

Denizaltılarda Stirling Motor Temelli Havadan Bağımsız Tahrik Sistemlerinin (AIP) Değerlendirilmesi

Kadir Beytullah Gündüz ¹, Yasemin Arıkan Özden ²

^{1,2} Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Yıldız, Türkiye

¹ (sorumlu yazar), kgunduz@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6878-8357

² yarikan@yildiz.edu.tr, 0000-0001-9909-0859

ÖZET

Ülkelerin savunma güçlerinde özellikle donanma kuvvetleri önemli bir yere sahiptir. Donanma kuvvetlerinin mihenk taşı olan denizaltılar II. Dünya Savaşı'nda ne kadar önemli bir güç olduğunu etkili bir biçimde göstermiştir. O günden günümüze denizaltılarda yapılan teknolojik gelişmeler bir hayli hız kazanmıştır. Bahsi geçen gelişmelerin en başında ise kuşkusuz tahrik sistemlerinde yapılan gelişmeler gelmektedir. Özellikle AIP (Havadan Bağımsız Tahrik) sistemlerinin kullanımı ile hızlı bir gelişim gözlenmiştir. Klasik dizel-elektrik denizaltılardan kapalı çevrimlere yakıt hücresi teknolojisine sahip denizaltılardan Stirling temelli denizaltılara kadar birçok varyant uygulanmaktadır. İsveç ve Japonya gibi gelişmiş ülkelerin donanmalarında da Stirling motor kullanımının denizaltı uygulamaları göze çarpmaktadır. Stirling motorlarının Yakıt hücrelerine kıyasla daha düşük yakıt ikmal maliyetleri ve MESMA sistemine göre daha sessiz olması başlıca avantajları olmaktadır. Ayrıca içten yanmalı motorlara kıyasla egzoz gaz atımının daha kontrollü olması tercih edilmesinin başlıca sebepleri arasında yer almaktadır. Stirling motorlarının yakın geçmişte geliştirilmesi ve NASA'ya ait radyoizitop aracında temel güç kaynağı olarak tercih edilmesi, motorun oksijene gerek duymaksızın ne kadar verimli ve bakım gereksiniminin minimum seviyede olduğunun göstergesidir. Bu makalede Stirling motorunun günümüze kadar gelen süreçte nasıl geliştirildiği ve denizaltı uygulamalarında neden tercih edildiği, avantajları ve geleceği hakkında irdelemelerde bulunulacaktır.

Anahtar kelimeler: Denizaltı, Havadan Bağımsız Tahrik Sistemi (AIP), Stirling motoru

Makale geçmişi: Geliş 08/05/2022 – Kabul 10/06/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1113622>

Assessment of Stirling Engine Based Air Independent Propulsion Systems in Submarines

Kadir Beytullah Gündüz¹, Yasemin Arıkan Özden²

^{1,2} Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering, Yıldız Technical University, Yıldız, Türkiye

¹ (corresponding author), kgunduz@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6878-8357

² yarikan@yildiz.edu.tr, 0000-0001-9909-0859

ABSTRACT

In the defense forces of countries, especially the navy forces have an important place. Submarines are the cornerstone of naval forces and their power has been effectively demonstrated in World War II. Since then, technological developments in submarines have accelerated considerably. Undoubtedly, the developments made in the propulsion systems are at the forefront of the mentioned developments. Especially with the use of AIP (Air Independent Propulsion Systems) systems, a rapid development has been observed. Many different propulsion systems are applied on submarines, classical diesel-electric submarines, closed-cycle submarines, fuel-cell technology and Stirling-based submarines. In the navies of developed countries such as Sweden and Japan applications of Stirling engines stand out. The main advantages of Stirling engines are lower refueling costs compared to Fuel cells and quieter operation than the MESMA system. In addition, the fact that the exhaust gas emission is more controlled compared to internal combustion engines is among the main reasons why it is preferred. The recent development of Stirling engines and the preference of NASA's radioisotope vehicle as the main power source shows how efficient the engine is without the need for oxygen and maintenance requirements at a minimum level. In this article, it will be discussed how the Stirling engine has been developed until today and why it is preferred in submarine applications, its advantages and its future.

Keywords: Submarine, Air Independent Propulsion (AIP), Stirling Engine

Article history: Received 08/05/2022 – Accepted 10/06/2022

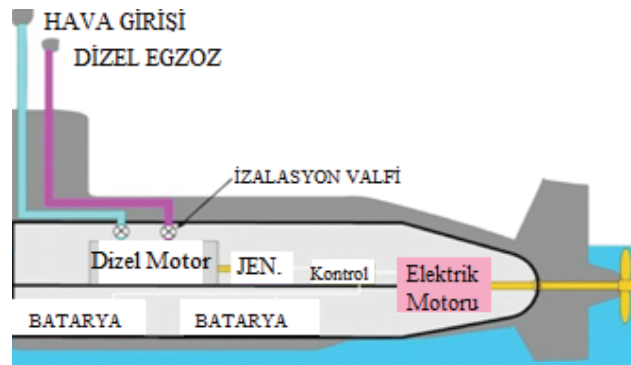
1. Giriş

Ülkelerin savunma ve taarruz yönünden donanma kuvvetleri oldukça önemli bir konuma sahiptir. Donanma kuvvetlerinde taarruz, çıkarma ve savunma alanlarında etkili olan birçok askeri taşıt bulunmaktadır. Bu taşıtların başında su altında gitmesiyle ayrı bir yere sahip olan denizaltılar gelmektedir. Denizaltıların birçok faaliyet için görev alabilmeleri ve oldukça uzun süren operasyonları gerçekleştirmeleri önemli bir enerji ihtiyaçlarının olduğunu göstermektedir. Denizaltıların satıha çıkmadan görevlerini yapabilmeleri ve kendi bünyelerinde enerjilerini sağlamaları hayati bir yere sahiptir. Bu alanda II. Dünya savaşından itibaren birçok gelişme yaşanmıştır.

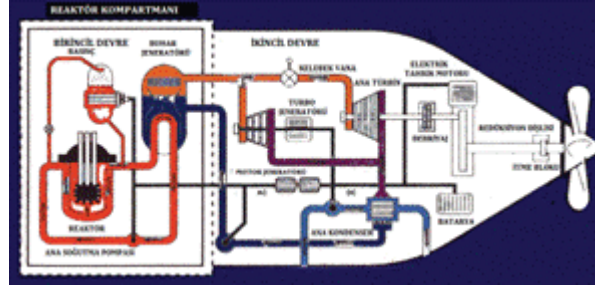
Denizaltılarda günümüze kadar farklı birçok tahrik sistemi kullanılmıştır. Geliştirilen yeni sistemler ile geçmişe göre çok daha kapsamlı niteliklere sahip denizaltılar uzun süren operasyon faaliyetlerini başarılı bir şekilde gerçekleştirebilmektedir. Genel olarak denizaltılarda kullanılan tahrik sistemleri klasik dizel-elektrik, AIP sistemler ve nükleer tahrikli sistemler olarak sınıflandırılabilir.

1.1. Tahrik Sistemlerine Göre Denizaltılar

Denizaltıların en önemli bileşeni tahrik sistemleri oluşturmaktadır. Bunun başlıca nedeni ise tahrik sisteminin hareket ve manevraya doğrudan etki etmesi ve denizaltıların gizliliğinde önemli bir rol oynayan ses ve titreşim oluşturan ana etmen olarak gösterilmeleridir. Denizaltıların suyun altında hareketleri sırasında enerji üretimi için gerekli olan oksijen elementinden mahrum kalmaları denizaltıların kullanımındaki temel sorunu oluşturmaktadır. Operasyonel faaliyetler esnasında denizaltıların enerji üretimi için su yüzeyine çıkmaları denizaltıların en savunmasız zamanı olarak nitelendirilmektedir. Bu durum Şekil 1'de örneği gösterilmiş olan klasik dizel-elektrik sevk sistemine sahip denizaltıların en büyük sorunlarından biri olarak değerlendirilirken, diğer bir sorun ise suyun altında enerji üretmediği için su altındaki faaliyetlerin kısa periyotlar halinde ilerlemesidir. Yakın geçmişte farklı tip tahrik sistemlerinin gelişmesi ile bu sorun ortadan kalkmıştır. Özellikle nükleer sevk sistemine sahip denizaltıların dört kilogram uranyum elementinin radyoaktif enerjisiyle denizaltının kullanım ömründen daha fazla süre enerjisinin yetmesi bunun en büyük örneğini teşkil etmektedir (Şekil 2). AIP sistemler ise bu sorunu başka bir çözüm yolu ile aşmayı başarmıştır (Şekil 3). Havadan bağımsız olarak enerji üretebilen ve bunu nükleer güce sahip olmaksızın yapabilen birçok varyant bulunmaktadır. Nükleer denizaltılar da AIP sınıfına girebilir, ancak nükleer denizaltılar radyoaktif tehlike, yüksek maliyet ve yüksek teknoloji seviyesi nedeniyle çok yaygın değildir ve sadece altı ülke (ABD, Rusya, İngiltere, Fransa, Çin ve Hindistan) tarafından kullanılmaktadır (Watch, 2012).



Şekil 1. Klasik Dizel-Elektrik Tahrik Sistemi (Baino, 2018)



Şekil 2. Nükleer Tahrik Sistemi (Association, 2021)



Şekil 3. Havadan Bağımsız Tahrik Sistemi (Sutton, 2020)

1.2. Havadan Bağımsız Tahrik Sistemleri (AIP)

Klasik dizel-elektrikli denizaltıların özellikle yüksek hızlarda su altı seyir süreleri sınırlıdır. Dizel jeneratörleri çalıştırmak için şnorkel seyri yapmak zorunda kalan klasik dizel-elektrikli tahrikli denizaltılar, bu durumdan kaynaklı savunma zafiyeti vermektedir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için nükleer tahrikli denizaltı uygulamaları yapılmıştır. Ancak bu çözüm teknolojik gereksinime ihtiyaç duymakla birlikte maliyetli olmaktadır. Aynı zamanda nükleer atık ürünlerinin atımı güvenlik problemi yaratmaktadır (Katoch, 2021).

Denizaltıların su altı seyir sürelerini arttırmanın daha ucuz ve güvenli bir yoluna duyulan ihtiyaç, yakıt hücresi, Stirling motoru gibi AIP sistemlerinin araştırılmasına yol açmıştır. Havadan Bağımsız Tahrik (AIP) sistemleri nükleer tahrik sistemlerine alternatif olarak geliştirilmiştir. AIP Sistemleri nükleer tahrik sistemleri ile kıyaslandığında, nükleer tahrik sistemleri kadar uzun sualtı operasyon süresi elde edemese de çok daha sessiz, düşük maliyetli, teknolojik gereksinimi daha az ve güvenli sistemler olarak tanımlanabilmektedir (Patrick, 2012). AIP sistemler, klasik dizel-elektrikli tahrikli denizaltıların su altı operasyon sürelerini günlerden haftalara hatta aylara çıkarabilmektedir. Bu sebeple klasik dizel-elektrikli tahrik sistemlerine göre büyük bir avantaja sahip olmaktadır. AIP sistemlerin bir başka kayda değer özelliği ise klasik dizel-elektrikli denizaltılara kolayca entegrasyon işleminin yapılabilmesidir. Genel olarak entegrasyon işlemi paralel boy ekleme yöntemi ile yapılabilir de alternatif olarak tahrik sistemindeki modernizasyon işlemiyle de yapılabilmektedir (Jang, 2021). Modernizasyon işleminde dizel jeneratörler daha kompakt ve güç oranı yüksek jeneratörler ile yenilenir, elektrik tahrik motoru güncel versiyonları ile değiştirilerek bu sırada kazanılan hacim ile AIP sistemin entegrasyon işlemi yapılabilmektedir.

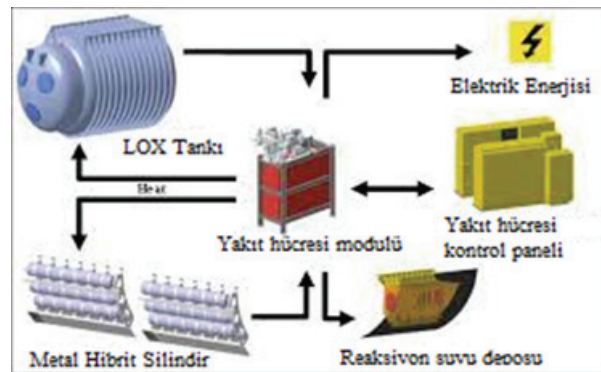
Günümüzde havadan bağımsız tahrik sistemlerinin birçok farklı tipi kullanılmakta ve temel aldığı enerji üretici sistemlerine göre kendi arasında ayrılmaktadır. Günümüze kadar olan gelişim süreci 1860'lı yıllara kadar uzanmaktadır. 1867 yılında geliştirilen, Narcís Monturiol i Estarriol denizaltısı peroksitle çalışan havadan bağımsız bir buhar motoru ile çalışmasıyla ilk AIP sistem olma özelliğini taşımaktadır (Joubert, 2008). 1908'de Rus İmparatorluk Donanması tarafından, basınçlı hava ile beslenen ve su altında tükenen benzinli bir motor kullanan denizaltı Pochtovy denize indirilmiştir (Gray, 1985).

Almanya'da Helmut Walther 1935'te kapalı çevrim olarak çalışan denizaltılar için türbin projesini tanıtmıştır. Walther'in türbini olarak adlandırılan bu sistem, İkinci Dünya Savaşı sırasında birkaç Alman denizaltısına kurulmuştur. Sovyetler Birliği'nde de İkinci Dünya Savaşı'ndan önce kapalı çevrim olarak çalışan güç sistemleri üzerine araştırmalar başlamıştır. Savaşın sonuna doğru, 50'li yıllardan itibaren, ağırlıklı olarak nükleer enerjili denizaltılar üzerine çalışmalar yapılmıştır. Daha sonraki yıllarda nükleer olmayan AIP sistemler üzerine araştırmalar hız kazanmıştır (Preston, 1988).

