



## STANDART TEST PERVANESİ ANALİZLERİ İLE HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ANALİZ ALTYAPISININ DOĞRULANMASI

Naz YILMAZ<sup>1</sup>, İsmail ÇİÇEK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Deniz Ulaştırma ve İşletme Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

DTMB 4119  
Gemi Pervanesi,  
VP 1304 Pervanesi,  
Hesaplamalı Akışkanlar  
Dinamiği,  
Modelleme ve Analiz  
Doğrulama

### Öz

Bu çalışmada, literatürde standart test pervanesi olarak yer alan iki farklı gemi test pervanesinin analizleri yapılmış ve performans değerleri hesaplanmıştır. Analizi yapılan pervanelerden biri, DTMB (David Taylor Model Basin) 4119 kodu ile adlandırılan, David Taylor model deney havuzunda geliştirilmiş, 5 pervaneli bir seriye ait ve doğrulama çalışmalarında sıklıkla kullanılan, 3 kanatlı bir pervanedir. Diğeri ise, PPTC (Potsdam Propeller Test Case) VP1304 olarak adlandırılan, birçok akademik çalışmada kullanılmış, 5 kanatlı ve kanat açıları kontrol edilebilir bir pervanedir.

DTMB 4119 ve VP 1304 standart test pervanelerinin analizleri ANSYS kullanılarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemiyle yapılmıştır. Analiz sonuçları ile bulunan performans değerlerindeki hata oranları hesaplanmış ve literatürdeki diğer çalışmalar ile değerlendirilmiştir. DTMB 4119 pervanesi analiz sonuçları, panel metodu ve HAD yöntemiyle elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, VP1304 pervanesi için hesaplanan performans parametreleri açık su pervane testi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile pervane analizleri için oluşturulan analiz altyapısı test edilmiş olup izlenen yöntem HAD analiz altyapısının bir doğrulama yöntemi olarak gerçekleştirilmiştir.

## VERIFICATION OF THE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS ANALYSIS SUB-STRUCTURE BY STANDARD TEST PROPELLER ANALYZES

### Keywords

DTMB 4119  
Ship Propeller,  
VP 1304 Propeller,  
Computational Fluid  
Dynamics (CFD),  
CFD Method,  
Modelling and Analysis,  
Validation

### Abstract

In this study, two different marine propellers, cited as standard test propellers in literature, were analysed and performance values were calculated. One of the analysed propellers is a propeller called David Taylor Model Test Basin (DTMB) 4119, developed in David Taylor Model Test Basin, one of the 5-propeller series with 3 blades and frequently used in validation studies by many researchers. The other one is another marine propeller, called PPTC (Potsdam Propeller Test Case) VP1304, with a 5-blade and controllable pitch type, also used as a benchmark propeller in many academic studies.

DTMB 4119 and VP 1304 propellers were analysed with ANSYS, for employing the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. The error rates in performance values were calculated and evaluated against other studies in literature. DTMB 4119 propeller analysis results were compared against the results obtained using panel and RANS methods. Furthermore, VP1304 analysis results were examined with the results obtained in open water tests cited literature. With this study, the analysis infrastructure established for analysing the marine propellers was tested and the methodology followed herein was considered as a validation of the CFD infrastructure.

### Alıntı / Cite

Yılmaz, N. ve Çiçek, İ., (2018). Standart Test Pervanesi Analizleri ile Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analiz Altyapısının Doğrulaması, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(4), 681-690.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
N. Yılmaz, 0000-0002-0499-8248	<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	01.03.2018
I. Cicek, 0000-0003-4850-1747	<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	04.06.2018
	<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	17.10.2018
	<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	11.12.2018

## 1. Giriş

Pervane tasarımı için gerekenler; gemi ve pervanenin bir akış hacmi içerisinde göstermiş olduğu davranışı gözlemlemek ve aynı zamanda direnç, itme ve tork gibi pervane tasarımını doğrudan etkileyen parametreleri elde etmektir. Bu değerlerin tespiti model havuz deneyleri ile oldukça maliyetli olmaktadır. Gelişen teknoloji ve yapılan akademik çalışmalar göstermektedir ki; ANSYS gibi hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD veya Computational Fluid Dynamics, CFD) yöntemi kullanan paket yazılımlar yardımıyla bu değerlerin tayini günümüzde mümkün hale gelmiştir. HAD analizlerinden elde edilen itme ve tork değerleri kullanılarak, pervane performansına ait karakteristikler olan itme katsayısı ( $K_T$ ), tork katsayısı ( $K_Q$ ) ve açık su pervane verimi ( $\eta_0$ ) değerleri hesaplanabilir (Carlton, 2007) ve elde edilen değerler tasarım parametreleriyle karşılaştırılabilir.

Kullanılan sevk sisteminin tork değeri pervane tasarımı için sınırlayıcı bir ölçüt olup, HAD analizleri sonucu pervanenin maksimum tork değerine ulaşmadan sağlayacağı itme değeri kaydedilir. İtme değerinin tasarıma göre yetersiz olduğu durumlarda, pervane tasarımına geri dönüş yapılarak öncelikle pervane geometrisi, itmeyi iyileştirecek yönde yenilenebilir. Bu şekilde, HAD analiz paket programları, yinelemeli (iteratif) yaklaşımla tasarımın değerlendirilmesinde araç olarak kullanılabilir.

HAD analizlerinden elde edilen sonuçların doğru kabul edilerek değerlendirilmesi için, bazı test pervaneleri ve gemi modellerinin HAD analizlerinin yapılmasıyla, kullanılan paket programın ve yöntemin doğrulanması gerekmektedir. Bu makalede, doğrulama amacıyla, HAD çalışmalarından elde edilen sonuçlar, daha önceden literatürde yayınlanmış olan çalışmalarla karşılaştırılarak hata oranları belirlenmiş ve sonraki HAD çalışmaları sonuçları da bu hata oranları çerçevesinde değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, HAD analizleri için kullanılan ANSYS CFX yazılımının doğrulaması DTMB 4119 ve VP1304 standart test pervanelerinin analizleri yapılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucu elde edilen tork ve itme değerlerinden yola çıkılarak  $K_T$ ,  $K_Q$  parametreleri hesaplanmış ve model deney havuzundan elde edilen veriler ve akademik çalışmaların sonuçları (Brizzolara vd., 2008) ile karşılaştırılmış olup kullanılan analizlerdeki hata payı belirlenmiştir (Kulczyk vd., 2007).

