



Antifouling Boyaların Hidrodinamik Özellikleri Üzerine Bir HAD Çalışması

Utku Cem KARABULUT¹, Yavuz Hakan ÖZDEMİR², Barış BARLAS³

¹Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Türkiye

²Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Deniz Teknolojileri Meslek Yüksekokulu, Türkiye

³İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Türkiye

ukarabulut@bandirma.edu.tr; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7588-0132>

yhozdemir@comu.edu.tr; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0406-0532>

barlas@itu.edu.tr; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5846-2369>

Öz

Bu çalışmada, çeşitli antifouling boya ların hidrodinamik performans larını incelemek için kullanılabilen bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yaklaşımı sunulmaktadır. Düz bir levhanın etrafında gelişen, Reynolds sayısı $2,8 \times 10^6$ ve $5,5 \times 10^6$ olan akışları modellemek üzere, zamandan bağımsız zaman ortalamalı Navier Stokes (RANS) denklemleri çözülmüştür. Yüzey pürüzlülüğünün etkileri, sınır tabakanın logaritmik yasa bölgesindeki hız profilinde aşağı kayma olarak modellenmiştir. Tam ölçekli bir gemiye ait sürtünme direnci sonuç larını tahmin etmek üzere Granville'nin benzerlik yasasından faydalanılmıştır. Sonuç lar daha önceki deneysel ve sayısal çalışmalar ile uyum içerisindedir.

Anahtar Kelimeler: Antifouling boya, Gemi direnci, HAD, Yüzey Pürüzlülüğü.

A CFD Study On the Hydrodynamic Characteristics of the Antifouling Paints

Abstract

This paper presents a computational fluid dynamics (CFD) approach which can be used to investigate the hydrodynamic performances of various antifouling paints. Steady Reynolds - Averaged - Navier - Stokes (RANS) equations were solved for the flows around a flat plate at Reynolds number of $2,8 \times 10^6$ and $5,5 \times 10^6$. The surface roughness effects were modelled as downward shift of the velocity profile at the log - law region of the boundary layer. Granville's similarity law was used to extrapolate the results for a full scale ship. Results are in good agreement with the previous experimental and numerical studies.

Keywords: Antifouling Paint, Ship Resistance, CFD, Surface Roughness.

1. Giriş

Deniz taşımacılığı küresel ticarete büyük bir öneme sahiptir. Ticari ürünlerin hacimsel olarak % 80'inden, maddi açıdan ise % 70'inden fazlası gemiler tarafından taşınmaktadır [1]. Buna karşın dünyanın en büyük ulaşım aracı olan gemiler enerji kaynağı olarak fosil yakıtları kullanmaktadır. Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) gemilerde fosil yakıt tüketimine bağlı sera gazı emisyonlarını azaltmak üzere sıkı düzenlemeler getirmekte, alınan tedbir ve düzenlemeler ile sera gazı emisyonlarının 2020 yılına kadar % 20, 2025 yılına kadar % 25 ve 2030 yılına kadar % 30 oranında düşürülmesi amaçlanmaktadır. Gemilerde enerji verimliliğinin artırılması IMO'nun birinci önceliği konumundadır ve 2013 yılında yürürlüğe giren enerji verimliliği dizayn endeksi (EEDI), yeni inşa edilen gemiler için en önemli teknik düzenleme olarak tanımlanmaktadır [2,3]. Buna ek olarak, son yıllarda denizcilik sektöründe yaşanan ekonomik durgunluk, şirketleri operasyon maliyetlerini düşürmeye zorlamaktadır. Bu problemin üstesinden gelmenin bir yolu, iyi tasarlanmış bir tekne geometrisi ile toplam tekne direncini düşürerek yakıt maliyetini azaltmaktır.

Gemi, seyir süresince, hareket yönüne zıt bir direnç kuvvetine maruz kalır. Direnç kuvveti, sürtünme direnci ve artık direnç olmak üzere iki ana bileşenden oluşur [4]. Sürtünme direnci, isminden de anlaşılacağı üzere, teğetsel akışkan kuvvetleri nedeni ile meydana gelir ve genellikle toplam direncin büyük bölümünü oluşturur. Sürtünme direnci, petrol tankerleri gibi düşük hızlı gemilerde toplam direncin yaklaşık % 80'ini oluştururken konteyner gemileri gibi yüksek hızlı gemilerde bu oran % 50 civarındadır [5]. Gemi direncinin yüksek bir hassasiyet ile öngörülmesi, hem tasarım aşaması hem geminin işletilmesi için kritik öneme sahiptir. Gemi üzerine etkileyen sürtünme ve artık direnç kuvvetlerinin doğru tahmin edilmesi, yakıt maliyeti

düşük, enerji verimliliği yüksek gemilerin tasarımına olanak sağlar. Böylece denizde taşımacılık faaliyetleri nedeni ile ortaya çıkan çevre kirliliği de azaltılabilir.

Bir geminin sürtünme direnci, tekne geometrisinin yanı sıra dış yüzeyinin pürüzlülük özelliklerine de bağlıdır. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça, direnç de artış gösterir. Diğer yandan gemiler, denize indirildikleri andan itibaren sürekli olarak biyolojik ve kimyasal kirlenmeye maruz kalırlar. Söz konusu kirlilik yüzey pürüzlülüğünde artışa neden olur. Antifouling boyalar, bu sorunla başa çıkmak üzere geliştirilmiştir.

Pürüzlülük - gemi direnci ilişkisi 18. yüzyılın ikinci yarısından beri birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün sürtünme direnci üzerine etkisinin incelendiği ilk araştırmalar, Froude [6, 7] tarafından yürütülmüştür. Kirlenmenin direnç üzerindeki etkisini araştıran ilk kapsamlı deney çalışması ise McEntee [8] tarafından gerçekleştirilmiştir. Deney kapsamında düz plakalar antikorozyon boya ile boyanmış ve bir süre denizde bekletilmiştir. Deney sonucunda 12 ay boyunca deniz suyuna maruz kalan plakalarda sürtünme direncinin dört kat artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Pürüzlülük nedeni ile gemi direncinde yaşanan artış hakkında ayrıntılı bilgi veren ilk çalışmalardan bir diğeri de Lackenby [5] tarafından yürütülmüştür. Çalışmanın sonuç bölümünde 18000 DWT, 14 knot servis hızında çalışan bir tanker gemisi ile 22 knot servis hızında çalışan bir kanal gemisinin direnç özelliklerinin değişimi verilmiştir. Tanker gemisinde üç yıllık bir işletim neticesinde biyolojik kirlenmeye bağlı olarak direnç kuvvetinde meydana gelen artışın % 31, kanal gemisinde ise dört yıllık bir işletim neticesinde direnç kuvvetinde meydana gelen artışın % 21 olduğu belirtilmiştir. Ayrıca dış kaplama yüzeyinin düzenli olarak bakım ve onarımı ile yakıt tüketiminin önemli ölçüde azaltılabileceği de çalışmanın sonuçları arasındadır.

