

Gemi Direnci ve Sevk Performansının Gemi Ölçeğinde Seyir Testleri ile Sayısal Doğrulaması

Naz Yılmaz

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Denizcilik Fakültesi, Bursa Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

naz.yilmaz@btu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0499-8248

ÖZET

Yıllardır gemi sevk performansının sayısal doğrulaması, genellikle model ölçeğindeki gemi deney sonuçları ile karşılaştırılarak yapılmaktadır. Gemi model deney havuzlarında gerçekleştirilen bu deneylerde gemi ölçeğini değiştirmek oldukça zor ve zahmetli iken, gelişen teknoloji ve artan hesaplama gücüyle nümerik analiz ve modellemeleri tam gemi ölçeğinde gerçekleştirmek daha makul hale gelmiştir. Bu durum aynı zamanda, ölçeklendirme sebebiyle ortaya çıkan ve akış dinamiklerinin tahminindeki belirsizlikleri ve model ölçeğinden gemi ölçeğine geçişteki ampirik hesaplamalardaki belirsizlikleri de ortadan kaldırmaktadır.

Ne yazık ki, gemi ölçeğindeki sayısal sonuçları doğrulamak amacıyla, uygun deniz koşullarında ve yüksek kalitede verilerin ölçülebilmesi için gerçekleştirilen gemi seyir testleri sonuçlarına ulaşmak konusunda bazı zorluklar yaşanmaktadır. Bunun üstesinden gelmek için Lloyd Register (LR) bünyesindeki Gemi Performansı Grubu, bir kargo gemisi ile gerçekleştirilen gemi seyir testlerinin deneysel sonuçlarını, gemi ölçeğinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemlerinin güvenilirliğini arttırmak ve nümerik modelleme araçlarının kabiliyetlerinin değerlendirilmesi amacıyla bir çalıştay vasıtasıyla paylaşmıştır.

Bu çalışmada, LR çalıştayında sunulan tam gemi ölçeğindeki gemi direnci, açık su pervane performansı, gemi sevki, pervane performansı ve pervane kavitasyonu konularındaki sayısal doğrulama çalışmaları sunulmaktadır.

Sayısal hesaplamalar, çalıştayın başında sonuçlar bilinmeksizin (kör bir şekilde) gerçekleştirilmiş olup, simülasyonlar esnasında ticari bir Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS) türbülans ve Volume of Fluid (VoF) modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Pervane kavitasyonunun hesaplanması için ise Schnerr-Sauer kavitasyon modeli kullanılmıştır. Gemi sevki analizlerinde pervane dönüşünün tanımlanabilmesi için kayan çözüm ağı (sliding mesh) yaklaşımı kullanılmıştır. Geminin kendi kendini sevk noktası, sabit pervane dönüş hızı (çalıştay tarafından sağlanan veriler arasındadır) ile gemi hızı değiştirilerek tespit edilmiştir. Nümerik olarak tahmin edilen pervane kavitasyon görselleri, gemi seyir deneyleri esnasında kaydedilen gerçek fotoğraflar ile karşılaştırılmıştır. HAD yöntemi kullanılarak analiz edilen tüm vakalar, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış olup, gemi direnci, açık su pervane performansı, güç ve kavitasyon tahminleri açısından oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Açık Su Pervane Performansı, Gemi Direnci, Gemi Sevki, Kavitasyon, HAD, Gemi Seyir Deneyleri

Makale geçmişi: Geliş 11/06/2020 – Kabul 23/06/2020

Numerical Validation of Ship Scale Resistance and Self-Propulsion Performances with Sea Trials

Naz Yilmaz

Naval Architecture and Marine Engineering Department, Maritime Faculty, Bursa Technical University, İstanbul, Turkey

naz.yilmaz@btu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0499-8248

ABSTRACT

For many years it has been best practice to validate results of numerical ship performance simulations against the results of towing tank experiments, both conducted at model-scale. While it is hardly possible to increase the scale of towing tanks considerably, with ever-increasing computational power, it became feasible to run numerical simulations in ship-scale. Thus, eliminating uncertainties arising from poorly predicted flow phenomena with models that are scale-sensitive and also from scaling up results to ship scale using empirical methods.

Unfortunately, to validate numerical ship scale results, the marine community was lacking high-quality experimental data measured on a suitable ship operating at sea under calm/measurable conditions. To overcome this, the Lloyd's Register Ship Performance Group (LR) provided such experimental data by conducting sea trial measurements on a general cargo vessel to assess and develop the capabilities of numerical tools to increase the confidence in ship-scale Computational Fluid Dynamics (CFD).

Accordingly, this study presents the numerical validation of the LR ship-scale experimental data for hull resistance, propeller open water characteristics, self-propulsion predictions and propeller cavitation cases, all simulated in ship-scale conditions. The computations were performed blind, without knowing the experimental results, using a commercial Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS) solver with an implemented Volume of Fluid (VoF) model for the free surface prediction and the Schnerr-Sauer cavitation model for the prediction of the propeller cavitation. For the self-propulsion simulations, a sliding mesh approach was used for describing the rotational motion of the propeller. In order to establish the self-propulsion point, the ship speed was varied at a constant propeller rotation rate which was given as input by LR. The numerically predicted cavitation was compared to video recordings of the sea trial propeller cavitation patterns. The simulated cases compared very well to the experimental data for resistance, propeller open water, power and cavitation prediction.

Keywords: Open Water Propeller Performance, Resistance, Self-Propulsion, Cavitation, CFD, Sea Trials

Article history: Received 11/06/2020 – Accepted 23/06/2020

1. Giriş

Bir geminin sevk performansının doğru tahmini, gemi hidrodinamiğindeki temel zorluklardan biridir. Tam ölçekli bir geminin hidrodinamik performansını anlamının geleneksel yolu, bir çekme tankındaki model testlerinin sonuçlarını ITTC yönergelerini izleyerek tam ölçeğe aktarmaktır (ITTC, 2017). Ancak, model testlerinden elde edilen deneysel sonuçlar, model ve tam ölçekli gemi arasında tam hidrodinamik benzerlik sağlanamadığından ölçek etkilerine tabidir. Son yıllarda, hesaplamalı kaynaklardaki hızlı gelişmeler doğrultusunda gemi performansını tahmin etmek için HAD yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda düzenlenen HAD çalıştaylarından elde edilen son sonuçlar, gemi hidrodinamiğinde HAD yöntemlerini kullanma becerisini ve güvenilirliğini kanıtlamaktadır (Larsson ve diğ. (2014), Larsson ve diğ. (2018)).

Yıllar geçtikçe, gemi sevki tahminlerinde HAD çalışmaları sürekli bir gelişme göstermiştir. KCS gemisi, model ölçekli test verilerine açık erişimi sayesinde çoğunlukla HAD topluluğu tarafından bir kıyaslama vakası olarak kullanılmıştır. Birçok araştırmacı, KCS gemisinin kendiliğinden tahrik özelliklerini model ölçeğinde araştırmıştır (Carrica ve diğ. (2010), Seo ve diğ. (2010) Krasilnikov (2013), Gaggero ve diğ. (2015)). Model ölçeği tahminlerinden elde edilen deneyimlerin ardından, son yıllarda tam ölçekli araştırmalara odaklanan pek çok sayıda çalışma da bulunmaktadır. Bhushan ve diğerleri (2009), tam ölçekli, gemi sevki analizlerinden birini gerçekleştirmiştir. Gemi seyri verileri olmadığı için, sonuçlar model ölçekli ölçümlerden hesaplanan tam ölçekli verilerle karşılaştırılmıştır. Bunu takiben, Castro ve arkadaşları (2011), pervanenin doğrudan ayrıklaştırılmasıyla KCS gemisinin tam ölçekli kendi kendini sevk hesaplamalarını gerçekleştirmiştir. Sonuçlar, ITTC test prosedürlerini takiben model ölçeğinde elde edilen verilerle iyi bir uyum göstermiş ve model ile tam ölçek arasındaki akış alanındaki farklılıklar tartışılmıştır. Visonneau ve diğerleri (2016), başka bir kıyaslama gemisi olan bir Japon dökme yük gemisi için enerji tasarruflu sevk sistemlerinin model ve tam ölçekli performansını araştırmıştır. Enerji tasarrufu sağlayan yeni nesil sevk sistemlerinin verimliliğini daha iyi tahmin etmek için tam ölçekli HAD analizlerine ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir.