1950 yılında İngilizler HMS Explorer ve HMS Excalibur isimli havadan bağımsız tahrik sistemine sahip denizaltıları denize indirmiştir (Preston, 1988). Sovyetler Birliği de bu teknolojiyi denemiş ve bir deney denizaltısı inşa etmiştir. Hidrojen peroksit, uçucu olması, çeşitli metallerle yüksek oranda reaktif olması ve denizaltılar tarafından yüksek oranda tüketilmesi nedeniyle zamanla terk edilmiştir. Bunu denediği bilinen ülkeler, Sovyetler ve İngiltere'dir. Amerika Birleşik Devletleri denizaltı tahriki için yeterince küçük bir nükleer reaktör geliştirdiğinde hidrojen peroksiti terk etmiştir. (Preston, 1988). İkinci Dünya Savaşı sırasında Kriegsmarine, Walter peroksit sistemine alternatif olarak, TİP XXVIIIB Seehund cüce denizaltısının bir çeşidi olan "Klein U-boot" da dahil olmak üzere kapalı dizel çevrim sistemini ilk kez kullanarak birtakım deneyler yapmıştır (Rossler, 2001). Aşağıda günümüze kadar kullanılan başlıca havadan bağımsız tahrik sistemleri incelenmektedir.

1.2.1. Yakıt Hücresi

Yakıt hücresi teknolojisi basit anlamda kimyasal reaksiyon kullanarak elektrik enerjisi üreten bir sistem olarak tanımlanmaktadır. Şekil 4'te yakıt hücresinin sistem bileşenleri verilmiştir. Yakıt hücreleri, kimyasal enerjiyi gürültü veya yanma olmaksızın doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren enerji dönüştürücülerdir. Yakıt hücrelerinde, depolanan hidrojen ve oksijen ile elektroliz işlemi gerçekleştirilerek su ve elektrik enerjisi açığa çıkarılmaktadır. Elektrik enerjisi doğrudan denizaltının aküsünü beslemek için kullanılmaktadır. Egzoz gazı üretmediği ve çok az ısı yaydığı için, yakıt hücresi sistemi, dalış basıncından bağımsız olarak ve denizaltının akustik izi üzerinde herhangi bir bozulma etkisi olmaksızın çalışabilmektedir. (ThyssenKrupp, 2020).



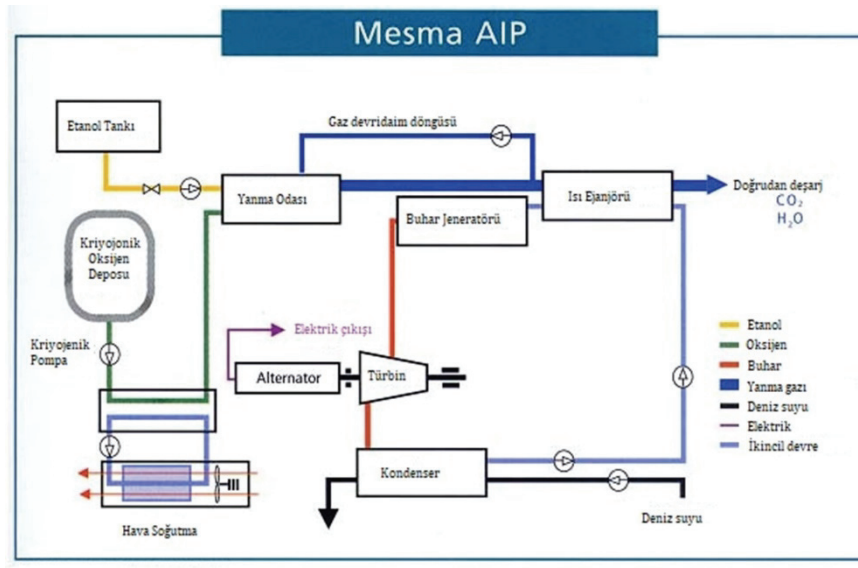
Şekil 4. Yakıt hücresi (FC) çalışma şematiği (Krummrich & Gmbh, 2010)

Halihazırda yakıt hücreli tahrik sistemleriyle çalışan veya yapım aşamasında olan çok sayıda denizaltı bulunmaktadır. Düşük gürültü ve kızılötesi izler, yüksek verimlilik ve düşük bakım gereksinimleri, yakıt hücresi sistemlerini nükleer olmayan yeni denizaltılar için alternatif çözüm haline getirmektedir. Yakıt hücresi sisteminde hidrojen ve oksijen stoklama zorunluluğu ağırlık ve hacim konusunda zorlayıcı olmaktadır. Ayrıca AIP stoklarının ikmali için özel şartlar ve araçlar da sağlanmalıdır. Yakıt hücrelerinin

karmaşık çalışma prensibi ve üretim zorluğu birkaç üreticiyi tekel durumunda tutmaktadır. (ThyssenKrupp, 2020).

1.2.2. MESMA (Otonom Denizaltı Enerji Modülü)

MESMA sisteminin çalışma prensibi kısaca alkol türevi olan metanol veya etanol ile oksijenin yakılmasıyla su buharının oluşturulması ve bu buharın da türbinden geçirilerek tahrik sağladığı kapalı devre buhar türbinlerine dayanmaktadır. Şekil 5'te MESMA sisteminin çalışma şematiği verilmiştir. Türbin kullanarak elektrik enerjisi ürettiği için çalışma prensibi olarak nükleer tahrikli denizaltılara benzerlik göstermektedir. Nükleer tahrik sisteminden tek farkı enerji kaynağı olarak nükleer reaktör yerine etanol-oksijen karışımını kullanmasıdır (Buckingham, Mimeche, Hardy, & Mimarest, 2008).



Şekil 5. MESMA AIP sisteminin şematik gösterimi (Baino, 2018)

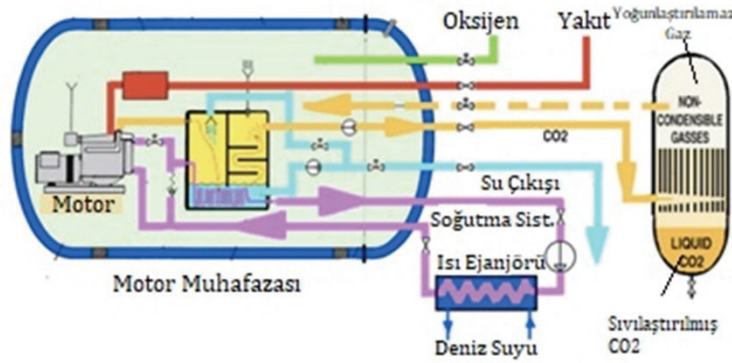
MESMA'nın avantajı alternatifleriyle karşılaştırıldığında daha yüksek su altı seyir hızlarına izin vermesi ve daha yüksek güç çıkışı sunmasıdır. En büyük dezavantajı ise düşük verimliliğidir. Buna ek olarak oksijen tüketim hızı çok yüksektir ve karmaşık bir sisteme sahiptir. Belirtilen dezavantajlarından dolayı birçok donanma MESMA yerine Stirling motoru veya yakıt hücresi alternatiflerini tercih etmektedir (Kerros, Inizan, & Grousset, 2002).

1.2.3. Kapalı Dizel Çevrim

Kapalı dizel çevrimi, denizaltı tam dalmış durumdayken dizel makinaları çalıştırmak suretiyle depolanmış oksijeni kullanarak elektrik enerjisi üretmeye dayanmaktadır (Şekil 6). Satıhtayken yani yüzeydeyken veya şnorkel derinliğindeyken dizel makinalar normal şekilde çalıştırılmaktadır. Oksijenin, argon gibi durağan gazlarla karıştırıldığı kapalı devre dizel teknolojisinde, yanma sonrası da bu durağan gazlar geri dönüşüme tabi tutulurken, diğer gazlar soğutulurken gemiden uzaklaştırılmaktadır (Tihonov, Bazykin, & Mukhanov, 2019).

Kapalı dizel çevrim sistemi, dizel jeneratörlerin yüksek gürültü ile çalışması ve dizel motorların su altındayken çalışabilmesi için gereken oksijen miktarının fazla olması diğer tip AIP sistemlere karşı geri planda kalmasına neden olmuştur. 1960'larda bu teknolojiyi kullanan Sovyet denizaltıları, yangın riskinin yüksek olmasından dolayı kapalı dizel çevrimini kullanmayı bırakmışlardır. Kapalı Dizel Çevrim

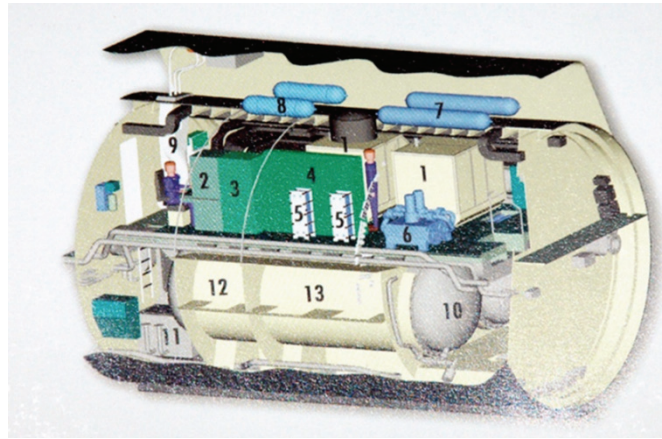
sistemi nispeten daha ucuz olmasına ve standart dizel yakıt kullanımıyla lojistiği basitleştirmesine rağmen modern denizaltılar için tercih edilmemektedir. (Buckingham vd., 2008).



Şekil 6. Kapalı dizel çevrim AIP sisteminin şematik gösterimi (Coates, 2013)

1.2.4. Stirling Motoru Temelli AIP Sistemi

1980'li yıllarda Stirling motorlu AIP sistemi ilk olarak İsveçli Kockums şirketi tarafından bir denizaltıda kullanılmıştır. Nükleer sonrası dönemde üretilen ilk modern AIP sistem olma özelliğini taşımaktadır. Stirling motorları dıştan yanmalı bir motor olma özelliğiyle iki temel sorunla başa çıkabilmektedir. İlki patlamasız sessiz yanma ile çalışabilmesi ve basit termodinamik çevrimi sayesinde herhangi bir sıcaklık farkı ile çalışabilmesidir. Yakıt hücrelerine yakın bir sessizlikte çalışması, basit sistem prensipleri ve hidrojen stokuna gerek duymamasıyla öne çıkmaktadır. Olgunlaşmış ve basit bir teknoloji olduğundan güvenli ve yaygın kullanılmaktadır. (STM ThinkTech, 2021) Ömür devri maliyeti rakiplerine oranla oldukça düşük olmaktadır. Dezavantajı ise verimli çalışma derinliği kısıtlaması olarak gösterilmektedir. Şekil 7'de Stirling AIP sistem modülü gösterilmiştir.



Şekil 7. Stirling AIP Modülüne ait denizaltı kesit modeli (Özden, 2010)

1.3. Havadan Bağımsız Tahrik (AIP) Sistemlerinin Kıyaslanması

Hali hazırda kullanılan havadan bağımsız tahrik sistemleri üstünlükleri ve zayıflıkları yönünden karşılaştırılmıştır. Donanmalar tarafından en yaygın tercih edilen sistemlerin yakıt hücresi ve Stirling motoru olduğu görülmektedir. Havadan bağımsız tahrik sistemlerinin başlıca avantaj ve dezavantajları aşağıda Tablo 1'de özetle sunulmuştur.

Tablo 1: AIP sistemlerin başlıca avantaj ve dezavantajları

AIP Sistemler	Avantajları	Dezavantajları
Yakıt Hücresi	<ul style="list-style-type: none"> • AIP sistemleri arasında en sessiz sistemdir (Mart & Margeridis, 1995). • Düşük sıcaklık ve yüksek verimle çalışabilmektedir. • Günümüzde yaygınlaşan en ileri teknolojiye sahip AIP sistem olarak görülmektedir. • Uzun kullanım ömrüne sahiptir. • Yakıt Pilleri, belirli koşullar altında %80'in üzerinde bir verime ulaşabilmektedir (J. C. Lee & Shay, 2018). 	<ul style="list-style-type: none"> • Hidrojen ve oksijen stoklama zorunluluğu vardır. Bu yüzden ağırlık ve hacim konusunda olumsuz etkisi vardır. • Karmaşık çalışma prensibine ve üretim zorluğu bulunmaktadır. Bu nedenle birkaç üretici tekel konumundadır (Fruhling & Schiemann, 2015). • Diğer AIP sistemleri arasında en maliyetli olanıdır.
MESMA	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek güç çıkışı sunmaktadır. • Bu sayede AIP'ler arasında en yüksek sualtı seyir hızına ulaşabilmektedir. • Derinlik limiti olmamasıyla öne çıkmaktadır. 	<ul style="list-style-type: none"> • Oksijen ve yakıt tüketimi oldukça fazladır. • Düşük verime sahiptir. • Sistem donanımı hantal hacimli olması önemli olumsuz özelliğidir (Jang, 2021). • Gürültülü seviyesi yüksektir. • Karmaşık tesisat sistemlerine sahiptir.
Kapalı Dizel Çevrim	<ul style="list-style-type: none"> • Oldukça basit bir sisteme sahiptir. • Ek bir AIP modülüne ihtiyaç duymamaktadır. • İlk yatırım maliyeti düşüktür. • Standart dizel yakıtı kullanmaktadır. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dizel makine çalıştırdığı için yüksek oksijen gazına ihtiyaç duymaktadır. • Yangın riski oldukça yüksektir. • Eski bir sistemdir ve günümüzde kullanılmamaktadır.
Stirling Motor	<ul style="list-style-type: none"> • Yakıt hücrelerine yakın bir sessizliğe sahiptir. • Basit sistem prensipleri ve hidrojen stokuna gerek duymaması öne çıkmaktadır. • Kullanılan ilk modern AIP sistemidir. Bu nedenle olgunlaşmış ve basit bir teknolojiye sahiptir. • Güvenli ve yaygın olarak kullanılmaktadır. • Ömür devri maliyeti rakiplerine oranla oldukça düşüktür. • Egzoz atımı oldukça basit bir sisteme dayanmaktadır (H. Nilsson, 1988). 	<ul style="list-style-type: none"> • Akustik ve termal iz oluşturmaktadır. • Verimli çalışma derinliği 250-300 metre ile sınırlıdır (Ahmed, Huang, Ahmed, & Wang, 2020). • Hareketli parçaların bulunması sebebiyle yakıt hücresi sistemine oranla gürültülü olmaktadır. • Hacim olarak büyüktür ve güç/hacim oranı düşüktür.

