

Numerical Investigation of the Effects of Underwater Aft Cone Angle and Length-to-Beam Ratio on Hull Efficiency

Yasemin Arıkan Özden*¹, Fahri Çelik¹

yarikan@yildiz.edu.tr

¹Faculty of Naval Architecture and Maritime, Naval Architecture and Marine Engineering
Yıldız Technical University -İSTANBUL

Abstract

The use of submarines in military, touristic, oceanographic surveys and seashore areas has increased in recent years. Much of the scientific research in submarine hydrodynamics has focused on the issues of acoustics and propulsion. One of the most important differences from the submarine dimensions in determining the propulsion characteristics is to define the angle of the stern cone. In this study, the effect of stern cone angle and aspect ratio (L / B) on hull efficiency is investigated by a computational fluid dynamics method (HAD). DARPA Suboff submarine is derived for different stern cone and different L / B ratios, so that displacement volume remains constant. For different submarine geometries, resistance and propulsive properties were investigated by performing flow analysis with/without propeller. The effect on the propeller-body interaction of the stern cone is given as the thrust deduction, the effective wake coefficient and the hull efficiency.

Keywords: Submarine, Wake coefficient, Thrust deduction, Hull Efficiency, Cone Angle, Computational-Experimental Fluid Dynamics

Denizaltı Kıç Koniklik Açısının ve Boy-Genişlik Oranının Tekne Verimi Üzerine Etkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Yasemin Arıkan Özden*¹, Fahri Çelik¹

yarikan@yildiz.edu.tr

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Yıldız-İSTANBUL

Özet

Denizaltıların askeri, turistik, oşinografi araştırmaları ve deniz kıyı yapıları alanlarında kullanımları son yıllarda artış göstermektedir. Denizaltı hidrodinamiği alanındaki bilimsel araştırmaların büyük bir kısmının akustik ve sevk sistemi verimi konularına odaklandığı görülmektedir. Sevk karakteristiklerini belirlemede denizaltı boyutlarından sonra en önemli faktörlerden biri kıç koniklik açısının belirlenmesidir. Bu çalışma kapsamında kıç koniklik açısının ve boy-genişlik (L/B) oranının tekne verimi üzerindeki etkileri bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi (HAD) ile araştırılmaktadır. Deplasman hacmi sabit kalacak şekilde DARPA Suboff denizaltısı farklı kıç koniklikleri ve farklı L/B oranları için türetilmiştir. Farklı denizaltı geometrileri için pervaneli ve pervanesiz akış analizleri gerçekleştirilerek direnç ve sevk özellikleri incelenmiştir. Kıç konikliğin pervane-gövde etkileşimi üzerindeki etkileri itme azalması, efektif iz katsayısı ve tekne verimi olarak verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Denizaltı, İz katsayısı, İtme Azalması, Tekne Verimi, Koniklik Açısı, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Deneysel Akışkanlar Dinamiği

1. Giriş

Denizaltıların sevk performansında belirleyici faktörler denizaltının formu ve sevk sistemidir. Herhangi bir sevk sisteminin verimi ve akustik performansı ise belirgin bir şekilde ona gelen akışa bağlıdır. Bu da gövde formuna, özellikle de kıç gövde formuna ve koniklik açısına; denizaltı yüzeyinde herhangi bir sonar yansıtıcı kaplama bulunup bulunmadığına, yelken şekli ve boyutları ile kıç takıntılarının konfigürasyonları ve boyutlarına bağlıdır (Martin, 2015). Sevk sistemi tasarlanırken göz önünde bulundurulacak iki kriter sevk sisteminin kendi performansı ve sevk sisteminin gövde ile etkileşiminden dolayı oluşan etkilerdir. Bunlar; iz katsayısı, itme azalması ve sürtünme kayıplarıdır. Bir denizaltının ön tasarımı aşamasında sevk verimi belirlenirken bu değerlerin doğru olarak tahmin edilmesi önem taşımaktadır.

Pervane karakteristikleri gemi arkası durumunda açık suya göre üzerine gelen üniform olmayan akıştan dolayı farklılıklar göstermektedir. Bundan dolayı gemilerin performansını belirlemek için pervane/gemi etkileşiminin incelenmesi önem kazanmaktadır. Potansiyel tabanlı bir kodu RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) ile birleştirilerek iteratif olarak gemi izinin tahmin edildiği Wilcox'un çalışması (1998), pervane kuvvetinin gövde kuvveti olarak RANS'a girildiği Piquet (197), Dai ve diğerleri (1991) ve Hally ve Laurens (1998), Chen ve Lee'nin (2004) çalışmaları RANS denklemleri ile potansiyel tabanlı yöntemlerin birleştirildiği çalışmalara örnek gösterilebilir. RANS denklemlerinin kullanıldığı başlıca çalışmalara Stern (1998), Sreenivas vd. (2003), Pontanza ve Chen'in (2006) çalışmaları gösterilebilir. McDonald ve Whitfield (1996) tam takınlı pervaneli bir su altı aracının menzilin hesabı için sayısal bir yöntem sunmuşlardır. Abdel-Maksoud vd (1998) RANS denklemlerini kullanan CFX-TASCflow kodunda pervane/gemi etkileşimi problemini incelemişlerdir. 27. ITTC konferansından sonra tam ölçekli sevk simülasyonlarının uygulanabilirliği araştırılmıştır (ITTC, 2014). Castro vd. KCS gemisi üzerinde DES (Detached-Eddy Simulation) modelini kullanarak direnç, pervane açık su karakteristikleri, sevk performansını model ölçeğindeki deney ve sayısal veriler ile karşılaştırmışlardır. Tam ölçek ile elde edilen verilerin model ölçeğine göre daha yüksek olduğu görülmüştür (Castro ve diğerleri, 2011).

Açık literatürde E1619 pervanesi ile sevk edilen DARPA Suboff denizaltısı birçok araştırmada kullanılmıştır. 2010 yılında Alin vd. doğrusal hareketteki DARPA Suboff denizaltısının etrafındaki akımı DES ve LES(Large Eddy Simulation) yöntemlerini kullanarak incelemişlerdir (Alin ve diğerleri, 2010). Çalışmanın amacı oldukça kaba bir çözüm ağında denizaltılar etrafındaki akımın farklı simülasyon yöntemleri ile modellenmesinin etkilerinin araştırılması ve DES ve LES gibi çözüm yöntemlerinin incelenmesidir. Yine 2010 yılında Alin vd. denizaltı ve pervane arasındaki etkileşimi incelemişlerdir (Alin ve diğerleri, Eylül 2010). Bu çalışmalarında LES yöntemine dayanan bir hesap metodolojisi ile takınlı DARPA Suboff denizaltı modelinin ve bir su üstü gemisinin etrafındaki akımı ve akımdan kaynaklanan gürültüyü incelemişlerdir. 2011'de Liefvendahl ve Troeng LES yöntemini kullanarak bir denizaltı pervanesindeki çevrimsel (cycle to cycle) pervane yükünü incelemişlerdir (Liefvendahl ve Troeng, 2011).

