

## Gemi Direncinin Telfer Yöntemi ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile İncelenmesi

Uğur Can <sup>1</sup>, Şakir Bal <sup>2</sup>

ugurcan@yildiz.edu.tr<sup>1</sup>, sbal@itu.edu.tr<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

### ÖZET

Gemi direnci hesaplamalarında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Kullanılan başlıca yöntemler Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) uygulamaları, diğer sayısal yaklaşımlar, deneysel ve istatistiksel yöntemlerdir. Hesaplamalar, geminin farklı hızlarında ve tasarımla ilgili iyileştirmelerin yapılabilmesi için farklı operasyonel şartlarında gerçekleştirilebilir. Dolayısıyla hesaplama yönteminin sistematik ve çok tekrarlı bir biçimde uygulamaya müsait olması istenir. Bundan dolayı, HAD yöntemi yaygın şekilde uygulanmaktadır. HAD yöntemi ile gerçek gemiye ait toplam direncin hesaplanması bilgisayar teknolojilerinin ilerlemesi sayesinde mümkün olabilmektedir. Fakat günümüzde hala HAD ile gerçek gemi toplam direncinin hesaplanması, yüksek hesaplama gücü ve uzun zaman gerektirdiği için yaygın şekilde uygulanmaz. Genellikle model ölçeğinde toplam direnç hesaplamaları gerçekleştirilir ve ardından model ölçeğindeki sonuçlar ekstrapolasyon tekniği ile gemi ölçeğine taşınır. En yaygın olarak kullanılan ekstrapolasyon yöntemleri; International Towing Tank Conference (ITTC) 1957, Hughes-Prohaska ve ITTC 1978' dir. Bu üç yöntemin de ortak özelliği, toplam direnci bileşenlerine ayırmasıdır.

Gemi direnç hesaplamaları için çok önce geliştirilmiş bir başka yöntem ise Telfer GEOSIM (GEOmetrically SIMilar) yöntemidir. Telfer yöntemi ile geometrik ve kısmi dinamik benzerliğe sahip farklı ölçek oranlarındaki model gemiler için toplam direnç katsayıları elde edilir. Bütün modellerin Froude (Fr) sayıları aynı iken Reynolds (Re) sayıları farklıdır ve Reynolds sayısına karşılık, elde edilen toplam direnç katsayıları ile bir eğri oluşturulur. Ardından gerçek gemi direnci basit bir ekstrapolasyon yoluyla elde edilir. Telfer yöntemini diğer yöntemlerden ayıran en önemli özellik, toplam direnci bileşenlerine ayırma işlemi olmaksızın, toplam gemi direncinin hesaplanabiliyor olmasıdır. Gemi direnci için geliştirilen yöntemler arasında Telfer yönteminin daha hassas sonuçlar veren bir yöntem olduğu bilinmektedir. Ancak bu yöntem, farklı ölçeklerde model imalatına ve model deneyleri yapılmasına ihtiyaç duyduğundan deneysel olarak pahalı bir yöntem olmuştur. Bu çalışmada, toplam gemi direncinin, direnci bileşenlerine ayırmaksızın hassas bir şekilde hesaplanabildiği bir yöntemin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Telfer GEOSIM yöntemi HAD yardımıyla uygulanmıştır. Hesaplamalar, gemi hidrodinamiği konusunda kullanılan referans tekne formlarından Duisburg Test Case (DTC) teknesi için yapılmıştır. HAD analizleri başlangıcında, ağdan bağımsızlık çalışması tek bir ölçek için gerçekleştirilmiş ve elde edilen çıktılar, diğer ölçeklere model boyları ile orantılı şekilde uygulanmıştır. Telfer yönteminde model deneylerinin yerini HAD analizleri almıştır. Ardından Telfer yöntemi modifiye edilerek, hassasiyeti artırılmış ve daha efektif bir hale getirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Gemi Direnci, HAD, Telfer GEOSIM, Reynolds Benzerliği, Froude Benzerliği.

**Makale geçmişi:** Geliş 23/05/2019 – Kabul 24/06/2019

## Investigation of Ship Resistance by Telfer's Method and Computational Fluid Dynamics

Uğur Can<sup>1</sup>, Şakir Bal<sup>2</sup>

ugurcan@yildiz.edu.tr<sup>1</sup>, sbal@itu.edu.tr<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Naval Architecture and Maritime, Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey

<sup>2</sup>Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey

### ABSTRACT

There are several methods for ship resistance calculations. Computational Fluid Dynamics (CFD) applications, other numerical methods, experimental and statistical methods are the mainly used methods. Resistance are calculated at different velocities and ship operation conditions to get an optimum hydrodynamic form. Therefore, the ship resistance calculation method should be suitable for a systematic and repetitive application. Due to these reasons, the CFD method is used widely for ship resistance calculations. It has been possible to calculate total resistance for ships with the developing computer technologies. However, calculation of total ship resistance with CFD still requires high calculation capacity and long calculation times. Generally, ship resistance calculations with CFD are performed at model scale. Model resistance is then extrapolated to full ship scale. International Towing Tank Conference (ITTC) 1957, Hughes-Prohaska and ITTC 1978 are the most common extrapolation techniques.

Telfer's GEOSIM (GEOmetrically SIMilar) method developed in the distant past is another technique for ship resistance problems. Total resistance coefficients of hulls are computed at different scale ratios. These models have geometric and kinematic (Froude) similarities. Non-dimensional resistance coefficients are then plotted against Reynolds numbers. After that the ship resistance at full scale is computed by a simple extrapolation technique. Unlike other methods, in the Telfer method, total ship resistance is not separated into its components. It is known that the Telfer method is a very successful method to predict the ship resistance. However, this method is expensive in experimental studies as it requires different scaled models to be produced and multiple model tests. In this study, resistance values have been calculated for a benchmark hull geometry, Duisburg Test Case (DTC) which is commonly used in computational ship hydrodynamics studies. In the beginning of CFD analyses, mesh independence studies were conducted for one single scale and the output was applied to the other scales in proportion with the model lengths. It is aimed to calculate total ship resistance accurately without separating it to its components. CFD computations are made on six different scaled models and total resistance coefficients are obtained for these models. In "Telfer Method" model tests are replaced by CFD analyses. Then the Telfer method is modified to enhance the accuracy.

