

Denizaltılarında Havadan Bağımsız Tahrik Sistemi Olarak Kullanılan MESMA Sisteminin Termodinamik Performans Analizi

İbrahim Özsarı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, Türkiye

ibrahim.ozsari@btu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4543-9167

ÖZET

Dünya genelinde, denizlerin sualtı stratejik gücü, gün geçtikçe daha da önemli bir hale gelmektedir. Bu nedenle deniz kuvvetlerinin stratejik düşüncesinde denizaltıların yeri ve önemi gün geçtikçe artmaktadır. Denizaltılar birçok kişi tarafından en gelişmiş ve güçlü savaş araçları olarak kabul edilir. Denizlerde yeni güç odakları ve tehditlerin oluşması nedeni ile ülkelerin sualtı savaş platformlarına ilgileri artmıştır. Bu yüzden günümüzde gelişmiş, yüksek kabiliyetli denizaltılar için büyük yatırımlar yapılmaktadır. Bu çalışmada, denizaltılarında havadan bağımsız tahrik sistemi olarak kullanılan MESMA sisteminin termodinamik performans analizi yapılmıştır. İlk olarak MESMA sisteminin çalışma prensibi gösterilmiştir. MESMA sistemini oluşturan bileşenlerin enerji ve ekserji hesaplamaları yapılmıştır. MESMA sisteminin birincil ve en önemli bölümü olan yanmanın olduğu kısımda detaylı yanma analizi yapılmıştır. Sistemde aktif olarak kullanılmış metanol ve etanol yakıtlarının yanma ürünleri ve yanma ekserjisi, %21 ve %25 oksijen oranlı yanmalardaki sonuçları ile kıyaslanmıştır. Tüm sistemin elde edilen net güç değerleri etanol ve metanol yakıtlarının üç farklı oksijen oranına göre yanması, ekivalans oranı ve yanma odası giriş sıcaklığının değişimi ile sunulmuştur. Net güç bakımından etanol ile metanol yanmasının 10 ile 50 kW arasında bir farkla sonuçlandığı tespit edilmiştir. Yanmadaki oksijen oranının artması ile elde edilen gücün arttığı gösterilmiştir. Ayrıca yanma odası giriş sıcaklığı arttıkça sistem gücü artmıştır. Elde edilen güçler yakın olmasına rağmen verim bakımından incelendiğinde, metanol yanmasının etanol yanmasından belirgin bir fazlalığı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Verim açısından iki yakıt arasında 5 puanlık fark oluşmuştur. Ayrıca ekolojik performans katsayısı (Ecological coefficient of performance/ECOP) yönünden incelenerek hangi şartlarda daha çevre dostu performans elde edileceği gösterilmiştir. Ekolojik performans katsayısı (ECOP) ekivalans oranının 0,3'den 1'e kadar artması ile azalarak artan bir grafik çizmiştir. Ekivalans oranının 1'den 1,5'e bir miktar azaldıktan sonra yatay olarak devam etmiştir. Ekolojik performans katsayısı (ECOP) bakımından metanol yakıtının daha avantajlı olduğu ortaya koyulmuştur.

Anahtar kelimeler: Termodinamik analiz, Havadan bağımsız tahrik, MESMA, Denizaltı, Gemi makineleri, Yanma Analizi

Makale geçmişi: Geliş 09/04/2022 – Kabul 27/04/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1101003>

Thermodynamic Performance Analysis of the MESMA System Used as an Air-Independent Propulsion System in Submarines

İbrahim Özşarı

Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Bursa Technical University, Bursa, Türkiye

ibrahim.ozsari@btu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4543-9167

ABSTRACT

Worldwide, the underwater strategic power of the seas is becoming more and more important day by day. Therefore, the place and importance of submarines in the strategic thinking of the navies are getting bigger and bigger. Submarines are considered as the most advanced and powerful combat vehicles. Due to the emergence of new power centers and threats on the seas, countries' interest in underwater warfare platforms has increased. For this reason, big investments are made in advanced, high-capability submarines. In this study, thermodynamic performance analysis of the MESMA system, which is used as an air-independent propulsion system in submarines, was made. First, the working principle of the MESMA system was shown. Energy and exergy calculations of the components that make up the MESMA system were made. A detailed combustion analysis was carried out in the part where the combustion, which is the primary and most important part of the MESMA system, takes place. Combustion products and combustion exergy of actively used methanol and ethanol fuels in the system were compared with their results in combustion with 21% and 25% oxygen ratios. The net power values of the whole system are presented by the combustion of ethanol and methanol fuels according to three different oxygen ratios, the variation of the equivalence ratio, and the combustion chamber inlet temperature. It has been found that the combustion of ethanol and methanol results in a difference between 10 and 50 kW in terms of net power. It has been shown that the power obtained increases with the increase of the oxygen ratio in the combustion. In addition, the system power increased as the combustion chamber inlet temperature increased. Although the obtained powers are close, it was concluded that methanol combustion has a significant excess of ethanol combustion when examined in terms of efficiency. There was a difference of 5 points between the two fuels in terms of efficiency. In addition, it has been examined in terms of ecological performance coefficient (ECOP) and it has been shown under which conditions a more environmentally friendly performance will be achieved. It has been demonstrated that methanol fuel is more advantageous in terms of ECOP.

Keywords: Thermodynamic analysis; Air independent propulsion; MESMA; Submarine; Ship Machines; Combustion Analysis

Article history: Received 09/04/2022 – Accepted 27/04/2022

1. Giriş

Denizaltılarının askeri, istihbarat ve stratejik olarak önem arz etmesiyle birlikte her geçen yıl denizaltı teknolojileri üzerine yapılan çalışmalar arttırılmaktadır. Bunlardan en önemlisi havadan bağımsız tahrik sistemleridir. Denizaltılarında kullanılan havadan bağımsız tahrik sistemleri; havaya ihtiyaç duyulmaksızın yani denizaltının yüzeye çıkmadan su altında seyir yapabilmesi için gereken tahrik gücünü üreten sistemler olarak adlandırılmaktadır. Denizaltılarda en büyük hedef, deniz yüzeyine bağımlılığı azaltıp olabildiğince uzun süreler su altında kalmasını sağlamaktır. Geleneksel dizel-elektrik denizaltılarının, hava kullanılarak dizel motorlarla çalıştırılan jeneratörler sayesinde pillerini şarj etmek için periyodik olarak yüzeye çıkmaları gerekir. Denizaltılarının su yüzeyine her çıkışları hem yerlerinin tespit edilme ihtimalinden dolayı hem de savunmasız kalmaları nedeniyle çok tehlikelidir. Bunun için denizaltı su altındayken gerekli gücü üretecek havadan bağımsız tahrik (Air Independent Propulsion / AIP) sistemleri geliştirilmiştir. Literatüre bakıldığında havadan bağımsız tahrik sistemleri; Walter türbini ("https://uboa.net/types/walter_hist.htm,"), kapalı devre dizel (Burcher ve Rydill, 1994), stirling motoru (Mohammed Shibil Kurikkal, 2016; Rashad ve Nada, 2021), MESMA (Kerros vd., 1994; Psallidas vd., 2010) ve yakıt pili (Bedir F. ve Alniak M.O., 2004) olarak sıralanmaktadır. Bunların yanı sıra, günümüzde araştırılması yapılan ve üzerinde çalışılan çeşitli havadan bağımsız tahrik sistemleri de bulunmaktadır (Ozturan, H., 2017).