2012 yılında Iowa Üniversitesi'nden Nathan Chase E1619 ile sevk edilen DARPA SUBOFF denizaltısının akış simülasyonlarını CFDSHIP-IOWA V4.5 programı ile incelemiştir (Chase 2012 ve 2013). Pervane açık su diyagramlarını iki farklı çözüm ağı için ağır yüklerden hafif yüklü pervane durumlarına farklı ilerleme katsayıları için elde etmiş ve deneysel veriler ile karşılaştırmıştır. İz üzerindeki hızları deneysel veriler ile karşılaştırmış ve sonuçların uyum içinde olduğunu göstermiştir. E1619 ile sevk edilen DARPA Suboff temsili denizaltısının model ölçeğinde sevk (self-propulsion) noktasını sayısal yöntemler ile elde etmiş, doğrusal hareket ve sancak dönüşü durumlarını incelemiştir.

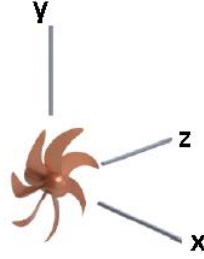
Bu çalışmada E1619 pervanesi ile sevk edilen DARPA Suboff Denizaltı Modeli farklı kış koniklik açıları ve farklı L/B oranları için türetilerek, denizaltı kış formunun ve boy-genişlik (L/B) oranlarının tekne verimine etkileri incelenmiştir. Bunun için ilk önce E1619 pervanesi açık su karakteristikleri ve DARPA Suboff denizaltı modelinin direnç karakteristikleri ticari bir HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yazılımı olan ANSYS FLUENT ile elde edilmiş ve sonuçlar literatürdeki deney sonuçları ile karşılaştırılarak yöntemin doğrulanması sağlanmıştır. Daha sonra matematiksel olarak temsil edilen denizaltı kış geometrisi sabit deplasman şartı sağlanacak şekilde değiştirilerek farklı kış konikliklerine

göre türetilmiştir. Aynı şekilde sabit hacimde farklı boy-genişlik oranlarına göre orjinal denizaltı geometrisi değiştirilmiştir. E1619 pervanesi ile sevk edilen denizaltı modeli ve türetilmiş geometriler değişken yüklü sevk deneyi yöntemine göre HAD yöntemleri ile incelenerek sevk noktası belirlenmiştir. Buradan itme azalması, iz katsayısı ve tekne verimi değerleri elde edilmiştir.

2. Geometriler

2.1. E1619 pervanesi

Çalışmada INSEAN tarafından tasarlanan E1619 model pervanesi kullanılmıştır. E1619 pervanesi yüksek çalıklıklı yedi kanatlı bir denizaltı pervanesidir (Şekil 1). Pervanenin açık su deneyleri INSEAN'ın çekme tankında, iz ölçümleri ise sirkülasyon tankında LDV (Laser Doppler Velocimetry) tekniği ile yapılmıştır. Model pervane tek parça olarak alüminyumdan üretilmiş olup dışı lazer yansımaları azaltmak amacı ile siyah anod kaplama ile kaplanmıştır (Di Felice ve diğerleri, 2009). Pervane ana boyutları Tablo 1'de verilmektedir.



Şekil 1. INSEAN E1619 Model Pervanesi

Tablo 1. E1619 Pervanesi Ana Boyutları

Pervane Kanat Sayısı	Z	7
Çap (m)	D	0.485
Göbek Çap Oranı	H/D	0.226
0.7R'de Piç Oranı	P/D	1.150
0.75R'de Kord Uzunluğu (m)	$C_{0.75}$	0.0686
Kanat açılım alanı oranı	A_E/A_0	0.608

2.2. Darpa Suboff denizaltı modeli

Çalışmada denizaltı modeli olarak açık literatürde yaygın olarak kullanılan temsili (jenerik) denizaltı modeli DARPA Suboff'un Groves vd. tarafından AFF8 olarak belirtilen takıntılı konfigürasyonu kullanılmıştır (Groves ve diğerleri, 1989). Model denizaltının ana boyutları Tablo 2'de verilmiştir. DARPA Suboff AFF8 konfigürasyonunun direnç deneyleri Liu ve Huang tarafından Reynolds sayısı $R_n=12 \times 10^6$ için yapılmıştır (Liu ve Huang, 1998). Pervane ile sevk edilen denizaltı modelinde E1619 pervanesi ölçeklendirilerek 0.262 m çapında kullanılmaktadır. Gövde, takıntılar ve pervanenin yerleşimi Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Pervaneli Darpa Suboff konfigürasyonu ve kullanılan koordinat eksenleri

Tablo 2. DARPA Suboff AFF8'in ana boyutları

Toplam Boy	L _{OA}	4.356 m
Kaideler Arası Boy	L _{PP}	4.261 m
Maksimum Gövde Yarı Çapı	R _{MAX}	0.254 m
Hacim Merkezi (Burundan kıça)	LCB	0.4621 L _{OA}
Deplasman Hacmi	∇	0.718 m ³
Islak Alan	S _{WS}	6.338 m ²

2.3. Farklı kık koniklik açılarına göre Darpa Suboff denizaltı model geometrisinin türetilmesi

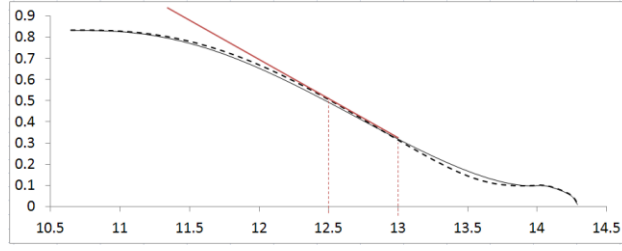
Denizaltı kık koniklik açısı, denizaltıların kık formunun eğimini veren bir tanımdır. Genel olarak denizaltılarda pervane bacasının başlangıcından gövdeye çizilen bir teğet ile tanımlanır ve maksimum eğim açısını ifade eder. DARPA Suboff denizaltı modelinin kık koniklik açısı olarak 12.5-13 feet lokasyonu arasındaki eğim açısı değeri kullanılmıştır (Şekil 3). Baş, paralel gövde, kık ve takıntıları matematiksel olarak ifade edilen DARPA Suboff formunun kık gövdesi aşağıdaki formülasyon ile belirtilmiştir (Groves ve diğerleri, 1989):

Kık dikme $x=13.979167$ ft (4.26085 m.)'den itibaren geçerli
 $10.645833 \leq x \leq 13.979167$ ft ($3.2448 \leq x \leq 4.26085$ metre)

