

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DENİZALTI LARDA YAKIT PİLİNE DAYALI SEVK SİSTEMİ UYGULAMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Dilşad KARATAŞ

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

EYLÜL 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DENİZALTI LARDA YAKIT PİLİNE DAYALI SEVK SİSTEMİ UYGULAMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Dilşad KARATAŞ
508151102**

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kadir Sarıöz

EYLÜL 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 508151102 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Dilşad KARATAŞ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “DENİZALTI LARDA YAKIT PİLİNE DAYALI SEVK SİSTEMİ UYGULAMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Kadir SARIÖZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. İsmail Hakkı HELVACIOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet Ömer BELİK
Piri Reis Üniversitesi

Teslim Tarihi : 27 Mayıs 2019
Savunma Tarihi : 6 Eylül 2019



ÖNSÖZ

Kendisiyle birlikte tez yapmama olanak sağlayan ve desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Kadir Sarıöz'e derin şükranlarımı sunarım. Lisans zamanımdan beri beni hep destekleyen, beraber çalışma fırsatı bulduğum, devamlı yeni fikirler sunan çok sevdiğim ve doktorasını bitirmesini heyecanla beklediğim değerli ağabeyim Yük. Müh. M. Cansın Özden'e teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam sırasında bana destek olan, kendisi ile beraber çalışmaktan her zaman büyük zevk aldığım Yük. Müh. Sertaç Kurdoğlu'na teşekkür ederim. Yüksek lisans öğrenimim sırasında beraber çalıştığım, beni öğrencilikten mühendisliğe geçirip, beni yetiştiren Onuk-BG A.Ş.'nin genel müdürü Yük. Müh. Barış A. Gümüşlüoğlu'na teşekkürlerimi sunarım. Son olarak benden sevgisini ve dualarını hiç eksik etmeyen, beni hep destekleyen anneme teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2019

Dilşad Karataş
Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR.....	ix
SEMBOLLER.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	4
2. DENİZALTI SEVK SİSTEMLERİ.....	7
2.1 Konvansiyonel Sevk Sistemi.....	7
2.1.1 Denizaltı dizel jeneratörü.....	7
2.1.2 Denizaltı bataryaları.....	8
2.1.3 Denizaltı elektrik motoru.....	12
2.2 Havadan Bağımsız Sevk Sistemleri.....	13
2.2.1 Kapalı devre dizel motoru sistemi.....	13
2.2.2 Stirling motoru.....	15
2.2.2.1 Stirling motoru termodinamik çevrimi.....	15
2.2.2.2 Stirling motoru konfigürasyonları.....	16
2.2.2.3 Alfa Stirling motoru.....	16
2.2.2.4 Beta Stirling motoru.....	19
2.2.2.5 Gama Stirling motoru.....	22
2.2.2.6 Stirling motorunun avantajları ve dezavantajları.....	23
2.2.2.7 Stirling motorunun denizaltılarda kullanımı.....	23
2.2.3 MESMA (Module d'Energie Sous-Marin Autonome).....	24
2.2.3.1 MESMA sisteminin gelişimi.....	25
2.2.3.2 MESMA sisteminin AM2000 denizaltısındaki performansı.....	26
2.2.3.3 MESMA sisteminin avantaj ve dezavantajları.....	28
2.2.4 Yakıt pili (fuel cell).....	28
2.2.4.1 Yakıt pili türleri.....	30
2.2.4.2 Denizaltılarda yakıt pili kullanımı.....	32
2.3 Nükleer Sevk Sistemi.....	44
3. YAKIT PİLİ HESAPLAMALARI.....	37
3.1 Hesaplarda Kullanılacak Denizaltılar.....	37
3.2 Denizaltıların Dalmış Durumda Şaft Gücü Hesabı.....	39
3.3 Denizaltıların Şnorkel Seyrindeki Oluşan Ek Direnç Hesabı.....	47
3.4 Dalmış Durumda Batarya Kapasitesi Hesabı.....	48
3.5 Görünmezlik Oranı ve Dalmış Durumda Sıa Hesabı.....	50
3.6 AIP Hesabı.....	50
3.7 Problem Çözümü.....	53

3.7.1 8 knota kadar olan çözüm.....	54
3.7.2 8 knot üzeri çözüm.....	55
4. SONUÇ.....	61
KAYNAKLAR.....	63
EKLER.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	87



KISALTMALAR

AIP	: Air Independent Propulsion – Havadan Bağımsız Sevk Sistemi
DCN	: Direction des Construction Navales – Gemi İnşa Müdürlüğü
FTDA	: Fırçasız Tip Doğru Akım
ITTC	: International Towing Tank Conference – Uluslararası Çekme Tankı Birliği
MCFC	: Molten Carbonate Fuel Cell - Erimiş karbonatlı yakıt pili
MESMA	: Module d’Energie Sous-Marin Autonome – Otonom Denizaltı Enerji Modülü
MIT	: Massachusetts Institute of Technology – Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
MLOX	: Denizaltı sıvılaştırılmış oksijen tankı kapasitesi (kg)
PAFC	: Phosphoric Acid Fuel Cell - Fosforik asit yakıt pili
PEMFC	: Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell - Polimer elektrolit yakıt pili
SOFC	: Solid Oxide Fuel Cell - Katı oksit yakıt pili
VLOX	: Denizaltı sıvılaştırılmış oksijen tankı kapasitesi (m ³)

SEMBOLLER

$AIPTE$	: Yakıt pili sistemleri tarafından sağlanan güç
$A_{midship}$	: Yelkensiz denizaltı orta kesit alanı
C_a	: Korelasyon katsayısı
Cd_a	: Dümen direnç katsayısı
Cd_s	: Dümen direnç katsayısı
C_f	: Sürtünme direnci katsayısı
C_h	: Hıza bağlı katsayı
C_{o2crew}	: Birim zamanda kişi başı personel oksijen tüketimi
C_p	: Prizmatik katsayısı
C_r	: Artık direnç katsayısı
C_s	: Güvenlik faktörü
C_u	: Havada kalma faktörü
C_w	: Dalga yapma direnci katsayısı
D	: Denizaltı çapı
D_oD	: Deşarj oranı
E_b	: Bataryalardaki toplam enerji
E_c	: Belli deşarj akımında bir hücrenin enerji kapasitesi
h	: Denizaltı ekseninin su yüzeyine olan mesafesi
IR	: Görünmezlik oranı
J	: İlerleme katsayısı
K_T	: İtme katsayısı
kW	: kiloWatt
L_h	: Sistem-yaşam yükü
L_{max}	: Denizaltı tam boyu
M_{o2crew}	: Personel oksijen tüketimi
N_{bc}	: Batarya şarjı esnasındaki enerji dönüşüm katsayısı
N_c	: Batarya sayısı
P_D	: Şaft gücü
P_{dg}	: Denizaltının dizel jeneratörlerinin toplam gücü

P_{DS}	: Şnorkel seyri için gerekli SHP
P_{DW}	: Dalga direncinden dolayı oluşan ek direnç
P_E	: Etkin güç
P_{Top}	: Denizaltı sevki için gerekli toplam güç
Q	: Isı
R	: Direnç
Re	: Reynold sayısı
S_a	: Dümen ve diğer takıntıların toplam ıslak yüzey alanı
S_s	: Yelken ıslak yüzey alanı
t	: İtme azalması
T	: Deniz suyu sıcaklığı
T	: İtme
T_{aip}	: Denizaltı seyir süresi
T_d	: Batarya deşarj süresi
T_r	: Belli şnorkel hızında batarya şarj süresi
v	: Dalmış durumdaki hız
v_s	: Dalmış durumdaki hız
V_{env}	: Takıntısız denizaltı hacmi
V_{re}	: Dalmış durumdaki hız
w	: Taylor iz katsayısı
W	: İş
ν	: Kinematik viskozite
η_{aip}	: Çekilen akıma göre yakıt pili verimi
η_D	: Sevk verimi
η_H	: Tekne form verimi
η_0	: Açık su pervane verimi
η_R	: Bağıl dönme verimi
ρ	: Su yoğunluğu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : AM 2000 denizaltısı sürat AIP süresi karşılaştırması.....	27
Çizelge 3.1 : Hesaplarda kullanılan denizaltıların genel özellikleri.....	37
Çizelge 3.2 : INSEAN E1619 pervanesi genel özellikleri.....	44
Çizelge 3.3 : Denizaltıların farklı hızlardaki P_D değerleri.....	46
Çizelge 3.4 : Denizaltıların farklı hızlardaki C_h değerleri.....	47
Çizelge 3.5 : Denizaltıların LOX tank hacimleri.....	51



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : MTU 16V396 dizel jeneratör seti.....	7
Şekil 2.2 : Tipik denizaltı bataryası.....	8
Şekil 2.3 : Tipik batarya performans eğrisi.....	9
Şekil 2.4 : Tipik batarya deşarj eğrisi.....	9
Şekil 2.5 : Tipik batarya şarj eğrisi.....	10
Şekil 2.6 : Batarya kimyasal reaksiyonları.....	11
Şekil 2.7 : Reis sınıfı denizaltısı SINAVY PERMASYN FTDA motoru.....	12
Şekil 2.8 : FTDA motoru çalışma diyagramı.....	12
Şekil 2.9 : Kapalı devre dizel sevk sistemi diyagramı.....	14
Şekil 2.10 : Alfa motoru konfigürasyonu.....	17
Şekil 2.11 : Alfa Stirling motorunda genişleme aşaması.....	17
Şekil 2.12 : Alfa Stirling motorunda transfer aşaması.....	17
Şekil 2.13 : Alfa Stirling motorunda büzüşme aşaması.....	18
Şekil 2.14 : Alfa Stirling motorunda transfer aşaması.....	18
Şekil 2.15 : Alfa motoru P-V diyagramı.....	19
Şekil 2.16 : Beta motoru konfigürasyonu.....	19
Şekil 2.17 : Beta Stirling motorunda genişleme aşaması.....	20
Şekil 2.18 : Beta Stirling motorunda transfer aşaması.....	20
Şekil 2.19 : Beta Stirling motorunda büzüşme aşaması.....	21
Şekil 2.20 : Beta Stirling motorunda transfer aşaması.....	21
Şekil 2.21 : Beta motoru P-V diyagramı.....	22
Şekil 2.22 : Gama motoru konfigürasyonu.....	22
Şekil 2.23 : Gama motoru P-V diyagramı.....	23
Şekil 2.24 : A26 denizaltısı.....	24
Şekil 2.25 : A26 denizaltısı Stirling motoru.....	24
Şekil 2.26 : MESMA sistemi çalışma diyagramı.....	26
Şekil 2.27 : MESMA modülü.....	28
Şekil 2.28 : Çeşitli yakıt pili kimyasal reaksiyonları.....	29
Şekil 2.29 : Yakıt pili bileşenlerinin düzlemsel dizilimi.....	30
Şekil 2.30 : Polimer elektrolit yakıt pili elemanları.....	31
Şekil 2.31 : Siemens BZM 34 yakıt pili.....	33
Şekil 2.32 : Siemens BZM 120 yakıt pili.....	33
Şekil 2.33 : Denizaltı metal hidrit tankları.....	33
Şekil 2.34 : Denizaltı LOX depolama tankı.....	34
Şekil 2.35 : Nükleer sevk sistemi çalışma diyagramı.....	35
Şekil 3.1 : Type 214 denizaltısı kesit resmi.....	38
Şekil 3.2 : S1000 denizaltısı kesit resmi.....	38
Şekil 3.3 : Type 212 denizaltısı kesit resmi.....	38
Şekil 3.4 : İtme azalması grafiği.....	42
Şekil 3.5 : Taylor iz grafiği.....	43
Şekil 3.6 : INSEAN E1619 Pervanesi Geometrisi	43

Şekil 3.7 : E1619 Pervanesi açık su performans eğrileri.....	44
Şekil 3.8 : Type 214, S1000 ve Type 212 denizaltısı hız P_D grafiği.....	45
Şekil 3.9 : Denizaltı batarya kuyusu kesit görünümleri.....	48
Şekil 3.10 : KILO tipi denizaltı genel yerleşim planı.....	49
Şekil 3.11 : KILO tipi denizaltı tank dağılım planı	49
Şekil 3.12 : Yakıt pili güç akım grafiği.....	52
Şekil 3.13 : Yakıt pili akım verim grafiği.....	53
Şekil 3.14 : Type 214 denizaltısı deşarj süresi grafiği.....	56
Şekil 3.15 : S1000 denizaltısı deşarj süresi grafiği.....	56
Şekil 3.16 : Type 212 denizaltısı deşarj süresi grafiği.....	57
Şekil 3.17 : Type 214 denizaltısı s1a grafiği.....	57
Şekil 3.18 : S1000 denizaltısı s1a grafiği.....	58
Şekil 3.19 : Type 212 denizaltısı s1a grafiği.....	58
Şekil 3.20 : Type 214 denizaltısı görünmezlik oranı grafiği.....	59
Şekil 3.21 : S1000 denizaltısı görünmezlik oranı grafiği.....	59
Şekil 3.22 : Type 212 denizaltısı görünmezlik oranı grafiği.....	60

DENİZALTILARDA YAKIT PİLİNE DAYALI SEVK SİSTEMİ UYGULAMASI

ÖZET

Bu tez çalışmasında denizaltılarda kullanılmakta olan yakıt pili esaslı havadan bağımsız sevk sistemi incelenmiştir. Bu sistemin denizaltıların dalmış durumdaki seyir süresine, seyir sıasına ve periskop derinliğinde bataryaları şarj etmek için harcanan sürenin toplam seyir süresi oranı olan görünmezlik oranına (indiscretion rate) olan katkısı hesaplamalı olarak gösterilmiştir.

Öncelikle denizaltılarda kullanılan konvansiyonel, havadan bağımsız ve nükleer sevk sistemleri tanıtılmıştır. Konvansiyonel sevk sistemini oluşturan dizel makina, bataryalar, fırçasız tip doğru akım motoru çalışma prensipleri hakkında bilgi verilmiştir. Bağımsız sevk sistemleri başlığı altında kapalı çevrim dizel motoru, Stirling motoru, MESMA sistemi ve yakıt pili sistemleri tanıtılmıştır. Aynı çerçevede değişik Stirling motoru konfigürasyonları ile polimer elektrolit yakıt pili, fosforik asit yakıt pili, erimiş karbonatlı yakıt pili ve katı oksit yakıt pillerinin çalışma prensipleri sunulmuştur.

Konvansiyonel bir sevk sistemine göre yakıt piline dayalı sevk sisteminin performansını göstermek üzere yakıt pili sistemi ile donatılmış bir denizaltı için dalmış durumda gerekli shaft beygir gücü ve şnorkel seyrinde oluşan ek beygir gücü hesapları yapılmıştır. Batarya kapasitelerinin bulunması için TYPE 214, S1000 ve TYPE 212 denizaltılarının genel yerleşim planı ve kesit planlarından yararlanılmıştır. Batarya kuyusu hacmi olarak ölçülen ilk hacimden, batarya kuyusunun yanlarında ve altındaki tank hacimlerinin çıkarılmasının ardından kalan bölge yeni batarya kuyusu hacmi olarak ele alınmış ve bataryaların bu hacimde yaklaşık % 65'lik bir alan kapladığı bulunmuştur. Güç - akım grafiğinden akım verimine geçilerek hesaplara yakıt pillerinin değişik güç karşılama durumları için verimlerini veren bir denklem eklenmiştir.

Bütün bu hesapların yapılabilmesi için MATLAB ortamında bir bilgisayar programı yazılmıştır. Problem çözümünde MATLAB'ın Optimizasyon modülündeki nonlinear programlama çözücüsü "*fmincon*" kullanılmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta denizaltının sınırlı yakıt pili kapasitesine sahip olmasıdır. Bu kapasite belli bir süratin üzerinde denizaltının sevk için tek başına yetersiz olacaktır. Bu yüzden optimizasyon problemi iki parçalı olmak üzere çözülmüştür. Düşük hızlarda sevk için gerekli gücü ve sistem-yaşam yükünü hem batarya hem de yakıt pili sabit bir şekilde paylaşacaktır ve hem bataryanın hem de yakıt pilinin aynı anda bitmesi beklenmektedir. Yüksek hızlarda shaft gücünün eksponansiyel olarak artması, bu artan güç karşısında yakıt pillerinin yetersiz kalması ile birlikte asıl yük bataryalara binecektir. Bu da aslında bataryaların yakıt pilinden çok önce tükenmesi anlamına gelmektedir. Bu şekilde yakıt pili kullanan denizaltılar için farklı ilerleme hızlarında sadece batarya ile sevk ve batarya ve yakıt pili ile beraber sevk durumlarında

maksimum sevk süresi ve sıra hesabı yapılmıştır. Bu hesaplara ek olarak denizaltı görünmezlik oranı hesabı yapılmıştır.

Tez kapsamında sunulan hesaplamalar sonucunda konvansiyonel sevk sistemi ile karşılaştırıldığında yakıt piline dayalı havadan bağımsız sevk sisteminin dalmış durumdaki seyir süresini arttırması, dalmış durumdaki sıayı arttırması ve denizaltının görünmezlik oranını düşürmesi bakımından avantajlı olduğu açık bir şekilde gösterilmiştir.



APPLICATION OF FUEL CELL BASED PROPULSION SYSTEMS IN SUBMARINES

SUMMARY

From the beginning of the first use in military, submarines became an important power source in navies. Starting with the Turtle submarine, which is used in American Independence War in late 1700's, importance of the submarines gradually increase with the increasing fire power and submerged sail time thanks to the developing technology and industry. Submarines, which sail with diesel engines on surface and sail with batteries submerged, which are first used by German Navy, play an important role in World War 1 by sinking many commercial and military vessels.

With the start of World War 2 more advanced submarines took part in wars. In this period submarines still spend most of the time on surface. Because of that their hull forms are based on surface performance. Air independent walter engine, snorkel system, Rankine cycle motor which works with hydrogen peroxide are the studies performed by Germans to improve submerged sail time of submarines. The United States submarine force also become very effective against Japan forces. Unfortunately submarines were still surface vessels which only dive to attack using torpedoes. Their submerged speed while using batteries was still low.

At the end of the 1950's using nuclear power on submarines cause dramatic change in usage of submarines and their designs. By using nuclear power submarines can sail independently from surface. With this improvement their underwater performance had grown. Submarine's hull form changed to improve underwater performance. Weapons and sensors to be used underwater developed. However nuclear power isn't a technology that any country can reach because of it's high cost. As a consequence countries which don't use nuclear power started researching ways to improve their diesel electric submarines and consequently air independent propulsion concept came to exist.

Producing power without using oxygen in air is the basis of air independent propulsion. For improving submerged duration of modern diesel electric submarines research like increasing of battery capacity and decreasing of submerged hotel load, is in progress. While achieving submerged duration of a couple of weeks with air independent propulsion systems, only contribution with degree of hours can be achieved using only batteries.

Fuel cells directly convert the chemical energy of the reactants, a fuel and an oxidant, into direct current electricity. Fuel cells will continue to operate for as long as the externally stored reactants are supplied. The fuel cell system includes the fuel cell stacks and control systems, the stored fuel and oxidant, storage vessels, associated pipework and reactant processing systems, and exhaust product handling system.

Commonly used reactants include air and oxygen as the oxidant and pure hydrogen or hydrogen derived from catalytically reformed hydrocarbons or cracked ammonia as the fuel. Hydrazine has been used in military fuel cells, and methanol has been used as a liquid fuel in the direct methanol fuel cell.

The fundamental components of the fuel cell are the porous gas diffusion electrodes, comprising the fuel electrode or anode and the oxidant electrode or cathode. These two reaction sites are separated by an ion conducting electrolyte which can be either a liquid, a liquid immobilised on a porous substrate, or an ion conducting solid. The conductive electrodes are connected electrically through a load by an external circuit. At the anode, oxidation of the incoming fuel produces electrons, which provide power in the external load, and then reduce the incoming oxidant at the cathode. A flow of ions through the electrolyte completes the circuit.

The most common fuel cell is the hydrogen/oxygen fuel cell, with either an acidic or an alkaline electrolyte. In an acid electrolyte fuel cell, the conducting ions are protons produced at the anode, and water is the reaction product at the cathode. In an alkaline electrolyte fuel cell, hydroxide ions are produced at the cathode, and the water reaction product is produced at the anode.

In low temperature fuel cells, catalysts impregnated into porous gas diffusion electrodes are required to promote these reactions, whereas in high temperature fuel cells the kinetics are generally sufficiently fast that catalysts are not required.

Individual fuel cells connected in series form a fuel cell stack. The individual cells are connected by a ribbed bipolar plate that provides low electrical resistance between adjacent porous cathode and anode structures and also functions as a gas barrier between the fuel and oxidant streams in the adjacent cells.

By connecting a multiplicity of stacks it is possible to form a fuel cell of any desired voltage and current output. In low temperature fuel cells, the design must also facilitate removal of the water product from the stack to prevent flooding of the electrodes which may block the gas flow.

In this thesis air independent propulsion systems based on fuel cell technology used in modern submarines are investigated. The performance of this system in terms of the submerged range, range and the indiscretion rate which is the ratio of the time needed to remain at periscope depth to recharge the batteries and the total operating time of submarine, is estimated by using computational procedures.

First, the conventional propulsion system, air independent propulsion systems and the nuclear propulsion system used in modern submarines are described. Working principle of conventional propulsion system consisting of diesel engine, batteries and electrical motor is explained. Closed cycle diesel engines, Stirling engines, MESMA (Module d'Energie Sous-Marin Autonome) system and the fuel cell system are explained under air independent propulsion systems. Working principle of different configurations of Stirling engine and polymer electrolyte membrane fuel cells, molten carbonate fuel cells, phosphoric acid fuel cells and solid oxide fuel cells are also explained.

In order to compare the performance of fuel cell based propulsion systems with that of conventional propulsion systems, submerged required power and additional power due to snorkeling are calculated for a typical submarine. Formulas for range calculations with batteries and with air independent propulsion systems are given. For calculating battery capacities of submarines general arrangement plans and

section plans of TYPE 214, S1000 and TYPE 212 submarines are used. By subtracting volumes under and sides of battery room from overall volume of battery room section, the remaining volume is assumed to be used for the batteries. It is found that batteries take about % 65 of this new battery room volume. In order to estimate the efficiency of fuel cells under different power consumption rates current to efficiency graphs based on power to current data are generated. Indiscretion rate calculations are also presented.

For the performance predictions a MATLAB computer program is developed. To solve the nonlinear programming problem “*fmincon*” subroutine in MATLAB optimization module is used. The crucial point of the optimization problem is that the fuel cell power source capacity of a submarine is limited and not sufficient for propulsion beyond a certain speed. For this reason the problem is solved in two parts separated with an identified submerged speed. At lower speeds fuel cells and the batteries share both hotel load and propulsion load together so that they run out at the same time simultaneously. Since the required propulsion power exponentially increases with speed, at higher speeds the fuel cells become insufficient and the main propulsion power is provided by the batteries. For both cases, the maximum submerged range at any given speed for the conventional and the fuel cell based propulsion systems are estimated and compared. Furthermore indiscretion rate calculations for both systems are carried out. As a result of these calculations, submarine discharge rate graphs, range graphs and indiscretion rate graphs are developed and presented.

The calculations presented in the thesis have clearly shown the advantages of fuel cell based air independent propulsion systems for increasing submerged range and endurance while decreasing indiscretion rate compared to the conventional propulsion systems.



1. GİRİŞ

Denizaltılar dalmış durumda iken yaymış oldukları akustik, manyetik ve basınç izleri nedeniyle sonar, basınç sensörü ve elektromanyetik sensör gibi birçok sensör tarafından tespit edilebilirler. Bunun önüne geçmek için denizaltıların izini düşürmek amacıyla gerek dizayn ve inşa gerekse operasyon aşamalarında birçok karşı önlem alınır.

Dalmış durumda bir denizaltıyı ele veren en önemli izler akustik kaynaklı olduğundan nükleer denizaltılara göre daha sessiz çalışan dizel elektrik sisteme sahip konvansiyonel denizaltıları tespit etmek genelde daha zordur. Fakat nükleer denizaltılarla karşılaştırılınca dizel elektrik denizaltıların temel problemi dalmış durumda kullanılan bataryaların sınırlı kapasitesi nedeniyle denizaltının su yüzeyine çıkarak veya şnorkel yardımıyla dizel jeneratörlerini çalıştırma ve bataryalarını şarj etme zorunluluğudur.

Bataryalarını şarj etmek üzere yüzeye çıkan veya periskop derinliğinde şnorkel seyri yapan bir konvansiyonel denizaltı görsel olarak veya radar ile tespit edilebileceği gibi dizel jeneratörlerin ve egzozun akustik olarak tespiti veya ortaya çıkan ısı emisyonunun kızıl ötesi sensörler ile tespiti de mümkündür. Konvansiyonel bir denizaltının yüzeyde bataryalarını şarj etmek için geçirdiği sürenin toplam seyir süresine oranı görünmezlik oranı (indiscretion rate) olarak tanımlanmaktadır. Görünmezlik oranı düşük olan yani daha az sıklıkla yüzeye çıkması gereken ve bunun zamanını ve yerini seçmede daha serbest olan bir denizaltının büyük bir taktiksel avantajı olacağı açıktır. Konvansiyonel dizel-elektrik denizaltıların suyun altında daha uzun süre kalmalarını sağlayabilmek üzere pekçok havadan bağımsız sevk sistemi (Air Independent Propulsion – AIP – system) geliştirilmiş olup bu yönde yapılan bilimsel ve teknik araştırmalar son hızıyla devam etmektedir.

Havadan bağımsız sevk sistemleri elektrik enerjisi oluşturmak için kullanılan yakıt ve oksidanın ek olarak taşınmasını da gerektirmektedir. Oluşturulan elektrik enerjisi sevk için gerekli gücü ve diğer bütün elektriksel sistemlerin gerektirdiği gücü

karşılamak için kullanılır. Bu sistemler atmosferdeki havadan bağımsız olarak çalıştıkları için dalmış durumdaki seyir süresini ve sıayı arttırmaya ve görünmezlik oranını düşürmeye yardımcı olur.

Konvansiyonel denizaltıların havadan bağımsız sevki konusunda öncü çalışma 1930'ların başında Alman mühendis Helmuth Walter tarafından gerçekleştirildi. Walter sistemi olarak bilinen bu teknolojiye denizaltı içinde depolanmış hidrojen peroksit kullanılarak permanganat katalizör yardımıyla yüksek ısıda buhar ve oksijen üretilmektedir. Yanma odasına gönderilen dizel yakıt oksijen ile yakılarak türbini tahrik eden sıcak buhar ve gaz karışımı oluşturur. Ortaya çıkan egzoz ve yoğunlaşmış buhar denizaltı dışına deşarj edilmektedir. Walter'in öncelikli amacı yüksek sıadan ziyade dalmış durumda yüksek hızlara ulaşmaktı ve sistemin denendiği ilk denizaltı olan 76 ton ağırlığında ve 22 metre uzunluğundaki V80 denizaltısı 1940 yılında yapılan testte dalmış durumda 28,1 knot hıza ulaştı. 2. Dünya savaşı sırasında Walter'in prototipi Kriegsmarine tarafından kullanılabilir bir ölçüye getirilip yedi adet 300 ton ağırlığında ve 2 adet 2500 beygir gücünde türbin ile sevk edilen Type XVII denizaltısı inşa edildi. Daha büyük açık deniz denizaltıları dizayn edildiyse de hidrojen peroksit temininde yaşanan sıkıntılar ve savaşın sona ermesi nedeniyle bu projeler gerçekleşemedi. 2. Dünya savaşı sonunda Walter sistemi ile çalışan denizaltılar ABD ve İngiliz donanmalarının ilgisini çekti. 1950'lerde İngiltere'de Walter'in başkanlığında bir ekip tarafından iki adet denizaltı dizayn ve inşa edildi ancak hidrojen peroksitin çok kolay yanması ve patlaması nedeniyle bu teknoloji günümüzde kullanılmamaktadır [1].

2. Dünya Savaşı sonrası Sovyetler Birliği tarafından sıvı oksijenli kapalı çevrim dizel sistemi üzerine yapılan çalışmalar Project 615 Quebec sınıfı denizaltıları ortaya çıkarmıştır. 650 ton ağırlığında olan Quebec sınıfı denizaltıların ilkinin inşasına 1950 yılında Sudomekh tersanesinde başlandı. İnşa edilen denizaltıların hizmete girmesi ile tanklardan sızan sıvı oksijen birçok patlamaya sebep olmuştur. 1957 yılında M-256 denizaltısı Baltık Denizi'nde ve M-351 denizaltısı Karadeniz'de bu tür kazalar sonucu batmıştır. Bu sınıftaki diğer denizaltılarda da oksijen kaynaklı birçok yangın meydana geldiği için bu teknoloji modern denizatılarda kullanılmamaktadır [2].