Günümüzde panel metotları, pervane akış analizlerinin gerçekleştirilmesi için bir standart ifade

eder. Bu metot ile pervane tasarımı gerçekleştirilerek iyileştirme için kabul edilebilir sonuçlar elde edilebilir. Potansiyel bir akış incelenirken tasarımı dışarıdan etkileyen koşul ve parametrelerin belirlenmesi daha zor bir görevdir. Bu koşul ve parametreler, özel akış koşulları için viskozite, dalga girdap hizalama (Gaggero ve Brizzolara, 2007), uç geometrisinin doğru tanımlanması (Lee vd., 2004) ve birbirinden ayrılan akış yüzeyleri için sınır tabaka oluşturulması gibi sıralanabilir. Bu çalışmaların yanı sıra farklı pervane tipleri üzerinde yapılan araştırmalar da mevcuttur. Bu çalışmalara çok yüksek eğiklik (skew) değerine sahip modern pervaneler üzerinde Rhee ve Joshi'nin (2005) yaptığı çalışma örnek verilebilir. Pervane akışı üzerinde yapılan bu çalışmada değişik bölgesel akış karakteristikleri ve pervane tork değerinin tahmini için yapılan hatalar gösterilmiştir. Bunun yanı sıra bazı enstitüler tarafından gerçekleştirilen ve üzerinde durulması gereken çalışmalar da mevcuttur. Qing'in 2006 yılında ve Becchi'nin de 2005 yılında yayınlamış olduğu makaleler (Li, 2006, Becchi ve Pittaluga, 2005) bu önemi vurgular niteliktedir. Bu makalelerde pervane giriş kenarı (leading edge) tasarımı üzerinde durulmuş olup, ne yazık ki geometrileri yayınlanmamıştır.

Tüm bu koşullar ile birlikte, Reynolds Avaraged Navier Stokes (RANS) adı verilen bir çözücü ile hesaplama gücünü arttırmak, bu belirsizlikleri çözmek ve pervane etrafındaki sabit bir akışın tam olarak tanımını yapmak oldukça güçtür ve halen uzun hesaplama zamanı almaktadır. Son yıllarda geliştirilen bu metotlar karmaşık geometriler için başvuru yöntemler haline gelmiştir (Philips, 2009). Tüm bu zorluklara rağmen pervane tasarımı ve oluşturulan tasarımın analizlerini yapabilecek, pervanenin akış içerisindeki performansını belirleyebilecek metot ve yazılımlar da mevcuttur.

Panel metodu, sıkıştırılmaz ve viskoz olmayan akış kabulü ile Laplace denklemi kullanılarak yapılacak analiz çözümü için kullanılan en genel yöntemdir. Akışkan analizi için, bilgisayar teknolojisinin de gelişimine paralel olarak birtakım sayısal yöntemler ortaya çıkmıştır. Bu sayısal yöntemlerin temeli, potansiyel akış teorisi içinde yer alan teoremlere dayanmaktadır. Kullanılan bu teknikler "yüzey tekillik metotları (surface singularity methods)", "sınır eleman metotları (boundary element methods)" veya en genel olarak "panel metotları (panel methods)" olarak bilinmektedir.

HAD analiz yöntemlerinin temelini RANS çözücüsü olarak kullanılan sonlu hacimler metodu oluşturmaktadır. Bu metotta sonlu hacim, sayısal bir

ağ (mesh) üzerinde düğüm noktalarını çevreleyen küçük bir hacim olarak ele alınmaktadır. Sayısal ağlar kısmi diferansiyel denklemler ile temsil edilerek çözülmektedir. Sonlu hacim metodunun avantajlarından biri, karmaşık şekilli sayısal ağlar için problemin kolay bir şekilde formüle edilmesini mümkün hale getirmesidir. Bu sebeple bu metod, birçok hesaplamalı akışkanlar dinamiğine ait paket programlarda kullanılmaktadır. Bu programlardan biri de akışkan uygulamalarında sıklıkla kullanılan ANSYS Fluent ve Ansys CFX paketleridir. Bu program aracılığı ile üç boyutlu geometrisi bilinen bir pervane üzerinde veya etrafındaki basınç, hız dağılımları ile sistemin tamamına veya bir parçasına etkiyen kuvvet bileşenleri hesaplanabilmektedir.

DTMB 4119 pervanesi üzerinde yapılan bir HAD çalışmasında (Kulczyk vd., 2007), pervaneler üzerinde RANS kodu ile elde edilen sonuçların yüksek değişkenlikte olma riski üzerinde durulmuştur. Bu nedenle iyi kalitedeki çözüm ağı yapısının ve doğru türbülans modeli seçiminin analizler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Son zamanlarda pervaneler üzerinde yapılan HAD çalışmalarındaki kısıtlar kaviteasyon tahmini için farklı metodların uygulanabilirliğini göstermektedir. Hatta bu tip çalışmalar için en zor olanı sabit olmayan (değişken) çalışma koşullarında zamana bağlı analizlerin gerçekleştirilmesidir (Bulten ve Oprea, 2006; Kawamura, 2006).

Yine DTMB 4119 standart test pervanesi geometrisi kullanılarak, pervane kaviteasyonu kaldırıcı hat ve kaldırıcı yüzey yöntemleri ile birlikte Bal tarafından incelenmiştir (Bal, 2011). Pervane kaviteasyonu, pervane performansını genellikle olumsuz yönde etkileyen çok önemli bir olgu olmasına rağmen bu makalenin konusu değildir. Bu makalede pervane performansı pervane kaviteasyonu incelenmeksizin açık su testi koşulları altında değerlendirilmiştir.

