

114820

KAPALI DEVRELİ GAZ TÜRBİNİNİN NÜKLEER GÜÇ TAHRİKLİ
DENİZALTILARA UYGUNLUĞUNUN ARAŞTIRILMASI

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Fizikçi Mustafa DALGIÇ
(304.95.1.059)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 8 Ekim 2001
Tezin Savunulduğu Tarih : 7 Ekim 2001

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hasbi YAVUZ

Diğer Jüri Üyeleri Doç. Dr. Süleyman ÖZKAYNAK (D.H.O.)

Yar. Doç. Murat AYDIN

ARALIK 2001

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, nükleer güç ile tahrik edilen gemi ve denizaltılara, yüksek sıcaklık gaz reaktörlerinin (HTGR) kullanılabilirliği araştırılarak, tahrik sistemleri için sistem geliştirme problemleri sunulmaktadır.

Yüksek lisans eğitimim sırasında, ders ve tez aşamalarında bana olan değerli yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen ve her konuda beni destekleyip teşvik eden değerli hocam Sayın Prof. Dr. Hasbi YAVUZ'a en içten duygularıyla şükranlarımı sunarım.

Bugünlere ulaşmamda bana her zaman ve her yönden destek olan aileme minnetlerimi sunarım.

Aralık 2001

Mustafa DALGIÇ

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR

TABLO LİSTESİ

ŞEKİL LİSTESİ

SEMBOL LİSTESİ

ÖZET

SUMMARY

1. GİRİŞ

- 1.1. HTGR Gelişimi Ve Genel Özellikleri
 - 1.1.1. İlk HTGR Tesisleri
 - 1.1.2. HTGR 300
 - 1.1.3. Diğer HTGR Dizaynları
- 1.2. Nükleer Güç İle Tahrik Edilen Gemi Ve Denizaltıların Gelişimi Ve Avantajları

2. GAZ TÜRBİNİ ÇEVİRİMLERİ VE NÜKLEER UYGULAMALARI

- 2.1 . Gaz Türbini Çevrimleri
- 2.2. Kapalı Çevrimli Gaz Türbini
 - 2.2.1. Gaz Türbinli Nükleer Tesisler
 - 2.2.2. Helyum Gazıyla Çalışan Gaz Türbini Çevrimlerinin Üstünlükleri Ve Buhar Türbini Tesisleri İle Karşılaştırılması
 - 2.2.3. Kapalı Devreli Gaz Türbini Çevrimi İle Birleştirilmiş Htgr'in Özellikleri Ve Üstünlüğü
 - 2.2.4. Soğutucu Gazların Özellikleri
 - 2.2.4.1. Helyum Gazının Avantajları
 - 2.2.5. Reaktörlerdeki Sıcaklık Sınırlamaları
 - 2.2.5.1. Sıcaklığın Nükleer Sonuçları
- 2.3. Direkt Ve Endirekt Çevrimlerin Mukayesesi
 - 2.3.1. Direkt Çevrimin Avantajları
 - 2.3.2. Direkt Çevrimin Dezavantajları
- 2.4. Helyum Türbini Tesislerinin Kontrolü
 - 2.4.1. Gaz Türbinlerinin Soğutulması

3. KAPALI SİSTEM BRAYTON ÇEVİRİMİ ANALİZİ

- 3.1. Kapalı Brayton Çevriminde Çevrimin Teorik Analizi İçin Yapılan Kabuller
- 3.2. Ara Soğutuculu Ve Ara Isıtıcı Gaz Türbinleri
- 3.3. Gerçek Çevrimin Kayıpları
 - 3.3.1. Kompresör Ve Türbin Verimleri
 - 3.3.2. Isı Değiştiricinin Verimi

4. NÜKLEER TAHRİKLİ GERÇEK KAPALI BRAYTON ÇEVİRİMİNDE ISITICI VE SOĞUTUCUDAKİ BASINÇ DÜŞÜMLERİDE GÖZ ÖNÜNDE BULUNDURULARAK ÇEVİRİMİN GÜCÜNÜN VE VERİMİNİN KOMPRESÖR BASINÇ ORANINA BAĞLI DEĞİŞİMİNİN ANALİZİ

- 4.1. Nükleer Tahrikli Gerçek Kapalı Brayton Çevrimi
- 4.2. Gerçek Çevrim
- 4.3. Önerilen Çevrimin Boyutsuz Güç Ve Veriminin Maksimum Performansları

5. NÜKLEER GÜÇ İLE TAHRİK EDİLEN GEMİ VE DENİZALTILARIN TARİHSEL GELİŞİMİ VE DİZAYNI

- 5.1. Nükleer Gemilerin Tarihsel Gelişimi
- 5.2. Nükleer Denizaltıların Tarihçesi
- 5.3. Nükleer Denizaltılardaki Nükleer Reaktör Kısımı
- 5.4. Nükleer Güç İle Tahrik Edilen Gemi Sistemleri Ve Karşılaşılan Zorluklar
 - 5.4.1. Para Ve Güvenlik
 - 5.4.2. Teknik Eleman
 - 5.4.3. Sigorta Giderleri
 - 5.4.4. Tamir Ve Bakım
 - 5.4.5. Reaktöre Yeniden Yakıt Yüklenmesi
 - 5.4.6. Radyoaktif Atıkların Depolanması
 - 5.4.7. Limanlarla İlgili Sorunlar
 - 5.4.8. Lisans İşlemleri
- 5.5. Denizaltılarda Kullanılan Tahrik Sistemlerinin Karşılaştırılması
 - 5.5.1. Nükleer Güç İle Tahrik Edilen Denizaltıların Avantajları
 - 5.5.2. Nükleer Güç İle Tahrik Edilen Ticari Gemilerde Yiyecekleri Koruyabilme Avantajı
- 5.6. Nükleer Denizaltılarda Yeniden Yakıt Yüklenmesi
 - 5.6.1. Denize Atma
 - 5.6.2. Sığ Kıyıya Gömme
 - 5.6.3. Derin Kıyıya Gömme
- 5.7. Nükleer Denizaltıların Sökülme Riski
 - 5.7.1. Amerika Birleşik Devletleri'deki Nükleer Denizaltıların Sökülmesi

6. NÜKLEER GÜÇ İLE TAHRİK EDİLEN DENİZALTILAR İÇİN ÖNERİLEN TEORİK KAPALI ÇEVİRİM NÜKLEER GÜÇ SANTRALLERİ

- 6.1. Denizaltı Güç Sistemleri İçin Kapalı Çevrim Gaz Türbini Nükleer Güç Santralleri
 - 6.1.1. Deniz Altı Dizayn Referansları
- 6.2. Nükleer Denizaltıları İçin Direkt Çevrimli Gaz Türbini Santralleri
 - 6.2.1. Nükleer Güç İle Tahrik Edilen Denizaltılar İçin Ön Görülen Kapalı Brayton Direkt Çevriminin İdeal Verimi
- 6.3. Nükleer Güç İle Tahrik Edilen Denizaltılarda İndirekt Çevrim Gaz Türbin Santralleri
- 6.4. Nükleer Güç İle Tahrik Edilen Denizaltılarda Kullanılan İtme Sistemi Kontrolü

7. SONUÇ VE TARTIŞMA

KAYNAKLAR

EK-A

ÖZGEÇMİŞ

KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım (Alternative Current)
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
HTGR	: Yüksek Sıcaklık Gaz Soğutmalı Reaktör (High Temperature Gas-Cooled Reactor)
IHX	: Ara Isı Değiştirici (Intermediate Heat Exchanger)
PWR	: Basınçlı Su Reaktörü (Pressurized Water Reactor)
GCR	: Gaz Soğutuculu Güç reaktörü (Gas Cooled Reactor)



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Gaz Türbinlerinde Kullanılan Gaz Ve Türbin Elemanlarına Ait Bazı Karakteristik Değerler.	8
Tablo 2.2. Değişik Sıcaklıklarda Nötron Enerjisinin Fisyon Olasılığına Bağlı Değerleri	15
Tablo 6.1. Şekil 6.3. Deki Direkt Brayton Çevrimi İçin Giriş Varsayımları Ve Sonuçları	69
Tablo 6.2. Şekil 6.3'teki Direkt Çevrimde Kullanılan Türbo Makineler Ve Isı Değiştiricilere Ait Fiziksel Değerler.....	70
Tablo 6.3. Şekil 6.6'daki İndirekt Brayton Çevrimine Ait Değerler.....	76

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Nükleer Kapalı Gaz Türbini Çevrim Şeması.....	6
Şekil 2.2. He, N ₂ ve CO ₂ kullanıldığında türbin ve ısı değiştirici boyutlarındaki değişim	9
Şekil 2.3. Termik verimin genişleme oranına bağlı değişim grafiği	12
Şekil 2.5. Nötron yutma tesir kesitinin sıcaklığa bağlı değişimi.....	16
Şekil 2.6. Direkt ve Endirekt çevrime ait şemalar	18
Şekil 2.8. By-pass ile verim ve güçteki düşme	22
Şekil 3.1. Kapalı Brayton Çevrimine ait basit şema, P-v ve T-s Diyagramları	24
Şekil 3.2. Çok Kademeli ara soğutuculu ve ara ısıtıcılı tesise ait T-s Diyagramı..	29
Şekil 3.3. Çift türbinli ve çift kompresörlü Tesis Şeması	30
Şekil 3.4. Çift türbin ve çift kompresörlü tesise ait T-s Diyagramı.....	30
Şekil 3.5. Kapalı Çevrim Gaz Türbini Tesisi	32
Şekil 3.6. Kapalı Çevrim Gaz Türbinine ait T-s diyagramı	32
Şekil 4.1. Teorik Kapalı Brayton Çevrim Şeması	35
Şekil 4.2. Teorik Brayton Çevrimine ait P-v ve T-s diyagramı	36
Şekil 4.3. Tek devreli, ısı değiştiricili kapalı Brayton çevriminin şeması	39
Şekil 4.4. Şekil 4.3'te şeması verilen kapalı devreli gaz türbini çevrimine ait T-s diyagramı	41
Şekil 5.1 Amerika Birleşik Devletleri ve Rusya'da üretilen ve operasyondan alınan denizaltı sayısını gösterir grafik	51
Şekil 5.2. Bir nükleer denizaltının reaktör kompartımanına ait şema	53
Şekil 5.3. 40 MW gücündeki 8 yıl çalıştıktan sonra durdurulmuş bir nükleer denizaltının reaktöründeki harcanan yakıtın aktivitesinin yıllara bağlı değişim grafiği.....	54
Şekil 5.4. Reaktör çalışırken nötron aktivasyonundan dolayı oluşan radyoaktivitenin reaktör durduktan sonraki zamana bağlı değişim grafiği. ...	55
Şekil 5.5. Bir Nükleer Kargo gemisinin bölümleri	58
Şekil 5.6. Bir nükleer denizaltının reaktör kısmını gösteren şema.....	60
Şekil 5.7. Sökülmek üzere tersaneye getirilen gerçek nükleer denizaltılar.....	61
Şekil 5.8. Gerçek bir nükleer deniz altının parçalanma aşaması	61
Şekil 5.9. Gerçek bir nükleer denizaltıdan ayrılmış reaktör kompartımanı	62
Şekil 6.1. Şafta aktarılan gücün ağırlıkla değişim grafiği	65
Şekil 6.2. Şafta aktarılan gücün hızla değişim Grafiği	66
Şekil 6.3. Basit bir Brayton Direkt Çevrim Şeması	67
Şekil 6.4. Çevrimin Termal veriminin türbin giriş sıcaklığına ve ısı değiştirici verimine bağlı değişim grafiği	71
Şekil 6.5. Şekil 6.3'teki Kapalı direkt Brayton çevrimine ait T-s diyagramı	72
Şekil 6.6. İndirekt Brayton Çevrim Şeması	74

Şekil A.1. Boyutsuz gücün, türbin politropik verimi η_{pt} parametresine göre değişimi	84
Şekil A.2. Boyutsuz gücün, kompresör politropik verimi η_{pc} parametresine göre değişimi	84
Şekil A.3. Boyutsuz gücün, ısı girişindeki basınç oranı ε_H parametresine göre değişimi	85
Şekil A.4. Boyutsuz gücün, ısı çekilişindeki basınç oranı ε_L parametresine göre değişimi	85
Şekil A.5. Boyutsuz gücün, çevrimin maksimum ve minimum sıcaklıklara oranı τ parametresine göre değişimi.....	86
Şekil A.6. verimin, ısı değiştirici verimi η_R parametresine göre değişimi.....	86
Şekil A.7. verimin, türbin politropik verimi η_{pt} parametresine göre değişimi.....	87
Şekil A.8. verimin, kompresörün politropik verimi, η_{pc} parametresine göre değişimi	87
Şekil A.9. verimin, ısı girişindeki basınç oranı ε_H parametresine göre değişimi...	88
Şekil A.10. verimin, ısı çekilişindeki basınç oranı ε_L parametresine göre değişimi	88
Şekil A.11. verimin, çevrimin maksimum ve minimum sıcaklıkları oranı τ parametresine göre değişimi.....	89

SEMBOL LİSTESİ

c_p	: Sabit basınçta mükemmel gazın özgül ısısı
c_v	: Sabit hacimde mükemmel gazın özgül ısısı
h	: Özgül entalpi
k	: Gazın sabit basınçtaki özgül ısısının, sabit hacimdeki özgül ısısına oranı
m	: Kütle
$\dot{m}$	: Kütleli debi
n_c	: Kompresöre ait politropik üs
n_t	: Türbine ait politropik üs
p	: Basınç
q	: Birim kütle başına ısı geçişi ve ısı alışverişi
R	: Gaz sabiti
s	: Özgül entropi
T	: Sıcaklık
V	: Hacim
w	: Birim kütle başına yapılan iş
$\dot{Q}$	: Isıl güç
$\dot{m}$	: Kütle debisi
$\dot{W}$	: Güç
W_{max}	: Maksimum özgül net iş
$\dot{W}_g$	: Çevrimin gerçek gücü
$\dot{W}_{gt}$	: Türbinin gerçek gücü
$\dot{W}_{gc}$	: Kompresörün gerçek gücü
η_t	: Türbin verimi
η_{it}	: Türbin izantropik verimi
η_{pt}	: Türbindeki genişlemeye ait politropik verim
η_c	: Kompresör verimi
η_{ic}	: Kompresörün izantropik verimi
η_{pc}	: Kompresördeki sıkıştırmaya ait politropik verim
η_R	: Isı değiştirici verimi
η_β	: Teorik Brayton çevriminin verimi
η_{th}	: Termik verim
Δh	: Özgül entalpi değişimi
β	: Basınç oranı
σ_f	: Filyon tesir kesiti
r_p	: İzantropik sıkıştırma oranı

- θ_c : Kompresör sıcaklık oranı
 θ_t : Türbin sıcaklık oranı
 ε_H : Isı girişindeki basınç oranı
 ε_L : Isı çekilişindeki basınç oranı
 τ : Çevrimin maksimum ve minimum sıcaklıklara oranı



KAPALI DEVRELİ GAZ TÜRBİNİNİN NÜKLEER GÜÇ TAHRİKLİ DENİZALTILARA UYGUNLUĞUNUN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Son yıllardaki teknolojik gelişmeler gaz soğutmalı nükleer reaktörlerin, nükleer güç ile tahrik edilen gemi ve deniz altı sistemlerine uygulanabilirliğini mümkün hale getirmiştir.

Bu çalışmanın birinci bölümünde, dünyadaki fosil yakıtların uzun süreli kullanımının sınırlı olduğu, ticari gemi ve deniz altılarda alternatif enerji kaynağı olarak nükleer güç kullanıldığında daha fazla avantaj sağlanabileceği vurgulanmıştır. İkinci bölümde, gaz türbinleri kısaca tanıtılarak gaz soğutmalı reaktörlerde kullanılan gazların özellikleri verilmekte ve en uygun gazın helyum gazı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca kapalı devre gaz türbinleri ile birleştirilmiş yüksek sıcaklık gaz reaktörlerinin (HTGR) özellikleri ve üstünlükleri üzerinde durulmuştur. Üçüncü bölümde, Kapalı Brayton Çevriminde çevrimin teorik analizi yapıp bu analiz için yapılan kabuller anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, nükleer tahrikli gerçek kapalı Brayton çevriminde, iş yapan akışkana reaktörden ısı geçişi ve soğutma sisteminde ısı çekilişi esnasında basınç düşümleri de hesaba katılarak çevrimin gücünün ve veriminin, kompresör sıcaklık oranına bağlı değişimin analizi yapılmıştır. Beşinci bölümde, nükleer güç ile tahrik edilen gemi ve denizaltıların tarihsel gelişimi anlatılıp, nükleer güç ile tahrik edilen ticari gemilerin karşılaştıkları zorluklar üzerinde durulmuştur. Ayrıca denizaltılarda kullanılan tahrik sistemlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Altıncı bölümde, Nükleer güç ile tahrik edilen denizaltılar için düşünülen Kapalı Brayton Direkt Çevrimi ile endirekt çevrim karşılaştırılması yapıp bu sistemlerde karşılaşılabilecek zorluklara dikkat çekilmiştir. Son bölümde ise nükleer güç ile tahrik edilen denizaltılara HTGR'lerin uygulanması için sistem geliştirme problemleri sunulmuştur.

Bu çalışmanın amacı, Nükleer güç ile tahrik edilen gemi ve denizaltılarda kullanılan basınçlı su reaktörleri (PWR) gibi, bazı yönden daha avantajlı olan HTGR'lerin uygulanabilirliği tartışılmıştır.

ANALYSIS OF A CLOSED CYCLE GAS TURBINE NUCLEAR POWER PLANT FOR SUBMARINE PROPULSION

SUMMARY

In recent years, improvements in technology, the application of gas cooled nuclear reactors in submarines and other ships have become possible.

In the first part of this study, limitations of using fossil fuels in submarines and commercial ships is emphasized and it is determined that nuclear energy has several advantages and is the best alternative energy source for submarines. In the second part, gas turbines and their properties are defined. Properties of the gases that can be used in submarines are analyzed and it is concluded that helium can be the most proper gas for HTGR. Also, properties of the closed circuit gas turbines and high temperature gas cooled reactors (HTGR) are explained.

In the third part, definitions used for the closed Brayton cycle are explained. Also Brayton cycle itself is theoretically analyzed.

In the fourth part, nuclear propelled real closed Brayton cycle's power and efficiency versus compressor pressure is analyzed. While doing this, pressure losses at regenerator and precooler is included.

In the fifth part, improvements of nuclear submarines and ships are explained from a historical perspective. Also difficulties seen in commercial nuclear ships are emphasized, in addition, various propulsion systems used in submarines are discussed.

In the sixth part, direct and indirect closed Brayton cycles are compared and difficulties seen in both of these systems are emphasized.

In the last part, improvements and applications of HTGR systems in nuclear submarines are presented.

The aim of this study is to determine the advantages of using high temperature gas cooled reactors (HTGR) in nuclear submarines.

1. GİRİŞ

Uzun bir geçmişe sahip olan gaz türbinlerinin başlangıçta verimleri oldukça düşüktü. Bunun nedeni ilk üretilen kompresörlerin veriminin oldukça düşük olması sebebi ile türbinden alınan gücün büyük bir kısmının kompresör tarafından harcanması, yüksek sıcaklıklarda çalışabilecek ve ani sıcaklık değişikliklerinde meydana gelecek termal gerilmelere dayanabilecek türbin kanat malzemelerinin geliştirilmemiş olmasıydı.

Daha sonra gelişen teknoloji ile kompresör verimleri artırılmış ve yüksek sıcaklık şartlarında çalışabilecek ve ani sıcaklık değişikliklerinde oluşabilecek termal gerilmelere karşı dayanıklı türbin kanat malzemelerinin üretilmesi ile gaz türbinlerinin verimlerinde anlamlı artışlar sağlanmıştır (Eyice, 1982).

Bu gelişmeler neticesinde, Brayton çevriminin verimi, diğer içten yanmalı makinaların verimleri ile mukayese edilebilir bir düzeye ulaşmıştır. Brayton Çevriminde soğutucu akışkan olarak hava, azot (N_2), karbondioksit (CO_2) ve helyum (He) gibi gazlar kullanılmaktadır. Gaz soğutmalı nükleer reaktörlerde kullanılabilecek gazların yüksek sıcaklıktaki kimyasal etkileşimleri ve nötronik davranışları göz önünde bulundurulduğunda en uygun gazın helyum olduğu anlaşılmaktadır (Crouch, 1960).

1.1. HTGR GELİŞİMİ VE GENEL ÖZELLİKLERİ

Ticarii gaz soğutmalı güç reaktörlerinin ilki 1956 yılında İngiltere'de Calder Hall Plant firması tarafından işletmeye açılmıştır. İngiltere'de, bu güne kadar 26 Magnot tipte ve 14 gelişmiş tipte gaz soğutuculu güç reaktörü üretilmiştir. İlk dönem ticari Gaz Soğutuculu Güç Reaktörleri (GCR) üzerine çalışmalar; Japonya'da, Fransa'da ve İspanya'da başlamıştır.

1950 yılında, GCR'lerin gelişimi ile başlatılan çalışmalar HTGR'lerin gelişimine neden olmuştur. HTGR'lerin gelişimi seramik yakıtların geliştirilmesi sayesinde olmuştur. Hem prizmatik tipteki grafit moderatör blokları hem de küresel yakıt elemanları işlevsel bir öneme sahiptir. Reaktör yakıt kalbindeki sıcaklığın artmaması için helyum (He) soğutucu olarak kullanılmıştır (IAEA, 2001).

1.1.1. İlk HTGR Tesisleri

İlk HTGR tipi reaktörler; İngiltere'de Dragon, Almanya'da AVR ve Amerika'da Peach Bottom firmaları tarafından dizayn edilmiştir. Bu firmaların geliştirdikleri reaktörlerin genel performansları çok iyidir ve bunlar gelişmiş HTGR'lerin temelini oluşturmaktadırlar.

İngiltere'deki Dragon HTGR reaktörü denemeleri 1965 Temmuz'unda başlatılmış ve 1966 yılının Nisanında 20 MW güce ulaşmıştır. Reaktör gelişiminde, grafit yakıt elemanları uranyum karbit ile zenginleştirilmiştir. Reaktör kalbinin merkezinden geçen iş yapan akışkanın çıkış sıcaklığı 750 °C olmuştur.

1967 yılında Almanya'da 15 MW gücünde bir HTGR işletmeye açılmıştır. AVR (Arbeitsgemeinschaft Versuch Reactor)'lerde, yakıt olarak 6 cm çaplı grafit küreler kullanılmıştır. AVR'lerin merkezinden geçen iş yapan akışkanın sıcaklığı 950 °C lere ulaşmıştır. Bu sıcaklık, reaktörün performansını artırmıştır. Ayrıca, AVR'ler yakıt geliştirmek için de kullanılmıştır.

AVR'nin iletilmesi 1988 kasımına kadar devam etmiştir. 21 yıl boyunca bu reaktör 122000 saatten fazla hizmette bulunmuş ve 1.67 milyar KW-saat elektrik üretmiştir.

GCR'ler, Amerika Birleşik Devletleri'nde 1950 ve 1960 yılları boyunca inşa edilmiş ve bu sürede amaç, helyum soğutuculu gaz reaktörlerinin gücünü 40 MW çıkarmak idi. HTGR'lerin üzerinde yapılan çalışmaların amacı, HTGR'lerin elektrik üreten diğer ticari reaktörlerle rekabetlerinin sağlanması idi (IAEA, 2001).

1.1.2. HTGR 300

Almanya, 300 MW HTGR inşasına 1971 yılında başlamıştır. Fakat lisans gerekliliklerin artması yüzünden bu reaktör, 1984 yılında kadar tamamlanamamıştır. 1985 kasımında, HKG (Hoch-Temperature- Kernkraftwerk gmbh) tarafından bu reaktörlerin geliştirilmesi çalışmaları başlatılmıştır. 1989 ağustos ayında uzun vadeli olarak THTR'lerin (Toryum Yüksek Sıcaklık Reaktörü) yapılmasına karar verilmiştir(IAEA, 2001).

1.1.3. Diğer HTGR Dizaynları

HTGR dizayn sisteminin gelişmesi ile, Almanya HTR 500'ü, Rusya VG400'ü ve Amerika Birleşik Devletleri de, buhar devresini geliştirmiştir. HTR

500, THTR 300'ün teknolojik gelişimi neticesinde ortaya çıkmıştır. Rusya'nın geliştirmiş olduğu VG400 son olarak 1060 MW'e ulaşmıştır.

Amerika Birleşik Devletleri 1970 lerde HTGR-SC dizaynını 77 MW'dan 1160 MW'a çıkarmaya kendini odaklamıştı. 1973'teki petrol krizi yüzünden 10 tane nükleer santralin kurulması programa alınmış, fakat gerçekleşmemiştir. Ayrıca, dünyadaki bu petrol krizi, ekonomik çöküşe neden olmuş ve Amerika Birleşik Devletleri'nin nükleer güç pazarından düşmesine sebep olmuştur. (IAEA, 2001)

1.2. NÜKLEER GÜÇ İLE TAHRİK EDİLEN GEMİ VE DENİZALTILARIN GELİŞİMİ VE AVANTAJLARI

Nükleer reaktörlerde akışkan olarak helyum gazı kullanılması, kullanılan türbo makinelerin (Türbin, Isı değiştirici) boyutlarında anlamlı küçülmelere yol açmıştır. Türbo makinelerin boyutlarındaki bu küçülme statik reaktörler için çok önemli olmamasına rağmen, dinamik reaktörler için oldukça önemlidir. Nükleer güç ile tahrik edilen gemiler ilk olarak 1959 yılında Rusya'da geliştirilmiş ve bu gemiler Rus donanması tarafından Kuzey Buz Denizinde buz kırıcılar olarak başarıyla kullanılmıştır (Khlopin ve Zotov, 1997).

Daha sonra Nükleer güç ile tahrik edilen ticari gemiler üretilmiş fakat bu gemilerin maliyet fiyatları dizel tahrik gücüyle çalışan gemilerin maliyetlerinin yaklaşık 3 misli olması, işletme ve bakım maliyetlerinin fazla olması ve lisans işlemlerinin zorlukları nedeniyle nükleer güç ile tahrik edilen ticari gemiler pek rağbet görmemiştir. (Illies, 1973).

Donanmada kullanılan denizaltılar için, nükleer güç çok cazip avantajlar sunmaktadır. Tahrik gücü açısından donanmada kullanılan denizaltılar iki grupta toplanabilir.

- Dizel gücü + batarya ile çalışan denizaltılar
- Nükleer güç ile tahrik edilen denizaltılar

Dizel motorların çalışabilmesi için oksijene ihtiyaç vardır. Bu yüzden dizel gücü ile çalışan denizaltılar dalışa geçtiklerinde dizel motorlarını kullanamazlar. Su altında daha önceden bataryalarına depo ettikleri elektrik enerjisini kullanırlar. Denizaltıların su altında batarya ile tahrik edilmesi sessizlik açısından denizaltılara büyük avantaj sağlamaktadır. Fakat bununla birlikte yeterli miktarda elektrik enerjisinin bataryalara depolanamaması denizaltıların su altında kalma sürelerini azaltmaktadır. Bu ise askeri açıdan istenmeyen bir durumdur.

Denizaltılar, nükleer güç ile tahrik edildiğinde enerji üretimi için oksijene ihtiyaç duymazlar ve denizaltında uzun süre kalabilirler. Hatta nükleer denizaltı personeli için gerekli olan temiz su ve oksijeni bu sistemle rahatlıkla üretebilirler. Bu durum denizaltılara hiç yakıt ikmali yapmadan uzun süre su altında kalabilme avantajı getirir. (Gouge, 1991)

Bugüne kadar üretilmiş nükleer güç ile tahrik edilen gemi ve denizaltılarda basınçlı su reaktörleri (PWR) kullanılmıştır. PWR'ler oldukça büyük hacim kaplarlar ve bir PWR reaktörü, bir denizaltı hacminin yaklaşık %50'si kadardır. Sınırlı hacme sahip olan denizaltılarda, PWR'lerden daha küçük hacim işgal eden yüksek sıcaklık gaz soğutmalı reaktörler (HTGR) kullanılması durumunda, nükleer güç ile tahrik edilen denizaltılar iç hacim açısından oldukça avantajlı duruma getirilebilir.

Gelişen teknoloji, küçük boyutlarda güç yoğunluğu yüksek reaktörler yapmayı sağlamıştır. Ayrıca, gaz türbini çevrimlerinde kullanılan kompresörlerin, yüksek sıcaklıklarda çalışabilecek türbin kanatları üretilmesi ile, türbin verimleri %90'lar civarına çıkmıştır. Aynı şekilde gazdan gaza ısı değiştiricilerinin gelişimi ve verimlerinin %90'lar civarına çıkarılması, HTGR'lerin denizaltılarda kullanılabilmelerini mümkün hale getirmiştir.

Varsayımsal olarak ele alınan bir denizaltının boyu 100 m, çapı 10 m olsun. Yani L/D oranı modern denizaltılarda olduğu gibi 10 olsun. Denizaltının yüzey alanı 2700 m² ve ağırlığı 6300 ton olarak kabul edilirse ki bu değerler gerçek değerlerle uyum içerisindedir, böyle bir denizaltının 35 deniz mili hız yapabilmesi için 26,3 MW güce ihtiyacı vardır. (Gouge, 1991)

Günümüz teknolojisinin ulaşılmış olduğu seviyede, denizaltının ihtiyacı olan güçlerde çalışan gaz soğutmalı nükleer reaktör yapmak mümkündür. Varsayımsal olarak düşündüğümüz denizaltıda Kapalı Brayton Direkt Çevrimi uygulandığında denizaltının iç hacminde rahatlama sağlanabilir. Direkt çevrimin sadeliğinden dolayı denizaltılar için doğal bir çekiciliği vardır. Fakat türbomakinelerle reaktör ve tahrik sistemlerinin aynı kompartımanda bulunması bakım ve onarım zorlukları nedeniyle istenmeyen bir durum oluşturmaktadır.

Bunun yerine endirekt çevrimi kullanıldığında reaktör ile türbo makineler ve tahrik sistemleri ayrı bölümlerde olacağından bakım ve onarım açısından avantajlı bir durum elde edilmiş olur. Bununla birlikte endirekt çevrim işgal ettiği hacim açısından direkt çevrime nazaran daha fazla yer işgal eder. Fakat güvenlik açısından endirekt çevrim direkt çevrime kıyasla tercih edilebilir.

2. GAZ TÜRİNİ ÇEVİRİMLERİ VE NÜKLEER UYGULAMALARI

2.1 . GAZ TÜRİNİ ÇEVİRİMLERİ

Gaz türbini çevrimleri; türbine yüksek basınç ve sıcaklıkta giren gazın türbinde genişleyerek iş yapması prensibine göre çalışır. Gaz türbini çevrimleri;

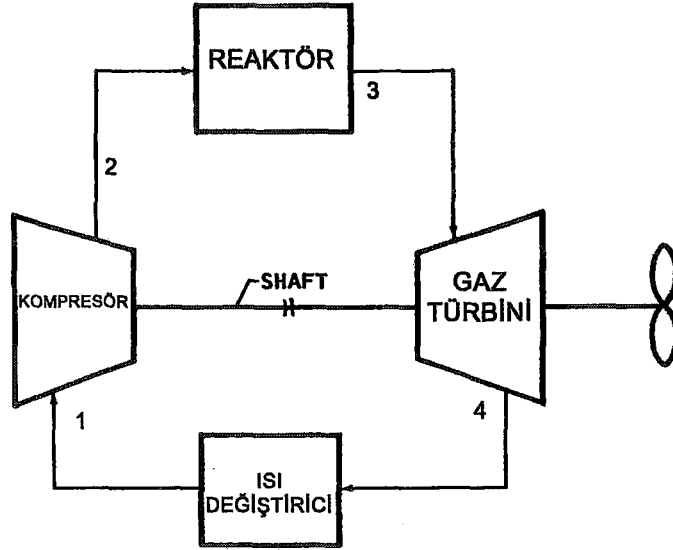
- Açık çevirim
- Kapalı çevirim
- Yarı Kapalı çevirim

olmak üzere üç şekilde gerçekleştirilebilir. Açık çevirim de iş gören akışkan (gaz) türbinde genişledikten sonra atmosfere atılır.