Rusya hükümeti 1974 yılında elektrokimyasal güç sistemlerinin gelişimi için çalışmalar yapılmasını onaylamıştır. Bunlardan ilki Krasnoye Sormovo tersanesinde Project 613 sınıfı Whiskey denizaltısına bir gövde modülü eklenmesi olmuştur. 280 kW gücündeki yakıt pili sistemi geliştirilip Katran olarak anılan Project 613Eh denizaltısına monte edilmiştir. Denizaltıya -252 °C muhafaza edilen dört ton hidrojen ve -165 °C’de muhafaza edilen 32 ton oksijen taşıyan dört adet kriyojenik tank monte edilmiştir. Bu tankların doldurulması için 160 saatten fazla süre gerekmekteydi. Denizaltının bir adet dizel motoru sökülüş yerine denizaltının iki şaftından birini tahrik eden EhKhG-280 elektrokimyasal sistem monte edilmiştir. Project 613 tipi denizaltı yüzeye çıkmadan 2 knot hızda 7 gün seyir yapabilmekteydi. 613Eh konfigürasyonu 2,5 knot hızda 28 gün seyir yapabilme kabiliyetine sahipti [2].

Alman tersanesi Thyssenkrupp tarafından kapalı çevrimde çalışan MTU 8V 183 SE52 dizel makinası test edilmiş ve hibrit sevk sistemi olarak kullanılmak üzere önerilmiştir. 6 metre uzunluğundaki yardımcı sistemlerin de içinde bulunduğu makina modülü 1996 yılı Mart ayında U-1 denizaltısına monte edilmiştir. Maksimum makina gücü 400 kW kadardı. Yapılan test sonucunda denizaltı dalmış durumda hiç durmadan 14 gün seyir yapmıştır [3].

Stirling motoru İsveç donanması tarafından başarılı bir şekilde test edilip uygulanmış bir sistemdir. 1988 yılında sistemin prototipi A14 sınıfı Nacken denizaltısına monte edilmiştir. Yapılan testler sonucu A19 sınıfı denizaltılarda Stirling motoru kullanılmasına karar verilmiştir. A19 sınıfı denizaltıda konvansiyonel dizel makinanın yanında 75kW gücünde iki adet V4-275R Stirling motoru bulunmaktadır. İlk A19 sınıfı denizaltı olan HMS Gotland deniz testlerini 1996 yılında tamamlamıştır [3]. İsveç Vastergötland sınıfı 2 adet denizaltı 2003 ve 2004 yıllarındaki modernizasyon sürecinde Stirling AIP sisteminin eklenmesi ile Södermanland sınıfı olarak yeniden servise girmişlerdir. Tersanede gövdesinin ikiye ayrılıp Stirling AIP modülünün eklenmesi ile beraber denizaltının uzunluğu 48,5 metreden 60,5 metreye çıkmıştır. Eklenen AIP modülünde 2 adet V4-275 tipi Stirling motoru bulunmaktadır [4]. Her biri 75 kW’lık 2 adet V4-275 tipi Stirling motoru kullanan İsveç Gotland sınıfı denizaltılar 1996 yılında hizmete girmeye başlamışlardır. Günümüzde 3 adet Gotland sınıfı denizaltı servisedir [5]. 2005 yılında Japon Kawasaki Heavy Industries ile İsveçli Kockums firması Japon Soryu

sınıfı denizaltılarda kullanılacak Stirling AIP sisteminin üretimi konusunda anlaşma imzalamışlardır [6]. İlki 2009 yılında servise giren Soryu sınıfı denizaltılarda toplamda 300 kW gücünde 4 adet V4-275 tipi Stirling motoru bulunmaktadır [7]. Çin tarafından üretilen ilki 2006'da servise giren Yuan sınıfı denizaltıların Stirling AIP sistemi kullandığı bilinmektedir [8].

Bertin Company ve French Directorate for Naval Construction tarafından geliştirilen MESMA (Module d'Energie Sous-Marin Autonome) sistemi ilk olarak 1992 yılında AM2000 denizaltısı üzerinde test edildi. Sistem denizaltıda 6,2 metre çapında, yaklaşık 10 metre uzunluğunda ayrı bir bölüm olarak yer almaktadır. Yapılan seyir testleri sonucu 2 knot hızda 295 saat, 3 knot hızda 237 saat, 4 knot hızda 204 saatlik bir seyir süresi elde edilmiştir [9]. Pakistan donanması tarafından kullanılan Agosta 90B sınıfı denizaltılarının modernizasyonu kapsamında ilki 2008 yılında Hamza denizaltısına olmak üzere 3 adet denizaltıya MESMA sistemi eklenmiştir. Agosta 90B sınıfı denizaltılara eklenen MESMA modülleri 8,5 metre uzunluğa ve 300 ton ağırlığa sahiptirler [6].

Yunanistan donanmasında 1979 yılından beri hizmet gören Type 209 sınıfı Okeanos denizaltısı 2014 yılındaki modernizasyon sonucu yakıt pili ile donatılmıştır [10]. İlki 2005 yılında servise giren Alman U212 sınıfı denizaltılarda Siemens tarafından geliştirilen yakıt pili bulunmaktadır. Denizaltının toplam yakıt pili kapasitesi 300 kW'tır [11]. Alman HDW tersanesi tarafından dizayn edilmiş olan Type 214 sınıfı denizaltılarda her biri 120 kW gücünde 2 adet Siemens PEMFC yakıt pili bulunmaktadır. İlk Type 214 denizaltısı 2007 yılında servise girmiştir [12].

Modern askeri denizaltılarda kullanılan sevk sistemleri ilerleyen bölümlerde detaylı olarak incelenecektir.

1.1 Tezin Amacı

Günümüzde kullanılan ve halen geliştirilmekte olan birçok AIP teknolojisi bulunmaktadır. Bunların başında kapalı çevrim dizel makinaları, Stirling motorları, MESMA sistemi ve yakıt pilleri gelmektedir.

Bu tez çalışmasında değişik ülkeler tarafından kullanılmakta olan çeşitli AIP sistemlerin tanıtılması ve bu sistemler arasında gelişme potansiyelinin daha yüksek olduğu düşünülen yakıt piline dayalı sevk sistemlerinin denizaltının sevk süresine,

σίαςına ve görünmezlik oranına olan katkısının hesaplamalı olarak incelenmesi amaçlanmıştır.





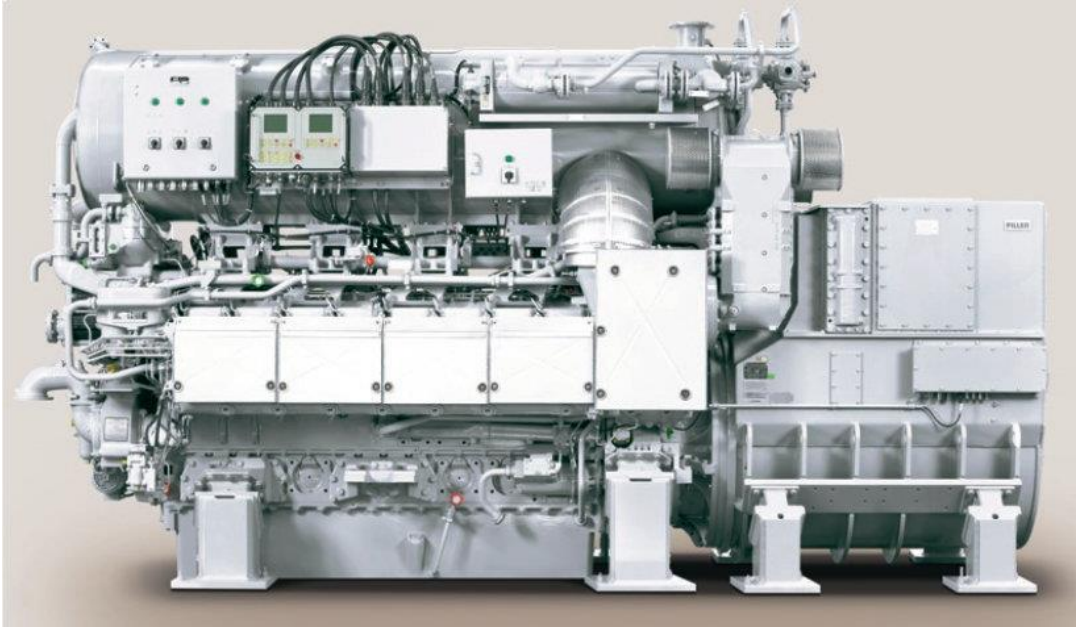
2. DENİZALTI SEVK SİSTEMLERİ

2.1 Konvansiyonel Sevk Sistemi

Günümüzde kullanılmakta olan birçok denizaltı konvansiyonel olarak tabir edilen; bataryalar, elektrik motoru ve dizel jeneratörlerden oluşan sevk sistemini kullanmaktadır. Denizaltı su yüzeyinde iken dizel jeneratör setleri tarafından bataryalar şarj edilir ve elektrik motoru ile denizaltı sevk edilir. Denizaltı dalmış durumda iken ise bataryalar ile pervaneyi tahrik eden elektrik motoru enerjilendirilir ve böylece denizaltı sevk edilir. Denizaltının belli sürelerde şnorkel seviyesine çıkıp dizel jeneratörler ile bataryalarını şarj etmesi gerekmektedir.

2.1.1 Denizaltı dizel jeneratörü

Ağırlık ve hacimden kazanmak için denizaltılarda yüksek devirli dizel makineler kullanılmaktadır. Makinanın çalışma sırasında çıkardığı mekanik gürültünün engellenmesi ve şok absorbsiyonu için makina elastik yataklar üzerine konumlandırılır [13]. Alman Type 212 denizaltısında kullanılan MTU 16V396 dizel jeneratör seti Şekil 2.1’de verilmiştir [14].

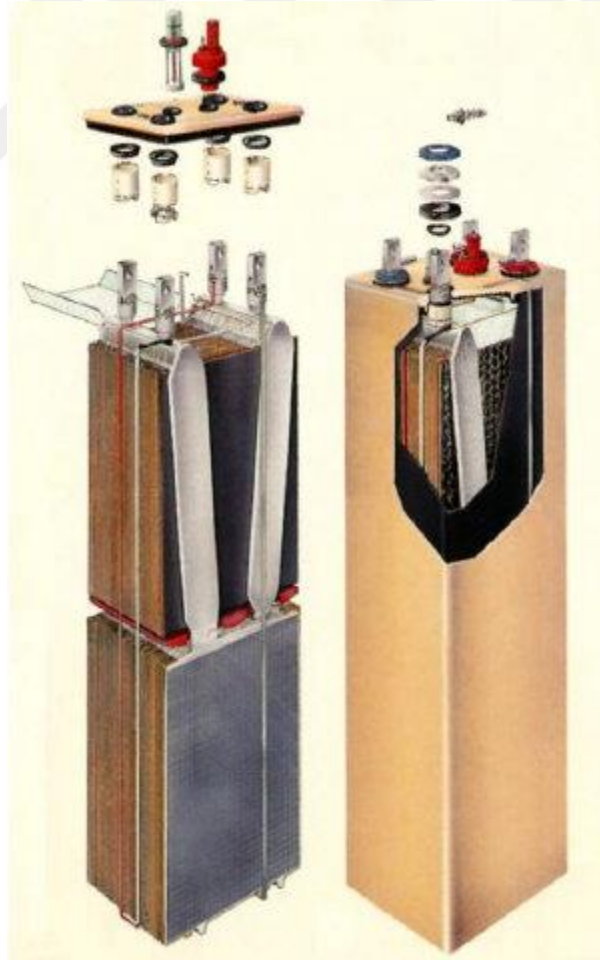


Şekil 2.1 : MTU 16V396 dizel jeneratör seti [14].

2.1.2 Denizaltı bataryaları

Bataryalar dalmış durumda iken sevk yükünü ve diğer sistem-yaşam yüklerini karşılamak için kullanılır. Bataryalar aynı voltaj değerine sahip olmakla beraber kapasiteleri (amper-saat) ve verdikleri enerji (kilowatt-saat) boyutlarına ve iç yapılarına göre değişiklik gösterir. Deşarj oranı düştükçe bataryanın kapasitesi artar. Toplam harcanan kilowatt-saat değeri değişik çalıştırma durumlarına göre değişken değildir. Deşarj durumundaki voltaj değeri deşarj akımına ve deşarj süresine bağlıdır. Deşarj sırasında bataryadaki asit yoğunluğu artar.

İç dirençler yüksek akımda deşarj ile düşük akımda deşarj durumlarında bataryanın davranışını belirler. Bu iç dirençlerin düşürülmesi için bataryalar çift katlı olarak imal edilir. Çift katlı yapıda üst üste yerleştirilmiş birbirine paralel olarak bağlı iki sıra halinde plakalar bulunur [13]. Şekil 2.2’de tipik bir denizaltı batarya kesiti verilmiştir [15].

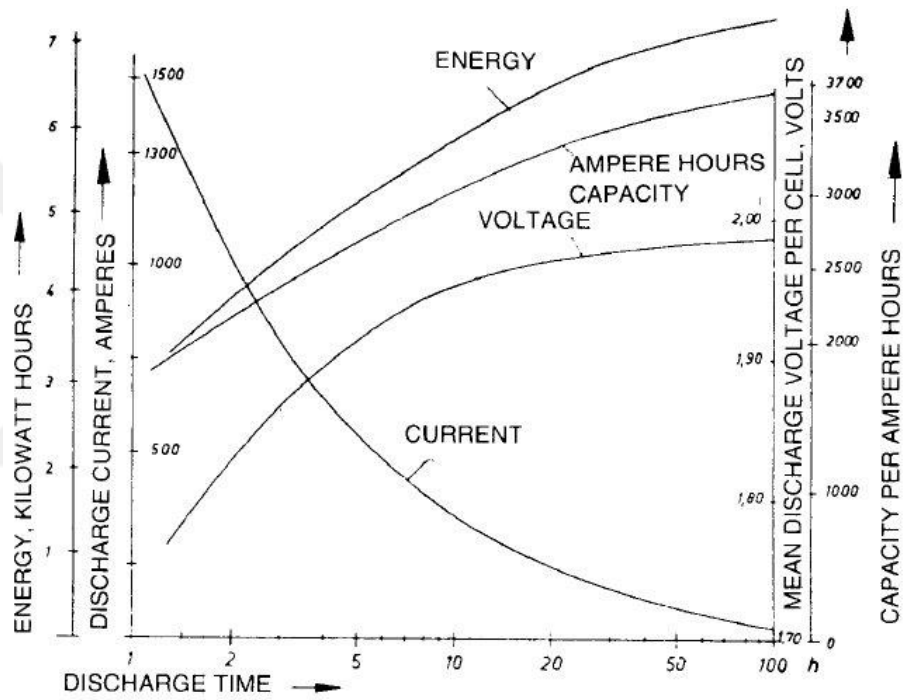


Şekil 2.2 : Tipik denizaltı bataryası [15].

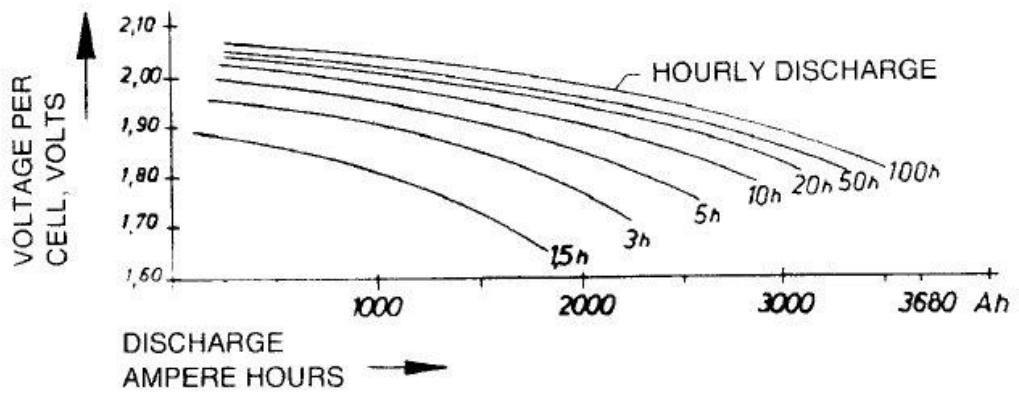
Bataryayı şarj etmek için gereken voltaj deşarj voltajından daha yüksektir. Şarj işlemi iki aşamada gerçekleşmektedir:

1. 2.4 V değeri elde edilene kadar batarya sabit akımda şarj edilir
2. Batarya sabit voltajda en düşük akım elde edilene kadar azalan akımda şarj edilir.

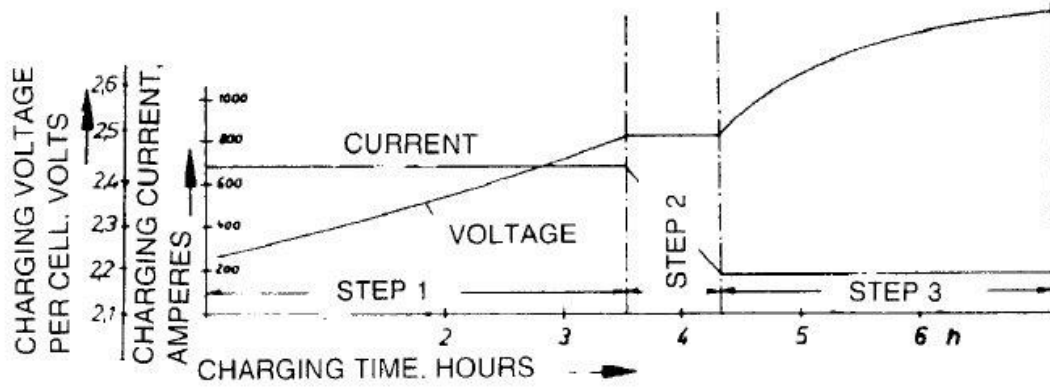
Bataryanın kilowatt-saat olarak verimi hızlı deşarj durumunda % 78 ile yavaş deşarj oranında % 86 arasında değişiklik gösterir [13]. Şekil 2.3, Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te tipik denizaltı bataryalarına ait performans eğrileri verilmiştir [13].



Şekil 2.3 : Tipik batarya performans eğrisi [13].



Şekil 2.4 : Tipik batarya deşarj eğrisi [13].



Şekil 2.5 : Tipik batarya şarj eğrisi [13].

Hücre içinde asit yoğunluğunun ve sıcaklığın düzgün dağılması için asit sirkülasyon sistemleri bulunur. Gerekli voltaj değerini karşılamak için hücreler birbirlerine terminalleri ile bağlanıp batarya bölümü oluştururlar. Bu batarya bölümleri birbirlerine seri veya paralel olarak bağlanabilir. Seri bağlama durumunda en yüksek voltaj değeri elde edilir [13].

Tek bir hücrenin boyutu çok büyük olmadıkça, iki veya dört hücre tek bir kutu içinde bir araya getirilip yerleşim için daha büyük birimler oluşturulur. Bu kaplar cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerden üretilir [13].

Batarya kapları denizaltı boyunca ve enince birbirlerine ve gövdeye bağlanırlar, bu sayede tek bir birim olarak davranıp sevk sırasında güvende olurlar. Bataryalar batarya odasında denizaltıda diğer bölümlerden ayrılmış haldedir. Batarya kutuları yalnız batarya kutularını yükleyip boşaltmak için kullanılan mukavim teknedeki kaporta ile denizaltıya yüklenir [13].

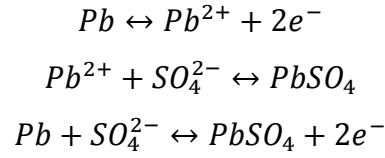
Batarya odaları sürekli olarak havalandırılırlar. Havalandırma kapasitesi patlama riskini önlemek için batarya tarafından üretilen en yüksek oksihidrojen gazının yirmi katı kadar olmalıdır. Yavaş deşarj durumunda bataryalar az miktarda hidrojen gazı üretirler. Kapalı durumdaki denizaltıda bu hidrojen seviyesi zamanla tehlikeli seviyelere gelebilir. Bunu önlemek için denizaltıda üretilen hidrojeni oksijen ile birleştirip su açığa çıkartan birimler bulunur [13].

Kısmen kullanılmış bataryaların kalan kapasitesinin bilinmesi önem arz etmektedir. Kalan kapasite en son tam şarjdan itibaren harcanan toplam amper saatin belirlenmesi ile hesaplanabilir. Kalan kapasiteyi bulmanın bir yolu da asit yoğunluğunu, sıcaklığı ve yüksüz durumdaki voltajı ölçüp grafikten okumaktır [13].

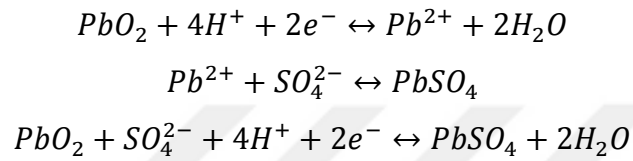
Batarya temel reaksiyonları

Bataryada gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki denklemler ile ifade edilebilir [16]

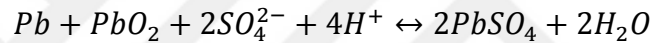
Anot (negatif elektrot):



Katot (pozitif elektrot):



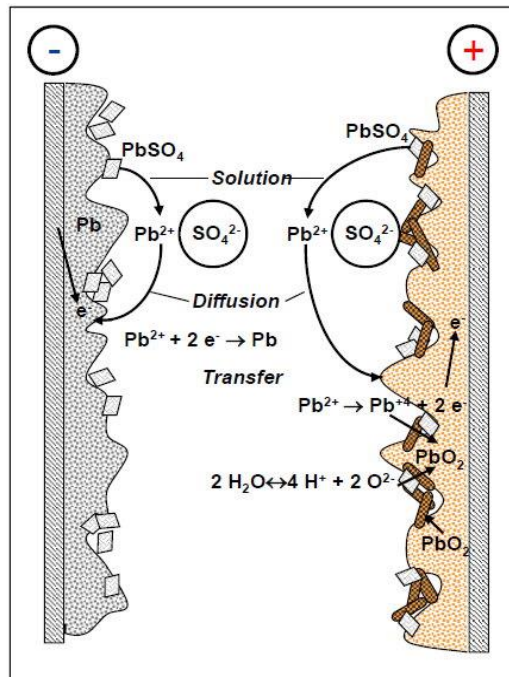
Hücre reaksiyonu:



→ deşarj durumu

← şarj durumu

Bataryada gerçekleşen kimyasal reaksiyonların şematik gösterimi Şekil 2.6'da verilmiştir [16].



Şekil 2.6 : Batarya kimyasal reaksiyonları [16].

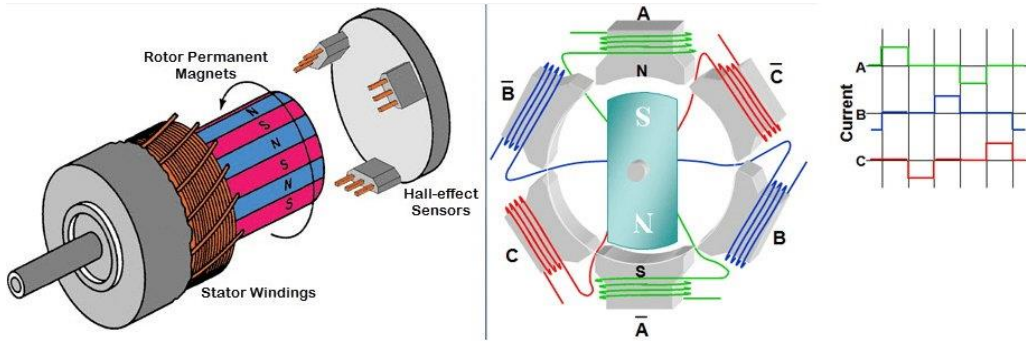
2.1.3 Denizaltı elektrik motoru

Askeri denizaltılarda genel olarak fırçasız tip doğru akım motorları kullanılır. Şekil 2.7’de Türk Deniz Kuvvetleri için inşa edilmekte olan Reis sınıfı (Type 214) denizaltılarda kullanılan SINAVY PERMASYN FTDA motoru gösterilmektedir [17].



Şekil 2.7 : Reis sınıfı denizaltılarda kullanılan SINAVY PERMASYN FTDA motoru [17].

Fırçasız tip doğru akım motorunda rotor kısmı mıknatıstan oluşmaktadır. Sargılar statorun üzerinde sabit olarak bulunmaktadır. Sargılar sabit olduğu için motorda fırçaya ve komütatöre gerek kalmaz. Sabit sargılar tarafından oluşturulan manyetik alanın yönü değiştirilerek dönme sağlanır. Dönmeyi kontrol etmek için sargılardan geçen akımın büyüklüğü ve yönü ile oynanır. Şekil 2.8’de fırçasız tip doğru akım motoru çalışma diyagramı gösterilmektedir [18].



Şekil 2.8 : Fırçasız tip doğru akım motoru çalışma diyagramı [18].

2.2 Havadan Bağımsız Sevk Sistemleri

Denizaltıların sık olarak şnorkel seviyesine çıkıp bataryalarını şarj etmesini önlemek ve su altında kalma süresini uzatmak için değişik havadan bağımsız sevk sistemleri geliştirilmiştir. Nükleer sevk sistemi genel olarak havadan bağımsız sevk sistemlerinden ayrı olarak incelenmektedir. Havadan bağımsız sevk sistemleri genel olarak bağımsız bir sevk sistemi değil yardımcı bir sevk sistemi olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler ile üretilen elektrik enerjisi sevk sisteminin yanında sistem-yaşam yüklerini de karşılamaktadır.

Havadan bağımsız sevk sistemlerinin öne çıkan bir özelliği de mevcut denizaltılara yeni bir gövde modülü olarak sonradan eklenebilmeleridir. Havadan bağımsız sevk sistemleri atmosferik hava kullanarak şarj olan bataryaların yerine geçecek kadar güç ve dayanıklılığa sahip olmamasına rağmen su altında kalma süresinin artmasını sağlarlar.

Denizaltılarda en yaygın olarak kullanılan havadan bağımsız sevk sistemleri şu şekilde sıralanabilir:

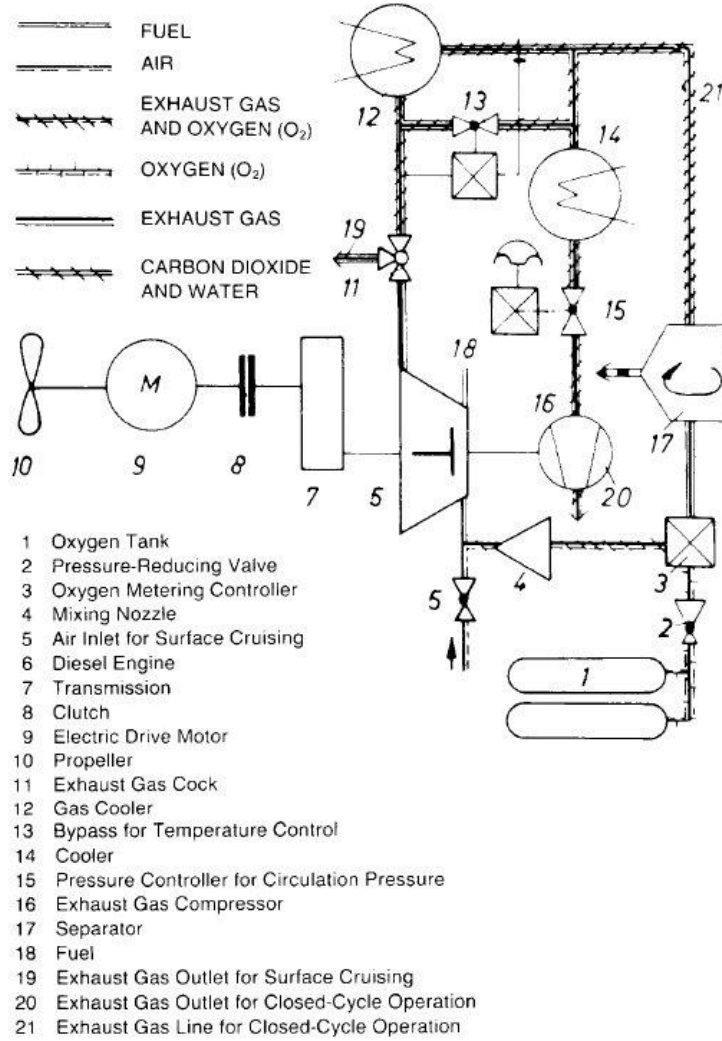
- Kapalı devre dizel sistemi
- Stirling motoru
- MESMA
- Yakıt pili

2.2.1 Kapalı devre dizel motoru sistemi

Kapalı devre dizel motoru denizaltı su üstünde veya şnorkel yaparken atmosferdeki havayı kullanarak normal olarak çalışabilir. Dalmış durumda dizel makina stoklanmış oksijen ve argon gazını kullanır. Makinadan çıkan egzoz soğutulduktan sonra içinde bulundurduğu karbondioksit kimyasal olarak ayrıştırılır. Egzozdaki argon tekrar kullanılmak üzere geri dönüştürülür. Egzoz karıştırma haznesinde oksijen ile zenginleştirilerek dizel makinanın emme manifoldu kısmına gönderilir, böylece kapalı bir devre elde edilmiş olur. Geri kalan egzoz gazı deniz suyu ile karıştırılarak denizaltı dışına gönderilir.