Tabloda AIP sistemlerin olumlu ve olumsuz tarafları özetlenmiştir. AIP sistemi seçilirken uygulanacağı denizaltının özellikleri ve üretim amacı dikkate alınmalıdır. Denizaltıda kullanılacak olan AIP sisteminin seçiminde birçok parametre göz önünde bulundurulmaktadır. AIP sistemlerinin birbirleri arasındaki avantajları ve dezavantajları göz önüne alındığı zaman, iki farklı AIP sistemi ön plana çıkmaktadır. İlk olarak yakıt hücresi tercih edilebilir seçenek olarak görülmektedir. Yakıt hücresinin diğer AIP sistemlere

göre oldukça yüksek verime sahip olması ve son yıllarda üretilen ve yapılması planlanan denizaltılarda tercih edilmesi büyük avantaj sağlamaktadır (Jang, 2021). Diğer yandan kimyasal reaksiyon sonucu elektrik üretimini gerçekleştirdiği için egzoz atımı, yanma odası gibi problemler doğurmamaktadır (Psoma & Sattler, 2002). Buna ek olarak en sessiz AIP sistem olduğu için akustik iz oluşturmamaktadır. Bu özellik tercih edilmesindeki başlıca sebeplerinden biri olarak görülmektedir (Han, Charpentier, & Tang, 2012).

Yakıt hücresine rakip olarak görülen diğer bir sistem ise Stirling motorudur. Stirling AIP sistemi ilk modern AIP sistem örneğini teşkil etmektedir. Bu nedenle uzun yıllar boyunca geliştirilme imkânı bulmuştur. Ayrıca yakıt hücresi dışında diğer AIP sistemlerle kıyaslandığında daha sessiz bir sistemdir (Han vd., 2012). Dıştan yanmalı olarak çalışması sebebiyle basit bir çalışma prensibine sahiptir. Yakıt hücresi sistemi ile kıyaslandığındaki en büyük avantajı hidrojen stokuna gerek duymamasıdır. Günümüzdeki AIP sistemine sahip denizaltılarda yaygın kullanımı mevcuttur (bkz. Tablo 2). Yakıt hücresi gibi teknolojik gereksinimlerinin yüksek olmaması sebebiyle belirli teknolojik birikimi olan ülkelerin kendi Stirling AIP sistemini geliştirmesi mümkün olabilmektedir.

Stirling motoru dıştan yanmalı bir motor olsa da ısı ile çalıştığı için belirli bir termal iz oluşturmaktadır. Buna ek olarak hareketli parçaların bulunması gürültü yayarak akustik iz oluşturmaya sebebiyet vermektedir. Stirling AIP sisteminin en büyük dezavantajlarından biri de çalışma derinliğinin kısıtlı olmasıdır. Bu dezavantaj, denizaltının 300 metreye kadarki dalmış durumdayken AIP sistemi aktive ederek bataryaları doldurması, sonrasında ise pasif duruma getirip daha derine inerek operasyonunu gerçekleştirmesi ile mümkün görünmektedir. Stirling AIP sistemi, denizaltının özellikleri ve üretim amacı doğrultusunda tercih edilebilir sistem olarak değerlendirilebilir.

2. Stirling Motoru

Stirling motorunun mucidi İskoç kilisesinin başrahipliğini yapan Robert Stirling (1790-1878), kendi icadı olan Stirling motoruna hava motoru adını vermiştir. O günlerde buhar motoru pek çok alanda kullanılmaktaydı ancak buhar motorları sıklıkla patlayıp insanların ölümüne yol açmaktaydı bu nedenle Stirling motoru alternatif bir motor olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1816 yılında Stirling yeni "hava motoru" için ilk patentini almıştır. Bunu izleyen yıllarda helyum ve hidrojen gibi genleşme katsayısı yüksek olan gazlar işletme akışkanı olarak tercih edilmeye başlanmıştır. Stirling motorları kendi başına bir motor sınıfını tanımlamaktadır. Bu motorlar sıcak hava veya helyum gibi gazları kapalı bir çevrimde sürekli kullanan motorlar olarak nitelendirilmektedir.

Motor içindeki gaz içten yanmalı motorlar gibi motor dışına atık olarak gönderilmez aksine motor çevriminin bölümleri arasında kullanılmaktadır. Stirling motorunun içindeki sıcak gaz soğuk rejeneratör içinden aktığında onu ısıtmaktadır. Bu, havayı ısısının geri kalanını kaybedeceği ve çevrimin tamamlanacağı motorun soğuk tarafına geçmeden önce, bir miktar soğutmaktadır. Bu işlem, bir çevrimini her tamamladığında egzoz yoluyla kalan bütün ısısını dışarı atan içten yanmalı motorlarla benzerlik göstermektedir.

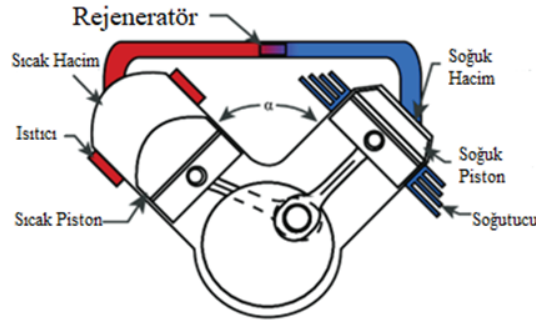
2.1. Stirling Motorunun Çalışma Prensibi

Stirling motoru, harici olarak uygulanan bir sıcaklık farkı temelinde çalışan bir ısı motorudur. Sıcak ve soğuk sıcaklık farkını koruyarak motor çalışmakta ve mekanik güç üretebilmektedir (Şekil 8). İçten yanmalı motorlardan farklı bir çalışma şekline sahiptir. Kapalı bir çevrime sahiptir, yani çalışma gazı motorun içine sızdırmaz şekilde kapatılmıştır. Bu, çalışma gazının (havanın) ortamdaki çekildiği, yakıtla yakıldığı ve egzoz olarak dışarı atıldığı içten yanmalı motorların tam ters şekli olmaktadır. Bundan dolayı

içten yanmalı bir motorda vanalar ve zamanlama mekanizmaları gereklidir. Ancak bir Stirling motorunda bu tür bileşenlere gerek duyulmamaktadır. Ayrıca, Stirling motoru kapalı bir çevrime sahip olduğundan dolayı ısıyı oluşturmak için kullanılan yakıt türüyle sınırlı olmamaktadır. Kirlenici olmayan güneş enerjisi veya karbon nötr olan biokütlenin (odun, kabuk, etanol, vb.) yakılması da dahil olmak üzere birçok ısı kaynağını kullanabilmektedir. (Normani, 2013).

Stirling motorunun temel çalışma prensibi şu şekildedir; motor çalışma gazı olarak nitelendirilen hava, helyum veya hidrojen gibi bir gazla doldurulmaktadır. Motorun içinde gaz ısıtılır, basıncı artırılır ve sonuç olarak pistonları hareket ettirmektedir. Devamında gaz soğutulur ve basıncı düşürülmektedir.

Daha sonra tekrar ısıtılır ve döngü tekrarlanmaktadır. Gerçek bir motorda bu, tipik olarak, bir içten yanmalı motor ile aynı hızda, çok hızlı gerçekleşmektedir. Çalışma gazı, motorun içinde, sıcak ve soğuk uçlar arasında çok hızlı bir şekilde ileri geri hareket ettirilir, sürekli olarak ısı kazanır ve kaybeder ve bunun sonucunda güç üretilmektedir (Normani, 2013).



Şekil 8. Stirling motorunun çalışma prensibinin gösterimi (Nightingale, 1986)

Motorun içindeki çalışma gazını ısıtıp soğutmak için ısıtıcı ve soğutucu kullanılmaktadır. Isıtıcı ve soğutucu, içinde çalışma gazının aktığı dar borulardan (veya geçitlerden) oluşan tipik olarak kompakt ısı eşanjörleridir. Çalışan gaz ya ısı kazanmakta ya da ısı kaybetmektedir.

Isıtıcının dış yüzeyi, brülör alevi veya konsantre güneş enerjisi gibi yüksek sıcaklık kaynağına maruz kalmaktadır. Soğutucunun dış yüzeyi ortam havası veya su gibi bir soğuk sıcaklık kaynağına maruz kalmaktadır. Isıtıcı ve soğutucu arasında bir rejeneratör bulunmaktadır. Bir rejeneratör, ısıtıcının ısı girdi gereksinimini ve soğutucunun ısı uzaklaştırma gereksinimini azaltarak bir Stirling motorunun verimliliğini arttırmaktadır. Motorun çalışması için bir rejeneratöre sahip olmak gerekli değildir, ancak yakıt maliyeti söz konusu olduğunda, maliyet düşürme açısından bir rejeneratöre sahip olmak avantaj sağlayacaktır (Normani, 2013).

Rejeneratör, çalışma gazının ısıtıcıdan soğutucuya geçerken ısı enerjisinin bir kısmını depolamak ve böylece soğutucu üzerindeki soğutma talebini azaltmaktadır.

Dönüş yolunda, çalışma gazı soğutucudan ısıtıcıya hareket ettikçe, bu ısı enerjisinin bir kısmını geri kazanarak ısıtıcının ısıtma ihtiyacını azaltmaktadır. Bir rejeneratör temel olarak çalışma gazını ısıtıcıya girmeden önce ısıtmakta ve çalışma gazını soğutucuya girmeden önce soğutmaktadır.

2.2. Stirling Bileşenleri

Stirling motoru günümüzde birçok farklı amaçta ve bu amaçlar doğrultusunda birçok farklı tipte bulunmaktadır. Şekil 9'da Stirling motoruna ait bileşenler gösterilmiştir. Ancak Stirling motorunu

oluşturan temel bileşenler birbiri arasında benzerlik göstermektedir. Stirling motoru temel anlamda birkaç bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler kısaca şu şekilde tanımlanabilmektedir:

Isıtıcı: Stirling motorunun sıcak bölgesindeki silindiri ısıtan kısım olarak tanımlanmaktadır. Isıtıcı kaynağı, dıştan yanmalı bir sistem olduğundan dolayı herhangi bir yakıt olabilmektedir. Isıtıcı kaynağı fosil yakıtlar, biodizel, alkol, güneş vb. farklı yapılarda kullanılmaktadır.

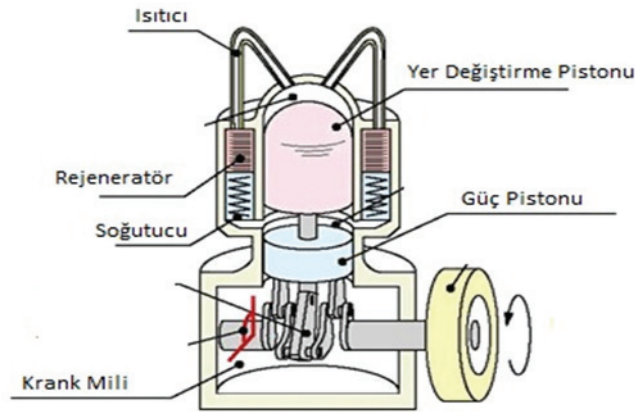
Silindir: Pistonların içinde hareket ettiği yapı olarak tanımlanmaktadır. Farklı Stirling tiplerinde silindir sayısı değişebilmekte ve maruz kaldığı sıcaklık miktarına karşı farklı materyallerden yapılabilmektedir.

Piston: Silindir içerisinde bulunan ve sıcaklığın değişmesi ile genişleyen hava sayesinde hareket eden parça olarak tanımlanmaktadır. Farklı Stirling motor tiplerine göre soğuk-piston sıcak-piston veya genelde serbest pistonlu Stirling motorda bulunan yer değiştirme ve güç piston olarak da tanımlanmaktadır. Güç pistonu Stirling motor içerisinde oluşturulan hareketi krank miline ileten veya elektrik enerjisine çeviren parçadır. Yer değiştirme pistonu ise sıcak tarafta bulunan ve hareket etmesiyle güç pistonunu hareket ettiren kısımdır.

Soğutucu: Isıtıcı tarafından ısınan hava pistonu hareket verdikten sonra hava soğuk bölgeye ilerlemekte, burada havayı soğutarak sıcaklık farkı oluşturmakta ve motorun verimli bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır.

