



## Bir Savaş Gemisinde S-CO<sub>2</sub> Çevriminin Enerji Verimliliğine Etkisinin İncelenmesi

### *Effect of Using S-CO<sub>2</sub> Cycle on Energetic Efficiency for a Naval Ship*

Arif Emre ÖZGÜR<sup>1,\*</sup> Mustafa Utku ÖZGÜR<sup>2</sup> Volkan CEYLAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>İsparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32200, ISPARTA

<sup>2</sup>İsparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32200, ISPARTA

<sup>3</sup>Avrasya Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, 61000, TRABZON

#### Özet

Türkiye, cumhuriyetin ilanının yüzüncü yılı olan 2023 yılına kadar savunma sanayinde dışa bağımlılığı tamamen ortadan kaldırarak, silahlı kuvvetlerimizde ileri teknoloji savunma sistemleri kullanarak denizlerdeki kontrol ve hakimiyetini güçlendirmeyi amaçlamaktadır. Bununla birlikte diğer ülkelere bu teknolojileri pazarlayarak savunma sanayi sektöründe de söz sahibi ülkelerle rekabet edilebilir seviyelere ulaşmak istenmektedir. Bu çerçevede yapılan çalışmada MİLGEM (Milli Gemi) Projesi kapsamında milli imkanlarla üst düzey teknolojiye sahip olarak üretilen Ada sınıfı korvet gemilerinin güç tahrik sistemlerinden çıkan atık ısısından, bir S-CO<sub>2</sub> çevrimi ile elektrik enerjisi üretilmesi incelenmiştir. Güç sistemlerinin verilerinden yola çıkılarak, bir termodinamik model oluşturulmuştur. Modelin çözümü, belirli kabuller yapılarak, bir bilgisayar yazılımı (Engineering Equation Solver-EES) ile gerçekleştirilmiştir. Sistem verimindeki iyileşme ve üretilen gücün, gemi jeneratörlerinin kapasitelerine oranı belirlenmiştir. S-CO<sub>2</sub> sistemi ile 6.32 MW güç üretebileceği ve %31.3 ısı verim değerlerine ulaşabileceği gösterilmiştir. S-CO<sub>2</sub> sistemi, geminin sahip olduğu 4 dizel jeneratörden daha fazla elektriksel güç üretebileceği belirlenmiştir. Savaş gemileri özelinde, S-CO<sub>2</sub> çevrimlerinin performansını inceleyen bir çalışma literatürde mevcut değildir.

#### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 11.05.2022

Düzeltilme: 12.10.2022

Kabul: 19.10.2022

#### Keywords

S-CO<sub>2</sub>,

Gemi,

Termodinamik Analiz,

Atık Isı Geri Kazanımı,

Güç.

#### Anahtar Kelimeler

S-CO<sub>2</sub>,

Ship,

Thermodynamic

Analysis,

Waste Heat Recovery,

Power.

#### Abstract

By 2023, the centennial of the proclamation of the republic, Turkey aims to completely eliminate foreign dependency in the defense industry and to strengthen its control and dominance in the seas by using advanced technology defense systems in our armed forces. However, by marketing these technologies to other countries, it is desired to reach levels that can compete with the countries that have a say in the defense industry sector. In this study, the generation of electrical energy from the waste heat of the power propulsion systems of the Island class corvettes, which were produced with high technology with national means within the scope of the MİLGEM (National Ship) Project, was investigated with an S-CO<sub>2</sub> cycle. Based on the data of the power systems, a thermodynamic model was created. The solution of the model was realized with a computer software (Engineering Equation Solver-EES) by making certain assumptions. The improvement in system efficiency and the ratio of the generated power to the capacities of the ship generators were determined. It has been shown that with the S-CO<sub>2</sub> system, it can produce 6.32 MW of power and reach 31.3% thermal efficiency values. It has been determined that the S-CO<sub>2</sub> system can produce more electrical power than the 4 diesel generators owned by the ship. There is no study in the literature examining the performance of S-CO<sub>2</sub> cycles in warships.

