T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

YAKIT PİLLERİNİN DENİZALTI UYGULAMALARI

Zekariye ALAGÖZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ ANA BİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Ali ATA

GEBZE
2009

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI **:** Yakıt Pillerinin Denizaltı Uygulaması

YAZAR ADI **:** Zekariye ALAGÖZ

Bu çalışmada Fuel Cell'in Denizaltı uygulamaları incelenmiştir.

Bölüm 2'de Hidrojen enerji sistemi anlatılmış olup bu bağlamda Hidrojen elementinin özellikleri, elde edilişi, dağıtımı, depolanması ve ülkelerin gelecekteki Hidrojen enerji sistemleri hakkındaki programları incelenmiştir.

Bölüm 3'te Fuel Cell'ler konusu incelenmiştir. Fuel Cell'lerin tarihi gelişimi, fiziksel ve kimyasal yapıları, bileşenleri, çalışma prensipleri ve farklı tipleri anlatılmış, birbirleriyle mukayesesi yapılmıştır.

Bölüm 4'de Denizaltılar hakkında bilgi verilmiştir. Bu bölümde Denizaltıların tarihi incelenmiş olup ilk Denizaltılar hakkında kısaca bilgiler verilmiştir. Ayrıca Denizaltının dalma ve çıkma, tahrik sistemleri, sensörleri ve silahları hakkında da bilgi verilmiştir.

Bölüm 5'de Denizaltıların tahrik sistemleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Denizaltılarda kullanılan değişik tahrik sistemleri, çalışma prensipleri, birbirleriyle mukayesesi yapılmıştır. Fuel Cell kullanılarak yapılan Havadan Bağımsız Tahrik sisteminin Denizaltılarda uygulanması çalışmaları incelenmiş ve bunların Dünyadaki uygulamaları anlatılmıştır.

Bölüm 6'da ise yapılan çalışmanın sonucu özetlenmiş ve bu çalışmanın ülkemizdeki Denizaltılarımıza uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Denizaltı, Yakıt Pili, AIP, Hidrojen

SUMMARY

THESIS TITLE **:** Yakıt Pillerinin Denizaltı Uygulaması

AUTHOR NAME **:** Zekariye ALAGÖZ

In this study, "The Submarine Applications of Fuel Cells" have been investigated

In Chapter 2, Hydrogen energy system has been explained and, along with this explanation, the properties, derivation, dissemination and storage issues of the hydrogen element has been mentioned. Also, the future plans of various countries' about Hydrogen Energy systems have been investigated.

Chapter 3 investigates Fuel Cells. The historical development of Fuel Cells, their physical and chemical structures, components, operating principles have been mentioned and different types of fuel cells have been compared.

Chapter 4 mainly discusses Submarines. In this chapter the history of submarines has been mentioned and information about the first submarines has been supplied. Also, information about diving – surfacing, propulsion, sensor and weapon systems of submarines has been provided in this chapter.

Chapter 5 makes a through analysis of propulsion systems of submarines. Different propulsion systems used onboard submarines and their operating principles have been explained and comparison of different types has been performed. Also, studies about the application of "Air İndependent Propulsion Systems with Fuel Cells" for submarines have been examined and their applications worldwide have been discussed.

Chapter 6 summarizes the study and shows the applicability of this study to the submarines of our Navy.

Keywords: Submarine, Fuelcell, AIP, Hydrogen

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca beni yönlendirmede yardımcı olan ve katkılarını esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Ali ATA'ya, tez komitemde bulunmayı kabul eden değerli hocalarım Prof. Dr. Selim SİVRİOĞLU ve Yrd. Doç. Dr. Ercan ERTÜRK'e, ayrıca bu tezi hazırlama aşamasında yardımlarından dolayı bütün arkadaşlarıma son olarak ise desteğinden ve sabrından dolayı sevgili eşim Esra ALAGÖZ'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET iv
SUMMARY v
TEŞEKKÜR vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ x
ŞEKİLLER DİZİNİ xi
TABLOLAR DİZİNİ xiii
RESİMLER DİZİNİ xiv
1 GİRİŞ 1
2 HİDROJEN ENERJİ SİSTEMİ 2
2.1 Hidrojen 3
2.2 Hidrojen Elde Edilmesi 4
2.2.1 Fosil Yakıtlardan Hidrojen Elde Edilmesi 5
2.2.2 Sudan Hidrojen Elde Edilmesi 7
2.3 Hidrojen Dağıtımı ve Depolanması 9
2.4. Hidrojen Enerji Sistemi Programları 11
3 YAKIT PİLLERİ 13
3.1 Yakıt Pillerinin Tarihsel Gelişimi 13
3.2 Yakıt Pilleri 15
3.3 Kullandıkları Elektrota Göre Yakıt Pilleri 16
3.3.1 Alkali Yakıt Pili (AFC) 17
3.3.2 Polimer Elektrolit Membran Yakıt Pili(PEMFC) 17
3.3.3 Fosforik Asit Yakıt Pili(PAFC) 17
3.3.4 Erimiş Karbonat Yakıt Pili(MCFC) 18
3.3.4 Katı Oksit Yakıt Pili(SOFC) 19
4 DENİZALTILAR HAKKINDA 24
4.1 Denizaltı Tarihi ve İlk Denizaltılar 24
4.2 Denizaltı Nasıl Dalar ve Çıkar 26
4.2.1 Statik Dalış 27
4.2.2 Dinamik Dalış 28
4.2.3 İtici Güç 28
4.3 Denizaltı Harekâtı ve Denizaltı Tespiti 32

4.4 Denizaltı Nasıl Bilgi Toplar 35
4.4.1 Denizaltı Aktif Alıcıları 35
4.4.2 Denizaltı Pasif Alıcıları 36
4.5 Denizaltı Silahları 37
4.5.1 Torpidolar 37
4.5.2 Füzeler 38
4.5.3 Mayınlar 40
4.6 Denizaltılarımız 41
5 DENİZALTI TAHRİK SİSTEMLERİ 42
5.1 Nükleer Denizaltılarda Tahrik Sistemleri 42
5.2 Konvansiyonel Denizaltılarda Tahrik Sistemleri 47
5.2.1 Dizel-Elektrik Tahrik Sistemli Denizaltılar 47
5.2.2 Hibrit Tahrik Sistemli Denizaltılar(Dizel-Elektrik+AİP) 48
5.2.2.1 Walter Türbini 50
5.2.2.2 Kapalı Çevrim Dizel Motorlu AİP 53
5.2.2.3 Stirling Motorlu AİP 56
5.2.2.4 Mesma Sistemli AİP(Steam-Rankine Cycle) 59
5.2.2.5 Fuel Cell'li AİP 61
5.2.2.5.1 Genel Bakış 61
5.2.2.5.2 Fuel Cell'li AİP'in Tarihi Gelişimi 63
5.2.2.5.3 Fuel Cell Çeşitlerinin Uygunluğu 64
5.2.2.5.3.1 Yüksek Sıcaklık Fuel Cell 65
5.2.2.5.3.2 Düşük Sıcaklık Fuel Cell 66
5.2.2.5.3.3 Siemens PEM Fuel Cell 68
5.2.2.5.4 Fuel Cell'li AİP Sistemi 73
5.2.2.5.4.1 Uygulanış Biçimleri 74
5.2.2.5.4.1.1 Yeni Denizaltıya Uygulanışı 77
5.2.2.5.4.1.2 Mevcut Denizaltıya Uygulanışı 78
5.2.2.5.4.2 Verimlilik ve İmza 79
5.2.2.5.4.3 Performans ve Güvenirlik 82
5.2.2.5.4.4 Güvenlik ve Sistem Uyumu 84
5.2.2.5.4.5 Reaktant Depolama ve İşleme 85
5.2.2.5.5 Fuel Cell AİP'li Denizaltıların Ülkelerdeki Durumu 90
5.2.2.6 Havadan Bağımsız Tahrik Sistemlerin Avantajları 91

5.2.3 Diğer Teknolojiler 92
6 SONUÇ VE ÖNERİLER 94
KAYNAKLAR 97
ÖZGEÇMİŞ 98
KULLANILAN BİRİMLER 99

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

H	: Hidrojen
O	: Oksijen
LOX	: Sıvı Oksijen
Pt	: Platin
Y	: Yitrium
Pt	: Zirkonyum
Pt	: Platin
$NaBO_2$	:Sodyum Borat
$NaBH_4$	:Sodyum Borhidrit
Li	: Lityum
Na	: Sodyum
K	: Potasyum
H_2O	: Su
CH_4	: Metan
CO	: Karbonmonoksit
OH	: Hidroksit
aq	: Sulu Çözelti, Eriyik
g	: Gaz
Yd	: Yard
ESM	: Elektromanyetik dalga tespit anteni
ASW	: Denizaltı Savunma Harbi(DSH)
KDD	: Kapalı Devre Dizel
AİP	: Havadan Bağımsız Tahrik Sistemi(HBT)
PEFC	: Polimer Elektrolitik Zar Yakıt Pili
AFC	: Alkali Yakıt Pili
PAFC	: Fosforik Asit Yakıt Pili
MCFC	: Erimiş Karbonat Yakıt Pili
SOFC	: Katı Oksit Yakıt Pili

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL	SAYFA
2. 1 Hidrojen Enerji Sistemi	3
2. 2 Doğalgazlardan Buharlaştırma ile H_2 Eldesi	5
2. 3 Kısmi Oksijenleme	6
2. 4 Kömür Gazlaştırılması	7
3. 1 Alkali Yakıt Pili	17
3. 2 Polimer Elektrolitik Zar ve Fosforik Asit Yakıt Pili	18
3. 3 Erimiş Karbonat Asit Yakıt Pili	19
3. 4 Katı Oksit Yakıt Pili	20
3. 5 Yakıt Pilleri Polarizasyon Eğrileri	21
3. 6 Yakıt Pilleri Çalışma Prensipleri	22
3. 7 Yakıt Pillerinin Verimliliği	23
3. 8 Yakıt Pillerinin ile Diğer Enerji Kaynaklarının Atık gaz Karşılaştırması	23
4. 1 Sarnıçlar Vasıtasıyla Denizaltının Batırılması ve Yüzeye Çıkartılması	27
4. 2 Dümenler Vasıtasıyla Denizaltının Batırılıması	28
4. 3 Denizaltı Sonarının Dip Tarama Yapması	32
4. 4 Sonarın Hedefi Tespit Etmesi	33
4. 5 Denizaltının Decoyları Kullanması	35
4. 6 Çeşitli Torpidolar	38
4. 7 Torpidonun Hedefini Tespit Etmesi	39
5. 1 Nükleer Tahrik Sistemi	46
5. 2 Klasik Denizaltıya Yerleştirilen AIP Sistemi	48
5. 3 AIP Uygulanmış Denizaltı ve Klasik Denizaltı Boy Farkı	48
5. 4 Walter Türbini Genel Çalışma Akışı Şeması	51
5. 5 KDD Genel Çalışma Akışı Şeması	55
5. 6 MESMA Çalışma Akışı şeması	60
5. 7 Fuel Cell ve Çevre Birimleri	62
5. 8 Fuel Cell Sisteminin Denizaltıya Yerleşimi	62
5. 9 BZM 34'ün Dinamik ve Aşırı Yüklenme Davranışı	69
5. 10 U-212(Sol) ve U-209/214(Sağ)'lerin Fuel Cell Blok Diyagramı	70
5. 11 Siemens PEM Fuel Celle'lerin Tasarım Özellikleri	71
5. 12 Denizaltı'ya kurulan Fuel Cell ve bileşimleri	75
5. 13 Fuel Cell'lerin Denizaltılara Uygulanma Biçimleri	76

5. 14 Fuel Cell'li Bölümün Denizaltı Pozisyonu 77
5. 15 Fuel Cell'li Ek Bölümün ve H2 Tüplerinin Yerleştirilmesi 78
5. 16 Tip 209'a Yerleştirilmek İçin Hazırlanan Ek Bölüm 79
5. 17 Fuel Cell Veriminin Sankey Diyagramı ile Gösterimi 80
5. 18 U-212 Fuel Cell Sistemi Voltaj Düşümü 82
5. 19 Dipte Seyir Mesafesi karşılaştırması 83
5. 20 FC bölümünün Type 209'lara montesi 96

TABLOLAR DİZİNİ

TABLO	SAYFA
2. 1 Hidrojen özellikleri	3
2. 2 Hidrojen Depolama Şekli ve Yoğunluğu	10
2. 3 Hidrojen Depolama Araçları, Kapasite ve Yoğunluğu	11
3. 1 Yakıt pilleri genel özellikleri	20
3. 2 Yakıt pilleri Kimyasal Tepkimeleri	22
5. 1 34 ve BZM 120'nin Elektriksel Özelliklerinin Karşılaştırılması	68

RESİMLER DİZİNİ

RESİM	SAYFA
2. 1 Küçük Ölçekli Elektroliz Sistemi	8
5. 1 KDD Sisteminin Kullanıldığı Askeri Denizaltı U1 ve Kesiti	55
5. 2 V4-275 Motoru ve Gotland Sınıfı Denizaltıda AIP sisteminin konumu	58
5. 3 BZM 34 ve BZM 120 PEM Fuel Cell'leri	68
5. 4 LOX ve H_2 Doldurma İstasyonları	85
5. 5 U-212A'ya Yerleştirilmiş Sıvı Oksijen ve Hidrür Depo Silindirleri	90

1 GİRİŞ

Klasik Denizaltılar olarak bilinen konvansiyonel Denizaltılar dalma görevlerini icra edebilmek için bataryalarını şarj etme ihtiyacı duyarlar, bunu gerçekleştirebilmek için periyodik zamanlarda su üstüne çıkmak zorunda kalırlar. Bu süre zarfında Denizaltılar kolayca tespit edilip saldırıya uğrayabilirler. Nükleer Denizaltılar havadan bağımsız çalışabilmektedirler. Fakat Nükleer Denizaltılarında tanımlanabilen ses seviyeleri ve hassasiyeti artırılan Denizaltı savunma harp sistemlerinden dolayı sığ ya da kapalı denizlerde bazı zayıf yanları bulunmaktadır. Buna ilaveten Nükleer Denizaltının inşası ve bakımı oldukça pahalıdır. Sadece çok zengin ülkeler bu gemileri kullanabilmektedir. Bu gibi dezavantajlarından dolayı birçok ülke Konvansiyonel Denizaltılara yönelmişlerdir. Bu yönelme Konvansiyonel Denizaltıların Nükleer Denizaltılara göre dezavantajları üzerinde geniş kapsamlı araştırmalar ve neticesinde ise büyük gelişmelere sebep olmuştur. Özelliklede Nükleer Denizaltıların en büyük avantajı olan havadan bağımsız olarak su altında uzun süre kalabilme kabiliyetinin konvansiyonel Denizaltılara kazandırılma çalışmaları sonucunda Hibrit Tahrik sistem adı verilen Dizel-Elektrik tahrik sistemine ilave olarak ısı motoru ya da Fuel Cell gibi elektrokimyasal yollarla elektrik enerjisi üretebilen enerji kaynağı ilavesi ile Konvansiyonel Denizaltılara havadan bağımsız çalışabilme kabiliyeti kazandırılmıştır.

Havadan bağımsız sistem(AIP) ile Denizaltı sualtında iken elektrik üretebilir. Denizaltı dalmış durumda iken üretilen elektrik bataryaların şarj edilmesinde, tahrik siteminde ve diğer elektrikli cihazların elektrik ihtiyaçlarında kullanılırlar. Günümüz modern konvansiyonel Denizaltılarında AIP sistemler artık kaçınılmaz hale gelmiştir. AIP sistemler Denizaltıların havadan bağımsız çalışmalarını sağlayarak onlara haftalarca görevlerini yapma, uzun süreli dalma imkânı verir. Geliştirilen birçok AIP sistem arasında geleceği en parlak AIP Sistemi seçimi hakkında, tüm Dünyada sayısız çalışmalar yapılmış ve pek çok tartışma yürütülmüştür. Sonuç olarak, Fuel Cell sistemleri nükleer olmayan Denizaltılar için havadan bağımsız itici güce en ideal çözüm olarak kabul edilmektedir. Daha önce diğer AIP Sistemlerini dikkate alan ülkeler bile şu anda geleceği en parlak çözümde karar kıldılar. Fuel Cell'lerin düşük

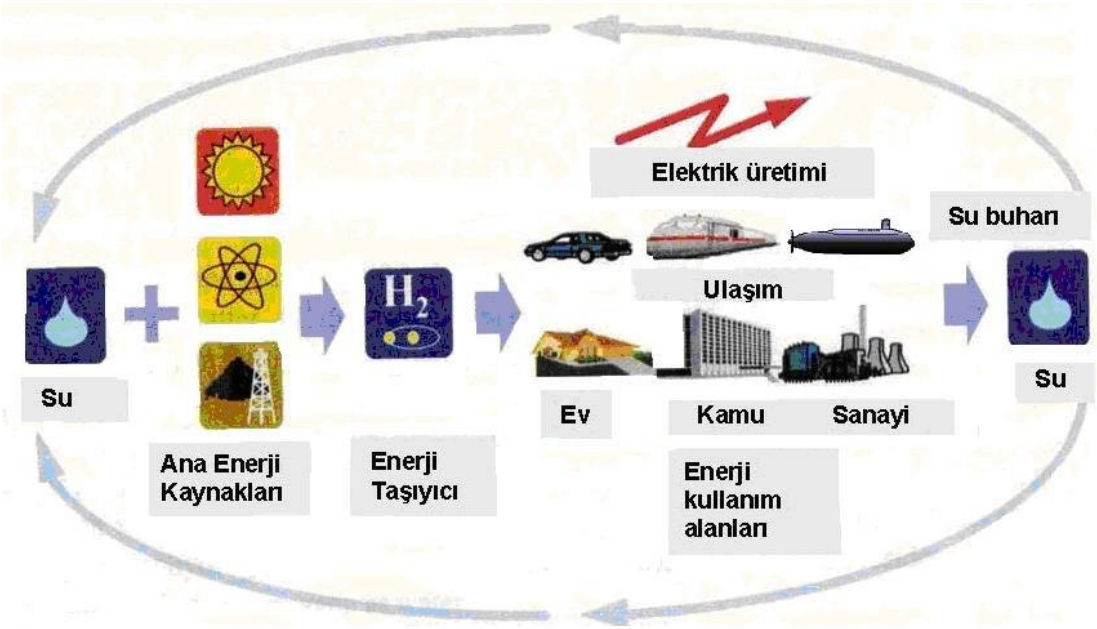
gürültü ve kızılötesi imza, etkili enerji çevrimi, yüksek verim, düşük bakım isterleri gibi avantajlarından dolayı Fuel Cell'li AIP sistemleri Dünya genelinde büyük ölçüde kabul görmüştür. Fuel Cell AIP tahrik sistemi klasik konvansiyonel Dizel-Elektrik tahrik sistemli Denizaltılara dalma pozisyonunda daha fazla kalabilme ve 5–6 knot hızda daha fazla hareket imkanı kazandırır. Fuel Cell'ler geleneksel ısı motorlarıyla mukayese edildiğinde gelecek vaat eden iyi teknik değerlerinin yanında çevre etkileri bakımından da kullanımı zaruri gibi görünmektedir. Fuel Cell'ler motor olmayıp enerji dönüştürücülerdir.

Bu yüzden ısı motorlarında olduğu gibi termodinamik kanunlar gereği verimi sınırlı değildir. Bu sistemler konvansiyonel Denizaltılara kolayca yerleştirilebilmektedir. Hem var olan Denizaltılara ek olarak eklenebilmekte hem de yeni Denizaltılara konulabilmektedirler. Bu Fuel Cell'li AIP sistemlerin tüm avantajlarına rağmen yine de daha fazla güç ve daha fazla sürede dalma gibi birçok yönden geliştirilme potansiyeli vardır.

2 HİDROJEN ENERJİ SİSTEMİ

Hidrojen enerji sistemi; Hidrojen gazının Fuel Cell'ler yardımıyla kimyasal tepkimeye sokularak elektrik enerjisi üretilen sistemlerdir. Fuel Cell ise temiz, çevreye zarar vermeyen ve yüksek verime sahip enerji dönüşümleridir. Bu sistemde bir buhar kazanı ya da türbin kullanılmadan sadece kimyasal tepkime ile elektrik enerjisi üretilir. Hidrojen ve Oksijen arasındaki elektrokimyasal tepkime ile elde edilen ve verimliliği %90'lara kadar ulaşabilirler. Bu sistemde atık olarak su elde edilmesi temiz enerji olarak adlandırılmasını sağlamaktadır.

Hidrojen enerji sisteminin ana konularını Hidrojen, üretimi, dağıtımı, depolanması ve elektrokimyasal enerji dönüştürücü olan Fuel Cell'ler oluşturmaktadır. Bu bölümde Hidrojen, üretimi, dağıtımı ve depolanmasını ele alınacaktır.



Şekil 2. 1 Hidrojen Enerji Sistemi

2.1 Hidrojen

Doğada Hidrojenin 3 izotopu vardır. Bunlar: protium, dueterium and tritium dur. Bilinen standart Hidrojen atomu (protium) en basit element olarak bilinir ve bir proton ve elektrondan oluşur. Hidrojen molekülü (H_2) iki ayrı şekilde bulunur ortho- ve para- Hidrojen. Her iki şekilde aynı kimyasal özelliklere sahiptir. Oda sıcaklığında bulunan Hidrojenin %75'i ortho- ve %25'i para-Hidrojendir. Para Hidrojen düşük sıcaklıklarda durağan bir yapıya sahiptir ve sıcaklık düştükçe yoğunluğu artar, sıvı Hidrojenin neredeyse tamamı bu şekilde bulunur.

Tablo 2. 1 Hidrojen özellikleri

Molekül Ağırlığı	Amu (mol/gr)	2,016
Yoğunluk	Kg/m^3	0,0838
Üst Enerji Değeri	MJ/kg	141,90
	MJ/m^3	11,89

Alt Enerji Değeri	MJ/kg	119,90
	MJ/m³	10,05
Kaynama Sıcaklığı	K	20,3
Sıvı Hal Yoğunluğu	Kg/m³	70,8
Kritik Değerler		
Sıcaklık	K	32,94
Basınç	Bar	12,84
Yoğunluk	Kg/m³	31,40
Kendi Kendine yanma sıcaklığı	K	858
Havada Yanma Limiti	(vol.%)	4–75
Havadaki Stoichiometric karışım	(vol.%)	29,53
Havada Yanma Sıcaklığı	K	2,318
Difüzyon Katsayısı	cm²/s	0,61
Özgül Isı (c_p)	kJ/(kg-K)	14,89

Hidrojen renksiz ve kokusuz bir gazdır. Molekül ağırlığı 2,016 olup en hafif elementtir. Yoğunluğu havadan 14 kat azdır (Normal şartlar altında 0,08376 kg/m^3). Hidrojen 20,3ºK ve bir atmosfer basınç altında sıvı hale geçmektedir. Hidrojen çoğu yakıttan daha yüksek enerjiye sahip bir moleküldür. Hidrojenin enerji kapasitesi 141,9 MJ/kg olup benzinin neredeyse 3 katına eşittir.

2. 2 Hidrojen Elde Edilmesi

Bilindiği gibi Hidrojen doğada fosil yakıtlar gibi bulunmamaktadır. Ancak fosil yakıtlar içinde de Hidrojen bulunmaktadır. Bu nedenle çeşitli kimyasal işlemler ile Hidrojen elde edilmesi gerekmektedir.

2.2.1 Fosil Yakıtlardan Hidrojen Elde Edilmesi

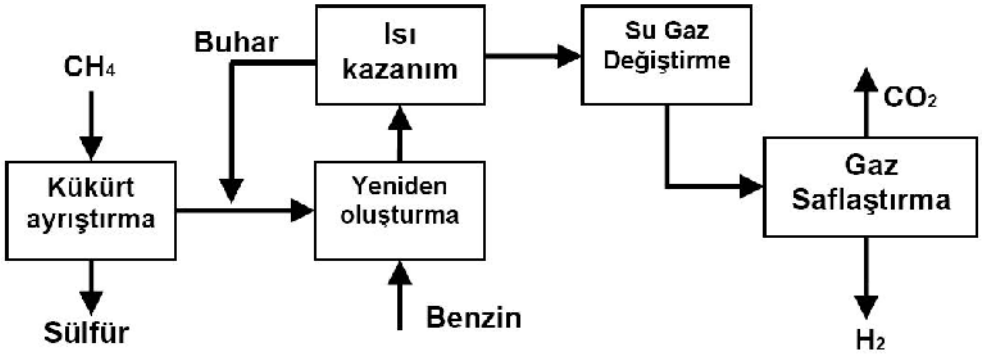
Hidrojen fosil yakıtlara alternatif olarak düşünülse de fosil yakıtların içerisinde Hidrojen atomu bulunduğu da bir gerçektir. Bu kısımda fosil yakıtlardan Hidrojen elde etme yöntemleri anlatılacaktır.

Doğal gazlardan buharlaştırma: Doğal gazlardan buharlaştırma en etkili ve verimli Hidrojen elde etme yöntemidir. İlk basamak gaz sentezlenmesi, ikinci basamak su gaz değişimi üçüncü basamak ise gaz saflaştırmasıdır. Bu işlem sırasında ısı 700–925°C ye kadar çıkmaktadır. İşlem verimliliği %65–75 olup Hidrojen maliyeti 6$/GJ'dur.

$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$

$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$

$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$



Şekil 2. 2 Doğalgazlardan Buharlaştırma ile H_2 Eldesi

Kısmi Oksijenleme: Kısmi Oksijenleme doğal gazlardan buharlaştırmanın gerçekleştirilemediği neft yağından daha ağır hidrokarbonlarda (ethanol ve benzinde) kullanılan bir yöntemdir. Genel olarak kısmi Oksijenleme üç basamakta gerçekleştirilir. İlk basamak gaz sentezlenmesi, ikinci basamak su gaz değişimi üçüncü basamak ise gaz saflaştırmasıdır. Bu işlem sırasında ısı 1150–1315°C ye kadar çıkmaktadır. İşlem verimliliği %50 olup Hidrojen maliyeti 4$/GJ dir.

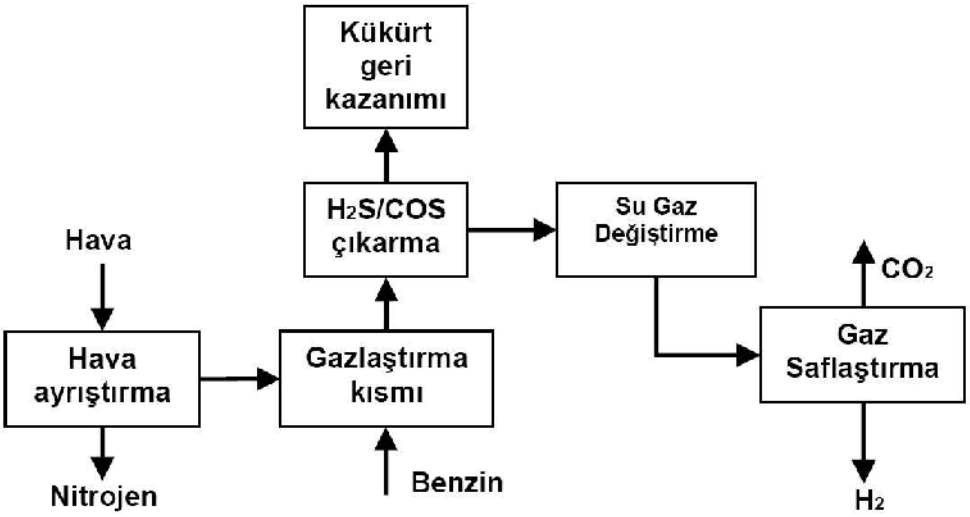
$C_nH_m + n/2\ O_2 \rightarrow n\ CO + m/2\ H_2 + heat$

$C_nH_m + n\ H_2O + heat \rightarrow n\ CO + (n+m/2)\ H_2$

$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 + heat$

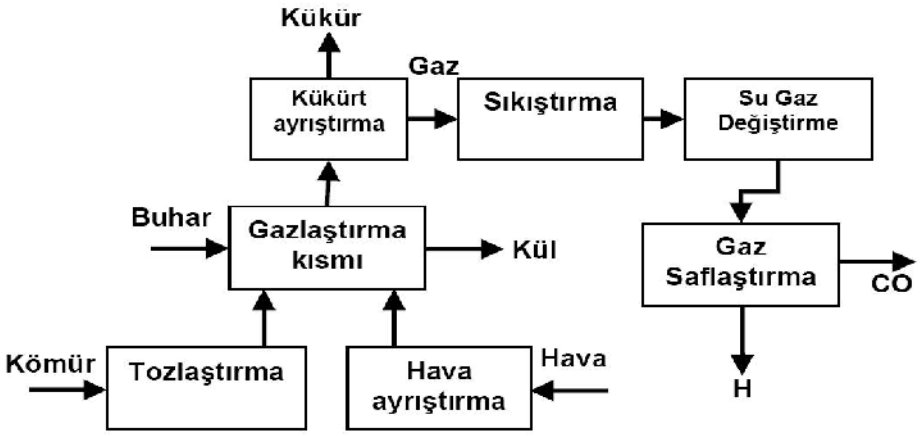
(artık fueloil de n=1 ve m=1.3)

Doğal gazlarda ısı parçalaması: Doğal gaz 1400°C kadar sıcak hava ile ısıtılır ve hava akımı kesilir. Metan gazı bu ısıda ayrılır. Daha sonra ısı 800°C ye düşürülür ve Hidrojen ayrıştırılır. Bu işlemde CO_2 oluşmaz.



Şekil 2. 3 Kısmi Oksijenleme

Kömür Gazlaştırması (Koppers-Totzek process): Toz haline getirilen kömür sıcak buhar yardımıyla yakılarak kül haline getirilir ve kükürdün ayrışması sağlanır oluşan ürün su ile saflaştırılarak karbon monoksit ve Hidrojenin ayrıştırılması sağlanır. Bu işlemde verimlilik %97 olup Hidrojen maliyeti 12$/GJ dir.



Şekil 2. 4 Kömür Gazlaştırılması

2.2.2 Sudan Hidrojen Elde Edilmesi

Dünya üzerindeki en büyük Hidrojen kaynağı su olarak bilinmektedir. Bu nedenle sudan Hidrojen elde edilmesi önemli bir kaynaktır.

Elektroliz: Elektroliz en çok bilinen, kullanılan ve fosil yakıtlardan Hidrojen elde etmeden 50 yıl daha eski bir teknolojidir. Elektrolizde anot ve katot arasında oluşan elektron akımı ile Hidrojen oluşturulur. Su içine NaCl, KOH, NaOH katılarak elektrik iletimi artırılır. Elektroliz için 1.75–2.05V yeterlidir.

İşlem Basamakları:

Katot tepkimesi: $2H_2O\ (l) + 2\ e^- \rightarrow H_2\ (g) + 2OH^-\ (aq)$

Anot tepkimesi: $2OH^-\ (aq) \rightarrow 1/2O_2\ (g) + H_2O\ (l)$

Toplam tepkime: $H_2O\ (l) \rightarrow H_2\ (g) + O_2\ (g)$



Resim 2. 1 Küçük Ölçekli Elektroliz Sistemi

Thermolysis (Doğrudan ısıl ayrıştırma): Su 2000°K üzerinde kendiliğinden Hidrojen ve Oksijen atomlarına ayrışmaya başlar. Ancak ısı arttıkça verimlilik artar 2000K %1, 2500K %8.5, 3000K %24.

$H_2O \rightarrow a\ H_2O + b\ OH + c\ H + d\ O + e\ H_2 + f\ O_2$

Termokimyasal Dönüşüm: Direk ısıl ayrışma çok yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Direk ısıl ayrışmanın düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi için su içerisine kimyasal maddeler katılması gerekmektedir. Su içerisine kimyasal maddeler karıştırılarak düşük ısılarda direk ısıl ayrışma gerçekleştirilmesine termokimyasal dönüşüm denir. 1960'lardan beri kullanılan bir yöntemdir. Ancak verimliliğin istenen düzeyde olması için 2000–3000 kez işlemin tekrarlanması gerekebilmektedir.

Photolysis (Güneş ışığı ile elektroliz): Direk güneş ışığı kullanılarak sudan Hidrojen elde etme yöntemidir. Su içerisine redox katalizör, değişik mikro organizmalar katılarak güneş ışığı yardımıyla oluşan kimyasal reaksiyon sonucunda Hidrojen elde edilir.

2.3 Hidrojen Dağıtımı ve Depolanması

Hidrojen dağıtımı ve depolanması Fuel Cell'lerin gelişimi ile birlikte üzerinde en çok düşünülen konulardan biri olmuştur. Kapalı çevrim sistemlerde saf suyun elektrolizi ile Hidrojen elde edilmesi ve uygun bir tank içerisinde depolanarak ihtiyaç duyulduğunda kullanılması öngörülmektedir. Bu durumda bile depolama bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Bu tankın boyutu, basınç dayanımı, imal edileceği malzeme gibi pek çok etken ön plana çıkmaktadır. Kaldı ki Hidrojen Enerji Sisteminde enerji taşıyıcı olan Hidrojen taşıtlar (Denizaltı, otomobil vb.), işyerleri, ev ve uzay çalışmaları gibi geniş bir alanda kullanılacaktır.

Hidrojen ilk çalışmalarda gaz halinde depolanacağı ve taşınacağı düşünülmüştür. Bu durumda yapılacak boru hatlarının, taşıma tankerlerinin ve depolama tanklarının devasa boyutlarda olması gerekmiştir. Bu nedenle basınç altında taşınması gündeme gelmiş bu da tankların basınç dayanımını ve dolayısı ile ağırlığını arttırmıştır. Denizaltıların kısıtlı hacimlerinden dolayı kapasite kısıtlamaları da ortaya çıkmıştır. Hidrojen çelik tüplerde 200 –250 atm. Basınç altında depolanırsa çelik tüpün kütlesi Hidrojenden 100 kat daha ağır olmaktadır. Son yıllarda kompozit tüpler de geliştirilmiştir. Bu tüpler hafif ve daha yüksek basınçlarda (500–700) atm. kullanılmaktadır. Çelik tüplerle kıyaslandığında kütlesi 3 defa daha azdır. Ancak kütlesinin düşürülmesine rağmen halen çok pahalıdır.

Hidrojenin sıvı olarak depolanması da mümkündür. Ancak Hidrojen -253°C de buharlaşmaya başlamaktadır. Sıvı halde depolanan Hidrojenin büyük tanklarda (10 Milyon m^3 civarı) günde yaklaşık % 0,1'i küçük ve taşınabilir tanklarda ise günde % 2-3'ü buharlaşma ile kaybedilmektedir.

Hidrojen depolanması için Metal Hidritlerden faydalanılması düşünülmüş(Hidrojenin kimyasal tepkime ile ağır metallere tutturularak depolanması), Denizaltılarda en fazla bu yöntem kullanılmaktadır. MgH_2 depolama yoğunluğu 0,07 kgH_2/kg'dır.

Tablo 2. 2 Hidrojen Depolama Şekli ve Yoğunluğu

Depolama Şekli	kgH_2 /kg	KgH_2 /m^3
Yüksek kapasite (10^2-10^4 m^3)		
Yer altı	-	5–10
Yer üstü (Basınç altında)	0.01–0.014	2–16
Metal hidrit	0.013–0.015	50–55
Sıvı Hidrojen Tankı	~1	65–69
Düşük Kapasite (1-100m^3)		
Basınçlı Silindirik	0.012	~15
Metal hidrit	0.012–0.014	50–53
Sıvı Hidrojen Tankı	0.15–0.50	~65
Araç Tankları (0.1–0.5m^3)		
Basınçlı Silindirik	0.05	15
Metal hidrit	0.02	55
Sıvı Hidrojen Tankı	0.09–0.13	50–60

Çalışmalarda gelinen aşama Hidrojenin daha efektif depolanması ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle çalışmalar bu yönde devam etmektedir.

