

Araştırma Makalesi

Hibrit bir otonom deniz platformunun su altı hidrodinamiğinin incelenmesi

Utku Cem KARABULUT^{1,*}, Barış BARLAS², Şebnem HELVACIOĞLU³, Mehmet Ali BAYKAL⁴

¹ Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Maritime Faculty, Bandırma Onyedi Eylül University, Bandırma, Turkey

² Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Faculty of Naval Architecture and Marine Sciences, Istanbul Technical University, İstanbul, Turkey

³ Ship Construction Program, Maritime Vocational School, Piri Reis University, İstanbul, Turkey

⁴ Department Of Metallurgy And Materials Engineering, Faculty of Engineering, İstanbul Gedik University, İstanbul, Turkey

*Correspondence: ukarabulut@bandirma.edu.tr

DOI: 10.51513/jitsa.1652443

Özet: Bu çalışma, su altı ve su üstünde seyir yapabilen hibrit bir yarı dalgıç askeri platformun su altındaki hidrodinamik performansını deneysel ve sayısal yöntemlerle kapsamlı bir şekilde incelemekte, otonom askeri deniz aracı tasarımı alanında katkı sunmayı amaçlamaktadır. Model deneyleri İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiş, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri ise Star CCM+ yazılımı kullanılarak yürütülmüştür. Çalışmada, su altı direnç deneyleri farklı dalış derinliklerinde ve hızlarda yapılmış, sonuçlar deneysel belirsizlik analizleriyle değerlendirilmiştir. HAD sonuçları, deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulama sağlanmış ve genel olarak %5'in altında farklar elde edilmiştir. Bulgular, su altı performansının dalış derinliğiyle doğrudan ilişkili olduğunu ve yüzeye yakın operasyonlarda hidrodinamik etkilerin arttığını göstermektedir. Bu çalışma, hibrit askeri gemilerin tasarım optimizasyonuna yönelik önemli veriler sunarken, HAD yöntemlerinin bu tür analizlerde etkinliğini de ortaya koymaktadır. Gelecekteki araştırmalar, dinamik manevra kabiliyeti ve çevresel etkilerin değerlendirilmesine odaklanacaktır.

Anahtar Kelimeler: Otonom deniz aracı tasarımı, Yarı dalgıç askeri platform, gemi direnci, deneysel gemi hidrodinamiği, hesaplamalı gemi hidrodinamiği, su altı deneyleri

Investigation of the underwater hydrodynamics of a hybrid autonomous military platform

Abstract: This study comprehensively examines the underwater hydrodynamic performance of a hybrid semi-submersible naval platform capable of operating both on the surface and underwater using experimental and numerical methods, aiming to contribute to the design of autonomous military crafts. Model tests were conducted at Istanbul Technical University (ITU) Ata Nutku Ship Model Testing Laboratory, while computational fluid dynamics (CFD) analyses were performed using the Star CCM+ software. The study involved underwater resistance experiments at different submergence depths and speeds, with results evaluated through experimental uncertainty analyses. CFD results were validated by comparing them with experimental data, showing less than 5% overall differences. Findings indicate that submergence depth directly influences underwater performance and that hydrodynamic effects increase in near-surface operations. This study provides valuable data for optimizing the design of hybrid naval vessels and demonstrates the effectiveness of CFD methods in such analyses. Future research will focus on assessing dynamic manoeuvrability and environmental effects.

Keywords: Autonomous naval vessel design, Semi-submersible naval platform, ship resistance, experimental ship hydrodynamics, computational ship hydrodynamics, underwater experiments

* Corresponding author.

ORCID: 0000-0002-7588-0132, 0000-0002-5846-2369, 0000-0002-5785-1039, 0000-0003-2876-4232 (in hierarchical order, added after if manuscript is accepted for publication)

Received 06.03.2025; Received in revised form 17.06.2025; Accepted 17.06.2025

Peer review under responsibility of Bandırma Onyedi Eylül University. This work is licensed under CC BY 4.0.

APA Citation Info: Karabulut, U. C., Barlas, B., Helvacioğlu, Ş., Baykal, M. A. (2025). Su altı ve su üstünde seyir yapabilen hibrit bir otonom deniz platformunun su altı hidrodinamiğinin incelenmesi. Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi, 8(2), 197-216.

<https://doi.org/10.51513/jitsa.1652443>

1. Giriş

İlk denizcilik faaliyetlerinin M.Ö. 4000'li yıllara, su altı gemisi fikrinin ise 16. yüzyıla kadar uzandığı tahmin edilmektedir (Bevan, 1999; Davis, 1995). Su altı teknolojisi savunma sanayinde büyük bir öneme sahiptir. Dünya yüzeyinin büyük bir kısmının okyanuslarla kaplı olduğu ve açık sularda okyanus derinliğinin binlerce metreye ulaştığı düşünüldüğünde bu anlaşılabilir bir durumdur. Su altı gemilerinin su üstü gemilerine göre kısaca aşağıdaki gibi sıralanabilecek çeşitli avantajları vardır:

- a) Çoğu su üstü platformu sınırlı su altı sensör sistemleri ile donatılmıştır ve bu platformların su su altında angajman kabiliyetleri sınırlıdır.
- b) Su üstü gemilerinde kullanılan uzun menzilli etkili silahlar su altı hedeflerine karşı çoğunlukla kısıtlı etkiye sahiptir.
- c) Uydu ile tespit yüzeye çok yakın derinlikler hariç su altında etkisizdir.
- d) Özellikle özel kuvvetler operasyonları (SFO) için tasarlanan su altı harekât kabiliyetine sahip platformlar, düşman sularında tehlikeli bölgelere gizlilikle yaklaşabilme, sıyrılma yetenekleri, gizlilik özellikleri nedeniyle yüksek muharebe etkinliğine sahiptir, daha esnektir ve daha geniş bir harekât alanına sahiptir. Su yüzeyini ve kısıtlı olarak sualtını kullanabilen bir platform suüstü platformların avantajları ile sualtı platformlarının avantajlarını operasyon gereklerini sağlamak için gereği şekilde kullanabilme yetkinliğine sahiptir.

Bu avantajlar I. Dünya Savaşı'ndan bu yana denizaltıların etkin bir şekilde kullanılmasına yol açmıştır. Son yıllarda ülkeler denizaltıların yanı sıra muharebe esnekliklerini arttırmak amacıyla donanmalarına çok yönlü özel harekât platformlarını da dahil etmektedir. Bu gemiler çeşitli çok amaçlı görevleri yerine getirebilir ve bu özel operasyon gemi tiplerinden biri de yarı dalgıç askeri gemiler olarak adlandırılır. Yarı dalgıç askeri gemi, denizaltı ve su üstü gemilerinin avantajlı özelliklerini kullanarak hem su altında hem de su üstünde görev yapabilen hibrit bir muharebe gemisidir. Bu gemiler balast operasyonu ile radar kesit alanlarını en aza indirerek düşman sulara sızabilirler ve bazı özel amaçlı askeri görevleri yerine getirebilirler (Karabulut ve diğ., 2024). Günümüzde birçok ülkenin donanmasında yarı dalgıç gemiler bulunmaktadır. Öte yandan, tüm donanma gemilerinde olduğu gibi bu tür gemilerle ilgili bilgiler de gizli tutulduğundan, açık literatürde bu tür gemilerle ilgili akademik araştırmaların oldukça sınırlı olduğu anlaşılmaktadır.

Yarı dalgıç askeri gemiler yüzeyde yüksek hızlara ulaşabilen, aynı zamanda sığ dalış yaparak su altında da seyir yapabilen deniz araçları olduğundan, bu gemilerin hidrodinamik tasarımları incelenirken her iki husus bir arada ele alınmalıdır (Karabulut ve Barlas, 2025). Gövdelerinin alt kısmı kayıcı tekne formuna sahiptir. Kayıcı tekneler, özellikle hızın öncelikli olduğu durumlarda denizde çeşitli uygulama alanlarına sahiptir (Savitsky, 1985). Bu tekneler genellikle hidrodinamik kaldırma kuvveti üreten su hattı altında V tipi kesitlere ve ayna kış geometrisine sahiptir. Bu tasarım teknelerin pozitif trim açılarıyla çalışmasına olanak tanır ve teknenin ıslak boyunu azaltarak dalga direncini düşürür (Savitsky ve Core, 1980). Çok sayıda araştırmacı 1950'lerden bu yana yüksek hızlı kayıcı teknelerin hidrodinamiğini araştırmıştır (Tavakoli ve diğ., 2024). En eski çalışmalardan biri Davidson ve Suarez (1949) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada 50-Serisi tekne formları kullanılarak model deneyleri yapılmış ve 20 farklı tekne formu konfigürasyonunun performansı analiz edilmiştir. Bir başka erken deneysel analiz de Clement ve Blount (1963) tarafından Seri-62 formları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fridsma (1969) prizmatik kayıcı teknelerin sakin ve dalgalı su hidrodinamiklerini araştırmış, her bir modeli sakin suda ve düzenli dalgalarda test etmiştir. Daha yakın zamanda, Najafi ve diğ. (2020) Fridsma serisinin tek stepli bir versiyonu üzerinde deneyler yaparken, Vitiello ve diğ. (2022) stepli kayıcı teknelerin hidrodinamiğini deneysel olarak araştırmıştır. Bu tür teknelerinin hidrodinamiği için en yaygın olarak bilinen ampirik model, Savitsky (1964) tarafından geliştirilmiştir.