Kapalı çevirimde iş gören akışkan (helyum) türbinde genişledikten sonra çevrimi tamamlamak üzere hal değişimlerinden sonra aynı maksatla tekrar kullanılır. Yarı kapalı çevrim ise, yukarıda bahsedilen iki çevirim arasında çalışır.

2.2. KAPALI ÇEVİRİMLİ GAZ TÜRİNİ

Bu çalışma konusu içinde yer alan en basit kapalı gaz türbini çevrimlerinde, türbine basınçlı ve sıcak olarak giren gaz, türbinde genişleyip iş yapmakta, daha sonra bir soğutucuda kompresöre giriş sıcaklığına kadar soğutulmakta ve kompresörde sıkıştırılan gaz, bir ısı kaynağından ısı alarak tekrar türbine gönderilmektedir. Burada, gazın ısıtma işlemi, bir nükleer reaktörün kalbinde yapılabilir. Bu yüzden kapalı çevrimli gaz türbinlerini klasik ve nükleer olmak üzere iki guruba ayırmak mümkündür. Şekil 2.1 de basit bir nükleer kapalı gaz türbini çevrim şeması verilmiştir.



Şekil 2.1. Nükleer Kapalı Gaz Türbini Çevrim Şeması

2.2.1. Gaz Türbinli Nükleer Tesisler

Nükleer enerjinin kaynağını, reaktör kalbi içinde oluşan fisyon reaksiyonu teşkil eder. Bir nükleer reaktör kalbi içinde meydana gelen fisyon enerjisinin dışarıya taşınması soğutucu adı verilen bir akışkan vasıtasıyla olur.

Nükleer reaktörlerin soğutulmasında kullanılan soğutucular sıvı veya gaz olabilir. Soğutucu olarak kullanılan akışkan sıvı ise soğutucunun dolaşımı bir pompa vasıtasıyla, kullanılan akışkan gaz ise, akışkanın dolaşımı bir kompresör yardımı ile birinci devre adı verilen bir devre içinde gerçekleştirilir.

Reaktörün soğutulmasında kullanılan akışkanın mümkün olduğunca az nötron yutması istenir. Bir nükleer reaktörde soğutucu olarak kullanılan sıvı akışkanların başlıcası H_2O 'dur. Suyun nötron yutma tesir kesitinin küçük olması, ucuz ve kolay elde edilebilmesi suyu bu konuda avantajlı hale getirmiştir.

Bir nükleer reaktörün birinci devresinde soğutucu akışkan olarak, reaktörün dizayn kriterine göre sudan başka ağır su (D_2O), sodyum (Na) ve potasyum (K) gibi sıvı metallere başka, helyum (He), karbondioksit (CO_2), azot (N_2), hava ve He ile CO_2 'nin çeşitli oranlarda karışımları da kullanılabilir.

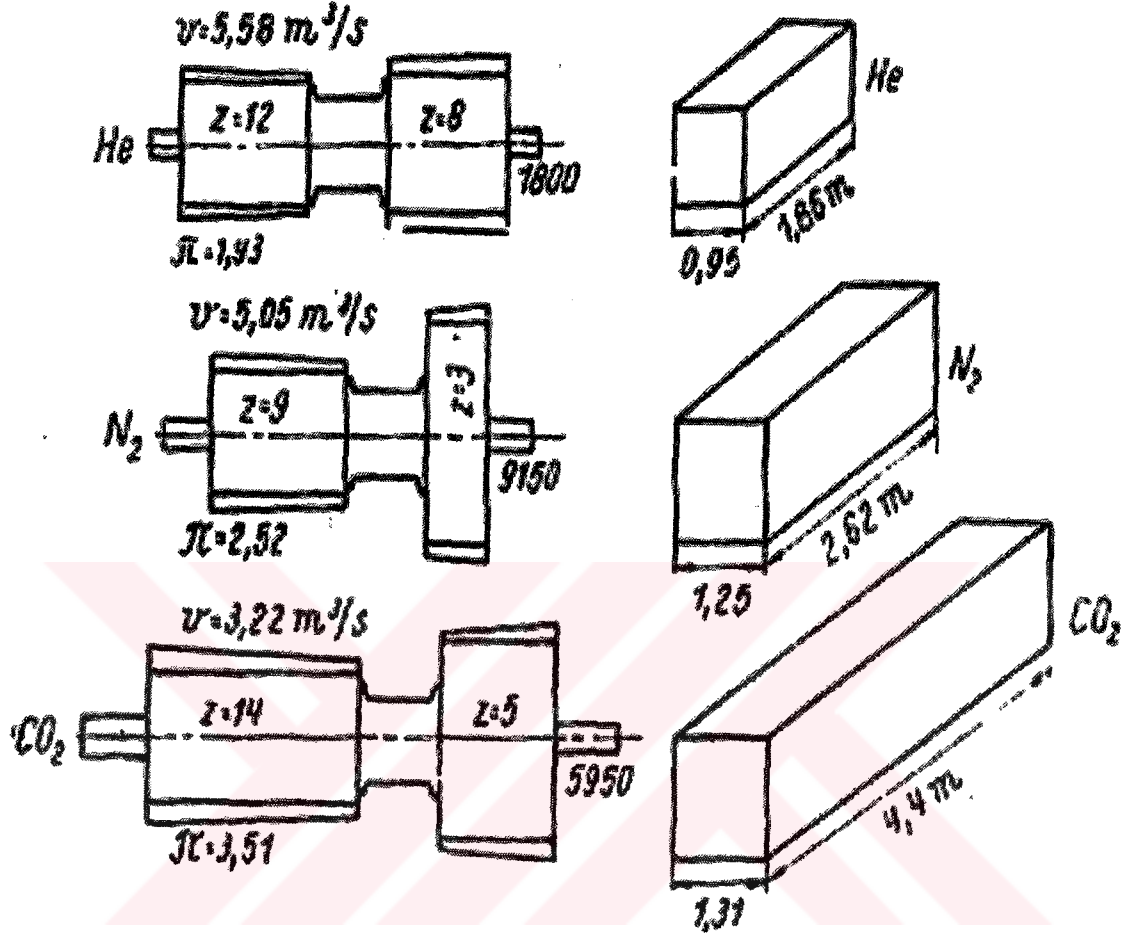
Soğutucu akışkan olarak kullanılan gazlar içinde en uygun olanı He gazıdır. Çünkü He'un diğerlerine göre ısı iletim katsayısı daha yüksektir, ayrıca kimyasal olarak kararlıdır ve radyasyondan daha az etkilenir. He'dan sonra en uygun gaz, saf azot (N_2) gazıdır.

Gaz soğutmalı reaktörlerde yavaşlatıcı olarak grafit kullanılır. Soğutucu akışkan olarak saf CO_2 gazı kullanıldığında 800°C sıcaklık altında grafit yavaşlatıcı malzemesi ile reaksiyon yaparak karbonmonoksit meydana getirdiğinden pek tercih edilmez. Fakat He ve CO_2 'in bazı olumlu özellikleri bunların belirli oranlarda karıştırılarak kullanılmasını mümkün kılar. Karışım içindeki CO_2 oranı genellikle %5 veya %10 civarındadır. Bu gazlarla ilgili bazı fiziksel ve termodinamik özellikler ile türbin, ısı değiştirici ve gaz ısıtıcılarında, gazın cinsine bağlı olarak çıkan boyutlar ile diğer karakteristik değerler Tablo 2.1'de verilmiştir. Bu tablonun ikinci kısmında gerekli gaz türbinleri ve ilgili diğer teçhizatla bütün gazlar için güç, basınç, sıcaklık, genişleme oranları ve hız değerleri aynı alınmıştır. Ayrıca çevrim hızları ve basamak adetlerinin sabit kaldığı kabul edilmiştir. (Eyice, 1988)

Tablo 2.1. Gaz Türbinlerinde kullanılan gaz ve türbin elemanlarına ait bazı karakteristik değerler. (Eyice, 1988)

Gazın Özellikleri	Birim	Gazın Adı				
		N ₂	He	H ₂	He+CO ₂	H ₂ +CO ₂
Moleküler Ağırlık	---	29	4	2	48	46
Özgül Isı	KJ/kg°C	1,087	5,225	12,54	3,156	3,762
Viskozite Oranı	---	1	1	0,5	1	1
Mach Sayısı	---	1	3	3,9	2,1	2,4
Adyabatik Basınç Oranı	---	4	2,52	3,65	2,92	2,71
Karışımında CO ₂ Miktarı	%	-	-	-	10	5
Gaz Türbini						
Basamak Sayısı Oranı	-	1	4,8	13,5	2,8	3,5
Çevre Hızı Oranı	-	1	2,2	3,7	1,75	1,9
Çap Oranı	-	1	0,68	0,52	0,76	0,73
Devir Sayısı Oranı	-	1	3,3	7,1	2,3	2,6
Isı Değiştirici						
Isı İletim katsayısı oranı	-	1	2,56	4,35	1,86	2,12
Boru Sayısı Oranı	-	1	0,56	0,27	0,66	0,62
Boru Uzunluğu Oranı	-	1	0,70	0,85	0,82	0,76
Boru Ağırlığı Oranı	-	1	0,30	0,23	0,54	0,47
Hava Isıtıcı						
Isı İletim Katsayısı Oranı	-	1	2	4	1,6	1,7
Boru Sayısı Oranı	-	1	0,68	0,30	0,78	0,75
Boru Uzunluğu Oranı	-	1	0,74	0,85	0,82	0,79
Boru Ağırlığı Oranı	-	1	0,50	0,25	0,64	0,59

Şekil 2.2'de N_2 , CO_2 ve He gazı ile çalışan tesislerde, solda türbin ve sağda ısı değiştirici boyutları verilmiştir. Görüldüğü gibi, boyutlar açısından en uygun olanı, He gazı ile çalışan gaz türbini çevrimi vermektedir.



Şekil 2.2. He, N_2 ve CO_2 kullanıldığında türbin ve ısı değiştirici boyutlarındaki değişim (Eyice, 1988)

2.2.2. Helyum Gazıyla Çalışan Gaz Türbini çevrimlerinin Üstünlükleri Ve Buhar Türbini Tesisi İle Karşılaştırılması

1. Gaz soğutmalı reaktör ve gaz türbinli nükleer tesisler değişken yüklere göre inşa edilebilirler. Bu sebepten, günümüz su soğutmalı reaktörlerindeki gibi, yüksek basınç ve sıcaklıklarda kaza olasılıkları yoktur.
2. Helyum gazıyla çalışan gaz türbinlerinin boyutları buhar türbinlerine nazaran çok daha küçüktür. Aynı güçte, uygun bir buhar türbini ile karşılaştırıldığında (250MW) kapalı devre türbininin en büyük çapı 3 defa, kanat uzunluğu 5 defa daha küçüktür. Dolayısıyla bir kanada etkiyen

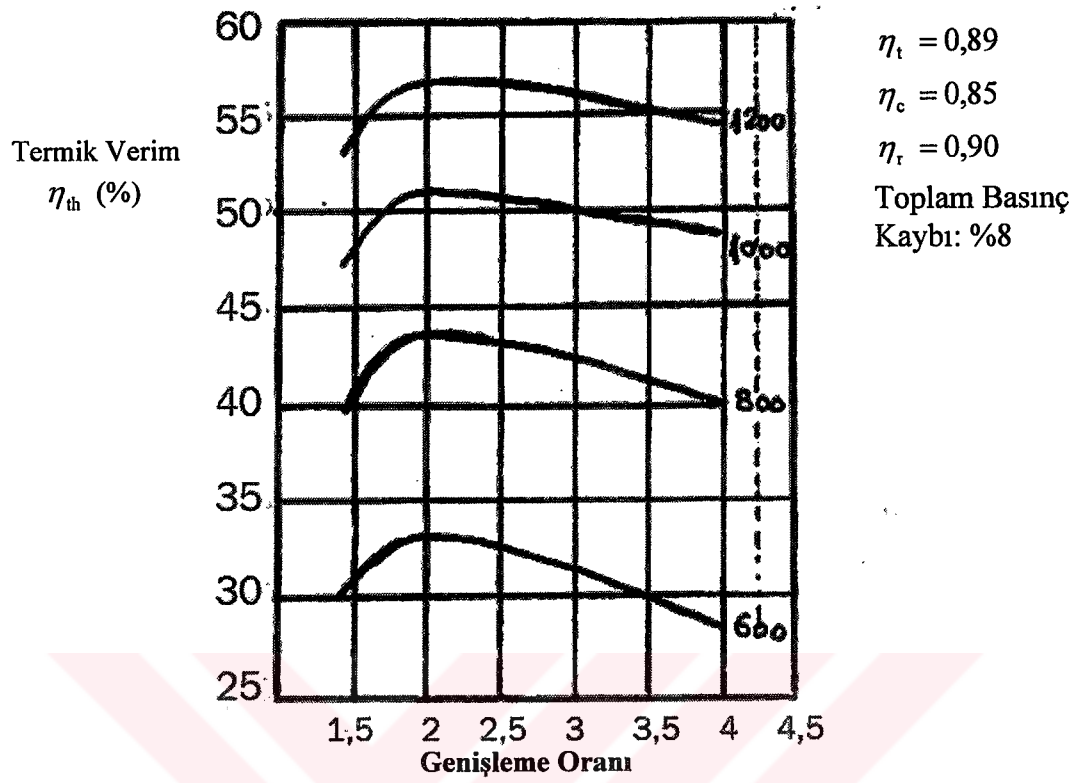
gerilme çok daha küçüktür. Bu sonuçlar buhar türbinleri ile karşılaştırıldığında küçük genişleme oranları ve küçük özgül hacim değişmesinden doğar. Doymuş buharlı bir nükleer buhar türbininin çıkışında çok büyük hacimler elde etmek için 600MW, 1500 d/dk'lık bir grupta ilave olarak en az yaklaşık 5,3 m dış çaplı 4 paralel çıkışa ihtiyaç vardır. 3600 d/dk. çift çıkışlı bir helyum türbininde bu 1,7 m kadardır. 3000 d/dk. ve yüksek güçlü buhar türbinleri 6-8 çıkışa ihtiyaç duyarlar.

3. Gaz türbinlerinde buhar türbinlerinde olduğu gibi korozyon tehlikesi yoktur.
4. Patlama veya ikinci çevrimden birinci gaz soğutmalı reaktör çevrimine buhar sızması tehlikesi yoktur.
5. Soğutma suyu ihtiyacı buhar türbinleri tesisine nazaran 3-5 defa daha azdır. Çünkü helyumun ısı taşınım katsayısı ve özgül ısısı buhardan daha yüksektir. Helyum küçük sıcaklık değişimleri ile suya daha fazla ısı verir.
6. Helyum gibi soy gazların kullanılması oksidasyonu önler. Bundan dolayı 1000°C üstündeki sıcaklıklarda yüksek gerilim özelliğine sahip malzemelerin kullanılması bir dez avantaj gibi görülmesine rağmen, 1000°C nin üstündeki sıcaklıklara çıkılması ile, %50 den büyük verimlerin elde edilmesini sağlar. Buhar sıcaklığı 650°C'den yukarı çıkmayan buhar çevrimlerinde ise, %50 verime hiçbir zaman ulaşamaz.
7. Yük değişimi esnasında kombine bir by-pass ve basınç seviyesi kontrol sistemiyle reaktör çıkış sıcaklığı pratik olarak sabit tutulabilir. Kontrol sistemi yük değişimi ani ve yüksek olsa bile reaktör çıkış sıcaklığında ± 20 °C lik değişme yapar. Hiçbir buhar türbinli su reaktörü bu gibi değişikliklere uyamaz.
8. Bir buhar türbininde kondansördeki küçük sıcaklık farkı ile karşılaştırıldığında, kompresör kademeleri arasındaki soğutma suyu ve çevrim gazı arasındaki faydalı büyük sıcaklık farkı miktarının azaltılmasına sebep olur. Böylece hava ile de soğutma yapılabilir.
9. Buhar çevrimlerinin aksine, gaz çevrimleri çalışma basıncından bağımsızdır. Böylece makinelerin ve aletlerin emniyet boyutları serbestçe seçilebilir. Helyumlu büyük 600 MW kapasiteli ünitelerde bile 7 MPa maksimum basınçtan fazlasına ihtiyaç duyulmaz
10. Küçük ve orta boydaki kapalı devreli gaz türbinlerinin verimleri aynı güçteki buhar türbinlerinin verimlerinden yüksektir. Buna ilaveten buhar

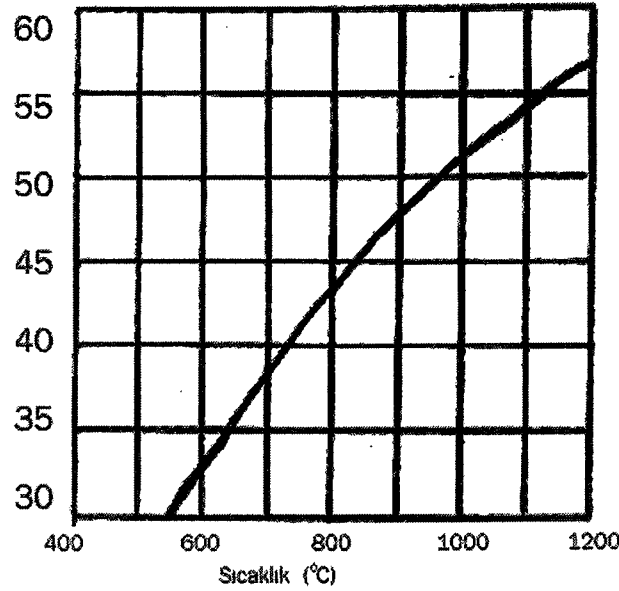
türbinlerinin verimleri bir yıllık çalışmadan sonra %1, iki yıllık çalışmadan sonra %0.5 kayba uğrar.

2.2.3. Kapalı Devreli Gaz Türbini Çevrimi ile Birleştirilmiş HTGR'in Özellikleri ve Üstünlüğü

1. Basit tek dönüşlü çevrim ve dolayısıyla basit tesis inşaatı
2. Yüksek sıcaklıkla çalışma dolayısıyla yüksek termik verim
3. Geniş bir güç bölgesi içinde sabit verim
4. Klasik güç tesislerine benzer değişken yüklerde çalışma imkanı sağlayan bir nükleer güç tesisi. Normal soğutma ve çalışma çevriminde basıncı değiştirerek basit yük ayarı. (Şekil 2.3-Şekil 2.4)
5. Sistemin özelliği dolayısıyla olan emniyet, patlama tehlikesinin olmaması
6. Uygun soy gazın serbest seçimi
7. Oksijen yokluğu, yüksek sıcaklıklardaki malzemelerinin yüksek gerilmelerde kullanılmasını temin eder. Çünkü korozyon yoktur.
8. Kirlenme probleminin olmaması
9. Yüksek basınç ve ısı iletimi dolayısıyla boyutların küçük olması
10. Yardımcı cihazların az olması
11. Az yer işgal etmesi
12. Küçük, orta ve büyük ünite güçlerinin elde edilmesinin mümkün olması



Şekil 2.3. Termik verimin genişleme oranına bağlı değişim grafiği



Şekil 2.4. Termik verimin sıcaklığa bağlı değişim grafiği (Keller, 1968)

2.2.4. Soğutucu Gazların Özellikleri

Reaktörlerde kullanılan soğutucu gazların yoğunluğu çok küçük olduğundan, nötronlar gazla etkileşmeye giremediğinden ve bu nedenle gaz soğutmalı reaktörlerde, yavaşlatıcı olarak katı yavaşlatıcı malzemeler (grafit) kullanılması kaçınılmaz olmaktadır. Diğer taraftan, grafit iyi bir yavaşlatıcı olduğundan, reaktörde yakıt olarak doğal uranyum kullanıldığından, gaz soğutmalı reaktörlerde önemli bir avantaj sağlar.

Gaz soğutmalı reaktörler için ısı geçişi açısından yaklaşık 50 çeşit uygun gaz veya gaz karışımı vardır. Fakat gazların reaktör içindeki radyasyondan etkilenmeleri ve kimyasal etkileşimleri de göz önünde bulundurulduğunda, bu gazların arasından ancak 4 tanesi reaktör için daha uygun bulunmuştur. Bunlar: hava, nitrojen, karbondioksit ve helyum gazlarıdır.

Hava, iyi bir gaz soğutucusudur ve elde edilmesi çok kolaydır. Fakat hava içinde değişik oranlarda bulunan çeşitli gazlar reaktör içerisinde kimyasal reaksiyonlara sebep olabilir.

Nitrojen, termodinamik açıdan dengelidir. Fakat kolaylıkla radyoaktif hale gelebilir.

CO₂ ise, maliyet açısından ucuzdur. Fakat sıcaklığı yaklaşık 800 °C olduğu zaman grafitle tepkimeye girer ve bu yüzden yüksek sıcaklıklarda tercih edilmez. (Crouch, 1960)

2.2.4.1. Helyum Gazının Avantajları

Reaktör soğutucuları olarak kullanılan gazlar, ısı açıdan karşılaştırıldığında birbirlerine göre önemli farklılıklar göstermezler. Sabit hacimdeki özgül ısı açısından hidrojen helyumdan daha iyidir. CO₂ ise 3. sırada gelir. Fakat genel bir kabul olarak helyum en iyi seçimdir.

Hidrojen nükleer açıdan dezavantajlıdır. Çünkü hidrojen ısı nötronları yutar. Bu da nötronik açıdan istenmeyen bir durumdur.

He, hem nükleer hem de kimyasal olarak dengeli bir gazdır, ısı nötronları yutmaz ve radyoaktif hale gelmez, ayrıca reaktör içerisindeki malzemelerde korozyona sebep olmaz. Bu özellikleri helyumu diğer gazlardan avantajlı kılar. Helyumun başlıca dezavantajı kolaylıkla elde edilememesi ve fiyatının CO₂'in fiyatının yaklaşık iki katı olmasıdır. (Crouch, 1960)

Yukarıdaki açıklamalar göz önünde bulundurulduğunda reaktörler için en uygun gaz helyumdur.

2.2.5. Reaktörlerdeki Sıcaklık Sınırlamaları

Su soğutmalı reaktörlerde 2000°C ta ortaya çıkan zorluklardan daha fazlası 550 °C gaz soğutmalı reaktörler için ortaya çıkar. Gaz sıcaklığı 550 °C olduğunda nükleer yakıt elemanları ile sıcak gaz arasında bir film engeli oluşturur. Bu film engeli yüzey elemanları ile soğutucu gazın temasını önemli ölçüde azaltır. Bunun sebebi yakıt zarf ara yüzeyindeki pürüzlü yüzeye gaz moleküllerinin takılmasıdır. Bu film engelini ortadan kalkması için yakıt yüzeyi ile gaz arasındaki sıcaklık farkının yaklaşık 260 °C olması gerekir.

Yakıt çubuğu içindeki fisyon gazlarının basıncı yüksek sıcaklık sebebi ile artar. Bu basınç artışı zarf malzemesini çatlatır. Eğer zarf malzemesi olarak tungsten kullanılırsa bu sorundan kaçınılabilir. Tungsten 1100°C sıcaklıkta 10.160MPa basınca dayanabilir. Fakat 310 paslanmaz çelik (310 SS) kullanılırsa, ancak 1.451MPa basıncına kadar dayanabilir.

Tungsteni fiyatı 310 paslanmaz çeliğin fiyatının 30 katıdır. Daha kötüsü tungstenin termal nötronları yutması paslanmaz çelikten 10 kat daha fazladır. (Crouch, 1960)

Bu sebeple, zarf malzemesi olarak tungsten yerine paslanmaz çelik tercih edilir.

2.2.5.1. Sıcaklığın Nükleer Sonuçları

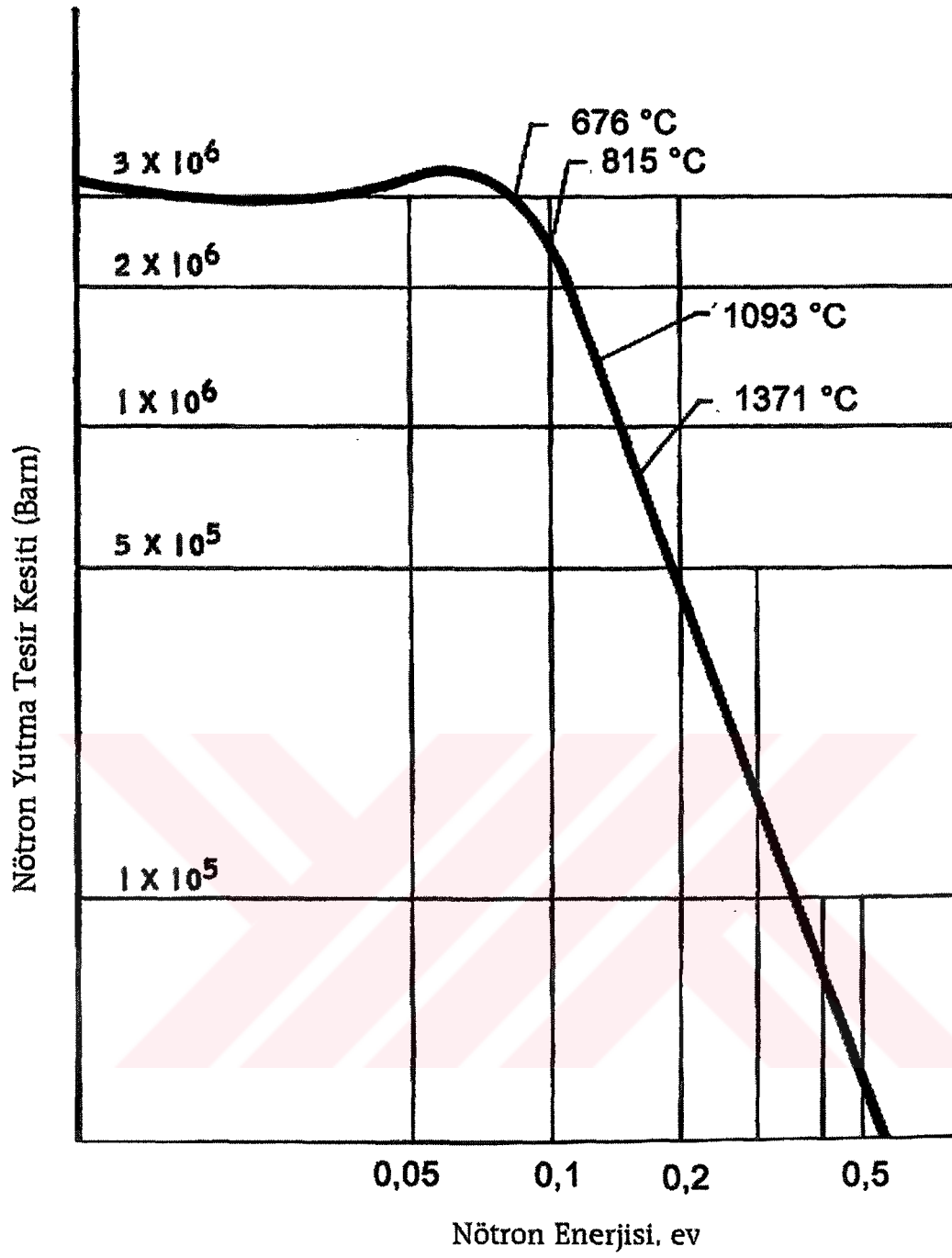
Yakıt elemanlarının ortalama sıcaklığı 1098°C dir. Bu sıcaklıkta termalize edilmiş nötronların fisyon enerjileri 0,118ev'tur. 1098°C sıcaklıkta tahmini fisyon tesir kesiti 240 barn'dır. Bu değer 550 °C sıcaklıktaki tesir kesitine nazaran %25 daha azdır.

Tablo 2.2.'de değişik sıcaklıklarda nötron enerjisinin fisyon olasılığına (σ_f) bağlı değerleri verilmiştir.

Tablo 2.2. Değişik sıcaklıklarda Nötron enerjisinin Fisyon olasılığına bağlı değerleri (Crouch, 1960)

Yakıt Sıcaklığı (°C)	Nötron Enerjisi (ev)	Fisyon Olasılığı (Barn) σ_f
37	0,026	565
550	0,070	315
676	0,082	100
815	0,094	260
954	0,108	250
1093	0,118	240
1232	0,130	222
1371	0,142	210
1510	0,153	205
1648	0,166	200

Yakıt sıcaklığının artması ile fisyon olasılığı küçülmektedir. Bunun anlamı, reaktörde sıcaklığı arttırabilmemiz için yakıt miktarını arttırmamız gerekir. Nükleer tepkimeler sonucu yakıt içinde çeşitli fisyon gazları oluşur. Bu fisyon gazları içinde Xe-135'in termal nötronları yutma oranının yüksek olması nedeniyle, yakıt içinde istenmeyen bir elementtir. Xe-135'in termal nötron yutma tesir kesiti oldukça büyüktür. Xe-135 gazı çıkışı 676 °C ye kadar büyük bir problem oluşturmaz. Sıcaklık artarsa, yakıt içinde oluşan Xe-135 zehrinin termal nötron tesir kesiti artar. Şekil 2.5. de Xe'un nötron yutma tesir kesitini nötron enerjisine bağlı grafiği verilmiştir.



Şekil 2.5. Nötron yutma tesir kesitinin sıcaklığa bağlı değişimi (Crouch, 1960)

Bunun anlamı da, oluşan her bir Xe-135 atomu için U^{235} atomundan 10000 tane eklememiz gerekir. (Crouch,1960).

2.3. DİREKT VE ENDİREKT ÇEVİRİMLERİN MUKAYESESİ

2.3.1. Direkt Çevrimin Avantajları

Direkt çevrimde birincil ve ikincil devreleri bağlayan kısımlar yoktur. Bu sebeple birincil ısı değiştiricilere gerek yoktur. Yatırım maliyetleri daha düşüktür ve ön devre ısı değiştiricilerindeki enerji kayıplarının olmaması sebebiyle güç kazancı vardır.

