

## HAVA-SU ETKİSİNDE BULUNAN BİR İNSANSIZ DENİZ ARACINDAKİ AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİNDE SAS VE LES TÜRBÜLANS MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Alpaslan KILAVUZ<sup>1</sup> ve Hüseyin AKILLI<sup>2</sup>  
<sup>1,2</sup>Çukurova Üniversitesi, Adana

Muammer ÖZGÖREN<sup>3</sup> ve Beşir ŞAHİN<sup>4</sup>  
<sup>3</sup>Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya  
<sup>4</sup>İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul

### ÖZET

*Bu çalışmanın amacı, hava-su etkileşiminde bulunan serbest yüzey etkisinde seyreden bir insansız deniz aracının temel akış özelliklerini incelemektir. Çalışmada, Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme (PIV) yöntemi ile elde edilen akış karakteristikleri, LES (Large Eddy Simulation) ve SAS (Scale Adaptive Simulation) türbülans modelleri kullanan, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Myring geometrisine sahip mikro boyutta insansız deniz aracı, serbest yüzeyin tüm akış karakteristiklerini etkilediği  $h/D=0.75$  daldırma oranında, model boyuna göre tanımlanan  $Re=4 \times 10^4$ , Reynolds sayısında seyretmektedir. Karşılaştırmalı olarak verilen sonuçlarda, boyutsuzlaştırılmış hız bileşenlerinin, girdapların ve türbülans kinetik enerjinin (TKE) eşdeğer eğrileri (konturları) akım çizgileri ile birlikte sunulmuştur. Akıştaki kararlı girdaplar  $Q$ -kriteriyon ile izometrik eşdeğer eğrileri kullanılarak 3-boyutlu olarak görselleştirilmiştir. LES türbülans modelinde serbest yüzey etkisinin, kuyruk çevresi akışta odak noktalarını ve durma noktalarını yüzeye önemli ölçüde yönlendirdiği ve ardından kuyruktan ayrılan akışın yüzeye doğru hareket ettiği görülmüştür. SAS türbülans modeli akım çizgilerinde ve hız konturlarında deneysel sonuçlara daha yakın değerler hesaplanmıştır, ancak model üst yüzünde deneysel değerlere göre daha küçük girdap yapılıması ve ayrılmış akış bölgesinde daha düşük ancak daha yakın topolojide TKE değerlerinin olduğu bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, serbest yüzey etkisinde seyir halinde bulunan insansız deniz araçları ve torpido benzeri geometrilerin HAD çalışmalarında SAS modelinin aynı ağ yapısına sahip LES model çözümlerine göre daha üstün olduğunu göstermiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** CFD, Mikro otonom araç, LES, PIV, SAS, türbülanslı akış

### GİRİŞ

Günümüzde insansız deniz araçları (İDA), tamir/onarım, veri toplama ve askeri uygulamalar da dâhil çeşitli amaçlarla kullanımdadır. Veri toplama ve askeri alanlarda kullanılan insansız deniz araçlarının çoğu uzun menzil, yüksek yakıt performansı veya yüksek hassasiyet gibi çeşitli nedenlerden dolayı, akış ayrılmasını en aza indiren silindirik, torpido benzeri bir yapıya sahiptir. Deniz tabanı yüzey tabakası çalışmaları, deniz hayatını uzun süre yakından takip edebilme, güneş enerji sistemlerinin verimliliği ve ucuz ve etkili askeri çözümler gereğince geçtiğimiz on yılda artmıştır. Tasarımda deneysel yöntemlerin hız ve finansal nedenlerden ötürü HAD sonuçlarını takiben yapıldığı, hatta bazı alanlarda HAD ve çeşitli alanlardaki simülasyonların, deneylerin yerine geçebildiği günümüzde, HAD ile doğru sonuçları yakalayabilmenin önemi artmıştır.

Hava-su arasındaki serbest yüzey, HAD içerisinde çok fazlı modeller ile tanımlanarak çözüm alanı oluşturulur. İDA'lar için literatür bu çok fazlı akış ortamını genellikle Volume of Fluid (VOF) ile tanımlar [Salari and Rava, 2017]. Yüzeye yakın daldırma oranlarındaki çok fazlı model ihtiyacı [Kilavuz vd, 2022a] tarafından da küçük daldırma oranlarında ( $h/D < 1.0$ ) serbest yüzey ile model arasındaki jet benzeri akış bölgesinde ve takiben ayrılmış akışta havanın varlığı ile de gösterilmiştir.

