LİMAN SAHASINDAKİ GEMİLERDE ORGANİK RANKINE ÇEVİRİMİNİN YAKIT KAZANCI VE EGZOS SALIMINA ETKİSİ

Olgun KONUR¹, Murat PAMIK², C. Özgür ÇOLPAN³

ÖZET

Gemilerde fosil yakıtlar kullanılarak elde edilen enerjinin büyük bölümü, yararlı işe çevrilemeyerek ısı olarak atılmaktadır. Kazan sistemleri, egzoz gazından buhar (stim) elde ederek atık ısının geri kazanımı konusunda fayda sağlamaktadır. Buna rağmen, yüksek oranda atık ısı; egzoz gazları ve ısı değiştiriciler ile birlikte doğaya salınmaktadır. Organik Rankine Çevrimi (ORC), buhar Rankine çevrimine göre daha düşük çalışma sıcaklıklarında çalışabildiğinden, gemilerde atık ısının geri kazanımı konusunda son yıllarda denizcilik uygulamalarında yer bulmuştur. Ayrıca, yapılan çalışmalar, çevreye zararlı gazların salımlarının da bu yöntem ile azaltılabildiğini göstermektedir. Bu çalışmanın ilk bölümünde gemilerde enerji verimliliği uygulamalarına ve bunların mevcut şartlardaki önemine değinilmektedir. Sonraki bölümlerde, ORC teknolojisi tanıtılmakta ve ORC teknolojisinin gemilerdeki kullanım olanaklarına değinilmektedir. Son olarak, örneklem olarak seçilen İzmir limanına yanaşan gemilerin ORC sistemine sahip olmaları durumunda, atık ısıdan yararlı işe çevirebilecekleri enerji miktarı, yakıt kazancı ve liman sahasındaki egzoz salımları, seçilen bir zaman dilimi için güncel veriler üzerinden hesaplanmıştır. Bu sayede, ORC sisteminin bu çıktılar üzerine faydasının karşılaştırılmalı analizi yapılmıştır.

¹ Arş. Gör., Dokuz Eylül Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, İzmir
olgun.konur@deu.edu.tr.

² Araş.Gör., Dokuz Eylül Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, İzmir
murat.pamik@deu.edu.tr.

³ Doç. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İzmir,
ozgur.colpan@deu.edu.tr.

Anahtar Sözcükler: Atık ısının geri kazanımı, egzoz salımı, enerji verimliliği, organik Rankine çevrimi.

1. GİRİŞ

Dünyada çevresel sorunların baş göstermesi, gemi kaynaklı egzoz salımlarının azaltılması konusunda ilgili otoriteleri önlemler almaya itmiştir. Hem bu önlemlerin, hem de denizcilik sektörünün büyüyen ekonomik kaygılarının sonucu, gemilerde enerji verimliliğini arttırıcı uygulamalar da son yıllarda büyük önem kazanmıştır.

MARPOL 73/78 Sözleşmesi'ni değiştiren 1997 Protokolü ile “Gemilerden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Önlenmesi için Kurallar” Ek VI sözleşmesine eklenmiş ve 19 Mayıs 2005 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Sözleşme uyarınca ozon tabakasına zarar veren salımın önlenmesi ile gemilerin egzoz gazlarından çıkan azot oksit (NO_x) ve kükürt oksit (SO_x) içeren salımların sınırlandırılmasına ilişkin düzenlemeler getirilmiştir (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2017). Daha sonra yayımlanan ek düzenlemeler ile 2011 yılı Temmuz ayında, EEDI (Enerji Verimliliği Dizayn İndeksi) ve SEEMP (Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı) zorunlu uygulamaları kabul edilmiştir. Bu gereklilikler 1 Ocak 2013'ten itibaren uygulamaya geçmiş olup, hem yeni hem de mevcut olan 400 groston ve üstü her gemi bir SEEMP planı bulundurmak zorundadır (IMO, 2017).

MEPC.213(63) (IMO, 2012: 7-11), gemilerde enerji yönetim planı içinde potansiyel olarak benimsenmesi için, birtakım enerji iyileştirme yöntemlerini ayrıntılarıyla anlatan “Gemiler için Yakıt Verimli İşletim için En İyi Uygulamalar Rehberi”ni sunmaktadır. Bu yöntemler, açıklamaları ile birlikte Tablo 1’de özetlenmiştir.