Günümüzde pürüzlülük - sürtünme ilişkisinin incelenmesine yönelik en yaygın araştırma yöntemi plaka çekme deneyleridir. Candries vd. [9], foul - release tipi boyaların dirençlerini incelemek için 2,55 m uzunluğunda bir düz plaka ile deneyler gerçekleştirmiş, bu boya türünün farklı pürüz dokusu ile SPC türü boyalara bir alternatif olabileceği sonucuna ulaşmıştır. Schultz [10], zımparalama uygulanan farklı yüzeylerin sürtünme - direnç ilişkisini araştırmak amacı ile düz plakalar kullanarak, çekme tankında deneysel bir çalışma yürütmüştür. Boyutsuz direnç katsayısında % 7,3'e varan artış gözlemlenmiştir. Ayrıca bu yüzeylerde ortalama pürüz yüksekliği kullanılarak tek bir parametreye bağlı pürüzlülük fonksiyonlarının başarılı bir biçimde kullanılabilmesi belirtilmiştir. Schultz [11], gemilerde kullanılan antifouling boyaların direnç özelliklerini incelemek amacı ile sistematik deneyler yürütmüştür. Deney kapsamında 1,52 m uzunluğunda plakalara çeşitli deniz boyalarını uygulamış ve farklı akış hızlarında direnç kuvvetini ölçmüştür. Daha sonra plakalar belirli bir süre biyolojik kirlenmeye maruz bırakılıp yüzey pürüzlülüğü incelendikten sonra deney yinelenmiştir. Ek olarak tüm yüzeyler temizlenmiş ve deney bir kez daha tekrar edilmiştir. Benzer şekilde deneyler iki farklı zımpara kâğıdı için de gerçekleştirilmiştir. Deniz boyalarında ortalama pürüz yüksekliği değerinin Grigson [12] tipi pürüzlülük fonksiyonu ile birlikte kullanıldığında başarılı veri sağladığı, öte yandan zımpara kâğıtlarında Nikuradse [13] tipi pürüzlülük fonksiyonunun daha kullanışlı olduğu sonucuna varılmıştır. Atlar vd. [14], nano yapılı ve florlu foul - release polimer boyaların hidrodinamik performansını araştırmak için, eksenel olarak simetrik bir cisim etrafındaki akışı deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuçlar, boyaların ilk uygulandıklarında çok yüksek hidrodinamik performans sergilediklerini

göstermiştir. Ünal vd. [15], yeni nesil foul - release boyaların hidrodinamik performansını incelemiştir. Çalışma kapsamında çeşitli yüzeyler üzerindeki sıfır basınç gradyanlı akış araştırılmış, sınır tabaka ölçümleri iki boyutlu Lazer Doppler Velosimetri (LDV) sistemi ile alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, tüm yüzeylerin sürtünme özelliklerinin dikkat çekici derecede iyi olduğunu ve pürüzsüz referans yüzeyine göre yerel sürtünmede en fazla % 6,6 artış olduğunu göstermiştir. Schultz vd. [16], foul - release boyalar kullanarak, bir tam gelişmiş türbülanslı kanal akış sisteminde yürüttüğü deneyler ile biyofilmlerin sürtünme direnci üzerindeki etkisini incelemiştir. Deney kapsamında temiz yüzeyler için ölçümler alındıktan sonra yüzeyler üç ay ve altı ay süre boyunca diatomlu balçık filmlere maruz bırakılmış ve deneyler tekrar edilmiştir. Sürtünme direncinde % 70'e varan artış gözlemlenmiştir.

Plaka deneyleri, pürüzlülük - direnç ilişkisine yönelik faydalı bilgiler sağlar. Öte yandan, plakalar üç boyutlu bir gemi geometrisini temsil edemeyeceğinden bu deneylerden elde edilen bilgi sınırlıdır. Tam ölçekli seyir tecrübeleri ile yapılan çalışmalar ise büyük yatırımlar gerektirdiğinden nadiren gerçekleştirilir. Başarılı bir girişim Haslbeck ve Bohlander [17] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında 22 hafta biyolojik kirlenmeye maruz kalmış bir tek pervaneli firkateyn ile seyir tecrübeleri gerçekleştirilmiş, torsionmetre ile shaft beygir gücü değeri ölçülmüştür. Daha sonra dış kaplama yüzeyi temizlenmiş ve seyir tecrübesi yinelenmiştir. Temizleme işlemi sonrasında, seyir hızına bağlı olarak, shaft beygir gücü değerinde % 5 - % 20 oranında artış olduğu gözlemlenmiştir.

Son dönemde araştırmacıların ilgisini çeken bir diğer yaklaşım, sayısal simülasyonlardır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çalışmalarında yüzey

pürüzlülüğünün dâhil edilmesine yönelik ilk girişimler Patel [18] tarafından incelenmiştir. Öte yandan geçtiğimiz dönemde bilgisayarların hesaplama kabiliyetlerinde ve türbülans modelleme tekniklerinde önemli gelişmeler yaşanmıştır. Khor ve Xiao [19], NACA 4424 airfoil ve bir denizaltı etrafındaki akışı Zaman - Ortalamalı - Navier - Stokes (RANS) temelli bir yöntem ile simüle etmişlerdir. Pahalı olmalarına karşın foul - release boya ların SPC boya larla kıyasla önemli ölçüde düşük direnç kuvvetine yol açtığı sonucuna ulaşılmıştır. Usta ve Korkut [20], 1,5 m uzunluğunda beş farklı alüminyum plaka ile hem deneysel hem sayısal çalışmalar gerçekleştirmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün sayısal olarak başarılı bir şekilde modellenebileceği gösterilmiştir. Demirel vd. [21], Schultz [11] tarafından sunulan plaka geometrisi ve pürüz özelliklerini kullanarak HAD analizleri gerçekleştirmiştir. Grigson [12] tarafından önerilen Colebrook [22] tipi duvar fonksiyonunu kullanmış ve sayısal sonuçları deney sonuçları ile kıyaslamışlardır. Tüm vakalar için, direnç değerlerinde sayısal sonuçlar ile deney sonuçları arasındaki bağıl fark % 2,54'ten düşüktür. Haase vd. [23] orta - süratli büyük katamaranların tam ölçekte direnç değerlerinin tahmin edilmesine yönelik RANS temelli bir hesaplama yöntemi geliştirmiştir. Yüzey pürüzlülüğü, duvar fonksiyonunda, hız değerinin aşağı kayması olarak hesaplamalara dâhil edilmiştir. Hesaplama ve deneysel çalışmalar arasındaki bağıl fark % 5 civarındadır. Demirel vd. [24] KRISO Konteyner Gemisi (KCS) geometrisini kullanarak RANS temelli bir sayısal yöntem ile pürüzlülüğün gemi direnci üzerindeki etkisini araştırmıştır. Duvar fonksiyonu üzerinde yaptıkları düzenlemeler ile pürüz etkilerini hesaplamalara dâhil etmişlerdir. Rushd vd. [25], viskoz yağ kaplamalarının eşdeğer kum tanesi pürüzlülüğünü (hidrolik pürüzlülük) belirlemek amacı