Rejeneratör: Stirling motorunun sıcak ve soğuk bölgeye geçişindeki ısıyı depolayan ve motora tekrar kazandıran ve bu sayede motor verimini arttıran kısımdır.

Krank Mili ve Şaft: Pistonların silindir içinde lineer hareketini sağlamak için bağlı olduğu parça şaft olarak tanımlanmaktadır. Krank mili ise pistonların lineer hareketini dögüsel harekete çeviren kısımdır.



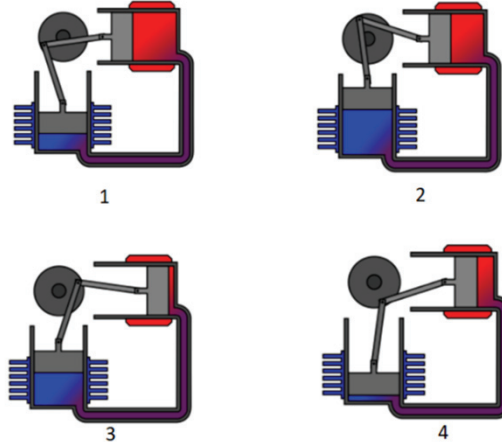
Şekil 9. Stirling motoru temel bileşenleri (Masato Kitazaki, 2017)

2.3. Stirling Motor Tipleri

Stirling motoru bazı temel bileşenlerinin veya formunun farklılaşması ile çeşitli tiplere ayrılmıştır. Bu farkların başında silindir piston düzeneğinin çeşitlenmesi ve volan-krank yapısının değişmesi gelmektedir. Stirling motorlar dört ana tipte incelenmektedir. Bunlar Alfa tipi, Beta tipi, Gama tipi ve son yıllarda ilgi görmekte ve kullanılmakta olan serbest pistonlu Stirling motor tipi olarak tanımlanmaktadır.

2.3.1. Alfa Tipi

Alfa tipi pistonlar iki adet piston, bir adet volan, pistonların bulunduğu kapalı bir gaz haznesi, ısı eşanjörleri, ısı üretici ve bir adet volandan oluşmaktadır. Üst kısma yerleştirilmiş olan pistonun etrafı ısı kaynağıyla ısıtılarak içerisinde bulunan gazın aktifleşmesi hedeflenmektedir. Isınan gaz pistonu ileri geri itmeye başlar, bağlı bulunan diğer piston da harekete başlar bu sayede sıcak ve soğuk gaz hazne içerisinde yer değiştirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu iki pistonun kranklarla bağlı olduğu volan yardımıyla oluşan enerji aktarılıp kullanılmaktadır (Şekil 10) (Stirling, 2017).

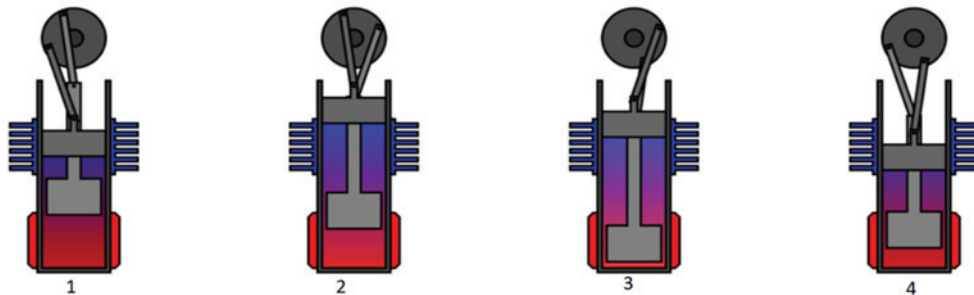


Şekil 10. Alfa Tipi Stirling motorunun hareket döngüsü gösterimi (Richard Wheeler, 2007)

Bu tür bir motor, yüksek güç / hacim oranına sahiptir, ancak genellikle sıcak pistonun yüksek sıcaklığı ve contalarının dayanıklılığı nedeniyle teknik sorunları vardır. Pratikte, bu piston genellikle bazı ek ölçü alan pahasına contaları sıcak bölgeden uzaklaştırmak için büyük bir yalıtım kafası taşımaktadır. Krank açısının verimlilik üzerinde önemli bir etkisi vardır ve en iyi açının sıklıkla deneysel olarak bulunması gerekmektedir.

2.3.2. Beta Tipi

Aynı şaft üzerinde iki adet piston bulunmaktadır. Bu iki piston birbirine bağlıdır. Alt tarafta bulunan pistonun bulunduğu hazne ısıtılarak kapalı hazne içerisindeki gazın ısınarak aktifleşmesi sağlanmaktadır. Bu sayede piston yukarı yönlü hareketine başlamaktadır. Bağlı bulunan diğer piston da bununla birlikte soğuk gazı hazne içerisinde hareket etmesine yardımcı olmaktadır (Şekil 11). Pistonların kranklarla bağlı olduğu volan yardımıyla oluşan enerji aktarılıp kullanılmaktadır (Gheith, Hachem, Aloui, & Ben Nasrallah, 2018).

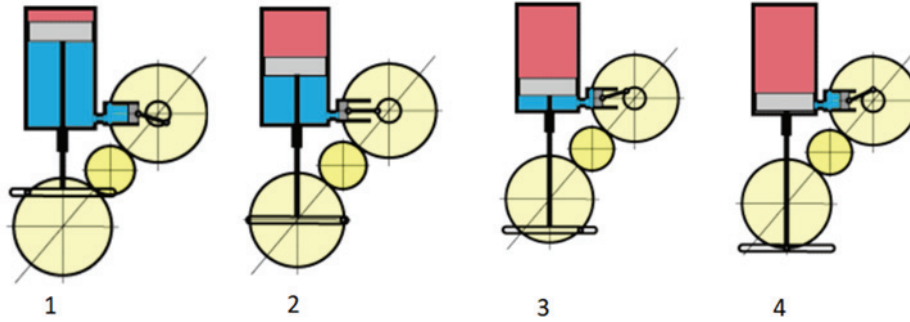


Şekil 11. Beta tipi Stirling motorunun hareket döngüsü gösterimi (Wikipedia, 2011)

Beta tipinde, alfa tipinden farklı olarak, güç pistonu sıcak gazla temas halinde olmadığından, sıcak bölgedeki contalar teknik problem çıkarmamaktadır.

2.3.3. Gama Tipi

Gama tipinde iki ayrı piston bulunmaktadır. Büyük olan pistonun bulunduğu hazne ısıtılarak içerisinde bulunan gazın aktifleşmesi sağlanmaktadır. Bu sayede volan ile birbirine bağlı olan pistonlar harekete başlamaktadır. İki silindirdeki gaz aralarında serbestçe akabilmekte ve tek bir gövde olarak kalmaktadır (Şekil 12). Bu konfigürasyon, ikisi arasındaki bağlantının hacmi nedeniyle daha düşük bir sıkıştırma oranı üretmektedir. Ancak mekanik olarak daha basittir ve genellikle çok silindirli Stirling motorlarında kullanılmaktadır (Stirling, 2017).



Şekil 12. Gama tipi Stirling motorunun hareket döngüsü gösterimi (Pierre Gras, 2007)

2.3.4. Serbest Pistonlu Stirling Motoru

Beta tipine benzer özelliklere sahiptir. Tek silindir içinde bir şaftta, yer değiştirme ve güç pistonu bulunmaktadır. Herhangi bir krank veya volan parçası bulunmamaktadır. Döngüsel hareket üreten bir parçası olmadığı için yalnız lineer hareket üretmektedir. Genleşen hava pistonu ittirdikten sonra yay sayesinde geri tepki vererek döngü haline gelmekte ve belirli frekanslarda hareketine devam etmektedir.

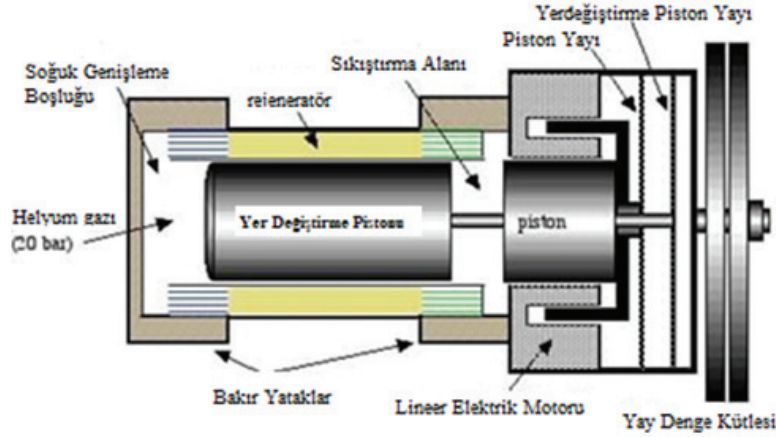
2.3.5. Tek Pistonlu Serbest Stirling Motoru

En basit tipteki serbest pistonlu motordur (Şekil 13). İki zamanlı buji ile ateşlemeli motorun silindiriyle aynı şekilde çalışan tek bir silindire sahiptir. Hava ve yakıt karıştırılarak silindir beslenir, karışım sıkıştırılır ve ardından ateşlenerek bir güç stroku sağlanır. Aynı zamanda yanma gazları dışarı atılır ve döngü tekrarlanır. Serbest piston versiyonunda, piston bir krank miline değil, bir sıçrama odasına, hava veya başka bir gaz içeren bir silindirin içine kapatılmış ikinci bir pistonla bağlıdır (Şekil 14). Bu piston güç pistonu olarak tanımlanmaktadır.

Güç stroku sırasında ana motor pistonu, sıçrama odası pistonunu odanın içindeki gazı sıkıştırmaya zorlamaktadır. Güç strokunun sonunda, sıcak silindir bölgesinin içindeki gaz yüksek basınç altındadır ve motor pistonu iter yayın tepkisiyle üstüne geri dönmeye zorlayarak sıkıştırma ve ateşleme strokunu yeniden başlatmaktadır (Breeze, 2018).



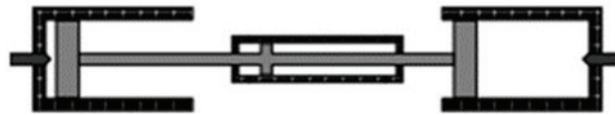
Şekil 13. Tek Pistonlu Stirling Motoru (Paul Breeze, 2018)



Şekil 14. Serbest Pistonlu Stirling motorunun şematik gösterimi (Zhu vd., 2018)

2.3.6. Çift Pistonlu Serbest Stirling Motoru

Serbest pistonlu motorun ikinci bir yaygın türü çift pistonlu motordur. Şekil 15'te basit motor düzeniği verilmiştir. Bu motor tipinde, her biri kendi pistonuna sahip motor silindiri bulunmaktadır. Bununla birlikte, bu pistonlar arka arkaya bağlıdır, böylece bir piston güç stroku boyunca hareket ederken ikinci pistonun içeriğini (sanki bir sıçrama odasıymış gibi) sıkıştırmakta ve genişletmektedir. Bununla birlikte, her biri diğerini tahrik ettiğinden, her bir silindirdeki yanma döngülerinin son derece hassas bir şekilde kontrol edilmesini gerektirmektedir. Silindirlerin her birinde hem strok uzunluğu hem de sıkıştırma oranı kısmen ikincinin kontrolü altındadır ve senkronizasyon mükemmel değilse dengesizliklere yol açabilmektedir. Motorlar prensipte oldukça verimlidir. Tek pistonlu versiyonda olduğu gibi, motor ya hidrolik tahrik için ya da lineer bir jeneratör aracılığıyla elektrik üretmek için kullanılmaktadır.



Şekil 15. Çift Pistonlu Stirling Motoru (Paul Breeze, 2018)

3. Stirling Motorunun Matematiksel Modeli

1816'da Robert Stirling tarafından icat edilmesinden sonra matematiksel model analizi 1871'de Gustave Schmidt tarafından yapılmıştır. Bu model kapalı bir Stirling çevriminin performansı için çözüm üretmiştir. Bugün, bir Stirling motorunun tasarımı ve performans analizi ampirik ve analitik modeller kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Günümüze kadar özellikle serbest pistonlu Stirling motorlarının tasarımı ve icadından bu yana pek çok matematiksel model geliştirilmiştir. Bu çalışmalardan öne çıkan

isimlerden biri de 1960'ların başında Beale olmuştur. Ampirik modellerde çoğunlukla boyutsuz motor gücünü tahmin etmek için Beale sayısı olarak adlandırılan bir parametre kullanılmıştır. Motora bağlı olarak diğer çalışma parametreleri frekans, basınç, genişleme hacmi ve analitik modeller gibi dinamik ve termodinamik analizlere dayanmaktadır. Genel olarak, bir Stirling motor çevriminin termodinamik analizi çok karmaşıktır (de la Bat, Dobson, Harms, & Bell, 2020). Serbest pistonlu Stirling motoru'nda hareketin döngüsel olmaması ve krank bulunmaması nedeniyle farklı matematiksel model yöntemleri geliştirilmiştir.

3.1. Schmidt Modeli (İdeal İzotermal Model)

Stirling motorunun farklı bölümlerde farklı bölmelere sahip olması nedeniyle çalışma sıvısının tamamı aynı termodinamiği yaşamamaktadır.