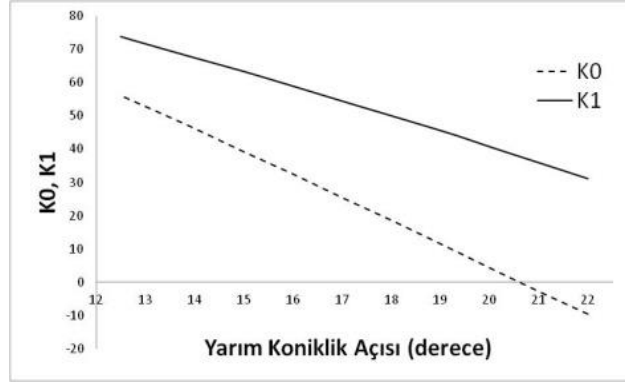
$$R = R_{MAX} \left\{ r_h^2 + r_h K_0 \varepsilon^2 + \left(20 - 20r_h^2 - 4r_h K_0 - \frac{1}{3} K_1 \right) \varepsilon^3 + \left(-45 + 45r_h^2 + 6r_h K_0 + K_1 \right) \varepsilon^4 + \left(36 - 36r_h^2 - 4r_h K_0 - K_1 \right) \varepsilon^5 + \left(-10 + 10r_h^2 + r_h K_0 + \frac{1}{3} K_1 \right) \varepsilon^6 \right\}^{1/2} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{13.979167 - x}{3.333333}, x \text{ (feet)} \quad (2)$$

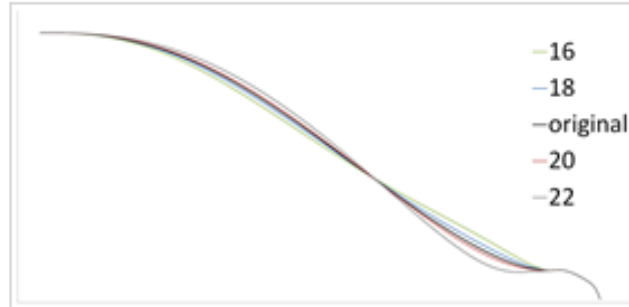
$R_{MAX} = 0.254$ m. (0.8333 feet) ve $r_h = 0.1175$ değerinde sabitlerdir. Orijinal DARPA Suboff formu için $K_0 = 10$ ve $K_1 = 44.6244$ şeklinde alınmaktadır. K_0 ve K_1 katsayıları değiştirilerek yapılan incelemelerde, bu katsayıların değişimi ile kık gövde formunun kontrol edilebildiği saptanmıştır. Toplam hacim sabit kalacak şekilde kık koniklik açılarının değişimi K_0 ve K_1 katsayıları değiştirilerek incelenmiştir. İncelemelerden K_0 'ın kık konikliğinin eğimini kontrol ettiği, K_1 'in ise eğikliğini paralel öteleyerek hacmi kontrol ettiği görülmüştür. Yarım kık koniklik açıları 12.5 ile 22 derece arasında olacak şekilde K_0 ve K_1 katsayıları kık formunun hacmi sabit olacak şekilde değiştirilmiştir. Elde edilen K_0 ve K_1 katsayılarının yarım koniklik açıları ile lineere yakın bir şekilde değiştiği görülmüştür (Şekil 4). Bunlar içinden anlamlı olan dört durum, yarım kık koniklik açısı 16, 18, 20 ve 22 dereceler incelenmek üzere seçilmiştir (Şekil 5) (Tablo 3).



Şekil 3. Kıç koniklik açısı ölçümü yapılan konum



Şekil 4. K_0 ve K_1 değerleri



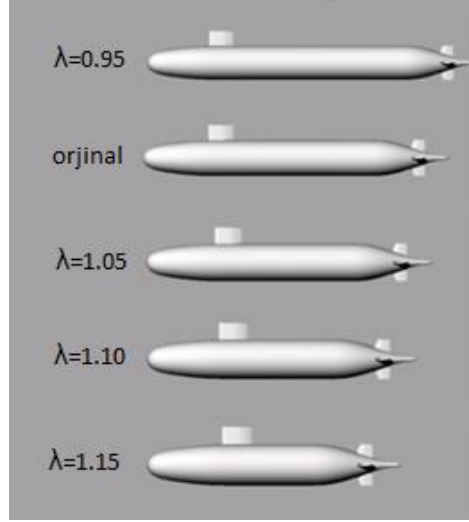
Şekil 5. Farklı kıç koniklik formları

Tablo 3. Türetilen geometrilerdeki K_0 ve K_1 değerleri

Model ismi	Kıç Yarım Koniklik Açısı (derece)	K_0	K_1
DKKA_1	16	32.60	59.00
DKKA_2	18	18.70	50.10
DKKA_4	20	4.40	40.80
DKKA_5	22	-9.50	31.20

2.4. Farklı boy-genişlik oranlarına göre Darpa Suboff denizaltı model geometrilerinin türetilmesi

Darpa Suboff denizaltı modelinin farklı boy-genişlik oranlarına göre elde edilmesi için orjinal durum 0.95, 1.05, 1.1 ve 1.15 oranlarında ölçeklendirilmiştir (Şekil 6). Pervane ile beraber ölçeklendirilen geometrilerin sabit deplasman koşulu paralel gövde boyutlarının değiştirilmesi ile sağlanmıştır.



Şekil 6. Farklı L/B oranlarına göre türetilen geometriler

Tablo 4. Farklı L/B oranlarına göre türetilen türetilen geometrilerin ana boyutları

Ölçek	L	B	L/B
0.95	4.690	0.483	9.7101
1.00	4.356	0.508	8.5748
1.05	4.070	0.530	7.6792
1.10	3.830	0.560	6.8393
1.15	3.612	0.584	6.1849

3. Sayısal yöntem

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri sonlu hacimler yöntemini kullanan ticari bir yazılım olan ANSYS FLUENT 14.5 ile yapılmıştır. Çözüm ağı yapılandırılmamış elemanlardan meydana gelecek şekilde Pointwise programında oluşturulmuştur. Çözüm ağı duvardan boyutsuz uzaklık $y^+=50$ sağlanacak şekilde T-REX elemanlar kullanılmıştır. Pervane ve denizaltının çözüm ağı bağımsızlığı üç farklı yoğunluktaki ağı için orta yoğunluktaki çözüm ağının $\sqrt[3]{2}$ oranında değiştirilmesi ile oluşturulmuştur. Hesaplarda SST (Shear Stress Transport) $k-\omega$ türbülans modeli kullanılmıştır. Çözüm şeması SIMPLE (Semi Implicit Methods for Pressure Linked Equations) olarak seçilmiştir. Gradyan ayrıklaştırması Green-Gauss nod tabanlıdır. Yapılan analizlerde kullanılan sınır ve başlangıç şartları Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Analizlerdeki çözüm şemaları ve türbülans sınır şartları

