

SERBEST SU YÜZEYİNE YAKIN DERİNLİKTEKİ DENİZALTININ MANEVRA SORUNLARININ İNCELENMESİ

Kağan YÜCE¹, Devrim Bülent DANIŞMAN²

¹*İstanbul Teknik Üniversitesi | yuce20@itu.edu.tr | ORCID 0000-0003-1703-9481*

²*İstanbul Teknik Üniversitesi | bulent.danisman@itu.edu.tr | ORCID 0000-0001-6320-5351*

ÖZET

Gizlilik, denizaltıların en etkili özelliklerinden birisi olup; periskop derinliğinde bu özelliğini kaybetmeden görevlerini icra etmesi gerekmektedir. Ancak denizaltıların sahip olduğu form nedeniyle serbest su yüzeyine yakın derinlikte oluşan basınç dağılımı denizaltıyı başlı bir şekilde dalma yönünde harekete zorlamaktadır. Bu durumu nümerik olarak incelemek amacıyla DARPA SUBOFF AFF-8 geometrisi ile OpenFOAM açık kaynak kodlu yazılımın çok fazlı akış çözücüsü kullanılmıştır. Ağ yapısı olarak da oluşturulan model, akış hacminden bağımsız dinamik hareket edebilen 'overset' hacmine yerleştirilmiştir. Oluşturulan ağın Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analiz sonuçlara etkisinin olup olmadığını incelemek amacıyla da 'Ağ Yakınsaklık İndeksi' hesaplamalarıyla doğrulama çalışması yapılmıştır. Analiz sonuçlarında çapının 1,1 katı derinliğe yerleştirilen model, 0 (sıfır) derece açı değerinde bulunan dümenleri ve baştan 2,009 metre olarak belirlenen ağırlık merkezi ile başlı bir şekilde dalma hareketini yapmıştır. Bu manevra sorununu giderebilmek için ufki dümenlere aşağı yönde açı vermek ve baş taraftan balast atmak denizaltıcıların uyguladığı yöntemler olduğu öğrenilmiştir. Gelecek çalışmalarda bu çözümlerin etkisi parametrik olarak incelenecektir.

Anahtar kelimeler: Denizaltı, manevra, serbest su yüzeyi, OpenFOAM, DARPA.

Makale geçmişi: Gönderim 19 Mayıs 2023; Kabul 24 Mayıs 2023

1. Giriş

Denizaltılar ve sualtı araçları, sahip oldukları sınırlı hacim nedeniyle farklı yollarla üretilen enerjinin en verimli şekilde kullanılması gereken platformlardır. Genellikle askeri amaçla kullanılan bu platformlar hakkındaki bilgiler gizlilik nedeniyle ulaşılması güç olsa da günümüze kadar birçok jenerik denizaltı formu oluşturulmuştur. Araştırmacılar bu jenerik denizaltı geometrilerini kullanarak deneysel ve nümerik çalışmalar yapmışlardır. Son zamanlarda, denizaltıların sahip olduğu form nedeniyle ortaya çıkan manevra karakteristikleri ve sorunları araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Bu sorunlardan bir tanesi de batarya imlası ve keşif faaliyetlerini yürütmesi için periskop derinliğinde ilerlemesi gereken denizaltıların serbest su yüzeyine yakın olması nedeniyle ortaya çıkan manevra sorunudur.

Sualtı araçlarının manevra karakteristiklerini incelemek için sayısal ve deneysel çalışmalar yürütülse de açık kaynak kodlu ve ticari yazılımlardaki gelişmeler sayesinde sayısal çalışmalar daha etkin biçimde kullanılmaktadır. Takahashi [1] sualtı araçlarının hidrodinamik performansını simüle etmekte kullanılmak üzere çalışmanın ana esaslarını belirleyen kılavuz niteliğinde bir

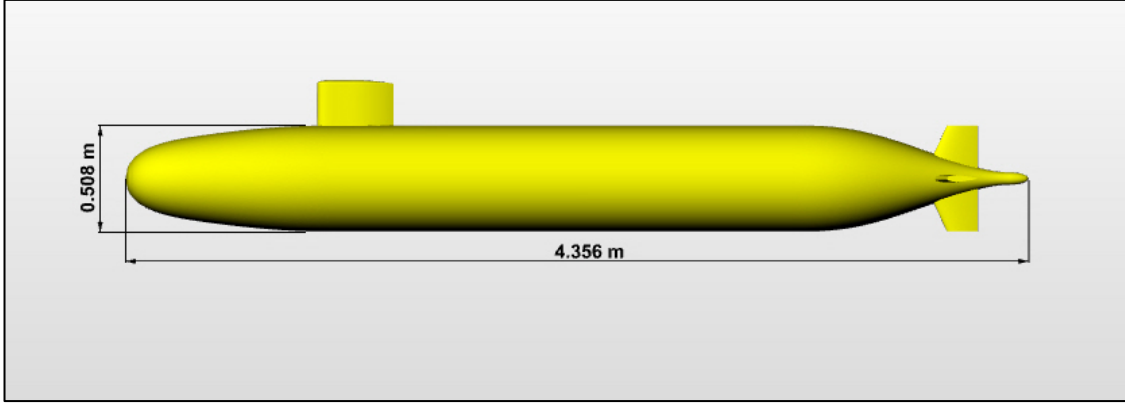
prosedür hazırlamıştır. Kim ve diğerleri [2] 6 serbestlik derecesi ile hareket eden sualtı araçlarının manevra karakteristiklerini hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile belirlemek üzere yapılan çalışmada katsayıları deneysel verilerle azami %7,26 sapma oranı ile hesaplamışlardır. The Defence Advanced Research Projects Agency (DARPA) tarafından geliştirilen 8 farklı denizaltı modeli de hidrodinamik alanında çalışma yürüten araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır. Denizaltıların hidrodinamik karakteristiğini belirlemek için kullanılan HAD'ın potansiyeli, DARPA modelini kullanarak farklı hız ve dönme açılarında incelenmiştir [3]. Kale [4] AFF-1 ve AFF-8 modellerini kullanarak yaptığı çalışmada ANSYS FLUENT ve Open Field Operation and Manipulation (OpenFOAM) programları ile nümerik sonuçları deneysel verilerle kıyaslamıştır. Jenerik denizaltı geometrilerinden olan Joubert BB2 modeli de Carrica ve diğerleri [5] tarafından farklı hızlarda dikey zig-zag manevrasının incelenmesinde kullanılmıştır.