Atık ısının geri kazanımı, gemilerde enerji verimliliği sağlamak konusunda yüksek potansiyele sahip metotlar içerisindedir. Gemilerde baca kazanı (ekonomayzer) sistemleri ile atık ısının geri kazanımı yaygın olarak görülmektedir. Bu sistemlerde baca kazanı içerisindeki ısı değiştiriciler ile egzoz gazının sıcaklığı kazan besleme suyuna aktarılır. Gerçekleşen ısı transferi, besleme suyunu kaynatarak basınçlı stim elde edilmesini sağlar. Stimin gemide, yakıt tanklarının ve devrelerinin ısıtılması, yağ/yakıt separasyon sıcaklığının ayarlanması, sintine separatörünün ısı ihtiyacının karşılanması ve sıcak su temini gibi farklı işlevlerde kullanılması ile atık ısı yararlı işe dönüştürülmüş olur.

Tablo 1. SEEMP kapsamında enerji verimliliği sağlayabilecek metotlar
(Lloyd's Register, 2012: 3; IMO, 2012: 7-11).

Kategori	İyileştirme yöntemi	Açıklama
Yakıt Tasarrufu Sağlayabilecek Faaliyetler	Gelişmiş sefer planlaması	Yolculukların dikkatli şekilde planlanması
	Hava durumuna göre rota optimizasyonu	Mevcut rota araçları ile potansiyel verimlilik kazançları
	Tam zamanında varış	Bir sonraki liman ile erken ve iyi iletişim sonucu hız optimizasyonu
	Optimum hız	Motorun optimal çalışma verimi ve pervane eğrisi dikkate alınarak yapılacak yakıt harcamı düşüşü
	Optimum Şaft Gücü	Sabit şaft devri ile verim artışı
Optimum Gemi İdaresi	Trim-draft optimizasyonu	Belirli draft ve hız için optimum trim
	Optimum balast	Optimum trim ve iyi yük planlaması sonucu balast yönetimi
	Optimum pervane ve akış düzenleme donanımları ile ilgili hususlar	Gelişmiş pervane dizaynları ve kanat, fin gibi akış düzenleyiciler ile sevk sistemlerinin güçlendirilmesi
	Dümen ve otopilot sistemlerinin optimum kullanımı	Dümen donanımı hatalarının ve rota dışı kat edilen seyir mesafelerinin azaltılması
	Tekne Bakımı	Gelişmiş kaplama sistemlerinin kullanımı, sualtı denetimi ve bakım sürelerinin yönetimi
Sevk Sistemi	Sevk sistemi bakımı	Planlı bakım ve optimizasyon faaliyetleri ile ısı ve mekanik kayıpların azaltılması
Atık Isının Geri Kazanımı		Elektrik üretimi veya bir şaft motoruyla ek tahrik gücü için gemi kaynaklı termal ısı kayıplarının değerlendirilmesi
Gelişmiş Yük Elleçleme		Gemi ve liman gerekliliklerine göre optimum yükün elleçlenmesi
Gelişmiş Filo Yönetimi		Filo planlamasındaki iyileştirmeler
Enerji Yönetimi		Gemide enerji harcayan sistemlerin incelenmesi ile sağlanacak kazançlar
Yakıt Tipi		Yeni geliştirilen alternatif yakıtlar
Diğer Önlemler		Yakıt tüketimi yazılımları, yenilenebilir enerji teknolojileri, sahil elektriği kullanımı

Yüksek ısı verimliliklerine rağmen dizel motorlar çevreye yüksek miktarda ısı enerjisi yaymaktadır. Bu enerjinin bir kısmı, gemi içi ısı talebini karşılamak üzere baca kazan sistemleri ile egzoz gazından geri kazanılabilmektedir. Bununla birlikte, geminin bu ısı talebi üretilen ısıya göre nispeten azdır ve mevcut atık ısının başka amaçlarla daha fazla kullanılması için potansiyel bırakmaktadır (Baldi ve Gabriellii, 2015: 655).

Buhar Rankine çevrimi, baca kazanlarından çıkan egzoz sıcaklıklarının 200-250°C'nin altına indiği koşullarda verimli olamamaktadır (Baldi, Larsen ve Gabriellii, 2015: 86). Bu nedenle, düşük sıcaklıklardaki ısıyı enerjiye dönüştürmek için uygun teknolojiler atık ısının geri kazanımı alanında incelemeye alınmıştır. Bu konuda en umut verici teknolojilerden biri, çeşitli ısı kaynaklarının verimli kullanılması açısından esnekliğe sahip ve nispeten basit bir güç çevrimi olan ORC (organik Rankine çevrimi) 'dir (Larsen, Pierobon, Haglind ve Gabriellii, 2013: 803).

