



Jenerik Bir Firkateyn için Egzoz Gaz Dağılımının Sayısal Analizi

Erinç DOBRUCALI¹, Selma ERGİN²

¹Deniz Harp Okulu, Türkiye

erincdobrucali@gmail.com, ORCID ID: orcid.org/0000-0001-5027-8949

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Türkiye

ergin@itu.edu.tr, ORCID ID: orcid.org/0000-0001-8343-2455

Öz

Bu çalışmada, jenerik bir firkateyn için egzoz gaz sıcaklığının ve sapma açısının, egzoz gazları ve emisyonlarının dağılımına etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Süreklilik, momentum, enerji, kütle transferi ve türbülans denklemleri sonlu hacim metodu kullanılarak çözülmüştür. Egzoz gaz yayılımının sapma açısı, egzoz sıcaklığı, kaldırma kuvveti ve türbülans etkilediği tespit edilmiştir. Sapma açısı arttıkça gemi arkasında oluşan türbülans nedeniyle egzoz gazlarının yayılımının düzensizleştiği, egzoz gazlarının insan sağlığına olumsuz etkilerinin gerçekleşebileceği tespit edilmiştir. Ayrıca bacadan çıkan egzoz gazlarının sıcaklıklarının artışı ile egzoz gazlarının momentumlarının az da olsa artarak gazların yükselme eğiliminde olduğu, NOx, konsantrasyonunun hacimsel olarak azaldığı tespit edilmiş olup bu durumda egzoz emisyonlarının seyir esnasında görevi gereği üst güvertede bulunabilecek personeli olumsuz etkileyebileceği değerlendirilmiştir. Son olarak da egzoz gaz yayılımı analitik olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Egzoz Gaz Yayılımı, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Sapma Açısı, Firkateyn.

A Numerical Analysis of Exhaust Smoke Dispersion for a Generic Frigate

Abstract

In this study, the effects of exhaust outlet temperature and yaw angle on the exhaust gas and emission dispersion for a generic frigate are investigated numerically. The conservation of energy, momentum, mass, species and turbulence equations have been solved by using the finite volume method. It is found that the exhaust smoke dispersion is affected by yaw angle, buoyancy and turbulence, as well as exhaust outlet temperature. The results show that the dispersion of the exhaust gases and the emission is affected adversely with increasing the yaw angle. It is defined that this phenomenon can be dangerous for the human health and the frigate. The momentum of the exhaust gases is rising slightly with increasing exhaust outlet temperature and the NOx concentrations tend to decrease volumetrically with exhaust outlet temperature. In this case, crew on the upper deck may be affected, adversely. The computations are validated with the flow visualization tests carried out in a wind tunnel. The agreement between the numerical and experimental results is found to be good. Furthermore, the exhaust gas dispersion is obtained analytically and the results are compared with the numerical results.

Keywords: Exhaust Gas Dispersion, Computational Fluid Dynamics, Yaw Angle, Frigate.

1. Giriş

Bu ekonomi ve bilgi çağında daha büyük, hızlı ve çok daha karmaşık gemilere ihtiyaç olduğu aşikardır. Bunun bir sonucu olarak egzoz gazları ile ortaya çıkan kirlilik ve ısıdan kaynaklı zararları kontrol etmek maksadıyla gemilerin bacaları için doğru dizayn standartları üretme gerekliliği mevcuttur. Ayrıca, gemi bacalarından çıkan zararlı egzoz gazlarının dünya çapında ve ciddi anlamda kurallara bağlanması şarttır.

Bacadan çıkan egzoz gazları içinde partiküller, CO₂, CO, SO_x ve NO_x gibi insan sağlığını ve çevreyi etkileyen zararlı emisyonlar vardır. Gemilerde bacadan çıkan zararlı gazlar ve baca gazının yüksek sıcaklığı, güverte üzerindeki elektronik cihazları, makinelerin hava emiş yollarını, helikopter hareketi yapan savaş gemilerinde helikopterin iniş kalkış hareketini ve güverte üzerindeki personelin sağlığını olumsuz şekilde etkilemektedir.

Bütün bu sebeplerden dolayı egzoz gazı içindeki zararlı gazların ve sıcaklığın yayılımının bilinmesi özellikle helikopter hareketi yapan savaş gemilerinde geminin dizayn aşamasında dikkat edilmesi gereken en önemli parametrelerdendir. Fakat günümüzde geminin dizayn aşamasında bu probleme gerektiği kadar önem verilmediği değerlendirilmektedir. Genelde, egzoz gazlarının güverteye düştüğü, hava emiş kanallarına girdiği, helikopter hareketini etkilediği ve bacadan çıkan gazların sıcaklıklarının elektronik cihazlara büyük zararlar verdiği, son donatım aşamasında, deniz tecrübelerinde veya geçici teslim esnasında tespit edilebilmektedir. Bu geç tespit baca dizaynının değiştirilmesi ve üst bina yerleşiminin değiştirilmesi gibi maliyetli ve problemlili düzenlemelerin yapılmasını ortaya çıkarabilmektedir. Gemilerin egzoz gaz yayılımlarının belirlenmesi konusu önemini gün geçtikçe arttırmakta, gemi teslim aşamasında büyük maliyetlerin oluşmaması için geminin ön dizayn aşamasında farklı çalışma/

seyir koşulları altında egzoz gazlarının yayılımının ve izinin bilinmesi ve bunun kullanması çok önemli olmaktadır.

Bu kapsamda değerlendirilirse, bir geminin baca dizaynı 1970'li yıllardan beri araştırma konusu olmuş, literatürde gemi üzerinde oluşan hava akımının etkilerinin ve gemilerde egzoz gaz dağılımının incelendiği çalışmalar bulunmaktadır [1-6]. Ancak özellikle helikopter platformuna sahip savaş gemilerinin egzoz gazı yayılımı, egzoz gazlarının kızılötesi ize etkileri ve egzoz gazlarının sıcaklık bakımından üst binadaki elektronik sistemlere ve helikopter hareketine etkilerini vurgulayan detaylı bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada amaç helikopter platformuna sahip tipik bir savaş gemisi için egzoz gaz yayılımını sayısal olarak modellemek, egzoz gaz yayılımına etki eden faktörleri inceleyerek sonuçları sunmaktır. Bu kapsamda literatürdeki gemi baca dizaynları, egzoz gazlarının yayılımı, seyir halindeki gemilerde gemi formundan dolayı oluşan hava akımı ve bunun helikopter iniş kalkışına etkileri, akım görüntüleme deneyleri detaylı olarak incelenmiş ve önceki çalışmalar bölümünde sunulmuştur.

Seçilen fırkateynin tahrik sistemi dört ana dizel motordan oluşan birleşik CODAD sistemidir. Fırkateynin tam boyu (L_{OA}) 110 m, draftı (T) 4.1 m ve genişliği (B) 14.2 m'dir. Gemide helikopter hareketine imkan sağlayan helikopter platformu bulunmaktadır. Deneysel çalışmada egzoz gazlarının yayılımı, rüzgar tüneline yerleştirilen 1/100 ölçekli fırkateyn modeli ve akım görüntüleme teknikleri kullanılmıştır. Akım görüntüleme deneyleri İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Fakültesi Trisonik Laboratuvarında bulunan boyutları itibarı ile ölçekli model üzerinde duvar etkisi yaratmayacak bir rüzgar tüneline (8 L_{OA} x 4 B x 4 T) gerçekleştirilmiştir [30]. Geminin pruvası ile rüzgarın nispi yönünden oluşan farklı sapma açısının ($\Psi=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$) egzoz gaz

yayılmına etkisi incelenmiş ve elde edilen deneysel sonuçlar sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Sayısal çalışmanın deneysel sonuçlarla karşılaştırılması sonrasında, gerçek boyutlardaki tipik fırkateyn modeli sayısal çalışma esnasında duvar etkisi yaratmayacak boyutlardaki dikdörtgenler prizması ($10 L_{OA} \times 5 B \times 5 T$) içine yerleştirilerek sayısal modelleme yapılmıştır. Egzoz gazları ile fırkateyn üst binası arasındaki etkileşimi çözebilmek için üç boyutlu momentum, süreklilik ve enerji denklemleri ile türbülans ve kütle transferi denklemleri sonlu hacim metodu kullanılarak çözülmüştür. Matematiksel modellemenin detayları Bölüm 4'de açıklanmış olup incelenen parametrelere (Ψ, K) ilişkin detaylar için bakınız Ref [32].