Model ölçeğinde, kendinden tahrikli ve farklı kıyaslama gemilerinin tam ölçekli sevk tahminlerinin gereklilikleri doğrultusunda bu ilerlemelerin ardından, Lloyd's Register Gemi Performansı Grubu (LR) ilk defa gemi ölçeğinde bir hidrodinamik çalışmayı düzenledi. LR, HAD kullanıcıları topluluğuna gemi ölçeğinde gemi sevki performansının kör sayısal tahminleri üzerine bir çalıştay düzenlediğini duyurdu. Çalıştayın amacı, modern sayısal yöntemlerin sonuçlarını, LR tarafından daha önceden tamamlanan deniz seyir deneyleri ölçümleriyle karşılaştırmak, gemi ölçeğindeki çalışmalarda sayısal modelleme araçlarının yeteneklerini değerlendirmek ve geliştirmek ve gemi ölçeğinde HAD analizlerine olan güveni artırmaktı. Seçilen gemi, basit bir geometrik konfigürasyona sahip olduğu için HAD doğrulamaları için ideal bir adaydı (tek pervane ve enerji tasarrufu sağlayan cihazlar yok). Bu atölye çalışması için altmış HAD sonucu alındı, bunlar gemi direnci vakaları için on yedi, pervane açık su performansı tahmini için on dokuz, sevk hesaplamaları için yirmi iki ve pervane kavitasyonu vakası için iki adet idi. Söz konusu geminin tekne ve pervane geometrileri, çizimler ve analiz koşulları halka açık hale getirildi ve katılımcılar ile paylaşıldı. Katılımcılardan, sevk, direnç, pervanenin açık su ve kavitasyon koşulları için söz konusu gemi kullanılarak kör sayısal sonuçlar sunmaları istendi.

LR çalıştay için seçilen gemi, REGAL ile ilgili olarak şu ana kadar birkaç çalışma yayınlanmıştır. Starke ve diğerleri (2017), gemi sevki simülasyonlarını, birleştirilmiş sabit RANS çözücü ve sınır elemanı yöntemi (BEM) kullanarak tahmin etmişlerdir. İlk önce pervanesiz RANS hesaplamaları yapmışlar ve direnç ve iz alanı elde etmişlerdir. Daha sonra pervane iz alanında BEM kullanılarak pervane hesaplamaları yapılmıştır ve bu RANS çözüm ağı yapısına interpolate edilmiştir. Jasak ve diğerleri (2019), REGAL için bulgularını, pervane için aktüatör diski yaklaşımıyla basitleştirilmiş bir yöntem kullanarak

sunmuşlardır. Sonuçlar gemi seyir ölçüleriyle karşılaştırılmış olup, her iki vaka için de uygun olduğu tespit edilmiştir.

Gemi sevk performansı için sayısal hesaplamalarının çoğu, gemi seyir testlerinden elde edilen verilerin eksikliği nedeniyle model ölçeğinde gerçekleştirilir. Ayrıca, sevk ile ilgili mevcut çalışmaların büyük çoğunluğu, hesaplama gücü sınırlamaları nedeniyle çeşitli basitleştirmelere dayanmaktadır. Ponkratov ve Zegos (2015), herhangi bir basitleştirilmiş yöntem olmaksızın gemi ölçeğinde HAD analizlerine duyulan ihtiyacı vurgulamıştır. Böylece, serbest su yüzeyi, gerçek pervane performansı, trim ve batma gibi dinamik gemi hareketleri de dahil olmak üzere, gövde ve pervanenin hidrodinamik performansını etkileyen tüm önemli fiziksel etkenler değerlendirilebilir.

Gemi sevk performansının tahmininde, yukarıda belirtilen incelemelerden elde edilebilecek bilgilerin özü şudur; model ölçeğinde yararlı deneysel ve HAD tabanlı sayısal modelleme çalışmaları yaygın olmasına rağmen, günümüzün ticari HAD kodlarından tam ölçekli koşullarda yararlanarak bu karmaşık hidrodinamik problemi modellemek için halen literatürde bazı boşluklar yer almaktadır. Her ne kadar literatürde direnç ve sevk performans tahminleri için birçok model ölçeği araştırması mevcut olsa da, son teknik yayınların çoğu gemi ölçeği HAD analizlerinin gerekliliğini vurgulamaktadır. Gemi ve pervane tasarımcıları için HAD modellemelerinin değeri ve gerekliliği, bir geminin kavramsal aşamadaki performansını tahmin etmenin ötesindedir. HAD yaklaşımı ayrıca mevcut gemilerdeki düşük performansın nedenlerini belirlemek ve söz konusu gemiyle ilişkili hidrodinamik davranışları geliştiren enerji tasarrufu önlemlerinin etkinliğini tahmin etmek için de kullanılabilir. Doğru gemi akışı modellemesi, pervane kavitasyonu ve diğer gemi titreşimi kaynakları gibi araştırmaları da geliştirebilir.

Yukarıda bahsedilen girişin ardından bu makale, gemi model ve geometri açıklamaları, test ve analiz koşulları da dahil olmak üzere REGAL gemisinin deneysel incelemeleri için kullanılan gemi seyir testlerinin gözden geçirilmesiyle Bölüm 2'de devam etmektedir. Gemi performansının sayısal araştırmaları, akış hacmi hazırlığı, çözüm ağı oluşturulması, sayısal modelleme ve analiz koşulları ve simülasyon kurulumunun ayrıntılı açıklamaları ise Bölüm 3'te sunulmuştur. Açık su pervane performansı, gemi direnci, sevk ve kavitasyon tahminlerini içeren sonuçlar ve tartışmalar Bölüm 4'te yer almaktadır. Makale, Bölüm 5'te sunulan sonuçlar ve gelecekteki çalışmalar ile sona ermektedir.

2. Gemi Seyir Deneyleri

Gemi seyir deneylerinden önce, gemi havuza alınmış, gemi gövdesi ve pervane yüzeyleri temizlenmiştir. Gemi, dümen ve pervane 3 Boyutlu tarama cihazları vasıtasıyla taranarak gerçek geometriler elde edilmiştir. Bu bölümde, tam ölçekteki geminin geometrik özellikleri, pervanesi ve gemi seyir koşulları ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

2.1. Gemi Modeli – Kargo Gemisi; REGAL

3 Boyutlu tarama cihazları ile taranan gemi gövdesi, yüksek kalitede gemi geometrisi ve boyutları hakkında bilgi vermekte olup, tasarım çizimlerinden oluşturulan geometrilerde meydana gelebilecek belirsizlikleri de ortadan kaldırmıştır. Yine de doğrudan taranan geometrilerin HAD analizlerinde kullanılmasında bazı zorluklar meydana geldiği için (özellikle çözüm ağı yapısı oluşturulması esnasında) tüm geometriler çalıştay ekibi tarafından tekrar modellenmiş olup, katılımcılara temizlenmiş geometriler sunulmuştur. Çalışmaya katılacak olan araştırma ekiplerine ilgili geometri dosyalarını (stl. Formatında sunulmuştur), gemi seyir deneylerinde belirlenen analiz koşullarını indirmeleri ve bu veriler üzerinde çalışmaları için yönlendirmeler yapılmıştır. Çalıştay başlangıç aşamasında yalnızca bu verilerden oluşmakta olup, sonuçlara dair veriler paylaşılmamış, katılımcıların analizleri sonuçları bilmeksizin (kör bir şekilde) yapmaları istenmiştir. Bu çalıştay kapsamında incelenecek olan gemi, Şekil

1’de verilmiş olup, gemi ve pervaneye ait teknik özellikler Tablo 1’de yer almaktadır.