2. ORGANİK RANKINE ÇEVİRİMİ (ORC)

Organik Rankine çevrimi (ORC), düşük sıcaklıktaki ısıyı elektrik enerjisine dönüştürmek için uygulanabilir bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, ORC sistemleri otonom operasyona izin verecek ve az bakım gerektirecek şekilde tasarlanabilmektedir. ORC giderek endüstriye adapte olmasına rağmen, maliyet etkinliğinin artırılması ihtiyacı devam etmektedir (Lecompte, Huisseune, Broek, Vanslambrouck ve Paepe, 2015: 448). Günümüzde ORC teknolojisi jeotermal uygulamalarda, güneş enerji santrallerinde, biyokütle uygulamalarında ve atık ısıdan elektrik enerjisinin üretildiği farklı uygulamalarla birlikte son yıllarda gemilerde yaygın kullanım olanakları sunmaktadır (DÜRR, 2017).

Rankine çevrimi, bir akışkanın atık ısıyı mekanik veya elektrik gücüne dönüştürmek için dört bileşen boyunca art arda dolaştığı kapalı çevrimli bir sistemdir. Seçilen çalışma akışkanı organik ise, bu sistem organik Rankine çevrimi (ORC) olarak adlandırılmaktadır.

ORC sisteminin ilk adımı, Şekil 1'de görüleceği üzere, mevcut atık ısıyı kullanarak evaporatörden geçen akışkanı ısıtmaktır. Isıyı alan akışkan, özellikleri neticesinde buharlaşarak güç türbinine ulaşmaktadır. Tamamen gaz haldeki basınçlı gaz, güç türbininin kanatçıklarına çarparak dönme momenti yaratmaktadır. Bu sayede, güç türbinine akuple bir jeneratörden elektrik enerjisi üretimi gerçekleşmektedir. Gerekli ısı üretilmesini sağlayan gaz, güç türbininden çıkarak kondensere ulaşır. Burada soğutma gerçekleştirilerek, organik akışkanın tekrar sıvı hale gelmesi sağlanmaktadır. Son olarak, bir pompa vasıtası ile akışkanın debisi artırılarak kapalı çevrimin tekrarlanması sağlanmaktadır.

Şekil 1. Organik Rankine çevrimi ve T-s diyagramı (Çengel ve Boles, 2008)

Organik akışkanın seçimi, sistemdeki atık ısı kaynağının sıcaklık sınırlarına göre değişiklik göstermektedir. Farklı çalışma sıcaklığı koşullarında, organik akışkanların çevrim verimleri de farklılık göstermektedir (Andreasen, Larsen, Knudsen, Pierobon ve Haglind, 2014: 204). ORC sistemlerinde hidrokarbonlar, siloksanlar, alkoller, eterler gibi organik akışkanlar kullanılmaktadır. Bu akışkanların buharlaşma gizil ısıları suya oranla daha düşük olduğundan, akışkanı buharlaştırmak için daha az ısı kullanılmaktadır. Bununla birlikte, organik sıvıların düşük gizil ısı, buhar Rankine çevrimlerine kıyasla daha büyük kütle akış oranlarının kullanılmasını gerektirmektedir. Bu sebeple, akışkanın sürekli döngüsünü sağlayacak olan pompanın harcayacağı enerji, organik Rankine çevrimi sistemlerinin enerji verimliliğini etkileyen önemli bir parametre olmaktadır.

3. DENİZCİLİKTE ORC UYGULAMA ALANLARI VE LİTERATÜR TARAMASI

Denizcilik sektöründe, başta artan yakıt fiyatları ve yakın zamanda çıkan düzenlemeler nedeniyle, sevk sistemi enerji verimliliğini artırmak için güçlü bir motivasyon bulunmaktadır. Bu nedenle yapılan çalışmalardan, düşük dereceli ısıyı enerjiye dönüştürmek için uygun teknolojilerin incelenmesi oldukça yaygındır. Çeşitli ısı kaynaklarının verimli kullanılması açısından, iyi esnekliğe sahip bir güç çevrimi olan ORC, atık ısının yüksek miktarda bulunduğu gemilerde kullanıma potansiyeline sahip önemli bir teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır (Singh ve Pedersen, 2016: 316).