Yapılan çalışmada deneysel sonuçlar ile sayısal sonuçların uyum içinde oldukları görülmüştür. Fırkateyn ileri yolda seyir halindeyken sapma açısının, egzoz gaz sıcaklığının seçilen tipik fırkateyn bacasından çıkan egzoz gazlarının yayılımına ve egzoz emisyonlarına etkisi ile egzoz gazlarının gemi üst binası ile etkileşimi sayısal olarak incelenmiş ve sapma açısı arttıkça gemi arkasında oluşan türbülans nedeniyle egzoz gazlarının yayılımının düzensizleştiği, egzoz gazlarının insan sağlığına olumsuz etkilerinin gerçekleşebileceği tespit edilmiştir. Ayrıca bacadan çıkan egzoz gazlarının sıcaklıklarının artışı ile egzoz gazlarının momentumlarının az da olsa artarak gazların yükselme eğiliminde olduğu, bu durumda egzoz emisyonlarının personeli olumsuz etkileyebileceği değerlendirilmiştir. Son olarak da egzoz gaz yayılımı analitik olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

2. Önceki Çalışmalar

Sivil tankerlerde, savaş gemilerinde egzoz gazlarının yayılımı, gemilerin seyir

halinde üst binalarının oluşturduğu hava akımının özellikle helikopter iniş/kalkışına olan etkileri, egzoz sıcaklıklarının gemi üzerinde bulunan elektronik sistemlere etkileri, baca dizaynı ve gemilerde üst bina yerleşiminin önemi, araştırma gemilerinde ölçüm sistemlerinin yerleşimi için yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar ile rüzgar tünellerindeki akım görüntüleme deneyleri üzerine yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Egzoz gaz yayılımına ilişkin yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

1977 yılında D.McCallum ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada geçmişten günümüze değişen deniz taşımacılığında kullanılan gemilerin değişiminden kısaca bahsedilerek, halihazırda bacadan çıkan zararlı gazların yarattıkları olumsuz etkilerden bahsedilmiştir. Savaş gemilerinde ve ticari gemilerde baca dizaynının nasıl yapılacağı adım adım anlatılmaktadır. Dizayn prosedürlerini etkileyen; baca yüksekliğinin seçimi, hız oranı ve baca şeklinin seçimi, gaz sıcaklığı ve izinin kontrolünden bahsedilmiştir. Sonuç olarak yardımcı sınıf bir gemi olan AO-177 yağ gemisinin bacası örneklenmiş, daha sonrada USS Foster adlı bir destroyerin bacasından çıkan egzozun sıcaklık yayılımı incelenmiştir [7, 8].

2001 yılında Eunseok Jin ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada ticari bir geminin üst bina modeli ele alınmıştır. Yapılan sayısal çalışmada CFD programı kullanılmış, kütle, momentum ve enerji denklemlerinin yanı sıra $k-\epsilon$ türbülans modeli 3 boyutlu olarak ele alınmıştır. Değişken parametreler olarak üst bina yüksekliği, baca-üst bina mesafesi ve baca/ üst bina yükseklik oranı kullanılmıştır. Seçilen bu parametrelere göre yapılan sayısal çalışmanın sonucunda bacadan çıkan zararlı gazlardan NO_2 ve partikül izi tespit edilmiş ve optimum baca yüksekliği, üst bina baca arası mesafe belirlenmiştir [9].

2005 yılında Moat ve arkadaşlarının

yaptıkları çalışmada seçilen tipik bir gemide rüzgar hızını ölçen anemometre gibi cihazların, geminin seyir halindeyken etrafında oluşan hava akımından nasıl etkilendikleri incelenmiş ve CFD yazılımı kullanılarak gemi üç boyutlu olarak modellenmiştir. Geminin üst binasında akışın bozulduğu ve anemometre gibi hassas cihazların bu akış bozulmasından etkilendikleri tespit edilmiştir. Bu sayısal çalışmada bu tip cihazların yerleşimi konusunda elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir [10]. Ayrıca 2003 yılında S.Popinet ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada da bir araştırma gemisi üç boyutlu olarak modellenmiş ve geminin üzerinde bulunan tüm ölçüm cihazlarının farklı seyir şartlarında geminin oluşturduğu hava akımından nasıl etkilendikleri hem deneysel hem de sayısal olarak araştırılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir [11].

2007 tarihinde Kulkarni P.R. ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada tipik bir savaş gemisi modeli seçilmiş, CFD kullanılarak yapılan sayısal çalışmada tekne kısmı olmadan sadece üst binası alınarak dört farklı üst bina baca yerleşimi belirlenmiştir. Kütlelin ve momentumun korunum denklemlerinin yanında $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılmış ve yerçekimi (buoyancy effect) ihmal edilmiştir. Değişken parametreler olarak dört farklı baca konfigürasyonu yanında, dört farklı hız oranı $K=1, 2, 3, 4$ (V_s/V_w) ve yedi farklı rüzgar açısı ψ (00, 50, 100, 150, 200, 250, 300) kullanılmış ve 112 farklı modelleme yapılmıştır. 2007'de yayınlanan bu sayısal çalışma sonucunda elde edilen sayısal verilerin ışığı altında hangi baca yerleşiminin daha verimli olduğu, egzoz gazının bacadan çıkış hızının minimum ne kadar olması gerektiği tespit edilmiş olup daha sonra yapılacak olan deneysel model çalışması için bir kaynak oluşturulmuştur [12].

2010 yılında Huang ve arkadaşlarının

yaptıkları çalışmada seçilen tipik bir geminin etrafındaki egzoz gazlarının yayılımı sayısal olarak incelenmiştir. Momentum, kütlelin korunumu ve enerji denklemleri üç boyutlu olarak çözülmüştür. Geminin farklı deniz ve dalga durumlarında bacasından çıkan egzoz gazının NO_x emisyonu ile sıcaklık yayılımının incelendiği çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir [13].

Bunların dışında savaş gemilerinde gemi üst yapısı etrafındaki akışın simülasyonu, bu akışın helikopter hareketına etkilerinin farklı yöntemlerle sayısal olarak incelendiği literatürde sayısal çalışmalar (örneğin [14-16]) olduğu gibi günlük hayatta bina bacalarından çıkan egzoz emisyonlarının deneysel ve sayısal olarak modellendiği çalışmalar da bulunmaktadır [17-18].

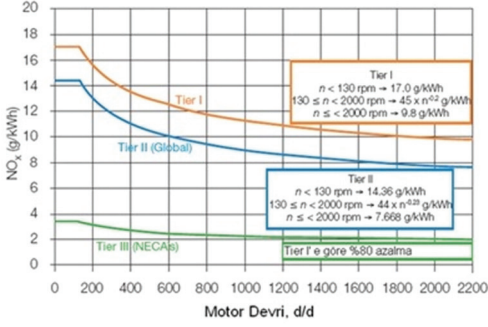
Bu çalışmanın başlıca amacı, sapma açısı ve egzoz gaz sıcaklığının seçilen tipik bir fırkateynin bacasından çıkan egzoz gazlarının yayılımına ve egzoz emisyonlarına olan etkilerinin sayısal olarak incelenmesidir.

3. Egzoz Emisyon Limitleri

Tipik fırkateyn bacasından çıkan egzoz gazlarında, çevreye ve insan sağlığına zararlı CO_2 , CO, HC, PM, NO_x ve SO_x emisyonları bulunmaktadır. Özellikle NO_x emisyonunun, insan sağlığına ve iklim değişimi gibi çevreye olumsuz etkileri vardır [19-21]. Bu kapsamda hava kirliliği açısından önemli olan NO_x emisyonunu azaltmak amacıyla değişik sistemler geliştirilmiştir [22]. Bu çalışmada da farklı parametreler için NO_x emisyonunun hacimsel olarak yayılımı ele alınmıştır.

Gemilerden kaynaklı hava kirliliğinin önlenmesine ilişkin kurallar 19 Mayıs 2005 yılında yayınlanan MARPOL 73/78 EK VI ile belirlenmiştir. Bu kapsamda ozon tabakasına ve insan sağlığına en zararlı egzoz emisyonlarından NO_x ve SO_x emisyonlarına ilişkin kurallar sırasıyla MARPOL 73/78 EK VI Kural 13 ve Kural 14'de açıklanmıştır [23].

Buna göre bu çalışma kapsamında modellenen tipik fırkateyn için NO_x emisyonu Şekil 1'de gösterilen ve halihazırda yürürlükte bulunan "Tier II" de belirtilen değerlerin geçerli olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 1. Gemilerde İzin Verilen Maksimum NO_x Emisyonları [23]

Aynı zamanda gemilerden yayılan sülfür oksit (SO_x) ve partikül emisyonları aşağıda belirtilen, gemi dizel yakıtı içindeki kükürt oranına sınır koyularak veya temizleme sistemleri kullanılarak kontrol edilmektedir. Bu çalışmada modellenen savaş gemisinde % 3 m/m kükürt oranına sahip dizel yakıtın kullanıldığı kabul edilmiştir.

- % 4.50 m/m 01 Ocak 2012'ye kadar
- % 3.50 m/m 01 Ocak 2012 ve sonrası
- % 0.50 m/m 01 Ocak 2020 ve sonrası

Çevre ve Orman Bakanlığının 06 Haziran 2008 yılında yürürlüğe soktuğu 26898 sayılı "Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği" Türkiye'de hava kalitesinin değerlendirilmesine yönelik hazırlanmıştır [24]. Bu yönetmeliğin amacı; hava kirliliğinin insan sağlığı ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerini önlemek yada en aza indirmek için hava kalitesi hedeflerini oluşturmak ve tanımlamak, buna göre hava kalitesini değerlendirmek, hava kalitesinin yeterli olduğu yerlerde durumu koruyarak iyileştirmek, hava kalitesi hakkında bilgi toplamak ve uyarılarla halkı bilgilendirmektir. Bu kapsamda egzoz emisyonlarının insan

sağlığına zarar vermemesi için aşağıda belirtilen limit değerlerin üzerine çıkmaması gerekmektedir.