Bu makalede DTMB 4119 pervanesi için, daha önceden yapılmış bir akademik çalışmada (Brizzolara vd., 2008) kullanılan Panel ve RANS metodundan elde edilen pervane performans karakteristikleri ile tarafımızdan ANSYS Fluent kullanılarak yapılan HAD analizlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. VP 1304 pervanesi için de benzer bir analiz yöntemi kullanılmış olup elde edilen sonuçlar hali hazırda bir çalıştayda raporlanan test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu testler, Barkmann ve Mach tarafından gerçekleştirilmiş olup, SMP'11 (Symposium of Marine Propulsors, Hamburg, Almanya, Haziran, 2011) çalıştayında diğer enstitülerin yaptığı çalışmalar ile kıyaslanmak için kullanılmıştır. Bununla birlikte bu test sonuçları, Barkmann ve Mach tarafından test raporu olarak yayınlanmıştır (Barkmann, 2011 ve Mach, 2011). Bu makalede yapılan karşılaştırmanın amacı ise, HAD metodunun diğer tasarım ve analiz metodlarına göre doğrulamasını sağlamaktır. Bu tip mühendislik problemleri için doğrulama çalışmaları bulmak

oldukça güçtür. 22. ITTC (International Towing Tank Conference, Seul, Kore Cumhuriyeti & Şangay, Çin, Halk Cumhuriyeti, Eylül 1999) konferansında doğrulama amacıyla farklı katılımcılar tarafından başlangıç serileri üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada, ANSYS Fluent programı ile DTMB 4119 ve VP 1304 pervanelerinin HAD analizleri yapılmış ve sonuçlar hesap yöntemi ile analiz ortamının doğrulanması amacıyla açık su pervane performans verileri ile karşılaştırılmıştır. Bu kıyaslama esnasında panel metodu ve RANS metodu ile elde edilen önceden yapılmış akademik çalışmalara ait sonuç değerleri de kullanılmıştır.

## 2. DTMB 4119 Standart Pervanesi HAD Analizleri

### 2.1. Model Geometrisi

DTMB 4119 standart test pervanesi, David Taylor model deney havuzunda geliştirilmiş olup 5 pervaneli serinin, doğrulama çalışmalarında sıklıkla kullanılan, 3 kanatlı bir pervanesidir (Brizzolara ve Gaggero, 2007). DTMB 4119 model pervanesinin literatürde belirtilen pervane çapı 1 ft = 0,3048 m olup NACA 66 Düzeltilmiş Profil ve NACA a=0,8 sehim hattı kullanılarak tasarlanmıştır. DTMB 4119 standart test pervanesinin geometrisine ait teknik özellikler Tablo 1'de gösterilmiştir. Bu özelliklerdeki DTMB 4119 standart test pervanesi analizlerinde kullanılan parametreler, analiz sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için Brizzolara vd. (2008)'nin çalışmaları ile aynı tutulmuş ve Tablo 1 ve Tablo 2'de gösterilmiştir. Bu amaçla, pervane devri (n) 1080 1/dk, pervane ilerleme katsayısı (J) 0,833, ilerleme hızı (VA) 4,5701 m/s olacak şekilde seçilmiştir. Bu çalışmadaki analizlerde kullanılmak üzere Rhino programında hazırlanmış olan model tasarımı Şekil 1'de gösterilmiştir.

**Tablo 1:** DTMB 4119 Standart Test Pervanesinin Teknik Özellikleri

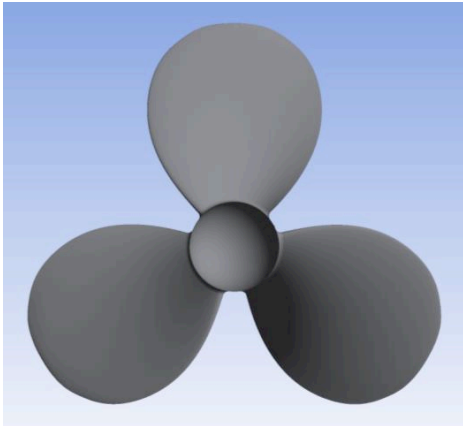
ÖZELLİK	DEĞER	BİRİM
İlerleme Katsayısı (J)	0,833	-
İlerleme Hızı (Va)	4,5701	m/s
Pervane Çapı (D)	0,3048	m
Devir (n)	1080	1/dk

**Tablo 2:** DTMB 4119 Standart Test Pervanesi Geometri Parametreleri

r/R	c/D	rk/D	sk(°)	P/D	tmax/c	fmax/c
0.20	0.3200	0.000	0.000	1.1050	0.2055	0.0143
0.30	0.3635	0.000	0.000	1.1022	0.1553	0.0232
0.40	0.4048	0.000	0.000	1.0983	0.1180	0.0230
0.50	0.4392	0.000	0.000	1.0932	0.0902	0.0218
0.60	0.4610	0.000	0.000	1.0879	0.0696	0.0207
0.70	0.4622	0.000	0.000	1.0839	0.0542	0.0200
0.80	0.4347	0.000	0.000	1.0811	0.0421	0.0197
0.90	0.3613	0.000	0.000	1.0785	0.332	0.0182
0.95	0.2775	0.000	0.000	1.0770	0.0323	0.0163
0.98	0.2045	0.000	0.000	1.0761	0.0321	0.0145
1.00	0.0800	0.000	0.000	1.0750	0.0316	0.0118

DTMB 4119 standart test pervanesine ait geometri parametreleri Tablo 2’de gösterilmiş, pervane geometrisi için bu parametreler aşağıda açıklanmıştır:

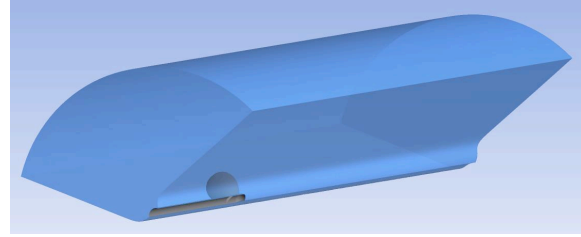
- r/R : Kesit yarıçap oranı  
c/D : Kesit kord boyunun çapa oranı  
rk/D : Kesit eğiklik değerinin çapa oranı  
sk(°) : Açısal olarak kesidin çalıklık değeri (kesit orta noktasının dik eksene göre açısı)  
P/D : Kesit hatvesinin çapa oranı  
tmax/c : Kesit maksimum kalınlık değerinin kord boyuna oranı  
fmax/c : Kesit maksimum sehim değerinin kord boyuna oranı

**Şekil 1.** DTMB 4119 pervane modeli

## 2.2. Akış Hacmi Geometrisi

Pervane etrafında yer alan akış hacmi ANSYS Design Modeller modülü ile modellenmiştir. HAD analizlerinde pervane modeli sabit, pervanenin etrafındaki akış hacmi hareketli, dönen akış hacmi, olarak tanımlanmıştır. HAD analizinde simetri özelliği kullanılarak pervane modeli 3 kanatlı bir pervane olmasından dolayı 3 parçaya bölünmüş ve böylelikle analizlerde akış hacminin 1/3 simetrik modeli kullanılmıştır. Bu işlem ile akış hacmi küçültülmüş,

çözüm ağını oluşturan elementlerin sayısı da aynı oranda azaltılmış ve çözüm süresinin kısaltılması da sağlanmıştır. Oluşturulan akış hacmi ve 1/3 simetrik modeli, tek pervane kanadı, Şekil 2’de gösterilmiştir.