Şekil 2. Gemi baca kazanlarına ORC uygulamasının şematik gösterimi (Singh ve Pedersen, 2016: 318)

Atık ısının geri kazanımı, gemilerde enerji verimliliği sağlamak konusunda yüksek potansiyele sahip metotlar içerisinde. Belirli bir kapasitenin üzerindeki hemen her geminin kullandığı, en bilinen ve atık ısının geri kazanımı için gemilerde kullanılan en verimli atık ısı geri kazanımı teknolojisi baca kazanı (ekonomayzer) teknolojisidir. Bu sistemde, fosil yakıtların yüksek sıcaklık ve basınç altında oksijen ile yakılarak, gemiye sevk için gerekli hareket enerjisi sağlayan dizel motorların, yanma sırasında oluşan yüksek sıcaklıklı egzoz gazlarının enerjisinden faydalanılır. Bu atık ısı enerjisi, baca kazanı adı verilen ısı değiştiricilerine yönlendirilerek, egzoz gazının sıcaklığı kazan besleme suyuna aktarılır. Gerçekleşen ısı transferi, besleme suyunu kaynatarak basınçlı stim (su buharı) elde edilmesini sağlar. Stimin gemide, yakıt tanklarının ve devrelerinin ısıtılması, yağ/yakıt separasyon sıcaklığının ayarlanması, sintine separatörünün ısı ihtiyacının karşılanması ve sıcak su temini gibi farklı işlevlerde kullanılması ile atık ısı yararlı işe dönüştürülmüş olur. Fakat bu kazanımdan sonra bile, hala ORC uygulamak için yeterli atık ısı kalmaktadır (Köroğlu ve Söğüt, 2017: 1138). Şekil 2’de gösterildiği üzere, gemilerdeki en büyük atık ısı kaynağı olan ana makine egzozu doğrudan ORC sisteminde elektrik enerjisi üretimi için değerlendirilebileceği gibi, baca kazanında stim

üretildikten sonraki aşamada da sisteme dahil edilerek kalan atık ısıdan enerji üretimi gerçekleştirilebilmektedir.

Sevk için kullanılan dizel makineden üretilen tek atık ısı egzoz değildir. Yanma sonucu oluşan ısının, yanma odasındaki parçalara aktardığı ısı da, dizel makine için istenmeyen ve soğutulması gereken bir atık ısı durumundadır. Buradan geri kazanılabilecek enerji egzoz ile kazanılana göre çok düşük olmasına rağmen ORC uygulamaları mevcuttur (Köroğlu ve Söğüt, 2017: 1138).

Şekil 3. Gemilerde termal yağ ile toplanan atık ısının ORC ile geri kazanımı (Bellolio, Lemort ve Vigo, 2015: 7)

Gemi makine dairesindeki atık ısı kaynakları farklı sıcaklık aralıklarındadır. Bu atık ısıların hepsinin ortak bir sistemde toplanarak ORC sisteminde kullanıldığı örnekler görülmektedir. Şekil 3'te gösterildiği gibi ısı değiştirici akışkan olarak termal yağın kullanıldığı bu sistemlerde, termal yağ düşük sıcaklıklı kaynaktan yüksek sıcaklıktaki kaynağa doğru kademeli olarak dolaştırılmaktadır. Bu sayede ekonomik olarak daha verimli bir ORC sistemi ile makine dairesindeki birden fazla atık ısı kaynağının enerjisinin geri kazanımı mümkün olmaktadır.

Larsen, Pierobon, Haglind ve Gabriell (2013), denizcilik uygulamalarındaki 180°C ile 360°C arasında değişen ısı kaynağı sıcaklıkları için maksimum ORC sistemi verimliliklerini sırasıyla %20-30 arasında değişen değerlerde olacağını belirtmektedir. Bu oranlar, yaklaşık olarak %10 ile %15 arasında genel sistem verimliliğinin iyileşmesini sağlayabilmektedir. Ortalama olarak, iyimser simülasyonlar genel sistem verimliliği iyileştirmelerini %15-20 arasında, gerçekçi beklentiler ise ORC ile enerji verimliliğini iyileştirmelerini %7-10 oranında artıracaklarını tahmin etmektedir (Sprouse ve Depcik, 2013: 714-715). Deniz dizel