- SO_2 gazı için saatlik limit değer $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$,
- NO_2 gazı için saatlik limit değer $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$,
- CO gazı için sekiz saatlik limit değer $10 \text{mg}/\text{m}^3$

4. Matematiksel Model

Genel olarak baca gazı yayılımı ölçekli modeller ile rüzgar tünellerinde incelenmektedir [12]. Bu yöntem çok uzun zaman alıcı ve pahalı olabilmektedir. Rüzgar tüneli deneylerinin yerine sayısal hesaplamalar ile geliştirilen programlar geminin dizayn aşamasında kullanılarak bir çok farklı baca geometrisi ve üst bina yerleşimi hızlı aynı zamanda da ucuz bir şekilde modellenilebilmektedir. Bu çalışmada gemi üst yapısı ve egzoz gazlarının etkileşimi, helikopter platformuna sahip tipik bir fırkateyn için sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmada iki denklemlilik k-ε türbülans modeli kullanılmış olup üç boyutlu yönetici denklemler sonlu hacim metodu ile hesaplanmıştır. Ağ sistemi tetrahedral ve uyarlanabilir ağ sistemi olup hesaplamalar ağdan bağımsız olarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma gemilerde egzoz gazları ile gemi üst yapı etkileşiminin çözümünde sayısal modellemenin çok etkili bir araç olduğunu kanıtlamıştır.

Egzoz gazları ile gemi üst yapısı etkileşimini belirleyebilmek maksadıyla aşağıdaki yönetici denklemler sonlu hacim metodu kullanılarak sayısal olarak hesaplanmıştır [25,26]. Sürekli durumda ($\partial/\partial t = 0$), sıkıştırılmayan akışkan ($Ma \leq 0.3$) kabulü yapılmıştır. Kartezyen koordinatlarda, yönetici denklemler tensör notasyonu kullanılarak aşağıda verilmiştir.

Süreklilik Denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (4.1)$$

Momentum Denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (4.2)$$

Enerji Denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_{t,eff} \frac{\partial T}{\partial x_j}) + \rho g_i \quad (4.3)$$

Kütle Transferi Denklemi:

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V Y_i) = \nabla \cdot (\Gamma_i \nabla Y_i) + R_i \quad (4.4)$$

Gemi üst yapısı üzerindeki türbülans bölgesi egzoz gazlarının güverteye düşme probleminde çok önemli bir faktördür. Türbülans bölgesinin yüksekliği başlıca geminin yapısına bağlı olmakla birlikte pratik olarak rüzgar hızından bağımsızdır [12]. Egzoz gazlarının güverteye düşme (smoke downwash) problemini çözebilmek için, türbülans bölgesi sınırının muhtemel yüksekliğinin ve bacadan çıkan egzoz gazlarının bu türbülans bölgesine girmesine engel olacak baca yüksekliğinin bilinmesi gereklidir [12].

k-ε modeli türbülans modelleme çalışmalarında pratik olarak kullanılan en kolay modellerden birisidir [27]. Daha karmaşık modeller türbülans yayılımı ve sıcaklık farkı ile oluşan kaldırma kuvveti (buoyancy) etkilerini daha iyi sunabilirler ancak bunların çözümü için ekstra gayret gereklidir ve genelde yetersiz kalırlar [12]. Murakami yaptığı çalışmada k-ε modelinin ortalama rüzgar hızını doğru olarak tahmin ettiğini fakat keskin köşeler etrafında türbülans kinetik enerjisi daha iyi öngördüğünü, ayrıca k-ε modelinin sayısal modelin yakınsama zamanını ciddi anlamda kısaltıp parametrik çalışmaları mümkün hale getirdiğini belirtmiştir [28]. Bu çalışmada da k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

Türbülans Kinetik Enerji :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_{k,eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + P - \rho \varepsilon \quad (4.5)$$

Türbülans kinetik enerjisi yayılım oranı:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_{\varepsilon,eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) + C_1 P \frac{\varepsilon}{k} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.6)$$

Yukarıdaki denklemlerde efektif viskozite :

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (4.7)$$

şekindedir. Türbülans viskozitesi ise

$$\mu_t = C_\mu \rho k \frac{k}{\varepsilon} \quad (4.8)$$

şeklinde hesaplanır. Yukarıdaki C_μ bir sabittir. Denklem (4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6)'daki Γ difüzyon katsayısı olup sırasıyla μ_{eff} / σ_T , μ_{eff} / σ_k ve $\mu_{eff} / \sigma_\varepsilon$ olarak hesaplanır. Denklemlerde verilen sabitlerin değerleri ise $C_1=1.44$, $C_2=1.92$, $C_\mu=0.09$, $\sigma_T=1.0$, $\sigma_k=1.0$ ve $\sigma_\varepsilon=1.3$ 'dür. Bu değerler birçok zorlanmış konveksiyon çalışmalarında kullanılmıştır. Denklem (4.5) ve (4.6)'daki P terimi türbülans enerjisinin üretimini göstermekte ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [31].

$$P = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.9)$$

Bu denklemlerin ayrıklaştırılması için SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Consistent) algoritmasını kullanılan sonlu hacim metodu seçilmiştir. Sonlu hacim metodunda akış küçük kontrol hacimlerine bölünmüş ve her bir hacim için yukarıda bahsedilen denklemler çözülmüştür. Çalışmada iki denklemlilik k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Ağ sistemi ise tetrahedral

ve uyarlanır ağ sistemi olup, Şekil 2'de hesaplamalarda kullanılan ağ sistemi gösterilmiştir. Ağ büyüklüğünden bağımsız çözüm elde etmek için hesaplamalar farklı ağ büyüklükleri (19705, 31999, 76036, 122994, 190364, 312547 ve 398211 hücreli ağ) için tekrarlanmış ve sonucun ağdan bağımsız olduğu (312547 hücreli hesaplama ağı) durum ele alınmıştır. Ağdan bağımsız elde edilen sonuçlar için bakınız Ref [32].

Hesaplama alanının girişinde giriş (inlet) sınır şartı olarak sabit hız ($du/dx=0$) ve sıcaklık ($dT/dx=0$), çıkışında ise çıkış (outlet) sınır şartı olarak basınç sınır şartı ($P_{out}=P_{atm}$) kullanılmıştır. Duvar (Wall) sınır şartı olan sınırlarda hız sıfıra eşit olup ($u=v=w=0$) adyabatik sınır şartı kullanılmıştır ($q=0$). Simetri sınır şartı olan sınırlarda ise hız vektörlerinin normali sıfırdır. Baca çıkışında da sabit hız ve sıcaklık sınır şartı kullanılmıştır. Türbülans büyüklükleri k ve ε için giriş

sınır şartı sırasıyla $k=\frac{3}{2}(U_{ref}T_i)^2$, $\varepsilon=C_\mu^{3/4}k^{3/2}l$ olarak hesaplanır ve $l=0.07L$ 'dir [25]. Burada L hesaplama alanının karakteristik uzunluğudur. Çıkış ve simetri ekseninde $\partial k / \partial n = 0$ ve $\partial \varepsilon / \partial n = 0$ 'dır.

Ayrıca helikopter platformuna sahip tipik fırkateynin ana makinasına giren %21 O_2 +%79 N_2 hava ve %97 HC +%3 S

yakıt karışımı olarak belirlenmiştir [20]. Yanma sonucu ortaya çıkan emisyonlar ise %13 O_2 +%75 N_2 +%5 CO_2 +%5 H_2O + %1 NO_2 +%0.5 SO_2 + %0.5 CO , Y_i sınır şartı olarak verilmiştir [20].

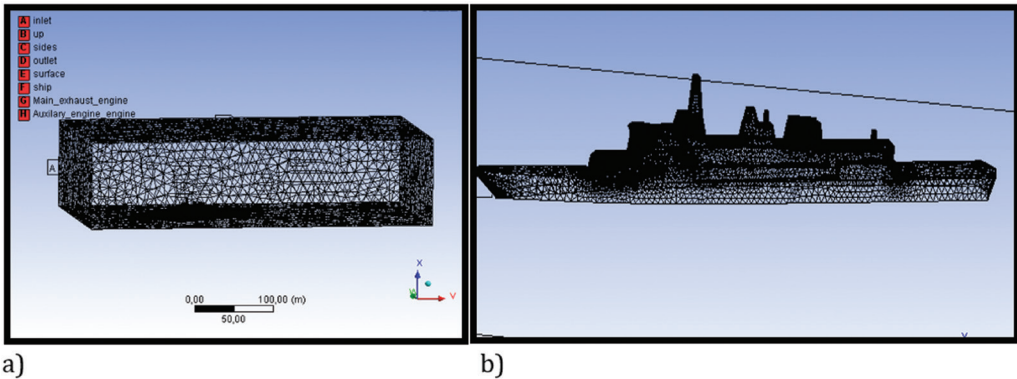
Helikopter platformuna sahip gerçek boyutlardaki tipik bir fırkateyn modeli üzerinde gerçekleştirilen sayısal çalışmada literatürde benzer boyutlara sahip savaş gemileri için belirli sürat kademelerinde/değişik makine yüklerinde bacadan çıkan egzoz gazlarının ölçülmüş değerleri kullanılmış olup; bu değerler Tablo 1'de gösterilmiştir [8]. Bu çalışmada geminin ağır yolda seyir yaptığı kabul edilmiştir.