Kapalı devre dizel motoru sisteminde standart dizel makina kullanılmaktadır. Mevcut denizaltılara gerekli ekipmanlar eklenerek mevcut sistem kapalı devre dizel

sistemine dönüştürülebilir. Tanklarda depolanan sıvılaştırılmış oksijen ve argon gazı güvenlik bakımından dikkat edilmesi gereken hususlar arasındadır. Kapalı devre dizel sisteminde standart dizel makina kullanıldığı için sistemin oluşturduğu gürültü ve termal iz yüksek olmaktadır. Şekil 2.9’da denizaltılarda kullanılan tipik bir kapalı devre dizel sevk sistemi diyagramı gösterilmektedir [13].



Şekil 2.9 : Kapalı devre dizel sevk sistemi diyagramı [13].

Kapalı devre dizel motoru sisteminin avantaj ve dezavantajları

Avantajlar:

- Kendini kanıtlamış bir teknolojinin yeni bir uygulaması olması
- Mürettebatın sistemi tanıyor olması
- Ucuz bir sistem olması
- Standart dizel yakıt kullanılması

Dezavantajlar:

- Verimin açık sisteme göre düşük olması
- Güvenli bir şekilde sıvı oksijen depolama ihtiyacı gerektirmesi
- Sınırlı sıvı oksijen depolama hacmi
- Yüksek gürültü seviyesi
- Egzoz gazının kimyasal olarak ayrıştırılmasını gerektirmesi

2.2.2 Stirling motoru

Stirling motoru Robert Stirling tarafından 1817 yılında icat edilen bir çeşit sıcak hava motorudur. Robert Stirling o dönemde kullanılmakta olan buhar türbinin dizaynını geliştirmek ve daha güvenli bir alternatif ortaya çıkarmak amacıyla çalışmalarına başlamıştır. Stirling motoru düşük basınçta çalıştığı ve sıcak buhar barındırmadığı için daha güvenli bir alternatif olmuştur. Ayrıca Stirling motorunun verimi buhar türbininden daha yüksektir.

2.2.2.1 Stirling motoru termodinamik çevrimi

Stirling motoru çevrimi kütlesi değişmeyen bir çalışma akışkanı kullanan kapalı bir çevrimdir. Çalışma akışkanı olarak hava, hidrojen veya helyum kullanılmaktadır. Sıcaklık değişimine bağlı termal genleşme ve büzülme prensibine dayanır. İdeal Stirling çevrimi ikisi sabit sıcaklıkta, ikisi sabit hacimde gerçekleşen dört termodinamik aşamadan oluşur.

- 1-2: izotermal sıkıştırma aşaması. Sistemden Q_{1-2} ısı dışarı verilirken W_{1-2} işi yapılır. Çalışma akışkanı sabit T_c sıcaklığında sıkışır.
- 2-3: sabit sıcaklıkta ısınma aşaması. Q_{2-3} ısını alan çalışma akışkanının sıcaklığı T_c 'den T_h 'ye çıkar. Bu aşamada iş yapılmaz.
- 3-4: izotermal genleşme aşaması. Sisteme eklenen Q_{3-4} ısına eşit miktarda W_{3-4} işi çalışma akışkanı tarafından yapılır. Çalışma akışkanı sabit T_h sıcaklığında ısınır ve genleşir.
- 4-1: sabit hacimde soğuma aşaması. Q_{4-1} ısı çalışma akışkanından çekilirken sıcaklık T_h 'den T_c 'ye düşer. Bu aşamada iş yapılmaz.

Ana işlemler birçok ısı motorunda olduğu gibi soğuma, sıkışma, ısınma ve genişmeden oluşmaktadır. Stirling motoru aralarında yüksek sıcaklık farkı bulunan bir ısıtma ve bir soğutma kaynağı kullanarak çalışmaktadır.

İdeal çevrim ile karşılaştırılınca normal şartlarda çalışan bir motorun verimi sürtünme, ısı kaybı gibi nedenlerden dolayı düşmekte ve ideal (carnot) veriminin yarısı kadar olmaktadır.

Stirling motorunda kullanılan gaz, motoru hiçbir zaman terk etmediği için Stirling motorunda egzoz valfi bulunmaz. Stirling motorunda içten yanmalı motorlarda olduğu gibi bir patlama gerçekleşmez.

Stirling motoru ters çalıştırılarak bir ısı pompası vazifesi de görebilir [19].

2.2.2.2 Stirling motoru konfigürasyonları

Stirling motoru alfa, beta ve gama olarak adlandırılan üç tip konfigürasyona sahiptir.

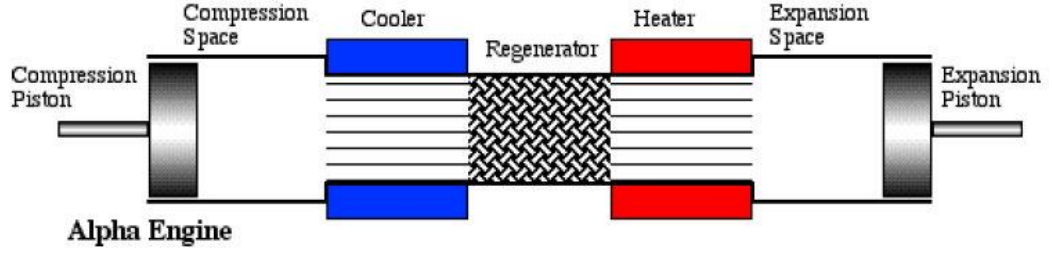
Bu motorlar yüksek yüzey alanına sahip ve ısı iletimi yüksek bir ısı değiştirici barındırırlar.

Sıcak gaz soğuk pistonu iletilirken önce ısı değiştiriciden geçer ve ısının bir kısmı burada depolanır. Soğumuş gaz geri dönerken buradan geçer ve depolanan ısı geri alınır. Bu şekilde ısı değiştirici gazı önceden ısıtıp, soğutarak verimi artırır.

Beta ve gama konfigürasyonlarındaki gibi ayrı bir ısı değiştiricisi olmayan motorlarda ayırıcı ve silindir, çalışma gazı ile ısı alışverişi yaparak ısı değiştirici görevi yapar [19].

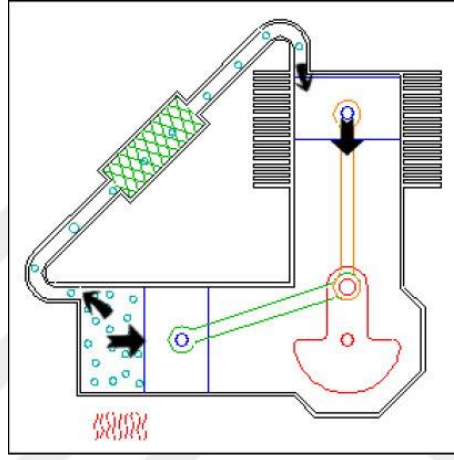
2.2.2.3 Alfa Stirling motoru

Alfa motoru birbirine ısıtıcı, soğutucu ve ısı değiştirici ile seri olarak bağlanan iki ayrı hareketli pistondan oluşur. Bunlardan birisi sıcak piston diğeri soğuk pistondur. Sıcak piston yüksek sıcaklıktaki ısı değiştirici tarafında, soğuk piston düşük sıcaklıktaki ısı değiştirici tarafındadır. Şekil 2.10'da alfa tipi Stirling motoru konfigürasyonu verilmiştir [19].



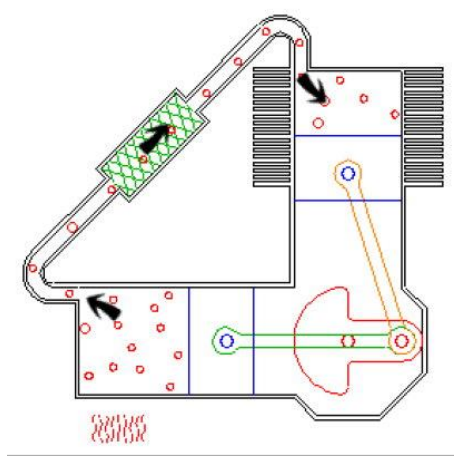
Şekil 2.10 : Alfa motoru konfigürasyonu [19].

Alfa konfigürasyonunda bir motor çevrimi genleşme (Şekil 2.11), transfer (Şekil 2.12), büzüşme (Şekil 2.13) ve transfer (Şekil 2.14) aşamalarından oluşur [19].



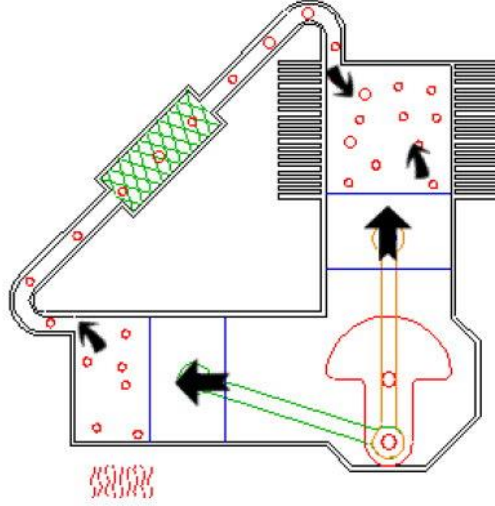
Şekil 2.11 : Alfa Stirling motorunda genleşme aşaması [19].

Genleşme aşamasında sistemdeki gazın çoğunluğu sıcak pistondadır. Gaz ısınır ve genişler sıcak pistonu aşağı iter ve borudan geçerek soğuk pistona giderek onu da aşağı iter.



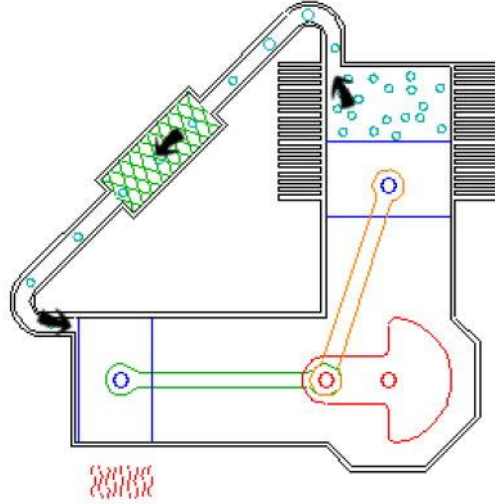
Şekil 2.12 : Alfa Stirling motorunda transfer aşaması [19].

Transfer aşamasında gaz genişlemiş durumdadır ve büyük bir kısmı sıcak silindirde bulunmaktadır. Krank şaft sonraki 90°'lik dönüşünü yaparken gazı soğuk pistona gönderir.



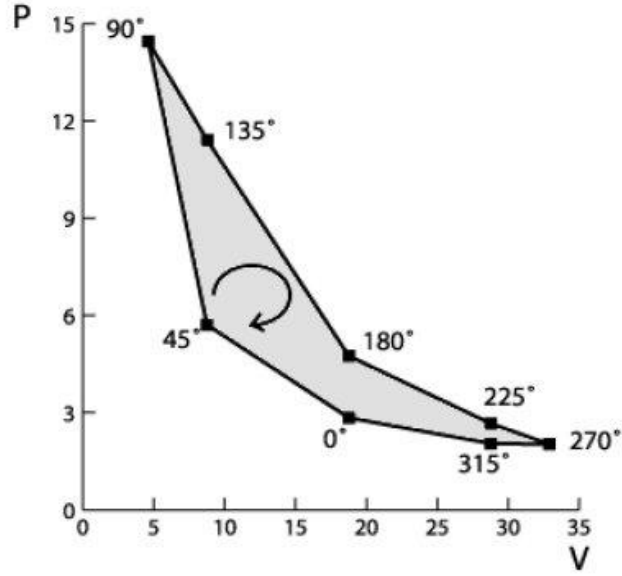
Şekil 2.13 : Alfa Stirling motorunda büzüşme aşaması [19].

Büzüşme aşamasında gazın çoğunluğu soğuk silindirde bulunmaktadır. Gaz soğuyup büzüşerek iki pistonu da yukarı çeker.



Şekil 2.14 : Alfa Stirling motorunda transfer aşaması [19].

Transfer aşamasında krank şaft 90° daha dönerek soğumuş ve büzüşmüş olan gazı sıcak pistona gönderir. Şekil 2.15'te alfa motoru P-V diyagramı gösterilmektedir [19].



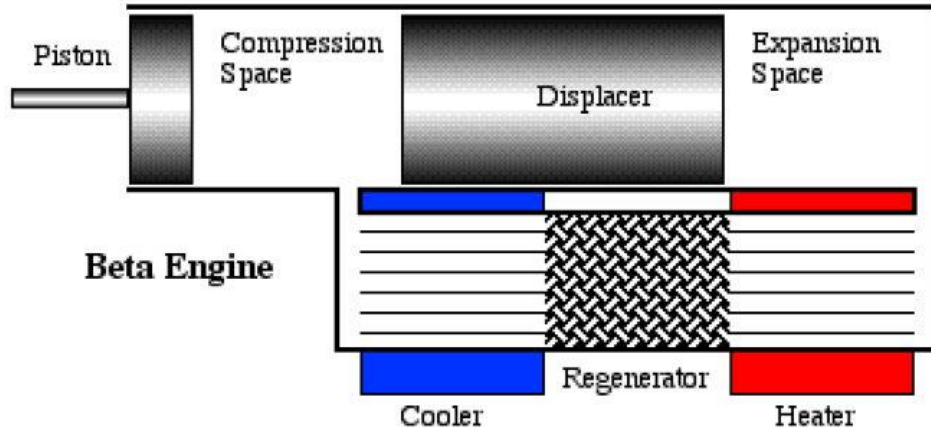
Şekil 2.15 : Alfa motoru P-V diyagramı [19].

Alfa motor konfigürasyonu basit bir konfigürasyon olmasına rağmen iki pistonun da gaz sızdırmazlığının sağlanmasını gerektirir.

2.2.2.4 Beta Stirling motoru

Beta konfigürasyonu Stirling'in patentinde de gösterilen orijinal, klasik motor konfigürasyonudur [19].

Beta ve gama motorlarının ikisi de ayırıcı-piston düzenini kullanırlar. Beta motorunda ayırıcı ve piston aynı hat üzerinde bir silindirin içinde bulunurlar. Gama motoru ayrı silindirler kullanır. Şekil 2.16'da beta tipi Stirling motoru konfigürasyonu gösterilmektedir [19].

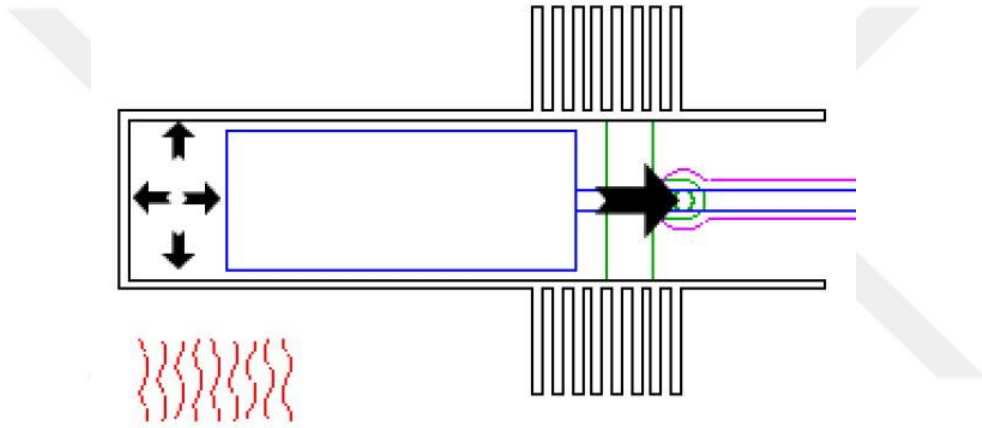


Şekil 2.16 : Beta motoru konfigürasyonu [19].

Tek hareketli piston ve ayırıcı kullanmanın amacı sabit hacimde çalışma akışkanını yer değiştirmek ve birbirine seri olarak yerleştirilmiş olan soğutucu, ısı değiştirici ve ısıtıcı arasında gidip gelmesini sağlamaktır.

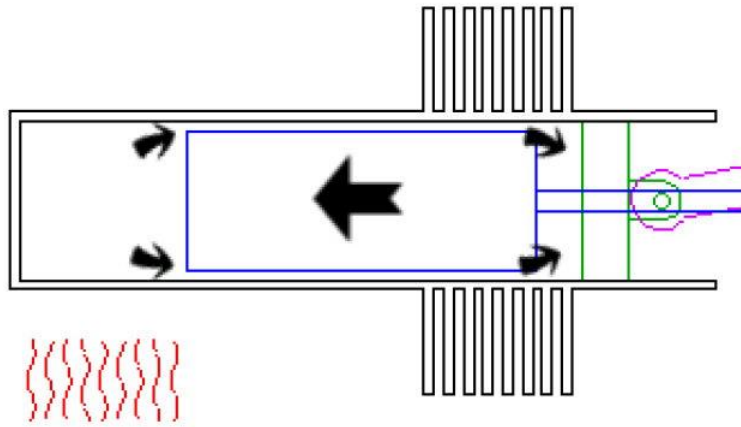
Gaz silindirin sıcak tarafına gönderildiğinde genişler ve pistonu iter. Gaz silindirin soğuk tarafına gönderildiğinde büzülür ve pistonu diğer tarafa iterek gazı sıkıştırır. Beta konfigürasyonunda alfa konfigürasyonunda bulunan sıcak ortamda çalışan sızdırmazlık sağlama sorunu yoktur.

Beta konfigürasyonunda bir motor çevrimi genişleme (Şekil 2.17), transfer (Şekil 2.18), büzülme (Şekil 2.19) ve transfer (Şekil 2.20) aşamalarından oluşur [19].



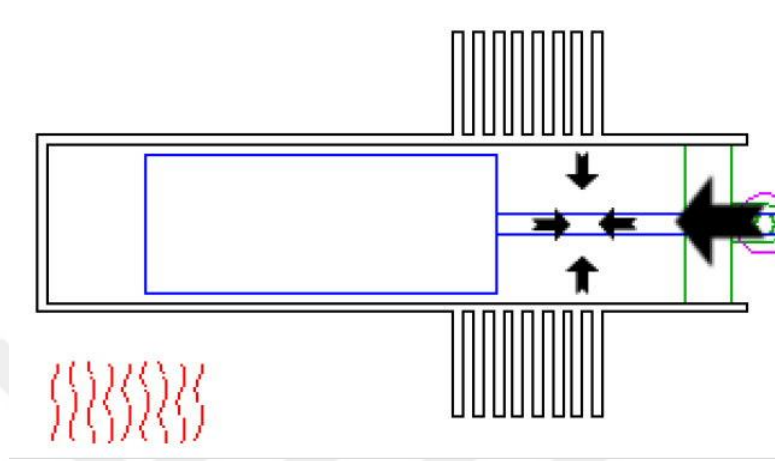
Şekil 2.17 : Beta Stirling motorunda genişleme aşaması [19].

Genleşme aşamasında sistemdeki gazın büyük kısmı silindirin sıcak tarafındadır. Gaz ısınıp genişlerken pistonu iter.



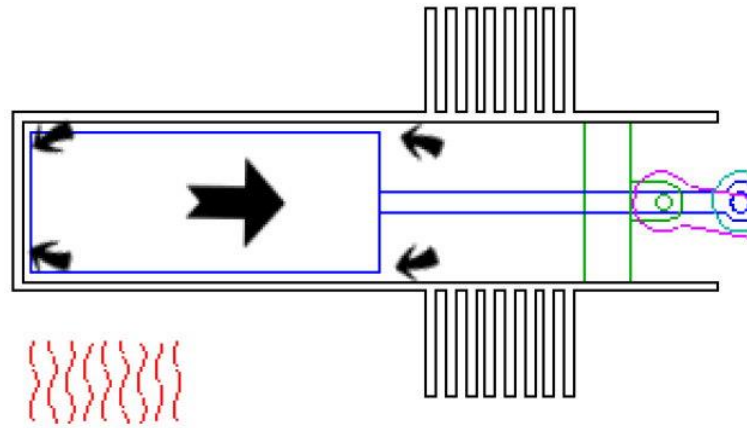
Şekil 2.18 : Beta Stirling motorunda transfer aşaması [19].

Transfer aşamasında gaz genleşmiş durumdadır. Gazın büyük kısmı hala sıcak tarafta bulunmaktadır. Volanın momentumu ile krank şaft sonraki 90⁰'lik dönüşünü gerçekleştirir. Krank şaft dönüşünü gerçekleştirirken gaz ayırıcının etrafından geçerek silindirin soğuk kısmına geçer.



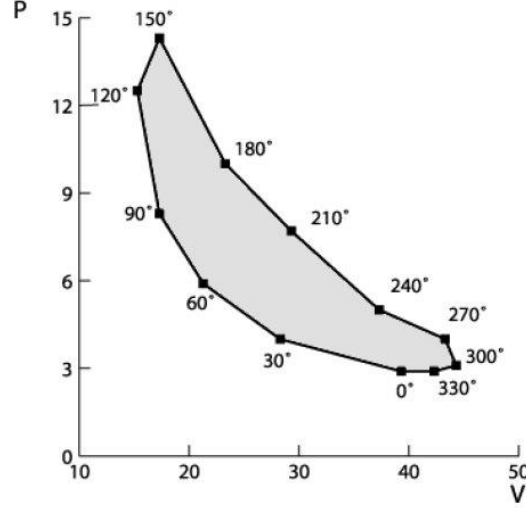
Şekil 2.19 : Beta Stirling motorunda büzüşme aşaması [19].

Büzüşme aşamasında genleşmiş gazın çoğunluğu silindirin soğuk tarafında bulunmaktadır. Gaz büzüşür ve piston en alt pozisyonda bulunur.



Şekil 2.20 : Beta Stirling motorunda transfer aşaması [19].

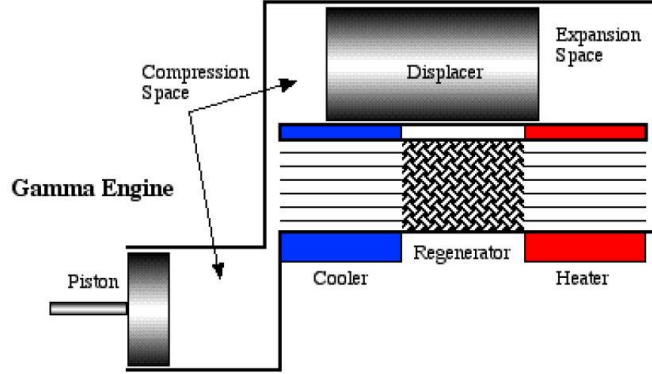
Buradaki transfer aşamasında büzüşmüş olan gaz hala silindirin soğuk tarafında bulunmaktadır. Volanın momentumu ile krank şaft sonraki 90⁰'lik dönüşünü gerçekleştirir. Ayırıcı geri çekilir ve gaz silindirin sıcak tarafına gönderilir. Şekil 2.21'de beta motoru P-V diyagramı gösterilmektedir [19].



Şekil 2.21 : Beta motoru P-V diyagramı [19].

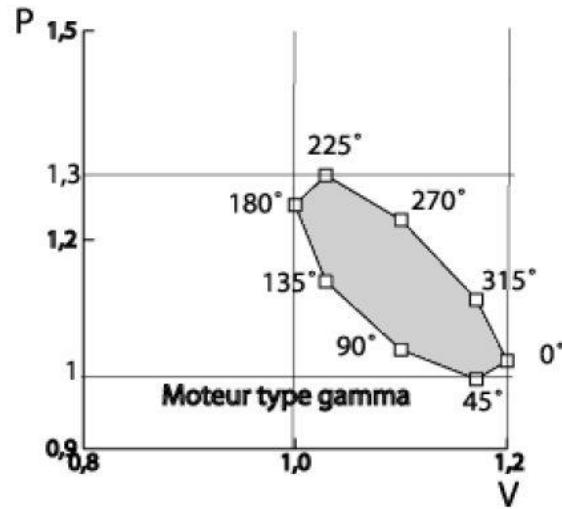
2.2.2.5 Gama Stirling motoru

Gama motoru esasen ayırıcı ve pistonun ayrı silindirlerde bulunduğu beta motorudur. Piston ve ayırıcı aynı volana bağlıdır. İki silindir arasında gaz serbest olarak hareket edebildiği için tek bir ortam oluştururlar. Bu konfigürasyonun sıkıştırma oranı düşük fakat mekanik olarak basit olduğu için genellikle çok silindirli Stirling motorlarında kullanılır. Şekil 2.22’te gama motoru konfigürasyonu gösterilmektedir [19].



Şekil 2.22 : Gama motoru konfigürasyonu [19].

Genleşme esnasında genleşmenin bir kısmı sıkıştırma bölgesinde gerçekleştiği için güçte azalma meydana gelir. Bu nedenle gama motorları ayrı silindir kullanmanın ortaya çıkan güçten daha avantajlı olduğu durumlarda kullanılır. Bu konfigürasyonun avantajı sadece pistonun sızdırmazlığının sağlanmasının yeterli olmasıdır. Şekil 2.23’te gama motoru P-V diyagramı gösterilmektedir [19].



Şekil 2.23 : Gama motoru P-V diyagramı [19].

2.2.2.6 Stirling motorunun avantajları ve dezavantajları

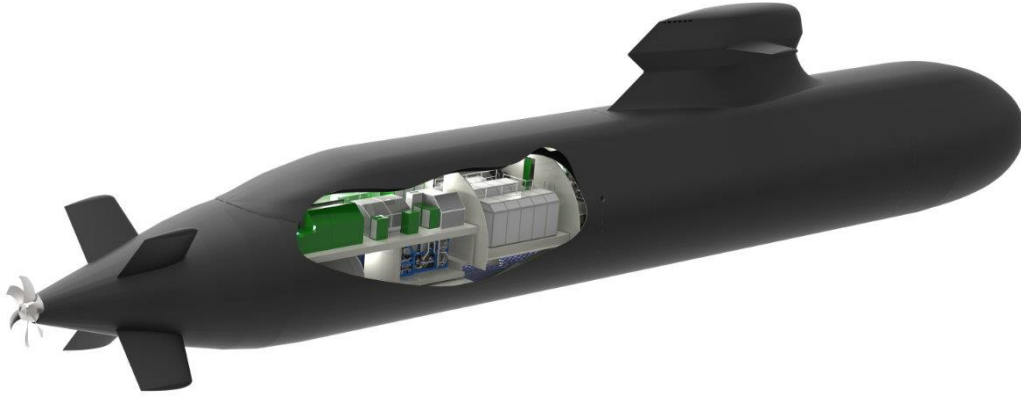
Bu motorun kullanılma sebeplerinden birisi patlama riskinin bulunmamasıdır. Yüksek basınçlı kazanlarda buhar üretimi ve içten yanmalı motorlarda olduğu gibi silindir içinde patlamalar yoktur. Ateşleme, hava yakıt karışımı ve valf yoktur. Pistonun içinde hava, helyum veya hidrojen kullanılabilir. Sistem kapalı bir çevrim olduğu için sistemdeki gazı yenileme ihtiyacı yoktur.

Isı üretimi için her türlü kaynak kullanılabilir. Isı kaynağı yenilenebilir bir enerji olması durumunda sistemin emisyonu olmaz. Sessiz, titreşimi düşük ve havaya ihtiyaç duymayan bir sistemdir. Ufak ısı farkları sistemin çalışmasını sağlayabilir.

Stirling motoru sistemi konvansiyonel sevk sistemine göre daha komplike bir sistemdir. Stirling motoru sisteminde üretilen güç miktarı konvansiyonel sisteme göre düşük kalmaktadır. Sistemin verimi daha düşüktür. Egzoz gazının kimyasal olarak ayrıştırılması gerekmektedir.

2.2.2.7 Stirling motorunun denizaltılarda kullanımı

Stirling motoruna sahip denizaltılarda ısı üretimi için dizel yakıt ve sıvılaştırılmış oksijen kullanılır. Soğutma için ise deniz suyu kullanılır. Bu tip sistemler halen İsveç’li Kockums firması tarafından üretilen Gotland ve A26 sınıfı denizaltılarda ve Japon Soryu sınıfı denizaltılarda kullanılmaktadır. İsveç A26 sınıfı denizaltı ve sahip olduğu Stirling motoru Şekil 2.24 ve Şekil 2.25’te gösterilmektedir [20,21].



Şekil 2.24 : A26 denizaltısı içinde Stirling motoru yerleşimi [20].



Şekil 2.25 : A26 denizaltısı Stirling motoru [21].

Kockums A26 denizaltıları sahip oldukları Stirling motoru sistemleri sayesinde devriye hızında 18 günü aşan süre ile su altında seyir yapabilmektedir [21].