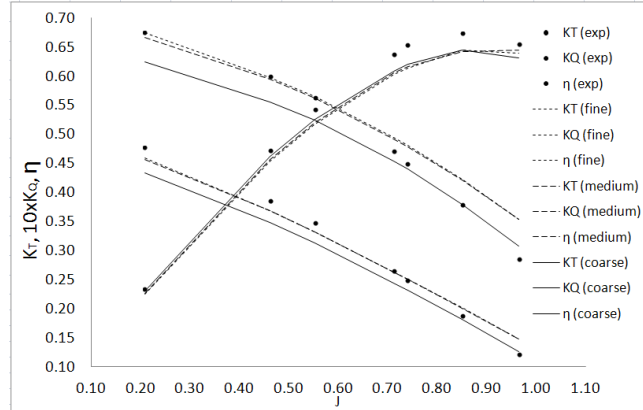
	E1619 Pervanesi	DARPA Suboff	Pervaneli DARPA Suboff
Basınç ayrıklaştırması	PRESTO	İkinci mertebe	İkinci mertebe
Momentum denklemleri	QUICK	İkinci mertebe	İkinci mertebe
Türbülans kinetik enerjisi	QUICK	QUICK	QUICK
Spesifik yayılma oranı	QUICK	QUICK	QUICK
Türbülans Yoğunluğu	2.5	2	2
Türbülans viskozite oranı	10	5	5
Türbülans kinetik enerjisi	0.002646	0.004537	0.004537
Spesifik yayılma oranı	263.3337	903.157	903.157

3.1. E1619 pervanesi açık su karakteristikleri ve pervane gerisi izin HAD ile tahmini

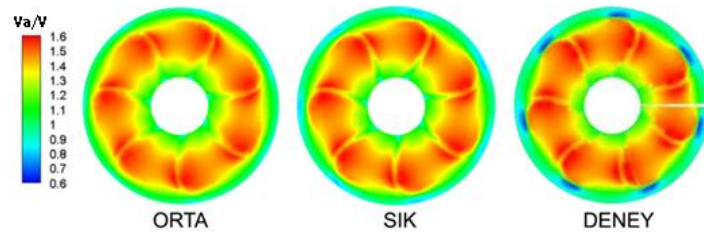
E1619 pervanesi incelenirken $-6.2 < x/D < 3.09$ uzunluğunda ve $r/D < 6.2$ çapında silindirik bir çözüm hacmi içine yerleştirilmiştir. Çözüm hacminin içine pervanenin içinde bulunduğu ve pervaneye dönme hareketinin verildiği $2.5D$ uzunluğunda ve $1.5D$ çapında silindirik bir Chimera blok yerleştirilmiştir. Kaba olan çözüm ağı 3.8×10^6 , orta çözüm ağı 6.6×10^6 ve sık olan çözüm ağı 11.8×10^6 elemandan oluşmaktadır. Pervaneye dönme hareketi Hareketli Referans Eksen (Moving Reference Frame-MRF) yöntemi ile verilmiştir.

Pervaneye gelen akım hız girişi ile verilmiş ve hızı $V=1.68\text{m/s}$ (Di Fellice'nin çalışmasında belirtilen hız değeri (2009)) olarak alınmıştır. Farklı ilerleme hızları için akış hızı sabit tutulmuş ve pervane devri değiştirilmiştir. Çıkışta basınç çıkış şartı sıfır olarak kabul edilmiştir. Sınır şartlarında türbülans girişte ve çıkışta türbülans yoğunluğu ve viskozite oranı ile tanımlanmıştır. Pervane ve pervane göbeğinin yüzeyi kaydırmaz duvar olarak, dış silindirik yüzey simetri ve iç silindirik yüzey ara yüzey olarak seçilmiştir.

Farklı çözüm ağı yoğunluğuna göre elde edilen açık su diyagramı Şekil 7'de verilmiştir. Burada kaba çözüm ağı için K_T %2, K_Q %5, orta yoğunluklu çözüm ağı K_T için %0.3 K_Q için %6 ve sık çözüm ağı K_T için %0.4 ve K_Q için %6 hata ile hesaplanmıştır. Pervane gerisi $x=0.17R$ konumunda elde edilen iz görünümü deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır (Şekil 8). Sevk hesaplarında pervanenin orta yoğunluklu çözüm ağı için olan özellikleri kullanılmıştır.



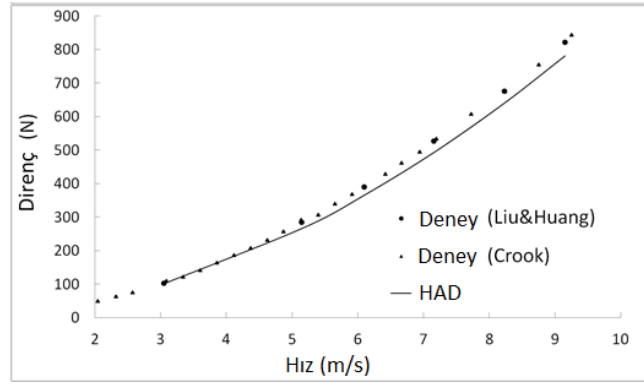
Şekil 7. E1619 Pervanesi Açık Su Pervane Karakteristikleri Çözüm Ağı Bağımsızlığı



Şekil 8. E1619 pervanesi farklı çözüm ağı yoğunluklarında $J=0.74$ için $x=0.17R$ konumundaki boyutsuz hız (V_a/V)

3.2. Darpa Suboff denizaltı modeli direnç karakteristikleri ve nominal izin HAD ile tahmini

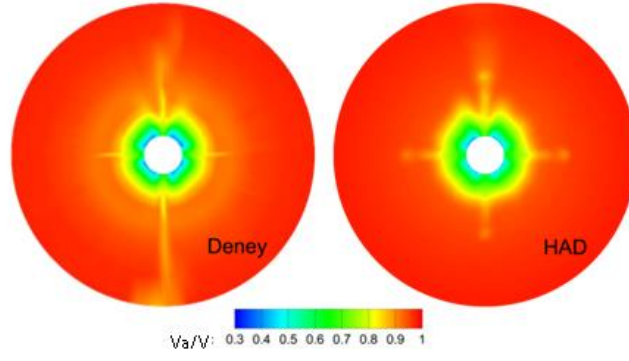
Darpa Suboff modeli incelenirken $-1.03 < x/L < 3.78$ ve $r/L < 1.6$ boyutlarında silindirik bir çözüm hacminin içine yerleştirilmiştir. Çözüm ağı 11×10^6 elemandan oluşmaktadır. Denizaltıya gelen akım, hız girişi ile verilmiştir. Çıkışta basınç çıkış şartı sıfır olarak kabul edilmiştir. Sınır şartlarında türbülans girişte ve çıkışta türbülans yoğunluğu ve viskozite oranı ile tanımlanmıştır. Denizaltının yüzeyi kaydırmaz duvar olarak, dış silindirik yüzey simetri olarak seçilmiştir. HAD'den elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen direnç değerlerinin deneye göre hata oranı Reynolds sayısının 12×10^6 ile 18×10^6 aralığında %1 ve 18×10^6 'dan büyük değerlerinde %6 mertebesindedir (Şekil 9) (Tablo 10). Denizaltı nominal iz dağılımı deneysel veriler ile $x/L=0.98$ konumunda karşılaştırılmıştır (Şekil 10). Sonuçların uyum içinde olduğu görülmektedir.