Sayısal yöntemler ve bilgisayar teknolojilerinde yaşanan gelişmelerle birlikte, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) araştırmacıların ilgi alanlarına girmiştir. Günümüzde hesaplamalı hidrodinamik, gemi tasarımında çok önemli rol oynamaktadır (Barsoum, 2000). Caponnetto ve diğ. (2003) bir HAD çözücüsü olan Comet'i kullanarak kayıcı teknelerinin dalgalar içindeki hareketlerini analiz etmiştir. Sukas ve diğ. (2017), Fridsma'nın (1969) gövde formunu kullanarak Star CCM+ ile HAD analizleri gerçekleştirmiş ve HAD yöntemlerinin yüksek hızlı kayıcı teknelerinin hareketini ve direncini başarılı

bir şekilde tahmin edebildiği sonucuna varmıştır. Hosseini ve diğ. (2021) keskin çeneli bir kayıcı tekne üzerinde çeşitli sayısal teknikler kullanarak HAD simülasyonları gerçekleştirmiş, Jin ve diğ. (2023) ise Fridsma'nın (1969) tekne formunun sakin su ve dalgalı deniz koşullarındaki performansını HAD analizleri ile incelemiştir.

Yarı dalgıç deniz araçlarının hidrodinamik tasarımının bir diğer önemli yönü de su altı operasyonlarındaki hidrodinamik performansları ve manevra kabiliyetleridir. Su altı araçlarının hidrodinamik tasarımı, optimum performans, manevra kabiliyeti ve rota ve derinlik tutma stabilitesi gibi çeşitli kritik unsurları içeren çok yönlü bir süreçtir. Tasarım, gövde formunun hidrodinamik performansı ile sensör yerleşimi ve yük kapasitesi gibi pratik operasyonel gereklilikleri dengelemelidir (Lidtker ve diğ., 2017; Hong ve diğ., 2024). Gövde formu, güç gereksinimlerini ve enerji verimliliğini doğrudan etkilemektedir (Amory ve Maehle; 2018). Araç serbest yüzeye yakın çalıştığında, bu ortamın sunduğu özel hidrodinamik zorluklar nedeniyle bazı kritik hususlar da ayrıca göz önüne alınmalıdır.

Su altı araçlarının hidrodinamik ve manevra özelliklerine ilişkin araştırmalar 1960'lardan beri devam etmektedir. Bu tür araçların manevrası için ilk başarılı model Gertler ve Hagen (1967) tarafından geliştirilmiş, daha sonra Smith ve diğ. (1978) ve Feldman (1979) tarafından model üzerinde iyileştirmeler yapılmıştır. Geleneksel yaklaşım olarak geçmiş dönem çalışmalarında, denizaltıların hidrodinamik tasarımı derin su koşullarına odaklanmıştır (Van Terwisga ve Hooft, 1988). Hesaplama ve deneysel araçlardaki ilerlemelerle birlikte, daha güncel çalışmalar yüzeye yakın veya yüzeydeki operasyonları da göz önüne almıştır (Amiri ve diğ., 2018 ve 2019; Dawson, 2014; Dong ve diğ., 2022; Toxopeus, 2008; Vaz ve diğ., 2010). Ancak bu çalışmalar ağırlıklı olarak konvansiyonel denizaltılara odaklanmıştır. Yarı batabilir askeri gemilerin gövde formları konvansiyonel denizaltılardan farklılık göstermektedir. Geleneksel denizaltı gövdeleri tipik olarak aksel simetrik dış gövde geometrisine sahiptir. Buna karşılık, yarı dalgıç askeri gemiler yüzeyde yüksek hızlara ulaşmak ve sadece sığ dalışlar gerçekleştirmek için planya gövde formlarıyla tasarlanmıştır. Bu nedenle, yarı dalgıçların hidrodinamik tasarımı yüksek hızlı yüzey koşullarını ve yüzeye yakın sığ dalış koşullarını da içermelidir.

1.1. Otonom Askeri Platformlar

Otonom askeri platformlar, insani riskleri azaltmak ve operasyonel kabiliyetleri güçlendirmek amacı ile çeşitli alanlarda geliştirilmekte ve kullanılmaktadır. Dronlar ve su altı araçları da dahil olmak üzere otonom sistemler istihbarat toplama, gözetleme ve keşif görevlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Carrera ve Paredes, 2020; Payal ve diğ., 2021; Alquwayzani ve Albuali, 2024). Özel amaçlı bazı tasarımlar insan için riskli olan ekstrem koşullarda keşif, yük teslimi ve iletişim desteği gibi görevleri yerine getirebilmektedir (Hong ve diğ., 2024). Ayrıca otonom sistemler, gerçek zamanlı veri ve karar verme desteği sağlayarak komuta ve kontrol operasyonlarına yardımcı olmaktadır. Bu sistemler büyük miktarda bilgiyi işleyebilmektedir ve komuta kademesi için stratejik öngörüler sağlayabilmektedir (Fučić ve diğ., 2021).

Su üstü ve su altı platformları dahil olmak üzere otonom askeri platformlar tasarımları, manevra kabiliyetleri ve operasyonel verimlilikleri bakımından çok önemli olan farklı hidrodinamik özellikleri barındırırlar. Bu araçların hidrodinamik özelliklerinin tasarım aşamasında detaylı olarak incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Hidrodinamik analizler sayesinde gövde formu iyileştirmeleri yapılabilir ve bu sayede düşük direnç, yüksek hız ve yüksek manevra kabiliyeti elde edilebilir. Ayrıca kontrol sistemlerinin tasarımı için öncelikle platformun hidrodinamiğinin iyi anlaşılması gereklidir. Bu nedenle hidrodinamik analiz bu platformların performansını arttırmak için temel bir mühendislik disiplini olarak öne çıkmaktadır.

Su üstü platformlarda deplasman tipi U kesitli formlar stabilize ve verimliliğin önemli olduğu durumlarda tercih edilirken, hızın önemli olduğu durumlarda hidrofoil formları ve V kesitli kayıcı tekne formları tercih edilmektedir (Kragelund ve diğ., 2013; Wang ve diğ., 2020; Matveev, 2022). Otonom su altı araçlarının hidrodinamik tasarımı ise direnci en aza indiren optimum gövde formunu elde etmeye odaklanmaktadır. Gao ve diğ. (2016) farklı aksel simetrik gövde formu kullanarak HAD analizleri gerçekleştirmiş ve bu formların direnç özelliklerini karşılaştırmıştır. Van He ve diğ. (2021) üç farklı gövde formu için HAD analizleri gerçekleştirmiş ve derin su koşulu altında bu formların hidrodinamik özelliklerini incelemiştir.

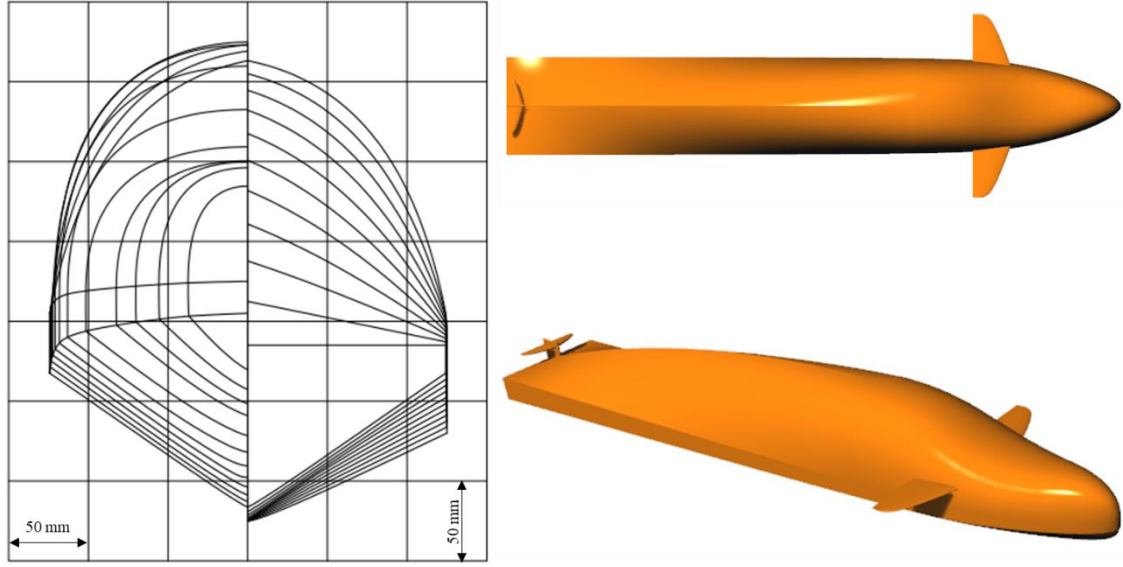
Otonom deniz platformları, yalnızca hidrodinamik performans açısından değil, aynı zamanda akıllı ulaşım sistemleri (AUS) kapsamında karar destek sistemleri, görev planlama algoritmaları ve çevresel farkındalık yetenekleri açısından da önemli araştırma alanları arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, platformların seyir verimliliği ve direnç karakteristikleri gibi temel fiziksel parametreleri, AUS bileşenlerinin karar alma süreçlerini doğrudan etkilemektedir. Özellikle düşük enerji tüketimi, görev optimizasyonu ve rotalama algoritmalarında kullanılmak üzere doğrulanmış hidrodinamik veriler, çoklu araç koordinasyonu ve otonom kontrol sistemleri için kritik bir girdi oluşturmaktadır (Rypkema ve diğ., 2018; Mirzaei ve Taghvaei, 2020; Panda ve diğ., 2021). Ayrıca, hibrit suüstü-sualtı görev profiline sahip araçların modellenmesi, değişen operasyonel modlar arasında geçiş stratejileri geliştirilmesine de olanak tanımaktadır (Yu ve diğ., 2019).

