten su türbinlerinden oluşmaktadır. Ayrıca, sevk sistemi seçiminde, itki ve enerji üretim modu olarak iki ayrı modda çalışabilen DC motor-pervane seti tercih edilmiştir ki bu sayede teknenin yelkenli seyri esnasında oluşan tekne altı su akıntısından faydalanarak pervanenin geri dönüşü ile yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılması sağlanmıştır. Güneş enerji panelleri seçiminde teknenin salon kısmı üzerinde bulunan gölgelik alan üzerine rijit paneller yerleşimi çalışılmış; 3 boyutlu geometrik tasarım ile 9 adet güneş enerji paneli yerleştirilmiştir. Rüzgâr türbini seçiminde, teknenin kış güverte köşe kenarlarına, 3 boyutlu görsel çalışma ile tekne üzerinde insan hareketlerini en az etkileyecek bu noktalara, 2 adet rüzgâr türbini yerleştirilmiştir. Güneş enerji panelleri ve rüzgâr türbinleri, benzer tekneler için uygun olabilecek tedarik edilebilen raf ürünlerinin geometrik yapıları ile performans karakteristikleri değerlendirilerek seçilmiştir. Bu çalışma ile raf ürünlerinin araştırma projeleri seviyesinden sahada uygulama seviyesine dönüştüğü de gösterilmiştir. Tasarımda değerlendirilen rüzgâr türbinlerinin de güneş enerji panellerinde olduğu gibi, piyasada bulunabildiği ve tasarımlarda değişik ebat ve özelliklerde seçilebilir olmaya başladığı görülmüştür.

Tekne altına yerleştirilen su türbinleri için akademik çalışmalar incelenerek aynı tip tekne için başka bir akademik çalışma (Alvar, 2016; Ekinci ve Alvar, 2017) sonuçlarından faydalanılmıştır. Su türbininin tasarımı ve analizleri gösterilen bu çalışmalarda da sistem mühendisliği yöntemi ile sistem bileşenlerine ayrıldığından ve bu çalışmada düşünüldüğü gibi 2 ayrı türbininin birlikte kullanılması değerlendirildiğinden, referansı verilen çalışma sonuçları bu çalışmanın tasarım tanımı ve senaryo analizlerinde kullanılabilmiştir. Genel konsepti anlatıldığı şekli ile yatay eksensli bu su türbinlerinin teknik istekleri, Alvar (2017)'in çalışmasından faydalanılarak tanımlanmıştır. İtici DC motor-pervane bileşenine ait pervanenin 2-kanatlı tasarım analizleri aynı zamanda bu bileşenin türbin modunda elektrik üretmesi için analizlerini de içermiştir.

Senaryo çalışmaları için İTÜ Denizcilik Fakültesi limanından çıkılarak Büyükkada'ya tekne seyri ile gidiş ve geliş ile yine aynı yerden çıkılarak Mudanya'ya gidiş geliş senaryoları gerçekleştirilmiştir. Teknenin bu senaryolar esnasında enerji üretim ve tüketimleri teknenin limanda manevraya hazır olması, DC motor-pervane sevk sistemi ile manevra, yelkenli tekne seyri, ve demirde bekleme olmak üzere 4 ayrı tekne modunda elektrik üretim ve tüketim karakteristikleri detaylandırılmıştır. Örneğin elektrik tüketicileri her bir modda farklı güç harcamaktadır. Elektrik üretim bileşenleri de bu modlarda ve bulunan coğrafya ve tarihlerdeki enerji kaynaklarının ölçülmüş verilerine göre elektrik üretmekte olduğu senaryolarda kullanılmıştır. Senaryo çalışmalarında uygulanan Marmara iç denizinde seyir senaryoları, en az enerji üretim canlandırıldığı düşünülerek seçilmiştir. Zira, istatistiklere göre, Türkiye'nin Karadeniz sahilleri Marmara iç denizine göre daha fazla rüzgâr alan, güneybatı sahilleri ise daha fazla rüzgâr ve güneş enerjisi alan kıyı bölgeleridir. Bu bakımdan seçilen bölge, istatistiklere göre, teknenin yenilenebilir enerji kaynakları ile en az elektrik üretim sağlayacağı bölgedir. Bu sebeple, yapılan senaryo sümülasyonları ile tasarımı yapılan sistemin en verimsiz olan bir bölgedeki meteorolojik verilere göre doğrulanmasını içermiştir.