ile hem deneysel hem sayısal çalışmalar yürütmüştür. Çalışmanın bulguları arasında HAD uygulamalarının kirli yüzeylerin hidrolik pürüzlülüğünü belirlemek için kullanılabileceği vurgulanmıştır. Atlar vd. [26], üç farklı prosedür ile, antifouling boya ların gemi performansı üzerindeki etkilerini tahmin etmede kullanılabilecek bir yaklaşım sunmuştur. Her üç prosedür de KCS üzerinde iki farklı servis hızı için uygulanmış ve kirlenmeye bağıl olarak yakıt tüketiminde yaşanan artış hesaplanmış, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yeni nesil antifouling boya lar Demirel [27] tarafından ayrıntılı olarak tanıtılmış ve değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, Schultz [11] çalışmasında kullanılan beş farklı antifouling boya nın ve iki adet yeni nesil boya nın hidrodinamik performansları sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında düz levha üzerindeki akış sayısal olarak modellenmiş, pürüz etkisinin modele dâhil edilmesi için Schultz [11] tarafından sağlanan pürüz fonksiyonları kullanılmıştır. Bu fonksiyonların elde edilmesi bakımından plaka çekme deneyleri önemlidir. Öte yandan bir defa elde edildiklerinde, çok daha geniş bir akış yelpazesinde sayısal inceleme yapmaya olanak sağlar.

2. Yüzey Koşulları, Hesaplama Hacmi ve Sınır Koşulları

Hesaplamalar, Schultz [11] çalışmasında kullanılan levha dikkate alınarak 1,52 m uzunluğunda ve 0,59 m genişliğinde bir levha ile yürütülmüştür. Levha kalınlığı, uzunluğuna ve genişliğine kıyasla çok küçük olduğundan basitçe ihmal edilmiştir. Hesaplamalar Reynolds Sayısı $2,8 \times 10^6$ ve $5,5 \times 10^6$ değerlerine karşılık gelen iki farklı akış koşulunda gerçekleştirilmiştir.

Boyalı yüzeylere ait pürüz özellikleri Tablo 1'de gösterilmektedir. Tabloda yer alan R_a , ortalama pürüz yüksekliğini, R_q , ortalama karekök (RMS) pürüz yüksekliğini, R_p , maksimum pürüz yüksekliğini temsil

etmektedir. Silikon 1 ve Silikon 2 yüzeyleri, iki farklı silikon bazlı boyaya ait pürüz özelliklerini, SPC kısaltması kendinden parlatmalı kopolimer (Self Polishing Copolimer), TBT kısaltması ise Tri - Bütül Kalay (Tri - Butil Tin) anlamına gelmektedir.

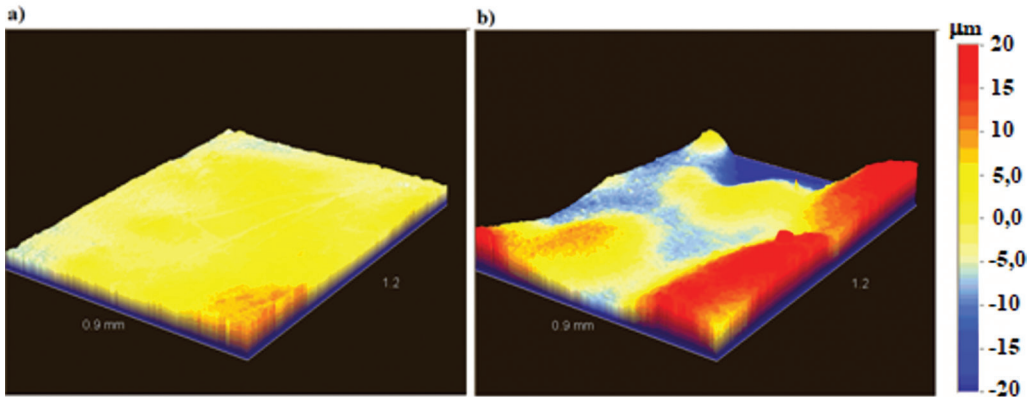
Çalışma kapsamında, kıyaslama mikroskobu kullanılarak iki adet yeni nesil antifouling boyaya ait pürüz özellikleri ölçülmüş ve bu boyaların hidrodinamik performansları da HAD analizleri ile değerlendirilmiştir. Her ne kadar kıyaslama mikroskobu ile alınan örneklerin kesme uzunluğu düşük olsa da, yüzey istatistiklerini diğer pürüz ölçme tekniklerine kıyasla çok daha düşük bir belirsizlikle verebilmektedir. Kesme uzunluğu düşük olduğundan, ölçümler yüzeylere ait üçer örnek üzerinden alınmıştır. Boyalı yüzeyler üzerinden

alınan mikroskop görüntülerine ait birer örnek Şekil 1'de verilmiştir.

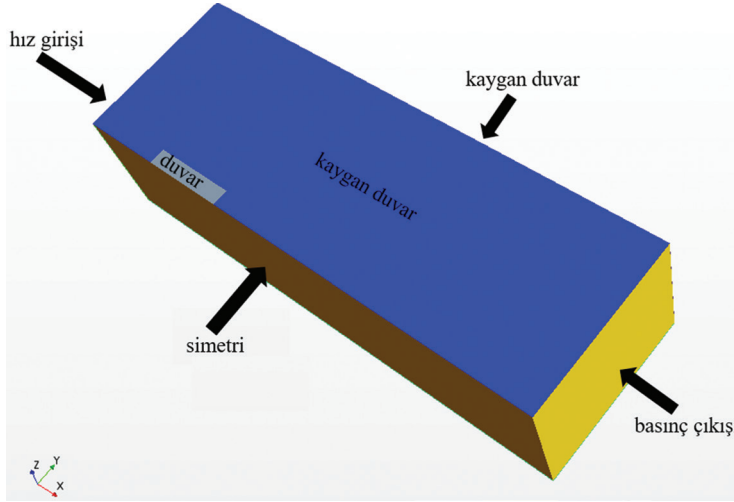
Şekil 2 sayısal analizler için oluşturulan hesaplama hacmini ve sınır koşullarını göstermektedir. Dikdörtgenler prizması şeklinde bir hacim seçilmiş, giriş sınırı, levhanın akışı karşılayan uç sınırından itibaren bir levha boyu kadar ön tarafa, çıkış sınırı ise dört levha boyu kadar arka tarafa yerleştirilmiştir. Problemin simetrisi göz önüne alınarak plakanın yalnızca yarısı modellenmiştir. Sırası ile iki levha boyu yanıl uzaklıkta ve bir buçuk levha boyu düşey uzaklıkta kaygan (sıfır kayma gerilmeli) duvar sınır koşulu uygulanmıştır. Levhanın simetri eksenini üzerindeki düzlem boyunca simetri sınır koşulu uygulanmıştır. Giriş sınırında, düzleme dik sabit hız değeri ve % 1 gibi düşük bir türbülans şiddet seviyesi tanımlanmış, çıkış sınırında ise hidrostatik basınç değerleri tanımlanmıştır