motoru için yapılan bir çalışmada, ORC sistem verimliliğinin %18-21 arasında arttığı gözlemlenmiştir. Böylece toplam tesis verimliliğinde yaklaşık %10 oranında artış elde edilmiştir (Song, Song ve Gu, 2015: 980-983). Gaz türbini egzoz ısısı kullanan deniz uygulamaları için ORC verimliliği % 20-30 olarak belirtilmiştir (Pierobon, Kandepu ve Haglind, 2015). Bir diğer çalışmada ana makine soğutma suyu, yağlama yağı ve skavenç kaynaklı ısıların kullanılması ile ORC'nin farklı konfigürasyonları analiz edilmiştir. Burada düşük kaliteli WHR'nin fizibilitesinin % 8'e kadar iyileştirilebildiği gösterilmiştir (Soffiato, Frangopoulos, Manente, Rech ve Lazzaretto, 2015). OPCION Marine şirketi, 2012 yılında M/V Figaro isimli Ro-Ro gemisinde ilk ORC-Atık Isı Geri Kazanım tesisini devreye sokmuştur. Ana makine soğutma suyuna uygulanan ORC sisteminde % 4-5 civarında yakıt tasarrufu hedeflenmiş olup; kurulacak diğer tesisler ile % 5-10 arasında tasarruf potansiyeli beklenmiştir (OPCION Marine, 2012).

4. İZMİR LİMANINA UĞRAYAN GEMİLER ÜZERİNE ORC UYGULAMASI

Bu bölümde gemilerin liman sahasındaki salımlarının indirgenmesi hedeflenerek, 24 Mart 2017 ila 31 Mart 2017 tarihleri arasında İzmir Limanında bulunan gemilerin ORC sistemini kullanması durumunda, limanda kullandıkları jeneratörlerden salınan CO₂ gazlarındaki değişim ve yakıt tasarruf miktarı incelenmiştir.

İzmir Liman Başkanlığından alınan verilerle, belirtilen tarihler arasında İzmir limanında bulunan 41 adet gemi bu çalışmanın örneklemini oluşturmaktadır. Gemilerin IMO numarası ve bağlı bulundukları klas kuruluşlarındaki bilgilere dayanarak, çalışma için gerekli olan liman jeneratör kapasitelerine ulaşılmıştır.

Liman operasyonları sırasında, gemilerin ihtiyaç duyacakları güç miktarları değişiklik gösterdiğinden, bu çalışmada jeneratörlerin %60 yük altında çalıştıkları kabul edilmiştir.

ORC sisteminin kullanılmasındaki en önemli detay, kullanılan ısı transfer akışkanının seçimidir. Yüksek debili atık ısı kaynaklarında akışkanın seçimi ile ilgili, R-245ca ve R-245fa'nın, 180°C'nin altındaki türbin giriş sıcaklıkları için atık ısı geri kazanım uygulamalarında en uygun olduğu bildirilmektedir (Sprouse ve Depcik, 2016).

Tablo 2'de, sistem için kullanılan akışkanın R-245ca olarak belirlenmesinden sonra, bu akışkan kullanılarak elde edilecek ideal verimin %15,8, gerçek verimin ise %8,7 olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Organik Rankine çevrimlerinin farklı ısı transfer akışkanlarına göre performans kıyaslamaları (Sprouse ve Depcik, 2013)

Parametre	HPSRC	LPSRC	ORC-R245ca	ORC-izopentan
Net elektrik gücü(kW)	5	5	5	5
İdeal Verim (%)	22,7	15,3	15,8	16,3
Gerçek Verim (%)	13,3	8,9	8,7	9,0
Maksimum Basınç (bar)	25	8	22.5	19
Maksimum Sıcaklık (C)	260	220	143	151
Kütleli Debi (g/s)	15,2	22,7	241	121

Bu çalışma kapsamında analiz edilecek olan gemilerde kullanılan dizel jeneratörlerin özgül yakıt tüketimlerinin (Θ_Y) belirlenmesi için Şekil 4'te verilen orta devirli motorlar için karakteristik yakıt tüketim eğrisinden yararlanılmıştır. Jeneratörlerin liman içerisindeki ortalama yüklenme durumları %60 olarak kabul edilmiş ve grafiğe göre 198 g/kWh özgül yakıt tüketimi hesaplamalarda kullanılmıştır.

Şekil 4. Orta devirli bir dizel motorun karakteristik performans-yakıt tüketimi eğrisi (Hudson ve Turnock, 2011: 208)

Tablo 3. 24.03.2017 – 31.03.2017 tarihleri arasında İzmir Limanında bulunan gemilerin bekleme süreleri ve jeneratör güç tüketimleri