Literatür incelendiğinde otonom askeri deniz platformlarına yönelik hidrodinamik çalışmaların yalnızca yüzey operasyonlarına odaklandığı, ya da yalnızca su altı operasyonlarına odaklandığı anlaşılmaktadır. Bu çalışma kapsamında ilk kez hem su altında hem yüzeyde seyir yapabilen hibrit bir otonom askeri platforma ait gövde formu kullanılarak deneysel ve sayısal analizler yürütülmüştür. Makalenin temel amacı özgün bir gövde tasarımına sahip olan bu tür bir platformun su altındaki hidrodinamik performansını deneysel ve sayısal olarak kapsamlı bir şekilde araştırmaktır. Çalışmada, ölçekli su altı model deneyleri ile HAD simülasyonları gerçekleştirilerek, bu tür bir geminin su altındaki performansı direnç ve manevra yönünden incelenmiştir. Model deneyleri İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarında gerçekleştirilmiş, HAD analizleri ise Star CCM+ yazılımı kullanılarak yürütülmüştür. Direnç ölçümlerine ait belirsizlik ITTC (2014) yöntemi ile hesaplanmıştır. HAD analizlerine ait sayısal belirsizlik ise sistematik ağ sıkılaştırma ve zaman adımı sıkılaştırma teknikleri kullanılarak hesaplanmıştır. HAD modelinin doğruluğu, sayısal verilerle deneysel veriler karşılaştırılarak test edilmiştir. Ardından tekne etrafındaki hız alanı, basınç alanı ve dalga yükseklikleri detaylı olarak incelenmiştir. Araştırmadan elde edilen bulgular, yarı dalgıç tasarımlarının optimizasyonuna katkıda bulunacak, verimliliklerini ve operasyonel yeteneklerini artıracaktır.

2. Materyal ve metot

2.1. Geometri ve temel tanımlar

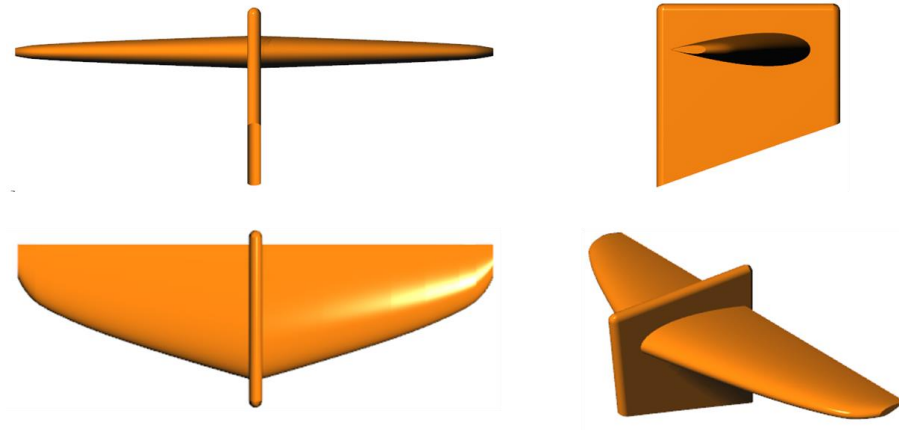
Şekil 1’de çalışmada kullanılan teknenin form planı ve üç boyutlu modeli verilmiştir. Tablo 1’de ise teknenin tam ölçekte ve model ölçeğindeki genel geometrik özellikleri görülmektedir. Gövde formu, hem yüzeyde yüksek performans elde etmek üzere yüksek hızlı kayıcı tekne özelliklerinin, hem de sualtı operasyonlarında düşük direnç üretmek üzere geleneksel sualtı araçlarının geometrik özelliklerinin bir bileşimidir. Bir yandan operasyonel ve işlevsel hem ister hem de kısıtları karşılarken öte taraftan su üstü ve sualtı performansını dengelemek amacı ile özel olarak tasarlanmıştır (Karabulut, 2024; Karabulut, 2025). Baş ve kıç tarafa yerleştirilen finler, kaldırıcı yüzey formunda olup dalış açılarını kontrol etmek ve rota stabilitesini arttırmak için eklenmiştir. Şekil 2 kıç finlerini, Şekil 3 ise baş finlerini göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan hibrit deniz aracı modeli, ticari veya askeri olarak sınıflandırılmış bir sistem olmayıp, tamamen araştırma amaçlı olarak tasarlanmış bir prototiptir.



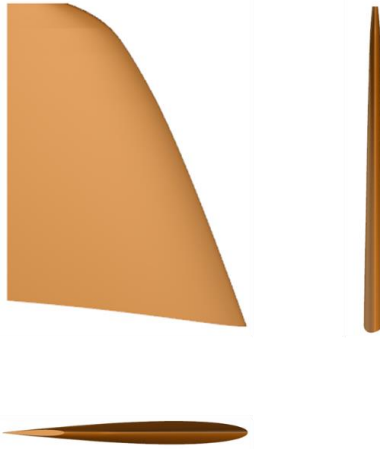
Şekil 1. Tekne modelinin form planı ve üç boyutlu CAD tasarımı.

Tablo 1. Sualtı ve su üstünde seyir yapabilen hibrit tekne formunun genel özellikleri.

Özellik	Sembol	Gemi	Model
Ölçek	λ	1	1/10
Tam boy	$L_{OA} (m)$	15,75	1,575
Su hattı boyu	$L_{WL} (m)$	14,78	1,478
Dikmeler arası boy	$L_{BP} (m)$	14,78	1,478
Genişlik	$B (m)$	2,50	0,250
Su çekimi	$T (m)$	0,78	0,078
Yükseklik	$H (m)$	3,00	0,300
Deplasman (yüzey)	$\Delta (t)$	10,6	0,0105
Deplasman (dalmış)	$\Delta (t)$	57,0	0,057
Islak alan (yüzey)	$S (m^2)$	35,8	0,358
Islak alan (dalmış)	$S (m^2)$	117,1	1,171
Dizayn hızı (yüzey)	$V_A (knot)$	30,0	9,487
Dizayn hızı (dalmış)	$V_S (knot)$	5,00	1,581
Ağırlık merkezinin boyuna konumu (yüzey)	$LCG (m)$	5,202	0,520
Ağırlık merkezinin boyuna konumu (dalmış)	$LCG (m)$	7,750	0,775
Dalış derinliği	$D (m)$	4,00	0,40

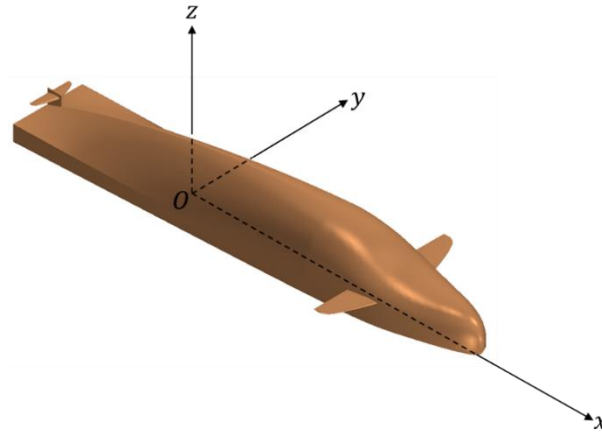


Şekil 2. Hibrit tekneye ait kış finleri.

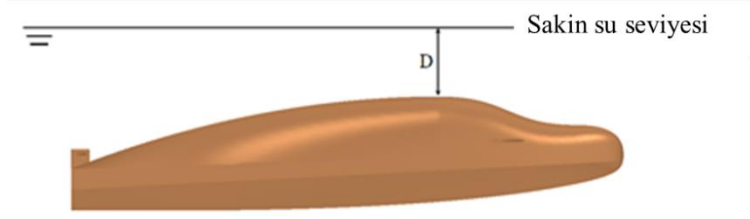


Şekil 3. Hibrit tekneye ait baş finleri.

Bu çalışmada, tüm sonuçlar Şekil 4'te gösterildiği gibi sağ el koordinat sistemi kullanılarak sunulmuştur. Koordinat sisteminin orijini geminin ağırlık merkezine yerleştirilmiş olup x , y ve z eksenleri sırasıyla baş tarafı, iskele tarafını ve düşey olarak yukarıya yönü göstermektedir. Dalış derinliği, Şekil 5'te şematik olarak gösterildiği gibi, teknenin en üst ucundan serbest su yüzeyine kadar olan düşey mesafe olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4. Çalışmada kullanılan sağ el kartezyen koordinat sistemi.



Şekil 5. Dalış derinliğinin tanımı.

Benzerlik hesabında kullanılan Reynolds sayısı (Re) ve Froude sayısı (Fr) sırası ile aşağıdaki denklemlerle tanımlanmaktadır.

$$Re = \frac{VL_{BP}}{\nu} \quad 1$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL_{BP}}} \quad 2$$

Burada V model hızı g yerçekimi ivmesi ve ν kinematik viskozitedir. Toplam direnç (R_T), sürtünme direnci (R_F) ve artık direncin (R_R) toplamı olup bu direnç bileşenleri aşağıdaki şekilde boyutsuzlaştırılmıştır.

$$C_T = \frac{R_T}{0,5\rho SV^2} \quad 3$$

$$C_F = \frac{R_F}{0,5\rho SV^2} \quad 4$$

$$C_R = \frac{R_R}{0,5\rho SV^2} \quad 5$$

Burada C_T , C_F ve C_R boyutsuz direnç katsayıları olup ρ su yoğunluğunu ifade etmektedir. Deneysel çalışmada C_F , Re 'nin bir fonksiyonu olarak ITTC 1957 denklemi kullanılarak tahmin edilmiştir; ITTC 1957 denklemi

$$C_F = \frac{0,075}{[\log(Re) - 2]^2} \quad 6$$

şeklinde verilmektedir. Yukarıdaki denklemlerde verilen L_{BP} ve S için Tablo 1'de verilen statik değerler kullanılmıştır.