**Şekil 2.** Akış Hacmi ve Pervane Kanadı Modeli

## 2.3. Çözüm Ağı Yapısı

Çözüm ağı yapısı ANSYS Meshing programında yapısal olmayan ağ olarak, ‘tetramesh’ adı verilen üçgen prizmalarının oluşturduğu bir yapı olarak oluşturulmuştur. Çözüm ağı yapısını oluşturan elemanlar pervane kanadı yüzeyi çevresinde küçük boyutlardadır. Eleman büyüklüğü, akış hacminin dış yüzeyine doğru gidildikçe artacak şekilde oluşturulmuştur.

Çözüm ağı yapısı oluşturulurken eleman kalitesi için göz önünde bulundurulmuş kalite ölçütleri; y+ değeri, eğiklik (skewness) ve dikey kalite (orthogonal quality) olarak sıralanabilir. Pervane etrafındaki akışkanın davranışının doğru incelenebilmesi için pervane kanadı üzerinde 5-6 katmandan oluşacak şekilde sınır tabaka yapısı oluşturulmuştur. Sınır tabaka için (inflation) ağ elemanlarının kalitesinin değerlendirilmesini sağlayan parametre y+ değeridir. SST k-omega türbülans modeli için kesin sonuçları, y+ değerinin 5’in altında olduğu şartlar verebilir. İlk katman kalınlığının 0,2 mm olması durumunda y+ değeri 30-60 arasında değişebilir. Pervane gibi zor geometrilerde y+ değerini bu aralık arasında tutmak oldukça güçtür.

Eleman kalitesini etkileyen en önemli parametre eğiklik (skewness) değeridir. Bu değer ideal geometriye (eşkenar üçgen veya kare) ne kadar yaklaşıldığını göstermektedir. Eğiklik değerinin 0.95 değerinin altında olması analizde kullanılacak çözücü için kabul edilebilir değerdir. Ancak bu değer olabildiğince düşük olması eleman kalitesini arttıracaktır.

Analiz sırasında oluşacak sayısal hatalar, yakınsama oranını ve sayısal kararlılığı doğrudan etkiler. Bu değer, 0 ile 1 arasında olmakla birlikte ne kadar büyük olursa eleman kalitesine etkisi de buna bağlı olarak pozitif yöndedir.

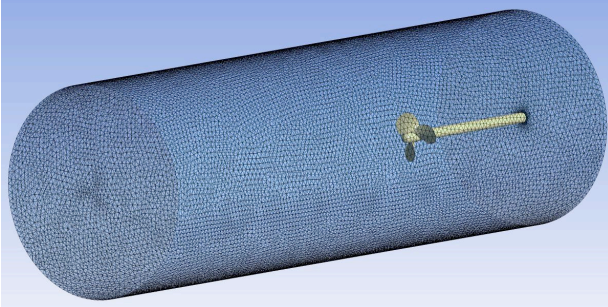
Oluşturulan çözüm ağı yapısı ile ilgili tüm kalite ölçütleri ve çözüm ağı yapısının tüm teorik ve nümerik ayrıntıları için Ansys teori ve kullanıcı rehberine

başvurulabilir (Ansys Teori Rehberi, Ansys Kullanıcı Rehberi, 2018).

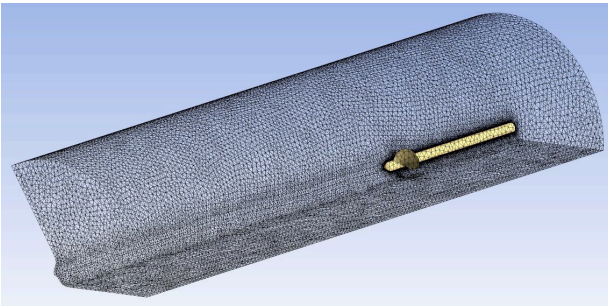
DTMB 4119 pervanesi analizleri için yukarıda belirtilen ölçütlere göre çözüm ağı yapısı oluşturulmuş olup Tablo 3'de kalite ölçütleri gösterilmiştir. Akış hacminde oluşturulan ağ yapısı Şekil 3 ve 4'te, kanat üzerindeki ağ yapısı ise Şekil 5'te gösterilmiştir.

**Tablo 3:** Kalite Ölçütlerine Göre Belirlenen Ağ Yapısı Değerleri.

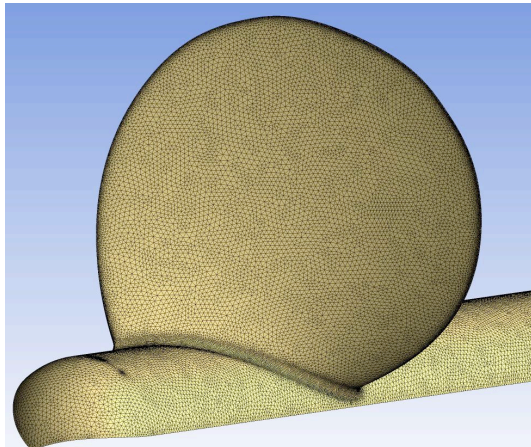
ÖZELLİK	DEĞER
Eleman Sayısı	3255790
Eğiklik	0,845
Dikey Kalite	0,10
y+	5



**Şekil 3.** Akış Hacminde Çözüm Ağı Yapısı



**Şekil 4.** Tek Kanat Etrafında Oluşturulan Akış Hacminde Çözüm Ağı Yapısı



**Şekil 5.** Kanat Üzerinde Çözüm Ağı Yapısı

## 2.4. Çözüm ve Çözücü Ayarları

Oluşturulan model etrafında akış hacmi ve bu geometri için çözüm ağı yapısı oluşturulduktan sonra yapılması gereken gerekli olan çözüm ayarları ile sınır koşullarının belirlenmesidir. Sınır koşullarının doğru bir şekilde belirlenmesi, çözümden istenilen doğru sonucun alınmasına ve çözüm süresinin kısalmasına neden olacaktır.