GEMİ TİPİ	DWT	GELİDİĞİ TARİH	GİTTİĞİ TARİH	SÜRE(SAAT)	D/G KW (% 60MCR)
KURUYÜK / RO RO	9.089,00	24.03.2017	24.03.2017	14	528
TAM KONTEYNER GEMİSİ	13.996,00	24.03.2017	25.03.2017	17	444
TAM KONTEYNER GEMİSİ	13.623,00	22.03.2017	25.03.2017	34	444
KURU YÜK	3.789,00	24.03.2017	25.03.2017	32	60
KURUYÜK GEMİSİ	3.337,00	20.03.2017	25.03.2017	28	60
DÖKME YÜK GEMİSİ	53.553,00	17.03.2017	26.03.2017	61	939
RO RO/ YÜK GEMİSİ	18.885,30	25.03.2017	25.03.2017	7	698,4
TAM KONTEYNER GEMİSİ	25.904,00	24.03.2017	25.03.2017	10	729
TAM KONTEYNER GEMİSİ	11.050,00	25.03.2017	26.03.2017	11	444
PETROL TANKERİ	886,00	25.03.2017	26.03.2017	14	60
TAM KONTEYNER GEMİSİ	22.030,00	25.03.2017	26.03.2017	10	432
RO RO/ YÜK GEMİSİ	6.987,00	26.03.2017	26.03.2017	8	810
KURUYÜK	6.085,00	23.03.2017	29.03.2017	100	150
KURU YÜK	5.479,00	17.03.2017	26.03.2017	51	150
TAM KONTEYNER GEMİSİ	39.345,00	26.03.2017	27.03.2017	16	780
TAM KONTEYNER GEMİSİ	17.505,50	26.03.2017	28.03.2017	32	432
TAM KONTEYNER GEMİSİ	12.477,00	26.03.2017	28.03.2017	35	600
KURU YÜK	4.891,00	26.03.2017	27.03.2017	20	108
RO RO/ YÜK GEMİSİ	31.108,00	29.03.2017	29.03.2017	8	1134
KURUYÜK / RO RO	11.555,00	28.03.2017	29.03.2017	21	528
KONTEYNER / RO RO	84.270,00	26.03.2017	29.03.2017	55	1224
KONTEYNER / RO RO	35.814,00	28.03.2017	29.03.2017	14	717,6
KURU YÜK	7.436,38	22.03.2017	29.03.2017	109	150
YÜK / KONTEYNER GEMİSİ	9.963,00	29.03.2017	29.03.2017	14	672
YÜK / KONTEYNER GEMİSİ	12.754,00	29.03.2017	30.03.2017	25	444
TAM KONTEYNER GEMİSİ	23.011,00	29.03.2017	30.03.2017	10	729
TAM KONTEYNER GEMİSİ	20.346,00	29.03.2017	31.03.2017	40	558
KONTEYNER / RO RO	17.515,00	29.03.2017	30.03.2017	19	698,4
KURU YÜK	3.243,00	28.03.2017	31.03.2017	50	60
KONTEYNER / RO RO	33.742,00	29.03.2017	31.03.2017	29	1134
KURUYÜK GEMİSİ	1.896,00	30.03.2017	30.03.2017	12	48
TAM KONTEYNER GEMİSİ	26.812,00	29.03.2017	31.03.2017	39	444
KURUYÜK	3.492,00	27.03.2017	31.03.2017	80	60
ARABA TAŞIYICI GEMİ	19.080,00	31.03.2017	31.03.2017	14	630
KURU YÜK	3.811,00	26.03.2017	31.03.2017	103	60
RO RO/ YÜK GEMİSİ	18.800,00	31.03.2017	31.03.2017	7	698,4
TAM KONTEYNER GEMİSİ	8.943,00	31.03.2017	31.03.2017	9	444
KURUYÜK GEMİSİ	3.533,00	29.03.2017	01.04.2017	52	60
KURU YÜK	4.201,85	28.03.2017	31.03.2017	69	90
KONTEYNER / RO RO	12.578,00	27.03.2017	31.03.2017	84	900
TAM KONTEYNER GEMİSİ	39.089,00	31.03.2017	01.04.2017	5	792

D/G : Dizel Jeneratör

MCR : Maksimum Sürekli Nominal Güç

Bilgileri alınan liman içerisindeki 41 geminin toplam enerji tüketimleri (TE), 530.348,6 kWh olarak hesaplanmıştır. Şekil 4'te verilen grafikten faydalanılarak toplam yakıt tüketimini (TY) hesaplamak için Formül 1 kullanılmıştır.

$$TY = \Theta Y \times E \quad (1)$$

TY : Toplam yakıt tüketimi (ton)
 ΘY : Özgül yakıt tüketimi (ton/kWh)
 TE : Toplam enerji tüketimi (kWh)