Şekil 1. Kargo gemisi; REGAL.

Tablo 1. Gemi ve pervanenin teknik özellikleri.

Gemi	Değer	Ölçü Birimi
Gemi İsmi	REGAL	-
Gemi Tipi	Genel Kargo	-
Dizayn su çekiminde Servis Hızı	14	knot
Gros Tonaj	11542	ton
Dikmeler Arası Uzunluk (LBP)	138	m
Genişlik (B)	23	m
Derinlik (D)	12.1	m
Seyirde Kıç / Baş su çekimi (T)	5.6 / 4.9	m
Pervane		
Pervane Tipi	Sabit Hatveli (FPP)	-
Kanat Sayısı (Z)	4	-
Pervane Çapı (D)	5.2	m
Hatve Oranı (P/D, 0.7R)	0.6781	-

2.2. Gemi Seyir Durumları

Bu çalıştay kapsamında, daha önceden gemi seyir deneyleri gerçekleştirilmiş REGAL gemisine ait 4 farklı analiz senaryosu belirlenmiştir. Bu vakalar, gemi direnci, açık su pervane performansı, gemi sevki ve pervane kavitasyonu araştırmalarını içermekle birlikte, ilgili vakalara ait koşullar Tablo 2’de tanımlanmıştır.

Gemi direnci vakası için, 4 farklı gemi hızı koşulunda, gemi serbest bırakılacak şekilde (batma ve trim), toplam gemi direncinin hesaplanması istenmiştir.

Açık su pervane performansı vakası için ise, pervanenin dönüş hızı verilmiş ve sabit tutulacak olup, 5 farklı pervane ilerleme katsayısında (ilerleme hızı) pervane performansının tahmin edilmesi istenmiştir.

Gemi sevki vakası için yalnızca bir koşul zorunlu tutulmuş olmasına rağmen, çalıştay kapsamında belirlenen 3 farklı pervane dönüş koşulu da analiz edilmiştir. Ancak bu makale kapsamında yalnızca bir koşulun ayrıntılı sonuçları verilmiş ve tartışılmıştır.

Son olarak, yalnızca bir pervane kavitasyonu koşulu belirlenmiş ancak çalıştay kapsamında bu vaka zorunlu tutulmamıştır. Bu makalede de sonuçlarına yer verilmiş olan bu vaka için yalnızca iki araştırma

grubu tarafından kavitasyon sonuçları çalıştay için gönderilmiştir.

Tablo 2. Gemi seyir koşulları ve çalıştay tarafından istenen analiz vakaları.

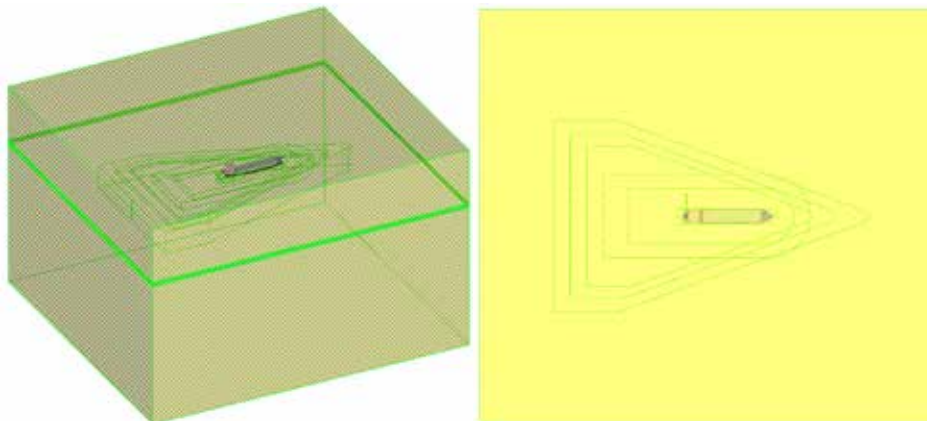
Vaka	Analiz Türü	Zorunluluk	Sabit	Değişken
1.1	Gemi Direnci	İsteğe bağlı/Önerilir	Serbest batma ve trim	8 kn
1.2				10 kn
1.3				12 kn
1.4				14 kn
2.1	Açık Su Pervane Performansı	İsteğe bağlı/Önerilir	71.62 rpm	0.20
2.2				0.30
2.3				0.40
2.4				0.50
2.5				0.60
3.1	Gemi Sevki	En az bir vaka gerekli	Sabit / Serbest batma ve trim	71.62 rpm
3.2				91.10 rpm
3.3				106.4 rpm
4.1	Pervane Kavitasyonu	İsteğe bağlı/Önerilir	-	71.62pm

3. Sayısal Yöntem (HAD Yöntemi)

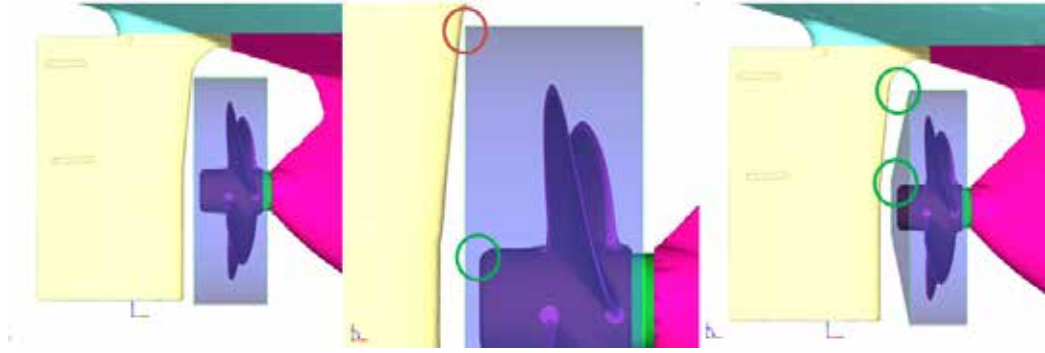
3.1. Geometri ve Akış Hacminin Hazırlanması

Gemi direnci vakaları için, yarım (1/2) akış hacmi oluşturulurken, gemi sevki analizleri için pervane varlığı nedeniyle tam bir akış hacmi modellenmiştir (Şekil 2). Pervane kavitasyonu vakası için gemi sevki akış hacmi kullanılırken, açık su pervane performansı vakası için farklı bir akış hacmi modellenmiştir.

Şekil 2’de yer alan akış hacmi için, gemi direnci ve sevki analizleri için oluşturulmuş olan akış hacmini göstermektedir. Gemi etrafına çizilmiş fazladan geometriler, gemi su hattını daha doğru bir şekilde modelleyebilmek için çözüm ağı yapısını sıklaştırmak için kullanılacak geometrileri temsil etmektedir. Şekil 3’te ise, pervane etrafında modellenen, pervane ve dümen arasındaki mesafenin kısıtlı olması ve dümenin şekli nedeniyle dönel akış hacmi üzerinde yapılan modifikasyonlar gösterilmiştir. Dönel akış hacmi için pervane etrafına çizilen geometri bir silindir geometrisi değil, mevcut hacme göre modellenmiş özel bir geometridir.



Şekil 2. Gemi direnci ve sevki analizleri için oluşturulan akış hacmi.