Denizaltı manevra karakteristiğini belirlemenin yanısıra kontrol yüzeylerinin optimizasyonu ve denizaltı formunun iyileştirilmesi konuları da araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Hussain ve diğerleri [6] AFF-8 modelini kullanarak iki farklı kış dümen konfigürasyonunda HAD analizleri yapmışlardır. Çalışmaya göre haç biçimindeki dümen yapısı denizaltıyı daha stabil hale getirir iken çarpaz biçimindeki dümen yapısı denizaltıya daha yüksek manevra kabiliyeti sağlamaktadır. AFF-8 modelinin kış amudi dümenini üç farklı dönme açısında iki farklı sayısal metotla inceleyen Li ve diğerleri [7] ise 'Unsteady Reynolds-Averaged Navier Stokes (URANS)' metodunun 'Delayed Detached Eddy Simulation (DDES)' akış hatlarını belirlemede daha üstün olduğunu tespit etmiştir. Denizaltının kış formu optimizasyonu üzerine yapılan Özden ve diğerlerinin [8] yaptığı çalışmada INSEAN E1619 yedi kanatlı pervaneye sahip AFF-8 modeli farklı kış form açıları parametrik olarak incelenmiştir. Sezen ve diğerleri [9] de AFF-1 ve AFF-8 modellerini kullanarak farklı hızlarda direnç analizleri yaparak kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir.

Bu çalışmada, DARPA SUBOFF AFF-8 jenerik denizaltı modeli periskop derinliğinde iken ortaya çıkan manevra sorunları OpenFOAM açık kaynak HAD yazılımı ile incelenmiştir. Serbest su yüzeyine yakın seviyelerdeki denizaltılar hakkında Efremov ve Milanov [10], deneysel çalışmalar yürütmüş, AFF-8 modelinin amudi dümenlerinin verimliliği incelemişlerdir. Quintana ve Paredes [11], farklı derinlik ve froude sayılarında serbest su yüzeyinin direnç etkisi ile hız sensörlerinin yerleştirilebilecek bölgeleri araştırmışlardır. Amiri ve diğerleri [12], periskop derinliğindeki denizaltılara gelen baş ve kış dalgaların hidrodinamik etkilerini incelemişlerdir.

2. HAD Analizlerinde Kullanılan Geometri

Bu çalışma kapsamında yapılan HAD analizlerinde DARPA'nın SUBOFF programı ile geliştirilen denizaltı modellerinden AFF-8 modeli kullanılmıştır. Model, Groves ve diğerleri [13] tarafından hazırlanan dokümana göre Rhinoceros programı ile oluşturulmuştur. Model, fonksiyonel bir ifadeyle elde edilebilecek aksel simetrik bir gövdeye sahiptir. Yelken, kış ufki ve amudi dümenleri de modelin takıntılarını oluşturmaktadır. Üç boyutlu modelin yan görünüşü ve boyutsal özellikleri Şekil-1'de verilmiştir.



Şekil 1. AFF-8 Model Geometrisi.

1/24 ölçeğinde olan model denizaltının hacmi 0.708 m^3 olup; Roddy [14]'nin 1990 yılında yaptığı deneysel çalışmalarda olduğu gibi yapılan HAD analizlerinde boyuna ağırlık merkezi baştan 2,009 m olarak belirlenmiştir.

3. HAD Analizi Detayları

3.1 Hesaplama Yöntemi

Sayısal analizlerde OpenFOAM yazılımı ile ‘Sonlu Hacimler Yöntemi’ kullanan ‘interFoam’ çözücüsünün ‘overset’ ağ metodunun kullanıldığı ‘overInterDyMFOam’ çözücüsü kullanılmıştır. ‘overInterDyMFOam’, ‘Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)’ denklemleri ile izotermal ve birbirine karışmayan sıkıştırılmaz iki akışkan için nümerik olarak çözümü gerçekleştirmektedir.