Buna göre liman içerisindeki gemilerin belirlenen tarihler arasındaki toplam yakıt tüketimi (TY) 106,99 ton'dur. Bu değer, Tablo 2'deki R245-CA akışkanı bir ORC sisteminin gerçek verimlilik değeri kullanılarak hesaplandığında, Formül 2'den faydalanılarak 98,96 tonluk bir tüketime tekabül edecektir. D/G verimliliği sıkıştırma oranı 6.5 kabul edilerek, %52 olarak alınmıştır (Goodenough ve Baker, 1927: 44). Aradaki 8,03 tonluk fark ORC sistemi ile elde edilecek kazanç olacaktır.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\eta_{D/G}}{(\eta_{D/G} + \eta_{D/G}) - \eta_{D/G} \times \eta_{ORC}} \quad (2)$$

Gemilerden kaynaklı karbon salımı hesaplanırken, yakıt miktarına göre yaklaşık olarak salım yapılan CO₂ miktarına ulaşmak için aşağıdaki verilen Formül 3 kullanılmaktadır (Simmons, 2001: 3).

$$Cr = Q \times NCV \times EF \times (1-Sf) \times F \times 3.66 \quad (3)$$

Cr : Salım yapılan karbon miktarı (kg)
 Q : Makinede yakılan yakıt miktarı (kg)
 NCV : Yakıt kalorifik değeri (TJ/ton)
 EF : Salım katsayısı (kg/TJ)
 SF : Karbondioksit depolama katsayısı
 F : Yakıt oksidasyon katsayısı
 $\eta_{D/G}$: Dizel jeneratör gerçek verimi
 η_{ORC} : Organik Rankine çevrimi sistemi gerçek verimi

Bu formülde, gemilerden kaynaklı salım yapılan toplam karbondioksit miktarını bulmak için yakıtın kalorifik değeri 42.2 TJ/ton olarak kabul edilebilmektedir (Gülmez, Günay ve Cerit, 2016). "IPCC Guidelines" (1996)'dan elde edilen bilgilere göre gemilerde kullanılan dizel yakıtın salım katsayısı 0.0211 kg/TJ, karbondioksit depolama katsayısı 0.18, oksidasyon katsayısı 0.99 olarak kullanılmıştır. Buna göre; ORC sistemleri ile ekonomik olarak kazanılabilecek 8,03 ton dizel yakıtın yanında, İzmir limanı içerisinde 21,24 ton CO₂ salımına engel olunabilecektir.

5. SONUÇ

Gemilerin ortaya çıkardığı yüksek karbondioksit salımları özellikle İzmir gibi metropol şehirler için ciddi tehdit oluşturmaktadır. Bu bölgelerde hava kirliliğinin artması bölgenin turizm potansiyelini olumsuz etkileyeceği gibi sağlık ve çevre problemlerinin artmasına da yol açacaktır. Bu sebeple bu bölgelerin hava kirliliği seviyelerinin daha düşük değerlere indirilebilmesi için çalışmalar yapılmalıdır.

Bu çalışmada, liman sahalarındaki egzoz salımlarının azaltılmasına yönelik kullanılan teknolojilerden organik Rankine çevrimi (ORC) kullanılmasının etkileri araştırılmış ve İzmir limanı söz konusu çalışmanın örnekleme seçilmiştir. Çalışmada, belirlenen bir hafta içerisinde limanda bulunan gemiler, limanda bekleme süreleri ve bu süre içerisinde tükettikleri enerjiler üzerinden, atık ısıнын kullanılması ile geri kazanılan yakıt miktarı hesaplanmış; buna bağlı olarak önlenecek CO₂ salımlarının miktarı ortaya konmuştur. Çevreci düzenlemelere uyum sağlaması açısından oldukça önemli sonuçlar elde edilmiştir.

Çalışmada kabul yapılan jeneratör yükü ve özgül yakıt tüketimi verileri çalışmanın kısıtlarını oluşturmaktadır. Bu veriler yerine gemilerin günlük öğlen raporlarından alınan gerçek değerleri kullanılması ile daha net sonuçlara ulaşılabilecektir.