Schmidt modeli, ana motor bölmelerinin, yani motorun sıkıştırma alanı, soğutucu, rejeneratör, ısıtıcı ve genişleme alanı izotermal kabul edilmektedir. Soğutucu ısı alıcı sıcaklığında ($T_{soğuk}$) olduğu varsayılmaktadır. Isıtıcı ve genişleme boşluğunun ısı kaynağı sıcaklığında ($T_{sıcak}$) olduğu varsayılmaktadır. Model daha sonra sıkıştırma ve genişletmenin hacim değişikliklerini dahil ederek hesaplanmaktadır. Aralarında bir faz kayması olan sinüzoidal hareket varsayılarak boşluklar belirlenmektedir. Tüm uzaylar izotermal olarak kabul edildiğinden, Schmidt modeli bazen izotermal model olarak adlandırılmaktadır (Deetlefs & Dobson, 2014).

Bu modelin en önemli özelliği, basınç için bir denklemin üretilmesidir. Bu denklem tüm döngü için tanımlanmıştır. Basınç denklemi aşağıdaki gibidir (Denklem 1):

$$p = \frac{MR}{\frac{V_e}{T_e} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_k}{T_k} + \frac{V_c}{T_c}} \quad (1)$$

P: basınç, M: mol kütlesi, R: gaz sabiti V: hacim ve T: sıcaklığı tanımlamaktadır. Alt indisler ise Şekil 16'daki bölgelere ait olan sıcaklık ve basınç değerleridir.

İzotermal sıcaklık varsayımlarını ekledikten sonra aşağıdaki formül elde edilmektedir (Denklem 2):

$$p = \frac{MR}{\frac{V_{sıcak}}{T_{sıcak}} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_{soğuk}}{T_{soğuk}}} \quad (2)$$

Sadece etkin rejeneratör sıcaklığı (Denklem 3) (T_r) ($T_{sıcak}$) ve ($T_{soğuk}$) cinsinden yazılmalıdır. Rejeneratörün uzunluğu (L_r) boyunca lineer bir sıcaklık profili varsayılır ve bu profil, uzunluğu boyunca kütleye göre (m_r) entegre edilir (Denklem 4). Efektif sıcaklığı bulmak için aşağıdaki formül kullanılır (Denklem 5). Daha sonra aşağıdaki gibi ideal gaz denklemi (Denklem 6) ile karşılaştırılır:

$$T_r(x) = \frac{T_{sıcak} - T_{soğuk}}{L_r} x + T_{soğuk} \quad (3)$$

$$m_r = \int_0^{V_r} \rho dV = \int_0^{L_r} \frac{p}{RT_r(x)} A_r dx = \frac{pV}{RT_{eff}} \quad (4)$$

$$T_{eff} = \frac{(T_{sıcak} - T_{soğuk})}{\ln\left(\frac{T_{sıcak}}{T_{soğuk}}\right)} \quad (5)$$

Basınç denklemi daha sonra aşağıdaki gibi yeniden yazılmaktadır:

$$p = \frac{MR}{\frac{V_{sıcak}}{T_{sıcak}} + \frac{V_r \ln\left(\frac{T_{sıcak}}{T_{soğuk}}\right)}{(T_{sıcak} - T_{soğuk})} + \frac{V_{soğuk}}{T_{soğuk}}} \quad (6)$$

Çevrim başına yapılan işi bulmak için analitik bir çözüm olmamasına rağmen, (Urieli and Berchowitz, 1984) tarafından geliştirilen basınç terimini Fourier serisi açılımı ile çözülebilmektedir.

3.2. Finkelstein modeli (İdeal adyabatik model)

Sıkıştırma ve genişletme süreçleri bazen daha iyi tahmin edildiğinden izotermal yerine adyabatik olarak Finkelstein modeli tasarlanmıştır. Finkelstein model varsayımlarının çoğu Schmidt modeliyle aynıdır, sıcaklıklar sıkıştırma ve genişleme boşluklarında çözülmektedir.

Finkelstein modeli, şunları gerektirir: kütle korunumu denklemi, enerjinin korunumu denklemi ve belirtici denklem. Adyabatik model, küçük ölçekli motorlar ve özellikle yüksek frekanslarda çalışan büyük motorlar için daha başarılı bir model olduğu varsayılmaktadır (Chen, N. and Griffin, 1983).

Ancak Finkelstein modelinin çözümü Schmidt modeline göre daha zordur. Schmidt modeli, döngü sırasında herhangi bir noktadaki basınç için bir denklem üretirken, Finkelstein modeli ise yalnızca bir ifade üretir, “dp/dt” akışın yönüne bağlı olan koşullu sıcaklık terimlerini içermektedir. Basıncın sayısal entegrasyonla çözülmesi gerektiğinden, artık kapalı biçimli bir çözüm olmamaktadır.

3.3. Second-Order Analiz

İkinci merteye yöntemler, döngü analizi ve bireysel kayıp mekanizmaları ile başlamaktadır. Döngü analizi, gücü, verimliliği ve kaybı tahmin eder, terimler ise bunları ayarlamak için kullanılmaktadır. Kullanılacak ortak döngü ya Schmidt modeli ya da Finkelstein modeli olmaktadır. Ancak bazen yarı adyabatik çevrimler de kullanılmıştır; özellikle Philips firması tarafından dikkate değer olarak görülmüştür (Martini, 1983).

Bu kayıp terimlerini ayrı ayrı tanımlayarak, nerede iyileştirmelerin yapılabileceğini belirlemek daha kolay olmaktadır. Güç kaybı için mekanizmalar şunları içermektedir; akış sürtünmesi, mekanik sürtünme, verimsiz bir rejeneratör nedeniyle yeniden ısıtma kaybı, rejeneratör matrisi yoluyla gaz ve katı iletimi. İkinci dereceden yöntemler karmaşık olmayan bir tasarım yöntemi sunsa da optimizasyon işlemi daha çok kinematik Stirling motoru için geliştirilmiştir (Martini, 1983).

3.4. Third-Order Analiz

Akış her zaman kararsız olduğundan, bir Stirling motorunun akışı tersine çevirerek çalışması en büyük karmaşıklık faktörüdür. (Chen, N. and Griffin, 1983) tarafından belirtildiği gibi, üçüncü merteye yöntemler üç temel prosedürden oluşmaktadır: 1) çalışma alanını bir kontrol hacimleri ağına bölmek, 2) kütle, momentum ve enerjinin korunumu için diferansiyel denklemleri ve çalışma akışkanı için bir durum denklemi kurmak 3) eş zamanlı olarak fark denklemleri sistemini bazı yeterli sayısal yöntemlerle çözmek.

Urieli tarafından sunulan üçüncü dereceden bilgisayar simülasyonu, düşük tersine çevrildiğinde bir basınç düşüşünü göz ardı etme problemini önlemek için düşük sürtünmelerde yayılım sürtünme faktörünü Reynolds sürtünme faktörü ile değiştirmiştir (Urieli, 1977).

Üçüncü mertebeden analiz genellikle daha tercih edilen yöntem olmuştur. Doğru sonuçlar verme konusunda en büyük potansiyele sahiptir bu sayede başlangıç aşamasındaki motor parametrelerini yakalayabilmektedir. Diferansiyel denklemler, çalışan akışkanın kinetik enerjisinin ihmal edilmesi gibi belirli varsayımlarla da basitleştirilebilmektedir. Üçüncü dereceden yöntemlerin en büyük dezavantajı, tasarım iyileştirmelerine ilişkin anlayışın büyük ölçüde kaybolması ve sadece parametrik bir çalışma ile belirlenmesi, yani parametrelerin değiştirilerek her durum için analizin tekrarlanması gerekmektedir.

3.5. Dinamik Analiz

Yukarıda bahsedilen tüm yöntemlerde, piston ve krank açısı referans alınarak hesaplamalar yapıldığı için döngüsel hareket eden Stirling motorlarında daha efektif kullanılmaktadır. Serbest pistonlu Stirling motorlarında hem döngüsel bir hareketin olmaması hem de güç ve yer değiştirme pistonunun belirli faz farkı ile hareket etmesinden dolayı dinamik analiz yöntemi tercih edilmektedir. Dinamik analizde, güç ve yer değiştirici piston dinamik kütle olarak, yaylar sönümleyici sistem olarak ele alınmaktadır. Bu sayede güç ve yer değiştirici piston hareketleri anlık olarak belirlenmektedir.

Hareket denklemlerinin genel formu aşağıdaki gibidir (Denklem 7) (Kankam, M.D. and Rauch, 1991):

$$[M][\ddot{X}] + [C][\dot{X}] + [K][X] = [F(t)] \quad (7)$$

[M], [C] ve [K] sistem kütleleri, sönüm katsayıları ve sertlik katsayıları için matrisleri ifade etmektedir. [F(t)] ise zamana bağlı hareketin kuvvetini temsil etmektedir. Tipik bir uygulama aşağıdaki gibi görünecektir (bkz. Şekil 16):

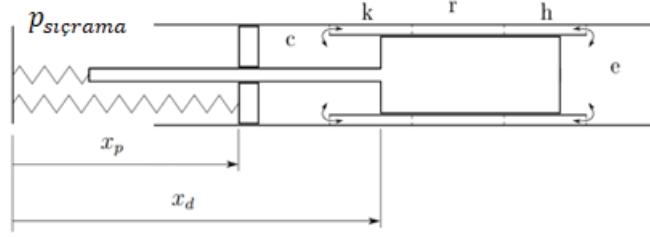
$$m_p \ddot{x}_p + C_p \dot{x}_p + C_{pd} (\dot{x}_p - \dot{x}_d) + k_p x_p = (p_{sıçrama} - p_c) A_p - F_{yük} \quad (8)$$

$$m_d \ddot{x}_d + C_d \dot{x}_d + C_{pd} (\dot{x}_d - \dot{x}_p) + k_d x_d = p_c A_c - p_e A_e + p_{sıçrama} A_{rot} \quad (9)$$

Kuvvet terimi $F = \text{Basınç} \times \text{Alan}$ cinsinden ifade edilmektedir (Denklem 8). Görülebileceği gibi, zamana bağlı kuvvet terimleri, bir elektrik jeneratörü gibi yükün yanı sıra çalışma alanındaki basınca da bağlı olmaktadır (Denklem 8 ve 9). Elektrik jeneratörünün karakteristiğinin bilindiği varsayılarak, basınçlar için bir ifade belirlenmesi gerekmektedir.

Dinamik analize yönelik farklı yaklaşımlar burada görülebilmektedir. Doğrusal harmonik analiz (LHA) ve kontrol tabanlı tasarım gibi birçok farklı yaklaşım olmasına rağmen, bunlar her zaman basitleştirici varsayımlar gerektirmektedir. (Chen, N. and Griffin, 1986) tarafından sunulan LHA (Linear Harmonic Analysis, Doğrusal harmonik analiz), periyodik değişkenler için sinüzoidal fonksiyonlar içerir, burada (Riofrio, J., Al-Dakkan, K., Hofacker, M. and Barth, 2008) tarafından sunulan kontrol tabanlı tasarım basınç dalgalanmalarını belirlemek için Schmidt modeli kullanılmaktadır.

Varsayımları basitleştirme ihtiyacından kaçınmak için, üçüncü dereceden bir yaklaşımla motor boyunca basıncı belirlemek mümkün olmaktadır. Kısacası çalışma alanı bir dizi kontrol hacmine bölünmekte ve basınç sayısal olarak belirlenmektedir.



Şekil 16. Dinamik Analiz (Deetlefs & Dobson, 2014)

4. Stirling Motorunun Gelişimi

Stirling motoru icadından sonra teknoloji ile birlikte pek çok yenilik kazanmıştır. Robert Stirling 1816 yılında ekonomizör denilen günümüz rejeneratörünün ilk çalışması olarak adlandırılan parçayı motora eklemiştir. Sonrasında Sadi Carnot (1796-1832) Carnot verimini diğer ismi ile termal verimi bulmuştur. Stirling verimi ideal şartlarda Carnot verimine eşit sayılmaktadır. İlerleyen yıllarda Stirling motorunun farklı alanlarda kullanılması ve gelişimi gözlemlenmektedir.

İlk modern sayılan Stirling motoru 1938 yılında Philips tarafından üretilmiştir. Philips 200 beygir gücünde otobüs, inşaat makineleri gibi araçlarda kullanılabilecek Stirling motorunu yapmıştır. V4-235 olarak adlandırılan motor yüksek hız ve basınçta çalışabilmektedir. US (Stirling Birliği), V4-265 adında başka bir motor geliştirmiş ve 10 000 saatlik çalışma süresi elde etmeyi başarmıştır (D. Nilsson & Engineer, 2014).

Otomotiv sektöründe ilk Stirling motorunu kullanan Ford firması olmuştur. İki modelde kullanılan Stirling motoru Ford -Pinto ve Ford -Taunus modellerinde sırasıyla V4-31 ve V4-35 ismiyle üretilmiştir. 1978 yılında ASE (Otomotiv Stirling Motoru) kurulmuştur. ASE 10 yıllık iş birliği için kurulmuş ve NASA, US (Stirling Birliği), MTI (Mekanik Teknoloji) şirketleri tarafından desteklenmiştir (Nasn-, Cr-, & Ernst, 1997). Proje finansmanını Amerika Birleşik Devleti Enerji Bakanlığı üstlenmiştir. Projeye 125 milyon dolar kaynak sağlanmıştır. İlk projesi ise Opel -Record marka araçta kullanılan P40 Stirling motoru olmuştur (Şekil 17) (D. Nilsson & Engineer, 2014).



Şekil 17. Opel-Record araçta kullanılan P40 Stirling motoru (D. Nilsson & Engineer, 2014)

1970'lerde United Stirling tarafından geliştirilmiş 50'den fazla motor farklı uygulamalarda üretilmiş ve kullanılmıştır. NASA tarafından yönetilen Otomotiv Stirling Motoru programında JPL, Advanco ve

McDonnell Douglas şirketleri ile güneş enerjisi ile çalışabilen Stirling motor programına dahil edilmiştir (Nasn- vd., 1997).