2.2.3 MESMA (Module d’Energie Sous-Marin Autonome)

MESMA sistemi Fransız Direction des Construction Navales (DCN) firması tarafından daha çok ihracat amaçlı kullanım için geliştirilmiş bir havadan bağımsız sevk sistemidir. Sistem temelde kapalı çevrimli bir buhar türbini sistemi olan Rankine çevrimine bağlıdır. -185°C ’de depolanan sıvı oksijen buharlaştırıcıya gönderilip gaz hale gelir. Daha sonra yanma odasında etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) ile karıştırılıp yanma gerçekleştirilir. Ortaya 60 atmosfer basınçta 700°C ’lik bir gaz

ortaya çıkar. Birinci devrede üretilen bu gaz ikinci devrede buhar türbininden geçen buharı üretmek için kullanılır. Bu şekilde ısı enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülür. Buhar türbinine bağlı alternatör sayesinde elektrik üretimi de yapılır. Ortaya çıkan egzoz gazının yüksek basınçta olması başka bir ekipmana ihtiyaç olmadan denize atılmasını sağlar.

Buhar jeneratörünün ikinci devresi tatlı su ile çalışan Rankine çevrimidir. Üretilen buhar tekrar buhar jeneratörüne gitmeden önce türbine daha sonra kondensere gider [9].

2.2.3.1 MESMA sisteminin gelişimi

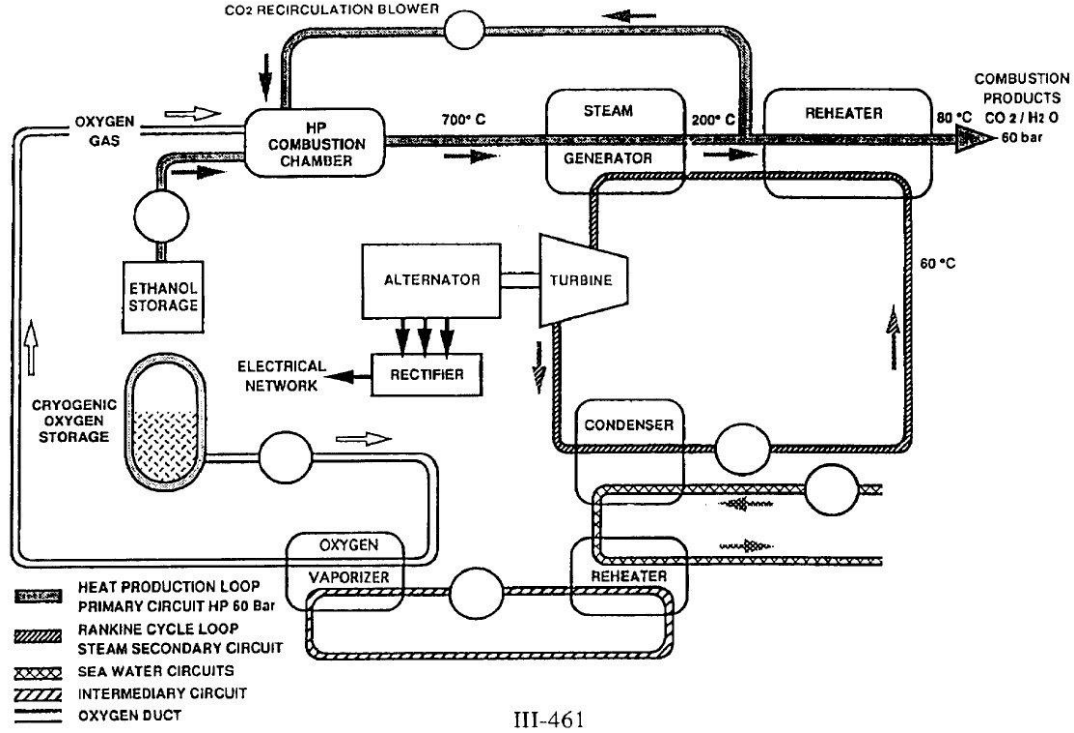
MESMA sisteminde ilk önce yakıt olarak metanol denenmiş fakat mürettebat için fazla toksik olduğu için etanole geçilmiştir [9].

Oksijenin yüksek basınçta depolanması, kullanımı gerektiğinde bir pompa ihtiyacı olmadan devreye verilmesini sağlar. Fakat yüksek basınçta depolamak kullanılabilir depolama hacmini % 20 kadar düşürür. Bu düşüşün nedeni tankı daha dayanıklı yapmak ve basıncı korumak için tankın içinde gaz halinde oksijen oluşturmaktır. Gaz haldeki bu oksijen sistemdeki kayıptır [9].

İlk başlarda yanma ürünleri olan karbon dioksit ve suyun dışarı atılmadan önce depolanarak denizaltının görünmezliğinin artırılması düşünülmüştür. Yoğunlaştırılmış ürünler yakalanma riski ortadan kalkana kadar bir tankta depolanabilir. Fakat 60 bardaki karbon dioksitin yoğunlaştırılması için sıcaklığın 15 °C olması gerekmektedir. Eğer deniz suyu sıcaklığı daha yüksek ise ayrı bir devre gerekir. Oksijenin içinde daima argon gazı bulunmaktadır ve argon gazı yoğunlaştırılamamaktadır. Devredeki basıncı sağlamak için argonun sürekli olarak dışarı atılması gerekir. Güvenlik nedenlerinden dolayı karbon dioksitin içerde depolanması da uygun değildir. Bu nedenlerden dolayı yanma ürünleri direk denize deşarj edilir. Bu sayede birincil devrede kondenser bulundurma ihtiyacı da ortadan kalkar [9].

Oksijenin ısıtılması için ikincil devredeki kondenserden çıkan deniz suyu devresi ısı kaynağı olarak kullanılır. Deniz suyu devresi ile sıvı oksijen arasında denizaltı güvenliğini sağlamak için özel bir devre kullanılır.

Birincil ve ikincil devre arasındaki bağlantı başta buhar jeneratörü ile sağlanır. Birincil sistemden çıkan yanma ürünleri ile ikincil sistemdeki suyun ısıtılması ile sistemin veriminin arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 2.26'da MESMA sistemi çalışma diyagramı gösterilmektedir [9].



Şekil 2.26 : MESMA sistemi çalışma diyagramı. [9]

2.2.3.2 MESMA sisteminin AM2000 denizaltısındaki performansı

DCN tarafından dizayn ve inşa edilen AM 2000 MESMA sistemi ile donatılmış bir denizaltıdır. 2003 yılında hizmete giren denizaltıda MESMA sistemi 6,2 metre çapında, yaklaşık 10 metre uzunluğunda ayrı bir bölüm olarak yer almaktadır.

Oksijen dikey olarak yerleştirilmiş silindirik tank içinde depolanmaktadır. Silindirin yüksekliği ve çapı gövde çapına eşittir. Şoktan etkilenmemesi için silindir elastik olarak yataklanmıştır. Sıvı oksijen tankı ve devresi güvenlik nedenleriyle ayrı bir odada konumlandırılmıştır. MESMA bölümünün dışında herhangi bir oksijen veya yakıt borusu bulunmamaktadır.

Etanol aynı zamanda dışarı atılan yanma ürünlerinin ağırlığının da dengelendiği koferdamda depolanmaktadır. AM 2000 denizaltısındaki kullanılabilir sıvı oksijen miktarı 30 m³'ün üzerindedir.

AM 2000 denizaltısı sistem-yaşam yükünü karşılamak ve 2 knot, 3 knot ve 4 knot hızda ilerlemek için sırası ile 90 kW, 110 kW ve 130 kW güce ihtiyaç duymaktadır.

MESMA sistemini kullanmanın iki yolu bulunmaktadır.

- a. MESMA sistem-yaşam yükü ve sevk için gerekli gücü karşılar. Bu durumda dalmış durumdaki sıra aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$A = \frac{V}{P * C_s} \quad (3.1)$$

V= kullanılabilir oksijen hacmi [m³]

P= MESMA tarafından sağlanan güç [kW]

C_s= oksijen tüketimi [l/kW*h]

- b. MESMA tam güçte çalışıp sistem-yaşam yükünü ve sevk için gerekli gücü karşılar. Artan güç ile bataryalar şarj edilir. Bataryalar tamamen dolduğunda MESMA durdurulur ve bataryalar ile devam edilir. Bataryalar tükenince MESMA yeniden çalıştırır ve döngü devam eder. Bu durumda dalmış durumdaki sıra aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$A = \frac{V}{C_s * 185} \left(1 + \frac{0,85 * (185 - P)}{P} \right) \quad (3.2)$$

MESMA'nın nominal gücü 185 kW olup batarya verimi % 85'tir.

Çizelge 2.1'de AM 2000 denizaltısının belirli hızlardaki a ve b çalışma durumundaki sırası verilmiştir [9].

Çizelge 2.1 : AM 2000 denizaltısı sürat AIP süresi karşılaştırması.

Dalmış durumdaki hız			
	2 knot	3 knot	4 knot
a	230 saat	215 saat	195 saat
b	295 saat	237 saat	204 saat

Her iki durumda da batarya tam dolu iken oksijen ve yakıt tamamen kullanılmış durumdadır. Maksimum toplam dalmış sıayı bulmak için sadece bataryalar ile gidilen sıayı da yukarıdaki tabloya eklemek gerekmektedir. Şekil 2.27'de Agosta 90B denizaltısı MESMA modülü gösterilmektedir [22].



Şekil 2.27 : MESMA modülü [22].

2.2.3.3 MESMA sisteminin avantaj ve dezavantajları

Avantajları:

- Yüksek güç üretimi
- Yüksek sualtı seyir hızı

Dezavantajları:

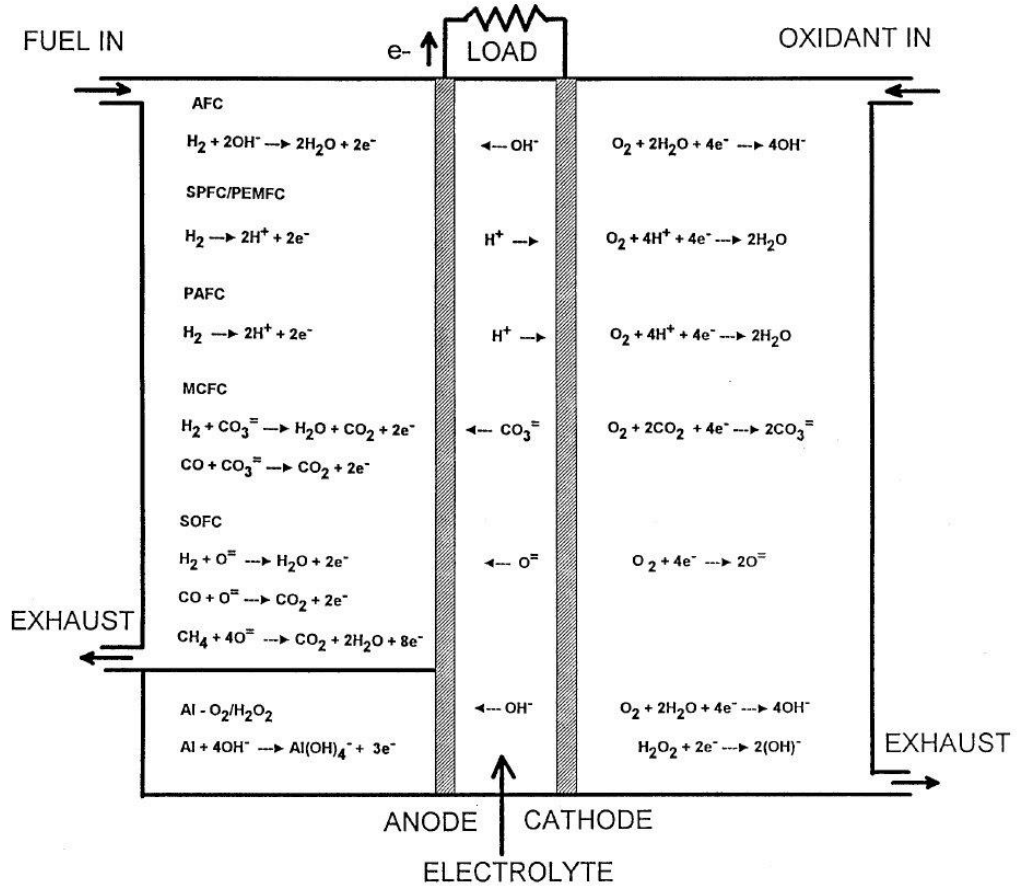
- Düşük verim
- Yüksek oksijen sarfıyatı
- Komplike yapısı
- Mürettebatın sistem için eğitilmesi ihtiyacı

2.2.4 Yakıt pili (fuel cell)

Yakıt pilleri bir yakıt ve oksidanttan oluşan reaktantlarının kimyasal enerjilerini direk olarak elektrik enerjisine çevirir. Harici olarak depolanan reaktantlar sağlandığı sürece yakıt pili çalışmaya devam eder. Yakıt pili sistemi yakıt pili, kontrol sistemi, depolanmış yakıt ve oksidant, depolama kapları, boru hatları, reaktant işleme sistemleri ve egzoz işleme sisteminden oluşur.

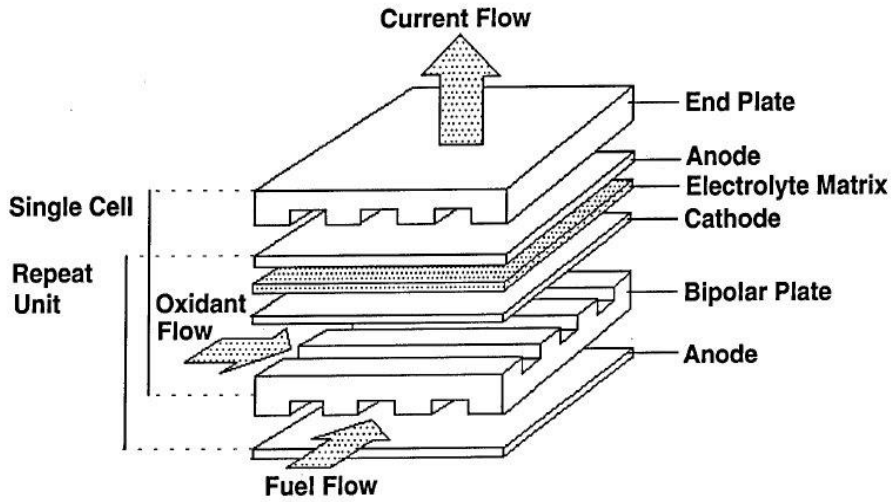
Genelde kullanılan reaktantlar oksidant olarak hava ve oksijen, yakıt olarak saf hidrojen veya hidrokarbonlardan elde edilen hidrojen veya amonyaktan oluşur.

Yakıt pilinin temel elemanları yakıt elektrotu olan anot ve oksidant elektrotu olan katottan oluşan gözenekli gaz difüzyon elektrotlarından oluşur. Bu iki tepkime alanı iyonlar içeren bir elektrolit ile birbirinden ayrılır. Bu elektrolit sıvı, gözenekleri sıvı ile doldurulmuş bir madde veya iyon içeren bir katı olabilir. İletken elektrotlar harici bir devre ile elektriksel olarak birbirlerine bağlanmıştır. Anot kısmında yakıtın oksidasyonu elektron üretir, bununla harici elektriksel yük oluşur ve katottaki oksidantı indirger. Elektrolit içindeki iyon akışı da devreyi tamamlar. En yaygın yakıt pili tipi asidik veya alkalın elektrot kullanan hidrojen oksijen yakıt pilidir. Asidik elektrolit kullanan yakıt pilinde iletken iyonlar anotta üretilen protonlar olmakla beraber katotta reaksiyon ürünü olarak su oluşur. Alkalın elektrolit kullanan yakıt pilinde katotta hidroksit iyonları oluşurken anotta reaksiyon ürünü olarak su oluşur [23]. Şekil 2.28’de değişik yakıt pili tiplerinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar ve reaktantlar gösterilmektedir [23].



Şekil 2.28 : Çeşitli yakıt pili kimyasal reaksiyonları [23].

Düşük sıcaklık yakıt pillerinde reaksiyonların gerçekleşmesi için katalizör emdirilmiş elektrotlara ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek sıcaklık yakıt pillerinde katalizör ihtiyacı olmamaktadır. Tekil yakıt pilleri seri olarak bağlanarak bir küme oluştururlar. Tekil piller birbirine komşu anot ve katot arasında düşük elektriksel direnç oluşturan ve yakıt ve oksidant arasında bir gaz bariyeri oluşturan çift taraflı levhalar ile birbirine bağlanır [23]. Şekil 2.29'da yakıt pili bileşenlerinin düzlemsel dizilimi gösterilmektedir [23].



Şekil 2.29 : Yakıt pili bileşenlerinin düzlemsel dizilimi. [23]

Pil kümelerini birbiri ile bağlayarak istenen voltaj ve akımı veren yakıt pili üretilmesi mümkündür. Düşük sıcaklık yakıt pillerinde elektrotlara gaz akışını bloke edecek su baskının önüne geçmek için reaksiyon sonucu ortaya çıkan suyun sistemden uzaklaştırılması gerekir.

2.2.4.1 Yakıt pili türleri

Genellikle çalışma sıcaklığı ve kullanılan elektrolite göre ayrılan birçok tip yakıt pili bulunmaktadır. Yakıt pilleri arasında en yaygın kullanıma sahip olanlar:

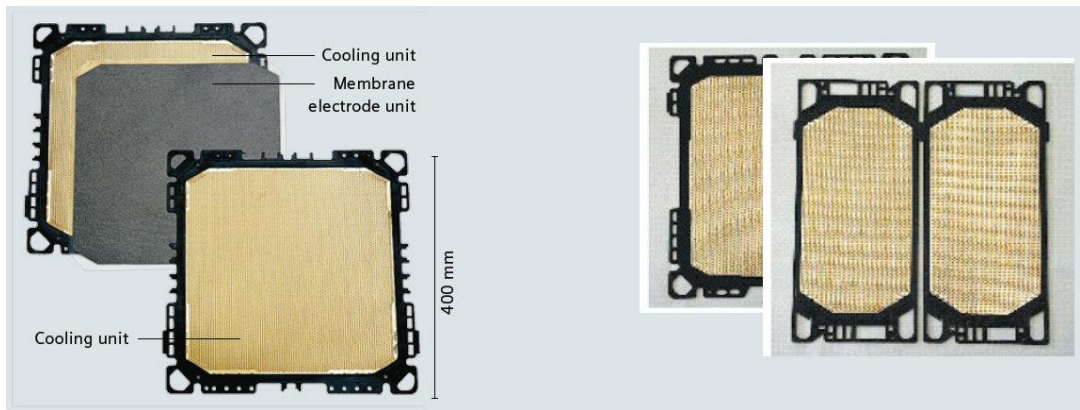
- a) Polimer elektrolit yakıt pili - Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)
- b) Katı oksit yakıt pili - Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)
- c) Erimiş karbonatlı yakıt pili - Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)
- d) Fosforik asit yakıt pili - Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)

a) PEMFC yakıt pili

PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell - Polimer elektrolit yakıt pili) yakıt pili ismini elektrolit olarak kullanılan plastik membrandan almaktadır. Bu membran için en çok kullanılan malzeme perfluorinatlı sülfonik asit polimeri olan Nafiondur ($C_7HF_{13}O_5SC_2F_4$). Platin katalizör ile kaplanmış olan membran gözenekli iki karbon elektrot arasında bulunmaktadır. PEMFC yakıt pilinin düşük çalışma sıcaklığından dolayı platin katalizör kullanımı mecburidir.

Yakıt olan hidrojen ve oksidant olan oksijen membran elektrot montaj takımına onları en düzgün şekilde ayırmaya yarayan bir seri plakadan geçirilerek gönderilir. Tekil piller birbirine gaz akış kanalları bulunduran çift taraflı levhalar ile bağlanır. Çift taraflı levhalar metalik veya karbon kompozit yapıda olabilir.

Yakıt ve hava sağlandığı zaman piller yaklaşık 0,7 V voltta yoğunluğu $1W/cm^2$ 'ye ulaşan elektrik gücü üretir. Reaksiyon ürünü olan su ve ısının sistemden uzaklaştırılması gerekir. Isının uzaklaştırılması soğutma devresi ile sağlanır. Membran protonları ileten sıvı su bulundurur, bu da sıcaklığı PEMFC yakıt pilinin çalışma sıcaklığında tutar [24]. Şekil 2.30'da bir polimer elektrolit yakıt pili elemanları gösterilmiştir [25].



Şekil 2.30 : Polimer elektrolit yakıt pili elemanları [25].

b) SOFC yakıt pili

SOFC (Solid Oxide Fuel Cell - Katı oksit yakıt pili) yakıt pili yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri grubundadır. Çalışma sıcaklıkları $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşmaktadır. SOFC yakıt pili yakıt olarak gaz halinde hidrojen, dizel, kerosen, doğal gaz gibi birçok çeşit kimyasal kullanabilir. Düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri katalizörü için ciddi bir sorun teşkil eden CO da yakıt olarak kullanılabilir. SOFC yakıt

pilinin bir avantajı da yüksek ısı üretmesidir. Sistemin veriminin arttırılması için ortaya çıkan ısı sisteme eklenen gaz türbini tarafından kullanılabilir. SOFC yakıt pili yapısal olarak PEMFC yakıt piline benzer. Pilin elektrokimyasal olarak aktif olan parçaları seramik malzemelerden imal edilir. Reaksiyon sırasında pilde 0,5 ile 1 V arası potansiyel oluşur. Pildeki akım yoğunluğu 0,5 ile 1 A/cm² arasındadır.

Pilin anot kısmı seramik ve metal birleşimi olan zirkonyumdioksit ve nikeloksit gibi sermet yapıdadır. Elektrolit O²⁻ iyonlarını geçiren yarı geçirgen bir membrandır. Elektrolit malzemesi olarak genelde itriyumoksit katkılı zirkonyum dioksit malzeme kullanılır [24].

c) MCFC yakıt pili

MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell - Erimiş karbonatlı yakıt pili) yakıt pili yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri grubundadır. Pilin çalışma sıcaklığı 650 C⁰ dir. MCFC yakıt pilinde lityum karbonat ve potasyum karbonat gibi karbonatlar elektrolit olarak kullanılır. Elektrotlar nikel materyaller barındırır.

MCFC yüksek elektriksel ve kimyasal verime sahiptir. Buhar oluşumuna olanak sağlayan yüksek ısı üretir. Doğal gaz gibi karbon içerikli gazları yakıt olarak kullanabilir. Yüksek çalışma sıcaklığı nedeniyle pilde pahalı katalizör kullanımı ihtiyacı yoktur. Çalışma sıcaklığı SOFC yakıt pilindeki kadar yüksek olmadığı için de pahalı seramik malzeme kullanımı gereksinimi ortadan kalkar [24].

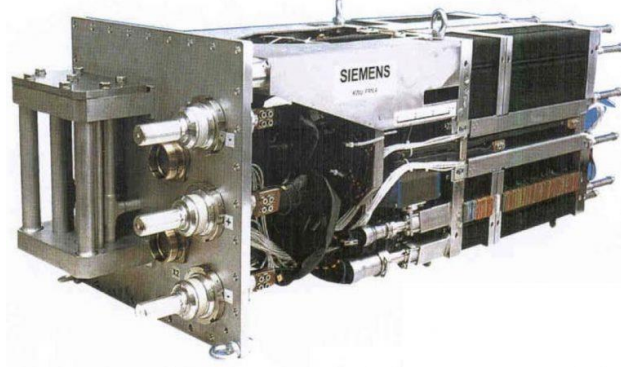
d) PAFC yakıt pili

PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell - Fosforik asit yakıt pili) yakıt pili silika karbit ortamına emdirilmiş fosforik asit çözeltisinden oluşan elektrot kullanır. Elektrotlar platin katalizör bulunduran grafit malzemeden oluşur. Çalışma sıcaklığı 200 C⁰ olan PAFC yakıt pilleri orta sıcaklık yakıt pili olarak gruplandırılabilir [24].

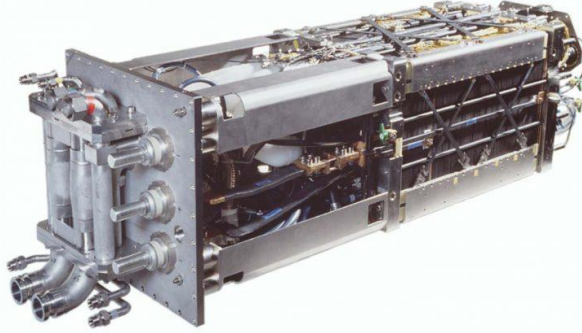
2.2.4.2 Denizaltılarda yakıt pili kullanımı

Günümüzde Siemens tarafından geliştirilen PEMFC yakıt pilleri giderek artan yaygın bir kullanıma sahiptir. Alman Type 212 sınıfı denizaltılarda 34kW gücünde 9 adet olmak üzere toplamda 304 kW gücünde BZM 34 PEMFC yakıt pili sistemi bulunur. Alman Type 214 denizaltılarında 2 adet 120 kW'lık olmak üzere toplamda 240 kW gücünde BZM 120 PEMFC yakıt pili sistemi bulunur. Denizaltılarda

kullanılan BZM 34 ve BZM 120 PEMFC yakıt pili şekil 2.31 ve 2.32’de gösterilmektedir [26].



Şekil 2.31 : Siemens BZM 34 yakıt pili [26].



Şekil 2.32 : Siemens BZM 120 yakıt pili [26].

Denizaltılarda hidrojen depolamanın en verimli yolu hidrojeni metal hidritlere bağlı halde mukavim tekne dışındaki silindirlerde depolamaktır. Geri çevrilebilir depolama kapasitesi ağırlığının % 2’sine kadar ulaşan düşük sıcaklık metal hidritleri bu iş için uygun bir çözümdür. Type 212 ve Type 214 sınıfı denizaltılarda kullanılan metal hidrit tankları şekil 2.33’te gösterilmektedir [27].



Şekil 2.33 : Denizaltı metal hidrit tankları [27].

Oksijen denizaltıda mukavim tekne içinde veya dışında bulunan tanklarda sıvı halde depolanmaktadır. Oksijen depolama tankları vakum yalıtımlı, çift duvarlı yapıdadır. Tank tesisatı, güvenlik ve izleme ekipmanları ve evaporatör basınç geçirmez ve su geçirmez bir kabinde bulunur. Oluşabilecek şoka karşı tank tesisatı ve evaporatör esnek bir şekilde sabitlenmiştir. Mürettebatın kullandığı oksijen de bu tanklardan elde edilir. Type 212 sınıfına ait oksijen depolama tankı şekil 2.34'te gösterilmektedir [28].



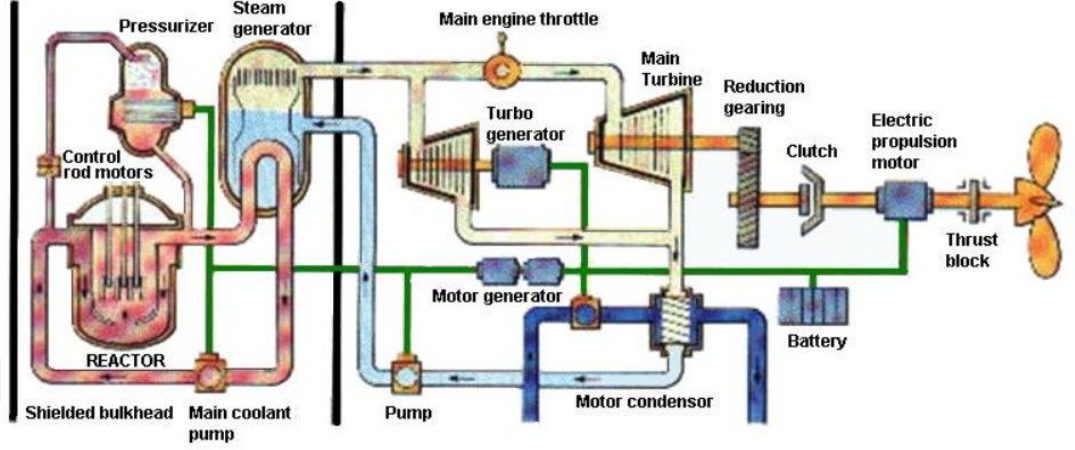
Şekil 2.34 : Denizaltı LOX depolama tankı [28].

2.3 Nükleer Sevk Sistemi

Nükleer sevk sistemi yüksek mukavemetli çelik reaktör kabı, ısı değiştirici olarak buhar jeneratörleri, pompalar, borular ve valflerden oluşur. Her reaktör yaklaşık 1000 ton kurşun kalkan bulundurur. Denizaltılarda kullanılan nükleer sevk sisteminde ısı üretmek için nükleer yakıtın füzyona uğradığı nükleer reaktör kullanılır. Reaksiyon sonucu ortaya çıkan radyasyondan mürettebatın korunması için reaktör etrafına kalkan yerleştirilir.