Tablo 1. Yüzey Pürüz Özellikleri [11]

Test yüzeyi	R_a (μm)	R_q (μm)	R_t (μm)
Silikon 1	12±2	14±2	66±7
Silikon 2	14±2	17±2	85±8
Ablatif Bakır	13±1	16±1	83±6
SPC Bakır	15±1	18±1	97±10
SPC TBT	20±1	24±2	129±9
UNI PRO	2,24	2,81	17,13
Extra EU	7,99	10,13	74,40



Şekil 1. Boyalı Yüzeylere Ait Mikroskop Görüntüleri; a) UNI PRO, b) Extra EU



Şekil 2. Hesaplama Hacmi ve Sınır Koşulları

3. Matematiksel Model

Analizlerde, zamandan bağımsız sıkıştırılamaz RANS denklemleri [28] çözülmüştür. İlgili süreklilik ve momentum denklemleri,

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (2)$$

şekindedir. Bu denklemlerde U_i ve u'_i sırası ile hızın ortalama ve türbülans salınımı bileşenlerini temsil etmektedir. P ortalama basıncı, ρ yoğunluğu ve ν kinematik viskoziteyi temsil etmektedir. Analizlerde, eşitliğin sağ tarafındaki son terim olan Reynolds gerilmelerini modellemek için iki farklı türbülans modeli kullanılmış ve böylece türbülans modelinin çözüm üzerindeki etkisi incelenmiştir. Söz konusu türbülans modellerinin ilki Boussinesq hipotezine [29] dayalı çift tabaka yaklaşımli realizable $k-\epsilon$ türbülans modeli [30] ve eliptik karışım Reynolds gerilme modelidir [31].

Süreklilik, momentum ve türbülans denklemleri, denklemleri sırası ile ele alan bir sonlu hacim [32, 33] tekniği ile çözülmüştür. Basınç alanının çözümü için basınç düzeltme prosedürü (SIMPLE) [34]

kullanılmıştır. Konvektif terimler, ikinci dereceden akış yönü şeması ile, viskoz terimler ise ikinci dereceden merkezi farklar şeması kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Çözüm için ticari bir paket yazılım olan Star CCM+ programı kullanılmıştır ve tüm ölçekli artıklar 10^{-5} değerinin altına düştüğünde yakınsamanın sağlandığı kabul edilmiştir.

4. Duvar Fonksiyonu

Türbülanslı sınır tabakalar üç ana alt tabakaya ayrılabilir. Viskozite etkilerinin baskın olduğu iç kısma, viskoz alt tabaka denir ve sınır tabakanın % 80 - % 90'lık bölümünü oluşturan dış bölgesi de dış tabaka olarak adlandırılır. Dış ve viskoz alt tabakalar arasında yer alan ve logaritmik yasa bölgesi olarak adlandırılan üçüncü bir bölge daha bulunur [35]. Hidrolik olarak pürüzsüz bir yüzey için bu bölgenin ortalama hız profili;

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \quad (3)$$

şekindedir. Burada U^+ ve y^+ ifadeleri sürtünme hızı (U_τ) ve kinematik viskozite ile boyutsuzlaştırılmış hızı ve düşey uzaklığı temsil etmektedir. κ , Von - Karman sabiti, B

ise logaritmik yasa sabiti olarak adlandırılır. Clauser [36], pürüzlü yüzeylerin etrafında gelişen türbülanslı sınır tabakalarda ortalama hız profiline benzer bir logaritmik yasa ile temsil edilebileceğini öne sürmüştür. Bu yaklaşımda pürüzlülük etkisi ile ortalama hız profili, pürüzsüz yüzeydeki değere paralel olarak bir miktar aşağı kayar. Aşağı kaymayı ifade etmek için denkleme pürüzlülük fonksiyonu olarak adlandırılan ΔU^+ terimi ilave edilir.

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B - \Delta U^+ \quad (4)$$

HAD uygulamalarında duvar fonksiyonları, akışın duvar sınırlarına yakın bölgelerini modellemek için kullanılır. Bu nedenle uygun pürüzlülük fonksiyonları ile bu çalışmanın konusu olan probleme ve benzer problemlere yönelik başarılı HAD metodolojileri elde edilebilir. Star CCM+ yazılımı logaritmik yasa bölgedeki pürüzlülük etkilerini yakalamak için denklemin (3) ile özdeş aşağıdaki formda bir duvar fonksiyonunu kullanır [37]:

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(E' y^+) \quad (5)$$

Burada E' çarpanı aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$E' = \frac{E}{f} \quad (6)$$

Eşitlikteki E ifadesi duvar fonksiyonu katsayısı olarak, f ise pürüzlülük katsayısı olarak tanımlanır. Analizlerde κ ve E için Cebeci ve Bradshaw [38] önerilerine uygun olarak sırası ile 0,42 ve 9 değerleri kullanılmıştır.

Star CCM+ yazılımı f için pürüzlülük Reynolds sayısı (k^+) ve akış rejimine bağlı olarak aşağıdaki eşitlikleri kullanmaktadır:

$$f = \left\{ \begin{array}{ll} \left[A \left(\frac{k^+ - k_{\text{pürüzsüz}}^+}{k_{\text{pürüzlü}}^+ - k_{\text{pürüzsüz}}^+} \right) + C k^+ \right]^n & k^+ \leq k_{\text{pürüzsüz}}^+ \\ \left[\frac{k_{\text{pürüzsüz}}^+}{A + C k^+} \right] & k_{\text{pürüzsüz}}^+ < k^+ < k_{\text{pürüzlü}}^+ \\ k_{\text{pürüzlü}}^+ & k_{\text{pürüzlü}}^+ \leq k^+ \end{array} \right\} \quad (7)$$

a ifadesi ise aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$a = \sin \left[\frac{\pi}{2} \frac{\log(k^+ / k_{\text{pürüzsüz}}^+)}{\log(k_{\text{pürüzlü}}^+ / k_{\text{pürüzsüz}}^+)} \right] \quad (8)$$