Direkt çevrimde reaktör çıkışında verilen bir akışkan sıcaklığı ile, çevrim verimi ve özgül iş daha yüksektir. Çünkü türbin giriş sıcaklığı, birincil devredeki ısı değiştiricinin ve buradaki sıcaklık farkının olmaması sebebiyle daha yüksektir. **(Keller, 1968)**

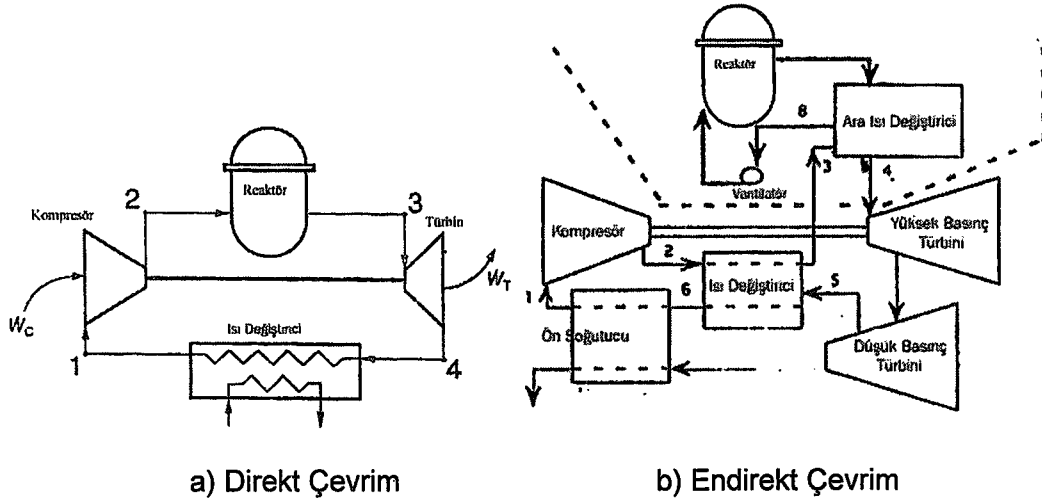
2.3.2. Direkt Çevrinin Dezavantajları

Direkt çevrim halinde reaktörün durumu reaktör soğutucusu ve devre akışkanı aynı olacağından, akışkanın özellikleri her ikisinde uygun olmalıdır. Seçilen akışkan reaktör için istenen özelliklere sahip olmalıdır. Güç çevrimi için uygun olmayan bir akışkan reaktöre çıkış sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda çalışmaya zorlayabilir.

Bu da Fisyon ürünlerinin salınması probleminin daha da önem kazanmasına sebep olur.

Güç çevrimini sınırlayan faktörler: Artan reaktör gücü ile çalışma basıncı da önem kazanır. Sınırlayıcı faktör reaktör basınç kabında meydana gelen gerilmedir. Reaktör için müsaade edilen basınç güç çevrimi için gereken optimum değerden düşük olabilir. Güç çevrimi için en iyi akışkan reaktör için uygun olmayabilir. Bu sebeple türbo makineler, ısı değiştiricileri ve boru donatımının optimum değerleri verecek uyum sağlamalıdır.

Direkt devredeki bir kaza soğutucu kaybına veya basınç kaybına sebep olabilir. Bu durumda reaktör acil soğutma sistemi harekete geçirilmelidir. Bazı emniyetler gerektiğinden dizayn zorlaşır. Şekil 222.6'da; (a) direkt (Todreas ve Kazimi, 1997) ve (b) endirekt çevrime ait şemalar verilmiştir. **(Keller ve Schmidt, 1970)**



Şekil 2.6. Direkt ve Endirekt çevrime ait şemalar

Akışkan olarak helyum gazının kullanılması anlatılan dezavantajları azaltır ve direkt çevrimin endirekt çevrime nazaran daha avantajlı olmasını sağlar. Sonuç olarak helyum gazı kullanılan direkt çevrimin büyük avantajları olduğu söylenebilir.

2.4. HELYUM TÜRBİNİ TESİSLERİNİN KONTROLÜ

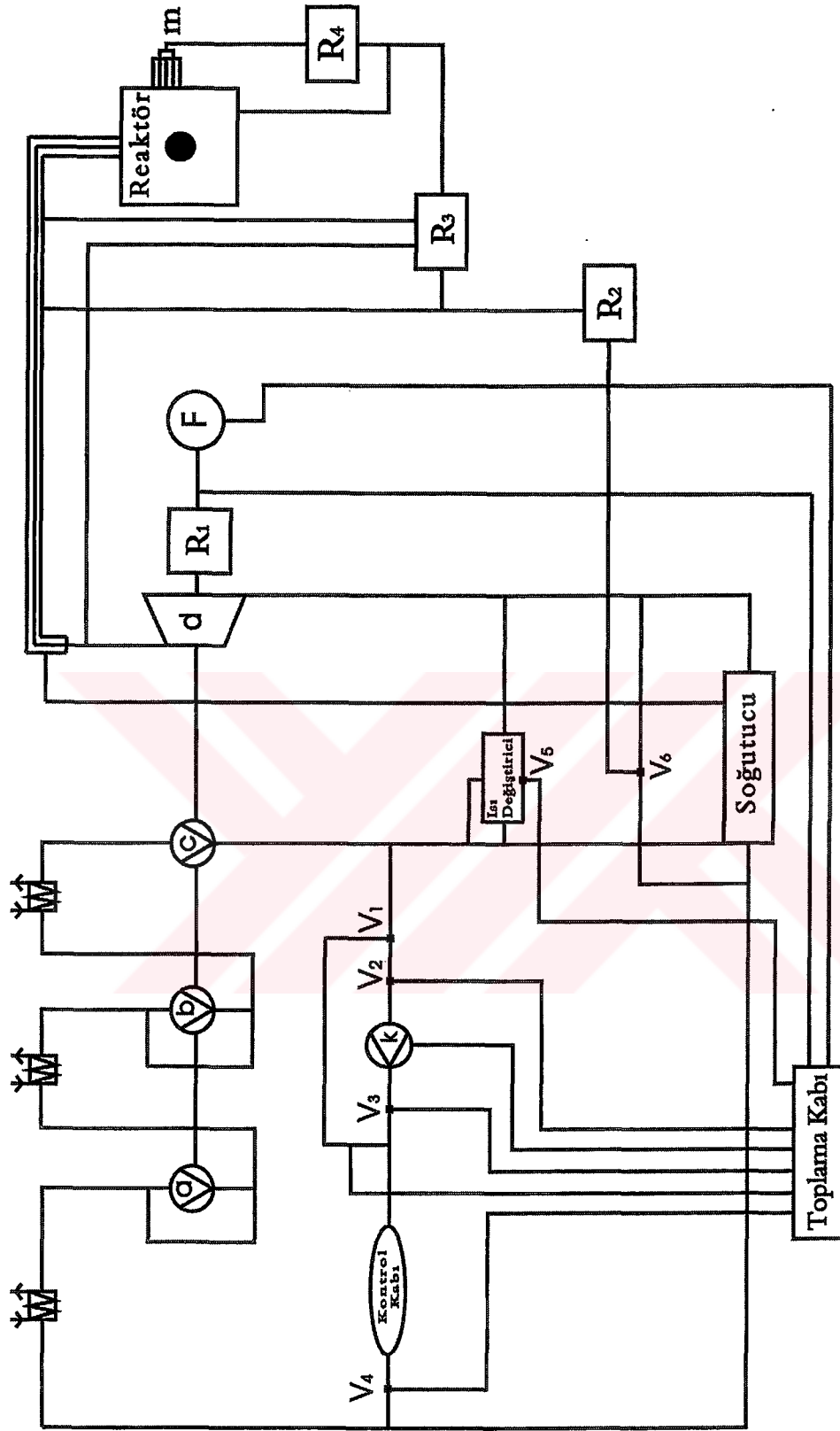
Hava türbinleri ile yapılan deneme sonuçları helyum türbini tesislerinde geniş olarak kullanılmaktadır. Aynı şekilde kapalı devreli hava türbini tesislerinde kullanılan kontrol sistemi helyum türbini tesislerinde de kullanılabilir.

Hava türbinlerinde denenen By-Pass ve basınç seviyesi kontrolü helyum türbinleri içinde iyi sonuç vermiştir. By-Pass kontrolü yüksek kontrol hızına sahiptir.

Isıtıcı kontrol sisteminin karakteristiği, ikazın doğrudan doğruya elektrik tarafından değil devreden alınmasıdır. Referans giriş çıkış sıcaklığındaki basınçtır ve kontrol edilen miktar ısıtıcı çıkış sıcaklığıdır. Bu sebepten ısıtıcı kontrol sistemi güç değişmelerine endirekt olarak cevap verir.

Güç kontrolünde istenen özellikleri şu şekilde sıralayabiliriz:

1. Türbomakinenin gücü net iş talebini mümkün olduğu kadar çabuk karşılayacak şekilde ayarlanabilmelidir. Yüksek kontrol hızıyla beraber tesis veriminde fazla değişme olmamalıdır.
2. Kontrol sistemi, devrenin çeşitli unsurları ani gerilim altında kalmayacak şekilde yapılmalıdır.
3. Yüksek sıcaklık reaktörü, direk gaz üzerinde yapılan kontrol işlemlerinin tesirlerine doğrudan doğruya maruz kalır. Bu sebeple yakıt elemanı kanalları ve çekirdek yapısında tahribatı önlemek için reaktörün giriş sıcaklığı sabit tutulmalıdır. Nominal duruma karşılık küçük sıcaklık değişimleri ve yavaş sıcaklık değişimleri istenir.
4. Isı değiştirici, soğutucular ve boru donanımı hızlı sıcaklık değişimlerine karşı korunmalıdır. Tesis kontrolü için:
 - a. Bir helyum deposu
 - b. Helyumu reaktör devresinden depoya nakletmek için transfer kompresörleri
 - c. By-pass kontrol valfleri
 - d. Kontrol işlemini yönetecek bir kontrol bilgisayarı gereklidir.



Şekil 2.7. By-Pass Kontrol Şeması (Bammert ve Ruchband, 1971)

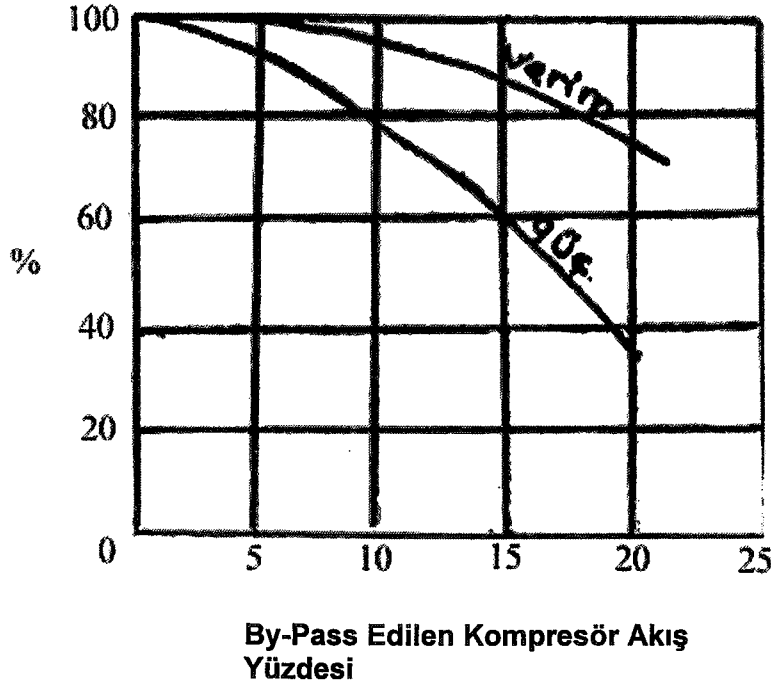
(a. Alçak Basınç Kompresörü, b. Orta Basınç Kompresörü, c. Yüksek Basınç Kompresörü,
d. Türbin, f. Alternatör, k. Doldurma Kompresörü, m. Tahrik
Kolu, R₁, R₂, R₃, R₄ Kontrol Cihazları)

Şekil 2.7'deki helyum türbini ile yüksek sıcaklık reaktörünün kontrol şeması verilmektedir. Basınç seviyesi kontrolünde devreden gazın çıkarılmasıyla güç düşürülür. Bu şekilde gazın yoğunluğu değiştirilerek güç değiştirilmiş olur. Makinelerde kullanılan hacimler ve çevre sıcaklıkları sabit kaldığından yalnız basınç seviyesi kontrolü ile makine verimlerinde dolayısıyla tesis veriminde değişme olmaz. Bu kontrol metodunun üstünlüğü ekonomik olmasıdır.

Basıncı azaltıp güç düşürülmek istendiği zaman V_1 valfi açılır. Bu çevrimde dolaşan helyumun en fazla %80 i devrenin yüksek basınçlı tarafından kontrol kabına gelir. Bu noktada denge sağlandığı zaman V_1 kapanır. V_2 , V_3 valfleri açılarak kompresör vasıtasıyla kontrol kabına devreden helyum verilir. Kontrol kabında depolanan helyum, güç artırılması istendiği zaman V_4 valfi ile tekrar devreye gönderilebilir. Kontrol kabındaki basınç, bütün güç oranları için yeterlidir. Bir kontrol kabı yerine ayrı basınç seviyeli birden fazla kontrol kabı kullanıldığında daha küçük bir depolama hacmi kafi gelir. Burada depodaki basınç 5,5 MPa kadar çıkar. Büyük tesislerde ise mevcut helyum miktarı fazla olduğundan büyük depolama hacimleri gereklidir. Reaktör sistemindeki maksimum basınç 5 MPa olduğunda mevcut helyum miktarı yaklaşık 7000 kg dır. Helyum deposunun bu miktarın iki misli yani 14000 kg Helyum alacak şekilde düzenlenmesi gerekir. Bu takdirde yüksek basınçlı Helyum deposu kullanılabilir. Depo için maksimum basıncı 14 MPa kabul edersek depo 300 °K sıcaklığında olacak ve 615 m³ hacminde olması gerekecektir. Bu 1,5 m³ kapasiteli 410 tüple sağlanabilir.

By-pass kontrolünde yüksek basınç kompresöründen gelen gazın bir miktarı V_5 valfi vasıtasıyla türbin çıkışındaki alçak basınçlı tarafa akıtılır. Böylece Türbin ve reaktörden geçen kütle akışı azaltılır. Bununla birlikte türbindeki ısı düşüşü azalır ve böylece türbin gücü düşürülmüş olur. Fakat toplam kompresör güç ihtiyacı sabit kalır. Böylece türbinden çekilen faydalı güç ani olarak düşürülmüş olur. Reaktör by-pass ile verim ve güçteki düşme şeklindeki gibi gösterilebilir. (Şekil 2.8)

Reaktör giriş sıcaklığında büyük değişmeler istenmediğinden by-pass miktarı bölünmelidir. Büyük bir miktar V_6 valfi ile ısı değiştiriciden çıkıp ön soğutucuya giden hacme eklenmelidir. Aksi takdirde türbin çıkış sıcaklığında artma olacak, ısı değiştirici vasıtasıyla reaktöre giriş sıcaklığı artacaktır.



Şekil 2.8. By-bass ile verim ve güçteki düşme (Bammert ve Ruchband, 1971)

By-pass ve basınç seviyesi kontrol valfleri güç ve hız kontrol cihazı R_1 tarafından işletilir. Reaktörün giriş sıcaklığı da R_2 tarafından düzeltilir. Reaktörün gücü, türbin giriş sıcaklığına bağlı olarak kontrol edilir. Türbin giriş basıncı ve reaktörün çıkış sıcaklığı da R_3 tarafından kontrol edilir. R_3 'ün kontrolü ile sağlanan güç tespit edilen ideal güç ile aynı değildir. Aradaki fark, R_4 tarafından reaktör kontrol çubuklarını tahrik kolu (m) vasıtasıyla kontrol etmekte kullanılır.

By-pass kontrolü sayesinde güçte saniyede %1 oranında bir düşüş sağlanabilir. Bu değer ani yük düşmeleri için çok faydalıdır.

2.4.1. Gaz Türbinlerinin Soğutulması

Yüksek reaktör çıkış sıcaklıklarında direkt devreli gaz türbin sistemi büyük avantaj sağlar. Fakat yüksek sıcaklıklarda malzeme problemi ortaya çıkar. Mevcut malzemelerin kullanılabilmesi için soğutma yapmak gerekir. Bilhassa türbin kanatlarında çok iyi bir soğutma yapılması halinde aynı malzemelerin 250°C daha yüksek sıcaklıklarda kullanılması sağlanabilir.

Helyum türbinlerinde yapılan soğutmada helyumun ısı iletkenliği yüksek olduğundan kanat boyunca sıcaklık düşmesi fazla olur. Ve kanatlarda termik gerilmeler doğar. Bu durumun uygulanan soğutma sisteminde göz önünde bulundurulması gerekir. Helyum türbininde rotor soğutucu sistemler vardır. Rotor

soğutucu sistemi ile rotor 1000°K giriş sıcaklığında Ferritik metallerin kullanılabileceği sıcaklığa kadar soğutulabilir.

Soğutucu gaz içindeki yabancı maddelerin zararlı tesirleri olur. Bu tesirleri özel bölmelerden rotora gönderilen temiz gaz sayesinde önlenabilir. Fakat temizleme tertibinde basınç kayıplarından dolayı bir vantilatör gerekir. Küçük güçlü tesislerde vantilatör gücü yüksek değere ulaşmamalıdır. Yüksek güçlü tesislerde bu vantilatör gücü büyük kayıplar getirmez. Sıcak gazın aralıklardan rotora ve muhafazaya girmemesi için soğutma gazı basıncı ilk türbin kademelerindeki basınçtan bir miktar fazla olmalıdır.

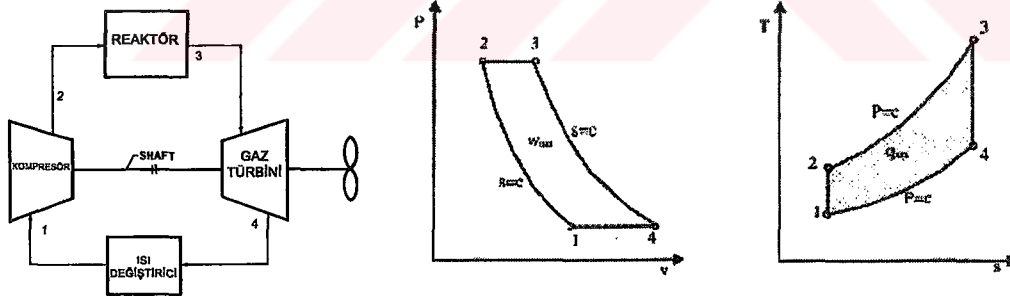
Soğutma sistemiyle soğutulan kanat diplerinin her kademe başına maksimum sıcaklığa 40°C eklenebilir. Türbinin bir kademesinin soğutulması ile %0,2 devrenin verim kaybına karşılık %1 verim artışı elde edilir. 25MW gücündeki küçük bir tesiste devredeki akışkanın %1 i miktarındaki soğutma gazı ile bu sonuçlar bir miktar değişir. Soğutma gazı tesis verimini %1-1,5 azaltır. Buna karşılık bütün giriş sıcaklığının 100°C kadar arttırılmasını sağlar. Böylece tesis verimi %4,5 arttırılır. Bu durumda toplam tesis verimi %3-3,5 artmış olur. Soğutma sisteminin yabancı maddeler dolayısıyla iyi çalışmaması halinde türbomakine durmaz. Sadece soğutma ile 10^5 saate ulaşan malzeme ömrü yaklaşık 10^4 saate düşer. (Bemmart ve Ruchband, 1971)

3. KAPALI SİSTEM BRAYTON ÇEVİRİMİ ANALİZİ

3.1. KAPALI BRAYTON ÇEVİRİMİNDE ÇEVİRİMİN TEORİK ANALİZİ İÇİN YAPILAN KABULLER

1. Çevrimde kullanılan soğutucu akışkan helyumdur ve özgül ısısı çevrim boyunca sabittir.
2. Sıkıştırma ve genişleme işlemleri izantropiktir.
3. Her bir elemanın giriş ve çıkışı arasındaki kinetik ve potansiyel enerji değişimi ihmal edilmektedir.
4. Reaktörde ve ısı değiştiricide sürtünmelerden dolayı basınç düşmesi olmadığı varsayılmaktadır.
5. Gazın kütle akışı, çevrim boyunca sabittir.
6. Isı değiştirici ters akışlıdır. Ve verimi %100 dür.

Kapalı Brayton Çevrimine ait şema, P-v ve T-s diyagramları Şekil 3.1'te verilmiştir.



Şekil 3.1. Kapalı Brayton Çevrimine ait basit şema, P-v ve T-s Diyagramları

Bu kabuller altında Şekil 3.1'de verilen basit bir Kapalı Brayton Çevriminin her bir elemanı açık sistem olarak göz önüne alındığında;

1 noktasında kompresöre giren gaz, 2 noktasına kadar kompresörde tersinir adyabatik olarak sıkıştırılmaktadır. Sıkıştırma işlemi adyabatik tersinir (izantropik) olduğu kabulüne göre,

$$\dot{Q}_{12} = 0 \quad (3.1)$$

olur.

Kompresör açık bir sistem olarak seçilerek yukarıdaki kabuller altında termodinamiğin I. Kanunu uygulandığında kompresör gücü;

$$- \dot{W}_{12} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

olur ve

$$- \dot{W}_{12} = \dot{m}c_p(T_2 - T_1)$$

şeklinde yazılabilir. Diğer taraftan;

$$- w_{12} = c_p(T_2 - T_1)$$

olarak bulunur.

2-3 arasında reaktöre giren gaza sabit basınçta ısı geçişi olmaktadır. Benzer şekilde, reaktör bir açık sistem olarak alınıp yukarıdaki kabuller göz önüne alındığında, özellikle gaz akışkanın sürtünmesiz olduğu kabulünden;

$$\dot{W}_{23} = 0$$

olur.

Termodinamiğin I.Kanunu uygulandığında

$$\dot{Q}_{23} = \dot{m}.c_p(T_3 - T_2)$$

şeklinde yazılabilir. Buradan birim kütle başına gaza verilen ısı ise

$$q_{23} = c_p(T_3 - T_2) \quad (3.2)$$

bulunur.

3 noktasında türbine giren gaz izantropik olarak 4 noktasına kadar genişleyerek yalnız iş yapmaktadır. Genişleme izantropik olduğundan;

$$\dot{Q}_{34} = 0$$

olur.

Türbin açık sistem olarak ele alınıp termodinamiğin I. Yasası uygulandığında türbin gücü;

$$-\dot{W}_{34} = \dot{m} c_p (T_4 - T_3)$$

olur. Ayrıca, birim kütle başına yapılan iş

$$w_{34} = c_p (T_3 - T_4) \quad (3.3)$$

şeklinde yazılabilir.

4 noktası şartlarında soğutucuya giren gaz, 1 noktasına kadar sabit basınçta ısı vermektedir. Soğutucu içinde sürtünme olmadığından, soğutucunun gücü;

$$\dot{W}_{41} = 0$$

olur.

Termodinamiğin I. Yasası kullanılarak

$$\dot{Q}_{41} = \dot{m} c_p (T_1 - T_4)$$

yazılır. Buradan;

$$q_{41} = c_p (T_1 - T_4) \quad (3.4)$$

olur.

Bu bir kapalı çevrim olduğu için çevrimin iç enerji değişimi "0" dır. Bu tanımdan hareketle;

$$q_{12} + q_{23} + q_{34} + q_{41} - (w_{12} + w_{23} + w_{34} + w_{41}) = 0 \quad (3.5)$$

bulunur.

Kompresörde izantropik sıkıştırma, türbinde izantropik genişleme olduğu için;

$$q_{12} = q_{34} = 0$$

yazılabilir.

Reaktörde ve ısı değiştiricide iş yapılmadığından

$$w_{23} = w_{41} = 0$$

şeklinde yazılır.

Denklem 3.5 dñzenlendiđinde

$$q_{23} + q_{41} = w_{12} + w_{34} \quad (3.6)$$

bulunur. Alınan ve verilen iş ve ısılar göz önñne alındığında, böyle bir kapalı Brayton Çevriminin termal verimi;

$$\eta_{\text{termal}} = \frac{W_{\text{net}}}{q_{\text{verilen}}} = \frac{w_{34} - w_{12}}{q_{23}} = \frac{q_{23} - q_{41}}{q_{23}} \quad (3.7)$$

olarak yazılır. q_{23} ve q_{41} için Denk. (3.2) ve Denk. (3.4) deki ifadeleri sırasıyla yerine konulur ve gerekli dñzenlemeler yapılırsa

$$\eta_{\text{termal}} = 1 - \frac{c_p (T_4 - T_1)}{c_p (T_3 - T_2)} \quad (3.8)$$

şeklinde bulunur.

Ayrıca; $P_1 V_1^k = P_2 V_2^k$ dır. "k" gazın sabit basınçtaki özgül ısısının, sabit hacimdeki özgül ısısına oranı

$$k = \frac{c_{p0}}{c_{v0}} \text{ şeklinde tanımlanır.}$$

Buradan basınçlar oranı;

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k \quad (3.9)$$

bulunur. Ayrıca;

$$\frac{P_1 V_1}{P_2 V_2} = \frac{RT_1}{RT_2} \quad (3.10)$$

oranından 3.10 dñzenlenirse

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{T_1}{T_2} \quad (3.11)$$

olur. Denklem 3.9 ve 3.11 kullanılarak

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{T_1}{T_2} \right)^k \quad (3.12)$$

yazılır. 3.11 eşitliği düzenlendiğinde;

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{1}{\beta} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (3.13)$$

olarak yazılır. Burada $\beta = \frac{P_1}{P_2}$ izantropik basınç oranıdır.

Diğer taraftan $P_3=P_2$ ve $P_4=P_1$ olduğundan

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{1}{\beta} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (3.14)$$

olur. Buradan 3.8 eşitliği düzenlendiğinde

$$\eta_{\text{termal}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (3.15)$$

bulunur. Termal verim k ve β cinsinden yazılırsa

$$\eta_{\text{termal}} = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}} \quad (3.16)$$

elde edilir. Denk 3.16'da görüldüğü gibi verim k ve β ya bağlıdır.

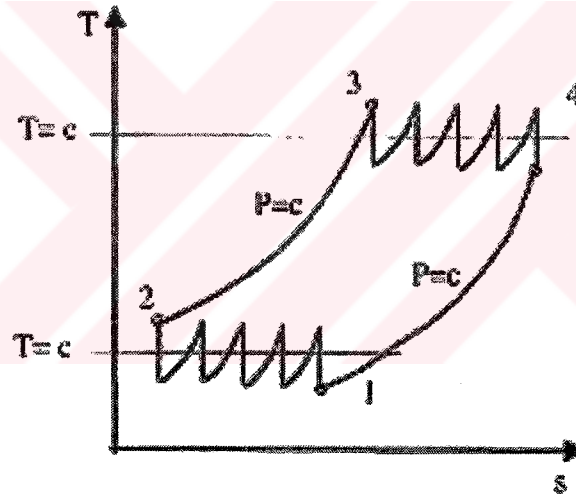
Hava için $k=1,40$ iken Helyum gazı için $k=1,667$ dir. Gazların Bölüm 2.2.3'te bahsedilen özellikleri de göz önünde bulundurulduğunda kapalı çevrim gaz türbinleri için en uygun gaz He dur.

Açık Çevrimli gaz türbinlerinde en düşük basınç atmosfer basıncı iken, kapalı çevrimde giriş basıncı atmosfer basıncından daha yüksek olabilir. Böylece daha

yüksek basınçlarda çalışabilmenin sonucu olarak; gaz türbini elemanlarından geçen gazın hacminin azaltılabilmesine, küçük yüzeyli ısı değiştiricileri kullanılmasına olanak sağlamakta ve yüksek güçlü gaz türbini ünitelerinin yapımı kolaylaşmaktadır.

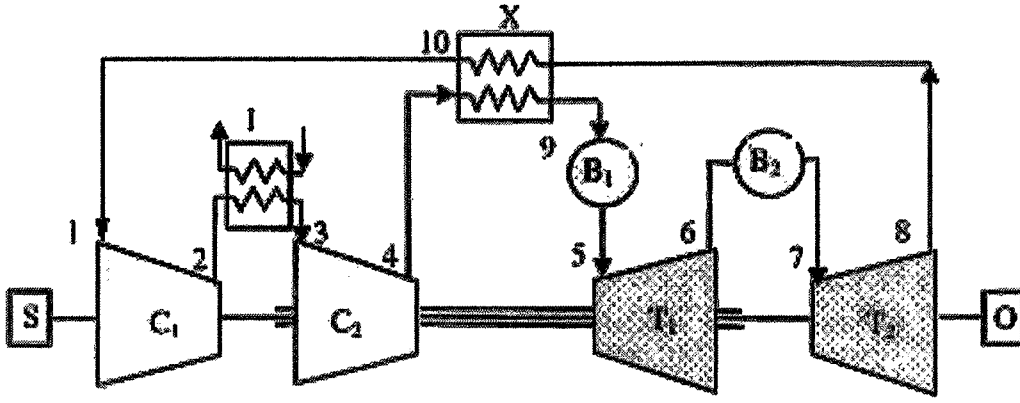
3.2. ARA SOĞUTUCULU VE ARA ISITICILI GAZ TÜRBİNLERİ

Bir gaz türbininin verimi, kompresörde sıkıştırma ve gaz türbininde genişleme işlemlerinin izantropik olarak yapılması ile artırılabilir. Tasarım güçlükleri nedeni ile izotermal sıkıştırma ve genişleme de mümkün değildir. Ancak kademeli kompresör ve ara soğutucular, kademeli türbin ve ara ısıtıcılarla bu işlemler izotermale yaklaştırılabilir. Bu durum şekil 3.2'deki T-s diyagramında açıklanmıştır. Daha çok kademelerin teorik olarak gaz türbininin verimini arttırmasına karşın, gaz türbini dizaynı karmaşıklaşmakta ve işlemlerin tersinmezliği nedeniyle olan kayıplar artmaktadır.



Şekil 3.2. Çok Kademeli ara soğutuculu ve ara ısıtıcılı tesise ait T-s Diyagramı

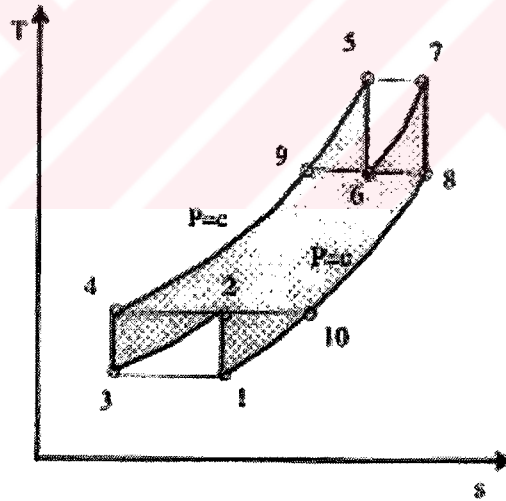
Şekil 3.3'de çok kademeli, ara soğutuculu ve ara ısıtıcılı bir gaz türbininin sistem şeması görülmektedir.



Şekil 3.3. Çift türbinli ve çift kompresörlü Tesis Şeması

Bu tür bir sistemde He gazı bağımsız kompresör kademelerinde sıkıştırılır ve kademeler arasında bulunan soğutucular tarafından soğutulur.

Şekil 3.4'teki T-s diyagramında da görüldüğü gibi izantropik sıkıştırma ve sabit basıncıdaki soğutma işlemi kademeleri ile toplam sıkıştırma işlemi izotermele yaklaşmaktadır.



Şekil 3.4. Çift türbin ve çift kompresörlü tesise ait T-s Diyagramı

Isı değiştiriciler, kademeli sıkıştırma ve kademeli ısı verme gaz türbinlerinin, verimlerini dikkate değer oranda arttırmaktadır. Verim artışındaki en büyük pay ise ara ısıtma işleminindir. Ekonomik üretim açısından uygulamada en çok 2 kademeli genişleme ve 3 kademeli sıkıştırma uygulanmaktadır. 3 kademeli sıkıştırmada ulaşılabilecek toplam basınç artışı gerekli işin azalması için 3 eşit basınç oranlı kompresörle sağlanır. Buna göre izantropik basınç oranları;

$${}_1\beta_2 = {}_3\beta_4 = {}_5\beta_6 \quad (3.17)$$

dır.