Süreklilik denklemi Denklem (1)’de gösterilmektedir.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemi Denklem (2) olarak sunulmuştur.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{t_{ij}}) + \rho g_i + f_{\sigma i} \quad (2)$$

u	:	Hız
g_i	:	Yerçekimi ivmesi
p	:	Basınç
τ_{ij} ve $\tau_{t_{ij}}$:	Viskozite ve türbülans gerilimi
$f_{\sigma i}$:	Yüzey gerilimi

Momentum denkleminde yoğunluğu ifade eden ρ Denklem (3)’de görülmektedir.

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (3)$$

Denklemdaki ' α ' ifadesi birinci akışkan için 1, diğer akışkan için 0 olup; ara fazda bulunan akışkan için bu değer 0 ile 1 arasındadır.

Yüzey gerilimini ifade eden $f_{\sigma i}$ ve eğriliğin yaklaşık hesaplama denklemi Denklem (4) ve (5) olarak gösterilmiştir.

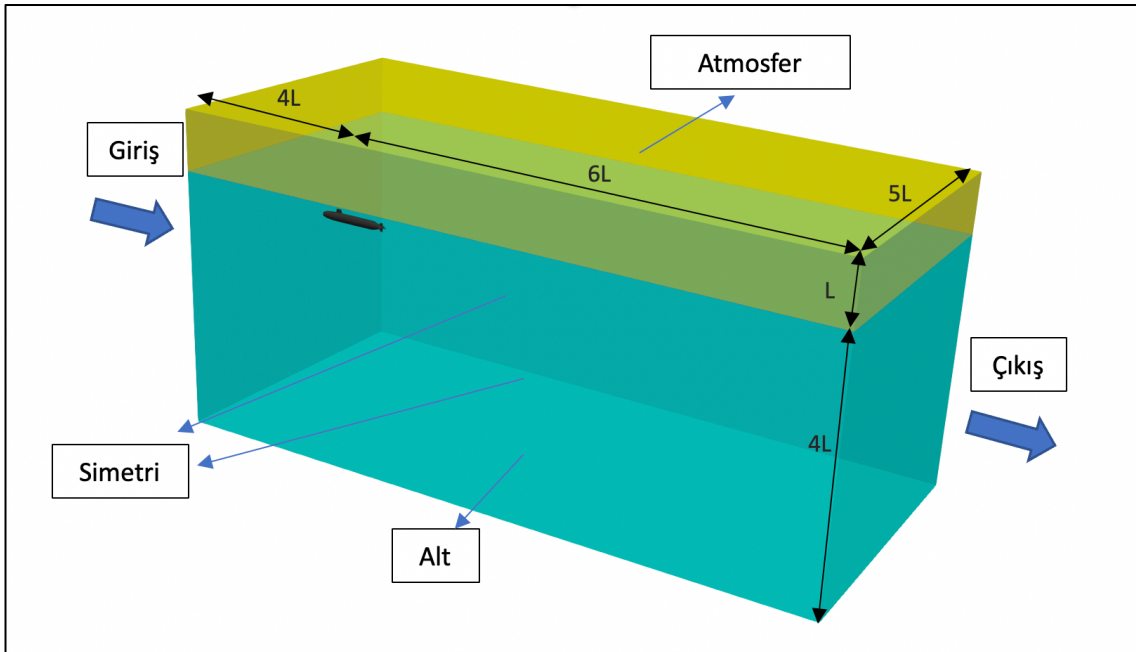
$$f_{\sigma i} = \sigma \kappa \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} \quad (4)$$

σ : Yüzey gerilim sabiti
 κ : Eğrilik

$$\kappa = -\frac{\partial n_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \alpha / \partial x_i}{|\partial \alpha / \partial x_i|} \right) \quad (5)$$

3.2 Sınır Koşulları ve Ağ Yapısı

'L' model boyu olmak üzere, dikdörtgen prizmadan oluşan akış hacmi 10L uzunluğunda, 5L genişliğinde ve su hattının altında kalan derinlik 4L olmak üzere toplam 5L yüksekliğindedir. Başlangıç konumu $H/D=1.1$ derinlikte olan model, 2L uzunlukta, L genişliğinde ve L yüksekliğinde 'overset' hacminin içerisine yerleştirilmiştir. Akış hacminin boyutların ve sınırların isimleri Şekil-2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Akış hacmi boyutları ve sınır isimlendirmesi.