Tablo 1. Tipik Fırkateyn Çalışma Şartları

Sürat	Gemi hızı (knot)	Egzoz çık. sic. [T_s] (°C)	Egzoz çık. hızı V_s (m/s)
Max sürat	28	415	80
İktisadi sürat	20	343	57
Ağır yol	5	315	17

5. Deneysel Çalışma

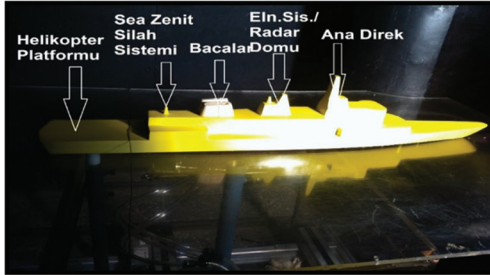
Helikopter platformuna sahip, üst güvertesinde egzoz gazlarından etkilenebilecek elektronik/silah sistemleri bulunan, 1/100 ölçekli tipik bir fırkateyn akımgörüntüleme deneylerindeki kullanılmak üzere rüzgar tüneline yerleştirilmiş ve



Şekil 2. Sayısal Çalışmadaki Hesaplama Ağı **a)** Hesaplama Alanı **b)** Fırkateyn Yüzeyindeki Ağ

farklı hız oranları, sapma açıları ve farklı baca geometrileri için deneyler yapılmıştır. 1/100 ölçekli tipik bir fırkateyn modeli Şekil 3'te gösterilmiştir. Çalışmada kullanılan fırkateynin ileri/tornistan yolda egzoz gazlarından etkilenebilecek ana direk ve üzerindeki cihaz/sistemler, radar kubbesi (domu), Sea Zenith silah sistemi ve dümenevi bulunmaktadır. Bu fırkateynin seçilmesinin sebebi baca etrafında egzoz gazı sıcaklığından etkilenebilecek elektronik sistemlerin olması ve helikopter platformuna sahip olmasıdır.

Seçilen fırkateynin tahrik sistemi dört ana dizel motordan oluşan birleşik CODAD sistemidir. Fırkateynin boyu 110 m, draftı 4.1 m ve genişliği 14.2 m'dir. Gemide helikopter hareketına imkan sağlayan helikopter platformu bulunmaktadır. Deneysel çalışmada egzoz gazlarının yayılımı, rüzgar tüneline yerleştirilen



Şekil 3. 1/100 Ölçekli Tipik Fırkateyn Ahşap Modeli

1/100 ölçekli fırkateyn modeli ve akım görüntüleme teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Akım görüntüleme deneyleri İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Fakültesi Trisonik Laboratuvarında bulunan rüzgar tüneline gerçekleştirilmiştir. Rüzgar tüneline ise Şekil 4'te gösterilmiştir.

Rüzgar tüneline akım görüntüleme deneylerinde değişken parametre olarak beş farklı baca modeli, geminin pruvası ile rüzgarın nispi yönünden oluşan dört farklı sapma açısı, $\Psi=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ ve tornistan ile gemi bacasından çıkan egzoz gazlarının hızının rüzgar tüneline giriş hızına oranından oluşan beş farklı hız oranı, $K=\infty, 0.135, 0.203, 0.407$ ve 0.815 gözönüne alınmıştır. Bahsedilen değişkenlerin egzoz gazlarının yayılımına etkisi deneysel olarak incelenmiş, elde edilen sonuçlar sayısal modelleme sonuçlarının doğruluğunun gösterilmesinde kullanılmıştır. Bu çalışmada sayısal model sonuçlarının karşılaştırılması maksadıyla sapma açısının etkisi incelenmiş ve Bölüm 7.1'de tartışılmıştır.

Rüzgar tüneline akım görüntüleme deneylerine başlamadan önce rüzgar tüneline boyutlarının 1/100 ölçekli tipik fırkateyn modeline etkileri incelenmiştir. Blokaj etkisi, akış önüne test için yerleştirilen nesnenin kesit alanının test



a)



b)

Şekil 4. Rüzgar Tüneli a) Dıştan Görünüm b) İçten Görünüm

bölümünün kesit alanına oranı ile ilişkili olup, düzeltme gerektiren bir husustur. Bu oran genellikle 0.01 ile 0.10 arasında değişecek şekilde model veya test nesnesi boyutları seçilir [30]. Bahse konu oranın, gemi modeli 0° de iken % 2.781, model 10°lik açı ile döndürüldüğünde % 4.7, 20°lik açı ile döndürüldüğünde ise % 7.2 olduğu hesaplanmıştır. Dolayısıyla, rüzgar tüneli boyutlarının akım görüntüleme deneylerine bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

6. Egzoz Gazlarının Yörüngesinin Analitik Olarak Hesaplanması

Gemi bacasından çıkan egzoz gazları sıcaklık farkından oluşan kaldırma kuvvetine (buoyancy) sahip sıcak gaz kütesidir ve bu kaldırma kuvveti egzoz gazının izini etkiler [8]. Egzoz gazlarının izi analitik olarak aşağıdaki gibi belirlenebilir [8].

Eğer V_w rüzgar hızı sabit ve $\frac{d\rho}{dy}=0$ ise $X < X_c$ için;

$$\frac{y}{R_s} = \frac{(V_s/V_w)(X/R_s)^{1/2}}{(\beta + \alpha V_s/V_w)^{1/2}} \quad (6.1)$$

Denklem (6.1)'daki y değeri egzoz gazlarının baca merkezinden uzaklaştıkça çizdikleri izi ifade etmektedir. X_c değeri ise denklem (6.2)'den hesaplanmaktadır.

$$X_c = \left(\frac{2\beta^2}{3} \right)^2 \left(\frac{V_s/V_w}{\beta + \alpha V_s/V_w} \right)^3 \frac{L_m^3}{L_b^2} \quad (6.2)$$

$X > X_c$ için ise y değeri;

$$y = \left(\frac{3}{2\beta^2} \right)^{1/3} L_b^{1/3} X^{2/3} \quad (6.3)$$

olarak hesaplanmaktadır. Yapılan hesaplamalarda baca merkezinden yatay mesafe "X" her zaman " X_c " den küçüktür. Dolayısıyla analitik çalışmada denklem (6.1) kullanılmıştır. Denklem (6.1)'da V_s egzoz çıkış hızını, V_w rüzgarın giriş hızını,

R_s egzoz çıkış bacası yarıçapını, X ise baca merkezinden yatay mesafeyi belirtmektedir. $\alpha=0.15$ universal bir sabit olmakla birlikte β bir sabit değil, hız oranı ve Fr sayısına bağlı bir değer olup $0.8 < \beta < 1.2$ arasında değerler almaktadır. Bu çalışmada $\beta = 1.2$ olarak alınmıştır.

Denklem (6.2)'da yer alan L_m ve L_b sırasıyla momentun uzunluk ölçeği ve sıcaklık farkı ile oluşan kaldırma kuvveti (buoyancy) uzunluk ölçeği olarak Denklem (6.4) ve (6.5)'de açıklanmıştır.

$$L_m = R_s \left(\frac{V_s}{V_w} \right) \quad (6.4)$$

$$L_b = \left(\frac{F_s}{V_w^3} \right) \quad (6.5)$$

Denklem (6.5)'te yer alan F_s aşağıdaki Denklem (6.6)'de açıklanmıştır.

$$F_s = V_s R_s^2 \delta g \quad (6.6)$$

Bu denklemde g yer çekimi ivmesini,

$\delta = \frac{\rho_\infty - \rho_s}{\rho_\infty} = \frac{T_s - T_\infty}{T_s}$ kaldırma kuvveti (buoyancy) oranını ifade etmektedir. Tam boyutlu tipik fırkateyn modeli için yapılan çalışmada egzoz çıkış sıcaklığı $T_s=315^\circ\text{C}$, ortam sıcaklığı ise $T_\infty=15^\circ\text{C}$ olarak sabit alınmıştır. Bu çalışmada tipik fırkateyn modeli için farklı 5 hız oranı için egzoz gazlarının baca merkezinden çıktığı andan itibaren izledikleri yörünge yukarı belirtilen yöntem ile hesaplanmış ve Bölüm 7.4'de sunulmuştur.

7. Sonuçlar ve Tartışma

7.1. Deneysel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırması

1/100 ölçekli tipik fırkateyn model için, egzoz çıkış hızı (V_s) 2.03846 m/s, rüzgar tüneli giriş hızı (V_w) 2.5 m/s ($K=0.815$, gemi ileri yolda, ortam sıcaklığı 21.6°C ve sabit baca geometrisi) kullanıldığında elde

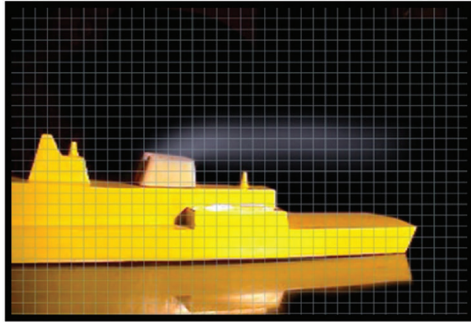
edilen sayısal ve deneysel sonuçlar Şekil 5'te gösterilmiştir.