2.2. Deney prosedürü

Tüm deneyler İTÜ Atan Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarında yapılmıştır. Çekme tankı 160 m uzunluk, 6 m genişlik, 3,4 m su derinliği boyutlarına ve 6 m/s en fazla çekme hızına sahiptir. Deneyler geminin 1/10 ölçekli modeli kullanılarak gerçekleştirilmiş ve model gövdesi ITTC (2011) tavsiyelerine göre ahşaptan imal edilmiştir. Kaba ahşap model 5 eksenli CNC kullanılarak kesilmiştir. Ardından astarlama, boyama ve markalama işlemleri uygulanmıştır (Danışman, 2016). Ayrıca, model gövdesi alt gövde ve üst kapak olmak üzere iki parça halinde üretilmiştir. Takıntılar ise üç boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiş ve sualtı deneylerinden hemen önce model gövdesine monte edilmiştir. Modelin çeşitli aşamadaki durumları sırası ile Şekil 6 ve Şekil 7'de sunulmuştur.



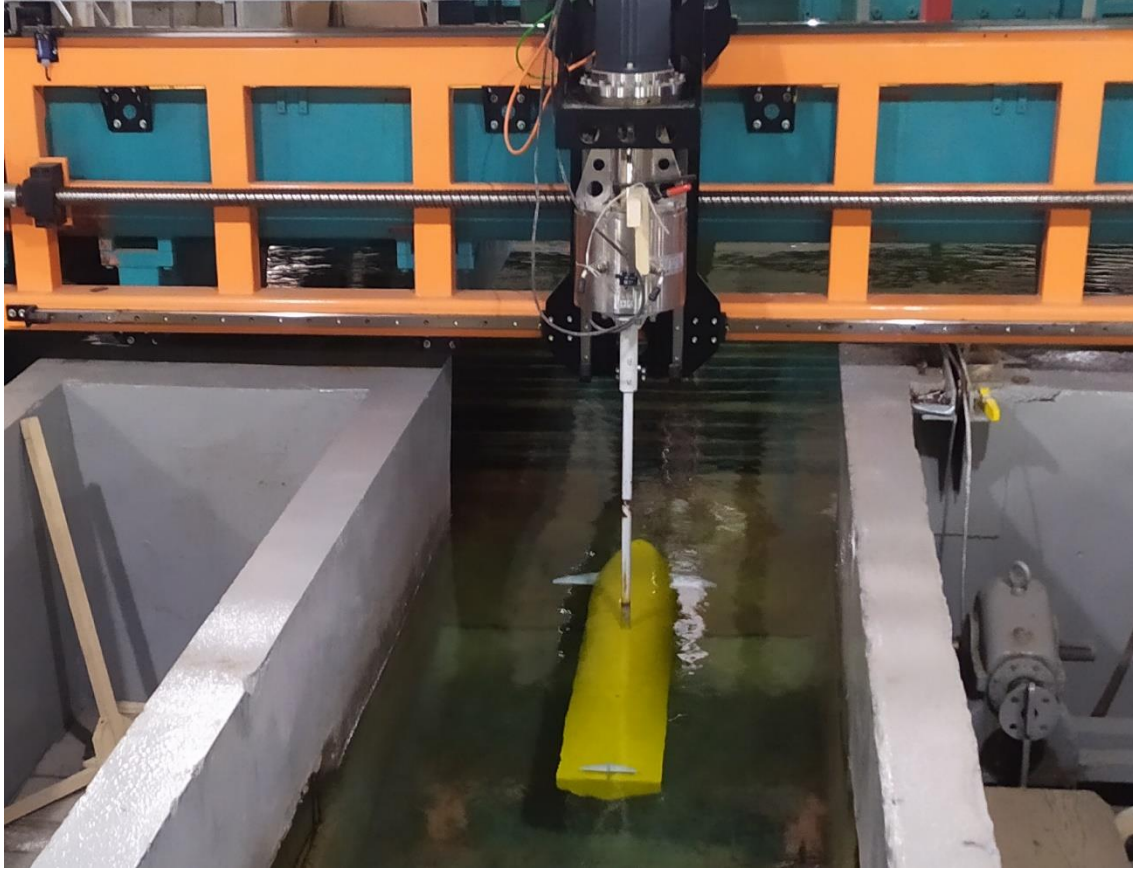
Şekil 6. Modelin alt gövdesi.



Şekil 7. Modelin su altı deneylerinden hemen önce, alt gövde ve üst kapak birleştirilmiş durumu.

2.3. Su Altı Deneyleri

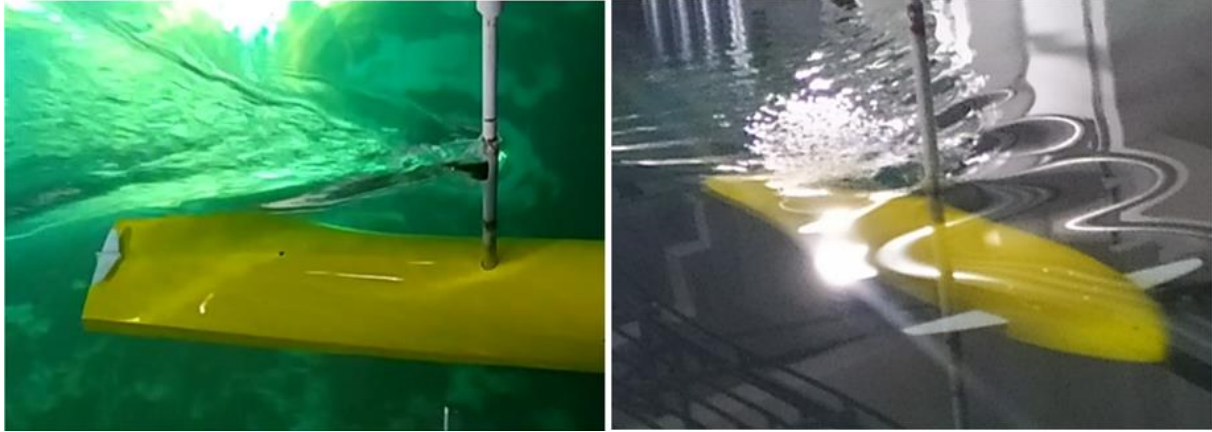
Su altı direnç deneyleri için düzlemsel hareket mekanizması (DHM) kullanılmıştır. Model 25.4 mm çapında bir mil ile DHM sistemine monte edilmiştir. Bağlantı mili, merkez hattı modelin ağırlık merkezinden geçecek şekilde sabitlenmiştir. Şekil 8’de modelin DHM sistemine bağlandıktan sonraki durumu verilmiştir. Direnç ölçümleri üç farklı dalış derinliğinde ve her derinlik için dört farklı hızda gerçekleştirilmiş ve toplam 12 direnç ölçümü elde edilmiştir. Tüm dalış derinliklerinde model düşey yönde sabit tutulmuştur. Bu ölçümlerin detayları Tablo 2’de özetlenmiştir. Modelin direnç deneyleri esnasındaki görünümü Şekil 9’da sunulmuştur.



Şekil 8. Modelin DHM sistemine sabitlendikten sonraki görünümü.

Tablo 2. Su altı direnç ölçümleri için deney matrisi.

D (cm)	V (m/s)	Fr	D/L_{BP}
20	0,8	0,210	0,135
20	1,2	0,315	0,135
20	1,6	0,420	0,135
20	2	0,525	0,135
30	0,8	0,210	0,203
30	1,2	0,315	0,203
30	1,6	0,420	0,203
30	2	0,525	0,203
40	0,8	0,210	0,271
40	1,2	0,315	0,271
40	1,6	0,420	0,271
40	2	0,525	0,271



Şekil 9. Direnç deneyi esnasında modelin görünümü

2.4. Deneysel Belirsizlik Analizi

Daha önce Delen ve Bal (2015; 2019) ve Kınacı ve diğ. (2020) Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarında çeşitli gemi tiplerinin direnç ölçümleri için belirsizlik analizleri gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada belirsizlik analizi ITTC (2014) yöntemi esas alınarak yapılmıştır. Bu yöntem yalnızca sonuçlar üzerinde baskın etkiye sahip olan belirsizlik kaynaklarını değerlendirmeye almaktadır. ITTC'ye (2014) göre dirençteki genel standart belirsizlik şu şekilde hesaplanabilir:

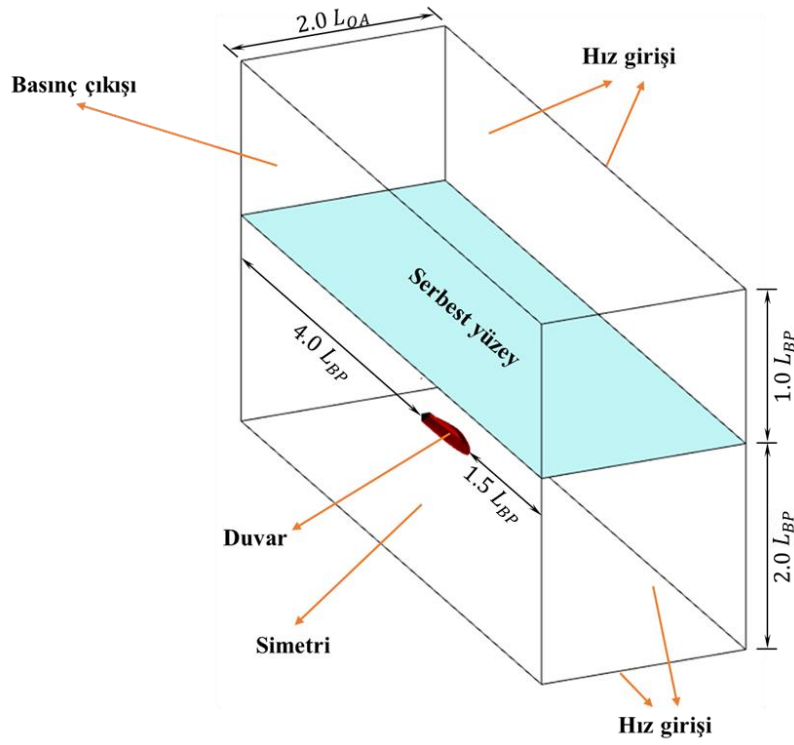
$$u_c'(R_T) = \sqrt{(u_1')^2 + (u_2')^2 + (u_3')^2 + (u_4')^2 + (u_A')^2} \quad 7$$