Günümüzde Bor mineralinden metal hidritlerde olduğu gibi Hidrojen depolama amacıyla faydalanma yönünde çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu amaçla $LaNi_5$ ve $NaBO_2$ genel adlarıyla üçüncül Lantan Nikel alaşımı ve Sodyum Borat kullanımı denenmiştir. 2,5 atm. Ve 25°C sıcaklıkta saf $LaNi_5$; sıvı Hidrojenden iki kat, sıkıştırılmış gaz Hidrojenden 12 kat fazla Hidrojen depolayabilmektedir. Enerji yoğunluğu olarak ise sıvı Hidrojenden 1,1 kat, sıkıştırılmış gaz Hidrojenden de 9 kat fazladır.

Tablo 2. 3 Hidrojen Depolama Araçları, Kapasite ve Yoğunluğu

Depolama Aracı	İçerdiği Hidrojen (kg/kg)	Depolama Kapasitesi (hacim için kg/l)	Enerji Yoğunluğu (kj/kg)	Enerji Yoğunluğu (hacim için kj/l)
MgH_2	0.070	0.101	9,933	14,330
Mg_2NiH_4	0.0316	0.081	4,484	11,494
VH_2	0.0207	-	3.831	-
$FeTiH_{1.95}$	0.0175	0.096	2,483	13,620
$TiFe_{0.7}Mn_{0.2}H_{1.9}$	0.0172	0.090	2,440	12,770
$LaNi_5H_{7.0}$	0.0137	0.089	1,944	12,630
$R.E.Ni_5H_{6.5}$	0.0135	0.090	1,915	12,770
Sıvı H_2	1.00	0.071	141,900	10,075
Gaz H_2 (100 bar)	1.00	0.0083	141,900	1,170
Gaz H_2 (1000 bar)	1.00	0.0166	141,900	2,340
Petrol	-	-	47,300	33,500

$NaBH_4 + 2H_2O \rightleftharpoons 4H_2$ (gaz) + $NaBO_2$ (Borax)

Hidrojenin Sodyum Borat kullanılarak depolanması kimyasal denklemi yukarıdaki gibidir.

2.4. Hidrojen Enerji Sistemi Programları

Hydro-Hidrojen projesi Kanada ile Almanya arasında 100 MW bir enerji üretimini hedeflemektedir. Bu projeyle Quebec'te bulunan temiz ve yenilenebilir enerji kaynağı olan hidroelektricity kullanılarak elektroliz yoluyla Hidrojen elde edilecek ve Avrupa'ya likit olarak gemilerle nakledilecektir. Avrupa'ya getirilen Hidrojen; elektrik üretme, ısı kaynağı, araçlarda, Denizaltılarda ve fabrikalarda ayrıca doğal gazlar gibi evlerde ve endüstri ihtiyaçları gibi değişik alanlarda

kullanılacaktır. Benzer bir proje Norveç ile Almanya arasında yapılmaktadır. Bu proje ile Norveç de ihtiyaç fazlası hidro enerji ile Hidrojen üretilecek. Üretilen Hidrojen sıvı olarak gemilerle Almanya'ya taşınacaktır. Bu proje Alman son kullanıcıları için Hidro-Hidrojen projesine göre daha hızlı, ucuz Hidrojen üretimi, taşınması ve dağıtım zincirini öngörmektedir.

Mini Solar Hydrojen Energy System Nürnberg Almanya da kurulacak Solar-Wassersoft-Bayer Hidrojen test ve uygulama tesislerinden oluşacaktır. Bu tesis Fotovoltaik piller, elektroliz ünitesi, yakıt pili, Hidrojen depolama ünitesi, Hidrojen üretimi, Hidrojen yakıt istasyonu ve Hidrojenle çalışan araçlar gibi solar Hidrojen enerji sisteminin bütün parçalarını barındıracaktır. El Jrushi (İsrailli bilim adamı) yüksek kapasiteli Hidrojen üretiminin Libya çöllerinde güneş enerjisi ana kaynaklı olarak yapılmasını ve Avrupa'ya ihraç edilmesini projelendirmiştir.

HYSOLAR projesi Almanya ile Suudi Arabistan arasında Hidrojen üretimini hedeflemektedir. Bu proje ile Suudi Arabistan da güneş enerji panelleri ile elektrik elde edilecek ve bu elektrik elektrolizde kullanılarak Hidrojen üretilecektir. Üretilen Hidrojen sıvı olarak gemilerle Almanya'ya taşınacaktır. Bu proje gelecekte çölde Hidrojen üretilerek Avrupa'ya ihraç edilmesinin ekonomik, ticari ve teknolojik olarak uygun ve dizayn edilebilir olduğunu göstermiştir.

Japon WE-NET programı (Japon Ticaret ve Endüstri Bakanlığı tarafından desteklenmektedir.) en iddialı ve büyük projelerden biridir. Bu proje için kritik Hidrojen teknolojisinin Hidrojen Enerji Sistemi amacıyla kullanılabilmesi için 2020 yılına kadar 3 milyar ABD Doları harcama yapmayı planlamaktadır.

3 YAKIT PİLLERİ

3.1 Yakıt Pillerinin Tarihsel Gelişimi

Yakıt pili kavram olarak ilk defa Jules VERNE'nin "The Mysterious Island" kitabında şöyle ortaya konmuştur.

"…water decomposed into its primitive elements… and decomposed doubtless, by electricity… will one day be employed as fuel,… hydrogen and oxygen which constitute it, used singly or together, will furnish an inexhaustible source of heat and light, of an intensity of which coal is not capable,… Water will be the coal of the future."

"…su iki ana elementine ayrılır… ve kuşkusuz ki elektrikle ayrılabilir… bir gün yakıt olarak kullanılacak,…suyu oluşturan Hidrojen ve Oksijen ayrı ayrı yada birlikte kullanılır, kömür yeterli değilken su tükenmeyecek bir ısı ve ışık kaynağı olacaktır,… su geleceğin kömürü olacaktır."

Yakıt pili, ilk olarak 1839 yılında suyun elektrolizi konusunda çalışmalar yapan Sir William Grove tarafından elektrokimyasal bir tepkime olarak ortaya konmuş ve gerçekleştirilmiştir. 1923 yılında Haldane rüzgâr enerjisi ve elektroliz yöntemiyle Hidrojen elde edilerek sıvı Hidrojen olarak depolanabileceğini ve yakıt olarak kullanılabileceğini öngörmüştür. Bu öngörü 15 yıl sonra (1938 yılında) Sikorsky tarafından teknik detayları ile ortaya konmuş ve Hidrojenin havacılıkta potansiyel yakıt olacağını da belirtmiştir. 1920'lerin başında Lawaczek Hidrojen ile çalışan motor, araba ve tren kavramının ana hatlarını ortaya koymuştur. Bu kavrama göre elektroliz yardımıyla Hidrojen elde edilecek ve böylece enerji doğal gazlar gibi Hidrojen boru hatları ile taşınabilecekti. 1920–1930 döneminde konu üzerine çalışmalar devam etmiştir. Aynı dönemde Eren ve ekibindeki mühendisler pek çok araç motorunu multi-fuel sistem, yani hem benzin hem de Hidrojen kullanabilir hale getirmiştir. İlk başarılı yakıt pili 1932 yılında Francis Bacon'un çalışmaları sonucu ortaya çıkmıştır. Bacon, Mond ve Langer 1959 yılında bir kaynak makinesine güç

sağlayan 5 KW'lık pratik bir sistem kurmayı başarmışlardır. Bacon'un pili daha sonra modifiye edilerek Amerikan uzay programında kullanılmıştır. 1950'lerin sonunda NASA (Amerikan Ulusal Uzay Dairesi) insanlı uzay araştırmaları için panellere güç sağlamak üzere araştırmalar başlatmıştır. Nükleer reaktörlerin riskli olması, pillerin ve akülerin çok ağır ve kısa ömürlü olmaları nedeniyle NASA enerji kaynağı olarak yakıt pillerine önem vermiştir. Yakıt pilleri Apollo ve Gemini uzay mekiklerinde güvenli olarak elektrik ve su sağlayarak uzay çalışmalarındaki önemlerini ortaya koymuşlardır.

Güneş enerjisi kaynaklı Hidrojen ekonomisi kavramı ilk olarak 1962 yılında Bockris tarafından ortaya konmuş, 1965 yılında Justi tarafından geliştirilerek şematize edilmiş, 1970 yılında Bockris ve Triner tarafından Hidrojen ekonomisi olarak isimlendirilmiş, 1971 yılında Bockris ve 1972 yılında Bockris ve Appleby tarafından formülize edilmiş, 1972 yılında Gregory tarafından ölçülmüştür. 1972 yılında Marchetti Nükleer Hidrojen sistemini ortaya attı. Bu sistemde izole edilmiş bir adada nükleer enerji kullanılarak üretilen Hidrojen sıvılaştırılmış olarak gemilerle taşınacak ve kullanılacaktı. Bockris 1962 yılında Amerikan şehirlerinin Güneş enerjisi kaynaklı Hidrojen ile desteklenmesi için plan hazırlamıştır. Bu plana göre yüzer fotovoltaik paneller oluşturulacak, elektroliz ile deniz suyundan Hidrojen üretilerek boru hatları ile şehirlere nakledilecekti. Japonlar tarafından PORSHE (Planned Ocean Raft System for the Hydrojen Economy) adlandırılan benzer bir kavram 1979 yılında Escher ve Ohta tarafından ortaya konmuştur. 1974 yılında Veziroğlu ilk uluslararası Hidrojen enerji konferansını düzenlemiştir. THEME (The Hydrogen Economy Miami Energy Conference) konferansında herhangi bir ana enerji kaynağı ile Hidrojen üretimi ve fosil yakıtlar yerine kullanılabilirliği tartışılmış, fosil yakıtların tükenmesi ve bu yakıtların kullanılması ile oluşan çevre kirliliği ile ilgili soruların cevaplanmasına çalışılmıştır.

Başlangıçta Hidrojenden yakıt olarak faydalanılması düşünülürken yakıt pilleri değil de içten yanmalı motorlarda benzin yerine Hidrojen yakılması düşünülmüş ancak araştırmalar sonucunda yakıt pilleri ortaya çıkmış, günümüzde ise her geçen gün önemi daha da artmaktadır.

3.2 Yakıt Pilleri

Yakıt pilleri elektrokimyasal bir süreç sonunda doğrudan elektrik enerjisi üretirler. Bu süreçte içten yanmalı motorlarda olduğu gibi yanma evresi olmadığından temiz enerji kaynağıdırlar.

Yakıt pillerinde ana enerji kaynağından (Güneş, Rüzgar, Nükleer vb.) elde edilen enerji ile önceki bölümde anlattığımız Hidrojen elde etme yöntemlerinden biri kullanılarak elde edilen Hidrojen kullanılır. Hidrojen havadaki Oksijenle yakıt pili aracılığı ile yanarak su oluşturur. Tepkime ekzotermik olup ısı açığa çıkar ancak oluşan ısı çok yüksek değerde olmadığında su ile yakıt pili dışına atılır yüksek ısı üreten yakıt pillerinde ise ayrıca soğutma ihtiyacı duyulabilir.

Genel olarak bir yakıt pili şöyle çalışır; Anotta Hidrojen molekülü elektron verir ve H^+ şekline dönüşür. Elektronlar dış hat ile katota doğru ilerlerken bizim ihtiyacımız olan elektrik enerjisini üretirler. Hidrojen iyonları yakıt hücresinin tipine göre farklılık gösteren elektrolitten geçerek katota ulaşır. Katota geçen Hidrojen iyonu ve havada bulunan Oksijen dış hattan gelen elektronlarla birleşerek su oluşturur.

Yakıt pilleri kullandıkları yakıta, elektrolit cinsine ve çalışma sıcaklığına göre farklı isimler alır. Yakıt pillerinin kullandıkları yakıta göre:

1 Proton geçiren polimeri zarlı yakıt Pili (PEMYP)
2 Direk metanol yakıt pili (DMYP)
3 Alkali yakıt pili (AYP)
4 Fosforik asit yakıt pili (FAYP)
5 Erimiş karbonatlı yakıt pili (EKYP)
6 Katı oksitli yakıt pili (KOYP)
7 Rejeneratif yakıt pili (RYP)
8 Silindirik yakıt pili (SYP)

Yakıt pillerinin çalışma sıcaklıklarına göre:

1 Düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (0-100^{0}C)
2 Orta sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (100-500^{0}C)
3 Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (500-1000^{0}C)

Yakıt pillerinin kullandıkları elektrolite göre:

1 Alkali elektrolitli yakıt pilleri
2 Katı polimerili yakıt pilleri
3 Fosforik asit yakıt pilleri
4 Erimiş karbonatlı yakıt pilleri
5 Katı oksitli yakıt pilleri

3.3 Kullandıkları Elektrota Göre Yakıt Pilleri

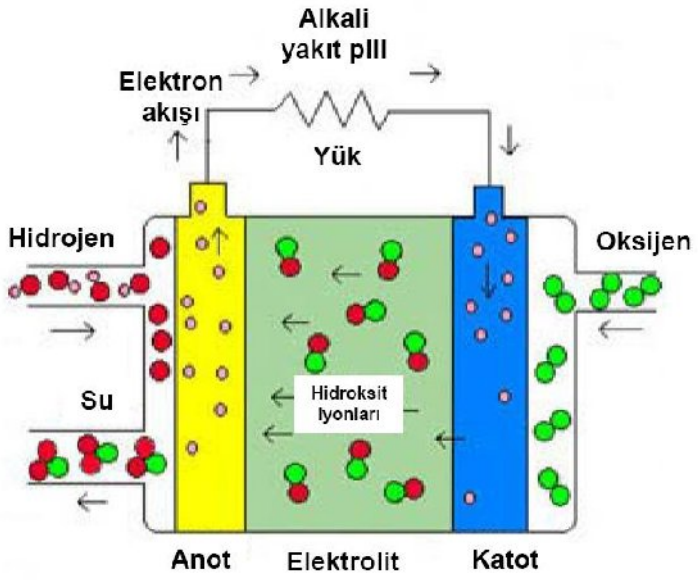
3.3.1. Alkali yakıt pili (AFC)

Elektrolit olarak %85 konsantrasyonunda KOH (potasyum hidroksit) kullanılır ve çalışma sıcaklığı 200–250°C dir. %35–50 konsantrasyonda KOH kullanıldığında çalışma sıcaklığı 120°C altına düşer. Katalizör olarak Ni (nikel), Ag (gümüş), metal oksitler veya özel bazı metaller kullanılır.

Anot: $H_2\ (g) + 2\ (OH)^-\ (aq) \rightarrow 2\ H_2O\ (l) + 2e$

Katot: $\frac{1}{2}\ O_2\ (g) + H_2O\ (l) + 2e^- \rightarrow 2\ (OH)^-\ (aq)$

Toplam: $H_2\ (g) + \frac{1}{2}\ O_2\ (g) \rightarrow H_2O\ (l)$



Şekil 3. 1 Alkali Yakıt Pili

3.3.2 Polimer Elektrolit Membran Yakıt Pili(PEMFC)

Elektrolit olarak yapısında flor bulunduran ve sulfonik asit polimerleri gibi iyon değiştirebilen çok ince polimer zar kullanılır. 12–20 mikron seviyesinde kalınlıkları vardır. Zar inceldikçe verimliliği artar. Katalizör olarak anot ve katotta Pt (platin) veya Pd (paladyum) gibi metaller kullanılmaktadır. Çalışma sıcaklığı genellikle 100°C altında olup tipik çalışma sıcaklığı 60–80°C dir.

Anot: $H_2\,(g) \rightarrow 2\,H^+\,(aq) + 2\,e^-$

Katot: $\frac{1}{2}\,O_2\,(g) + 2\,H^+\,(aq) + 2\,e^- \rightarrow H_2O\,(l)$

Toplam: $H_2\,(g) + \frac{1}{2}\,O_2\,(g) \rightarrow H_2O\,(l)$

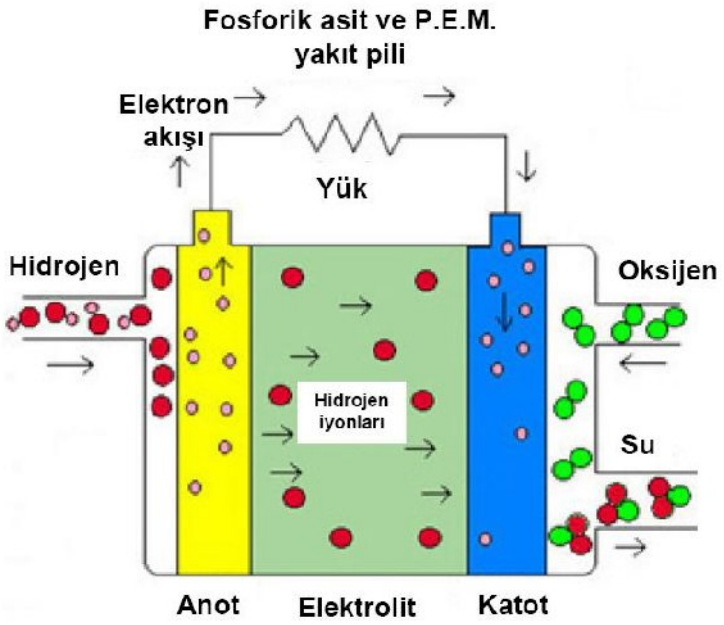
3.3.3 Fosforik Asit Yakıt Pili(PAFC)

Elektrolit olarak %100 fosforik asit kullanılır. Çalışma sıcaklığı 150–220°C dir. Katalizör olarak anot ve katotta Pt (platin) veya Pd (paladyum) kullanılmaktadır.

Anot: $H_2\,(g) \rightarrow 2\,H^+\,(aq) + 2\,e^-$

Katot: $\frac{1}{2}\,O_2\,(g) + 2\,H^+\,(aq) + 2e^- \rightarrow H_2O\,(1)$

Toplam: $H_2\,(g) + \frac{1}{2}\,O_2\,(g) + CO_2 \rightarrow H_2O\,(1) + CO_2$



Şekil 3. 2 Polimer Elektrolitik Zar ve Fosforik Asit Yakıt Pili

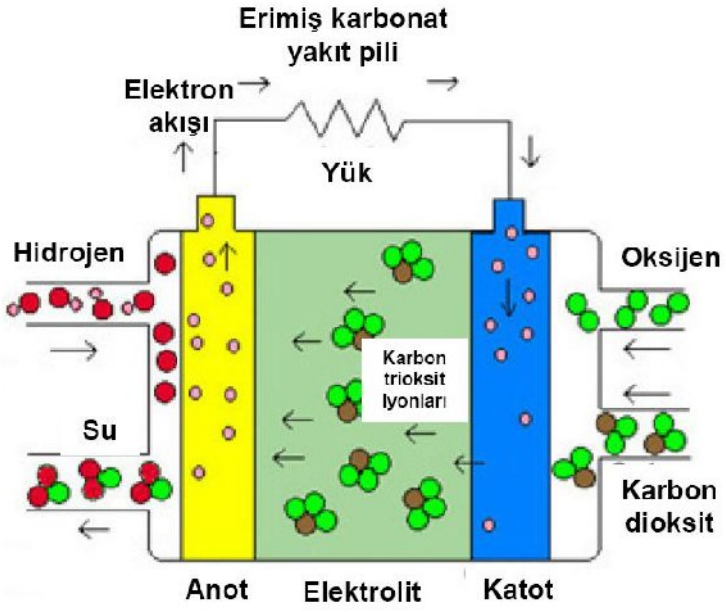
3.3.4 Erimiş Karbonat Yakıt Pili(MCFC)

Elektrolit olarak Li (lityum), Na (sodyum), K (potasyum) gibi alkali karbonatlarının $LiAlO_2$ biçimindeki seramikleri kullanılır. Çalışma sıcaklığı 600–700°C dir. Katalizör olarak anotta Ni (nikel) katotta ise nikel oksitler kullanılmaktadır.

Anot: $H_2\,(g) + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O\,(g) + CO_2\,(g) + 2\,e^-$

Katot: $\frac{1}{2}\,O_2\,(g) + CO_2\,(g) + 2\,e^- \rightarrow CO_3^{2}$

Toplam: $H_2\,(g) + \frac{1}{2}\,O_2\,(g) + CO_2\,(g) \rightarrow H_2O\,(g) + CO_2\,(g)$



Şekil 3. 3 Erimiş Karbonat Asit Yakıt Pili

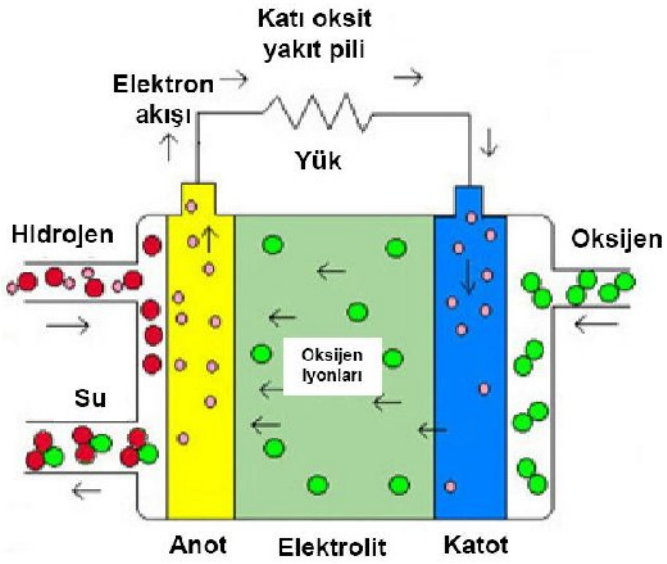
3.3.4 Katı Oksit Yakıt Pili(SOFC)

Elektrolit olarak katı, gözeneksiz metal oksitler genellikle Y_2O_3 ile desteklenmiş ZrO_2 kullanılır. Çalışma sıcaklığı 650–1000°C dir. Katalizör olarak anotta CO-ZrO_2 veya Ni-ZrO_2 katotta ise Sr ile desteklenmiş $LaMnO_3$ kullanılır.

Anot: $H_2\ (g) + O^{2-} \rightarrow H_2O\ (g) + 2\ e^-$

Katot: $\frac{1}{2}\ O_2\ (g) + 2\ e^- \rightarrow O_2$

Toplam: $H_2\ (g) + \frac{1}{2}\ O_2\ (g) \rightarrow H_2O\ (g)$



Şekil 3. 4 Katı Oksit Yakıt Pili

Yakıt pilleri arasında üzerinde en çok araştırma yapılan PEFC ve SOFC'dir. Katıoksit yakıt pilleri yüksek ısıda çalışan (650–1000 °C) ancak yüksek enerji kapasitesine sahip yakıt pilleridirler. Yüksek ısıda çalışmaları nedeniyle Denizaltılar gibi yüksek ısının dezavantaj olduğu platformlarda kullanılmaları mümkün olmamaktadır. Ancak hem çalışma ısısından ısıtma amacıyla faydalanılabilmesi hem de doğalgazların hiçbir işleme tabi olmadan katı oksit yakıt pillerinde yakıt olarak kullanılmaları da ev ve ofis uygulamaları için avantaj olmaktadır. Yüksek enerji kapasiteleri nedeniyle katı oksit yakıt pillerinin yaygın bir kullanım alanı da elektrik santralleri olacağı tahmin edilmektedir.

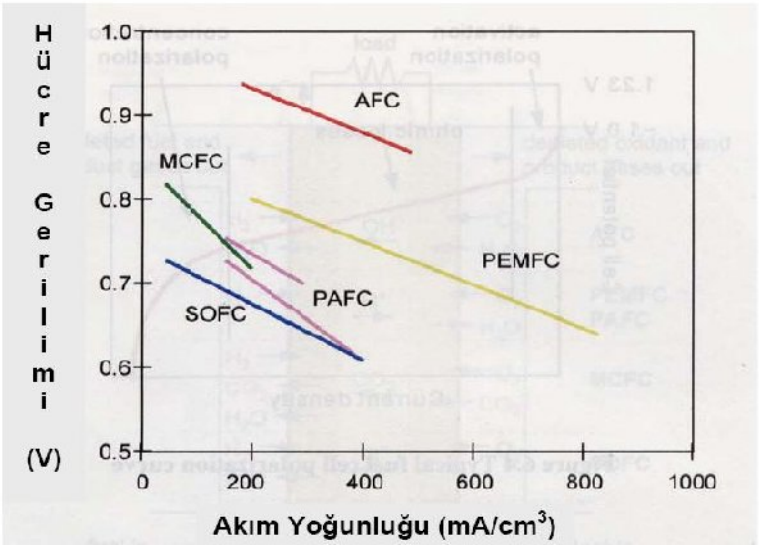
Tablo 3. 1 Yakıt pilleri genel özellikleri

	Fosforik asit yakıt pili	Alkali yakıt pili	Erimiş karbonat yakıt pili	Katı oksit yakıt pili	Proton değiştiren zar yakıt pili
Elektrolit	Fosforik asit	Potasyum hidroksit	Karbonat	Çinko üzerine tutturulmuş Yitrium (YSZ)	İyon değiştirici polimer zar
Çalışma sıcaklığı(ºC)	200	100–250	600–700	650–1000	50–80
Yük taşıyıcı	H^+	OH^-	CO_3^{-2}	O_2^{-2}	H^+

Hücre malzemesi	Karbon	Karbon	Seramik	Nikel, paslanmaz çelik	Karbon
Güç yoğunluğu (W/kg)	120–180	35–105	30–40	15–20	350–1500
Katalizör	Platin	Nikel, gümüş	Nikel	Zirkonyum	Platin

Yakıt pillerinin genel özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Çizelgede bütün yakıt pillerinin çalışma sıcaklıkları incelendiğinde Denizaltılar için en uygun olan, en düşük sıcaklıkta ve pratik uygulamanın en kolay olduğu, soğutma için özel yapı oluşturulmasına en az ihtiyaç duyulanın proton değiştiren zar yakıt pili olduğu görülmektedir.

Şekil 3.5'da yakıt pilleri polarizasyon eğrileri görülmektedir. Grafikte verilen eğriler direnç kayıplarının olduğu yani gerçekte bizim bu pilleri çalıştırmamız gereken bölgeyi göstermektedir. Proton değiştiren zar yakıt pilinin(PEFC) akım değerinin diğerlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir.



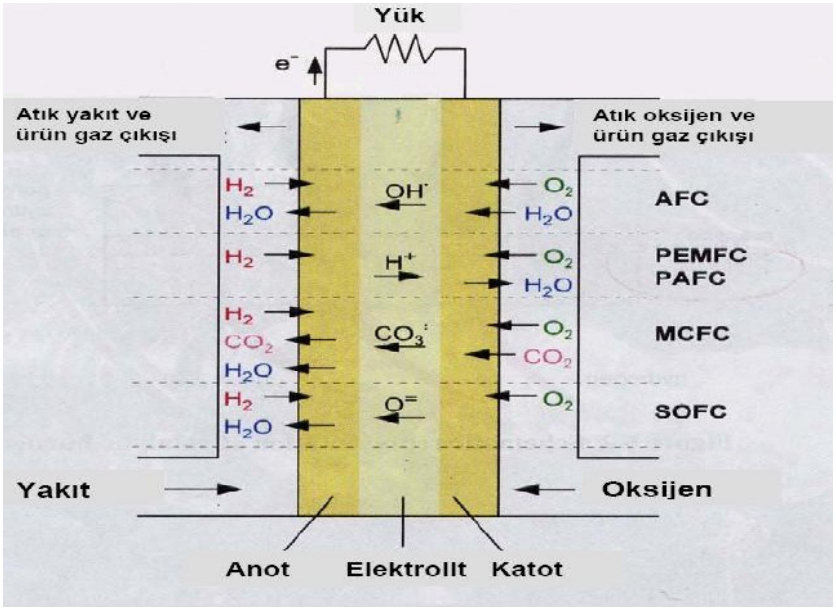
Şekil 3. 5 Yakıt Pilleri Polarizasyon Eğrileri

Tablo 3.2'de yakıt pillerinin kimyasal tepkimeleri görülmektedir. Kimyasal tepkimeler yakıt pillerine göre değiştiği gibi akım taşıyıcı iyon da değişmektedir.

Tablo 3. 2 Yakıt pilleri Kimyasal Tepkimeleri

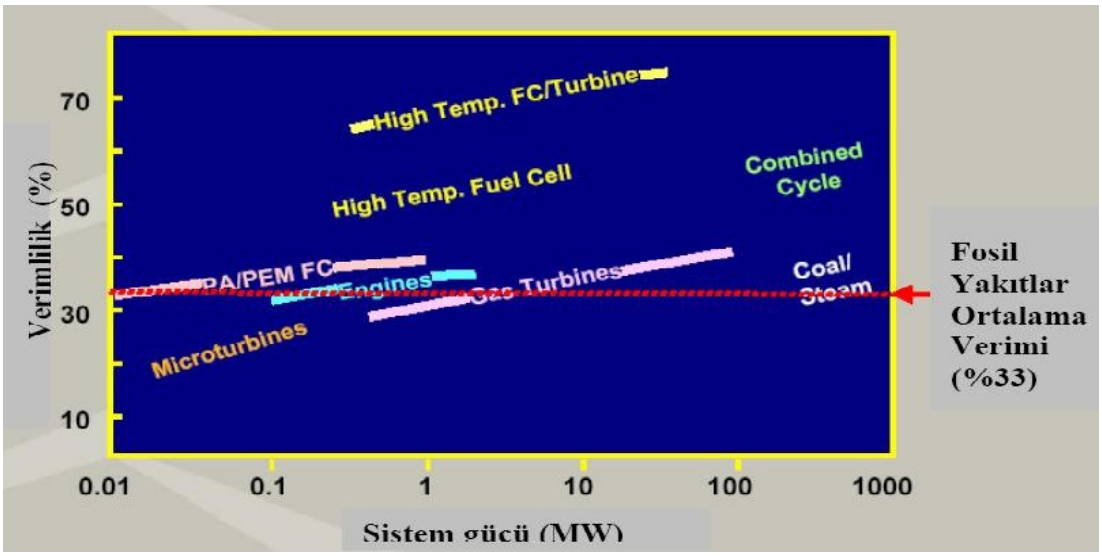
Yakıt pili tipi	Anot tepkimesi	Katot tepkimesi
Alkali	$H_2 + 2\,(OH)^- \rightarrow 2\,H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2}\,O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2\,(OH)^-$
Polimer elektrolit	$H_2 \rightarrow 2\,H^+ + 2\,e^-$	$\frac{1}{2}\,O_2 + 2\,H^+ + 2\,e^- \rightarrow H_2O$
Fosforik asit	$H_2 \rightarrow 2\,H^+ + 2\,e^-$	$\frac{1}{2}\,O_2 + 2\,H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
Erimiş karbonat	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2\,e^-$	$\frac{1}{2}\,O_2 + CO_2 + 2\,e^- \rightarrow CO_3^{2-}$
Katı oksit	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2\,e^-$	$\frac{1}{2}\,O_2 + 2\,e^- \rightarrow O_2^-$

Şekil 3.6'da tüm yakıt pillerinin akım taşıyıcı iyonları, tepkimeye giren moleküller ve katalizörler görülmektedir. Burada da görüldüğü gibi tüm yakıt pilleri Anot-Elektrolit-Katot yapısındadır.



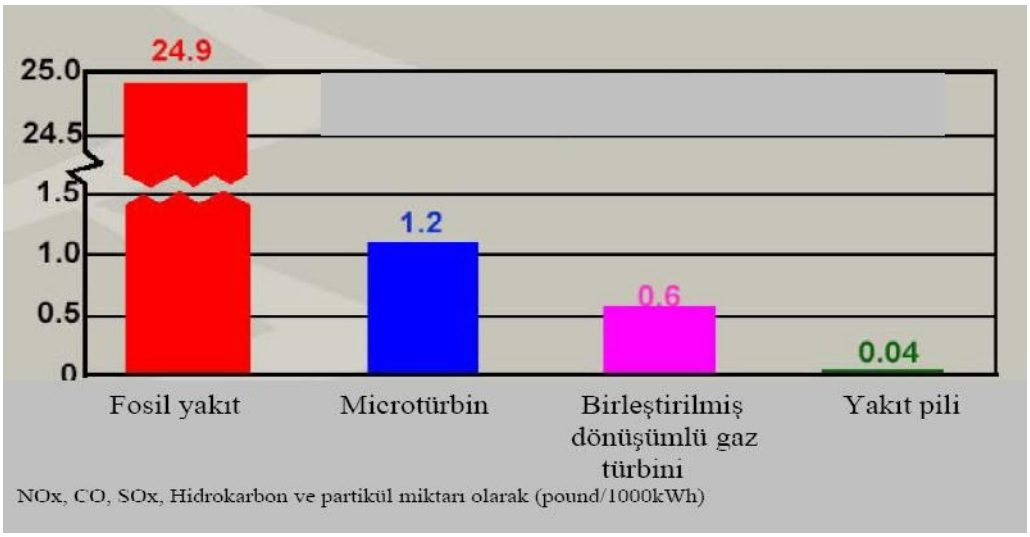
Şekil 3. 6 Yakıt Pilleri Çalışma Prensipleri

Şekil 3.7'de yakıt pillerinin verimliliği ortaya konmaya çalışılmıştır. Fosil yakıtların verimliliğinin %33 olduğu göz önünde tutulursa tüm yakıt pillerinin fosil yakıtlardan daha verimli olduğu görülmektedir.



Şekil 3. 7 Yakıt Pillerinin Verimliliği

Şekil 3.8'de ise yakıt pilleri ile diğer enerji kaynaklarının atık gaz karşılaştırması yapılmıştır. Grafikten görüleceği gibi yakıt pillerinin atık gaz neredeyse 0 (0,04) iken fosil yakıtların 24,9 (pound/1000 kWh)dur. Bu durum da yakıt pillerinin Dünya için ne denli önemli temiz enerji çevrim aracı olduğunun açık bir ispatıdır.



Şekil 3. 8 Yakıt Pillerinin ile Diğer Enerji Kaynaklarının Atık gaz Karşılaştırması

4 DENİZALTILAR HAKKINDA

4.1 Denizaltı Tarihi ve İlk Denizaltılar

Denizaltı kelimesi Dünya dillerinde; Almanca Unterseeboot, Fransızca Sous-Marin, İngilizce Submarine. Deniz sathının altında seyredebilen deniz vasıtası. Denizaltı târihi çok eski zamanlara dayanır.

Denizaltı gemilerini Deniz Kuvvetlerine bir vurucu güç unsuru olarak katılması fikrinin Büyük İskender ile başlamıştır. Aristo, İskender'in Tyre şehrinin alınmasında kendisine 7 ay mukavemet eden bu denizci ve muharip insanları yenebilmek için fıçı şeklindeki su altı silahlarından istifade ettiğini yazmaktadır. Mısırlı ördek avcıları, ağızlarında borular su altında sessizce ilerlerlermiş. Antik Yunanistan'da savaşlar sırasında bu şekilde limanlardaki gemilerin altına delik açılırmış. 1465'te Kyeser'in Almanya'da, 1531'de De Lorena'nın İtalya'da Nemi Gölü'nde birer saat ve Osmanlı'da da saray eğlenceleri kapsamında timsah biçimli bir tekne ile bir süre su altında su altında kaldıkları olmuştur. Ayrıca insan aklının denizler için ülkeler arası sınırlar koyamaması denizin sadece üstünden değil altından da korunması düşüncesi Denizaltılar için ana düşüncelerden olmuştur. 2.Dünya savaşının belirleyici güç unsurlarından en büyük etken kullanılan Denizaltıların manevra kabiliyet ve yeterlilik konularında gelişmiş olmalarıdır. Teknolojinin gelişimiyle birlikte derinlik ve basınç konularının basite indirgenmesiyle yapılan denemelerde ve güdümlü füzelerin eklenmesiyle Denizaltılarında bir kruvazör görevi yapması savaşlarda caydırıcı bir unsur olmuştur.