## 1. GİRİŞ

MİLGEM projesi kapsamında milli olarak dizayn ve inşa edilen Ada sınıfı korvet gemisi ilk olarak 2011 yılında denize indirilmiştir. Bu tarihten günümüze kadar geçen sürede ulusal ve uluslararası standartlar göz önünde bulundurularak Deniz Kuvvetleri Komutanlığı envanterine kazandırılan korvet gemilerinde personelin çalışma koşulları ve konforuna büyük önem verilmekle geminin tasarımı geliştirilerek askeri ve teknolojik yenilikler yapılmaya devam edilmektedir (Deniz Harp Okulu, 2022). Gemi üzerindeki kritik sistemlerde de millilik gerçekleştirilerek stabilize makineli tüfek, düşük yakalanma olasılıklı radar, top atış kontrol sistemi, lazer ikaz sistemi ve manyetik iz azaltma sistemi gibi önemli çalışmalar yapılmaktadır. Bu bağlamda enerji verimliliği çalışmaları açısından gemilerde önemli kazanımlar elde edilebilir. Dizel motorlardan ve gaz türbinlerinden çıkan baca gazlarının sıcaklığı oldukça yüksektir. Bu gaz akışından ısı geri kazanımı yapılabilir ve elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilebilir. Buhar türbinlerinin boyutları ve buhar kullanımının risk oluşturması sebepleri ile savaş gemilerinde kombine çevrim uygulamaları yapılmamaktadır. Bununla birlikte, güç çevrimlerinde buhara alternatif olarak, karbondioksit (CO<sub>2</sub>) kullanımı gündeme gelmiştir. CO<sub>2</sub>, çalışma basınç ve sıcaklıklarında, su buharına göre daha yüksek yoğunluğa sahiptir. Ayrıca yanıcılık, zehirlilik ve maliyet kriterleri açısından uygun olması ve ozon tabakasına zarar vermemesi gibi önemli avantajlara sahiptir. CO<sub>2</sub>'in kritik sıcaklığı düşük, kritik basıncı ise yüksektir (31.1 °C ve 7377 kPa) (Span & Wagner, 1996). Bu sebeple, yüksek basınçlı transkritik çevrimler ile güç üretimi gerçekleştirilebilir. Bu strateji süper kritik CO<sub>2</sub> çevrimleri (S-CO<sub>2</sub>) olarak adlandırılmaktadır. Wright vd. (2018), yılında yaptıkları bir çalışmada, 15 MWe kapasiteli bir gaz türbini sisteminin atık ısısından faydalanan S-CO<sub>2</sub> çevriminin performansını incelemişlerdir. 15 MWe kapasiteli gaz türbini yapısına, S-CO<sub>2</sub> sisteminin eklenmesi ile 5 MWe ek kapasite elde edilebileceğini ve gaz türbinin net veriminin %35.2'den %47 düzeyine çıkabileceğini ifade etmişlerdir. Gemilerde atık ısının değerlendirilmesinin, atmosfere salınan CO<sub>2</sub> emisyonunda da %2 ila %6 oranında azalmaya sebep olacağı değerlendirilmektedir (Tatar & Özer, 2018). Dolayısıyla emisyon azaltılması ve enerji verimliliğinde artış hedefleri için gemilerde atık ısının değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Donanma gemilerinde elektrik üretmek için kullanılan jeneratörler de bulunmaktadır. Gemi tahrik sisteminin atık ısısını kullanarak elektrik üretmek mümkün iken elektrik üretmek için ayrı sistem kullanılmaktadır. Bir tesiste, güç ve ısı ihtiyacının ayrı sistemlerle üretilmesi durumunda, dizel yakıtlı kojenerasyon sistemine göre yakıt tüketiminin %34.8 oranında arttığı ifade edilmektedir (Abuşoğlu & Kanoğlu, 2009). Bununla birlikte, savaş gemilerinin bünyesinde, atık ısının değerlendirilmesine yönelik uygulamalar için gerekli hacmin oluşturulması güç olabilmektedir. Fakat S-CO<sub>2</sub> çevrimlerinde, CO<sub>2</sub>'in yüksek yoğunluğu, özellikle türbin boyutlarında dramatik bir azalmaya sebep olmaktadır. CO<sub>2</sub> türbinlerinin, bir buhar türbini yapısına (yüksek, orta ve alçak basınç türbinlerinden oluşan güç yapısı) göre 30 ila 35 kat daha kısa boyutlarda ve daha fazla mekanik güç elde edilebilecek nitelikte olduğu ifade edilmektedir. Ayrıca türbin rotor çapları da 10 kattan daha küçük ebatlarda olabilmektedir (Dostal vd., 2004). Bu durumda, savaş gemilerinde atık ısının değerlendirilmesi amacıyla, S-CO<sub>2</sub>

çevrimlerinin kullanılması mümkün olabilir. Böylelikle, geminin elektrik jeneratörleri daha düşük kapasitelerde çalıştırılabilir ve yakıt tasarrufu elde edilebilir. Elde edilen yakıt tasarrufu ile etkin görev menziline iyileşme sağlanabilir.

Savaş gemilerinde atık ısıyı değerlendirmek, bacadan çıkan egzoz gazı sıcaklığının da azaltılmasını mümkün kılar. Baca gazları sıcaklığının azaltılması, gemilerin kızılötesi güdümlü füzelere hedef olma olasılığını azaltır. Geminin ısı izi azaltılabilir ve böylelikle gemi savunması da iyileştirilebilir. Bunun için baca yerleşimleri farklılaştırılabilir ve baca gazları soğutulabilir (Bayram & Heperkan, 2012). Ergin ve Paralı, bir fırkateyn gemisi özelinde egzoz gazlarının yayılımını incelemişlerdir. Egzoz gazı sıcaklıklarının ve gaz çıkış hızının, gaz yayılımı açısından önemli olduğu vurgulanmıştır. Yapılan sayısal modelleme çalışmalarının sonuçları incelendiğinde, düşük egzoz gazı sıcaklıkları ile ısı izin fark edilebilirliğinin önemli oranda değiştiği görülmektedir (Ergin & Paralı, 2010). Bu çalışmalardan açık olarak görülmektedir ki savaş gemilerinde atık ısının değerlendirilmesinin, enerji ve emisyon açısından avantajları olduğu gibi geminin savunmasının güçlendirilmesi bakımından da faydaları söz konusudur. Bu çalışmada, MİLGEM Projesi kapsamında, üretilen korvet gemilerinin güç tahrik sistemlerinden çıkan atık ısısından, bir S-CO<sub>2</sub> çevrimi ile elektrik enerjisi üretilmesi incelenmiştir. Güç sistemlerinin verilerinden yola çıkılarak, bir termodinamik model oluşturulmuştur. Modelin çözümü bir bilgisayar programı ile gerçekleştirilmiştir. Sistem verimindeki iyileşme ve üretilen gücün, gemi jeneratörlerinin kapasitelerine oranı belirlenmiştir. Savaş gemileri özelinde, S-CO<sub>2</sub> çevrimlerinin performansını inceleyen bir çalışma literatürde mevcut değildir. Savaş gemileri termal izlerini azaltmak istemektedir. Bacadan atılan ısıyı, transkritik bir çevrim ile etkin olarak değerlendirmenin mümkün olduğu gösterilmiştir. Gemilerin termal izlerinin azaltılmasına katkı yapan ve geminin elektriksel gereksinimini karşılayacak yenilikçi bir tasarım önerilmiştir. Savaş gemilerinin yakıtlarını daha etkin kullanmalarının ve menzil artışı elde etmelerinin mümkün olduğu gösterilmiştir.