Burada u_1' , u_2' , u_3' , u_4' ve u_A' sırası ile model geometrisi, dinamometre kalibrasyonu, su sıcaklığı, çekme hızı ve tekrarlanabilirlik kaynaklarının direnç kuvvetinde (R_T) meydana getirdiği standart belirsizlik değerini ifade etmektedir. $u_c'(R_T)$ terimi ise dirençteki toplam standart belirsizliği ifade etmektedir. Her bir bileşenin hesaplanmasına ait detaylı bilgi ITTC'de (2014) mevcuttur. Hem su üstü hem de su altı ölçümleri için su sıcaklığı, çekme hızı, kuvvet ölçümleri için sistematik belirsizlik sınırları sırası ile $\pm 0,1^\circ\text{C}$, $\pm 0,02\text{ m/s}$ ve $\pm 0,15\text{ N}$ 'dir. Model deplasmanına bağlı sistematik belirsizlik yüzey ölçümleri için $0,05\text{ kg}$, su altı ölçümleri için ise $0,1\text{ kg}$ 'dır. Su altı deneyleri için iki ayrı sistematik belirsizlik kaynağı daha bulunmaktadır. Bunlar, modelin x doğrultusunda hızalanmasına ve dalış derinliğine ait belirsizlikler olup bu belirsizlikler sırası ile $0,1^\circ$ ve $0,1\text{ mm}$ 'dir.

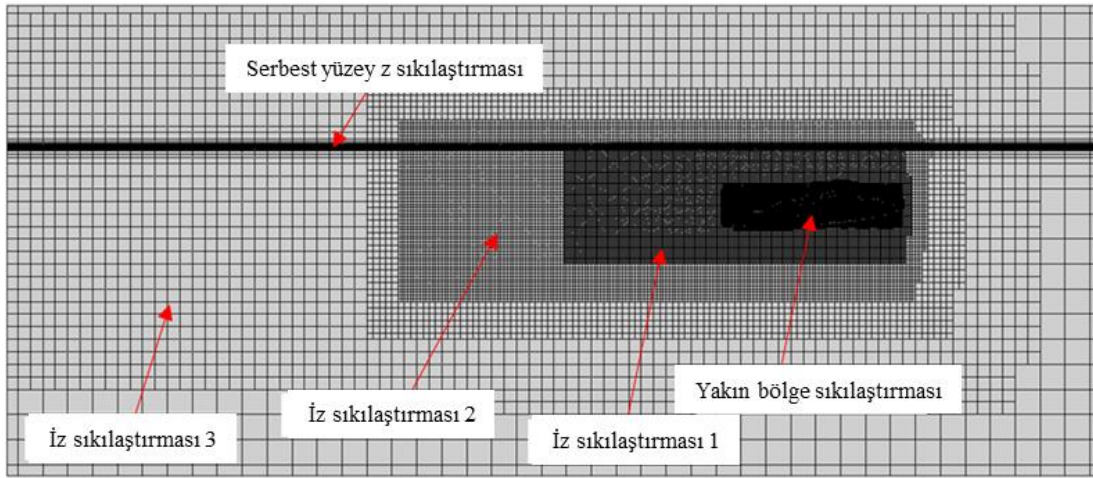
2.5. Sayısal Analiz İçin Matematiksel Model ve Sınır Şartları

Akış, zamana bağlı Reynolds ortalama Navier Stokes (RANS) denklemleri (Wilcox, 2006) ile modellenmiş ve Reynolds gerilmeleri, kayma gerilmesi taşınımlı (SST) $k-\omega$ türbülans modeli (Menter, 1994) kullanılarak modellenmiştir. Su ve hava arasındaki arayüzeyi hesaplamak için akışkan hacmi yöntemi kullanılmıştır (Hirt ve Nichols, 1981). Süreklilik, momentum, türbülans ve akışkan hacmi denklemleri ikinci dereceden hücre merkezi tabanlı sonlu hacimler yöntemiyle ayrıştırılmıştır (Bertolazzi ve Manzini, 2004). Zamansal ayrıklaştırma için ikinci dereceden kapalı bir şema kullanılmıştır. Basınç ve hız alanları, standart basınç düzeltme algoritması (Patankar ve Spalding, 1972) ile birleştirilmiştir. Su ve hava arasındaki serbest yüzeyi yakalamak için yüksek çözünürlüklü ara yüzey yakalama şeması (HRIC) (Muzaferija, 1998) kullanılmış, ve sayısal difüzyon hatasını en aza indirmek adına şema yerel Courant sayısından bağımsız hale getirilecek şekilde düzenlenmiştir (Bohm, 2014). Tüm simülasyonlar Star CCM+ (sürüm 23.02) yazılımı kullanılarak yürütülmüştür.

Su altı analizlerinde kullanılan hesaplama hacmi ve uygulanan sınır koşulları Şekil 10'da gösterilmektedir. Giriş sınırı teknenin en uç sınırından itibaren $1,5 \times L_{BP}$ mesafeye konumlandırılmıştır. Çıkış sınırı ise ayna kıçtan $4 \times L_{BP}$ geriye yerleştirilmiştir. Hesaplama hacminin dip sınırı sakin su yüzeyinden $2 \times L_{BP}$ aşağıda, üst sınırı ise $1 \times L_{BP}$ yukarıda konumlandırılmıştır. Hesaplama hacminin genişliği $2 \times L_{BP}$ olarak seçilmiştir. Akış alanındaki kritik bölgelerde sistematik ağ sıkılaştırma bölgeleri tanımlanmıştır. Çözüm ağı ve tanımlanan ağ sıkılaştırma bölgeleri Şekil 11'de sunulmuştur.



Şekil 10. Su Altı Analizleri İçin Hesaplama Hacmi ve Sınır Koşulları.



Şekil 11. Su Altı Analizleri İçin Çözüm Ağı ve Ağ Sıkılaştırma Bölgeleri.

2.6. Sayısal Belirsizlik Analizi

Sayısal belirsizlik tahminleri ITTC (2017) önerilerine göre yapılmıştır. Tüm sayısal simülasyonlar, iterasyon kaynaklı belirsizlikler diğer belirsizlik kaynaklarına kıyasla ihmal edilebilir seviyeye ininceye kadar sürdürülmüştür (Stern ve diğ., 2001; Eça and Hoekstra, 2014). Ağ çözünürlüğünden ve zaman adımından kaynaklanan belirsizlikler (U_G ve U_T) Çelik ve diğ. (2008) tarafından önerilen ağ ve zaman adımı yakınsama analizlerine göre hesaplanmıştır. Toplam sayısal belirsizlik (U_{SN}) ise aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır ITTC (2017).

$$U_{SN} = \sqrt{U_T^2 + U_G^2} \quad 8$$

3. Bulgular ve değerlendirmeler

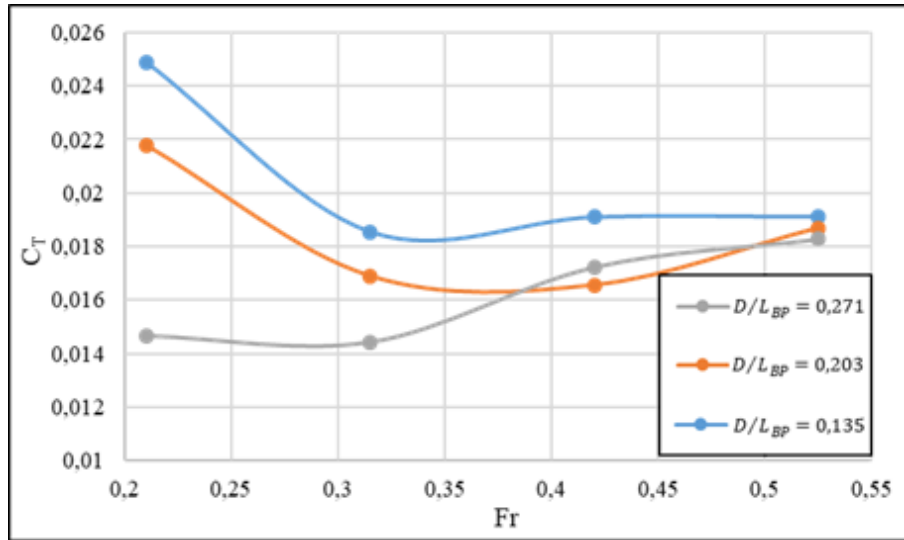
3.1. Deneysel sonuçlar

Su altı direnç ölçümleri için yürütülen deneysel belirsizlik analizi sonuçları Tablo 4’de $D = 20\text{ cm}$ dalış derinliği için verilmiştir. Tüm deneylerde u_A' bileşeninin baskın belirsizlik kaynağı olduğu, u_2' teriminin ise minör bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Yüzey ölçümlerinde u_1' terimi de minör bir etkiye sahip olup hem yüzey hem su altı ölçümlerinde u_3' ve u_4' terimleri ihmal edilebilir düzeyde bir belirsizliğe yol açmaktadır. Yüzey deneylerinde hesaplanan en büyük genişletilmiş belirsizlik %2,65 ile $Fr = 0,527$ değerinde gerçekleşirken, en düşük genişletilmiş belirsizlik %1,16 olarak $Fr = 1,061$ değerinde ortaya çıkmaktadır. Su altı ölçümlerinde en büyük genişletilmiş belirsizlik %10,4 olarak en düşük deney hızında hesaplanmış, bu değer en yüksek hıza karşılık gelen $Fr = 0,525$ ’de %1,33’e düşmüştür.