### 2.4.1. Sınır Koşulları

Akışkanın, akış hacmine girdiği varsayılan yüzey girişinde 'hız girişi'; programdaki adıyla 'velocity inlet' sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Giriş koşulu, bu analiz için 4.5701 m/s'dir. Çıkış koşulu için, akışkanın akış hacmini terk ettiği yüzeyde 'çıkış basıncı' (pressure outlet) seçilmiş ve değeri 0 Pa olarak sabitlenmiştir.

Duvar sınır koşulları: Akış hacmi içerisinde bulunan pervane simetrik model kanadının göbek ve şaftı hareketsiz kayma olmayan duvar (No slip wall condition) sınırı ile tanımlanmıştır (Şekil 6). Kullanılan akış hacmi içerisinde pervane ve şaft sabit bulunmaktadır. Bunların etrafındaki akışkanın dönüyor olduğu kabul edilmiştir. Akış hacminin en dışında kalan yüzey simetri sınır koşulu olarak tanımlanmıştır (Şekil 7).

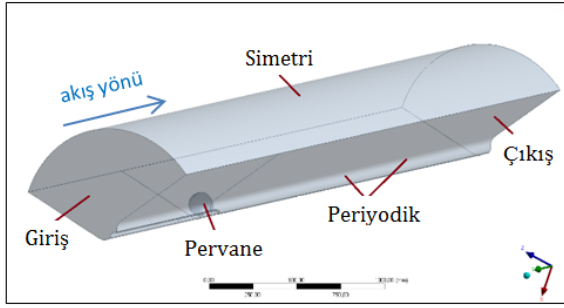
Ara yüz sınır koşulları (interfaces): Birbirinin içinde bulunan birden fazla akış hacmi bulunmadığından ara yüz sınır koşulu bulunmamaktadır. Ara yüz olmadığından ara yüz sınır koşulu sadece birbirini takip eden yüzeyler için tanımlanır. ANSYS Fluent'te bu yüzeyler birbirleriyle eşlenerek periyodik arayüz olarak tanımlanmıştır.

Açık su pervane performansının belirlendiği açık su analizlerinde akışkan olarak su tanımlanırken kavitasyon analizlerinde su ve su buharı olmak üzere iki farklı faz şeklinde tanımlanmaktadır.

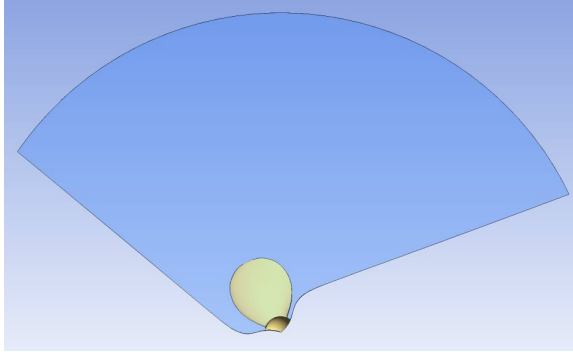
Analizlerde kullanılan sınır koşulları Tablo 4'te özet olarak sunulmuştur.

**Tablo 4.** DTMB 4119 Pervane Analizi Sınır Koşulları.

Özellik	Değer, Sınır Koşulu
<b>Türbülans Modeli</b>	RANS (k- $\omega$ SST) modeli
<b>Akışkan Türü</b>	Deniz suyu (1025 kg/m <sup>3</sup> )
<b>Inlet (Giriş)</b>	Akışkan hızı 4,5701 m/s
<b>Outlet (Çıkış)</b>	Çıkış basıncı, sabit 0 Pa
<b>Propeller (Pervane)</b>	Pervane ve şaft yüzeylerinin tümü 'None Slip Wall' sınırı
<b>Symmetry (Simetri)</b>	Akış hacminin dış yüzeyinde simetri koşulu
<b>Per_1 (Periyodik)</b>	1/3 modelin birbirini takip eden yüzeyleri için periyodik.
<b>Per_2 (Periyodik)</b>	1/3 modelin birbirini takip eden yüzeyleri için periyodik



Şekil 6. Sınır Koşulları, Dış Yüzey ile Gösterimi



Şekil 7. Sınır Koşulları, 1/3 Simetri Gösterimi

#### 2.4.2. Akışkanın Çözümü ve Çözücü Ayarları

DTMB 4119 standart test pervanesinin açık su pervane karakteristiklerinin elde edilmesi için yapılan bu analizde kullanılan çözücü Ansys Fluent yazılımıdır.

Çözüm için yapılan ayarlarda belirlenmesi gereken öncelikle akışkan türüdür. Bu analiz için su içerisinde bir pervanenin davranışı gözlemlenmek istendiğinden akışkan türü olarak su tanımlanmıştır. Bu analiz için elde edilmek istenen ve karşılaştırılacak olan değerler açık su koşulları için belirlenecektir. Pervane üzerindeki kavitasyon oluşumu bu analiz çalışmasının konusu değildir. Kavitasyon oluşumunun gözlemlenmesi için yapılan analizlerde suyun yanında su buharı da ortamda oluşacağı su ve su buharı akışkanları programda birlikte tanımlanır.

Akışkanın analizi için belirlenmesi gereken bir diğer önemli koşul ise türbülans modelidir. Bu analizde türbülans modeli RANS SST k- $\omega$  türbülans modeli olarak belirlenmiştir. Pervane etrafındaki akışın modellenerek, pervanenin hidrodinamik performansının hesaplanması amacıyla gerçekleştirilen analizler için RANS k- $\epsilon$  ve k- $\omega$  türbülans modelleri denenmiş olup, deneysel sonuçlara en yakın sonuçlar SST k- $\omega$  türbülans modeli kullanılarak elde edilmiş ve bu sebeple SST k- $\omega$  türbülans modeli tercih edilmiştir.