Collins Sınıfı denizaltısında olası kullanım için uygunluk sırasını belirlemek amacı ile havadan bağımsız tahrik (AIP) sistemlerinin operasyonel ihtiyaçları göz önüne alınmıştır. Karasal sistemlerde kullanılan altı yakıt hücresinin, denizaltı uygulamalarında en iyi performansla kullanılacak olanı belirlenmiştir. Denizaltı AIP sistemi ile ilişkili depolama ve reaktan işleme sistemleri için tek bir optimum seçeneğin olmadığı gösterilmiştir (Peter L. Mart ve Jenny Margeridis, 1995). Denizaltıların AIP sistemlerini su altı seyir süreleri yönünden incelenmiş ve eski sistemlere göre bu sürelerin 3-4 kat artarak denizaltılarına kabiliyet özelliği kazandırdığı gösterilmiştir (Edward C. Whitman,). Howaldtswerke-Deutsche Werft (HDW) şirketinin son yıllarda faaliyete giren denizaltıların araştırılmasını ve üretim hedeflerine geçirilmesini sağlayarak, gelecekteki denizaltı AIP sistemleri için yeni teknolojilerin geliştirilmesini ortaya koymuştur (Psoma ve Sattler, 2002). Persson vd. denizaltılarında uzun süren su altı operasyonları sırasında elde edilen bir dizi hava kalitesi parametresinin sonuçlarını incelemiştir. Havadaki partikül ölçümleri, yüksek hava değişim oranları ve verimli hava temizleme cihazları sayesinde hava kirleticilerinin düşük bir seviyede meydana geldiğini göstermiştir (Persson vd., 2006). Geleneksel denizaltı teknolojisinin performans özelliklerini gösteren analiz örnekleri sunulmuş, gelecekteki tasarımlar ve olası tehditlere etkileri belirtilmiştir. Aynı gövde formundaki farklı AIP sistemlerle potansiyel iyileştirmeler araştırılarak olası tespitler ortaya koyulmuştur (Psallidas vd., 2010). Denizaltılarında mevcut tahrik sistemi, hidrojenin emilimi ve desorpsiyonunun yardımcı sistemleri için değişiklik gerektirmeyen bir çözüm önermiştir. Depolama hacmi yoğunluğu, çalışma koşulları, şarj sayısı ve boşaltma çevrimleri gibi farklı kısıtlamalar dikkate alınarak denizaltı otonomisinde önemli bir artış yapılabileceği değerlendirilmiştir (Fiori vd., 2015). 2000 tonluk bir hibrit AIP sistem denizaltısının performansı, tahrik sisteminin ağırlığı, hacmi ve verimliliği analiz edilerek incelenmiştir. İncelenen AIP sisteminin motoru olarak, düşük sıcaklıkta proton değişim membranlı (Proton-exchange membrane/PEM) tip bir yakıt hücresi kullanmıştır. Yakıt hücresinin reaktanları, üç yakıt depolama sistemi (metanol, sıvı hidrojen ve metalhidrit) ve iki oksidan depolama sistemlerinin kombinasyonundan çıkan sonuçlar incelenmiştir (Lee ve Shay, 2018). Denizaltı AIP sistemi kontrol algoritmaları ile yük artışı adımıyla dinamik yanıt yoluyla değerlendirilmiş ve nominal durum geri besleme kontrolörünün kontrol performansı ile geleneksel kontrolör karşılaştırılmıştır. Önerilen nominal durum geri besleme kontrolü ile sistem enerjisini %23,9 arttırdığı gösterilmiştir (Han vd., 2020). Denizaltılar için en uygun AIP teknolojisini seçmek için zorunlu karar matrisi (Finite difference

method/FDM) kullanılarak rasyonel bir karar verme prosedürü geliştirilmiştir. Zorunlu karar matrisinin, çok seçenekli bir ortamda en uygun çözümün belirlenmesinde etkili bir araç olduğu vurgulanmıştır (Menon vd., 2020). Denizaltı atık gazları tahliyesi için deniz suyunda karbondioksit (CO₂) çözünmesi üzerine deneyler yapılmıştır. Reaksiyon basıncına ve deneysel sıcaklığa göre CO₂ konsantrasyonu elde edilerek su altı silah sistemlerinin tecrübe ettiği fiili çalışma koşulları altında, atık gaz arıtma işleminin optimum tasarımı ortaya koyulmuştur (Park ve Choi, 2020). Denizaltılarındaki AIP sistemlerinin gelişmiş teknolojiler ile birleştirilmesinin iyileştirilmiş hedef belirleme, saldırı döngüsü ve nihayetinde artırılmış görev esnekliği, hareket kabiliyeti, dayanıklılık, erişim, güvenlik ve su altında kalma süresi arttırmasının önemi coğrafi ve askeri olarak incelenmiştir (Raska, 2016). HDW, denizaltıların su altı seyir menziline arttırmak için bir yakıt pili sistemi geliştirdiğini belirtmiş ve bu teknolojiyi geliştirmek, inşa etmek, test etmek ve üretim aşamasına getirmek için gereken süreler hakkında bir inceleme sunmuştur (Pommer, H. vd., 2006). Denizaltılarının havadan bağımsız tahrik sistemlerinde MESMA sistemi ile ilgili çalışma yok denecek kadar azdır. Stirling motoru hakkında termodinamiksel çalışmalar yapılmıştır fakat diğer havadan bağımsız tahrik sistemleri için bu tarz analiz çalışmaları yapılmamıştır.

Bu çalışmada, literatürde yapılmamış ve eksiği görülen denizaltılarında havadan bağımsız tahrik sistemi olarak kullanılan MESMA sisteminin çalışma prensibi gösterilmiştir. MESMA sistemi bileşenlerinin enerji ve ekserji yönünden hesaplamaları ortaya koyulmuştur. Sistemin en önemli bölümü olan yanmanın detaylı yanma analiz sonuçları iki farklı yakıt ve iki farklı oksijen oranına göre sunulmuştur. Tüm sistemin termodinamiksel performans analizi etanol ve metanol yakıtlarının üç farklı oksijen oranına göre elde edilen net güç, verim ve ekolojik performans katsayısı (ECOP) bakımından detaylı bir şekilde incelenmesi yapılmıştır.

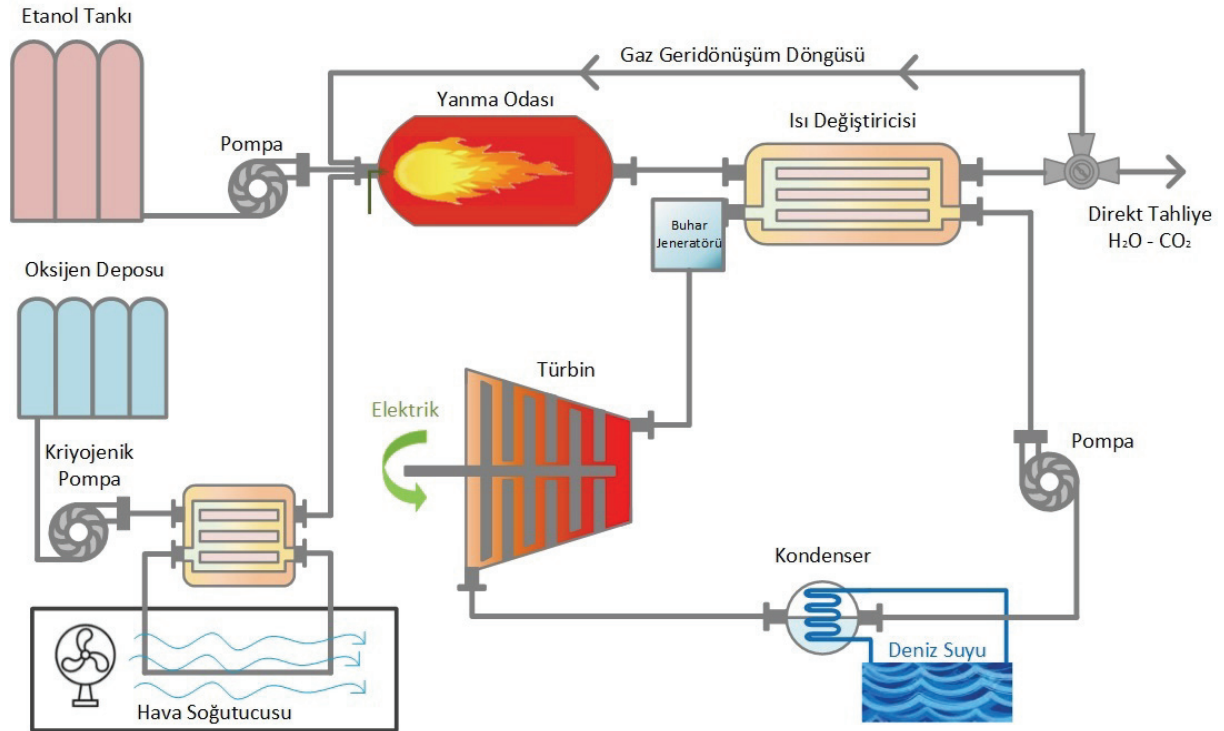
2. Teorik Model ve Simülasyon

MESMA (Module d'Énergie Sous-Marin Autonome) havadan bağımsız tahrik sistemi Fransız Direction des Construction Navales (DCN) şirketi tarafından oluşturulmuş ve geliştirilmiş bir sevk sistemidir (Şekil 1).