Nükleer sevk sistemi iki sistemden oluşan basınçlı su reaktörü dizaynına sahiptir. Birinci sistem sıradan suyu dolaştıran boru devreleri, pompalar, buhar jeneratörü ve reaktörden oluşur. Reaktörde üretilen ısı yüksek basınç altındaki suya transfer edilir, böylece su kaynamaz. Bu su buhar jeneratörlerine gittikten sonra tekrar ısınmak için reaktöre döner. Buhar jeneratörlerinde birinci sistemden gelen sudan elde edilen ısı ikinci sisteme aktarılıp buhar üretilir. İki sistem suyun karışmaması için birbirinden

izole edilmiştir. İkinci sistemde buhar türbin jeneratörlerini çalıştırmak için buhar jeneratörlerinden çıkar. Türbinlerden geçen buhar yoğunlaşarak sıvı hale gelir ve tekrar buhar jeneratörlerine pompalanır [29]. Nükleer sevk sistemi çalışma diyagramı şekil 2.35’te gösterilmektedir.



Şekil 2.35 : Nükleer sevk sistemi çalışma diyagramı [29].



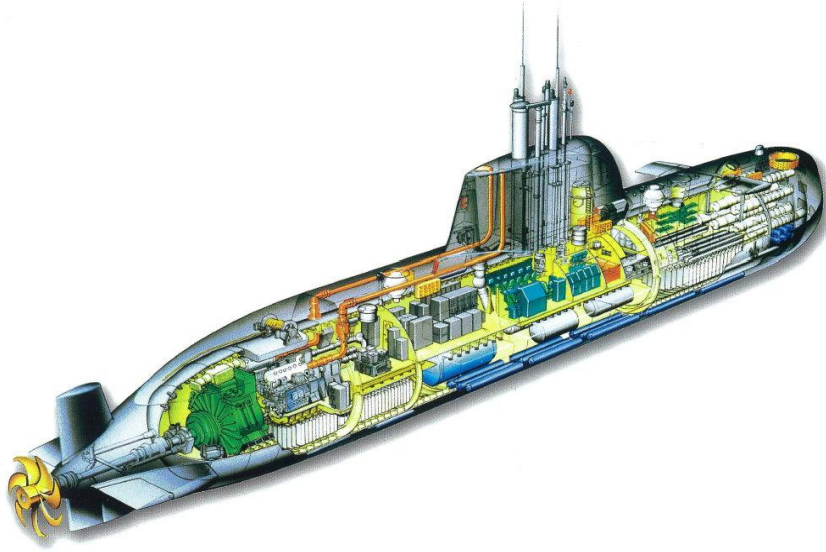
3. YAKIT PİLİ HESAPLAMALARI

3.1 Hesaplarda Kullanılacak Denizaltılar

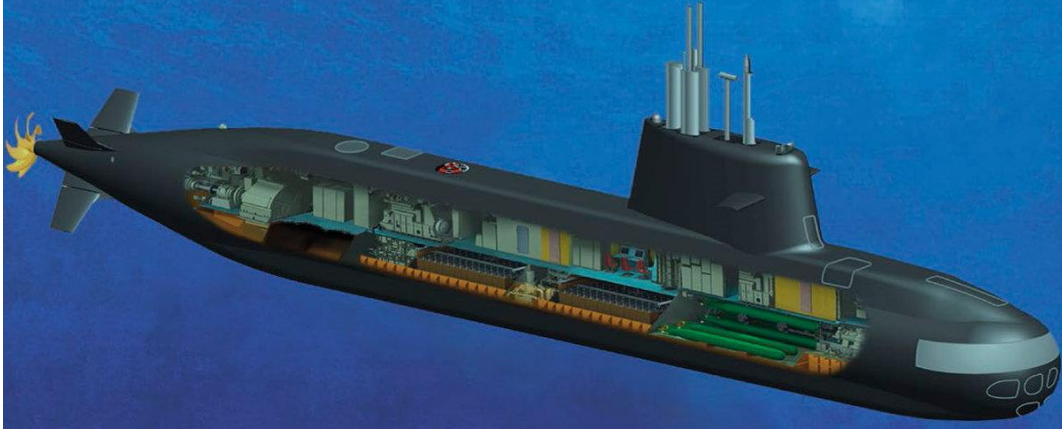
Hesaplarda kullanılacak olan denizaltılar için PEMFC yakıt pili kullanan Alman Type 214 denizaltısı, PEMFC yakıt pili kullanan Rus S1000 denizaltısı ve PEMFC yakıt pili kullanan Alman Type 212 denizaltısı seçilmiştir. Hesaplarda kullanılan denizaltılara ait dizayn özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir [30]. Bu denizaltılara ait kesit resimleri şekil 3.1, şekil 3.2 ve şekil 3.3’te verilmiştir [31] [32].

Çizelge 3.1 : Hesaplarda kullanılan denizaltıların genel özellikleri [30].

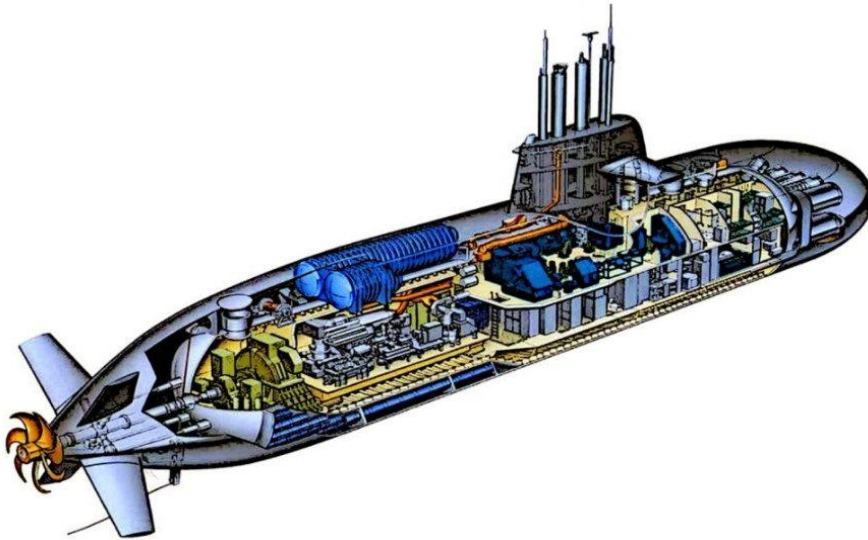
			TYPE 214	S1000	TYPE 212
Tam boy	LOA	m	65,00	66,20	56,00
Pervanesiz boy	L _{max}	m	63,98	55,00	54,60
Çap	D	m	6,30	5,50	7,00
Orta kesit alanı	A _m	m ²	38,90	29,81	38,50
Takıntılar olmadan hacim	V _{env}	m ²	2326,54	1233,70	2056,00
Islak alan	WS	m ²	1662,37	914,46	1263,00
Dümenlerin alanı	S _a	m ²	93,30	62,62	73,73
Yelken alanı	S _s	m ²	140,10	116,70	68,80
Tekne verimi	η _H	-	1,40	1,35	1,43
Dizel makina gücü	P _{dg}	kW	6240	1300	3120
Batarya sayısı	N _c	Adet	519,24	265,80	443,00
Sistem-yaşam yükü	L _h	kW	61	39	58



Şekil 3.1 : Type 214 denizaltısı kesit resmi [31].



Şekil 3.2 : S1000 denizaltısı kesit resmi [32].



Şekil 3.3 : Type 212 denizaltısı kesit resmi [31].

3.2 Denizaltıların Dalmış Durumda Şaft Gücü Hesabı

Denizaltı su içerisinde hareket edince ince bir su tabakası denizaltı yüzeyine yapışarak denizaltı hızında hareket eder. Suyun viskozitesi sebebiyle yüzeye beraber hareket eden bu su tabakası, denizaltı yüzeyine paralel komşu ikinci bir su tabakasını beraber sürüklemeye çalışırken buna bitişik üçüncü bir su tabakası, aynı viskoz özellik nedeniyle ikinci tabakanın ileri hareketini engellemeye çalışır. Denizaltı yüzeyinden belirli bir mesafe sonra bu etki tamamen kaybolur. Böylece denizaltı yüzeyi boyunca sürüklenen bir sınır tabaka meydana gelir. İçinde hız düşüşlerinin olduğu bu tabakanın dışında hareketten etkilenmemiş sakin halde su bulunur [33].

Sınır tabaka bölgesinde yüzeye dik yönde hızdaki önemli değişimler sonucunda ($\delta u/\delta y$) hız gradyanı büyük değerlere ulaşır ve akışkanın viskozitesine bağlı olarak ($\tau = \mu (\delta u/\delta y)$) kayma gerilmesi meydana gelir. Böylece sınır tabaka yüzeye teğet kuvvetlerin oluşturduğu sürtünme direncinin kaynağı olur. Bu yüzden sınır tabakaya sürtünme kuşağı da denilmektedir. Sınır tabaka bölgesinin dışında ise hız gradyanı sıfır olduğu için sürtünme direnci oluşmayacaktır. Cismin baş tarafından kış tarafına doğru bir basınç artışı gerçekleşir. Cismin etrafındaki basınç dağılımları değişerek viskoz basınç direnci veya viskoz form direnci denen bir direnç oluşur. Buradan görülmektedir ki sürtünme direnci sadece denizaltı ve yüzeyine yapışan su tabakası arasında değil aynı zamanda sınır tabaka bölgesindeki su tabakaları arasında da oluşmaktadır [33].

Bir denizaltının istenilen hızda hareket edebilmesi için gerekli olan etkin gücü karşılayacak kadar bir gücün bataryalar veya diğer kaynaklar tarafından sağlanması gerekir. Ancak bataryalar ve diğer kaynakların ürettiği gücün denizaltının hareketini sağlayacak itme kuvvetine dönüşmesi aşamalarında bir takım kayıplar meydana gelir ve bu kayıplara bağlı olarak değişik güç ve verim ifadeleri tanımlanır [33].

Denizaltının v hızında yedekte çekilebilmesi için gerekli olan güce etkin güç (P_E) denir. Şaft kovanından sonra pervanenin önünde ölçülen ve pervaneye iletilen güce şaft gücü (P_D) denir. Ele alınan denizaltıların dalmış durumdaki şaft gücü aşağıdaki formüle göre hesaplanacaktır [30].

$$P_D = P_E/\eta_D \text{ [kW]} \quad (3.1)$$

Burada P_D şaft gücünü, P_E etkin gücü ve η_D genel sevk verimini temsil etmektedir.

Bir denizaltının toplam direnç hesabında denizaltının yelken ve dümenlerinin de direnci göz önüne alınmalıdır. Sürtünme direncinin bu takıntıların alanı ile arttığı kabul edilir. Artık direnç katsayısı olan C_r değeri model direnç deneyleri ile belirlenir ve Reynolds sayısından bağımsız olduğu kabul edilir. Denizaltı sonuçları ile iyi bir uygunluk sağlamak ve pürüzlülüğün etkisini hesaba katmak için denizaltının toplam direnç katsayısına C_a şeklinde bir korelasyon katsayısı eklenir. Böylece denizaltının toplam direnç katsayısı $C_f + C_r + C_a$ şeklinde olur.

Gövde ve her bir takıntı birbirinden bağımsız olarak tam gövde uzunluğuna ek olarak her bir takıntının ortalama kord boyu ele alınarak belirlenmiş bölgesel Reynolds sayıları kullanılarak incelenir. Etkin gücü belirlemek için aşağıdaki ampirik ifadeden yararlanılacaktır [34].

$$P_E = 0,51408 * v^3 \quad (3.2)$$
$$* [WS * (C_f + C_a + C_r) + (S_s * Cd_s) + (S_a * Cd_a)] [kW]$$

Burada v dalmış durumdaki hızı [m/s], WS takıntısız halde denizaltı ıslak yüzey alanını [m^2], C_f sürtünme direnci katsayısını, C_a korelasyon katsayısını, C_r artık direnç katsayısını, S_s yelken ıslak yüzey alanını [m^2], Cd_s yelken direnç katsayısını, S_a dümen ve diğer takıntıların toplam ıslak yüzey alanını [m^2], Cd_a dümen direnç katsayısını ifade etmektedir. C_a korelasyon katsayısı 0,0004 olarak verilmiştir [30]. Cd_s yelken direnç katsayısı 0,009 olarak verilmiştir [34]. Cd_a dümen direnç katsayısı 0,006 olarak verilmiştir [34].

Eşdeğer levha direncinin denizaltı sürtünme direncine iyi uyum göstermesi fikrini esas alarak genelde deneye dayalı çok sayıda formül çıkarılmıştır. Bu formüllerde denizaltı boyu ve hızı kullanılarak C_f sürtünme direnç katsayısı elde edilir. Sürtünme direnci katsayısı için Reynolds sayısına bağlı olarak ITTC 1957 tarafından tavsiye edilen formül aşağıda verilmiştir [35].

$$C_f = \frac{0,075}{(\log Re - 2)^2} \quad (3.6)$$

Burada Re Reynold sayısını temsil etmektedir.

Reynold sayısı aşağıdaki formüle göre hesaplanacaktır [35].

$$Re = \frac{V_{Re} * L_{max}}{\nu} \quad (3.7)$$

Burada V_{re} dalmış durumdaki hızı [m/s], L_{max} denizaltı tam boyunu [m], ν kinematik viskoziteyi [m^2/s] ifade etmektedir.

Kinematik viskozite aşağıda verilen ampirik formüle göre hesaplanacaktır [30].

$$\nu = (0,659 * 10^{-3} * (T - 1) + 1,7688)10^{-6} [m^2/s] \quad (3.8)$$

Burada T deniz suyu sıcaklığını [$^{\circ}C$] ifade etmektedir.

Artık direnç katsayısı aşağıda verilen ampirik formüle göre hesaplanacaktır [34].

$$C_r = C_f * \left(1,5 * (D/L_{max})^{1,5} + 7 * (D/L_{max})^3 + 0,002 * (C_p - 0,6) \right) \quad (3.9)$$

Burada C_p prizmatik katsayısı ifade etmektedir.

Prizmatik katsayı aşağıda verilen formüle göre hesaplanacaktır [30].

$$C_p = \frac{V_{env}}{L_{max} * A_{midship}} \quad (3.10)$$

Burada V_{env} takıntısız denizaltı hacmini [m^3], $A_{midship}$ yelkensiz denizaltı orta kesit alanını [m^2] ifade etmektedir.

Sevk verimi denizaltının etkin gücünün şaft gücüne oranı olarak tanımlanır. Sevk verimini belirlemek için aşağıdaki ifadeden yararlanılacaktır [34].

$$\eta_D = \eta_H * \eta_0 * \eta_R \quad (3.3)$$

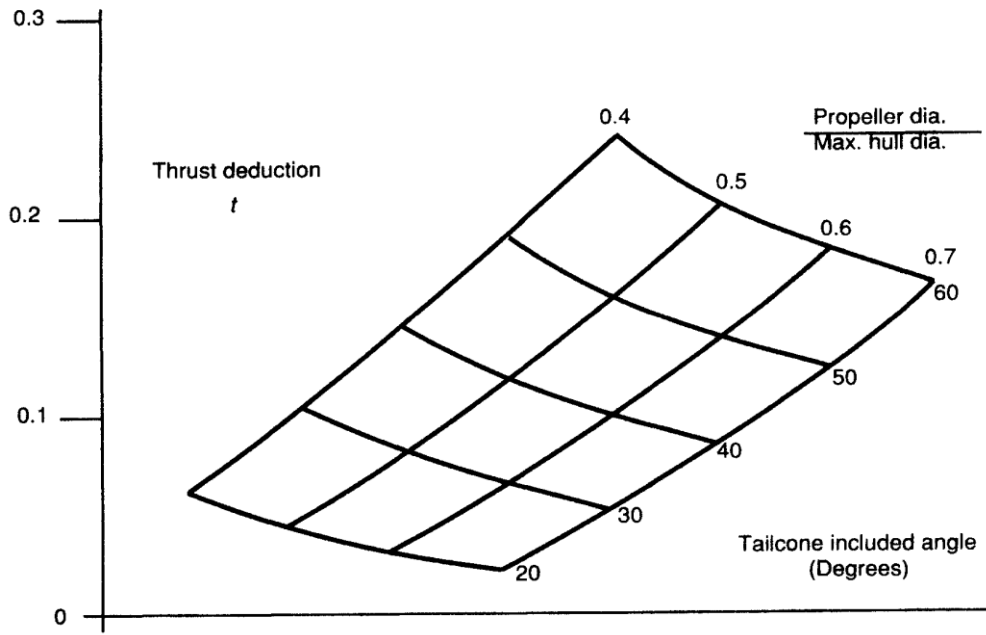
Burada η_H tekne form verimini, η_0 açık su pervane verimini, η_R bağıl dönme verimini ifade etmektedir. η_R bağıl dönme verimi 1,02 olarak verilmiştir [36].

Tekne form verimi (η_H) etkin gücün pervanenin itme gücüne oranı olup, pervane ile denizaltı kığı arasındaki etkileşimle ilgilidir. Tekne form verimi aşağıdaki formüle göre hesaplanacaktır [30].

$$\eta_H = \frac{1 - t}{1 - w} \quad (3.4)$$

Burada t itme azalmasını, w Taylor iz katsayısını ifade etmektedir.

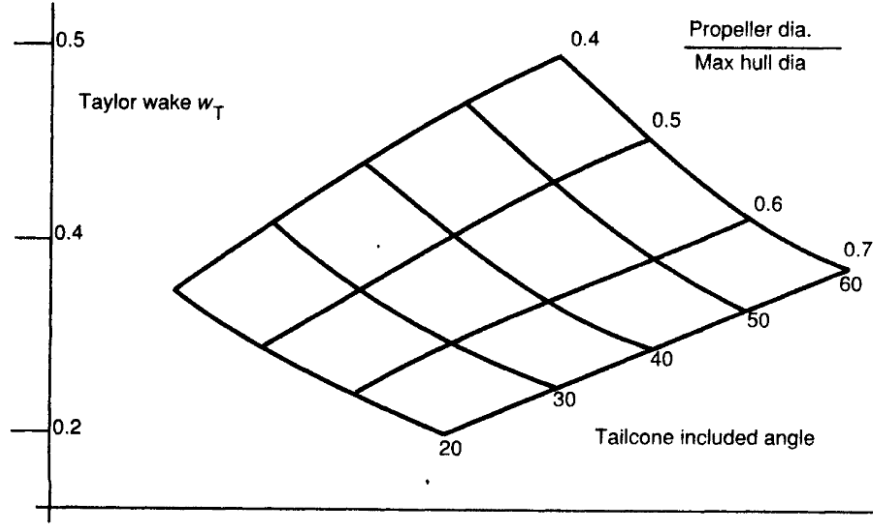
Bir denizaltıyı belirli bir hızla sevk edebilmek için gerekli olan T itmesi, denizaltının aynı hızdaki toplam direncinden daha fazladır. Bunun nedeni, pervanenin denizaltı kıçında akımı hızlandırması ve basınç alanını düşürmesi sonucunda meydana gelen direnç artışıdır. Bu nedenle, pervane itmesi denizaltı direnci ile pervanenin çalışmasından dolayı artan direnci karşılamak zorundadır. Genellikle direnç artışı yerine pervane itmesinde meydana gelen azalma şeklinde ifade edilir. t ile gösterilen bu oran itme azalması veya emme katsayısı olarak isimlendirilir. Denizaltıların itme azalması aşağıdaki grafik yardımıyla belirlenecektir [36].



Şekil 3.4 : İtme azalması grafiği [36].

Burada denizaltının kıç koniklik açısına ve pervane çapının maksimum gövde çapına oranına göre itme azalması belirlenir.

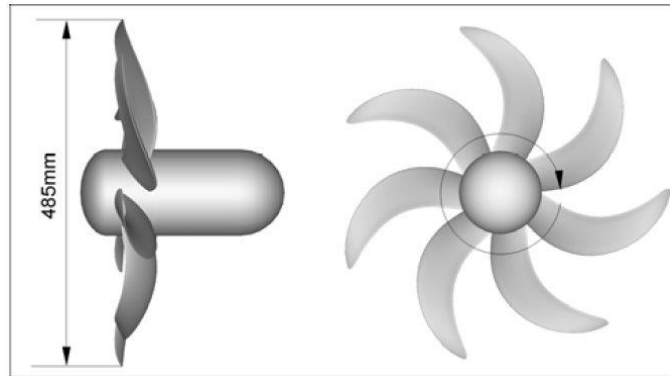
Bir denizaltının izi (wake); denizaltının ilerleme hızı ile suyun pervaneye akış hızı arasındaki fark olarak tanımlanır. Bu farkın denizaltı hızına veya suyun ortalama akış hızına bölünmesiyle de iz katsayısı tanımlanır. Denizaltıların Taylor iz katsayıları aşağıdaki grafik yardımıyla belirlenecektir [36].



Şekil 3.5 : Taylor iz grafiği [36].

Burada denizaltının kış koniklik açısına ve pervane çapının maksimum gövde çapına oranına göre Taylor iz katsayısı belirlenir.

Açık su pervane verimi (η_0) pervaneye verilen gücün ne kadarının pervane tarafından denizaltı sevki için kullanıldığını gösteren orandır. Genelde pervane verimini ölçme deneyleri kavitasyon tüneline üniform akımla yapıldığından ölçülen bu verime pervane açık su verimi denir. Hesaplama INSEAN tarafından tasarlanan E1619 model pervanesi kullanılmıştır. E1619 pervanesi yüksek çalıklıklı yedi kanatlı bir denizaltı pervanesidir. Pervanenin açık su deneyleri INSEAN'ın çekme tankında, iz ölçümleri ise sirkülasyon tankında LDV (Laser Doppler Velocimetry) tekniği ile yapılmıştır. Model pervane tek parça olarak alüminyumdan üretilmiş olup dışı lazer yansımaları azaltmak amacı ile siyah anod kaplama ile kaplanmıştır [37]. INSEAN E1619 pervanesi geometrisi aşağıdaki şekilde verilmiştir [37]. Pervanenin genel özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir [37].

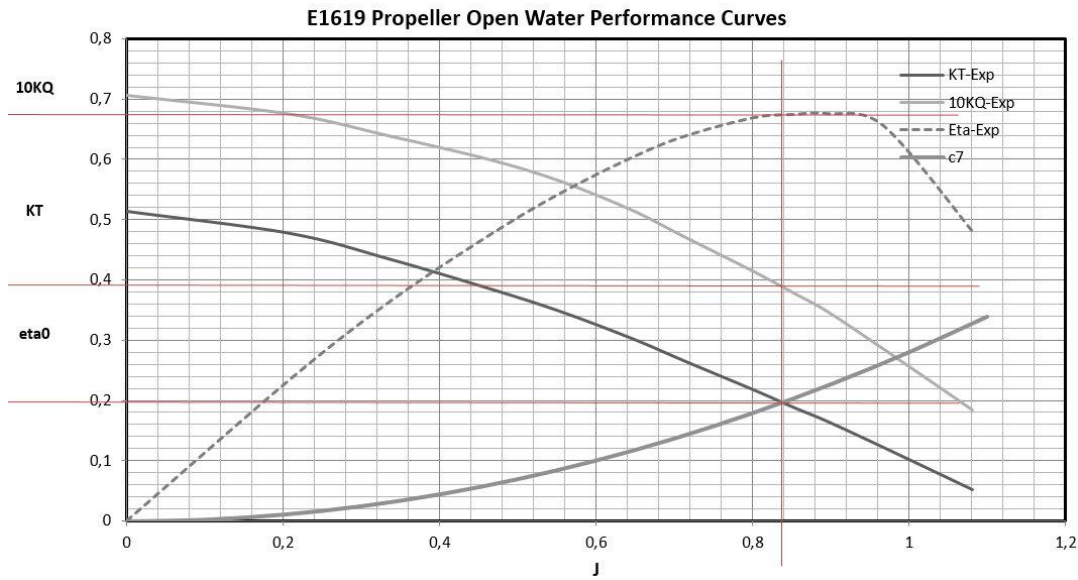


Şekil 3.6 : INSEAN E1619 Pervanesi Geometrisi [37].

Çizelge 3.2 : INSEAN E1619 pervanesi genel özellikleri

Pervane Kanat Sayısı	Z	7
Çap (m)	D	0,485
Göbek / Çap Oranı	H/D	0,226
0,7R'de Piç Oranı	P/D	1,150
0,75R'de Kord Uzunluğu (m)	C _{0,75}	0,0068
Kanat açılım alanı oranı	A _E /A ₀	0,608

E1619 pervanesinin açık su pervane verimi aşağıdaki grafik yardımıyla belirlenecektir [38].



Şekil 3.7 : E1619 Pervanesi açık su performans eğrileri [38].

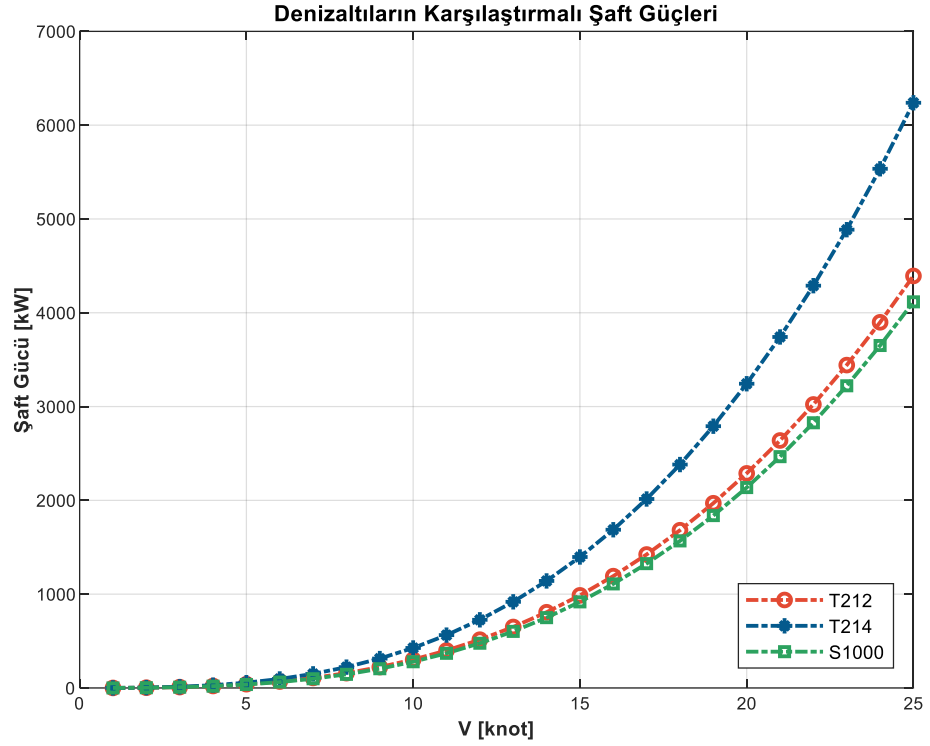
Hesapta her bir J değerine karşılık gelen C_7 değeri hesaplanır. C_7 eğrisi grafikte çizilerek K_T eğrisi ile kesiştirilir ve karşı geldiği J değeri okunur. Bu J değerine karşılık gelen K_Q ve η_0 değerleri grafikten okunur. C_7 değeri aşağıda verilen ampirik formüle göre hesaplanacaktır [38].

$$C_7 = \frac{K_T}{J^2} = \frac{R}{(1-t)(1-w)^2 \rho v_s^2 D^2} \quad (3.5)$$

Burada K_T itme katsayısını, J ilerleme katsayısını, R direnci, ρ su yoğunluğunu, v_s dalmış durumdaki hızı, D denizaltı çapını ifade etmektedir.

Yukarıda açıklanan şaft gücü hesaplama yöntemi Type 214, S1000 ve Type 212 denizaltılarına uygulanmış olup sonuçlar Şekil 3.8 ve Çizelge 3.3’de sunulmaktadır.

Bu sonuçlardan da görüldüğü üzere denizaltıların şaft gücü değeri direk olarak denizaltıların geometrilerine bağlıdır. Type 214 denizaltısının gövdesinin ve takıntılarının ıslak alanı diğer denizaltılara göre daha yüksek olduğu için denizaltıyı sevk etmek için gereken şaft gücü daha yüksek çıkmaktadır.



Şekil 3.8 : Type 214, S1000 ve Type 212 denizaltıları hız P_D grafiği.