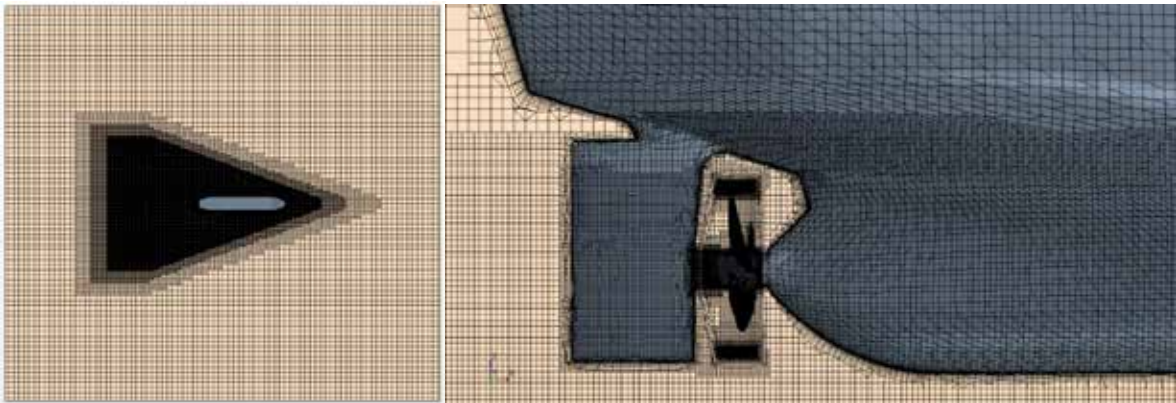
Şekil 3. Pervane etrafında özel olarak oluşturulmuş dönel akış hacmi bölgesi.

Gemi seyir testleri alçak bir su çekimi koşulunda gerçekleştirildiğinden, pervane ucu serbest yüzey su yüzeyine çok yakındır, bu da havanın pervane dönüşü sırasında emilerek analizlerin yakınsamasında bozulmalara neden olmaktadır. Bu sorunu çözmek için simülasyon, pervanenin dönüşü sabitlenerek başlatılmış ve kıç dalgası formu oluşturulduktan sonra pervane aktif hale getirilmiştir (bakınız Şekil 10).

Gemi sevk analizleri için, hem dönel hem de sabit akış hacimlerine ait çözüm ağlarını birbirine bağlayan arayüzler tanımlanmış, böylece geometrik olarak modellenmiş pervanenin dönmesine izin veren bir kayan ağ (sliding mesh) yöntemi kullanılmıştır.

3.2. Çözüm Ağının Oluşturulması

Farklı durumlara uygun akış hacimlerinin oluşturulmasından sonra, uygun çözüm ağları üretilmiştir. Böylece, direnç ve sevk durumları için serbest su yüzeyi bölgesi etrafındaki dalga modellerini doğru bir şekilde yakalayabilmek için fazladan bir sıklaştırma bölgesi uygulanırken, açık su pervane performansı ve kavitasyon hesaplamaları için pervanenin uç bölgesini de kapsayacak şekilde pervane etrafına silindirik bir sıklaştırma bölgesi uygulanmıştır. Üretilen çözüm ağları ve uygun sıklaştırma bölgeleri Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Gemi (Sol) ve pervane (Sağ) etrafında sıklaştırılmış çözüm ağı yapısı.

3.2.1 Çözüm Ağından Bağımsızlık Çalışmaları

Direnç değerlerindeki sayısal hataları değerlendirmek için, üç farklı çözüm ağı yapısı ile ağdan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Bu üç çözüm ağı, seyrek (3.8M hücre), orta (5.3M hücre) ve sık (7.6M hücre), olacak şekilde 10 knot gemi hızı koşulu için (Durum 1.2) çözdürülmüştür. y^+ değeri, yaklaşık 70 ortalama değerinde sabit tutulmuştur (tam ölçekli koşullar için $y^+ > 30$ olması önerilmektedir).

Ağdan bağımsızlık çalışmaları Stern vd. (2001) sunmuş olduğu prosedüre uygun olarak, geminin toplam direnci için gerçekleştirilmiş olup, sonuçlar Tablo 3'te sunulmuştur. Stern vd. (2001) göre, bu çalışmadaki gemi direnci değeri için salınımlı bir yakınsama elde edilmiştir.

Tablo 3. Gemi direnci analizleri için ağdan bağımsızlık çalışmaları.

Ağdan Bağımsızlık	Seyrek	Orta	Sık	U_G
Toplam Gemi Direnci, R_T (kN)	118.19	117.06	117.57	1.09%

3.3. Sayısal Modelleme ve Simülasyon Kurulumu

Bu çalışma kapsamındaki tüm HAD analizleri, ticari bir HAD yazılımı olan STAR-CCM+ (STAR-CCM +, 2018) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Türbülans modellemesi için tüm vakalara uygun Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) modeli tercih edilmiştir.

Açık su pervane performans hesaplamaları için, başka bir akış hacmi (direnc ve sevk analizlerinden farklı olarak) hazırlanmış ve dönme, kayan ağ yaklaşımı kullanılarak tanımlanmıştır. Zaman adımı değeri pervanenin dönme hızı kullanılarak hesaplanmıştır. Diğer analiz durumları için çok fazlı modelleme gerekliliklerinin aksine, açık su analizleri için sadece su fazı akışkan olarak kullanılmıştır.

Direnc ve sevk analizlerinde, serbest su yüzeyini analize dahil etmek için, iki farklı tipte sıvının (yani su ve hava) ve kavitasyon analizleri için iki farklı akış fazının (yani sıvı ve su buharı) modellenmesi gerekmektedir. Direnc ve sevk vakaları için, serbest yüzey su ve hava arasında tanımlanırken, kavitasyonun modellenmesi için suyun sıvı ve buhar fazları arasında çok fazlı bir etkileşim tanımlanmıştır. Gemi ölçeği direnc analizleri için, toplam çözüm ağı hücre sayısını azaltmak için simetri koşulu kullanılarak hesaplama alanının sadece yarısı oluşturulmuşken, pervane geometrisinin varlığı nedeniyle sevk koşulu için tüm gövde geometrisinin modellenmesi gerekmiştir.

Kavitasyon, Rayleigh-Plesset denkleminin dayanan Schnerr-Sauer kavitasyon modeli kullanılarak modellenmiştir.

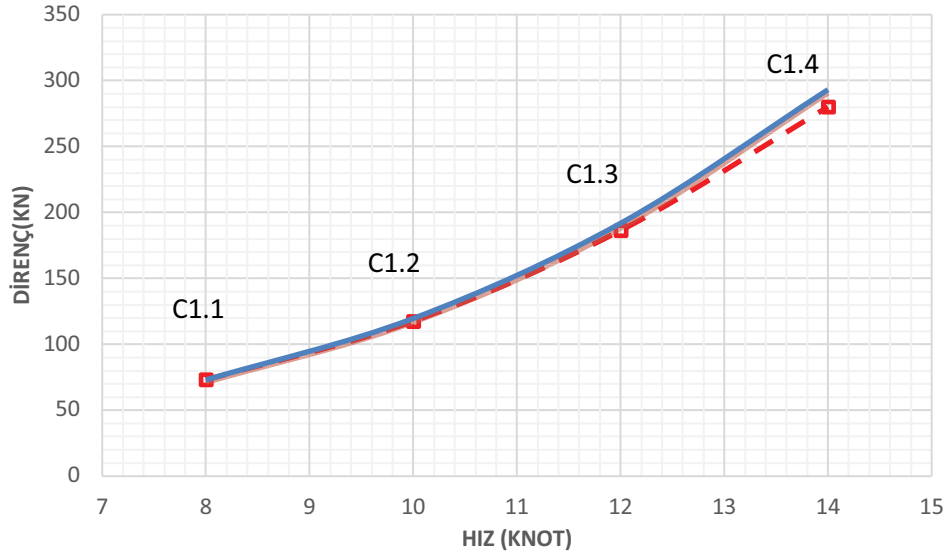
Gemi seyir testleri sonuçları arasında, açık su pervane performansı ve direnc ölçümleri bulunmadığından, bu durumlarda çalıştay katılımcılarının sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Ancak, gemi sevki durumunda kör HAD sonuçları, çalıştay sonunda diğer katılımcıların sayısal hesaplamaları ve aynı zamanda deneysel seyir testi ölçümleriyle de kıyaslanmıştır.