Makine devrine geçilmeden önce insanoğlu su içinde dalma ve seyir yapabiliyordu. Denizaltının ilk olarak resmini çizen Leonorda Da Vinci'dir. William Bourne 1580 senesinde Denizaltı dizaynını gerçekleştirdi. Çok basit de olsa Cornelius Von Drebnel ilk olarak Denizaltıyı tatbik sâhasına koydu. Drabnel, 1620 yılında küçük üstü kapalı bir tekne yaparak, nehrin 4–5 metre derinliğinde, yürütmeyi başardı.1653 yılında Fransuva De Son adında bir Fransızın aynı biçimde bir tekne ile yaptığı başarılı denemelerden sonra, 1680'de İtalyan Giovanni Borelli bir Denizaltı planı çizmiş ve inşa etmiştir. 1729'da İngiliz marangoz Nathaniel

Symons, 45 dakika boyunca su altında kalıp tekrar yüzeye çıkabilen bir gemi yapmıştır. Aynı yıllarda Türk mühendisleri de İstanbul'da padişah Üçüncü Ahmed'in huzurunda bir çeşit Denizaltı denemesi yapmışlar ve başarılı olmuşlardır. Denizaltı tarihinin en önemli halkalarından biri, David Bushnell'e ait. "Kaplumbağa" adlı yumurta şeklindeki tek kişilik Denizaltı, hem ilk Amerikan Denizaltısı hem de savaşta kullanılan ilk Denizaltı olma özelliğini taşıyor. 1776'da İngiliz gemisi HMS Eagle'a Kaplumbağa ile saldırılmış ve başarısız olunmuştur. Kaplumbağa, el ile çevrilen bir pervane ile çalışıyor, hedefin altına gelip büyük bir matkapla delik açıyor, bu deliğe saatli bombalar bırakabiliyordu. Batmak için kullanılan su, bir el pompası ile tahliye ediliyordu. Oksijen kaynağı olmadığı için en fazla yarım saat su altında kalabiliyordu. Modern Denizaltıların ilki kabul edilen Kaplumbağa, bundan 233 yıl önce eylül ayında ilk seferine çıktı.

1800'de Amerikalı mucit Robert Fulton, 21 metre uzunluğunda bir Denizaltı inşaa etmiş ve ismini de Nautilus koymuş. Bu gemideki iki önemli teknoloji; basınçlı olarak depo edilmiş Oksijen ve gemiye yukarı aşağı kontrollü hareket sağlayan kanatçıklar. Yine de geminin pervanesini döndürmek için kol gücü gerekliydi. Silah olarak mayın kullanabiliyor ve "torpido" kelimesini de bulan Fultondur. 1850'de Almanlar, bir ismerpisit balinası büyüklüğündeki "Brandtaucher"ı yaptılar. İki kişilik bu Denizaltı, ilk Alman Denizaltısıdır. Savaş gemisi olarak ilk defâ 1887'de İspanyol J. Peral batarya ile çalışan Denizaltısını yaptı. Bunu 1888'de Fransız Zede takip etti. 1895'te John P. Holland "Holland II"yi yapmış. Bu Denizaltı petrolle çalışıyordu ve yüzeye çıkmak ve batmak için kullanılan pompalar elektrik gücü kullanıyordu.

Yüzyıl başında Başta Almanya,ABD ve Rusya olmak üzere pek çok ülke Denizaltına inmek ve var olan araçları geliştirmek için çalışmalar yapmış ve yeni tasarımlar ortaya çıkarmışlardır. 1902'de ise Almanlar en başarılı Denizaltıyı yaptılar. 1904'te Fransa'da yapılan "Aigette", ilk dizel motorlu Denizaltıdır. 1943'te Almanlar, dizel motorların bol hava ihtiyacı için şnorkel denen sistemi geliştirdiler, 1944'de de alternatif enerji olarak Hidrojen kullanmayı denemişlerdir.1954'de Amerikalılar, ilk nükleer Denizaltı "USS Nautilus"u yaptılar. Amerikalılar 1958'de su altındaki direnci azaltmaya yarayan "gözyaşı şekli" denilen dizaynı kullanmaya başladılar. 1959'da ilk nükleer füze taşıyan Denizaltı "USS George Washington" suya indirilmiştir.

4.2 Denizaltı Nasıl Dalar ve Çıkar

Denizaltıların batırılmasını sağlayan teknik, ilk geminin yapılışından beri bilinen ve işe yaradığı istisnasız her seferinde kanıtlanan tekniktir, yani geminin içine su soldurmak. İçine su dolunca batmayan bir gemi henüz olmamıştır, asıl problem batan gemiyi su yüzüne geri çıkartmaktır. Denizaltının batması için suyun kaldırma kuvvetini yenmek gerekir, bunun için de "kontrollü batırma" olarak bilinen bir operasyon gerçekleştirilir. Denizaltılar, iç içe geçmiş iki gemidir. Dışarıdan görünen dış kabukla içeride insanların bulunduğu hacim arasında balast tankları bulunur, bu tanklara doldurulan su ile geminin kütlesi artırılır ve Denizaltı batar. Denizaltı yüzeydeyken bu balast tankları havayla doludur yani bir anlamda geminin yoğunluğu sudan düşüktür, haliyle suyun kaldırma kuvveti baskın çıkar ve gemi yüzer. Denizaltıyı batırmak için balast tanklarının vanaları açılır, içerideki hava dışarı çıkarken tankların içine su dolar. Geminin kütlesel yoğunluğu artıp suyun yoğunluğunu geçtiği zaman Denizaltı batmaya başlar. Gemiyi tekrar yüzeye çıkarmak için bu tankların içine hava basılır, basınçlı hava yüzünden tanklardaki su dışarı çıkmak zorunda kalır ve gemi yükselir. Dalış ve yükselişin dilenen açılarla gerçekleşmesi için geminin kuyruğunda bulunan kanatlar kullanılır. İstenen derinliğe ulaşıldığında bu kanatlar sayesinde geminin yüzeye paralel konuma gelmesi sağlanır. Denizaltı dalışı genelde 3 aşamalı olarak gerçekleşir bunlar;

Statik Dalış
Dinamik Dalış
İtici Güç

Denizaltının dalışında iki esas etkindir. Statik ve Dinamik dalış. Denizaltı dalış için bu iki esası aynı anda uygulamaktadır. Bu esasların uygulanışında deniz suyundaki özellikler Denizaltının bünyesine ve çeliğine etkisi açısından önemlidir. Bunlar temel olarak;

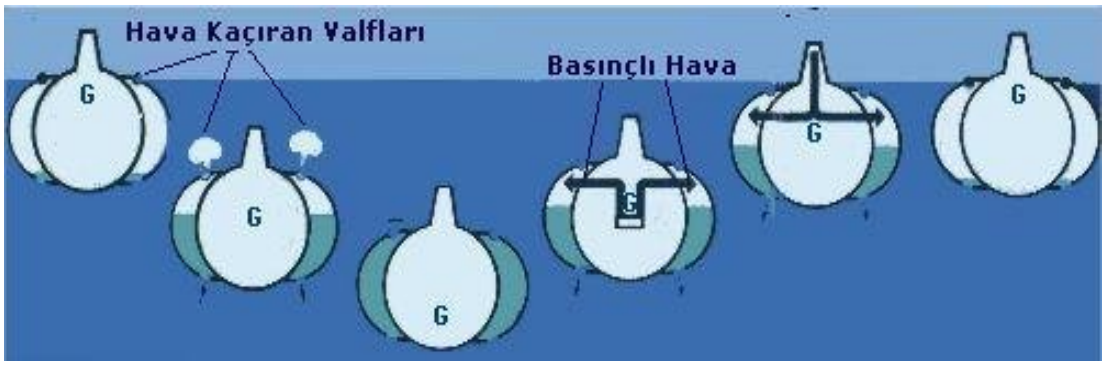
Yoğunluk(Tuzluluk-Kesafet),
Sıcaklık,
Basınç

Sıcaklığın 1 ton çelik alaşım levha üzerindeki etkisi çok küçüktür. Ancak binlerce ton olarak ifade edilen bir Denizaltıda, yoğunluğa nazaran az da olsa etkileri vardır. Aynı şekilde basıncında gemi hacmine etkisi küçüktür. Örneğin; Deniz suyundaki sıcaklık yükselmesi materyalde genleşme oluşturacak, Denizaltının hacmi büyüyecek yüzme kuvveti artacaktır.

Denizaltı derine indikçe (ve sıcaklık aynı ise) dış basınç yüzünden gemi sıkışacak hacmi daralacak ve yüzme kuvveti bir miktar azalacaktır. Sıcaklık ve basınç azalmaları içinde ters etkiler düşünülebilir.

4.2.1 Statik Dalış

Denizaltının dalışını oluşturan esaslardan biridir. Denizaltı hareketsiz durumundayken; dizayna göre değişen, altı denize açık veya bir valfla kapatılabilen Dalma Sarnıçlarına (Alttaki şekilde mavi bölgeler), tepesindeki valf açılıp içindeki hava kaçırılarak su alınması ve yüzme kuvvetinin azaltılması sağlanır. Ancak sarnıçların dolması, botun bünyesini etkilemesi çok uzun bir aşamadır. Sadece aşağı-yukarı hareket vardır.



Şekil 4. 1 Sarnıçlar Vasıtasıyla Denizaltının Batırılması ve Yüzeye Çıkartılması

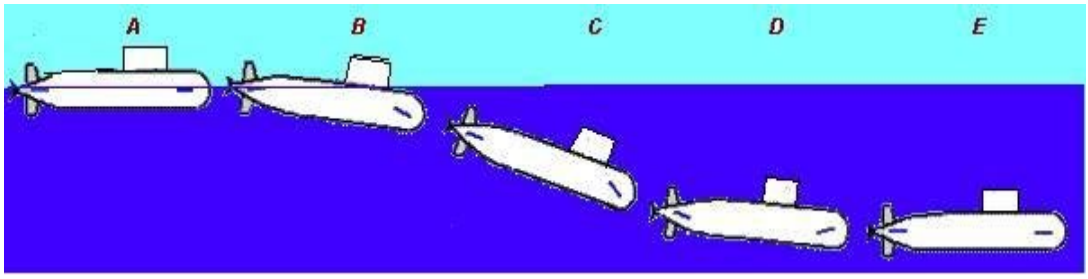
Eğer ağırlıklar baştan iyi hesaplanmışsa, bot ağırlaşmadan dolayı aşağı ivme kazanıp belli bir derinliğe kadar dalıp kalacaktır. Buna; Nötr Sepiye denir. Bataryadan tasarruf etmek ve etrafı dinlemek için Denizaltı Nötr sepiye ye ayarlanır, bu işleme Askıya alma pozisyonu denir.

Eğer ağırlıklar fazla gelmişse devamlı dalacaktır. Buna Negatif Sepiye denir, istenmeyen bir durumdur.

Eğer ağırlıklar az gelmişse hiç dalmayacaktır ya da bir miktar dalıp yukarı çıkmaya başlayacaktır. Buna da Pozitif Sepiye denir. Bu da istenmeyen bir durumdur.

4.2.2 Dinamik Dalış

Denizaltının dalışını etkileyen bir diğer unsurdur; Denizaltının baş-kıç ve sancak-iskele bordalarındaki kanat benzeri dümenlere ve Denizaltının kendisine açı-meyil verdirilerek, bunlara Denizaltının ileri hareketiyle oluşan su akışının etkilerinin kullanılması ile yapılan dalıştır. Dümenler; Baş ve Kıç Ufki dümenler olarak adlandırılırlar. Kıç ufki dümenler baş ufki dümenlerden daha büyüktür. Eski dizaynlarda bu dümen pervanenin gerisine konarak, pervanenin ittiği suyla bot meyli sağlanıyordu fakat Denizaltıların sürat potansiyeli arttıkça Kıç ufki ve Yön (Dikey) dümenlerinin konumu; pervanenin oluşturduğu çürük ve türbülanslı sudan, akışın düzgün olduğu türbülanssız suya, pervanenin önüne alınmıştır.
Baş ufki dümenlerin görevi emredilen derinliğe inmek, kıç ufki dümenlerin görevi de geminin emredilen meyilini korumaktır. Nötr sepiye ye göre veya geminin süratine göre (Denizaltının sürati arttıkça, gemide hafifleme olur), iyi ağırlık ayarı yapılmış gemide dümenler "0" pozisyonundadır.



Şekil 4. 2 Dümenler Vasıtasıyla Denizaltının Batırılması

A.Denizaltı su üstü seyrinde(İleri yolda),
B. Dalma sarnıçlarının hava kaçıran valfları açılarak, hava kaçırılıyor, sarnıçlara deniz suyu doluyor(Statik dalış başlıyor).
C. Kıç ufki dümenin meyillendirdiği Denizaltı, suyun bünyesine ve baş ufki dümene etkisiyle dalıyor(Dinamik dalış başlıyor).
D. İstenen derinliğe gelince kıç ufki dümen meyli düzeltip dalışı durduruyor.
E. Ağırlıklar ve trimi ayarlanmış pozisyon: Dümenler sıfırlanmış.

Dalmış Denizaltının Satıha çıkarılması sarnıçlara yüksek basınçlı hava verilmesiyle sağlanır. Denizaltı umkuna gelip nötr sephiyeye geçtikten sonra dalma sarnıçlarının tepesindeki hava kaçıran valfları emniyet için kapanır. Leğen içinde su dolu ters bardak benzetmesini kullanabileceğimiz pozisyonu alırlar. İçine bir pipetle hava üflediğimizde bardağın pozitif sepiye kazanıp su yüzeyine çıkması gibi Denizaltıda yüksek basınç hava tüplerindeki havadan bir miktar dalma sarnıçlarına üfleyerek satha çıkar. Harcadıkları 250 kg/cm^2 basıncındaki havayı, yüksek tazyik hava kompresörleri ile 250 kez sıkıştırılmış ve ısınmış halde soğuması için mukavim tekne dışına form tekne içine monteli çok sayıdaki tüplerde depolarlar. Tüpler tam dolu haldeyken Denizaltıya çok kez satıh ameliyesini yaptırabilir. Ayrıca bu hava, dalgıç regülatörleri gibi regülatörlerle basıncı düşürülerek birçok işlemler için kullanılabilir. Örneğin bataryayı motora bağlayan yüksek akım şalterlerini yay basıncına karşı kurmak-kapamak için 10kg/cm^2 basıncında hava kullanılır. Hava kaçırılınca yay, şalteri açar.

4.2.3 İtici güç

Klasik(Dizelli) Denizaltının itici gücü, 1890larda geliştirilmiş Ward-Leonard sistemine dayanır. AC Motor-Jeneratör-DC Motor bu sistemin orijinal halidir. Sistem; motor verimindeki en az kayıp üzerine kurulmuştur. Denizaltıda uygulanışı; Dizel-jeneratör-batarya-dc elektrik motoru şeklindedir. Batarya aradan çıkartılıp Dizel-jeneratör-dc elektrik motoru şeklinde su üstü seyirlerinde uygulanmaktadır.

Bataryalar; tasarıma göre değişen çok sayıdaki pilden oluşur. Öyleki bazı dizaynların; dalmış tonajının üçte birini bataryalar oluşturmaktadır.

Günümüzde Nükleer olmayan Denizaltılar için pratik ve güvenilir bir Havadan Bağımsız Tahrik (AIP) özelliği en son üretilen konvansiyonel Denizaltı tasarımlarında kullanılmıştır. İsveç'li Gotland sınıfında Stirling motoru, Alman Tip 212'sinde yakıt hücreleri ve Fransız Agosta'sında Mesma sistemini kullanmaktadır. Bugüne kadar geliştirilen ve kullanılan başlıca itici güç sistemleri;

Stirling dönüşüm motoru: Dıştan yanmalı bir makinedir. Yüzde kırk kadar bir termal etkinlik sağlayacak kapasitede gelişmiş bir piston motorudur. Motorini Okside edici olarak sıvı Oksijen kullanılmaktadır. Bu teknoloji son beş yılda çok hızlı gelişti ve İsveç Denizaltısı "Nacken"de başarılı denemeler gerçekleştirilmesinin ardından Stirling dönüşümlü motorları yeni A-19 Gotland sınıfı Denizaltılarda uygulanmaya başlandı. Gotland, Dünyadaki ilk modern havadan bağımsız Denizaltı olma özelliğini taşımaktadır. Yapılan tecrübelerde Gotland 14 gün 5 Mil süratle hiç şnorkel yapmadan intikal edebilmiştir.

Yakıt hücresi; Bir oksidant ile bir yakıtı kimyasal olarak birleştirmek suretiyle elektrik üretir. Yakıt Pilleri gürültüsüz çalışabilen elektrokimyasal enerji dönüştürücüleridir. Transformer ve jeneratöre ihtiyaç duyulmadığından elektriki ve mekanik kayıplar yoktur. Sistemde kullanılan Hidrojen ve Oksijen gazı mukavim tekne dışındaki tanklarda taşınır. Nitrojen gazı inert gaz olup emniyet maksadıyla gemi içindeki şişelerde depolanır. Çoktan beri derin sualtı kurtarma araçlarında kullanılmaktadırlar ve uzay programında uzun zamandır tatbik edilmişlerdir. Yakıt Pili sistemi münferit olarak, batarya sistemi ile paralel olarak veya bataryayı şarj etme maksatlı kullanılabilir. Yakıt hücresi teknolojisi U–1 Denizaltısında 1989–1991 arasında Alman Donanması tarafından test edilmiştir. Bu geminin uzatılmış yapısında 16 yakıt hücresi vardı ve toplam 400 KW'lık üretim yapılmaktaydı. Bu da pilleri 50 dakika içinde şarj etmek için yeterliydi. Bu çok başarılı denemelerin sonucu olarak, Alman Denizaltılarının bir sonraki sınıfı olan Tip 212'lerin standart olarak birer yakıt hücresine sahip olmaları kararlaştırıldı. Tip 212 Sınıfı Denizaltıların Alman Deniz Kuvvetleri için inşa edilen ilk gemisi 2002 yılında hizmete girmiştir. Hybrid Sisteme sahip olan 212 sınıfları havadan bağımsız sisteme

ilaveten yüksek süratlerde kullanmak için klasik Dizel Elektrik sisteme de sahiptir. Deniz tecrübelerinde 212 sınıfı Denizaltı 4 knot sürat ile 3000 Mil intikal edebilmiştir.

Mesma sistemi; Etanol ve sıvı Oksijenin kapalı-devrede yakılması prensibine dayanır. Ana prensibi havadan bağımsız buhar için enerji teminidir. Sistem, buhar ve yakıt çevrimleri, süper ısıtıcı, türbin, jenaratör grubu ve kondansatörden oluşmaktadır. Yanma havası olarak ve gemi havasını iklimlendirmede sıvı Oksijen kullanılmaktadır. Bu sistem bir Denizaltının sualtı dayanıklılığını üç dört katına çıkarabilmektedir. Fransız Yapımı Agosta-90 Sınıfı Denizaltı Dünyadaki ilk Mesma Sistemine sahip Denizaltılar olup ilki 1999 yılı sonlarında hizmete girmiştir. MESMA sisteminin uygulandığı diğer Denizaltı Scorpene Sınıfı'dır.

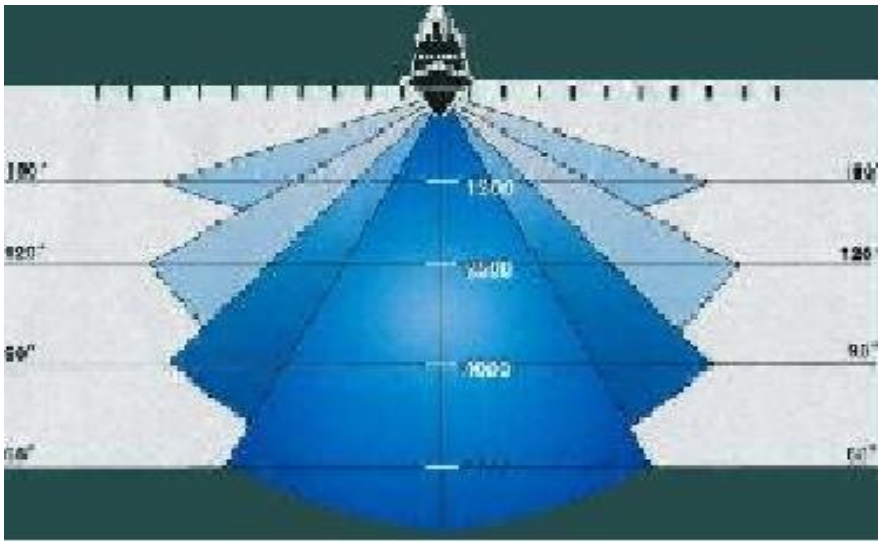
Kapalı Çevrim Dizel Sistemi; Dizel bir "kutu" içine alınmıştır. Bu kutu sistemin kapalı çevrim olarak çalışmasını sağlar. Tanklarda saklanan Oksijen yakma havası olarak dizelin kutusuna gönderilir, çalışması sonucu oluşan egzoz gazı deniz suyuna verilir. Sistem basit gözükmesine rağmen sistemin soğutulması problemlidir. İlk deneyen Stephan Dzhevetsky'dir. "Pochtovy" Denizaltısına uygulamıştır. Daha sonra 2.Dünya savaşında Ruslar "RADO" sistemi adıyla denemişlerdir.

Nukleer Denizaltı; reaktördeki "Çekirdek"'in kontrollü parçalanması esnasındaki açığa çıkan ısının, yüksek basınçlı buhar üretiminde kullanımı ve basınçlı buharın türbinde dönüş hareketine çevrilip, şaftla pervaneye iletilmesi ile itici güç temin edilmiştir. Ancak türbinin dönüş hareketi ve buharın türbindeki akış titreşimlerinin gürültülü olması, Denizaltının sessiz olma özelliğini ortadan kaldırmaktadır. Bu olumsuz duruma çözüm için türbin şafttan ayrılmış bir jeneratörü çevirmektedir. Elde edilen enerji; şafta bağlı elektrik motorunu çevirmekte, dönüş hareketi pervaneye iletilmektedir. Gelişmiş şok emicilerinin yardımıyla, günümüz nükleer Denizaltıları oldukça sessizdir. İlk nükleer Denizaltı USS Nautilus, 1954'de hizmete girmiştir. Yakıt ikmali yapmadan 146.000 km'si dalışta 170.000 km gitmiştir. 3 Ağustos 1958de Kuzey Kutbu altından geçmiştir. Sonraki güçlendirilmiş çekirdek yakıt ikmali ile bu mesafeler artmıştır. Günümüzde bu nükleer çekirdekler, ABD nükleer Denizaltılarına 640.000 km.lik erim sağlamaktadır.

4.3 Denizaltı Harekâtı ve Denizaltı Tespiti

Klasik Denizaltı, gizliliğini koruduğu süre içinde harekâtını etkin olarak yapar. Devamlı sakınma halindedir. Keşfolunmaktan sakınır, keşfolunmuşsa teması kaybettirmeye, temas devam ediyorsa hücumdan sakınır. Bu yüzden; Bataryasını ve temiz havasını çok dikkatli harcar, periskopu sınırlı kullanır, çok gerekmedikçe transmisyon yapmaz, kısa şnorkeller planlar, emercensi atışlara hazır olur, Düşmanın muhtemel taktiklerini bilir, su bombasına ve emercensi durumlara hazır olur, devamlı eğitim yapar ve aşağıdaki oşinografik şartları kullanarak, sakınmaya başlayacağı yeri ve zamanı bilir.

Ortam(oşinografik) Şartları: Su ortamının yoğunluğunda; radarın ve telsizin kullandığı yüksek frekans elektromanyetik dalgalar büyük kayba uğradığı için radar ve telsiz kullanılmaz. Fakat düşük frekanslı elektromanyetik dalgalar su içinde ilerleyebilirler. Düşük frekans elektromanyetik dalga üreten cihaz ve anten boyutları büyük olduğundan gemilerde kullanımı pratik değildir.



Şekil 4. 3 Denizaltı Sonarının Dip Tarama Yapması

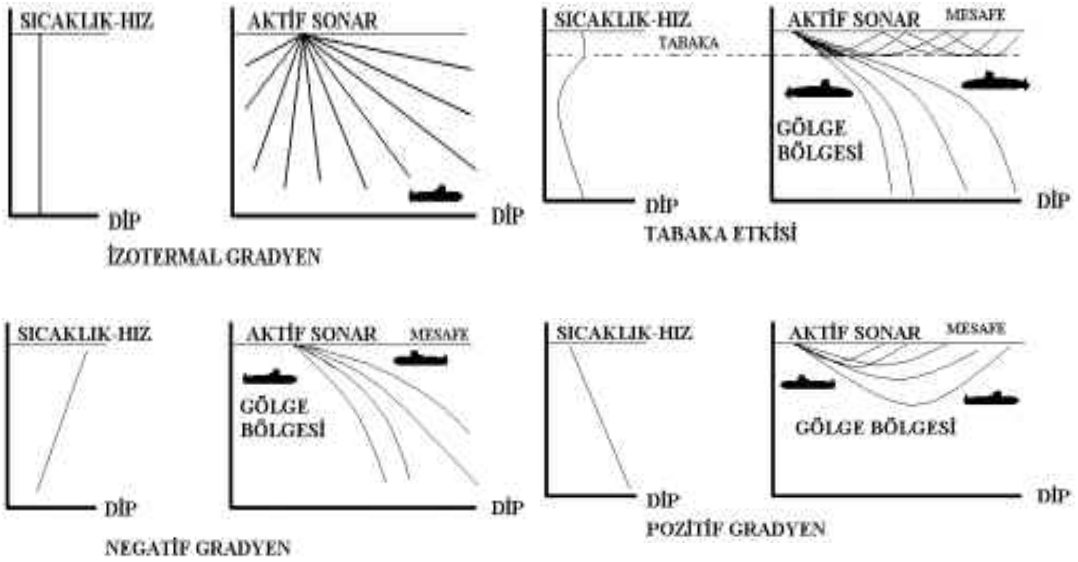
Yine yüksek frekans ses dalgaları da fazla uzağa gidemez. Bu dalgalar, Denizaltının başka gemi ile iletişimini sağlayan su altı telefonu, derinlikölçer(iskandil), çok kısa mesafe sonarlarda vs. kullanılır.

Sesin 39F sıcaklıktaki su içindeki yayılma hızı 4800 ft/sn.(1600yd/sn)'dir. Bu değere 3 faktör etki eder;

Su Sıcaklığı:	Her 1F'lık artış ses hızını 4–8 ft/sn arttırır,
Tuzluluk:	Her %0.01 artış ses hızını 4 ft/sn arttırır,
Basınç:	Her 100Ft'lik derinlik artışında ses hızı 2 ft/sn artar.

Alttaki şekiller için Sesin birkaç temel özelliği şunlardır,

- Su içinde ses dalgaları daima fazladan aza doğru kırılırlar. Sıcaktan soğuğa ve tuzludan tatlıya gibi,
- Frekans'ın ve ortam şartlarının önemi kadar kaynağın gücüde mesafeye etkilidir,
- Suyun soğuması ile sesin emilmesi fazlalaşır, mesafesi kısalır,
- Düşük frekanslı ses daha uzağa gider,
- Homojen bir ortamdan, farklı homojen ortama giren ses dalgası sınırda kırılır,
- Aşağıdaki şekil İzotermal şartlarda -26db Aktif Sonar ping'lerinin temsili yayılışlarını göstermektedir, yanlara olan skala derinlik skalasıyla eşdeğerdir ~5000mt .



Şekil 4. 4 Sonarın Hedefi Tespit Etmesi

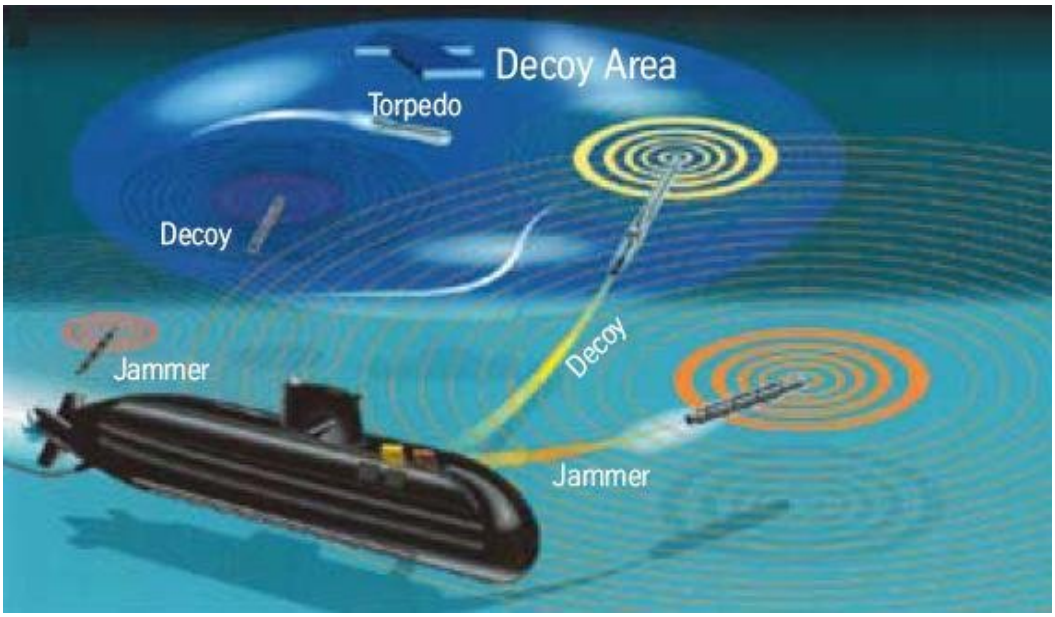
Denizaltıyı Tespit Etmek: Denizaltının tespitinde kullanılan yöntem ve cihazlar arttıkça yerleştirildiği platformlar çeşitlenmiştir. Bu yöntemler için gerekli cihazlar; karada, gemide, uçakta, helikopterde veya uyduda olabilir. Bu platformların sahip oldukları Denizaltı arama imkanları;

Karada; Deniz dibine döşenmiş sabit sonar alıcıları (Kontrol cihazı karada), Radar, ESM, Kızıl ötesi tarayıcı,
Gemide; Aktif/Pasif Sonar, Radar, ESM, Kızıl ötesi tarayıcı,
Helikopterde; Görerek tespit, Radar, ESM, Aktif/Pasif Sonar,
Uçakta; Görerek tespit, Radar, Aktif/Pasif Sonar şamandırası (Radyo vericili), Şnorkel egzost izi tespit, Denizaltının Dünyanın manyetik eğrilerinde neden olduğu bozulmayı tespit,
Uyduda; Görerek tespit, Kızıl ötesi tarama.

Görerek tespit öğleyin sakin havada Güneş ışınları, örneğin Akdeniz de 60 metreye kadar ulaşır ve Denizaltı varsa renk farkına neden olur. Bu fark yukardan hatta geniş bir sahayı gören uydu tarafından saptanabilir.

Kızıl ötesi tarama Şnorkel yapan Denizaltının egzoz gazlarının ve neden olduğu deniz suyu ısınmasının yaydığı kızılötesi ışınların saptanmasıdır.

Denizaltı Nasıl Yanıltır: Kendisine karşı harekât yapan gemi, uçak ve helikopterlere karşı Denizaltı bazı aldatıcılar kullanır. Yakın bir zamana kadar bunlar radar ekosu verecek biçimde yapılmış sahte periskoplar, deniz suyu ile kimyasal etkileşime girdiğinde köpürüp baloncuklar yayarak gürültüye neden olan maddeler ve çöp-kirli yağ olmuştur. Günümüzde aldatma kapsamına kendi sonarı ile arama yapan Homing torpidolarda dahildir. Aşağıdaki şekilde Circe firmasının geliştirdiği "Aldatıcılar" ve Sonarını Aktif modda yani arama modunda çalıştıran uçak, gemi, helikopter ve torpido sonarı ile aynı frekansta eko üreterek kendine yönelmelerine neden olan Decoy'lar ile, yine bu arama yapan sonarların bilhassa Denizaltı ile temasta olan torpido sonarının, bizden dönen ekoların şiddetinden daha kuvvetli sinyal üreterek torpidonun bizden temasının kırılmasını sağlayan ve ortamı akustik olarak karıştıran Jammer'ların kullanımları görülmektedir.



Şekil 4. 5 Denizaltının Decoyları Kullanması

Denizaltı, decoy'ların zaman ayarını önceden yaparak belli hatta dizer. Çalıştıkları zaman decoylar'dan oluşan perdenin arkasında gizlenerek ya da başka bir noktada daha sessiz kalarak, bunlara yönelecek tehdit unsurlarını rahat atış yapabileceği bir pozisyona çeker böylece taktik bir avantaj yakalar.

4.4 Denizaltı Nasıl Bilgi Toplar

4.4.1 Denizaltı Aktif Alıcıları

Klasik Denizaltının en büyük özelliği gizliliktir. Nükleer Denizaltılar gibi enerjisi bol olmadığından ve ani süratlenip torpido hızında kaçamadığı için, gizliliğine azami dikkat gösterir. Bu yüzden aktif sensörlerini, tespit edilme şartlarını iyi değerlendirerek kullanır. Nükleer Denizaltı ise sürat ve derinlik avantajına sahip olduğundan, aktif sensörlerinden aktif sonarını daha rahat kullanır.

Radar: Denizaltı, coğrafi konumunu veya hedeflerin pozisyonunu tespit için kullanılır. Belli bir bölgeye dar bir açıda, çok kısa süre için elektromanyetik intişar

yapar ve keser. Çevreden yansıysan dalgalar radar tarafından değerlendirilir ve böylece keşif yapılmış olur. Nadiren olmakla birlikte hedefe torpido atışından önce hedefin rota-sürat-mesafe parametrelerinin tayininde kullanılır. Radar, bir vericinin atmalar (pulse) halinde yaydığı radyo dalgalarının yolları üzerindeki cisimlerden yansıyarak geri dönmesi ve bir alıcı tarafından yakalanması ilkesi temelinde çalışır. Alıcı geri dönen yankıdan hedefin yönünü ve mesafesini, iki yankı arasında geçen zamandan da hızını belirleyebilir. Hedef doğrudan radara geliyorsa ya da uzaklaşıyorsa Doppler etkisi sayesinde hız da belirlenebilir.

Aktif Sonar: Radarla aynı esasa göre çalışır gönderdiği ses dalgalarının cisimlerden gelen yankılarını değerlendirir. Gönderilen "Ping"'in frekansı arttıkça hedefe çarpıp dönme mesafesi kısalmaktadır. Bu frekansın "Kesinliği" fazladır, cihazları az yer kaplar. Marmara denizi gibi kesafet çeşitliliği nedeniyle tabakası fazla denizlerde yüksek frekansın etkinliği iyice azalır. Alçak frekans uzak mesafelere gidebilir fakat bu frekansın seçiciliği az ve cihazları geniş yer kaplar. Klasik Denizaltı için dikkatle kullanılması gereken cihazdır. Denizaltı Harekâtı bölümünde incelenen "Ortam Şartlarına" bağlı olarak "Çok uzak mesafeler"'den duyulabilirler.

4.4.2 Denizaltı Pasif Alıcıları

Periskop: 1854 yılında Fransız Marie Dawey, aynalarla ilk periskobu yapmış 1872'de prizmaları kullanmıştır. Amerikalı Thomas H. Doughty'nin iç savaş esnasında Red River'da harekât yapan Monitör Osage'ın taretine bir boru içine koyduğu aynalarla nehir setleri üstünden Konfederasyon birliklerine atışlar yapması periskop fikrinin kabaca ilk kullanımını teşkil eder. Periskop'un gelişimde iki kişi rol oynamıştır. 1902de; Protector dizaynında dışarıyı görmek için, merceklerle yaptığı "Omniscope yada Skalomniscope" adını verdiği buluşu ile Simon Lake ve Periskobu geliştirip Hollanda yapımı İngiliz Denizaltılarına uygulayan Dublinli bir teleskop imalatçısı: Sir Howard Grubb (1844–1931). Günümüz Denizaltılarında; prizmadan ve merceklerden oluşan periskoplara radar, lazer mesafe ölçer, tv kamerası, fotoğraf makinesi, Elektromanyetik dalga tespit anteni(ESM), UHF anteni, gece görüş

sistemi, infrared alıcı ve ışıkla haberleşme (Mors) için lamba konmaktadır. Data Fiber Optik kablolarla iletilmektedir.

Pasif Sonar: Su altındaki her türlü sesi dinlemeye imkan veren cihazdır. Tekne dışındaki Hydrphone denilen sensörlerine-alıngaçlarına gelen ses titreşimlerinin, düşük voltajlarda elektrik enerjisi dönüşmesi esasına göre çalışır. Yakın tarihe kadar Operatörlerin kulak hassasiyeti ve tecrübesi ile etkinleşen bu cihaz; frekans bandının genişletilmesi ve kütüphanesine, su altında duyulabilecek sesleri tanıma için karşılaştırma yapabileceği örnekler kaydedilmesi sayesinde, operatöre net analiz sonuçları vermekte ve tespitinde yardımcı olmaktadır.