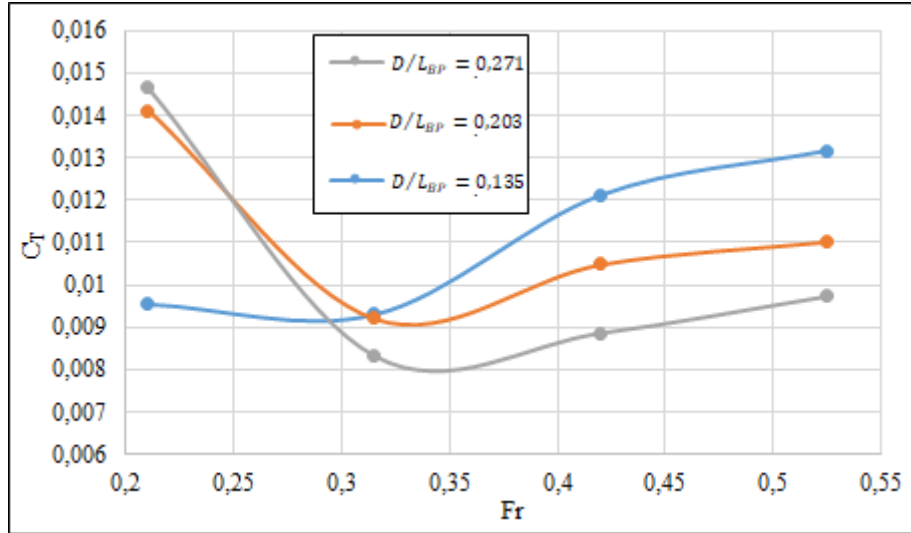
Tablo 4. Su altı direnç ölçümleri için belirsizlik analizi sonuçları ($D = 20\text{ cm}$)

Bileşen	Bağıl belirsizlik yüzdeleri			
	$Fr = 0,210$	$Fr = 0,315$	$Fr = 0,420$	$Fr = 0,525$
Geometri (u_1')	%0,93	%0,42	%0,20	%0,12
Dinamometre (u_2')	%2,41	%1,09	%0,51	%0,31
Su sıcaklığı (u_3')	%0,08	%0,04	%0,02	%0,01
Çekme hızı (u_4')	%0,37	%0,17	%0,08	%0,05
Tekrarlanabilirlik (u_A')	%4,60	%2,08	%0,98	%0,59
Toplam (u_c')	%5,22	%2,36	%1,11	%0,67
Genişletilmiş (U_D)	%10,4	%4,72	%2,20	%1,33

Şekil 12 dalış derinlikleri için ölçülen toplam direnç kuvveti katsayılarını Froude sayısının fonksiyonu olarak göstermektedir. Bu sonuçlara montaj miline etki eden kuvvetler de dahildir. Modelin direnç kuvvetini belirlemek için mile etkiyen direnç kuvveti belirlenip çıkarılmalıdır. Montaj mili yüzey yarıçapı dairesel bir silindir olup ve birçok araştırmacı yüzey yarıçapı dairesel silindirlerin direnci için deneysel (Hay, 1947; Chaplin ve Teigen, 2003), sayısal (Kawamura ve diğ., 2002; Rosetti ve diğ., 2013) veya hem deneysel hem de sayısal (Benitz ve diğ., 2016; Ducrocq ve diğ., 2017) çalışmalar yapmıştır. Mile etkiyen direnç kuvvetini belirlemek için, bu çalışma ile aynı silindir çapını ($d = 25,4\text{ mm}$), benzer en-boy oranlarını ve aynı akış hızlarını kapsadığından Hay (1947) tarafından yapılan deneysel sonuçlardan yararlanılmıştır. Mil üzerine etkiyen kuvvetler çıkarıldıktan sonra model üzerine etkiyen direnç kuvveti katsayıları Şekil 13’te gösterilmektedir. Gövdenin direnç kuvvetini belirlemeye yönelik bu yaklaşımda, mil-gövde etkileşimlerinin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu varsayılmaktadır.



Şekil 12. Model ve bağlantı miline etkiyen direnç kuvveti katsayıları.



Şekil 13. Bağlantı miline etkiyen kuvvetler çıkarıldıktan sonra belirlenen direnç kuvveti katsayıları

3.2. Sayısal Sonuçlar

Su altı analizleri için $D = 20 \text{ cm}$, $V = 2 \text{ m/s}$ değerlerinde zaman adımı ve ağ çözünürlüğü yakınsama analizleri yürütülmüş sonuçlar Tablo 7 ve Tablo 8'de özetlenmiştir. Buna göre toplam dirençteki ağ çözünürlüğü belirsizliği %0,64, zaman adımı belirsizliği %0,90 ve toplam sayısal belirsizlik %1,22 olarak belirlenmiştir.

Tablo 7. Ağ Yakınsama Analizi Sonuçları ($V = 2 \text{ m/s}$, $D = 20 \text{ cm}$).

Simülasyon	$N (\times 10^{-6})$	$C_T (\times 10^3)$
Kaba	0,383	14,075
Orta	0,931	13,895
Sıkı	2,198	13,981
Yakınsama durumu		Salınlımlı
U_G		0,64%

Tablo 8. Zaman Adımı Yakınsama Analizi Sonuçları

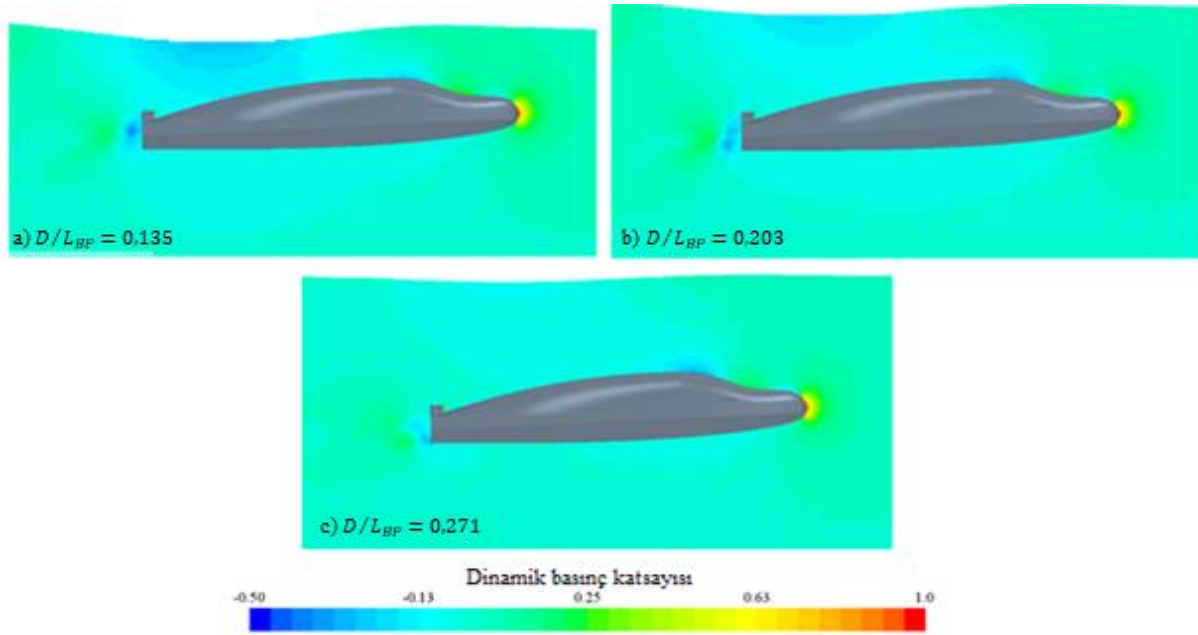
Simulation	Δt (s)	$C_T (\times 10^3)$
Kaba	0,020	14,117
Orta	0,010	13,865
Sıkı	0,005	13,981
Yakınsama durumu		Salınlımlı
U_T		0,90%

Tablo 9 deneysel ve sayısal olarak hesaplanan toplam direnç katsayısı değerlerini karşılaştırmaktadır. Tabloda ayrıca bağıl fark ($|E|$) değerleri de gösterilmektedir. Sonuçlar toplam on iki analizin HAD ile deney arasındaki bağıl farkın altısında %5'in altında, dördünde %5 ile %10 arasında olduğunu, yalnızca iki analizde %10'un üzerinde bağıl fark olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlara göre HAD ve deney sonuçlarının iki analiz dışında uyum içerisinde olduğu söylenebilir. Bununla birlikte $Fr = 0,21$ için iki dalış derinliğinde %30'un üzerinde bağıl farklar ortaya çıktığı görülmektedir. Bu farklar kısmen düşük hızlarda deneysel belirsizliğin daha yüksek olduğuna atfedilebilir. Ayrıca bağlantı mili ile gövde etkileşiminin ihmal edilmesinin de bu fark üzerinde rol oynadığı düşünülebilir.

Tablo 9. Deneysel ve sayısal olarak hesaplanan C_T değerlerinin karşılaştırılması.

Fr	$D/L_{BP} = 0,135$			$D/L_{BP} = 0,203$			$D/L_{BP} = 0,271$		
	Deney	HAD	$ E $	Deney	HAD	$ E $	Deney	HAD	$ E $
0,525	13,15	13,98	%6,3	11,01	11,44	%3,9	9,72	10,29	%5,8
0,420	12,11	11,97	%1,1	10,48	10,07	%3,9	8,86	9,19	%3,8
0,315	9,30	9,82	%5,6	9,20	9,24	%0,4	8,31	8,96	%7,9
0,210	9,54	9,40	%1,4	14,10	9,27	%34,3	14,64	9,22	%37,0

Hem sayısal hem deneysel sonuçlar belirli bir hız için dalış derinliği arttıkça direnç kuvvetinin azaldığını göstermektedir. Bu durum serbest yüzeye yaklaştıkça ortaya çıkan etkileşimin tekne etrafındaki hız ve basınç alanını ciddi biçimde değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 14 farklı dalış derinlikleri için teknenin merkez düzlemi boyunca hesaplanan dinamik basınç katsayısı dağılımlarını göstermektedir. Dalış derinliği azaldıkça serbest yüzey etkilerinin bir sonucu olarak teknenin hemen arkasındaki bölgede dinamik basıncın düştüğü görülmektedir. Bu düşüş dirençteki artışın temel sebebi olarak gösterilebilir.



