# International Marmara Sciences Congress (Autumn 2021)

**10 – 11 December 2021 KOCAELI**

# PROCEEDINGS
# E-BOOK

DRAFT

**Organizer**

**Sponsors**

This congress proceedings book is published as an electronic format as e-book.

All rights reserved.

**Editorial Board**

**Prof.Dr. Arif ÖZKAN**
**Assoc.Prof.Dr. Serdar BİROĞUL**
**Assoc.Prof.Dr. Ömer GÜNGÖR**
**Lect. Kazım KAHRAMAN**
**Research Asist. Çağatay TAŞDEMİRCİ**

**ISBN:**

DRAFT

**Address** Kocaeli Üniversitesi Rektörlüğü, Umuttepe Yerleşkesi Kocaeli, TÜRKİYE
**Phone** +90 262 303 1000
**E-mail** info@imascon.com
**Web** www.imascon.com

All legal and ethical responsibility of the studies belongs to the authors. All rights reserved. The copyright of this proceedings book belongs to Kocaeli University. It may not be copied or reproduced without permission.

# DENİZALTILARDA ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ

**Taha ADIGÜZEL,**
Kocaeli Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli

**Engin ÖZDEMİR**
Kocaeli Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli

**Özet**
Klasik denizaltılar, dizel tahrikli generatörler ile denizaltı bataryalarını şarj ederek enerji gereksinimlerini karşılarlar. Bu denizaltılar bataryalarının şarj işlemini gerçekleştirmek için suyun üstüne çıkmak zorunda olup bu olaya denizaltıların şnorkel yapma durumu denir. Ancak askeri denizaltılar için denizaltı suyun altında ne kadar uzun süre kalırsa o kadar iyidir. Bu husus denizaltılarda enerji depolamanın ne kadar önemli olduğunu bize açıkça göstertmektedir. Denizaltıları diğer su üstü gemilerinden ayıran en büyük özellikleri olan gizlilikleri ancak ne kadar çok enerji depoladıkları ve depoladıkları farklı enerji çeşitleri ile ölçülebilir. Bundan dolayı bu tezde denizaltılarda kullanılan enerji depolama yöntemleri anlatılmaktır. Bunlar; farklı enerji depolama şekilleri olup enerji üretiminde de etkilidir. Burada denizaltılarda kullanılan batarya türleri, havadan bağımsız tahrik sistemi enerji depolaması ve depolamayla ilgili olan denizaltılarda kullanılan dizel generatörler, yakıt pilleri, nükleer denizaltılarda kullanılan depolama yöntemi ve bunlarla ilgili olan sistemlerde incelenmiştir. Klasik denizaltılarda kullanılan en önemli enerji depolama yöntemlerinin bataryalar olduğu göz önünde bulundurulduğunda bataryaların gelişiminin denizaltılarda enerji depolama açısından büyük önem arz ettiği görülmektedir. Bu yüzdende bu makalede denizaltılarda kullanılan bataryalar üzerinde titizlikle durulmuştur.

**Anahtar kelimeler**: Denizaltı, Depolama, Enerji, Batarya, Yakıt Pili,

## Energy Storage Technologies in Submarines

**Abstract**
Conventional submarines meet their energy needs by charging submarine batteries with diesel powered generators. These submarines have to rise above the water to charge their batteries, and this is called the submarines snorkeling situation. But for military submarines, the longer the submarine stays underwater, the better. This point clearly shows us how important energy storage is in submarines. Their secrecy, which is the biggest feature that distinguishes submarines from other surface ships, can only be measured by the different types of energy they store and store. Therefore, in this thesis, the energy storage methods used in submarines are explained. These; They are different forms of energy storage and are also effective in energy production. Here, battery types used in submarines, air-independent propulsion system energy storage and diesel generators used in submarines, fuel cells, storage method used in nuclear submarines and related systems are examined. Considering that batteries are the most important energy storage methods used in classical submarines, it is seen that the development of batteries is of great importance in terms of energy storage in submarines. Therefore, in this article, the batteries used in submarines have been meticulously emphasized.

**Keywords:** Submarine, Storage, Energy, Battery, Fuel Cell,

## 1. Giriş
Tarih boyunca denizaltılar deniz savaşlarının seyrini önemli ölçüde etkilemişlerdir. Bu yüzden denizaltıların tasarımlarının geliştirilmesinde bu husus itici güç olmuştur. Denizaltı tasarımcıları denizaltıları daha fazla dalmış durumda tutmak için çalışmalarına devam etmektedir. Klasik denizaltılar olan dizel tahrikli –elektrikli denizaltılar boşalan bataryalarının yeniden şarj işlemini gerçekleştirmek için ihtiyaç duyduğu zamanda su yüzeyine çıkarak şarj işlemini gerçekleştirirler. Denizaltıların su yüzeyinde geçirdikleri bu duruma şnorkel yapma durumu denir. Ancak denizaltılarda mevcut enerji depolama yöntemlerinin yanında sualtında kalma sürelerinin uzatacak farklı teknolojilerde

DRAFT

uygulanmıştır. Mevcutta klasik denizaltıların sualtında kalma süreleri yaklaşık olarak bir hafta olarak bilinmektedir.

Halen kullanılmakta olan klasik denizaltılarda bulunan dizel-generatör setleri ile denizaltı şnorkelde iken bataryalarını şarj eder. Şarj işlemini bitirdikten sonra denizaltı tekrar dalışa geçebilir. Dalış durumunda olan bir denizaltı hareket ihtiyacı için ihtiyaç duyduğu enerjiyi sadece bataryalarından karşılar. Batarya kapasitesi kritik seviyeye indiği vakit tekrar şnorkele çıkıp bataryalarını şarj etmek zorunda kalır. Ancak klasik denizaltılarda yeni teknoloji sayılabilecek yakıt pili teknolojisi ile hidrojen ve oksijenin denizaltı platformunda özel koşullarda depolanarak yakıt pili üzerinden enerji üreterek bu enerjinin denizaltı tarafından ihtiyaç duyulacak enerjinin karşılanmasında kullanılması denizaltının daha fazla sualtında kalmasını ve denizaltının en önemli özelliği olan gizliliğini korumasında önemli rol oynar. Bu gibi farklı bir enerji üretim ve depolama yöntemi denizaltılarda enerji depolama yöntemlerindeki gelişimi gözler önüne sermektedir.

## 2. Denizaltılar

### 2.1. Denizaltıların Tarihçesi

Denizaltılar sualtı savaş teknolojisinde önemli bir yer tutar. Denizaltı teknolojisinin gelecekte nasıl değişeceğini anlayabilmek için, denizaltı teknolojisinin geçmişine bakmakta fayda vardır. Denizaltı tarihine bakıldığında ilk denizaltı modelinin Leonardo Da Vinci tarafından tasarlandığı görülmektedir. Daha sonraları 1580 yılında William Bourne bir denizaltı tasarımı yaptı. Ancak istediği başarıyı elde edemedi. Bundan sonra 1620 yıllarında Hollandalı bir fizikçi olan Cornelius Van Drebbel, bir denizaltı inşaa etmiştir. İnşaa edilmiş olan bu denizaltı İngiltere'de bir nehirde denendi ve kısmen başarılı olduğu görüldü çünkü bu denizaltı yaklaşık olarak nehirde 5 metre kadar dalmayı başarmıştı. 1720 yıllarında Osmanlıda İstanbul'da bulunan Türk mühendisler bir denizaltı denemesi yaptılar yapılan bu denemeyle denizaltı suyun altında 2 saat kalabilmişti[1].