Aşağıdaki Şekil 5'ten de anlaşılacağı gibi sapma açısı $\Psi=0^\circ$ dan $\Psi=20^\circ$ 'ye çıktıkça egzoz gazlarının helikopter platformunun üstüne düştüğü hem sayısal hem de deneysel çalışmadan görülmektedir. Sonuç olarak bağıl rüzgâr hızının geminin pruvası ile yaptığı açı olan sapma açısı büyüdükçe egzoz gazlarının

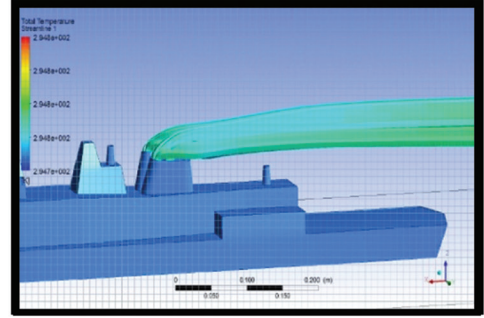
helikopter platformuna düşme eğiliminin hızla artmakta olduğu, bu kapsamda sayısal sonuçların deneysel sonuçlar ile iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür.

7.2 Sapma Açısının Egzoz Gaz Yayılmına Etkisi

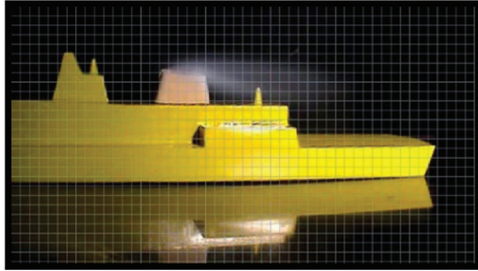
Tipik firkateyn 5 knot sürat ile ileri yolda giderken, rüzgâr baştan 20 knot ile esmektedir. Egzoz çıkış hızı 17 m/s,



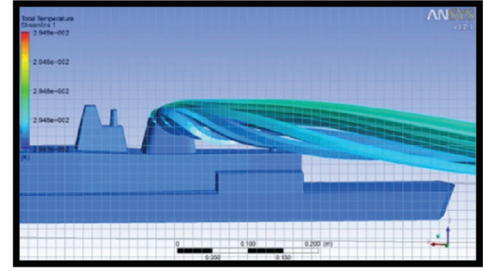
a)



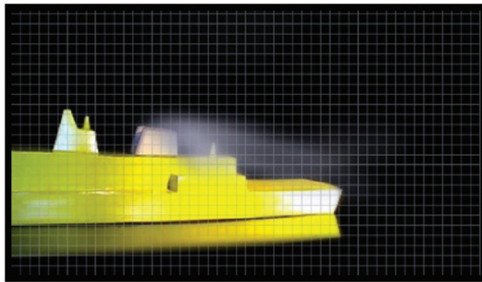
b)



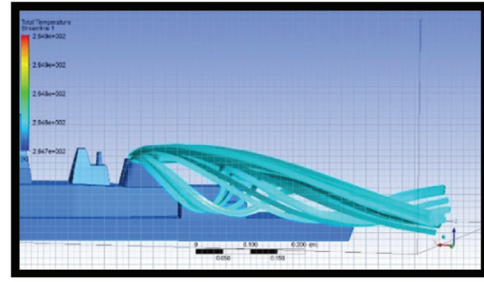
c)



d)



e)



f)

Şekil 5. Sapma Açısının Egzoz Gaz Yayılmına Etkisi. a) $\Psi=0^\circ$ Deneysel Sonuç, b) $\Psi=0^\circ$ Sayısal Sonuç, c) $\Psi=10^\circ$ Deneysel Sonuç, d) $\Psi=10^\circ$ Sayısal Sonuç, e) $\Psi=20^\circ$ Deneysel Sonuç, f) $\Psi=20^\circ$ Sayısal Sonuç

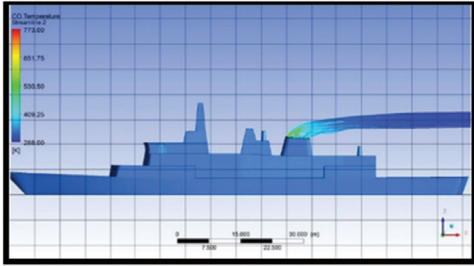
egzoz çıkış sıcaklığı 315°C 'dir. Bu şartlar altında $K=1.32$ 'dir. Belirtilen şartlar altında gerçek boyutlarında helikopter platformuna sahip tipik bir fırkateynin yönü ve nispi rüzgârdan oluşan sapma açısı ($\Psi=0^{\circ}, 10^{\circ}, 20^{\circ}$, ve 30°) değişiminin egzoz gazlarının yayılımına etkileri Şekil 6'da gösterilmiştir.

Şekil 6'dan da görüldüğü gibi fırkateyn 5 knot sürat ile ileri yolda seyir yaparken, rüzgar baştan 20 knot ile estiğinde egzoz çıkış hızı 17 m/s, egzoz çıkış sıcaklığı 315°C iken geminin yönü ve nispi rüzgardan oluşan sapma açısı $\Psi=0^{\circ}, 10^{\circ}, 20^{\circ}$ ve 30° değişiminin etkisinin olumsuz yönde olduğu görülmüştür. Sapma açısı $\Psi=0^{\circ}$ dan $\Psi=30^{\circ}$ ye değiştiği durumlarda egzoz gazlarının helikopter platformu üzerine düştüğü tespit edilmiştir. Özellikle $\Psi=10^{\circ}$ den sonra sapma açısı arttıkça gemi arkasında oluşan türbülans sonucunda egzoz gazlarının yayılımının düzensizleştiği, egzoz sıcaklığının baca

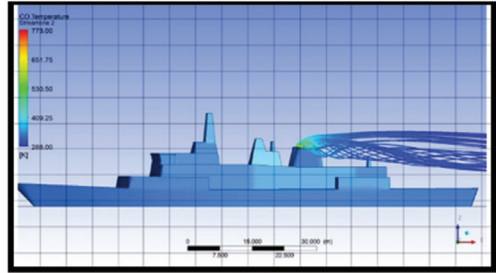
arkasında bulunan silah sistemlerine zarar verebileceği görülmüştür.

Ayrıca yine gerçek boyutlardaki tipik fırkateyn için gerçek seyir şartlarında sapma açısı $\Psi=0^{\circ}, 10^{\circ}, 20^{\circ}$ ve 30° olarak değiştiğinde bacadan çıkan egzoz gazlarından NO_x gazının hacimsel oranının 0.0001'i aştığı bölgeleri gösteren emisyon dağılımları Şekil 7'de gösterilmiştir.

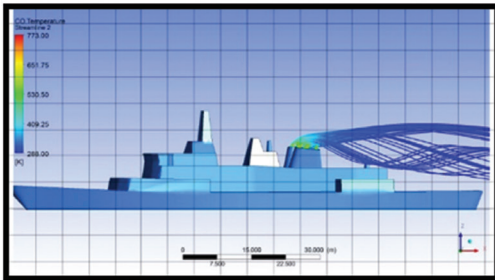
Sapma açısı $\psi=0^{\circ}$ dan $\psi=30^{\circ}$ ye değiştiğinde egzoz gazlarından NO_x gazının helikopter platformu üzerine doğru yöneldiği Şekil 7'den anlaşılmaktadır. Özellikle $\psi=20^{\circ}$ 'den sonra sapma açısı arttıkça gemi arkasında oluşan türbülans sonucunda insan sağlığına en zararlı egzoz gaz emisyonlarından NO_x gazının yayılımının düzensizleştiği, tamamen helikopter platformuna düştüğü dolayısıyla egzoz gazlarının insan sağlığına olumsuz etkileri ile karşılaşılabileceği değerlendirilmektedir.



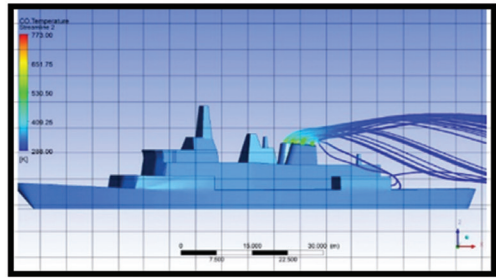
a)



b)