Şekil 14. Farklı derinliklerde su altında ilerleyen tekne etrafındaki dinamik basınç dağılımı ($Fr = 0,525$)

4. Sonuçlar

Yapay zekâ ve kontrol sistemleri teknolojilerinde yaşanan güncel gelişmeler sayesinde otonom askeri deniz platformlarının kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu araçların direnç özelliklerinin iyi anlaşılması, gerek bu araçların hidrodinamik performanslarının iyileştirilmesi bakımından, gerekse otonom kontrol sistemlerinin tasarımı bakımından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, su altı ve su üstünde seyir yapabilen hibrit bir otonom askeri platformun su altındaki hidrodinamik performansı hem deneysel hem de sayısal yöntemler kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, bu tür bir deniz aracının su altı operasyonlarındaki direnç ve hidrodinamik davranışlarını anlamak ve otonom deniz araçlarının tasarım optimizasyonuna yönelik veriler elde etmektir.

Gerçekleştirilen model deneyleri, farklı dalış derinliklerinde ve hızlarda ölçülen direnç kuvvetleri açısından değerlendirilmiştir. Ölçümler, deneysel belirsizlik analizleri ile desteklenmiş ve belirsizlik seviyeleri belirlenmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki:

- Dalış derinliği arttıkça toplam direnç azalmakta, bu da serbest yüzeye yakın operasyonların daha yüksek hidrodinamik etkilere maruz kaldığını göstermektedir.
- Serbest yüzey etkisi nedeniyle kıç taraftaki dinamik basınç düşüşü, toplam direnç kuvvetinde belirgin bir artışa neden olmaktadır.
- En yüksek direnç değerleri, en düşük dalış derinliklerinde ve en yüksek hızlarda gözlenmiştir.

Deneysel veriler, modelin operasyonel koşullarda nasıl bir performans sergilediğini belirlemek açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, deneysel sonuçların Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizleriyle doğrulanması, kullanılan metodolojinin güvenilirliğini artırmaktadır.

Star CCM+ yazılımı ile gerçekleştirilen HAD simülasyonları, deneysel verilerle kıyaslanmış ve genel olarak güçlü bir korelasyon gözlemlenmiştir. HAD analizleri ile elde edilen veriler aşağıdaki önemli sonuçları ortaya koymuştur:

- Sayısal ve deneysel veriler arasındaki bağıl fark genellikle %5'in altında kalmıştır, bu da HAD yöntemlerinin bu tür analizlerde güvenilir bir alternatif olduğunu kanıtlamaktadır.
- En büyük farklar düşük hız ve küçük dalış derinliği koşullarında ortaya çıkmıştır, bu durum serbest yüzey etkisinin sayısal olarak modellenmesinin zorluklarından kaynaklanabilir.
- Dalış derinliği arttıkça direnç azalmakta ve HAD analizleri de bu eğilimi başarıyla tahmin etmektedir.

- HAD ile elde edilen akış alanı görselleştirmeleri, tekne etrafındaki basınç dağılımlarını ve akış yapısını detaylı bir şekilde ortaya koymuştur.

Bu bulgular, HAD yöntemlerinin hibrit yarı dalgıç askeri gemiler gibi karmaşık tasarımların analizinde başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Bu çalışmada, yarı dalgıç bir hibrit askeri platformun yalnızca sabit dalış derinliğindeki direnç ve hidrodinamik performansı incelenmiştir. Ancak, bu tür platformların operasyonel kabiliyeti açısından daha kapsamlı analizlere ihtiyaç duyulmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda yarı dalgıç askeri platformların dalgalı deniz koşullarındaki performansı, sevk sistemi performansı, değişken dalış açıları, manevra kabiliyeti ve serbest yüzey etkisinin zamana bağlı davranışı gibi daha karmaşık hidrodinamik koşullar incelenecektir. Ayrıca bu çalışma kapsamında bağlantı mil ile gövde etkileşimi sayısal olarak incelenmemiş olup bu konu da gelecekteki çalışmalarda ele alınacaktır.

Bu çalışma, hibrit askeri platformların tasarım sürecine önemli katkılar sunmakta olup, elde edilen veriler yalnızca akademik araştırmalara değil, aynı zamanda savunma sanayiindeki mühendislik uygulamalarına da rehberlik edebilecek niteliktedir. Ayrıca çalışma, hibrit otonom deniz platformlarının hidrodinamik performansını kapsamlı şekilde ele alarak, sadece geleneksel deniz mühendisliği literatürüne değil, aynı zamanda akıllı ulaşım sistemleri (AUS) kapsamında geliştirilen görev planlama, enerji verimliliği ve karar destek altyapılarına da doğrudan katkı sağlamakta; üretilen hidrodinamik veriler, bu sistemlerde kullanılabilecek nitelikte çıktılar sunmaktadır.

Araştırmacıların katkı oranı beyanı

Yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

Destek ve teşekkür beyanı

Bu çalışma, birinci yazarın İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Bölümü'nde yürütmekte olduğu doktora çalışmasının bir parçası olup, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (Proje No: 45756) tarafından kısmen desteklenmiştir. Yazarlar, deneysel çalışmalar sırasında sağladıkları değerli katkılardan dolayı Prof. Dr. Devrim Bülent Danışman'a ve İTÜ Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı personeline teşekkürlerini sunar.

Çıkar çatışması beyanı

Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Referanslar

Alquwayzani, A. A., & Albuali, A. A. (2024). A Systematic Literature Review of Zero Trust Architecture for Military UAV Security Systems. *IEEE Access*.

Amiri M.M., Esperança P.T., Vitola M.A., & Sphaier S.H. (2018). How does the free surface affect the hydrodynamics of a shallowly submerged submarine? *Appl. Ocean Res.* 76:34–50. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.04.008>

Amiri M.M., Sphaier S.H., Vitola M.A., & Esperança P.T. (2019) URANS investigation of the interaction between the free surface and a shallowly submerged underwater vehicle at steady drift. *Appl. Ocean Res.* 84:192–205. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.01.012>

Amory, A., & Maehle, E. (2018). Modelling and CFD simulation of a micro autonomous underwater vehicle SEMBIO. In *OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston* (pp. 1-6). IEEE.

Benitz, M.A., Carlson, D.W., Seyed-Aghazadeh, B., Modarres-Sadeghi, Y., Lackner, M.A., & Schmidt, D.P. (2016). CFD simulations and experimental measurements of flow past free-surface piercing, finite length cylinders with varying aspect ratios. *Computers & Fluids*, 136, 247-259.

Bertolazzi, E., & Manzini, G. (2004). A cell-centered second-order accurate finite volume method for convection–diffusion problems on unstructured meshes. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 14(08), 1235-1260.

- Bevan, J.** (1999). Diving bells through the centuries. *South Pacific Underwater Medicine Society Journal*, 29 (1). ISSN 0813-1988.
- Bohm, C.** (2014). A Velocity Prediction Procedure for Sailing Yachts Based on Integrated Fully Coupled RANSE-Free-Surface Simulations, Delft.
- Caponnetto M., Söding H., & Azcueta R.** (2003). Motion Simulations for Planing Boats in Waves. *Ship Technology Research*, 50(4), 182–198. <https://doi.org/10.1179/str.2003.50.4.006>
- Carrera, E. V., & Paredes, M.** (2020). Analysis and evaluation of the positioning of autonomous underwater vehicles using acoustic signals. In *Developments and Advances in Defense and Security: Proceedings of MICRADS 2019* (pp. 411-421). Springer Singapore.
- Chaplin, J. R., & Teigen, P.** (2003). Steady flow past a vertical surface-piercing circular cylinder. *Journal of Fluids and Structures*, 18(3-4), 271-285.
- Clement E.P., & Blount D.L.** (1963). *Resistance tests of a systematic series of planing hull forms*. SNAME Trans, 71.
- Çelik, I.B., Ghia, , 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* 30:078001-1-4. <https://doi.org/10.1115/1.2960953>
- Danışman, D. B.** (2016). Ata Nutku Model Deney Tankı Çekme Deneyleri İçin Model İmalat Süreci. *GİDB Dergi*(07), 49-60.
- Davidson K.S.M., & Suzrez, A.** (1949). Test of Twenty Related Models of V-Bottom Motor Boats EMB Series 50. Report R-47, DTMB. Available at: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/AD0224761.pdf>
- Davis, R. H.** (1995). Deep Diving and Submarine Operations Part 1 and 2. Siebe Gorman and Co Ltd.
- Dawson E. (2014) *An Investigation into the Effects of Submergence Depth, Speed and Hull Length-to-Diameter Ratio on the near Surface Operation of Conventional Submarines*. PhD Thesis, University of Tasmania, AU
- Delen, C., & Bal, S.** (2015). Uncertainty analysis of resistance tests in Ata Nutku ship model Testing Laboratory of Istanbul Technical University. *Turkish Journal of Maritime and Marine Sciences*, 1(2): 69-88.
- Delen, C., & Bal, S.** (2019). ‘Uncertainty analysis of numerical and experimental resistance tests for ONR Tumblehome’. *Sustainable Development and Innovations in Marine Technologies: Proceedings of the 18th International Congress of the Maritime Association of the Mediterranean (IMAM 2019)*; Sept 9–11; Varna, Bulgaria. CRC Press. p. 142.
- Dong, K., Wang, X., Zhang D., Liu, L., & Feng, D.** (2022) CFD Research on the Hydrodynamic Performance of Submarine Sailing near the Free Surface with Long-Crested Waves. *J. Mar. Sci. Eng.* <https://doi.org/10.3390/jmse10010090>
- Ducrocq, T., Cassan, L., Chorda, J., & Roux, H.** (2017). Flow and drag force around a free surface piercing cylinder for environmental applications. *Environmental Fluid Mechanics*, 17(4), 629-645.
- Eça, L. ve Hoekstra, M. (2014). A procedure for the estimation of the numerical uncertainty of CFD calculations based on grid refinement studies, *J. Comput. Phys.* 262:104-130, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2014.01.006>.
- Feldman J.** (1979). *DTNSRDC revised standard submarine equations of motion*, Tech. rep. David W Taylor Naval Ship Research and Development Center, Ship Performance Dept, Bethesda, MD. Available at: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA071804.pdf>
- Fridsma G.** (1969) *A Systematic Study of the Rough Water Performance of Planing Boats*. Davidson laboratory, Stevens Institute of Technology (November 1969), Technical Report 1275. Available at: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD0708694.pdf>

Fučík, J., Frank, L., & Stojar, R. (2021). Autonomous systems and cyberspace: Opportunities for the armed forces. In *International conference on modelling and simulation for autonomous systems* (pp. 440-451). Cham: Springer International Publishing.