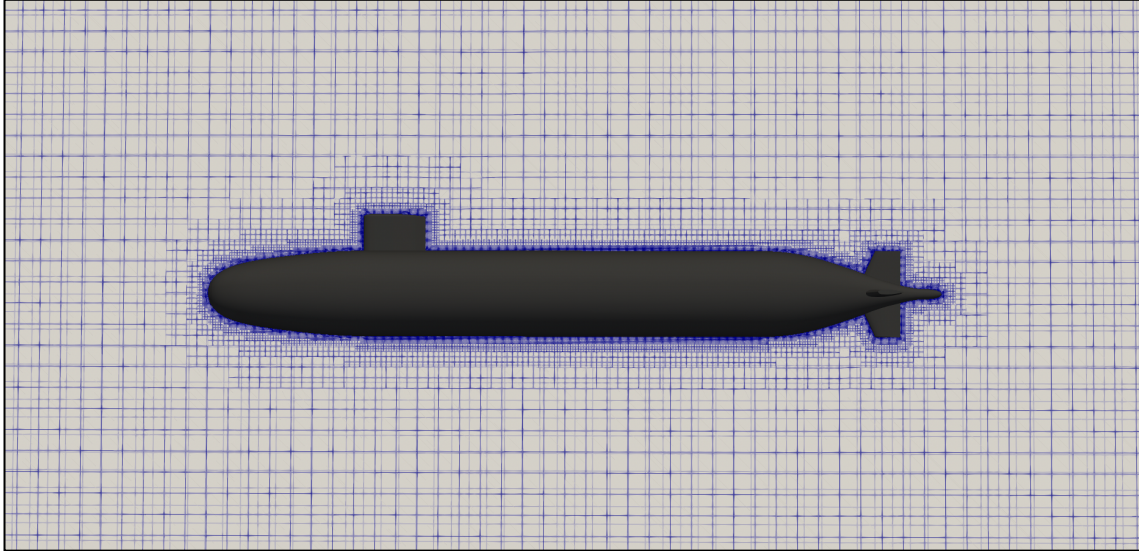
Hesaplamalarda kullanılan sınır koşulları Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Sınır koşulları.

Sınır İsmi	U (Hız)	p_rgh
Giriş	fixedValue	fixedFluxPressure
Çıkış	outletPhaseMeanVelocity	zeroGradient
Atmosfer	pressureInletOutletVelocity	totalPressure
Alt	symmetryPlane	symmetryPlane
Simetri	symmetryPlane	symmetryPlane
AFF-8	movingWallVelocity	fixedFlucPressure

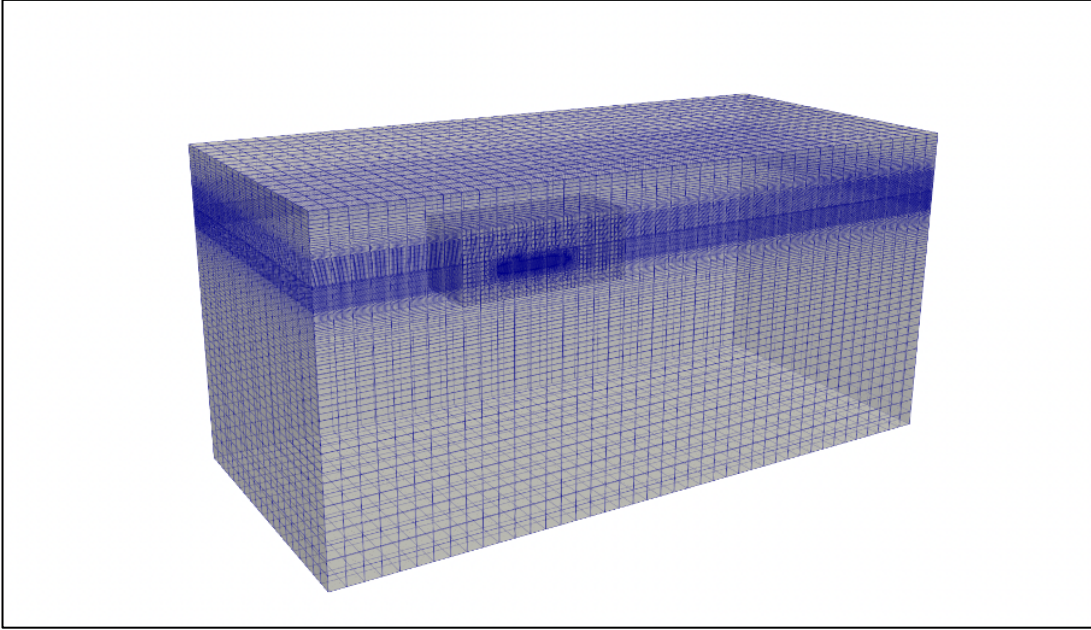
Çalışmada kullanılan akış hacmi içerisinde ‘overset’ olarak isimlendirilen ve geometriyi içine alan bir hacim kullanılmıştır. Bu hacim, akış hacminden bağımsız dinamik bir ağ oluşturmak için kullanılmakta olup; sınır koşulları ‘overset’ olarak belirlenmiştir. Bu yöntemde deforme olan ağ türünün dezavantajları olmadan çok fazlı akıştaki kompleks geometrilerin hareketleri interpolasyon ile çözülebilmektedir. Bu yöntem kullanılabilmesi için, OpenFOAM dosya düzeninde bulunan ‘constant’ klasöründe yer alan ‘dynamicMeshDict’ dizininde ‘dynamicOversetFvMesh’ ağ tipi seçilmiştir.

Rhinoceros programı ile oluşturulan AFF-8 yüzeyi ‘Standard Triangle Language (STL)’ formatında OpenFOAM dosya dizinine eklenmiş olup; ‘snappyHexMesh’ ağ üreticisi ile ağ oluşturulmuştur. ‘snappyHexMesh’ ile oluşturulan ağ yapısı Şekil-3’de görülmektedir.