Eşitliklerdeki $k_{\text{pürüzsüz}}^+$ ve $k_{\text{pürüzlü}}^+$ ifadeleri sırası ile hidrolik açıdan pürüzsüz ve tam pürüzlü akış rejimleri için tanımlanan k^+ sınır değerlerini temsil etmektedir. Model [13] verilerine uygun olarak geliştirilmiş olup sıkı biçimde yerleştirilmiş düzenli bir kum tanesi pürüzlülüğü varsayımında bulunmaktadır. Model Cebeci ve Bradshaw [38] tarafından verilen modelin hafifçe değiştirilmiş bir versiyonudur ve akış rejimi sınırları için $k_{\text{pürüzsüz}}^+ = 2,25$ ve $k_{\text{pürüzlü}}^+ = 90$ değerleri, A ve C katsayıları için sırası ile 0 ve 0,253 değerleri önerilmektedir [37]. k^+ ise U_τ ve v' 'ye bağlı olarak aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$k^+ = \frac{k U_\tau}{v} \quad (9)$$

Öte yandan, bu model düzensiz pürüz özelliklerine sahip olan yüzeyler için her zaman kullanışlı değildir. Colebrook [22], bazı düzensiz pürüz özelliklerinin, pürüzlülük fonksiyonunda tek bir parametreye bağlı olarak ifade edilebileceğini öne sürmüştür. Grigson [12], antifouling boyalardan kaynaklanan pürüz özellikleri için Colebrook [22] tipinde bir pürüz fonksiyonu önermiştir. Schultz [11], boyalı yüzeylerde Grigson [12] tipi pürüz fonksiyonunun başarı ile uygulanabileceğini belirtmiştir.

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y^+}{1 + k^+} \right) + B \quad (10)$$

Başarılı bir pürüz fonksiyonu için bir diğer önemli husus, karakteristik pürüz yüksekliğinin seçimidir. Özellikle düzensiz pürüz özellikleri gösteren yüzeylerde, çoğu zaman bu yüksekliğin seçiminde deneysel

verilere ihtiyaç duyulur. Bu çalışmada Schultz [11] önerileri göz önüne alınarak; boyalı yüzeylerde $k=0,17R_a$ olmak üzere denklem (10) kullanılmıştır.

Star CCM+ yazılımı, kullanıcının doğrudan denklem (10) gibi bir pürüzlülük fonksiyonu tanımlamasına izin vermemekte, $k^+_{\text{pürüzsüz}}$, $k^+_{\text{pürüzlü}}$, A ve C katsayılarının seçimine olanak sunmaktadır. Denklem (10) ile özdeş bir pürüzlülük fonksiyonu elde etmek üzere $k^+_{\text{pürüzsüz}}$ ve $k^+_{\text{pürüzlü}}$ için düşük değerler seçilmiş, böylece akışın her zaman tam pürüzlü rejimde kalması sağlanmıştır. A ve C katsayıları ise 1 olarak tanımlanmış ve böylece denklem (10) ile özdeş bir pürüz fonksiyonu elde edilmiştir.

5. Ağ Yapısının Oluşturulması

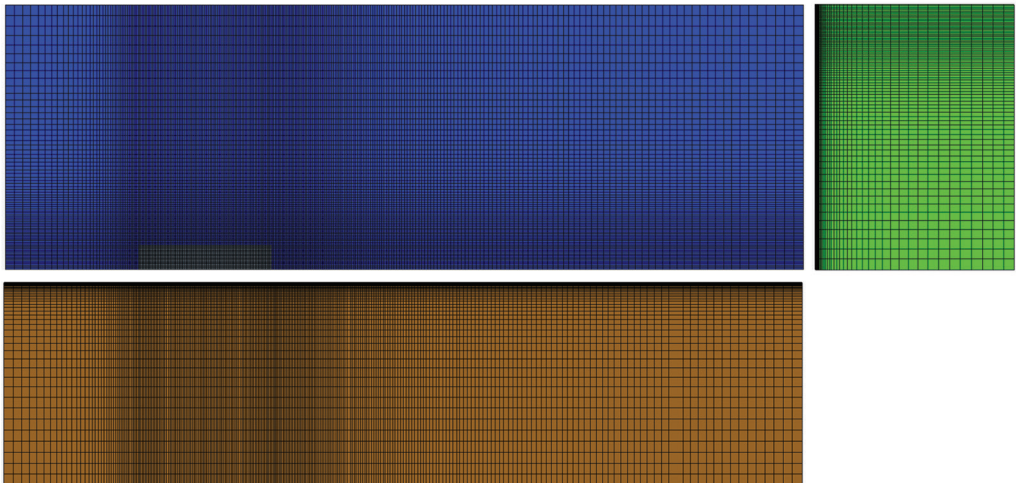
Düzenli ağ yapıları modern ve gelişmiş bir ağ üretimi paket yazılım programı ile üretilmiştir. Duvar sınırı üzerinde ortalama boyutsuz y^+ değerinin 50 civarında tutulması amaçlanmış ve buna uygun olarak farklı akış hızları için farklı ağ yapıları oluşturulmuştur. Levhaya bitişik ağ hücresinin yüksekliği, levha uzunluğuna bağlı Reynolds sayısı $2,8 \times 10^6$ olan akış koşulu için 1,24 mm, Reynolds sayısı $5,5 \times 10^6$ olan akış koşulu için 0,7 mm olarak ayarlanmıştır. Şekil 3, $Rn=2,8 \times 10^6$ için

oluşturulan ağ yapısını göstermektedir.

Pürüzsüz yüzey üzerindeki akış için ($Rn=2,8 \times 10^6$) üç farklı yoğunlukta ağ yapısı ile analizler gerçekleştirilmiş ve çözümün ağ yoğunluğuna bağlılığı incelenmiştir. Bunun için ilk ağ yapısını takiben, ortalama ağ yoğunluğu x, y ve z doğrultularında sistematik olarak $\sqrt{2}$ oranında artırılmış ve düşük yoğunluklu, orta yoğunluklu ve yüksek yoğunluklu üç ağ yapısı oluşturulmuştur. Ağ yapısından kaynaklanan belirsizliği tahmin etmek için, Roache'un [39] Richardson ekstrapolasyonuna [40] dayanan ağ yakınsama indeksi (GCI) metodu kullanılmıştır. Metot, [41] tarafından detaylı olarak açıklanmaktadır. GCI hesaplama sonuçları Tablo 2'de gösterilmektedir. Her iki türbülans modeli için de ağ yapısına ait sayısal belirsizliğin % 1'den küçük olduğu görülmektedir. Sayısal belirsizliğin düşük olduğu dikkate alınarak, takip eden analizlerde orta yoğunluklu ağ yapıları kullanılmıştır.