Çizelge 3.3 : Denizaltıların farklı hızlardaki P_D değerleri

TYPE 214		S1000	TYPE 212
V [kn]	P_D [kW]	P_D [kW]	P_D [kW]
1	0,52	0,34	0,378
2	3,90	2,53	2,810
3	12,70	8,24	9,107
4	29,36	19,10	21,000
5	56,28	36,68	40,176
6	95,81	62,54	68,287
7	150,29	98,22	106,965
8	222,00	145,23	157,821
9	313,24	205,10	222,450
10	426,25	279,33	302,434
11	563,30	369,41	399,343
12	726,61	476,81	514,737
13	918,41	603,04	650,165
14	1140,91	749,56	807,170
15	1396,31	917,83	987,287
16	1686,80	1109,32	1192,042
17	2014,57	1325,48	1422,956
18	2381,81	1567,77	1681,545
19	2790,67	1837,64	1969,317
20	3243,33	2136,52	2287,778
21	3741,93	2465,86	2638,425
22	4288,64	2827,11	3022,755
23	4885,60	3221,69	3442,257
24	5534,96	3651,03	3898,417
25	6238,84	4116,57	4392,719

3.3 Denizaltıların Şnorkel Seyrindeki Oluşan Ek Direnç Hesabı

Denizaltı yüzeye yaklaştığı zaman dalga oluşturmak için harcadığı enerji nedeniyle direnci artar. Bu dalgaların oluşumu denizaltı üzerindeki basınç dağılımını değiştirir ve yüzey sürtünmesini arttırıp artık direnç katsayısında bir artışa neden olur. Şnorkel seyri için gerekli olan şaft gücü P_{DS} aşağıdaki formüle göre hesaplanacaktır [30].

$$P_{DS} = P_D + P_{DW} [kW] \quad (3.11)$$

Burada P_D dalmış durumdaki şaft gücünü [kW], P_{DW} dalga direncinden dolayı oluşan ek direnci [kW] temsil etmektedir.

Dalga direncinden dolayı oluşan ek direnç aşağıdaki ampirik formüle göre hesaplanacaktır [34].

$$P_{DW} = 0,51408 * v^3 * WS * C_W [kW] \quad (3.12)$$

Burada v şnorkel seyrindeki hızı [m/s], WS takıntısız denizaltı ıslak yüzey alanını [m^2], C_W dalga yapma direnci katsayısını ifade etmektedir.

Dalga yapma direnci katsayısı aşağıdaki ampirik formüle göre hesaplanacaktır [34].

$$C_W = \frac{C_h}{4 * (L_{max}/D - 1,3606) * (L_{max}/D)^2} \quad (3.13)$$

Burada D denizaltı çapını [m], L_{max} denizaltı tam boyunu [m], C_h hıza bağlı katsayıyı ifade etmektedir. C_h değeri denizaltıların L_{max}/D oranları ve h/L_{max} oranlarına göre verilmiş bir tablodan alınmıştır [34]. Buradaki h değeri denizaltı ekseninin su yüzeyine olan mesafesidir. Şnorkel derinliği bütün denizaltılar için aynı kabul edilmiştir. C_h değeri şnorkel hızı ve bu durumdaki P_{DS} değerlerine ulaşılabilen Type 2000 tipi bir denizaltıya [34] göre Çizelge 3.4'teki gibi çıkarılmıştır.

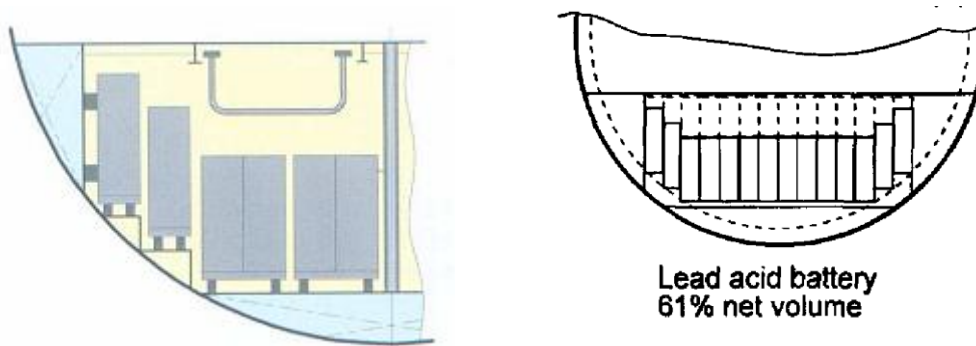
Çizelge 3.4 : Denizaltıların farklı hızlardaki C_h değerleri

Hız [knot]	C_h
4	5,441746
6	5,928816
8	7,064350
10	9,657285
12	10,593770

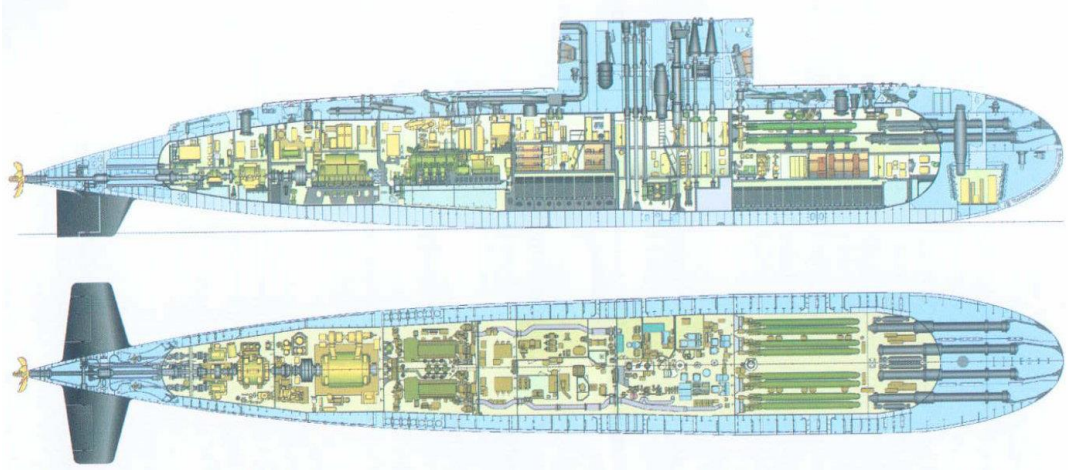
3.4 Dalmış Durumda Batarya Kapasitesi Hesabı

Tezin hazırlanması esnasında ulaşılabilen resimlerin büyük çoğunluğu genel yerleşim planlarının profil görünümü veya denizaltıların üç boyutlu görüntülerinden alınmış kesit resimleri olduklarından ölçülen tank hacimleri yetersiz kalmıştır. Bu yüzden bir takım kabuller yapılmak durumunda kalınmıştır. Resimlerin büyük çoğunluğundan ölçülebilen tank hacimleri; kış trim sarnıcı, kış motorin/yağlama yağı sarnıcı, ayar sarnıçları, torpido ara suyu sarnıcı ve baş trim sarnıcıdır. Bunlardan torpido ara suyu sarnıçları torpido dairesi hacmi içinde ele alınmıştır. Yakıt kapasite verisine ulaşılabilmiş olan Amur 1650 denizaltısının batarya kuyusu hacmi ölçülmüştür. Batarya kuyusunun yanları ve altındaki hacimlerin tamamının, buna ek olarak resimlerden ölçülen kış trim sarnıcı, baş trim sarnıcı ve kış motorin/yağlama yağı sarnıcı hacimlerinin tamamının %15 fazlasının yakıt sarnıcı kapasitesine eşit olduğu görülmüş ve tüm denizaltılar için bu kabul yapılarak yakıt kapasiteleri hesap edilmiştir [39].

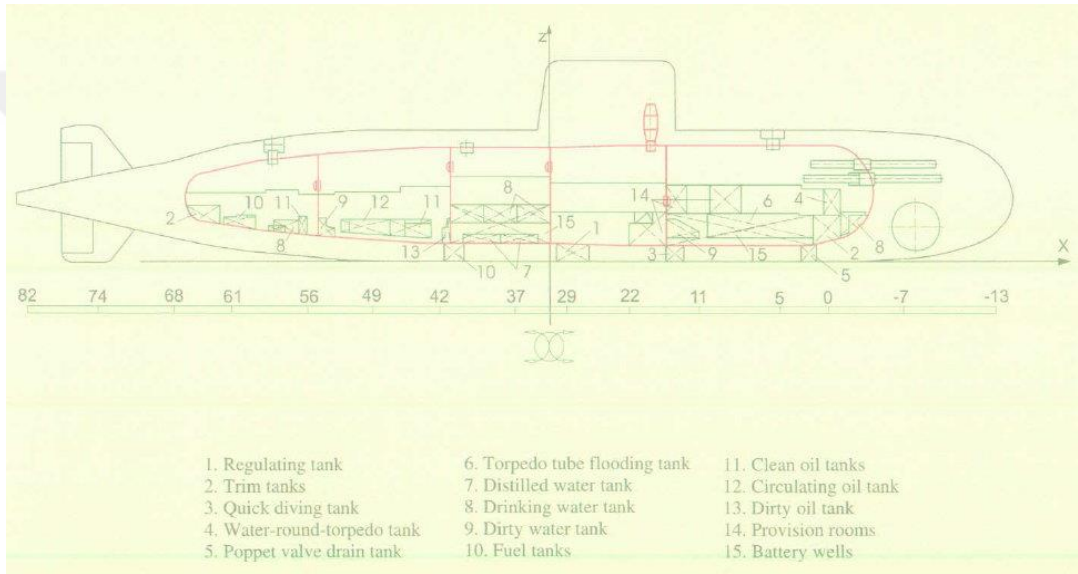
Şekil 3.9, 3.10 ve 3.11’de sunulan KILO tipi denizaltı genel yerleşim planı üzerinden yapılan inceleme sonucu batarya kuyusu hacmi olarak ölçülen ilk hacimden, batarya kuyusunun yanlarında ve altındaki tank hacimlerinin çıkarılmasının ardından kalan bölge yeni batarya kuyusu hacmi olarak ele alınmış ve bataryaların bu hacimde yaklaşık %65lik bir alan kapladığı bulunmuştur. Kabulün yapıldığı denizaltıda bulunan bataryalar bu tez için standart batarya veya “scell” olarak kabul edilmiş ve denizaltıdan ölçülen gerçek batarya hacmine bölünerek Standart Batarya için 4,6154 scell/m³ sayısı bulunmuştur. N_c sayısı bu bataryaların sayılarının toplamıdır [39].



Şekil 3.9 : Denizaltı batarya kuyusu kesit görünümleri [39].



Şekil 3.10 : KILO tipi denizaltı genel yerleşim planı [39].



Şekil 3.11 : KILO tipi denizaltı tank dağılım planı [39].

Bataryalardaki toplam enerjiyi belirlemek için aşağıdaki formülden yararlanılacaktır [29].

$$E_b = E_c * N_c [kW * saat] \quad (3.14)$$

Burada E_c belli deşarj akımında bir hücrenin enerji kapasitesini [$kW*saat$], N_c batarya sayısını ifade etmektedir.

Belli deşarj akımında bir hücrenin enerji kapasitesi aşağıda verilen ampirik formüle göre hesaplanacaktır [34].

$$E_c = 23 * \left(0,3030 * (1 - e^{(-T_d/2,6)}) + 0,2597 * (1 - e^{(-T_d/2,7)}) \right. \\ \left. + 0,2424 * (1 - e^{(-T_d/0,41)}) + 0,1948 \right. \\ \left. * (1 - e^{(-T_d/0,05)}) \right) [kW * saat] \quad (3.15)$$

Burada T_d batarya deşarj süresini [saat] ifade etmektedir.

Batarya deşarj süresi aşağıda verilen ampirik formüle göre hesaplanacaktır [30].

$$T_d = \frac{D_o D * E_b}{P_D / 1,3405 + L_h} [saat] \quad (3.16)$$

Burada $D_o D$ deşarj oranını, L_h sistem-yaşam yükünü [kW], E_b bataryalardaki toplam enerjiyi [kW*saat] ifade etmektedir. Deşarj oranı ($D_o D$) %80 olarak verilmiştir [34].

3.5 Görünmezlik Oranı ve Dalmış Durumda Sıa Hesabı

Görünmezlik oranı, denizaltıların şnorkel yapma sürelerinin toplam seyir süresine oranıdır. Denizaltı değerlendirmelerinde büyük öneme sahiptir çünkü denizaltının bir anlamda görünmezliğinin değerlendirilmesidir. Denizaltıların görünmezlik oranı aşağıda verilen formüle göre hesaplanacaktır [30].

$$IR = \text{Görünmezlik oranı} = \frac{T_r}{T_r + T_d} \quad (3.17)$$

Burada T_r belli şnorkel hızında batarya şarj süresini [saat] ifade etmektedir.

Belli şnorkel hızında batarya şarj süresi aşağıda verilen ampirik formüle göre hesaplanacaktır [30].

$$T_r = \frac{D_o D * E_b}{(P_{dg} - (SHP_s - L_h) * N_{bc})} [saat] \quad (3.18)$$

Burada $D_o D$ deşarj oranını, P_{dg} denizaltının dizel jeneratörlerinin toplam gücünü [kW], E_b bataryalardaki toplam enerjiyi [kW*saat], SHP_s şnorkel seyri için gerekli gücü [kW], L_h sistem-yaşam yükünü [kW], N_{bc} batarya şarjı esnasındaki enerji dönüşüm katsayısını ifade etmektedir. N_{bc} değeri 0,75 olarak verilmiştir [34].

3.6 AIP Hesabı

Hesaplarda incelenen denizaltılar reaktant olarak oksijen ve hidrojen kullanan yakıt pili sistemleri kullanılmaktadırlar. Denizaltılarda kullanılan yakıt pili sistemlerinin

sağladığı sevk süresini hesaplayabilmek için denizaltılarda bulunan oksijen ve hidrojen tank hacimleri bilinmelidir. Denizaltıların sahip olduğu hidrojen ve oksijen tanklarının miktarının bilgisine ulaşamadığından, bu değerler denizaltıların genel yerleşim planları üzerinden ölçülmüştür. Fakat AIP sistemi kullanan bir denizaltıda onlarca hidrojen tankı olduğundan, hidrojen miktarına genel yerleşim planı üzerinden doğru bir yaklaşım yapılamayacağı göz önüne alınmış ve her denizaltıda bir ya da iki tane bulunan LOX tankları ölçülmüştür.

Denizaltıların genel yerleşim planları, denizaltıların sahip olduğu boyut değerlerine göre Solid Works ve Rhinoceros çizim programları kullanılarak ölçeklendirilmiş ve gerçek boyutlar oluşturulmuştur. Ardından resimlerde görülen LOX tanklarının ölçümüne geçilmiş, resimler üzerinde yapılan çizimler ve ölçümler sonucu her bir denizaltının LOX kapasitesi Çizelge 3.5'teki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 3.5 : Denizaltıların LOX tank hacimleri

	Type 214	S1000	Type 212
LOX Tank Hacmi (m ³)	13,9	16,1	16,8

Bir LOX tankında ne kadar oksijen depolanabileceğine ait formül aşağıda verilmiştir [40].

$$\frac{V_{LOX}}{M_{LOX}} = 0,024 [feet^3/lb] = 0,0015 [m^3/kg] \quad (3.19)$$

Burada V_{LOX} denizaltı sıvılaştırılmış oksijen tankı kapasitesini, M_{LOX} denizaltı sıvılaştırılmış oksijen tankı kapasitesini temsil etmektedir.

Denizaltı seyri sırasında mürettebatın ne kadar oksijen harcayacağı aşağıda verilen ampirik formüle göre hesaplanmaktadır [40].

$$M_{o2crew} = C_{o2crew} * C_u * C_s * \text{personel sayısı} * \frac{T_{aip}}{1000} [kg] \quad (3.20)$$

Burada C_{o2crew} birim zamandaki kişi başı personel oksijen tüketimini [gram/(adam*saat)], C_u havada kalma faktörünü, C_s güvenlik faktörünü, T_{aip} denizaltı seyir süresini [saat] ifade etmektedir. Personel oksijen tüketimi 40,4

[gram/(adam*saat)] olarak verilmiştir [40]. Havada kalma faktörü 1,05 olarak verilmiştir [40]. Güvenlik faktörü 1,1 olarak verilmiştir [40].

Denizaltının istenen hızda seyir etmesi için gereken güç aşağıdaki formülde de belirtildiği gibi o hız için gerekli şaft gücü ile sistem-yaşam yükünün toplamından oluşmaktadır.

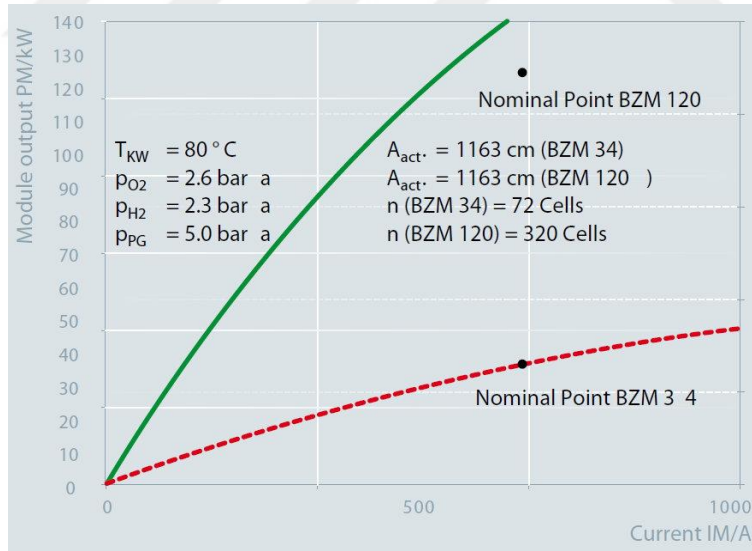
$$P_{Top} = P_D + L_h [kW] \quad (3.21)$$

Yakıt pili sistemleri tarafından sağlanan toplam güç aşağıda verilen ampirik formüle göre hesaplanmaktadır [40].

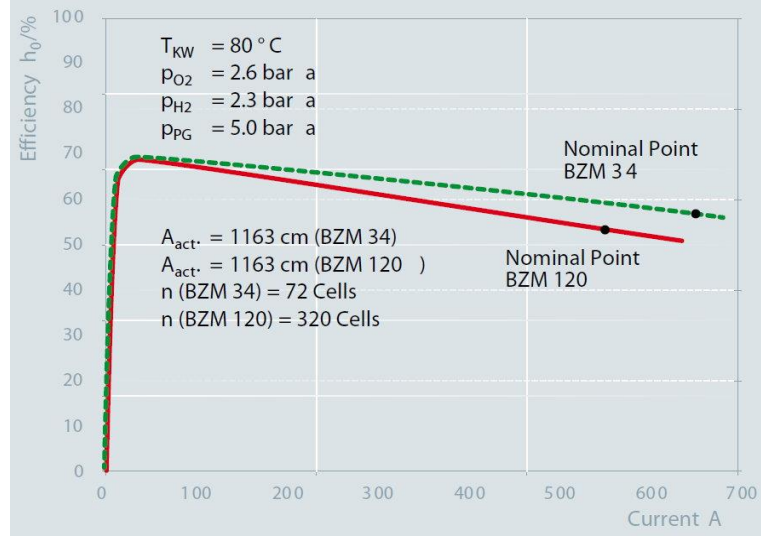
$$AIPTE = (MLOX - M_{o2crew})/C_{o2} * \eta_{aip} [kW * saat] \quad (3.22)$$

Burada $MLOX$ [kg] denizaltı oksijen tankı hacmini, M_{o2crew} personel oksijen tüketimini [kg], C_{o2} yakıt pili oksijen tüketimini [kg/kW*saat], η_{aip} çekilen akıma göre yakıt pili verimini temsil etmektedir. Yakıt pili oksijen tüketimi 0,511 [kg/kW*saat] olarak verilmiştir [39].

Çekilen güce göre yakıt pilinin veriminin hesaplanması için aşağıda verilen şekillerde güçten akıma, akımdan da verime geçilmiştir [25].



Şekil 3.12 : Yakıt pili güç akım grafiği [25].



Şekil 3.13 : Yakıt pili akım verim grafiği [25].

Yakıt pili kullanılarak elde edilen toplam seyir süresini hesaplamak için gerekli formül aşağıda verilmiştir [40].

$$T_{aip} = AIPTE / P_{Top} \text{ [saat]} \quad (3.32)$$

Burada $AIPTE$ yakıt pili sistemi tarafından sağlanan gücü [kW], P_{Top} denizaltı sevki için gerekli toplam gücü [kW] ifade etmektedir.

3.7 Problem Çözümü

Bu kısımda MATLAB'ın Optimizasyon modülündeki nonlinear programlama çözücüsü "fmincon"dan yararlanılacaktır. "fmincon" aşağıda verilmiş olan genel program tanımının minimumunu bulmayı amaçlar.

$$\min_x f(x) \text{ öyle ki } \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ c_{eq}(x) = 0 \\ Ax \leq b \\ A_{eq}x = b_{eq} \\ a_s \leq x \leq u_s \end{cases} \quad (3.32)$$

Bu problem tanımında b ve b_{eq} vektör, A ve A_{eq} matris, c ve c_{eq} nonlinear de olabilen fonksiyonlar, $f(x)$ skaler sonuç veren bir amaç fonksiyonu, a_s ve u_s ise sırasıyla x vektörüne ilişkin alt ve üst sınırlardır. x vektörü de bu optimizasyon probleminin çözüm vektörünü temsil eder. Aslında bu problemin amacı genel tanımda verilen 5 kısıtı ihlal etmeyecek şekilde $f(x)$ amaç fonksiyonunun minimumunu veren x çözüm vektörünü bulmaktır.

Bu tezde ise batarya ve yakıt pili ile sevk edilen bir denizaltının maksimum hızının hesaplanması amaçlanmaktadır. Bir başka deyişle değişik hızlarda ilerleyen denizaltının dalmış durumda geçirdiği maksimum sürenin bulunmasıdır. Bu yüzden hem batarya deşarj hem de yakıt pili deşarj denklemleri gerekli olacaktır.

$$T_d = \frac{D_o D * 23 * N_c * (A + B + C + D)}{P_D + L_h} \quad (3.33)$$

$$A = 0,3030 * (1 - e^{(-T_d/26)})$$

$$B = 0,2597 * (1 - e^{(-T_d/2,7)})$$

$$C = 0,2424 * (1 - e^{(-T_d/0,41)})$$

$$D = 0,1948 * (1 - e^{(-T_d/0,05)})$$

$$T_{aip} = \frac{MLOX - C_{o2crew} * C_u * C_s * \text{personel sayısı} * \frac{T_{aip}}{1000}}{(P_D + L_h) * (C_{o2} * \eta)} \quad (3.34)$$

Burada dikkat edilmesi gereken bir nokta denizaltıda 2 adet yakıt pili bulunup toplamda 240 kW'lık bir güce sahip olmasıdır. Bu güç denizaltının 8 kottan yüksek hızları için tek başına yetersiz olacaktır. Bu yüzden optimizasyon problemi 1-8 knot ve 9-25 knot arası olmak üzere 2 parçaya ayrılacaktır.

3.7.1 8 knota kadar olan çözüm

Bu kısım için 2 varsayım yapılacaktır:

1. Şaft ve sistem-yaşam yükünü hem batarya hem de yakıt pili sabit bir şekilde paylaşacaktır.
2. Hem bataryanın hem de yakıt pilinin aynı anda bitmesi beklenmektedir.

Böylelikle,

$$\min_{x_1} -x_1 \text{ öyle ki} \quad (3.35)$$

$$\begin{cases} \frac{D_o D * 23 * N_c * (A + B + C + D)}{P_D + L_h - x_2} - x_1 = 0 \\ \frac{MLOX - C_{o2crew} * C_u * C_s * \text{personel sayısı} * \frac{x_1}{1000}}{x_2 * (C_{o2} * \eta)} - x_1 = 0 \end{cases}$$

$$A = 0,3030 * (1 - e^{(-T_d/26)})$$

$$B = 0,2597 * (1 - e^{(-T_d/2,7)})$$

$$C = 0,2424 * (1 - e^{(-T_d/0,41)})$$

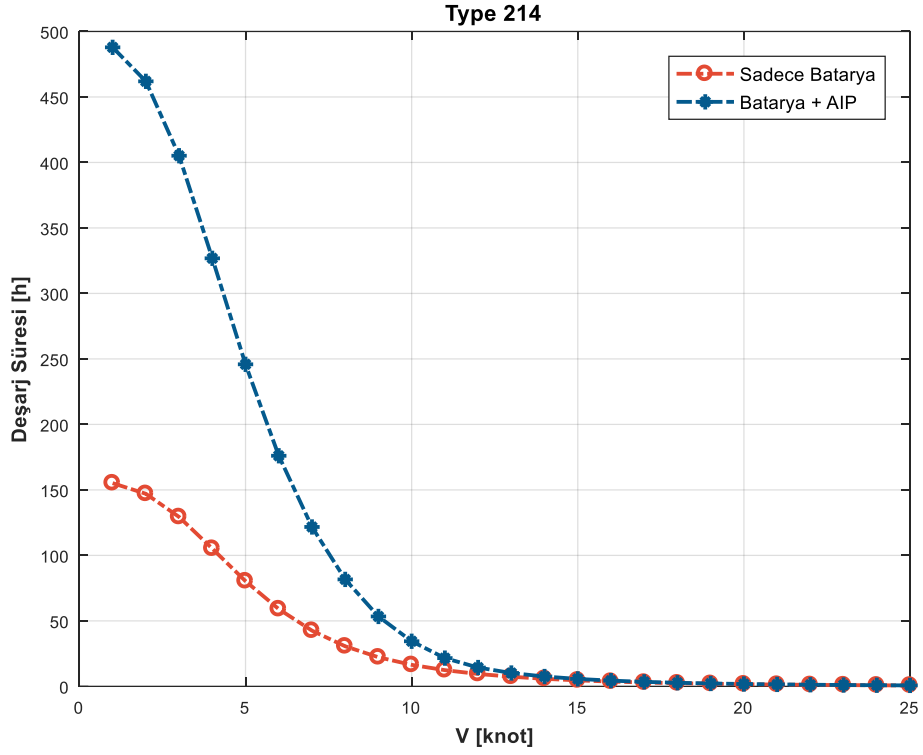
$$D = 0,1948 * (1 - e^{(-T_d/0,05)})$$

Dikkat edilirse Denklem (3.33) ve (3.34), Denklem (3.35)'in nonlinear eşitlik kısıtları olacak şekilde tekrardan düzenlenmiştir. Hem bataryanın hem de yakıt pilinin aynı anda bitmesinin beklenmesi varsayımına göre iki sistemin deşarj değişkenleri aynı olup x_1 olarak belirtilmiştir. x_2 ise iki sistem arasındaki sabit güç paylaşımını gösterip bu değer doğal olarak yakıt pillerinin maksimum gücünü aşmamak üzere 240 kW olarak sınırlandırılmıştır. Amaç fonksiyonunun önüne - işareti eklenmesinin sebebi aslında aranan zamanın maksimumu probleminin geleneksel olarak minimum arayan optimizasyon sürecine benzetilmesinden başka bir şey değildir.

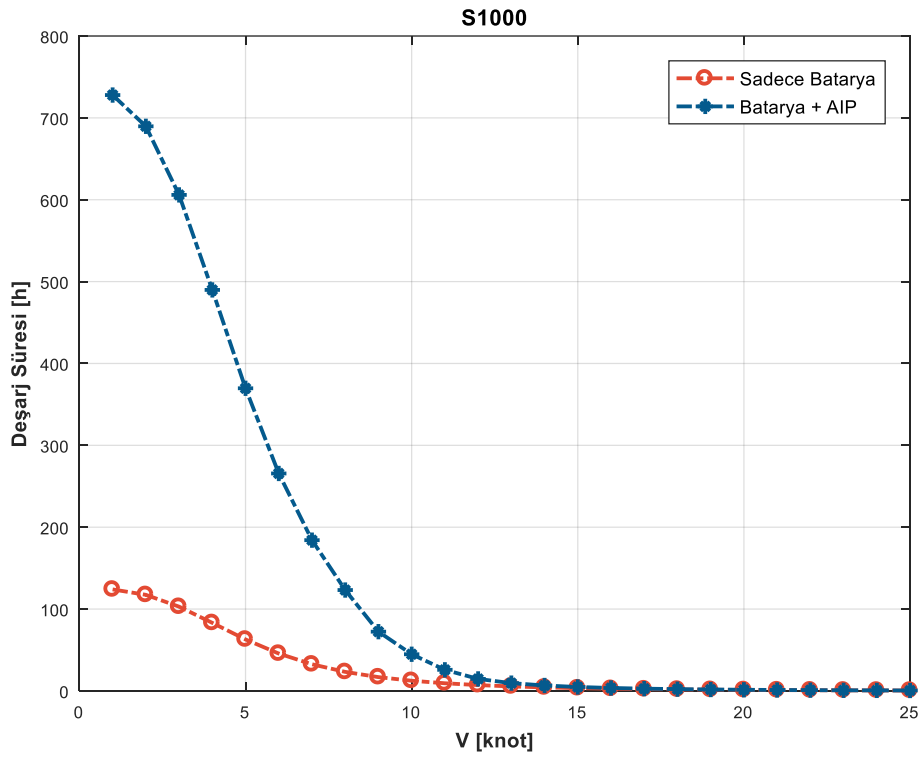
3.7.2 8 knot üzeri çözüm

Bir önceki parçada yapılan varsayımlar geçerli olsa da yakıt piline ait nonlinear eşitlik kısıtı nonlinear eşitsizlik kısıtına çevrilmiştir. Bunun nedeni yüksek süratlerde şaft gücünün eksponansiyel olarak artması, bu artan güç karşısında yakıt pillerinin yetersiz kalması ve bununla birlikte asıl yükün bataryalara binmesidir. Bu da aslında bataryaların yakıt pilinden çok önce tükenmesi anlamına gelmektedir. Bataryalar tükendiğinde de yakıt pillerinde halen belli bir miktar güç bulunma ihtimali yüksek olacaktır. Eğer yakıt pillerine ait nonlinear eşitlik kısıtı bozulmadan optimizasyon süreci işletilirse çözümün bulunamayacağı koşullar ortaya çıkacaktır. Gerçekten de Ek-B'de verilen optimizasyon programı çalıştırıldığında yakıt pilinden çekilen güç maksimumda yani 240 kW değerinde olduğu ve deşarj süresinin baskın bir şekilde bataryalar tarafından tayin edildiği görülecektir. Bu da yakıt piline ait nonlinear eşitlik kısıtı nonlinear eşitsizlik kısıtına çevrilmesi konusunda bir öngörü sunmaktadır. Bir bakıma bu durum katı olan eşitlik kısıtının daha yumuşak olan eşitsizlik kısıtına çevrilmesidir.