4. Sonuçlar ve Tartışma

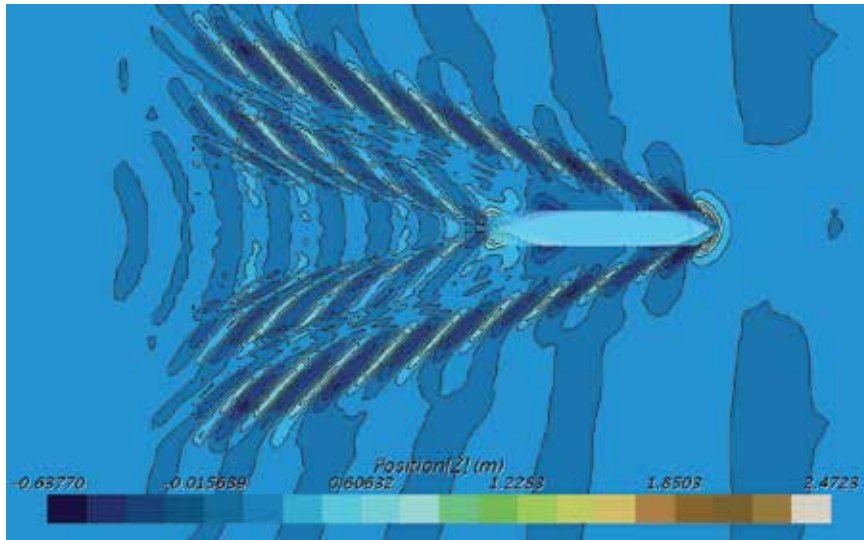
Gemi direnci, açık su pervane performansı, sevk performansı ve kavitasyon tahminleri dahil olmak üzere 4 farklı vaka ile ilgili karşılaştırmalı sonuçlar ve tartışmalar aşağıdaki bölümlerde gösterilmiştir.

4.1. Gemi Direnci

Çalıştay kapsamında, direnc hesaplamaları, toplam 7,6 milyon hücre kullanılarak serbest batma ve trim koşullarında 4 farklı giriş hızı için gerçekleştirilmiştir. Toplam direnc değeri için deneysel veriler mevcut olmamasına rağmen, çalıştay katılımcılarından elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmış olup, Şekil 5, HAD sonuçlarını ortalama direnc değerleri ile karşılaştırarak göstermektedir. Bu şekil, toplam direnc için HAD tahmininin, farklı hız koşullarında diğer sonuçlarla iyi bir uyum sağladığını göstermektedir. Kırmızı kesik çizgili eğri bizim HAD sonuçlarımızı, mavi eğri tüm katılımcıların değerlerinin ortalamasını temsil etmektedir. Şekil 6 ayrıca Durum 1.2 için su hattı üzerinde dalga oluşumunu göstermektedir.



Şekil 5. Toplam direnç değeri için HAD sonuçlarının ortalama değerler ile kıyaslanması.

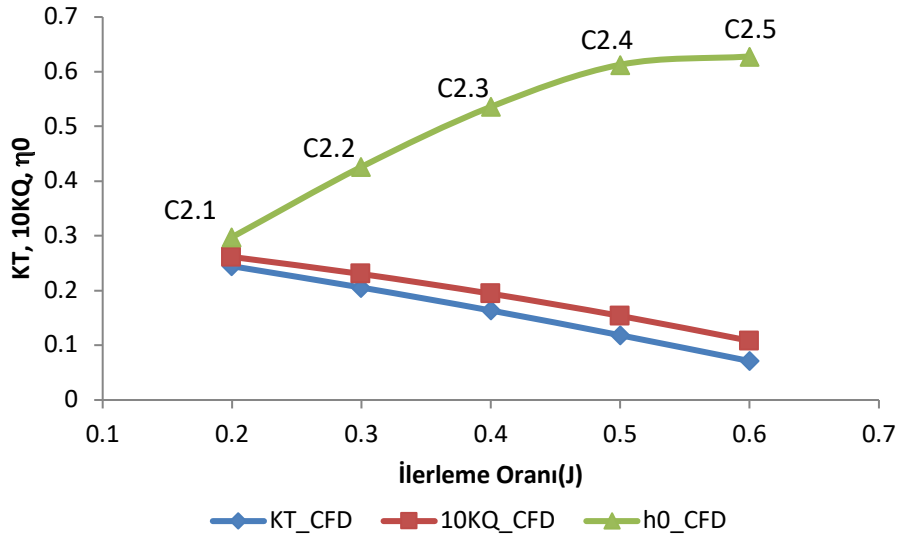


Şekil 6. Su hattı üzerindeki dalga yapısı.

4.2. Açık Su Pervane Performansı

Pervane açık su performans hesaplamaları, pervanenin dönme hızını sabit tutarak ve giriş hızını değiştirilerek istenen ilerleme katsayılarına karşılık gelen, çalıştay komitesi tarafından talep edilen koşullara (Tablo 2) göre gerçekleştirilmiştir.

Şekil 7, 5 farklı koşula karşılık gelen HAD sonuçları kullanılarak çizilen açık su pervane eğrilerini göstermektedir. Her ne kadar açık su pervane performans tahminleri için deneysel sonuçlar mevcut olmasa da, kör HAD sonuçları diğer katılımcıların sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve iyi bir uyum sağlanmıştır. HAD sonucu ortalama açık su verimlilik değeri ile karşılaştırıldığında, açık su pervanesi verimliliği % 2'den daha düşük hata payı ile hesaplanmıştır (Durum 2.1 için).



Şekil 7. Açık su pervane performansı eğrileri.

4.3. Gemi Sevk Performansı

Çalıştay kapsamında katılımcılardan, gemi sevk performansı tahminleri için gemi seyir testleri sırasında kaydedilen şaft dönüş hızları göz önüne alınarak elde edilen gemi hızlarını belirlemeleri istenmiştir. HAD analizlerinde, belirli bir hız değeri için şaft hızını ayarlamak yerine, sabit şaft hızıyla gemi hızını belirlemek, hesaplamalı olarak pahalı ve uzun zaman alan (her giriş koşulu değişikliğinde analizin yakınsaması beklenmelidir.) ve olağandışı bir uygulamadır.

Bu isterin nedeni, şaftın dönüş hızı ölçümlerinin gemi hızı ölçümlerine nazaran çok daha güvenilir olması ve ölçülen değerlerin gemi seyir testleri sırasında doğru kaydedilmiş olmasıdır. Yerdeki gemi hızı, modern bir GPS sistemi ile yüksek bir doğrulukla da ölçülebilir; bununla birlikte deniz koşulları, rüzgar ve akışın gerçek hız değerleri üzerinde önemli bir etkisi olabilir. ISO15016 standardı, bu tip değerleri ideal bir ortama dönüştürmeye yardımcı olmaktadır (dalga ve rüzgar yok kabul edilerek). Bununla birlikte, standart bazı ampirik formüllere dayandığı ve görsel izlenimlere (örneğin dalga yüksekliği için) dayandığı için, işlem sonrası bazı belirsizlikler ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, bu durum için doğru olarak ölçülmüş şaftın dönüş hızı, sabit bir referans noktasına sahip olmak ve değerlerin tutarlılığı açısından çalıştay komitesi tarafından tercih edilmiştir. Bu gereksinim, belirli bir şaft hızında kendi kendine sevk noktasına ulaşabilmek için giriş hızını (gemi hızı) yinelemeli olarak ayarlama zorunluluğuna sebep olduğundan, bu analizler için oldukça zaman ve güç açısından pahalıya mal olmuş ve bu vakayı zor hale getirmiştir.