## 6. Sonuçlar

Senaryo çalışmaları, özet olarak aşağıdaki sonuçları ortaya koymuştur:

- Çalışmanın ana amacı ile ifade edilen sıfır emisyonlu tekne hedefi, iki ayrı tipik yelkenli tekne seyir senaryoları ile gösterilmiştir.
- İstatistiksel olarak Türkiye'nin güney sahillerine göre daha az güneş ve rüzgâr enerji potansiyeli olan Marmara iç denizinde yelkenli tekne seyri esnasında önerilen tasarım ile

yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanılarak enerji gereksinimlerinin karşılandığı gösterilmiştir.

- Bu senaryoların ilkinde %50 şarj durumu ile başlayan batarya grupları, 24 saatlik seyir senaryosu sonucunda %28,01 toplam şarj seviyesi ile senaryo tamamlanmıştır.
- %60 batarya şarj seviyesi ile başlayan 24 saatlik ikinci seyir senaryosunda ise senaryo, %46,48 batarya şarj seviyesi ile tamamlanmıştır.
- Tamamen dolu batarya grupları ile 4,5 saat süreli yelkensiz sıfır emisyonlu seyir yapılabileceği gösterilmiştir.

Yapılan tasarım çalışmasında, sistem mühendisliği uygulamalarından dolayı edinilen tecrübeler, özet sonuç olarak şudur: Çalışmanın bu kısmı sistem kırılım diyagramları ile gerçekleştirilmesinin, sistemi modüler haline getirdiği ve bu modüllerin sistem isterlerini sağlaması için ürün tedariki, başka çalışmalarda akademik sonuçlar kullanılması veya mevcut çalışmada yapılan tasarım ve analizlerin kullanılması yöntemlerinden mevcut olanlarının kolaylıkla kullanılabilmesini sağlamıştır. Ayrıca, sistem yerleşim çalışmasında hangi birimlerin ne tür arayüz tasarımı yapılacağı kolaylıkla belirlenebilmiştir. Bu sebeple, benzer farklı bileşenler içeren kompleks denilebilecek çalışmalarda sistem mühendisliği yöntemi uygulanması bu çalışma ile edinilen uygulama tecrübesi ile tavsiye edilmiştir.

Bu çalışmanın devamı niteliğinde aşağıdaki tavsiyeler verilmiştir:

- Çalışmada, tasarım doğrulaması simülasyon analizleri ile gösterilmiştir. Yaklaşım ve tasarımlar, proje çalışmasına dönüştürülerek deneysel çalışma ile bir uygulama yapılabilir. Son yıllarda konunun artan önemi değerlendirildiğinde bir uygulama çalışmasının önemli olacağı düşünülmektedir. Bu kapsamda gerçekleştirilecek bir çalışmada maliyet analizi de derinlemesine irdelenebilir.
- Yapılan araştırma çalışmalarında konu hakkında en önemli ilerleme sağlanacak kısımlardan birisi çoklu enerji üretim ve tüketimleri destekleyebilen batarya sistemidir. Elektronik ve yazılım ile bu alanda önümüzdeki yıllarda ticari gelişmelerin daha fazla görülmesi muhtemeldir.

## 7. Teşekkür ve Bilgi

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun ve yazarlardan Sena Nomak'ın doktora tez çalışmasının bir bölümünden türetilerek hazırlanmıştır.

**Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.**

## 8. Kaynaklar

- Alfonsin, V., Suarez, A., Cancela, A., Sanchez, A. & Maceiras, R. (2014). Modelization of hybrid systems with hydrogen and renewable energy oriented to electric propulsion in sailboats, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 11763-11773.
- Alfonsin, V., Suar, A., Urrejola, S., Miguez, J. & Sanchez, A. (2015). Integration of several renewable energies for internal combustion engine substitution in a commercial sailboat, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 6689-6701.
- Alvar, M. (2016) Rüzgâr-elektrik hibrit konseptinde geliştirilen bir tekne için yatay eksenli su türbini tasarımı. (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bal, Ş., & Güner, M. (2009). Performance analysis of podded propulsors. *Ocean Engineering*, 36(8), 556-563.