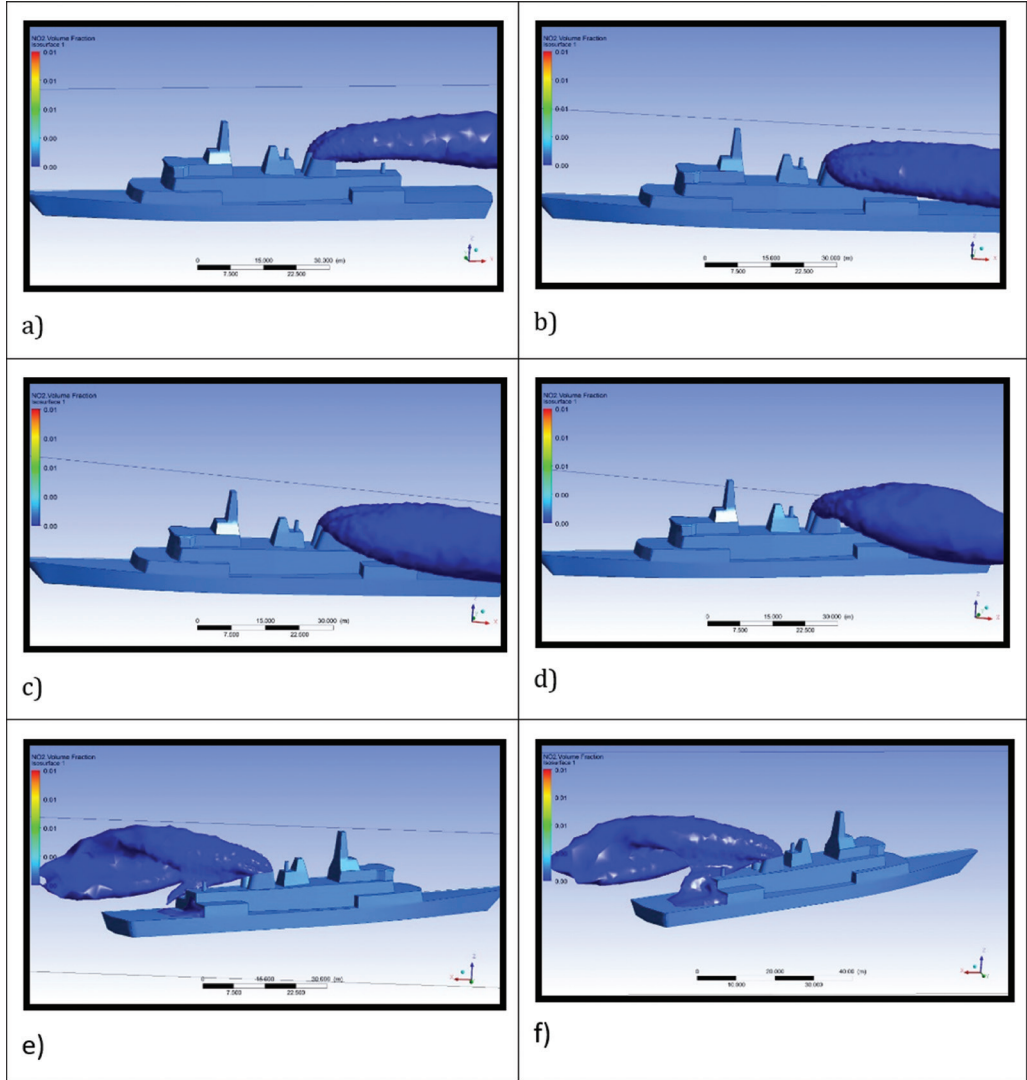


c)



d)

Şekil 6. Sapma Açısının Egzoz Gazlarının Yayılımına Etkisi
a) $\psi=0^{\circ}$, b) $\psi=10^{\circ}$, c) $\psi=20^{\circ}$, d) $\psi=30^{\circ}$



Şekil 7. Sapma Açısının NO_x Yayılımına Etkisi

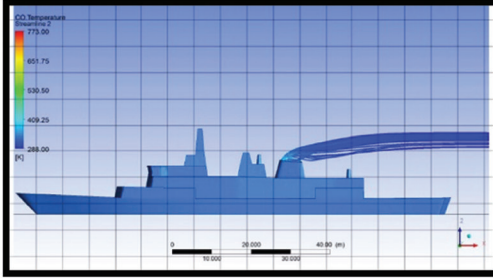
a) $\psi=0^\circ$, **b)** $\psi=10^\circ$, **c)** $\psi=20^\circ$, **d)** $\psi=30^\circ$ **e)** $\psi=20^\circ$ Sancak Borda Görünüş **f)** $\psi=30^\circ$ Sancak Borda Görünüş

7.3 Egzoz Gaz Çıkış Sıcaklığının Egzoz Gaz Yayılımına ve NO_x Yayılımına Etkisi

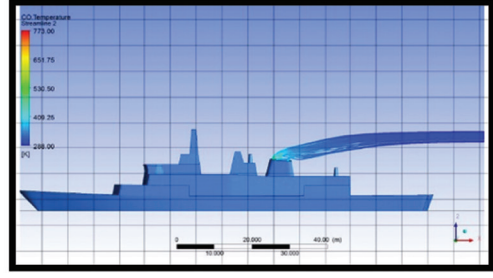
Gerçek boyutlardaki tipik bir fırkateyn ileri yolda iken hız oranı $K=1.32$ için egzoz gazlarının çıkış sıcaklıklarının $T_s=100^\circ C$ 'den $T_s=500^\circ C$ 'ye değişiminin bacadan çıkan egzoz gazlarının yayılımına etkileri Şekil 8'de gösterilmiştir.

Helikopter platformuna sahip tipik bir fırkateyn için (Hız oranı $K=1.32$)

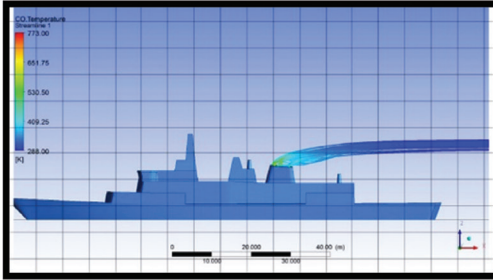
gerçek seyir şartlarında bacadan çıkan egzoz sıcaklığının $T_s=100^\circ C$ ile $T_s=500^\circ C$ arasında değiştiği durumlarda egzoz gazlarının yayılımı incelendiğinde egzoz gaz sıcaklığı arttığında egzoz gazlarının momentumlarının az da olsa artarak gazların yükselme eğiliminde olduğu görülmüştür. Egzoz gazlarının yükselme eğiliminin sıcaklık farkından dolayı oluşan kaldırma kuvveti (Buoyancy) etkilerinden



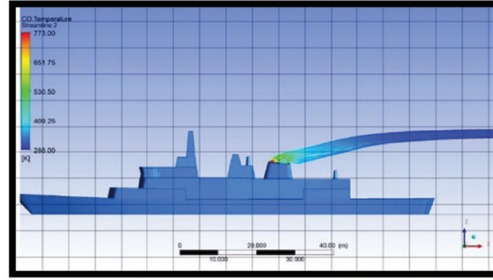
a)



b)



c)



d)

Şekil 8. Egzoz Çıkış Sıcaklığının Egzoz Gazlarının Yayılımına Etkisi

a) $T_s = 100^\circ\text{C}$, **b)** $T_s = 200^\circ\text{C}$, **c)** $T_s = 300^\circ\text{C}$, **d)** $T_s = 500^\circ\text{C}$

ortaya çıkabileceği değerlendirilmektedir. Ancak sonuç olarak belirtilen seyir şartlarında bacadan çıkan egzoz gaz yayılımının olumsuz etkilerinin olmayacağı düşünülmektedir.

Gerçek boyutlardaki tipik bir fırkateyn ileri yolda hız oranı $K=1.32$ iken egzoz gazlarının çıkış sıcaklığının $T_s=100^\circ\text{C}$ 'den $T_s=500^\circ\text{C}$ 'ye değiştiği durumlarda egzoz gazlarından NO_x gazının hacimsel oranının 0.0001'i aştığı bölgeleri gösteren emisyon dağılımları ise Şekil 9'da gösterilmiştir.

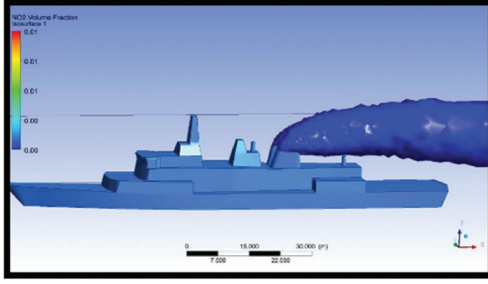
Helikopter platformuna sahip tipik bir fırkateyn için gerçek seyir şartlarında egzoz sıcaklığı $T_s=100^\circ\text{C}$ ile $T_s=500^\circ\text{C}$ arasında değiştiğinde egzoz gazı içindeki NO_x gaz konsantrasyonunun hacimsel olarak azaldığı, egzoz gazı sıcaklığı arttırıldığında NO_x gazının momentumunun az da olsa artarak gazların yükselme eğiliminde olduğu, egzoz gaz sıcaklığının $T_s=100^\circ\text{C}$ olduğu durumda egzoz emisyonunun seyir esnasında görevi gereği üst

güvertede bulunabilecek personel için olumsuz etkilerinin olabileceği Şekil 9'da görülmüştür. Sonuç olarak belirtilen seyir şartlarında egzoz gaz sıcaklığının $T_s=100^\circ\text{C}$ olduğu durum haricinde bacadan çıkan egzoz gaz emisyonlarının olumsuz etkilerinin olmayacağı değerlendirilmektedir.