## **2.TEORİK ANALİZ**

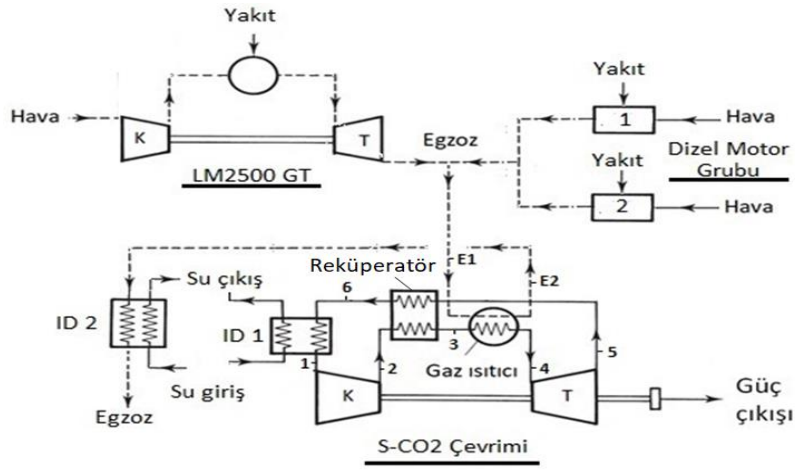
### **2.1. Sistem Yapısı**

MİLGEM Ada Sınıfı Korvet Projesi kapsamında üretilen gemilerin görünümü Şekil 1’de sunulmuştur. Bu proje kapsamında üretilen gemilerde, Kombine Dizel ve Gaz (KODAG) İtki Sistemi kullanılmıştır. KODAG Sisteminde 2 adet dizel motor ve 1 adet gaz türbini yer almaktadır. Dizel motorların her biri 4300 kW güç üretirken, gaz türbini ise 37000 kW güç üretmektedir. Bununla birlikte, geminin elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanması amacıyla, 600 kW gücünde 4 adet dizel jeneratör bulunmaktadır (STM, 2022; Mehmet, 2018; Geaviation, 2022a). KODAG Sisteminin egzoz gazı debisi ve sıcaklığı dikkate alındığında, egzoz gazı atık ısısından, S-CO<sub>2</sub> sistemi ile elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada, Şekil 1’de gösterilen geminin KODAG Sistemi egzoz gazı şartları dikkate alınarak, reküperatörlü bir S-CO<sub>2</sub> güç çevriminin etkinliği analiz edilmiştir.



**Şekil 1:** MİLGEM ada sınıfı korvet projesi kapsamında üretilen gemilerin görünümü (STM, 2022).

Çalışmada incelenen, itki sistem yapısındaki, atık ısının değerlendirilmesine dair önerilen yapının şematik çizimi, Şekil 2’de sunulmuştur.



**Şekil 2:** İtki sistem yapısındaki atık ısı ile çalışan S-CO<sub>2</sub> yapısının şematik çizimi.

Şekil 2’de görülen gaz türbini ve dizel motoru egzoz gazları, ortak bir kanaldan S-CO<sub>2</sub> çevrimine aktarılmaktadır. Seyir esnasında, motorların kapasiteleri değiştirildiğinde, egzoz gaz debisi ve sıcaklıkları da değişmektedir. Bu durumda S-CO<sub>2</sub> çevriminin, farklı atık ısı kapasiteleri için üretim gerçekleştirebilir olmasını gerekli kılmaktadır. Bu tür Brayton Çevrimli yapıların, değişken güç durumlarında kapasiteleri hızlıca değiştirilebilir. Esnek bir güç üretim stratejisi gerçekleştirmek mümkündür. Bu sebeple, egzoz ısıl yükünün değişmesi, S-CO<sub>2</sub> yapısının da kapasitesinin uyumlu bir değişim göstermesi açısından sorun teşkil etmez. Egzoz gazları (E1), S-CO<sub>2</sub> çevrimindeki gaz ısıtıcısında, CO<sub>2</sub> ile ısı transferi gerçekleştirir. Egzoz gazları (E2) buradan çıkınca 2 numaralı ısı değiştiriciye (ID2) gönderilir. Burada deniz suyuna ısı aktarımı yapar ve sıcaklığı düşürülerek atmosfere bırakılır. Bu yapının sistem performansına etkisi, egzoz gazlarının basınç kaybı ile sınırlıdır. ID2 ile hedeflenen etki geminin termal izini azaltmaktır. Basınç kayıpları ve yaşanabilecek işletme sorunları, ID2 yapısından vazgeçilme stratejisini de gerektirebilir.

Şekil 2’de verilen S-CO<sub>2</sub> yapısı incelendiğinde, kompresör çıkışında bir ısı değiştirici (ID1) görülmektedir. Bir kapalı çevrim olan S-CO<sub>2</sub> yapısının kompresörü girişindeki CO<sub>2</sub> sıcaklığı, deniz suyu ile düşürülür. Bu sayede sıkıştırma işi azaltılabilir. Karadeniz, Marmara, Ege ve Akdeniz deniz suyu ortalama sıcaklıkları, 2017 yılı verilerine göre 15.5 °C, 16.1 °C, 18.7 °C ve 21.6 °C olarak