<sup>1</sup>Makine Müh. Böl. Dr. Öğr., E-posta [aukilavuz@gmail.com](mailto:aukilavuz@gmail.com)

<sup>2</sup>Prof. Dr. Makine Müh. Böl., E-posta: [hakilli@cu.edu.tr](mailto:hakilli@cu.edu.tr)

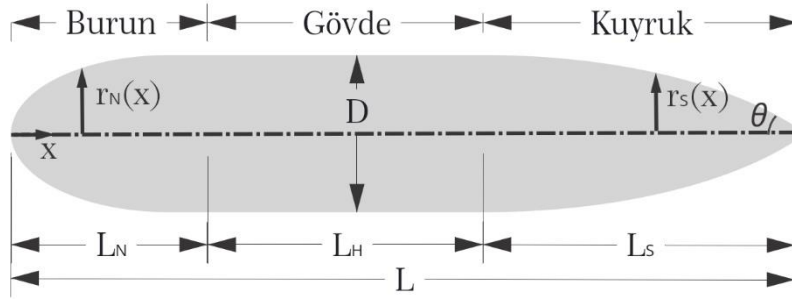
<sup>3</sup>Prof. Dr. Uçak ve Makine Müh. Böl., E-posta: [mozgoren@erbakan.edu.tr](mailto:mozgoren@erbakan.edu.tr)

<sup>4</sup>Prof. Dr. Uçay Havacılık Müh. Böl., E-posta: [besirsahin@aydin.edu.tr](mailto:besirsahin@aydin.edu.tr)

Serbest yüzeye farklı konumlarda ve farklı hücum açılarında yerleştirilen mikro boyutta torpido benzeri farkı burun ve kuyruk yapısına ait modeller PIV ve boya deneyleri araştırmışlardır [Kılavuz vd, 2022b ve 2022c; Sarigiguzel vd. 2022]. Model, serbest su yüzeyinden model çapının iki katından fazla bir derinliğe daldırıldığında serbest yüzey etkisinin ihmal edilebilir mertebe olduğunu ifade edilmiştir. Türbülans modeli olarak Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) modelleri hızlı ve kabul edilebilir sonuçlar verirken, Large Eddy Simulation (LES) modeli ise daha fazla zaman alıcı, ancak, serbest yüzey etkisindeki tüm daldırma oranlarında deneysel verilere daha yakın akış karakteristik değerleri sunmuştur. Bu çalışmada, literatürde performansı RANS ile LES arasında kabul edilen, “Unstable Reynolds Averaged Navier-Stokes” (URANS) modeli olan “Scale Adaptive Simulation” (SAS) modelinin performansı, LES performansı ve deneysel PIV sonuçlarıyla karşılaştırılarak yüzey etkisindeki İDA’lar için daha hızlı ve kabul edilebilir bir HAD çözüm metodu sunulması amaçlanmıştır.

## YÖNTEM

PIV ve HAD için uzunluğu  $L=0.2$  m, çapı  $D=0.04$  m olan eliptik burunlu, su altı araçlarında tercih edilen bir Myring profili [Myring, 1976] kullanılmıştır. Myring profili, düşük sürüklenme katsayısı ( $C_D$ ) ve yüksek manevra kabiliyeti sağlamak amacıyla silindirik su altı ve hava araçlarında kullanılan bir profildir. Şekil 1’de kullanılan geometri üzerinde Myring denklemlerinde kullanılan parametreler sunulmaktadır.



Şekil 1. Myring denklemlerindeki parametrelerin kullanılan geometri üzerinde gösterimi

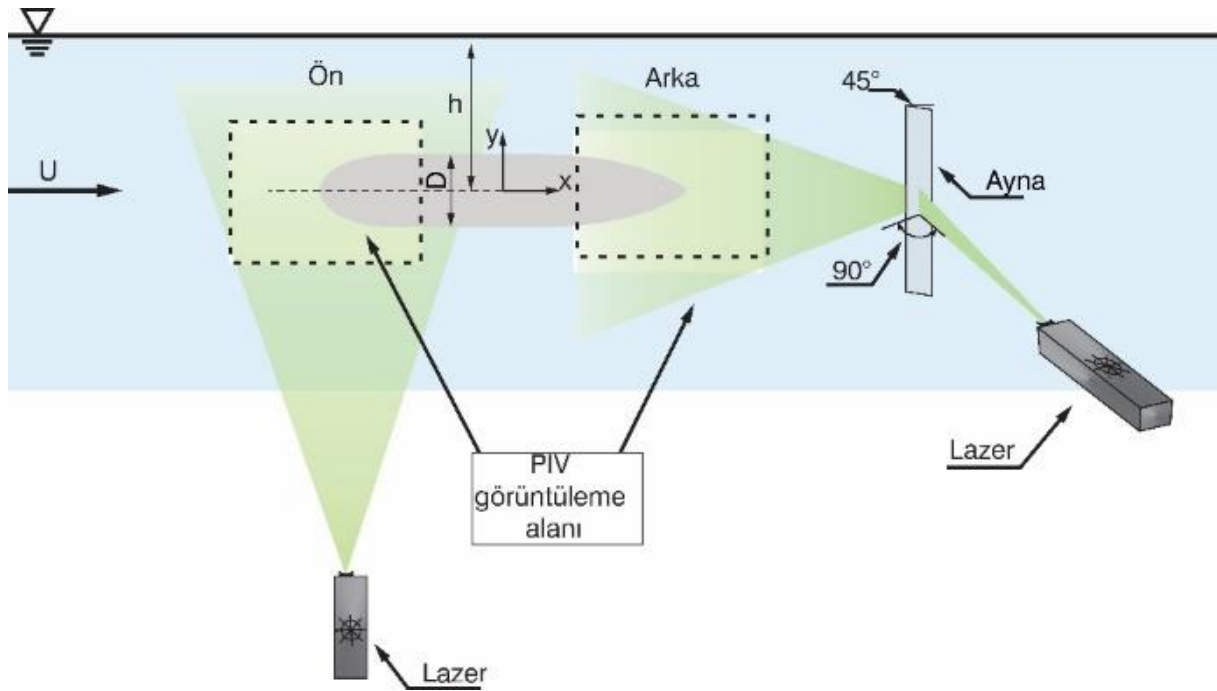
Myring profilinde burun kesiti için Eşitlik 1 ve kuyruk kesiti için Eşitlik 2 kullanılır.