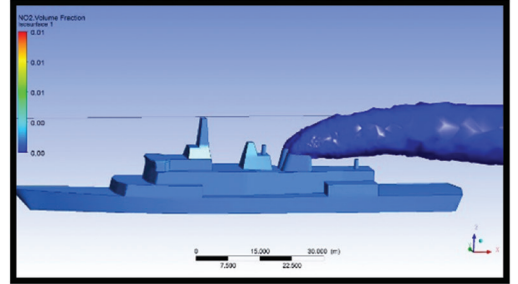
7.4 Sayısal ve Analitik Sonuçların Karşılaştırması

Tam boyutlu tipik fırkateyn modeli için yapılan bu sayısal çalışmada farklı 5 hız oranı ($K=0.601$, $K=0.7349$, $K=1.32$, $K=2.772$ ve $K=3.242$) için egzoz gazlarının baca merkezinden çıktığı andan itibaren izledikleri yol (Yörüngesi) analitik olarak hesaplanmış ve Şekil 10'da sunulmuştur.

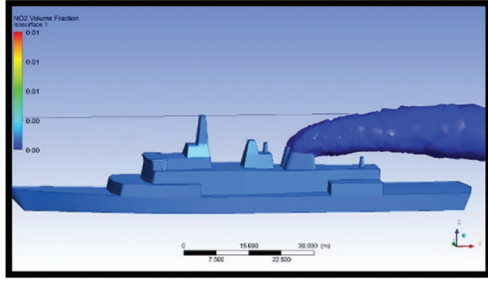
Şekil 10'da 0,0 noktası savaş gemisinin baca merkez eksenidir. x-ekseni merkezden yatay, y-ekseni merkezden dikey mesafeyi ve mor, mavi, yeşil, kırmızı ve siyah renkteki eğriler ise farklı hız oranları için



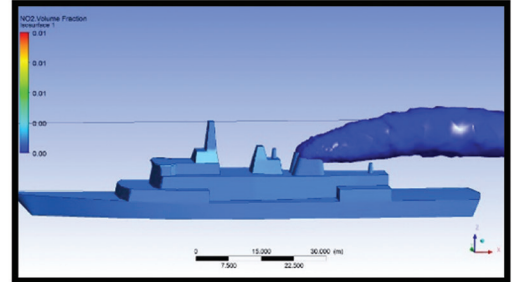
a)



b)

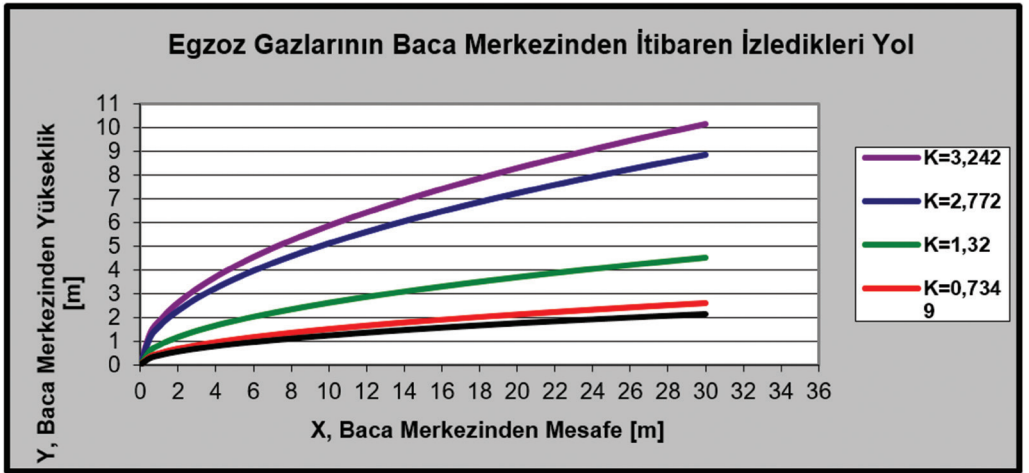


c)



d)

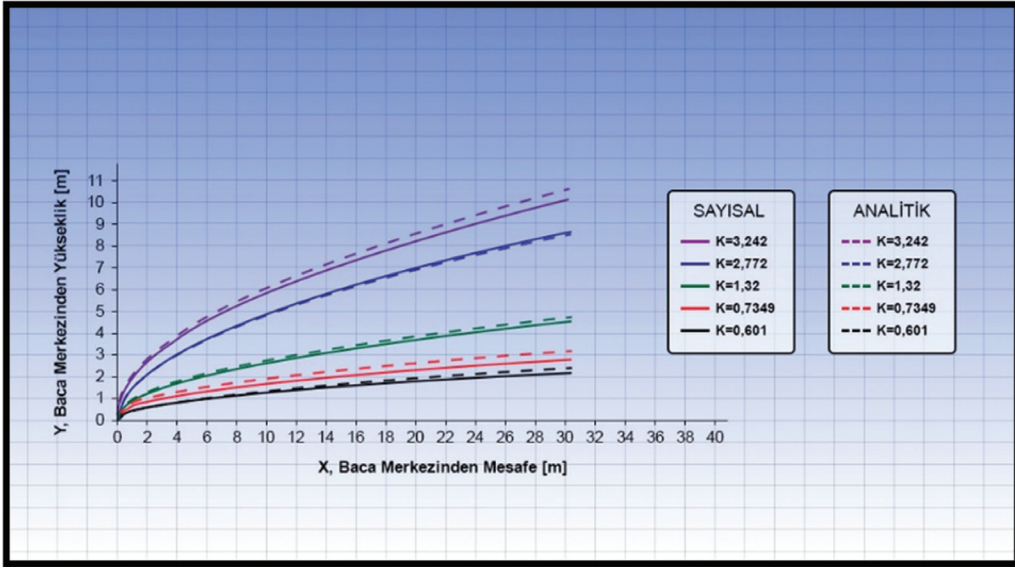
Şekil 9. Egzoz Çıkış Sıcaklığının NO_x Yayılımına Etkisi
a) $T_s = 100^\circ C$, b) $T_s = 200^\circ C$, c) $T_s = 300^\circ C$, d) $T_s = 500^\circ C$



Şekil 10. Farklı Hız Oranları için Egzoz Gazlarının İzledikleri Yol (Analitik Çözüm Sonuçları)

(Sırasıyla $K=0.601$, $K=0.7349$, $K=1.32$, $K=2.772$ ve $K=3.242$) egzoz gazlarının baca çıkışından itibaren izledikleri yolu göstermektedir. Analitik olarak egzoz gazlarının yörüngeleri incelendiğinde hız oranı arttırıldığı zaman egzoz gazlarının

sayısal çalışmada olduğu gibi yükseldiği görülmektedir. Ayrıca egzoz gazlarının izledikleri yol hem sayısal hem de analitik olarak karşılaştırılmış ve Şekil 11'de sunulmuştur.



Şekil 11. Farklı Hız Oranları için Egzoz Gazlarının İzledikleri Yol-Sayısal ve Analitik Sonuçların Karşılaştırması

Şekil 11'den anlaşılacağı gibi hem sayısal hem de analitik olarak egzoz gazlarının izledikleri yol hız oranı arttıkça artmaktadır. Analitik sonuçlarla sayısal sonuçlar arasındaki fark ise hız oranı $K=0.601$ için ortalama % 3.8, hız oranı $K=0.7349$ için % 4.2, hız oranı $K=1.32$ için % 2.7, hız oranı $K=2.772$ için % 1.6 ve hız oranı $K=3.242$ için % 4.8 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre sayısal ve analitik sonuçların arasındaki farkın %4.8'den fazla olmadığı bundan dolayı sayısal modelleme sonunda elde edilen sonuçların analitik sonuçlar ile uyum sağladığı değerlendirilmektedir.

8. Değerlendirmeler

Bacadan salınan egzoz gazları içinde partiküller, CO_2 , NO_x , CO ve SO_x gibi insan sağlığını ve çevreyi etkileyen emisyonlar mevcuttur. Egzoz gazlarının güverteye düşüşü, baca gazlarının yukarıya yönelmesinden daha hızlı bir şekilde güverteye ve helikopter platformuna doğru dağılmasına sebep olmaktadır. Bu egzoz gazlarının ana ve yardımcı makina girişlerinden ve geminin havalandırma

sisteminden emilmesi ve bunlara ek olarak yüksek sıcaklıkların üst binadaki elektronik cihazları etkilemesi ile dumanın helikopter hareketini etkilemesi gibi bir çok olumsuz etkileri bulunmaktadır. Diğer taraftan, askeri teknolojilerdeki gelişmelerin sonucu olarak egzoz gaz yayılımı ve baca dizaynı, kızılötesi iz ve radar kesit alanı (RKA) açısından önemli bir hale gelmiştir. Yüksek sıcaklıklar radar kulesi ve güverte üzerindeki sıcaklığa duyarlı cihaz/sensörler için tehlikeli olabilmektedir. Bütün bu sebeplerden dolayı egzoz gazı içindeki zararlı gazların ve sıcaklığın yayılımının bilinmesi ve özellikle helikopter hareketi yapan savaş gemilerinde gemi tekne formunun tasarım aşamasında ele alınması çok önemlidir.