6. Analiz Sonuçları

Sürtünme direnci katsayısı için HAD analizlerinin sonuçları ve deney sonuçları karşılaştırmalı olarak Tablo 3 ve Tablo 4'te sunulmuştur. Tüm yüzeylerde deney sonuçları ile HAD sonuçları arasındaki ilişki



Şekil 3. Ağ Yapısı

Tablo 2. GCI Hesaplama Sonuçları

Parametreler	Değerler (k-ε)	Değerler (RGM)
N_1, N_2, N_3	3.231.760; 1.152.100; 403.970	3.231.760; 1.152.100; 403.970
Γ_{21}, Γ_{32}	$\sqrt{2}$	$\sqrt{2}$
ϕ_1	0,003550	0,003668
ϕ_2	0,003548	0,003658
ϕ_3	0,003552	0,003674
P_{21}	0,287	1,354
ϕ_{21}^{ext}	0,003568	0,003685
GCI_{fine}^{21}	% 0,65	% 0,58

fark % 3 değerinin altındadır. Sonuçlar önceki bölümde açıklanan pürüzlülük fonksiyonu ve hesaplama yönteminin başarı ile kullanılabilirliğini göstermektedir. Yeni nesil boyalara ait sonuçlar da tablolara eklenmiştir. Yeni nesil boyaların üstün

pürüzlülük özellikleri hidrodinamik açıdan da kendini göstermektedir. UNI PRO yüzeyi pürüzsüz bir referans yüzeyine kıyasla yalnız % 0,5 civarında bir direnç artışına neden olurken Extra EU yüzeyi için bu oran % 1 dolayındadır.

Tablo 3. $R_n=2,8 \times 10^6$ için Karşılaştırmalı C_f Değerleri

Yüzey	$C_f (\times 10^3)$ (k-ε)	$C_f (\times 10^3)$ (RGM)	$C_f (\times 10^3)$ (Deney [11])	BF (%) (k-ε)	BF (%) (RGM)
Pürüzsüz	3,548	3,658	3,605	1,58	1,47
Silikon 1	3,647	3,759	3,666	0,52	2,54
Silikon 2	3,662	3,774	3,663	0,03	3,03
Ablatif Bakır	3,655	3,767	3,701	1,24	1,78
SPC Bakır	3,669	3,781	3,723	1,45	1,56
SPC TBT	3,703	3,816	3,783	2,11	0,87
UNI PRO	3,564	3,674	-	-	-
Extra EU	3,597	3,708	-	-	-

Tablo 4. $R_n=5,5 \times 10^6$ için Karşılaştırmalı C_f Değerleri

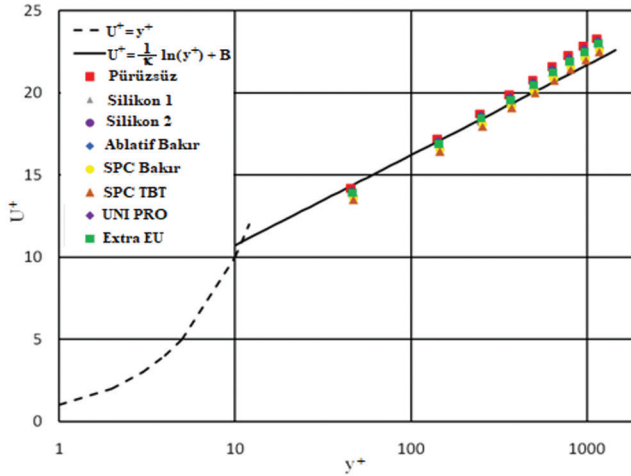
Yüzey	$C_f (\times 10^3)$ (k-ε)	$C_f (\times 10^3)$ (RGM)	$C_f (\times 10^3)$ (Deney [11])	BF (%) (k-ε)	BF (%) (RGM)
Pürüzsüz	3,174	3,271	3,226	1,61	1,39
Silikon 1	3,315	3,416	3,374	1,75	1,24
Silikon 2	3,335	3,436	3,426	2,66	0,29
Ablatif Bakır	3,325	3,426	3,401	2,23	0,74
SPC Bakır	3,344	3,446	3,438	2,73	0,23
SPC TBT	3,392	3,494	3,500	3,09	0,17
UNI PRO	3,197	3,295	-	-	-
Extra EU	3,244	3,343	-	-	-

Reynolds gerilme modeli (RGM) ve $k-\varepsilon$ türbülans modeli ile elde edilen sonuçlar oldukça benzerdir. $k-\varepsilon$ modeli C_f değerini deney sonucuna [11] kıyasla % 1,61-% 3,09 oranında daha düşük tahmin etmekte, Reynolds gerilme modeli ise C_f değerini deney sonucuna kıyasla % 0,17-% 1,39 bir parça daha yüksek tahmin etmektedir.

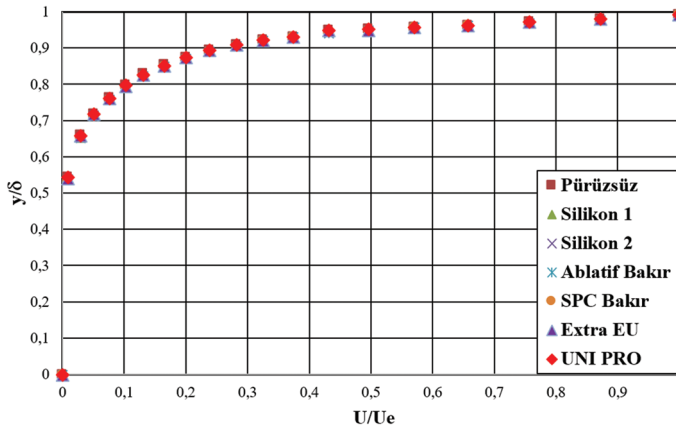
Boyutsuz hız profilinin yüzey pürüzlülüğüne bağlı değişimini incelemek üzere, her bir yüzey için levhanın çıkış ucundaki hız değerleri karşılaştırılmıştır. Boyutsuz hız profillerindeki aşağı kayma, Şekil 4 üzerinden görülebilir.

Şekil 5 ise ortalama akış hızı, uzaklık

ilişkisini türbülanslı sınır tabakanın dış bölge değişkenleri üzerinden göstermektedir. U_e dış akış hızını, δ ise sınır tabaka kalınlığını temsil etmektedir. Sınır tabaka kalınlığı, x yönündeki akış hızının dış akış hızının % 99'una eşit olduğu düzey uzaklık olarak kabul edilmiştir. Şekilden pürüz etkisinin duvardan uzaklaştıkça azaldığı anlaşılmakta, türbülanslı sınır tabakanın dış bölge değişkenleri cinsinden hız değerleri neredeyse hiç değişiklik göstermemektedir. Bu durum literatürdeki deneysel çalışmalarla [42] paralellik göstermektedir.