$$r_N(x) = \frac{1}{2}D \left[ 1 - \left( \frac{x - L_N}{L_N} \right)^2 \right]^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

$$r_S(x) = \frac{1}{2}D - \left[ \frac{3D}{2L_S^2} - \frac{\tan\theta}{L_S} \right] (x - L_N - L_H)^2 + \left[ \frac{D}{L_S^3} - \frac{\tan\theta}{L_S^2} \right] (x - L_N - L_H)^3 \quad (2)$$

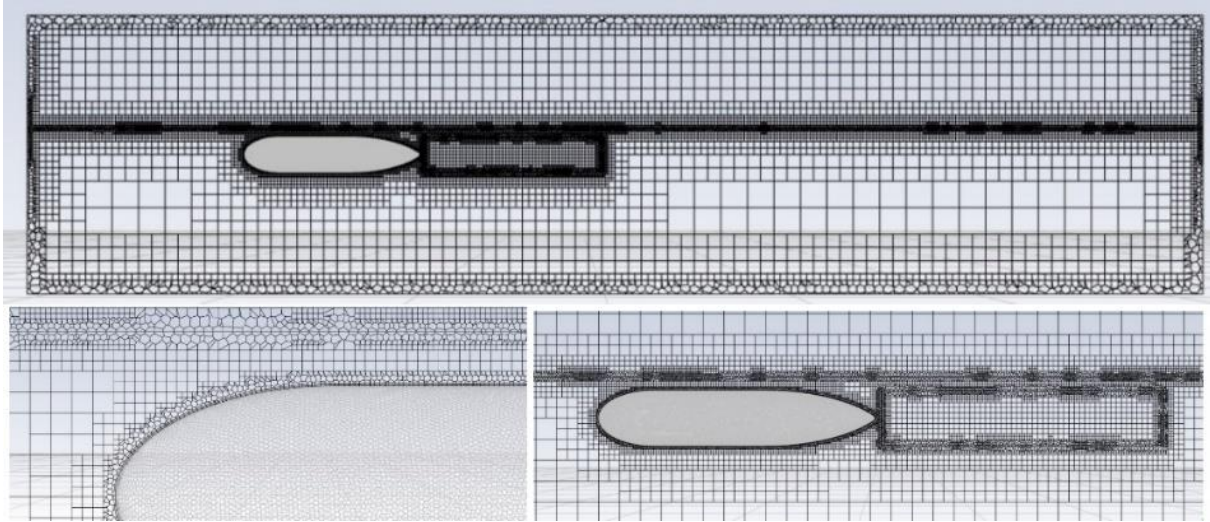
Çalışmada kullanılan profile kesit uzunlukları burun, gövde ve kuyruk için sırasıyla  $L_N=0.05$  m,  $L_H=0.07$  m ve  $L_S=0.08$  şeklindedir ve geometri potansiyel parametresi  $n$ ,  $n=2$  ve kuyruk açısı  $\theta$ ,  $\theta=30^\circ$  olarak alınmıştır.

Deneysel düzeneğin şeması, modelin Osmaniye Korkut Ata Üniversitesindeki su tüneline pozisyonu ile birlikte Şekil 2’de gösterilmiştir [Kılavuz vd, 2022a]. Lazer (Nd: YAG lazer), 532 nm dalga boyu ve 145 mJ’lük darbe enerjisine sahip ve saniyede 15 lazer huzme çifti gönderebilmektedir. Ön görüntü alanı çekimlerinde lazer su tüneline altına yerleştirilmiş, arka çekimlerde ise serbest yüzey etkileşimi daha net gözlemleyebilmek amacı ile  $45^\circ$ ’lik ayna ile yansıtılmıştır. 1600x1200 piksel çözünürlüğe sahip CCD kameralar, su tüneline lazer tarafından aydınlatılan gümüş kaplı, yaklaşık 10  $\mu$ m çapındaki plastik partiküllerin lazer darbe çiftleri arasındaki hareketini 1000 çift görüntü olarak almıştır. Alınan görüntü çiftlerindeki aydınlatılmış partiküllerin ardışık iki lazer darbe çifti içerisindeki yer değiştirmeleri, %50 örtüşmeli 32x32 piksel sorgulama pencereleri kullanılarak, 99x74 hız vektör alanına dönüştürülmüştür. Çalışmada, partikül boyu, homojen olmayan dağılım, lazer düzlemi dışı hareket, analizde pencere piksel boyu ve gürültüden kaynaklı belirsizliğin boyu %2’den az bulunmuştur [Westerweel, 1994].