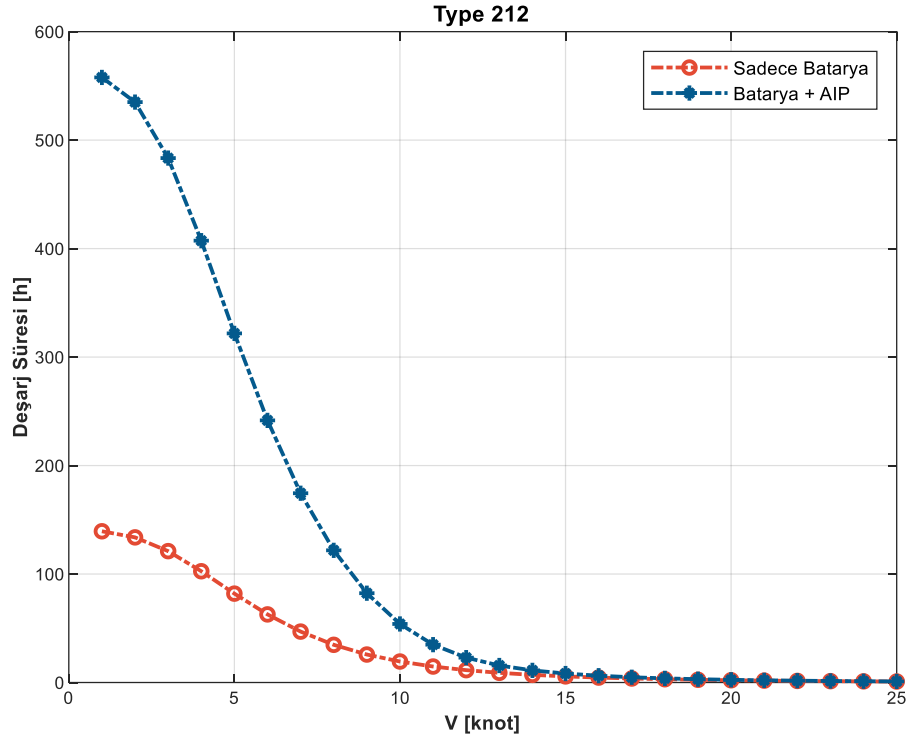
$$\begin{aligned} \min_{x_1} -x_1 \text{ öyle ki} \quad & (3.36) \\ \left\{ \begin{array}{l} \frac{D_o D * 23 * N_c * (A + B + C + D)}{P_D + L_h - x_2} - x_1 = 0 \\ -\frac{MLOX - C_{o2crew} * C_u * C_s * \text{personel sayısı} * \frac{x_1}{1000}}{x_2 * (C_{o2} * \eta)} + x_1 \leq 0 \\ A = 0,3030 * (1 - e^{(-T_d/26)}) \\ B = 0,2597 * (1 - e^{(-T_d/2,7)}) \\ C = 0,2424 * (1 - e^{(-T_d/0,41)}) \\ D = 0,1948 * (1 - e^{(-T_d/0,05)}) \end{array} \right. \end{aligned}$$



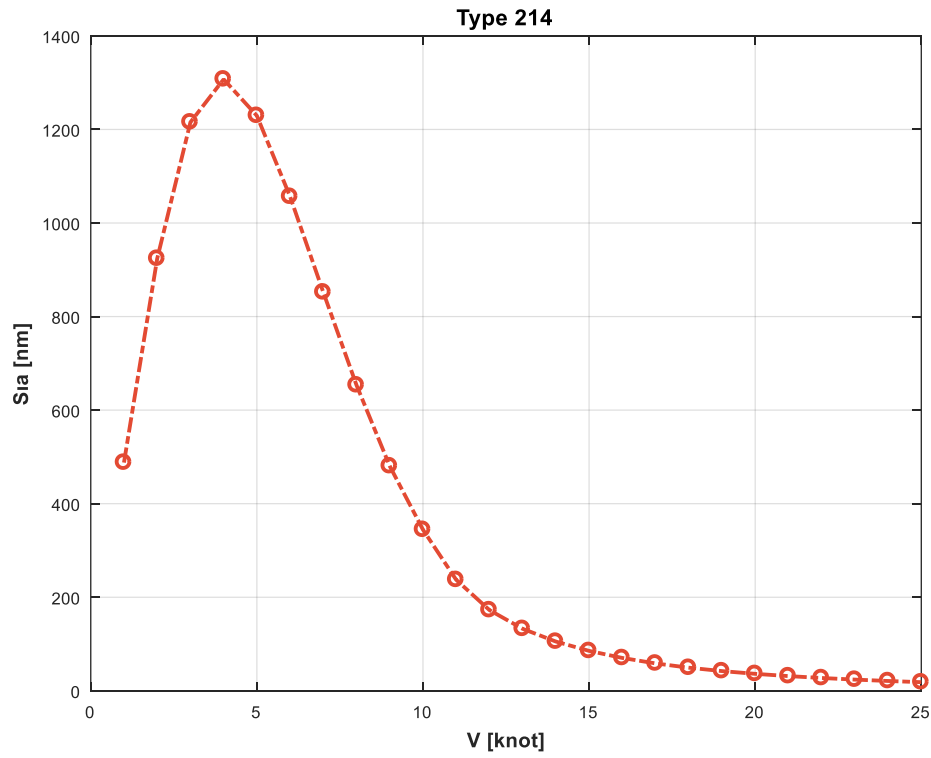
Şekil 3.14 : Type 214 denizaltısı deşarj süresi grafiği.



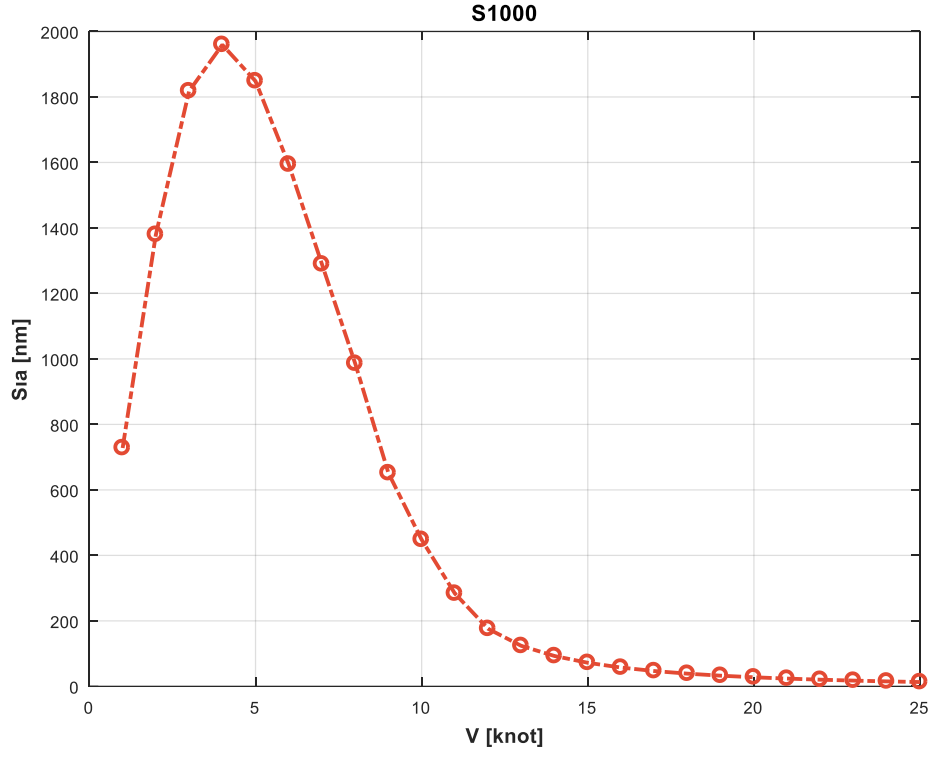
Şekil 3.15 : S1000 denizaltısı deşarj süresi grafiği.



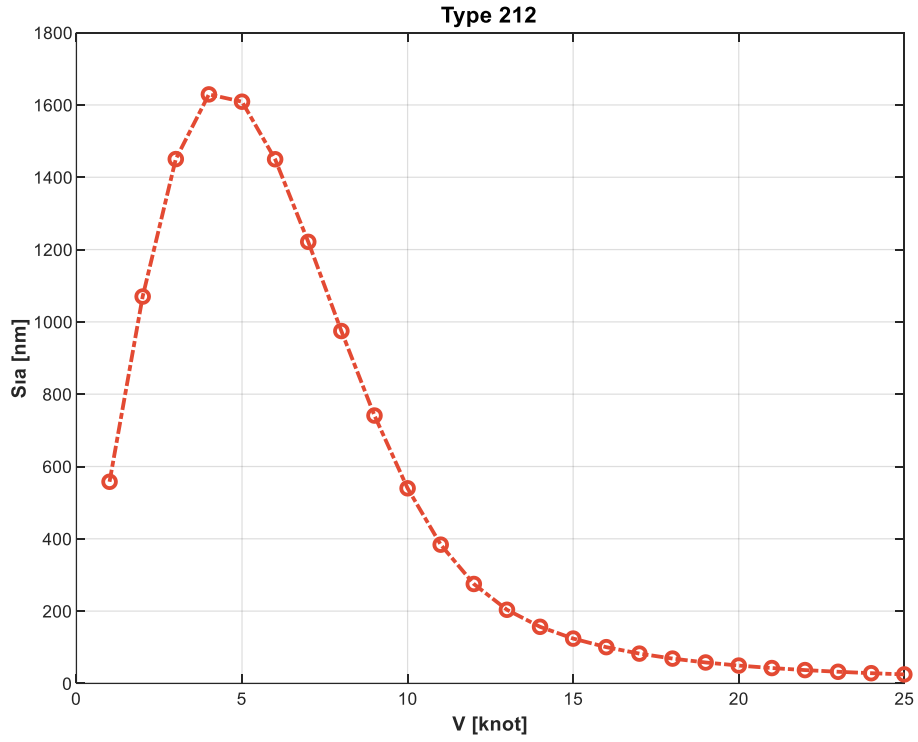
Şekil 3.16 : Type 212 denizaltısı deşarj süresi grafiği.



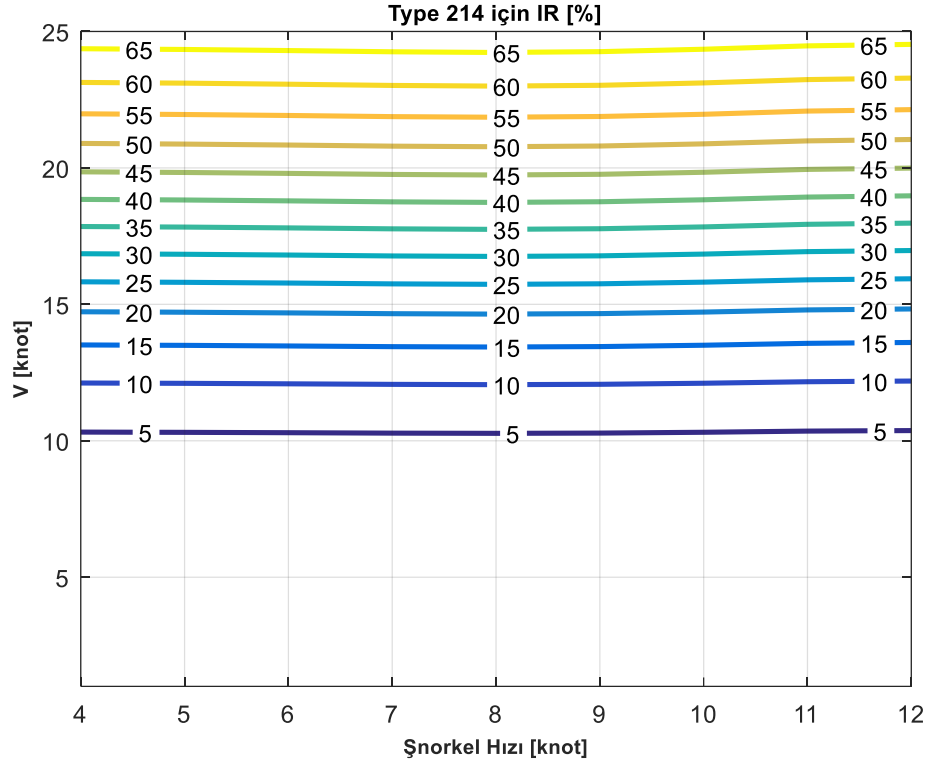
Şekil 3.17 : Type 214 denizaltısı sıa grafiği.



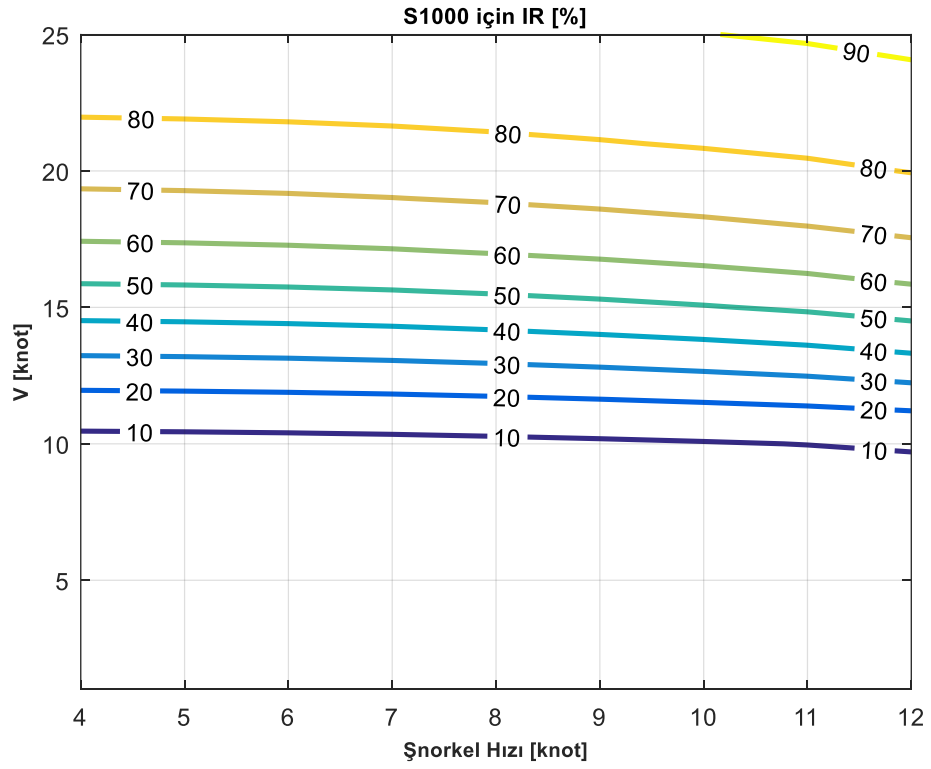
Şekil 3.18 : S1000 denizaltısı s1a grafiği.



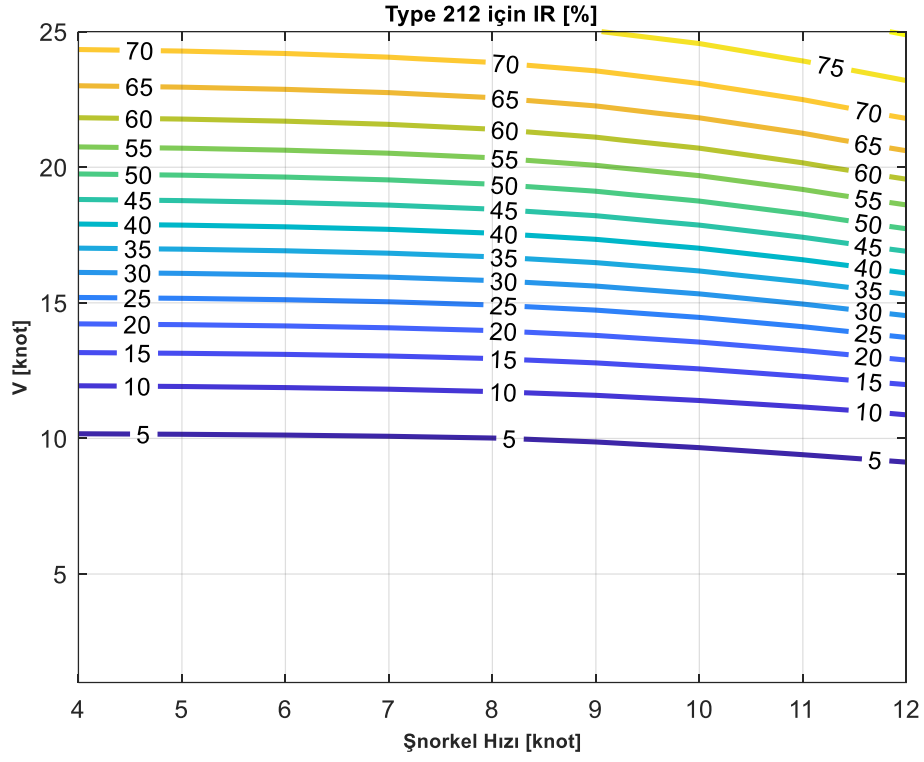
Şekil 3.19 : Type 212 denizaltısı s1a grafiği.



Şekil 3.20 : Type 214 denizaltısı görünmezlik oranı grafiği.



Şekil 3.21 : S1000 denizaltısı görünmezlik oranı grafiği.



Şekil 3.22 : Type 214 denizaltısı görünmezlik oranı grafiği.

4. SONUÇ

Bu tez çalışmasında denizaltılarda kullanılmakta olan yakıt pili esaslı havadan bağımsız sevk sistemleri incelenmiştir. Gerekli literatür taraması yapılarak tezde bahsedilen havadan bağımsız sevk sistemleri ve denizaltılar ile ilgili bilgiler bir araya getirilmiştir. Daha sonra yakıt pili kullanan denizaltılar için sadece batarya ile sevk ve batarya ve yakıt pili ile beraber sevk durumlarında maksimum sevk süresi ve sıa hesabı yapılmıştır. Bu hesaplara ek olarak denizaltı görünmezlik oranı hesabı yapılmıştır. Bu hesapların yapılabilmesi için gerekli bilgiler ulaşılan kaynaklardan direk olarak veya yeni yöntemler geliştirilerek elde edilmiştir. Hesaplara yakıt pillerinin değişik güç karşılama durumları için verimlerini veren bir denklem eklenmiştir. Problem çözümünde MATLAB'ın Optimizasyon modülündeki nonlinear programlama çözücüsü "fmincon"dan yararlanılmıştır. Problem çözümünde dikkat edilmesi gereken nokta denizaltının sınırlı yakıt pili kapasitesine sahip olmasıdır. Bu kapasite belli bir süratin üzerinde denizaltının sevk için tek başına yetersiz olacaktır. Bu yüzden optimizasyon problemi iki parçalı olmak üzere çözülmüştür. Tez kapsamında sunulan hesaplamalar sonucunda konvansiyonel sevk sistemi ile karşılaştırıldığında yakıt piline dayalı havadan bağımsız sevk sisteminin dalmış durumdaki seyir süresini arttırması, dalmış durumdaki sıayı arttırması ve denizaltının görünmezlik oranını düşürmesi bakımından avantajlı olduğu gösterilmiştir.



KAYNAKLAR

- [1] **Whitman, E. C.** (2019). Air-Independent Propulsion, AIP Technology Creates a New Undersea Threat, Undersea warfare magazine, Issue 13
- [2] **Polmar, N., Moore, K. J.** (2003). Cold War Submarines: The Design and Construction of U.S. and Soviet Submarines, 1945-2001. Dulles, United States.
- [3] **Lus, T.** (2001). Submarine Hydropropulsion Systems, Journal of Kones, Vol 8, No: 1-2
- [4] **Url-1** <https://www.naval-technology.com/projects/sodermanland-class-submarines/>, erişim tarihi 11.04.2019.
- [5] **Url-2** <https://www.naval-technology.com/projects/gotland/>, erişim tarihi 11.04.2019.
- [6] **Bitzinger, R., Vlavianos, H.** (2016). Emerging Critical Technologies and Security in the Asia-Pacific, Palgrave Macmillan, Singapore
- [7] **Url-3** <https://www.naval-technology.com/projects/ssoryuclasssubmarin/>, erişim tarihi 11.04.2019.
- [8] **Url-4** <http://maritimebulletin.net/2017/12/19/chinese-aip-submarines-not-the-best-choice/>, erişim tarihi 11.04.2019.
- [9] **Kerros, P., Inizan, C., Grousset, D.** (1992). MESMA AIP systems for submarines. DGA-DCN-INDRET, France
- [10] **Url-5** <http://www.navalanalyses.com/2016/03/photo-gallery-11-oceanos-submarine-of.html>, erişim tarihi 11.04.2019.
- [11] **Url-6** https://www.naval-technology.com/projects/type_212/, erişim tarihi 11.04.2019.
- [12] **Buckingham, J., Hodge, C., Hardy, T.** (2008). Submarine Power and Propulsion – Application of Technology to Deliver Customer Benefit, Bath, İngiltere.
- [13] **Gabler, U.** (2000). Submarine Design, Bernard & Graefe Verlag, Almanya
- [14] **Url-7** http://www.tognum.com/fileadmin/fm-dam/tognum/press/2011/MTU_Submarine_Charging_Unit_12V_4000.pdf, erişim tarihi 07.05.2019.
- [15] **McGuinness, M. & Benjamin, B.** (2003). Submarine Lead-Acid Battery Performance. Erişim tarihi 07.05.2019. <http://homepages.ecs.vuw.ac.nz/~markm/preprints/SubBatteriesReport.pdf>
- [16] **Wachtler, M. & Jörisen, L.** (2018). Energy Science and Technology III Lecture notes. ULM University.
- [17] **Url-8** <https://www.industry.siemens.com/verticals/global/en/marine/marine-ships/propulsion/Documents/sinavy-permasyn-en.pdf>, erişim tarihi 27.04.2019.
- [18] **Url-9** <https://www.electricaltechnology.org/2016/05/bl-dc-brushless-dc-motor-construction-working-principle.html>, erişim tarihi 27.04.2019.
- [19] **Christoph, M., Gil, A., Aguilera R., Shuang, L., Yu, X.** (2007). Stirling Engine. University of Gavle. Erişim tarihi 27.04.2019.

- <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.463.993&rep=rep1&type=pdf>
- [20] **Url-10** <https://mediaportal.saabgroup.com/#/items/28972>, erişim tarihi 27.04.2019.
- [21] **Url-11** <http://www.sms1835.no/arkiv/2012-08-29%20Sea%20Power%20Seminar%20Kockums.pdf>, erişim tarihi 27.04.2019.
- [22] **Url-12** <https://klswatch.wordpress.com/2011/06/22/second-dcnss-mesma%C2%AE-aip-ready-for-shipment-to-pakistan/>, erişim tarihi 27.04.2019.
- [23] **Mart, P.L. & Margeridis, J.** (1995). Fuel Cell Air Independent Propulsion of Submarines. DSTO-GD-0042. Article No 009-199. DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Avusturalya
- [24] **Gerboni, R., Pehnt, M., Viebahn, P., Lavagno, E.** (2008). Final report on technical data, costs and life cycle inventories of fuel cells. Project No. 502687. POLITO, IFEU, DLR
- [25] **Url-13** https://w3.siemens.co.uk/home/uk/en/Documents/Marcoms/pdf/SINAVY_PEM_Fuel_Cell_en.pdf. Erişim Tarihi 15.04.2019.
- [26] **Özkılınc, K.** (2017) U-214 Denizaltısına Seyir Üstünlüğü Sağlayan 2 Teknolojik Harika SINAVY Pem Fuel Cell ve SINAVY Permasyn.
- [27] **Goodenough, R. H., Greig, A.** (2008). Hybrid Nuclear/Fuel-Cell Submarine. Journal of Naval Engineering Volume 44 Book 3.
- [28] **Lakeman, J. B., Browning, D. J.** (2004). The Role of Fuel Cells in the Supply of Silent Power for Operations in Littoral Waters. TO AVT Symposium on "Novel Vehicle Concepts and Emerging Vehicle Technologies". İngiltere.
- [29] **Url-14** <https://fas.org/man/dod-101/sys/ship/eng/reactor.html> Erişim tarihi 15.04.2019.
- [30] **Özden, M. C.** (2010). Dizel Elektrik Denizaltıların Dizayn Açısından Karşılaştırmalı Analizi. (Bitirme tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul
- [31] **Url-15** <https://i.pinimgicom/originals/2e/90/53/2e9053c06e4e7d766a2b444a1129b963.jpg> Erişim tarihi 11.04.2019.
- [32] **Url-16** https://www.fincantieri.com/globalassets/common/sliders/images-common-caption-full-width-sliderblock/navi-militari/fincantieri_s1000_top.jpg Erişim tarihi 11.04.2019.
- [33] **Molland, A. F.** (2008). The Maritime Engineering Reference Book. Butterworth-Heinemann, Macaristan
- [33] **Stenard, J. K.** (1988). Comparative Naval Architecture Of Modern Foreign Submarines. (Master Tezi). Massachusetts Institute Of Technology, Cambridge, Massachusetts
- [34] **ITTC.** (2011). Resistance Test. Recommended Procedures and Guidelines 7.5-02-02-01
- [35] **Burcher, R., Rydill, Louis.** (1998). Concepts in Submarine Design. Cambridge University Press, Avustralya
- [36] **Di Felice, F., Felli, M., Liefvendahl, M., Svennberg U.** (2009). "Numerical and experimental analysis of the wake behavior of a generic submarine propeller". First International Symposium Marine Propulsors, Trondheim, Norveç
- [37] **Özden, M. C., Gürkan, A. Y., Özden, Y. A., Canyurt, T. G., Korkut, E.** (2014). Underwater Radiated Noise Prediction for a Submarine

Propeller in Different Flow Conditions. A. Yücel Odabaşı
Colloquium Series 1st International Meeting - Propeller Noise &
Vibration, İstanbul

[38] **Kormilitsin, Y. N., Khalizev, O. A.** (2001). Theory of Submarine Design.
Great Britain.