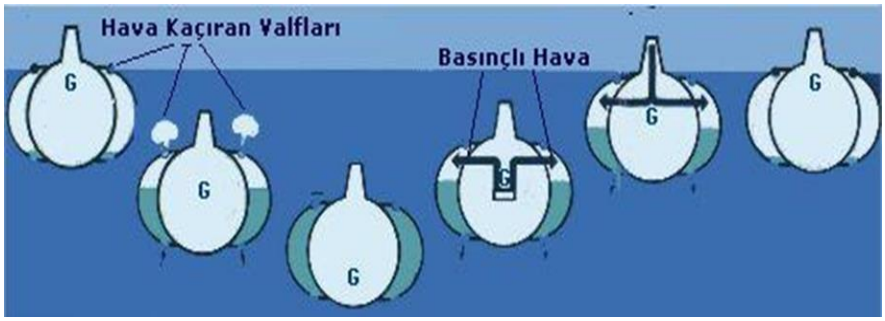
Almanlar 1902 yılında başarılı bir denizaltı yapmışlardır. Yapılan ilk dizel motorlu denizaltı 1904'te Fransa'da yapılan "Aigette" denizaltısıdır. Almanlar tarafından 1943'te şnorkel sistemi tasarlanarak denizaltıların daha uzun sürede görev yapmalarını sağlamışlardır. Ancak Amerikalılar 1954'de ilk nükleer denizaltı olan USS Nautilus'u yaparak denizaltıların dizaynında farklı bir boyut ortaya koymuşlardır. Daha sonra ABD'ye ait USS Triton nükleer denizaltısı, su yüzeyine çıkmadan dünya çevresini dolaşabilmiştir[2].

### 2.2. Denizaltıların Harekat Durumları

Denizaltıların suyun altına dalması ve su üstünde kalması için bazı etkenlerin göz önünde bulundurulması gerekir. Bunlar; deniz suyunun sıcaklığı, suyun basıncı ve suyun tuzluluk bakımından yoğunluğudur. Denizaltılar tarafından bu etkenler dikkate alınarak statik ve dinamik dalışlar gerçekleştirilir.

#### 2.2.1. Statik Dalma

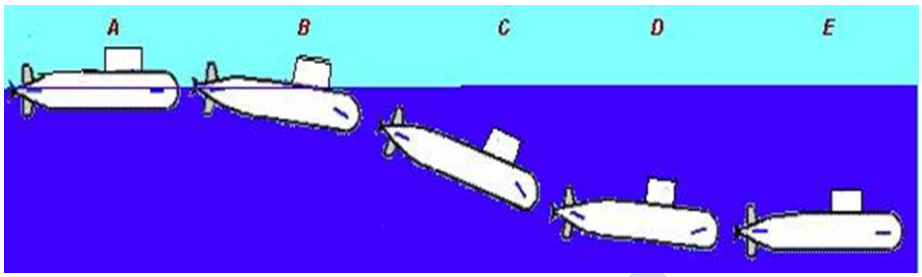
Statik dalmada denizaltılarda bulunan içi hava dolu sarnıçlardaki hava dalışı sağlayacak operatörler tarafından istenilen düzeyde hava boşaltılarak denizaltı dalış pozisyonuna geçecektir. Sarnıçlardan boşaltılan havanın yoğunluğu sarnıca giren suyun yoğunluğundan daha az olduğu için denizaltı aşağı yönlü hareket ederek dalışa geçecektir. Bu dalış şekli Şekil 2.1'de gösterilmiştir.




Şekil 2. 1. Sarnıçlara alınan su ile denizaltının dalması ve yüzeye çıkartılması [3]

### 2.2.2. Dinamik Dalma

Dinamik dalmada denizaltı baş ve kıç dümenlerini kullanır. Bu dümenlere baş ufki ve kıç ufki dümenler denir. Baş ufki dümenler operatör tarafından denizaltının hızı artırılarak devreye alınarak denizaltının dalışını gerçekleştirirken kıç ufki dümenler iste denizaltının stabilitesini yani meylini korumasına yardımcı olur. Bu dalış şekli Şekil 2.2'de gösterilmiştir.




Şekil 2.2. Baş ve Kıç Ufki Dümenlerle Denizaltının Daldırılması[4]

## 2.3. Denizaltı Tahrik Sistemleri

Denizaltılar daha önce bahsettiğimiz gibi İkinci Dünya Savaşı'ndaki etkinlikleri ile ülke savunmalarındaki önemlerini artırmışlardır. Fakat belli zamanlarda su üstüne çıkma zorunlulukları nedeni ile gizliliğin büyük önem taşıdığı bu platformlar için büyük bir risk oluşturmuştur. İkinci Dünya Savaşı süresince bu problemin giderilmesi için çeşitli sistemler üzerine çalışılsa da istenen başarı elde edilememiştir. 1950'lere gelindiğinde atom enerjisi ve AIP adı verilen "Havadan Bağımsız Sistemler" denizaltıların su altında uzun süre seyir yapmalarına imkan tanımıştır. AIP (Air İndependent Propulsion) i olarak adlandırılan bu sistemler oksijen gibi bir yakıcı gaza gereksinim duymayacak şekilde, dıştan yanmalı bir tür motor olan Stirling Motoru ile denizaltı gibi su taşıtlarının daha uzun süre sualtında kalmasını sağlamak maksadıyla tasarlanmış güç üretim sistemleridir.

### 2.3.1. Elektrik Motorlu Tahrik Sistemleri

Denizaltılarda Şnorkel durumunda dışardan alınan hava ile itici güç için dizel motorundan elde edilen elektrik enerjisi kullanılır. Elektrik enerjisi bataryalarda depolanır. Daha sonra elektrik motorlarına iletilir. Su altında dizel motor çalışmadığından (dizel motorun çalışması için ihtiyaç duyulan hava yüzünden) bataryalardaki depolanan elektrik enerjisi ile elektrik motorları beslenir ve denizaltı için gerekli hareketin oluşması sağlanır. Denizaltılarda bulunan DC ana tahrik motorları (tek şaft üzerinde iki motor) elektriksel olarak farklı seri ve paralel kombinasyonlarında bağlayarak. Motorun tersine döndürülmesi işlemi ise, motor armatür devresindeki akımın akış yönünün tersine çevrilmesiyle gerçekleştirilir. [5]