Şekil 2. PIV deney düzeneğinin şematik gösterimi

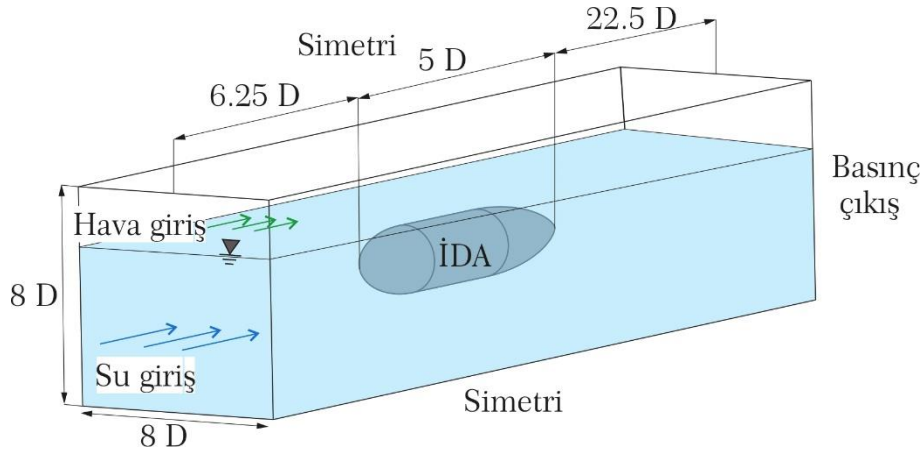
Ağ bağımsızlık çalışması yapılmış olup son ağ yapısı, kendinden daha yoğun olan hücre sayısı ile arasında %2.38 sürüklenme katsayısı ( $C_D$ ) farkı ile seçilen  $2.4 \times 10^6$  hücre sayılı ağ yapısı, detaylıca Şekil 3'te sunulmuştur. Ağ yapısı, Courant sayısı ( $C$ ) olacak şekilde, Courant-Friedrichs-Levy (CFL),  $C \leq 1$  şartını sağlamaktadır. Sınır tabakada hem LES hem de SAS modeline uygun olacak şekilde geometriye en yakın hücre duvarının geometriye uzaklığı  $y^+ = 1$  olarak verilmiştir. Ağ yapısı ANSYS Meshing Module kullanarak üretilmiştir.



Şekil 3. HAD çözümlerinde kullanılan ağ yapısı

Modelin akış hacmi içerisindeki konumu Şekil 4'te modelin çapına göre ölçülendirilerek sunulmuştur. HAD çözümlerinde kullanılan SAS ve LES türbülans model denklemleri sırasıyla [Ansys, 2013a] ve [Ansys, 2013b] kaynaklarında bulunmaktadır. Çift fazlı akış alanı tanımlamasında, VOF çoklu faz modeli ve açık kanal akış (Open Channel Flow) alt modeli kullanılarak Şekil 3'de gösterilen yoğun ağ katmanı serbest yüzey olarak tanımlanmıştır. Hava ve su için oluşturulan yüzeylerden hava ve su kütleli debi girişleri ve birleştirilmiş çıkış yüzeyinde basınç çıkışı kullanılmıştır. LES modelinde düşük daldırma oranlarında ( $h/D < 0.75$ ) art izinin serbest yüzeye doğru asimetric uzadığı durumlarda akış yapısında karasızlık sorunlarına neden olması sonucu 0 N/m olarak alınan hava-su yüzey

gerilmesi, SAS türbülans modelinde 0.072 N/m olarak alınabilmektedir. Tüm HAD çözümleri ANSYS FLUENT 2020 R-1 ile yapılmıştır.