hesaplanmıştır (MGM, 2022). Bu sıcaklıklar, deniz suyunun ısı transferi için etkin bir kaynak olarak kullanımını mümkün kılmaktadır. Bu çalışmada, en yüksek değer olan, Akdeniz için ölçülen 21.6 °C değeri deniz suyu sıcaklığı olarak alınmıştır. Kompresörde basınçlandırılan CO<sub>2</sub>, reküperatördeki ön ısıtma işlemi sonrasında, gaz ısıtıcıya aktarılır. Gaz ısıtıcıda, egzoz gazlarından ısı transferi gerçekleştiren CO<sub>2</sub> türbine gönderilir. Türbinde genleşen ve güç üretiminde kullanılan CO<sub>2</sub>, ID2'ye ulaşır ve çevrim bu şekilde tamamlanır. Güç çıkışına bağlanan bir jeneratör ile elektrik üretimi gerçekleştirilir. Ada Sınıfı MİLGEM Savaş Gemilerinde kullanılan, gemi tahrik sistemi bileşenleri için tanımlanan egzoz gazı sıcaklığı ve debisi, Tablo 1'de verilmiştir. Elde edilen veriler, ilgili standartlara göre yapılan ölçümlerin sunulduğu, sistem bileşenlerinin kataloglarından temin edilmiştir.

**Tablo 1:** Ada sınıfı MİLGEM savaş gemilerinde kullanılan güç üretim sistemi bileşenleri için tanımlanan egzoz gazı sıcaklığı ve debisi (Geaviation, 2022b; MTU, 2022).

	Egzoz gazı sıcaklığı (°C)	Egzoz gazı debisi
LM2500 Gaz Türbini	549	93 kg/s
Dizel Motor	440	5.03

Hava standardı kabulleri yapılarak, 2 adet dizel motor ve 1 adet gaz türbini sistemi için ortak egzoz gazı sıcaklığı ve toplam egzoz gaz debisi, bir bilgisayar programı aracılığıyla, hesaplanmıştır (MGM, 2022). Hesaplama kullanılan termodinamik özellikler Tablo 2'de sunulmuştur.

**Tablo 2:** Hava standardı kabulleri ile hesaplanan egzoz gazı bilgileri.

	LM2500 Gaz Türbini	Dizel Motor	Hesaplanan Değerler
Sıcaklık (°C)	549	440	538.5
Entalpi (kJ/kg)	846.7	727.8	835.1
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )*	0.4237	0.4885	0.4292
Kütleli debi (kg/s)	93	5.03	103.06

\*Gaz basıncı 100 kPa alınmıştır.

KODAG itki stratejisine ek olarak, sadece iki dizel motor veya sadece tek gaz türbini ile de seyir gerçekleştirilebilmektedir. Gaz türbininin de değişik kapasitelerde yük alacağı dikkate alındığında, S-CO<sub>2</sub> sisteminin çalışma şartlarında da değişiklik gözlenecektir. Farklı kapasitede yük alma durumlarında ve farklı kısmi yük regülasyon stratejilerinde, 4 farklı gaz türbinin egzoz gazı sıcaklıklarının ve debilerinin değişimi ile S-CO<sub>2</sub> çevrim bileşenlerine dair parametreler literatürde sunulmuştur (Ancona vd., 2021). Literatürdeki kabuller de dikkate alınarak, analiz için belirlenen sistem parametreleri Tablo 3'te verilmiştir. Analiz çalışmasında, sistem bileşenleri içindeki basınç kayıpları ihmal edilmiştir. Bu kayıpların %1 mertebesinde olduğu değerlendirilmektedir (Ancona vd., 2021).

**Tablo 3:** Analiz için kabul edilen sistem parametreleri.

Parametre	Değer
ID1 ve ID2 etkinlikleri	0.80
Rekuperatör etkinliği	0.80
Gaz ısıtıcı etkinliği	0.85
Türbin izentropik verimi, $\eta_T$	0.90
Kompresör izentropik verimi, $\eta_K$	0.85
Mekanik verim, $\eta_M$	0.99
Egzoz gazı sıcaklığı (°C)	440 – 540
Türbin giriş basıncı (MPa)	30
Türbin çıkış basıncı (MPa)	7.5
Kompresör giriş sıcaklığı (°C)	35
Egzoz gazı kütleli debi (kg/s)	100
Deniz suyu sıcaklığı (°C)	21.6

## 2.2. Enerji Analizi

Şekil 2’de S-CO<sub>2</sub> sisteminin bileşenlerinin giriş ve çıkışları, 1 ile 6 numaralarıyla tanımlanmıştır. Sistem bileşenleri içindeki basınç ve ısı kayıpları ihmal edilmiştir. Bununla birlikte, akışkanların kinetik ve potansiyel enerji terimleri de denklemlerin kapsamı dışında tutulmuştur. Bu kabuller ve seçilen parametreler sonucunda, sistem bileşenlerinin enerji analizlerine ait denklemler Tablo 4’te sunulmuştur.