Şekil 1. MESMA Sistemi Modülü (<https://klswatch.wordpress.com/> n.d.)

MESMA Sistemi temel olarak kapalı devre bir buhar türbini sistemi olan Rankine çevriminin çalışma prensibine benzemektedir. Düşük sıcaklıklardaki tanklarda depolanmış sıvı oksijen, buharlaştırıcıdan geçirilerek yanma odasında etanol ile yanma gerçekleştirilir. Yanma sonucunda 700 °C sıcaklıkta ve 60 Atm basınçta egzoz gazı ortaya çıkar. Birinci devrede üretilen sıcak gaz ile ikinci devrede buhar oluşturulur. Yüksek sıcaklıktaki buhar, buhar türbinlerine iletilerek ısı enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülür. Alternatör vasıtasıyla türbinden elde edilen mekanik güç ile gerekli elektrik ihtiyacı üretilir. Deniz suyu sadece kondenserde kullanılır. Yakıt olarak ilk başlarda metanol kullanılmış fakat mürettebat için zararlı olduğundan etanolde karar kılınmıştır. Metanolün içinde çok daha fazla zehirli toksik madde bulunduğundan dolayı bu durum gerçekleşmiştir (Kerros vd., 1994). Yanma ürünleri olan su ve karbondioksitin denize tahliye edilmeden önce depolanarak denizaltının görünmezliğinin artırılması düşünülmüştür. Bunun için 60 Atm basınçtaki CO₂'nin en fazla 15 °C olması gerekmektedir. Bunun sağlanması için deniz suyu sıcaklığının yeterince düşük olması veya ekstra bir devre düzeneği olması gerekmektedir. Genellikle egzoz gazları direkt olarak denize tahliye edilmektedir. Böylece birincil devrede kondenser olmasına gerek kalmamaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. MESMA genel çalışma prensibi gösterimi

Sistemlerin optimum çalışma performanslarını bulmak için Matlab programında sayısal bir simülasyon hazırlanmıştır. Sistemin termodinamiksel performans analizi için her bileşenin basınç, sıcaklık, özgül ısı, entalpi ve entropi değerleri hesaplanmıştır. Tüm gazlar ideal gaz olarak kabul edilir ve bunların entalpileri ve özgül ısıları sadece sıcaklıkla değişir. Yanmanın sabit durumda gerçekleştiği varsayılır ve yanma odasının iyi karıştırılan bir reaktör (Well-Stirred Reactor/WSR) olduğu varsayılır ve birincil bölge kalış süresinin 0,002 saniye olduğu varsayılır. Literatüre göre bu tarz yanma odasındaki basınç kaybı %2,5 ile %5 arasında değiştiği için %4 alınmıştır. (Lefebvre ve Ballal, 2010).

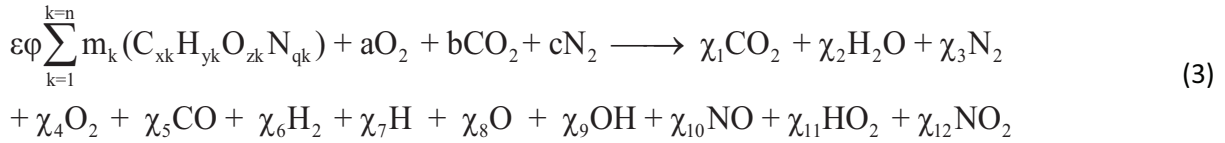
Şekil 2'de gösterilen MESMA sisteminin enerji analizi denklemleri aşağıdaki gibidir:

MESMA sisteminde sıvı akışkanların basınçlarının artırılması için birçok pompa kullanılmaktadır. Pompa işi ve pompa ekserji yıkımı şu şekilde ifade edilir:

$$\dot{W}_P = \frac{v_f(P_e - P_i)}{\eta_P} \quad (1)$$

$$\dot{E}_{Dp} = \dot{E}_e - \dot{E}_i + \dot{W}_P \quad (2)$$

MESMA havadan bağımsız tahrik sisteminin yanma odasındaki türbülans, sürtünme ve türbin girişindeki basınç kaybı ile basınç kaybının %4 olduğu kabul edilir. Termodinamik özellikleri tam olarak hesaplamak için yanma modeli oluşturulmuştur. Yanma ürünleri, denge sabitleri dikkate alınarak eşdeğerlik oranı ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hesaplanır. Yanma modeli için kimyasal denklem şu şekildedir:



Buradaki χ_1 den χ_{12} ye kadar her tür için mol sayısını temsil eder ve x,y,z,q yakıtta bulunan karbon, hidrojen, oksijen ve azot atomlarının sayılarını ifade eder. ϕ genel eşdeğerlik oranıdır. ε yakıtın stokiyometrik yanmasından elde edilen molar hava yakıt oranıdır.

$$f = \frac{FA}{FA_s} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{4a}{4X+Y-2Z} \quad (5)$$

12 bilinmeyen mol sayısını ve mol fraksiyonunu bulmak için temeli Ferguson'un (Ferguson CR., 1986) denge yöntemi kullanılır. Eşitlik ürünlerinin mol fraksiyonlarını çözmek için ek denklemlere ihtiyaç vardır. Bunlardan 6 tanesi, ürünler arası denge kriteri ile sağlanmaktadır. Denge ürünlerinin hesaplanmasında yanma modelinin atom dengesinden gelen 4 denklem daha mevcuttur. Bu denklemler Newton-Raphson ve Gauss sieedel yöntemleri ile güvenli ve hassas sonuçlar elde edilir. Bu sonuçları elde edilmesi ve GASEQ ve NASA CEA programları ile validasyonu yazarın Ozsari vd. (2021) ve Ozsari ve Ust (2019) çalışmalarında detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Her türün molar özgül ısı, entalpi ve entropi değerleri, (CHON) sistemlerinin termodinamik özellikleri için eğri uydurma katsayıları ($a_1... a_n$) kullanılarak aşağıdaki ifadelerden elde edilebilir (Turns, 2011):

$$\frac{\bar{h}_k}{R_u T} = a_{1,k} + \frac{a_{2,k}}{2} T + \frac{a_{3,k}}{3} T^2 + \frac{a_{4,k}}{4} T^3 + \frac{a_{5,k}}{5} T^4 + \frac{a_{6,k}}{2} \quad (6)$$

$$\frac{\bar{c}_{p,k}}{R_u} = a_{1,k} + a_{2,k} T + a_{3,k} T^2 + a_{4,k} T^3 + a_{5,k} T^4 \quad (7)$$

$$\frac{\bar{s}_k^0}{R_u T} = a_{1,k} \ln T + a_{2,k} T + \frac{a_{3,k}}{2} T^2 + \frac{a_{4,k}}{3} T^3 + \frac{a_{5,k}}{4} T^4 + a_{7,k} \quad (8)$$

Sabit basınçta, karışımın mol fraksiyonları sıcaklıkla değiştiği, ayrışmalara bağlı olarak karışımın entalpisi değişir. Bu, aşağıdaki şekilde tanımlanan gaz karışımının nihai özgül ısını değiştirecektir:

$$h = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^{12} \alpha_k \bar{h}_k [kJ/kg] \quad (9)$$

$$\bar{s} = \frac{R_u}{M} \left[\sum_{k=1}^n \alpha_k (\bar{s}_k^o - \ln \alpha_k) - \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \right] \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P = c_{p_g} = \sum_{k=1}^{12} \frac{\alpha_k}{M} \frac{\partial \bar{h}_k}{\partial T} + \frac{\bar{h}_k}{M} \frac{\partial \alpha_k}{\partial T} - \frac{\alpha_k \bar{h}_k}{M^2} \frac{\partial M}{\partial T} \quad (11)$$

$$\left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P = c_{p_g} = \frac{1}{M} \left[\sum_{k=1}^{12} \alpha_k \bar{c}_{p_k} + \bar{h}_k \frac{\partial \alpha_k}{\partial T} - h M_T \right] \quad (12)$$

$$M_T = \frac{\partial M}{\partial T} = \sum_{k=1}^{12} M_k \frac{\partial \alpha_k}{\partial T} \quad (13)$$

