Received: 04 October 2015 Accepted: 16 November 2015 DOI ID: 10.5505/jems.2015.29392

Journal of ETA Maritime Science JEMS JOURNAL

Original Research (AR)

Değişken Deniz Suyu Sıcaklıklarında Çalışan Bir Gemi Soğutma Sisteminin Ekonomik Analizi

Veysi BAŞHAN[1], Adnan PARLAK[1]

[1]Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği, *vbashan@yildiz.edu.tr; aparlak@yildiz.edu.tr*

Öz

Bilindiği üzere Kyoto Protokolü, hidrokarbon yakıt ile çalışan enerji sistemlerinde karbon salınımını azaltmayı öngörmektedir. Mevcut teknolojiler incelendiğinde, hidrokarbon esaslı yakıt tüketen sistemlerde karbon salınımını doğrudan azaltacak bir yöntem hali hazırda bulunmamaktadır. Günümüzde, karbon salınımını azaltmanın en etkin yolu yakıt tüketiminin azaltılmasıdır. Son yıllarda gemilerde de enerji verimliliğine yönelik uluslararası kurallar yürürlüğe girmiştir. Gemilerde enerji tüketen bileşenlerden bir tanesi soğutma ve iklimlendirme sistemleridir. Mevcut gemilerde soğutma sistemleri ekstrem şartlara göre ve sabit devirde çalışacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu sistemlerde kondanserde yoğuşma için soğutucu akışkan olarak deniz suyu kullanılmaktadır. Deniz suyu sıcaklığı arttıkça, soğutucu akışkanın kondanser çıkışında yoğuşmayı temin edecek şekilde kompresör çıkış basıncını arttırmak gerekmektedir. Bu durumda, kompresörün çektiği güç de artmaktadır. Deniz suyu sıcaklığı düştüğünde ise soğutucu akışkanın yoğuşmasını çok daha düşük çıkış basınçta sağlamak mümkündür. Bu durumda da kompresörün güç ihtiyacı azalmaktadır. Sabit devirle dönen mevcut soğutma kompresörleriyle düşük deniz suyu sıcaklıklarında soğutma sisteminin enerji tasarruf potansiyelinden faydalanılamamaktadır.

Bu çalışmada değişken devirli kompresöre sahip soğutma sistemi kullanılması durumunda; kompresör devri, kondanser çıkış sıcaklıklarına göre değişken hale getirilmesiyle soğutma sistemi etkinlik değerleri, sabit devirde çalışan soğutma sistemiyle karşılaştırılarak enerji tasarruf potansiyelleri hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Enerji Verimliliği, Gemi, Soğutma Sistemleri, EEDI, EEOI, MARPOL.*

Economic Analysis of A Ship Refrigeration System in case of Variable Sea Water Temperature Conditions

Abstract

As known Kyoto Protocol forces the states to decrease carbon emissions due to the combustion of hydrocarbon content fuels in the energy plants. When current technologies have been investigated, it seems that there is no method that directly decreases carbon emissions. Nowadays, the most effective way for decreasing carbon emissions is to develop methods that increase the

fuel efficiency of systems. In recent years international rules related to energy efficiency ships came into force. One of the components that consume energy in ships is HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning refrigeration) system. In existing ships, refrigeration systems are designed to work under extreme conditions and compressors work at constant speed. In these systems, sea water is used as a coolant in condenser. When sea water temperature increases, the compressor outlet pressure must be kept higher in order to ensure condensation in condenser outlet. This situation causes increase in power demand of compressors which result in decrease of COP. On the other hand, when the sea water temperature decreases, the power demand of compressor decreases. In that case, it cannot be benefited from energy saving potential of refrigeration system occurred in lower sea water temperature conditions.

In this study, usage of variable speed compressors in refrigeration system is considered and a comparison of constant speed compressor system and variable speed compressor system is carried out. The condenser outlet temperature is utilized as main parameter for compressor speed adjustment and energy saving potential is calculated.