**Tablo 4:** Sistem bileşenlerinin enerji analizlerine ait denklemler.

	Enerji Dengesi	Verim – Etkinlik
CO <sub>2</sub> Kompresörü	$\dot{W}_K = \dot{m}_{CO_2} \cdot (h_2 - h_1)$	$\eta_K = \frac{(h_{2S} - h_1)}{(h_2 - h_1)}$
Rekuperatör	$\dot{Q}_{REK} = \dot{m}_{CO_2} \cdot (h_5 - h_6)$ $= \dot{m}_{CO_2} \cdot (h_3 - h_2)$	$\epsilon_{REK} = \frac{T_3 - T_2}{T_5 - T_2}$
Gaz Isıtıcı	$\dot{Q}_{GI} = \dot{m}_{EGZoz} \cdot (h_{E2} - h_{E1})$ $= \dot{m}_{CO_2} \cdot (h_4 - h_3)$	$\epsilon_{GI} = \frac{T_4 - T_3}{T_{E1} - T_{E2}}$
CO <sub>2</sub> Türbini	$\dot{W}_T = \dot{m}_{CO_2} \cdot (h_4 - h_5)$ $\dot{W}_T = \dot{W}_K / \eta_M$	$\eta_T = \frac{(h_4 - h_5)}{(h_4 - h_{5S})}$
Isı Değiştirici 1	$\dot{Q}_{ID1} = \dot{m}_{SU} \cdot (h_{S2} - h_{S1})$ $= \dot{m}_{CO_2} \cdot (h_6 - h_1)$	$\eta_{ID1} = \frac{(T_6 - T_1)}{(T_6 - T_{S1})}$
Isı Değiştirici 2	$\dot{Q}_{ID2} = \dot{m}_{SU} \cdot (h_{S2} - h_{SU,ÇIKIŞ})$ $= \dot{m}_{CO_2} \cdot (h_{E2} - h_{EGZoz})$	$\eta_{ID2} = \frac{(T_{E2} - T_{S2})}{(T_{E2} - T_{EGZoz})}$
Çevrim		$\eta_{ÇEVİRİM} = \frac{\dot{W}_T}{\dot{Q}_{GI}}$

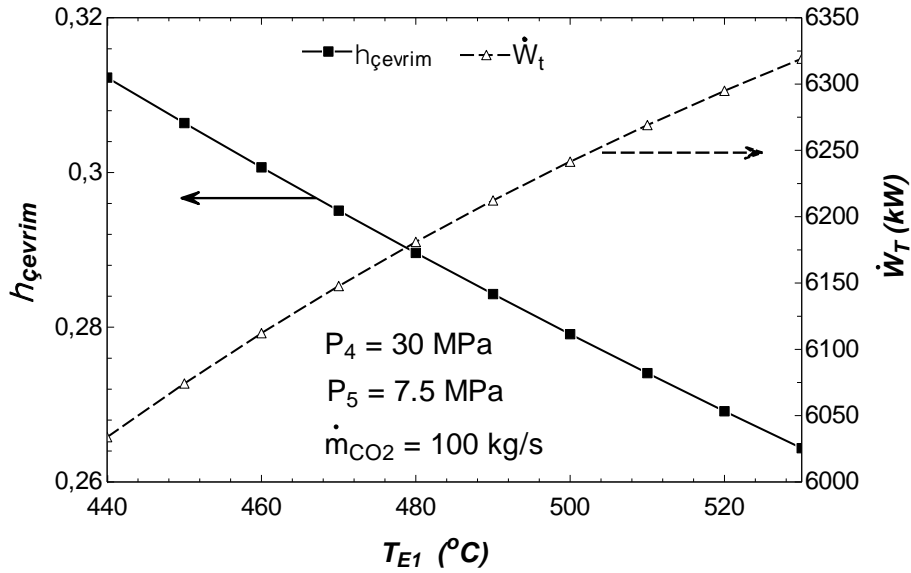
Tablo 4’te verilen denklemlerin çözümü ve akışkanlara ait termodinamik özellikler, paket bir bilgisayar programı (Engineering Equation Solver-EES) aracılığı ile elde edilmiştir (Klein, 2021). Denklemler, belirlenen aralık değerlerinde, parametrik analizler ile çözümlenmiş ve sonuçların grafiksel gösterimleri elde edilmiştir. Burada  $\dot{W}$  birim zamandaki güç,  $\dot{Q}$  birim zamandaki ısı güç,  $\dot{m}$  birim zamandaki kütleli debi,  $h$  entalpi,  $\eta$  verim,  $\eta_M$  mekanik verim,  $\epsilon$  sistem elemanının etkinliği, E1 egzoz gazı girişi, E2 egzoz gazı çıkışı,  $T$  türbin ve T ise sıcaklıktır. Denklemlerin çözümünde, türbin çıkış sıcaklığını değişken bir değer olarak hesaplayabilmek için türbinde genleşen CO<sub>2</sub> ideal gaz kabul edilmiştir ve

$$T_5 = T_4 - \left[ T_4 \cdot \eta_M \cdot \left( 1 - \left( \frac{P_4}{P_5} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) \right] \quad (1)$$

ifadesi ile elde edilmiştir. Burada  $P$  basınç,  $k$  ise orantı sabitidir.

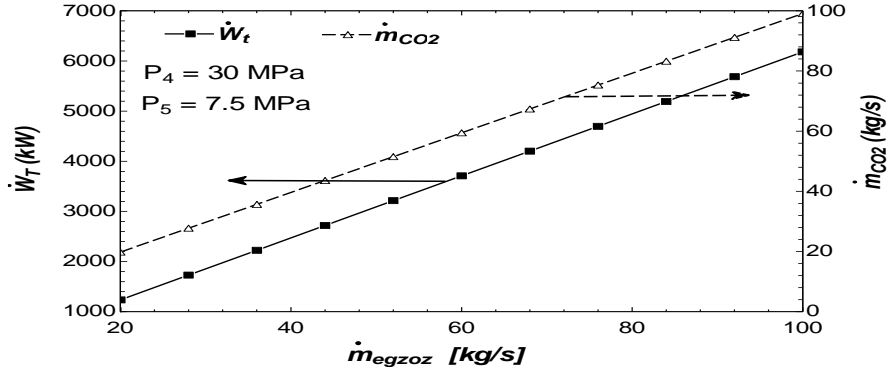
### 3. BULGULAR

Şekil 3, 4, 5 ve 6 Tablo 3'te verilen parametrelere göre elde edilmiştir. Egzoz gaz sıcaklığı ile çevrim verimi ve S-CO<sub>2</sub> sistemi türbin gücünün değişimi Şekil 3'te verilmiştir. Egzoz gaz sıcaklığının artışı, beklendiği üzere S-CO<sub>2</sub> türbin gücünde bir artış sağlamaktadır. Maksimum egzoz gaz debisine yakın bir değer (100 kg/s) için çizilen Şekil 3'de göstermektedir ki egzoz gazlarından elde edilebilecek güç değeri oldukça önemli değerlere ulaşmaktadır.