Şekil 3. ‘snappyHexMesh’ ile oluşturulan ağ yapısı.

Serbest su yüzeyi bölgesindeki akışı daha iyi çözümlmek maksadıyla su hattı bölgesinde ağ yoğunluğu artırılmış olup; ‘blockMesh’ komutu ile oluşturulan arka plan ağ yapısı Şekil-4’de gösterilmektedir.



Şekil 4. 'blockMesh' ile oluşturulan arka plan ağ yapısı.

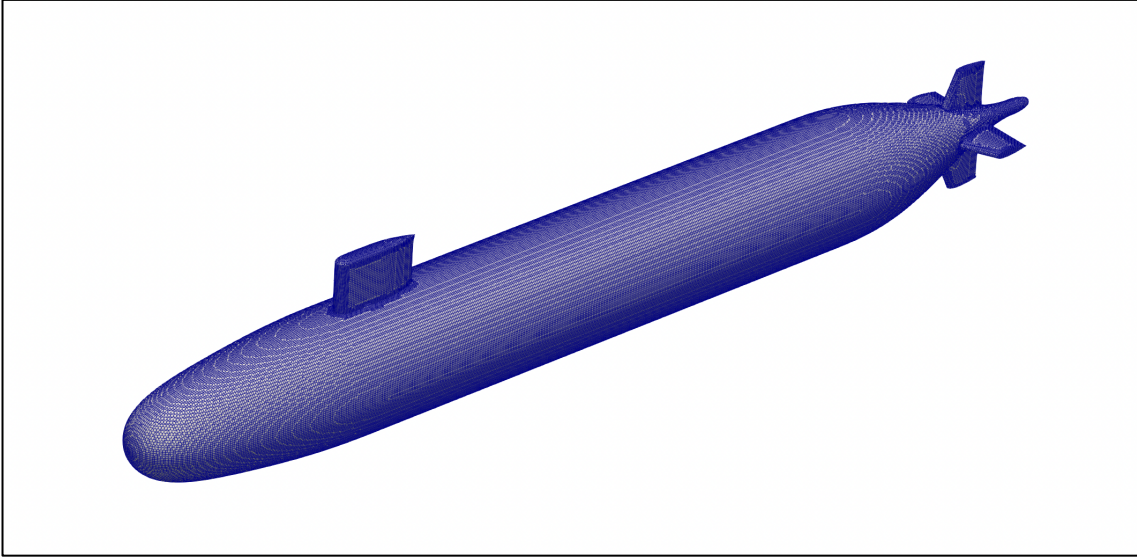
4. Doğrulama Çalışması

HAD analiz sonuçlarının kullanılan ağdan bağımsız olup olmadığını belirlemek amacıyla Çelik ve diğerleri [15] tarafından oluşturulan 'Ağ Yakınsaklık İndeksi (Grid Convergence Index – GCI)' hesaplamalarıyla doğrulama çalışması yapılmıştır. Hesaplama, toplam hücre sayısı artış oranı en az 1,3 olacak şekilde üç farklı çözünürlükteki ağ kullanılmıştır. Yapılan 'Ağ Yakınsaklık İndeksi' hesaplaması sonuçları Tablo-2'de olduğu gibidir.

Tablo 2. Doğrulama çalışması sonuçları.

Ağ Adı	Hücre Sayısı	Ortalama y^+	Sürüklenme Değeri (N)	Ağ Yakınsaklık İndeksi (%)
A	4024391	34	281	1,45
B	2006418	42	278	2,82
C	1183792	51	274	-

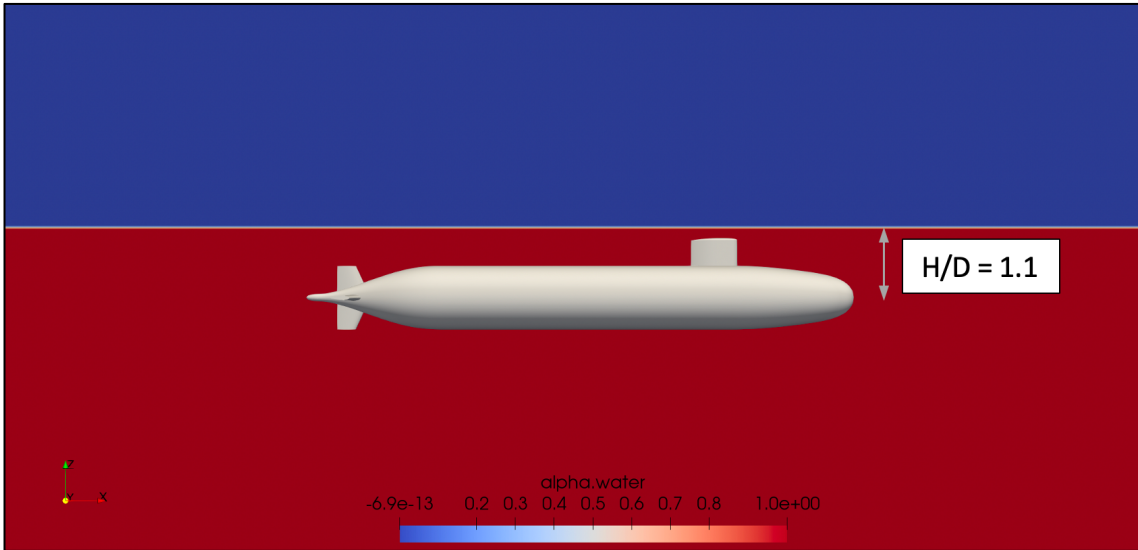
Hesaplama sonuçlarına göre, sık ağ yapısının (A) toplam sürüklenme değeri hesabında ağdan bağımsızlık indeksinin % 1,45 olduğu tespit edilmiş olup; yapılacak HAD çalışmalarında bu ağ yapısı kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan ağ yapısının genel görünümü Şekil-5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Doğrulama çalışması sonrasında seçilen ağ yapısı.