### 2.3.2. Walter Türbini Tahrik Sistemi

Alman bilim adamı Helmuth Walter tarafından tasarlanan kimyasal motor yüksek basınçlı buhar üretmek amacıyla kullanılan yanmayı sağlamak için havaya ihtiyaç kalmamış olup, oluşturulan buhar ise 7.500 hp gücündeki buhar türbinini çevirmek için kullanılmaktaydı. Walter'in kimyasal motoru yüksek saflıkta (%100'e yakın) hidrojen peroksitin - $H_2O_2$ (perhidrol veya htp -high test peroxide- olarak da adlandırılır) potasyum permanganat temelli bir katalizör üzerinden, yüksek sıcaklık ve basınç altında hızla 2000°C sıcaklığında su buharı ve oksijen karışımına ayrışması prensibiyle çalışıyordu. Bu safhada yüksek sıcaklıkta bulunan ve serbest oksijen içeren sisteme verilen dizel yakıtıyla şiddetli bir yanma olmakta ve bu da basıncı ve ısıyı daha da arttırıyordu. Artan sıcaklığı kontrol altında tutmak için motora ekstra su verilmesiyle aynı zamanda üretilen buhar miktarıda yükseliyordu. Bu sebeple Walter türbini hem buhar hem de gaz türbini teknolojilerini bir arada barındıran hibrit bir türbin türü olarak ifade edilebilmektedir. Meydana gelen buhar ve gaz karışımı yanma odasından türbine verilerek ve oradan çıkınca da yoğuşturucuda su ve yanma sonucu meydana gelen karbondioksit olarak ayrılır. [6].

### 2.3.3. Kapalı Devre Dizel Tahrik Sistemleri

Kapalı devre dizel (KDD) sistemleri su üstündeyken şnorkel sistemini kullanarak hava ihtiyacını giderir. Ancak dalıştayken denizaltında depoladığı havayı kullanarak dizellerin hava ihtiyacını karşılar. Dalış durumunda ise denizaltıda sıvı olarak depolanan oksijen ile bir asal gaz (çoğunlukla argon, bazen

helyum veya zenon) karışımının meydana getirdiği suni hava ile Dizelin hava ihtiyacı giderilir. Dizel motorun yaptığı yanma işleminden sonra meydana getirdiği atık gazlar ise soğurulup, ayrıştırılır. Bu ayrıştırma sonunda argon tekrar kullanılmak üzere emiş devresine gönderilirken karbondioksit ile diğer atık gazlar suyla denizaltıdan dışarı verilir. [7].

### 2.3.4. Stirling Motorlu Tahrik Sistemleri

Havadan bağımsız tahrik sistemlerinden bir tanesi de ise Stirling yani dıştan yanmalı motorlardır. Dıştan yanmalı bir motor olan Stirling motoru dizel yakıtın yanması sonucu oluşan ısıyı kullanan dıştan yanmalı bir motor çeşididir. Bahse konu motorun pistonlarına harici ısı verilerek genleşen ve sonrasında soğuyan hava etkisiyle pistonlar hareket ettirilerek elektrik enerjisi üretimi sağlanır. Elde edilen elektrik ile denizaltı pervanesi döndürülerek denizaltı sevk edilir. [8]. Stirling motoru denizaltıda bulunan dizel yakıtın denizaltıdaki depolanan sıvı oksijen ile yakılması sonucu meydana gelen ısı kullanılarak elektrik enerjisi elde edilir. Oluşan atık gazlar filtre edilerek deniz suyuna atılır.

### 2.3.5. Buhar Tirbünli Tahrik Sistemleri

Fransa tarafından geliştirilmiş olan ve **Mesma** (Module d'Energie Sous-Marin Autonome) olarak bilinen tahrik sistemi havadan bağımsız çalışan bir tahrik sistemidir. Kapalı devre bir yakma hücresinde buhar üretilmesi ve bu buharla türbinlerin çalıştırılması prensibiyle çalışır. Burada buhar üretilmesi için konvansiyonel yakıcı kullanılan sistemdir. [9].

Bahse konu sistem temelde kapalı çevrimli bir buhar türbini sistemi olan Rankine çevrimine bağlıdır. -185 0C'de depolanan sıvı oksijen önce gaz formuna sokulur. Daha sonra yanma odasında etanol (C2H5OH) ile karıştırılıp yanma işlemi yapılır. 60 atmosfer basınçta 700 0C'lik bir gaz meydana gelir. İlk aşamada üretilen bu gaz ikinci aşamada buhar türbininden geçen buharı oluşturmak için kullanılır. Böylelikle ısı enerjisi mekanik enerjiye çevrilmiş olur. Buhar türbinine takılı olan alternatör üretilen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirerek elektrik üretilmiş olur. Yan ürün olarak meydana gelen egzoz gazının yüksek basınçlı olması farklı bir sisteme gerek kalmadan denize salınması sağlanır. [10].

### 2.3.6. Yakıt Pili Tahrik Sistemleri

Denizaltılarda bulunan yakıt pili sevk sistemleri Denizaltıların su üstüne çıkmadan sualtında seyir yapmalarında önemli rol oynarlar. Yakıt pilleri denizaltıda depolanan oksijen ve hidrojenin yakıt pilinde kimyasal reaksyona girerek doğrudan elektrik üretmeleridir. Bu kimyasal reaksyondan yan ürün olarak su meydana gelir. Üretilen elektrik enerjisi ile denizaltının bataryaları şarj edilir ve denizaltının sevk edilmesi için ana motora verilir.

Yakın zamanda Siemens firması tarafından tasarlanan PEMFC yakıt pilleri farklı tip denizaltılarda kullanılmaktadır. Alman Type 212 sınıfı denizaltılarda 34kW gücünde 9 adet olarak totalde 304 kW gücünde BZM 34 PEMFC yakıt pili sistemi mevcuttur. Alman tasarımı olan Type 214 denizaltılarında ise 2 adet 120 kW'lık olarak totalde 240 kW gücünde BZM 120 PEMFC yakıt pili sistemi mevcuttur. Farklı tasarımlarda ve çok çeşitli alanlarda kullanılan yakıt pilleri bulunmaktadır.[11]

## 3. Denizaltılarda Enerji Depolama Yöntemleri

Enerjinin istendiği zaman ve istenilen yerde kullanılmaya hazır olması istenir. Enerjiyi istediğimiz zaman kullanabilmek için onu saklamaya depolama denir. Enerji depolama çeşitli şekillerde olabilmektedir. Denizaltılarda enerji depolama için; oksijen, batarya, yakıt ve hidrojene ihtiyaç duyulmaktadır. Denizaltılar ne kadar çok enerji depolayabilirlerse menzilleri buna paralel olarak uzamaktadır. Bu nedenle denizaltılarda farklı enerji depolama yöntemleri ortaya çıkmıştır.