#### 2.5. DTMB 4119 Analiz Sonuçları

Pervane performansını belirleyen boyutsuz katsayılar; pervane ilerleme katsayısı J, itme katsayısı

$K_T$ , tork katsayısı  $K_Q$  ve bu değerlere bağlı verim,  $\eta_0$ , değerleridir. Pervanenin model deneyi sonuçlarından veya HAD analizleri sonuçlarından elde edilecek olan itme ve tork değerleri kullanılarak bu performans değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanabilir (Carlton, 2007):

$$J = \frac{V_A}{(n * D)} \quad (1)$$

$$K_T = \frac{T}{(\rho * n^2 * D^4)} \quad (2)$$

$$K_Q = \frac{Q}{(\rho * n^2 * D^5)} \quad (3)$$

$$\eta_0 = \frac{J}{(2 * \pi)} * \frac{K_T}{K_Q} \quad (4)$$

$T$  : Pervane itme kuvveti

$Q$  : Pervane torku

$\rho$  : Akışkan yoğunluğu

$n$  : Pervane devir sayısı

$D$  : Pervane çapı

$V_A$  : Pervane ilerleme hızı

HAD analiz sonuçlarından pervane kanatları üzerindeki itme ve tork değerleri elde edilerek pervane performans parametreleri  $K_T$ ,  $K_Q$  ve  $\eta_0$  hesaplanmıştır. HAD analizi ile bulunan bu değerler literatürde yer alan açık su pervane testi, Panel ve RANS metotları (Villa vd., 2008) ile elde edilen değerler ile karşılaştırılmış olup Tablo 5 ve 6'da gösterilmiştir. Bu HAD analizi çalışması ile elde edilen sonuçların doğruluğunun tespit edilmesi için analiz sonuçlarının açık su testi sonuçlarına göre ne kadar hata payı içermekte olduğu tespit edilmiştir (Kulczyk, vd., 2011).

Tablo 5. Farklı Analiz Metotları ile Pervane Performans Parametreleri: J,  $V_A$ , T ve Q

Metot	J	$V_A$	T	Q
Açık Su Testi	0.833	4.5701	407.46	23.82
Panel Metodu	0.833	4.5701	408.30	24.07
RANS Metodu	0.833	4.5701	385.42	21.10
<b>HAD Metodu</b>	<b>0.833</b>	<b>4.5701</b>	<b>402.44</b>	<b>23.22</b>

Tablo 6. Farklı Analiz Metotları ile Pervane Performans Parametreleri:  $K_T$ ,  $10K_Q$ ,  $\eta_0$

Metot	$K_T$	$10K_Q$	$\eta_0$
Açık Su Testi	0.1460	0.28	%69
Panel Metodu	0.1463	0.283	%68
RANS Metodu	0.1381	0.248	%73
<b>HAD Metodu</b>	<b>0.1442</b>	<b>0.273</b>	<b>%70</b>

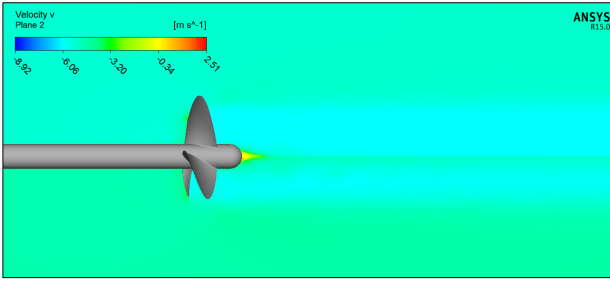
Tablo 7'de görüldüğü gibi elde edilen verilere göre hesaplanan hata değerleri %1 ile %3 aralığındadır. Analizlerin sonucunda elde edilen hata oranlarına

bakılarak kullanılan yöntemin ve analizlerin doğru olduğu değerlendirilmiştir.

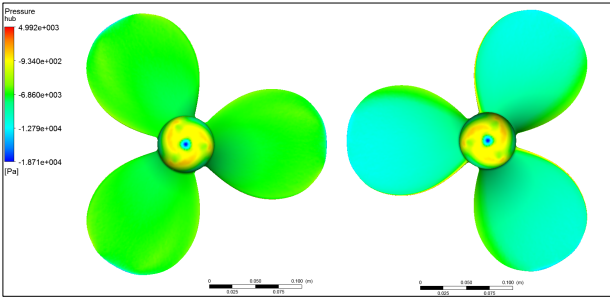
**Tablo 7.** Farklı Analiz Metotları Hata Oranları

Metot	%K <sub>r</sub>	%K <sub>0</sub>	%η <sub>0</sub>
Panel Metodu	%0.2	%1.1	%-0.9
RANS Metodu	%-5.4	%-11.4	%6.7
<b>HAD Metodu</b>	<b>%-1.2</b>	<b>%-2.5</b>	<b>%1.3</b>

Bu çalışmadaki, analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde pervane arkasında oluşan hız dağılımı ile pervane yüzeyindeki basınç dağılımı da incelenmiştir. Pervane arkasındaki hız dağılımı görseli incelendiğinde pervanenin kanat uçlarından itibaren akışkanı hızlandırmış olması beklenir. Şekil 8'de gösterilen hız dağılım grafiği incelendiğinde pervanenin çalışma ve dönme yönüne göre kesit görünümünden pervanenin arkasına doğru akışkanı hızlandırmış olduğu gözlemlenebilmektedir. Şekil 9'da gösterilen pervane yüzeyi basınç dağılımı grafiğine bakıldığında, pervane basınç tarafındaki basınç dağılımı değerlerinin emme tarafındaki basınç değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar da, HAD analiz sonuçlarının beklenen özelliklerde olduğunu göstermektedir.