Şekil 4. Sınır Tabaka Boyutsuz Hız Profilleri



Şekil 5. Dış Bölge Değişkenleri Cinsinden Boyutsuz Hız Profili

7. Tam Ölçekte Sürtünme Direnci Tahmini

Granville [42], sürtünme direncinde pürüz etkisinin gemi ölçeğine ekstrapolasyonuna olanak sağlayan bir benzerlik yasası tanıtmıştır. Antifouling boyaların gemi ölçeğindeki hidrodinamik performanslarını incelemek üzere Granville'in benzerlik yasası [42] kullanılarak, 200 m uzunluğunda ve 20 knot servis hızında bir geminin sürtünme direnci tahmin edilmiştir. Levhanın model ölçeği (λ) denklem (11) ile tanımlanmaktadır.

$$\lambda = \frac{L_{levha}}{L_{gemi}} \quad (11)$$

Bu amaca yönelik olarak, öncelikle aynı hesaplama hacmi kullanılarak 20 knot servis hızında ilave analizler yürütülmüştür. Levhaya komşu hücrenin ortalama y^+ değerini 50 civarında tutmak amacı ile ağ yapısı z doğrulusunda sıkılaştırılmıştır. Analizlerde yalnız $k-\varepsilon$ modeli kullanılmıştır. Tablo 5, levha ölçeğinde hesaplanan ve gemi ölçeğinde tahmin edilen C_f değerlerini göstermektedir. Tabloda yer alan ΔC_f ifadesi pürüzlülük nedeni ile direnç katsayısında ortaya çıkan artışı ifade etmektedir. Antifouling boya kullanımına bağlı olarak, levha ölçeğinde % 1,5-% 14 oranında, gemi ölçeğinde ise % 0,5-% 6 arasında

direnç artışı ortaya çıkmaktadır. Çalışmaya dahil edilen yeni nesil boyaların (özellikle UNI PRO yüzeyinin) gemi ölçeğinde çok avantajlı oldukları görülmektedir. Boya teknolojisinde yaşanan gelişmelerin, denizcilik sektörünün, IMO'nun sera gazı emisyonlarına yönelik orta ve uzun vadeli hedeflerine ulaşmasında önemli bir payı olacağı anlaşılmaktadır.

8. Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu çalışmada, çeşitli yüzey koşullarında, düz levha etrafındaki sıfır basınç gradyanlı türbülanslı akış özelliklerini incelemek üzere zamandan bağımsız RANS denklemleri çözülmüştür. Yüzey pürüzlülüğünün sınır tabaka içersindeki ortalama akış özellikleri üzerindeki etkilerini modellemek üzere pürüzlülük fonksiyonlarından yararlanılmış, antifouling boyalı yüzeylerde Grigson tipi [12] pürüzlülük fonksiyonu kullanılmıştır.

[11] sonuçları ile kıyaslandığında, realizeable $k-\varepsilon$ modeli C_f değerini hafifçe düşük, eliptik karışım Reynolds gerilme modeli ise C_f değerini hafifçe yüksek tahmin etmektedir. Her iki modelin de tüm yüzeylerde % 5'in altında bir bağıl hata ile başarılı sonuç verdiği görülmüştür. Önerilen HAD modelinin antifouling boyaların hidrodinamik performanslarını incelemek üzere kullanılabileceği

Tablo 5. Levha ve Gemi Ölçeğindeki Direnç Katsayıları

Yüzey	$C_f (\times 10^3)$ (Levha) ($\lambda=1:131,6$)	ΔC_f (%)	$C_f (\times 10^3)$ (Gemi)	ΔC_f (%)
Pürüzsüz	2,737	-	1,410	-
Silikon 1	2,997	9,50	1,452	2,98
Silikon 2	3,031	10,7	1,464	3,83
Ablatif Bakır	3,013	10,1	1,458	3,40
SPC Bakır	3,047	11,3	1,471	4,33
SPC TBT	3,124	14,1	1,499	6,31
UNI PRO	2,780	1,57	1,417	0,50
Extra EU	2,868	4,79	1,432	1,56

çıkarmı yapılabilir. Modelin sağladığı en önemli avantaj, analizlerin, yüzey pürüzlülüğü ölçümüne dayalı basit bir karakteristik pürüz yüksekliği değeri ile gerçekleştirilmesine olanak sağlamasıdır. Her ne kadar ilgili pürüz yüksekliğinin belirlenmesi - farklı yüzeyler için - deneysel çalışma gerektirse de, bir defa uygun pürüzlülük fonksiyonu belirlendiğinde çok geniş bir yelpazede farklı akış geometrileri için HAD simülasyonları gerçekleştirmeye olanak sağlar.

Sınır tabaka içerisindeki hız profili incelendiğinde, [43] verileri ile paralel olarak, akışın dış bölgesinde pürüz etkisinin azaldığı gözlenmektedir. Yerel kayma gerilmesi dağılımları incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğünün en yüksek etkiyi sınır tabakanın ince olduğu giriş ucunda gösterdiği de bulgular arasındadır.

Granville'in benzerlik yasası [42] kullanılarak 200 m uzunluğunda ve 20 knot servis hızına sahip bir gemide farklı antifouling boya kullanımlarına sürtünme direnci değerleri tahmin edilmiş, sürtünme direncinde boya tipine bağlı olarak % 0,5 - % 6 aralığında artış gözlenmiştir. Ayrıca, bu ölçekte silikon bazlı foul - release boya kullanımı Tri - Bütül Kalay bazlı boyalara kıyasla % 2 - % 3 oranında daha düşük direnç özelliğine sahip olduğu saptanmış, yeni nesil boyalarda iyileştirmenin % 5'e kadar çıktığı görülmüştür.

Gelecekte yürütülecek çalışmalarda, tanıtılan metot ile düz levha yerine, gemi gibi üç boyutlu geometrilerin etrafındaki akışın modellenmesi ve pürüzlülüğün iz bölgesindeki akış üzerindeki etkilerinin incelenmesi planlanmaktadır. Ayrıca boya çeşitlerinin performanslarına yönelik daha kapsamlı bir model geliştirebilmek adına kirlenmeye bağlı etkilerinin de uygun pürüzlülük fonksiyonları ile hesaplamalara dâhil edilmesi amaçlanmaktadır.

Kaynakça

- [1] United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) (2017). Review of Maritime Transport.
- [2] International Maritime Organisation (IMO) (2009). Report of the Marine Environment Protection Committee in its Fifty-Ninth Session. MEPC 59/24.
- [3] Longva T., Eide M. S., Skjong, R. (2010). Determining a required energy efficiency design index level for new ships based on a cost-effectiveness criterion, Maritime Policy & Management, 37:2, 129-143, DOI: 10.1080/03088830903533759
- [4] Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A. (2011). Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power. New York: Cambridge University Press.
- [5] Lackenby, H. (1962). Resistance of ships with special reference to skin friction and hull surface condition, The 34th Thomas Lowe Grey Lecture, Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Vol. 176, pp. 981-1014.
- [6] Froude, W. (1872). Experiments on the surface-friction experienced by a plane moving through water. British Association for the Advancement of Science. The Collected Papers of William Froude, Institution of Naval Architects, 1955; p. 138-146.
- [7] Froude, W. (1874). Report to the lords commissioners of the admiralty on experiments for the determination of the frictional resistance of water on a surface, under various conditions, performed at Chelston cross, under the authority of their lordships. 44th Report by the British Association for the Advancement of Science.
- [8] McEntee, W. (1915). Variation of frictional resistance of ships with condition of wetted surface. Trans Soc Nav Arch Mar Eng. 24:37-42.