### 3.1. Klasik Konvansyonel Denizaltılarda Enerji Depolama Yöntemleri

#### 3.1.1. Bataryalar

Bataryalar, Birincil ve İkincil olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Birincil kategorideki bataryalar şarj edilemeyen bataryalar olup tek seferlik uygulamalar için kullanılırlar. Denizaltılar için ikincil kategorideki tekrar şarj edilebilen bataryalar kullanılır. Bataryaların maliyetleri ve ömürleri denizaltılar için önemlidir. Zira bu parametreler denizaltının bakım onarıma girme süresini etkilemektedir. Denizaltılarda kullanılan batarya özellikleri Tablo 3.1'de ve Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

DRAFT

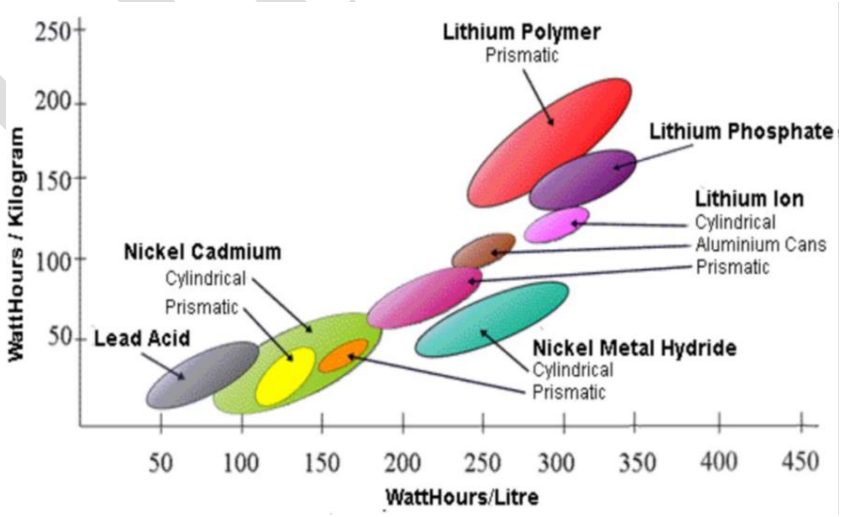
**Tablo 3.1** Denizaltılarda Kullanılan Batarya özellikleri [12]

| Classification | Lead-Acid | Alkaline | Alkaline | High Temprature |
|---|---|---|---|---|
| Battery Type | Lead Acid | Ni/Cd | Ag/Zn | LAIS(Lithium-Aluminum/Iron Sulfide Battery) |
| Maturity | Mature | Mature | Mature | Near Mature |
| Energy Density **(Wh/kg)** | 20-35 | 20-37 | 90 | 160-225 |
| Power Density (kW/kg) | 0.02-0.175 | 0.1-0.6 | 0.2-0.4 | 0.19-0.36 |
| Cycle Life | 200-2000 | 500-2000 | 100-2000 | 1000 |
| Service Life | 3-10 | 5-10 | 3 | - |
| Battery Effluent | H2 Gas | None | None | None |
| Ease of Operation | Good, , | Very good | Poor, | Projected to |

**Tablo 3.2** Batarya teknolojileri [13]

| Description | Power Density | Specific Power | Energy Density | *Specific Weight* |
|---|---|---|---|---|
| | kW/litre | kW/kg | Wh/litre | Wh/kg |
| Lead acid | 0.12 | 0.08 | 90 | 44 |
| Zebra | 0.24 | 0.16 | 167 | 114 |
| Sodium Sulphide (NaS) | 0.021 | 0.17 | 170 | 117 |
| Lithium ion | 0.22 | 0.11 | 270 | 120 |
| | | | | |

Kurşun asit bataryalar, yıllardır klasik denizaltılarda ana güç kaynağı olarak kullanılmaktadır. [14]. Batarya teknolojisi ilerledikçe, lityum iyon (Li-ion) bataryalar diğer bataryalara nazaran ön plana çıkmaktadır. Li-ion bataryalar, 2000'li yıllardan bu yana elektrikli araçlar, cep telefonları ve dizüstü bilgisayarlar vb. cihazlarda kullanılmaktadır. Enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu, ömür, ve maliyet yönünden Li-ion bataryalar, kurşun asit bataryalara göre daha iyi olabilirler. Li-ion bataryalar kurşun asit bataryalarla karşılaştırıldığında, aynı şartlar altında neredeyse iki kat daha uzun süre kalabilirler. Farklı batarya çeşitlerinin enerji yoğunluğu açısında karşılaştırması Şekil- 3.1'de sunulmuştur.




**Şekil- 3.1** Farklı batarya çeşitlerinin enerji yoğunluğu açısında karşılaştırılması [15].

Bataryaların enerji yoğunluğunun, önemi denizaltıların su altında kalma sürelerini etkiler ve denizaltının gizliliğini koruması için önem arz eder. Yüksek enerji yoğunluğunda olan bataryalar boyut olarak

küçülürse denizaltıda bataryaların konulduğu odalarda boş alan meydana gelmesini sağlar ve bu boş alanlar denizaltıların başka ihtiyaçları için kullanılabilir.

### 3.1.1.1. Kurşun Asit Bataryalar

Kurşun asit bataryalar yıllarca denizaltılarda başarıyla kullanılmışlardır. Bakım gerektirmez, elektrolit tabaka malzemesinde veya jelde depolanır. Yeni tiplerde, testlerdeki bipolar hücreler kullanılır. Bu batarya ağır, fakat ucuzdur. İyi bir batarya yönetim sistemi ile yaşamı güvenlidir. Hali hazırda denizaltılarda kullanılmaya devam edilmektedir. Tek bir batarya, negatif ve pozitif plakalardan oluşur. Sırasıyla kurşun ve kurşun dioksitten oluşturulmuş plakalar, sülfürik asitte batırılarak ve elektrolit ile kauçuk bir asit sızdırmaz batarya kabına konularak batarya oluşturulur. Bataryaların şarj edilmesi ve deşarj edilmesi durumunda plakalarda bulunan elektronlar plakalar ve elektrolit arasındaki akımı oluşturur. Kurşun asit bataryalarda batarya voltajı nominal olarak 2 VDC'dir. Bataryalar seri ya da paralel bağlanarak farklı voltajlardaki batarya grupları oluşturulabilir. Kurşun asit bataryalar DC dağıtım şebekesine bağlı olan anlık voltaj, şarj durumuna bağlı olarak bataryalar kapasitesinin yüzde 20'ye kadar düşebilmektedir.[16].

Bataryada kimyasal tepkime kimyasal reaksiyonun her iki yönde de ilerleyebildiğinden, bataryanın toplamda enerji verme ve alma kabiliyeti ve reaksiyon oluşma hızı bataryadan düşük güçte güç talep edildiğinde batarya voltajı daha uzun süre yüksek kalarak daha fazla enerji verilebilecektir. Yüksek sıcaklıktan etkilenen kurşun asit bataryalara batarya soğutma sistemleri takılarak bataryadan maksimum seviyede faydalanılır. Ayrıca bataryaya hava üflenerek elektrolit sıvısı homojen olarak dağıtılmaya çalışılarak kimyasal reaksiyonun en verimli şekilde oluşturulması sağlanır.