Burada yanma sıcaklığı T'dir (K). Ürün molar kütlesi M_k ve toplam ürün molar kütlesi M'dir.

$$M = \sum_{k=1}^{12} m_k = \sum_{k=1}^{12} \alpha_k M_k \quad (14)$$

Ürünlerin toplam mol sayısı, reaktanların kütlesini yanma ürünlerinin moleküler ağırlığına aşağıdaki gibi bölerek bulunabilir: Son olarak, $y_1, y_2, y_3 \dots y_{12}$ mol sayısı elde edilir.

$$N = \frac{m_R}{M} \Rightarrow v_i = y_i N \quad (15)$$

Yanma odası çıkış sıcaklığını hesaplamak için:

$$T_e = \frac{T_{pz} c_p m_{ox} + T_{cox} c_{p,cox} m_{cox}}{c_p m_{ox} + c_{p,cox} m_{cox}} \quad (16)$$

Burada T_{pz} birincil bölge hava sıcaklığı, T_{cox} ise dilüzyon havası sıcaklığını ifade etmektedir. Ayrıca yanma odasında oluşan ısı miktarını aşağıdaki denklemle buluruz:

$$Q_{in} = \dot{m}_f LHV / \eta_{cc} \quad (17)$$

Genel olarak, bir sistemdeki toplam ekserji şu şekilde ifade edilir:

$$EX_{Com} = EX_{Ph} + EX_{Ch} + EX_P + EX_K \quad (18)$$

Burada, EX_{Ph} fiziksel ekserjidir, EX_{Ch} kimyasal ekserjidir, EX_K kinetik enerjidir, EX_P potansiyel ekserjidir. EX_K ve EX_P ihmal edilir. Fiziksel ve kimyasal ekserji aşağıdaki gibi ayrıntılı olarak ifade edilir:

$$EX_{ph} = (H_e - H_0) - T_0 (S_e - S_0) \quad (19)$$

$$EX_{ph} = c_p (T_e - T_0) - T_0 \left[c_p \ln \left(\frac{T_e}{T_0} \right) - R \ln \left(\frac{P_e}{P_0} \right) \right] \quad (20)$$

$$EX_{Ch} = x_k e x_{Ch}^k + RT_0 \sum x_k \ln x_k \quad (21)$$

Yanma odasından çıkan sıcak akışkan ile bir nevi kapalı çevrimdeki suya ısı aktarımı yapılmaktadır. Isı değiştiricisinde basınç kaybı, enerji dengesi ve ekserji yıkımı şu şekilde elde edilir:

$$P_4 / P_5 = (1 - \Delta P_{Hex}) \quad (22)$$

$$\dot{m}_s (h_{e2} - h_{i2}) = \dot{m}_g (h_{e1} - h_{i1}) \eta_{Hex} \quad (23)$$

$$\dot{E}_{DHex} = \dot{E}_{i1} + \dot{E}_{i2} - \dot{E}_{e1} - \dot{E}_{e2} \quad (24)$$

Isı değiştiricisinden sıcaklığı yükselmiş kızıgın buhar türbine gönderilir. Buhar türbinindeki güç ve ekserji yıkımı aşağıdaki denklemler ile elde ederiz.

$$\dot{W}_T = \dot{m}_s (h_i - h_e) \quad (25)$$

$$\dot{E}_{DT} = \dot{E}_i - \dot{E}_e - \dot{W}_T \quad (26)$$

Türbinden çıkan buharın soğutulması için kondenserdeki enerji denklemi ve ekserji yıkımı aşağıdaki denklemler vasıtası ile bulunur.

$$\dot{m}_s (h_{i1} - h_{e1}) = \dot{m}_{sw} (h_{e1} - h_{i1}) \eta_{Con} \quad (27)$$

$$\dot{E}_{DCon} = \dot{E}_{e1} + \dot{E}_{i2} - \dot{E}_{i1} - \dot{E}_{e2} \quad (28)$$

Net güç; türbinden elde edilen gücün tüm sistemde kullanılan pompalarda harcanan güçten çıkarılması ile bulunur:

$$\dot{W}_{NET} = \dot{W}_T - \dot{W}_{Pn} \quad (29)$$

Termodinamiksel enerji sistemler için önemli bir performans kriteri ekolojik performans katsayısıdır (ECOP). (G. Gonca ve I. Ozsari, 2016; Gonca, 2018; Gonca ve Genc, 2019; Ust vd., 2005). ECOP, termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları arasında gerçeği bir kombinasyon oluşturan, etkin gücün toplam ekserji yıkımı hızına oranı olarak tanımlanmıştır ve şu şekilde elde edilir:

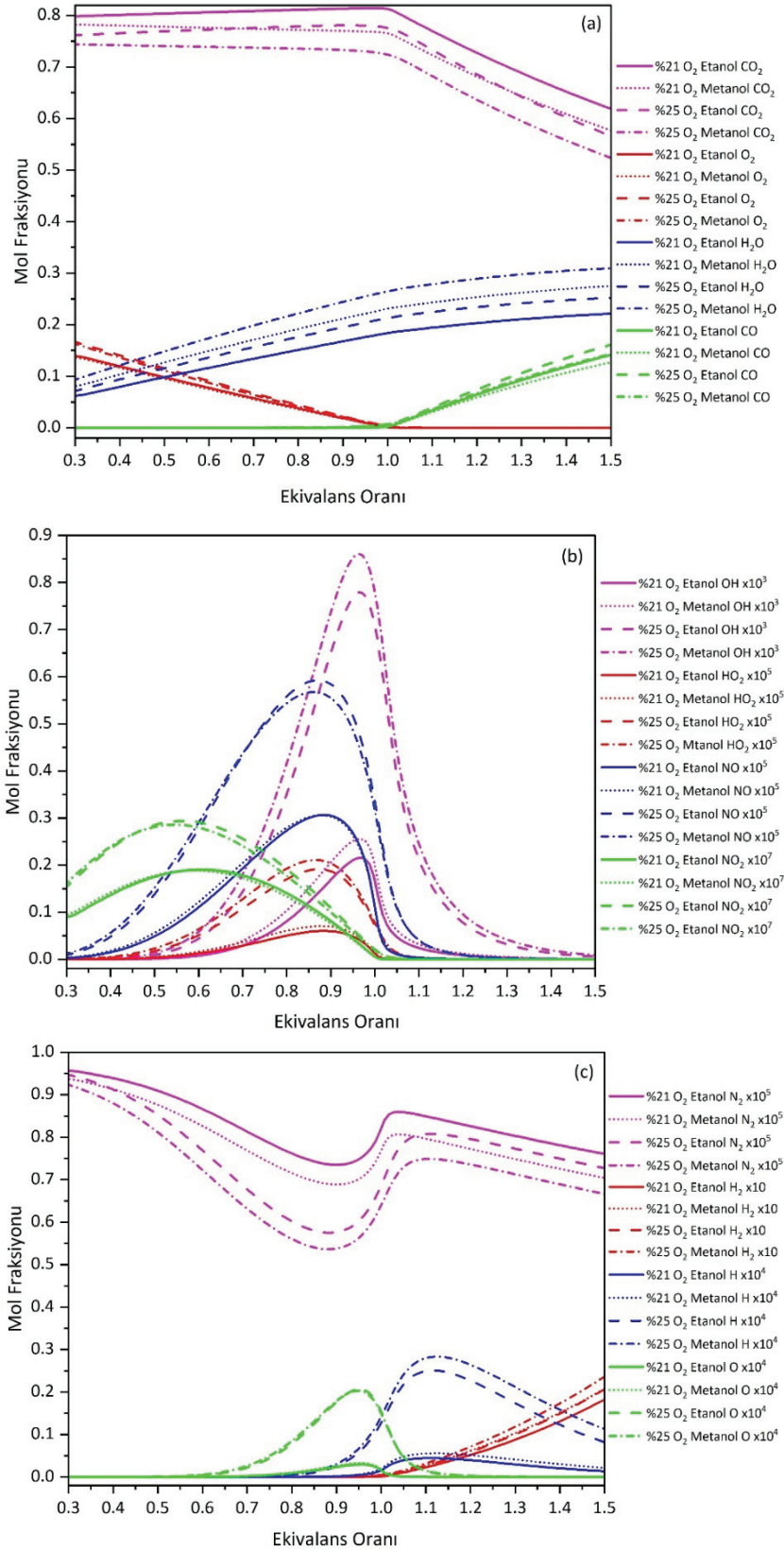
$$ECOP = \frac{W_{NET}}{E_{Dtot}} \quad (30)$$