Elektromanyetik Dalgaları Tespit(ESM): Gemi, uçak veya karadan yapılan her türlü elektromanyetik intişarı (Radar veya telsiz yayınını) tespit eder ve ekranında yönünü görüntüler. Eğer gelen elektromanyetik dalgayı analiz edebilme imkanı varsa hafızasına kaydedilmiş bilgilerle karşılaştırarak gemi ismine kadar tanımlar.

Akustik Mesafe Bulucu: Bir kaynaktan yayılan ve sudaki hızı bilinen sesin; Denizaltı boyunca, eşit aralıklarla konan 3 hydrophona ve her birine, belli açılar içinde ve farklı zamanlarda ulaşması ile oluşan üçgenin analizini yapar.

4.5 Denizaltı Silahları

4.5.1 Torpidolar

Heavyweight, Lightweight Torpidolar: Her iki tip torpidoda Denizaltı ve suüstü gemilerinden atılabilir. Lightweight tipleri uçaklardan da atılabilmektedir. İtiş sistemi, Güdüm sistemi ve Harp Başlığı ana bölümlerinden oluşur. Harp başlıkları çarpma veya bilgisayarının tetiklemesiyle patlarlar. Hemen hepsinin Homing (Sesi takip edebilme ve kendi sonarı ile hedefi arayıp bulma) özelliği ile de torpidolar, ani ve uzaktan geniş hücum seçenekleri sunmaktadır.



Şekil 4. 6 Çeşitli Torpidolar

Roket İticili Torpidolar: Su içindeki itişini patlayıcısının gücünü kullanarak yapar. 230–300 mil-saat hızında 3.75–20 mil menzile gidebilmektedir.

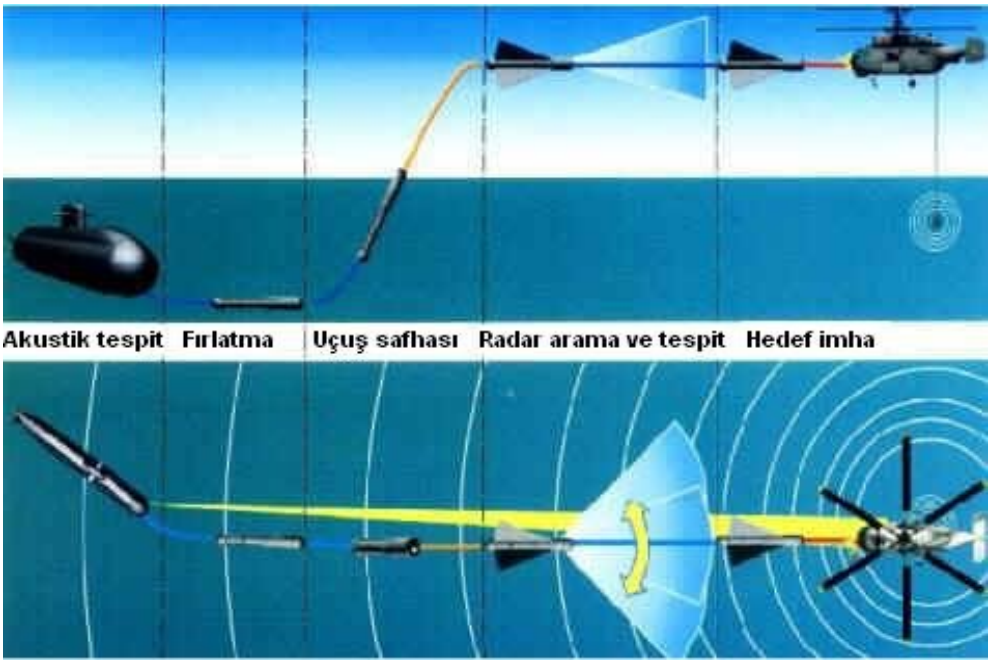
4.5.2 Füzeler

Ballistic Füzeler: Kıtalar arası balistik füze atan nükleer Denizaltılarda, dikine yerleştirilmiş ve kendine özgü kovanlardaki füze, çok yüksek basınçlı hava veya buhar ile su üstüne fırlatılmakta ve yakıtı ateşlenip uçuşuna başlamaktadır. Çin, Fransa, İngiltere, ABD ve Rusya sahiptir.

Cruise Füzeler: Cruise füzeler nükleer veya 450 kilo gibi tipik bir konvansiyonel başlığı, balistik füze menzilindeki bir "Nokta" hedefe daha isabetli ve daha ucuz götürebilmektedir. 19 ülkede üretilmekte ve 54 ülkeye ihraç edilmektedir. Klasik Denizaltılar kovanlarından Harpoon gibi füzeleri atabilmektedirler. Füzeler kendi muhafazaları ile atılmakta, satha gelirken otomatik ateşlenmekte ve muhafazasını parçalayıp uçuşuna başlamaktadırlar. SSBN'ler de daha ufak saldırı Denizaltılarından da atılabilen Harpoon, Cruise-Tomahawk füzelerini de atabilmektedirler.

Anti-Ship Füzeler: Su üstü gemilerine atılan kısa menzil füzelerdir. Harpoon veya Exsocet gibi füzelerin bu modifikasyonları vardır ve daha uzun menzillere

sahiptirler. Denizaltı araması yapan alçak uçuştaki uçağa ya da helikoptere karşı kullanılan ve periskopun baktığı yöne ateşlenen ısıya duyarlı, ufak, kısa menzil savunma maksatlı füzelerde ayrı bir sınıflandırmaya girseler de gemiye karşı kullanılma kapasiteleri vardır. Alttaki şekilde Sonarıyla arama yapan helikoptere atılan Triton füzesinin paterni görülmektedir.



Şekil 4. 7 Torpidonun Hedefini Tespit Etmesi

Bu tip füzelerin kısa menzilli olanları, satha yakın olmaları ve ebatları açısından yelken içindeki kovanlarında çok miktarda konuşlandırılmaktadırlar. Periskopta görülen uçan veya yüzen ufak hedef kerterizine ani atışlarda kullanılmaktadır. Hedefin ısı kaynağına giderler. Daha uzun menzilli olanları "Ufuk ötesi atışlar" için Radar, ESM, Pasif-Aktif sonar'dan aldıkları parametrelere göre pusisleri ile de atılırlar. Hedefin radar sinyaline kilitlenirler, kızıl ötesi ya da aktif arama yaparlar. Her iki tip taktik durum ve yakın tehdidin artması-kaçılamamasına göre kullanılmaktadır.

Anti-Submarine Rockets: Su üstü gemisinden veya denizatlıdan atılabilmektedirler. Torpido veya Nükleer Su bombası taşıyabilmektedirler.

4.5.3 Mayınlar

Mayınlar; Moore-Demirli mayınlar ve Sea flor-Bottom-Dip Mayını olarak iki temel tip'dirler. İki tip te genelde Akustik (acoustic mines) ya da Manyetik olarak (magnetic mines) etkin olmaktadırlar.

Moore-Demirli mayınlar: Bu mayınlar PM–1 (acoustic) ve PM–2 (Buz altı için antenli tip) etkileşimli mayınlardır. PM–2 özellikle buz tabakası altındaki Denizaltılar için kullanılmışlardır. Mayının anten sistemi 3 antenden oluşmaktadır. Üst, orta ve alt. Antenlerin her biri 2 elektrot ile "İlk Kurulma" ünitinin transformerinin bobinine bağlanmıştır. Denizaltının etrafındaki deniz suyunun electrolit özelliğinden dolayı oluşan manyetik alanın ürettiği sinyal bu antenler vasıtasıyla algılanır. Belli bir sinyal şiddetinde transformerinden ikazlanan mayın patlar. Akustik olanlar transduserine gelen sedanın şiddetinin ürettiği akım kuvveti ile aktif olurlar. Bu mayınlar TNT'den daha güçlü "Deniz karışımı" denen bir patlayıcı ile donatılır.

Sea floor-Bottom-Dip Mayını: Modern Dip mayınları; gemilerin fiziken oluşturduğu ses, manyetik, hidrodinamik basınç, elektrik sahalarını algılayan sensörlerin patlattığı çok kanaldan ikazlanan patlayıcılar ile donatılmışlardır. Çalışma şekilleri, 50–60 mt. yakından geçen gemiden etkilenen ve aktive olan çok hassas sensörleri sayesinde çalışır. Bu faktör; zamansal geciktirme, gemi sayma, ikazlanma tip seçenekleri ve uzaktan telekontrol olanağı ile ayarlanabilmekte ve mayın tarama temizleme yöntemleri atlatılabilmektedir. Döküldükleri deniz yatağında çamura gömülerek gizlenmekte ve tespiti zorlaşmaktadır. Aynı zamanda dip mayınları, mayın tarayıcıların önünde harekât yapan mayın avlayıcı araçları tespit ve imha olanakları ile donatılabilmektedir. Dip mayınlarının bünyesi 20 yıl ve bataryaları 10 yıl depolanabilir. Döküldüğü yerden çıkarıldıktan sonra(dip basıncı kalktıktan sonra) 1 yıldan fazla öldürücülüğünü korur.

4.6 Denizaltılarımız

Türk Deniz Kuvvetleri'nin Denizaltı filosunun güncel durumu şu şekildedir:

6 adet Ay sınıfı (Tip 209 / 1200)
S347 Atılay
S348 Saldıray
S349 Batıray
S350 Yıldıray
S351 Doğanay
S352 Dolunay

1974 – 1989 arasında hizmete giren bu botların ilk üçü HDW Kiel, geri kalanları Gölcük tersanelerinde inşa edilmiştir. 1,250t deplasmana sahip olan bu Denizaltılar silah olarak klasik torpido, SST–4 ve Mk23, Mk37 ModII/III kullanmaktalar. İlk iki Denizaltının emekliliği planlanmaktadır. Geri kalan dört Denizaltı modernizasyona tabi tutulacak ancak modernizasyon programının içeriği henüz netleşmiş veya duyurulmuş değil. Silah, atış kontrol ve tahrik sistemlerinde iyileştirme beklenebilir.

4 adet Preveze sınıfı (Tip 209 / 1400)
S353 Preveze
S354 Sakarya
S355 18 Mart
S356 Anafartalar

Preveze sınıfı Denizaltılar 1993 – 1999 arasında hizmete girdiler. Modern atış kontrol ve silah sistemleriyle donanmış bu botlar Türk Denizaltı filosunun gençleşmesine önemli ölçüde katkıda bulundular. Preveze sınıfı Denizaltılar ile birlikte Türk Deniz Kuvvetleri UGM–84 Sub Harpoon kabiliyeti ile tanıştı. 1,450t deplasmana sahip bu Denizaltılar ayrıca Link–11 (ROL–11) data link sistemi sayesinde diğer su üstü ve hava unsurlarından veri transferi yaparak, taktik resme daha iyi hakim olabilmekteler. Preveze sınıfı botlar torpido olarak klasik torpido, Mk37 ModII/III ve Mk24 ModII Tigerfish kullanıyorlar.

4 adet Gür sınıfı (Tip 209 / 1400 Mod)
S357 Gür
S358 Çanakkale
S359 Burak Reis
S360 Birinci İnönü

Gür sınıfı, genel olarak Preveze sınıfı ile hemen hemen aynı özelliklere sahip olmakla birlikte, alt sistem bazında önemli farklılıkları mevcuttur. Gür sınıfı halen silah, muhabere ve atış kontrol sistemleri açısından benzerleri arasında en gelişmiş Denizaltılardandır. Gür sınıfı Denizaltılar, Preveze sınıfına ek olarak DM2A4 torpidolarını (ana silah olarak) kullanırlar.

5 DENİZALTI TAHRİK SİSTEMLERİ

Denizaltılar, tahrik sistemlerine göre Nükleer ve Konvansiyonel olarak sınıflandırılırlar.

5.1 Nükleer Denizaltılarda Tahrik Sistemleri

Denizin altında çok uzun sürelerle ve çok yüksek süratlerle kalabilme hedefinde elde edilen ilk ciddi başarı ABD tarafından inşa edilen Nautilus nükleer Denizaltısı ile elde edildi. Nautilus temelde ikinci Dünya savaşı sonrasında Almanya'dan elde edilen teknoloji ile tasarımı yapılan boyutları büyütülmüş bir Tip–21 türevi ile Japon I–400 karışımı bir gövdeye nükleer bir enerji santralinin yerleştirilmesiyle inşa edilmiştir.

Doğada mevcut bir madde olan uranyum topraktan çıkartıldığında çeşitli izotoplarının bir arada bulunduğu bir haldedir. Çekirdeğinde 92 proton bulunan uranyumun bu ham halinde, en ağırlarının çekirdeğinde 146 nötron (yaklaşık toplam kütlenin %99.3'ü), orta ağırlıktakilerin (%0.7) 143 nötron ve hafif olanların (<%0.01) 142 nötron mevcuttur. Bu üç izotopun tanımlanması için çekirdeklerindeki

proton ve nötron adetlerinin toplanmasıyla adlandırılırlar; uranyum–238, uranyum–235 ve uranyum–234.

Bir reaktörde yakıt olarak kullanılabilmesi için uranyum cevherinin işlenmesi ve içerdiği uranyum–235 izotopu miktarının kütle olarak %0.7' den %5 civarına yükseltilmesi gerekir. Uranyum zenginleştirme olarak adlandırılan bu işlem için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Zenginleştirildikten sonra uranyum çok yoğun miktarda ısı üretir. Bu ısı buhar üretmek için kullanılır ve bu buharla da bir buhar türbini işletilir. Bu yöntemin Denizaltıların sevk edilmesinde kullanılabileceğini fark eden ve ilk olarak uygulayan da 1954 yılında ABD donanması olmuştur.

Bu günden sonra gerek denizde gerekse de karada çok çeşitli türde nükleer reaktörler geliştirildi ve kullanıldı. Almanya, İsviçre, Fransa, ABD, Japonya gibi ülkeler başta olmak üzere halen geliştirilmeye devam ediliyor ve artık 4.nesil olarak adlandırılan reaktörler kullanılmaya başlanacak. Şu anda 5 ülke; ABD, Rusya, İngiltere, Fransa ve Çin nükleer sevk sitemlerine sahip Denizaltılar kullanmaktadır. 6. ülke yakında Hindistan (aslında bir süredir Rusya'dan kiraladığı Charlie sınıfı bir nükleer Denizaltıyı mürettebat yetiştirmek ve araştırma-geliştirme amacıyla kullandı) olacaktır. Ayrıca şu anda özellikle ekonomik koşulları sebebiyle çok yavaş ilerlese de Brezilya, Pakistan ve Arjantin'in de nükleer Denizaltı programları mevcuttur. Diğer geliştirilen tüm sistemlere açık bir üstünlük olarak yakıt takviyesine (ortalama 10 sene) ihtiyaç duymazlar. Bununla birlikte imal ve işletme maliyetlerinin aşırı yüksekliği ve radyoaktif bir sistem olmasından kaynaklanan riskler daha yaygın kullanımını şimdilik engellemektedir.

Nükleer Denizaltılarda, reaktörde açığa çıkan ısı ile yüksek basınçlı buhar üretilir. Bu basınçlı buhar türbinleri çevirerek itici gücü oluşturur. Nükleer reaktörler kullandıkları soğutucu türlerine göre sınıflandırılırlar. Reaktör soğutucularından beklenen temel nitelikler; düşük erime noktası, yüksek kaynama noktası, yapı üzerinde korozyona sebep olmama, düşük nötron soğurma kesiti, radyasyon dengesi, ısı dengesi, türbin sıvılarıyla etkileşime girmeme, yüksek ısı transfer katsayısı, düşük pompalama gücü gereksinimi olarak sayılabilir. Aslına bakılırsa hiçbir soğutucu akışkan bu niteliklerinin tümünü birden karşılayamaz ve hepsinin bazı üstünlükleri ve zaafları mevcuttur. Bu nedenle de pek çok reaktör türü geliştirilmiştir. Başlıca reaktör türleri şunlardır;

- Basınçlı sulu
- Kaynar sulu
- Ağır sulu
- Süperkritik sulu
- Organik (difenil, difeniloksit)
- Sıvı metalli (sodyum, potasyum, kurşun, bizmut ve bunların karışımları)
- Gazlı (hava, azot, karbondioksit, Helyum)
- Çözünmüş tuzlu

Bu reaktör türlerinden sadece ikisi Denizaltılarda kullanılır.

1.Basınçlı su soğutmalı reaktörler
2.Sıvı metal soğutmalı reaktörler

Basınçlı Su Soğutmalı Reaktörler: 1947 senesinde ABD nükleer Denizaltı programı başladığında tasarımda kaynar sulu reaktör kullanılması düşünülüyordu fakat o yıllarda bu alandaki zorlukların üstesinden gelinemediğinden nihayetinde basınçlı su soğutmalı bir sistem seçildi. İlk nükleer Denizaltı için tasarımı yapılan mark–1 adı verilen basınçlı su reaktörü 1953 senesinde çalışmaya başlamıştır. Bu modelden sonra özellikle ABD'de askeri ve sivil amaçlarla yoğun olarak basınçlı su tipi reaktörler kullanılmıştır. Basınçlı su reaktörlerinde füzyon ısısı soğutucu olarak kullanılan su ile denetim altına alınır.

Bu tip reaktörlerde iki devreli bir ısı iletme çevrimi kullanılır. Birinci çevrim reaktör ile buhar üreticisi arasında ikinci çevrim ise buhar üreticisi ile buhar türbini arasında işler. Birinci çevrimde akışkan sıcaklığı 290 C derece civarındadır. Sistemde bulunan basınç arttırıcı araç akışkan basıncını 150 atmosfer civarında tutarak kaynamaya engel olur. Sovyet-Rus Lira (Alfa) sınıfının hizmetten kaldırılmasından sonra bugün Dünyada mevcut tüm nükleer Denizaltılarda kullanılan reaktörler basınçlı su tipindedir. Genel olarak söyleyebiliriz ki;

- Su teknoljisi iyi bilinen bir teknolojidir
- Su ucuzdur
- Su nötron enerjisinin azaltmak açısından çok etkindir
- Yüksek ısı kapasitesine sahiptir

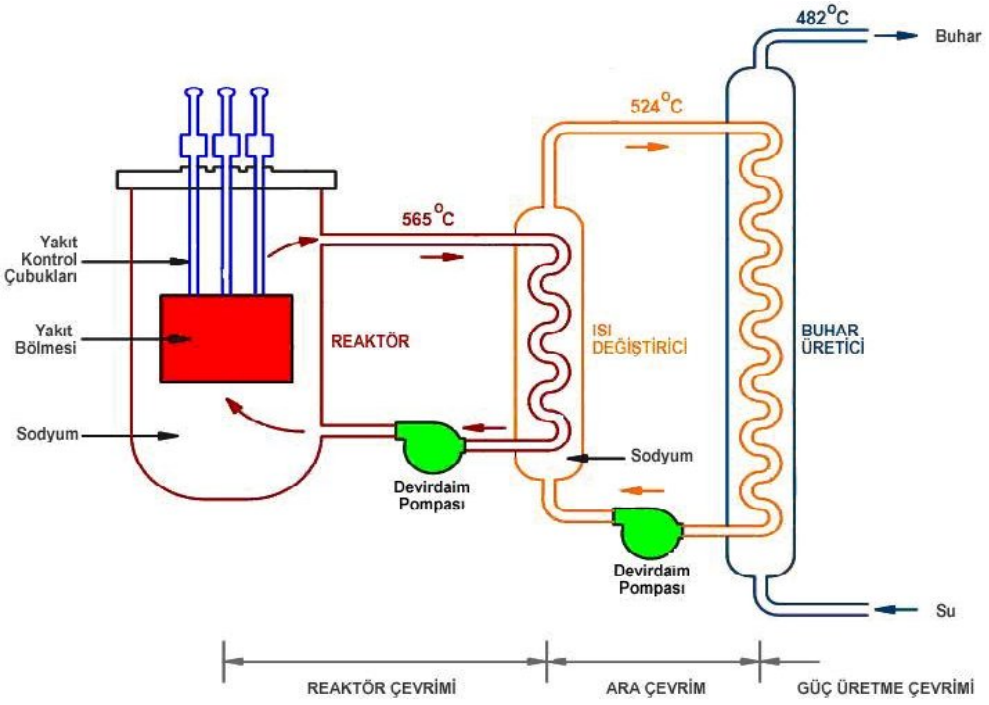
- Isı katsayısı negatiftir
- Olağan sızıntılara tahammül edebilir
- Füzyon ürünleri çevrime karışmaz
- Soğutucunun radyoaktivitesi saf tutulabildiği sürece kısa ömürlüdür
- Dönüşüm oranı yüksek olabilir
- Süper ısıtılmış buhar için ayrı bir ısıtıcı kullanarak mümkün olabilir

Basınçlı su reaktörlerinin başlıca zaafları ise aşağıdaki gibidir;

- Kaynamadan yüksek sıcaklıklar elde edebilmek için yüksek basınç altında tutulması gereklidir
- Yakıt elemanlarının imalatı pahalıdır
- Metalik yakıt elemanlarında sıcaklık sınırlıdır
- Çekirdekte füzyon ürünleri aktivitesi yüksektir
- Saf sıcak su yüksek derecede koroziftir. Bu nedenle birinci çevrimde özel ve pahalı maddeler kullanmak gereklidir
- Yakıt en azından bir miktar zenginleştirilmelidir
- Isı değiştirici ve kontrol çubuklarına ihtiyaç vardır
- Isı transferi sadece orta derecede etkindir
- Yakıtın yeniden işlenmesi oldukça güçtür
- Çekirdeğin boşaltılıp doldurulması için reaktörün kapatılması gereklidir
- Birinci çevrimde sızıntı olduğunda su buhara karışır
- Belirli şartlar altında su uranyum, toryum ve yapısal metallerle reaksiyona girer
- Düşük ısı transfer verimi sebebiyle ısı değiştirici, pompalar ve boru tesisatı göreceli olarak büyüktür. Bu da daha fazla ses izi anlamına gelir.

Sıvı Metal Soğutmalı Reaktörler: Sıvı metal temelli nükleer reaktörler alanında önde gelen ülkeler Rusya ve İsviçre'dir. Rusya bu tip reaktörleri bazı Denizaltılarında da kullanmıştır ve İsviçre günümüzde kara temelli yeni nesil sıvı metal reaktörler üzerinde yoğun olarak çalışmaktadır. ABD donanması da geçmişte bir Denizaltısında sıvı metal reaktör denediyse de karşılaşılan sorunlar sonucunda daha sonra bu programı iptal etmiştir.

Sıvı metal soğutmalı reaktörlerde kullanılan başlıca soğutucular; sodyum, potasyum, sodyum-potasyum karşımı, bizmut ve kurşun-bizmut karışımıdır. Kara reaktörlerinde genellikle sodyum, potasyum ve bunların karışımları kullanılır. Sodyum temelli bir sıvı metal soğutmalı reaktör çalışma şeması aşağıda görüldüğü gibidir.



Şekil 5. 1 Nükleer Tahrik Sistemi

Bazı korozyon ve erozyon sorunlarının giderilmesinden sonra kurşun-bizmut soğutmalı reaktörlere sahip 8 Rus Denizaltısı (Lira-Alfa sınıfı) 20 sene boyunca güç üretmiştir. Kurşun-bizmut içindeki Oksijen seviyesinin denetim altında tutulması korozyon dayanımı açısından çok önemlidir.

Sıvı metalli reaktörler çalışma hayatları boyunca soğutucularının çok iyi ısı transfer nitelikleri sebebiyle çok az yakıt çubuğu arızası yaparlar. Kurşun-bizmut-ötektik soğutucunun ürettiği radyoaktivite (polonyum- Po–210, yarı ömrü 138 gün olan bir alfa ışınımı) havuz sınırları içinde tutulur. Sıvı metaller sıra dışı ısı iletme niteliklerine sahiptir, modern türbinlerin ihtiyaç duydukları niteliklerdeki buharı çok yüksek sıcaklıklarda çalıştıklarından (birinci çevrimde, sodyumlu bir reaktör için

akışkan sıcaklığı 565 C derece civarındadır, bu değer basınçlı su reraktölerinin yaklaşık iki katıdır ve kurşun-bizmut reaktörlerinde daha da yüksektir) rahatça üretebilirler. İlave olarak düşük basınçta çalıştıklarından çok düşük pompa gücüne ihtiyaç duyarlar ve akışkan metal temelli olduğundan elektromanyetik pompalar kullanılabilir ki bu durum bir nükleer Denizaltının ses izi için çok önemli bir husustur. Aynı güç için bir sıvı metal reaktörün güç/ağırlık ve güç/hacim oranı diğer tüm reaktör türlerinden daha yüksektir.

Diğer taraftan yüksek ısıl gerilmeler reaktör sisteminin yapısal tasarımını güçleştirir. Soğutucunun Oksijenle ve ikinci çevrimdeki suyla temasının önlenmesi ciddi önlemler gerektirir, yakıt üzerindeki işlemler güçtür, donma ihtimaline karşı soğutucuyu tekrar eritmeye yönelik önlemler mevcut olmalıdır.

5.2 Konvansiyonel Denizaltılarda Tahrik Sistemleri

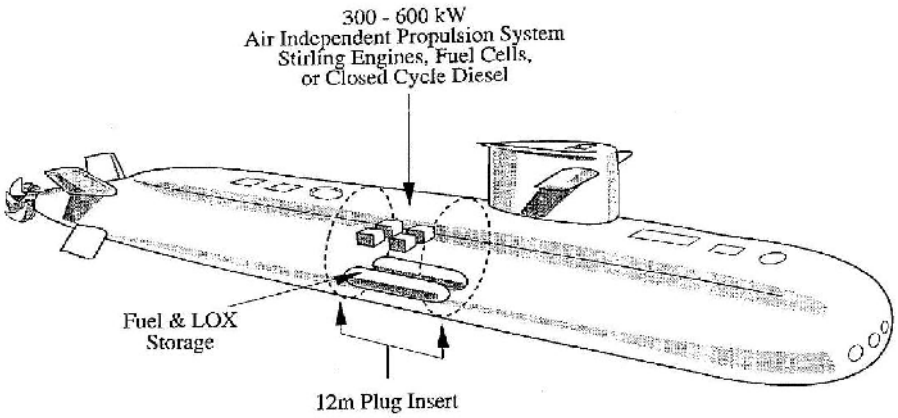
Konvansiyonel Denizaltılar iki kategoriye ayrılır.

5.2.1 Dizel-Elektrik Tahrik Sistemli Denizaltılar

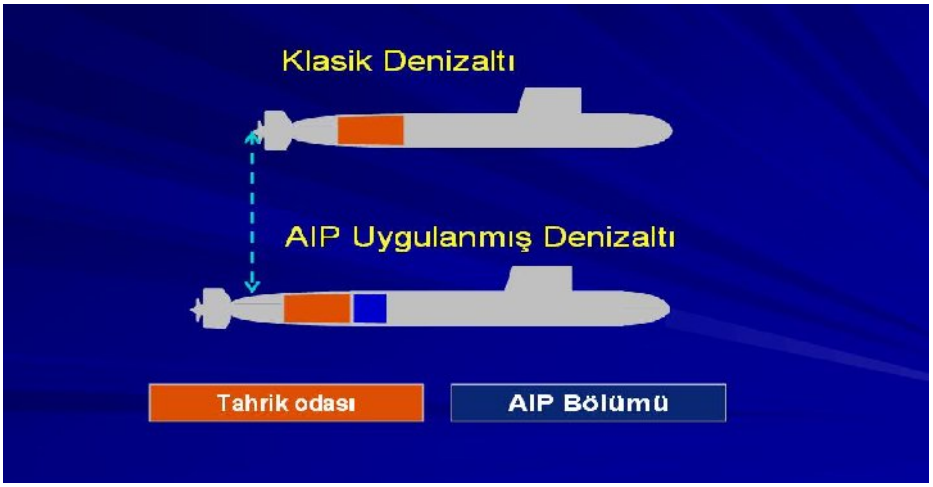
Klasik(dizelli) Denizaltının itici gücü, 1890larda geliştirilmiş Ward-Leonard sistemine dayanır. Bu sistemin orijinal hali ise AC Motor-Jeneratör-DC Motor biçimindedir. Sistem; motor verimindeki en az kayıp üzerine kurulmuştur. Denizaltıda uygulanışı; Dizel-jeneratör-batarya-dc elektrik motoru şeklindedir. Denizaltılarda itici güç için dizel motorundan elde edilen elektrik enerjisi kullanılır. Elektrik enerjisi bataryalarda toplanır ve elektrik motorlarına iletilir. Su altında dizel motor çalışamayacağı için (dizel motorun çalışması için ihtiyaç duyulan hava yüzünden) elektrik motorları ile hareket sağlanır. Bataryalar; tasarıma göre değişen çok sayıdaki pilden oluşur. Piller ağırlık olarak çok yer kaplayabilirler hatta bazı dizaynlarda dalmış tonajın üçte birini bataryalar oluşturmaktadır. Yüzeye çıkıldığı zaman dizel motorlar çalıştırılır. Böylelikle bataryalar yüklenir. Aynı zamanda dizel motor gücüyle Denizaltı harekette ettirilir.

5.2.2 Hibrit Tahrik Sistemli Denizaltılar(Dizel-Elektrik+AİP)

Konvansiyonel Denizaltılar bataryalarını şarj edebilmek için periyodik zamanlarda su üstüne çıkmak zorunda kalırlar. Bu süre zarfında Denizaltılar kolayca tespit edilip saldırıya uğrayabilirler. Hibrit tahrik sistemli Denizaltılarda var olan Dizel-Elektrik sistemine havadan bağımsız çalışan ısı motoru ya da Fuel Cell esaslı elektrik enerji kaynağı ilave edilir.(Şekil 5.2, Şekil 5.3) Böylece Denizaltı sualtında iken su üstüne çıkmadan elektrik üretebilir. Havadan Bağımsız Sistem(AIP) ile Denizaltı dalmış durumda iken üretilen elektrik; bataryaların şarj edilmesinde, tahrik sisteminde ve diğer elektrikli cihazların elektrik ihtiyaçlarında kullanılırlar. Böylece, bu tarz Denizaltılara klasik Dizel-Elektrik tahrik sistemli Denizaltılara göre 5–6 knot hızda daha fazla dalabilme ve hareket edebilme kabiliyeti kazandırılır.



Şekil 5. 2 Klasik Denizaltıya Yerleştirilen AIP Sistemi



Şekil 5. 3 AIP Uygulanmış Denizaltı ve Klasik Denizaltı Boy Farkı

AIP'nin bizlere sunduğu avantaj dışarıdan hava alımı yapmaksızın pilleri şarj edebilme yeteneğidir. Teoride, bu bize uzun süreli bariyer devriyeleri (yani pusuda beklemek) yeteneği verecektir ki bu da büyük oranda arttırılmış operasyon yeterliliği demektir. Bu sistemler fakir ülkelerin nükleer gücü olarak tanımlanmaktadır.

Bir Denizaltının gerçekten Denizaltı olarak nitelendirilebilmesi için görev seyrinin tamamına yakınını su altında geçirebilmesi gereklidir. Bunu sağlamakta yaşanan teknolojik zorluklar sebebiyle savaş görevlerinde ilk kullanılmaya başlandıkları yıllardan itibaren ikinci Dünya savaşına kadar geçen süre zarfında bu hedefe ulaşılamamıştır. 1.nesil diyebileceğimiz bu döneme ait Denizaltılar seyirlerinin büyük bölümünü bir gemi gibi su üstünde yapan ancak hedefe yaklaşmak ve saldırmak ya da kaçmak için kısa sürelerle dalabilen araçlardı. Ancak 2.Dünya savaşı bu alanda büyük gelişmeleri de beraberinde getirdi. Bu gelişmelerin önemli bir bölümü de geleneksel olarak Denizaltı teknolojisine her zaman büyük önem veren Almanlar tarafından gerçekleştirilmiştir. Radarların uçaklara bile yerleştirilebilir hale geldiği bu savaşta artık Denizaltılar için su üstünde seyretmek çatışmayı kaybetmek anlamına geliyordu. Bu sebeple ilk önemli gelişme dizel motorlarının su altında çalışmasına olanak veren şnorkel sisteminin geliştirilmesi oldu. Bunu tasarımcısının adıyla anılan Walter Türbini adlı tamamen havadan bağımsız ilk tahrik sistemi üzerinde yapılan geliştirme çalışmaları izledi. 2.Dünya savaşı sonrasında da Denizaltılar için havadan bağımsız sevk sistemi çalışmaları artarak devam etti. Bugüne kadar geliştirilip kullanılan havadan bağımsız sevk sistemi türleri, geliştirilme sırasına göre şunlardır;

1. Walter Türbini; Alman mühendis Helmuth Walter tarafından geliştirilen bir teknolojiye dayanır. Savaş sırasında Almanya, savaş sonrasında ise ele geçirilen Alman teknoloji ile İngiltere tarafından deneysel amaçlarla kullanılmıştır.
2. Kapalı Devre Dizel; Adından da anlaşılabileceği gibi dizel motoru çalıştırmak için gereken hava yerine Denizaltıda depolanan Oksijenle motorların çalıştırılması esasına dayanır. Tüm Havadan Bağımsız Tahrik sistemleri içinde teknolojik olarak en basiti olarak kabul edilebilir.
3. Stirling Motoru; İsveç tarafında Denizaltılara uyarlanan ve kendi Denizaltılarında başarıyla kullanılan Stirling motoru nükleer sonrası dönemde geliştirilen ve kullanıma giren ilk modern havadan bağımsız sevk sistemidir.

4. Mesma - Kapalı Devre Buhar Türbini; Fransa'nın geliştirdiği Havadan Bağımsız Tahrik sistemidir. Kapalı devre bir yakma hücresinde buhar üretilmesi ve bu buharla türbinlerin çalıştırılması esasıyla çalışır. Aslında buhar üretmek için nükleer reaktör yerine konvansiyonel bir yakıcı kullanan bir sistemdir.

5. Yakıt Hücresi; Almanların ve Rusların geliştirdiği Havadan Bağımsız Tahrik çözümüdür. Hiçbir hareketli parçaya sahip olmayan ve dolayısıyla tamamen sessiz çalışan ve elektriği tersine elektroliz gibi tamamen kimyasal yolla üreten bir sistemdir. Çeşitli alt türleri üzerinde araştırma - geliştirme çalışmaları sürmektedir.

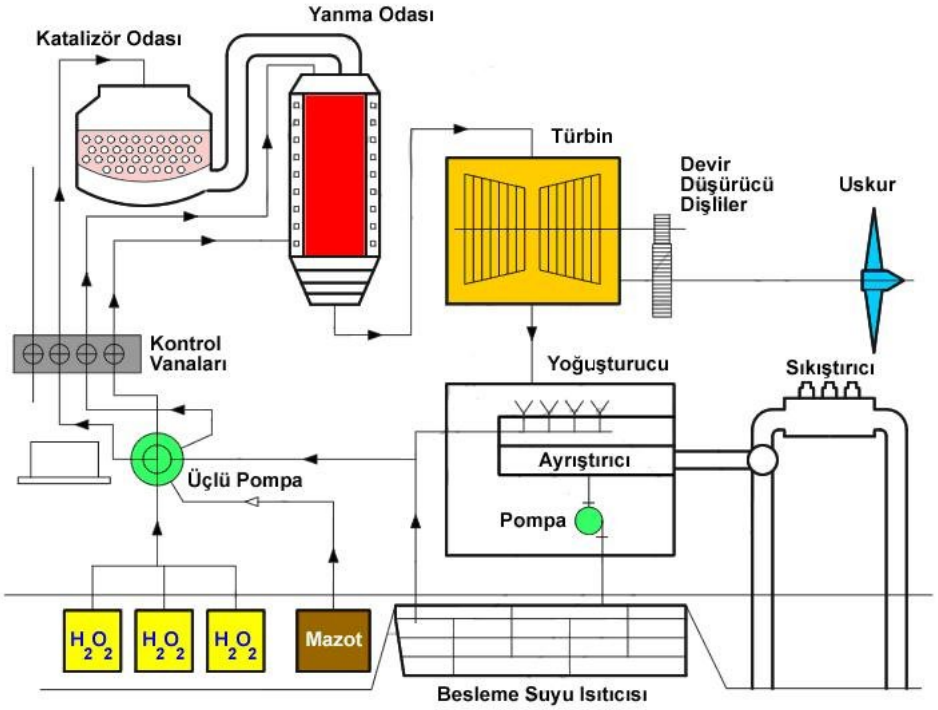
Nükleer olmayan Denizaltılar için pratik ve güvenilir bir Havadan Bağımsız Tahrik (AIP) özelliği en son üretilen konvansiyonel Denizaltı tasarımlarından ikisinde kullanılmıştır; İsveçli Gotland sınıfı, Alman Tip 212'si ve Fransız Agosta'sı. Bunların ilki bir Stirling motoru, ikincisi yakıt hücreleri ve üçüncüsü de MESMA sistemini kullanmaktadır.