5. Sonuç

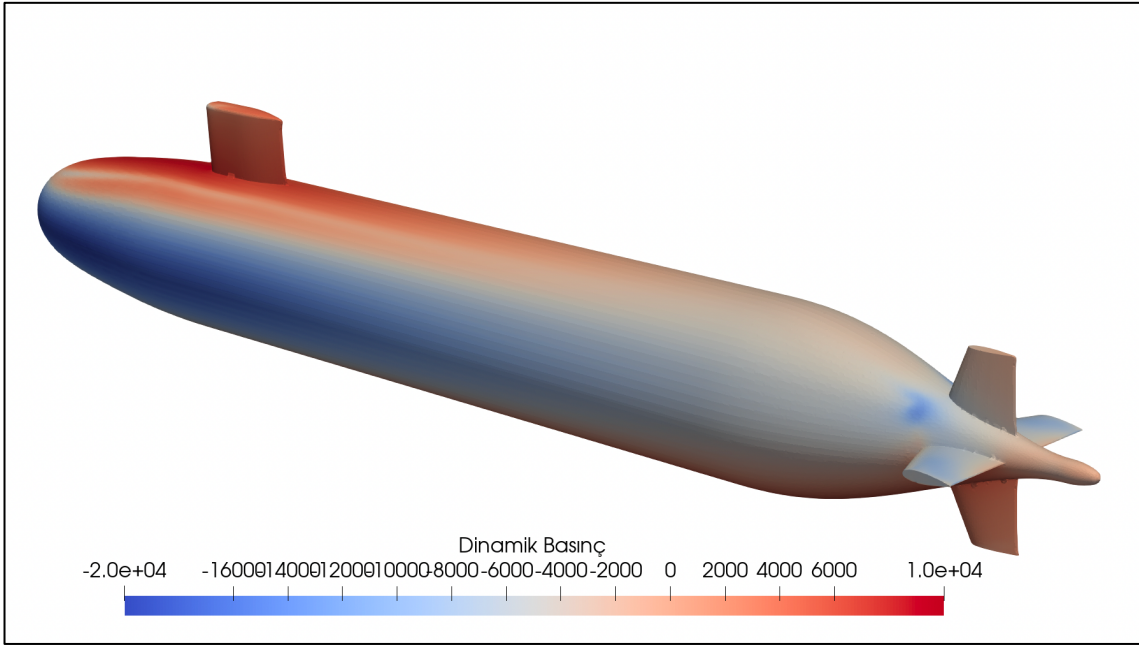
Bu çalışmada periskop derinliğinde bulunan denizaltıların manevra sorunlarını ortaya çıkarmak amacıyla model, $H/D=1.1$ derinliğe konumlandırılmıştır. Modelin su hattına göre konumu Şekil-6'da şematik olarak gösterilmiştir.



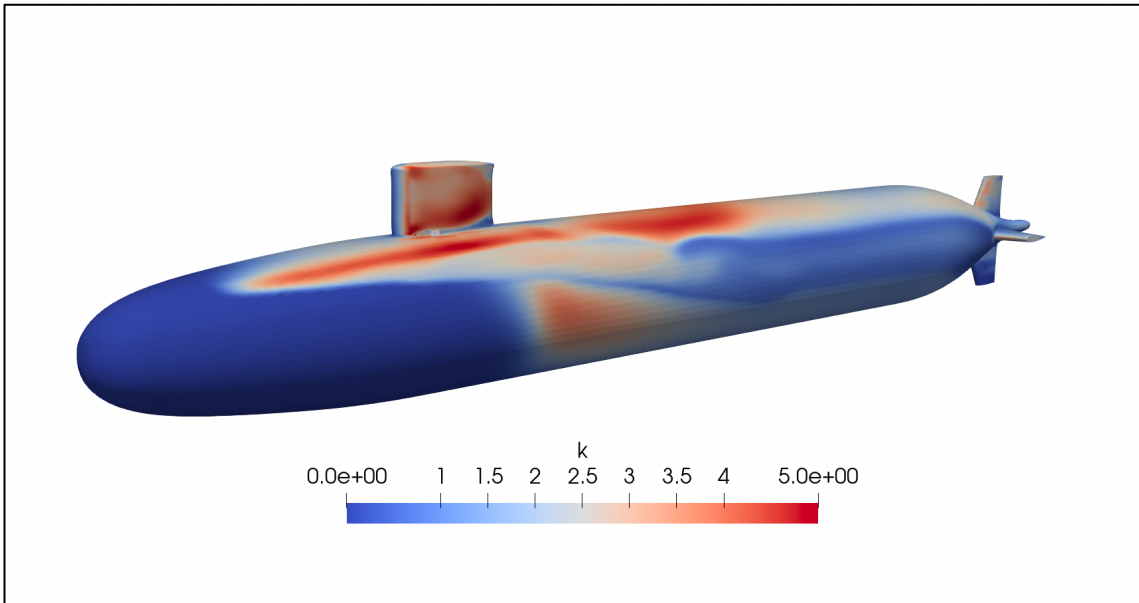
Şekil 6. Model konumu $H/D=1.1$.