1 nolu ara soğutucuya giren He un basıncı P_2 ve 2 nolu ara soğutucuya giren He un basıncı P_4 olduğuna göre 3 kompresörün ortak basınç oranı;

$$\beta_c = {}_1\beta_6 = \left(\frac{P_6}{P_4}\right) \cdot \left(\frac{P_4}{P_2}\right) \cdot \left(\frac{P_2}{P_1}\right) = {}_1\beta_2 \cdot {}_3\beta_4 \cdot {}_5\beta_6 \quad (3.18)$$

olur.

Böylece;

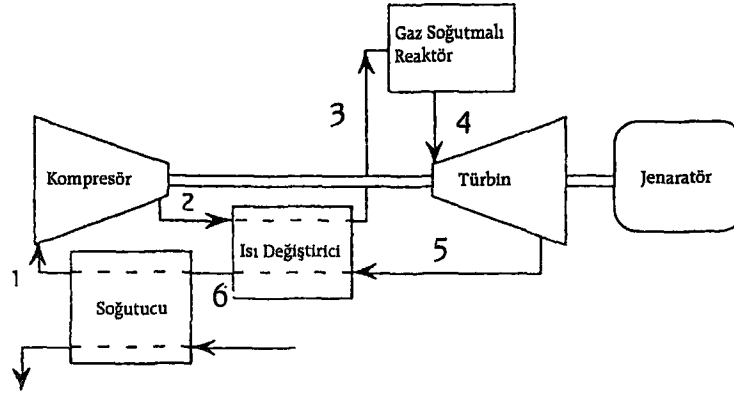
$${}_1\beta_2 = {}_3\beta_4 = {}_5\beta_6 = \sqrt[3]{P_c} \quad (3.19)$$

olur. (Çetinkaya, 1999)

3.3. GERÇEK ÇEVİRİMİN KAYIPLARI

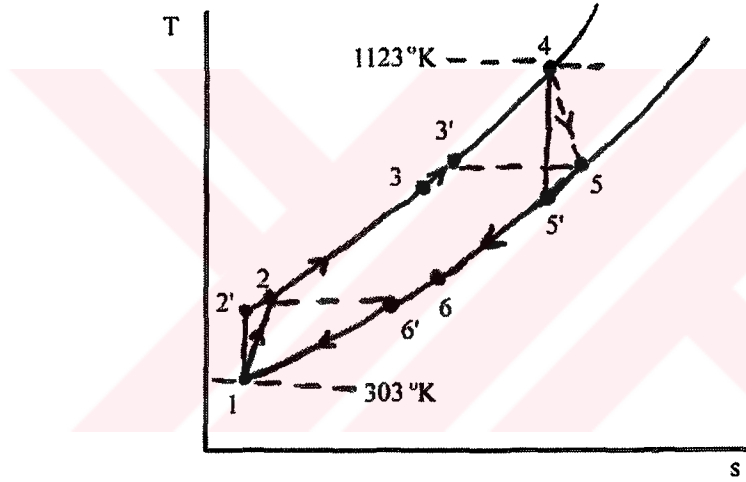
Gerçek çevrimin verimi aşağıdaki nedenlerden dolayı teorik çevrimin veriminden farklıdır.

- Türbomakinelerde akışkan hızları yüksek olduğundan her bir elemanın giriş ve çıkışı arasındaki kinetik enerji değişimi ihmal edilemez. Ayrıca sıkıştırma ve genişleme işlemlerinin tersinmez adyabatik olmaması nedeni ile, entropide artış olmaktadır.
- Reaktörde, ısı değiştiricilerde, emme ve egzoz kanallarındaki akışkan sürtünmesi basınç kayıplarına neden olmaktadır.
- Isı değiştirici ekonomik boyutlarda ise, sıkıştırılmış gazın sıcaklığı türbin çıkış sıcaklığına kadar ısıtılamaz.
- Kompresör ile türbindeki yataklardaki olan sürtünme, kayıpları dolayısıyla verimi azaltmaktadır.



Şekil 3.5. Kapalı Çevrim Gaz Türbini Tesisi

Şekil 3.5'teki kapalı çevrim gaz türbini tesisinin T-s diyagramı Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Kapalı Çevrim Gaz Türbinine ait T-s diyagramı

3.3.1. Kompresör ve Türbin Verimleri

İş alan veya veren herhangi bir makinenin verimi, gerçek ve ideal iş transferlerinin oranı olarak tanımlanır. Türbomakineler teoride adyabatik olduklarından ideal işlem izantropiktir. Ve verimde izantropik verim olarak adlandırılır.

Bu tanımlar ışığında kompresörün izantropik verimi, teorik işin gerçek işe oranıdır.

$$\eta_c = \frac{W'}{W} = \frac{\Delta h'}{\Delta h} \quad (3.20)$$

şeklinde yazılabilir.

Burada kompresör ve türbin açık sistem olduğundan $\Delta h'$ ve Δh değerlerinin açık ifadeleri yazıldığında η_c kompresör verimi;

$$\eta_c = \frac{W'}{W} = \frac{mc_p(T_2' - T_1)}{mc_p(T_2 - T_1)} \quad (3.21)$$

olur.

Burada ideal ve gerçek gaz sıcaklık değişimleri de çok farklı olmadığından ortalama sabit basınçtaki özgül ısı C_p her ikisi içinde aynı kabul edilir. Böylece izantropik verim sıcaklıklar cinsinden;

$$\eta_c = \frac{W'}{W} = \frac{(T_2' - T_1)}{(T_2 - T_1)} \quad (3.22)$$

şeklinde yazılır. Benzer şekilde türbin için izantropik verim gerçek işin teorik işe oranıdır ve

$$\eta_t = \frac{W}{W'} = \frac{\Delta h}{\Delta h'} \quad (3.23)$$

şeklinde ifade edilir. Buradan türbinin izantropik verimi sıcaklıklar cinsinden;

$$\eta_t = \frac{W}{W'} = \frac{T_4 - T_5}{T_4' - T_5} \quad (3.24)$$

olarak yazılır.

3.3.2. Isı Değiştiricinin Verimi

Gaz türbinlerinde ısı alıcı ve verici olarak karşı akışlı veya dik akışlı ısı değiştiriciler kullanılmaktadır.

Seyyar gaz türbinlerinde kullanılan ısı değiştiricilerin hacimleri taşıma güçlüğü ve kapladıkları yer açısından sınırlı tutulmaktadır. Bunun sonucu olarak ta kompresörden çıkan gaz ön ısıtma işlemi için girdiği ısı değiştiricisinde türbin çıkış sıcaklığına kadar ısıtılması pratik olarak mümkün değildir.

Burada kompresörden çıkan gazın ısı değiştiricide alabildiği enerji;

$$m_c c_p(T_3 - T_2) \quad (3.25)$$

olur. Türbinden çıkan gazın verebileceği maksimum enerji ise;

$$m_T c_p (T_5 - T_6') \quad (3.26)$$

olur. Burada $T_6' = T_2$ olduğundan;

$$m_T c_p (T_5 - T_2) \quad (3.27)$$

yazılabilir.

Burada çevrimde dolaşan gazın kütlesinin sabit kalması ve gerçek çevrim ile teorik çevrim arasındaki sıcaklık farklarının gazın C_p sabit basınçtaki özgül ısısında bir değişiklik yapmaması sebebiyle ısı değiştiricinin verimi sıcaklıklar cinsinden;

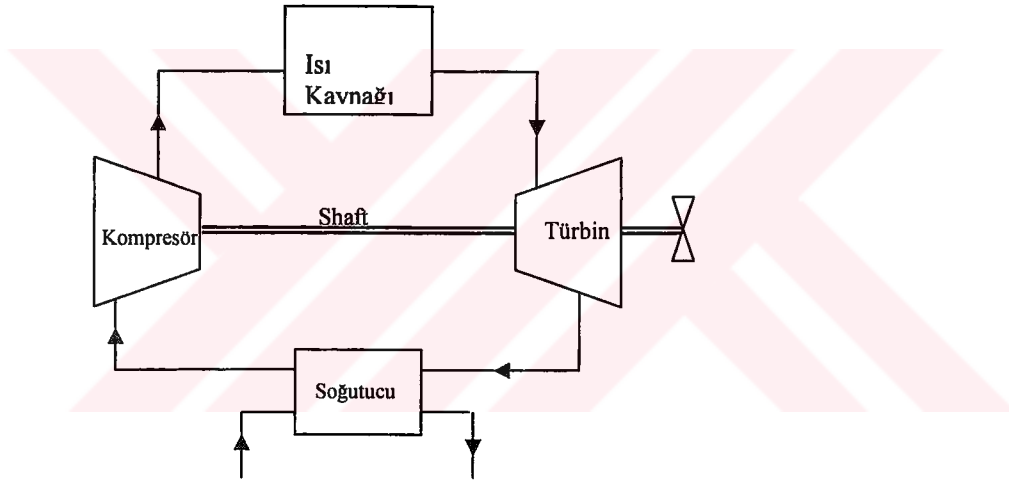
$$\eta_R = \frac{T_3 - T_2}{T_5 - T_2} \quad (3.28)$$

olur.

4. NÜKLEER TAHRİKLİ GERÇEK KAPALI BRAYTON ÇEVİRİMİNDE ISITICI VE SOĞUTUCUDAKİ BASINÇ DÜŞÜMLERİDE GÖZ ÖNÜNDE BULUNDURULARAK ÇEVİRİMİN GÜCÜNÜN VE VERİMİNİN KOMPRESÖR BASINÇ ORANINA BAĞLI DEĞİŞİMİNİN ANALİZİ

4.1. NÜKLEER TAHRİKLİ GERÇEK KAPALI BRAYTON ÇEVİRİMİ

Teorik kapalı Brayton çevrimi şeması Şekil 4.1'de, bu çevrime uygun teorik çevrimin P-v ve T-s diyagramları Şekil 4.2'de görülmektedir.



Şekil 4.1. Teorik Kapalı Brayton Çevrim Şeması

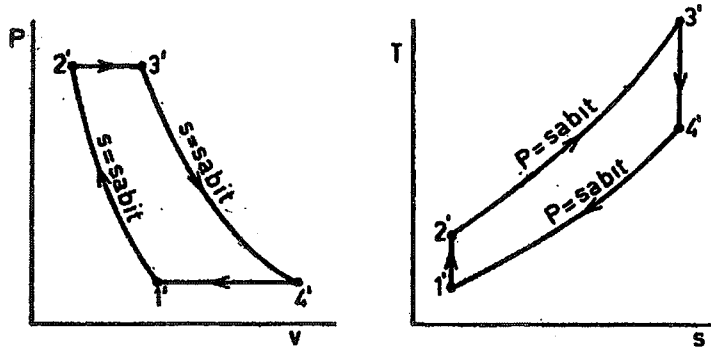
Teorik çevrimde;

1' – 2' : Kompresörde, iş yapan akışkan izantropik olarak sıkıştırılmaktadır.

2' – 3' : Isı kaynağında, sabit basınçta iş yapan akışkana ısı verilmektedir.

3' – 4' : Türbinde, iş yapan akışkan izantropik olarak genişlemektedir.

4' – 1' : Soğutucuda, iş yapan akışkandan sabit basınçta ısı çekilmektedir.



Şekil 4.2. Teorik Brayton Çevrimine ait P-v ve T-s diyagramı

Şekil 4.2'den, teorik Brayton çevriminde kompresördeki sıkıştırma basınç oranının artması

$\left(\frac{P_{2'}}{P_{1'}}\right)$ veya diğer bir deyişle, kompresördeki sıkıştırma sonundaki gazın sıcaklığının ($T_{2'}$)

artması, bu çevrime ait verim ifadesinden;

$$\eta_B = 1 - \frac{T_{1'}}{T_{2'}} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_{2'}}{P_{1'}}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (4.1)$$

teorik Brayton çevriminin veriminin de artacağını göstermektedir.

Teorik Brayton çevriminin net gücü,

$$\dot{W} = \dot{m}[(h_{3'} - h_{2'}) - (h_{4'} - h_{1'})] \quad (4.2)$$

bağıntısı ile verilir.

Denk. 4. 2'de iş yapan akışkanın ideal gaz ve özgül ısılarının sabit olduğu kabulü göz önüne alınırsa, çevrimin özgül net işi;

$$w = c_p [(T_{3'} - T_{2'}) - (T_{4'} - T_{1'})] \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilir.

İdeal Brayton çevriminde,

$$\frac{T_{4'}}{T_{3'}} = \frac{T_{1'}}{T_{2'}} \quad \text{veya} \quad T_{4'} = \frac{T_{1'} T_{3'}}{T_{2'}} \quad (4.4)$$

yazılabilir. Denk. 4. 4.4'deki ($T_{4'}$) sıcaklığı, Denk. 4.3 de yerine konursa;

$$w = c_p \left[(T_{3'} - T_{2'}) - \left(\frac{T_{3'} T_{1'}}{T_{2'}} - T_{1'} \right) \right] \quad (4.5)$$

bulunur.

Metalürjik sınırlamalar nedeniyle, çevrimin maksimum sıcaklığı ($T_{3'}$) belirli olduğundan, basınç oranının artırılması ile Brayton çevriminin özgül net işi de, önce artar, sonra azalır ve kompresörde sıkıştırma sonu sıcaklığı olan ($T_{2'}$) çevrimin maksimum sıcaklığı olan ($T_{3'}$) sıcaklığına kadar yükselir. Bu demektir ki, Denk. 4.5 ile verilen Brayton çevriminin özgül net işi de sifıra gider.

Öte yandan kompresör giriş sıcaklığı ($T_{1'}$), pratik olarak fazla değiştirilemediğinden, genelde belli bir değerde kabul edilir. Bu durumda, maksimum net özgül işi bulmak için, Denk. 4.5'in ($T_{2'}$) sıcaklığına göre türevi alınır ve sifıra eşitlenirse;

$$\frac{d}{dt}(w) = 0 = \left[0 - 1 + \left(\frac{T_{3'} T_{1'}}{T_{2'}^2} + 0 \right) \right] \quad (4.6)$$

ve bu denklemden,

$$T_{2'} = \sqrt{T_{1'} T_{3'}} \quad (4.7)$$

elde edilir.

Denk. 4.7'den bulunan ($T_{2'}$) sıcaklığı, Denk. 4.5'de yerine konulursa; maksimum özgül net iş;

$$w_{\max} = c_p \left(\sqrt{T_{3'}} - \sqrt{T_{1'}} \right)^2 \quad (4.8)$$

şeklinde elde edilir.

Denk. 4.8'den ($T_{3'}$) sıcaklığı ne kadar yüksek ve ($T_{1'}$) sıcaklığı ne kadar düşük olursa teorik Brayton çevriminin maksimum net özgül işinin o kadar büyük olacağı görülmektedir. Daha önce açıklandığı gibi, ($T_{3'}$) ve ($T_{1'}$) sıcaklıklarının üzerindeki sınırlamalar nedeniyle fazla değiştirilememektedirler.

Diğer taraftan, teorik Brayton çevriminde işi maksimum yapan ($T_{2'}$) sıcaklığı ve kompresördeki izantropik sıkıştırma basınç oranı $\left(\frac{P_{2'}}{P_{1'}} \right)$, ($T_{3'}$) ve ($T_{1'}$) sıcaklıkları cinsinden

hesaplanabilir. Bunun için, iş yapan akışkanın kompresördeki izantropik sıkıştırma basınç oranı ile sıcaklık oranı ve türbindeki genişleme basınç oranı ile sıcaklık oranı arasında aşağıdaki bağıntılar yazılabilir.

$$\frac{T_{2'}}{T_{1'}} = \left(\frac{P_{2'}}{P_{1'}} \right)^{\frac{k-1}{k}} = (r_p)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{P_{3'}}{P_{4'}} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{T_{3'}}{T_{4'}} \quad (4.9)$$

Burada, (r_p) izantropik sıkıştırma basınç oranıdır.

Maksimum özgül net iş veren Denk. 4.8 ile, teorik Brayton çevrimine ait bağıntıları veren Denk. 4.9'dan;

$$T_{2'} = \sqrt{T_{1'} T_{3'}} = T_{4'} \quad (4.10)$$

bulunur. Denk. 4.10'dan, maksimum özgül net iş için; $T_{2'} = T_{4'}$ olmaktadır.

Denk. 4.9 ve Denk. 4.10'dan

$$\frac{T_{2'}}{T_{1'}} = (r_p)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{T_{3'}}{T_{1'}} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{\sqrt{T_{1'} T_{3'}}}{T_{1'}} \quad (4.11)$$

elde edilir. Denk. 4.11'den (r_p) çekilirse, teorik Brayton çevriminin maksimum net işini veren izantropik sıkıştırma basınç oranı için,

$$(r_p)_{w_{mak.}} = \left(\frac{T_{3'}}{T_{1'}} \right)^{\frac{k}{2(k-1)}} \quad (4.12)$$

bağıntısı bulunur.

Denk. 4.12 de bulunan $(r_p)_{w_{mak.}}$, Denk. 4.1 de yerine konursa, maksimum net iş veren sıkıştırma oranı şartlarındaki verim ifadesi;

$$(\eta_B)_{w_{mak.}} = 1 - \sqrt{\frac{T_{1'}}{T_{3'}}} \quad (4.13)$$

elde edilir.

Ayrıca, Denk. 4. 3'ün sağ tarafı iş yapan akışkanın ideal gaz olduğu kabulü göz önüne alınır ve yeniden düzenlenirse ve $(T_{3'})$ sıcaklığı parantezine alınırsa;

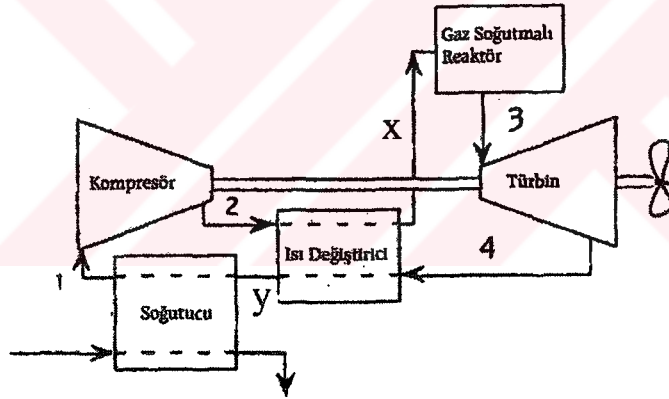
$$w = c_p T_{3'} \left[\left(1 - \frac{T_{2'}}{T_{3'}} \right) - \left(\frac{T_{4'}}{T_{3'}} - \frac{T_{1'}}{T_{3'}} \right) \right] \quad (4.14)$$

şeklinde yazılır.

Dikkat edilmelidir ki;

$T_{2'} \rightarrow T_{3'}$ 'e giderken, $T_{4'} \rightarrow T_{1'}$ 'e gider ve güç sıfıra yaklaşır. Bu da gösteriyor ki, basınç oranının sürekli artması, gücün belli bir noktadan itibaren azalarak sıfıra gitmesine sebep olmaktadır. Teorik Brayton çevriminde, yukarıdaki yapılan açıklamalardan çevrimin işi ve verimi sınırlı kalmaktadır.

Brayton çevrimindeki sınırlamalara karşılık, devreye bir ısı değiştirici (reküperatör) eklemek suretiyle verimin iyileştirilmesi yoluna gidilir. Şekil 4.3'te; tek devreli, ısı değiştiricili kapalı Brayton çevrimin şeması verilmektedir. Bu çevrim, gerçek bir çevrim olarak göz önüne alınmaktadır.



Şekil 4.3. Tek devreli, ısı değiştiricili kapalı Brayton çevriminin şeması

Gerçek çevrimin, teorik çevrime göre başlıca farkları aşağıdaki gibidir.

a-) Isı geçişleri tersinmezdir.

b-) İş yapan akışkanın; kompresörde sıkıştırılmasının ve türbinde genişlemesinin izantropik olamamaktadır.

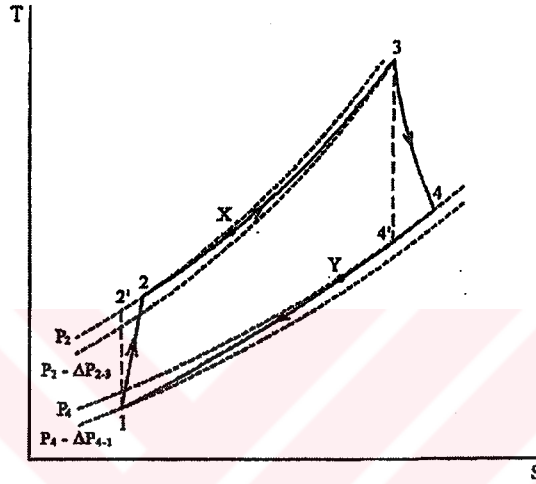
c-) Çevrim içinde dolaşan yüksek basınç ve hızlardaki iş yapan akışkanın sürtünmelerinin varlığı nedenleriyle, basınç düşümleri olmakta ve verim daha küçük olmaktadır.

Ayrıca, yukarda belirtilen üç madde yanında, aşağıdaki hususlar da göz önüne alınmaktadır.

1. Çevrim boyunca, hal değişimleri; sürekli akışlı, sürekli-açık sistem olarak gerçekleşir.
2. Kapalı çevrimde iş yapan akışkan He gazıdır ve kütlesinin sabit kaldığı göz önüne alınmaktadır.
3. İş yapan akışkana, ısı kaynağı olan reaktörden ısı geçişi olmaktadır.
4. Türbinden çıkan T_4 sıcaklığındaki iş yapan akışkan, ters akışlı ısı değiştiriciye (içten-ısıtmalı) girmekte ve kompresörden çıkan ters akışlı ısı değiştiriciye giren T_2 sıcaklığındaki iş yapan akışkana ısı vermektedir. Bu ısı geçişi bir verimle olmaktadır.
5. Çevrim boyunca iş yapan akışkanın (He) özgül ısıları c_p ve c_v sabittir.
6. kompresördeki sıkıştırma hal değişimi ile türbindeki genişleme hal değişimi izantropik değildir.
7. Ters akışlı ısı değiştiriciden çıkan iş yapan akışkan, ters akışlı soğutucuda (içten-soğutmalı) ısı verdikten sonra kompresöre girmektedir.
8. Böyle bir çevrim elemanlarından en fazla reaktörde ve soğutucuda basınç düşümü olmaktadır.
9. Hal değişimleri esnasında ve borulardan çevreye olan ısı kayıpları ihmal edilmektedir.

4.2. GERÇEK ÇEVİRİM

Bu tez çalışmasında, denizaltılarda kullanılmak üzere önerilen, tek devreli nükleer tahrikli ısı değiştiricili Brayton çevriminin T-s diyagramı Şekil 4.4'te görülmektedir. Yukarıdaki koşullardaki, böyle bir Brayton çevrimi, gerçek çevrime çok daha yakındır. Uygulamada, birden fazla ısı değiştirici ve soğutucu eklenerek verimin daha da iyileştirilmesi yoluna gidilir.



Şekil 4.4. Şekil 4.3'te şeması verilen kapalı devreli gaz türbini çevrimine ait T-s diyagramı

Çevrimin elemanları; sürekli-akışlı, sürekli-açık sistem olarak ele alınabildiği kabulünden başka, çevrimde kinetik ve potansiyel enerji değişimleri de ihmal edilebilir.

Kompresöre Termodinamiğin Birinci Kanunu uygulanırsa, kompresörün gücü;

$$\dot{W}_c = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (4.15)$$

şeklindedir.

Gerçek kompresörün izantropik verimi,

$$\eta_{ic} = \frac{h_{2'} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (4.16)$$

ile verilir.

İş yapan akışkanın (He) özgül ısıları sabit kabul edildiğinden, bu kabule göre Denk. 4.16 yeniden düzenlenirse,

$$\eta_{ic} = \frac{T_{2'} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (4.17)$$

bulunur.

Ayrıca, Denk. 4.17'nin sıcaklık oranları cinsinden ifadesi,

$$\eta_{ic} = \frac{\left(\frac{T_{2'}}{T_1}\right) - 1}{\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - 1} \quad (4.18)$$

şeklindedir. Kompresörün izantropik verimi; η_{ic} , kompresörün basınç oranlarının bir fonksiyonu olarak da yazılabilir.

Kompresörün sıcaklık ve basınç oranları için;

$$\theta_c = \frac{T_{2'}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (4.19)$$

bağıntısı geçerlidir. Burada (k) iş yapan akışkanın(He) sabit basıncıdaki (c_p) ve sabit hacimdeki (c_v) özgül ısılar oranıdır.

Denk. 4.19'daki sıcaklıklar oranı, Denk. 4.18'deki θ_c cinsinden yerine konulursa,

$$\eta_{ic} = \frac{\theta_c - 1}{\left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)} \quad (4.20)$$

bulunur.

Gerçek Brayton çevriminde, kompresördeki sıkıştırma ve türbindeki genişleme hal değişimleri politropiktir. Brayton çevriminde izantropik verimler yerine Politropik verimlerin kullanılması daha gerçek sonuçlar vermektedir.

Kompresördeki politropik hal değişimi için sıcaklık oranı;

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n_c-1}{n_c}} \quad (4.21)$$

şeklindedir.

Denk. 4. 19'dan $\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$ çekilir, Denk. 4.21'de yerine konulursa;

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\theta_c^{\frac{k-1}{k}}\right)^{\frac{n_c}{n_c-1}} \quad (4.22)$$

elde edilir.

Kompresörde gaz sıkıştırıldığından, Denk. 4. 8'de $P_2 > P_1$ 'dir. Gazın sıkıştırılması esnasında politropik üs $n_c > k$ şartını sağlamalıdır ve helyum gazına ait $k=1.667$ 'dir. Bu şart altında, kompresördeki sıkıştırmaya ait politropik verim için;

$$\eta_{pc} = \frac{\frac{k-1}{n_c-1}}{\frac{n_c-1}{k}} = \frac{\frac{n_c-1}{k}}{\frac{n_c-1}{k}} < 1 \quad ; n_c > 1.667 \quad (4.23)$$

bağıntısı yazılabilir.

Denk. 4.22, Denk. 4. 23'e göre düzenlenirse;

$$\frac{T_2}{T_1} = \theta_c^{\frac{1}{\eta_{pc}}} \quad (4.24)$$

bağıntısı bulunur.

Denk. 4. 24, Denk. 4.20'de yerine konulursa, kompresörün izantropik verimi, politropik verim ve sıcaklık oranı cinsinden;

$$\eta_{ic} = \frac{\theta_c - 1}{\frac{1}{\theta_c^{\eta_{pc}}} - 1} < 1 \quad (4.25)$$

bulunur.

Adyabatik gerçek kompresörün gücü;

$$\dot{W}_{gk} = \dot{m} c_p (T_2 - T_1) \quad (4.26)$$

bağıntısı ile verilir.

Türbindeki genişlemeye ait izantropik verim bağıntısı;

$$\eta_{it} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_4'} \quad (4.27)$$

şeklindedir.

$$\eta_{it} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_4'} = \frac{1 - \frac{T_4}{T_3}}{1 - \frac{T_4'}{T_3}} \quad (4.28)$$

şeklinde yazılabilir ve türbinin sıcaklık oranı için;

$$\theta_t = \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (4.29)$$

bağıntısı geçerlidir.

Denk. 4.29, Denk. 4.28'de yerine konulursa;

$$\eta_{it} = \frac{1 - \frac{T_4}{T_3}}{1 - \frac{1}{\theta_t}} \quad (4.30)$$

bulunur.

Türbindeki genişleme gerçekte bir politropik hal değişimidir. Sıcaklık oranı;

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{n_t-1}{n_t}} \quad (4.31)$$

şeklindedir.

Denk. 4.31'den $\left(\frac{P_4}{P_3} \right)$ çekilir ve Denk. 4. 28'de yerine konulursa;

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\theta_t^{\frac{-k}{k-1}} \right)^{\frac{n_t-1}{n_t}} \quad (4.32)$$

bağıntısı elde edilir.

Türbinde gaz genişlediğinden, yani Denk. 4.31'de $P_3 > P_4$ 'dir. Gazın genişlemesi esnasında, $1 > n_t > k$ olmalıdır. Bu şart altında türbindeki genişlemeye ait politropik verim için;

$$\eta_{pt} = \frac{\frac{n-1}{n}}{\frac{k-1}{k}} = \frac{\frac{k-1}{n_t}}{\frac{n_t-1}{n_t}} < 1 \quad ; \quad 1 > n_t > 1.667 \quad (4.33)$$

bağıntısı yazılabilir.

Denk. 4. 30, Denk. 4. 32 ve Denk 4. 33'deki bağıntı göz önüne alınarak düzenlenirse;

$$\eta_{it} = \frac{1 - \theta_t^{-\eta_{pt}}}{1 - \theta_t^{-1}} \quad (4.34)$$

elde edilir.

Adyabatik gerçek türbin gücü;

$$\dot{W}_{gt} = \dot{m} c_p (T_3 - T_4) \quad (4.35)$$

şeklindedir.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'den, ısı değiştiricide kompresörden çıkan iş yapan akışkana olan ısı transferi;

$$\dot{Q}_{s2} = \dot{m} c_p (T_x - T_2) \quad (4.36)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir.

Burada, (T_x) kompresörden çıkıp ısı değiştiriciden geçerek reaktöre giren iş yapan akışkanın sıcaklığıdır. Diğer taraftan iş yapan akışkana ısı değiştiricide olan ısı transferi ise;

$$Q_{4y} = \dot{m}c_p (T_4 - T_y) \quad (4.37)$$

şeklindedir. Burada, (T_y) türbinden çıkıp ısı değiştiriciden geçerek soğutucuya giren iş gören akışkanın sıcaklığıdır. Isı değiştiricinin ısı verimi;

$$\eta_R = \frac{T_x - T_2}{T_4 - T_2} \quad (4.38)$$

olup, tüm gerçek içten ısıtılmalı ısı değiştiricilerde (reküperatörlerde) daima 1'den küçüktür. Yukarıda verilenler göz önüne alınarak, çevrimin gerçek gücü;

$$\dot{W}_g = \dot{W}_{gt} - \dot{W}_{gc} = \dot{m}c_p [(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)] \quad (4.39)$$

bağıntısı veya ısı transferleri göz önüne alınırsa;

$$\dot{W}_g = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L = \dot{m}c_p [(T_3 - T_x) - (T_y - T_1)] \quad (4.40)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir. Denk. 4.20 ve Denk. 4.28 kullanılarak Denk. 4.39'da gerekli düzenlemeler yapılırsa, çevrimin gerçek gücü ;

$$\dot{W}_g = \dot{m}c_p T_3 \left[\eta_{it} \left(1 - \frac{1}{\theta_t} \right) - \frac{\tau}{\eta_{ic}} (\theta_c - 1) \right] \quad (4.41)$$

bulunur.

Burada; $\tau = \frac{T_1}{T_3}$ dir. Ve teorik sınırlamalar nedeni ile sabit kabul edilebilir.

Denk. 4.25'den η_{ic} ve Denk. 4.34'den η_{it} değerleri Denk. 4.41'de yerine konulursa;

$$\dot{W}_g = \dot{m}c_p T_3 \left[1 - \theta_t^{-\eta_{pt}} - \tau \left(\theta_c^{\frac{1}{\eta_{pc}}} - 1 \right) \right] \quad (4.42)$$

gerçek Brayton çevriminin gücü bulunur.