Keywords: *Energy Efficiency, Ship, Refrigeration Systems, EEDI, EEOI, MARPOL.*

1. Giriş

1978 protokolü ile değiştirilen MARPOL 73/78 (1973 Gemilerden Kaynaklanan Kirliliğin Önlenmesi Uluslararası Sözleşmesi) EK VI kural 22 ve SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan-Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı) 'nın gerekleri olarak gemilerde enerji tüketen sistemlerin verimliliğini arttırmak hedeflenmektedir [1] [2]. Bu kapsamda gemilerde kullanılan soğutma sistemleri ekstrem deniz suyu sıcaklıklarına göre tasarlanmıştır. Oysa gemiler deniz suyu sıcaklığının farklı olduğu bölgelere seferler düzenlemektedir. Örneğin gemi, Yemen'den (Deniz suyu sıcaklığı ~ 40 °C), Kuzey denizine, (Deniz suyu sıcaklığı ~ 5-10°C) seyir yapabilmektedir. Deniz suyu sıcaklığının çok düşük olduğu bölgelerde kondanser çıkışındaki soğutucunun sıvı hale getirilmesi çok daha düşük kondanser çıkış basıncı ile sağlanabilmektedir. Mevcut gemilerdeki soğutma sistemlerinde kompresör sabit devir ile çalıştığından, çıkış basıncı değişken şartlara göre ayarlanamadığından soğutma sistemlerinden elde edilebilecek tasarruf potansiyellerinden faydalanılamamaktadır.

Ülkemizde faaliyet gösteren ortalama bir denizcilik firmasının 15 gemisi olduğu kabul edildiğinde, firmanın 1 yılda (3000 saat) yapabileceği tasarruf miktarı -özellikle emisyon açısından kısıtlanan bölgelerde- 100.000 $'a ulaşabilmektedir. Bu çalışmada değişken deniz suyu sıcaklıklarına bağlı olarak soğutma sisteminden sağlanabilecek tasarruf potansiyeli araştırılmıştır. Yerel ve küresel hava kirliliği sebebi ile gemilerden kaynaklanan SOx, NOx, VOC emisyonlarını azaltmak için IMO MARPOL Ek VI'da ECA (Emission Control Area-Emisyon Kontrol Alanı) adı altında özel bölgeler belirlenmiştir [3]. Bu alanlarda seyir yapacak olan yeni inşa edilecek gemilerden çevreye atılacak olan emisyon limitleri sınırlandırılmıştır. CO_2 emisyonlarının düşürülmesi için halihazırda kullanılan bir yöntem bulunmadığından enerji verimliliğini arttırıcı önlemler alınmış ve bu kapsamda gemiler için enerji verimliliği dizayn indeksi (EEDI –Energy Efficiency Design Index) tanımlanmıştır [4]. İşletme esnasında geminin verimli işletilip işletilmediğinin kontrolü için ayrıca enerji verimliliği operasyon indeksi (EEOI- Energy Efficiency Operation Index) tanımlanmıştır [5]. Gemilerin yakıt tüketimi toplam işletme giderlerinin yaklaşık % 60'ını oluşturmaktadır. Bu nedenle yakıttan kaynaklı işletme maliyetini azaltabilmek için IFO180 ve IFO380 gibi çok yüksek viskoziteli ucuz yakıtlar tercih edilmektedir. Ancak yukarıda bahsedildiği gibi özel alanlarda (ECA) seyreden gemilerde uluslararası kurallar gereğince düşük kükürtlü yakıt kullanılması zorunludur.

Dolayısıyla bu alanlarda seyreden gemiler yüksek maliyetli yakıt (MGO ve/veya LSGO01) kullanmak durumundadırlar. Bu ise işletme maliyetini arttırmaktadır.

Önümüzdeki dönemlerde özel alanların çok daha geniş alanları kapsayacağı dikkate alındığında gemilerde enerji verimliliğine yönelik tedbirler ve yeni yöntemlerin geliştirilmesi kaçınılmazdır. "HVAC Sistemlerinin Etkinlik Katsayılarının Arttırılmasına Yönelik Önlemlerde" gemilerde enerji verimliliğini arttırmak için kullanılabilecek potansiyel gemi yardımcı sistemlerinden biridir. Soğutma sistemlerindeki verimlilik artışı özellikle yüksek soğutma yükü nedeniyle Cruise tipi gemilerde (Lüks Yolcu Gemisi) çok daha önemlidir.

Bu çalışmada değişken devirli kompresöre sahip soğutma sistemi kullanılması durumunda; kompresör devri, kondanser çıkış sıcaklıklarına göre değişken hale getirilmesiyle soğutma sistemi etkinlik değerleri, sabit devirde çalışan soğutma sistemiyle karşılaştırılarak enerji tasarruf potansiyelleri hesaplanmıştır.