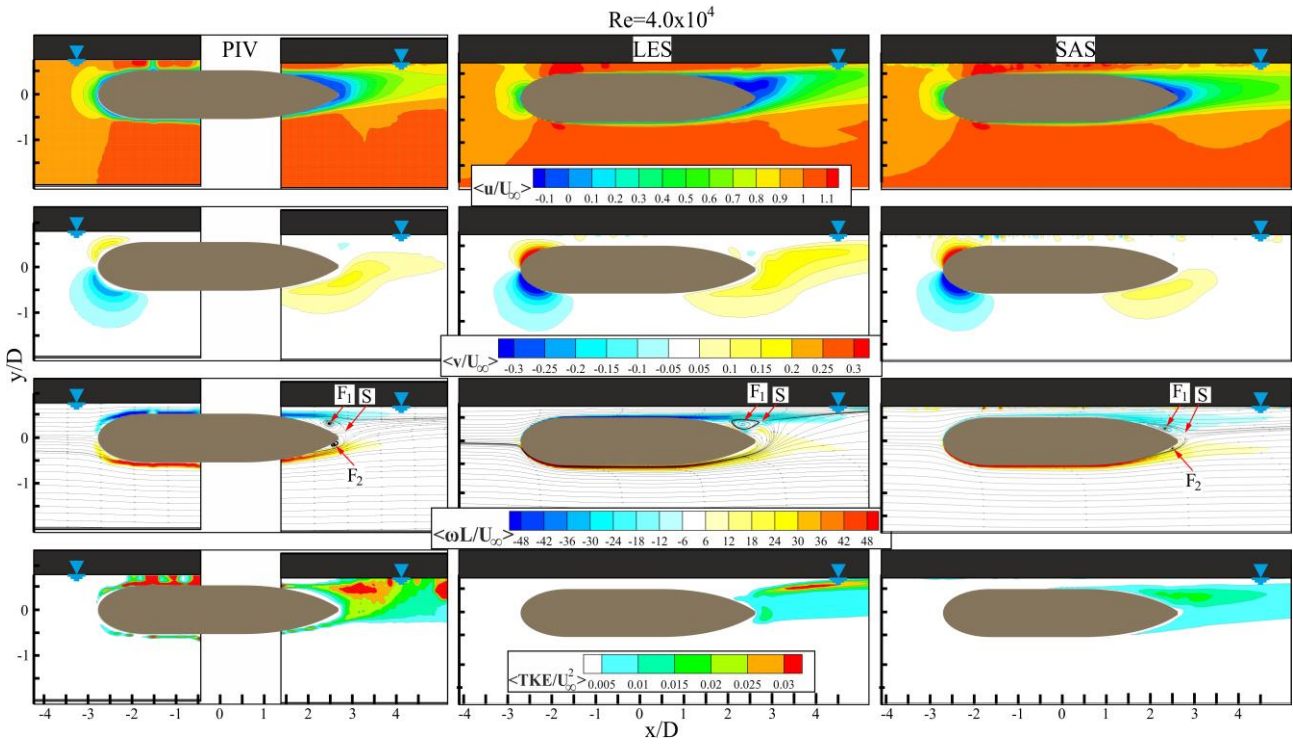


Şekil 4. HAD çözümlerinde oluşturulan akış hacmi ve modelin çapına göre konumu

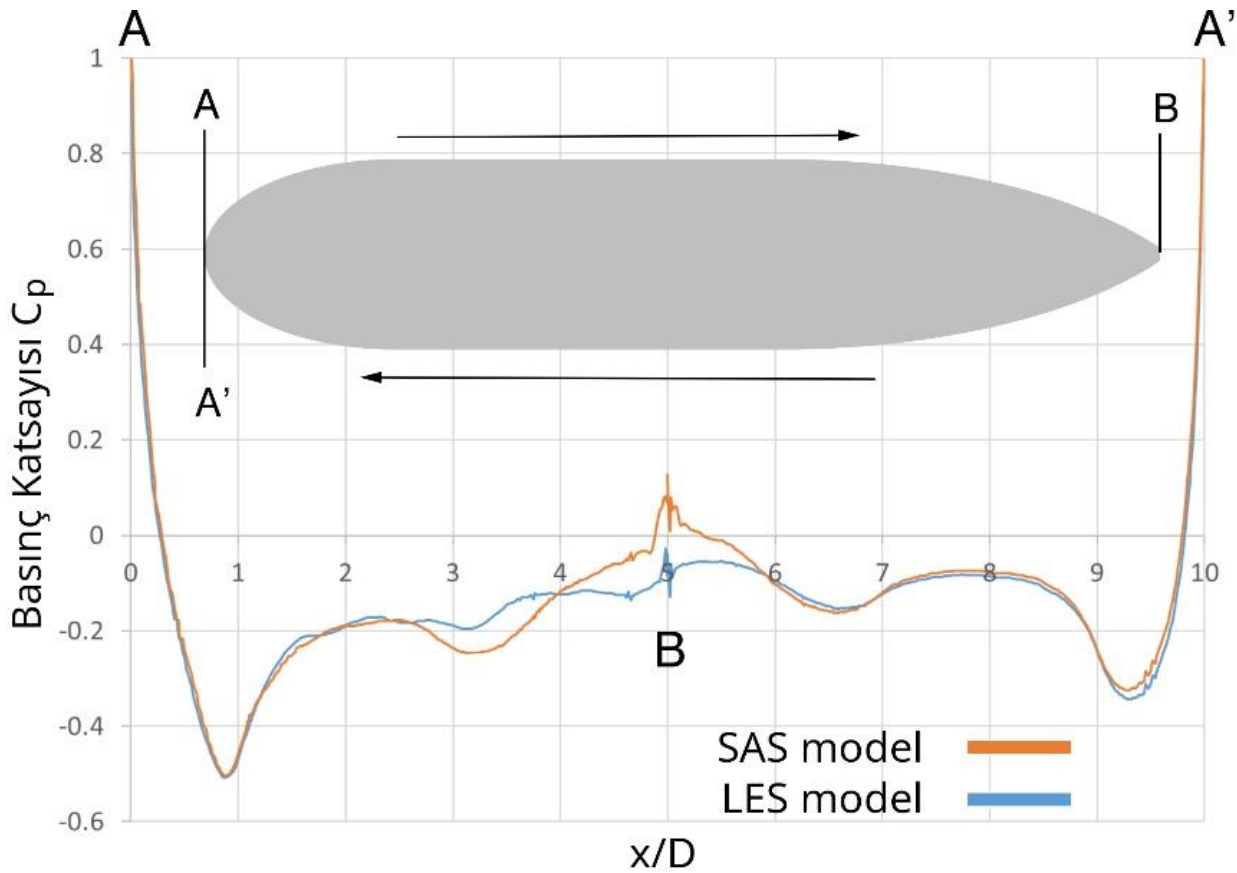
### UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Model geometri uzunluğuna göre hesaplanan Reynolds sayısı  $Re = \rho V L / \mu = 4 \times 10^4$  olan bir İDA'nın serbest yüzey etkisi altında  $h/D = 0.75$  daldırma oranındaki seyir halinin deneysel PIV ve HAD simülasyon sonuçları her iki türbülans modeli için de Şekil 5'te verilmiştir. HAD sonuçları ile karşılaştırabilmesi için PIV ön ve arka görüntü alanları birleştirilmiştir ve HAD çözümlerinde sadece serbest yüzeyin altında kalan su kesimi gösterilmiştir. Tüm sonuçlarda düşük basınç olduğu için beklendiği şekilde kuyruk etrafındaki akış bölgesinde serbest yüzeye doğru bir yönelme görülmüştür [Nematollahi, Dadvand ve Dawoodian, 2015]. SAS modelinde, burundan kopan girdapların İDA ile serbest yüzey arasındaki jet benzeri akışa kapılarak serbest yüzeye yönelimi daha net görülmüştür. Akım çizgileri ve boyutsuz hız bileşenlerinden görüldüğü üzere, serbest yüzeye yönelim LES modelinde PIV ve SAS modellerine göre daha fazladır. PIV ve SAS modelinde çift odak gözlenirken LES modelinde kuyruk altındaki odak noktası, akım çizgileri takip edildiğinde kuyruğun altında veya yanlarında geçici olarak bulunup zaman ortalaması alınan akım çizgileri görselinde sönmülmüştür. Üst kayma tabakasında oluşan girdaplar, PIV ölçümlerinde görüldüğü üzere, odak sonrası hızla şiddet olarak azalmıştır. SAS modelinde benzeri bir boyutsuz girdap yapısı, tüm üst kayma tabakasında daha düşük şiddette girdap ile gözlenirken, LES modelinde alt kayma tabakasının yukarı yönlü yüksek hızlı girdap atımları ile durma noktası, S, yukarı taşınmıştır.  $TKE^* = TKE / U_\infty$  değerlerine bakıldığında PIV ile SAS modelinde kuyruk ile serbest yüzey arasındaki  $TKE^*$  kontur yapılarının benzediği, ancak SAS modelinin deneyselle göre yaklaşık yarı büyüklükte olduğu görülmektedir. Bu durum, SAS modelinde jet benzeri akış ile burun bölgesini takiben üst kayma bölgesinden serbest yüzeye akış yönü hız bileşeninden görüldüğü üzere daha yoğun bir girdap kopması sonucu meydana gelmiştir. LES modelinde ise serbest yüzeye yönelen, uzatılmış, yassı haldeki yüksek  $TKE^*$  değerleri, alt kayma tabakasından salınan girdapların üst kayma tabakasından salınan girdaplarla etkileşimi sonucu oluşmuştur.

LES modelinde sürüklenme katsayısı  $C_D = 0.2281$  çıkarken SAS modelinde  $C_D = 0.2086$  olarak hesaplanmıştır. Şekil 6'da geometri profili boyunca A burunda  $x/D = 0$  ve  $y/D = 0$  bir nokta, B kuyrukta  $x/D = 0$ ,  $y/D = 0$  ve A' A ile çakışan bir nokta olarak A-B ile B-A' arasındaki basınç katsayısı ( $C_p$ ) verilmiştir. Burundan yüksek hızla kopan girdaplar sonucunda SAS modelinde İDA üst yüzeyinde (A-B)  $2.5 \leq x/D \leq 4$  aralığında basınç LES modeline göre çok daha düşük çıkmıştır. Kuyruk etrafındaki kuvvetli serbest yüzey yönelimi sonucundan dolayı ise  $4 \leq x/D \leq 5$  aralığında LES modelindeki basınç katsayısı ( $C_p$ ) artış göstermemiş ve  $x/D = 5$ , kuyruk kesitinin sonunda negatif kalmıştır. LES modeli ile hesaplanan sürüklenme katsayısı ( $C_D$ ) değerinde geometri çevresindeki basınç dağılımı daha etkindir.