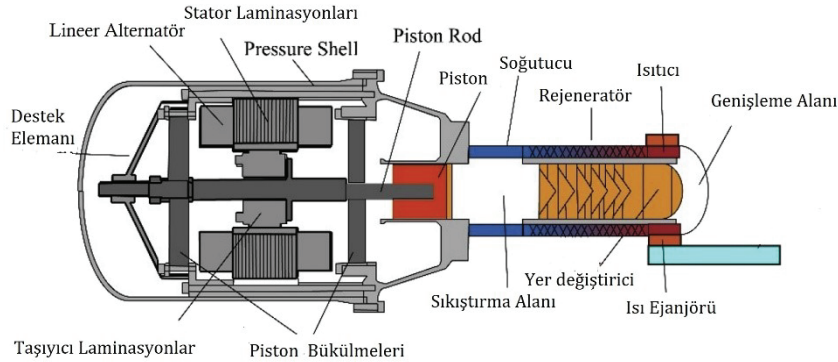
5. Nasa'nın Stirling Motor Çalışmaları

ASRG (Advanced Stirling Radioisotope Generator-Gelişmiş Stirling Radyoizotop Jeneratörü), ilk olarak NASA'nın Glenn Araştırma Merkezi'nde geliştirilen bir radyoizotop güç sistemidir (Şekil 18). Uzay gemilerinde kullanılmak üzere radyoaktif bozuma ısısını elektrığe dönüştürmek için bir Stirling güç dönüştürme teknolojisini kullanmaktadır.

ASRG tarafından yapılan enerji dönüştürme işlemi, benzer miktarda güç üretmek için önceki radyoizotop sistemlerine göre yaklaşık dört kat daha verimlidir ve diğer benzer jeneratörler gibi plütonyum- 238'in yaklaşık dörtte birini kullanabilmektedir.

NASA Glenn Araştırma Merkezi, on yıldan fazla bir süredir RPS (Radioisotope Power Systems-Radyoizotop Güç Sistemleri)'inde potansiyel kullanım için yüksek verimli Stirling güç dönüştürücülerinin geliştirilmesini desteklemektedir. Stirling güç dönüştürücülerini, doğrusal bir alternatörü salınım yaptırarak ısıyı elektrığe dönüştüren motorlar olarak tanımlanmaktadır (Narayan ve Gupta 2015).

Serbest pistonlu Stirling güç dönüştürücü üzerinde yapılan çalışmalar neticesinde, NASA'nın Glenn Araştırma Merkezi'ndeki Stirling Araştırma Laboratuvarı'nda 14 yıllık bakım gerektirmeksizin çalışma başarısı elde edilmiştir. Bu teknolojinin, uzay aracına uzun süreli, gelecekteki uzay görevlerinde güç verme yeteneğini arttırabilmeye yardımcı olması beklenmektedir (Doreen Zudell, 2020).



Şekil 18. NASA'nın Radyoizotopuna ait Stirling Motoru (Metscher, 2014)

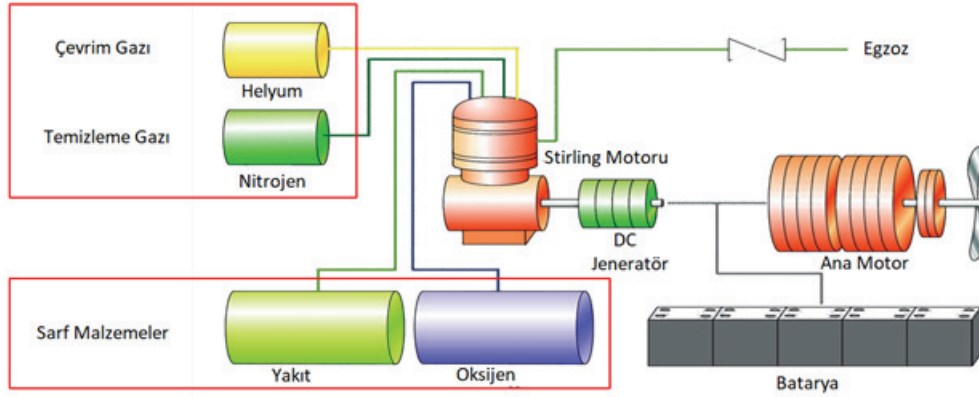
6. AIP Sistemi olarak Stirling Motorun İncelenmesi

Stirling motoru kapalı devreye sahip bir motor olması sebebiyle içten yanmalı motorlarda olduğu gibi tekrarlı ateşlenme olayı gerçekleşmemektedir. Stirling motorlarına ısı kaynağından ısının sürekli verilmesi ve dıştan yanmalı bir sistem olduğu için sabit hacimde gerçekleşmesi egzoz gaz çıkışının içten yanmalı motorlara kıyasla oldukça düşük seviyelerde olmasına olanak sağlamaktadır. Denizaltılarda egzoz çıkışı yapılabilmesi için denizaltının su yüzeyine çıkması gerekmektedir ki bu da denizaltı için en savunmasız olduğu süreç olarak tanımlanmaktadır. Bundan dolayı Stirling motoru denizaltılar için uygun bir AIP sistem oluşturmak için tercih edilmiştir (Şekil 19).

Stirling motorunun farklı uygulamalar için geliştirilmesi İsveç'te yirmi yılı aşkın bir süredir devam etmektedir. 1968 ve 1988 yılları arasında geliştirme çalışmaları United Stirling AB tarafından

yapılmıştır. 1988'in başında Kockums firması, United Stirling'i satın almış ve çalışmaya Stirling motorlarının sualtı uygulamasıyla devam etmeye karar vermiştir (H. Nilsson, 1988).

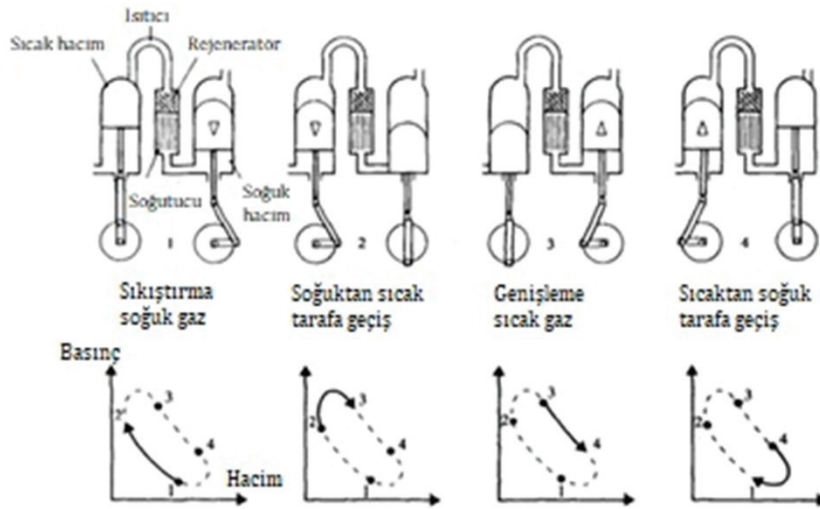
Stirling motoru V4-275R, özellikle denizaltı kurulumu için üretilmiş 75 kW gücünde bir motordur. Düşük gürültü ve titreşim için tasarlanmıştır. Yüksek basınçlı yanma odası temel motorla kolayca entegre edilebilmektedir. Bu motor tipi İsveç denizaltısı Nacken'de ve Fransız denizaltısı SAGA'da kurulmuştur. Her iki denizaltı da çalışır durumdadır ve Stirling sistemlerinin denemelerdeki sonuçları olumlu olmuştur (H. Nilsson, 1988).



Şekil 19. Stirling AIP Sistem Açılımı (D. Nilsson & Engineer, 2014)

7.1. V4-275R Stirling motoru

USAB (United Stirling AB), İsveç Kraliyet Donanması için ana denizaltı yüklenicisi Kockums ile ortaklaşa yapılan kapsamlı geliştirme sözleşmeleri sonucunda, 1970'lerin başından itibaren sualtı Stirling uygulamalarıyla ilgili çalışmaktadır. Şekil 20' de sualtı uygulamalarına ait Stirling motorunun çevrimi verilmiştir.

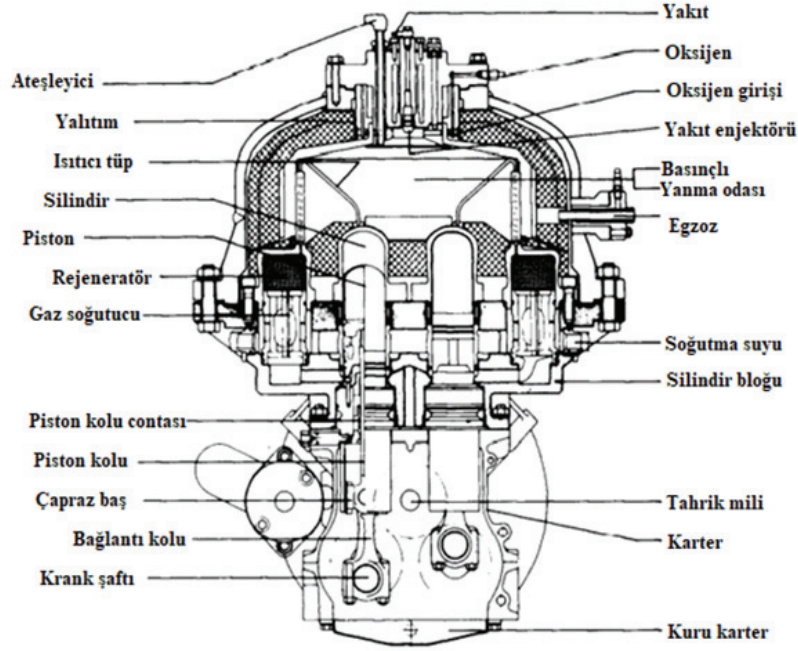


Şekil 20. Stirling Motoru Çevriminin Şematik ve Grafik gösterimi (Bratt, 1990)

Programın amacı orta büyüklükteki denizaltılar için hibrit enerji santralleri geliştirmek olmuştur. Ayrıca denizaltılar için enerji sistemleri tasarlanmış ve inşa edilmiştir. Stirling çevrimi, denizaltılar için büyük önem taşıyan pistonlu içten yanmalı motor çevrimlerine kıyasla düşük çevrimsel tork değişimleri ve

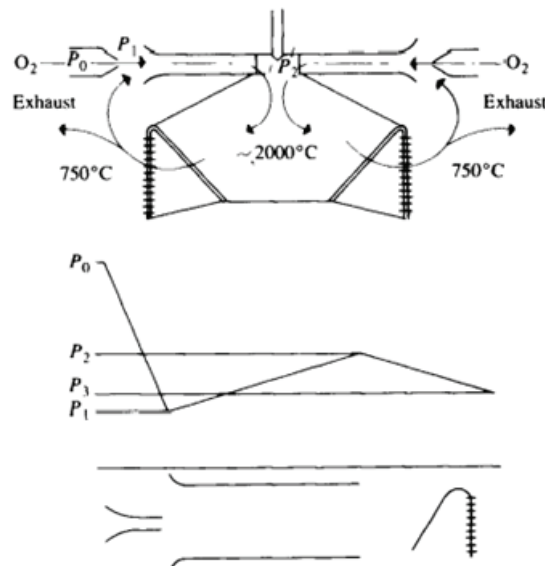
düşük seviyede gürültü ve titreşim sağlamaktadır. Yanma işlemi sürekli ve ortam üzerine çıkabilen sabit basınçta gerçekleşmektedir (H. Nilsson, 1988).

Stirling motor sistemi, büyük ve karmaşık olan egzoz gazı sıkıştırmasına veya egzoz gazı için bir çözme sistemine gerek kalmadan yaklaşık 300 m derinliğe daldırılmış olarak çalışabilmektedir. İlk su altı Stirling motoru Şekil 21'de gösterilmiştir.



Şekil 21. V4-275R Stirling Motoru detaylı şematik görseli (H. Nilsson, 1988)

Büyük ve karmaşık olan egzoz gazı için gaz sıkıştırma veya çözme sistemi, dizel egzoz gazının saf oksijen, yani adyabatik alev sıcaklığı anlamına gelen 4000°C kullanılarak basınçlı yanmasını kontrol etmek için egzoz gazı devridaimi (bkz. Şekil 22) kullanılmaktadır. Bir mikroişlemci, temel çalışma modlarında motoru ve işlem değişkenlerini uzaktan izlemektedir (H. Nilsson, 1988).