2. Soğutma Çevrim Analizi

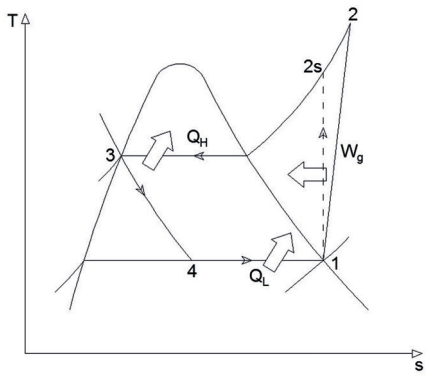
Çevrim analizinin yapıldığı tersinmez soğutma çevriminin T-s diyagramı Şekil 1' de görülmektedir. Çevrimde 1-2 arası tersinmez şartlardaki kompresör işini, 1-2s tersinir şartlardaki sıkıştırma işini, 2-3 arası tersinmez soğutma siteminde kondanserden atılan ısıyı, 2s-3 arası tersinir şartlarda kondanserden atılan ısıyı, 3-4 arası sabit entalpide kısılmayı, 4-1 ise evaporatörden çekilen ısıyı göstermektedir. Tersinmez kompresörün çektiği güç

$$\dot{W}_k = \dot{m}\,(h_2 - h_1) \tag{2.1}$$

Kompresör izantropik verimi

$$\eta_k = \frac{h_{2s}-h_1}{h_2-h_1} \tag{2.2}$$

Denklem 2.2 yeniden düzenlenerek denklem 2.1 de yerine konulursa tersinmez şartlarda çalışan kompresörün güç ifadesi



Şekil 1. *Tersinmez Buhar Sıkıştırmalı Soğutma Çevriminin T-S Diyagramı*

$$\dot{W}_K = \frac{\dot{m}(h_{2s} - h_1)}{\eta_K} \tag{2.3}$$

olur. 2-3 arasında kondanserden atılan ısı

$$\dot{Q}_C = \dot{m}(h_2 - h_3) \tag{2.4}$$

3-4 arasında soğutucu gaz sabit entalpide kısıldığından

$$h_3 = h_4 \tag{2.5}$$

olur. 4-1 arasında ortamdan çekilen ısı

$$\dot{Q}_E = \dot{m}(h_1 - h_4) \tag{2.6}$$

Tersinmez soğutma çevriminin tesir katsayısı

$$STK = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{W}_K} \tag{2.7}$$

Denklem 2.3 ve 2.6 denklem 2.7'de yerine konarak yeniden düzenlenirse STK aşağıdaki denkleme dönüşür.

$$STK = \frac{\eta_k\,(h_1 - h_4)}{h_{2s} - h_1} \tag{2.8}$$

Alternatör-Soğutma kompresörü genel verimi

$$\eta_T = \eta_{eff} \times \eta_{gen} \times \eta_{e,motor} \times \eta_{komp.} \tag{2.9}$$

$$\eta_T = \frac{W_{mil}}{\dot{m}_y.Hu} \times \frac{W_{gen}}{W_{mil}} \times \frac{W_{e,motor}}{W_{gen}} \times \frac{W_{komp}}{W_{e,motor}} = \frac{W_{komp.}}{\dot{m}_y.Hu} \quad (2.10)$$

Kompresör için dizel motorundan çekilen güç,

$$\dot{W}_x = \frac{W_k}{\eta_T} \quad \text{olacaktır.} \quad (2.11)$$

Bu durumda STK,

$$STK = \frac{\dot{m}_s(h_4-h_1)}{W_x} = \frac{\eta_T \dot{m}_s(h_4-h_1)}{W_k} = \frac{\eta_T(h_4-h_1)}{h_2-h_1} \quad (2.12)$$

2.2 no'lu denklemden h_2 alınıp 2.12 no'lu denkleme yazılırsa,

$$STK = \frac{\eta_K \eta_T(h_4-h_1)}{h_{2s}-h_1} \quad (2.13)$$

olur.

Bu çalışmada genel verim %100 kabul edilmiştir.