**Tablo 3.3** Kurşun asit Bataryaların Denizaltılardaki Kullanımına Göre Avantaj ve Dezavantajları[17]

| **Avantaj** | **Dezavantaj** |
|---|---|
| Uzun yıllarıdır kullanılan ve kendini kanıtlanmış bir teknolojiye sahiptir. | Farklı türdeki bataryalara göre daha az enerji yoğunluğuna sahiptir. |
| Uzun batarya ömrüne sahiptir. | Şarj sırasında hidrojen üretir ve bu husus istenmeyen bir durumdur. |
| Son dönemlerde yapılan iyileştirmelerle daha iyi hale gelmiştir. | Şarj ve deşarj sırasında bataryanın voltajı, sıcaklığı ve asit seviyesinin izlenmesi önem arz eder. |

### 3.1.1.2. Nikel Kadminyum Bataryalar

Nikel Kadmiyum (NiCd) bataryalar 1915'lerden beri ticari alanlarda kullanılmaktadır. Bu bataryalarda negatif elektrotta metalik kadmiyum ve pozitif elektrotta nikel oksihidroksit bulunmaktadır. Kurşun asitli bataryalara kıyasla daha fazla çevrim sayısı, daha yüksek güç ve enerji yoğunluğuna sahiptir. Bu bataryaların ömrü 1500 ila 3000 döngü arasında derin deşarj aralığında kullanılan NiCd bataryanın türüne bağlıdır. [49]. Bu tip bataryalar daha düşük seviyede bile çalışabilme özelliği ile öne çıkmaktadır. 20 C ile 40 C arasında değişen sıcaklık aralığında çalışabilmektedir. Ayrıca, bu piller kadmiyum zehirliliği nedeniyle Avrupa'da tüketici kullanımına yasak olan pillerdir. [18]. En iyi performans, %20 ila %50 arasında deşarj edildiğinde elde edilir. Nikel-Kadmiyum (Ni/Cd) pil teknolojisi, ticari uygulamalar için denizaltılar da kullanılan bataryalardan daha küçük boyutlarda kullanılan pillerdir. Çoğu taşınabilir şarj edilebilir elektrikli alet veya cihaz, Ni/Cd pillerle çalışır. Ni/Cd bataryanın çoğu özelliği kurşun asit batarya ile benzerlik gösterir. Ni/Cd piller, yüksek enerjileri açısından önem arz ederler.

**Tablo 3.4** Ni-Cd Bataryaların Avantaj ve Dezavanjları [19]

| **Avantaj** | **Dezavantaj** |
|---|---|
| Diğer bataryalara göre yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. | Batarya tamamen boşaldığında ani gerilim düşümü görülmektedir. |
| Uzun batarya ömrüne sahiptir. | Bellek etkileri |
| Hızlı şarj özelliğine sahiptir. | Maliyeti yüksektir |
| Az bakım gerektirir. | |

DRAFT

### 3.1.1.3. Lityum Bataryalar

Geçmişten günümüze farklı tipte birçok batarya çeşidi geliştirilmiştir. Denizaltılarda kullanılan bataryalarda genel olarak kurşun asit bataryalardır. Ancak daha fazla sualtında kalmak için daha fazla enerji depolamak için daha fazla kapasiteye sahip bataryalar için çalışmalar yapılmaktadır. Lityum İyonun kimyasal yapısı irdelendiğinde;

Kararsız bir element olan lityumun hava ile tepkimeye girmemesi gerekir, yoksa yangın meydana gelme ihtimali oluşabilir. Lityumun zayıf yanı olarak görülen tepkimeye girme meyili aynı zamanda lityumun güçlü yanıdır da denilebilir. Bir bataryada elektronların eksi elektrottan (anottan) artı elektroda (katot) akması gerekir. Bundan dolayı anotun elektronlarını kolayca veren bir materyal içermelidir. Lityum elementler arasında bünyesinde bulundurduğu elektronları en kolay vermeye en meyilli olanıdır. Diğer batarya türleri elektronlarını yavaş gerçekleşen kimyasal tepkimelere dayanarak vermektedirler. Bir lityum iyon pil şarj edildiğinde ya da kullanıldığında iyonlar çevreleriyle etkileşmeden elektrotlar arasında akar ve bu durum da pilin daha uzun ömürlü olması ve performansı düşmeden yüzlerce kez şarj edilebilmesi anlamına gelmektedir. [20]

Lityum-iyon piller denizaltılarda da büyük etkiler yaratabilir. Denizaltıların özellikle sualtında sessiz bir şekilde uzun süre hareket kabiliyetine sahip olmaları önemlidir. Lityum-iyon pillerin, daha uzun süre dayanabilmesi, hızlı şarj olması ve sessiz çalışabilmesi büyük avantaj sağlayabilir. Güney Kore, geliştirdiği pillerle denizaltı çalışma sürelerini iki katına çıkarabileceğini açıklarken, Japonya ilk lityum-iyon pillerle donatılmış denizaltısını tanıttırmıştır.

Savunma sanayiinde lityum kullanımının bir diğer yöntemi de bu hammaddenin yanıcı özelliğiyle daha fazla ısı üreterek, termonükleer silahlar da dahil olmak üzere birçok gelişmiş savaş silahında kullanılmasıdır.[22]

**Tablo 3.5** Lityum İyon Bataryaların Avantaj ve Dezavantajları[21]

| **Avantajları** | **Dezavantajları** |
|---|---|
| Lityum iyon bataryaların enerji yoğunluğu diğer bataryalara göre yüksektir. | Aşırı şarj ve aşırı deşarj durumuna karşı hassastır. Bu durumda yangın riski oluşabilmektedir. |
| Diğer batarya türlerine göre ani yüklerde daha fazla enerji sunabilmektedir. | Batarya yönetim sistemi gerekmektedir. |
| Diğer batarya türlerine göre daha hafiftir. | Kısa devre durumunda yangın riski oluşmaktadır. |
| Uzun ömürlü bataryalardır. | Elektrokimyasal yapıya bağlı olarak lityum yangını bilinen yangın söndürücüler ile söndürülemeyebilir. |
| Bakım gerektirmeyen kapalı yapıdadır. | Yangın anında toksin gaz açığa çıkar. |
| Şarj olurken herhangi bir gaz açığa çıkarmaz | Kısa devre akımları yüksektir. |
| Nem- Sıcaklık gibi ortam şartlarından etkilenmez. | Hali hazırda denizaltı platformlarında yaygın olarak kullanımları bilinmemektedir. |
| Düşük çalışma ısısına sahiptir. | |