**Keywords:** Ship Resistance, CFD, Telfer GEOSIM, Reynolds Similarity, Froude Similarity.

**Article history:** Received 23/05/2019 – Accepted 24/06/2019

## Sembol ve Kısaltma Listesi

B	Gemi genişliği
$C_F$	Sürtünme direnci katsayısı
$C_T$	Toplam direnç katsayısı
DTC	Dusiburg Test Case
Fr	Froude sayısı
GEOSIM	GEOmetrically SIMilar
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
ITTC	International Towing Tank Conference
k	Form faktörü
L	Gemi boyu
Re	Reynolds sayısı
T	Gemi draftı
U	Akış hızı
V	Gemi hızı
$\rho$	Akışkanın yoğunluğu
$\mu$	Akışkanın dinamik viskozitesi
$\epsilon$	Türbülans disipasyon oranı
$\Delta t$	Zaman adımı

### 1. Giriş

Bir gemiye ait toplam direnç, gemi henüz inşa edilmeden hassas bir şekilde bilinmelidir. Çünkü, gemi toplam direnci, istenen seyir hızı için gerekli olan ana makine gücü ve yakıt tüketimini doğrudan belirleyen ana faktördür. Ayrıca, gemi toplam direncini daha önceden belirlenmiş olan tasarım kriterleri doğrultusunda asgari seviyede tutmak oldukça önemlidir. Zira bu durum inşa ve işletme maliyetlerinin lüzumsuz bir şekilde artmasına engel olacaktır.

Gemi toplam direnci ve direnç bileşenlerinin hesabı için çeşitli yöntemler mevcuttur. HAD, panel yöntemleri, diğer sayısal teknikler, model deneyleri, ampirik ve istatistiksel yaklaşımlar toplam direncin hesaplanmasında kullanılan belli başlı yöntemlerdir (Çelik, 2014; Yılmaz, 2011; Aydın, 2018). Gemi direnci, dalga direnci ve serbest yüzey deformasyonu üzerine yapılan çalışmalarda, HAD yöntemi ile potansiyel teorinin uyumlu sonuçlar verdiği literatürde yer alan çalışmalarla görülmüştür (Larsson, 2010). Bal (2008)'deki çalışma ile potansiyel teoriye dayanan bir yöntem ile serbest su yüzeyi altında ilerleyen bir cisimden ötürü oluşan serbest yüzey deformasyonu ve dalga direnci incelenmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar, deneysel sonuçlar ile yüksek seviyede uyum göstermektedir. Uslu ve Bal (2008) yaptıkları çalışmada serbest yüzey etkisi altında olan iki ve üç boyutlu cisimler için potansiyel teori temelli bir yöntem ile dalga direnci hesaplamaları gerçekleştirmişler ve serbest yüzey deformasyonlarını incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar yöntemin başarılı olduğunu göstermiştir. Kınacı ve diğ. (2016) HAD yöntemi ile dalga direncinin incelendikleri bir çalışma gerçekleştirmişlerdir ve bu çalışmada elde edilen sonuçların potansiyel teori ile de uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Doğrul (2015) ise doktora tez çalışmasında, serbest yüzey deformasyonunu sınır elemanları ve HAD yöntemleriyle incelemiş ve sonuçların uyumunu göstermiştir. Holtrop (1984) çalışmasında ise istatistiksel bir direnç hesaplama yöntemi sunulmuştur.

Telfer 1920'lerde toplam direnç üzerinden bir ekstrapolasyon yöntemi önermiştir (Telfer, 1927, 1928, 1951). Bu yöntem, geometrik benzer kelimelerinin kısaltması olan « GEOSIM » ismiyle anılmaktadır. Bu yöntemin diğer yöntemlere göre iki avantajı mevcuttur. Bunlar; toplam direncin bileşenlerine ayrılmaksızın ekstrapole edilmesi ve Froude sayısı eşitliğinin sağlanmasının yanı sıra toplam direncin

Reynolds sayısının bir fonksiyonu şeklinde hesaplanmasıdır. Bu şekilde tam dinamik benzerliğin gerekliliği olan; Froude sayısı ve Reynolds sayısı benzerliği sağlanmamış olsa bile model ve gemi için Froude sayısı benzerliği sağlanır, ek olarak toplam direnç Reynolds sayısına bağımlı hale getirilir. Bu yaklaşım, yalnızca Froude benzerliğinin sağlandığı yöntemlere göre daha doğru bir yaklaşımdır (Molland, 2007). Ancak yöntemin handikapı, farklı ölçeklerdeki modeller için direnç sonuçlarının kullanılması ile uygulanabilen bir yöntem olmasıdır. Bu durum, tek bir modele ait direnç sonuçları ile ekstrapolasyon yapılabilen yöntemler olan Froude, Houghes ve ITTC yöntemlerine göre Telfer'in önerdiği yöntemi hem deneysel hem de sayısal uygulamalarda daha zahmetli ve masraflı bir hale getirmektedir. Yapılan yüksek lisans tezinde (Can, 2019) farklı akış koşulları için Telfer yöntemi incelenmiş ve revize edilerek daha efektif bir hale getirilmesi amaçlanmıştır.

Konuyla ilgili geçmişte yapılan deneysel çalışmalar da mevcuttur. Örneğin bu çalışma için seçilen Duisburg Test Case (DTC) teknesi ile yapılan ilk deneysel çalışma (Moctar ve diğ., 2012)' da verilmiştir. Bu çalışmada, DTC teknesi 59.4 ölçeğinde için çıplak tekne formu ve hareketsiz gemi durumunda direnç testleri gerçekleştirilmiştir. Burada toplam direnç katsayıları  $Fr = [0.174-0.218]$  aralığında altı farklı değer için verilmiştir. Ayrıca 59.4 ölçeği için form faktörü  $k=0.094$  olduğu belirtilmiştir. DTC için ek direnç hesaplamaları yapılan diğer çalışmada (Moctar ve diğ., 2016) 59.4 ölçeği ile deneysel ve sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Sayısal sonuçlar RANS yöntemi ile elde edilmiş ve hareketsiz durum için toplam direnç katsayıları  $Fr = [0.14-0.218]$  aralığında altı farklı  $Fr$  sayısı için 1.28% - 4.12% mutlak bağıl hata aralığında bulunmuştur. Literatürde DTC teknesi için 63.65 ölçeği ile kapsamlı bir çalışma da mevcuttur. Shigunov ve diğ. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışma ile manevra karakteristikleri ve dalga kaynaklı direnç için deneysel ve sayısal sonuçlar sunulmuştur. Çalışma kapsamında DTC teknesi için 5-25 knot aralığında durgun su toplam direnç katsayıları paylaşılmıştır. Burada Moctar'ın 59.4 ölçeğinde gerçekleştirdiği deneysel çalışmadan farklı olarak dümen ve yalpa omurgası mevcuttur. Ayrıca DTC teknesi için düşük Froude sayılarında sayısal bir çalışma ile ek direnç hesaplamaları yapılmıştır (Sigmund ve el Moctar, 2017). Bu çalışmada sakin su direnç hesaplamaları iki farklı Froude sayısı için gerçekleştirilmiş ve Froude sayısının düşüşü ile sayısal sonuçların deneysel sonuçlardan uzaklaştığı, bağıl hatanın arttığı görülmüştür. Sigmund,  $Fr=0.14$ 'te deney sonuçlarına 0.45%'lik bir bağıl hata ile yaklaşırken  $Fr=0.05$  için bağıl hata 3.02% değerine yükselmiştir.