2.1. Soğutma sisteminden sağlanabilecek tasarrufun hesaplanması

Soğutma çevrim analizinde YANMAR Firmasına ait 6EY18AL model 400 kW gücündeki yardımcı dizelin fabrika test değerleri kullanılmıştır. Üretici firmanın fabrika test verilerinde püskürtme Avansı 7^0KMA, atmosfer basıncı 1021.9 mbar, silindir soğutma suyu ortalama çıkış sıcaklığı 80 ^{0}C, 15 ^{0}C sıcaklıktaki yakıt yoğunluğu ise 855.4 kg/m^3 olarak verilmektedir. Üretici firma tarafından yürütülen testler dört farklı yükte gerçekleştirilmiştir. Bu yüklere ait yakıt sarfiyatları Tablo 1' de görülmektedir.

Tablo 1. *YANMAR 6EY18AL Model Dizel Motorun Fabrika Test Değerleri*

Yük,%	25	50	75	100
Yakıt Harcamı, kg/h	29.1	46.4	64.1	82.4
Ortam Sıcaklığı,^{0}C	24	23	26	22

Ara değerlerin hesabı için Excel'de Tablo 1 değerleri kullanılarak regresyon analizi yapılmış ve yüke bağlı yakıt sarfiyatını veren bir denklem bulunmuştur. Denklem kompresörün çektiği güce bağlı olarak düzenlenmiştir.

Yakıt sarfiyatındaki tasarruf miktarı denklem yardımıyla doğrudan bulunabilir. Üretici firma yakıt sarfiyatının ölçülmesinde kullanılan debi ölçerin özelliklerini belirtmemiştir.

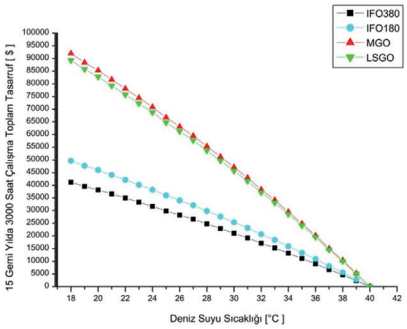
$$\dot{m}_{yakıt,kazanç} = 0{,}00002\left(\dot{W}_{k,std}^2 - \dot{W}_x^2\right) + \left(0{,}00004P_x + 0{,}1651\right)\left(\dot{W}_{k,std} - \dot{W}_x\right) \quad \text{(kg/saat)}$$

Yakıt ile sağlanan tasarrufun parasal karşılığı aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanmıştır.

Yakıt birim maliyet = B ($/kg)
Çalışma Saati = t (saat/yıl)
Yıllık kazanç = $\dot{m}_{yakıt,kazanç}$ x B x t ($/yıl)

Analizde farklı yakıtların kullanılması durumunda sağlanabilecek tasarruf miktarları hesaplanmıştır. Hesaplamalarda dört farklı yakıt tipi kullanılmıştır.

Yakıt özellikleri ve birim maliyetleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Hesaplamalar en kötü durum olan 40 °C deniz suyu sıcaklığına göre karşılaştırılmıştır.



Şekil 2. *Farklı Deniz Suyu Sıcaklıkları ve Farklı Yakıtlara Göre R404a Akışkanının Çevrim Sonuçlarının Parasal Tasarruf Karşılığı*

Tablo 2 ve Şekil 2'de gözüktüğü gibi deniz suyu sıcaklığı düştükçe değişken devirli soğutma sisteminin tasarruf potansiyeli artmaktadır. 15 gemi çalıştıran bir şirketin

Tablo 2. *Değişken Deniz Suyu Sıcaklığı ve Farklı Yakıt Türlerine Göre 3000 Saatlik Çalışma Süresi İçin 15 Gemilik Bir Filonun Yıllık Tasarruf Değerleri (Q_e=93 kW T_e = -15 °CnK=%80, Aşırı Kızdırma 7°C, Aşırı Soğutma 3°C, IFO 380 = 0.302 $/kg, IFO 180 = 0.364 $/kg, MGO=0.675 $/kg, LSGO01 =0.655$/kg)*