Bizim bu duruma karşı yaklaşımımız, pervane itme değerine karşılık gemi direnci eğrisi oluşturmak ve kendi kendini sevk noktasını bulabilmek için sabit şaft hızına ve değişken giriş hızlarına sahip bir dizi vakayı gerçekleştirmektir. Verilen pervane dönme hızlarında elde edilen gemi hızlarının göstergeleri, çalıştay öncesinde verilmiştir. Burada, 71.62 rpm şaft hızına karşılık, Durum 3.1'e karşılık gelen en düşük şaft dönme hızı için bulgular rapor edilmiştir.

Zaman adımı, her bir zaman adımı başına 1 derecelik pervane dönüşüne izin vermek üzere pervane dönüş hızına göre hesaplanmıştır. Hesaplamalar, yakınsama için gerekli olan hesaplama süresini azaltmak amacıyla çok daha büyük bir zaman adımı ile başlatılmıştır.

Gemi ölçeğinde HAD analizleri için genel iddialardan biri, hesaplamalar için çok sayıda hücrenin ve dolayısıyla önemli hesaplama gücünün, güvenilir sonuçlar elde etmek için teorik bir gereksinim olmasıdır. Bununla birlikte, sonuçlarımız, 8 milyon hücre sayısı ile daha kaba ağlarla bile iyi sonuçların

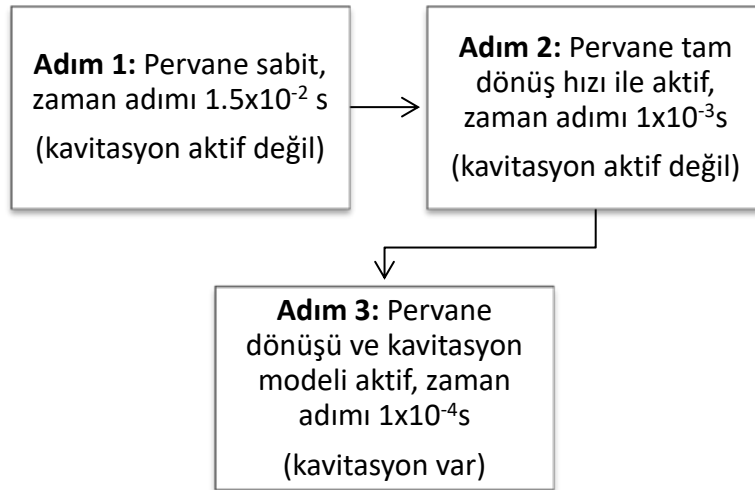
elde edilebileceğini göstermiştir. Bu gözlem, farklı tipteki gemiler için Ponkratov ve Zegos (2015) tarafından gerçekleştirilen tam ölçekli kendi kendini sevk için yapılan daha önceki çalışmalar ile de uyum göstermiştir.

Yukarıda bahsedilen hesaplama yöntemine dayanarak, HAD analizleri, Şekil 8'de verilen şematik tabloya göre ve aşağıdaki adımlarda tarif edilen yöntem izlenerek, tüm sevk durumları için gerçekleştirilmiştir:

Adım 1: Simülasyonlar pervanenin hareketi olmadan ve pervane kavitasyon simülasyonları için kullanılacak olanlardan nispeten daha yüksek bir zaman adımı (1.5×10^{-2} s) kullanılarak başlatılmıştır. Bu yaklaşım, simülasyonlarda geminin toplam direncinin kısa sürede yakınsamasını sağlar ve pervanenin hareketi ile daha yüksek zaman adımı değerlerinden kaynaklanan potansiyel iraksama problemlerinin önüne geçer.

Adım 2: Toplam direnç değeri yakınsadıktan sonra, pervanenin dönüşü etkinleştirilir, pervanenin devri artırılır ve zaman adımı (1×10^{-3} s) yavaş yavaş azaltılır. Bu, pervanenin itme ve tork değerleri yakınsayana kadar devam eder.

Adım 3: İtme ve tork değerleri yakınsadığında, daha küçük bir zaman adımı (1×10^{-4} s) ile pervane kavitasyonunun simüle edilebilmesi için saturasyon basıncı kademeli olarak -1000'den 3359 Pa'a değiştirilerek pervane kavitasyonu etkinleştirilir. Kavitasyonun aktivasyonunu takiben, simülasyonlar pervane kanadı yüzeylerindeki yüzey kavitasyonu kararlı hale gelene kadar yürütülür. Her ne kadar eğimli akış, tekne ve dümen varlığı gibi karmaşık akış özellikleri nedeniyle kavitasyon dinamikleri hala değişken olabilsede, kanat yüzeyindeki kavitasyon her bir kanat pozisyonu için kararlı olana kadar analizler devam ettirilmelidir.



Şekil 8. Sevk durumları için oluşturulmuş analiz yöntemi.

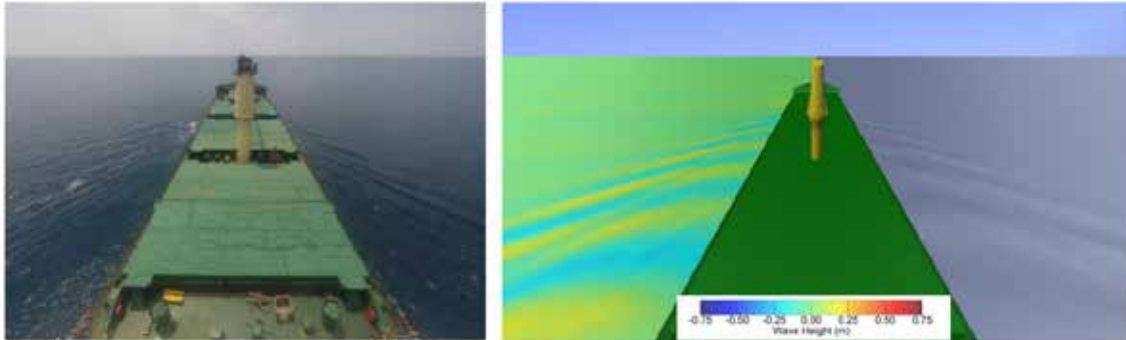
Daha öncede bahsedildiği gibi, gemi direnci ve pervane itme değerlerinin yakınsaması ve kendi kendine sevk noktasının tespit edilebilmesi için giriş hızı değeri değiştirilerek bu değerlerin birbirini yakalaması sağlanmıştır. Pervane dönüş hızı verilen 71.62 rpm değerine sabitlenerek, 9.6 knot hızında itme ve direnç arasında bir denge elde edilmiştir. Dolayısıyla geminin hızı 9.6 knot olarak tahmin edilmiştir. Hesaplamalara verilen hız ile başlanmış ve iteratif bir süreçle direnç ve itme arasındaki denge sağlanarak 9.6 knot kendi kendine sevk noktasına ulaşılmıştır. Daha sonra çalıştay sonuçları katılımcılar ile paylaşıldığında görülmüştür ki, gemi seyir testlerinde 71.62 rpm pervane dönme hızına karşılık gelen gemi hızı 9.25 knot'dur. Dolayısıyla HAD sonuçları gemi seyir testleri ile karşılaştırıldığında hız değerinin % 3.8 sapma ile tahmin edildiği sonucuna varılmıştır.