Bu çalışmada, toplam direnci bileşenlerine ayırmaksızın gerçek (tam ölçekte) gemi direncinin hesaplanabildiği Telfer'in GEOSIM yönteminin, HAD analizleri yardımıyla incelenmesi amaçlanmıştır. Daha sonra, Telfer yöntemi modifiye edilerek ve gemi toplam direncinin, farklı ölçeklerdeki toplam direnç değerleri esas alınarak, gerçek gemi toplam direncinin hassas bir şekilde hesaplanabileceği pratik bir yöntem önerilmiştir. Gemi direnci konusunda yaygın şekilde kabul gören ve uygulanan ekstrapolasyon yöntemleri temelde iki yönetime dayanmaktadır (Molland, 2007). Froude, model deneyi ile elde edilen direnç sonucunu gemi ölçeğine taşımak için bir yöntem önermiştir (Froude, 1872, 1874). Bu yöntemde, aynı Froude sayısında, model ile gemi artık direnç katsayılarının eşit olduğu kabulüne dayanır. Ancak, artık direnç katsayıları Reynolds sayısına da bağlıdır. Daha sonra, Hughes model ve gemi arasındaki geçiş için artık direnç yerine, dalga direnci benzerliğini önermiştir (Hughes, 1954). Bu şekilde, aynı Froude sayısındaki model ve gemi için dalga direnci katsayıları eşit kabul edilmiştir. Bu şekilde nispeten daha doğru bir kabul yapılmıştır. ITTC 1978'te Hughes yöntemine hava direnci eklenerek teknik modifiye edilmiştir (ITTC, 2017). Günümüzde hala yaygın şekilde kullanılan ve modelden gemiye ekstrapolasyon ile geçişi sağlayan yöntemler bu esas üzerinden gerçekleştirilir.

Telfer ise toplam direnç üzerinden bir ekstrapolasyon yöntemi önermiştir (Telfer, 1927, 1928, 1951). Bu yöntem, Telfer' in GEOSIM (GEOmetrically SIMilar) yöntemi ismiyle de anılmaktadır. Bu yöntemin diğer yöntemlere göre iki önemli avantajı mevcuttur. Bunlar, toplam direnci bileşenlerine ayırmaksızın tam ölçek değerine ekstrapole edilebilmesi ve Froude sayısı eşitliğinin sağlanmasının yanı sıra toplam

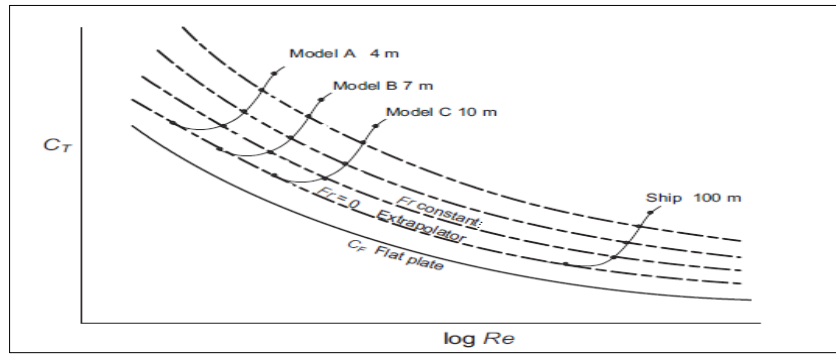
direncin Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak da hesaplanmasıdır. Bu şekilde tam dinamik benzerliğin gerekliliği olan, Froude sayısı ve Reynolds sayısı benzerliği tam olarak sağlanmamış olsa bile, model-gemi geçişi için çok önemli bir yaklaşım yapılmış olur. Bu yaklaşım, yalnızca Froude benzerliğinin sağlandığı diğer yöntemlere göre daha doğru bir yaklaşımdır (Molland, 2007). Ancak yöntem, farklı ölçeklerdeki (en az iki adet) modeller için direnç sonuçlarının bilinmesini gerektirir. Günümüzde çok gelişmiş HAD uygulamaları ile bu sorun çok büyük oranda aşılmıştır.

## 2. Telfer'in GEOSIM Yöntemi

Dinamik benzerliğin sağlanması şartıyla sabit bir Froude sayısı için aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$C_T = f_1(Re) + f_2(Fr) \quad (1)$$

Telfer, Denklem 1'e göre toplam direnç katsayısının tespiti amacıyla aynı tekne formunun farklı ölçek oranları ile sabit Fr sayılarında bir dizi model deneyi gerçekleştirmiştir. Aynı forma sahip farklı ölçeklerdeki modeller için geometrik benzer (Geometrically Similar-GEOSIM) seri üretmiştir. GEOSIM serileri ile yaptığı deneylerden elde ettiği toplam direnç katsayılarına karşılık ilgili Re sayıları ile elde ettiği sonuçlardan direnç eğrilerini çizmiştir. GEOSIM serileri ile elde edilmiş direnç eğrileri için bir örnek Şekil 1'de mevcuttur.



Şekil 1. Telfer'in GEOSIM yöntemi ile direnç tahmini (Molland, 2007).

Elde edilen direnç eğrileri ile geminin (tam ölçekli) Re sayısına karşılık gelen toplam direnç katsayısı ekstrapolasyon yolu ile hesaplanır. Eğriler  $\log Re^{-1/3}$  tabanına karşılık direnç katsayılarının Denklem 2'ye yerleştirilmesi ile oluşturulur ve aynı eğri üzerinde geminin Re sayısına karşılık toplam direnç katsayısı bulunur (Bertram, 2012).

$$\frac{a}{(\log R e)^{1/3}} + b = C_T \quad (2)$$

### 2.1 Modifiye edilmiş Telfer yöntemi

Telfer direnç eğrileri, aşağıda verildiği gibi gözönüne alınırsa,

$$\frac{a}{(\log R e)^x} + b = C_T \quad (3)$$

Burada, x yeni bir bilinmeyen olarak denkleme ilave edilmiş olur. Model ölçeğinde elde edilen toplam direnç katsayıları genel denklemde yerine yerleştirilir ve a, b, x katsayıları rahatlıkla bulunur. Böylece herhangi bir Re değerine karşılık direnç eğrisi çizilir. Elde edilen direnç eğrisi ile gerçek gemi toplam direnç katsayısı ekstrapolasyon yolu ile bulunur.

### 3. Matematiksel Model

Bu çalışmada, gemi etrafındaki su akışı sıkıştırılamaz akış olarak kabul edilmektedir. Zamana bağlı, üç boyutlu ve sıkıştırılamaz akış için hidrodinamik akışı açıklayan yönetici denklemler kütle korunumu ve momentum denklemleridir.

Süreklilik denklemi Denklem 4'teki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

Momentumun korunumu denklemi ise Denklem 5'deki gibi ifade edilebilir.