Bu çevrimdeki basınç kayıpları ΔP_{2-3} ve ΔP_{4-1} göz önüne alınırsa, basınç kayıpları ve basınç oranları ile ilgili parametreler; (Şahin, B., Kodal, A. Ve Oktem, A.S., 1999)

2-3 hal değişimi için;

$$\varepsilon_H = \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(1 - \frac{\Delta P_{2-3}}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (4.43)$$

ve 1-4 hal değişimi için;

$$\varepsilon_L = \left(\frac{P_1}{P_4} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(1 - \frac{\Delta P_{4-1}}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (4.44)$$

şeklinde yazılır.

Eğer $\frac{k-1}{k} = a$ ile ifade edilirse; sıcaklık oranları; θ_c ve θ_t ile basınç oranları parametreleri

ε_H ve ε_L arasında gerekli ara işlemler yapılırsa;

$$\theta_t = \varepsilon_H \varepsilon_L \theta_c \quad (4.45)$$

bulunur. Denk. 4. 45'deki θ_t , Denklem 42'de yerine konulursa, çevrimin gerçek gücü;

$$\dot{W}_g = \dot{m} C_p T_3 \left[1 - (\varepsilon_H \varepsilon_L \theta_c)^{-\eta_{pt}} - \tau \left(\theta_c^{\frac{1}{\eta_{pc}}} - 1 \right) \right] \quad (4.46)$$

elde edilir.

Çevrimin gerçek verimi; gerçek işin, reaktörden iş yapan akışkana verilen ısıya oranıdır.

$$\eta_g = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_H} = \frac{\dot{m} c_p [(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)]}{\dot{m} C_p (T_3 - T_x)} \quad (4.47)$$

Denk. 4. 47'de gerekli düzenlemeler yapıldığında, aşağıdaki verim ifadesi bulunur.

$$\eta_g = \frac{\left[\eta_{it} \left(1 - \frac{1}{\theta_t} \right) - \frac{\tau}{\eta_{ic}} (\theta_c - 1) \right]}{\left\{ 1 - \eta_R \left[1 - \eta_{it} \left(1 - \frac{1}{\theta_t} \right) \right] - (1 - \eta_R) \tau \left[1 + \frac{1}{\eta_{ic}} (\theta_c - 1) \right] \right\}} \quad (4.48)$$

Denk. 4.25 den η_{ic} , Denk. 4.34 den η_{it} ve Denk. 4. 45 den θ_c 'nin eşitleri; Denk. 4.48 de yerlerine

yazıldığında, gerçek Brayton çevriminin verimi;

$$\eta_g = \frac{\left[1 - (\varepsilon_H \varepsilon_L \theta_c)^{-\eta_{pt}} - \tau \left(\theta_c^{\frac{1}{\eta_{pc}}} - 1 \right) \right]}{\left\{ 1 - \eta_R \left[(\varepsilon_H \varepsilon_L \theta_c)^{-\eta_{pt}} - \tau (1 - \eta_R) \theta_c^{\frac{1}{\eta_{pc}}} \right] \right\}} \quad (4.49)$$

şeklinde bulunur.

4.3. ÖNERİLEN ÇEVİRİMİN BOYUTSUZ GÜÇ VE VERİMİNİN MAKSİMUM PERFORMANSLARI

Denk. 4.46' nin her iki tarafı $\dot{m} c_p T_3$ ile bölünerek boyutsuz güç ifadesi denklemi elde edilir.

$$w_g = 1 - (\varepsilon_H \varepsilon_L \theta_c)^{\eta_{pt}} - \tau \left(\theta_c^{\frac{1}{\eta_{pc}}} - 1 \right) \quad (4.50)$$

Denk. 4. 50 ile bulunan boyutsuz gücü maksimum yapan θ_c , verilen $\tau, \varepsilon_H, \varepsilon_L, \eta_{pt}$ ve η_{pc} değerleri için; Denk. 4.50'nin, θ_c 'ye göre diferansiyeli alınır ve bu diferansiyeli sıfıra eşitlenerek bulunur.

$$\frac{d}{d\theta_c} (w_g) = \varepsilon_H \varepsilon_L \eta_{pt} (\varepsilon_H \varepsilon_L \theta_c)^{-1-\eta_{pt}} - \frac{1}{\eta_{pc}} \tau \left(\theta_c^{-1+\frac{1}{\eta_{pc}}} \right) = 0 \quad (4.51)$$

Ara işlemler yapıldıktan sonra, kompresör sıkıştırma oranı parametresi θ_c ,

$$\theta_c = \left[\frac{\eta_{pc} \eta_{pt}}{\tau (\varepsilon_H \varepsilon_L)^{\eta_{pt}}} \right]^{\frac{\eta_{pc}}{1+\eta_{pc} \eta_{pt}}} \quad (4.52)$$

şeklinde bulunur.

Denk. 4. 52 den bulunan kompresör sıkıştırma oranı parametresi θ_c , Denk. 4.50 ile verilen w_g 'yi maksimum yapar.

Ayrıca, Denk. 4.52 den bulunan θ_c Denk. 4. 45 de yerine konursa, türbin genişleme oranı parametresi;

$$\theta_t = \varepsilon_H \varepsilon_L \left[\frac{\eta_{pc} \eta_{pt}}{\tau (\varepsilon_H \varepsilon_L)^{\eta_{pt}}} \right]^{\frac{\eta_{pc}}{1 + \eta_{pc} \eta_{pt}}} \quad (4.53)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

Benzer şekilde, boyutsuz güç için yapılan işlemler; Denk.49 ile verilen çevrimin verim ifadesi de, sıkıştırma oranı parametresi olan θ_c ile değişimi esas alınmıştır. Diğer parametreler olan; $\tau, \varepsilon_H, \varepsilon_L, \eta_{pt}, \eta_{pc}$ ve η_R değerleri seçilerek çizilen grafikler Ek-A'da verilmektedir.

5. NÜKLEER GÜÇ İLE TAHRİK EDİLEN GEMİ VE DENİZALTILARIN TARİHSEL GELİŞİMİ VE DİZAYNI

5.1. NÜKLEER GEMİLERİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Nükleer güç ile tahrik edilen ilk gemiler nükleer buz kırıcılar olarak Rusya tarafından 1953'te tasarlanmıştır. Rus A.P. Alexsandrov ve Neganov tarafından tasarlanan bu gemilerde basınçlı su reaktörleri (PWR) kullanılmıştır.

1959'da Marine Fleet tarafından yapılan bu gemiler ilk defa 1964 yılında kuzey buz denizinde görevde kullanılmış ve bu durum kuzey buz denizindeki dengeleri değiştirmiştir. Ve bu gemiler sayesinde kuzey buz denizinde, gelişmekte olan Rus filosunun üstünlüğü artmıştır.

15000Bg gücündeki 2 reaktörlü buz kırıcıların serileri St. Petersburg'taki Baltık tersanesinde inşa edilmeye başlanmış, 1975'te Arctica , 1977'de Sibiry, 1985'te Rusya ve 1989'da Soretskiy Soyuz'da ve 1993'te Yanal'da inşa edilmiş ve gemilerin güvenilirliği, ekolojik temizliği ve ekonomik durumu sergilenmiştir. Bu gemilerde kullanılan ekipmanlar oldukça uzun ömürlüdür. Bu ekipmanlar ilk modellerde bile 10⁵ saat süreyle kullanılmıştır.

Buz kırıcılar kuzey buz denizinde en zor şartlarda bile güvenilirliğini ve başarısını ispatlamıştır. Ticari maksatla kullanılan ilk nükleer gemi 1988'de Kerch'de 61000 ton yük taşıyabilen ve 40000 hp gücünde International Code For Safety Of Marchand Marine Nuclear Vessel tarafından üretilmiş ve uzak denizlerde özgürce kullanılmıştır.

Nükleer itme gücüyle çalışan ticari gemiler için 1960 yılında uluslar arası hukuki statülerini belirleyen bir enstitü kuruldu. Bu enstitü tarafından denizde insan hayatını koruyan özel kurallar oluşturuldu.

1981 yılında Uluslar arası Deniz Organizasyonu sivil ticari nükleer güçlü gemilerin bu özelliklerine adapte olup limanlarda ikili antlaşmalarla bu gemilerin statülerini belirlemiştir. (Khlopkin ve Zotov 1997)

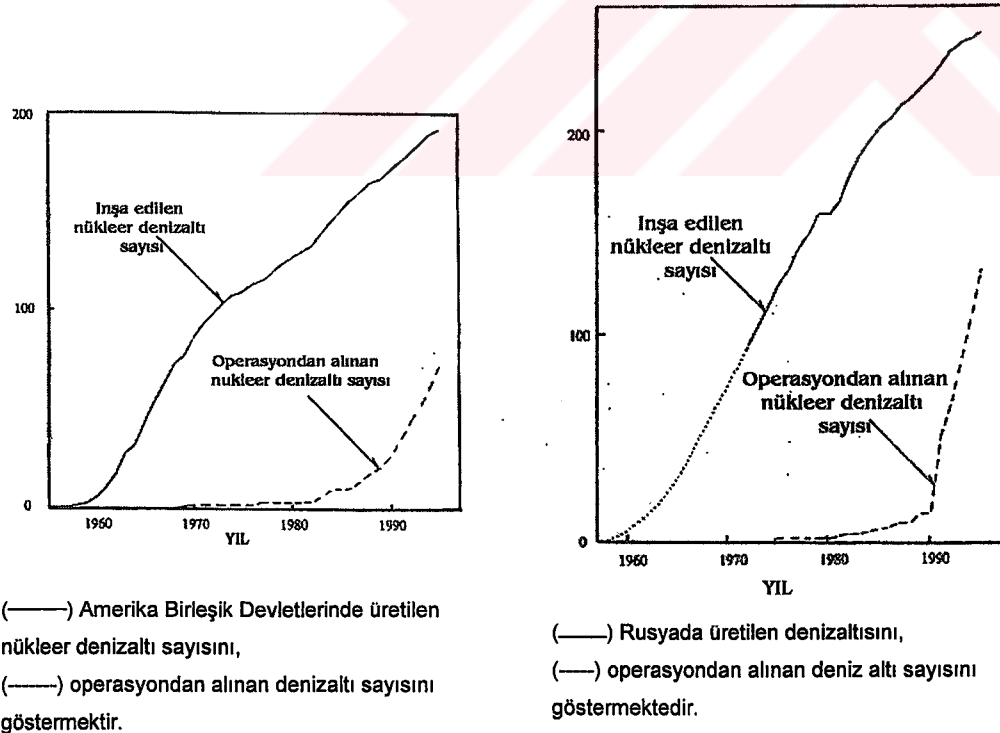
5.2. NÜKLEER DENİZALTILARIN TARİHÇESİ

İlk nükleer denizaltı (NAUTILUS) 1954 yılında Amerika Birleşik Devletleri tarafından yapıldı. Amerika Birleşik Devletlerinden sonra, Rusya ilk nükleer denizaltısını (LENINSKIY KOMSOMO I) 1958 yılında faaliyete geçirmeyi başarmıştır. İngiltere ise ilk nükleer denizaltısını (DREADNOUGHT) 1963 yılında faaliyete geçirmiştir. Fransa 1971 yılında ilk nükleer denizaltısı (LE REDOUTABLE) yi yapmayı başarmıştır. Çin ise ilk nükleer denizaltısını 1985 yılında yapmıştır.

1954'ten bu yana dünyada 500'ün üzerinde nükleer denizaltı reaktörü inşa edildi. Bunların 460'ı nükleer denizaltılarda kullanıldı.

Nükleer denizaltılar oksijen tüketimi olmadan çalıştığı için donanma için büyük kolaylık sağlamıştır. Bu sayede denizaltıların su altında uzun süre kalabilmeleri mümkün olmuştur. İlk nükleer denizaltıların günümüzdeki gibi operasyonel hale gelmeleri yaklaşık 40 yılı almıştır. Nükleer denizaltıların yaşam süresi genellikle 20-30 yıl kadardır. Günümüzde nükleer enerjiye bakış açısı ve silahsızlanma anlaşmaları sebebiyle nükleer denizaltı sayısında azaltmaya gidilmiştir.

Şekil 5.1 de, Amerika Birleşik Devletlerinde ve Rusya'da üretilen nükleer denizaltı sayısı ve operasyondan alınan nükleer denizaltı sayısının yıllara göre değişimi verilmiştir.



Şekil 5.1 Amerika Birleşik Devletleri ve Rusya'da üretilen ve operasyondan alınan denizaltı sayısını gösterir grafik (Le Sage ve Sarkisov, 1996)

Şekil 5.1. deki grafiklerden anlaşıldığı gibi 1995 yılına kadar Amerika Birleşik Devletleri 195 nükleer denizaltı inşa etmiş, bunların 70 tanesini operasyondan geri almıştır. Rusya ise 1995 yılına kadar yaklaşık 250 tane nükleer denizaltı inşa etmiş, bunların 130 tanesini operasyondan geri çekmiştir. Amerika Birleşik Devletleri nükleer denizaltılarını ayrıştırmaya 1980 yılında başlamış ve 1995 yılına kadar 70 nükleer denizaltısını ayrıştırmıştır.

Rusya ise 1990 yılına kadar ayrıştırma yapmamış 1990-1995 yılları arasında 130 nükleer denizaltısını ayrıştırıp hizmetten geri çekmiştir.

İngiltere, Fransa ve Çin'in nükleer filosu Amerika Birleşik Devletleri ve Rusya'dan çok daha azdır.

İngiltere 1963'ten 1995'e kadar 23 tane nükleer denizaltı inşa edip bunların 7 tanesini hizmetten geri çekti. Yapılan anlaşmalara göre 2000'li yıllarda İngiltere 8 nükleer denizaltısını daha hizmetten geri çekecektir.

Fransa 1971'den 1995'e kadar 11 nükleer denizaltı inşa edip, bunların 1 tanesini hizmetten geri almıştır. Fransa'nın 2000'li yıllarda hizmetten geri alacağı nükleer denizaltı sayısı 5'i geçmeyecektir.

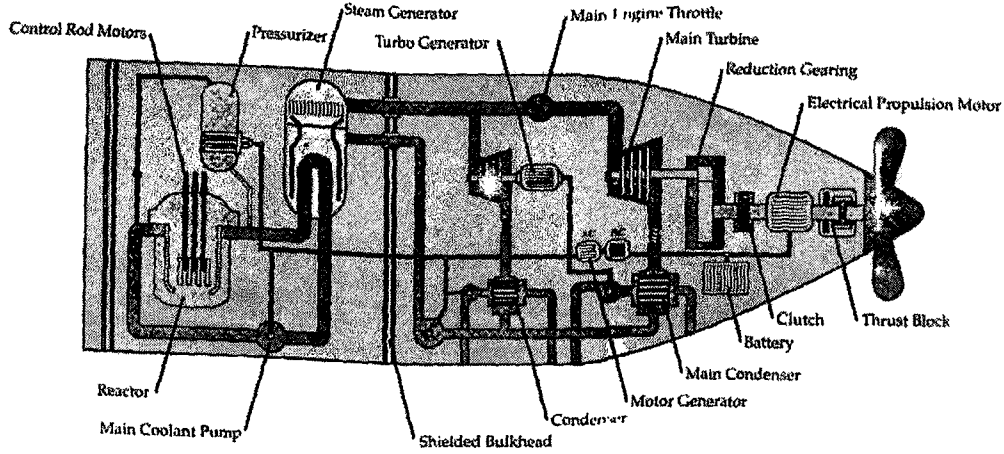
Çin ise 1985'ten 1995'e kadar 6 tane nükleer denizaltı inşa edip, bu süreler arasında hiçbir denizaltısını hizmetten geri almamıştır. 2000'li yıllarda ise, Çin elindeki nükleer denizaltı sayısını koruyacaktır. (Le Sage ve Sarkisov, 1996)

5.3. NÜKLEER DENİZALTILARDAKİ NÜKLEER REAKTÖR KISMI

Nükleer gemileri sıradan gemilerden farklı kılan, nükleer gemilerin nükleer güç reaktörüdür. Bir kaçı dışında tüm nükleer denizaltılarda PWR'ler kullanılmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nin inşa ettiği ikinci nükleer denizaltısı sıvı metal (Na) soğutuculu idi. Bu reaktörde nükleer fisyon sonucu oluşan ısıyı alan sıvı sodyum, ısınıp ikinci devredeki suya aktarıyordu. İkinci devreden ısı alıp buharlaşan su buhar türbininde genişleyerek iş yapma prensibi ile çalışıyordu.

Daha sonraki yıllarda bu tür reaktörler basınçlı su reaktörleri (PWR) ile değiştirilmiştir.

Şekil 5.2 de bir nükleer denizaltının reaktör bölümlerine ait şeması verilmiştir.



Şekil 5.2. Bir nükleer denizaltının reaktör kompartımanına ait şema
(Le Sage ve Sarkisov, 1996)

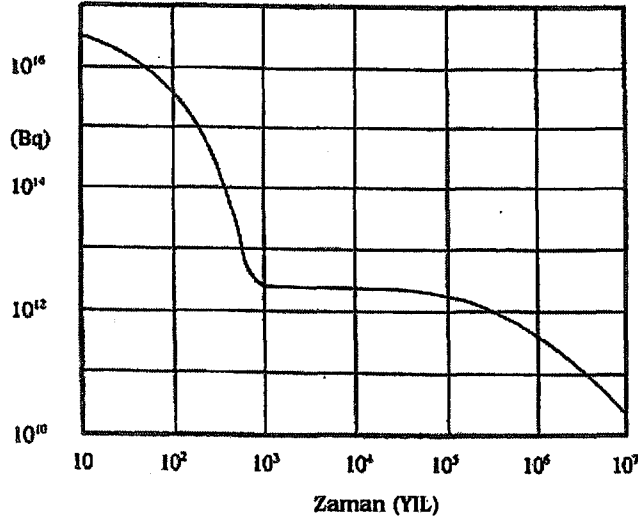
Rusya'nın elinde bulunan nükleer denizaltıların 65 tanesi 1 reaktörle çalışmakta, geri kalan nükleer denizaltıları ise 2 reaktörle çalışmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nin elindeki nükleer denizaltılar ise 1 reaktörle çalıştırılmaktadır. Bunun aynısı İngiltere, Fransa ve Çin'in elinde bulundurdıkları nükleer denizaltılar içinde geçerlidir. İstisnai olarak bazı nükleer denizaltılar 2'den fazla reaktörle de çalıştırılmıştır.

Örneğin; Amerika Birleşik Devletleri'nin ENTERPRISE denizaltısı 8 reaktörle çalıştırılmıştı. Rusya'nın NS LENIN buz kırıcısı ise 3 reaktörle çalıştırılmıştı.

İlk inşa edilen nükleer yüzey gemileri genellikle 2 reaktörle çalıştırılmıştır. Soğutucu kazalarının azalması ile denizaltılarda bir reaktör kullanılmaya başlamıştır. Nükleer savaş gemilerinde 1 reaktör kullanılması bazı sivil nükleer gemiler, NS SAVANAH, NS OTTO, HAHN, NS NUTSU ve Rus buz kırıcılar için de geçerlidir.

Nükleer gemilerin reaktörlerinin güç seviyesi, geminin kapasitesine ve reaktör sayısına göre değişmektedir. Fakat nükleer denizaltıların güç seviyesi genellikle 50-200MW arasında değişmektedir. Yüzey gemileri için ise bu değer 100-400MW arasında olmaktadır.

Şekil 5.3. te nükleer denizaltı reaktörlerinin yakıtlarının aktiviteleri tahmini bozulmadan sonraki zamanın fonksiyonu olarak gösterilmiştir.

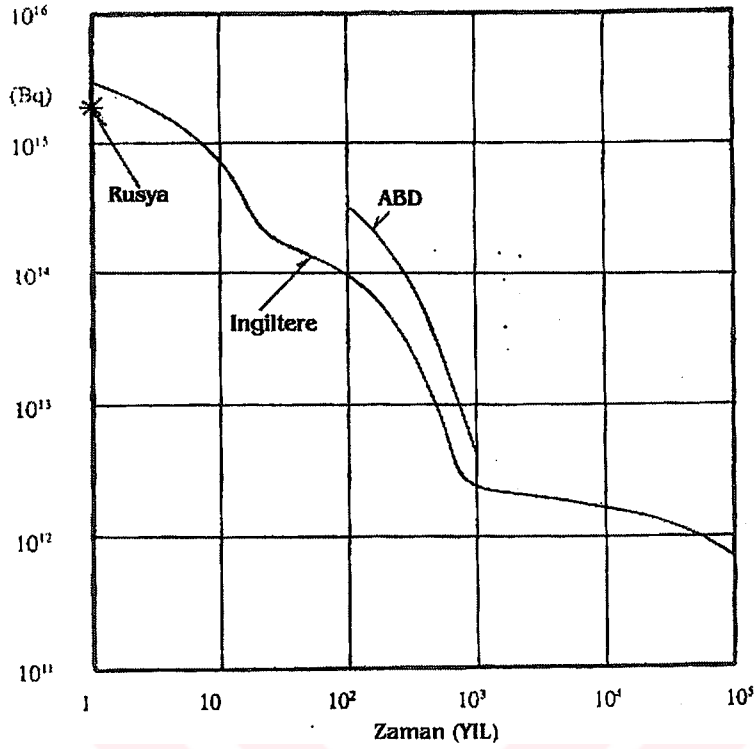


Şekil 5.3. 40 MW gücündeki 8 yıl çalıştıktan sonra durdurulmuş bir nükleer denizaltının reaktöründeki harcanan yakıtın aktivitesinin yıllara bağlı değişim grafiği (Le Sage ve Sarkisov, 1996)

Harcanan yakıtın radyoaktivitesi, reaktör güç seviyesi ve reaktörün çalışma süresine bağlıdır. Yakıtta aktivitenin yüksek olması, yakıtın iyi zırhlanması gerektiği manasına gelir. Nükleer denizaltıda %20 zenginlikte uranyum yakıtı kullanılır. Bu zenginlikteki yakıtın fisyon sonucu oluşan β ve γ radyasyonu oldukça önem kazanır. Eğer yakıtın zenginliği %5'in altında ise NS Lenin reaktöründe olduğu gibi, β ve γ radyasyonu çok büyük bir problem oluşturmaz.

Nükleer denizaltılarda kullanılmış yakıtların reaktörden alınıp depo edilmesi önemlidir. Yani yakıtın reaktörden depo kısmına aktarılmasıdır. Bu depo genellikle su havuzu şeklindedir. Bu durum reaktörden %99 oranında radyoaktivitenin taşınması anlamına gelir. Şekil 5.4. te İngiltere'de bir nükleer denizaltı reaktörünün yakıt taşındıktan sonraki reaktör tankının radyoaktivitesinin zamanla değişimi verilmiştir. Yine aynı şekilde Amerika Birleşik Devletleri'ndeki tahmini göstermektedir.

(*) ise Rusya'da NS Lenin reaktörünün aktivitesini göstermektedir.



Şekil 5.4. Reaktör çalışırken nötron aktivasyonundan dolayı oluşan radyoaktivitenin reaktör durduktan sonraki zamana bağlı değişim grafiği.
(Le Sage ve Sarkisov, 1996)

Şekil 5.4 deki yüksek aktivite reaktör çalışırken ki nötron aktivasyonundan dolayı oluşmuş ^{55}Fe ve ^{60}Co izotoplarından kaynaklanmaktadır. (Le Sage ve Sarkisov, 1996)

5.4. NÜKLEER GÜÇ İLE TAHRİK EDİLEN GEMİ SİSTEMLERİ VE KARŞILAŞILAN ZORLUKLAR

Nükleer güç ile tahrik edilen gemilerde PWR'ler kullanılmaktadır. Bugüne kadar yaklaşık 200 nükleer santral denizaltılar ve gemiler için üretilmiştir. Bu nükleer sistemler oksijene ihtiyaç duymadıklarından ötürü özellikle denizaltılar için oldukça geniş bir hareket sahası sağlamışlardır.

Taşımacılıkta kullanılan su üstü gemiler için bu avantaj pek önemli değildir. Taşımacılıkta kullanılan gemilerde aranan en önemli özellik ekonomik olmalarıdır. Şu anda dünya denizlerinde kullanılan fosil yakıtlı (Dizel ve Buharlı) ticari gemiler oldukça ekonomiktir. Nükleer gemi sistemlerinde ise henüz ekonomik bir verim sağlanamamıştır. Bu sorun birçok araştırmaya konu olmuş ve sunulan raporlar şunu göstermiştir ki; nükleer güç ile tahrik edilen gemiler için ortaya çıkan bazı zorluklar bu gemilerin ekonomik olmasını zorlaştırmıştır. Bu zorlukların başlıcaları aşağıda verilmektedir.;

5.4.1. Para ve Güvenlik

Nükleer güç ile tahrik edilen gemilerin m³ 'ünün maliyeti fosil yakıtlarla çalışan gemilerle kıyaslandığında 3 katına çıkmaktadır. Bunun sebebi nükleer güç ile tahrik edilen gemi sistemlerinin yaygın olarak üretilmemesi ve istenilen güç oranlarının normal reaktörlerde kullanılan makinelerle kıyasla daha küçük boyutlardaki makinelerden alınması gereksinimidir.

Gemi sistemlerinde PWR'ler kullanılmaktadır. Dolayısıyla kullanılan buhar türbinleridir ve boyutları oldukça büyüktür. kullanılan makinelerin aynı verimde daha küçük boyutlarda imal edilmesi özel malzeme ve özel üretim gerektirdiğinden bu zorluklar maliyeti artırıcı yönde etki etmektedir.

Ayrıca nükleer gemilerin dünya sularında rahatça hareket edebilmeleri için son derece güvenilir şekilde dizayn edilmesi gerekir. Buda alınan tedbirlerin artması gerekmektedir. Tedbirlerin artması maliyet artışına neden olur.

5.4.2. Teknik Eleman

Nükleer güç ile tahrik edilen gemiler özel eğitilmiş yüksek ücretli personele ihtiyaç duymaktadır. Bu durum personel için yapılan harcamayı %9 ile %14 oranında arttırmaktadır.

5.4.3. Sigorta Giderleri

Nükleer güç ile tahrik edilen ticari gemiler %15 ile %18 arasında katma değer vergisi ödemek zorundadırlar. Ve bu gemilerin maliyetlerinin yüksek olması ve olası bir kazada çevreyi verebilecekleri zarar ile sigorta şirketleri tarafından oldukça yüksek ücretlere sigortalanmaktadırlar.

5.4.4. Tamir ve Bakım

Gemideki radyoaktif kısımların bakımı ve tamiri diğer kısımlara nazaran daha özeldir. Bu da daha fazla tamir masrafı gerektirir.

5.4.5. Reaktöre Yeniden Yakıt Yüklenmesi

Reaktöre yeniden yakıt yüklenmesi her 3 yılda bir olur. Bu işlem sistem için gereklidir.

5.4.6. Radyoaktif Atıkların Depolanması

Her 3 yılda bir sistemin yakıtı değişeceğinden ortaya çıkan atıkların depolanması belli bir maliyet gerektirmektedir.

5.4.7. Limanlarla İlgili Sorunlar

Limanlar, nükleer güç ile tahrik edilen gemilerden daha fazla ücret almaktadırlar ve her liman bu gemileri kabul etmemektedir.

5.4.8. Lisans İşlemleri

Lisans işlemleri bu tür gemiler için hala bıkıran ve pahalı bir süreçtir.

Sonuç olarak bakıldığında yukarıda sayılan nedenler temelde yüksek maliyeti gerektiren sebeplerdir. Ayrıca, gemilerde kullanılan reaktörler basınçlı su reaktörleridir ve endirekt çevrimlidirler. Endirekt çevrim ise verimi bir miktar düşürmektedir. Nükleer güç ile tahrik edilen gemilere gaz soğutmalı nükleer reaktörler adapte edilirse sistem boyutları küçülüp daha verimli hale getirilebilir. (Krusemann, 1971)

5.5. DENİZALTILARDA KULLANILAN TAHRİK SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

5.5.1 Nükleer Güç ile Tahrik Edilen Denizaltıların Avantajları

Deniz kuvvetlerinde kullanılan denizaltıları çalışma prensibine göre ikiye ayırmak mümkündür.

- Dizel gücü + Akü ile çalışan denizaltılar
- Nükleer güç ile tahrik edilen denizaltılar

Nükleer güç ile tahrik edilen denizaltılar dizel güç ile tahrik edilen denizaltılardan çok daha sessizdir. Dizelli denizaltılar yaklaşık 100 km uzakta düşman kuvvetleri tarafından tespit edilebilirken nükleer denizaltılar 20 km uzaktan bile tespit edilememektedir.

Ayrıca hız ve denizaltında kalma süresi açısından nükleer denizaltılar dizel motorlu denizaltılardan çok daha üstün durumdadır. Dizel motorlu denizaltıların sesli olmaları limanlara yaklaşmaları ve düşman kuvvetlerinden saklanmalarını zorlaştırmaktadır. Bu yüzden bu dezavantajı ortadan kaldırabilmek için bu tür denizaltılara ek olarak büyük hacimli batari sistemleri eklenmiştir.

Bu tür denizaltılar dalışa geçtiklerinde ve limanlara yaklaşmak istediklerinde dizel motorlarını durdurup elektrik bataryalarını kullanarak daha sessiz hareket edebilmektedirler. Fakat batarya kullanımının dezavantajı istenilen miktardaki elektrik enerjisinin bataryalarda depolanamaması sebebiyle deniz altında uzun süre hareket edilememesidir.

Halbuki nükleer denizaltılar aylarca denizaltında kalabilirler ve hiç yakıt almadan çok uzak mesafelere gidebilirler. (Vickery, 1997)

Bu saydığımız özellikler göz önünde bulundurulursa nükleer denizaltıların dizel güçlü + bataryalı denizaltılardan bariz bir şekilde üstün oldukları görülür.

5.5.2. Nükleer Güç ile Tahrik Edilen Ticari Gemilerde Yiyecekleri Koruyabilme Avantajı

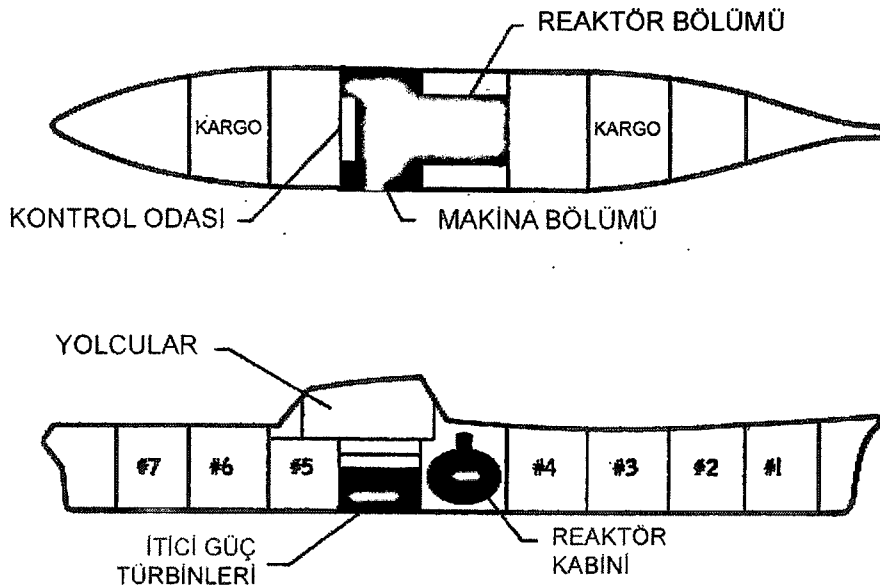
Taşımacılıkta kullanılan nükleer kargo gemilerinin bir avantajı da, yiyeceklerin sterilize edilmiş şekilde korunabilmesidir. Patates, süt, meyve, tahıl, et gibi bozulması kolay, korunması zor gıda ürünlerinin sterilize edilmesi için, reaktör kalbinde nükleer tepkimeler sonucu oluşan kararsız çekirdeklerin yaydığı gama (γ) ışınları kullanılabilir.