**Şekil 3:** Egzoz gaz sıcaklığı ile çevrim verimi ve S-CO<sub>2</sub> sistemi türbin gücünün değişimi.

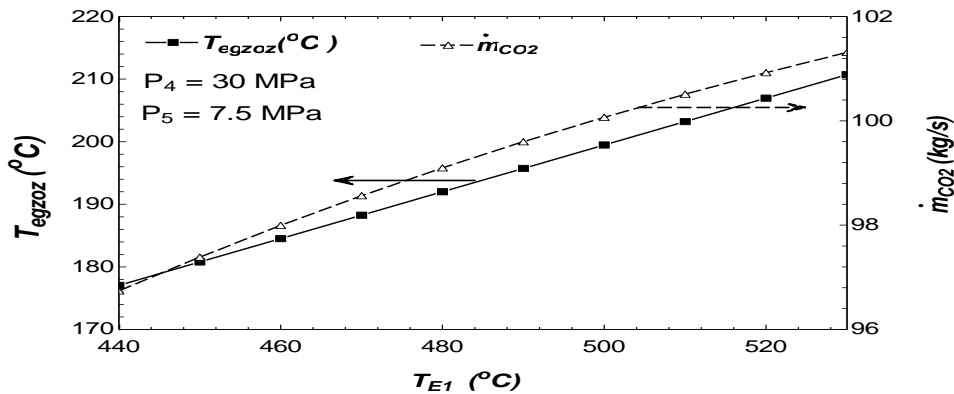
Gemide, elektrik üretmek için kullanılan 4 adet dizel jeneratörün toplam gücünden (2400 kW) daha fazla güç elde edilebilmektedir. Türbin giriş ( $P_4=30$  MPa) ve çıkış ( $P_5=7.5$  MPa) basıncının sabit tutulduğu durum için egzoz gaz sıcaklığı arttıkça çevrimin verimi azalırken S-CO<sub>2</sub> sisteminin türbin gücü artmaktadır. Bu bağlamda 540 °C'deki en yüksek egzoz gaz sıcaklığında çevrimin verimi %26.3 iken egzoz gaz sıcaklığı 440 °C'ye düşürüldüğünde çevrim verimi %31.3'e kadar çıkmaktadır. S-CO<sub>2</sub> sisteminin türbin gücü ise 6040 kW değerinde iken egzoz gazı sıcaklığının maksimuma çıkarıldığında türbin gücü 6320 kW değerine ulaşmaktadır. Şekil 4'te Egzoz gazı debisi ile S-CO<sub>2</sub> sisteminin türbin gücü ve CO<sub>2</sub> debisinin değişimi belirtilmiştir.



Şekil 4: Egzoz gazı debisi ile S-CO<sub>2</sub> sisteminin türbin gücü ve CO<sub>2</sub> debisinin değişimi.

Şekil 4'te görülmektedir ki egzoz gazlarının debisinin azalması ile S-CO<sub>2</sub> türbin gücü azalmaktadır. Bu beklenen bir sonuçtur. Fakat önemli olan husus, 20 kg/s egzoz gazı debisinde (normal seyir şartları) dahi 1200 kW güç üretilebilmektedir. Bu değer, gemideki iki dizel jeneratörün gücüne eş değerdir. 100 kg/s egzoz gazı debisinde S-CO<sub>2</sub> sistemi türbinde 6100 kW güç üretebilmektedir. Egzoz gazlarının debisi ile S-CO<sub>2</sub> çevrimindeki CO<sub>2</sub> debisi benzer bir değişim görülmektedir.

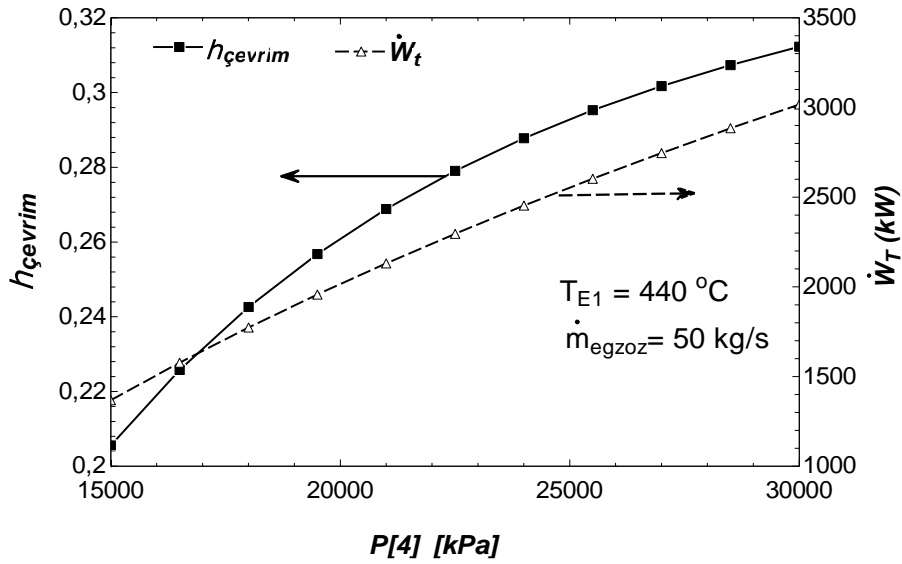
Gemiden atılan egzoz gazlarının sıcaklığı ( $T_{egzoz}$ ) geminin termal izi açısından önem arz eder. Bu da savaş gemilerinde istenmeyen durumlardan bir tanesidir. S-CO<sub>2</sub> sisteminin, egzoz gazlarından enerji alarak güç üretmesi, bu sıcaklığın azalmasına yol açmaktadır. Egzoz gazlarının, S-CO<sub>2</sub> sisteminden çıkış sıcaklığının, egzoz gazlarının gaz ısıtıcıya giriş sıcaklığı ile değişimi Şekil 5.'te gösterilmiştir. En düşük egzoz giriş gaz sıcaklığında olan 440 °C'de egzoz gaz çıkış sıcaklığı 177 °C, en yüksek egzoz giriş gaz sıcaklığı olan 540 °C'de egzoz gaz çıkış sıcaklık değeri ise 208 °C civarında olduğu görülmektedir. Bu değerler, geminin termal izinin azaltılmasına katkı sağlayabilecektir. Aynı şekilde S-CO<sub>2</sub> debisinin değişimi de sunulmuştur. En düşük egzoz giriş gaz sıcaklığında S-CO<sub>2</sub> debisi 97 kg/s iken en yüksek egzoz giriş sıcaklığında ise bu değer 101.3 kg/s olduğu görülmektedir. Egzoz gazlarının, gaz ısıtıcıya giriş sıcaklığındaki önemli değerdeki değişim, CO<sub>2</sub> debisinde aynı oranda bir değişime yol açmamaktadır. Bunun sebebi, CO<sub>2</sub>'in, çalışma şartlarındaki görece yüksek yoğunluk değeri olduğu öngörülmektedir.