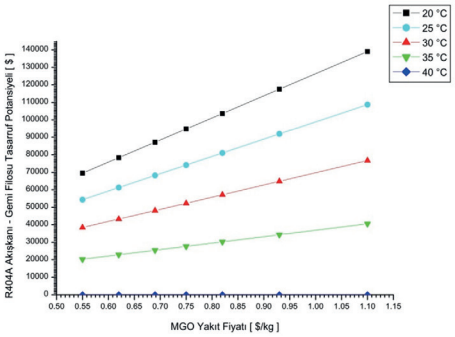
T_c [°C] Deniz Suyu	P_k [kW] Komp. Gücü	COP	Yakıt Sarfiyat [kg/h]	Tasarruf [40°C -T_c] [kg/h]	15 Gemi IFO380 [$]	15 Gemi IFO180 [$]	15 Gemi MGO [$]	15 Gemi LSGO01 [$]
18	17.0	5.48	31,940	2,50	41161,95	49612,41	92001,01	89275,05
19	17.6	5.30	32,042	2,39	39546,49	47665,30	88390,35	85771,35
20	18.2	5.12	32,144	2,29	38161,66	45996,16	85295,11	82767,87
21	18.8	4.96	32,246	2,19	36545,67	44048,43	81683,23	79263,00
22	19.4	4.80	32,348	2,09	34929,40	42100,38	78070,72	75757,54
23	20.0	4.65	32,450	1,99	33312,91	40151,97	74457,63	72251,46
24	20.6	4.51	32,551	1,88	31696,11	38203,24	70843,90	68744,83
25	21.3	4.38	32,670	1,76	29848,00	35975,70	66713,22	64736,55
26	21.9	4.25	32,772	1,66	28230,79	34026,48	63098,59	61229,02
27	22.5	4.13	32,874	1,56	26613,18	32076,81	59483,07	57720,60
28	23.2	4.01	32,993	1,44	24764,08	29848,14	55350,22	53710,24
29	23.9	3.90	33,112	1,32	22914,63	27618,97	51216,52	49698,99
30	24.5	3.79	33,214	1,22	21065,04	25389,67	47082,46	45687,42
31	25.2	3.69	33,334	1,10	19214,91	23159,70	42947,23	41674,72
32	25.9	3.59	33,453	0,98	17133,16	20650,59	38294,37	37159,74
33	26.6	3.50	33,572	0,86	15282,36	18419,80	34157,61	33145,51
34	27.3	3.41	33,691	0,74	13199,85	15909,75	29502,94	28628,77
35	28.0	3.32	33,810	0,63	11116,75	13399,02	24847,06	24110,86
36	28.7	3.24	33,929	0,51	9033,25	10887,79	20190,28	19592,05
37	29.5	3.16	34,065	0,37	6717,82	8096,94	15014,97	14570,10
38	30.2	3.08	34,185	0,25	4633,51	5584,77	10356,34	10049,49
39	31.0	3.00	34,321	0,11	2316,96	2792,61	5178,64	5025,19
40	31.7	2.93	34,440	0	0	0	0	0

tüm gemilerinin soğutma sistemlerinin yılda 3000 saat çalıştığı kabul edildiğinde yıllık tasarruf (01.05.2015 şirket verilerine göre IFO380 = 0.302 $/kg, MGO=0.675 $/kg) 41161 $ ile 92001 $ arasında tasarruf sağlanabileceği görülmüştür.

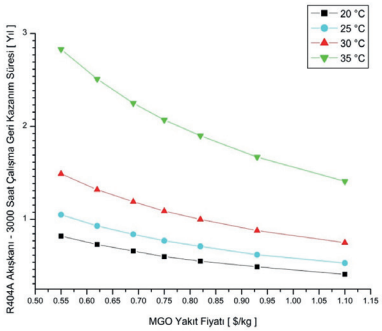
Soğutma sistemleri değişken devirli kompresöre göre düzenlendiğinde sağlanacak olan tasarruf miktarı yakıt fiyatlarına bağlı olarak değişkenlik gösterecektir. Şekil 3'de görüldüğü gibi tasarruf potansiyeli artan yakıt fiyatları ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Yıllara bağlı olarak sektördeki yakıt maliyetleri dikkate alındığında tasarruf potansiyeli yakıt fiyatının 1.1 $/kg olduğu durumda 138.999 $ seviyesine çıkabilmektedir.