Şekil 9. Darpa Suboff denizaltı modelinin direnç değerleri

Tablo 6. HAD ile elde edilen DARPA Suboff modeli direnç değerlerinin deney ile karşılaştırılması

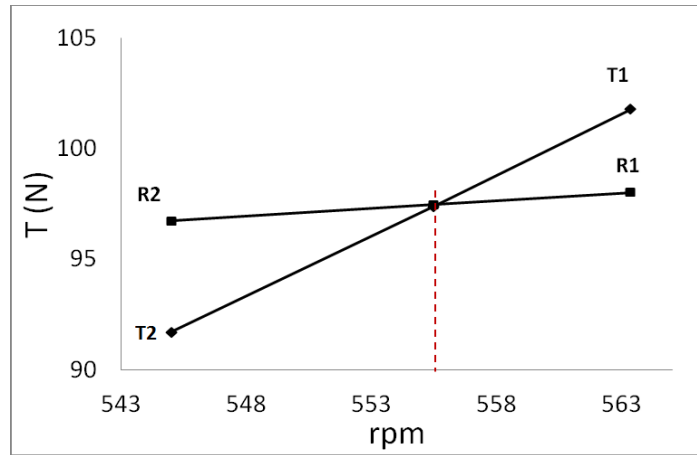
Reynolds Sayısı	Model Hızı (m/s)	Deney (Liu&Huang)	HAD	hata
		Direnç (Newton)	Direnç (Newton)	
1.2×10^7	3.050	102.3	101.27	0.010
2.0×10^7	5.144	283.8	265.53	0.064
2.4×10^7	6.096	389.2	364.861	0.063
2.8×10^7	7.160	526.6	492.98	0.064
3.2×10^7	8.230	675.6	639.87	0.053
3.6×10^7	9.151	821.1	780.36	0.050



Şekil 10. DARPA Suboff $x/L=0.98$ konumunda nominal iz dağılımlarının (V_a/V) karşılaştırılması

4. Darpa Suboff denizaltı modelinin sevk noktasının ve sevk karakteristiklerinin had ile tahmini

Pervaneli denizaltı için gerçekleştirilen sevk noktası (Sabit denizaltı hızında denizaltı toplam direncinin pervane itmesine eşit olacağı pervane devir sayısı) belirleme analizlerinde pervane ve denizaltı için yapılan analizlerdeki çözüm ağı özellikleri kullanılmıştır. E1619 pervanesi 3R uzunluğunda ve 1.5R çapında silindirik bir Chimera blok içine yerleştirilmiş ve MRF yöntemi ile dönme hareketi verilmiştir. Sevk noktası değişken yüklü sevk deneyi prensiplerine göre belirlenmiştir. Denizaltıya gelen akım, hız girişi ile verilmiştir. Çıkışta basınç çıkış şartı sıfır olarak kabul edilmiştir. Sınır şartlarında türbülans girişte ve çıkışta türbülans yoğunluğu ve viskozite oranı ile tanımlanmıştır. Denizaltının yüzeyi kaydırmaz duvar olarak, dış silindirik yüzey simetri olarak seçilmiştir. Pervaneli denizaltı modeline akış hızı $V=2.75$ m/s olarak gönderilmiş ve pervane devri farklı pervane yüklemelerine denk gelecek şekilde tahmini sevk noktasından büyük ve küçük olacak şekilde değiştirilmiştir. Her iki durum için elde edilen pervane itmesi ve denizaltı direnci değerlerinin kesişiminden ortaya çıkan devir değeri sevk noktası olarak belirlenerek bu değer için de analiz yapılmıştır (Şekil 11) (Tablo 7). Elde edilen itme ve tork değerlerinden itme benzerliği yaklaşımı ile efektif iz katsayısı, itme azalması ve tekne verimi hesaplanmıştır.



Şekil 11. Sevk noktasının belirlenmesi

Tablo 7. Sevk noktası belirlemek için yapılan analiz sonuçları

DURUM	n (rpm)	T (N)	R (N)
1	563.3321	101.0934	97.7996
2	545.0000	91.0272	96.5209
Sevk Noktası	555.4800	97.4013	97.4577

V=2.75 m/s hızındaki sevk noktası için belirlenen pervane devri n=555.48 rpm'dir. V=2.75m/s için ilerleme katsayısı; $J_p = \frac{V_s}{nD} = 1.1337$ olarak hesaplanır. Bu devirde hesaplanan itme kuvveti T=97.4013N ve moment Q=4.9034 Nm'dir. Bu değerlerden itme kuvveti katsayısı, tork kuvveti katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$K_{TP} = \frac{T}{\rho n^2 D^4} = \frac{97.4013}{998.2 \times 9.2580^2 \times 0.262^4} = 0.2416 \quad (3)$$

$$K_{QP} = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} = \frac{4.9034}{998.2 \times 9.2580^2 \times 0.262^5} = 0.04643 \quad (4)$$

Denizaltı arkası durumda pervaneye gelen akış hızındaki koşullarda pervane açık su karakteristiklerini belirlemek için itme benzerliği yaklaşımı kullanılmıştır. Bunun için hesaplanan K_{TP} değeri sayısal olarak elde edilen pervane açık su diyagramına yerleştirilir. Yerleştirilen bu değerden ilerleme hızı (J_0), tork katsayısı (K_{Q0}) ve verim (η_0) değerlerine birer dikme çıkılarak değerler okunur. Böylece denizaltı arkası durumda pervaneye gelen akış hızına karşılık gelen hızda pervane açık su karakteristikleri okunmuş olur. İlerleme hızı $J_0 = 0.7280$, tork katsayısı $K_{Q0} = 0.0470$ ve pervane verimi $\eta_0 = 0.6030$ olarak okunur.

Buradan Taylor iz katsayısı;

$$w_T = \frac{J_p - J_0}{J_p} = \frac{(1.1337 - 0.7280)}{1.1337} = 0.3579 \quad (5)$$

olarak hesaplanır. İtme azalması ise;

$$t = \frac{T - R_m}{T} = \frac{97.4013 - 82.6032}{97.4013} = 0.1519 \quad (6)$$

bulunur. Tekne verimi;

$$\eta_H = \frac{1 - t}{1 - w_E} = 1.3207 \quad (7)$$

Bağıl dönme verimi pervane açık su diyagramından elde edilen tork katsayısının denizaltı arkası durumdakine oranı olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

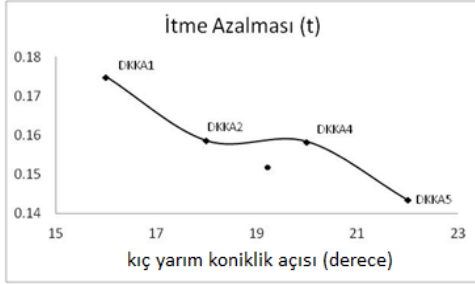
$$\eta_R = \frac{K_{Q0}}{K_{QP}} = \frac{0.044}{0.046} = 1.0125 \quad (8)$$