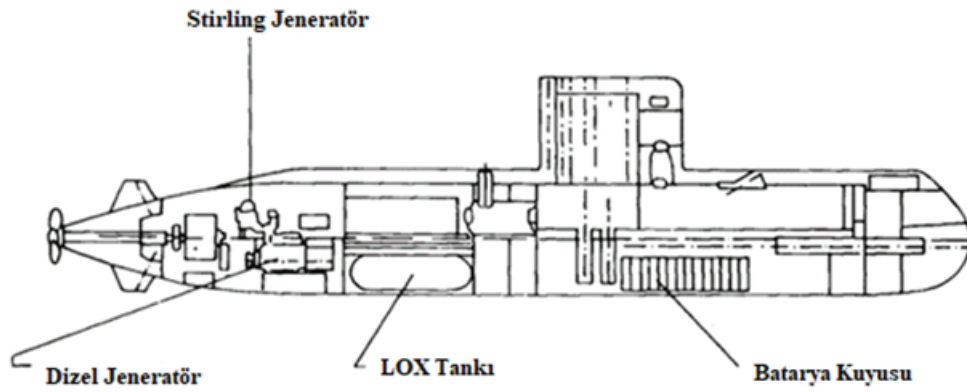
Şekil 22. V4-275R Stirling Motorunun egzoz gazı çıkış tanımlaması (H. Nilsson, 1988)

7.2 Denizaltılar için İlk Fizibilite Çalışması

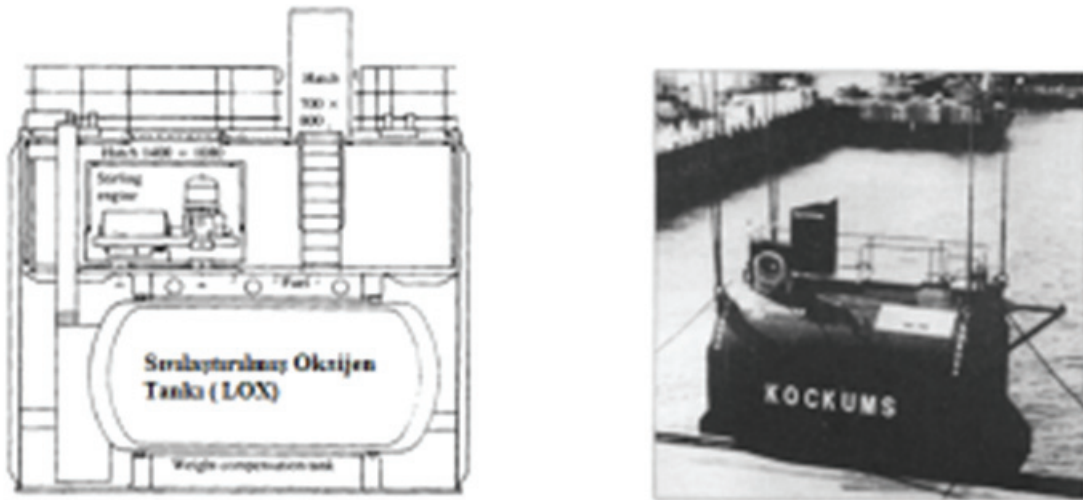
İsveç Kraliyet Donanması ve Kockums Şirketi tarafından yapılan testler ve çalışmalar denizaltılar için havadan bağımsız enerji dönüşüm sistemlerini kapsamaktadır.

Bir dizi proje ve prototip testleri ısı motorları kullanılarak gerçekleştirilmiştir (kapalı çevrim Dizel motor ve Stirling motoru). Proje kapsamında yakıt hücreleri ve yüksek enerji yoğunluklu piller kullanılmıştır. İlk aşamada 100 tonluk bir denizaltı için yapılan çalışmalarda sadece Stirling AIP modül eklendiğinde operasyon süresinin beş kat uzadığı gözlemlenmiştir. Daha sonraki çalışmalarda toplam denizaltı ağırlığı korunacak şekilde batarya kapasitesi yarıya düşürülmüş ve kalan hacme Stirling AIP modülü eklenmiştir. Bu uygulamada da su altı operasyon süresinin arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 23).

Aşağıda açıklanan Stirling AIP modülünün nihai tasarımı gösterilmektedir. AIP modülü tam pil kapasitesi korunarak denizaltıya ek paralel gövde kesiti şeklinde eklenmiştir. Havadan bağımsız bir güç kaynağı olarak Stirling AIP sistemi yakın vadeli en iyi potansiyele sahip AIP sistem olarak kabul edilmiştir. İsveç Kraliyet Donanması tam ölçekli bir denizaltı için AIP sistem geliştirilmesinde Stirling AIP sistemle devam etmiştir (H. Nilsson, 1988).



Şekil 23. Stirling AIP Sistem Yerleşimi (H. Nilsson, 1988)



Şekil 24. V4-275R Stirling Motorunun AIP modül şematik ve gerçek görseli (H. Nilsson, 1988)

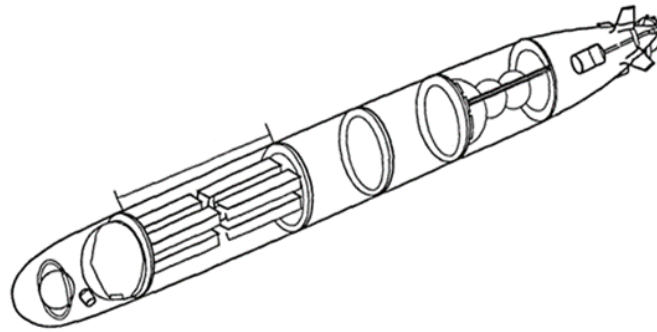
Başarıya ulaşan testler neticesinde gerçek bir denizaltı için Stirling AIP modülünü barındıran eklenti yapılması öngörülmüştür. 1982 yılında başlatılan sualtı motoru geliştirme programı neticesinde standart Stirling motoru 4-275 başarı ile üretilmiştir. Sıvı oksijen tankı ile entegrasyonuna yönelik

İsveç'teki AGA Cryon şirketinin köklü kriyojenik teknolojisine sahip oksijen sistemi kullanılmıştır. 1984 yılından itibaren Stirling motor sistemi tam ölçekli bir denizaltı test bölümünde başarıyla test edilmiştir (Şekil 24). Bu programın bir sonraki adımı eklenti üretilerek Stirling AIP sisteminin operasyonel bir İsveç denizaltısına entegrasyonu olmuştur. Kockums şirketi bu operasyonu üstlenmiş ve başarı ile entegrasyon işlemini tamamlamıştır (H. Nilsson, 1988).

7.3 Stirling Motoru İnsansız Denizaltı Uygulaması: SAGA

1987 yılında Stirling AIP sistemini geliştirmek için başka bir proje başlatılmıştır. İnsansız bir sualtı aracı için sistem geliştirilmesi amaçlanmıştır. İnsansız sualtı aracı için güç talebi 5 ila 15 kW aralığında olup bazı uygulamalarda 20 kW'a kadar yükselebilmektedir. Projede kullanılan 4-95 isimli motor olup, orijinal olarak 40 kW'lık bir otomotiv motoru olarak tasarlanmıştır (Şekil 26). Ayrıca jeneratör setlerinde ve güneş enerjisi sistemlerinde de kullanılmıştır. Bu tipte toplam 50 motor üretilmiş ve 150.000 saati aşkın bir süre çalıştırılmış ve motorun performansının yeterli olduğu kanıtlanmıştır (Bratt, 1990).

Proje, İsveç Savunma Malzeme İdaresi ve İsveç Ulusal Sanayi Kurulu tarafından ortaklaşa desteklenmiştir. Projenin ilk aşaması olarak laboratuvarında bir prototip sistemin üretilmesi ve test edilmesi başarı ile tamamlanmıştır. Motor sisteminin entegre olduğu ikinci aşamada gövde bölümünde sıvı oksijen deposu ve yakıt deposu eklenmiştir. Gövde bölümünün boyutu, ABD Donanması'nda insansız sualtı araçlarında kullanılan birinci nesil DARPA UUV'nin boyutlarıyla benzerlik göstermektedir (Şekil 25) (Bratt, 1990).



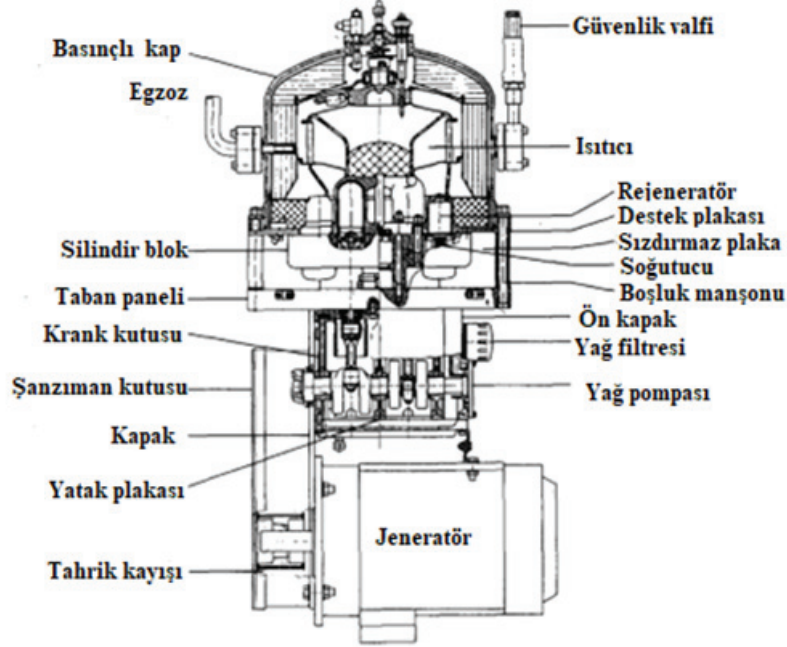
Şekil 25. SAGA denizaltısının gövde bölümünün benzerlik gösterdiği DARPA UUV (İnsansız Su altı Aracı) (A. Lee, James, Kuhn, & Baum, 1989)

7.4. Stirling motor temelli AIP sistem Kullanımı

Stirling Motoru denizaltı AIP sistemi olarak kullanılmasıyla birçok farklı denizaltı sınıfları da Stirling motorunu tercih etmiştir. Kronolojik sırayla gelişmeler şu şekildedir:

- HMS Gotland; 1995: Stirling AIP ile yeni inşa edilen dünyanın ilk deniz denizaltısı
- 2001: Japonya, Kawasaki Heavy Industries, Japon denizaltısı Asashio'nun Stirling AIP iyileştirmesini yapmıştır.
- 2003-2004: İsveç Västergötland sınıfındaki iki denizaltı Stirling AIP ile donatılmıştır.
- 2005: Västergötland sınıfındaki son iki Denizaltı Stirling AIP ile modernize edilmiştir. Singapur donanmasında görev almaktadır.
- 2005: Japonya, Soryu sınıfı denizaltında Stirling AIP ile inşa edilmiştir.

- 2010: A26 ve Gotland sınıfı orta yaşam yükseltmesi için geliştirilen yeni nesil Stirling AIP sistemi kullanılmıştır (D. Nilsson & Engineer, 2014).



Şekil 26. V4-95R Stirling Motorunun şematik gösterimi (Bratt, 1990)

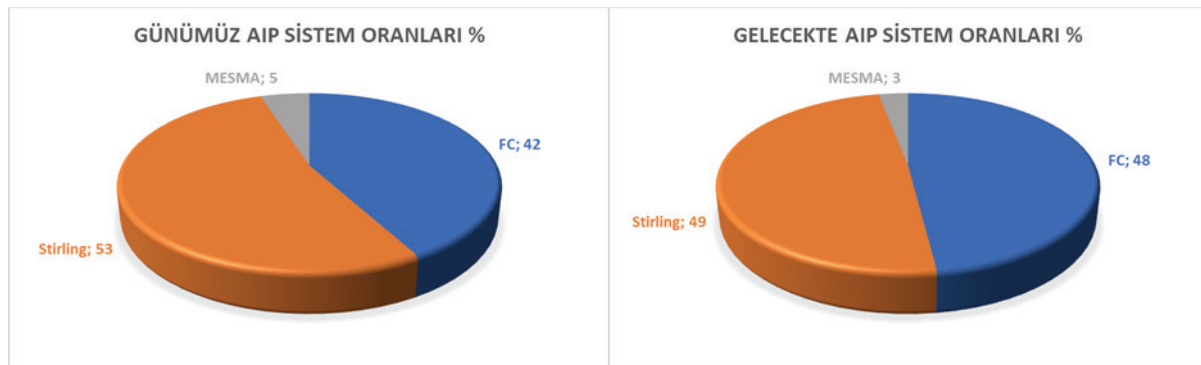
Tablo 2. Ülkelerin günümüzde kullandıkları ve yapılması planlanan AIP sistemleri (Sutton, 2016)

Ülke Donanımları	Günümüz (Adet)	Yapılması Planlanan (Adet)	Toplam	AIP Tipi	Sınıfı
Türkiye		6	6	Yakıt hücresi	Type-214
Çin	15	5	20	Stirling	YUAN
Çin	1		1	Stirling	QING
Almanya	5	1	6	Yakıt hücresi	Type-212
Yunanistan	4	2	6	Yakıt hücresi	Type-214
Yunanistan	1		1	Yakıt hücresi	Type-209
Hindistan	3	2	5	Yakıt hücresi	Scorpone
İtalya	3	3	6	Yakıt hücresi	Type-212
Japonya	8	3	11	Stirling	Soryu
Japonya	1		1	Stirling	Asashio
Pakistan	3		3	MESMA	Agosta 90B
Pakistan		8	8	Stirling	YUAN
Portekiz	2		2	Yakıt hücresi	Type-214
Rusya		3	3	Yakıt hücresi	Lada
Singapur	2		2	Stirling	Archer
Singapur		2	2	TBC	Type-218SG
Güney Kore	7	2	9	Yakıt hücresi	Type-214
İspanya		4	4	Yakıt hücresi	S-80
İsveç	2	-2	0	Stirling	Södermanland
İsveç		2	2	Stirling	A26
İsveç	3		3	Stirling	Gotland
Tayland		3	3	Stirling	YUAN

Günümüz denizaltılarında AIP kullanan ülkelerin yarısından fazlası Stirling AIP sistemini tercih etmektedir. İsveç, Çin, Japonya, Singapur ve Tayland Stirling AIP sistem kullanan ülkeler arasında yer almaktadır. Yakın zamanda Çin Pakistan'a sekiz adet Yuan Sınıfı denizaltı satışı gerçekleştirecektir. Yakın zamanda yapılması planlanan Çin'e ait Yuan sınıfı denizaltılara beş adet daha ekleme yapılacaktır (Xuanzun, 2021). Çin hükümeti 320 kW gücünde Stirling motor ürettiğini belirtmiş ve %40 termal verimle çalışacağını iddia etmiştir. Çin Donanması 1000 kW gücünde Stirling motor üretmeyi amaçladıklarını açıklamıştır (Chinese Navy, 2021).