Bu gama ışınları, reaktörden yiyeceklerin bulunduğu bölmelere, özel ışınlama tüpleri ile yönlendirilir. Yiyeceklere gönderilen gama ışınları yiyeceklere nüfus eder ve gıdaların kolaylıkla bozulmalarına sebep olan bakterileri, mikroorganizma ve böcekleri öldürür. Bu işlem birkaç dakika gibi kısa bir sürede yapılabilir ve de yiyeceklerin aylarca bozulmadan, tat ve kokularında bir değişiklik olmadan kalabilmesini sağlar. Bu yöntem uygulandığında bir çok gıda ürününün soğutuculara ihtiyaç duyulmadan sağlıklı bir şekilde depolanması sağlanır.

Reaktör durdurulmuş olsa bile, oluşan fisyon ürünlerinin gama ışımaları durmaz buda yiyeceklerin ışınlanmalarının istenildiği an yapılması avantajını getirir.

Ayarlanabilir ışınlama tüpleri vasıtasıyla yiyecek tipine bağlı olarak istenilen dozda gama ışını sağlanabilir.

Yiyecekleri en iyi sterilize etmenin yolu, özelliklerine göre yiyecekleri farklı kompartımanlara koymak ve yiyeceğin özelliğine uygun dozda ışınlamalarını yapmaktır. Şekil 5.5 de bu kompartımanlar gösterilmiştir. (Crouch, 1960)



Şekil 5.5. Bir Nükleer Kargo gemisinin bölümleri (Crouch, 1960)

5.6. NÜKLEER DENİZALTI LARDA YENİDEN YAKIT YÜKLENMESİ

Nükleer denizaltılar reaktörlerindeki zenginleştirilmiş uranyum sayesinde uzun süreler hiç yakıt gerektirmeden hareket edebilirler. Nükleer denizaltılar hareket süresi boyunca yakıt harcamadığından bir süre sonra denizaltıların tekrar yakıt yüklenmesi gerekecektir. Nükleer denizaltıların yeniden yakıt yüklenmesi olarak adlandırılan bu yöntem birkaç adımda gerçekleşir.

- İlk önce nükleer denizaltıdaki silahlar denizaltının deniz seviyesindeki en alt bölgesine çekilir. Sonra denizaltılar yüzdürülür, reaktör kapatılıp taşınabilir ekipmanlar taşınır.
- Kullanılmış yakıt demetleri gemi konteynırına yerleştirilir. Bazı Rus denizaltılarında bulunan yakıtlar daha aktif olduğundan bu tür nükleer denizaltılarda kullanılmış yakıtların taşınması daha zordur.

Nükleer reaktörlerinin ve reaktör bileşenlerinin belli bir kullanım süresi vardır. Kullanım süresini doldurmuş reaktörün denizaltılardan çıkarılması 3 şekilde olur.

5.6.1. Denize Atma

1959'da Amerikan Deniz Kuvvetleri ilk reaktör kısımlarını Atlantik okyanusunda Dela Vare'nin 200 km doğusunda 2700 m derinlikte denize bırakılmıştır.

Rusya 1965-1968 dönemi boyunca kuzey filosunun 8 reaktörlü 4 reaktör kompartımanını atmıştır. Rusya NS Lenin'in 3 yakıtsız reaktörü ile birlikte 5 tane zararlı yakıt içeren reaktörünü Novaya Zemlya açıklarında yaklaşık 20 veya 50m derinlikte batırmıştır.

1978 yılında Pasifik filosu yakıtsız 2 reaktörünü daha batırmıştır. Batırılma işlemi öncesi bu reaktörler kullanılabilir yakıt içermekteydi. Bu yakıtlar nükleer denizaltı içinde depolandıktan sonra boşalan reaktörler Hardening Forfurol ile doldurulup, biri 2500m derinlikte, öteki ise 3000m derinlikte batırılmıştır. Hardening Forfurol karışımı 100 yıl boyunca reaktörün deniz suyu tarafından korozyona uğramamasını sağlar.

1972 yılında Londra Konvensiyonu adlı uluslar arası bir antlaşmayla yüksek seviyeli radyoaktif atıkların derin denizlere bırakılması yasaklanmıştır. Londra Konvensiyonu yüksek seviyeli radyoaktif atıkların denize bırakılmasını yasaklarken, düşük ve orta derecedeki radyoaktif atıkların denizlere bırakılmasına izin veriyordu. Londra Konvensiyonu, 1975 yılına kadar varlığını sürdürebildi. Çünkü bir çok ülke bu konvensiyonu onaylamamıştı. Daha sonra radyoaktif atıkların denizlere verilmesi tüm dünyada tamamen yasaklanmıştır.

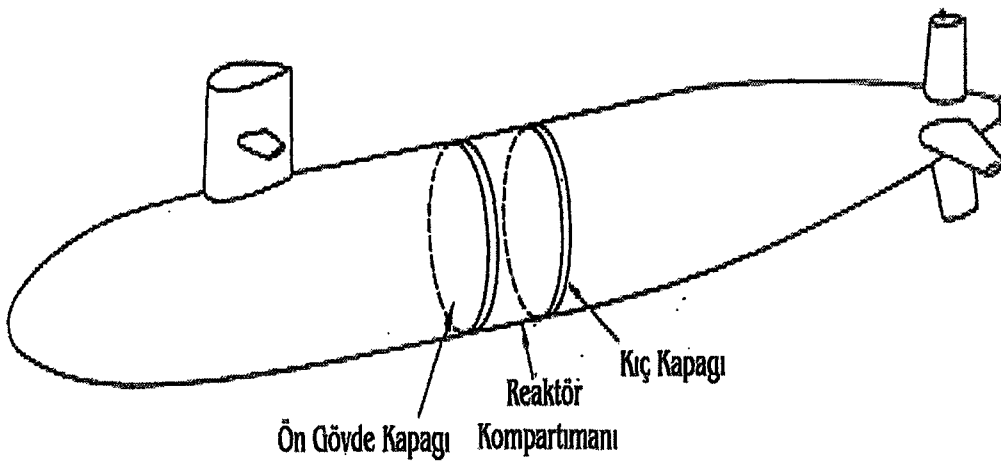
5.6.2. Sığ Kıyıya Gömme

Amerika Birleşik Devletleri Deniz Kuvvetleri sahip olduğu NSS Seawolf'un PWR reaktörü ve bölümlerini denize bıraktığından beri nükleer denizaltıların reaktör kompartımanlarını sığ kıyıya gömme kararı almıştır. Bu metodun avantajı radyoaktif doz miktarının düşük olması ve monitörle gözlenebilir olmasıdır. Kompartıman yüzeyinde radyasyon seviyesi yaklaşık 5 veya $10 \mu\text{Sv}$ ve bu her saat için 0,3 mSv radyasyon oluşturmaktadır. Bu metot denize bırakmaktan daha pahalıdır ve uzun dönem güvenlik problemi getirmektedir.

5.6.3. Derin Kıyıya Gömme

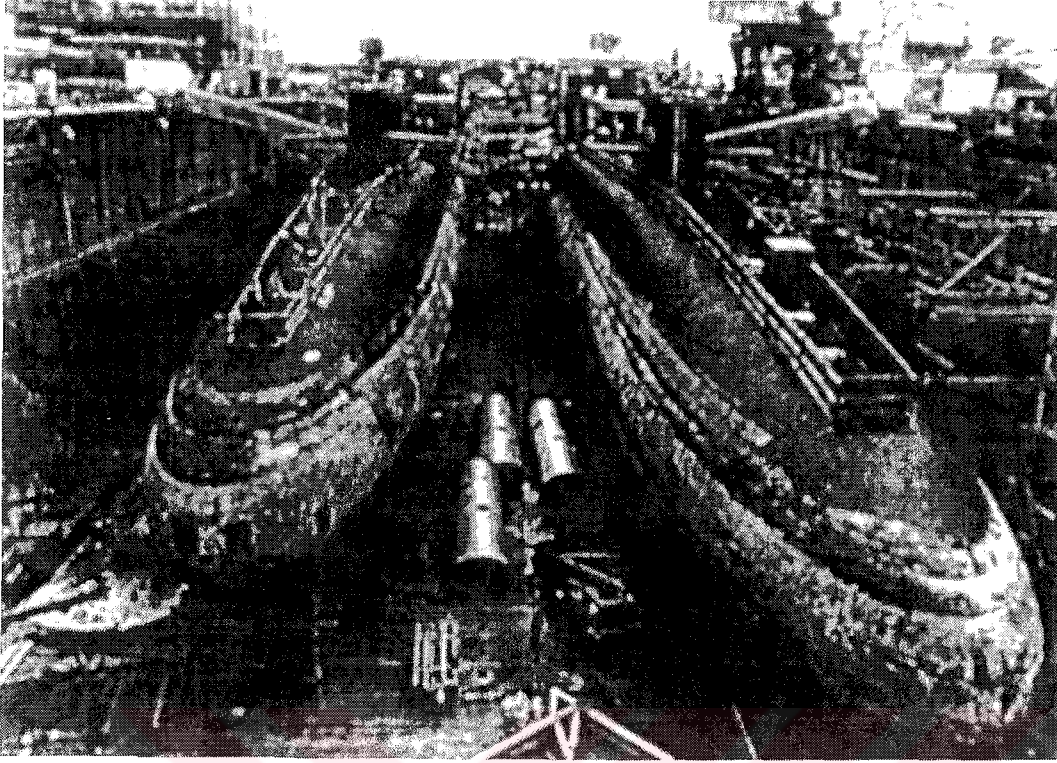
İngiltere Deniz Kuvvetleri için denize bırakmak favoridir. Fakat bu seçenek yapılan antlaşmalarla tüm dünyada yasaklandığından İngiliz Deniz Kuvvetleri derin kıyıya gömme metodunu tercih etmişlerdir. Ekonomik sebeplerden dolayı derin depolama sınırlı boyutlara sahiptir. Bu metot sadece 1.7m boyutundaki atıkları depolamaya müsaade eder. Sonuç olarak, nükleer denizaltı kompartımanlarının hiçbir parçası bütün olarak bu yöntemle depolanamaz. Bu metodun uygulanabilmesi için deniz altındaki nükleer reaktör kompartımanlarının uygun boyutlarda parçalanması gerekir. Bu işlem radyoaktif olan reaktör bölümlerinin parçalanması anlamına geldiğinden denize atma disposal ve sığ kıyıya gömme metodundan daha pahalıdır.

Şekil 5.6 da bir nükleer denizaltının reaktör kompartıman kısmı şematik olarak görülmektedir.



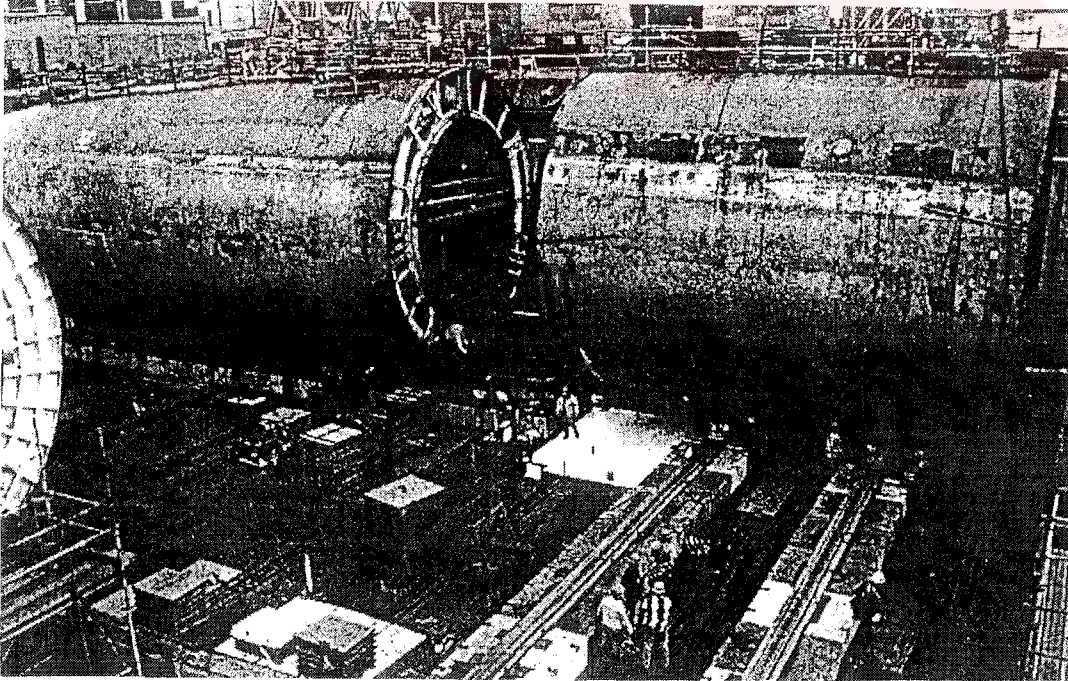
Şekil 5.6. Bir nükleer denizaltının reaktör kısmını gösteren şema. (Le Sage ve Sarkisov, 1996)

Şekil 5.7 de sökülme üzere tersaneye getirilen denizaltılar gözükmeğedir.



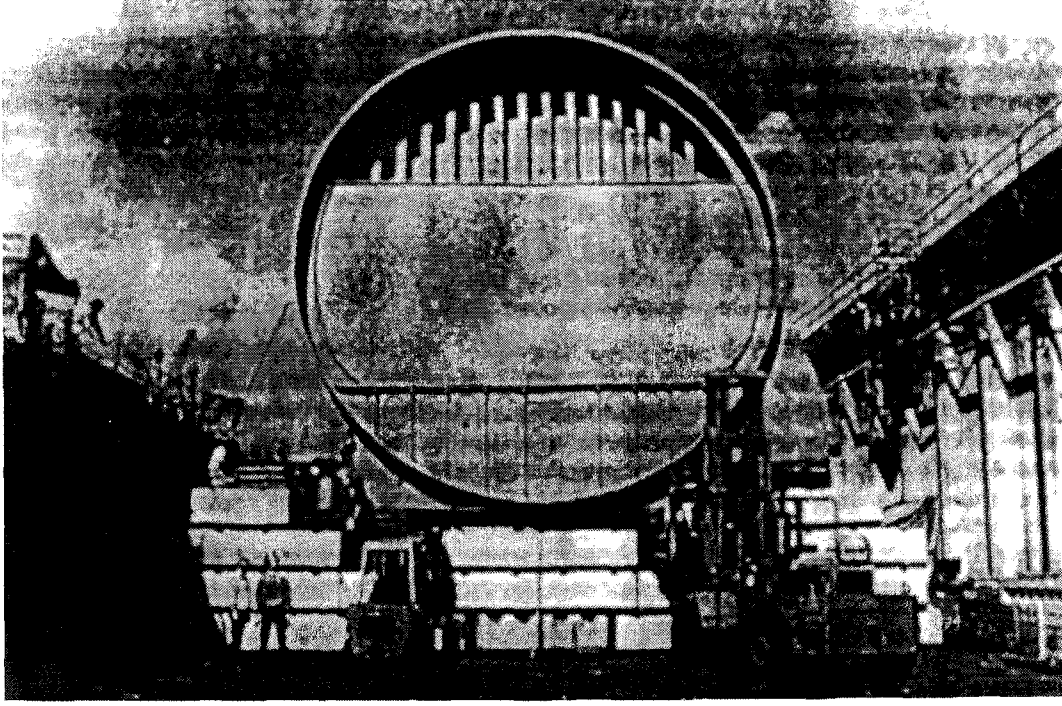
Şekil 5.7. Sökölme üzere tersaneye getirilen gerçek nükleer denizaltılar (Le Sage ve Sarkisov, 1996)

Şekil 5.8. de gerçek bir nükleer denizaltının parçalanma aşaması gösterilmektedir.



Şekil 5.8. Gerçek bir nükleer deniz altının parçalanma aşaması (Le Sage ve Sarkisov, 1996)

Şekil 5.9 da gerçek bir nükleer denizaltıdan ayrılmış reaktör kompartımanı görülmektedir.



Şekil 5.9. Gerçek bir nükleer denizaltıdan ayrılmış reaktör kompartımanı (Le Sage ve Sarkisov, 1996)

5.7. NÜKLEER DENİZALTILARIN SÖKÜLME RİSKİ

Nükleer denizaltıların sökülmesi(Decommissioning) ve ayırma (disposal) işlemi çok iyi bilinen ve riske sokulmaması gereken uygulamalardır. Fakat küçük olsa da önemli miktardaki yüksek radyoaktif maddeler her zaman kaza riski taşır.

Nükleer denizaltıların reaktörlerindeki radyoaktif malzemeler Çernobil reaktöründen 40 kat daha azdır. Ayrıca nükleer denizaltılardaki PWR reaktörleri Çernobil reaktöründen daha güvenilirdir. Bunun anlamı radyasyon kazalarında sökme boyunca kaza riski çok ciddi bir problem değildir. (Le Sage ve Sarkisov, 1996)

5.7.1. Amerika Birleşik Devletlerindeki Nükleer Denizaltıların Sökülmesi

Amerika Birleşik Devletleri'nde nükleer denizaltılar 1955'ten beri kullanılıyor. Bir çok nükleer denizaltı şu an kullanım süresini doldurmuş durumdadır. Bunun sebebi askeri kapasitelerini doldurmaları ya da balistik füze gereksinimleri olmasıdır. Ömürlerinin sonuna geldiğinde gemiler devre dışı kalırlar. Bu gemiler tersanelerde toplanır ya da yeniden satılmak üzere parçalara ayrılır.

Birleşik Amerika Donanması nükleer güçlü gemilerin sökülmesi programındaki amacı tersanedeki depolama masraflarını ortadan kaldırmaktır.

Nükleer denizaltıların tersanelerde depolanması 1970'lerin sonlarında başlamıştır. İlk gemilerin yakıtları alınarak, bu gemiler tersanelerde depo edilebilir hale getirilmiştir. Nükleer denizaltıların depolama maliyetleri yüksek fiyatlara ulaştığından, donanma bu tür gemileri sökerek bir takım eklemeleri de yaparak yeniden kullanılabilir hale getirmeye karar vermiştir.

Balistik füzeli gemiler, füze kompartımanına sahip hale getirilmiş ve yeniden birleştirilmiştir. Bu tür gemilerin bazıları kendi kompartımanından ayrılarak yeniden monte edilmiştir. 1980 yılında SSBN sınıfı nükleer denizaltılar kullanım dışı bırakılmaya başlanmıştır. Bu denizaltıların reaktör kompartımanları kesilip atılarak yeniden gemi olarak ortaya çıkarılmıştır.

1990 yılında nükleer denizaltıların sökülmesi programı Washington'da kabul edilmiştir. Bundan sonra 32 SSN ve SSBN sökülme işlemi tamamlanmıştır. Bunların 21 tanesi devre dışı bırakılmış, fakat sökülme işlemi yapılmamıştır.

(Le Sage ve Sarkisov, 1996)



6. NÜKLEER GÜÇ İLE TAHRİK EDİLEN DENİZALTILAR İÇİN ÖNERİLEN TEORİK KAPALI ÇEVİRİM NÜKLEER GÜÇ SANTRALLERİ

6.1. DENİZALTI GÜÇ SİSTEMLERİ İÇİN KAPALI ÇEVİRİM GAZ TÜRBİNİ NÜKLEER GÜÇ SANTRALLERİ

Basıncılı su reaktörleri (PWR) güvenilir bir sistem olarak 30 yılı aşkın bir süredir denizaltılarda kullanılmaktadır. Fakat PWR'ler oldukça ağırdır ve fazla hacim işgal ederler. İtici kuvvet ve makine aksamı nükleer taarruz denizaltılarının iç hacminin yaklaşık %50'sini işgal etmektedir. Buna rağmen yüksek hız yeteneği, su altında uzun süre kalabilme ve sessiz olmaları sebebiyle, denizaltılarda tahrik gücü olarak bu sistemler tercih edilmiştir. Eğer denizaltılarda büyüklük ve maliyet açısından anlamlı küçültmeler yapılmak istenirse, denizaltıların ya görev gereksinimleri hafifletilmeli yada yeni teknolojiler üzerinde durulmalıdır.

Bu maksatla yeni teknolojiler geliştirilerek, fiziksel hacmi küçültmek için yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörlerin (HTGR) denizaltılarında kullanılmaları önerilmektedir. Bu teknoloji 30 yılı aşkın bir süre önce gemi itme sistemleri için düşünülmüştür.

Bu süreç içerisinde; nükleer yakıt performansını, gaz türbini malzemeleri, gazdan gaza ısı değiştiricileri ve turbo makinelerin gelişimleri HTGR'lerin denizaltılarda kullanılmasını gündeme getirmiştir.

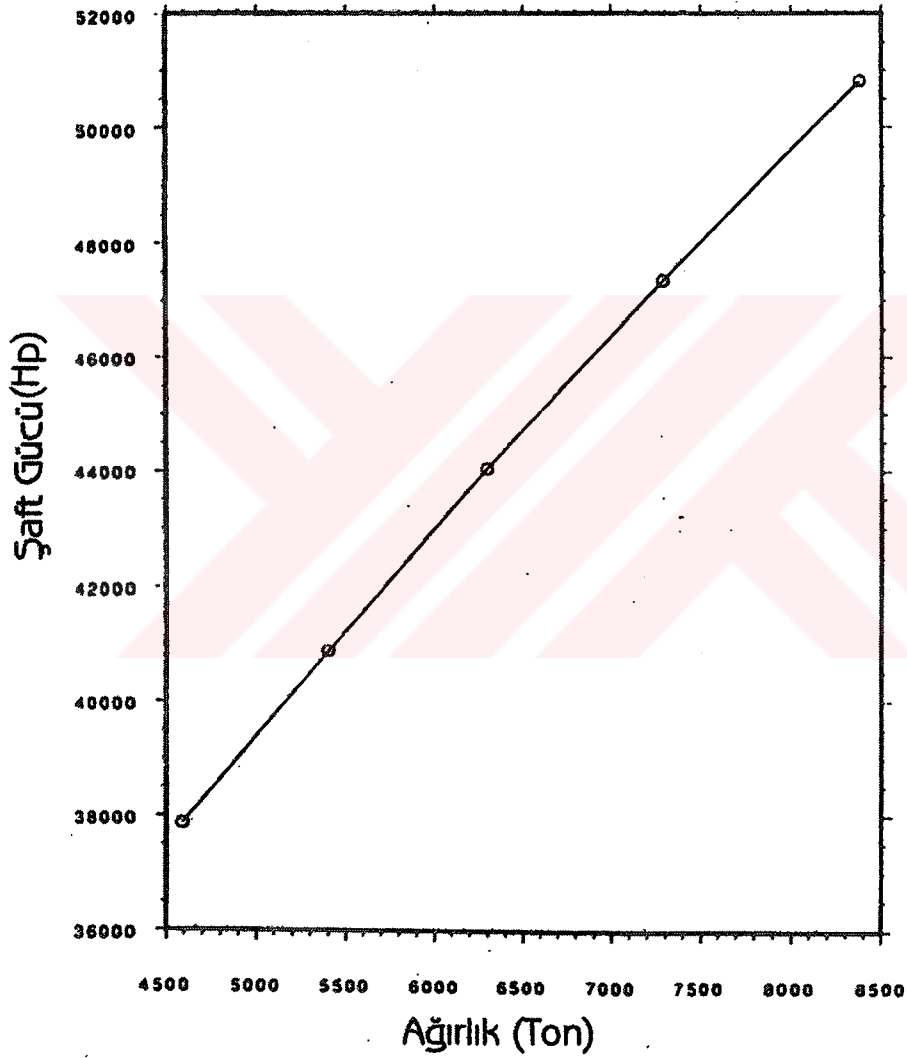
Amerikan donanmasında, su üstü savaş gemilerinde açık çevrimli fosil yakıtlı gaz türbinleri 20 senedir kullanılmaktadır. Aircraft turbo makine esasına dayanan bu teknoloji 120'den fazla fırkateynde, destroyerde ve kruvazörde kullanılmıştır. Buhar türbini ikincil devreli kullanan HTGR'ler USA'da ve diğer ülkelerde elektrik gücü üretimi için geliştirilmiş ve kullanılmaktadır.

HTGR teknolojisi kapalı gaz türbin çevrimi ile gelişmiş elektrik sürücülerini birleştirildiğinde yüksek verimli denizaltı tahrik sistemlerinin yapılması mümkün olur. (Rains ve Mitchell, 1993)

6.1.1. Deniz Altı Dizayn Referansları

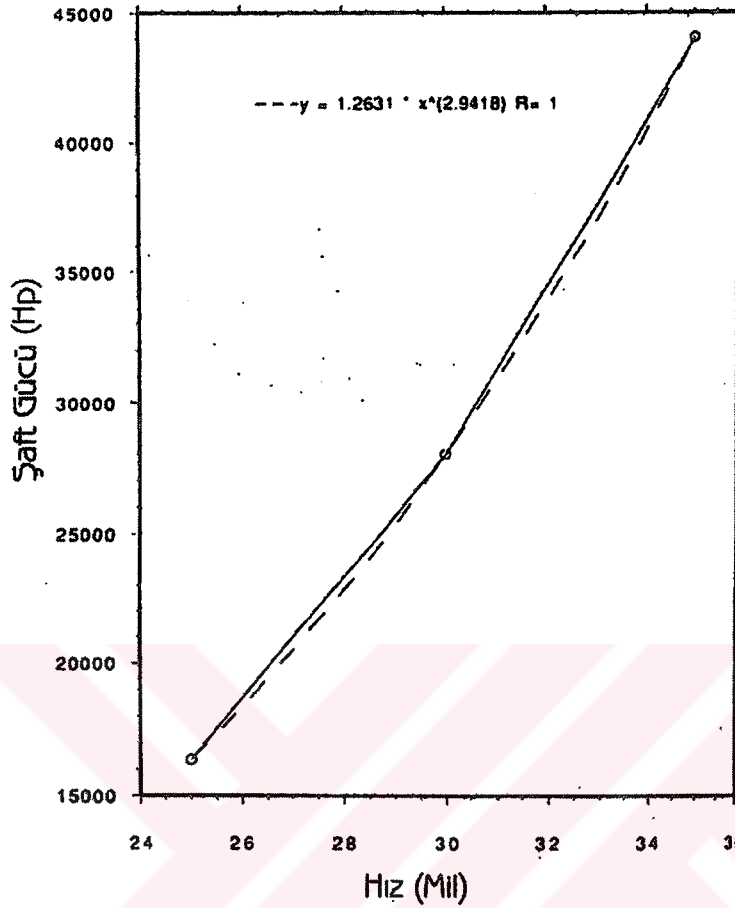
Basit bir denizaltı elektrik güç jeneratörü güç seviyesini belirlemek için varsayımsal bir nükleer taarruz denizaltısını ele alalım. Bu denizaltının boyu 100 m. çapı 10 m. olsun. Yani L/D oranı modern denizaltılarda olduğu gibi 10 olsun. Denizaltının yüzey alanı 2700 m² ve ağırlığı 6300 ton olarak kabul edilmiştir. Böyle bir denizaltının 35 deniz mili hız yapabilmesi için 26.3 MW güce ihtiyacı vardır. (Jeckson, 1983)

Şekil 6.1'de 35 deniz mili hızla seyretmekte olan bir denizaltının shaftına aktarılan gücün denizaltının ağırlığı ile değişimi verilmiştir.



Şekil 6.1. Şafta aktarılan gücün ağırlıkla değişim grafiği (Jackson, 1983)

Şafta aktarılan gücün Değişik hızlardaki değişimi Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.2. Şafta aktarılan gücün hızla değişim Grafiği (Jackson, 1983)

6.2. NÜKLEER DENİZALTILARI İÇİN DİREKT ÇEVİRİMLİ GAZ TÜRBİNİ SANTRALLERİ

Nükleer güç tahrikli denizaltılarda basınçlı su reaktörleri (PWR) kullanılmıştır. PWR'lerde iş yapan akışkan olarak su buharı kullanılmaktadır. Su buharı kullanılması sistemdeki ısı değiştiricileri ve türbin boyutlarının büyük olmasını gerektirmektedir.

Denizaltıların iç hacimleri ise oldukça küçüktür. Denizaltılarda kullanılan PWR'ler denizaltı hacminin yaklaşık % 50'sini kaplar. Bir denizaltıda istenilen özellikler

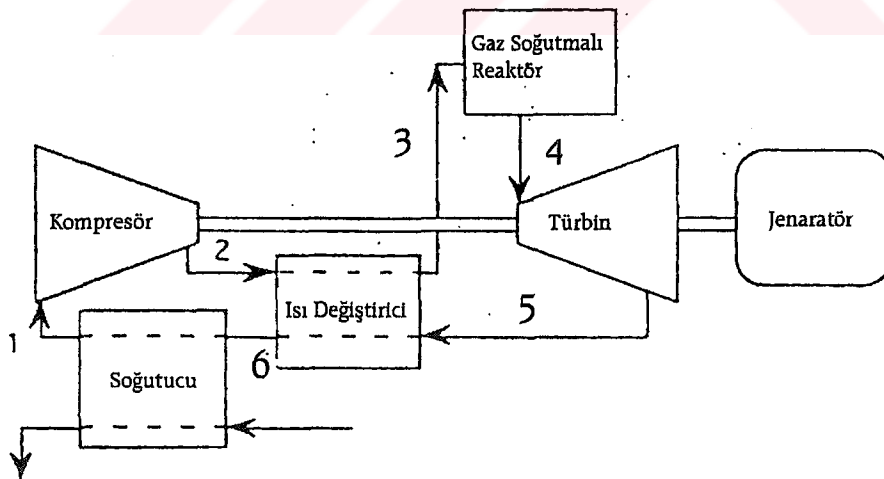
- Yüksek hız ve manevra kabiliyeti
- Sessizlik
- Uzun süre su altında kalabilme olarak sıralanabilir.

Bir denizaltı için bu 3 özelliği birlikte sağlayabilen tek sistem nükleer reaktörlerdir. Fakat denizaltılarda kullanılan reaktörler (PWR) denizaltının iç hacminin büyük bir bölümünü kaplamaktadır.

PWR'ler yerine yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörler (HTGR) kullanıldığında reaktör bölümlerinin hacimleri küçülmekte ve denizaltılar için daha cazip hale gelmektedir. Soğutucu akışkan olarak He gazı kullanıldığında, gazın reaktörden çıkış ve türbine giriş sıcaklığı yüksek tutulup, türbin boyutlarının küçülmesi sağlanmaktadır. Ayrıca kompresör yardımıyla sıkıştırılan gazın yoğunluğu artacağından dolayı ısı değiştiricilerde ısı iletiminin daha kolay sağlanması ve ısı değiştirici boyutlarının daha da küçülmesine sebep olmaktadır.

Reaktör boyutlarının küçülmesi denizaltılarda istenilen bir özellik olmasına rağmen inşa edilen denizaltılarda PWR'lerin kullanılmasının sebebi; gaz soğutmalı reaktörlerde kullanılan kompresörlerin veriminin düşük olması nedeni ile türbinden elde edilen gücün büyük bir kısmının kompresörde harcanması nedeniyle çevrimin veriminin düşmesi ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı türbin kanatlarının geliştirilememiş olmasıdır.