5.2.2.1 Walter Türbini

Denizaltıcılık tarihinin başından beri en büyük hedef deniz yüzeyine bağımlılığı azaltıp olabildiği kadar uzun sürelerle sualtında kalabilmek oldu. Bu hedef üzerindeki ilk önemli isabet ise Alman bilim adamı Helmuth Walter tarafından kaydedilmiş gibi görünüyor. 1930'larda prof. Helmuth Walter Hidrojen Peroksidin muhtemel bir güç kaynağı olarak kullanılabilmesine yönelik çalışmalara başladı. Fakat benzer teknolojiye dayalı bir motor aynı dönemde Japonya tarafından bazı torpilleri sevk etmek için de kullanılıyordu ve bağımsız bir çalışma ile geliştirilmişlerdi. Bu Japon torpillerinden en bilinenleri ise ikinci Dünya savaşının en mükemmel torpilleri olan Tip 93 ve Tip 95'lerdir. 1940'ların ilk yıllarına gelindiğinde Walter'in yaptığı çalışmalar netice vermeye başladı ve Alman donanması bazı araştırma Denizaltıları inşa ederek bu sistemi denemek istedi.

Bugün Walter'in adıyla anılan bu kimyasal motor yüksek basınçlı buhar üretmek amacıyla kullanılan yanmayı sağlamak için havaya ihtiyaç duymuyordu. Elde edilen buhar ise 7.500hp gücündeki buhar türbinini işletmek için kullanılıyordu. Walter'in kimyasal motoru yüksek saflıkta (%100'e yakın) Hidrojen Peroksidin-H_2O_2

(perhidrol) Potasyum Permanganat temelli bir katalizör üzerinden, yüksek sıcaklık ve basınç altında hızla 2000°C sıcaklığında su buharı ve Oksijen karışımına ayrışması temeline dayanıyordu. Bu aşamada yüksek sıcaklıkta bulunan ve serbest Oksijen içeren sisteme verilen dizel yakıtıyla şiddetli bir yanma oluyor ve bu da basıncı ve ısıyı daha da arttırıyordu. Yükselen sıcaklığı kontrol altında tutmak için motora verilen ilave su ise aynı zamanda üretilen buhar miktarının arttırıyordu. Dolayısıyla Walter türbini hem buhar hem de gaz türbini teknolojilerini bir arada barındıran melez bir türbindir denilebilir. Buhar ve gaz karışımı yanma odasından türbine verilir ve oradan çıkınca da yoğuşturucuda su ve yanma sonucu meydana gelen Karbondioksit ayrıştırılır. Walter türbininin genel çalışma akışı şeması(Şeki 5.4) aşağıda görülebilir.



Şekil 5. 4 Walter Türbini Genel Çalışma Akışı Şeması

Bu motor tam güçte 4 saat çalıştıktan sonra yakıtını (Hidrojen Peroksit) tüketiyordu. 7.500hp üretmek için dakikada 235 litre yüksek saflıkta Hidrojen Peroksit, 32 litre dizel yakıtı ve 1.000 litre su gerekliydi ve bu tüketimi karşılayabilecek miktarda yakıt depolayabilmek önemli bir sorundu. Ayrıca tüm

kimyasal çevrim çok hassas olarak kontrol edilmeliydi ki bu da Denizaltı derinlik ve sürat değiştirdiğinde neredeyse imkânsızdı.

Denizaltı derine daldıkça, artan geriye basınç(hidrostatik) sebebiyle, üretilen güç de azalıyordu. Bu nedenle tam güç ancak yüzeye çok yakın seyredildiğinde mümkün olabiliyordu. Türbin 100 kadem (~30m) derinlikte ancak 5.500 hp güç üretebiliyordu ki bu da seyir süratini 25 knot'dan 20 knot'ın altına düşürüyordu. Derinlik artışıyla da bu güç kaybı daha da kötüleşiyordu.

Hidrojen Peroksit metaller üzerinde son derece yüksek bozucu etkilere sahiptir ve bu nedenle yakıt devrelerinde ve depolarında özel malzemeler kullanmayı gerektirir. Bu yakıtın kullanımında daha başka zorluklar da vardır. Örneğin, Hidrojen Peroksidin içinden geçtiği boru devrelerinde dik açılı dönüşler olmamalıdır. Aksi takdirde Hidrojen Peroksit bu dirseklerde birikip aniden patlayabilmektedir. Ayrıca ortamın çok temiz olması gerekir.

Almanya'da araştırma-geliştirme amaçlı 3 farklı modelde; V–80 (80 ton), Tip17A (250 ton), Tip17B (310 ton) 8 Denizaltı inşa edildi. Bu silahsız deneme Denizaltılarının bazıları sualtında 26 knot'lık süratler elde etti. O zamanlar Dünya denizlerinde kullanılan Denizaltıların ulaşabildikleri sualtı sürati 8 knot'ı geçemiyordu. Ayrıca bu sürat müttefiklerin DSH gemilerinden de 5 knot daha yüksekti çünkü bu gemiler 21 knot süratin üstünde Asdic'i (ilk gemiye yerleşik sonarlar) kullanamıyorlardı.

Savaş görevleri için inşa edilecek nihai tasarım olan Tip26'lar (inşası planlanan birkaç farklı Walter türbinli Denizaltı tasarımı mevcuttu) ise inşalarına başlandığı halde temelde yukarıda kısaca değinilen sorunlar bir türlü giderilemediğinden iptal edildi fakat bu tasarımdan kazanılan önemli gelişmeler sadece tahrik sistemi değiştirilerek Tip21 projesine aktarıldı.

Savaştan sonra Almanya'dan ele geçirilen bilgi ve teknolojilerin yardımıyla birkaç ülke Walter türbin sistemini geliştirmeye yönelik çalışmalara devam etti. 1950'lerde nükleer tahrik sistemlerin ortaya çıkmasıyla bu ülkelerin Walter türbinine ihtiyaçları kalmayınca zaten tehlikeli olan bu çalışmalara da son verildi.

İnşa edilen 3 Tip17B'den birini savaş sonrasında ABD tarafından savaş ganimeti olarak el konulup gemi ile ABD'ye götürüldü. 1948 yılına kadar incelendi ve sonra hurdaya ayrıldı. Diğerine ise İngiltere el koydu ve Meteorit adını vererek donanmasına kattı. Bu arada Helmuth Walter ve ekibini de Denizaltıyla birlikte İngiltereye getirdi ve daha sonra Tip26 türevi iki Walter türbinli deneysel gemi daha inşa etti. Uzun yıllar süren çalışmalar sonucunda başarılı bir sonuç elde edilemedi. Bu iki gemi tahrik sisteminden kaynaklanan patlamalar ve ölümler sonucunda hurdaya ayrıldı.

Fakat her şeye rağmen Hidrojen Peroksit temelli tahrik sistemleri bundan böyle Denizaltılarda olmasa bile torpillerde kullanılmak üzere daha da geliştirildi. Günümüzde bu teknolojiye sahip modern torpiller halen kullanılmaktadır. Rusya ve İsveç Hidrojen Peroksit temelli motorlar konusunda lider ülkelerdir. Yaşanan tüm gelişmelere rağmen Hidrojen Peroksit hâlâ dikkat gerektirmektedir. Yakın zaman önce yaşanan ve Rus Kursk Denizaltısının batıp mürettebatının tamamının ölmesine sebep olan kaza da böyle bir torpilde yaşanan Hidrojen Peroksit sızıntısı sebebiyle meydana gelmiştir.

5.2.2.2 Kapalı Çevrim Dizel Motorlu AİP

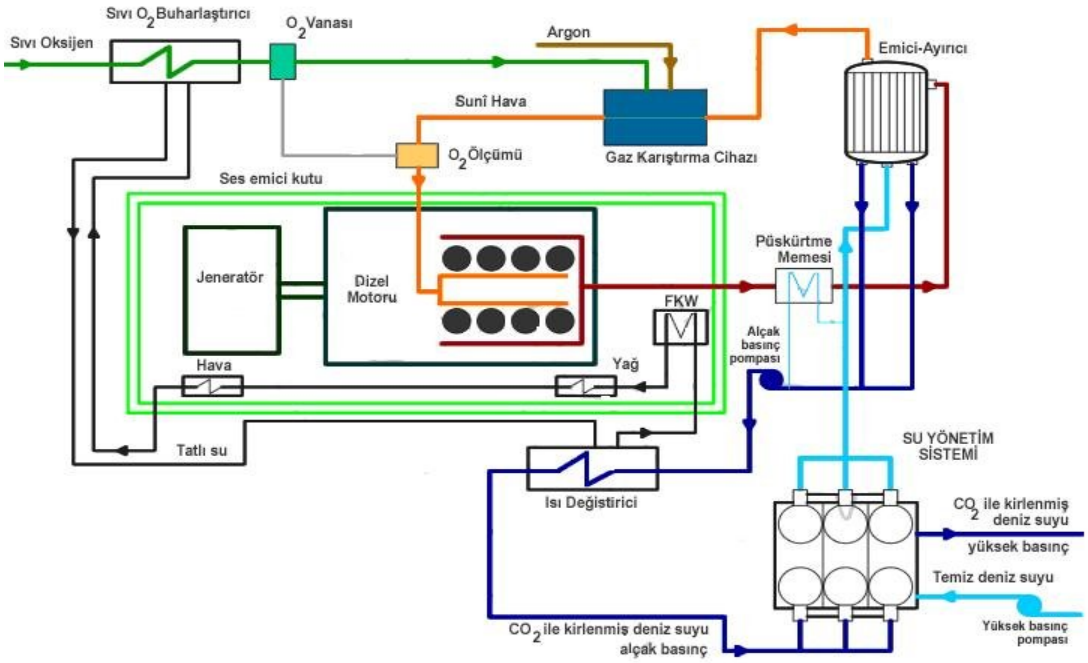
İkinci Dünya savaşı esnasında Denizaltılar için su üstünde seyretmenin giderek daha tehlikeli bir hâl alması sonucunda Denizaltıların sualtında daha fazla kalabilmesi için çalışmalar yapılmıştır. Özellikle tüm deniz stratejisini Denizaltılar üzerine kuran Almanya bu çalışmalara öncülük etmiştir. Özellikle walter türbini sistemindeki gecikmeler ve nihayetinde başarısızlık yaşanınca Almanya başka sistemler geliştirmek için çalıştı. Bunun sonucunda geliştirilmeye çalışılan sistemlerden biri de kapalı devre dizel (KDD) oldu. KDD basitçe normal bir dizel motorunu atmosferden emilen hava yerine Denizaltıda sıvı veya gaz halde depolanan Oksijen ile işletme yöntemine dayanmaktadır. Aslında dizel motoru doğrudan saf Oksijenle çalıştırılamaz bunu yerine depolanan Oksijen yine Denizaltıda depolanan bir asal gazla karıştırılarak meydana getirilen bir tür suni hava ile işletilir

Çalışmalar neticesinde Almanlar çalışmalarını bir Tip 7K Denizaltısında denedi. Amaç Denizaltıda depolanan Oksijen ile dizel motorlarını sualtında çalıştırmaktı fakat sonuç beklenen seviyeye ulaşamayan walter türbini sisteminden bile daha yetersiz kaldı. Yine ikinci Dünya savaşı yıllarında Sovyetler de bir Denizaltılarında kapalı devre dizel sistemi işletmek için yoğun çalışmalar yaptılarsa da onlar da tatmin edici bir sonuç elde edemedi. Karşılaşılan başlıca sorunlar; yeterli miktarda Oksijen depolayamama, yeterli çalışma güvenliğini sağlayamama, motordan çıkan yanmış gazların ayrıştırılmasının güçlüğü ve sualtında özellikle derin suda egzoz gazlarının Denizaltı dışına atılmasının güçlüğü olarak sıralanabilir.

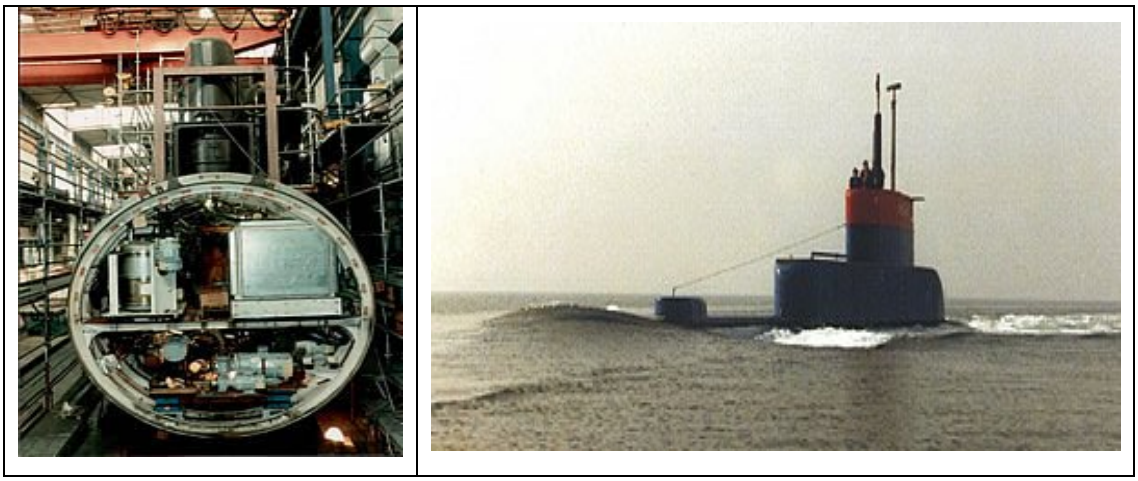
Bir kapalı devre dizel (KDD) sistemi yüzeyde veya şnorkel ile seyrederken normal dizel motoru gibi atmosferdeki havayı kullanarak çalışır yani motor açık çevrimde çalıştırılır, dalış halinde ise Denizaltıda sıvı olarak depolanan Oksijen ile bir asal gaz (çoğunlukla argon, bazen Helyum veya xenon) karışımının meydana getirdiği suni hava ile yani kapalı çevrimde çalıştırılır. Kapalı çevrim modunda motordaki yanma sonucu oluşan gazlar püskürtmeli soğutma sistemi vasıtasıyla 300–400 C dereceden 80 C ye kadar soğutulur. Sonra bu gazlar CO_2 emiciye beslenir. Emici ise gazları deniz suyu ile karıştırır ve sonra ayrıştırır. Bu ayrıştırma sonunda argon tekrar kullanılmak üzere emiş devresine gönderilirken karbondioksit vesaire atıklar suyla karıştırılıp Denizaltı dışına atılır.

KDD sistemleri özellikle Almanya, İngiltere, Hollanda ve İtalya'daki bazı şirketler tarafından yoğun olarak araştırılmıştır. İkinci Dünya savaşı sonrasında Ruslar tarafından M-401 Denizaltısına takılmıştır. 1940–1945 yılları arasında yapılan tecrübelerden sonra 1953–1957 yılları arasında 30 Quebec sınıfı Denizaltı hizmete sokulmuştur. Ancak donanmadaki hizmetleri boyunca bu gemilerde çeşitli yangınlar çıkmış ve bazı Denizaltılar batmıştır. 1970'den sonrada hizmetten çıkarılmışlardır. Ayrıca Almanlar tarafından 1993 yılında U-1(tip205) Denizaltısında da bu sistem kullanılmış ancak yapılan tecrübeler de yine teknik ve güvenlik problemleri ile karşılaşılmıştır. Dizeller aşırı gürültülü olduğundan sessizlik sağlanamamış ve sistemin kullanımından vazgeçilmiştir. Geçtiğimiz yıllarda İngiliz Marconi şirketi de kendi geliştirdiği bir KDD sisteminin Güney Kore'ye Tip 209'larının modernizasyonu için satmaya çalıştıysa da başarılı olamamıştır. Hollanda RDM tersanesi Moray 1400 tipi Denizaltılar için geliştirdiği Hibrit tahrik sistemini başarılı

şekilde test etmiş olup gemi her biri 2000 KW'lık olan üç dizel jeneratör den başka Denizaltının dalmış hız ihtiyacına göre her biri 300 KW'lık bir ya da iki kapalı çevrim dizel motor içeren özel bölüm ile desteklenmiştir. Hollanda Spectre Adında Kapalı Çevrim Dizel sistemini geliştirme çalışmalarına devam etmektedir. Aşağıdaki şekilde Alman U-1 Denizaltısına 1990'larda yerleştirilen modern KDD sisteminin çalışma şeması(Şekil 5.5) görülebilir..



Şekil 5. 5 KDD Genel Çalışma Akışı Şeması



Resim 5. 1 (solda) U1 gövde kesiti. Ana güvertenin iskelesinde bulunan gürültü azaltıcı kutu içinde kapalı devre dizel jeneratörü var. Onun sancağındaki cihaz ise

gaz emicisi-ayrıştırıcısı. (sağda) KDD sisteminin kullanıldığı tek askeri Denizaltı olan deneysel (eski) U1, bir Tip 205.

Modern KDD sistemlerinin diğer HBT'lere tek üstünlüğü mevcut dizel-elektrik Denizaltılara diğerlerine göre çok daha kolay ve düşük maliyetli olarak yerleştirilebilmesidir. Diğer taraftan KDD sistemi diğer rakiplerine göre başta yüksek gürültü izi olmak üzere %30–35 civarındaki düşük sistem verimi ve diğer çeşitli konularda daha geridedir ve artık kullanılması beklenmemektedir. Yine de rakiplerine göre düşük maliyetli olması sebebiyle gelecekte belki bazı üçüncü Dünya ülkelerinde tercih edilebilir. Alman tersanesi TNSW ile motor üretici firma MTU bu sistemi özellikle modernize yapılması gereken eski Denizaltılar için önermektedirler.

5.2.2.3 Stirling Motorlu AİP

Stirling motorunun mucidi Robert Stirling (1790–1878) kendi icadı olan bu motora hava motoru adını vermişti. O günlerin buhar motorları sıklıkla patlayıp yakınlarındaki insanları öldürdüğü halde Stirling'in motoru hiç patlamadı ve buhar motorlarından daha fazla güç üretebildi.1816'da Stirling yeni "hava motoru" için ilk patentini aldı. Bu ilk motor ve onu takip edenler 1940'lara, Helyum ve Hidrojen gibi diğer gazların da işletme akışkanı olarak kullanılmaya başlanmasına kadar "sıcak hava motoru" olarak adlandırıldılar.

Stirling motorları başlı başına bir motor sınıfını tanımlar. Bunlar sıcak havayı veya Helyum gibi diğer gazları kendi çalışma çevriminde tekrar tekrar kullanan kapalı devre motorlardır. Motorun içindeki gaz asla motor dışına atık olarak gönderilmez. Bunun yerine motor çevrimin bölümleri arasında kullanılır. Stirling motoru içindeki sıcak gaz soğuk rejeneratör içinden aktığında onu ısıtır. Bu olay havayı, ısısının geri kalanı kaybedeceği ve çevrimin tamamlanacağı motorun soğuk tarafına geçmeden önce bir miktar soğutur. Bu işlem, çevrimini her tamamladığında egzoz yoluyla kalan tüm ısısını dışarı atan içten yanmalı motorlarla karşılaştırılabilir.

Stirling motorları devamlı yanmalı motorlardır. Temiz çalışan bir motor yapmak istendiğinde bu büyük bir üstünlük sağlar. Elinize bir kibrit çöpü alıp birkaç

saniye yakın ve söndürün. En çok duman ne zaman çıktı? Yanmanın en parlak ve güçlü olduğu sırada değil, sönmek üzereyken ve söndükten sonra. Bu nedenle devamlı yanma işlemi, tekrarlanan yanma ve sönme işlemlerinden (içten yanmalı motorlarda olduğu gibi) çok daha temizdir. Bir Stirling Motorunda, motorun bir tarafı devamlı olarak ısıtılırken diğer tarafı devamlı olarak soğutulur. Hava (veya gaz) önce ısıtılacağı ve genleşeceği sıcak tarafa gönderilir. Bu etki pistonu iter. Sonra hava rejeneratöre (diğer çevrim için bir miktar ısıyı koruyacağı yere) oradan da soğuyacağı ve büzüleceği soğuk tarafa yönlendirilir ve pistonu kendine çeker. Motorun içindeki ısı değişimi pistonu hareket ettirecek basınç değişimini üretir ve motor çalışır. Yani sıcak ve soğuk bölümler arasındaki sıkışma ve genleşmeden mekanik hareket elde edilir. En büyük özelliği sessiz olmalarıdır. Bu sistemde yine bataryalar mevcut olup Stirling Makine tarafından çevrilen jeneratör ile bataryalar imla edilmektedir. Monte edilmesi çok kolaydır.

Stirling motoru dıştan yanmalı bir motor olup içten yanmalı motorlardan birkaç şekilde farklılık gösterir;

Motoru çalıştıran ısı silindirin içinde üretilmez. Bu nedenle stirling motoru herhangi bir yakıtla veya ısı kaynağıyla çalıştırmak mümkündür(güneş enerjisi gibi). Tabii ki bir stirling motorunun sıcak tarafı seçilen belirli ısı kaynağına veya yakıta göre tasarlanır.

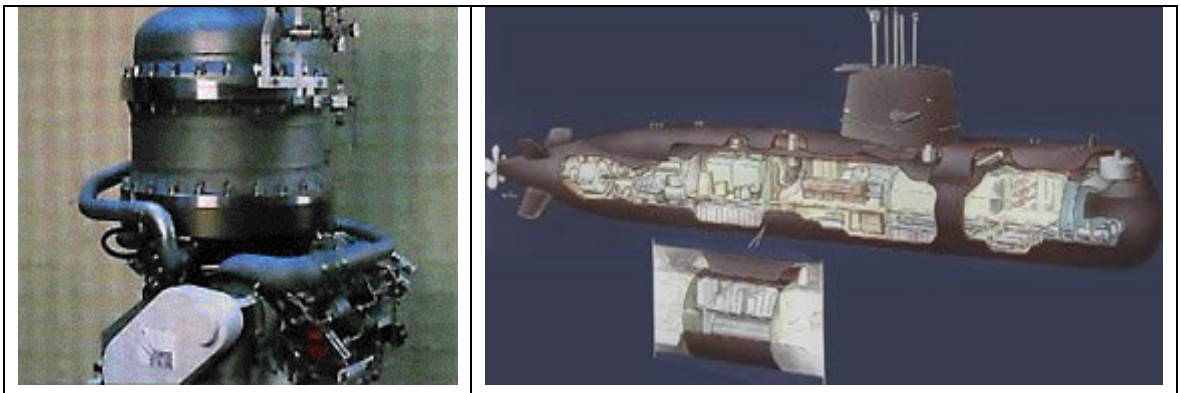
İkinci olarak Stirling motorlarında sübap bulunmaz.

Her çevrimde üretilen ısının bir miktarı rejeneratörde korunduğundan stirling motorları daha da verimli olurlar ve verimleri ısı motorları için mümkün olan en yüksek nazari verime yani Carnot çevrimine yakındır. Motoru çalıştıran gazın (günümüzde genellikle Helyum gibi asal gazlar kullanılır) ısıtılması Mesma sistemindeki gibi harici olarak yapıldığından yanma sonucu ortaya çıkan ürünlerin kontrol edilmesi örneğin kapalı devre dizel gibi içten yanmalı sistemlere göre belirgin bir kolaylık ve akustik üstünlük sağlar.

Bir stirling motoru ilk kez İsveç'in Kockums şirketi tarafından 1980'lerin ortalarında 500 tonluk bir Fransız sivil araştırma Denizaltısına yerleştirilmiştir. Saga

adlı bu Denizaltı 600m derinliğe dalabiliyordu ve içindeki Stirling motoru da 450 metreye kadar olan derinliklerde güç üretebiliyordu. Kockums Denizaltılar ve otomobillerde kullanmak amacıyla Stirling motorları üzerindeki araştırma geliştirme çalışmalarına 1960'larda başlamıştır.

Nükleer sonrası dönemdeki modern konvansiyonel askeri Denizaltı tarihinde ilk olarak kullanıma giren ve kendini ispatlayan AIP sistemi 2x75kW'lık V4–275 adlı bir Stirling sistemidir. V4–275 motorlarının ilki 1988 senesinde Näcken adlı Denizaltının ikiye kesilip, ayrıca inşa edilen 8m'lik AIP modülünün iki parçanın arasına eklenmesiyle hizmete girmiştir. Bu sistem Denizaltıda ilave olarak depolanan sıvı Oksijeni ve mevcut dizel yakıtını (düşük Sülfür içeren ve Ligroin olarak adlandırılan özel bir yakıt kullanılır) bir yanma odasında ve basınç altında yakarak üretilen ısı ile Stirling motorlarına bağlı alternatörler üzerinen mekanik enerjiyi elektriğe çevirir ve bu elektrik doğrudan ana elektrik motorunu çalıştırmak için veya aküleri doldurmak için kullanılır. Yanma odasının basıncı Denizaltının bulunduğu derinlikteki hidrostatik basınçtan daha yüksek olacak şekilde ayarlanır böylece yanma ürünlerinin deniz suyunda çözünerek Denizaltı dışına bir sıkıştırıcı vs kullanmadan atılabilmesi mümkün olur. İsveç donanması V4-275'den memnun kalınca daha sonra inşa edilen 3 adet 1.500 tonluk Gotland sınıfı gemide de bu AIP sistemi kullanılmıştır. Gotland sınıfı Denizaltılar 150kW'lık stirling sistemiyle 5 knot süratle hiç şnorkel yapmadan sualtında 14 gün devamlı seyir yapabilmektedir. Gotland sınıfı Denizaltılar da Stirling sistemine ilaveten klasik dizel elektrik sistemi de mevcuttur.



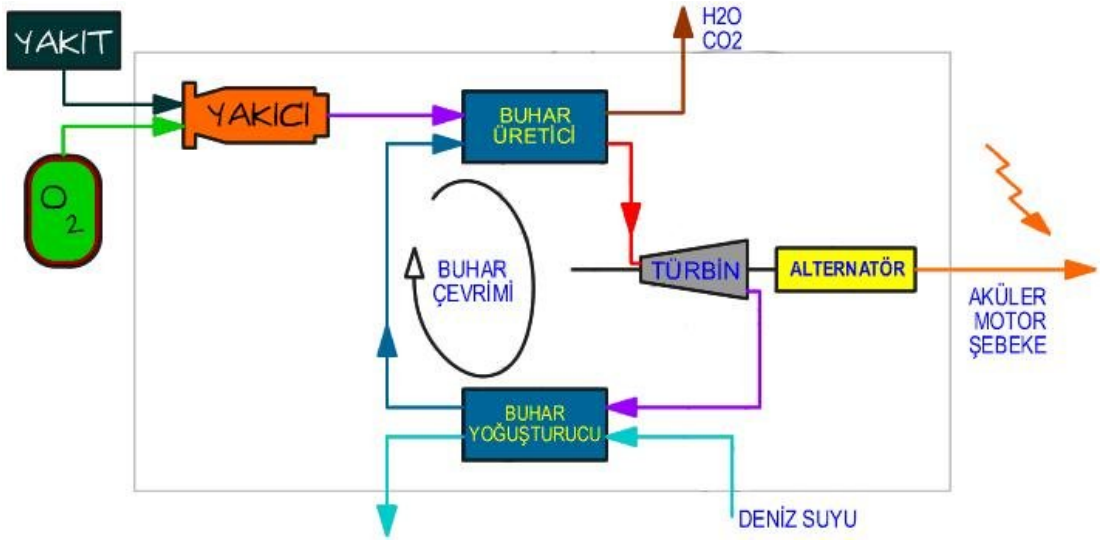
Resim 5. 2 Solda V4-275 motoru, Sağda Gotland sınıfı bir Denizaltının kesiti ve AIP sisteminin konumu.

AIP Stirling Motorun dezavantajı ise klasik pistonlu motorların aksine üretim için yüksek teknolojiye gereksinim duyması bunun yanında yüksek kaliteli yakıt istemesi ve düşük enerji konsantrasyonuna sahip olması olarak gösterilebilir. İsveç, donanmasına tümüyle Stirling AIP sistemin entegre edildiği tek ülkedir. Yeni nesil Denizaltılar üzerindeki Ar-Ge çalışmaları "Denizaltı 2000" adında İsveç, Danimarka, Norveç ortaklığıyla 1990 yılında başlamıştır. Geminin teknesi Amerikan projesi olan "Albecore" ile benzerlik göstermekte olup bu projede de Uzunluk-Genişlik oranı 7:1 oranındadır. Bu oran çok düşük gürültü seviyesi sağlamaktadır. Stirling motorlu tahrik sistemi su altında 15 gün kalma olanağı sağlamaktadır.

5.2.2.4 Mesma Sistemli AİP(Steam-Rankine Cycle)

MESMA (Module d'Energie Sous-Marin Autonome) temelde Fransız nükleer Denizaltı tasarımlarında kullanılan sistemin türevi olan bir kapalı devre buhar türbini sistemidir. Nükleer sistemden tek önemli farkı su buharını elde etmek amacıyla nükleer reaktör yerine daha farklı bir çevrim kullanmasıdır. Ana Prensibi havadan bağımsız buhar türbinidir. Mesma sistemi Buhar Devresi, Süper Isıtıcı, Türbin, Jeneratör Grubu Ve Kondansatörden Oluşan bir sistemdir. Yine yanma havası olarak sıvı oksijen kullanılmaktadır. Esasen bu sistem etanol ile Denizaltıda depolanan Oksijenin 60 atmosfer basınç altında yakılmasıyla elde edilen buharın işlettiği türbin-alternatör sistemidir. Yüksek basınç altında gerçekleşen bu yanma sayesinde yanma sonucu ortaya çıkan gazlar her derinlikte pompaya ihtiyaç olmadan dışarı atılabilir. Kapalı çevrimde yanan Oksijen ve Etanol konvansiyonel gemiye su altında 5 gün kalma imkânı sağlar. Sıvı Oksijen ve Etanol güvenliği arttırmak için geminin farklı bölmesinde yer alan ayrı tanklarda depolanır. Temel Etanol devresinde ki güç 150KW-600KW arasında değişir. İkinci Rankine buhar türbini tarafından sürülen jeneratör çıkışı ise 200KW değerindedir. Bu da gemiye 4 knot'da hereket kabiliyeti kazandırır ya da bataryaları şarj eder. Tüm Oksijen ve Etanol transfer işlemleri izlenir ve enerji ihtiyacına göre yapılır. Etanoldan elde edilen enerji buhar üretimi ve yardımcı ısıtma devresinde kullanılır. Bu devredeki buhar basıncı yaklaşık 1.8 Mpa olup sıcaklık ise yaklaşık 700 C derecedir. Bu yardımcı devre Rankine

prensibiyle(Buhar üreteci, Türbin, Yoğuşturucu, Pompa) çalışır. Sistemin temel çalışma şeması aşağıdaki gibidir.



Şekil 5. 6 MESMA Çalışma Akışı şeması

İlk olarak Pakistan donanması için inşa edilen Fransız yapımı 3adet Agosta-90 sınıfı Denizaltılar Dünyadaki ilk Mesma sistemine sahip Denizaltılar olup ilki 1999 yılı sonlarında hizmete girmiştir. Agosta 90B 200 KW'lık Mesma sistemiyle sualtında seyir süresini 3-5 kat artırabilmektedir. Ayrıca yine Fransızlar tarafından Scorpene sınıfı Denizaltılara da bu sistem monte edilmektedir. S 80 Scorpene sınıfı Denizaltılar İspanyol Deniz Kuvvetleri tarafından alınmak istenmektedir. Mesma sistemi eski Denizaltılara 9 metrelik ilave bölme takılarak monte edilebilmektedir.

Mesma diğer havadan bağımsız sistemlerden daha fazla güç üretebilir fakat verimi de diğerlerinden daha düşük, Oksijen tüketimi ise daha yüksektir. Bunun yanında yakıcıda meydana gelen 700 C derecelik ısının uzaydan tespit edilebilmesi ve deniz suyuna verilen sıcak CO_2'nin de gerek kızılötesi gerekse kimyasal algılayıcılarla belirlenebilmesi ihtimali bu sistem için önemli bir sakınca olarak kabul edilebilir.

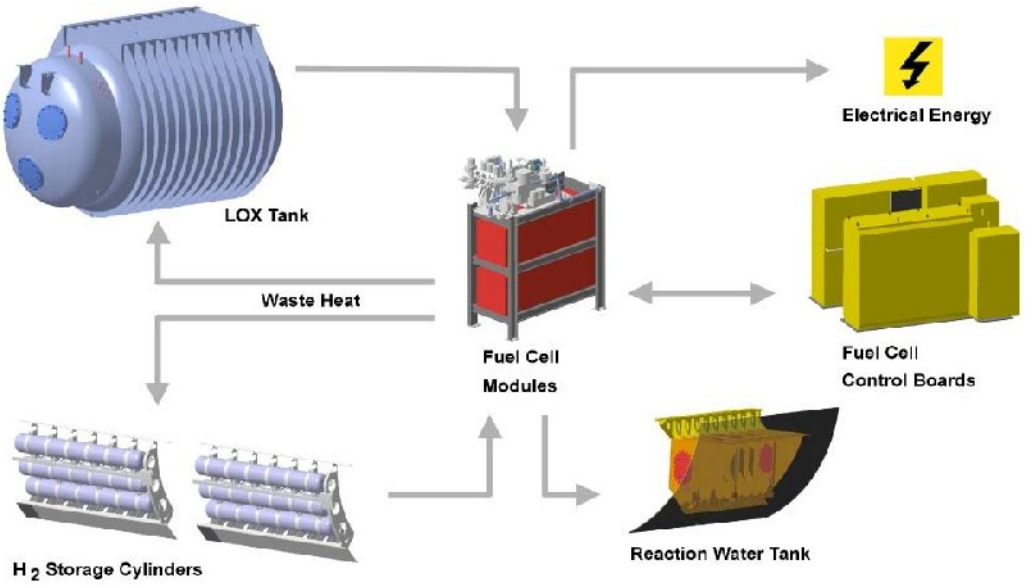
5.2.2.5 Fuel Cell'li AİP

5.2.2.5.1 Genel Bakış

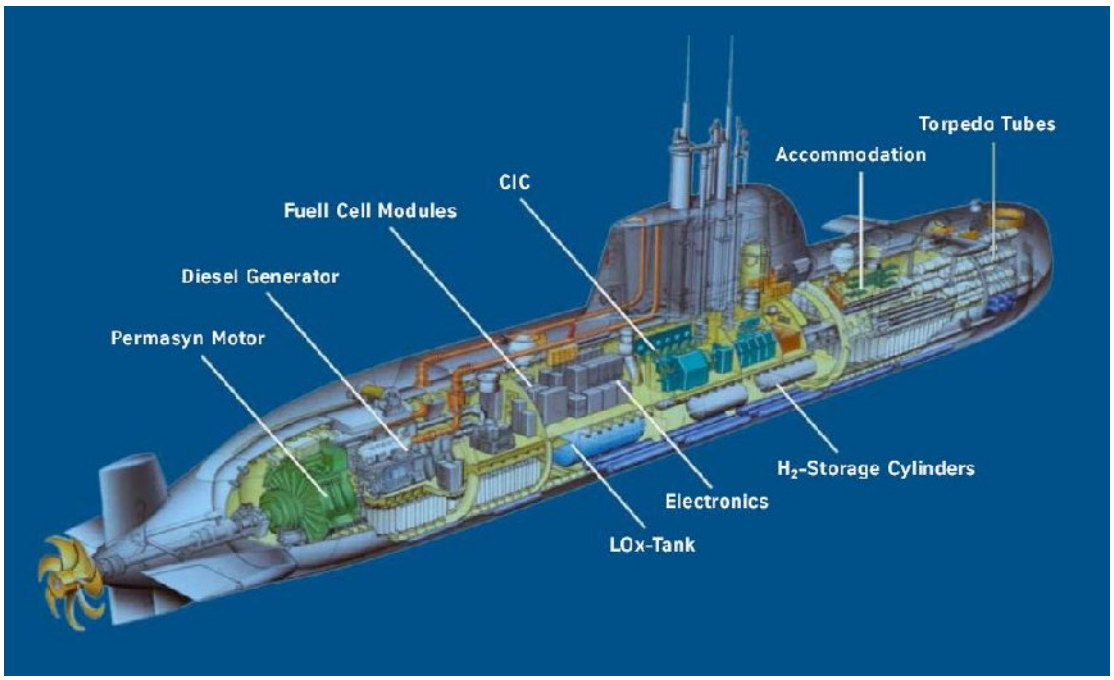
Bilinen en önemli Havadan Bağımsız Tahrik sistemidir. Fuel Cell'ler gürültüsüz çalışabilen elektrokimyasal enerji dönüştürücüleridir. Transformer ve jeneratöre ihtiyaç duyulmadığından elektrik ve mekanik kayıplar yoktur. Bu sistemlerin etkinliği çok yüksektir ve büyük ısı kayıpları vermek gibi bir sorunları da yoktur. Fuel cell'ler depolanan Hidrojen ve Oksijenin kimyasal enerjisini elektrik enerjisine hızlı ve verimli şekilde dönüştürürler. Diğer havadan bağımsız sistemler(Kapalı Çevrim Dizel, Buhar Türbinli Sistemler, Stirling Motorlu Sistemler gibi nükleer olmayan konvansiyonel sistemler) ile mukayese edildiğinde Fuel cell'lerin üstünlükleri açıkça görülür. Bugüne kadar yapılan tecrübeler neticesinde olağanüstü akustik performansı ve uzun dalış performansıyla AIP'li yeni nesil konvansiyonel Denizaltılarda Fuel Cell'lerin kullanımına karar verilmiştir. Geleceği en parlak AIP Sistemi seçimi hakkında, tüm Dünyada sayısız çalışmalar yapılmış ve pek çok tartışma yürütülmüştür. Sonuç olarak, Yakıt Pili Sistemleri nükleer olmayan Denizaltılar için havadan bağımsız itici güce en ideal çözüm olarak kabul edilmektedir. Daha önce diğer AIP Sistemlerini dikkate alan ülkeler bile geleceği en parlak çözümde karar kıldılar: Yakıt Hücreleri(Fuel Cell). Hem oldukça etkili enerji çevrimi hem de en düşük imzaları sağlayarak en önemli ihtiyaçlara cevap verirler.