6 serbestlik derecesine sahip denizaltının sualtı hareketleri 'sixDoFRigidBodyMotion' çözücüsü ile incelenmiştir. Denizaltının periskop derinliğindeki hareketlerini incelediğimiz için, 'dynamicMeshDict' dizininde model hareketi sadece boyuna (-x eksen) ve düşey (-z eksen) yönde doğrusal; baş kış dönme hareketi (-y eksen) yapacak biçimde rotasyonel olarak sınırlandırılmıştır. Bu sayede hesaplama maliyeti düşürülmüştür. Hesaplamalarda 'kOmegaSST' türbülans modeli kullanılmış olup; akış hızı 5,144 m/s olarak belirlenmiştir.

Denizaltılar, ufki kontrol yüzeylerini kullanarak ve uygun balast operasyonları ile dalıp çıkma hareketini yapmaktadır. Ancak periskop derinliğinde gizliliğini koruyarak göreve devam edebilmesi için denizaltının, su hattının hemen altında belirli bir derinlikte seyretmesi gerekmektedir. Denizaltının sahip olduğu form nedeniyle oluşan basınç dağılımı (Şekil-7) denizaltının başlı bir şekilde dalmaya zorlamaktadır. Bunu engellemek maksadıyla ufki dümenlere açı vermek, balast operasyonu yapmak gibi önlemler alınmaktadır. Ayrıca model etrafında oluşan türbülans kinetik enerjisi dağılımı da Şekil-8'de sunulmuştur.