Fakat günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte bu zorluklar büyük ölçüde aşılmış, kompresör verimleri %90 lar civarına çıkmış ve yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerin üretilmesi ile yüksek sıcaklık şartlarında çalışabilen türbinler üretilmiştir. Bu gelişmelerle, kapalı Brayton direkt çevrimi tahrik sistemi hacimleri için kayda değer gelişmeler sunmaktadır. Bu gelişmeler ışığında Şekil 6.3'te nükleer güç tahrikli bir denizaltı için teorik olarak düşünülen basit bir Brayton direkt çevrim şeması verilmiştir. (Captain ve Gouge, 1995)



Şekil 6.3. Basit bir Brayton Direkt Çevrim Şeması (Captain ve Gouge, 1995)

Bu çevrimde reaktörde ısınan sıcak helyum gazı, nükleer reaktörü terk eder ve gaz türbinine girer. Bu gaz türbini yüksek verimli AC elektrik jeneratörünü ve kompresörü sürmektedir. Bu sistemde birden fazla türbin olabilir. Türbinlerden biri yüksek basınç türbini, kompresörü

tahrik eder. Öteki türbin ise düşük basınç türbini, elektrik jeneratörünü ve jeneratöre bağlı şaftı tahrik eder.

Türbinden 5 noktasına gelen daha düşük basınçlı ve yüksek sıcaklıktaki egzost gazı ısı değiştiriciye girer. Burada 2 noktasından 3 noktasına doğru akmakta olan yüksek basınçlı Helyum gazı ısıtılır. Isı değiştiriciden 6 noktasında çıkan Helyum ön soğutucu olarak adlandırılan ön ısı değiştiricisine girer ve başlangıç şartlarına kadar soğutulan Helyum 1 noktasında kompresöre girer. Ön soğutucuda soğutma işlemi deniz suyu ile yapılır. Kompresöre giren helyumun basıncı çevrimin en yüksek basınç değerine kadar artırılır. Kompresörden gelen yüksek basınçlı Helyum reaktöre girmeden önce 2-3 noktaları arasında ön ısıtmaya tabii tutulur. Helyum sıcaklığını ve basıncını farklı noktalarda hesaplamak için, basit bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Burada ele alınan Direkt Brayton Çevrimi için giriş varsayımları ve sonuçlar Tablo 6.1’de verilmiştir.



Tablo 6.1. Şekil 6.3. deki Direkt Brayton Çevrimi için giriş varsayımları ve sonuçları
(Captain ve Gouge, 1995)

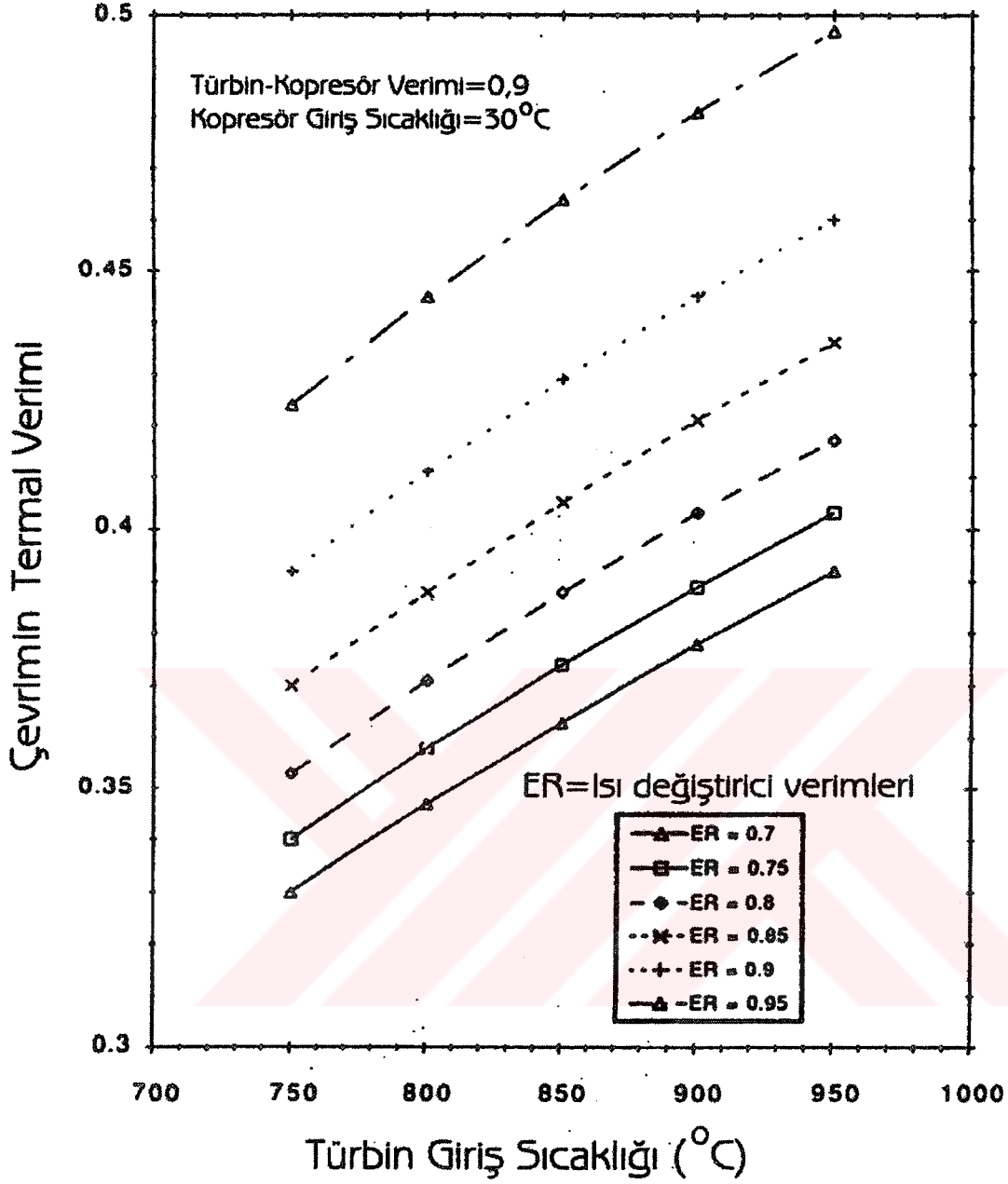
Direkt Brayton Çevrimi		
Isı Değiştiricinin verimi		%92
Toplam Basınç Düşüşü		%7
Türbin Verimi		%91
Kompresör verimi		%89
Basınç oranı		2,2
Çevrim Verimi		%44
Reaktör gücü		85,2 MW Termal
Bölge	Sıcaklık °C (°F)	Basınç MPa(psi)
Türbin Girişi (4)	850 (1562)	7,80 (1132)
Türbin Çıkışı (5)	591 (1096)	3,80 (551)
Ön Soğutucu Girişi (6)	193 (380)	3,68 (534)
Kompresör Girişi (1)	30 (86)	3,67 (532)
Kompresör Çıkışı (2)	159 (318)	8,06 (1169)
Reaktör Girişi (3)	557 (1035)	8,01 (1162)

Tablo 6.2'de Türbo makineler ve ısı değiştiricilerine ait fiziksel değerler verilmiştir.

Tablo 6.2. şekil 6.3'teki Direkt Çevrimde kullanılan Türbo Makineler ve ısı değiştiricilere ait fiziksel değerler (Captain ve Gouge, 1995)

Parametreler	Türbin	Kompresör
Kademe Sayısı	8	12
<i>Hub</i> Çapı (m)	0,45	0,45
Maksimum <i>Tip</i> Çapı (m)	0,58	0,52
Pervane Uzunluğu (m)	0,86	1,35
Toplam Uzunluk (m)	1,27	1,9
Hız (Devir/Dk)	15000	15000
Isı Değiştirici Uzunluğu (m)	1,1	
Isı Değiştirici Alanı (m ²)	2,4	
Isı Değiştirici Hacmi (m ³)	2,6	
Ön Soğutucu Uzunluğu (m)	2,5	
Ön soğutucu Hacmi (m ³)	4,2	

Isı değiştirici için varsayılan verim %92 dir. Türbo makinelerin izantropik verimi %89-%91, gerçeğe uygundur ve mevcut teknolojiyi desteklemektedir. Makineler ve ısı değiştiricileri için nominal değerler Tablo 6.2. de verilmiştir. Dikkat edilirse makineler ve ısı değiştiricileri için verilen fiziksel boyutlar aktif elemanlar olan türbin kanatları ve ısı transfer yüzeyi içindir. Gerçek bileşenler dış kaplama nedeniyle biraz daha geniştir. Bununla birlikte görölüyor ki asıl tahrik komponentleri Rankine çevrimindekilere göre daha küçüktür. Reaktör çıkış sıcaklığı 850 °C dir. Ve bu değer mevcut reaktör ve türbin materyalleri ile uyuşmaktadır. Çevrimin ısı verimi yaklaşık %44 dır. şekil 6,4'te direkt çevrim ısı veriminin türbin giriş sıcaklığına bağlı değişimi, ısı değiştirici verimi birlikte verilmiştir. Bu değerden de göröldüğü gibi yüksek türbin giriş sıcaklığı ve ısı değiştiricinin ne denli önemli olduğu açıktır. Çevrim verimleri kayda değer miktarda Rankine çevriminden daha yüksektir. (Yan ve Lidskey, 1991)

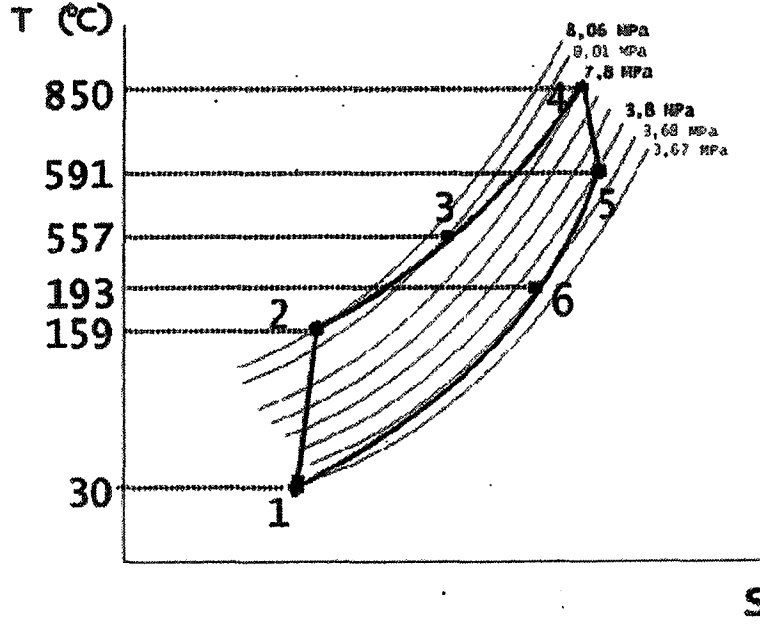


Şekil 6.4. Çevrimin Termal veriminin türbin giriş sıcaklığına ve ısı değıştirici verimine bağılı değışim grafiğı (Yan ve Lidskey, 1991)
(Basınç Düşüşü %7, Kompresör giriş sıcaklığı 30 °C ve Türbo makinelerin izantropik verimi %90 olarak alınmıştır)

6.2.1. Nükleer Güç ile Tahrik Edilen Denizaltılar İçin Ön Görülen Kapalı Brayton Direkt Çevriminin İdeal Verimi

İş alan veya veren herhangi bir makinenin verimi gerçek ve ideal iş transferlerinin oranı olarak tanımlanır. Türbo makineler gerçekte adyabatik olduklarından ideal iş izantropiktir. Ve verimde izantropik verim olarak adlandırılır.

Şekil 6.3'teki Kapalı Direkt Brayton Çevrimi'ne ait T-s diyagramı Şekil 6.5. te verilmiştir.



Şekil 6.5. Şekil 6.3'teki Kapalı direkt Brayton çevrimine ait T-s diyagramı

Denk. 3.22 ve Tablo 6.1'deki değerler kullanılarak kompresör için adyabatik verim;

$$\eta_c = \frac{T'_2 - T_1}{T_2 - T_1} \Rightarrow 0,89 = \frac{T'_2 - 30}{159 - 30}$$

olarak yazılır ve buradan $T'_2 = 144,8$ °C olarak bulunur.

Isı değiştiricinin verimi ise Denk. 3.28 kullanılarak;

$$\eta_R = \frac{T_3 - T_2}{T'_3 - T_2} \Rightarrow 0,92 = \frac{557 - 159}{T'_3 - 159}$$

olarak yazılır ve buradan $T'_3 = 591$ °C olarak bulunur.

Reaktörden yüksek sıcaklıkta çıkan Helyum türbinde izantropik olarak genişlemektedir. Burada verim gerçek işin ideal işe oranı olarak tanımlanır. Ve Denk. 3.24 kullanılarak izantropik verim;

$$\eta_T = \frac{T_4 - T_5}{T_4 - T'_5} \Rightarrow 0,91 = \frac{850 - 591}{850 - T'_5}$$

olarak yazılır. Buradan $T'_5 = 565$ olarak bulunur.

Denk. 3.28 kullanılarak ısı değiştiricinin verimi;

$$\eta_R = \frac{T'_5 - T_6}{T'_5 - T'_6} \Rightarrow 0,89 = \frac{565 - 193}{565 - T'_6}$$

olarak yazılır. Buradan $T'_6 = 147^\circ\text{C}$ olarak bulunur.

Yukarıdaki hesaplamalardan $T'_3 = T_5$ ve $T_2 = T'_6$ olarak bulunur.

Buradan termal verim;

$$\eta_{iç} = 1 - \frac{q_{soğog}}{q_{ısca}} = \frac{C_p (T'_6 - T_1)}{C_p (T'_4 - T'_3)}$$

olarak yazılır. Ve gerekli sadeleşmeler yapıldığında;

$$\eta_{iç} = 1 - \frac{T'_6 - T_1}{T'_4 - T'_3} = 1 - \frac{147 - 30}{850 - 591} = 0,54 = \%54$$

olarak bulunur.

Denizaltı dizaynları için referans reaktör güç seviyesi yaklaşık 85 MW dır. Kalıcı mıknatıslı AC (Alternatif Akım) jeneratör direkt olarak şafta bağlı olan kalıcı mıknatıslı DC (Doğru Akım) tahrik motoruna güç sağlar. Jeneratör, tahrik motoru ve şafttan daha uzak yere yerleştirilebilir. Bu sayede denizaltı içerisinde komponentlerin düzenlenmesinde ve ölçümünde esneklik sağlanabilir. Elektrik sürücüsünün bilinen diğer bir faydası tatmin edici seviyelerde itme gücünün yüksek güçlü sistemler için elde edilebilmesidir. Başka bir avantajı, bu tip itme sistemlerinde diğer itme sistemlerine göre operatör ihtiyacının daha az olmasıdır. Bu sayede iç hacim rahatlatılabilir. Ayrıca türbin egzostundaki Helyum hala yüksek sıcaklıktadır. Sıcak Helyum taze su üretimi gibi değişik amaçla kullanılabilir. Bu güç sistemlerinde;

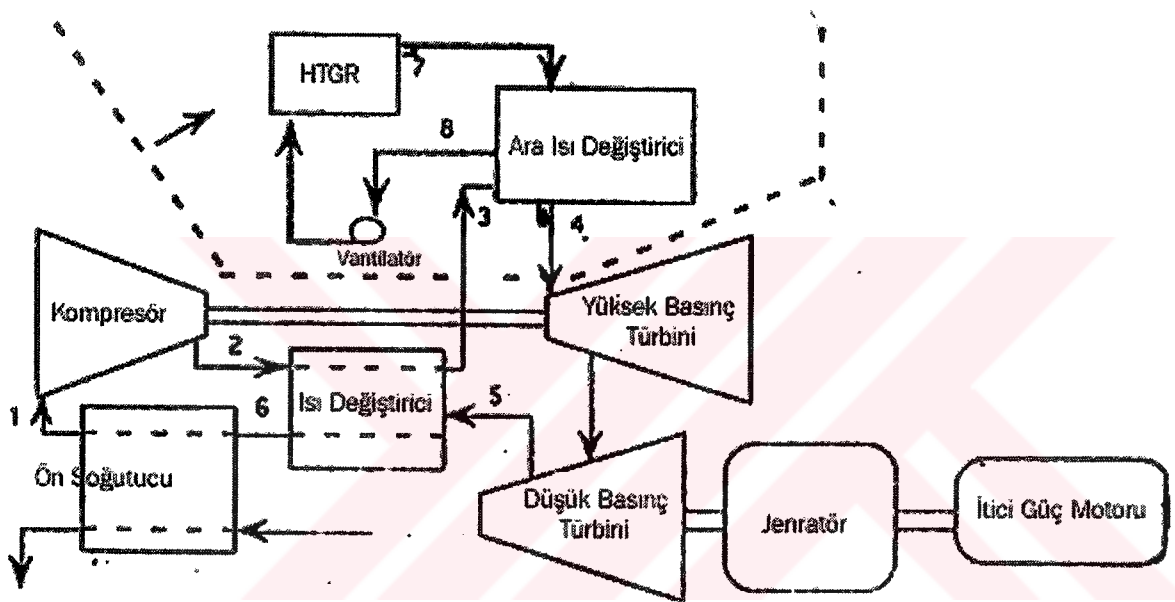
- Helyum yüksek basınçta kalmaktadır. Helyumun en küçük basınç değeri bile 35 atmosferin üzerindedir.
- Türbo makineler yüksek devirsel hızda çalışmaktadır ve gaz sızıntılarını minimize ederler.

Direkt çevrimin sadeliğinden kaynaklanan doğal bir çekiciliği vardır. Fakat gemiler için tüm güç çevrim donanımlarının nükleer reaktör ile aynı kompartımanda bulunması pek istenen bir yapı değildir. (Dade, 1994)

6.3. NÜKLEER GÜÇ İLE TAHRİK EDİLEN DENİZALTI LARDA İNDİREKT ÇEVİRİM GAZ TÜR BİN SANTRALLERİ

Direkt brayton çevriminin değişik şekilleri indirekt çevrim olarak adlandırılır. Ve bu yapıda basınçlı su reaktörlerine benzer olarak birincil ve ikincil çevrim kullanılır. Birincil çevrim dizayn olarak basittir. Bu çevrim nükleer reaktör, gazdan gaza ısı dönüştürücülerini ve Helyum sirkülatörünü içerir. Birincil ve ikincil Helyum çevrimleri arasındakileri düşük sızıntı oranı gereksinimleri nedeniyle IHX (Ara Isı Değiştiricileri) için daha büyük yüzey genişliği gerekir. İkincil çevrim şekil 6.2'deki direkt çevrim komponentlerine benzer.

İndirekt Brayton Çevrimine ait şema Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.6. İndirekt Brayton Çevrim Şeması (Yan ve Lidsky, 1991)

Bununla birlikte indirek çevrimde HTGR, IHX ve sirkülatör dışında tüm önemli komponentler reaktör kompartımanının dışında olduğu için bakım işleri daha kolay olacaktır. Direkt çevrimde farz edilen aynı güç gereksinimleri için hesaplanan itme sistemi parametreleri Tablo 6.3'te verilmiştir. Isı değiştiricinin verimi %90, türbo makinelerin izantropik verimi %91 ve reaktör çıkış sıcaklığı 850 °C, Bölüm 6.2'de bahsedilen direkt çevrim için kabul edilen değerlere benzerdir.

Dikkat edilirse IHX'in ikincil tarafındaki basınç az miktarda birincil tarafındaki basınçtan fazladır. Bu basınç farkı iç sızıntıların birincil akıntılara gitmesini sağlar. Direkt çevrim ile benzer olarak çevrimin ısı verimi %44'tür. İndirekt çevrim için basınç oranı (6), direkt çevrim optimum basınç oranından 3 kat daha büyüktür. bu yüksek basınç oranı HTGR için daha düşük IHX birincil taraf çıkış sıcaklığına izin verir. Böylece daha düşük ortalama sıcaklık

Reaktör için sađlanmıř olur. Bu sayede mevcut dűřűk alařımlı çelikler reaktörde kullanılabilir. Örneđin, Manganez-Molibdenim.

İndirekt evrim itme sistemleri aynı tip direkt çevrim itme sistemlerinden daha bűyűktűr. Fakat indirekt çevrim itme sistemlerinin hacimleri řimdiki mevcut PWR sistemlerine nispeten daha da kűűltűlebilir. Tűm tűrbo makineler, ısı deđiřtiricileri ve elektrik jeneratűrleri ulařılabilir yerlerde olduđu için ve ortalama merkez sıcaklıđı dűřűk merkez giriř sıcaklıđı nedeni ile dikkate deđer bir seviyede direkt çevrimden dűřűk olduđundan indirekt çevrim portatileri için cezbedicidir. (Yan ve Lidsky, 1991)



Tablo 6.3. Şekil 6.6'daki İndirekt Brayton Çevrimine ait Değerler (Yan ve Lidsky, 1991)

İndirekt Brayton Çevrimi		
IHX verimi		%93
Isı Değiştirici Verimi		%90
Türbin Verimi		%91
Kompresör verimi		%91
Toplam Basınç Düşüşü (Birincil)		%2
Toplam Basınç Düşüşü (İkincil)		%7,2
Vantilatör Gücü		1 MW
Basınç Oranı		6
Çevrim Verimi		%44
Reaktör Gücü		86,9 MW
Bölge	Sıcaklık °C (°F)	Basınç MPa(psi)
<i>Birincil Döngü</i>		
HTGR Çıkışı (7)	850 (1562)	7,00 (1016)
IHX Çıkışı (8)	325 (617)	6,90 (1001)
<i>İkincil Döngü</i>		
Türbin Girişi (4)	810 (1490)	7,20 (1045)
Türbin Çıkışı (5)	304 (579)	1,28 (186)
Ön Soğutucu Girişi (6)	140 (284)	1,247 (181)
Kompresör Girişi (1)	30 (86)	1,24 (180)
Kompresör Çıkışı (2)	122 (252)	7,53 (1093)
IHX girişi (3)	285 (545)	7,44 (1080)

Ayrıca yabancı madde aktivasyonu mümkün olmadığından ikincil döngü için Helyum saflık gereksinimleri daha hafiftir. Bu sayede Brayton Çevrim komponentleri için basitleştirilmiş bakım teknikleri uygulanabilir.

6.4. NÜKLEER GÜÇ İLE TAHRİK EDİLEN DENİZALTILARDA KULLANILAN İTME SİSTEMİ KONTROLÜ

Donanmada kullanılan itme sistemleri için kısa aralıklı santral gücü ölçümleri kaçınılmazdır.

Başlıca iki tane kısa süreli kontrol düşünülmektedir. Bunlar;

- By-Pass Kontrol: Helyum Akışının bir kısmı türbin civarında By-Pass edilir.
- Inventory Kontrol: Helyum Çalışma basıncı özel bir güç seviyesine göre ayarlanır.

Inventory Kontrol düşük seviyelerinde Yüksek çevrim veriminin devamlılığını sürdürme gibi bir avantaj sağlar. Fakat yeterince hızlı değildir. Özellikle askeri manevralarda Negatif güç geçişlerinden dolayı hızı yetersiz kalmaktadır. By-Pass kontrolü daha hızlıdır. Ve askeri manevralar için yeterlidir. Ama çevrim verimleri düşüktür. Inventory kontrolünün yüksek gaz basıncı ve depolama gibi gereksinimleri vardır. Gerçek kontrol sistemlerinde türbin ve kompresör anlamlı derecede rahatsız edilmeden hızlı geçiş kontrol yeteneği sağlandığı müddetçe her iki metotta sistem veriminin devamlılığı için kullanılabilir. Her iki kontrol sistemi birlikte kullanılarak (Manevra için By-Pass Kontrol, verim devamlılığı için Inventory Kontrol) donanma itme sistemleri için etkileyici sistemler yapılabilir. (Gouge, 1991)

7. SONUÇ VE TARTIŞMA

Nükleer güç ile tahrik edilen gemiler ilk olarak 1959 yılı başlarında Ruslar tarafından geliştirilmiş ve bu gemiler Rus Donanması tarafından Kuzey Buz Denizinde buz kırıcılar olarak başarıyla kullanılmıştır. Nükleer reaktörlerin gemi tahrik sistemlerine adaptasyonu gerek donanmada kullanılan gemilerde gerekse sivil taşımacılıkta kullanılan gemilerde bazı avantajlar sağlamıştır.

Nükleer gücün gemi tahrik sistemlerinde kullanılması gemilere yakıt ikmali yapmadan uzun süre boyunca dünya denizlerinde uzak mesafelere serbestçe gidebilme avantajı getirmiştir. Ayrıca gıda taşımacılığında kullanılan kuru yük gemilerinde reaktörde fisyon sonucu oluşan kararsız atomların yaydığı gama radyasyonu kullanılarak çabuk bozulabilecek gıdaların gama ışınları ile uygun dozda ışınlanmasıyla yiyeceklerin içindeki çürümeyi sağlayan bakteri mikro organizmaların etkisiz hale getirilmesi sağlanarak yiyeceklerin taze bir şekilde nakli mümkün olmaktadır.

Bununla birlikte nükleer güç ile tahrik edilen su üstü gemiler için bazı dezavantajlarda söz konusudur. Bu dezavantajlar;

- Yüksek maliyet: Nükleer güç ile tahrik edilen gemilerin maliyet fiyatı fosil yakıtla çalışan gemilerin maliyet fiyatının yaklaşık 3 mislidir. Bunun sebebi nükleer güç ile tahrik edilen tahrik sistemlerin yaygın olarak üretilmemesi ve istenilen güç oranlarının normal reaktörlerde kullanılan makinelere kıyasla daha küçük boyutlarda olma gereksinimleridir.
- Bu gemilerde çalışacak elemanların özel eğitilmiş olmaları gerekmektedir. Dolayısıyla bu durum personel için yapılması gereken harcamayı %9 ile % 14 oranında attırmaktadır.
- Nükleer güç ile tahrik edilen ticari gemilerin sigorta masrafları fosil yakıtla çalışan gemilere kıyasla daha fazladır.
- Gemilerin radyoaktif kısımlarının bakımı ve tamiri diğer kısımlara nazaran daha özeldir. Bu daha fazla tamir masrafı gerektirmektedir.

- Limanlar, Nükleer güç ile tahrike edilen gemilerden daha fazla ücret almaktadır ve her liman bu gemileri kabul etmemektedir.

Nükleer güç ile tahrik edilen ticari gemiler için söz konusu olan bu dezavantajlar için tamamı temelde yüksek maliyet getiren engellerdir. Dünyadaki fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması ve son yıllarda fosil yakıtlarının kullanımının hızlı bir şekilde artması daha şimdiden alternatif enerji kaynaklarının araştırılması gündeme getirmiş ve bu alanda ciddi çalışmalar yapılmaya başlanmıştır.

Dünya denizlerinde kullanılan gemiler buhar ve dizel tahrik sistemleri olarak dizayn edilmiş ve geliştirilmiştir. Bu gemilerin dünya denizlerinde yayın olarak kullanılmasını ve gelişen teknolojinin b sistemleri desteklemesi şu an için kullanılan fosil yakıtlı tahrik sistemleri maliyet açısından daha avantajlı konuma getirmiştir. Gemilerde kullanılan nükleer tahrik sistemleri gelişen teknoloji ile desteklenirse ve bu gemilerde kullanılan komponentlerin maliyeti seri üretim ile şu an da kullanılan komponentlerin maliyet fiyatları seviyesine çekilebilirse ve bu gemilerle ilgili lisans prosedürlerinde anlamlı düzenlemeler yapıldığında nükleer tahrik sistemleri günümüzde kullanılan dizel tahrik sistemlerine göre daha avantajlı hale gelebilir.

Donanmada kullanılan nükleer tahrik sistemleri, 30 yılı aşkın süredir kullanılmaktadır. Donanmada kullanılan nükleer tahrik sistemleri, daha çok denizaltı taarruz gemilerinde kullanılmıştır.

Denizaltılarda istenilen özellikler;

- Yüksek hız ve manevra kabiliyeti
- Sessizlik
- Uzun süre su altında kalabilme

olarak sıralanabilir. Dizel motorların çalışabilmeleri için oksijene ihtiyaç vardır. Bu oksijen ihtiyacı denizaltılar için en önemli problemlerden biridir. Su altında dizel motorların kullanılamaması nedeniyle denizaltılarda yüksek kapasiteli ve büyük hacim kaplayan akü sistemleri kullanılmaktadır. Denizaltılarda kullanılan akü sistemi sessizlik açısından çok avantajlıdır. Bununla birlikte kullanılan aküler denizaltıların uzun süre su altında kalmalarını sağlayacak kadar elektrik enerjisini depolayamamaktadır.

Denizaltılarda istenilen özelliklerin sağlanması açısından nükleer tahrik gücü, denizaltıları çok avantajlı konuma getirmektedir. Bugüne kadar inşa edilen nükleer güç ile tahrik edilen denizaltılarda PWR'ler kullanılmıştır. PWR'ler hem çok ağır hemde çok yer kaplamaktadır. İtici sistemler ve makine aksamı, nükleer taarruz denizaltıların iç hacminin yaklaşık %50'sini kaplar. Buna karşılık yüksek hız, deniz altında uzun süre kalabilme ve sessiz olmaları sebebiyle PWR'ler denizaltılarda kullanılmıştır.

Eğer denizaltılarda büyüklük ve maliyet açısından anlamlı küçültmeler yapılmak istenirse denizaltıların ya görev gereksinimleri hafifletilmeli ya da yeni teknolojiler üzerinde durulmalıdır. Bu maksatla, fiziksel hacmi küçültmek için yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörlerin (HTGR) kullanılması önerilmektedir. Bu teknoloji 30 yıl önce denizaltı tahrik sistemleri için düşünülmüştür. Fakat o günkü teknoloji HTGR'lerin deniz altılarda anlamlı güç seviyelerinde çalışmalarına izin vermemiştir.

Bu süreç içerisinde nükleer yakıt performansının artması, gaz türbini materyallerinin yüksek sıcaklıklarda çalışabilir hale getirilmesi, gazdan gaza ısı değiştiricilerin geliştirilmesi ve kompresör verimlerinin artırılması HTGR'lerin günümüzde denizaltı tahrik sistemlerinde kullanılabilmelerini mümkün kılmıştır.

Teknolojideki bu gelişmeler sayesinde PWR'ler yerine yüksek sıcaklıklı gaz reaktörler soğutmalı reaktörler (HTGR) denizaltı tahrik sistemleri için cazip hale gelmiştir. HTGR'ler denizaltı tahrik sistemlerine kapalı Brayton Direkt Çevrimi olarak adapte edildiğinde kapalı çevrimin ara elemanlarının az oluşu ve soğutucu akışkan olarak Helyum gazı kullanılması türbin ve ısı değiştiricilerinin boyutlarının küçülmesi ve dolayısıyla denizaltı içinde işgal edilen hacmin azalması sebebiyle Brayton Direkt Çevriminin denizaltı tahrik sistemleri için doğal bir çekiciliği vardır.

Bununla birlikte reaktör ile türbo makinelerin aynı yerde bulunması bakım, onarım ve güvenlik açısından pek istenen bir durum değildir. Bunun yerine denizaltı tahrik sistemleri için birincil ve ikincil devreden oluşan Endirekt Brayton Çevrimi düşünüldüğünde reaktör ayrı bir bölmede, ısı değiştirici, türbin, kompresör ve jeneratör ayrı bir bölmede olacak, dolayısıyla radyoaktif olan reaktör bölümü ayrı, radyoaktif olmayan diğer bölümler ayrı olacağından türbo makinelerin bakımı kolaylaşacak ve sistem daha kullanışlı bir hal alacaktır.