Gemide taşınabilen bir enerji taşıyıcı (Hidrojen) ve yükseltgenme aracı (sıvı Oksijen, LOX) kullanırlar. Yakıt hücrelerinde, Hidrojen ve Oksijen elektrik(DC) üretmek birleşirler ve bunun yanında da su üretirler. Bu çalışma prensibi su elektrolizinin tersidir. Çok yüksek verim sayesinde, harcanan ısı ve ortaya çıkan IR imzaları düşüktür. Üretilen elektrik enerjisi Denizaltının ana panosuna beslenir. Depolanan reaktantların sayısı yakıt hücrelerinin mükemmel verimiyle birleştiğinde Denizaltının operasyonel dayanıklılığı tanımlanır. Denizaltı FC uygulamaları için, enerji depolamanın farklı işlemleri uygulanabilir. Gemide bulunan Hidrojen ve sıvı Oksijenin doğrudan kullanımı yanında, gelecekte yakıt hücre plantını gemide bulunan metanol, doğal gaz, kerosen ve dizel yağı gibi diğer enerji taşıyıcılardan Hidrojen çıkaran bir reformer ile birleştirmek mümkün olabilir. Aşağıdaki Şekillerde

Fuel Cell AIP sisteminin çevre birimleriyle birlikte konfigürasyonu ve Denizaltı'ya yapılan yerleşimi görülmektedir.



Şekil 5. 7 Fuel Cell ve Çevre Birimleri



Şekil 5. 8 Fuel Cell Sisteminin Denizaltıya Yerleşimi

5.2.2.5.2 Fuel Cell'li AİP'in Tarihi Gelişimi

Dünyada 1970'li yıllarda Stirling Motor, Kapalı Çevrim Dizel, Kapalı Çevrim Gaz ve Buhar Türbinleri gibi değişik AIP teknolojileri vardı. Man, Ferrostaal, Siemens, Howaldtswerke-Deutche Werft (HDW) ve Ingenieur Kontör Lübeck gibi firmalar Fuel Cell Teknolojisinin potansiyelini en erken fark edenler olarak 70'lerin sonlarında Denizaltı tahrik gücü için Fuel Cell sistemleri geliştirmeye başladılar. Alman donanması bu teknolojiler arasından Fuel Cell tabanlı AIP konusunda çalışmalar yapması için Howaldtswerke-Deutsche Werft AG (HDW) ve Siemens AG firmalarını görevlendirdi. HDW Denizaltıları için çeşitli Fuel Cell sistemleri geliştirilmesi ve seri bir şekilde üretilmesi aşamalarında güvenilir deneyimler edindi. 1970'lerde AIP sistemler konusunda Alman donanması kararını Fuel Cell'den yana kullanmış olmasına rağmen o yıllarda başka sistemler üzerinde başka çalışmalar da yapılıyordu, firmalar ve üzerinde çalıştıkları sistemler;

Fuel Cell – Siemens, HDW, Ferrostaal, IKL
Stirling Motor – MAN ve HDW
Kapalı Çevrim Gaz Türbini – MTU
Kapalı Çevrim – NSWE ve MTU
Yüksek Kapasiteli Bataryalar – VARTA ve Friwo

Alman donanması bu kararından dolayı çok eleştirilmesine rağmen gerekli tecrübeler ve testlerden geçirilen Fuel Cell kararında başarılı olmuştu. Bu gelişmelerin neticesinde 1980'lerin sonunda U1 diye adlandırılan 205 sınıfı Denizaltılara başarıyla yerleştirildi ve kullanıldı. Böylece U1 ilk Fuel Cell'li AIP kullanılan Denizaltı olmuştur. Bu geminin uzatılmış yapısında 16 yakıt hücresi vardı ve toplam 400 KW'lık üretim yapılmaktaydı. Bu da pilleri 50 dakika içinde şarj etmek için yeterliydi.

Fuel Cell, son 30 yıl boyunca Alman Deniz Kuvvetlerinin ilgi odağı haline gelmiştir. 1980 yılı başlarından itibaren Alman firmaları tarafından Fuel Cell Ve Kapalı Çevrim Dizeller üzerinde paralel çalışmalar devam etmiş 1988–1990 yılları arasındaki U–1 Denizaltısı ile yapılan deniz tecrübeleri sonucunda Yakıt Pilleri tercih edilmiştir. Fuel Cell'li AIP'in U1 deki başarılı sonuçları neticesinde 1995

yılında yeni 212A sınıfı Denizaltılarında bu sistemle donatılması kararlaştırıldı ve 4 Denizaltı başarılı deniz testlerinden sonra 2002 yılında kullanıma girmiştir. Bunlara ilaveten aynı sınıf ve aynı özellikteki iki Denizaltıda İtalyan Donanması için yapılmıştır. HDW firması yabancı donanmalara satmak amaçlı Fuel Cell donanımlı 214 sınıfı Denizaltıları inşa etmiştir. Bugüne kadar Yunanistan ve Güney Kore donanmaları için 7 adet Fuel Cell AIP'li 214 sınıfı Denizaltı inşa edilmiştir Türkiyede 2008 yılında bu gemilerden 6 adet 2015 yılına kadar teslim edilmesi için HDW ile anlaşma imzalamıştır. Bunlara ilaveten Yunan Donanmasına ait 4 adet 209 sınıfı Denizaltıya ve Portekiz Donanmasına ait 2 adet 209 sınıfı Denizaltıya Fuel Cell entegre edilmiştir.

5.2.2.5.3 Fuel Cell Çeşitlerinin Uygunluğu

Denizaltı uygulamaları için düşünülen Fuel Cell sistemleri verimlilik, imza, performans, güvenirlik, emniyet, sistem uyumu, ikmal, maliyet kriterleri ile değerlendirilmelidir. Burdaki kriterlerin her biri Fuel Cell'in uygulama alanına bağlı olarak önem sırasına göre derecelendirilip toplam performansa göre Fuel Cell tercih edilir.

Böyle bir tercih uygulaması Amerika'daki Arctic Enerji Ltd. şirketi tarafından Denizaltılar ve AUVS(Autonomous Underwater Vehicles and Submersible) araçları için enerji kaynağı seçiminde detaylı bir şekilde uygulanmıştır. Böyle bir değerlendirmenin sonuçlarına göre Fuel Cell'in kullanım alanına göre farklı değişkenlere bağlı olarak değişiklik gösterebileceği ve seçilen Fuel Cell'in senaryo değişimlerine karşı kolayca adapte olması gerektiği değerlendirilmiştir..

Çeşitli yakıt hücresi tipleri geliştirilmiş, bu yakıt pilleri kullanılan yakıt-oksitleyici türlerine göre, yakıtın sistemin içinde veya dışında işlenmesine göre, elektrolit tipine göre, işletme sıcaklığına göre vs sınıflandırılabilirler. Yakıt hücreleri genellikle kullanılan elektrolitlerin türüne göre sınıflandırılır ancak Denizaltılar için sıcaklık parametresi çok önemli olduğu için yaklaşık çalışma sıcaklıklarına göre sınıflandırılırsa;

Polimer elektrolit yakıt hücresi (PEFC - polymer electrolyte fuel cell) / 80°C
Alkalin yakıt hücresi (AFC - alkaline fuel cell) / 100°C - 200°C
Fosforik asit yakıt hücresi (PAFC - phosphoric acid fuel cell) / 200°C
Erimiş karbonat yakıt hücresi (MCFC - molten carbonate fuel cell) / 650°C
Katı oksit yakıt hücreleri (SOFC - solid oxide fuel cell) / 800°C-1000°C

Düşük sıcaklıkta çalışan yakıt hücrelerinde (PEFC, AFC, PAFC) protonlar ve hidroksil iyonları elektrolit içindeki temel elektrik yükü taşıyıcılarıdır. Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt hücrelerinde ise (MCFC, SOFC) sırasıyla hem karbonat iyonları hem de Oksijen iyonları elektrik yükü taşıyıcılarıdır.

5.2.2.5.3.1 Yüksek Sıcaklık Fuel Cell

Yüksek sıcaklık Fuel Cell'ler Denizaltılarda ısı yönetiminin zorluğu sebebiyle fazla tercih edilmezler. Özellikle personel konforunun çok önemli olduğu uzun süreli dalmalı devriye görevlerinde Denizaltı atmosferinin sıcaklığı personelin performansı üzerinde çok etkilidir. Bu problem uygun yalıtım ve havalandırma ile çözülmesine rağmen bu çözümler su altında kalma için gerekli olan reaktant miktarının azalmasına sebep olarak tahrik ve batarya şarjı için kullanılan gücü azaltır. Yüksek sıcaklık Fuel Cell'lerin Denizaltılar için uygun olmamasının bir başka nedeni de soğukken yavaş başlayabilmesidir. Bu başlama saatler sürebilmektedir. Denizaltılarda yüksek sıcaklık Fuel Cell kullanımının emniyet açısından da sakıncaları vardır. Çünkü yüksek sıcaklıkta yangın çıkma ihtimali daha fazla olduğu gibi su girişi de buhar patlama faciasına sebep olabilir. Bu sebeplerin yanında teknoloji olarak da olgunlaşmamış teknolojilerinden dolayı Molten karbonat ve Solid Oksit Fuel Cell şimdilik AIP li Denizaltılarda kullanılacak kadar uygun değildir. Bu Fuel Cell çeşitleri su üstü gemileri için daha uygundur. Ayrıca bunlar düşük sıcaklık isterli AIP'li Denizaltılardan ziyade yüksek güç(multi megawat) üretimi için de uygundurlar.

5.2.2.5.3.2 Düşük Sıcaklık Fuel Cell

Düşük sıcaklık Fuel Cell'ler yukarda bahsedilen özelliklerinin yanında azaltılmış startup zamanı ve düşük termal imza gibi özelliklerinden dolayı AIP'li Denizaltılar için uygundurlar. Düşük sıcaklık Fuel Cell'ler arasında iki tanesi yeterli güç yoğunluğuna sahiptirler. Bunlar Alkaline ve Solid polimer elektrolit Fuel Cell'lerdir. Fosforik asit Fuel Cell'ler düşük verim ve elektrotlarındaki korozyon probleminden dolayı Denizaltılar için uygun değildir. Alüminyum-Oksijen Semi-Cell'in yüksek güç yoğunluğunu devam ettirmesi henüz kanıtlanamadığı için ve yan ürünü olan Alüminyum hidroksidin etkili şekilde uzaklaştırılamamasından dolayı pek tercih edilmiyor. Ayrıca katı yakıtın lojistiği sıvı yakıttan daha zor olmaktadır.

Hidrojen kaynağı Metal Hidrit ya da Likit Hidrojen ise AFC ve PEFC'lerin her ikiside Denizaltı AIP sistemi için uygundurlar. PEFC için gerekli olan su yönetimi AFC için gerekli olan elektrolit yönetimi ile eşleştirilebilir. AFC'nin hücre voltajı PEFC den yüksek olmasına rağmen son zamanlarda PEFC'lerde kullanılan yüksek performanslı membranlar ile elde edilen yüksek akım yoğunluğu sayesinde yüksek güç yoğunluğu elde edilmiştir. Denizaltı AIP sistemleri için yüksek güç yoğunluğuna sahip Fuel Cell'lerin seçimi Denizaltına daha fazla su altında kalma, daha uzak mesafeler kat edebilme, daha hızlı hareket edebilme ve düşük termal imza kabiliyeti kazandırır. Bu özellikle donatılmış bir Denizaltı diğer konvansiyonel Denizaltılara göre büyük stratejik avantajlar sağlayacaktır. Tip 205 Denizaltısı olan U1'lerde AFC ler başarılı olarak kullanılmalarına rağmen Alman donanması Denizaltılar için PEFC geliştirilmesi için Siemensi yetkilendirmiştir. AFC'nin en büyük dezavantajı, eğer yakıt olarak Hidrokarbonlar kullanılmışsa Hidrojendeki CO_2, veya eğer Fuel Cell, Denizaltı hava almak için şnorkel yaptığında aldığı hava ile çalışabilme kabiliyetine sahipse havadaki CO_2'yi uzaklaştırma gereğinden dolayı çok fazla avantajlı değildirler. Birkaç çeşit CO_2 ayırma metodu olmasına rağmen bunlar mekanik ve kimyasal olarak kararlı solid eletrotları olan PEFC'nin sahip olduğu CO_2 toleransına sahip olmayan AFC'nin verimini de negatif olarak etkiler.

Bununla birlikte eğer amonyak gibi hidrokarbon olmayan yakıtlar kullanılırsa, AFC, Methanol ile çalışan PEFC ye göre bazı avantajları vardır. Reforming ünitten

gelen az miktardaki amonyak AFC için zararlı olmayıp, PEFC için asidik olup ayrıca gaz temizleyicisine, arıtıcısına ihtiyaç duyar. Bunun yanında amonyak'ın kontrolü Metanol'den daha zordur ve daha zehirlidir. Bu yüzden Denizaltılar için kullanılma olasılığı oldukça azdır. Metanol'den daha az yanıcı olmasına rağmen havadaki oranı %16–25 arasına ulaşırsa patlayıcı olabilir. Tüm bu sebeplerden dolayı yakıt olarak saf Hidrojen ya da reformed Hidrojen kullanılmasına bakılmaksızın şimdilik AIP li Denizaltılar için PEFC'nin AFC'den daha uygun olduğu söylenebilir.

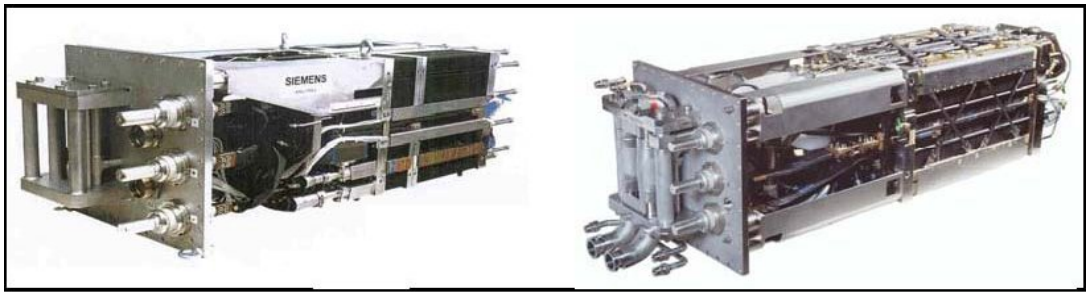
Düşük sıcaklık Fuel Cell'lerde harici bir hidrokarbon reformeri kullanmak, tüm sistemin verimini azalttığı için, kompleksliği arttırdığı için, değişik yüklenmelere verdiği cevabı yavaşlattığı için düşük sıcaklıkta çalışmanın avantajını oldukça azaltır. Metanol diğerlerine nispeten daha düşük sıcaklıkta refomer gerektirdiği için en kolay reforme edilen hidrokarbondur fakat zehirlenme ve yanıcı olması gibi problemleri vardır. Yakıt güvenliği ve temini göz önüne alındığında reformed dizel kullanımı avantajlıdır fakat bununda yüksek sıcaklık gerektirmesinden dolayı düşük sıcaklık Fuel Cell'ler ile uyumlu değildirler. Metal hidrit'ler sistemlerinin yalın olması, termal imza avantajından ve güvenli olmasından dolayı Metanola göre daha avantajlıdır.

Sonuç olarak Altı tip Fuel Cell karşılaştırıldı(Solid polimer, Alkaline, Fosforik asit, Alüminyum Oksijen, Molten Karbonat ve Solit Oksit). Bu Fuel Cell çeşitleri birçok konuda incelendikten sonra SPFC ya da PEFC'lerin Denizaltı AIP sistemleri için en uygun Fuel Cell çeşidi olduğu görülmüştür. Diğer Fuel Cell'lere göre avantajları ise; düşük çalışma sıcaklığı, hızlı başlayabilme kabiliyeti, Mekanik ve kimyasal kararlılık, Yüksek güç yoğunluğu, Solid elektrot ve düşük bakım. Değişik ülkelerde yapılan çalışmalar neticesinde de bu tip üzerinde karar kılınmış, İngilizler tip 2405 için Almanlar ise tip 212 için PEFC kullanmışlardır. Kanada DOD ise olası bir Denizaltı yenileme programında PEFC kullanmayı düşünmektedir. Bu doğrultuda önümüzdeki on yıllarda Denizaltı AIP sistemleri için diğer Fuel Cell çeşitleri üzerinde herhangi bir gelişme olmayacağa benzemektedir.

5.2.2.5.3.3 Siemens PEM Fuel Cell

Siemens PEM Fuel Cell metal esaslı kompakt tasarımıyla Denizaltı çalışma koşullarını tam olarak karşılar ve yüksek güç yoğunluğunda iyi bir sıcaklık yönetimi sağlar. Bunlara ilaveten ve çok önemli olan kabul edilebilir bir çalışma ömrü vardır.

Hâlihazırda inşa edilen Denizaltılarda kullanılan iki tip PEM Fuel Cell; BZM 34 ve BZM 120 olup bunlar sırasıyla 34 KW ve 120 KW'lık bir güç değerine sahiptirler. BZM 34(Şekil 5.9) Alman ve İtalyan deniz kuvvetlerinde kullanılan tip 212 sınıfı Denizaltılar için dizayn edilmiş olup başarıyla kullanılmaktadırlar. Bir sonraki nesil olan BZM 120(Şekil 5.9) ise ihraç için tasarlanan tip 214 Denizaltılar için geliştirilmiş olup aynı zamanda tip 209 gibi eski nesil Denizaltıların modernizasyonunda da kullanılabilir.



Resim 5. 3 PEM Fuel Cell(BZM 34) PEM Fuel Cell(BZM 120)

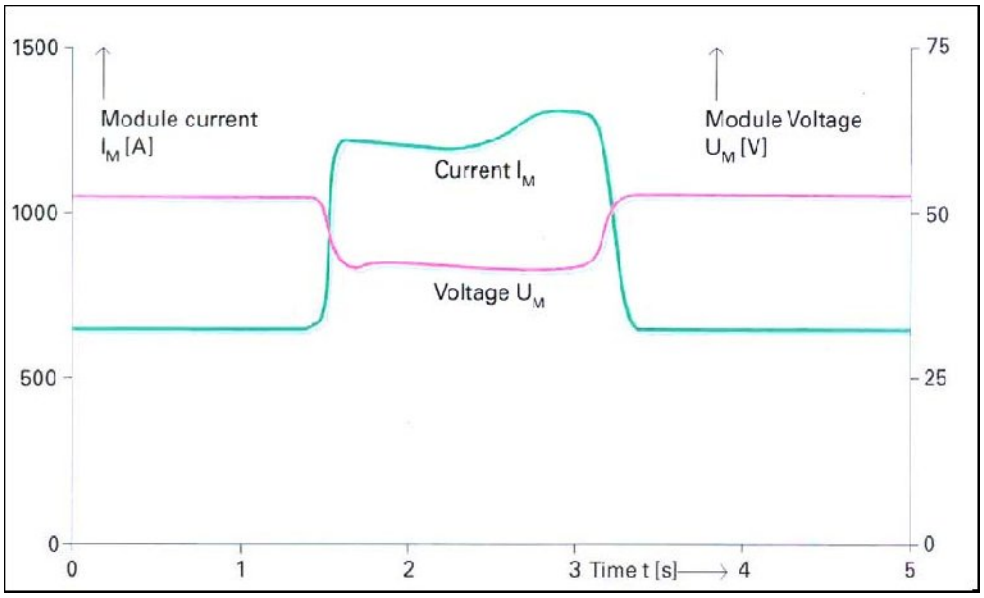
Her iki tip Fuel Cell bilgileri karşılaştırmalı olarak Tablo 1'de belirtilmiştir. Tablodan da anlaşılacağı üzere BZM 120 BZM34'e göre daha yoğun bir tasarıma sahiptir.

Tablo 5. 1 34 ve BZM 120'nin Elektriksel Özelliklerinin Karşılaştırılması

	BZM 34	BZM 120
Güç	34 KW	120KW
Hücre Sayısı	72	320
Akım	650 A	560 A
Voltaj	52 V	215 V

Hidrojen Basıncı	2,3 bar a	2,3 bar a
Oksijen Basıncı	2,6 bar a	2,6 bar a
Çalışma Sıcaklığı	70 – 80°C	70–80°C
Ebat	47x47x143 cm3	176x53x50 cm3
Ağırlık	650 kg	900 kg
Tam Yükte Verim	%60	%58
% 20 Yükte Verim	%70	%68

Fuel Cell'ler anlık yüklenme anında mükemmel bir davranış sergilerler(Şekil 5.10). BZM 34'e göre daha az verimli gibi görünen BZM 120, teknik performans(ebat, güç) ile ekonomik isterler(fiyat) konularında iyi değerlere sahip bir tasarımdır.



Şekil 5. 9 BZM 34'ün Dinamik ve Aşırı Yüklenme Davranışı

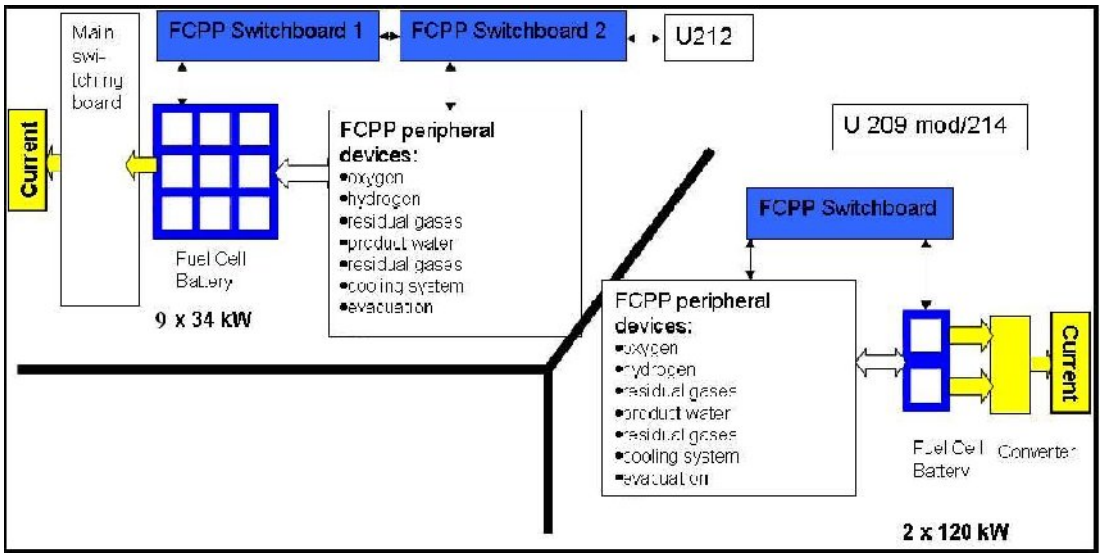
Fuel Cell modülünün emniyeti, modül duvarı ile Fuel Cell yığını arasındaki boşluğa yığın basıncından daha yüksek basınçta(3atm.) asal gaz(N2) doldurularak sağlanmıştır. Herhangi bir sebeple sızıntı olayında asal gaz yığın içine nüfuz ederek kontrol sisteminin algılayabileceği değerler(Basınç arttırma, Voltaj düşümü ve

benzer fiziksel parametreler) oluşturarak acil kapatma işleminin yapılması için ortam sağlar.

Fuel Cell'i beslemek için gerekli olan Oksijen likit olarak Hidrojen ise metal hidrit olarak depolanır. Depolanan miktar aralıksız elektrik üretimi ve dalmış konumda haftalarca kalabilmesini sağlayabilmektedir. Fuel Cell'ler düşük süratli seyirlerde tahrik için, sessiz çalışma sırasında elektriksel aletlerin elektrik ihtiyacı için ve bataryaların şarjı için elektrik üretirler.

Tip 212 Denizaltılarda yer alan 9 adet BZM 34 Fuel Cell modülü direk olarak geminin ana güç sistemine bağlıdır. Herhangi bir arıza durumunda otomatik olarak devreye girebilen bir adet Fuel Cell yedeklenmiştir(Şekil 5.11 Sol).

Tip 214 ve 209 Denizaltılarda ise 2 adet BZM 120 Fuel Cell modülü değişik voltaj seviyelerine uyumu sağlayabilmek için DC/DC konvertör üzerinden geminin güç sistemine bağlanmıştır(Şekil 5.11-Sağ). Bu durum modernizasyon projelerinde Fuel Cell entegrasyonu yapılacak olan eski tip Denizaltılar için oldukça önemlidir. DC/DC konvertör değişik donanmalardaki değişik tekneli Denizaltıların modernizasyonunda farklı elektriksel gereksinimler için esneklik sağlar.



Şekil 5. 10 U 212 (Sol) ve U 209/214 (Sağ) Denizaltılarda Yeralan Fuel Cell Teçhizatının Blok Diyagramı

Aşağıda bu Fuel Cell'ler ile yapılmış ya da yapılmakta olan Denizaltılar gösterilmiştir.

BZM 120, 2 Modül/Denizaltı

4 Denizaltı - Yunanistan - Tip 214

3 Denizaltı - Güney Kore - Tip 214

2 Denizaltı - Portekiz - Tip 209

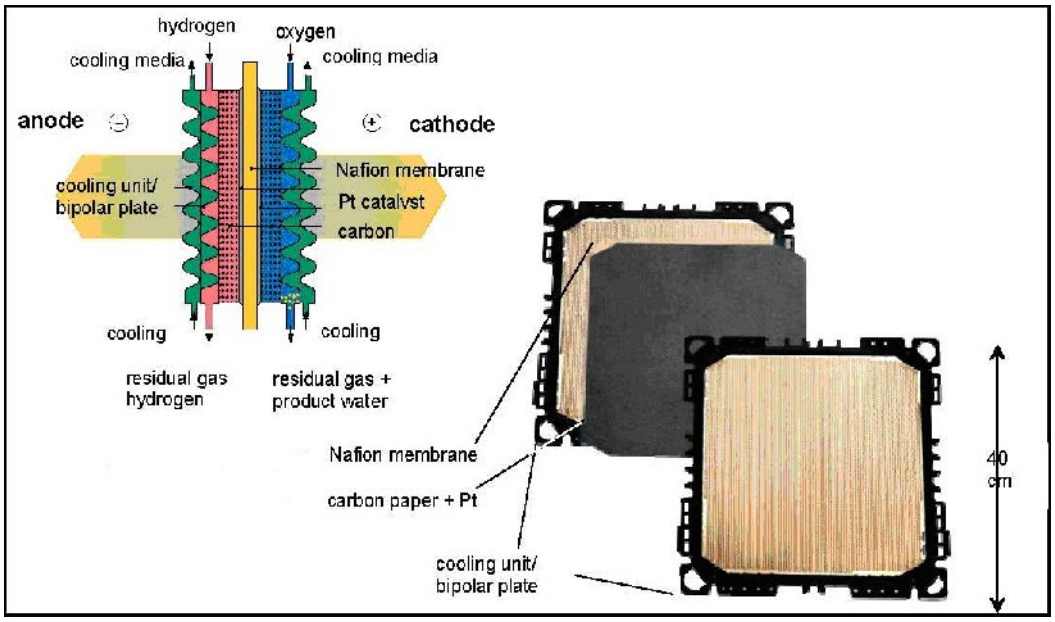
BZM 34, 9 Modül/Denizaltı

4 Denizaltı – Almanya - Tip 212

2 Denizaltı - İtalya - Tip 212

4 Denizaltı - Yunanistan - Tip 209

1 Denizaltı - Almanya - Tip 205



Şekil 5. 11 Siemens PEM Fuel Celle'lerin Tasarım Özellikleri

Polimer elektrolit yakıt hücresinde "elektrolit" bir iyon değişim zarıdır. Bu zar florinli Sülfonik asit polimeri veya benzer bir polimerden imal edilir ki bu maddeler mükemmel proton iletkenleridir. Bu yakıt hücresinde tek sıvı sudur bu nedenle korozyon sorunları en azdır. Zardaki suyun kontrolü yakıt hücresinin verimi açısından çok önemlidir; bir yan ürün olan su üretiminin buharlaşmasından daha hızlı olması zarın devamlı olarak ıslak kalabilmesini sağlamak açısından önemlidir.

Tüm PE yakıt hücreleri aynı temel şekilde çalışırlar; Metanol veya metal hidritten alınan Hidrojen, platin temelli bir katalizör vasıtasıyla elektron ve protonlarına ayrılacağı yakıt hücresine gönderilir. Protonlar, proton değişim zarından geçerken elektronlar Denizaltı için gerekli olan elektriği üretmekte kullanılır. Zarın diğer tarafında ise elektronlar elektrik devresinden ayrılır, protonlarla ve ilave olarak Oksijenle birleşerek reaksiyonun tek yan ürünü olarak saf su haline gelir. Bu çevrim tek bir yakıt hücresinde sadece 0.7 volt civarında elektrik üretebilir. Bu nedenle yeterli elektriği üretebilmek için yakıt hücreleri yığınlar halinde birleştirilerek kullanılırlar.

PEM türü yakıt hücreleri tüm türleri içinde en basit reaksiyonu kullanandır. Bu tür bir yakıt hücresinde; Anot, yakıt hücresinin negatif tarafıdır ve birkaç işlevi vardır. Hidrojen moleküllerinden ayrıştırılan elektronları harici çevrimde kullanmak üzere iletir. Üzerinde Hidrojen gazının katalizör yüzeyi üzerinde eşit olarak dağılmasını sağlamak üzere kanallar bulunur. Katot, yakıt hücresinin pozitif tarafıdır, üzerinde Oksijen gazının katalizör yüzeyi üzerinde eşit olarak dağılmasını sağlamak üzere kanallar bulunur. Ayrıca elektronları harici çevrimden Hidrojen iyonları ve Oksijen ile su oluşturmak üzere birleşecekleri katalizöre geri iletir. Elektrolit, proton değişim zarıdır. Plastik masa örtüsü görünümündeki bu özel olarak işlenmiş malzeme sadece pozitif yüklü iyonları geçirir elektronları ise engeller.(Şekil 5.12)

Katalizör, Oksijen ile Hidrojenin reaksiyonunu kolaylaştıran özel bir malzemedir. Genellikle çok ince bir katman olarak platin tozu ile kaplanmış karbon kâğıdı veya kumaşı ile imal edilir. Katalizör Hidrojen ve Oksijene platinle olabildiğince yüksek bir temas yüzeyi sağlayabilmek için yani yüzey alanını arttırabilmek için son derece pürtüklü ve girintili çıkıntılı bir şekilde imal edilir. Katalizörün platin kaplı tarafı proton değişim zarına bakar. PEM türü yakıt hücrelerinin kimyasal denklemleri;

Anot tarafı: $2H_2 => 4H^+ + 4e^-$

Katot tarafı: $O_2 + 4H^+ + 4e^- => 2H_2O$

Toplam reaksiyon: $2H_2 + O_2 => 2H_2O$

Yakıt hücresinin kullanıldığı ilk Denizaltı olan Alman Tip212'nin PEM türü yakıt hücresi sistemi Siemens ve HDW tarafından geliştirilmiştir. Tip212'lerde bir büyük tank içinde sıvı Oksijen taşınırken güçlendirilmiş birkaç küçük tankta da metal hidrit yakıtı, mukavim teknenin dışında taşınır. 300KW'lık yakıt hücresi sistemi Tip212'ye yaklaşık 14 gün boyunca sualtında seyir imkânı verir. Bu güç kaynağı tamamen sessiz çalışır ve tek atığı olan saf su da mürettebat tarafından kullanılır. Rusya'da ise Rubin tasarım bürosu tarafından Kristall-27e yakıt hücresi, Amur sınıfı yeni Denizaltılar için geliştirilmiştir ve Alman sistemine benzer şekilde çalıştığı düşünülmektedir. İlk sistem Hindistan'a satılmıştır. Kanada tarafında geliştirilen benzer bir sistem diğer ikisinden tek önemli farkı Hidrojenin metal hidrit olarak değil metanol (CH_3OH) olarak tek bir tankta depolanmasıdır.

Sonuç olarak SİEMENS AIP'li konvansiyonel Denizaltılar için geliştirilen 34 ve 120 KW'lik PEM Fuel Cell'ler Manyetik imza, Sistem güvenliği, Akustik özellikler, şok/titreşim kriterleri gibi konularda askeri isterleri tamamen karşılamaktadırlar. Bu konularda tatmin edici sonuçlar veren PEM Fuel Cell'ler konvansiyonel Denizaltılar için standart olmuşlardır.