Bu sonuçlar doğrultusunda sevk verim değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

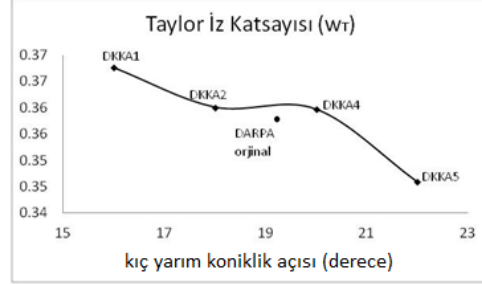
$$\eta = \eta_H \cdot \eta_0 \cdot \eta_R = 1.3207 \times 0.6030 \times 1.025 = 0.8064 \quad (9)$$

5. Farklı kış konikliklerine göre Darpa Suboff denizaltı modelinin sevk karakteristiklerinin had ile tahmini

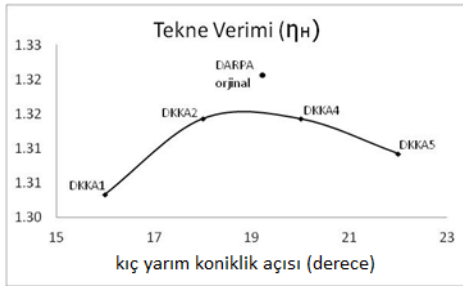
E1619 pervanesi ile sevk edilen DARPA Suboff denizaltı modelinin kış yarım koniklik açısı sırası ile 16° (DKKA_1), 18° (DKKA_2), 20° (DKKA_4) ve 22° (DKKA_5) olmak üzere değiştirilmiş geometrilerinin sevk karakteristikleri Bölüm 4'te belirtildiği şekilde $V=2.75$ m/s için tespit edilmiştir.



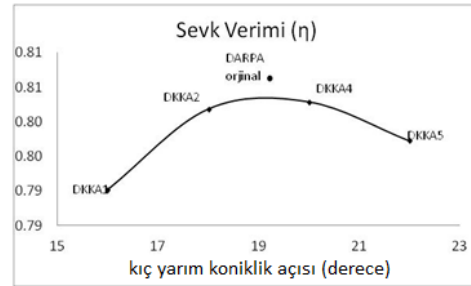
Şekil 12. İtme azalması



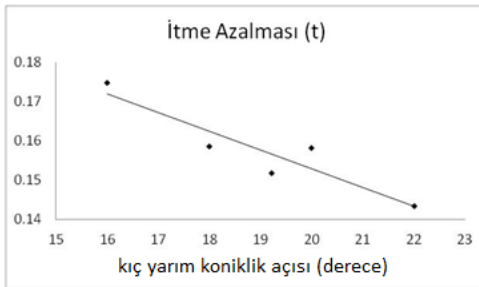
Şekil 13. Taylor İz katsayısı



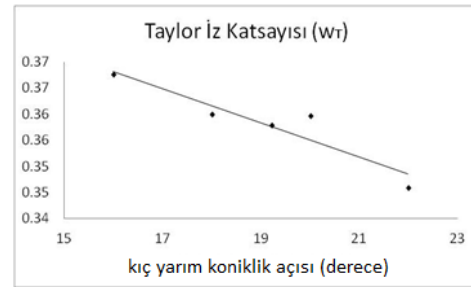
Şekil 14. Tekne verimi



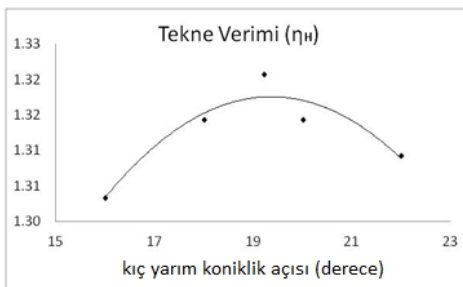
Şekil 15. Sevk verimi



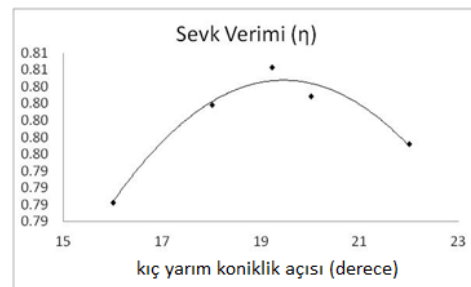
Şekil 16. İtme azalması



Şekil 17. Taylor iz katsayısı



Şekil 18. Tekne verimi

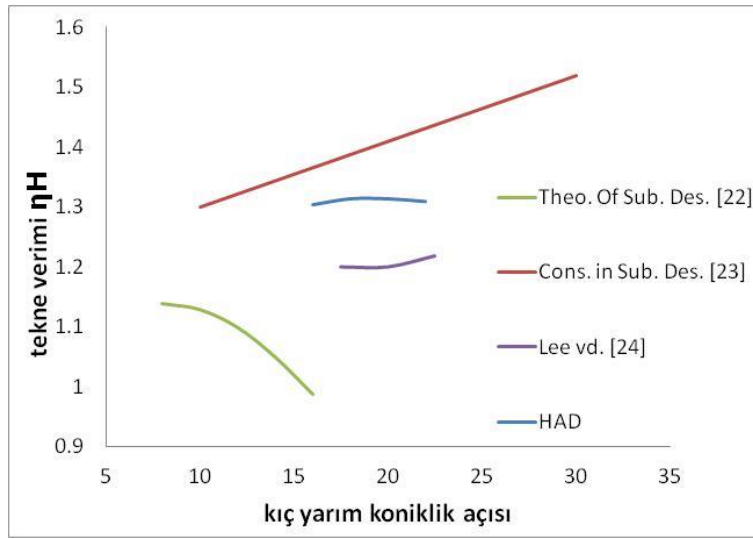


Şekil 19. Sevk verimi

Tablo 8. Farklı kıç konikliklere göre itme azalması, efektif iz katsayısı, verim değerleri

Durum	Derece	R (N)	T (N)	devir (rpm)	t	w _E	η_H	η_{OT}	η_R	η
DKKA_1	16	82.3200	99.7693	555.28	0.1749	0.3669	1.3033	0.5990	1.0122	0.7902
DKKA_2	18	82.6107	98.1817	555.32	0.1586	0.3598	1.3143	0.6050	1.0084	0.8019
DKKA_4	20	82.6311	98.1810	555.45	0.1584	0.3597	1.3144	0.6050	1.0097	0.8029
DKKA_5	22	82.8613	96.7473	556.70	0.1435	0.3459	1.3093	0.6080	1.0015	0.7973