[39] **Thornton, G. B.** (1994). A Design Tool For The Evaluation Of Atmosphere
Independent Propulsion In Submarines. Massachusetts Institute Of
Technology





EKLER

EK A: Hesaplarda esas alınan denizaltılar

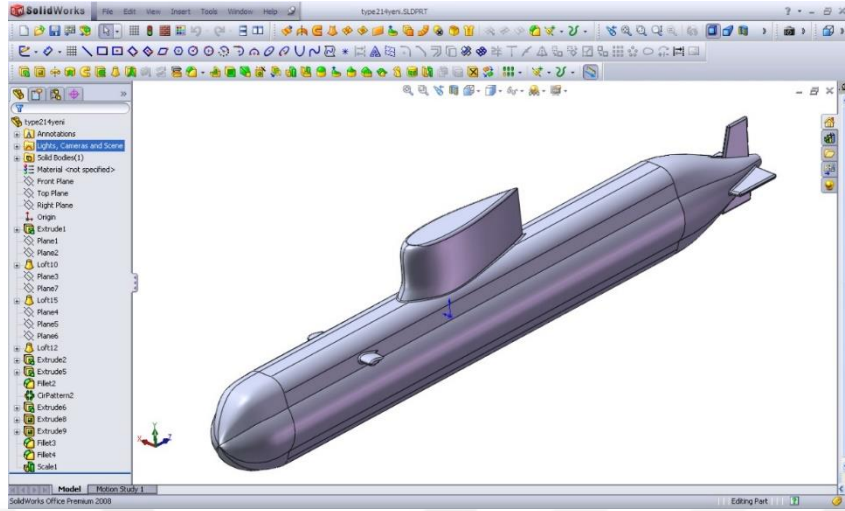
EK B: Type 214 denizaltısı hesapları için yazılmış MATLAB kodu

EK C: S1000 denizaltısı hesapları için yazılmış MATLAB kodu

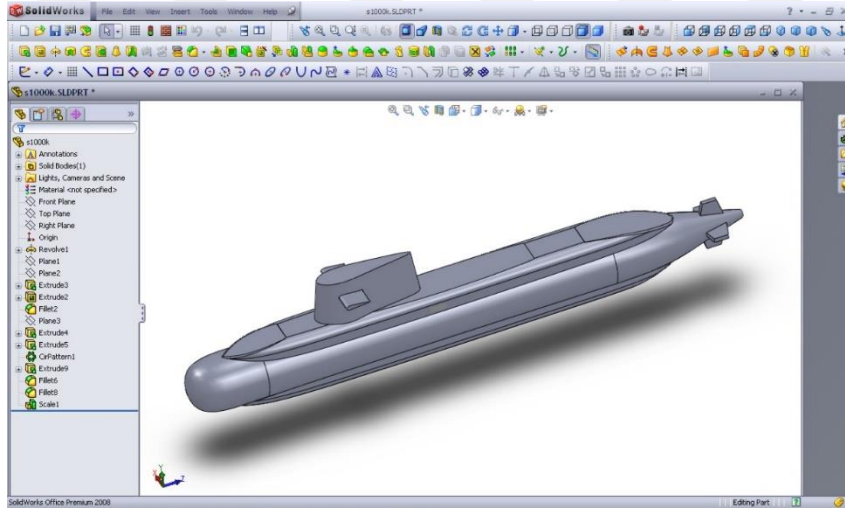
EK D: Type 212 denizaltısı hesapları için yazılmış MATLAB kodu



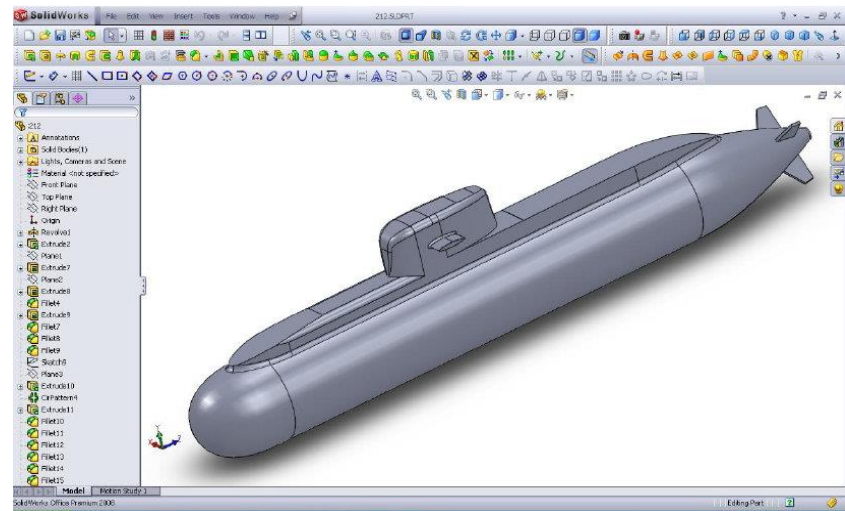
Ek A: Hesaplarda esas alınan denizaltılar



Ek A1 : Type 214 sınıfı denizaltı çizimi



Ek A2 : S1000 sınıfı denizaltı çizimi



Ek A3 : Type 212 sınıfı denizaltı çizimi

Ek B: Type 214 denizaltısı hesapları için yazılmış MATLAB kodu

```
%% 8 knot'a kadar
```

```
close all
```

```
clear
```

```
clc
```

```
load SHP.mat
```

```
SKW = SHP/1.3405;
```

```
Nc = 519.24;
```

```
DoD = 0.8;
```

```
Lh = 61;
```

```
x0 = [100; 1];
```

```
lb = [0; 0];
```

```
ub = [1000; 240];
```

```
COX = 0.4;
```

```
% COX = 0.511;
```

```
COX_crew = 40.4;
```

```
N_crew = 22;
```

```
Cu = 1.05;
```

```
Cs = 1.1;
```

```
M_LOX = 13.9/0.0015;
```

```
fun = @(x) -x(1);
```

```
for i = 1:8
```

```
    con{i} = @(x) nonlincon(x, DoD, Nc, M_LOX, COX, COX_crew, N_crew, Cu,  
    Cs, SKW(i), Lh);
```

```
end
```

```
options = optimoptions('fmincon', 'Display', 'notify-detailed',...
```

```
    'Algorithm', 'interior-point',...
```

Ek B (devam):

```
'MaxFunctionEvaluations', 150000,...
    'MaxIterations', 50000,...
    'FunctionTolerance', 1e-5,...
    'ConstraintTolerance', 1e-5);

for i = 1:8
    [x(i,:),fval(i,:),exitflag(i,:),output(i,:)] = ...
        fmincon(fun,x0,[],[],[],[],lb,ub,con{i},options);
end

% Kısıtlar

function [c, ceq] = nonlincon(x, DoD, Nc, M_LOX, COX, COX_crew, N_crew,
    Cu, Cs, SKW, Lh)
c = [];
ceq_1 = (DoD*23*(0.3030*(1-exp(-x(1)/26))+0.2597*(1-exp(-
x(1)/2.7))+0.2424*...
    (1-exp(-x(1)/0.41))+0.1948*(1-exp(-x(1)/0.05))))*Nc)/(SKW+Lh-x(2))-x(1);
ceq_2 = (M_LOX-(COX_crew*N_crew*Cu*Cs*x(1))/1000)/(x(2)*COX)*...
    ((-0.03334*(0.01295*x(2)^2+2.93*x(2)+37)+71.45)/70)-x(1);
ceq = [ceq_1; ceq_2];

%% 8 knot sonrası

close all
clear
clc

load SHP.mat
SKW = SHP/1.3405;

Nc = 519.24;
```

Ek B (devam):

```
DoD = 0.8;
Lh = 61;
x0 = [100; 1];
lb = [0; 0];
ub = [1000; 240];

COX = 0.4;
COX_crew = 40.4;
N_crew = 22;
Cu = 1.05;
Cs = 1.1;
M_LOX = 13.9/0.0015;

fun = @(x) -x(1);
for i = 9:25
    con{i} = @(x) nonlincon_upper(x, DoD, Nc, M_LOX, COX, COX_crew,
N_crew, Cu, Cs, SKW(i), Lh);
end
options = optimoptions('fmincon', 'Display', 'notify-detailed',...
    'Algorithm', 'interior-point',...
    'MaxFunctionEvaluations', 150000,...
    'MaxIterations', 50000,...
    'FunctionTolerance', 1e-5,...
    'ConstraintTolerance', 1e-5);

for i = 9:25
    [x(i,:),fval(i,:),exitflag(i,:),output(i,:)] = ...
        fmincon(fun,x0,[],[],[],[],lb,ub,con{i},options);
end

% Kısıtlar
```

Ek B (devam):

```
function [c, ceq] = nonlincon_upper(x, DoD, Nc, M_LOX, COX, COX_crew,
N_crew, Cu, Cs, SKW, Lh)
ceq = (DoD*23*(0.3030*(1-exp(-x(1)/26))+0.2597*(1-exp(-x(1)/2.7))+0.2424*...
(1-exp(-x(1)/0.41))+0.1948*(1-exp(-x(1)/0.05)))*Nc)/(SKW+Lh-x(2))-x(1);
c = -(M_LOX-(COX_crew*N_crew*Cu*Cs*x(1))/1000)/(x(2)*COX)*...
((-0.03334*(0.01295*x(2)^2+2.93*x(2)+37)+71.45)/70)+x(1);
```

```
% IR
```

```
close all
clear
clc

load SHP.mat;
load DoD_Eb.mat;
load Td.mat;
Lh = 61;
Lmax = 63.98;
D = 6.3;
WS = 1662.37;
Ch = [5.4417 5.6548 5.9288 6.3650 7.0644 8.3733 9.6573 10.5272 10.5938]';
Cw = Ch./(4*((Lmax/D)-1.3606)*((Lmax/D)^2));
Vs = (4:12)';
SHPW = 0.00872*(Vs.^3)*WS*10.7639.*Cw;
SHPS = SHPW+SHP(4:12);
Pdg = 6240;
Nbc = 0.75;
Tr = DoD_Eb./(Pdg-(SHPS/1.3405-Lh)*Nbc);

for i = 1:size(Td,1)
    for j = 1:size(Tr,1)
        IR(i,j) = 100*Tr(j)/(Tr(j)+Td(i));
```

Ek B (devam):

```
end
end

x = 4:12;
y = 1:25;
[X,Y] = meshgrid(x,y);
Z = IR;
fig_aux = figure(1);
[c, h] = contour(X,Y,Z,'ShowText','on');
h.LineWidth = 2;
h.LevelStep = 5;
grid on
xlabel('Şnorkel Hızı [knot'],'FontSize',8,'FontWeight','Bold')
ylabel('V [knot'],'FontSize',8,'FontWeight','Bold')
title('Type 214 için IR [%]','FontSize',9,'FontWeight','Bold')
print(fig_aux,'-dmeta','Type 214 (IR)')

%% Grafikler

close all
clear
clc

load('Td_bat.mat')
load('Td.mat')
load('SHP.mat')
SKW = SHP/1.3405;
v_knot = (1:25)';

fig_aux = figure(1);
plot(v_knot,x_bat,'-o','Color',(1/255)*[227 74 51],'MarkerSize',5,'LineWidth',1.5)
hold on
```

Ek B (devam):

```
plot(v_knot,Td,'-.*','Color',(1/255)*[4 90 141],'MarkerSize',5,'LineWidth',1.5)
grid on
set(gca,'FontSize', 7);
legend({'Sadece Batarya',' Batarya + AIP'},'Location','Northeast','FontSize',7.5)
xlabel('V [knot]','FontSize',8,'FontWeight','Bold')
ylabel('Deşarj Süresi [h]','FontSize',8,'FontWeight','Bold')
title('Type 214','FontSize',9,'FontWeight','Bold')
print(fig_aux,'-dmeta','Type 214 (Discharge)')

fig_aux = figure(2);
plot(v_knot,SKW,'-o','Color',(1/255)*[227 74 51],'MarkerSize',5,'LineWidth',1.5)
grid on
set(gca,'FontSize', 7);
xlabel('V [knot]','FontSize',8,'FontWeight','Bold')
ylabel('Şaft Gücü [kW]','FontSize',8,'FontWeight','Bold')
title('Type 214','FontSize',9,'FontWeight','Bold')
print(fig_aux,'-dmeta','Type 214 (SKW)')

fig_aux = figure(3);
plot(v_knot,v_knot.*Td,'-o','Color',(1/255)*[227 74
51],'MarkerSize',5,'LineWidth',1.5)
grid on
set(gca,'FontSize', 7);
xlabel('V [knot]','FontSize',8,'FontWeight','Bold')
ylabel('S1a [nm]','FontSize',8,'FontWeight','Bold')
title('Type 214','FontSize',9,'FontWeight','Bold')
print(fig_aux,'-dmeta','Type 214 (S1a)')
```

Ek C: S1000 denizaltısı hesapları için yazılmış MATLAB kodu

```
%% 8 knot'a kadar
```

```
close all
```

```
clear
```

```
clc
```

```
load SHP.mat
```

```
SKW = SHP/1.3405;
```

```
Nc = 265.80;
```

```
DoD = 0.8;
```

```
Lh = 39;
```

```
x0 = [100; 1];
```

```
lb = [0; 0];
```

```
ub = [1000; 240];
```

```
COX = 0.4;
```

```
COX_crew = 40.4;
```

```
N_crew = 22;
```

```
Cu = 1.05;
```

```
Cs = 1.1;
```

```
M_LOX = 16.1/0.0015;
```

```
fun = @(x) -x(1);
```

```
for i = 1:8
```

```
    con{i} = @(x) nonlincon(x, DoD, Nc, M_LOX, COX, COX_crew, N_crew, Cu,  
    Cs, SKW(i), Lh);
```

```
end
```

```
options = optimoptions('fmincon', 'Display', 'notify-detailed',...
```

```
    'Algorithm', 'interior-point',...
```

```
    'MaxFunctionEvaluations', 150000,...
```

Ek C (devam):

```
'MaxIterations', 50000,...
'FunctionTolerance', 1e-5,...
'ConstraintTolerance', 1e-5);

for i = 1:8
    [x(i,:),fval(i,:),exitflag(i,:),output(i,:)] = ...
        fmincon(fun,x0,[],[],[],[],lb,ub,con{i},options);
end

% Kısıtlar

function [c, ceq] = nonlincon(x, DoD, Nc, M_LOX, COX, COX_crew, N_crew,
    Cu, Cs, SKW, Lh)
c = [];
ceq_1 = (DoD*23*(0.3030*(1-exp(-x(1)/26))+0.2597*(1-exp(-
x(1)/2.7))+0.2424*...
    (1-exp(-x(1)/0.41))+0.1948*(1-exp(-x(1)/0.05))))*Nc)/(SKW+Lh-x(2))-x(1);
ceq_2 = (M_LOX-(COX_crew*N_crew*Cu*Cs*x(1))/1000)/(x(2)*COX)*...
    ((-0.03334*(0.01295*x(2)^2+2.93*x(2)+37)+71.45)/70)-x(1);
ceq = [ceq_1; ceq_2];

%% 8 knot sonrası

close all
clear
clc

load SHP.mat
SKW = SHP/1.3405;

Nc = 265.80;
DoD = 0.8;
```

Ek C (devam):

```
Lh = 39;
x0 = [100; 1];
lb = [0; 0];
ub = [1000; 240];

COX = 0.4;
COX_crew = 40.4;
N_crew = 22;
Cu = 1.05;
Cs = 1.1;
M_LOX = 13.9/0.0015;

fun = @(x) -x(1);
for i = 9:25
    con{i} = @(x) nonlincon_upper(x, DoD, Nc, M_LOX, COX, COX_crew,
N_crew, Cu, Cs, SKW(i), Lh);
end

options = optimoptions('fmincon', 'Display', 'notify-detailed',...
    'Algorithm', 'interior-point',...
    'MaxFunctionEvaluations', 150000,...
    'MaxIterations', 50000,...
    'FunctionTolerance', 1e-5,...
    'ConstraintTolerance', 1e-5);

for i = 9:25
    [x(i,:),fval(i,:),exitflag(i,:),output(i,:)] = ...
        fmincon(fun,x0,[],[],[],[],lb,ub,con{i},options);
end

% Kısıtlar
```

Ek C (devam):

```
function [c, ceq] = nonlincon_upper(x, DoD, Nc, M_LOX, COX, COX_crew,  
N_crew, Cu, Cs, SKW, Lh)  
ceq = (DoD*23*(0.3030*(1-exp(-x(1)/26))+0.2597*(1-exp(-x(1)/2.7))+0.2424*...  
    (1-exp(-x(1)/0.41))+0.1948*(1-exp(-x(1)/0.05)))*Nc)/(SKW+Lh-x(2))-x(1);  
c = -(M_LOX-(COX_crew*N_crew*Cu*Cs*x(1))/1000)/(x(2)*COX)*...  
    ((-0.03334*(0.01295*x(2)^2+2.93*x(2)+37)+71.45)/70)+x(1);  
  
% IR  
  
close all  
clear  
clc  
  
load SHP.mat;  
load DoD_Eb.mat;  
load Td.mat;  
Lh = 39;  
Lmax = 55;  
D = 5.5;  
WS = 914.46;  
Ch = [5.4417 5.6548 5.9288 6.3650 7.0644 8.3733 9.6573 10.5272 10.5938]';  
Cw = Ch./(4*((Lmax/D)-1.3606)*((Lmax/D)^2));  
Vs = (4:12)';  
SHPW = 0.00872*(Vs.^3)*WS*10.7639.*Cw;  
SHPS = SHPW+SHP(4:12);  
Pdg = 1300;  
Nbc = 0.75;  
Tr = DoD_Eb./(Pdg-(SHPS/1.3405-Lh)*Nbc);  
  
for i = 1:size(Td,1)  
    for j = 1:size(Tr,1)  
        IR(i,j) = 100*Tr(j)/(Tr(j)+Td(i));
```

Ek C (devam):

```
end
end

x = 4:12;
y = 1:25;
[X,Y] = meshgrid(x,y);
Z = IR;
fig_aux = figure(1);
[c, h] = contour(X,Y,Z,'ShowText','on');
h.LineWidth = 2;
h.LevelStep = 10;
grid on
xlabel('Şnorkel Hızı [knot'],'FontSize',8,'FontWeight','Bold')
ylabel('V [knot'],'FontSize',8,'FontWeight','Bold')
title('S1000 için IR [%]','FontSize',9,'FontWeight','Bold')
print(fig_aux,'-dmeta','S1000 (IR)')

% Grafikler

close all
clear
clc

load('Td_bat.mat')
load('Td.mat')
load('SHP.mat')
SKW = SHP/1.3405;
v_knot = (1:25)';

fig_aux = figure(1);
plot(v_knot,x_bat,'-.o','Color',(1/255)*[227 74 51],'MarkerSize',5,'LineWidth',1.5)
hold on
```

Ek C (devam):

```
plot(v_knot,Td,'-.*','Color',(1/255)*[4 90 141],'MarkerSize',5,'LineWidth',1.5)
grid on
set(gca,'FontSize', 7);
legend({'Sadece Batarya ',' Batarya + AIP'},'Location','Northeast','FontSize',7.5)
xlabel('V [knot]','FontSize',8,'FontWeight','Bold')
ylabel('Deşarj Süresi [h]','FontSize',8,'FontWeight','Bold')
title('S1000','FontSize',9,'FontWeight','Bold')
print(fig_aux,'-dmeta','S1000 (Discharge)')

fig_aux = figure(2);
plot(v_knot,SKW,'-o','Color',(1/255)*[227 74 51],'MarkerSize',5,'LineWidth',1.5)
grid on
set(gca,'FontSize', 7);
xlabel('V [knot]','FontSize',8,'FontWeight','Bold')
ylabel('Şaft Gücü [kW]','FontSize',8,'FontWeight','Bold')
title('S1000','FontSize',9,'FontWeight','Bold')
print(fig_aux,'-dmeta','S1000 (SKW)')

fig_aux = figure(3);
plot(v_knot,v_knot.*Td,'-o','Color',(1/255)*[227 74
51],'MarkerSize',5,'LineWidth',1.5)
grid on
set(gca,'FontSize', 7);
xlabel('V [knot]','FontSize',8,'FontWeight','Bold')
ylabel('S1a [nm]','FontSize',8,'FontWeight','Bold')
title('S1000','FontSize',9,'FontWeight','Bold')
print(fig_aux,'-dmeta','S1000 (S1a)')
```

Ek D: Type 212 denizaltısı hesapları için yazılmış MATLAB kodu

```
close all
clear
clc

Lmax = 54.6;
D = 7.0;
Am = 38.5;
Venv = 2056.0;
WS = 1263.0;
Sapp = 73.73;
Ssail = 68.8;
Tsea = 15;
etaH = 1.43;
Nc = 443.0;
Lh = 58;
Pdg = 3120;
Ca = 0.0004;
Cds = 0.009;
Cda = 0.006;
eta0 = 0.65;
etaR = 1.02;
kn2ms = 0.5144;
m2tof2 = 10.7639104;

Cp = (Venv/(Lmax*Am));
eta = etaH*eta0*etaR;
v = ((((((0.659*(10^-3))*(Tsea-1))-0.05076)*(Tsea-1))+1.7688)*10^-6);

V = (1:25).';
Re = (Lmax*V*kn2ms)/v ;
Cf = ((0.075)./((log10(Re))-2).^2 ) ;
Cr = Cf*((1.5*(D/Lmax)^1.5)+(7*(D/Lmax)^3)+(0.002*(Cp-0.6))) ;
EHP =
(0.00872.*(V.^3).*(WS*(m2tof2).*(Ca+Cf+Cr)+(Ssail*(m2tof2)*Cds)+(Sapp*(m
2tof2)*Cda))) ;
SHP = EHP/eta;

save('SHP.mat', 'SHP')

close all
clear
clc

load SHP.mat
SKW = SHP/1.3405;

Nc = 443;
```

Ek D (devam):

```
DoD = 0.8;  
Lh = 58;  
x0 = [100; 1];  
lb = [0; 0];  
ub = [1000; 300];
```

```
COX = 0.4;  
% COX = 0.511;  
COX_crew = 40.4;  
N_crew = 27;  
Cu = 1.05;  
Cs = 1.1;  
M_LOX = 16.8/0.0015;
```

```
fun = @(x) -x(1);  
for i = 1:9  
    con{i} = @(x) nonlincon(x, DoD, Nc, M_LOX, COX, COX_crew, N_crew, Cu,  
Cs, SKW(i), Lh);  
end  
options = optimoptions('fmincon', 'Display', 'notify-detailed',...  
    'Algorithm', 'interior-point',...  
    'MaxFunctionEvaluations', 150000,...  
    'MaxIterations', 50000,...  
    'FunctionTolerance', 1e-5,...  
    'ConstraintTolerance', 1e-5);
```

```
for i = 1:9  
    [x(i,:),fval(i,:),exitflag(i,:),output(i,:)] = ...  
        fmincon(fun,x0,[],[],[],[],lb,ub,con{i},options);  
end
```

```
save('Solution_1.mat', 'x');
```

```
close all  
clear  
clc
```

```
load SHP.mat  
SKW = SHP/1.3405;
```

```
Nc = 443;  
DoD = 0.8;  
Lh = 58;  
x0 = [100; 1];  
lb = [0; 0];  
ub = [1000; 300];
```

```
COX = 0.4;
```

Ek D (devam):

```
COX_crew = 40.4;
N_crew = 27;
Cu = 1.05;
Cs = 1.1;
M_LOX = 16.8/0.0015;

fun = @(x) -x(1);
for i = 10:25
    con{i} = @(x) nonlincon_upper(x, DoD, Nc, M_LOX, COX, COX_crew,
    N_crew, Cu, Cs, SKW(i), Lh);
end
options = optimoptions('fmincon', 'Display', 'notify-detailed',...
    'Algorithm', 'interior-point',...
    'MaxFunctionEvaluations', 150000,...
    'MaxIterations', 50000,...
    'FunctionTolerance', 1e-5,...
    'ConstraintTolerance', 1e-5);

for i = 10:25
    [x(i,:), fval(i,:), exitflag(i,:), output(i,:)] = ...
        fmincon(fun, x0, [], [], [], [], lb, ub, con{i}, options);
end

save('Solution_2.mat', 'x');

function [c, ceq] = nonlincon_upper(x, DoD, Nc, M_LOX, COX, COX_crew,
N_crew, Cu, Cs, SKW, Lh)
% c = [];
% ceq_1 = (DoD*23*(0.3030*(1-exp(-x(1)/26))+0.2597*(1-exp(-
x(1)/2.7))+0.2424*...
% (1-exp(-x(1)/0.41))+0.1948*(1-exp(-x(1)/0.05))) * Nc)/(SKW+Lh-x(2))-
x(1);
% ceq_2 = (M_LOX-(COX_crew*N_crew*C_u*Cs*x(1))/1000)/(x(2)*COX)-x(1);
% ceq = [ceq_1; ceq_2];
ceq = (DoD*23*(0.3030*(1-exp(-x(1)/26))+0.2597*(1-exp(-x(1)/2.7))+0.2424*...
(1-exp(-x(1)/0.41))+0.1948*(1-exp(-x(1)/0.05))) * Nc)/(SKW+Lh-x(2))-x(1);
c = -(M_LOX-(COX_crew*N_crew*C_u*Cs*x(1))/1000)/(x(2)*COX)*...
((-0.03334*(0.01295*x(2)^2+2.93*x(2)+37)+71.45)/70)+x(1);
% Efficiency
% ((-0.03334*(0.01295*x(2)^2+2.93*x(2)+37)+71.45)/70)

function [c, ceq] = nonlincon(x, DoD, Nc, M_LOX, COX, COX_crew, N_crew,
Cu, Cs, SKW, Lh)
c = [];
ceq_1 = (DoD*23*(0.3030*(1-exp(-x(1)/26))+0.2597*(1-exp(-
x(1)/2.7))+0.2424*...
(1-exp(-x(1)/0.41))+0.1948*(1-exp(-x(1)/0.05))) * Nc)/(SKW+Lh-x(2))-x(1);
ceq_2 = (M_LOX-(COX_crew*N_crew*C_u*Cs*x(1))/1000)/(x(2)*COX)*...
```

Ek D (devam):

```
((-0.03334*(0.01295*x(2)^2+2.93*x(2)+37)+71.45)/70)-x(1);
ceq = [ceq_1; ceq_2];
% ceq = (DoD*23*(0.3030*(1-exp(-x(1)/26))+0.2597*(1-exp(-
x(1)/2.7))+0.2424*...
% (1-exp(-x(1)/0.41))+0.1948*(1-exp(-x(1)/0.05)))*Nc)/(SKW+Lh-x(2))-
x(1);
% c = -(M_LOX-(COX_crew*N_crew*Cu*Cs*x(1))/1000)/(x(2)*COX)+x(1);
% Efficiency
% ((-0.03334*(0.01295*x(2)^2+2.93*x(2)+37)+71.45)/70)
% ((-0.03334*(0.0032*x(2)^2+1.4652*x(2)+37)+71.45)/70)

close all
clear
clc

load SHP.mat;
load DoD_Eb.mat;
load Td.mat;
Lh = 58;
Lmax = 54.6;
D = 7.0;
WS = 1263.0;
Ch = [5.4417 5.6548 5.9288 6.3650 7.0644 8.3733 9.6573 10.5272 10.5938]';
Cw = Ch./(4*((Lmax/D)-1.3606)*((Lmax/D)^2));
Vs = (4:12)';
SHPW = 0.00872*(Vs.^3)*WS*10.7639.*Cw;
SHPS = SHPW+SHP(4:12);
Pdg = 3120;
Nbc = 0.75;
Tr = DoD_Eb./(Pdg-(SHPS/1.3405-Lh)*Nbc);

for i = 1:size(Td,1)
    for j = 1:size(Tr,1)
        IR(i,j) = 100*Tr(j)/(Tr(j)+Td(i));
    end
end

x = 4:12;
y = 1:25;
[X,Y] = meshgrid(x,y);
Z = IR;
fig_aux = figure(1);
[c, h] = contour(X,Y,Z,'ShowText','on');
h.LineWidth = 2;
h.LevelStep = 5;
grid on
xlabel('$norkel Hızı [knot]','FontSize',8,'FontWeight','Bold')
ylabel('V [knot]','FontSize',8,'FontWeight','Bold')
```

Ek D (devam):

```
title('Type 212 için IR [%]','FontSize',9,'FontWeight','Bold')
print(fig_aux,'-dmeta','Type 212 (IR)')

close all
clear
clc

load('Td_bat.mat')
load('Td.mat')
load('SHP.mat')
SKW = SHP/1.3405;
v_knot = (1:25);

fig_aux = figure(1);
plot(v_knot,x_bat,'-.o','Color',(1/255)*[227 74 51],'MarkerSize',5,'LineWidth',1.5)
hold on
plot(v_knot,Td,'-.*','Color',(1/255)*[4 90 141],'MarkerSize',5,'LineWidth',1.5)
grid on
set(gca,'FontSize', 7);
legend({'Sadece Batarya','Batarya + AIP'},'Location','Northeast','FontSize',7.5)
xlabel('V [knot]','FontSize',8,'FontWeight','Bold')
ylabel('Deşarj Süresi [h]','FontSize',8,'FontWeight','Bold')
title('Type 212','FontSize',9,'FontWeight','Bold')
print(fig_aux,'-dmeta','Type 212 (Discharge)')

fig_aux = figure(2);
plot(v_knot,SKW,'-.o','Color',(1/255)*[227 74 51],'MarkerSize',5,'LineWidth',1.5)
grid on
set(gca,'FontSize', 7);
xlabel('V [knot]','FontSize',8,'FontWeight','Bold')
ylabel('Şaft Gücü [kW]','FontSize',8,'FontWeight','Bold')
title('Type 212','FontSize',9,'FontWeight','Bold')
print(fig_aux,'-dmeta','Type 212 (SKW)')

fig_aux = figure(3);
plot(v_knot,v_knot.*Td,'-.o','Color',(1/255)*[227 74
51],'MarkerSize',5,'LineWidth',1.5)
grid on
set(gca,'FontSize', 7);
xlabel('V [knot]','FontSize',8,'FontWeight','Bold')
ylabel('S1a [nm]','FontSize',8,'FontWeight','Bold')
title('Type 212','FontSize',9,'FontWeight','Bold')
print(fig_aux,'-dmeta','Type 212 (S1a)')
```



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Dilşad Karataş
Doğum Tarihi ve Yeri : 15.08.1992 Kırıkkale
E-posta : dilsadkaratas01@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

Yüksek lisans : İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi ve Deniz
Teknolojisi Mühendisliği
Lisans : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi ve Deniz
Teknolojisi Mühendisliği
Lise : 2010, Pertevniyal Anadolu Lisesi

MESLEKİ DENEYİM

20.06.2016 – 26.02.2019: Onuk-BG Endüstriyel Mühendislik Sanayi ve Ticaret
A.Ş.
- Üretim Mühendisi
- Dizayn Mühendisi
01.07.2015 – 17.06.2016: DATUM (Denizaltı Teknolojileri ve Uygulamalı
Mühendislik)
- Dizayn Mühendisi