### 3.1.2. Dizel Generatör Sistemi Yakıt Depolama

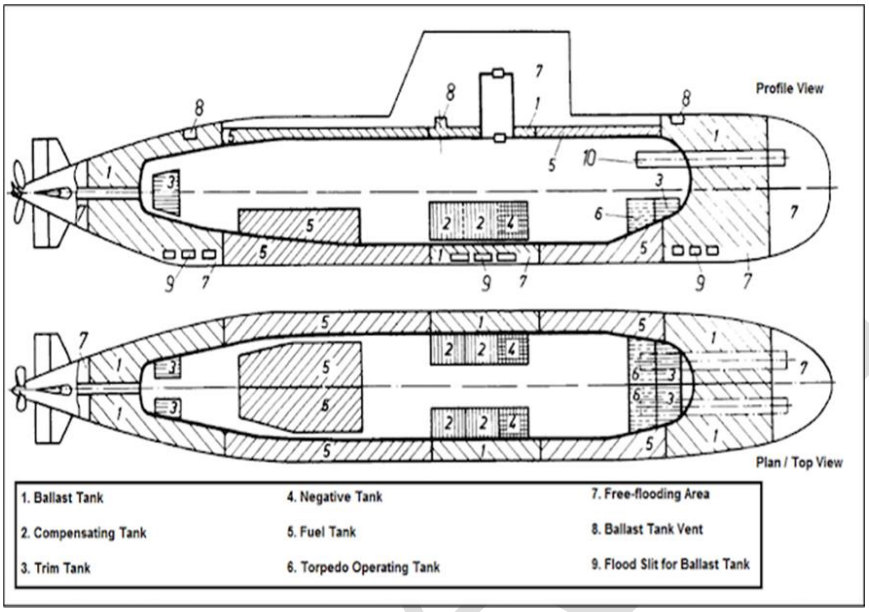
Klasik dizel generatör sistemine sahip denizaltılar petrol bazlı dizel makine yakıtı depolar bu yakıtın depolama miktarı denizaltının kullanım amacı ve denizaltıların dizayn kısıtları göz önünde bulundurularak belirlenir. Hali hazırda birçok dünya ülkesinde kullanılan dizel tahrikli denizaltılarda dizel makinelere uyarlanmış generatörler ile denizaltıların bataryaları şarj edilir.

### 3.1.2.1. Dizel Yakıt Depolama

Denizaltılarda farklı işlevleri olan birçok tank bulunur. Bunlardan bir tanesi de dizel yakıt tankıdır. Dizel akaryakıt kimyası; dizel yakıt yağları, daha genel olarak ham petrol olarak bilinen petrolden elde edilir. Tüm ham yağlar, hidrokarbonlar olarak bilinen karbon ve hidrojen bileşiklerinden oluşur. Yağın yapısı molekül adı verilen küçük parçacıklardan oluşur. Ham petrolde, bir molekül belirli sayıda karbon atomundan ve belirli sayıda hidrojen atomundan oluşur. Bir moleküldeki karbon ve hidrojen atomları arasındaki oran, ham petrolün doğasını belirler.[23] Denizaltılarda kullanılan dizel makine yakıtları ise

çeşitli askeri standartlara uygun olmak zorundadır. Çoğu denizaltı filosu yakıt tankı tipi denizaltının kapasitesi yaklaşık 19.000 ila 25.000 galon arasında değişen üç yakıt balast tankına sahiptir. [23]

Denizaltılarda akaryakıt dolu tanklar içindeki akaryakıt kullanıldıkça denizaltının dengesinin sağlanması için içindeki azalan akaryakıtın yerine deniz suyu alınarak denizaltının su içerisindeki dengesi sağlanmış olur. Tabi akaryakıtın yoğunluğu deniz suyundan az olduğu için suyun üzerinde kalır. Akaryakıtın denizaltının dizel motorlarına gitmeden önce seperatörlerden geçirilip temizlendikten sonra dizel motorlara gönderilir. Dizel motorların tahrikiyle dizel motora akuple edilmiş generatörlerden elektrik enerjisi üretilerek denizaltının enerji ihtiyacı karşılanır.




**Şekil 3.2** Dizel Elektrik Tahrikli Denizaltı Tank Planı[24]

### 3.1.3. Yakıt Pili Sistemi AIP

Dizel tahrikli denizaltılarda temel unsur, dizel motorlarda içten yanma için gerekli olan hava, daha özel olarak oksijendir ve dizel denizaltılar, oksijeni içinden geçirerek solumak zorundadır. Yanmanın gerçekleşmesi için şnorkel direğinin kullanılması zorunludur. Bu önemli zamanı azaltmak için, denizaltılara su altı dayanıklılığını uzatmak için ek seçenek sunabilen havadan bağımsız tahrik (AIP) sistemleri tanıtıldı [25].

Yakıt hücreleri, hidrojen ve oksijen arasındaki reaksiyonu kolaylaştırarak, herhangi bir emisyon olmaksızın yan ürünü olarak sadece su üreten elektrik üretir. Almanya'dan Siemens, Howaldswerke Deutsche Werft AG (HDW) Alman donanması için Type 212A denizaltısıyla donatılmış yakıt hücresi ünitelerinin üretimini sağladı ve bu denizaltıları geliştirdi.[25]
Yakıt hücreleri, aşağıdaki özelliklerden dolayı dizel-elektrikli denizaltılar için en uygun AIP sistemidir [25]:

- %70'e varan yüksek verimlilik (H2/O2 çalışması).
- Normalde yalnızca pille çalıştırılarak elde edilebilen enerji üretim sürecinin sessizliği.
- Operasyon sırasında derinlik bağımsızlığı.
- İyi işletim ve kontrol özellikleri.
- Ürün suyunu kolayca depolayarak ağırlıkları dengeleme.

#### 3.1.3.1. Hidrojen Depolama

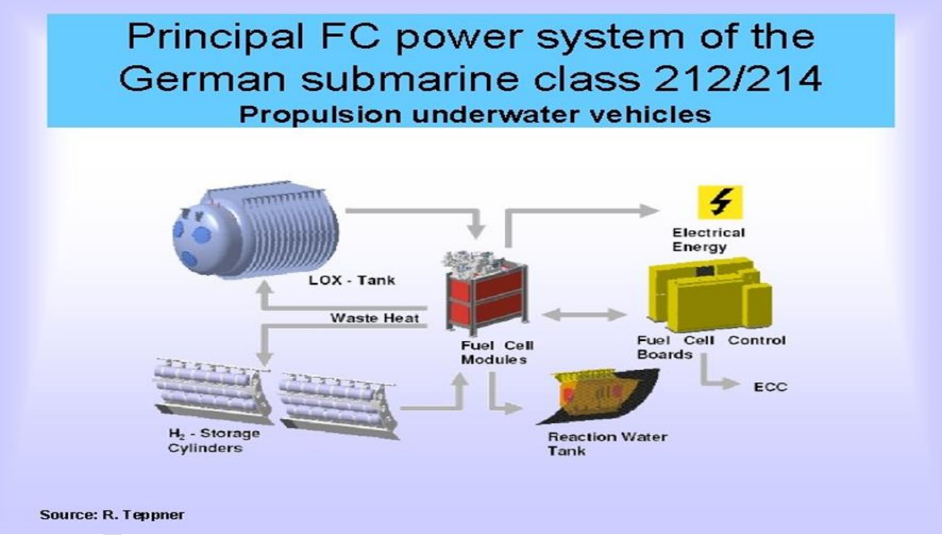
Denizaltılarda bulunan AIP sistemlerinde enerji üretiminin ortaya çıkması, reaksiyonun gerçekleştirilebilmesi için tüm yakıt hücresi sistemleri, reaksiyonun elektrik üretmesi için tipik olarak hidrojen ve bir oksitleyiciye, genellikle oksijene ihtiyaç duyar.