**Şekil 8.** Pervane Arkasındaki Hız Dağılımı



**Şekil 9.** Pervane Üzerindeki Basınç Dağılımı: Basınç Tarafı (solda) ile Emme Tarafı (sağda)

### 3. VP 1304 Standart Pervanesi HAD Analizleri

VP 1304, üzerinde birçok akademik çalışma yapılmış standart bir test pervanesi olup 5 kanatlı CPP (Controllable Pitch Propeller) tipi bir pervanedir. Pervane çapı 0,25 m, analizler sırasında kullanılan devri 900 1/dk olup HAD analizleri 2,25 m/s akışkan hızı için yapılmıştır. VP 1304 pervanesi açık su testlerinin yapılmasının yanında 13 farklı akademik kurum ve üniversite tarafından analizleri

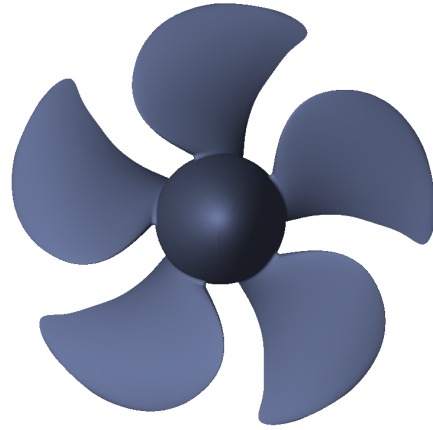
gerçekleştirilmiş ve açık su testleri ile karşılaştırılmış olup, akademik bir çalışma toplantısı (smp'11 pervane çalıştay) sonrasında paylaşılmış ve literatürde raporlanmıştır (Barkman, 2011 ve Mach, 2011).

### 3.1. Pervane Model Geometrisi

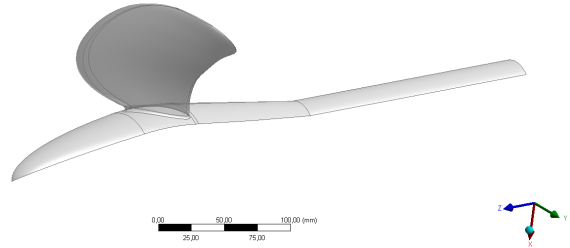
DTMB 4119 pervanesinin modellenmesinde olduğu gibi tasarım özellikleri Tablo 8'de gösterilen VP 1304 pervanesinin modeli, Rhino yazılımı kullanılarak oluşturulmuş ve Şekil 10'da gösterilmiştir. HAD analizleri için oluşturulan tek kanatlı 1/5 simetrik model, Şekil 11'de gösterilmiştir.

**Tablo 8.** VP 1304 Pervane Tasarım Özellikleri

Özellik	Değer	Birim
İlerleme Katsayısı (J)	0,60	-
İlerleme Hızı (V <sub>A</sub> )	2,25	m/s
Pervane Çapı (D)	0,25	m
Devir (n)	900	1/dk



**Şekil 10.** VP 1304 Pervane Modeli



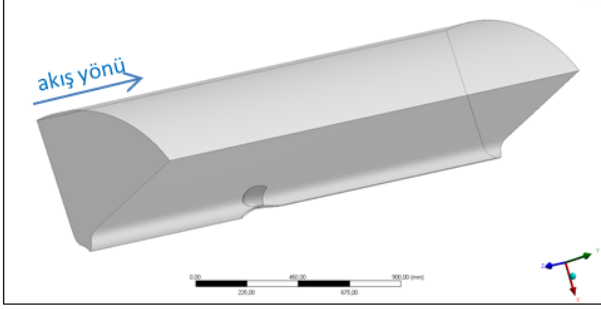
**Şekil 11.** VP 1304 Pervanesinin 1/5 Tek Kanat Modeli

### 3.2. Akış Hacmi Geometrisi

Hazırlanan pervane modeli, pervane yüzeylerinin onarılması, analizlere hazır hale getirilmesi ve akış hacminin oluşturulması için ANSYS Design Modeller modülüne aktarılmıştır.

VP 1304 test pervanesi analizi için hazırlanan akış hacmi Şekil 12'de görülmektedir. Akış hacmi 5'e bölünerek yüzeylerin birbirini takip edebilmesi için periyodik yüzeyler tanımlanacak şekilde oluşturulmuştur. Akış hacmi kanat geometrisinin

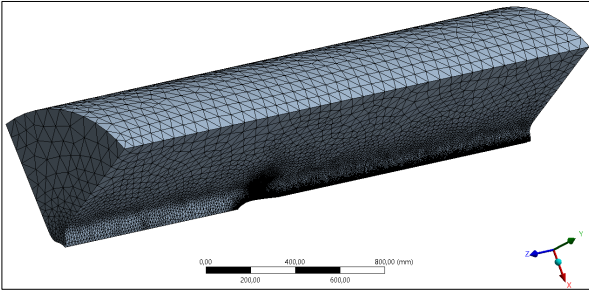
etrafında dönen bir akış hacmi olarak tasarlanmıştır. Analizler esnasında kanat, göbek ve shaft kısımları sabit olacak şekilde ve etrafındaki akış hacmi hareketli (dönen hacim) olarak tanımlanmıştır.



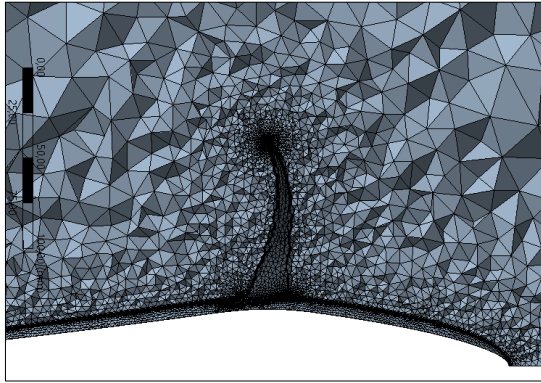
Şekil 12. 1/5 Model Pervane Akış Hacmi.

### 3.3. Çözüm Ağı

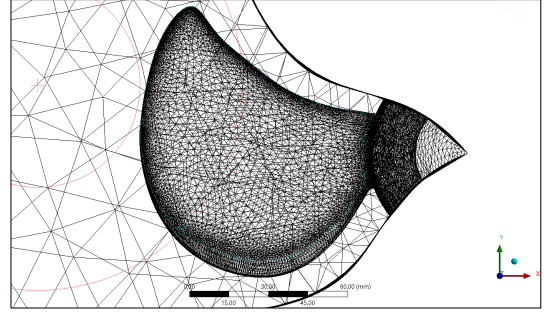
Oluşturulan akış hacmi için çözüm ağı yapısı üçgen elemanlar kullanılarak ANSYS Meshing modülünde oluşturulmuştur. Oluşturulan çözüm ağı yapısına ait görseller Şekil 13, 14 ve 15' te gösterilmiştir.