Tablo 2'de ülke donanmalarına ait AIP kullanan denizaltıların tipleri, sınıfları ve yapılması planlanan AIP sistemine sahip denizaltıların sayısı verilmiştir.

Burada yer alan Stirling AIP sınıfına sahip denizaltıların Çin donanmasına ait denizaltılar hariç diğer tüm sınıflar Kockums firması tarafından geliştirilen Stirling AIP modülünü kullanmaktadır. Günümüzde kullanılan AIP sistemlerinin birbirleri ile oranları ve yakın gelecekteki durumları Şekil 27'de gösterilmiştir (Sutton, 2016).



Şekil 27. Ülkelerin günümüz ve gelecekte yapılması planlanan AIP sistem tiplerinin oranları

8. Sonuç

Tahrik sistemi, denizaltıların performansını belirleyen başlıca unsurlardan biridir. Günümüzde denizaltı tahrikinde ön plana çıkan havadan bağımsız tahrik sistemlerinin, nükleer ve klasik dizel-elektrik tahrik sistemlerine karşı üstünlükleri ile gelecekte denizaltılarda kullanılmalarının daha yaygın olacağı beklenmektedir. Stirling AIP sistemi yüksek teknoloji gerektirmemesi ve bakım maliyetlerinin düşük olması sebebiyle diğer AIP sistemlere göre ön plana çıkmaktadır. Sunduğu avantajlarla Stirling AIP sisteminin günümüzde olduğu gibi gelecekte de geliştirilmeye ve tercih edilmeye devam edileceği düşünülmektedir. Bu sonuca hali hazırda kullanılma oranlarına ve ülkelerin donanma güçlerine bakarak varmak mümkündür.

NASA'nın radyoizotop güç sisteminde kullandığı ve son yıllarda üzerinde çalışmalar yapılan serbest pistonlu Stirling motorunun, havadan bağımsız Stirling sisteminde kullanılması ile halihazırda kullanılan Stirling motorunun dezavantajlarını ortadan kaldırma imkânı sunabilecektir. Serbest pistonlu Stirling motorunun lineer çalışma mantığı, hareketli parçasının az olması ve güç/hacim oranının diğer Stirling motorlarına göre oldukça fazla olması nedeniyle AIP sisteminde kullanılmaya çok uygun olduğu görülmektedir.

Stirling AIP sistemine sahip HMS Gotland denizaltısının USS Donald Reagan uçak gemisini 2005 yılında yapılan tatbikatta fark edilmeden batırması oldukça dikkat çeken bir olay olmuştur. Olay sonrası Amerikan Donanması iki yıllığına HMS Gotland denizaltısını incelemelerde bulunmak üzere kiralamıştır. Bu olay Stirling AIP sisteminin kabiliyetini gösteren somut bir örnek olma niteliği taşımaktadır.

Stirling AIP sisteminin yakıt hücresi gibi nadir malzemelere sahip olmaması ve basit çalışma prensibi gibi avantajlarından dolayı ülkemizde ar-ge çalışmaları yapılarak olumlu sonuçlar doğrultusunda denizaltılarda değerlendirilmesi uygun olabilecektir. Türkiye’de yapılması planlanan MİLDEN projesinde de denizaltı tahrik sistemi olarak Stirling AIP sisteminin de değerlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle tahrik sistemi modernizasyon işlemleri için Stirling AIP sisteminin entegrasyon işleminin elverişli olması ve başarılı modernizasyon işlemlerinin gerçekleşmiş olması nedeniyle iyi bir tercih olarak görülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü’nün FYL-2021-4172 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Çalışmalarımıza olan desteklerinden ötürü Dr. Münir Cansın ÖZDEN’ e ve Enishan ÖZCAN’ a teşekkürlerimizi sunarız.

Referanslar

Ahmed, F., Huang, H., Ahmed, S., & Wang, X. (2020). A comprehensive review on modeling and performance optimization of Stirling engine. *International Journal of Energy Research*, 44(8), 6098–6127. <https://doi.org/10.1002/er.5214>

Association, W. N. (2021). Nuclear-Powered Ships. Tarihinde adresinden erişildi <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships.aspx>

Baino, T. (2018). Overview of Hull Design of Diesel Electric Submarines with Air Independent Propulsion (AIP) System – The Maritime Review. Tarihinde adresinden erişildi <https://maritimereview.ph/2018/09/26/2281/>

Bratt, C. (1990). The 4-95 Stirling engine for underwater application. *Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 5, 530–533. <https://doi.org/10.1109/iecec.1990.748005>

Breeze, P. (2018). Stirling Engines and Free Piston Engines. *Piston Engine-Based Power Plants*, 59–70. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812904-3.00006-9>

Buckingham, J., Mimeche, C., Hardy, T., & Mimarest, C. (2008). Submarine Power and Propulsion - Application of Technology to Deliver Customer Benefit. *UDT Europe 2008*, (June), 1–17.

Chen, N. and Griffin, F. (1983). A Review of Stirling Engine Mathematical Models. Oak Ridge National Laboratory (ORNL).

Chen, N. and Griffin, F. (1986). Linear harmonic analysis of free-piston Stirling engines.

Chinese Navy. (2021). China invents most powerful Stirling engine for AIP submarines. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.china-arms.com/china-best-aip-submarine-engine/>

Coates, P. (2013). Air Independent Propulsion. Tarihinde adresinden erişildi <http://gentleseas.blogspot.com/2014/07/air-independent-propulsion-game-changer.html>

de la Bat, B. J. G., Dobson, R. T., Harms, T. M., & Bell, A. J. (2020). Simulation, manufacture and experimental validation of a novel single-acting free-piston Stirling engine electric generator. *Applied Energy*, 263(January), 114585. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114585>

Deetlefs, I. N., & Dobson, R. T. (2014). Design, simulation, manufacture and testing of a free-piston stirling engine. (December), 1–90. Tarihinde adresinden erişildi <http://scholar.sun.ac.za>

Doreen Zudell. (2020). Stirling Convertor Sets 14-Year Continuous Operation Milestone. NASA. Tarihinde adresinden erişildi <https://rps.nasa.gov/news/40/stirling-convertor-sets-14-year-continuous-operation-milestone/>

Fruhling, C., & Schiemann, M. (2015). Subsea power supply based on submarine propulsion technology. Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, 2(May), 982–993. <https://doi.org/10.4043/25732-ms>

Gheith, R., Hachem, H., Aloui, F., & Ben Nasrallah, S. (2018). Stirling Engines. İçinde Comprehensive Energy Systems (C. 4–5). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00409-0>

Gray, R. (1985). Conway's All the World's Fighting Ships, 1906-1921. İçinde Conway's All the World's Fighting Ships, 1906-1921 (s. 314,315).

Han, J., Charpentier, J. F., & Tang, T. (2012). State of the art of fuel cells for ship applications. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, (April), 1456–1461. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2012.6237306>

Jang, J. (2021). A Study on the Submarine Air Independent Propulsion System: Focused on Submarines Currently in Operation. Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, 24(4), 418–425. <https://doi.org/10.9766/kimst.2021.24.4.418>

Joubert, S. (2008). A steam powered submarine: the Ictíneo Low-tech Magazine, 24 August 2008. Low-tech Magazine.

Kankam, M.D. and Rauch, J. (1991). Comparative survey of dynamic analyses of freepiston Stirling engines. 26th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference.

Katoch, L. G. P. C. (2021). AIP and Nuclear Powered Submarines. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.spsmai.com/experts-speak/?id=976&q=AIP-and-Nuclear-Powered-Submarines>

Kerros, P., Inizan, C., & Grousset, D. (2002). MESMA: AIP system for submarines. III/457-III/466. <https://doi.org/10.1109/oceans.1994.364242>

Krummrich, S., & Gmbh, H. W. (2010). Fuel Cell Methanol Reformer System for Submarines. Energy, 78, 1–6.

Lee, A., James, B. D., Kuhn, I. F., & Baum, G. N. (1989). A comparative analysis of electrochemical power sources for the DARPA UUV Program. Proceedings of the 6th International Symposium on Unmanned, (6339), 168–188. <https://doi.org/10.1109/uust.1989.754714>

Lee, J. C., & Shay, T. (2018). Analysis of fuel cell applied for submarine air independent propulsion (AIP) system. Journal of Marine Science and Technology (Taiwan), 26(5), 657–666. [https://doi.org/10.6119/JMST.201810_26\(5\).0005](https://doi.org/10.6119/JMST.201810_26(5).0005)

Mart, P. L., & Margeridis, J. (1995). Fuel Cell Air Independent Propulsion of Submarines. 54. Tarihinde adresinden erişildi <http://www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=ADA304112>

Martini, W. (1983). Stirling Engine Design Manual. National Aerospace and Space Administration (NASA).

Masato Kitazaki. (2017). Development of Zero Emission Generating System “Stirling Engine”. Journal of the Japan Institute of Marine Engineering,.

Metscher, J. F. (2014). Free-Piston Stirling Converter Model Development, Validation, and Analysis for Space Power Systems. 73.

NARAYAN, S., & GUPTA, V. (2015). Overview of Working of Stirling Engines. Journal of Engineering Studies and Research, 21(4), 45–53. <https://doi.org/10.29081/jesr.v21i4.132>

Nasn-, D. O. E., Cr-, N., & Ernst, W. D. (1997). Automotive Stirling Engine Development Project. Renewable Energy. Tarihinde adresinden erişildi http://mac6.ma.psu.edu/stirling/reports/19970012689_1997021349.pdf

Nightingale, N. P. (1986). Mod II Design Report. U.S. Department Of Energy, 54. Tarihinde adresinden erişildi http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19880002196_1988002196.pdf

Nilsson, D., & Engineer, S. D. (2014). Development of the Stirling AIP system Stirling AIP system explained Transit area Diesel engine Battery = Days. (1).

Nilsson, H. (1988). Submarine power systems using the V4-275R Stirling engine. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 202(4), 257–267. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1988_202_036_02

Normani, F. (2013). Stirling Engine Manual.

Özden, M. C. (2010). DİZEL/ELEKTRİK DENİZALTIILARIN DİZAYN AÇISINDAN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ.

Patrick, R. (2012). Nuclear air independent propulsion. Asia-Pacific Defence Reporter, 38(1), 24–30.

Paul Breeze. (2018). Piston Engine and Based Power Plants.

Pierre Gras. (2007). Gamma Stirling Engine. Tarihinde adresinden erişildi <http://www.moteurstirling.com/gamma.php>

Preston, A. (1988). Submarine Warfare. Brown Books.

Psoma, A., & Sattler, G. (2002). Fuel cell systems for submarines: From the first idea to serial production. Journal of Power Sources, 106(1–2), 381–383. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)01044-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)01044-8)

Richard Wheeler. (2007). Alpha Stirling Engine. Tarihinde adresinden erişildi https://tr.m.wikipedia.org/wiki/Dosya:Alpha_Stirling_frame_4.svg

Riofrio, J., Al-Dakkan, K., Hofacker, M. and Barth, E. (2008). Control-based design of free-piston Stirling engines. American Control Conference, pp. 1533 _ 1538.

Rossler, E. (2001). The U-Boat: The Evolution and Technical History of German Submarines.

Stirling, D. (2017). Stirling Engine Type. Tarihinde adresinden erişildi <https://diystirlingengine.com/>

STM ThinkTech. (2021). Yeni nesil denizaltılarda enerji kaynakları ve batarya sistemleri.

Sutton, H. I. (2016). World survey of AIP submarines. İçinde Covert Shores: The Story of Naval Special Forces Missions and Minisubs (2nd baskı). Tarihinde adresinden erişildi [http://www.hisutton.com/World survey of AIP submarines.html](http://www.hisutton.com/World%20survey%20of%20AIP%20submarines.html)

Sutton, H. I. (2020). AIP Submarines Will Increase The Lethality Of The Indian Navy. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.forbes.com/sites/hisutton/2020/07/22/aip-submarines-will-increase-the-lethality-of-the-indian-navy/?sh=44d4742141c7>

ThyssenKrupp. (2020). HDW Fuel Cell AIP System – proven power, simply silent. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.thyssenkrupp-marinesystems.com/en/products-services/innovations/hdw-fuel-cell-aip-system>

Tihonov, E., Bazykin, V., & Mukhanov, N. (2019). Opportunity of external combustion engines usage in forestry complex. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 316(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/316/1/012072>

Urieli. (1977). A Computer Simulation of Stirling Engine. University of the Witwatersrand.

Urieli and Berchowit. (1984). Stirling cycle engine analysis. (Modern energy studies).

Watch, D. (2012). Tomorrow's Submarines: the Non-Nuclear Option. Tarihinde adresinden erişildi [https://argee.net/DefenseWatch/Tomorrows Submarine Fleet--The Non-nuclear Option.htm](https://argee.net/DefenseWatch/Tomorrows%20Submarine%20Fleet--The%20Non-nuclear%20Option.htm)

Wikipedia. (2011). Stirling Engine. Tarihinde adresinden erişildi https://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine

Xuanzun, L. (2021). China develops world's most powerful Stirling engine. Tarihinde adresinden erişildi <http://www.globaltimes.cn/page/202112/1243157.shtml>

Zhu, S., Yu, G., Jongmin, O., Xu, T., Wu, Z., Dai, W., & Luo, E. (2018). Modeling and experimental investigation of a free-piston Stirling engine-based micro-combined heat and power system. Applied Energy, 226(May), 522–533. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.122>