3. Bulgular ve Tartışma

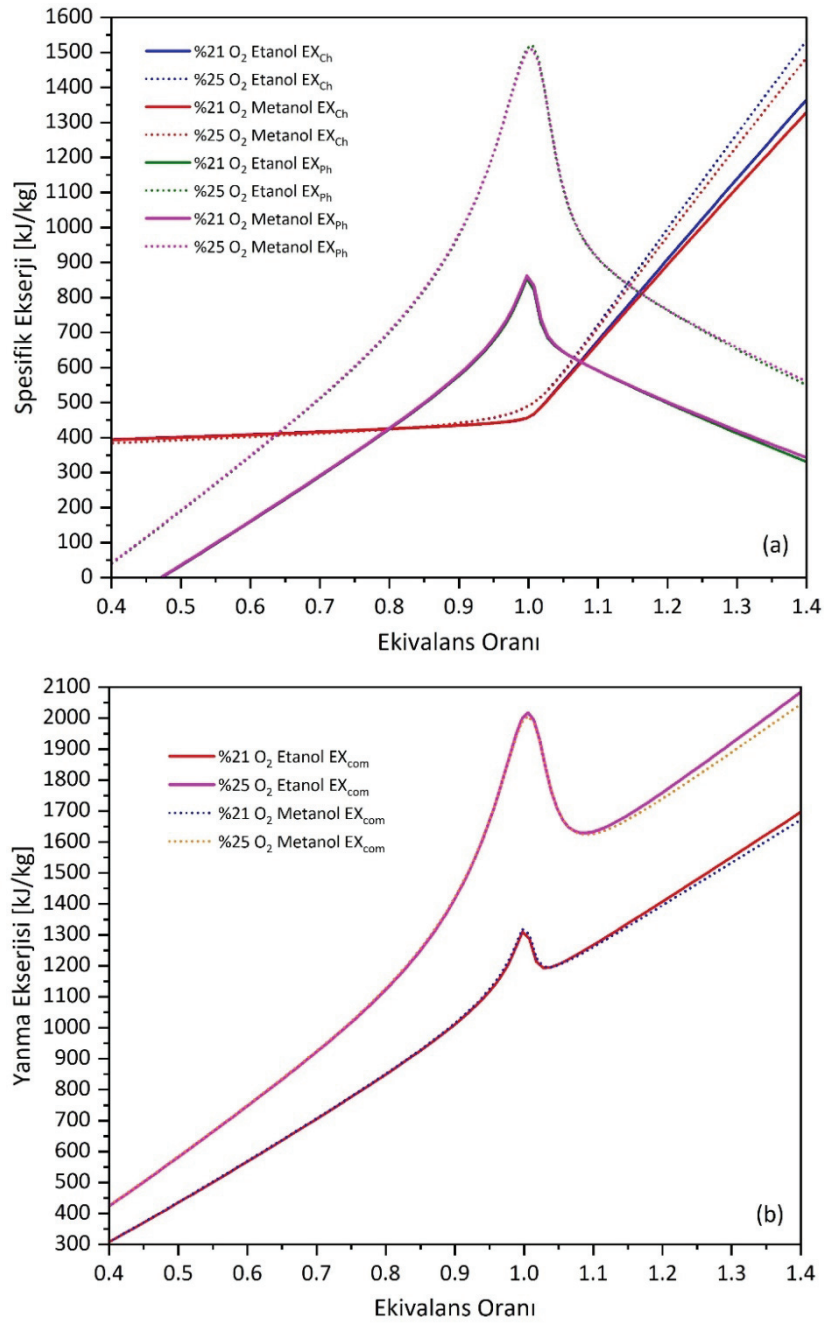
Denizaltılarında havadan bağımsız tahrik sistemi olarak kullanılan MESMA sisteminin ilk denenen ve şu an güncel kullanılan yakıtı olmak üzere 2 farklı yakıt ile detaylı termodinamiksel performans analizi sonuçları şekil 3-7'de sunulmuştur. Yanma ekivalans oranının ve yanma odası giriş sıcaklığının değişimine göre yanma ürünleri sonucu, net güç, verim, ECOP ve yanmanın kimyasal/fiziksel/toplam spesifik ekserjisi hesaplanmış ve sonuçları gösterilmiştir.

MESMA sisteminin en kritik ve önemli bölümü, yanma bölümüdür. Bu yüzden termodinamik performans analizinden doğru ve hassas sonuçlar alınması için yanma sonrası çıkan ürünler ve bunlara bağlı termodinamik özellikler hesaplanmalıdır. Yanma sonucu oluşan bileşenlerin mole fraksiyonları, şekil 3a-c de değişik ölçeklendirmeler ile sergilenmiştir. Burada yakıt olarak etanol ve metanolün, %21 ve %25 oksijen oranlı oksijen yanmalarının sonuçları, ekivalans oranı değişimine göre sunulmuştur. Yanma ekserjisi analizini yapmak için, yanma ürünlerinin mol fraksiyonları mümkün olduğu kadar gerçeğe yakın hesaplanmalıdır. Hesaplamalarda 12 yanma ürünü farklı enerji ve ekserji özelliklerine sahiptir. Hesaplanan birçok yanma ürünü olduğundan, anlaşılır olması için şekil 3; a, b ve c olmak üzere üç kısma ayrılmıştır. şekillerde, tüm eğrileri bir arada sunmak için ölçeklendirme yapılmıştır. şekil 3'te görüldüğü gibi, fakir yanma bölgesinde 0,3-1, iki yakıtın yanmasında da CO₂, O₂ ve NO₂ diğer bölgelere nazaran daha yüksek değerlerdedir. Tam yanma bölgesinde maksimum sıcaklıkların ortaya çıktığı 1 ve civarında ise OH oluşumun arttığı görülmüştür. Sıcaklık artışı ile NO oluşumu artarken buna karşın N₂'de düşüş

görülmüştür. Zengin yanma bölgesinde, 1-1,6 eksik yanma nedeniyle CO, H ve H₂'de önemli artışlar görülmüştür.



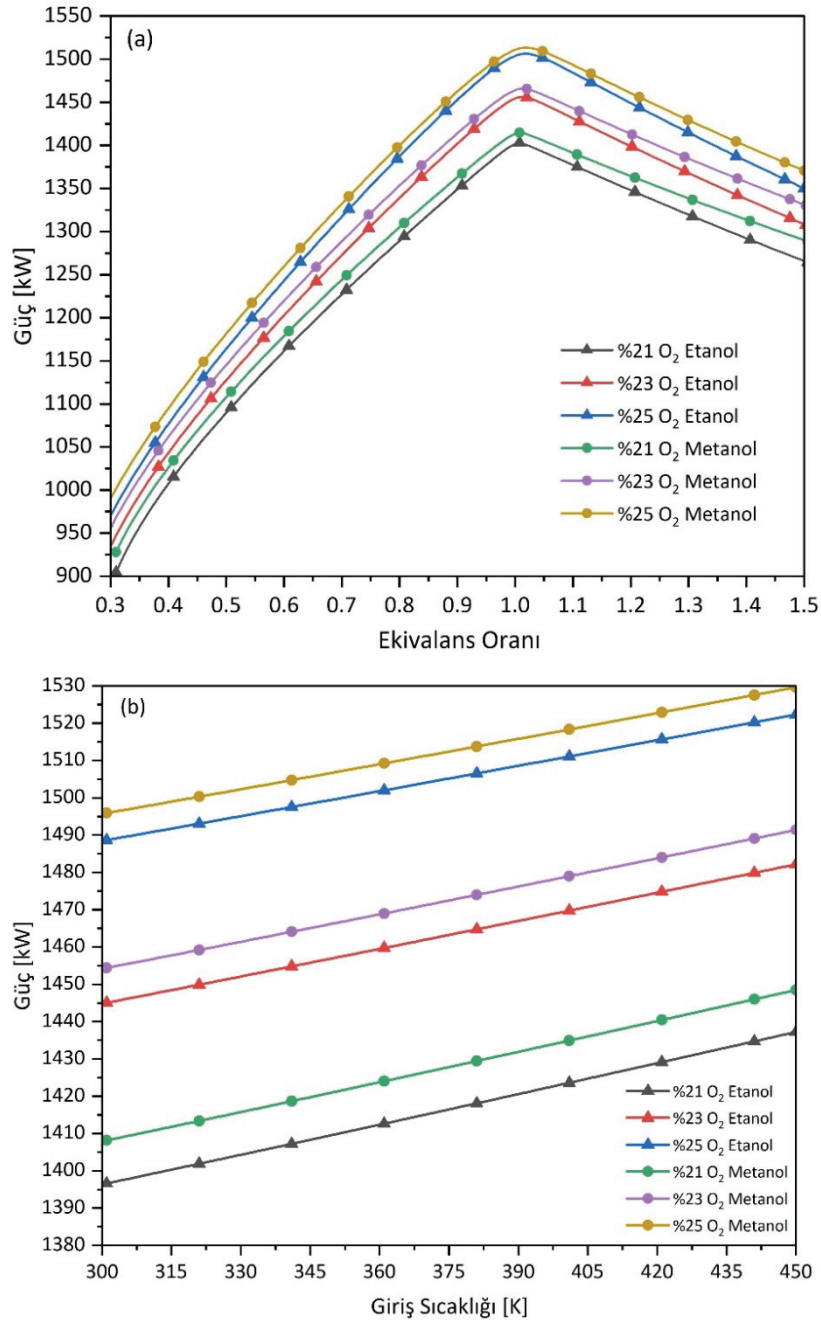
Şekil 3. İki farklı oksijen oranlarında etanol ve metanol yakıtlarının eşdeğerlik oranının değişimine göre CO₂, O₂, H₂O, CO molar fraksiyonları (a) OH, HO₂, NO, NO₂ molar fraksiyonları (b), N₂, H₂, H, O molar fraksiyonları (c)