Tablo 4, çalıştay sırasında paylaşılan gemi seyir testleri ölçümleriyle HAD analiz sonuçlarının kıyaslandığı gemi sevk performansına ait ana parametreleri listelemektedir. Seyir verileri, 71.6 rpm'deki gemi hızını 9.25 knot olarak ölçerken, kör tahminimizin 9.6 knot olduğu görülmektedir. Tablo 4'te yer alan HAD sonuçları, gemi seyir sonuçları ile iyi bir uyum gösterirken, hız % 3.8, tork % 2.9 ve güç % 2.7'lik bir hata payı ile tahmin edilmiştir.

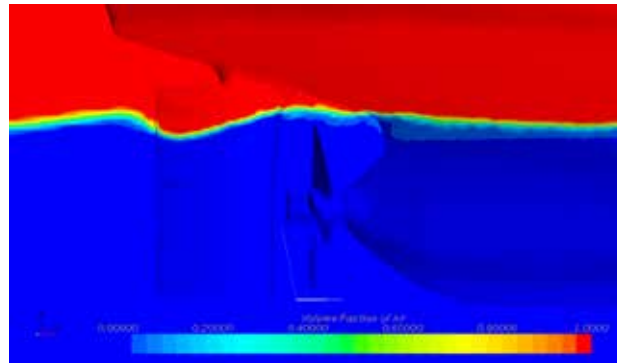
Tablo 4. HAD ile hesaplanan sevk performans parametrelerin gemi seyir testleri ile mukayesesi.

Durum 3.1	Gemi Hızı (kn)	Toplam Direnç (R_T)	Pervane İtmesi (T)	Sevk Noktası (%)	Pervane Torku (Q)	İletilen Güç (P_D)
HAD Sonuçları	9.6	180.1	179.9	0.13	98.93	741.18
Seyir Testleri	9.25	-	-	-	96.16	721.00
Sapma	% 3.8	-	-	-	% 2.9%	% 2.7

Şekil 9'da HAD ile modellenen serbest su hattı yüzeyi, bir GoPro kameradan elde edilen gemi seyir testleri sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu görüntü görsel bir karşılaştırma sağlarken dalga yapısının sayısal hesaplamalar ile doğru bir şekilde tahmin edildiğini göstermektedir. Bu nedenle, sunulan HAD hesaplamalarında serbest su yüzeyin tatmin edici bir şekilde modellendiğini söylemek mümkündür. Son olarak, Şekil 10, gemi gövdesi ve dümen yüzeyinde su ve havanın hacimsel oranını göstererek serbest su yüzeyinin HAD hesaplamalarında nasıl sunulduğunu göstermektedir.



Şekil 9. HAD (Sağ) ile elde edilen su hattı yüzeyinin seyir testi (Sol) sırasında çekilmiş gerçek bir fotoğraf ile karşılaştırılması.

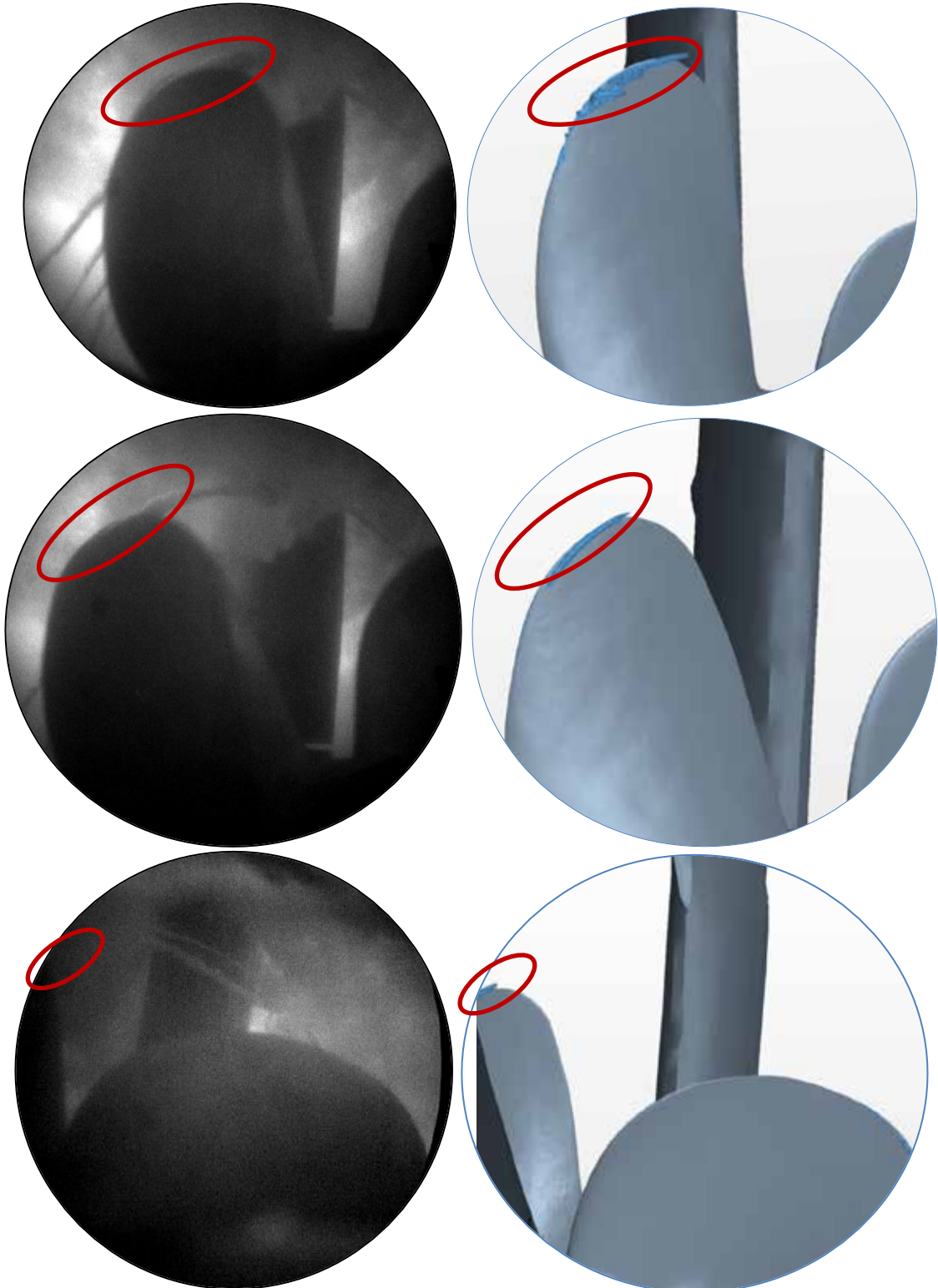


Şekil 10. Gemi ve dümen üzerinde su ve havanın hacimsel oranı.

4.4. Pervane Kavitasyonu

Pervane kavitasyonu durumu için, çalıştay kapsamında, bu çalışma da dahil olmak üzere sadece iki katılımcı sonuçlarını paylaşmıştır. Şekil 11, farklı kanat açısı pozisyonları için HAD tahminleri (Sağ) ile gemi seyir testlerinden (Sol) elde edilen gerçek görüntüler arasındaki kavitasyon görünümü karşılaştırmalarını göstermektedir. Bu şekilden görülebileceği gibi, pervane ucundaki en büyük

kavitasyon hacmi üst ölü noktada yakalanırken, pervane açılal pozisyonu nedeniyle çözüm süresi boyunca yüzey kavitasyonu hacmi azaltılmıştır. Yüzey kavitasyonu modellenemesine rağmen, pervane ucunun etrafındaki çözüm ağı sıkılaştırma bölgesinin eksikliği nedeniyle, kanat ucu girdap kavitasyonu ve yüzey kavitasyonu ile etkileşimi bu vaka için ne yazık ki modellenememiştir. Bu olgu için adapte edilebilir ağı sıkılaştırma tekniğinin (MARCS, Yılmaz vd. 2019) gelecekte yapılacak bir araştırma olarak uygulanması planlanmaktadır.