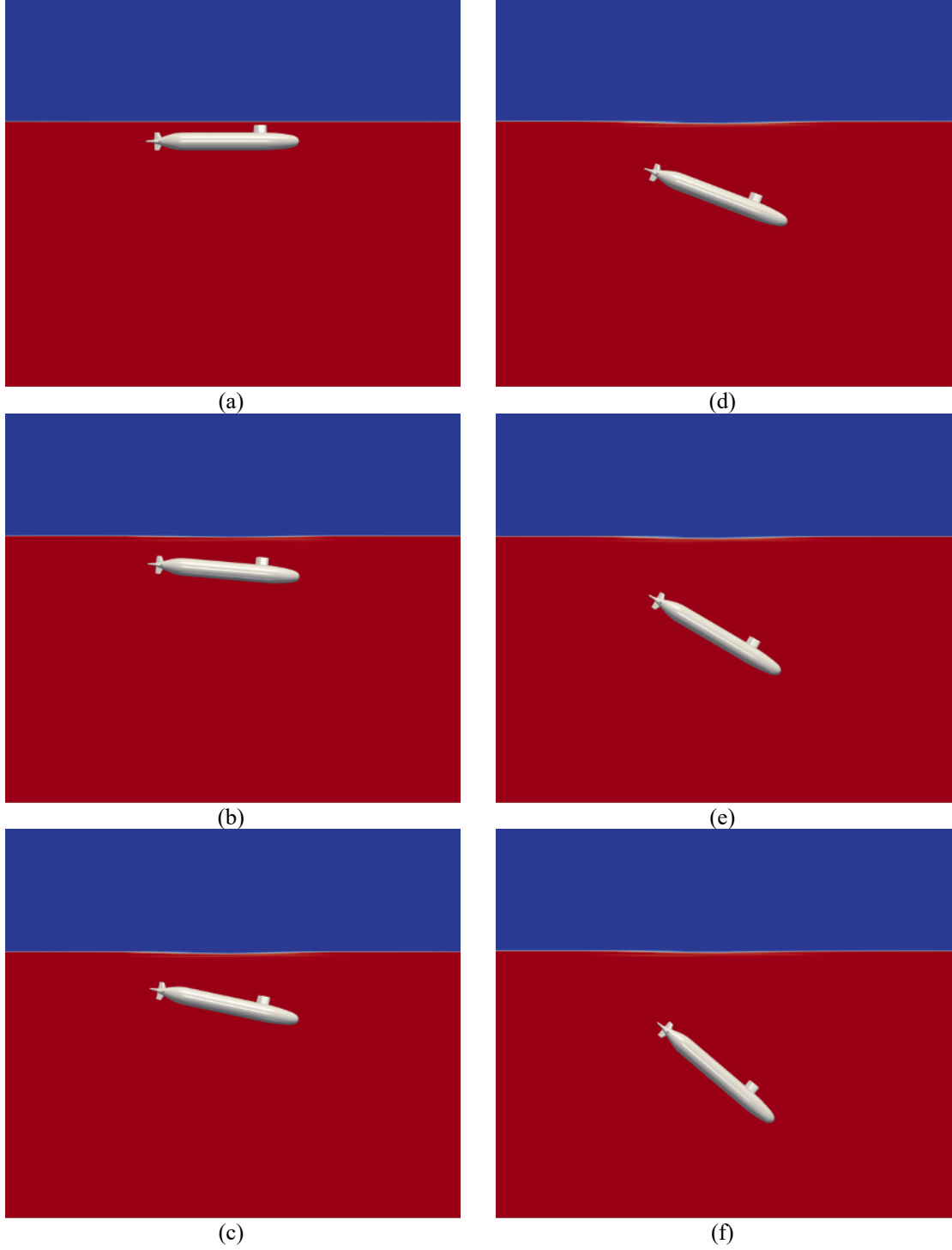


Şekil 7. Model etrafında oluşan dinamik basınç dağılımı.



Şekil 8. Model etrafında oluşan türbülans kinetik enerjisi.

'oversetInterDyMFoam' çözücüsü ile yapılan HAD analizlerinde önceki bölümlerde anlatılan geometri, sınır koşulları ve ağ örgüsüyle denizaltının başlı bir şekilde dalma hareketini yaptığı Şekil-9'da görülebilmektedir.



Şekil 9. HAD analiz sonuçları.

Yapılan HAD analizinde görüldüğü gibi model üzerinde bulunan kontrol yüzeylerine müdahale edilmezse denizaltı dalma hareketine devam etmektedir. Bu durumu engellemek amacıyla periskop derinliğinde kış kontrol yüzeylerine kumanda edilmektedir. Bu sayede model üzerinde oluşan basınç kaynaklı oluşan kuvvetlere karşı kuvvet üretilmektedir. Sonuç olarak denizaltı periskop derinliğindeki görevlerini icra edebilmekte ve gizliliğini koruyabilmektedir.

Kaynaklar

- [1] Takahashi, Kenshiro. Numerical simulations of comprehensive Hydrodynamic performance of DARPA SUBOFF submarine. Diss. 2019.
- [2] Kim, Howan, et al. "Six-DOF simulations of an underwater vehicle undergoing straight line and steady turning manoeuvres." *Ocean Engineering*, 2018.
- [3] Takahashi, Kenshiro, and Prasanta K. Sahoo. "Fundamental CFD study on the Hydrodynamic Performance of the DARPA SUBOFF submarine." *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Vol. 58776. American Society of Mechanical Engineers, 2019.
- [4] Kale, Fatih Mehmet. Numerical investigation of flow around a submarine by openfoam and ansys fluent. Diss. Master's Thesis]. Istanbul Technical University Institute of Science, Istanbul, Turkey, 2020.
- [5] Carrica, P. M., Y. Kim, and J. E. Martin. "Vertical zigzag maneuver of a generic submarine." *Ocean Engineering* 219, 2021.
- [6] Hussain, Arif, et al. "To study the effectiveness of stern appendages (Cruciform & X Shaped configurations) for maneuverability of autonomous underwater vessel using computational fluid dynamics." *Ocean Engineering* 272, 2023.
- [7] Guo, Haipeng, Guangnian Li, and Lin Du. "Investigation on the flow around a submarine under the rudder deflection condition by using URANS and DDES methods." *Applied Ocean Research* 131, 2023.
- [8] Özden, Yasemin Arıkan, M. Cansın Özden, and Fahri Çelik. "Numerical investigation of submarine tail form on the hull efficiency." *Proceedings of the fifth international symposium on marine propulsors*. 2017.
- [9] Sezen, Savas, et al. "Investigation of self-propulsion of DARPA Suboff by RANS method." *Ocean Engineering* 150, 2018.
- [10] Efremov, D. V., and E. M. Milanov. "Hydrodynamics of DARPA SUBOFF submarine at shallowly immersion conditions." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 13.2, 2019.
- [11] Quintuña, María T., and Rubén J. Paredes. "Free Surface Effect Assessment of the Flow Around the DARPA SUBOFF-5470 Submarine Using OpenFOAM." *International Conference*

on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Vol. 85185. American Society of Mechanical Engineers, 2021.

[12] Amiri, Mojtaba Maali, et al. "How does the free surface affect the hydrodynamics of a shallowly submerged submarine?." Applied ocean research 76, 2018.

[13] Groves, Nancy C., Thomas T. Huang, and Ming S. Chang. Geometric characteristics of DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) SUBOFF models (DTRC model numbers 5470 and 5471). David Taylor Research Center Bethesda MD Ship Hydromechanics Dept, 1989.

[14] Roddy, Robert F. Investigation of the stability and control characteristics of several configurations of the DARPA SUBOFF model (DTRC Model 5470) from captive-model experiments. David Taylor Research Center Bethesda MD Ship Hydromechanics Dept, 1990.

[15] Celik, Ishmail B., et al. "Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications." Journal of fluids Engineering-Transactions of the ASME 130.7, 2008.