Şekil 4. İki farklı oksijen oranlarında etanol ve metanol yakıtlarının eşdeğerlik oranının değişimine göre kimyasal ekserji, fiziksel ekserji (a), toplam yanma özgül ekserjisi (b)

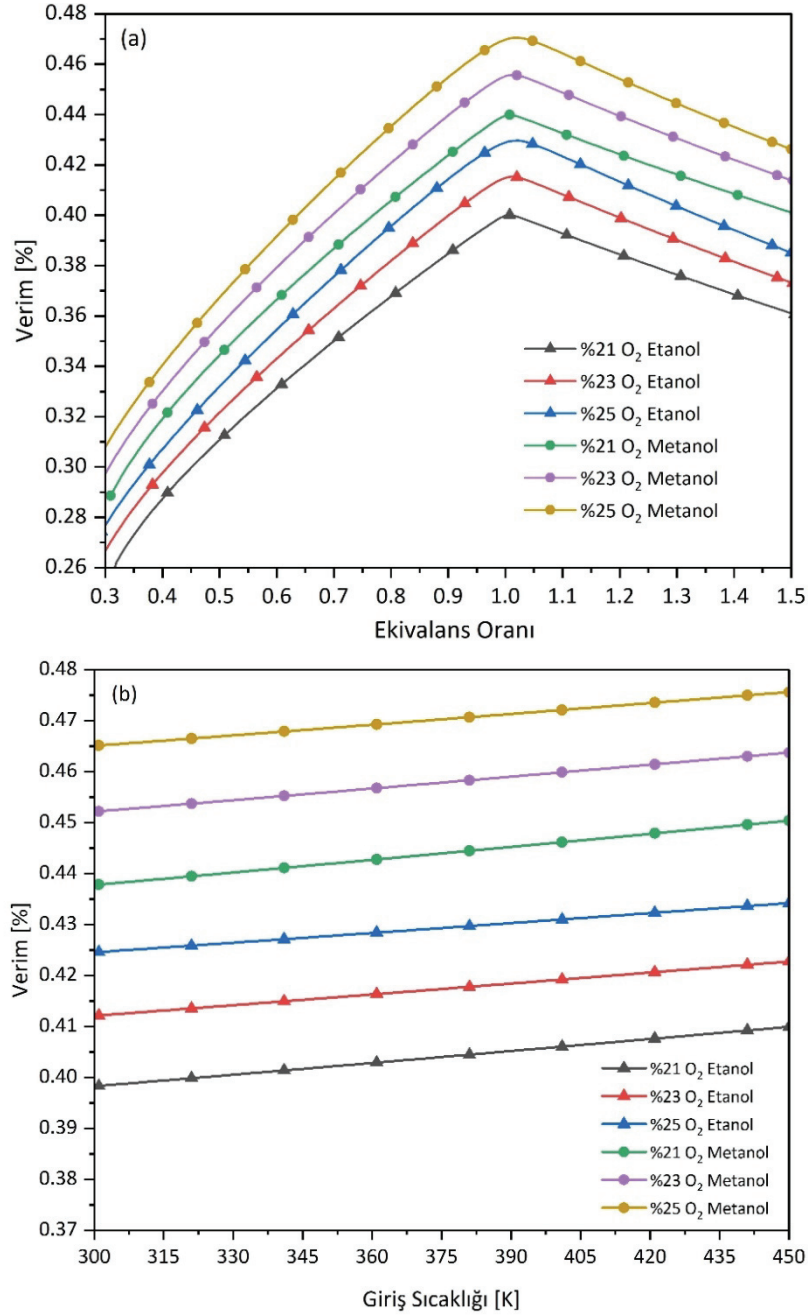
MESMA havadan bağımsız tahrik sisteminde ilk başlarda yakıt olarak metanol yakılmaktaydı. Fakat metanol yakıtının kullanılması personel için tehlikeli olduğu için daha sonra kullanılmamıştır. Metanol baş ağrısı, baş dönmesi, bulantı, koordinasyon kaybı ve sersemlik gibi küçük etkilerinin yanında bilinç kaybı, kalıcı hasarlar ve ölüm gibi çok büyük ve geri dönülemez etkilere de sebep olabilmektedir. Günümüz MESMA sistemlerinde yakıt olarak etanol kullanılmaktadır. Bu iki yakıtı (metanol/etanol), farklı oksijen oranlı yanmaları ile elde edilen sonuçları değerlendirilmiştir. Şekil 4.a'da görüldüğü üzere küçük bir fark ile spesifik fiziksel ekserji bakımından metanol, etanolden daha yüksek değerlere sahiptir. Sadece ekivalan oranı 1 civarında bu durum değişmiştir. Diğer yönden kimyasal ekserji bakımından fakir yanma bölgesinde çakışırken, zengin yanma bölgesinde etanol yakıtının değerleri metanolden daha yüksektir. Her iki yakıtın yanmasında da oksijen oranının artması spesifik ekserjileri arttırmıştır.

Kimyasal ekserji ile fiziksel ekserji değerlerinin toplamı, yanma ekserjisi olarak şekil 4.b'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Üç farklı oksijen oranlarında etanol ve metanol yakıtlarından elde edilen net güç değişimi, eşdeğerlik oranına göre (a), yanma odası giriş sıcaklığına göre (b)