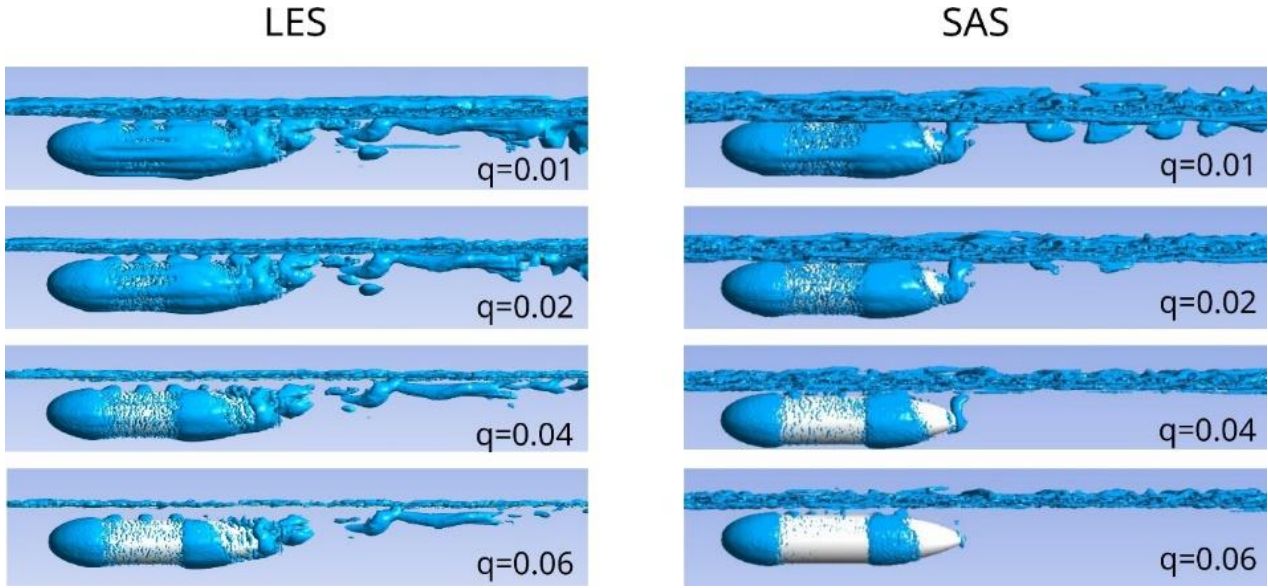


Şekil 5. Zaman ortalamalı boyutsuz hız bileşenlerin,  $(u/U_\infty$  ve  $v/U_\infty)$  boyutsuz girdap üzerine yerleştirilmiş akım çizgilerin ve  $TKE^*$ 'nin  $h/D=0.75$  derinlikte  $Re=4.0 \times 10^4$  ile seyreden bir İDA için deneysel PIV ve hesaplamalı LES ve SAS türbülans modellerinin karşılaştırılması. Burada sunulan PIV ve LES dataları hakkın da detaylı bilgi [Kılavuz vd,2022c] de verilmiştir.



Şekil 6:  $h/D=0.75$  derinlikte  $Re=4.0 \times 10^4$  ile hareket eden İDA durumunda LES ve SAS modellerinden elde edilen basiñç katsayısı değişiminin ( $C_p$ ) karşılaştırılması

HAD ile 3-boyutlu girdap yapısını görselleştirebilmek amacıyla Şekil 7'de Q-kriteri iso-konturları kullanarak akıştaki kararlı girdap yapıları verilmiştir. Serbest yüzeyin üzerinde kalan hava içerisindeki girdaplar da kısmen gösterilmiştir. Önceki sonuçlarda görüldüğü şekilde, SAS modelinde üst kayma tabakasından serbest yüzeye doğru küçük boyutta girdaplar ve bu girdapların İDA sonrası serbest yüzeyden tekrar su içerisinde oluşturduğu girdap yapıları  $q=0.01$  ve  $q=0.02$  de görülmektedir. Buna karşılık, LES modelinde üst kayma tabakasından burundan itibaren girdaplar boyut olarak SAS modele kıyasla büyük kalmıştır. LES modelinde burundan kopan girdaplar  $q=0.01$  den  $q=0.06$  ya gövdenin üst yüzeyinde net olarak görülürken SAS modelinde aynı konumdaki girdaplar, serbest yüzeye direkt olarak etkileşim sonucu önemli boyutta küçülmüştür. LES modelinde kuyruk etrafındaki kayma tabakalarından kopan girdaplar süratle serbest yüzeye yönelip İDA-serbest yüzey arasındaki jet-benzeri akış nedeni ile serbest yüzey ile tam etkileşime giremeyip akışa paralel olarak yüzey altında devam etmektedir. Serbest yüzey üzerindeki havanın da yüzey geriliminin HAD denklemlerine SAS modeline eklenebilmesi sonucu artan girdap yapısı, girdapların serbest yüzeye direkt etkileşimin sonuçlarına dikkat çekmektedir.