- [9] Candries, M., Atlar, M., Anderson, C.D. (2001). Foul Release systems and drag. Consolidation of Technical Advances in the Protective and Marine Coatings Industry; Proceedings of the PCE 2001 Conference, pp. 273-286. Antwerp.
- [10] Schultz, M. P., (2002). The Relationship Between Frictional Resistance and Roughness for Surfaces Smoothed by Sanding, ASME J. Fluids Eng., 124, pp. 492-499.
- [11] Schultz, M.P. (2004). Frictional Resistance of Antifouling Coating Systems. ASME J. Fluids Eng. 126, 1039-1047.
- [12] Grigson, C.W.B. (1992). Drag losses of new ships caused by hull finish. J.ShipRes. 36, 182-196.
- [13] Nikuradse, J., (1933). Laws of Flow in Rough Pipes. NACA Technical Memorandum 1292.
- [14] Atlar, M., Unal, B., Unal, U.O., Politis, G., Martinelli, E., Galli, G. Davies, C., Williams, D. (2012). An experimental investigation of the frictional drag characteristics of nanostructured and fluorinated fouling-release coatings using an axisymmetric body, Biofouling, 29:1, 39-52.
- [15] Ünal, O.U., Ünal, B., Atlar, M. (2012). Turbulent Boundary Layer Measurements Over Flat Surfaces Coated By Nanostructured Marine Antifouling. Experiments in Fluids. 52:1431-1448.
- [16] Schultz, M.P., Walker J.M., Steppe, C.N., Flack, K.A. (2015). Impact of Diatomaceous Biofilms on the Frictional Drag of Fouling-Release Coatings, Biofouling, 31, 9-10, 759-773, DOI:10.1080/08927014.2015.1108407.
- [17] Haslbeck, E.G., Bohlander, G. (1992). Microbial biofilm effects on drag - lab and field. IN: Proceedings of the SNAME Ship Production Symposium. Paper No. 3A-1. Jersey City, N.J.: SNAME; 7p.
- [18] Patel, V. (1998). Perspective: Flow at High Reynolds Number and Over Rough Surfaces—Achilles Heel of CFD. Journal of Fluids Engineering-Transactions of The Asme - J FLUID ENG. 120. 10.1115/1.2820682.
- [19] Khor, Y.S., Xiao, Q., (2011). CFD simulations of the effects of fouling and antifouling, Ocean Engineering, 38, 1065-1079.
- [20] Usta, O., Korkut, E. (2013). A Study for the Effect of Surface Roughness on Resistance Characteristics of Flat Plates, Marine Coatings Conference, London, UK.
- [21] Demirel, Y.K., Khorasanchi, M., Turan O. Incecik, A. Schultz, M. (2014). A CFD model for the frictional resistance prediction of antifouling coatings. Ocean Engineering. 89. 21-31. 10.1016/j.oceaneng.2014.07.017.
- [22] Colebrook, C.F., (1939). Turbulent Flow in Pipes, With Particular Reference to The Transition Region Between the Smooth and Rough Pipe Laws. J. Inst. Civil Eng. 11, 133-156.
- [23] Haase, M., Zurcher, K., Davidson, G., Binns, J.R., Thomas, G., Bose, N. (2016). Novel CFD-based full-scale resistance prediction for large medium-speed catamarans. Ocean Engineering, 111(1), 198-208.
- [24] Demirel, Y.K., Turan, O., Incecik, A. (2017). Predicting the effect of biofouling on ship resistance using CFD. Appl. Ocean Res. 62, 100-118.
- [25] Rushd, S., Ashraful, I., Sanders, R.S. (2018). CFD Methodology to Determine the Hydrodynamic Roughness of a Surface with Application to Viscous Oil Coatings. J. Hydraul. Eng., 2018, 144(2): 04017067.
- [26] Atlar, M., Yeginbayeva, I.A., Turkmen, S., Demirel, Y.K., Carchen, A., Marino, A., Williams, D. (2018). A Rational Approach to Predicting the Effect of Fouling Control Systems on “In-

- Service” Ship Performance. *GMO Journal of Ship and Marine Technology*. 213:5-36.
- [27] Demirel, Y.K. (2018). New Horizons in Marine Coatings. *GMO Journal of Ship and Marine Technology*. 213:37-53.
- [28] Wilcox, D.C. (1994). *Turbulence Modelling for CFD*, İkinci Basım, DCW Industries, Colifornia.
- [29] Tennekes, H., Lumley, J.L. (1972). *A First Course in Turbulence*. MIT Press, Cambridge, UK.
- [30] Shih, T.-H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J. (1995). A New $k-\varepsilon$ Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows, *Computers and Fluids*, 24(3), 227-238.
- [31] Manceau, R. ve Hanjalic ‘, K. (2001). Elliptic blending model: A new near-wall Reynolds-stress turbulence closure. *Physics of Fluids*. 14, 744-754. DOI: 10.1063/1.1432693.
- [32] Blazek, J. (2001). *Computational Fluid Dynamics*. 3rd. Edition. Butterworth Heinemann.
- [33] Versteeg, H. K. ve Malalasekera, W. (1996). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method*, Üçüncü Basım, Longman Scientific and Technical, London UK.
- [34] Patankar, S.V., Spalding, D.B. (1972). A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *Int. J. Heat Mass Tran.* 15, 1787-1806.
- [35] Schlichting, H. (1979). *Boundary Layer Theory*. McGraw-Hill, New York.
- [36] Clauser, F.H. (1954). Turbulent Boundary Layer in Adverse Pressure Gradients. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 21, 91-108.
- [37] CD-ADAPCO. (2011). *User Guide STAR-CCM+*.
- [38] Cebeci, T., Bradshaw, P. (1977). *Momentum Transfer in Boundary Layers*. Washington, DC, Hemisphere Publishing Corp., New York, McGraw-Hill Book Co.
- [39] Roache, P.J. (1998) *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*, Hermosa Publishers, New Mexico, USA
- [40] Richardson, L.F. (1910). The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam, *Trans. R. Soc. Lond.* 210 (1910) 307-357.
- [41] Celik, I.B., Ghia, U., Roache, P.J., Freitas, C.J., Coleman, H., Raad, P.E. (2008). Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications, *J. Fluids Eng. Trans. ASME* 130, 078001-1-4.
- [42] Granville, P.S. (1958). The frictional resistance and turbulent boundary layer of rough surfaces. *J. Ship Res.* 2, 52-74.
- [43] Hama, F.R. (1954). Boundary layer characteristics for smooth and rough surfaces. *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol. 62, pp. 333-358.