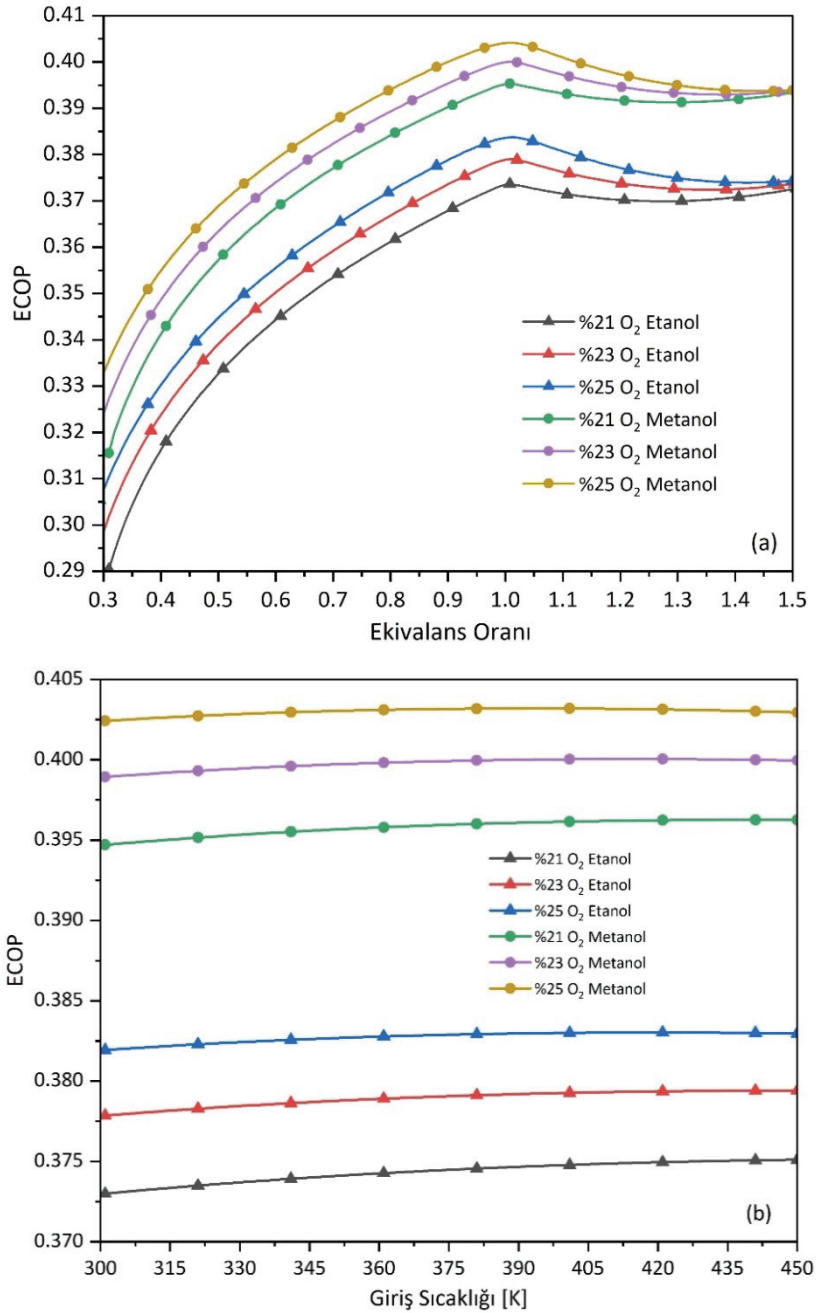
Sistemlerin termodinamiksel performans analizinde ilk bakılan çıktı, elde edilen net iş veya net güçtür. Şekil 5.a'da ekivalans oranının değişimine göre MESMA sisteminden elde edilen güç gösterilmiştir. Ekivalans oranının 0,3'ten teorik tam yanmaya ($\Phi=1$) kadar yanma odası çıkış sıcaklığının arttığı gözlemlenmiştir. Bu şekilde ısı değiştiricisinden aktarılan ısı miktarının artması ile net gücün artması doğaldır. Zengin yanma bölgesinde ekivalans oranı artmasıyla yanma odası çıkışı düşmekte ve doğru orantılı olarak elde edilen güç de azalmaktadır. Etanol yakıtının oksijen yanmasında oksijen oranı %21, %23 ve %25 olarak değiştirildiğinde yaklaşık 50 kW civarında güç artışına yol açtığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum metanol yakıtının yakılmasında da elde edilmiştir.



Şekil 6. Üç farklı oksijen oranlarında etanol ve metanol yakıtlarından elde edilen sistem termal verimi değişimi, eşdeğerlik oranına göre (a), yanma odası giriş sıcaklığına göre (b)

Etanol ile metanolün sonuçlarını kıyasladığımızda ise tüm durumlarda metanol yakıtı kullanılması ile daha fazla güç elde edilmiştir. Bu durum %21 O₂ oranlı oksijen-yanma durumunda yer yer değişerek metanolün etanol yakıtından 30 kW'a kadar daha fazla güce ulaştığı görülmüştür. Bununla birlikte O₂ oranı arttıkça bu farkların 10 kW'lara kadar düştüğü sonucuna ulaşılmıştır. Bu iki yakıtın farklı O₂ oranlı teorik tam yanma durumlarındaki kıyaslama sonuçları, yanma odası giriş sıcaklığını değiştirdiğimizde de görülmüştür (Şekil 5.b). Metanol yakıtı yanması ile elde edilen gücün, etanol yakıtından elde edilen güçten daha fazla olduğu ve bu durumda yanmadaki oksijen oranının %21'den %25'e doğru çıktıkça azaldığı görülmüştür. Oksijen oranının değişimi literatürde %21'den başlayarak %25'e bazı çalışmalarda %35'e kadar incelenmektedir (Escudero vd., 2020). Fakat oksijen oranının artması ile maliyetin çok fazla artması ve denizaltılarında oksijen tanklarının da sınırlı olması nedeni ile %21'den %25'e kadar değişim uygun görülmüştür. Yanma odası giriş sıcaklığının 300 K'den 450 K'e değiştirilmesi ile elde edilen güç

tüm şartlarda lineer olarak artmıştır. Fakat bu artış, %21 O₂ oksijen oranında daha fazla olurken %25'e doğru gidildikçe azalmıştır.



Şekil 7. Üç farklı oksijen oranlarında etanol ve metanol yakıtlarından elde edilen ekolojik performans katsayısı (ECOP) değişimi, eşdeğerlik oranına göre (a), yanma odası giriş sıcaklığına göre (b)

Enerji sistemleri analizinde elde edilmek istenen güce ulaşıldıktan sonra bakılan ilk performans ölçüğü verimdir. İstenilen gücün ne kadar enerji harcanarak sağlandığının öğrenilmesi gerekmektedir. Şekil 6.a'da görüldüğü üzere yanmadaki oksijen oranının artması ile sistem verimi artmıştır. Net güç bakımından etanol ile metanol yanmasının yakın değerlerde olmasına rağmen metanolün yakıt olarak kullanılması durumunda etanolden belirgin bir farkla daha yüksek verime sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bunun nedeni; metanol yanması ile oluşan ısı enerjisinin etanoldekinden daha az olmasıdır. Bunun nedeni ise metanolün alt ısıl değerinin (lower heating value / LHV) etanolden düşük olmasıdır. Yani personel sağlığına bir zararı olmasaydı metanol yerine etanol kullanımının gündeme

gelmeyeceği bu sonuçlar ile net olarak görülmüştür. Teorik tam yanma durumunda, yanma odası giriş sıcaklığını arttırdığımızda da verimin arttığı görülmüştür (Şekil 6.b).

Şekil 7.a ve 7.b; ekivalans oranı ve yanma odası giriş sıcaklığı değişimi, sistemin ekolojik performans katsayısı (ECOP) üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 7.a'da görüldüğü üzere; ekolojik performans katsayısı ekivalans oranının artması ile teorik tam yanmaya kadar artmaktadır. Zengin yanma bölgesinde ise bu durum bir miktar azalarak yatay olarak sabite yakın bir halde devam etmektedir. Oksijen oranı arttıkça her iki yakıtta da ekolojik performans katsayısının arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Bunun yanında tüm durumlarda metanol yakıtının yanmasının etonelden daha yüksek olduğu ve daha çevreci bir sonuç verdiği görülmüştür. En düşük ekolojik performans katsayısı sonuçlarına göre %21 etanol yanması, en yüksek değere ise %25 O₂ oranlı metanol yanmasının olduğu net olarak ortadadır. Metanol yakıtı yanması ile elde edilen güç, etanol yakıtından elde edilen güçten daha fazla olduğu ve bu durumun yanmadaki oksijen oranının %21'den %25'e doğru çıktıkça azaldığı görülmüştür. Yanma odası giriş sıcaklığının artırılması ile elde edilen güç tüm şartlarda az da olsa bir artış gösterdiği sonucu elde edilmiştir (Şekil 7.b).

4. Değerlendirme ve Sonuç

Bu çalışmada, denizaltılarında havadan bağımsız tahrik sistemi olarak kullanılan MESMA sisteminin termodinamik performans analizi yapılmıştır. Termodinamik analizde yanma, enerji ve ekserji sonuçları detaylı olarak incelenmiştir. Parametrik analiz sonuçları ekivalans oranının 0.3'den 1.5'e kadar, yanma odası giriş sıcaklığı 300K'den 450K'e kadar artırılması ile etanol ve metanol yakıtlarının farklı oksijen oranlı oksijen-yanmaları ile elde edilmiştir.