Şekil 7: Daldırma oranı  $h/D=0.75$  derinlikte  $Re=4.0 \times 10^4$  ile hareket eden İDA durumunda LES ve SAS modellerinde Q-kriteriyonu ile kararlı yapıdaki girdapların görselleştirilmesi

## SONUÇ

Bu çalışmada, serbest yüzey etkisi altında seyir halinde bulunan bir insansız deniz aracının  $Re=4 \times 10^4$  değerinde ve  $h/D=0.75$  daldırma oranındaki akış yapısı ve karakteristikleri, hız bileşenleri ve  $TKE^*$  konturları ile girdap üzerine akım çizgileri olarak PIV ve HAD sonuçları için farklı türbülans modelleri kullanılarak sunulmuştur. Basınç katsayısının ( $C_p$ ) geometri üzerindeki değişiminden gözlemlendiği üzere iki HAD türbülans modeli arasındaki en büyük fark burundan kopan girdapların serbest yüzeye  $2.5 \leq x/D \leq 5$  arasındaki etkileşimi sonucu gerçekleşmiştir.

Kontur değerlerinde özellikle  $TKE^*$  için, LES modelinde maksimum değer ile deneye oldukça yaklaşmış ancak deneysel minimum maksimum değerlerden uzaklaşarak SAS türbülans modeli ile deneysel daha yakın bir akış topolojisi elde edilmiştir. Özellikle akım çizgileri, SAS türbülans modelinin serbest yüzey etkisinde deneysel daha yakın bir akış yapısını yakalayabildiğini ortaya koymuştur.

$TKE^*$  ve akım çizgilerindeki deneysel sonuçlara yakınlığı ile SAS modelinde gözlenen akış yapısı, SAS modelinin 3-boyutlu görselleştirme yöntemlerinde deneylerde gösterilemeyen veya gösterimi zor olan durumlarda tercih edilebileceğini göstermiştir.

Sonuç olarak, SAS modeli serbest yüzey etkisi altında, yüzey ile direkt temas halinde olmayan ancak girdap ve akış yapılarının etkilendiği daldırma oranlarında çalışan İDA'larda ve çeşitli araçlarda LES türbülans modeline göre hızlı ve daha yüksek performanslı bir alternatif olarak kullanılabilir. Elde

edilen sonuçlar güvenilirliği dikkate alınarak gerçek hız ve prototip İDA'nın analiz ve tasarımları gerçekleştirilebilir.

### TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 214M318 nolu proje ve Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından FDK-2021-14066 nolu proje ile desteklenmiştir. Yazarlar TÜBİTAK'a, ÇÜ BAP Koordinatörlüğüne ve deneylerin yapılmasına imkan sağlayan Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi İleri Akışkanlar Mekanikliği PIV (Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme) Laboratuvarına da destekleri için teşekkür eder.

### Kaynaklar

- ANSYS Inc., ANSYS Fluent Theory Guide. (2013a). Canonsburg, PA, Amerika Birleşik Devletleri: 66-106
- ANSYS Inc., ANSYS Fluent Theory Guide. (2013a). Canonsburg, PA, Amerika Birleşik Devletleri: 116-128
- Kilavuz A., Ozgoren M., Kavurmacioğlu LA., Durhasan T., Sarigiguzel F., Sahin B., Akilli H., Sekeroglu E., Yaniktepe B. Flow characteristics comparison of PIV and numerical prediction results for an unmanned underwater vehicle positioned close to the free surface. *Applied Ocean Research* 2022a; 129: 103399.
- Kilavuz A., Durhasan T., Ozgoren M., Sarigiguzel F., Sahin B., Kavurmacioğlu LA., Akilli H., Sekeroglu E., Yaniktepe B. Influence of free-surface on wake flow characteristics of a torpedo like geometry. *Journal of Marine Science and Technology* 2022b; 27(3): 1130-1147.
- Kilavuz A., Sarigiguzel F., Ozgoren M., Durhasan T., Sahin B., Kavurmacioğlu LA., Akilli H., Sekeroglu E., Yaniktepe B. The impacts of the free-surface and angle of attack on the flow structures around a torpedo-like geometry. *European Journal of Mechanics-B/Fluids* 2022c; 92: 226-243.
- Sarigiguzel F., Kilavuz A., Ozgoren M., Durhasan T., Sahin B., Kavurmacioğlu LA., Akilli H., Sekeroglu E., Yaniktepe B. Experimental investigation of free-surface effects on flow characteristics of a torpedo-like geometry having a cambered nose. *Ocean Engineering* 2022; 253: 111174.
- Myring, D.F., A Theoretical Study of Body Drag in Subcritical Axisymmetric Flow, *Aeronautical quarterly*, 27(3), 186-194, 1976.
- Nematollahi, A., Dadvand, A., & Dawoodian, M. (2015). An axisymmetric underwater vehicle-free surface interaction: A numerical study. *Ocean Engineering*, 96, 205–214. doi:10.1016/j.oceaneng.2014.12.028
- Salari, M., Rava, A. (2017). Numerical investigation of hydrodynamic flow over an AUV moving in the water-surface vicinity considering the laminar-turbulent transition, *J Mar Sci Appl*. 16, 298–304
- Westerweel J., Efficient detection of spurious vectors in particle image velocimetry data, *Exp Fluids*. 16 (1994) 236–247. doi:10.1007/BF00206543.