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j} \right) \quad (5)$$

Çalışmada türbülans etkilerini hesaplama sürecine dahil etmek üzere gerçekleştirilebilir (realizable)  $k-\varepsilon$  türbülans modeli tercih edilmiştir.  $k-\varepsilon$  türbülans modeli iki denklemlidir. Bu denklemlerden türbülans kinetik enerji taşınım denklemi Denklem 6'da, türbülans dağılım oranı taşınım denklemi Denklem 7'de verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \bar{v}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho (\varepsilon - \varepsilon_0) + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \bar{v}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{1}{T_\varepsilon} C_{\varepsilon 1} P_\varepsilon - C_{\varepsilon 2} f_2 \rho \left( \frac{\varepsilon}{T_e} - \frac{\varepsilon_0}{T_0} \right) + S_\varepsilon \quad (7)$$

Bu çalışmada kullanılan türbülans modeli olan gerçekleştirilebilir  $k-\varepsilon$  türbülans modeli ile ilgili daha detaylı açıklamalar (Wilcox, 1993)'de mevcuttur.

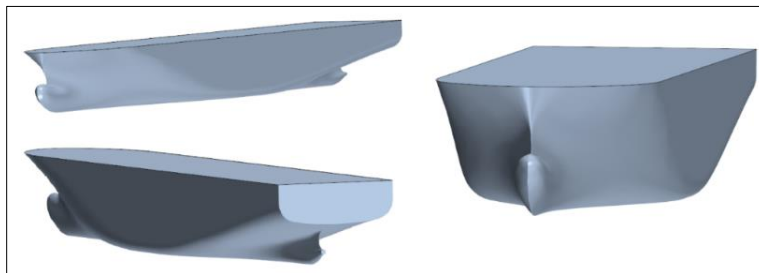
### 4. Sayısal Çözüm

Bu çalışmada literatürde geniş bir sonuç yelpazesi bulunan DTC model seçilmiştir. DTC teknesinin farklı ölçeklerine ait modellerin toplam direnç katsayıları HAD ile hesaplanmıştır. HAD hesaplamaları yaygın olarak kullanılan ticari bir kod olan Star CCM+ ile gerçekleştirilmiştir. Söz konusu kod, yönetici denklem ayrıklaştırması için sonlu hacimler yöntemini kullanmaktadır.

HAD çözümlerinde akış zamana bağlı ve sıkıştırılamaz kabul edilmiştir. Türbülans modeli olarak  $k-\varepsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır.  $y^+$  değeri 30-300 arasında tutulmuştur.

#### 4.1 Tekne geometrisi ve hesaplama hacminin oluşturulması

DTC teknesinin üç boyutlu CAD geometrisi Şekil 2'de mevcuttur.



Şekil 2. DTC tekne formu üç boyutlu CAD geometrisi.

DTC teknesi ve her bir ölçek faktöründeki modeller için ana boyutlar ve katsayılar Tablo 1’de verilmiştir. Farklı ölçeklerdeki her bir model sırasıyla isimlendirilmiş ve sonraki bölümlerde model isimleriyle kullanılmıştır.

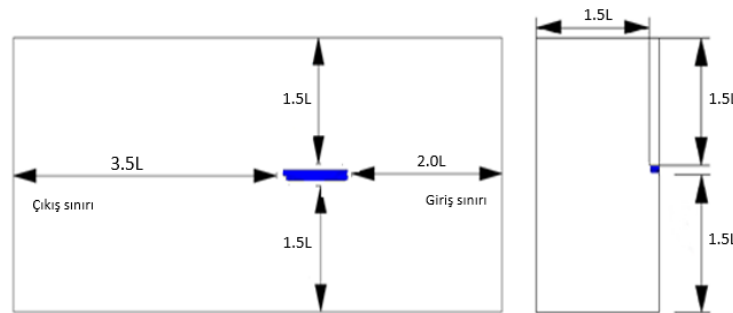
**Tablo 1.** DTC teknesi ve DTC teknesi için oluşturulan modellerin ana boyutları.

Ölçek İsmi	DTC Ana Boyutlar						
	Tam Ölçek	Ölçek-1	Ölçek-2	Ölçek-3	Ölçek-4	Ölçek-5	Ölçek-6
<b>Benzerlik oranı (<math>\lambda</math>)</b>	1	75.8	67.63	63.65	59.4	40	20
<b>Dikmeler arası boy (<math>L_{BP}</math>) [m]</b>	355	4.683	5.251	5.577	5.976	8.875	17.75
<b>Genişlik (B) [m]</b>	51	0.673	0.754	0.801	0.859	1.275	2.55
<b>Draft (T) [m]</b>	14.5	0.191	0.214	0.228	0.244	0.3625	0.725
<b>Islak alan (S) [m<sup>2</sup>]</b>	22032	3.834	4.82	5.438	6.243	13.77	55.08
<b>Deplasman hacmi (<math>\nabla</math>) [m<sup>3</sup>]</b>	173467	0.398	0.561	0.673	0.827	2.71	21.683
<b>Blok katsayısı (<math>C_B</math>)</b>	0.661	0.661	0.661	0.661	0.661	0.661	0.661

Ana boyutları Tablo 1’de olan DTC teknesine ait modellerin her birisi için ayrı birer akış hacmi oluşturulmuştur. Gemi direnci hesaplamalarında yapılan HAD analizleri için ITTC tarafından bir standardizasyon geliştirilmiş ve hesaplama hacmi boyutları için genel bir tarif verilmiştir (ITTC, 2011). ITTC standardizasyonu ile Özdemir ve diğ. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışma gözetilerek hesaplama hacimleri oluşturulmuştur. Hesaplama hacmi boyutlarının ölçek boyutlarına oranı bütün modeller için korunmuştur. Hesaplama hacmi ana boyutları, ölçek boylarına göre Tablo 2’de mevcuttur. Hesaplama hacimlerinin şematik görünüşü ise genelleştirilmiş biçimde Şekil 3’te verilmiştir.

**Tablo 2.** Hesaplama hacimlerinin ölçek boyuna göre oranları.

Referans	Referansa göre mesafe
Model gemi önünde	2.0 $L_{BP}$
Model gemi arkasında	3.5 $L_{BP}$
Model gemi üstünde	1.5 $L_{BP}$
Model gemi yanında	1.5 $L_{BP}$
Model gemi altında	1.5 $L_{BP}$