5.2.2.5.4 Fuel Cell'li AİP Sistemi

Fuel Cell teknolojisinin bu kadar tercih edilmesinin sebebi sessiz, yanma olmadan direk elektrokimyasal dönüşme ile çalışmasıdır. Hidrojen ve Oksijen 80 C derece gibi düşük bir sıcaklıkta katalizör vasıtasıyla reaksiyona girerek sadece elektrik ve su üretir. Denizaltılarda en çok kullanılan solid polimer elektrot içeren PE Fuel Cell'lerin anot tarafında Hidrojen elektron ve protonlarına ayrıştırılır. Elektronlar Denizaltının beslemesine katılırken protonlar ise membranın diğer tarafına geçerler. Katot tarafında ise elektronlar protonlarla yeniden birleşmek için katot üzerinden geri dönerler ve Oksijen molekülleri ile birlikte reaksiyonun tek ürünü olan saf su oluştururlar. Denizaltılarda kullanılan PEM 80 C derecede çalışmaktadır. Düşük çalışma sıcaklığı az imza demektir. Buna ilaveten PEM'in yüksek verimli enerji dönüşümü, hızlı açılıp kapatılabilme, dinamik davranış, egzoz olmayışı, sınırsız güç ve dalma gibi başka avantajları da vardır. İmza, ara yüz

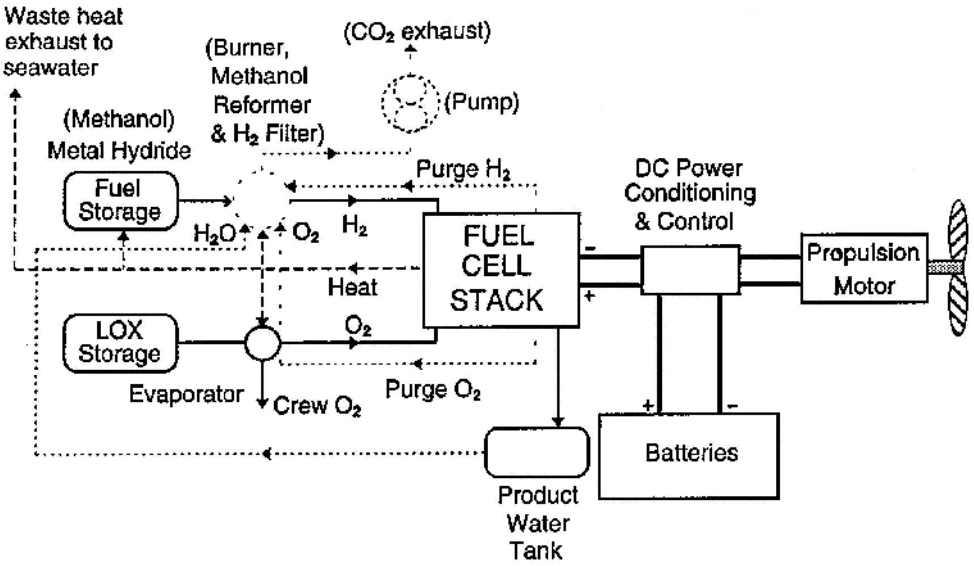
standartları, saf Oksijen kullanımı, ani şoklara dayanıklılık gibi Denizaltı isterlerine de uyumludur.

Bu Fuel Cell modüller; hücrelerin birleşiminden oluşan yığınlar, nemlendiriciler, valfler, sensörler, Hidrojen, Oksijen, su soğutucu arasındaki bağlantı parçaları gibi çevresel birimlerden oluşurlar. Fuel Cell Modülü Fuel Cell kontrol kartına elektronik olarak bağlanarak modül içindeki işlemin kontrolü ve görüntülenmesi sağlanır. Yakıt Hücre Kontrol Sistemi olarak 2 farklı Pano vardır. Bunlardan biri elektronik kısmı içerir diğeri ise plantı kontrol eder ve otomatik güvenlik aygıtlarını içerir. Sistem Denizaltının merkezi kontrol konsoluna bağlandığından ek mürettebata ihtiyaç duymadan merkezden yönetilir. Acil durumlarda yakıt hücre plantı doğrudan panodan da yönetilebilir. Bir yakıt hücre modülünün çalışma noktası istenen elektriksel yüke bağlıdır. Bu yüzden yakıt hücre çalışması asıl olarak kendi kendini kontrol eder.

Buna ilave olarak Fuel Cell Modülü ile Fuel Cell yığını arasındaki boşluk Nitrojen ile doldurularak sistemin iç güvenliği sağlanır. Ayrıca Nitrojen yakıt hücreleri uzun kapalılık dönemlerinde eylemsiz tutmak için yakıt hücre plantına beslenir. Soğutma sistemi olarak işlemler sırasında üretilen artık ısı çift soğutma devre sistemiyle çıkarılır. Bu soğutma sistemi hidrür depo silindirlerine Hidrojen çıkarma için ihtiyaç duyulan termal enerjiyi ve aynı zamanda geri dönüşte de Oksijen buharlaştırıcısına gerekli enerjiyi sağlar. Sadece geriye kalan en az artık ısı denize gönderilir, bu da sistemi IR imzası bakımından tüm diğer AIP sistemlerinden daha üstün kılar. Yakıt Pili sistemi münferit olarak, batarya sistemi ile paralel olarak veya bataryayı şarj etme maksatlı kullanılabilir.

5.2.2.5.4.1 Uygulanış Biçimleri

Şekil 5.12'de Denizaltılara kurulan düşük sıcaklık Fuel Cell sistemlerinin ana bileşenleri gösterilmektedir.

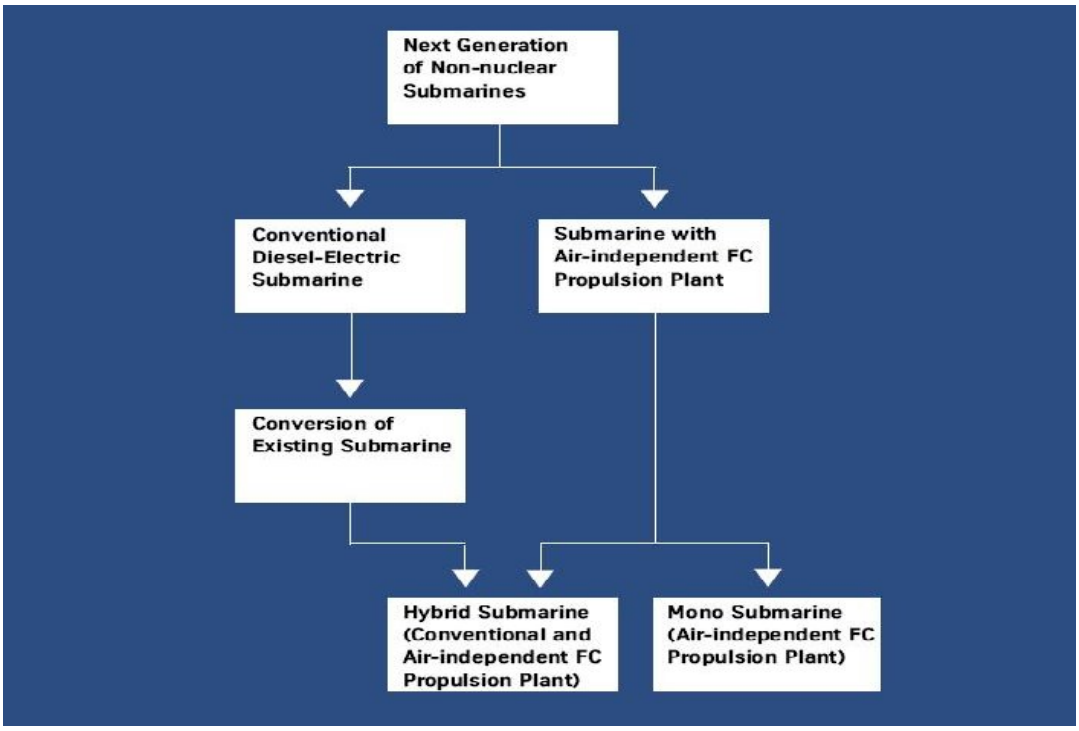


Şekil 5. 12 Denizaltı'ya kurulan Fuel Cell ve bileşimleri

Fuel Cell'den yayılan atık ısı AFC'de likit elektrolit dolaştırılarak yada PEFC'de nötürleştirilen soğutma suyu vasıtasıyla kapalı çevrim soğutma ile kazanılır. Isı değiştirici ile bu sıcaklık alt sistemlerde kullanılacak duruma getirilir. Hidrojen eğer Metal Hidrit içinde depolanmış ise hidritler Hidrojen ile şarj olurken(ekzotermik reaksiyon) deniz suyu soğutma devresi hidritlere soğutulmuş su, Fuel Cell çalışırken Hidrojeni ayrıştırmak içinde(endotermik reaksiyon) sıcak su sağlar.

Alt sistemler ve hidrokarbonlu(Metanol gibi) yakıt ile çalışan bileşimler noktalı kısımlar ile gösterilmiştir. Buhar metanolu düzenlediği zaman Fuel Cell'deki artık ısı metanol su karışımında ön ısıtma olarak kullanılır. Reforming sonucu ortaya çıkan yan ürünleri(CO_2 ve CO) ayırmak ya da zararsız hale getirmek için kullanılan Fuel Cell çeşidine göre filtreleme ya da işleme ünitesi gerekmektedir. Bu yan ürünlerin ayırımı Hidrojen geçirgenli polymeric membrane yada ısıtılmış palladium-gümüş diffusion membrane vasıtasıyla membran içindeki yüksek basınç düşümünün üstesinden gelebilmek için yüksek basınç reformeri gerektirir fakat Fuel Cell sisteminin düşük basınç ve dead-end modda çalışmasını kolaylaştırır. Eğer CO_2 Fuel Cell içerisinden geçirilirse anodun kutuplanmasını engellemek için azaltılmış

Hidrojen kullanarak dead-end modda çalıştırılmalıdır. Yüksek basınçlı reformer ile Fuel Cell yüksek ya da düşük basınç da çalıştırılabilir. Bununla birlikte eğer reformer ve/veya Fuel Cell düşük basınçta çalıştırılırsa(mesela CO_2 düşük basınçta egzoz edilirse, üretilirse) deniz suyu basıncına karşı CO_2 'di yok etmek için bir pompaya gereksinim olacaktır. Reformer yada Fuel Cell'den kalan artık ısının bir kısmı Fuel Cell ve Reformer'e Oksijen sağlamak için likit Oksijen tankından Oksijeni buharlaştırmak için kullanılır kalan kısmı ise gemiden denize, deniz suyuna verilir. Bu sistemler konvansiyonel Denizaltılara kolayca yerleştirilebilmektedir. Hem var olan Denizaltılara ek olarak eklenebilmekte hem de yeni Denizaltılara konulabilmektedirler(Şekil 5.14).

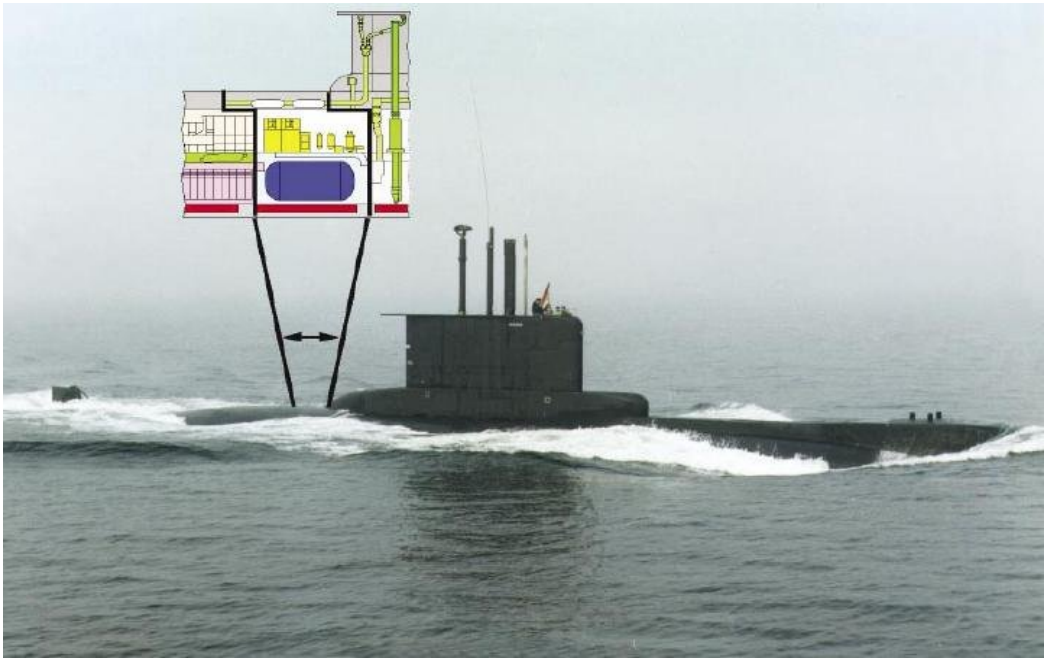


Şekil 5. 13 Fuel Cell'lerin Denizaltılara Uygulanma Biçimleri

5.2.2.5.4.1.1 Yeni Denizaltıya Uygulanışı

Eğer FC sistemli yeni bir gemi alınacaksa, Denizaltının tüm dizaynı genel sistemde bir FC teçhizatı entegrasyonuna uyacak şekilde tasarlanır. Bu entegre edilmiş içerik hangi boyutta olursa olsun Denizaltılarda optimum performansa yolu açar.

Dizaynın en başından FC entegrasyonuna uyacak şekilde tasarlanan ilk gemi Alman ve İtalyan Deniz Kuvvetleri için tasarlanan sınıf 212A'dır. Bu çözüm tüm alt sistemleri ayarlanmış, yakıt hücre teçhizatını da hesaba katarak entegre edilen bir AIP dizaynının sadece bir şeklidir. FC teçhizatının modüler yapısından dolayı geminin özel donanımı ve ağırlık şartlarına bağlı olarak farklı dizayn çözümleri uygulanabilir. Sınıf 212A'nın inşası esnasında edinilen tecrübelerden yararlanılan diğer HDW Denizaltı tasarımları Sınıf 214 ve 209PN'dir. Sınıf 214 şu anda Yunanistan ve Güney Kore, 209PN ise Portekiz donanmaları için inşa edilmiştir.

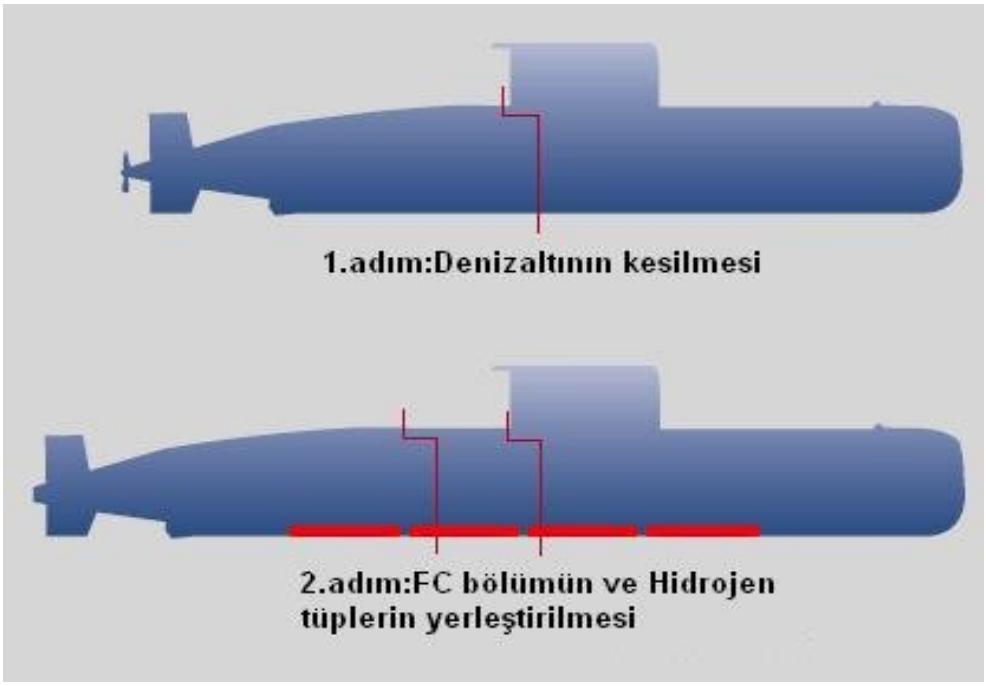


Şekil 5. 14 Fuel Cell'li Bölümün Denizaltı Pozisyonu

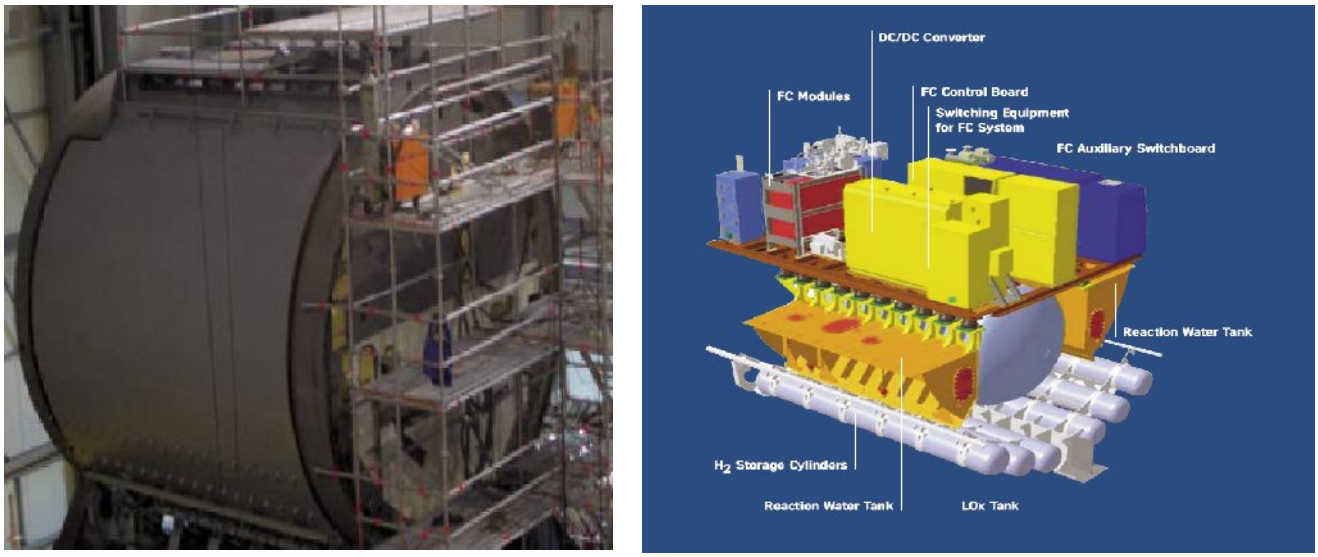
5.2.2.5.4.1.2 Mevcut Denizaltıya Uygulanışı

Halihazırda varolan diesel-elektrik Denizaltıları ek bir FC bölümü entegre ederek dönüştürmek mümkündür. Denizaltının modüler dizayn ve inşası sayesinde, mukavim tekne kesilerek yaklaşık bir mukavim tekne çapı uzunluğunda uzatılabilir. Bu prosedür modern Denizaltıların ve FC sisteminin modüler yapısı nedeniyle sorunsuz yapılabilir. FC teçhizatı tamamen otomatik bir sistem olduğundan mürettebatın sayısında artışa gerek yoktur.

Yeni bölüm safra görevi gören, karinaya monte edilen Hidrojen depo silindirleri hariç tüm FC sistemi(LOX deposu dahil) içerir. Denizaltının böyle büyümesi tipik olarak dipte dolanım aralığını arttırır. Varolan bir Denizaltı güncellenebilir. HDW Tip 212A Denizaltı için bir FC teçhizatı geliştirirken eski bir Alman Denizaltısı olan U1'i kesip gemiye bir FC sistemi entegre edebilmiştir. Helen Deniz Kuvvetleri için FC bölümlü 4 sınıf 209 Denizaltıların modernizasyonları halen devam etmektedir. Ek bölüm şeklindeki Fuel Cell aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



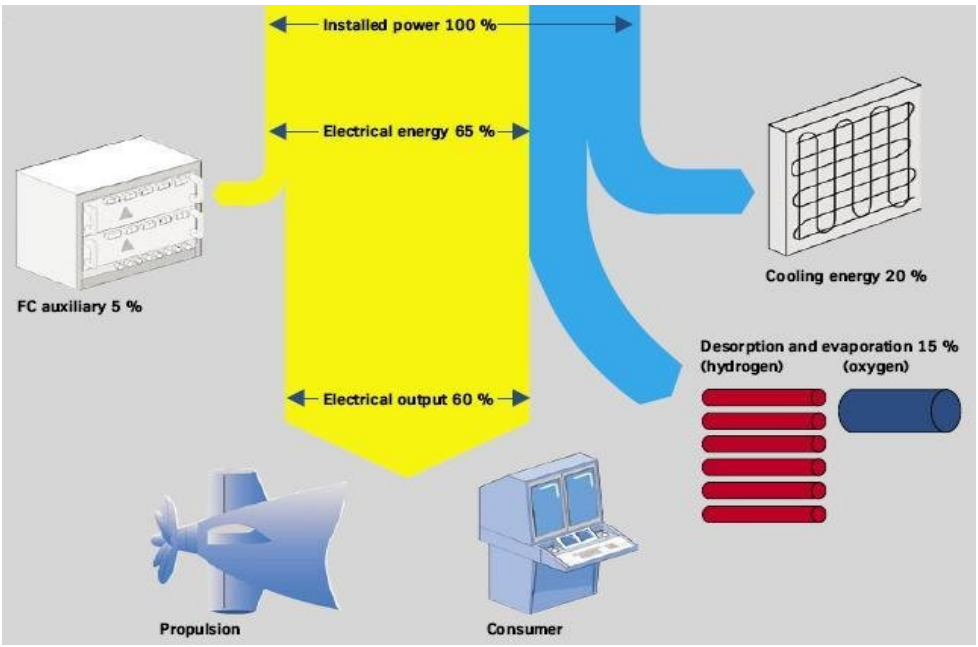
Şekil 5. 15 Fuel Cell'li Ek Bölümün ve H2 Tüplerinin Yerleştirilmesi



Şekil 5. 16 Tip 209'a Yerleştirilmek İçin Hazırlanan Ek Bölüm

5.2.2.5.4.2 Verimlilik ve İmza

Fuel Cell'lerde kimyasal enerji direk elektrik enerjisine dönüştürüldüğü için verim çok yüksektir. Isı motorlarında önemli termodinamik ısı kayıplarına neden olan Carnot çevrimi sınırlamaları Fuel Cell'lerde görülmez. Teorikte elde edilen verimlilikleri polarizasyon kayıplarından dolayı azalmasına rağmen yinede jeneratörleri süren ısı motorlarına(%30–40) göre hala yüksek verimliliğe sahiptirler(Fuel Cell tipine göre ve reformer kullanıp kullanmamalarına göre %40–65). Yakıt olarak depolanmış 100 KW'lık enerjiden, tüm enerji kayıpları çıkarıldığında (soğutma amaçlı gibi),60 KW'lık net Denizaltı tahrik ve personelin kullanımına sunulur. Fuel Cell'lerin verimini anlatan Sankey diyagramı aşağıda gösterilmiştir(Şekil 5.18).



Şekil 5. 17 Fuel Cell Veriminin Sankey Diyagramı ile Gösterimi

Fuel Cell'in tam yükte verimi maksimum %20–40 ve daha yüksek güç faktörlerinde yavaşça azalır. Eğer Denizaltı bataryaları tam dolu iken Fuel Cell hotel ihtiyaçları ve 4–5 Knot hızda devriye için itici güç olarak kullanılacaksa bu bir avantajdır. Fuel Cell maksimum gücü uygun değerde ise ara sıra devriye hızından daha yüksek hızlarda bataryaları kullanmadan kullanılabilirler ya da bir kısmı boşalmış bataryaları şnorkel yapmadan yavaş yavaş şarj edebilirler. Bunun yanında Fuel Cell'ler bütün yükleme faktörlerinde ısı motorlarından daha yüksek verimde ve hızda çalışırlar. Denizaltı uygulamalarında Fuel Cell performans hedefi; elektrot geometrik alanın 1W/cm2 lik güç yoğunluğu, 0.5 Voltun üstünde bir çalışma voltajı ve 2A/cm2 civarında akım yoğunluğudur.

Denizaltı AIP sistemlerinde düşük termal imza arzu edilir ve yüksek verimli Fuel Cell'ler artık ısı miktarını soğutma suyu ile azaltırlar. Düşük sıcaklık Feul Cell'ler ısı kaybını azaltmak için etkili izolasyon gerektiren yüksek sıcaklık Fuel Cell'lere göre doğal olarak daha düşük termal imzaya sahiptirler. Hidrokarbon yakıt ile birlikte reformer kullanımı da benzer kısıtlamalar gerektirmektedir, Metanol'u işlemek için gereken sıcaklığa rağmen(200–250 C derece) yüksek sıcaklık Fuel Cell'lere göre oldukça düşüktür. Bununla birlikte en verimli reformerin verimi %80 civarındadır, bu yüzden reforme edilen yakıt ile çalışan düşük sıcaklık Fuel Cell'ler ısı motorları tarafından üretilen termal imzadan çok daha küçük olmasına rağmen saf

Hidrojen ile çalışanlardan daha geniş termal imzaya sahiptirler. FC sistem platformunun imza minimizasyonu şok-dirençli çerçeveler kullanılarak geminin yapısına monte edilmiştir. Bu yüzden yapıdan kaynaklı sesler efektif olarak yalıtılmış olur. Platformdan gövde yapısına giden boru ve kanallardaki özel büyüme noktaları ses iletimini en aza indirger.

FC sistemi 80 C 'ya kadar ısılarda ve 60%'lik bir verimle çalıştığı için artık ısının miktarı ve buna bağlı olarak da soğutucu deniz suyu talebi de en aza indirgenmiştir. İmza minimizasyonunu ilgilendiren tüm bu pozitif karakteristikler ve PEFC'ye özgü olan avantajlar, FC Denizaltıları tespit etmeyi geleneksel dizel-elektrik Denizaltıları tespit etmeye kıyasla zorlaştırır ve şnorkel ya da serbest dolaşım dönemlerinde ASW prosedürlerini hiç olmadığı kadar etkisiz hale getirir.

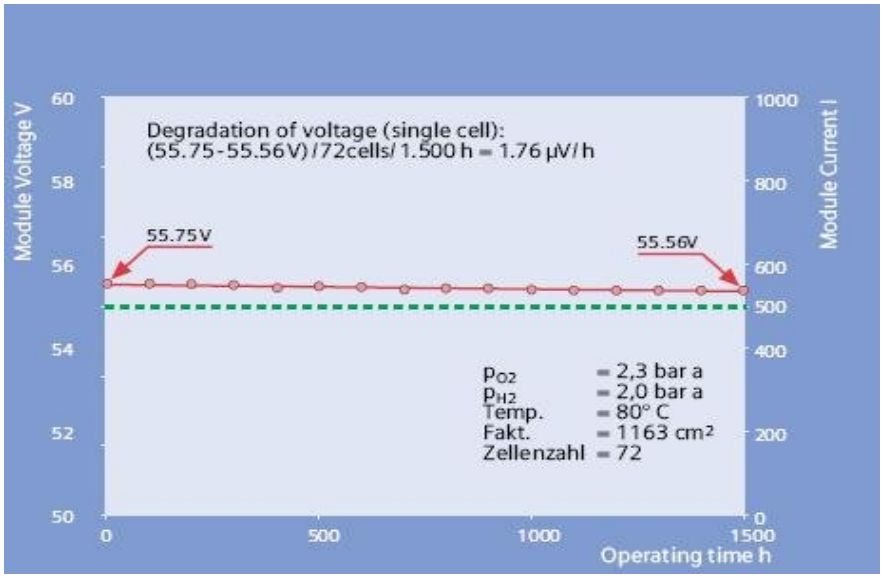
Artık ürünler Denizaltının sezilmesini etkilemeden yok edilmelidir. Saf Hidrojen ve Oksijen ile çalışan Fuel Cell'ler ürün olarak sadece su çıkarırlar ve bu su mürettebatın ihtiyaçlarında kullanılmak için depolanır. Fuel Cell, anotta toplanan kirleri ayırmak için arada bir temizlenirse küçük miktarlarda Oksijen ve Hidrojen salınır. Temizlenmiş Oksijen AIP ile uzun zamanlı su altı görevlerinde personelin Oksijen ihtiyacına ek olarak kontrollü bir şekilde Denizaltı atmosferine verilir. Egzozun olmayışı Fuel Cell'e en uygun basınçta ve derinlikten bağımsız çalışma imkanı sağlar.

Fuel Cell'in hidrokarbon yakıt kullanması durumunda egzoz ürünü olarak ortaya çıkan CO_2'i ya gemiden denize pompalamak gerekir ya da gemide depolamak gerekir. Reformerler yüksek basınçta çalıştırılabildiği için CO_2, genel verimi azaltan ayrı bir kompresöre ihtiyaç duymadan direk olarak gemiden denize atılabilir. Örneğin 12 bar civarında endüstriyel Hidrojen üreten Johnson Mattey Metanol reformerleri 20 barda çalışır. 20 barlık Metanol reformer 200 metreye kadar derinlikte CO_2 egzoz çıkarabilir. Daha fazla derinliklerde deniz suyuna karşı basıncı arttırarak egzoz yapabilmek için küçük bir kompresöre ihtiyaç vardır. Bununla birlikte Denizaltıların dalabildiği derinliklerdeki daha yüksek basınçlarda çalışabilecek reformerlar tasarlanabilir.

Fuel Cell'ler doğru akım üretirler. Sabit yükte motor tahrik ve Denizaltı bataryalarına voltaj uyumunu sağlamak için seri ya da paralel bağlanabilirler. Elektrik gürültü kaynağının olmaması ve doğrultucuya ihtiyaç olmaması Fuel cell'lerin elektromanyetik imzaları elektromanyetik koruma gerektiren elektrik jeneratörlü ısı motorlarından daha az sezilebilir özelliktedir. Değişik yüklenmelerden oluşan farklı Fuel Cell çıkış voltajını batarya voltajına uydurmak için dc/dc konvertör kullanılırsa bir elektromanyetik gürültü kaynağı oluşabilir bu yüzden uygun koruyucu kaplama gerektirir. Akustik olarak Fuel Cell'ler yapıları gereği sessizdirler. Likit elektrot yönetimi (AFC), soğutucu su ve gaz sirkülâsyonu(Siemens PEFC de olduğu gibi dead-end modda çalışmazsa) için kullanılan küçük bir elektrikli pompadan başka hareketli parça bulunmamaktadır. Aynı şekilde yüksek verim nedenlerinden biri olan Fuel Cell'lerde soğutma için dolaştırılan su miktarı ısı motoru için gereken miktardan oldukça az miktarda olup bu yüzden gereken pompa gücü miktarı ve üretilen gürültü daha azdır.

5.2.2.5.4.3 Performans ve Güvenirlik

Fuel Cell performansı Fuel Cell tipine, kullanılan yakıt ve oksidant çeşidine, kullanılan elektrolit çeşidine göre, çalışma sıcaklığına ve reaktantların basıncına bağlıdır. Fuel Cell çıkış gücünde zamanla bir zayıflama olur fakat binlerce saat yüksek performansla çalıştığı kanıtlanmıştır(Şekil 5.19).

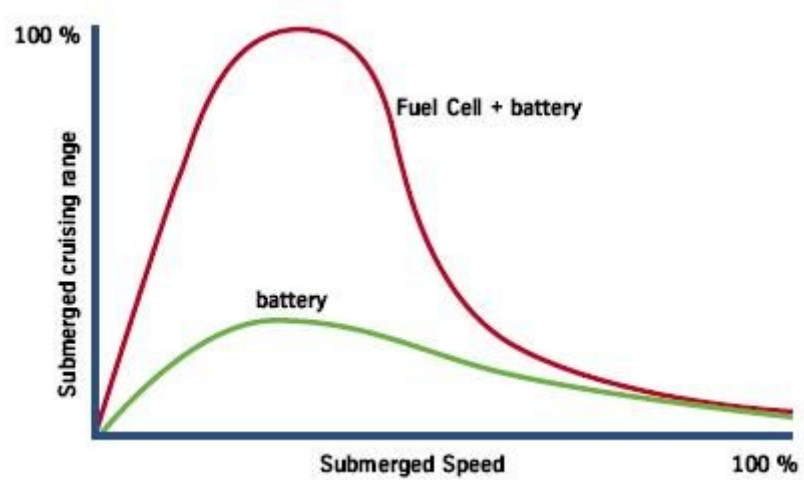


Şekil 5. 18 U-212 Fuel Cell Sistemi Voltaj Düşümü

Denizaltı AIP sistemlerde hızlı startup önemlidir ve Hidrojen ve Oksijen ile çalışan düşük sıcaklık Fuel Cell oldukça hızlı startup yapabilirler. Reforme edilmiş hidrokarbon yakıt ile çalışan sistemler de reformerlerin çalışma sıcaklığına ulaşması gerektiğinden daha uzun startup süreleri vardır. Fakat bu sistemlerde tampon Hidrojen depolama(sıkıştırılmış gaz) kullanılarak daha hızlı bir startup sağlanabilir. Feul Cell uygun karakteristiklerde yüklenmelidir(reformer gibi) ve anlık aşırı yüklenme durumlarında iyi kontrol edilmelidir. Verimlilik kısmi yüklenmelerde yüksek olmalıdır.

Kabul edilebilir seviyede yan ürünler(CO_2 ve CO gibi) veren yakıtlar tercih edilir böylece daha az çevre donanımlarına ihtiyaç duyulur ayrıca bu durum Fuel Cell yığınlarının uzun ömürlü olmasını da sağlar. Elektrotların kararlı olması yani mekanik olarak dayanıklı olması ve diğer Fuel Cell elamanlarıyla reaksiyona girmemesi düşük bakımlı ve güvenilir olmasını sağlar. Denizaltı sistemlerde kullanılan Fuel Cell yığınları ve yardımcı sistemler ani şoklara karşı dayanıklı olmalıdır.

Fuel Cell'li Denizaltı sadece dizel motorlu Denizaltıya göre dalmış durumda yaklaşık 5–6 knot hızda yaklaşık 2 hafta buyunca kalabilir(Şekil 5.20).



Şekil 5. 19 Dipte Seyir Mesafesi karşılaştırması

5.2.2.5.4.4 Güvenlik ve Sistem Uyumu

Likit Hidrojen ve yüksek basınçta sıkıştırılmış Hidrojen uzay programlarında ve endüstride kimyasal işlemlerde kullanılmasına rağmen Denizaltılarda kullanılırken dikkat edilmelidir. Havadaki Hidrojen oranı %4'e ulaşırsa alev alır %18'e ulaşırsa patlar. Düşük miktardaki enerji Hidrojeni tutuşturmak için yeterlidir. Hidrojen molekülleri borulardaki en ufak hatalı bir noktadan kolayca sızabilir ve hızlıca havaya karışabilir. Bu yüzden sızıntıları engellemek için çok dikkatli ve titiz çalışılmalıdır. Sızıntı olduğunda sızıntı noktası hızlıca bulunup, Hidrojen ve Oksijen birimleri güvenlik için acil olarak kapatılabilmelidir.

Alman Fuel Cell'li Denizaltısı U1 de Hidrojen metal hidrit olarak Oksijen ise likit olarak(LOX) mukavim teknenin dışında depolanır ve çift katlı borulardaki gaz miktarı minimum olacak şekilde tasarlanmıştır. Bunun yanında sızıntıyı engellemek için Fuel Cell basınç cihazları reaktant gazların basıncından(2.3 bar) daha yüksek basınçta(3 bar) Nitrojen ile doldurmuştur. Bu uygulama tehlikeyi azaltır fakat harici depolama geniş reaktant stogu için elverişli değildir.

Eger Oksijen elde etmek için LOX yerine Hidrojen Peroksit kullanılırsa Hidrojen Peroksitin yoğunlaştırılmış(%70–90) formu High Test Peroksit(HTP) olarak bilinir. Eğer kirlenirse aşırı kararsız olabilir ve büyük yangınlara sebep olabilir. Hidrojen Peroksidin içinden geçtiği boru devrelerinde dik açılı dönüşler olmamalıdır aksi takdirde Hidrojen Peroksit bu dirseklerde birikip aniden patlayabilmektedir. Ayrıca ortamın çok temiz olması gerekir. Bunun yanında eğer uygun şekilde tasarlanır ve çalıştırılırsa her zaman güvenlidirler. İsveç, Norveç ve Danimarka donanmaları yaklaşık 20 yıldan beri torpidolarında HTP'yi güvenle kullanmaktadırlar. Bunun yanında Walter türbinli İngiliz deneysel Denizaltılarında da kullanılmıştır. HTP'nin daha düşük konsantrasyonlarda kullanılması(%50 gibi) mukavim tekne dışında depolanması güvenliği arttırıcı faktörlerdir.