- MESMA sisteminin en önemli kısmı olan yanmanın detaylı analizi yapılmıştır. Tüm yanma ürünleri etanol ve metanol yakıtı için iki farklı oksijen oranı ile ekivalans oranına göre sergilenmiştir. Ayrıca bu iki yakıtın yanma ekserjisi sonuçları ortaya koyularak kıyaslaması yapılmıştır.
- Elde edilen net güç bakımından sonuçların etanol ile metanolün yakın değerlere (10-50 kW farka) sahip olduğu gösterilmiştir. Yanmadaki oksijen oranının artması ile elde edilen gücün arttığı tespit edilmiştir. Yanma odası giriş sıcaklığını arttırmak, sistemden elde edilen gücü arttırmıştır.
- Metanol yakılması ile giren ısının, etanol yanmasından daha az olması nedeni ile verim bakımından metanol yakıtının kullanılmasının belirgin bir fazlalığı olduğu ispatlanmıştır. Tüm durum ve şartlarda metanol yanmasının etanol yanmasından daha verimli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. %25 O₂'li etanol yanmasının dahi %21 O₂'li metanol yanmasından daha düşük verime sahip olduğu, hem ekivalans oranı değişiminde hem de yanma odası giriş sıcaklığının değişiminde gösterilmiştir. İki yakıt arasında 5 puan verim farkı mevcuttur.
- Ekolojik performans katsayısı (ECOP) ekivalans oranının 0,3'ten 1'e kadar artması ile azalarak artan bir grafik çizmiştir. Ekivalans oranı 1'den 1,5'e bir miktar azaldıktan sonra yatay olarak devam etmiştir. ECOP yönünden metanolün daha avantajlı olduğu ortaya konulmuştur.

Elde edilen sonuçlar ile MESMA sisteminde metanol yakılması güç yönünden az olsa da verim ve ECOP bakımından etanol yakıtına göre üstünlük sağlamaktadır. Fakat tüm havadan bağımsız tahrik sistemlerinde birinci öncelik personel güvenliği olduğu için artık metanol yakıtı kullanılmamaktadır. Fakat ilerleyen yıllarda gelişen teknolojiler ve alternatif yakıtların bulunması ile daha iyi performanslar sergilenebilecektir.

7. Referanslar

Bedir F., Alniak M.O., 2004. Yakıt Pil Sistemlerinin Çalışma Prensibi Ve Denizaltı Sistemlerdeki Tasarımı. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi 31–37.

Burcher, R., Rydill, L., 1994. Concepts in submarine design, Cambridge ocean technology series. Cambridge University Press, Cambridge [England] ; New York.

Edward C. Whitman, n.d. Air-Independent Propulsion. AIP Technology Creates a New Undersea Threat 1–6.

Escudero, A.I., Aznar, M., Díez, L.I., Mayoral, M.C., Andrés, J.M., 2020. From O₂/CO₂ to O₂/H₂O combustion: The effect of large steam addition on anthracite ignition, burnout and NO_x formation. Fuel Processing Technology 206, 106432. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106432>.

Ferguson CR., 1986. Internal combustion engines – applied thermosciences., New York: John Wiley&Sons Inc.; ed.

Fiori, C., Dell’Era, A., Zuccari, F., Santiangeli, A., D’Orazio, A., Orecchini, F., 2015. Hydrides for submarine applications: Overview and identification of optimal alloys for air independent propulsion maximization. International Journal of Hydrogen Energy 40, 11879–11889. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.105>.

G. Gonca, I. Ozsari, 2016. Exergetic Performance Analysis of a Gas Turbine with two Intercoolers and two Reheaters Fuelled with Different Fuel Kinds. CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING ISTANBUL 2016.

Gonca, G., 2018. The effects of turbine design parameters on the thermo-ecologic performance of a regenerated gas turbine running with different fuel kinds. Applied Thermal Engineering 137, 419–429. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.03.100>.

Gonca, G., Genc, I., 2019. Thermoecology-based performance simulation of a Gas-Mercury-Steam power generation system (GMSPGS). Energy Conversion and Management 189, 91–104. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.081>.

Han, Jaeyoung, Han, Jaesu, Ji, H., Yu, S., 2020. “Model-based” design of thermal management system of a fuel cell “air-independent” propulsion system for underwater shipboard. International Journal of Hydrogen Energy 45, 32449–32463. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.233>.

<https://klswatch.wordpress.com/2011/06/22/second-dcnss-mesma%C2%AE-aip-ready-for-shipment-to-pakistan/>, n.d.

https://uboat.net/types/walter_hist.htm, n.d.

Kerros, P., Inizan, C., Grousset, D., 1994. MESMA: AIP system for submarines, in: Proceedings of OCEANS’94. Presented at the OCEANS’94, IEEE, Brest, France, p. III/457-III/466. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1994.364242>.

Lee J.-C., Shay T., 2018. ANALYSIS OF FUEL CELL APPLIED FOR SUBMARINE AIR INDEPENDENT PROPULSION (AIP) SYSTEM. Journal of Marine Science and Technology 26, 657–666. [https://doi.org/10.6119/JMST.201810_26\(5\).0005](https://doi.org/10.6119/JMST.201810_26(5).0005).

Lefebvre, A.H., Ballal, D.R., 2010. Gas turbine combustion alternative fuels and emissions. Taylor & Francis, Boca Raton [u.a.

Menon, R.R., Vijayakumar, R., Pandey, J.K., 2020. Selection of Optimal Air Independent Propulsion System using Forced Decision Matrix. *Def. Sc. Jl.* 70, 103–109. <https://doi.org/10.14429/dsj.70.13678>.

Mohammed Shibil Kurikkal, 2016. Air Independent Propulsion; Silent Submarines with Stirling Engines. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* 5, 240.

Ozsari, I., Ust, Y., 2019. Effect of varying fuel types on oxy-combustion performance. *Int J Energy Res* er.4868. <https://doi.org/10.1002/er.4868>.

Ozsari, I., Ust, Y., Kayadelen, H.K., 2021. Comparative Energy and Emission Analysis of Oxy-Combustion and Conventional Air Combustion. *Arab J Sci Eng* 46, 2477–2492. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-05130-0>.

Ozturan, H., 2017. IdeaLab'dan Sessiz Denizaltılar için Devrim Yaratacak Teknoloji: sCO₂ Brayton Güç Çevrimi. *MSI IDEF* 172.

Park, E.-Y., Choi, J., 2020. The Performance of Low-Pressure Seawater as a CO₂ Solvent in Underwater Air-Independent Propulsion Systems. *JMSE* 8, 22. <https://doi.org/10.3390/jmse8010022>.

Persson, O., Östberg, C., Pagels, J., Sebastian, A., 2006. Air contaminants in a submarine equipped with air-independent propulsion. *J. Environ. Monit.* 8, 1111–1121. <https://doi.org/10.1039/B605331A>.

Peter L. Mart, Jenny Margeridis, 1995. Fuel Cell Air Independent Propulsion of Submarines. DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Avusturalya DSTO-GD-0042.

Pommer, H., Hauschildt, P., Teppner, R., Hartung, W., 2006. Air-independent propulsion system for submarines. *ThyssenKrupp techforum* 64–69.

Psallidas, K., Whitcomb, C.A., Hootman, J.C., 2010. Design of Conventional Submarines with Advanced Air Independent Propulsion Systems and Determination of Corresponding Theater-Level Impacts: Design of Conventional Submarines. *Naval Engineers Journal* 122, 111–123. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.2010.00196.x>.

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

Rashad, M.I., Nada, S.A., 2021. Experimental and theoretical investigation on a proposed free piston Stirling engine with expansion bellow. *Applied Thermal Engineering* 182, 116071. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116071>.

Raska, M., 2016. Diesel-Electric Submarine Modernization in Asia: The Role of Air-Independent Propulsion Systems, in: Bitzinger, R.A. (Ed.), *Emerging Critical Technologies and Security in the Asia-Pacific*. Palgrave Macmillan UK, London, pp. 91–106. https://doi.org/10.1057/9781137461285_8.

Turns, S.R., 2011. *An introduction to combustion: concepts and applications*, 3. ed. ed. McGraw-Hill, Boston.

Ust, Y., Sahin, B., Sogut, O.S., 2005. Performance analysis and optimization of an irreversible dual-cycle based on an ecological coefficient of performance criterion. *Applied Energy* 82, 23–39. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.08.005>.