Farklı kıç koniklik açıları için elde edilmiş itme azalması, efektif iz katsayısı, tekne verimi, bağıl dönme verimi ve sevk verimi değerleri Tablo 8’de verilmiştir. Farklı kıç konikliklerine göre elde edilen itme azalması Şekil 12’de, efektif iz katsayısı Şekil 13’te, tekne verimi Şekil 14’te ve sevk verimi Şekil 15’te gösterilmektedir. Kıç konikliği değiştirilmemiş geometri için elde edilen değerler de Şekil 12-15 üzerinde işaretlenmiştir. Şekil 16 ve Şekil 18 arası orijinal DARPA Suboff verileri de dahil edilerek elde edilen sonuçlardan Şekil 16 ve 17’de regresyon eğrisi ve Şekil 18 ve 19’da regresyon polinomu geçirilerek ortalama eğriler elde edilmiştir. Açık literatürdeki diğer kaynaklarda verilen tekne verimi değerleri ile elde edilen sonuçlar Şekil 20’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 20. Tekne veriminin açık literatür verileri ile karşılaştırması

6. Farklı boy-genişlik oranlarına göre darpa suboff denizaltı modelinin sevk karakteristiklerinin had ile tahmini

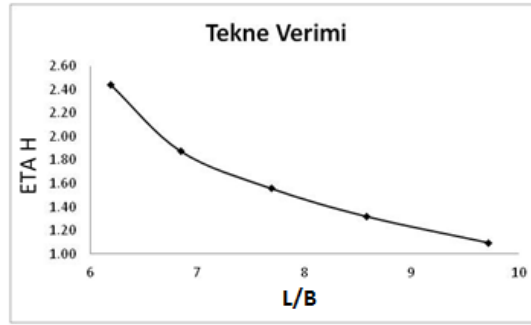
Farklı Boy-genişlik değerlerine göre oluşturulmuş denizaltı modellerinin direnç analizleri $V=2.75$ m/s için yapılmıştır. Ardından her geometri için E1619 pervanesi ile sevk noktaları değişken yüklemeli sevk deneyi prensiplerine göre tayin edilmiştir.

Tablo 9. Boy-genişlik (L/B) değişimine göre direnç ve sevk değerleri

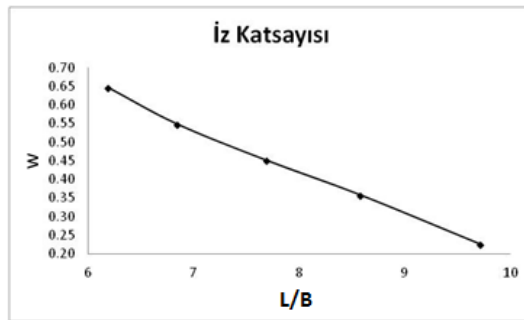
Ölçek	L	B	L/B	R (N)	T (N)	n (rpm)	n (rps)	Q (Nm)
0.95	4.69	0.483	9.7101	82.2038	96.8197	598.2000	9.97000	4.54086
1.00	4.356	0.508	8.5748	82.6032	97.4013	555.4800	9.25800	4.90300
1.05	4.07	0.53	7.6792	83.0253	96.9719	517.0000	8.61667	4.23187
1.10	3.83	0.56	6.8393	83.6348	98.6291	487.0000	8.11667	5.66504
1.15	3.612	0.584	6.1849	84.3154	97.5086	457.0000	7.61667	5.98989

Tablo 10. Boy-genişlik (L/B) değişimine göre direnç ve sevk değerleri

Ölçek	J	K _{TP}	K _{QP}	J _{OT}	KQ _{OT}	w _T	t	η _H	η _{OT}	η _R	η
0.95	1.052777	0.20709	0.03707	0.815	0.0430	0.2259	0.1510	1.0967	0.6400	1.1600	0.8142
1.00	1.133742	0.24161	0.04642	0.728	0.0470	0.3579	0.1519	1.3207	0.6030	1.0125	0.8064
1.05	1.218126	0.27768	0.04625	0.668	0.0512	0.4516	0.1438	1.5613	0.5800	1.1070	1.0059
1.10	1.293164	0.31829	0.06978	0.584	0.0547	0.5484	0.1520	1.8777	0.5320	0.7839	0.7978
1.15	1.378055	0.35735	0.08378	0.487	0.0588	0.6466	0.1353	2.4468	0.4800	0.7018	0.8208



Şekil 21. Farklı boy-genişlik (L/B) oranlarına göre tekne verimi



Şekil 22. Farklı boy-genişlik (L/B) oranlarına göre Taylor iz katsayısı

7. Sonuçlar

Çalışma kapsamında DARPA Suboff denizaltı modeli ve E1619 denizaltı pervanesi kullanılarak denizaltının sevk noktası HAD yöntemleri ile belirlenmiştir. Bunun için ilk önce E1619 pervanesi HAD yöntemleri ile çözümlenerek deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların pervane açık su karakteristikleri ve pervane gerisi iz dağılımı yönünden uyum içinde olduğu görülmüştür. Daha sonra AFF8 konfigürasyonundaki DARPA Suboff denizaltısının direnç karakteristikleri HAD yöntemleri ile

elde edilerek açık literatürdeki deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Direnç değerleri ve denizaltı kıçında elde edilen nominal iz dağılımının deneysel veriler ile uyum içinde olduğu görülmüştür. E1619 pervanesi ile sevk edilen DARPA Suboff modelinin sevk noktası HAD yöntemleri ile değişken yüklü sevk deneyi prensiplerine göre belirlenmiştir. Bu noktada itme azalması, efektif iz katsayısı, bağlı dönme verimi, tekne verimi ve sevk verimi değerleri hesaplanmıştır. Kıç koniklik açısının tekne verimi üzerindeki etkilerini incelemek amacı ile geometrisi matematiksel olarak formüle edilmiş DARPA Suboff geometrisi sabit hacim prensibi ile formülü içinde geçen K_0 ve K_1 katsayılarının değiştirilmesi ile modifiye edilmiştir. Buradan dört farklı koniklik açısına sahip geometri türetilmiştir. Ardından sabit hacimde farklı boy-genişlik oranlarında denizaltı geometrileri türetilmiştir. Türetilmiş geometrilerin de HAD yöntemi ile direnç karakteristikleri ve E1619 pervanesi konfigürasyonu ile sevk noktaları tespit edilmiştir.

Açık literatürdeki kaynaklardan Theory of Submarine Design kitabında (2001) kıç koniklik açısı arttıkça itme azalması artmakta, efektif iz katsayısı azalmakta, verim azalmaktadır. Concepts of Submarine Design kitabında (1994) kıç koniklik arttıkça itme azalması artmakta, efektif iz katsayısı artmakta ve verim artmaktadır. Açık literatürdeki bir diğer kaynakta (Lee ve diğerleri, 2003) kıç koniklik açısı arttıkça itme azalması artmakta, efektif iz katsayısı artmakta ve verim küçük bir aralıkta değişerek artmaktadır.