Hem LOX hem de H_2 problemsiz bir şekilde ve Dünyanın herhangi bir limanında lojistik harcama olmadan taşınabilir. FC gemisine yakıt ikmali yapmak dizel-elektrik Denizaltıya yakıt ikmali yapmaya benzer. Endüstride LOx ve H_2 yaygın olarak kullanılmaktadır.



Resim 5. 4 LOX ve H_2 Doldurma İstasyonları

Fuel Cell sistem gerektiğinde parçaları kolayca değiştirilebilir. Fuel Cell'lerin modüler tasarlanması denizde modüllerin kolaylıkla değiştirilmesine ve boyutsal olarak optimal yerleştirilmesine olanak sağlar. Bu yönleriyle yüksek sıcaklık Fuel Cell'ler yalıtım gerektirmeleri dolayısıyla düşük sıcaklık Fuel Cell'lerden daha az uygundurlar. Yüksek sıcaklık Fuel Cell'ler ile yüksek güç yoğunluğu elde edebilmek için fazla sayıda Fuel Cell içeren modüllere ihtiyaç vardır. Fuel Cell'in dc çıkışı daha önce anlatıldığı gibi elektriksel olarak Denizaltının batarya sistemi ile uyumludur.

5.2.2.5.4.5 Reaktant Depolama ve İşleme

Denizaltılar yapıları gereği kütle ve hacimleri sınırlıdır. Bu nedenle değişik Fuel Cell tipleri değerlendirilirken reaktantlarının kütle ve hacimleri yanında depolama ve işleme isterleri de göz önüne alınmalıdır. En iyi reaktant depolama ve işleme sistemi uygulama özelliğine ve stratejik senaryoya göre değişebilir. Buna göre Denizaltılarda termal imzası en az olan ve verimi en yüksek olan Metal Hidrit-Hidrojen ve Sıvı form-Oksijen en uygun olanıdır. Sistemde kullanılan Hidrojen ve Oksijen gazı mukavim tekne dışındaki tanklarda taşınır. Nitrojen gazı inert gaz olup emniyet maksadıyla gemi içindeki şişelerde depolanır.

Fuel Cell'ler üzerinde yapılan geniş kapsamlı çalışmalar neticesinde Oksijen, en iyi kriyojenik sıvı formda ya da Hidrojen Peroksit formda depolanabildiği anlaşılmıştır. Denizaltılarda Hidrojen Peroksit'in; Ekzotermik olmasından dolayı çevresine ısı vermesi, kirlenirse aşırı kararsız olabilmesi ve büyük yangınlara sebep olabilmesi, metaller üzerinde son derece yüksek bozucu etkilere sahip olması, bu nedenle yakıt devrelerinde ve depolarında özel malzemeler kullanmayı gerektirmesi, içinden geçtiği boru devrelerinde dik açılı dönüşler olmamalıdır aksi takdirde bu dirseklerde birikip aniden patlayabilmesi gibi elverişsiz yönlerinden dolayı Oksijen sıvı formda(LOX) depolanır.Oksijen sistemi Oksijen tankı, güvenlik aygıtları ve buharlaştırıcıdan oluşur. Buharlaştırıcı Fuel Cell artık ısısını kullanır. Fuel Cell Oksijen sistemi aynı zamanda mürettebatın kullandığı Oksijeni de içerir. Oksijen tankı iki katlı olup vakum izolelidir. Tankın dayanıklılığını ve izolesinin yeterliliğini kanıtlamak için Denizaltı şok testlerinde ilk duvar çok şiddetli çarpmalara maruz bırakılmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır. Denizaltıların hacimlerinden dolayı depolanabilen sıvı Oksijenin sınırlı olması diğer tüm AIP sistemleri içinde Fuel Cell'li sistemler en az Oksijen tüketiminden dolayı en fazla sualtında kalabilmeyi sağlamaktadır. Denizaltı bünyesinde depolanan LOX miktarını azaltmak için KUMM firması yapay solungaç sistemi ile deniz suyundan veya periyodik aralıklarla havadan Oksijen elde etmeyi önermiştir. Bununla birlikte deniz suyundaki Oksijeni özelliklede Oksijen miktarı az olan tropikal denizlerdeki Oksijeni çıkarmak için fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Hesaplamalar neticesinde yapay solungaç için gereken enerji Fuel Cell'de üretilen enerjinin yaklaşık %25'i kadardır. Bununla birlikte 100 metre derinlikten sonra yapay solungaç sistemi işletebilmek için gereken enerji Fuel Cell'in yapabileceği üretimden daha fazla olmaktadır.

Yakıt hücrelerindeki elektro-kimyasal işlem için enerji taşıyıcı görevi gören Hidrojen; Sıvı formda, Sıkıştırılmış formda, Hidrokarbonlar üzerinde, Hidrür olarak ve Karbon Nanotüpler de olmak üzere değişik şekillerde depolanabilirler. Bu yöntemler arasında Denizaltılar için en uygun olan ve bugüne kadar en çok kullanılmış metotlar ise; Denizaltılarda Hidrojenin Hidrokarbonlarda veya Metal Hidrürlerde depolanması yöntemleri olmuştur.

Hidrojen hidrokarbon kaynaklardan düşük sıcaklık Fuel Cell'lerde(AFC ve PEFC) harici katalitik reforming, yüksek sıcaklık Fuel Cell'lerde(MCFC ve SOFC)

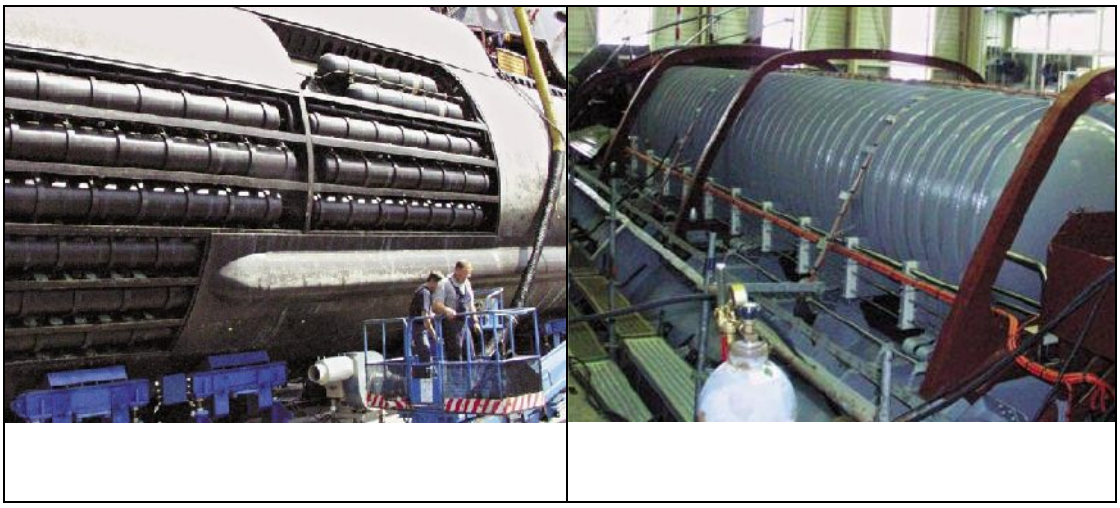
ise dahili katalitik reforming ile elde edilebilir. Bu işlem sonucundaki oluşan gaz başlıca Hidrojen ve CO_2'den oluşur biraz da CO içerir. Bu konuda yapılan geniş kapsamlı araştırmalarda özellikle düşük sıcaklık Fuel Cell'lerin yan ürünler olan CO_2 (AFC) ve CO(AFC,PEFC)'dan olumsuz etkilendikleri görülmüştür. Bunlardan CO_2, kimyasal temizleme(Chemical scrubbing) metodu ile CO ise, katalitik su-gazı yönlendirme reaksiyonu (catalytic water-gas shift reactions) metotları ile seçilerek ayrılır. Metanol diğerlerine göre 200-300 C derece sıcaklıklarda kolaylıkla çözülebildiği, kolaylıkla elde edilebildiği ve depolanması basit olduğu için özellikle düşük sıcaklık Fuel Cell'ler için en uygun Hidrokarbondur. Yüksek sıcaklık Fuel Cell'ler(MCFC ve SOFC) saf olmayan gazlardan veya CO gibi yan ürünlerden olumsuz etkilenmedikleri için yüksek derecede atık ısı ile yapılan dahili reforming sonucundaki gazın oksitlenmesi için anoda direk beslenmesini sağlar ve reforming katalist isterlerini azaltır. Bu Fuel Cell'ler doğal gazın yığın içinde reforming edilmesi için uygundurlar fakat Nafta ya da Dizel gibi daha yüksek hidrokarbonlar için kok'laşmayı önlemek için Fuel Cell yığını içine beslenmeden önce ön harici reforming gerektirir. Reformer katalistin yada Fuel Cell'in zarar görmesini engellemek için desülfürizasyon yatakları gerektirir. Hidrokarbonların harici reforming yapılmasının en önemli kısıdı net işlemin endotermik olmasıdır. PAFC Metanolu parçalamak için kendi artık ısısını kullanabilir, fakat düşük sıcaklık Fuel Cell'lerde(AFC ya da PEFC) kullanılan yüksek hidrokarbonların ya da yakıtların reformingi için gerekli işlem ısısını sağlamak için bazı yakıtların yakılmasını gerektirir. Buna ek olarak reforme edilen Hidrojenin hepsi Fuel Cell içinde kullanılamadığı için fazlası reformeri ısıtmak için yakılabilir. En iyi reformerin verimi yaklaşık %80 dir. Bu yüzden reformer ve Fuel Cell birleşimindeki kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüşümündeki tüm verim yalnız Fuel Cell'deki verime göre azaltılmıştır. %60 verimli Fuel Cell için tüm verim(Reformer ve Fuel Cell birleşiminin verimi) yaklaşık %48 olur. Sistemin karmaşıklığının arttırılması güvenirliğini azaltır ve reformer çıkışını yük-takipli Fuel Cell'e uygun hale getirmek için daha karmaşık geri besleme kontrol isterlerine sebep olur. Aynı zamanda reformerin soğuk iken startup zamanının uzun olması düşük sıcaklık Fuel Cell'lerin yüksek sıcaklık Fuel Cell'lere olan avantajını azaltır.

Hidrojen Denizaltının mukavim teknenin dışındaki metal hidrit silindirlerinde saklanır. Bu metal hidrürler metal kafes yapılarında tersinir işlemler ile Hidrojen atomlarıyla doldurulabilecek boş alanlara sahiptirler. Fuel Cell'in artık ısısı Metal Hidrür silindirlerden Hidrojeni tekrar elde etmek için kullanılır. Hidrid silindir hacmine bağlı olarak, alçak basınç ve ortam ısısında sıvı formda depolamaya göre daha yüksek miktarda Hidrojen depolamak mümkündür. Güvenli işlem yapılmasını sağlamak için mukavim tekne içindeki Hidrojen boruları çift duvarlı olup aradaki boşluk nitrojenle doldurulmuştur. Çevresel faktörlere karşı hassas olmadığından metal hidrür depo silindirleri Hidrojen depolamak için en güvenli yoldur. Hidrür serbest gaz bulundurmaz ve salınan Hidrojen miktarı uygulanan termal enerji miktarına bağlıdır. Hidrojen özel bir metal alaşımlardan oluşan metal kafeslere bağlı olan metal hidrit silindirler içerisinde depolanırlar. Bu depolama metodu ile likit Hidrojen ve yüksek basınçlı gaz şeklinde depolamadan daha yüksek hacimsel yoğunluklu depolama sağlanır aynı zamanda bu metot ile en güvenli Hidrojen depolamada sağlanır. Metal Hidrit depolama silindirlerinin bakıma ihtiyacı olmadıkları için mukavim tekne dışına yerleştirilebilirler. Mukavim tekne dışında olduklarından dolayı herhangi bir sızma halinde Denizaltı atmosferine karışma tehlikesi de bulunmamaktadır. HDW bu tip hidrit depolama metoduna Dünya çapında öncülük etmiş ve seri üretim yapabilecek imkânlara sahiptir. Hidrojen depolamada iyi yöntemlerden biride likit Hidrojen olarak depolamaktır fakat lojistik problemleri mevcuttur(Örneğin likit Hidrojen ticari olarak üretilmemektedir). Hidrojeni metal hidrit olarak depolamak oldukça güvenlidir ama Metal Hidritler çevre sıcaklığında ağırlıklarının yaklaşık %5 ağırlığında Hidrojen içerdikleri için geniş hacim isterleri vardır. Bununla birlikte Almanya U212 sınıfı Denizaltılarda kullanılan PEFC'ler için Hidrojeni bu metot ile depolamayı tercih etmiştir. Bu tercih tip 205 U1 Denizaltısında Alkalin Fuel Cell'lere yakıt sağlamak için başarılı likit Oksijen ve hidrit Hidrojen depolama çalışmalarından sonra yapılmıştır. Hidritlerde Hidrojen depolama Fuel Cell'den ortaya çıkan düşük dereceli artık ısının hidritten Hidrojen ayrıştırmak(Endotermik işlem) amaçlı kullanılabildiği için özellikle düşük sıcaklık Fuel Cell'ler için uygundur. Hidritten Hidrojen ayrıştırmanın bir avantajı da elde edilen Hidrojenin çok saf olmasıdır.

Hidrojen depolama yöntemleri(Metal hidrit, likit Hidrojen, Metanol) üzerinde yapılan çalışmalar neticesinde üç metodunda 100MWh'lık(elektriksel olarak)

nominal değerde yapılabilir olduğu gösterilmiştir. Bunun yanında Metal Hidrit ve Metanol yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Eğer Hidrojen bir metal hidritten çekilirse çevrim sonucunda sadece fakirleşmiş yakıt/oksitleyici ve su elde edilir, eğer Hidrojen Metanolden çekilirse ilave olarak bazı gazlar da yan ürün olarak oluşur. Metanol, Metal Hidrite göre daha ucuz bir Hidrojen kaynağıdır ve aynı hacimdeki metal hidrite göre yaklaşık %40 daha fazla Hidrojen atomu bağlayabilir. Bununla birlikte Metanolden Hidrojeni ayırmak için ilave bir dönüştürücü aygıta ihtiyaç vardır ki bu da sistemin toplam verimini bir miktar düşürür. Ayrıca metanol kullanımı CO_2 ortaya çıkmasına da neden olur ve bu gazın deniz suyu içinde çözündürülmesi gerekir. Bu işlem içinse bir yüksek basınç pompasına ihtiyaç olur. Pompa hem gürültü üretir hem de enerji tükettiğinden sistemin genel verimini bir miktar daha düşürür. Ayrıca suya CO_2 vermek Denizaltının gizliliğini de tehlikeye düşürür, kızılötesi ve kimyasal olarak tespit edilmesine sebep olabilir. Metal hidrit metodunda kütle sınırlaması varken Metanol ve likit Hidrojen metodunda ise hacim sınırlaması vardır. Alman Denizaltı üretici firması HDW'ye göre 50MWh'ye kadar Metal Hidritlerde Hidrojen depolama daha ekonomik iken daha yüksek enerjilerde(100MWh) hidrokarbon reformerlar daha ekonomik olmaktadır.

Tüm sistem(Fuel Cell, Reformer, Reaktantlar) ağırlık ve hacim olarak, Kumm, desülfürize edilmiş Dizel ve LOX ile çalışan MCFC'nin Metanol(harici reforming) ve LOX ile çalışan PEFC den daha iyi seçim olduğunu hesaplamıştır. Bunun yanında VSEL(Vickers Shipbuilding and Engineering Ltd.) ve İngilteredki CJB Development, Ballard tarafından yapılan PEFC ile birleştirilmiş metanol reforming sistem geliştirmişlerdir. Bu model tip 2495 Denizaltılarındaki AIP sisteminde kullanılmak için planlandı fakat İngiltere'nin tip 2400 Denizaltıları satma kararı bu tip Denizaltılarda planlanan sisteme benzemeyen sistemler ile değiştirildi bu sistem ise genel uygulamalara yönlendirildi.



Resim 5. 5 Hidrür depo silindirleri ve Sınıf 212A'ya yerleştirilmiş sıvı Oksijen deposu

5.2.2.5.5 Fuel Cell AİP'li Denizaltı Çalışmalarının Ülkelerdeki Durumu

Almanya: Alman Denizaltı şirketi HDW ayrı birim olarak 30-50 KW'lık Fuel Cell teknolojisini Denizaltılara uygulayabilmektedir. U212 tipi Denizaltılar 300 KW'lık Fuel Cell bataryaları ile donatılmıştır. Bu Fuel Cell su altında 8 knot' a kadar hareket etme kabiliyeti kazandırır. U214 tipi Denizaltılar ise 2000 KW'lık MTU 16V396 dizel motor ve 120 KW'lık iki adet Fuel Cell den oluşan hibrid tahrik sistem ile donatılmışlardır. Fuel Cell'ler su altında 6 knot'a kadar hareket kabiliyeti için yeterli olup yakıt olarak depolanan Oksijen ve Hidrojen miktarı 3 hafta boyunca sürekli su altında kalma olanağı sağlar.

Rusya: Fuel Cell Ar-Ge çalışmaları 1960'lardan beri St. Petersburg daki Rubin Tasarım dairesi devam etmektedir. Bu çalışmalar neticesinde Fuel Cell donanımlı dördüncü nesil "Amur" sınıfı Denizaltı Rus donanmasına teslim edilmiştir. Bu geminin ihraç edilecek modellerinde Fuel Cell bulunmamaktadır. Fuel Cell'li ilk tecrübeler ve deniz testleri "Whiskey" sınıfı "Kratan" Denizaltısında yapılmıştır. Fuel Cell ile çalışan bir kara istasyonu 1996 da tamamlanmıştır. Amur sınıfı Denizaltılara takılan Fuel Cell bölümü tekneyi 8 metre uzatır. "Kilo" sınıfı ihraç Denizaltılar üçüncü ve yeni nesillerine de Fuel Cell takılması kararlaştırılmıştır. Rubin dairesince yapılan Fuel Cell Siemens'in U–212 için yaptığı Fuel Cell'lere çok

benzemektedir. Almanlar'ın yaptığı dikdörtgen Ruslarınki ise silindir şeklindedir. Fuel Cell bataryanın çıkışı 100KW ile 250KW arasında değişir ve batarya sayısına bağlıdır.

5.2.2.6 Havadan Bağımsız Tahrik Sistemlerin Avantajları

• Seçilecek Hbt sisteminin kapasitesine bağlı olarak 60 güne varan karakol süresince karakol sahasının mümkün olan en yüksek yüzde ile kapsanması,

• Isı ve ses emisyonun düşük olması,

• İşletme açısından az personele ihtiyaç duyulması,

• İşletme risklerinin düşük olması,

• Enerji üretim maliyetinin düşük olması,

• Bakım ihtiyacının az, yedek parça temininin kolay olması,

• Sahil depoları tesis edildiğinde; yakıt temini, ikmalinin ve gemide stoklanmasının emniyetli ve kolay olması,

• Görev süresini tamamen kapsayabilecek şekilde gerekli yakıtı yeterince stoklanabilmesi,

• Faydalı ömrünün uzun olması, olarak sayılabilir.

• Sesiz olmaları nedeniyle hedeflerin daha uzak mesafelerden tespit ve teşhis edilebilmesi

• Denizaltı harekâtını gizlilik içinde sürdürerek, düşman üzerinde baskın tesir yapabilmesi

• Şnorkele ihtiyaç duymaması, ısı ve ses emisyonun düşük olması nedeniyle yakalanma ve tespit edilme ihtimalinin düşük olmasıdır.

5.2.3 Diğer Teknolojiler

Kapalı-dönüşüm tahrik sisteminin ilki Walter gaz-buharlı türbini idi. Hidrojen peroxide'ın tehlike arz eden özellikleri yüzünden Walter Drive tarihe karıştı ama ana fikri halen dönem dönem tekrar karşımıza çıkmaktadır. Bununla ilişkili bir başka konsept de Kreislauf ya da kapalı-dönüşüm dizelidir. Bu sistem dizel bir motoru kapalı dönüşümde çalıştırmak için egzoz gazına Oksijen enjekte eder ve böylece Hidrojen peroxide'ın tehlikelerini önlemiş olur. Bu her ne kadar Walter Drive'ın yapısında bulunan ölümcüllüğün önüne geçse de beraberinde kendi sorunlarını getirmektedir. Bunlara örnek olarak etkili kullanılmadığından Oksijeni depolamak için gereken hacim verilebilir. Ana fikrin daha yakın zamandaki bir uyarlamasında ise Oksijeni basınç gövdesinin etrafını saran toroid biçimli bir tankta saklamak düşüncesi vardır. Kâğıt üzerinde ve laboratuarda iyi bir tasarım gibi görünmesine rağmen pratikte işe kullanılamamıştır. Gerekli olan toroid şeklindeki kriyogenik (dondurucu eriyik sistemi) tankı ufak çatlaklar olmaksızın üretmek mümkün değildir. Oksijen bu çatlaklara girdiğinde, süratli ve geniş çaplı bir bozulma meydana gelir ve bu da hemen arızaya neden olur. Geniş çevrelerde teşvik edilmesine rağmen, bu fikrin peşinden gidilmemiştir.

Bir başka konsept de Brayton dönüşüm motorudur. Brayton dönüşümü iki aşamalı bir türbin içerir. İşleyen sıvı olarak argon, Helyum ya da xenon kullanılır. Hesaplamalar 5,000 tonluk sıvı Oksijen/petrollü Brayton dönüşüm güçlü bir Denizaltının 9 knot hızda 2,000 mil gidebileceğini, 3 knot'lık bir hızla istasyonda 40 gün geçirebileceğini ve eve dönmeden önce 40 saat boyunca 26 knot'lık bir fırlama yapabileceğini göstermiştir. Bu elbette ki dizel-elektrik gemilerde kayda değer bir ilerlemedir, ama 5,000 ton, nükleer-güçlü bir Denizaltıya eşittir ve bu mükemmel performans bile nükleer standartlar için yeterli değildir.

AIP'nin bir başka alternatifi tamamıyla konvansiyonel motor teknolojisinin dışına çıkmaktır. 1970'lerin başında araştırılan bir sistemde katı bir grafit (kurşun tozu) kütlesi 2,760°C (5,000°C) civarında ısıtılmaktadır. Bunu yapan yakma kömürleri Helyum kaplama ile soğutulmaktadır. Bu kütle bir Brayton dönüşüm motoru için gerekli olan çalışma enerjisini sağlayacaktı. Teorik olarak, kütle ne kadar sıcak olursa tahrik sistemi de o denli etkin olacaktı. Ne var ki, bu sistemin

güvenilirliği hakkında büyük endişeler dile getirilmiştir. Denizaltının içerisine ısı sızmasının önüne pratik izolasyon metotlarıyla geçilememekteydi ve bu yüzden de ciddi bir güvenlik tehlikesi mevzu bahisti.

Denizaltı güç santrali konusunda iki fantezi vardı. Bunlardan ilki AIP teknolojisini ve bir nükleer güç santralini aynı gövdede kullanmaktı. Amaç, küçük, doğal bir dönüşüm reaktörünü normal çalışma için kullanmaktı. Bu oldukça sessiz bir yöntem olacaktı ama yüksek süratler için yeterli güç sağlamayacaktı. Çok yüksek süratler için (fırlamalar), ek bir santral (genellikle yakıt hücreleri) devreye sokulacaktı. Bu konseptin bir başka versiyonunda, pilleri şarj etmek için küçük bir nükleer reaktör kullanılacaktı. Bu piller de Denizaltıya gerekli olan gücü sağlamaktaydılar. Pek çok fikir gibi bu düşünce de kâğıt üzerinde son derece çekici görünmektedir. Nükleer bir reaktörün ebadını (yani aslında güç çıkışını) ikiye katlamanın ağırlığı ve fiyatını da ikiye katlamak olduğu sanılmaktadır. Bu tamamıyla yanlıştır. Aslında, bir nükleer reaktörün ağırlık sorunlarının büyük bir kısmı kaplama bölümüyle alakalıdır ve sınırlı kaplama (koruma zırhı) artırımları için reaktör çıkışında önemli artışlar elde edilebilir. Reaktörün ebadını arttırmanın mali bir yükümlülüğü var ise de, bu onun doğrudan güç girişi ile ilgili değildir ve nispeten düşük bir ek maliyet ile önemli güç çıkışı kazanımları elde edilebilir.

İkinci fantezi magneto-hydrodynamic sürüş olarak adlandırılmaktadır. Başarısızlıkla sonuçlanan toplu taşıma sisteminde manyetik teknoloji kullanma projesinin bir sonucu olarak yalnızca bir kez Japonya'da bir su üstü gemisinde denenmiştir. Başka bir gerçekliği yoktur. Rus 941 Projesi (Typhoon) sınıfı balistik füze Denizaltısının böyle bir sürüş sistemine sahip olduğu iddia edilmiştir. Gerçekte ise; pratikte kullanımı mümkün olacak hiç bir magneto-hydrodynamic sistem yoktur ve böyle bir sistemin hizmete girmeye müsait bir tahrik sistemi halini almadan önce tasarım sanatı aşamasında pek çok devrim yapılması gerekecektir. Tüm bu devrimlerden sonra bile Denizaltı operasyonları için hiç de kullanılabilir olmayacaktır. Bu tür bir sistem çok sessiz olmasına rağmen, çok büyük bir manyetik parmak izine sahiptir ve kolayca tespit edilebilecek bir ısı yayma sorunu da çabasıdır. Magneto-hydrodynamic bir sürüş akustik avantajlar kazandırmakla birlikte başka yerlerde ciddi açıklara neden olmaktadır. Bu akustik avantajlar başka yollarla da elde

edilebilir. Bu yüzden bu sistem üzerinde çalışmanın bir anlamı yoktur. Nitekim bu nedenden dolayı Amerika ve İngiltere'de üzerinde durulmamıştır.

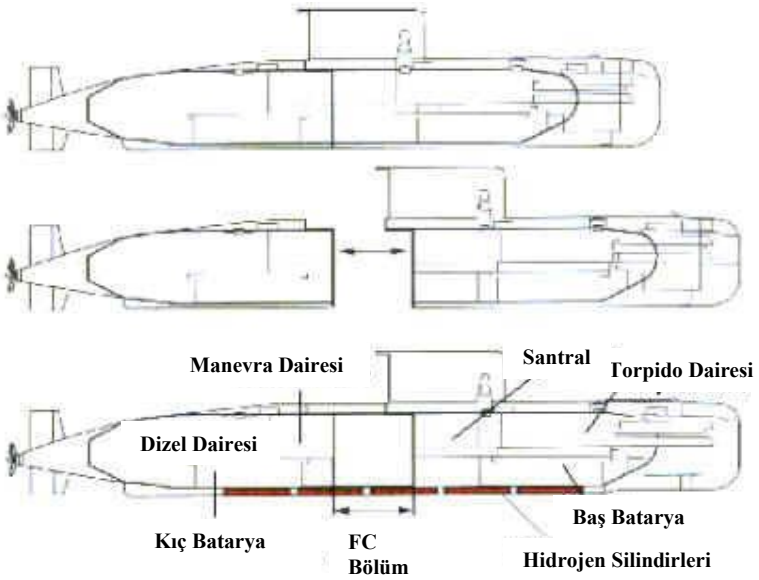
6 SONUÇ VE ÖNERİLER

Nükleer Denizaltılar tanımlanabilen ses seviyeleri ve hassasiyeti artırılan Denizaltı savunma harp sistemlerinden dolayı sığ ya da kapalı denizlerde bazı zayıf yanları bulunmaktadır. Bunların başında devamlı olarak çalışan reaktörün devir daim pompalarının çıkardığı gürültünün sebep olduğu ses izi gelir. Bazı yeni nükleer tahrik sistemlerinde düşük güçte çalışırken devir daim pompasını devre dışı bırakan doğal çevrim yöntemleri kullanılarak bu sorun bir ölçüde giderilmiştir fakat yüksek güç üretimi gerektiğinde yine de devir daim pompalarının kullanılması gerekir. Buna ilaveten Nükleer Denizaltının inşası ve bakımı oldukça pahalıdır. Sadece çok zengin ülkeler bu gemileri kullanabilmektedir. Donanmaların büyük çoğunluğunda görevlerin büyük ve önemli kısmını Denizaltılar icra etmektedir. Bugün Dünya donmalarındaki 550 Denizaltının 384 tanesi konvansiyonel tahrik sistemli Denizaltılardan oluşmaktadır. Tersanelerin portföylerinde bulunan yaklaşık 200 Denizaltının fiyatı yaklaşık 150 milyar USD dir. Denizaltıların ortalama kullanım ömrü yaklaşık 30 yıldır ve gelecekte de böyle olacağını düşünürsek yıllık Denizaltı üretimi 20 civarındadır. Birçok küçük ülke donanması yüksek verim, fayda ve değişik savaş tiplerindeki etkinliklerinden dolayı konvansiyonel Denizaltı satın almak istemektedir. Taleplerin büyük bir kısmı Alman ve ABD tersanelerine yapılmaktadır. Gelecekte eski Denizaltıların kullanım sürelerini uzatmak için modernizasyon çalışmalarına ihtiyaç olacaktır. Eski Denizaltılara AIP modülü eklenerek ya da Hibrit Sistem takılarak kullanım ömürleri uzatılabilir.

Mevcut HBT sistemleri içinde, yakıt hücrelerini diğer HBT'lerden ayırmak gereklidir çünkü yakıt hücresi haricindeki kapalı devre sistemler egzoz gazlarının bir şekilde Denizaltı dışına atılmasını gerektirirler ki bu da dalış derinliğini ve Denizaltının gizliliğini doğrudan olumsuz etkiler. Ayrıca hareketli mekanik parçalar içerdiklerinden Denizaltının ses izini ve suya verilen gazlar sebebiyle de özellikle

kimyasal izini arttırırlar. Sonuç olarak çok az hareketli parça içeren yakıt hücresi sistemleri akustik iz açısından bakıldığında bugün ve yakın gelecek için en üstün sistemlerdir denilebilir. Fuel Cell'li AIP sistemlerin tüm avantajlarına rağmen yine de daha fazla güç ve daha fazla sürede dalma gibi birçok yönden geliştirilme potansiyeli vardır. 7.500hp civarında güç üreten ilk HBT çözümü Walter türbinini ve nükleer sistemleri bir kenara bırakırsak günümüzün HBT sistemleri 150-300kW (200-400hp) civarında güç üretebilmektedir. Ortalama bir dizel-elektrik Denizaltının 3.000hp ve ortalama bir nükleer Denizaltının 20.000hp civarında sevk motorları olduğunu düşünürsek bugün ve yakın gelecekte HBT'nin ancak düşük sürat (4-5 knot) ve uzun sualtında kalış görevleri (12-17 gün) için kullanılabilir olabileceğini anlayabiliriz. AIP dizel-elektrik Denizaltıların sualtında çok hızlı gitmesini sağlamaz. AIP'nin hız karakteristikleri konvansiyonel dizel-elektrik Denizaltılarınkilere çok benzemektedir. Yüksek hızlarda uzun süre de seyredemezler; AIP sisteminin yerleşimi pil tüketimini ekilemez. Bu iki açıdan bakıldığında, AIP Denizaltılarının konvansiyonel tasarımlar üzerinde çok büyük bir ilerlemesi yoktur ve nükleer gücün sıra dışı avantajlarına sahip değildirler. Bir Denizaltıyı sevk etmek için gereken gücün kabaca süratinin küpü ile orantılı olduğu göz önüne alındığında çok ciddi teknolojik ilerlemeler sağlanmadıkça bu durumun değişmesi pek mümkün değildir. Dolayısıyla konvansiyonel HBT çözümlerinin nükleer sistemlerin yerini alması beklenemez.

Fuel Cell'li AIP sistemi günümüzde yeni gemi olarak Almanyada Type 212 ve Type 214'ün bünyesinde uygulanmış olup Dünyada ise bazı ülkelerde mevcut Type 209'lara uygulanmıştır. Bu sistemin Türk Deniz Kuvvetleri Donanması envanterinde bulunan Ay ve Preveze sınıflarına uyarlanabilirliği bulunmaktadır. Bu Denizaltıların kesilip, ortasına sistemin Oksijen tankının ve enerji üreten cihazların bulunduğu bir FC bölümü eklenebilir. Hidrojen tüpleri, gemi dışında omurgaya yakın bölüme konabilir. FC bölümünün Type 209'lara montesi için geminin kesileceği bölüm alttaki şemada gösterildiği gibi, santral-manevra dairesinin ek yeridir.



Şekil 5. 20FC bölümünün Type 209'lara montesi

Modüle verilen ve tehlikeli bir gaz olan Oksijen, Denizaltının hidrodinamiğini koruması da amaçlanarak, gemi içinde –180 derecede depolanmıştır. Reaksiyon için gerekli diğer bir gaz olan ve sızıntısı halinde patlama konsantrasyonuna çabuk ulaşan Hidrojen; gemi dışında çok sayıda Titanyum alaşımlı silindirik tüp içinde saklanmaktadır.

Modern Denizaltılar ve AIP sistemi üzerindeki mevcut çalışmalar şu şekilde sınıflandırılabilir; Yüksek kapasiteli ve yüksek verimli batarya üniteleri, Farklı konfigürasyonlarda kapalı çevrimli dizel motorlar, Kapalı çevrimde türbinler, Stirling motor ve Fuel Cell'ler. Bunların içinde bugüne kadar ulaşılan yüksek verimlerinden dolayı Fuel Cell'ler iyi bir gelecek vaat etmektedir. Fuel Cell'ler geleneksel ısı motorlarıyla mukayese edildiğinde gelecek vaat eden iyi teknik değerlerinin yanında çevre etkileri bakımından da kullanımı zaruri gibi görünmektedir. Bundan dolayı "temiz enerji" olarak adlandırılmaktadır. Tüm bunlara rağmen uzmanların görüşlerine göre gelişmekte olan ülker için Fuel Cell'li Denizaltı lar cazip görünmektedir.

KAYNAKLAR

1) Margeridis J.,Mart P., "FC air independent propulsion of submarines" DSTO-GD-0042, DOD

2) Hauschildt P. Hammerschmidt A. "An attractive energy source for submarines"

3) Erlangen, Hammerschmidt A. "FC propulsion of submarines" Advanced naval propulsion symposium, Arlington

4) Steinberg,M. and Cheng,H.C., "Moden and Prospective Technologies for Hydrogen Prduction from Fossil Fuels"

5) Silent power for non-nuclear submarines brochure-HDW

6) Class 214 submarine brochure-HDW

7) Fuel Cell Handbook (Fifth Edition)

8) PEM Fuel Cells for Submarines brochure- Siemens

9) www.thyssengroup.com

10) www.dataphone.se/~ms/ubootw/boats.htm

11) www.hdw.de

12) www.siemens.de

11) Baykara,S.Z. and Bilgen,E., "An Overall Assessment of Hydrogen Production Solar Water Termolysis"

12) Engels,H. "Thermochemical Hydrogen Production"

13) Leitman,J., "High temperature fuel cells for stationary applications"

14) Tomas L. Journal of kones. Combustion engines vol 8

15) Hancock,O.G., "A Photovoltaik-Powered Water Elektrolyzer: Its Performance and Economics"

16) Veziroğlu,T.N. and Barbir,F., "Hydrogen Energy Technologies", *UNIDO*, Vienna

17) Akgün F., "Hidrojen Enerjisi" Avrupa teknoloji platformları konferansı

ÖZGEÇMİŞ

Zekariye ALAGÖZ, 1978 Elbistan/K.Maraş doğumludur. 2001 yılında Elektronik Mühendisliği'nden mezun oldu. 2005- 2006 öğretim yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tahsiline başladı. Halen Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans öğrencisidir.

KULLANILAN BİRİMLER

1 atm = 101,325 kPa = 1,01325 bar

1 kWh = 3.600 kJ

1 cal = 4,184 J

1 kw = 0,239 kcal/sn

1 kWh = 860,1 kcal

1 kWh = 3.6×10^6 kcal

1 kJ = 1000 J = 1000 Nm = 1 kPa.m^3

1 kJ / kg = 1000 m^2/sn

1 W = 1 J/sn

1 F = 33.8 C

1 kJ / (kg.C^o) = 1 kJ / (kg.K) = 1 J / (g. ^{o}C)

T (K) = T (^{o}C) + 273,15

1 Knot = 1852 metre

1 yard = 926 metre

1 feet = 0.3 metre