Şekil 5: Egzoz gazları çıkış sıcaklığı ve CO<sub>2</sub> debisinin, egzoz gazlarının giriş sıcaklığı ile değişimi.



440 °C egzoz gazı sıcaklığı ve 50 kg/s egzoz gaz debisi şartlarında, çevrim veriminin ve S-CO<sub>2</sub> türbin gücünün, türbine giren CO<sub>2</sub> basıncı ile değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Basıncın artışı ile verim ve güç değerlerinde de artış sağlamaktadır. Basıncın 30 MPa değerini aşmasının, çevrim verimini daha da iyileştirebileceği öngörüsü yapılabilir. Bir savaş gemisi üzerinde, 30 MPa'dan daha yüksek bir basıncın, gemi güvenliği açısından uygun bulunursa, daha yüksek basınçlar ile sistemin işletilmesi avantajlı olabilir. Bununla birlikte, 15 MPa gibi görece daha düşük basınçlar, güvenlik değerlendirmesi açısından uygun görülür ise %20.5 civarında bir verim oluşmaktadır. Bu değer, atık ısı değerlendirme amaçlı bir sistem için oldukça başarılı ve rekabetçidir. Elde edilen türbin gücünün de 1.5 MW olduğu göz önüne alınırsa, sistemin yüksek basınç değerinin belirlenmesinde, savaş gemisi güvenlik değerlendirmelerinin daha ön planda olacağı ifade edilebilir.



Şekil 6: Çevrim veriminin ve S-CO<sub>2</sub> türbin gücünün, türbine giriş basıncı ile değişimi.

Türbin giriş basıncı en yüksek olan 30 Mpa seviyesinde çevrim gücü %31.3 iken türbin giriş basıncının artmasıyla türbin gücü artarak 3 MW'a ulaşmaktadır.

#### 4. SONUÇLAR

Brayton ve Rankine çevrimlerinde, çevrim akışkanı olarak CO<sub>2</sub>'in kullanılma öngörüsü, CO<sub>2</sub>'in sağladığı önemli avantajlar nedeni ile her geçen gün daha da kabul görmektedir. CO<sub>2</sub>'in, süperkritik bölgedeki yoğunluğu, görece yüksektir. Gaz fazında fakat yoğunluğu sebebiyle sıvıya benzer bir karakteristik sergileyen CO<sub>2</sub>, türbin ve diğer bileşenlerin ebatlarında önemli küçülmeler vadetmektedir. Bu sayede, savaş gemisi gibi platformlarda, küçük hacimlerde çalışabilir bir süperkritik sistem kurmak mümkün olabilir. Bu amaçla, S-CO<sub>2</sub> sisteminin, MİLGEM platformu üzerindeki performansı ele alınmıştır. Gemi güç sisteminin (KODAG) egzoz gazlarından ısı geri kazanımı yapan bir sistem önerilmiştir. Belirli şartlarda, S-CO<sub>2</sub> çevriminin güç ve verim değeri analiz edilmiştir. Bununla birlikte, gemi bacasından atılan egzoz gaz sıcaklıklarının da değişimi ele alınmıştır. Sonuçlar

göstermektedir ki önerilen sistemin gücü ve verimi önemli seviyelere çıkabilmektedir. Geminin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisinin tümü, S-CO<sub>2</sub> sistemi tarafından üretilebilir. Egzoz gaz sıcaklıkları ile önemli ölçüde düşürülerek, geminin termal izi açısından da kazanımlar elde edilebilir. Bu sayede gemi gerek gündüz gerekse gece şartlarında savunma ya da taarruz durumunda rahat bir hareket sahasına kavuşacak ve manevra kabiliyeti artarak sahada etkin bir rol üstlenebilecektir.

Bu çalışmada önerilen sistemin üretebileceği gücün, gemi jeneratörlerinin kapasitelerine oranla oldukça yüksek olabileceği kanıtlanmıştır. S-CO<sub>2</sub> sistemi ile 6.32 MW güç üretebileceği ve %33.3 ısı verim değerlerine ulaşılacağı gösterilmiştir. Minimum egzoz debisi şartlarında (20 kg/s) dahi gemi için 1.2 MW güç üretimi mümkün olabilmektedir. S-CO<sub>2</sub> sistemi, geminin sahip olduğu 4 dizel jeneratörden daha fazla elektriksel güç üretebilmektedir.