Gao, T., Wang, Y., Pang, Y., & Cao, J. (2016). Hull shape optimization for autonomous underwater vehicles using CFD. *Engineering applications of computational fluid mechanics*, 10(1), 599-607.

Gertler M., & Hagen G.R. (1967). *Standard equations of motion for submarine simulation*, Tech. rep. David W Taylor Naval Ship Research and Development Center, Bethesda, MD. Available at: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD0653861.pdf>

Hay, A.D. (1947). Flow about semi-submerged cylinders of finite length, report, 174 pp. *Princeton Univ., Princeton, NJ*.

Hirt, C.W., & Nichols, B.D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J Comput. Phys.* 39(1):201–225. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)

Hong, H., Chen, X., Wei, S., Shen, G., & Shu, X. (2024, May). Digital Twin System for Condition Monitoring and Control of Unmanned Autonomous Vehicle Powertrain. In *International conference on the Efficiency and Performance Engineering Network* (pp. 571-578). Cham: Springer Nature Switzerland.

Hong, L., Wang, X., & Zhang, D.S. (2024). CFD-based hydrodynamic performance investigation of autonomous underwater vehicles: A survey. *Ocean Engineering*, 305, 117911.

Hosseini A., Tavakoli S., Dashtimanesh ., Sahoo P.K., & Korgesaar M. (2021). Performance prediction of a hard-chine planing hull by employing different CFD models. *J. Mar. Sci. Eng.* 9 (5), 481. <https://doi.org/10.3390/jmse9050481>.

ITTC. (2011a). Ship models. ITTC – recommended procedures and guidelines.

ITTC. (2011b). Recommended procedures and guidelines: practical guidelines for ship CFD, 26th Int. Towing Tank Conf. 2011.

ITTC. (2014). General guideline for uncertainty analysis in resistance tests – 7.5-02-02-02’, in International Towing Tank Conference.

ITTC. (2017). Recommended Procedures and Guidelines: Uncertainty analysis in CFD verification and validation methodology and procedures. 2017. ITTC - 7.5-03-01-01

Jin S., Peng H., Qiu W., Hunter R., & Thompson S. (2023) Numerical simulation of planing hull motions in calm water and waves with overset grid. *Ocean Engineering* 287, 115858. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115858>

Karabulut, U.C., & Barlas B. (2025). Computational Analysis on the Hydrodynamics of a Semi-Submersible Naval Ship. *J. Marine Sci. and Appl.* (in press).

Karabulut, U.C., Barlas, B., & Baykal, M.A. (2024). Design Prioritization Study For A Semi-Submersible Naval Ship Based On Fast Decision Method. *Journal of Naval Sciences and Engineering*, 20(1), 3-19.

Kawamura, T., Mayer, S., Garapon, A., & Sørensen, L. (2002). Large eddy simulation of a flow past a free surface piercing circular cylinder. *J. Fluids Eng.*, 124(1), 91-101.

Kragelund, S., Dobrokhodov, V., Monarrez, A., Hurban, M., & Khol, C. (2013). Adaptive speed control for autonomous surface vessels. In *2013 OCEANS-San Diego* (pp. 1-10). IEEE.

Lidtke, A. K., Turnock, S. R., & Downes, J. (2017). Hydrodynamic Design of Underwater Gliders Using $k - k_L - \omega$ Reynolds Averaged Navier–Stokes Transition Model. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 43(2), 356-368.

Matveev, K. I. (2022). Modeling of Autonomous Hydrofoil Craft Avoiding Moving Obstacles. In *SNAME Maritime Convention* (p. D021S012R001). SNAME.

- Menter, F.R.** (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence modelling for engineering applications, *AIAA Journal* 32(8):1598-1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- Mirzaei, M., & Taghvaei, H.** (2020). A full hydrodynamic consideration in control system performance analysis for an autonomous underwater vehicle. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 99, 129-145.
- Muzaferija, S., & Perie M.** (1998). Computation of Free Surface Flows Using Interface-Tracking and Interface-Capturing Methods. In: Mahrenholtz O., Markiewicz M. (Eds.) *Nonlinear Water Wave Interaction*. Computational Mechanics Publications, Southampton, Chap. 2
- Najafi A., Nowruzi H., & Amero M.J.** (2020). Hydrodynamic assessment of stepped planing hulls using experiments, *Ocean Engineering* 217, 107939. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107939>
- Panda, J. P., Mitra, A., & Warrior, H. V.** (2021). A review on the hydrodynamic characteristics of autonomous underwater vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 235(1), 15-29.
- 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. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(72\)90054-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(72)90054-3)
- Payal, M., Dixit, P., Sairam, T. V. M., & Goyal, N.** (2021). Robotics, AI, and the IoT in defense systems. *AI and IoT-Based Intelligent Automation in Robotics*, 109-128.
- Rosetti, G.F., Vaz, G., Hoekstra, M., Gonçalves, R.T., & Fajarra, A.L.** (2013). CFD calculations for free-surface-piercing low aspect ratio circular cylinder with solution verification and comparison with experiments. In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (Vol. 55416, p. V007T08A056). American Society of Mechanical Engineers.
- Rypkema, N. R., Fischell, E. M., Forrest, A. L., Benjamin, M. R., & Schmidt, H.** (2018). Implementation of a hydrodynamic model-based navigation system for a low-cost AUV fleet. In *2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV)* (pp. 1-6). IEEE.
- Savitsky D.** (1964). Hydrodynamic design of planing hulls. *Mar. Technol.* 1, 1. <https://doi.org/10.5957/mtl.1964.1.4.71>
- Savitsky D.** (1985) Chapter IV: planing craft. *Nav. Eng. J.* 113–140. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1985.tb03397.x>
- Savitsky D., & Core J.L.** (1980). Re-evaluation of the planing hull form. *J. Hydronautics* 14(2), 34–47. <https://doi.org/10.2514/3.63184>
- Smith N., Crane J., & Summey D.** (1978). *SDV simulator hydrodynamic coefficients*, NCSC rep. TM-231-78, Naval Coastal Systems Center, Panama City, FL.
- Stern, F., Wilson, R.V., Coleman, H.W., & Paterson, E.G.** (2001). Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations—part 1: methodology and procedures. *J. Fluids Eng.*, 123(4), 793-802.
- Sukas O.F., Kinaci O.K., Cakici F., & Gokce M.K.** (2017). Hydrodynamic assessment of planing hulls using overset grids. *Appl. Ocean Res.* 65, 35–46. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.03.015>
- Tavakoli S., Zhang M., Kondratenko A.A., & Hirdaris S.** (2024). A review on the hydrodynamics of planing hulls. *Ocean Engineering*, 303, 117046. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117046>
- Toxopeus S.L.** (2008) Viscous-flow calculations for bare hull DARPA SUBOFF submarine at incidence. *Int Shipbuild Prog* 55(3):227–251. <https://doi.org/10.3233/ISP-2008-0048>
- Van He, N., Tuan, V. N., & Van Hien, N.** (2021). Analysis hydrodynamic performance of the autonomous underwater vehicle for a different hull shape. In *Regional Conference in Mechanical Manufacturing Engineering* (pp. 458-468). Singapore: Springer Nature Singapore.

Van Terwisga T.J.C., & Hooft J.P. (1988) Hydrodynamic support in the design of submarines. In: *Bicentennial maritime symposium*. Sydney, Australia, pp.241–251.

Vaz G., Toxopeus S.L., & Holmes S. (2010) Calculation of manoeuvring forces on submarines using two viscous-flow solvers. In: *29th international conference on ocean, offshore and arctic engineering (OMAE)*, Shanghai, China, OMAE2010-20373. <https://doi.org/10.1115/OMAE2010-20373>

Vitiello L., Mancini S., Niazmand Bilandi R., Dashtimanesh A., De Luca F., & Nappo V. (2022) A comprehensive stepped planing hull systematic series: Part 1 – resistance test. *Ocean Engineering* 266, 112242. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112242>

Wang, H., Zhu, R. C., Huang, S., & Zha, L. (2020). Hydrodynamic analysis of a planing hull in calm water using overset mesh and rigid body motion method. In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference* (pp. ISOPE-I). ISOPE.

Wilcox, D.C. (2006). *Turbulence modelling for CFD. Third ed.* DCW Industries.

Yu, X., Chen, W. N., Hu, X. M., Gu, T., Yuan, H., Zhou, Y., & Zhang, J. (2019). Path planning in multiple-AUV systems for difficult target traveling missions: A hybrid metaheuristic approach. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 12(3), 561-574.