Şekil 11. HAD modellemesi ile elde edilen kavitasyon hacminin gemi seyir testleri sırasında kaydedilmiş gerçek fotoğraflar ile karşılaştırılması.

5. Genel Değerlendirmeler ve Gelecek Çalışmalar

Bu makalede yer alan çalışmanın temel amacı, HAD yöntemi kullanılarak gemi direncinin, açık su pervane performansının, sevk ve pervane kavitasyonunun etkili bir şekilde araştırılması için son teknoloji ürünü ticari bir HAD kodunun kabiliyetlerini göstermektir. Yukarıdaki amaca ulaşmak için, ilk olarak, gemi direnci hesaplamaları, ağdan bağımsızlık analizleri de dahil olmak üzere giriş hızları değiştirilerek 4 farklı çalışma koşulunda gerçekleştirilmiştir. Bu görevi takiben 5 farklı koşulda açık su pervane performansı tam ölçekte tahmin edilmiş ve performans eğrileri çizilmiştir. Son olarak, kendi kendine sevk analizleri gerçekleştirilmiş ve pervane kavitasyonunun, saturasyon basıncı değeri bir girdi olarak değiştirilerek pervane kavitasyonu tahmin edilmiştir. Tüm analiz vakalarından iyi sonuçlar alınmasına rağmen, hesaplama ve sonuçlar daha iyi çözümler için hala geliştirilebilir. Bu çalışma için gelecekte yapılması planlanan çalışmalar şu şekilde sıralanabilir;

- Bu çalışmada, balast yükleme koşulları gereği, pervanenin hemen üzerindeki serbest su yüzeyinde suyun emilimi ve akışın tersine çevrilmesi gibi HAD tahminlerini karmaşıklaştıran akış özellikleri olduğu gösterilmiştir. Bunların, geminin tam yüklü durumunda ortaya çıkma olasılığı daha düşüktür, bu nedenle bu koşullarında aynı çalışmaların yapılması halinde tahminlerin doğruluğu ve sonuçların tutarlılığı artırılabilir.
- Tüm durumlar çalıştay tarafından seyir testleri sonuçları paylaşılmaksızın kör talep edildiğinden, sevk durumu için giriş hızı kendi kendine sevk noktası kullanılarak tahmin edilmiştir. Dolayısıyla, hız, gemi seyir testleri ölçümlerinden farklı olarak hesaplanmıştır. Sevk analizlerinde gemi direnci ve pervane itme gücü ile ilgili deneysel ve HAD sonuçları arasındaki farkı azaltmak için kesin giriş hızı ile tekrarlanması planlanmaktadır.
- Kavite simülasyonları, kesin giriş hızı ile ve yakın gelecekte adapte edilebilir bir ağ sıklaştırma tekniği yaklaşımı ile elde edilebilecek kanat ucu girdap kavitasyonu da dahil olmak üzere, kavitasyonun daha iyi tahmin edilmesi için tekrarlanabilir.

6. Teşekkür

Bu çalışma kapsamında sözü edilen LR çalıştayının düzenlenmesinde çok etkin bir rol oynayan ve aynı zamanda tüm çalışmaların gönderilmesi, paylaşılması ve derlenmesi konusunda bizlere çok yardımcı olan Dr. Dmitriy Ponkratov'a, özellikle gemi direnci ve sevk analizlerinde oldukça emeği olan meslektaşlarım Sn. Emin Öztürk ve Sn. Matthias Maasch'a, çalışmaya katılımımızı maddi açıdan destekleyen Prof. Dr. Osman Turan'a ve değerli doktora danışmanım Prof. Dr. Mehmet Atlar'a teşekkürü bir borç bilirim. Tüm bunların yanı sıra bu çalışma kapsamında verileri paylaşılmış HAD analizlerinin gerçekleştirilmesi için İskoçya'nın Batısı için Yüksek Performanslı Hesaplama (ARCHIE-WeSt) bilgisayarı EPSRC hibe no. EP / K000586 / 1 kullanılmıştır.

7. Kaynaklar

Bhushan, S., Xing, T., Carrica, P., Stern, F., (2009). Model- and Full-Scale URANS Simulations of Athena Resistance, Powering, Seakeeping, and 5415 Maneuvering. J. Sh. Res. 53, 179–198.

Carrica, P.M., Castro, A.M., Stern, F., (2010). Self-propulsion computations using a speed controller and a discretised propeller with dynamic overset grids 316–330. <https://doi.org/10.1007/s00773-010-0098-6>

Castro, A.M., Carrica, P.M., Stern, F., (2011). Full scale self-propulsion computations using discretised propeller for the KRISO container ship KCS. *Comput. Fluids* 51, 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2011.07.005>

Gaggero, S., Villa, D., Viviani, M., (2015). The Kriko container ship (KCS) test case: An open source overview, in: *Computational Methods in Marine Engineering VI, MARINE 2015*. pp. 735–749.
ITTC, (2017). 1978 ITTC Performance Prediction Method 7.5 – 02 0.

Jasak, H., Vukcevic, V., Gatin, I., Lalovic, I., (2019). CFD validation and grid sensitivity studies of full scale ship self propulsion. *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.* 11, 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2017.12.004>

Krasilnikov, V.I., (2013). Self-Propulsion RANS Computations with a Single-Screw Container Ship, in: *3rd International Symposium on Marine Propulsors*. pp. 430–438.

Larsson, L., Stern, F., Visonneau, M., (2014). An assessment of the Gothenburg 2010 Workshop.

Larsson, L., Stern, F., Visonneau, M., Hino, T., Hirata, N., Kim, J., (2018). Tokyo 2015: A workshop on CFD in ship hydrodynamics, in: *Tokyo 2015: A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics*. Tokyo.

Ponkratov, D., Zegos, C., (2015). Validation of Ship Scale CFD Self-Propulsion Simulation by the Direct Comparison with Sea Trials Results, in: *4th International Symposium on Marine Propulsors*.

Schnerr, G. H., Sauer, J., (2001). Physical and Numerical Modeling of Unsteady Cavitation Dynamics, ICMF2001, 4th International Conference on Multiphase Flow, New Orleans, USA, May 27-June 1, 2001.

Seo, J.H., Seol, D.M., Lee, J.H., Rhee, S.H., (2010). Flexible CFD meshing strategy for prediction of ship resistance and propulsion performance. *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.* 2, 139–145. <https://doi.org/10.3744/JNAOE.2010.2.3.139>

STAR-CCM+ User Guide, (2018).

Starke, A.R., Drakopoulos, K., Toxopeus, S.L., Turnock, S.R., (2017). RANS-based full-scale power predictions for a general cargo vessel, and comparison with sea-trial results, in: *7th International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, MARINE 2017*. pp. 353–364.

Stern, F., Wilson, R.V., Coleman, H. W., Paterson, E.R, (2001). Verification and Validation of CFD Simulations - Part1: Methodology and Procedures. *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 123.

Visonneau, M., Deng, G.B., Guilmineau, E., Queutey, P., Wackers, J., (2016). Local and Global Assessment of the Flow around the Japan Bulk Carrier with and without Energy Saving Devices at Model and Full Scale, in: *31st Symposium on Naval Hydrodynamics Monterey, California, 11-16 September 2016*.

Yilmaz, N., Atlar, M., Khorasanchi, M., (2019). An Improved Mesh Adaption and Refinement Approach to Cavitation Simulation (MARCS) of Propellers, *Journal of Ocean Engineering*, January 2019.