KAYNAKÇA

- Andreasen, J.G., Larsen, U., Knudsen, T., Pierobon L. ve Haglind, F. (2014). "Selection and optimization of pure and mixed working fluids for low grade heat utilization using organic Rankine cycles". *Energy*. 73(2014): 204-213
- Baldi, F. ve Gabriellii, C. (2015). "A feasibility analysis of waste heat recovery systems for marine applications". *Energy*. 80(2015): 654-665.
- Baldi, F., Larsen, U. ve Gabriellii, C. (2015). "Comparison of different procedures for the optimisation of a combined Diesel engine and organic Rankine cycle system based on ship operational profile". *Ocean Engineering*. 110(2015): 85-93.
- Bellolio, S., Lemort, V. ve Vigo, P. (2015). "Organic Rankine cycle systems for waste heat recovery in marine applications". SCC 2015, International conference on shipping in changing climates. 24-26 November 2015. Glasgow, Scotland.
- Çengel, Y. ve Boles, M.A. (2008). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw Hill, New York.
- DÜRR. (2017). *Atık Isıdan Elektrik Üretimi Organic Rankine Cycle (Orç) Teknolojisi*.
http://www.greenenergyorc.com/resim/userfiles/files/170329_DuCTS_ORC-Cyplan_TR_low.pdf, Erişim Tarihi: 18.06.2017
- Goodenough, G. A. ve Baker, J. B. (1927). *A Thermodynamic Analysis of Internal-Combustion Engine Cycles*. University of Illinois Bulletin.
- Gülmez, Y., Günay, O. ve Cerit, A.G. (2016). "Kruvaziyer Gemilerin Karbon Salımı Tahmini: Kuşadası Liman Bölgesi için Sistem Dinamikleri Yaklaşımı". 3. Ulusal Deniz Turizmi Kongresi. 26-27 Şubat 2016, İzmir.
- Hudson, D.A. ve Turnock, S.R. (2011). "Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping". *Energy Policy*. 40(2012): 204-218.
- IMO. (2012). "2012 guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan (SEEMP)". Resolution MEPC.213(63).
- IMO. (2017). *MARPOL73-78: Brief history - list of amendments to date and where to find them*.
<http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/ReferencesAndArchives/HistoryofMARPOL/Documents/MARPOL%2073-78%20Brief%20History%20>

%20List%20of%20amendments%20and%20how%20to%20find%20them.htm, Erişim Tarihi: 07.06.2017

- IPCC. (2007). “*Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC*”, Geneva, Switzerland.
- Koroğlu, T., Söğüt, O.S. (2017). Advanced exergy analysis of an organic rankine cycle waste heat recovery system of a marine power plant. *Journal of Thermal Engineering*, 3(2): 1136-1148.
- Larsen, U., Pierobon, L., Haglind, F. ve Gabrieli, C. (2013). “*Design and optimisation of organic Rankine cycles for waste heat recovery in marine applications using the principles of natural selection*”. *Energy*. 55(2013): 803-812.
- Lecompte, S., Huisseune, H., Broek M.V.D., Vanslambrouck, B. ve Paepe, M.D. (2015). “*Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery*”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 47(2015): 448–461.
- Lloyd’s Register. (2012). *Implementing a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)*. http://www.navtronic-project.eu/userdata/file/Public%20deliverables/Lloyds%20SEEMP%20Guidance%20Notes%20for%20Clients%20v2_tcm155-240651.pdf, Erişim Tarihi: 12.05.2017
- OPCON Marine. (2012). *Commissioning and testing of first reference installation of Opcon technology for ships*. <http://opconenergysystem.com/wp-content/uploads/2015/10/Opcon-Powerbox-ORC-brochure.pdf>, Erişim Tarihi: 15.04.2017
- Pierobon, L., Kandepu ve R., Haglind, F. (2012). “*Waste heat recovery for offshore applications*”. ASME 2012 International mechanical engineering congress and exposition. American Society of Mechanical Engineers; 9-15 November 2012. Houston, Texas, USA.
- Simmons, T. (2006). “*CO₂ Emissions From Stationary Combustion of Fossil Fuels*”. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme
- Singh, D.V., Pedersen, E. (2016). “*A review of waste heat recovery technologies for maritime applications*”. *Energy Conversion and Management*. 111(2016): 315–328.
- Soffiato, M., Frangopoulos, C.A., Manente, G., Rech, S. ve Lazzaretto A. (2015). “*Design optimization of ORC systems for waste heat recovery on board a LNG carrier*”. *Energy Conversion and Management*. 92(2015): 523–534.

- Song, J., Song, Y. ve Gu, C.W. (2015). "Thermodynamic analysis and performance optimization of an Organic Rankine Cycle (ORC) waste heat recovery system for marine diesel engines". *Energy*. 82(2015): 976-985.
- Sprouse III C., Depcik C. (2013). "*Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery*". *Applied Thermal Engineering*. 51(2013): 711-722.
- Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı. (2017). *1978 Protokolü ile Değişik, 1973 Tarihli Denizlerin Gemiler Tarafından Kirlenmesinin Önlenmesine Ait Uluslararası Sözleşme (MARPOL 73/78)*. <http://imo.udhb.gov.tr/TR/19Marpol.aspx>, Erişim Tarihi: 06.06.2017