- Balestra, L. & Schjøberg, I. (2021). Modelling and simulation of a zero-emission hybrid power plant for a domestic ferry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (18), 10924-10938.
- Bredariol, G., Garnier, A., Stevens, K. & Foley, A. (2010). SIHG Testing and Analysis. *Energy Sustainability*, 43949, 547-557.
- Bucci, V., Mauro, F., Vicenzutti, A., Bosich, D. & Sulligoi, G. (2020). Hybrid-electric solutions for the propulsion of a luxury sailing yacht. 2nd IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems (IESES), 280-286
- Can, U., Delen, C., & Bal, S. (2020). Effective wake estimation of KCS hull at full-scale by GEOSIM method based on CFD. *Ocean Engineering*, 218, 108052.
- Carlton, J. (1994). *Marine Propellers and Propulsion*. Butterworth-Heinemann.
- Eastlack, E., Klingenberg, S., Lidqvist, A., Faiss, E., Witt, M., Olsson, P., Sauter, R. & Szymanski, S. (2019). Zero Emission Super-Yacht. Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER).
- Ekinci, S. (2011). A practical approach for design of marine propellers with systematic propeller series. *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*, 62(2), 123-129.
- Ekinci, S. & Alvar, M. (2016). Sıfır emisyonlu yenilenebilir enerji üreten yelkenli bir tekne için sualtı türbin tasarımı. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7(3), 537-550.
- Ekinci, S., & Alvar, M. (2017). Horizontal axis marine current turbine design for wind-electric hybrid sailing boat. *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*, 68(2), 127-151
- Electric Energy Ltd. (2021). About D400. 21 Aralık 2021 tarihinde <https://eclitic-energy.co.uk/products/d400-wind-generator/> adresinden elde edilmiştir.
- Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and sustainable energy reviews*, 39, 748-764.
- ePropulsion. (2021). 26 Aralık 2021 tarihinde <https://www.epropulsion.com/pod-drive/> adresinden elde edilmiştir.
- IMO ANNEX 6 Resolution MEPC.280(70). (Adopted on 28 October 2016) Effective Date of Implementation of the Fuel Oil Standard in Regulation 14.1.3 OF MARPOL ANNEX VI.
- INCOSE. (2015) *Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities*. Wiley; 4. Edition. 7 Temmuz 2015.
- Kobougias, I., Tatakis, E. & Prousalidis, J. (2013). PV systems installed in marine vessels: technologies and specifications. *Advances in Power Electronics*.
- Lansing, RP. (1933). "Generator Equipment" 1898973.

- Malla, U. (2020). Design and sizing of battery system for electric yacht and ferry. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 14(1), 137-142.
- Marlec Engineering. (2021). About The Rutland 1200 Marine Windcharger. 26 Aralık 2021 tarihinde <https://www.marlec.co.uk/product/rutland-1200-windcharger/> adresinden elde edilmiştir.
- Mauro, F., Sorrenti, G., Bonfiglio, L., & Bucci, V. (2018). Integrated design of an eco-friendly luxury sailing super-yacht. In 2018 SNAME Maritime Convention, SMC 2018. Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2007). NASA systems engineering handbook. NASA/SP-2007-6105. Rev. 1. December 2007.
- Özbay, K., & Sarıışık, M. (2020). Yatlarda kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi üzerine bir değerlendirme. *Journal of Gastronomy Hospitality and Travel*, 3(2), 234-243.
- Reddy, JB. & Reddy, DN. (2004). Probabilistic Performance Assessment of a Roof Top Wind, Solar Photo Voltaic Hybrid Energy System. *Annual Symposium Reliability and Maintainability*, 654-658.
- Sebald, R. (1978). Electrical Generator for a Sailboat. 4102291
- Steward, D.W. (1981). The design structure system: A method for managing the design of complex systems. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 1981: EM-28(3).
- Sukas, O. F., Kinaci, O. K., & Bal, S. (2019). System-based prediction of maneuvering performance of twin-propeller and twin-rudder ship using a modular mathematical model. *Applied Ocean Research*, 84, 145-162.
- Soydan, A., & Bal, S. (2021). An investigation of scale effects on marine propeller under cavitating and non-cavitating conditions. *Ship Technology Research*, 1-13.
- Tercan, Ş. (2021) Sürdürülebilir Ulaşım İçin Güneş Enerjili Teknelerin Kullanılması ve Çevresel Etkileri. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(1), 223-232.
- Şenol, S. (2020). Gemi kökenli emisyonlara dayalı alternatif sevk sistemleri. *GİDB Dergi*, (18), 31-56.
- Yang, H. N., Lee, G. U., & Shin, C. H. (2019). A Study on the Priority Analysis of Government Support Policies for SOx Emission of Ships. *Journal of Navigation and Port Research*, 43(2), 86-92.
- Yılmaz, N. & Cicek, I. (2018) Standart Test Pervanesi Analizleri ile Hesaplı Akışkanlar Dinamiği Analiz Altyapısının Doğrulanması, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*,6(4), 681-690.