S-CO<sub>2</sub> sistemlerinin, gemi platformları için uygunluğunun değerlendirilmesi için daha fazla sayıda çalışmaya gereksinim vardır. Egzoz gazlarından ısı geri kazanımı yapan ısı değiştirici tasarımına özel bir önem verilmelidir. Çalışma basıncı yüksek olan bu ısı değiştiricinin, egzoz gazları kaynaklı kirliliğe karşı da tedbirlere sahip olması gerekir. Bununla birlikte, gemi işletmeciliği açısından da risk değerlendirmeleri de önem arz etmektedir. Geminin yakıt tüketimine ve dolayısıyla menziline katkısı olabilecek S-CO<sub>2</sub> sistemi, güvenlik kriterleri de dikkate alınarak gemilerde kullanılabilir. S-CO<sub>2</sub> sistemlerinin kullanılması, savaş gemilerinin emisyonlarının azaltılması açısından da önemli etki sağlayabilir. Ulusal anlamda savunma ve güvenliğin sağlanmasının yanı sıra diğer ülkelerde savunma ve güvenlik ihtiyaçlarını karşılanması bakımından savunma sanayisinde dışa bağımlılığı azaltarak rakipler arasında pazar payı arttırılabilir. Savaş gemisi ve benzer yüzer platformlarda, enerji etkin çözümlerin yaygınlaştırılmasının birçok açıdan kazanımlara yol açabileceği görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- Abuşoğlu, A. & Kanoğlu, M. (2009). Dizel motorlu kojenerasyon sistemlerinin emisyon özelliklerinin incelenmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 29 (1), 45-53.
- Ancona, M.A., Bianchi, M., Branchini, L., De Pascale, A., Melino, F., Peretto, A. & Torricelli, N. (2021). Systematic comparison of ORC and s-CO<sub>2</sub> combined heat and power plants for energy harvesting in industrial gas turbines. *Energies*, 14, 3402. <https://doi.org/10.3390/en14123402>
- Bayram, D. & Heperkan, H. (2012). Gemilerde baca gazı kaynaklı ısı izin sayısal modellemesi. *Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 30, 292-302.
- Deniz Harp Okulu (2022). Milli Olarak Dizayn ve İnşa Edilen İlk Türk Korveti Milgem Projesi, [https://dho.msu.edu.tr/sayfalar/00\\_Anasayfa/numpages/page0003.html](https://dho.msu.edu.tr/sayfalar/00_Anasayfa/numpages/page0003.html)
- Dostal, V., Driscoll, M.J. & Hejzlar, P. (2004). *Supercritical carbon dioxide cycle for next generation nuclear reactors* [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. Massachusetts Institute of Technology, Advanced Nuclear Power Technology Program, Annual and Progress Report, MIT-ANP-TR-100.
- Ergin, S. & Paralı, Y. (2010). Savaş gemilerinde egzoz gazları ve gemi üst yapısı etkileşiminin sayısal olarak incelenmesi. *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, 185, 4-9.

- Geaviation. (2022a). Gaz Türbini Motoru, (16.03.2022), Erişim: <https://www.geaviation.com/marine/engines/military/lm2500-plus-g4>
- Geaviation. (2022b). Gaz Türbini Motoru Kataloğu, (16.03.2022), Erişim: <https://www.geaviation.com/sites/default/files/datasheet-lm2500plusg4.pdf>
- Klein, S.A. (2021). Engineering Equation Solver, Academic Commercial V10.836-3D. Fchart Software.
- Mehmet, F. (2018). *Ada Sınıfı Korvet*. <https://www.defenceturk.net/ada-sinifi-korvet>
- MGM. (2022, 15 Mart). *Deniz Suyu Sıcaklıklarının İstatistikleri*. Erişim: <https://www.mgm.gov.tr/FILES/Haberler/2018/MGMDenizSuyu.pdf>
- MTU. (2022). RollRoce Dizel Motor Kataloğu. [https://www.mtu-solutions.com/content/dam/mtu/products/power-generation/diesel/50-hz/mtu-4000-ds\\_1600-4000-kva/32311381\\_MTU\\_spec\\_20V4000DS4000\\_3E\\_NEA\\_50Hz.pdf/\\_jcr\\_content/renditions/original/32311381\\_MTU\\_spec\\_20V4000DS4000\\_3E\\_NEA\\_50Hz.pdf](https://www.mtu-solutions.com/content/dam/mtu/products/power-generation/diesel/50-hz/mtu-4000-ds_1600-4000-kva/32311381_MTU_spec_20V4000DS4000_3E_NEA_50Hz.pdf/_jcr_content/renditions/original/32311381_MTU_spec_20V4000DS4000_3E_NEA_50Hz.pdf)
- Span, R. & Wagner, W. (1996). A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 25, 6, 1509. <https://doi.org/10.1063/1.555991>
- STM. (2022, 16 Mart). <https://www.stm.com.tr/tr/cozumlerimiz/deniz-projeleri/ada-sinifi-korvet>
- Tatar, V. & Özer, M.B. (2018). The impacts of CO<sub>2</sub> emissions from maritime transport on the environment and climate change. *International Journal of Environmental Trends*, 2 (1), 5-24.
- Wright, S.A., Davidson, C.S. & Husa, C. (2018, March 27 - 29). Off-design performance modeling results for a supercritical CO<sub>2</sub> waste heat recovery power system. *The 6th International Supercritical CO<sub>2</sub> Power Cycles Symposium*, Pittsburgh, Pennsylvania.