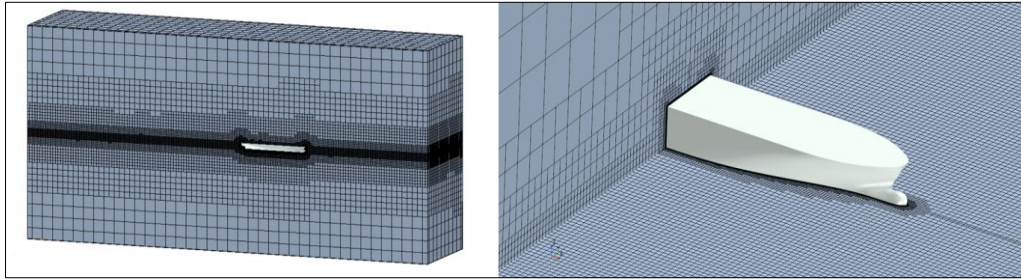


**Şekil 3.** Model tekneler için oluşturulan hesaplama hacminin şematik görünüşü.

#### 4.2 Ağ yapısının oluşturulması

Yeterli doğrulukta sonuçları verecek ve hesaplama süresini gereksiz şekilde arttırmayacak optimum çözünürlükte bir ağ örgüsü yapısının belirlenebilmesi için ağdan bağımsızlık çalışması gerçekleştirilmiştir. Ağdan bağımsızlık çalışması seyrek, orta ve sık olmak üzere üç farklı ağ yapısı için gerçekleştirilmiştir. Her bir ağ yapısı oluşturulurken trimmer algoritması kullanılmış ve ağ örgülerinin

tamamı düzgün altı yüzlü (hexahedral) elemanlar ile oluşturulmuştur. Ağ yapıları, tekne su altı formunu içine alacak biçimde bir alt kontrol hacmi ile baş ve kıç bölgesinde farklı alt kontrol hacimlerinde sıklaştırılmıştır. Ayrıca, serbest yüzey modellemesinin hassas biçimde yapılabilmesi için bu bölgede de sıklaşan bir ağ yapısı kullanılmıştır. Tekne üzerindeki sınır tabakanın doğru yakalanabilmesi için kaymama şartının geçerli olduğu duvar yüzeyler üzerinde gerekli  $y^+$  şartını sağlayacak ( $30 < y^+ < 300$ ) biçimde düzgün yapıya sahip prizmatik elemanlardan oluşan katmanlar kullanılmıştır. Hesaplama hacminde ve tekne üzerinde alınmış olan kesitlerde ağ yapısının görünüşü Şekil 4'te mevcuttur.



**Şekil 4.** Hesaplama hacmi ve tekne üzerinde alınmış olan kesitlerde ağ yapısının görünüşü.

#### 4.3 Ağdan bağımsızlık çalışması

Ağdan bağımsızlık çalışmasında, yalnızca uzaysal ayrıklaştırmadan kaynaklı hatalar incelenmiştir. Courant sayısı (CFL), HAD analizlerinde seçilen zaman adımına karşılık kat edilen hücre sayısını ifade eden boyutsuz bir sayıdır. Courant sayısı, bütün hücreler için ayrı ayrı hesaplanır ve nümerik stabilitenin bozulmaması için;  $CFL \leq 1$  şartının sağlanması istenir (Tezdoğan ve diğ., 2015). Courant sayısının 1'den küçük olması durumu açık (explicit) şemalarda nümerik olarak bir zorunluluktur. Ancak kapalı (implicit) ayrıklaştırma şemalarında bu zorunluluk bulunmamaktadır. Bu çalışmada kapalı ayrıklaştırma şeması kullanılmıştır. ITTC, gemi hidrodinamiğinde HAD hesaplamaları ile ilgili olarak zaman ayrıklaştırması ve zaman adımının belirlenmesi konusunda gemi boyu ve hızına bağlı bir formülasyon önermektedir (ITTC, 2011):

$$\Delta t = 0.005 \sim 0.01 L / U \quad (8)$$

Zaman adımı ITTC önerdiği formülasyon (Denklem 8) ile hesaplanmıştır. Uzaysal ayrıklaştırma hatasının incelenmesi için analizlerde üç farklı sıklıkta ağ yapısı ile çalışılmıştır ve sıklaştırma oranı için yaklaşık olarak  $\sqrt{2}$  kullanılmıştır. Sıklaştırmalar tekne üzerinde, sınır tabakada ve alt kontrol hacimlerinde yani akışı majör şekilde etkileyen bölgelerde yapılmıştır. Üç ağ yapısı için elde edilen sonuçlar Tablo 3'te yer almaktadır.

**Tablo 3.** Fr=0.192'de DTC ağdan bağımsızlık çalışması sonuçları.

DTC ağdan bağımsızlık çalışması sonuçları - Fr=0.192					
Ağ Yapısı	Eleman Sayısı ( $\times 10^6$ )	Ortalama $y^+$	$C_T \times 10^3$ (HAD)	$C^T \times 10^3$ (Deney)	% Mutlak Bağıl Hata
1-Seyrek	0.748	84.08	3.749	3.588	4.49%
2- Orta	1.030	41.56	3.615	3.588	0.77%
3- Sık	1.403	30.02	3.570	3.588	0.51%

Uzaysal ayrıklaştırmadan ileri gelen belirsizliğin tahmini için Grid Convergence Index (GCI), ağ yakınsaklık kriteri kullanılmıştır ve hesabı için Amerikan Makine Mühendisleri Odası (ASME) ve ITTC

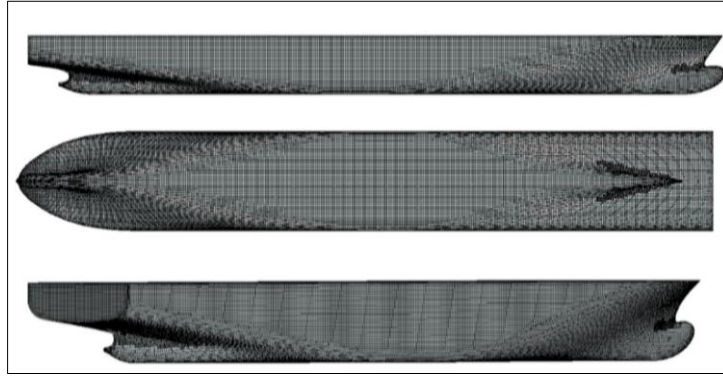


tarafından önerilen işlem basamakları takip edilmiştir, (Çelik ve diğ., 2008). Ağ yakınsama kriterleri ve GCI değeri Tablo 4'te mevcuttur.

**Tablo 4.** Analiz seti için hesaplanan yakınsama kriterleri ve GCI değeri.

Hesaplanan Parametreler	Değerler
$\Phi_1$	$3.749 \times 10^{-3}$
$\Phi_2$	$3.615 \times 10^{-3}$
$\Phi_3$	$3.570 \times 10^{-3}$
$R_G$	0.34
$\Phi_{ext}$	$3.546 \times 10^{-3}$
$GCI_{sık}$	0.84%