Şekil 4 ve Şekil 5' te görüldüğü gibi değişken devirli soğutma sistemi kullanıldığında yatırımın geri dönüş süresi IFO380 için 6 ay ile 1.5 yıl arasında değişmektedir. MGO için ise bu süre 4 ay ile 10 ay arasında değişmektedir. Yapılan fizibilite çalışmaları neticesinde değişken

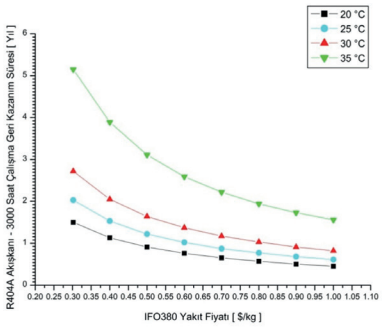
devirli soğutma sisteminin gemilere entegre edilmesinin ekonomik olduğu hesaplanmıştır. Böyle bir sistemin gemiye entegre edilmesi durumunda geminin yıllık tasarruf potansiyelinin 135.000 $ gibi oldukça yüksek değerlere ulaşabildiği anlaşılmıştır.



Şekil 3. *Değişken Yakıt Fiyatlarına Göre 15 Gemilik Bir Filonun Değişken Sıcaklıklarda Tasarruf Potansiyeli*



Şekil 4. *Değişken Mgo Yakıt Fiyatları İçin Geri Kazanım Süreleri*



Şekil 5. *Değişken Ifo380 Yakıt Fiyatları İçin Geri Kazanım Süreleri*

3. Sonuç

Kara tesislerinde kullanılan soğutma sistemlerinde dış ortam şartları mevsimsel olarak değişmektedir. Oysa gemiler her an farklı iklimlere seferler düzenleyebilmektedir. Gemilerde kullanılan soğutma sistemlerinin kompresörleri ise sabit devir ve sabit çıkış basıncında çalışmaktadır. Bu durumda değişken hava ve deniz suyu sıcaklığı şartlarında çalışan gemilerde enerji tasarruf potansiyelinden faydalanılamamaktadır. Değişken deniz suyu sıcaklıklarına bağlı olarak kompresör devri değişken hale getirilerek düşük deniz suyu sıcaklıklarında düşük kompresör çıkış basıncı, yüksek deniz suyu sıcaklıklarında ise yüksek kompresör çıkış basıncı sağlanabilecektir. Bu sayede hem sistem daha verimli çalışmış olacak hem de yüksek deniz suyu sıcaklıklarında karşılaşılan kompresörün yüksek basınçtan dolayı devre dışı kalmasının önüne geçilmiş olacaktır. Gemilerde soğutma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmayan bu sistem, değişken devirli kompresör(ler) kullanılarak yük ihtiyacına göre kompresörün çalışması sağlanarak yakıt tasarrufu sağlayacaktır.

4. Teşekkür

İnce Denizcilik A.Ş. ve DPA & Teknik Müdür, Sayın Ahmet Yaşar CANCA'ya analiz için gerekli verilerin temininde gösterdikleri destek ve katkılar için teşekkür ederiz.

Terimler

$\dot{W}_k$ = Tersinmez kompresörün çektiği güç

η_k = Kompresör izantropik verimi

$\dot{Q}_C$ = Kondanserden atılan ısı

$\dot{Q}_E$ = Evaporatörde ortamdan çekilen ısı

STK = Soğutma tesir katsayısı

Hu = Yakıtın alt ısıl değeri

$\dot{W}_x$ = Kompresör için dizel motorundan çekilen güç

η_T = Alternatör-Soğutma kompresörü genel verimi

$\dot{W}_{k,std}$ = Fabrika test değerlerindeki güç değeri

P_x = Değişken sıcaklık şartlarındaki güç

°KMA= Krank mil açısı

Kaynakça

[1] International Maritime Organization, International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL), Erişim Tarihi:27 Haziran 2015, http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx

[2] Guidance for the development of a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP), MEPC.1/Circ.683, 2009.

[3] International Maritime Organization, Special Areasunder MARPOL, Erişim Tarihi: 15Temmuz 2015,http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/SpecialAreasUnderMARPOL/Pages/Default.aspx

[4] Interim guidelines on the method of calculation of the Energy Efficiency Design Index fornewships (EEDI), MEPC.1/Circ.681, 2009.

[5] Acomi, N. &Acomi, O.C. (2014). proving the Voyage Energy Efficiency by Using EEOI, The 9th International Conference on Traffic&Transportation Studies (ICTTS'2014),138:531-536.

This Page Intentionally Left Blank