- Bu çalışmada DARPA Suboff denizaltısı ve E1619 pervanesi konfigürasyonunda kıç koniklik açısı arttıkça itme azalması ve efektif iz katsayısı değerinde bir azalma gözlemlenmektedir. Tekne verimi değeri çok küçük bir aralıkta değişmekte olup 19-20 derece civarında maksimum değerini aldığı görülmektedir. Darpa Suboff denizaltısının orjinal durumunun en verimli durum olduğu görülmektedir.
- Farklı boy-genişlik oranları için yapılan incelemede tekne veriminin L/B oranı arttıkça azaldığı gözlemlenmektedir. Boy-genişlik oranı arttıkça denizaltıların direncinde bir düşüş gözlemlenmektedir. Boy-genişlik oranı değiştirilirken pervane çapı/maksimum çap oranı sabit kalacak şekilde pervane de ölçeklendirilmiştir. Pervane çapı büyüdükçe sevk noktasında pervane devrinde bir düşüş görülmektedir. Buradan L/B oranı arttıkça J_{OT} ilerleme katsayısında bir yükselme gözlemlenmekte ve efektif iz katsayısı değerleri L/B arttıkça azalma eğilimindedir.
- Çalışmanın bundan sonraki kısmında denizaltı üzerindeki ölçek etkilerinin incelenmesi ve farklı bir denizaltı geometrisi için kıç koniklik açısının değişiminin incelenmesi hedeflenmektedir.

8. Teşekkür

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün 2015-10-01-DOP01 numaralı projesi ile desteklenmiştir. INSEAN'dan Mario Felli'ye çalışma kapsamında kullanılmak üzere E1619 pervanesinin geometrisini ve deney verilerini paylaştığından ötürü teşekkürlerimizi sunarız. Sevk deneyi prensipleri konusunda bilgi ve tecrübelerini paylaşan Prof. Dr. Emin Korkut'a, İTÜ HIGHLAB'ı kullanmamı sağlayan Yrd. Doç. Dr. Oral Ünal ve Prof. Dr. Ömer Gören'e, DARPA geometrisi için kıç koniklik açısının belirlenmesi konusunda önerilerinden Prof. Dr. Pablo Carrica'ya geometri çizimleri ile üç boyutlu model oluşturulması konusunda desteklerinden ötürü DATUM Ltd. Şti.'den Ersin Demir ve Azmi Ak'a teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca Yük. Müh. Münir Cansın Özden'e çalışmalarımıza olan desteklerinden ötürü teşekkürlerimizi sunarız.

9. Kaynaklar

- Abdel-Maksoud, M., Menter, F., Wuttke, H. (1998). "Numerical Computation of the Series 60 CB=0.6 Ship with Rotating Propeller", Third Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow and Hull Form Design, Osaka.
- Alin, N., Bensow, R., Fureby, C., Huuva, T. (2010). "Current Capabilities of DES and LES for Submarines at Straight Course", Journal of Ship Research, Vol. 54, p. 184-196.
- Alin, C., Chapius, M., Fureby, C., Liefvendahl, M., Svennberg, U., Troeng, C. (Eylül, 2010). "A Numerical Study of Submarine Propeller-Hull Interactions", 28th Symposium on Naval Hydrodynamics Pasadena, A.B.D.
- Burcher R. ve Rydill, L. (1994). "Concepts in Submarine Design", Cambridge University Press.
- Lee, S.W., Hwang, Y.S., Ryu, M.C., Kim, I.H., Sin, M.S. (2003) "A Development of 3000 ton Class Submarine and the Study on its Hydrodynamic Performances", The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, A.B.D.
- Castro, A. M., Carrica, P.M., Stern F. (2011). "Full Scale self-propulsion computations using discretized propeller for the KRISO container ship KCS". Computers&Fluids, 51, pp.35-47.
- Chase, N. (2012). "Simulations of the DARPA Suboff Submarine including self-propulsion with the E1619 Propeller", Master of Science Thesis, University of Iowa.
- Chase, N., Carrica, P. M. (2013). "Submarine Propeller Computations and Application to Self-Propulsion of DARPA Suboff", Ocean Engineering, Vol. 60, 68-80.
- Chen, H.C., Lee, S.K. (2004). "Time-domain Simulation of Four-quadrant Propeller Flows by a Chimera Moving Grid Approach", Proc. ASCE Conf. Ocean Eng. In the Oceans VI, p177.
- Dai, C.M.H., Gorski J.J., Hausling, H.J. (1991). "Computation of an Integrated Ducted Propulsor-stern Performance in Axisymmetric Flow", Proc. Propeller/shafting 1991 Symposium.
- Di Felice F., Felli M., Liefvendahl M., Svennberg U. (2009). "Numerical and experimental analysis of the wake behavior of a generic submarine propeller". First International Symposium Marine Propulsors, Trondheim, Norway.
- Groves, N.C., Huang, T.T., Chang, M.S. (1989). "Geometric Characteristics of Darpa Suboff Models", David Taylor Research Center, Ship Hydromechanics Department, Report Number DTRC/SHD-1298-01.
- Hally, D., Laurens, J.-M. (1998). "Numerical Simulation of Hull-Propeller Interaction Using Force Fields Within Navier-Stokes Computations", Ship Technology Research, Vol. 45, No. 1.
- Kormilitsin, Y.N. ve Khalizev, O.A. (2001). "Theory of Submarine Design", Riviera Maritime Media.
- Liefvendahl, M., Troeng, C. (2011). "Computation of Cycle-to-cycle Variation in Blade Load for a Submarine propeller using LES", Second International Symposium on Marine Propulsors smp'11, Hamburg, Almanya.

Liu, H., and Huang, T. (1998). "Summary of DARPA SUBOFF experimental program data". Report No. CRDKNSWC/HD-1298-11.

Martin, R. (2015). "Submarine Hydrodynamics", Springer Briefs in Applied Sciences and Technology.

McDonald, H., Whitfield, D. (1996). "Self-Propelled Maneuvring Underwater Vehicles". 21st SNH, Trondheim.

Piquet, J., Queutey, P., Visonneau, M. (1987). "Computation of Viscous Flows Past Axisymmetric Bodies with and without a Propeller in Operation". Num. Meth. In Laminar and Turbulent Flow, 5, 644.

Pontanza, J.P., Chen, C. (2006). "Chimera Reynolds-Averaged Navier Stokes Simulations of Coupled Ship and Propeller Flows", Proc. 16th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. San Fransisco, p.468.

Sreenivas, K., Cash, A., Hyams, D., Taylor D. (2003). "Computation Styudy of Propulsor Hull Interactions", AIAA 2003-1262.

Stern, F., Kim, H.T., Patel, V.C., Chen, H.C. (1998). "A Viscous Flow Approach to the Computation of Propeller-Hull Interaction". Journal of Ship Research, 32, p. 263.

Wilcox, D.C. (1998). "Turbulence Modeling for CFD", DCW Industries, Inc., La Canada, California.

27. ITTC Propulsion Committee Final Report and Recommendations to the 27th ITTC (2014).

* Corresponding author.