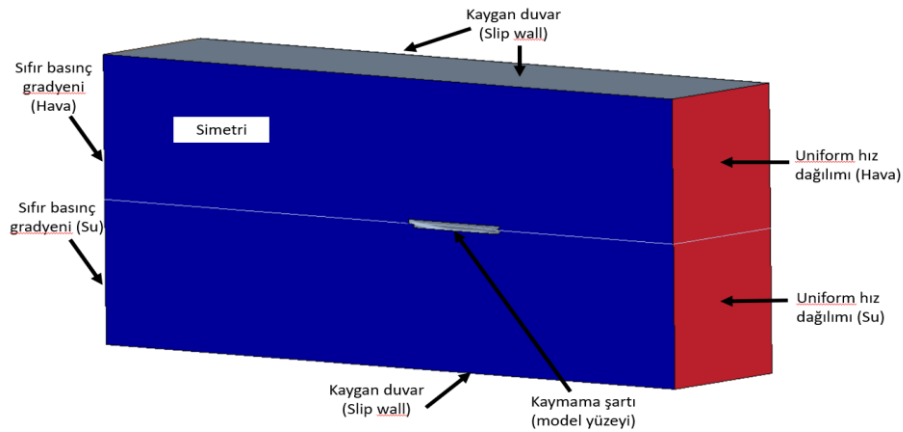
Yapılan ağdan bağımsızlık çalışmasına göre ağ yapısı seti yakınsamıştır ( $R_G=0.34$ ). Ayrıca GCI değeri 0.84% olarak hesaplanmıştır. Ağdan bağımsızlık çalışması sonucunda orta sıklıktaki ağ yapısı seçilmiştir. Bu ağ yapısının tekne üzerindeki görünüşü Şekil 5'te mevcuttur. Her ölçekte model boyu değiştiğinden ağ yapısı da değişecektir, fakat orta sıklıktaki ağ yapısı için alt kontrol hacim boyutları ve yapılan sıklaştırma oranları her bir modelde korunmuştur.



**Şekil 5.** Ağdan bağımsızlık çalışmasına göre seçilen ağ yapısının tekne üzerindeki görüntüsü.

#### 4.4 Sınır şartları

Hesaplama hacminde uygulanan sınır şartları Şekil 6'da verilmiştir. Giriş kesitinde sınır şartı olarak uniform hız dağılımı uygulanmıştır. Çıkış kesitinde basınç gradyeni sıfırdır.



**Şekil 6.** Hesaplama hacminde uygulanan sınır şartları.

Tekne yüzeyinde kaymama şartı (no-slip wall) geçerlidir. Üst, alt ve yan duvar yüzeylerinde, sürtünmesiz kaygan duvar (slip wall) sınır şartı tanımlanmıştır. Teknenin merkez hattından geçen kesit ve bu yüzeyde simetri şartı uygulanmıştır.

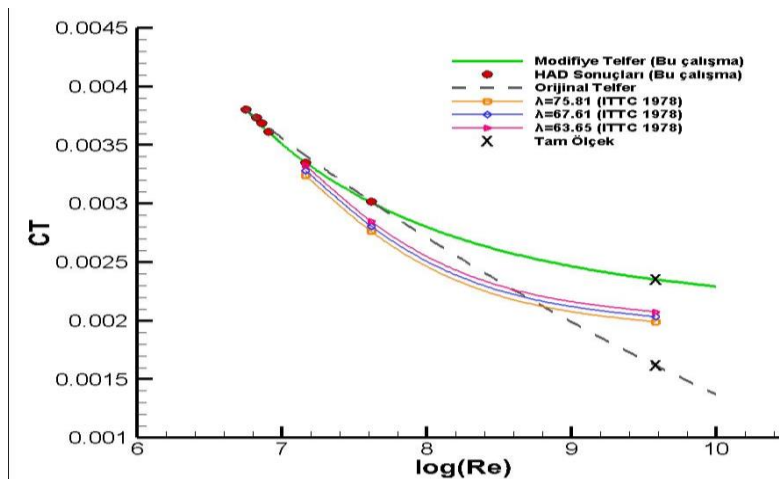
## 5. Sayısal Sonuçlar

Öncelikle, HAD sonuçları iki ölçekte deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır. Deneysel sonuçların mevcut olmadığı ölçeklerde ise HAD ile elde edilen sürtünme direnç katsayısı ITTC ile kıyaslanmıştır. HAD analizleri  $Fr=0.192$  için yapılmıştır. Ölçek-3 (1/63.65) deneysel çalışması, yalpa omurgası ve dümen ile takıntılı tekne formu için gerçekleştirilmiştir (Shigunov ve diğ., 2018). Bu yüzden mutlak bağıl hatanın Ölçek-4'e (1/59.4) göre daha yüksek seviyelerde olması beklenmiş ve sonuçlar beklenen şekilde ortaya çıkmıştır. Hesaplamalardan elde edilen sonuçlar Tablo 5'te mevcuttur.

**Tablo 5.** HAD, deneysel ve ampirik direnç katsayıları.

Toplam Direnç ve Sürtünme Direnci Katsayıları – $Fr=0.192$							
Ölçek İsmi	V [m/s]	$C_T$ - HAD	$C_T$ - Deneysel	% Bağıl Hata $C_T$	$C_F$ - HAD	$C_F$ - ITTC-57	% Bağıl Hata $C_F$
Ölçek-1	1.3014	$3.802 \times 10^{-3}$	-	-	$3.225 \times 10^{-3}$	$3.328 \times 10^{-3}$	3.09%
Ölçek-2	1.3780	$3.734 \times 10^{-3}$	-	-	$3.163 \times 10^{-3}$	$3.225 \times 10^{-3}$	1.95%
Ölçek-3	1.4202	$3.719 \times 10^{-3}$	$3.542 \times 10^{-3}$	5.00%	$3.120 \times 10^{-3}$	$3.174 \times 10^{-3}$	1.70%
Ölçek-4	1.4690	$3.615 \times 10^{-3}$	$3.588 \times 10^{-3}$	0.77%	$3.086 \times 10^{-3}$	$3.116 \times 10^{-3}$	0.95%
Ölçek-5	1.7915	$3.350 \times 10^{-3}$	-	-	$2.843 \times 10^{-3}$	$2.813 \times 10^{-3}$	1.07%
Ölçek-6	2.5336	$3.019 \times 10^{-3}$	-	-	$2.478 \times 10^{-3}$	$2.378 \times 10^{-3}$	4.19%
Gemi	11.3218	-	-	-	-	$1.305 \times 10^{-3}$	-

HAD hesaplamaları ile elde edilen toplam direnç katsayısı sonuçlarına göre Ölçek-4 için deneysel sonuçlar ile 0.77%'lik bir bağıl hata mevcuttur. Bağıl hata Ölçek-3 için 5.00% seviyesindedir. Bunun sebebi Ölçek-3 için deneysel çalışmanın takıntılı tekne formu için gerçekleştirilmiş olmasıdır. Sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu ve yine sürtünme direnci katsayılarının ise ITTC sonuçları ile uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir.