Bu çalışmada fırkateyn ileri yolda seyir halindeyken sapma açısının ($\Psi=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ ve 30°), egzoz gaz sıcaklığının ($T_s=100^\circ C, 200^\circ C, 300^\circ C$ ve $500^\circ C$) seçilen tipik fırkateyn bacasından çıkan egzoz gazlarının yayılımına ve egzoz emisyonlarına etkisi ile egzoz gazlarının gemi üst binası ile etkileşimi sayısal olarak incelenmiştir. Sapma açısı arttıkça özellikle $\Psi=10^\circ$ 'den

sonra gemi arkasında oluşan türbülans sonucunda egzoz gazlarının yayılımının düzensizleştiği, egzoz sıcaklığının baca arkasında bulunan silah sistemlerine zarar verebileceği, NO_x emisyon yayılımının da güverte üzerindeki görevli personele zarar verebileceği görülmüştür. Gerçek seyir şartlarında bacadan çıkan egzoz sıcaklığının $T_s=100^{\circ}C$ 'den $T_s=500^{\circ}C$ 'e artmasıyla egzoz gazlarının momentumlarının az da olsa artarak gazların yükselme eğiliminde olduğu ancak belirtilen seyir şartlarında bacadan çıkan egzoz gaz yayılımının olumsuz etkilerinin olmayacağı değerlendirilmiştir. Ayrıca bacadan çıkan egzoz gazlarının sıcaklıklarının artışı ile egzoz gazlarının momentumlarının az da olsa artarak gazların yükselme eğiliminde olduğu, NO_x , konsantrasyonunun hacimsel olarak azaldığı tespit edilmiş olup bu durumda egzoz emisyonlarının seyir esnasında görevi gereği üst güvertede bulunabilecek personeli olumsuz etkileyebileceği değerlendirilmiştir. Son olarak egzoz gaz yayılımı analitik olarak da incelenmiş ve elde edilen sonuçlar sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Egzoz gazlarının yörüngeleri incelendiğinde hız oranı artırıldığı zaman egzoz gazlarının sayısal çalışmada olduğu gibi yükseldiği görülmektedir. Bu kapsamda sayısal modelleme sonunda elde edilen sonuçların analitik sonuçlar ile uyum sağladığı değerlendirilmektedir.

Gemi bacasından yayılan egzoz gaz izinin tahmin edilmesi, olayın, rüzgar hızı ve yönü, türbülans seviyesi, geminin üst bina geometrisi, gazların akış hızı gibi birçok parametreye bağlı olmasından dolayı oldukça karmaşıktır. Fakat, bu çalışma, hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak bu karmaşık analizlerin kolaylıkla yapılabilmesini göstermektedir.

Sembol/Kısaltma Listesi

C_p	:Özgül ısı kapasitesi ($m^2/s^2 K$)
B	:Isıl genleşme katsayısı
E	:Türbülans kinetik enerji yayılımı (m^2/s^3)
K	:Isıl iletim katsayısı
K	:Türbülans Kinetik Enerjisi (m^2/s^2)
K	:Hız Oranı (V_e/V_w), (V_s/V_w)
l	:Uzunluk Ölçeği (m)
L	:Model uzunluğu/Karakteristik Uzunluk (m)
Ma	:Mach sayısı
P	:Türbülans enerjisi üretimi
R_i	: Y_i formasyon oranı
T_s	:Egzoz çıkış sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_i	:Türbülans Şiddeti
U	:Geminin seyir hızı (m/s)
CFD	:Computational Fluid Dynamics
CODAD	:Birleşik dizel ve dizel
U_{ref}	:Referans Ortalama Hız (m/s)
V_e, V_s	:Egzoz çıkış hızı (m/s)
V_w	:Rüzgar tüneli giriş hızı (m/s)
V_{ship}	:Gemi hızı (m/s)
Y_i	:Her bir i karışımı için Kütle Akısı
X	:Baca merkezinden yatay mesafe (m)
N	:Kinematik viskozite (m^2/s)
P	:Yoğunluk (kg/m^3)
μ	:Dinamik Viskozite ($N.s/m^2$)
Γ	:Difüzyon katsayısı
μ_{eff}	:Efektif viskozite ($N.s/m^2$)
μ_t	:Türbülans viskozitesi ($N.s/m^2$)
Ψ	:Sapma açısı (Bağlı rüzgarın gemi pruvası ile yaptığı açı) ($^{\circ}$)
α	:Isıl yayılma katsayısı
$\alpha, \beta, C_\mu, \sigma$:Sabit sayılar
MARPOL	:Marine Pollution

Kaynaklar

- [1] Kulkarni P.R., Singh S.N. ve Seshadri V. (2005). Flow Visualization Studies of exhaust Smoke-Superstructure Interaction on Naval Ships, Naval Engineering Journal, Vol.117, 41-56.
- [2] Vijayakumar R., Seshadri V., Singh S.N. ve Kulkarni P.R. (2008). A Wind Tunnel Study on the Interaction of Hot Exhaust from the Funnel with the

- Superstructure of a Naval Ship. IEEE Sections Congress. 978-1-4244-2126.
- [3] Harrell J.P. (1977). Experimentally Determined Effects Of Eductor Geometry on The Performance Of Exhaust Gas Eductors For Gas Turbine Powered Ships Naval Postgraduate School, Master Thesis.
- [4] Overcamp T.J. (2001). A review of Conditions Leading to Downwash in Physical Modeling Experiments, Atmospheric Environment 35, pp 3503-3508.
- [5] Richard G. ve Steven J.Z. (2002). Wind Tunnel Testing to Determine Unsteady Loads on a Helicopter Fuselage in a Ship Airwake, ICAS 2002 Congress.
- [6] Michael K. J. (1988). Flow Visualization of the Airwake Around a Model of a DD-963 Class Destroyer in a Simulated Atmospheric Boundary Layer Naval Postgraduate School, Master Thesis.
- [7] McCallum D. (1976). Technical Practices Manual For Surface Ship Stack Design Navsec Report 6136-76-18.
- [8] Baham G.J. ve McCallum D. (1977). Stack Design Technology For Naval And Merchant Ships, Sname Transaction, 85, 324-349.
- [9] Eunseok J., Jaedon Y. ve Yongsoo K. (2001) A Cfd-Based Parametric Study on The Smoke Behavior of A Typical Merchant Ship, Elsevier Science
- [10] Moat B., Yelland M., Pascal R. ve Molland A. (2005). An Overview of the Airflow Distortion at Anemometer Sites on Ships, International Journal of Climatology Int. J. Climatol. 25 : 997-1006.
- [11] Popinet S., Smith M. ve Stevens C. (2004). Experimental and Numerical Study of the Turbulence Characteristics of Airflow around a Research Vessel, Journal of Atmospheric and Oceanic Teechnology, Vol. 21 1575-1589.
- [12] Kulkarni P.R., Singh S.N. ve Seshadri V. (2007). Parametric Studies of Exhaust Smoke-Superstructure Interaction on a Naval Ship Using CFD, Computer&Fluids, 36, 794-816
- [13] Huang J., Carrica P.M. ve Sternl A. (2010). A Method to Compute Ship Exhaust Plumes with Waves and Wind, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 10.1002/flid.2499 .
- [14] Wilkinson C.H., Zan S.J., Gilbert N.E. ve Funk J.D. (1998). Modelling and Simulation of Ship Air Wakes for Helicopter Operations-A Collaborative Venture, RTO AVT Symposium.
- [15] Syms G.F. (2008). Simulation of Simplified-Frigate Airwakes Using A Lattice-Boltzmann Method, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 96, 1197-1206.
- [16] Syms G.F. (2004). Numerical Simulation Of Frigate Airwakes, International Journal of Computational Fluid Dynamics, 18(2), 199-207.
- [17] Blockena B., Stathopoulos T., Saathoff P. ve Wang X. (2008). Numerical Evaluation of Pollutant Dispersion in the Built Environment : Comparisons between Models and Experiments, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 96 (2008) 1817-1831.
- [18] Lateb M., Masson C., Stathopoulos T. ve Bédard C. (2010). Numerical Simulation of Pollutant Dispersion Around a Building Complex, Building and Environment, 45 (2010) 1788-1798.
- [19] Heywood J.B. (1998). Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill.
- [20] Emission Control Two Stroke Low Speed Diesel Engines, MAN B&W Diesel A/S, December 1996.
- [21] Quandt E. (1996). European Technology for Reducing Exhaust Pollution form Naval Ship Engines, Naval Surface Warfare Center,

- NSWCCD-TR-80-96/2.
- [22] Ergin S. (2007). Gemi Dizel Motorları için Geliştirilen Egzos Emisyon Kontrol Sistemi, Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi, Sayı 173, 7-11
- [23] MARPOL 73/78 Annex VI, (2005). Regulation for the Prevention of Air Pollution from Ships.
- [24] Çevre ve Orman Bakanlığının, 06 Haziran 2008 tarihli, 26898 sayılı "Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği.
- [25] Versteeg H.K. ve Malalasekera W. (1995). An Introduction to Computational Fluid Dynamics.
- [26] ANSYS, CFX 12.1
- [27] Gosman A.D. (1999). Developments in CFD for Industrial and Environmental Applications in Wind Engineering. J Wind Eng Ind Aerodyn ;81 : 21-39.
- [28] Murakami S. (1993). Comparison of various turbulence models applied to a bluff body. J Wind Eng Ind Aerodyn 1993;46-47 : 21-36.
- [30] Kaykısızlı H. (2006). Rüzgar Tüneli ve Akış Görüntüleme Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi.
- [31] Versteeg H.K. ve Malalasekera W. (1995). An Introduction to Computational Fluid Dynamics.
- [32] Dobrucalı E. (2013). Savaş Gemilerinde Egzos Gazlarının Yayılımının Deneysel Ve Sayısal Olarak İncelenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.