Hidrojen, tüm yakıtların temel yapı taşıdır ve hidrojen saf haldedir. Tüm yakıt hücrelerinin iç kimyasal süreçlerinde H2 formu gereklidir. Hidrojen, birkaç saf formdan birinde depolanabilir.[17] Hidrojen, sıkıştırılmış gaz formu, kriyojenik sıcaklıklarda sıvı form ve bazı hidritlerde katı formlar gibi çeşitli kimyasal durumlarda depolanabilir. Birçok çalışma, en verimli yolun gaz halinde depolanması olduğunu göstermiştir. Ancak güvenlik sorunları ve istikrarsızlık nedeniyle, sıkıştırılmış gaz belki de ilerlemek için en iyi yol olarak görülmemektedir. Bu yüzden Metal hidritler en verimli yöntem değildir, hidrojenin depolandığı kaplar herhangi bir serbest gaz içermeyen metal hidritlerle dolu olduğundan hidrojeni depolamanın en güvenli yoludur.

**Gaz formunda Hidrojen depolama**; Bu form için depolama yoğunluğu çok zayıf olmasına rağmen, gaz halinde depolama küçük hacimli gazların taşınmasının gerekli olduğu endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Gaz basıncının arttırılması, daha fazla H2'nin depolanmasına izin vermekte olup, ancak depolama silindirinin boyutunu ve ağırlığını da artırmaktadır. Yüksek basınçta hidrojen depolanır.

**Hidrojenin - Kriyojenik (sıfır altı sıcaklıkta) olarak depolanması**; Herhangi bir gazın sıvı olarak kriyojenik depolanması, belirli bir kullanılabilir hacim için daha fazla gazın taşınabileceği amacını taşımaktadır. Ancak gazlı depolamada olduğu gibi, bu depolama biçiminin zorluğu, kriyojenik korumak için alınması gereken önlemler koşullar barındırır. Kriyojenik sıvıların depolanması, süper teknolojilerle kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Bu işlem hidrojenin sıvı olarak depolanması işlemidir.

**Hidrojenin - METAL HYDRIDE Formunda Depolanması**; Bir hidritin çalışma prensibi, bir tür metal matrisin ( bir demir titanyum ) hidrojen gazı ile doyurulur ve hidrojen matrise bağlanır. Emilen hidrojen miktarı, ortamdaki sıcaklığa ve basınca bağlıdır. Hidrojen-Metal Hidrür (hidrit) yöntemi denizde denenmiş tek yöntemdir. Almanya'da Tip 205 denizaltısında hidrit depolama sistemi kullanılmıştır. Bu yöntem hidrojen depolama yöntemlerinin en güvenlisi olarak kabul edilir. Şekil-3.3'de 212 ve 214 sınıfı Alman denizaltılarında hidrojen depolama şekli gösterilmiştir.




**Şekil 3.3** Hirojenin Metal Hidrid Forunda Depolanmasının Gösterilmesi[26]

### 3.1.3.2. Oksijen Depolama

Oksijen için en yaygın depolama yöntemleri gaz halinde veya sıvı olan LOX şeklindedir. LOX, yüksek hacimsel ve yoğunluk nedeniyle oksijen depolamak için en verimli yöntemdir. Yakıt pili kullanan sistemlerde hidrojenden elektrik enerjisi elde edilebilmesi için mutlaka oksijene ihtiyaç vardır. Bu da oksijen depolamayı zorunlu hale getirmektedir. [25].

**Oksijenin Gaz Formunda Depolanması**; Oksijen gaz formunda yüksek basın altında ve yüksek basınca dayanıklı kaplarda depolanır. Yüksek basınçlı kaplarda oksijen depolaması hacim ve ağırlık açısından çok verimsizdir. Ayrıca yüksek basınç altında depolandığında depolama şişelerinin kaynak dikişleri önemli bir güvenlik sorunu teşkil edebilir.

**Oksijenin Kriyojenik Depolama Metodu**; Bu yöntem, oksijenin sıvı olarak depolanmasıdır. AIP (yakıt pili) sistemine sahip denizaltılarda depolama için en iyi seçenek olarak kabul edilir. Oksijenin gaz olarak depolamasından daha verimlidir. Çünkü daha fazla hacim sağlayarak daha fazla oksijen depolanmasına imkan verir. (LOX) Depolama tankları tipik bir depolama ile süper yalıtımdan oluşmaktadır.

**Oksijenin - Kimyasal Reformasyon Metodu İle Depolanması**; Bu yöntemde oksijen üretebilen bir dizi kimyasal bileşik bulunmaktadır. Bu yöntemde içinde oksijen bulunduran bileşikler belirli şartlar oluşturularak kimyasal reaksiyona sokularak oksijen üretilir. Kimyasal reaksiyonun bir yan ürünü olarak kullanılan Sodyum Perklorat (NaCIO04) meydana gelir.

### 3.2. Nükleer Denizaltılarda Kullanılan Enerji Depolama Yöntemleri

Günümüzde sadece İngiltere, ABD, Fransa, Rusya, Çin ve Hindistan'ın nükleer enerjili denizaltıları bulunmakta olup, saydığımız ülkelerden sadece ilk dördü onları nasıl inşa edeceklerini biliyor (Çin ve Hindistan onlarınkini Rusya'dan satın aldı). [27] Nükleer denizaltı inşaa teknolojisi bu teknolojiye sahip ülkelere muazzam bir avantaj sağlar. Çünkü klasik konvansiyonel denizaltılar elektrik bataryalarıyla çalışır ve bu bataryaları şarj etmek için oksijene ihtiyaç duyan bir dizel motor gerekir. Bu, denizaltının yüzeyden periskop derinliğinde kalması gerektiği anlamına gelir. [27]

Ancak nükleer denizaltılarda acil durumlar için kullanılacak bataryalar bulunur. Depolayabildiği enerji miktarı bataryanın kapasitesini belirler. Seri, paralel ya da seri-paralel şekillerde bağlanarak acil durumlarda denizaltının ihtiyaç olan enerji elde edilir. Denizaltıda reaktörden herhangi bir şekilde güç elde edilememesi durumlarında bu bataryalar hayati öneme sahip sistemlerin çalıştırılması için kullanılır.

Nükleer denizaltılarda reaktörün çalışması, nükleer reaktör yaklaşık olarak büyük bir kulübe boyutunda güçlü bir çelik yapıda olmaktadır. Bu yapının içinde, içinde kontrol çubukları bulunan Uranyum-235 bulunur. [71] Bu kontrol çubukları çıkarıldığında, uranyum atomları parçalanmaya ve enerji üretmeye başlar. Enerji, borularda aşırı ısıtılmış buhar olarak taşınan suyu ısıtır, bu da suyu ikincil bir boru sisteminde ısıtır ve İkincil buhar, pervanelere güç sağlayan türbinlere güç sağlamak için kullanılır.
Sonuç olarak nükleer denizaltılarda sadece acil durumlar için enerji bataryalar ile depolanır.