Nükleer güç ile tahrik edilen denizaltılar için düşünülen Endirekt Kapalı Brayton Çevrimi, Direkt Kapalı Brayton Çevriminden daha fazla yer kaplar. Fakat bakım, onarım ve güvenlik için sunulduğu avantajlar Endirekt Kapalı Brayton Çevrimini daha cazip kılmaktadır.

Sistem Geliştirme Problemleri

Kapalı Brayton Çevrimli santraller için bazı donanım ve geliştirme problemleri;

1. HTGR merkez dizaynının yaşam süresi, güç yoğunluğu ve geçiş gereksinimleri açısından askeri uygulamaları karşılayabilmesi için geliştirilmelidir.
2. Yüksek hızlı basınç türbinine 12000-17000 Hz hız sağlayabilmek için yüksek güç türbo makineleri geliştirilmelidir.
3. Yüksek basınçta ve makul basınç düşüşlerinde %90-%95 verimde çalışabilecek ısı dönüştürücüleri gereklidir.
4. Türbo makinelerdeki ve gaz reaktörlerindeki rahatsızlıkları minimize ederken iyi geçiş cevabı verilebilecek makul hacimli güvenilir ve verimli kontrol sistemlerinin dizayn edilmesi gerekmektedir.
5. Denizaltının iç hacmini en verimli şekilde kullanabilmek için bakım şartları da göz önüne alınarak santralin taslağı geliştirilmelidir.
6. Makul motor ve jeneratör verimleri olan ve diğer deniz altı sistemlerine entegre edilebilir gelişmiş tahrik sistemleri geliştirilmelidir.
7. Uygun ses izolasyonunun sağlanması ve titreşimi azaltmak için çalışmalar yapılmalıdır.

Yukarıda anlatılan geliştirme uygulamaları tatmin edicidir. Ve bundan 30 yıl önce donanma nükleer gücü öncülerinin ilk tahrik sistemlerini kurarken karşılaştığı ve çözdüğü problemlere benzerdir. Sonuç olarak HTGR'ler Kapalı Brayton Çevrimi ve tüm elektrik tahrik sistemleri ile birlikte çalıştırıldığında gelecekte yüksek santral güç yoğunluklu deniz altı sistemleri oldukça geçerli olacaktır. Bu görüşleri destekleyen yatırımlar yapıldığında bu seçenek gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

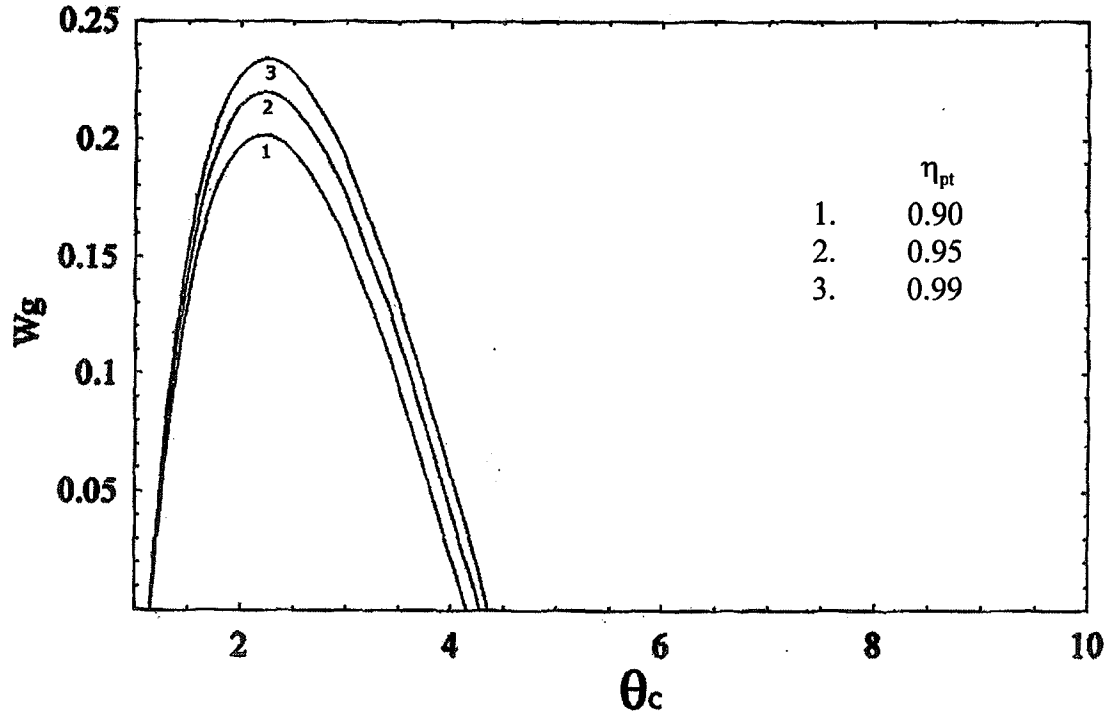
- Bammert, K. and Ruhbach, I., 1971, The Nuclear Power Gas Turbine, Paper 2.4-96 of the Eighth World Energy Conference, June 1971**
- Captein Michael and J., Gouge., 1995, Closed Cycle Gas Turbine Nuclear Power Plant for Submarine Propulsion, Naval Engineers Journal, November 1995**
- Crouch, H.E., 1960, Nuclear Ship Propulsion, Cornell Marytime Press, Cambridge**
- Çetinkaya, S., 1999, Gaz Türbinleri Nobel Kitabevi, Ankara, 1999**
- Dade, T.E., 1994, Advance Electric Propulsion, Power Generation, And Power Distribution, Naval Engineers Journal, March 1994**
- Eyice, S., 1982, Gaz Türbinleri, Ankara Devlet Mimarlık Mühendislik Akademisi**
- Gouge, M.J., 1991, HTGR Gas türbine Power Plant for Submarine Propulsion in the 21st Century The Submarine Review, July, 1991**
- IAEA., 2001., Current Status and Future Development of Modular High Temperature Gas Cooled Reactor Technology, Printed by the IAEA in Austria, February, 2001**
- Jeckson and Harry, A., 1983, Submarine Parametrics, Paper Presented to the Royal Institute of Naval Architects, London, Englang, May 1983**
- Krusemann, J.P., 1971, Comparitive Study of Nuclear and Conventional Propulsion for Large Container Ships, Den Hacc: Foundation Nuclear Propulsion of Merchantment.**
- Khlopin, N.S. and Zotov, A.P., 1997, Merchant Marine Nuclear-Powered Vessels, Russain Research Center, Kurchator Instituate, 123182 Moscow, Russain Federation**
- L.G. Sage and A.A.Sarkisov., 1996, Nuclear Submarine Decommissioning and Related Problems Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands.**
- Rains, D.A. and Mitchell, K.A., 1993, Nuclear vs. Non-Nuclear Attack Submarine Power Plants, Naval Engineers Journal, May, 1993**
- Şahin B., Kodal A. and Oktem A. S., 1999, J. Phys. D: Appl. Phys. 32 1832-1841.**

Todreas, E.N. and Kazimi, S., 1990, Nuclear Systems 1, 1990

**Vickery, B., 1997, Nuclear Propulsion for Submarines & Surface Vessels, SEARCH, Vol.28,
No.7 August 1997**

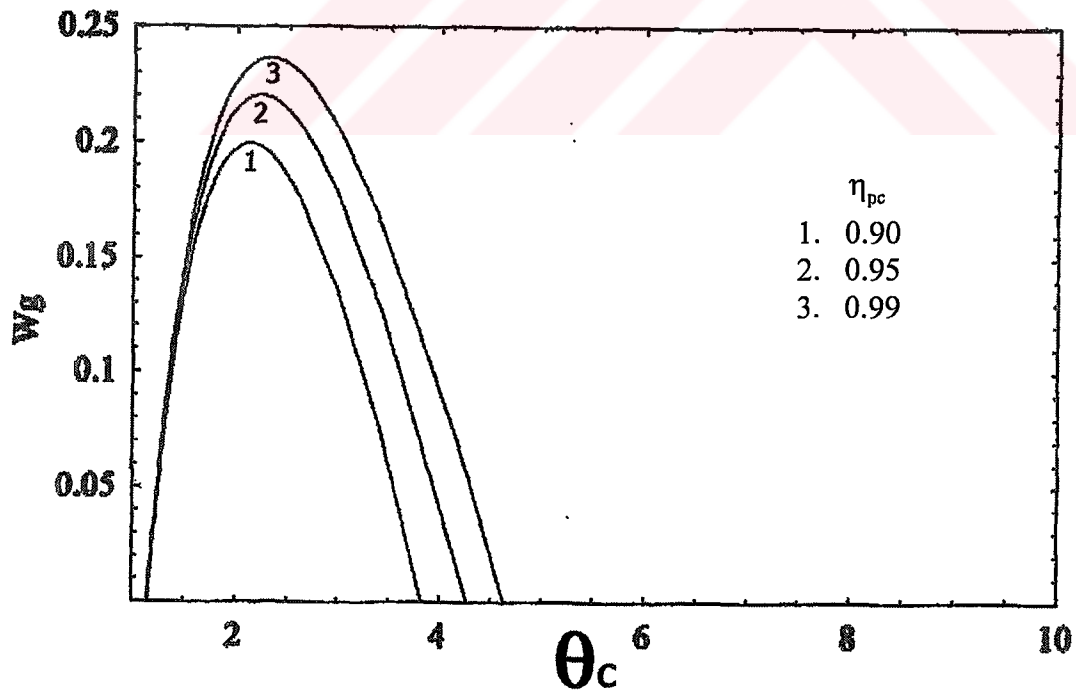
**Yan, X. and Lidsky, L.M., 1991, éMGR_GTI: An Indirect Closed Cycle MGR Gas Turbine
Power Plant for Near Yerm Deployment, MIT Report MITNPI-TR040, August,
1991**





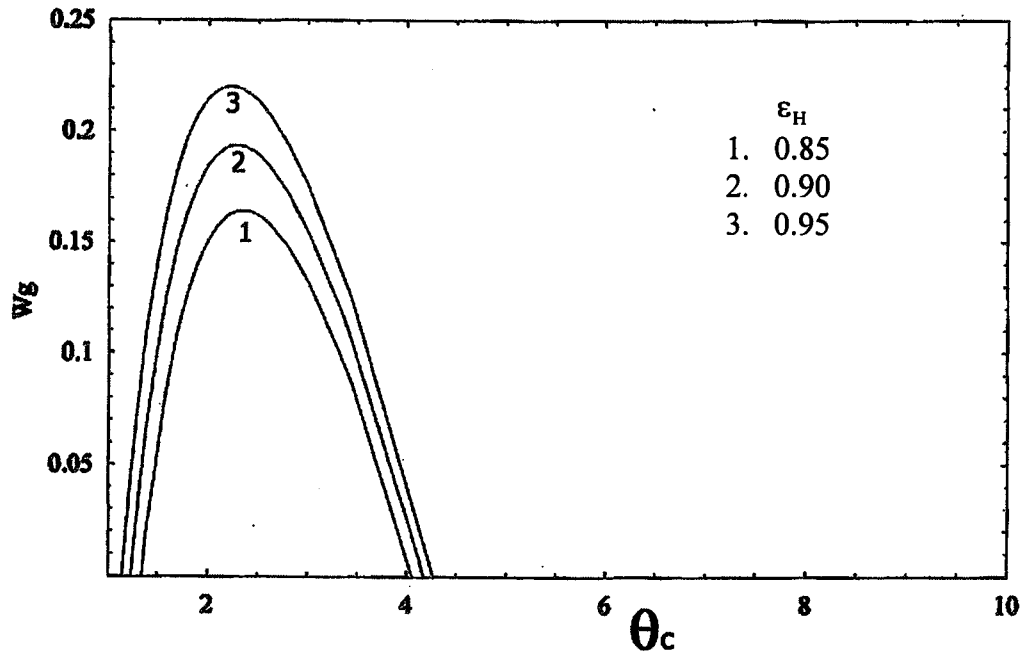
Şekil A.1. Boyutsuz gücün, türbin politropik verimi η_{pt} parametresine göre değişimi

$$(\epsilon_H = 0.95, \epsilon_L = 0.95, \eta_{pc} = 0.90, \tau = 0.2)$$



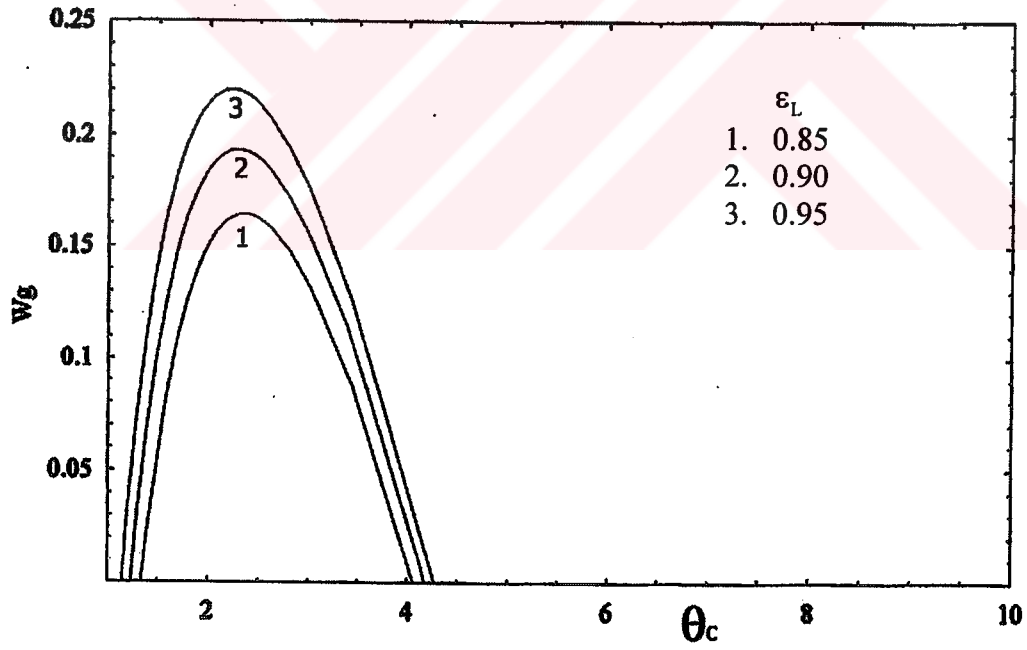
Şekil A.2. Boyutsuz gücün, kompresör politropik verimi η_{pc} parametresine göre değişimi

$$(\epsilon_H = 0.95, \epsilon_L = 0.95, \eta_{pt} = 0.95, \tau = 0.2)$$



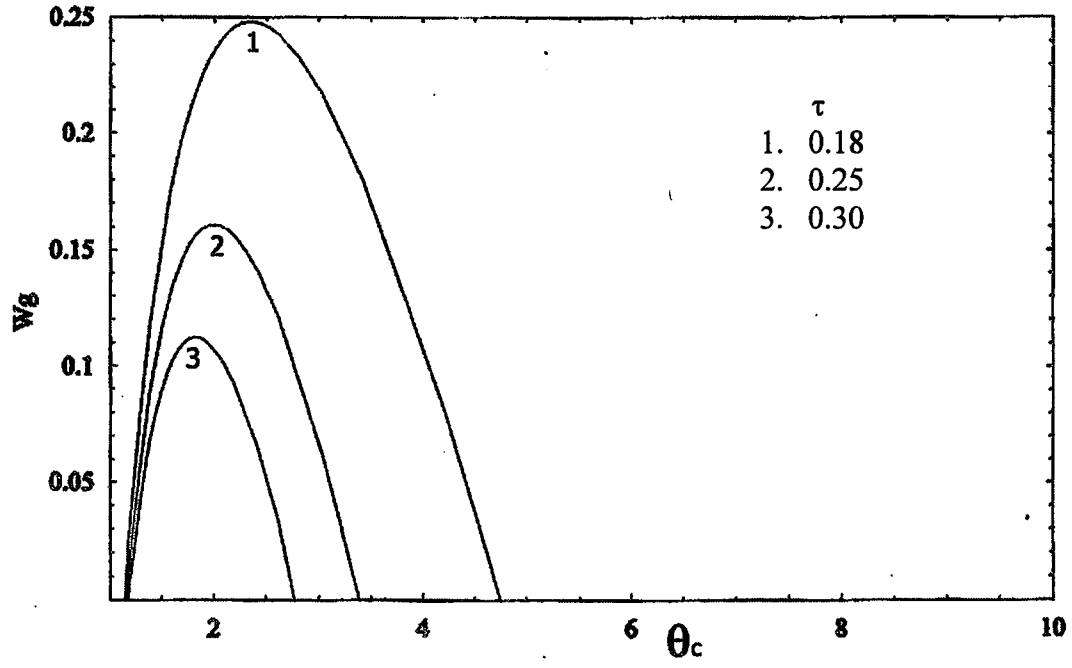
Şekil A.3. Boyutsuz gücün, ısı girişindeki basınç oranı ϵ_H parametresine göre değişimi

$$(\epsilon_L = 0.95, \eta_{pt} = 0.95, \eta_{pc} = 0.95, \tau = 0.2)$$



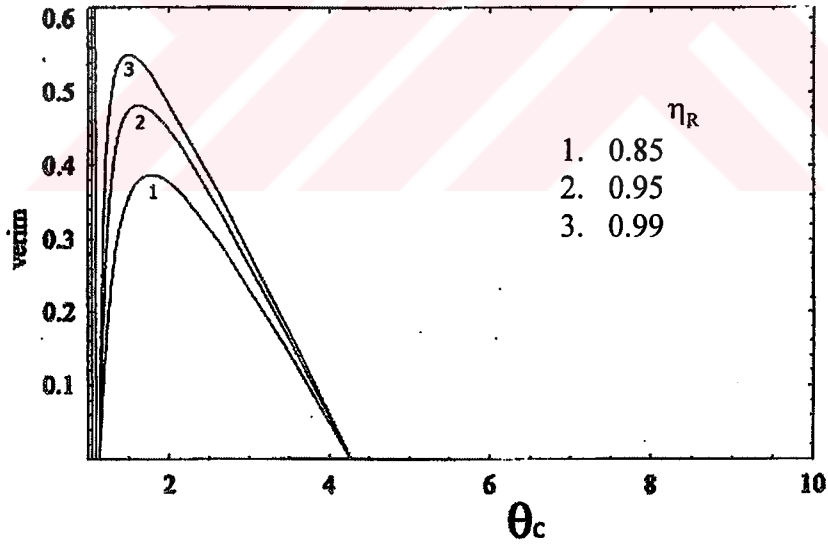
Şekil A.4. Boyutsuz gücün, ısı çekilişindeki basınç oranı ϵ_L parametresine göre değişimi

$$(\epsilon_H = 0.95, \eta_{pt} = 0.95, \eta_{pc} = 0.95, \tau = 0.2)$$



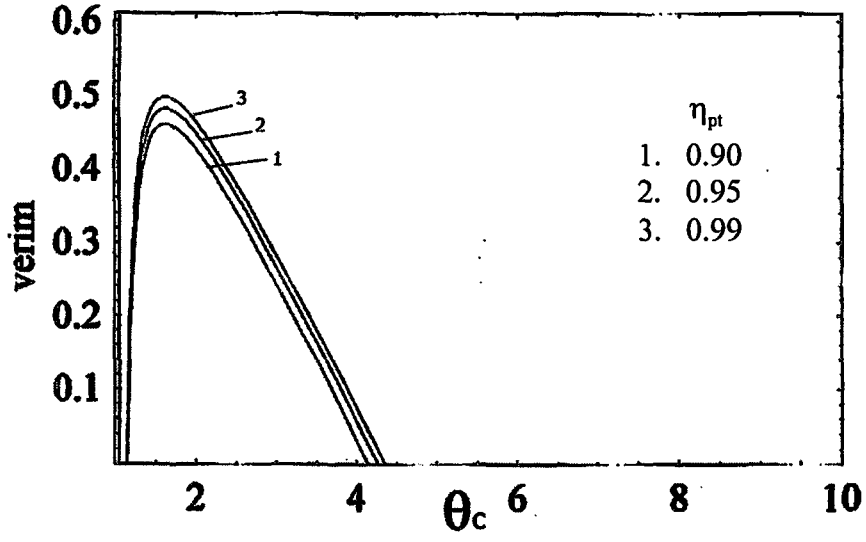
Şekil A.5. Boyutsuz gücün, çevrimin maksimum ve minimum sıcaklıklara oranı τ parametresine göre değişimi

$$(\varepsilon_H = 0.95, \varepsilon_L = 0.95, \eta_{pc} = 0.95, \eta_{pt} = 0.95)$$



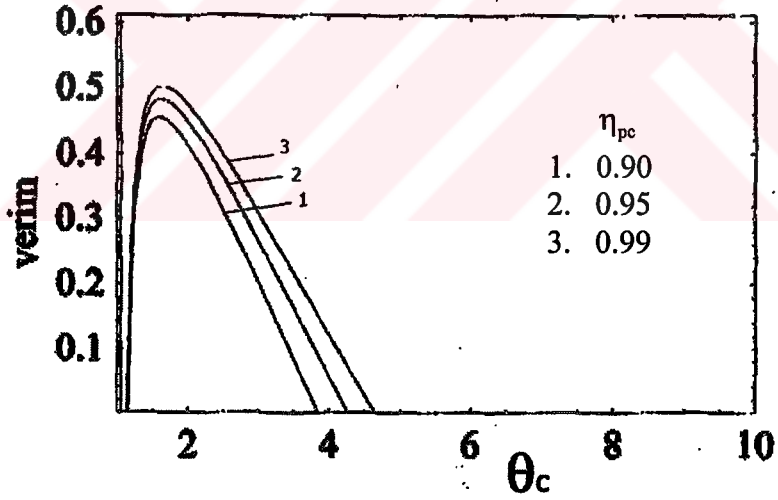
Şekil A.6. verimin, ısı değiştirici verimi η_R parametresine göre değişimi

$$(\varepsilon_H = 0.95, \varepsilon_L = 0.95, \eta_{pt} = 0.95, \eta_{pc} = 0.95, \tau = 0.2)$$



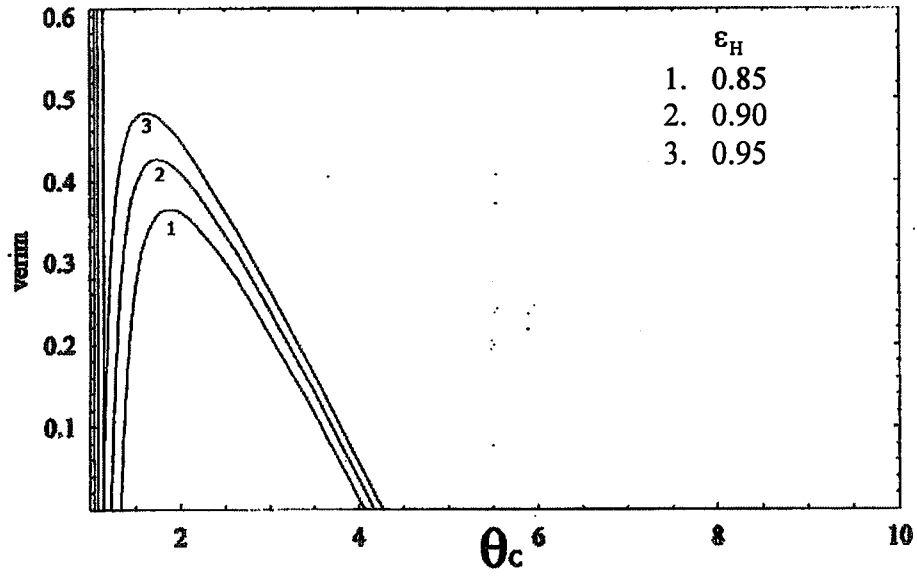
Şekil A.7. verimin, türbin politropik verimi η_{pt} parametresine göre değişimi

$$(\epsilon_H = 0.95, \epsilon_L = 0.95, \eta_{pc} = 0.90, \eta_R = 0.95, \tau = 0.2)$$



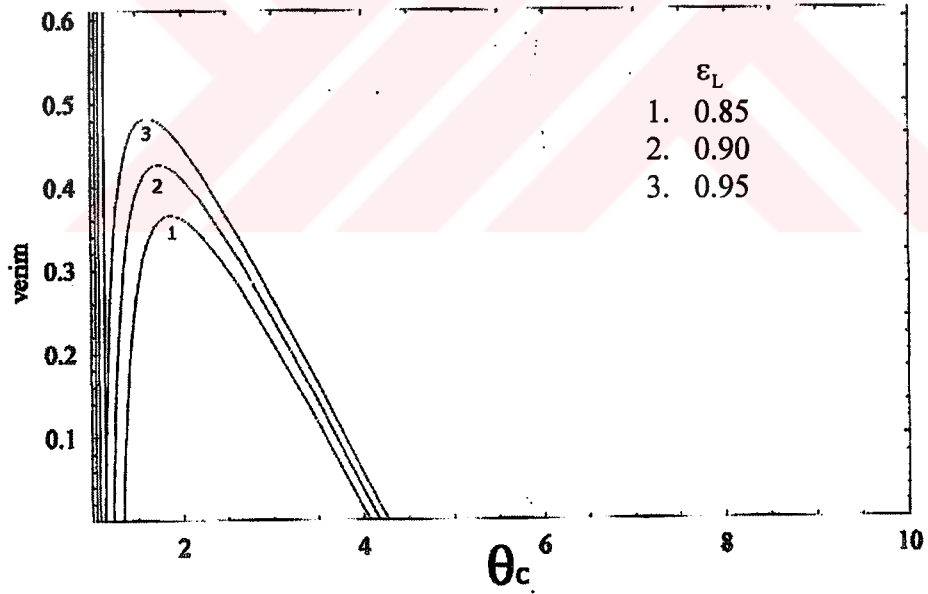
Şekil A.8. verimin, kompresörün politropik verimi, η_{pc} parametresine göre değişimi

$$(\epsilon_H = 0.95, \epsilon_L = 0.95, \eta_{pt} = 0.95, \eta_R = 0.95, \tau = 0.2)$$



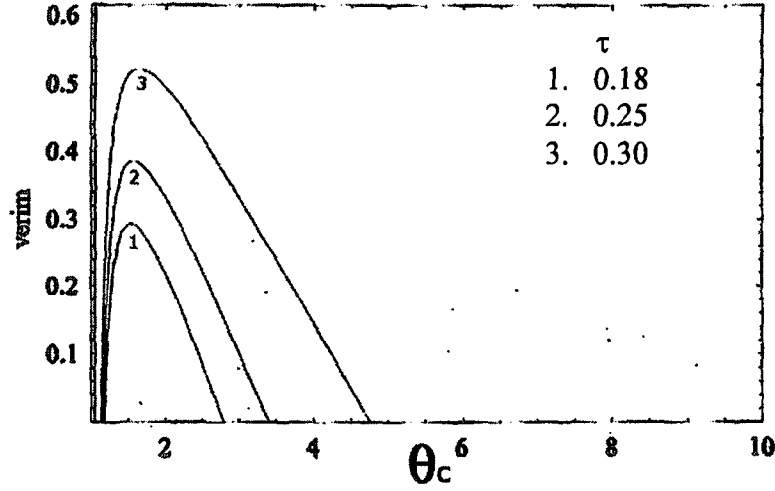
Şekil A.9. verimin, ısı girişindeki basınç oranı ϵ_H parametresine göre değişimi

$$(\epsilon_L = 0.95, \eta_{pt} = 0.90, \eta_{pc} = 0.95, \eta_R = 0.95, \tau = 0.2)$$



Şekil A.10. verimin, ısı çekilişindeki basınç oranı ϵ_L parametresine göre değişimi

$$(\epsilon_H = 0.95, \eta_{pt} = 0.95, \eta_{pc} = 0.95, \eta_R = 0.95, \tau = 0.2)$$



Şekil A.11. verimin, çevrimin maksimum ve minimum sıcaklıkları oranı τ parametresine göre değişimi

$$(\varepsilon_H = 0.95, \varepsilon_L = 0.95, \eta_{pt} = 0.95, \eta_{pc} = 0.95, \eta_R = 0.95)$$

Şekil A.1'de net özgül gücün, (W_g) kompresör basınç oranı, (θ_c) ile değişiminde diğer parametrelerin sabit kalması halinde ($\varepsilon_H, \varepsilon_L, \eta_{pc}, \tau$), η_{pt} arttıkça, W_g 'nin arttığı görülmektedir.

Şekil A.2'de net özgül gücün, (W_g) kompresör basınç oranı, (θ_c) ile değişiminde diğer parametrelerin sabit kalması halinde ($\varepsilon_H, \varepsilon_L, \eta_{pt}, \tau$), η_{pc} arttıkça, W_g 'nin arttığı görülmektedir.

Şekil A.3'te net özgül gücün, (W_g) kompresör basınç oranı, (θ_c) ile değişiminde diğer parametrelerin sabit kalması halinde ($\varepsilon_L, \eta_{pc}, \eta_{pt}, \tau$), ε_H arttıkça, W_g 'nin arttığı görülmektedir.

Şekil A.4'te net özgül gücün, (W_g) kompresör basınç oranı, (θ_c) ile değişiminde diğer parametrelerin sabit kalması halinde ($\varepsilon_H, \eta_{pc}, \eta_{pt}, \tau$), ε_L arttıkça, W_g 'nin arttığı görülmektedir.

Şekil A.5'te net özgül gücün, (W_g) kompresör basınç oranı, (θ_c) ile değişiminde diğer parametrelerin sabit kalması halinde ($\varepsilon_H, \varepsilon_L, \eta_{pc}, \eta_{pt}$), τ arttıkça, W_g 'nin azaldığı görülmektedir.

Şekil A.6'da çevrimin veriminin, kompresörün basınç oranı (θ_c) ile değişiminde diğer parametrelerin sabit kalması halinde ($\varepsilon_H, \varepsilon_L, \eta_{pc}, \eta_{pt}, \tau$), η_R arttıkça, verimin arttığı görülmektedir.

Şekil A.7'de çevrimin veriminin, kompresörün basınç oranı (θ_c) ile değişiminde diğer parametrelerin sabit kalması halinde ($\varepsilon_H, \varepsilon_L, \eta_{pc}, \eta_R, \tau$), η_{pt} arttıkça, verimin arttığı görülmektedir.

Şekil A.8'de çevrimin veriminin, kompresörün basınç oranı (θ_c) ile değişiminde diğer parametrelerin sabit kalması halinde (ε_H , ε_L , η_R , η_{pt} , τ), η_{pc} arttıkça, verimin arttığı görülmektedir.

Şekil A.9'da çevrimin veriminin, kompresörün basınç oranı (θ_c) ile değişiminde diğer parametrelerin sabit kalması halinde (ε_L , η_{pc} , η_{pt} , η_R , τ), ε_H arttıkça, verimin arttığı görülmektedir.

Şekil A.10'da çevrimin veriminin, kompresörün basınç oranı (θ_c) ile değişiminde diğer parametrelerin sabit kalması halinde (ε_H , η_{pc} , η_{pt} , η_R , τ), ε_L arttıkça, verimin arttığı görülmektedir.

Şekil A.11'de çevrimin veriminin, kompresörün basınç oranı (θ_c) ile değişiminde diğer parametrelerin sabit kalması halinde (ε_H , ε_L , η_{pc} , η_{pt} , η_R), τ arttıkça, verimin azaldığı görülmektedir.

ÖZGEÇMİŞ

1974 yılında İzmit'te doğdu. Orta öğrenimini takiben İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü'ne girdi ve 1995 yılında mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Nükleer Enerji Enstitüsünde yüksek lisans öğrenimine başladı.