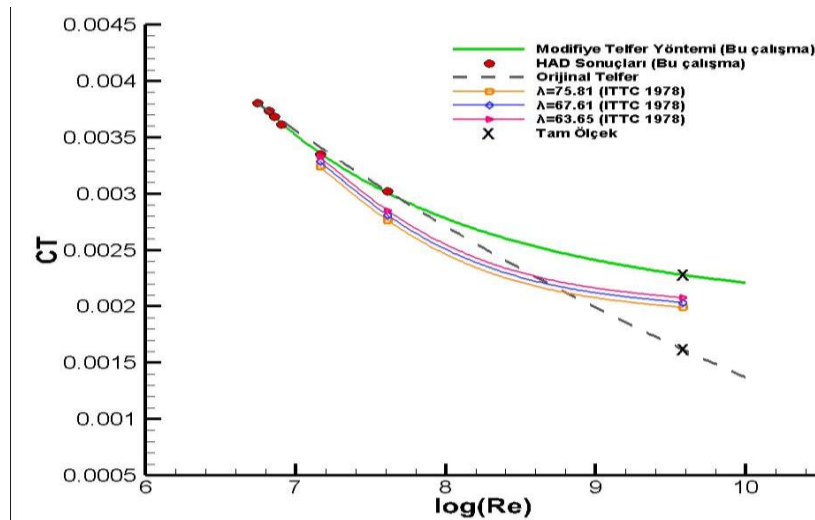
**Şekil 7.** Ölçek-1,4,5 kullanılarak çizilen modifiye Telfer direnç eğrisi ve diğer yöntemlere ait sonuçlar.

Şekil 7’de Ölçek-1,4,5 kullanılarak uygulanan modifiye Telfer yönteminden elde edilen direnç eğrisi ve diğer ekstrapolasyon yöntemlerine ait sonuçlar, Tablo 6’da ise yöntem sonuçları ve bağıl farkları yer almaktadır. BF1, BF2 ve BF3 kısaltmaları sırasıyla modifiye Telfer, orijinal Telfer ve ITTC 1978 yöntemlerinin elde ettiği sonuçların HAD sonuçlarına göre bağıl farklarını temsil etmektedir.

**Tablo 6.** Ekstrapolasyon yöntemleri ile hesaplanan sonuçlar ve HAD sonuçları ile kıyaslama.

HAD ve Ekstrapolasyon Sonuçları - Fr=0.192							
Ölçek	$C_T \cdot 10^3$ (HAD)	$C_T \cdot 10^3$ (Md.Telfer)	% BF1	$C_T \cdot 10^3$ (Or. Telfer)	% BF2	$C_T \cdot 10^3$ ITTC	% BF3
Ölçek-1	3.802	3.804	0.05%	3.802	0.00%	-	-
Ölçek-2	3.734	3.710	0.65%	3.729	0.14%	-	-
Ölçek-3	3.719	3.663	1.50%	3.692	0.74%	-	-
Ölçek-4	3.615	3.612	0.10%	3.649	0.93%	-	-
Ölçek-5	3.350	3.351	0.02%	3.411	1.80%	3.234	0.78%
Ölçek-6	3.019	3.009	0.35%	3.019	0.00%	2.849	5.63%
Gemi	-	2.351	-	1.618	-	2.075	-

Şekil 8’de Ölçek-1,2,3,4,5 kullanılarak uygulanan modifiye Telfer yönteminden elde edilen direnç eğrisi ve diğer ekstrapolasyon yöntemlerine ait sonuçlar, Tablo 7’de ise yöntem sonuçları ve bağıl farkları yer almaktadır. BF1, BF2 ve BF3 kısaltmaları sırasıyla modifiye Telfer, orijinal Telfer ve ITTC 1978 yöntemlerinin elde ettiği sonuçların HAD sonuçlarına göre bağıl farklarını temsil etmektedir.



**Şekil 8.** Ölçek-1,2,3,4,5 kullanılarak çizilen modifiye Telfer direnç eğrisi ve diğer yöntemlere ait sonuçlar.

**Tablo 7.** Ekstrapolasyon yöntemleri ile hesaplanan sonuçlar ve HAD sonuçları ile kıyaslama.

HAD ve Ekstrapolasyon Sonuçları - Fr=0.192							
Ölçek	$C_T \cdot 10^3$ (HAD)	$C_T \cdot 10^3$ (Md.Telfer)	% BH1	$C_T \cdot 10^3$ (Or. Telfer)	% BH2	$C_T \cdot 10^3$ ITTC	% BH3
Ölçek-1	3.802	3.815	0.35%	3.802	0.00%	-	-
Ölçek-2	3.734	3.722	0.33%	3.729	0.14%	-	-
Ölçek-3	3.719	3.675	1.18%	3.692	0.74%	-	-
Ölçek-4	3.615	3.624	0.23%	3.649	0.93%	-	-
Ölçek-5	3.350	3.359	0.26%	3.411	1.80%	3.234	0.78%
Ölçek-6	3.019	3.004	0.51%	3.019	0.00%	2.849	5.63%
Gemi	-	2.279	-	1.618	-	2.075	-

• Ölçek-1,4,5 ile gerçekleştirilen uygulamadan elde edilen modifiye Telfer direnç eğrisi, Ölçek-6 HAD sonucunu %0.35 bağıl fark ile tahmin etmiştir. Yöntem ile elde edilen sonuçlar, model ölçeğinde HAD sonuçları ile gemi ölçeğinde ise ITTC sonuçları ile orijinal Telfer yöntemine göre daha iyi bir uyum içerisindedir. Bu uygulama göstermiştir ki ölçekler arası mesafenin fazla ve Re sayısı aralığının geniş seçilmesi, yöntemin daha düşük Re sayısı aralıklı uygulamalarına göre (Ölçek-1,2,3 – Ölçek-1,2,4 – Ölçek-1,3,4) model ölçeğinde HAD sonuçları ile gemi ölçeğinde ise ITTC sonuçları ile daha uyumlu sonuçlar vermektedir (Can,2019).

• Ölçek-1,2,3,4,5 ile gerçekleştirilen uygulamaya göre elde edilen modifiye Telfer direnç eğrisi Ölçek-6 HAD sonucunu %0.51 bağıl fark ile tahmin etmiştir. Modifiye Telfer yöntemi, model ölçeğinde HAD sonuçları ile gemi ölçeğinde ise ITTC sonuçları ile orijinal Telfer yöntemine göre daha iyi bir uyum içerisindedir. Gemi ölçeğinde ITTC sonuçları ile yakınlık bağıl fark cinsinden %10' un altındadır. Ayrıca beş ölçekli sonuçlar, yöntemin üç ölçekli ve altı ölçekli uygulamalarıyla birlikte değerlendirildiğinde modifiye Telfer yönteminde kullanılan ölçek sayısını arttırmanın direnç eğrisini fiziksel karakterine yaklaştırdığı söylenebilir (Can,2019). Öte yandan bu uygulamada elde edilen sonuçlar üç ölçekli uygulama ile benzerlik göstermektedir. Dolayısıyla, modifiye Telfer yönteminin üç ölçekli uygulamalarının, Re sayısı aralığının geniş seçilmesi şartı ile yeterli hassasiyette direnç ekstrapolasyonu tahmini yapabileceği söylenebilir.