## 4. Sonuç ve Öneriler

Klasik konvansiyonel denizaltılarda ise denizaltı sık sık yakıt ikmali yapmak zorundadır. Bu sebeple denizaltıda enerji depolama hususu hayati öneme haiz olup denizaltının su altında seyir kabiliyetini doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden denizaltılarda çeşitli depolama yöntemleri geliştirilmiştir. Bu hususu 3 grupta değerlendirecek olursak; Bunlar sadece batarya sistemi kullanarak enerji depolayan denizaltılar, Hem batarya sistemi kullanan hem de yakıt pili kullanarak depolanan oksijen ve hidrojenden elde edilmesi bir diğeri ise sadece yakıt pili kullanarak denizaltıda depolanmış hidrojen ve oksijenden enerji elde edilmesidir.

Sadece batarya sistemi kullanarak depolanmış kimyasal enerjinin kullanılması enerjinin tekrar üretilip depolanması için denizaltının şnorkele çıkması denizaltının su altında uzun süre kalmasını ve gizliliğini bozması büyük bir dezavantaj olmaktadır. Ancak gelişmekte olan enerji depolama sistemleri göz önüne alındığında yeni gelişen lityum batarya teknolojileriyle denizaltıların daha fazla kimyasal enerji depolayabilecekleri ve bununda denizaltının daha fazla sualtında kalmasına imkan tanımaktadır. Lityum bileşenli bataryaların denizaltı platformlarına uygulanması ise lityumun oluşturabileceği yangın risklerine karşı denizaltıda farklı önlemlerin alınmasını gerekli kılar. Buda denizaltının görevini yerine getirmesinde zaafa neden olabilmektedir.

İkinci durumda ise hibrit denizaltı depolama sistemi diyebileceğimiz enerjinin denizaltıda bataryalarla kimyasal olarak depolanması ve aynı zamanda yakıt pili sisteminde yer alan hidrojen ve oksijenin farklı formlarda depolanarak enerji depolanmasıdır. Burada iki farklı opsiyon oluştuğundan sadece bataryayla elektrik enerjisi depolanyan denizaltılara oranla daha az şnorkel yapma ihtiyacı doğduğundan denizaltı daha fazla su altında kalarak su yüzeyinde daha az çıkarak gizliliğini daha uzun süre koruyabilmektedir. Bu husus da denizaltıya büyük bir avantaj sağlamaktadır. Günümüzde bu tarz hibrit enerji depolama

DRAFT

sistemine sahip birçok donanma bulunmakta olup denizaltının bu avantajının tercih sebebi olduğu değerlendirilmektedir.

Diğer bir denizaltı enerji depolama yöntemi ise sadece yakıt pilinin kullanılarak enerji elde etmesi için enerjinin depolanmasıdır. Bu tür denizaltılarda enerji yakıt olarak depolanan hirojen ve onun gireceği kimyasal reaksiyonda ihtiyaç duyduğu oksijenin farklı formlarından elde edildiğinden denizaltının sualtında kalma süresi uzadığı için bu durum denizaltıya büyük bir avantaj sağlamaktadır. Ülkemizde hem klasik konvansiyonel denizaltılar hem de yakın gelecekte envantere girecek olan enerji depolama olarak hibrit sisteme sahip olan denizaltılar göz önünde bulundurulduğunda denizaltılarda enerji depolama yöntemlerinin gelişime açık olduğu ve gelişen yeni teknolojilerle daha da gelişeceği çünkü bu hususun denizaltıların gizliliğini koruyarak uzun süre sualtında kalmasının depoladığı enerji ile doğrudan ilişkili olduğu düşünüldüğünde denizaltılarda enerji depolamanın önemi bir kez daha su üstüne çıkmaktadır.

**Kaynaklar**

[1] Harris B., The Navy Times Book of Submarines: A Political, Social, and Military History, 2nd Ed., Berkley Books, New York, 1997.
[2] Denizaltılar ve Geleceğin Sualtı Harp konseptleri Araştırma Raporu Ekim 2018 (STM) Clark, AGE (STM)
[3]https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/sites/default/files/deniz_altilar_nasil_suyun_altina_dalar.jpg
[4] http://www.denizaltici.com/aboutus-submarine-sec3.htm
[5] https://maritime.org/doc/fleetsub/elect/chap2.htm
[6] Walter Türbini kullanan denizatılar hakkında daha fazla bilgi için: http://www.uboat.net
[7] https://uskudar.biz/m%C3%BChendishane/makaleler/kapal%C4%B1-devre-dizel.html
[8]https://mavivatan.net/denizaltilar-ve-tahrik-sistemleri-2-havadan-bagimsiz-tahrikli-dizel-elektrik-denizaltilar
[9] http://tesisatvemuhendis.blogspot.com/2017/09/denizaltlarda-kullanlan-havadan-bagmsz.html/
[10] Kerros, P., Inizan, C., Grousset, D. (1992). MESMA AIP systems for submarines. DGA-DCN-INDRET, France
[11] https://www.slideshare.net/jornw1/u6000-power-73385-fuel-cellsversion1e
[12] Cortana Corporation, Anon., Air Independent Propulsion (AIP) Systems, 1988
[13] Paper on Submarine Power and Propulsion Presented at Pacific 2008 in Sydney, Australia.
[14] J. Szymborski, "Lead-acid batteries for use in submarine applications," in Proceedings of the 2002 Workshop on Autonomous Underwater Vehicles, San Antonio, 2002.
[15] F.-S. Gady, "South Korea Launches First-of-Class 3,000-ton KSS-III Diesel-Electric Attack Submarine," The Diplomat, 14 September 2018. [Online]. Available: https://thediplomat.com/2018/09/south-korea-launches-first-of-class-3000-ton-kss-iii-diesel-electric-attack-submarine/.
[16] Submarine Storaae Batteries, Lead Acid Batteries, Naval Ships' Technical Manual (NSTM), S9068-G1-STM-010/CH-223.
[17] A Desıgn Tool For The Evaluatıon Of Atmosphere Independent Propulsıon In Submarınes By Grant B. Thomton, LCDR, USN B.S., Marine Engineering United States Naval Academy, 1979
[18] Energy Storage Systems for Shipboard Microgrids—A Review Muhammad Umair Mutarraf * , Yacine Terriche, Kamran Ali Khan Niazi , Juan C. Vasquez and Josep M. Guerrero Received: 5 November 2018
[19] Thomton B., A Design Tool For The Evaluation Of Atmosphere Independent Propulsion In Submarines, Massachusetts Institude of Technology, Cambridge, 1994.
[20] Tübitak Bilim ve Teknik Dergisi, Nobel Ödülü, İlay Çelik Sezer, 2019
[21] https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi162/d162_4248.pd
[22] https://thinktech.stm.com.tr/detay.aspx?id=240
[23] https://maritime.org/doc/fleetsub/diesel/chap5.htm
[24] https://www.marineinsight.com/naval-architecture/submarine-design-unique-tanks-submarine
[25] Energy Management Systemin Naval Submarines by Byeongdoo Jeon May 2020
[26] https://slidetodoc.com/hochschule-fr-angewandte-wissenschaften-hamburg-university-of-applied
[27] https://www.wired.co.uk/article/nuclear-submarine-astute

DRAFT