## 6. Değerlendirme ve Tartışma

Bu çalışmada toplam direnci bileşenlerine ayırmaksızın, model ölçeğindeki sonuçları ekstrapolasyon ile gemi ölçeğine taşıyabilen bir yöntem araştırılmıştır. Bu amaçla Telfer GEOSIM yöntemi ele alınmış ve modifiye edilmiştir. HAD ile elde edilen direnç katsayıları ile modifiye Telfer yöntemi uygulanmış ve direnç eğrileri  $\log(Re)$  tabanında çizilmiştir. Bu sayede herhangi bir Re sayısına karşılık toplam direnç katsayısını hesaplayabilmek ve farklı ölçeklerdeki modellere ait direnç katsayılarını gemi ölçeğine ekstrapole edebilmek mümkün olmuştur. ITTC 1978 yönteminden elde edilen sonuçlar kıyaslama yapmak için kullanılmıştır.

Modifiye Telfer yöntemi iki farklı şekilde uygulanmıştır ve her iki uygulamada da model boyu ve Re sayısı en yüksek olan Ölçek-6 (1/20) HAD sonucu, genel denklem çözümüne katılmamıştır. Bunun sebebi, tam ölçeğe yaklaşıldıkça yöntemin başarısının anlaşılabilmesi ve doğrulama yapılabilmesidir. Buna göre, üç ölçekli ve beş ölçekli uygulamalarda modifiye Telfer yöntemi ile direnç eğrileri çizilmiş ve sonuçlar Ölçek-6 HAD sonucu ile kıyaslanmıştır.

Buna göre, modifiye Telfer yöntemi, Telfer GEOSIM yöntemine göre model ölçeğinde HAD ile gemi ölçeğinde ise ITTC ile daha uyumlu sonuçlar vermiştir. Modifiye Telfer yöntemi hızlı bir şekilde toplam gemi direncini bileşenlerine ayırmadan istenen gemi ölçeğinde toplam direncin hesaplanmasına imkan tanıyan başarılı bir uygulama olmuştur. Yöntemin daha dolgun ve ayrıca yüksek süratli tekne uygulamalarındaki öngörü kabiliyeti bundan sonraki çalışmanın konusudur.

## 7. Teşekkür

Bu çalışma, unutulmuş bir değer için tekrar hatırlanması amacıyla, 1946-1951 yılları arasında İ.T.Ü. Makina Fakültesi Gemi İnşaatı Kurucu Kürsü Başkanlığı görevini yapan (Baykal,2015) ve ülkemizdeki ilk gemi inşaatı profesörü ünvanına sahip (RINA, 1977; Walker, 2010) Prof. E.V. Telfer' in aziz hatırasına adanmıştır.

## 8. Kaynaklar

Aydın, M. (2018). Gemi Direnci ve Sevki-111 Çözümlü Problem. İstanbul: TMMOB Gemi Mühendisleri Odası Yayını.

Bal, Ş. (2008). Prediction of Wave Pattern and Wave Resistance of Surface Piercing Bodies by a Boundary Element Method. International Journal for Numerical Methods in Fluids. Vol. 56, Issue 3, pp: 305-329.

Baykal, R. (2015). Gemi İnşaatı ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Tarihi. İstanbul: İTÜ Vakfı Yayınları.

Bertram, V. (2012). Practical Ship Hydrodynamics. Butterworth Heinemann.

Can, U. (2019). Gemi toplam direncinin Telfer ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile hesaplanması. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Çelik, F. (2014). Gemi Direnci ve Sevki Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi.

Çelik, İ.B., Ghia, U., Roache, P.J., Freitas, C.J., Coleman, H. ve Raad P.E. (2008). Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. J. Fluids Eng. 130, 078001.

Doğrul, A. (2015). Gemi direnci ve serbest yüzey deformasyonlarının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi. (Doktora tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Froude, W. (1872). Experiments on the surface-friction experienced by a plane moving through water, 42nd Report of the British Association for the Advancement of Science, Brighton.

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 of the British Association for the Advancement of Science, Belfast.

Holtrop, J. (1984). A statistical re-analysis of resistance and propulsion data. International Shipbuilding Progress. Vol. 31.

ITTC. (2002). Recommended Procedures Method 7.5-02-02-02: Resistance, Uncertainty Analysis, Example for Resistance Test. 23rd Int. Towing Tank Conf.

ITTC. (2011). - Recommended Procedures and Guidelines 7.5-03-02-03. Practical Guidelines for Ship CFD. 26th Int. Towing Tank Conf.

ITTC. (2017). Recommended Procedures and Guidelines 7.5-02-03-01.4: 1978 ITTC Performance Prediction Method. 28th Int. Towing Tank Conf.

Kınacı, Ö.K., Sukas, Ö.F. ve Bal, Ş. (2016). Prediction of Wave Resistance by a RANSE based CFD Approach. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part M, Journal of Engineering for the Maritime Environment, Vol. 230, Issue 3, pp: 531-548.

Larsson, L. Ve Raven, H.C. (2010). Ship Resistance and Flow (Principles of Naval Architecture Series). SNAME Publications, USA.

Moctar, O. el, Shigunov, V. ve Zorn, T. (2012). Duisburg Test Case: Post-Panamax Container Ship for Benchmarking. Sh. Technol. Res. 59, 50–64.

Moctar, O. el, Sigmund, S., Ley, J. ve Schellin, T.E. (2016). Numerical and Experimental Analysis of Added Resistance of Ships in Waves. J. Offshore Mech. Arct. Eng. 139, 011301.

Molland, A.F., Turnock, S.R. ve Hudson, D.A. (2007). Ship Resistance and Propulsion. Cambridge University Press.

Özdemir, Y.H., Çoşgun, T., Doğrul, A. ve Barlas, B. (2016). A Numerical Application to Predict the Resistance and Wave Pattern of Kriso Container Ship. Brodogradnja, 67 (2), 47-65.

RINA (1977). The Transaction of The Royal Institution of Naval Architects. 119, pp. lxvi–lxvii.

Shigunov, V., el Moctar, O., Papanikolaou, A., Potthoff, R. ve Liu, S. (2018). International benchmark study on numerical simulation methods for prediction of manoeuvrability of ships in waves. Ocean Eng. 165, 365–385.

Sigmund, S. & el Moctar, O. (2017). Numerical and experimental investigation of added resistance of different ship types in short and long waves. Ocean Eng. 147, 51–67.

Telfer, E.V. (1927). Ship resistance similarity. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, Vol. 69.

Telfer, E.V. (1928/29). Frictional resistance and ship resistance similarity. Transactions of the North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders.

Telfer, E.V. (1951). Further ship resistance similarity. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, Vol. 93.

Uslu, Y. ve Bal, Ş. (2008). Numerical Prediction of Wave Drag of 2-D and 3-D Bodies Under or on a Free Surface. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences. Vol. 32, pp:177-188.

Walker, F. M. (2010). Ships and shipbuilders: Pioneers of design and construction. Seaforth Publishing.

Yılmaz, T. (ed) (2011). Gemi Mühendisliği El Kitabı. İstanbul: TMMOB Gemi Mühendisleri Odası Yayını.