Şekil 13. Çözüm Ağı Yapısı.



Şekil 14. Pervane Çözüm Ağ Yapısı Kesit Görünümü.



Şekil 15. Kanat Yüzeyi Üzerinde Çözüm Ağı Yapısı.

Çözüm ağı yapısının kalite ölçütleri Bölüm 2'de paylaşılmış olup, VP 1304 pervanesi çözüm ağı yapısına ait değerler şöyle sıralanabilir:

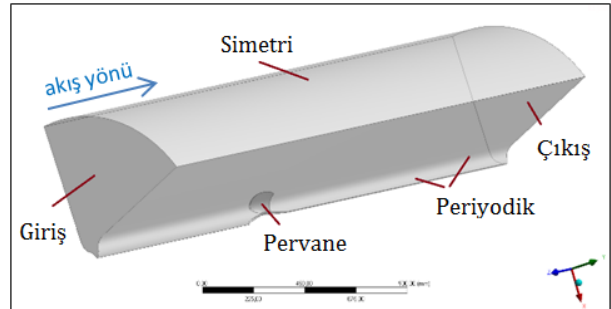
Minimum Orthogonal Quality > 0,15  
Maximum Aspect Ratio < 100  
Skewness < 0,95

### 3.4. Sınır Koşulları

Sınır koşulları ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 2'de DTMB 4119 pervane analizi için paylaşılmış olduğundan, Tablo 9'da özetlenmiş ve sınır koşullarındaki farklılıklar gösterilmiştir. Şekil 16'da simetri sınır koşulları 1/5 pervane modeli üzerinde gösterilmiştir.

Tablo 9. VP 1304 Pervane Analiz Sınır Koşulları.

Özellik	Değer, Sınır Koşulu
Türbülans Modeli	k- $\omega$ SST
Akışkan Türü	Deniz suyu (1025 kg/m <sup>3</sup> )
Inlet (Giriş)	Akışkan hızı 2,25 m/s
Outlet (Çıkış)	Çıkış basıncı, sabit 0 Pa
Propeller (Pervane)	Pervane ve shaft yüzeyleri tümü 'None Slip Wall' sınırı
Symmetry (Simetri)	Akış hacminin dış yüzeyi simetri koşulu
Per_1 (Periyodik)	1/5 modelin birbirini takip eden yüzeyleri için periyodik
Per_2 (Periyodik)	1/5 modelin birbirini takip eden yüzeyleri için periyodik



Şekil 16. VP 1304 Pervanesi Analiz Sınır Koşulları.

### 3.5. VP 1304 Pervanesi Analiz Sonuçları

VP 1304 pervanesinin sonuçlarının karşılaştırılmasında literatürde yapılan benzer validasyon çalışmaları örnek alınmıştır (Seil vd., 2008). Analiz sonucunda pervane kanatları üzerinden itme ve tork değerleri elde edilmiştir. Analiz



sonucunda bu değerler kaydedilerek pervane performans değerleri hesaplanmıştır. Bulunan performans katsayıları, açık su testi sonuçları ile kıyaslanmış (Tablo 10) ve hata oranları hesaplanmıştır (Tablo 11).

**Tablo 10.** VP 1304 Pervane Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.

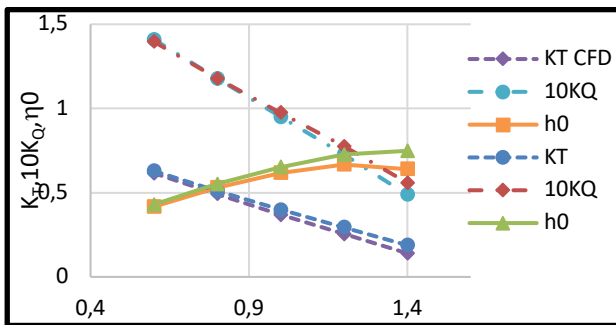
Analiz Yöntemi	Pervane Performans Parametreleri		
	$K_T$	$10K_Q$	$\% \eta_0$
Açık Su Pervane Testi	0,6288	1,3964	43
HAD Metodu	0,6159	1,4098	41

**Tablo 11.** VP 1304 Pervane Analizi Performans Sonuçlarında Hata Oranı.

HAD Metodu ile Test Arasında Hata Oranı	Pervane Performans Parametreleri		
	$\%K_T$	$\%10K_Q$	$\% \eta_0$
	-2	1	-3

VP 1304 standart test pervanesinin analizleri 2,25 m/s hız ile gerçekleştirilmiş olup, bu değere ait açık su testi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bunun yanı sıra pervane performansına ait  $K_T$ ,  $K_Q$  ve  $\eta_0$  eğrilerinin hazırlanmasına yönelik olarak analizler farklı  $J$  değerleri için tekrarlanmıştır. Analizler sonucunda elde edilen pervane performans eğrileri Şekil 17'de gösterilmiştir.

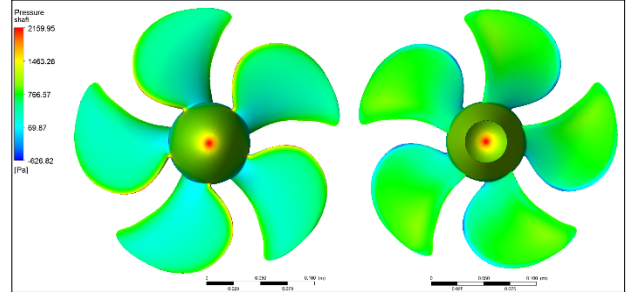
PPTC VP 1304 pervanesine ait, deneysel sonuçlar ile HAD metodu ile yapılan analiz sonuçları, pervane performans karakteristikleri açısından karşılaştırıldığında sonuçların birbirlerine oldukça yakın olduğu Şekil 17'de görülmektedir. Bunun yanı sıra pervane performans eğrileri incelendiğinde düşük  $J$  değerleri için hata oranlarının daha az olduğu tespit edilmiştir. Özellikle pervanenin sıklıkla çalıştığı dizayn  $J$  değeri olan 0,60 değeri de için hata oranları oldukça düşüktür.  $J$  değerinin artmasıyla deneysel sonuçlar ile analiz sonuçlarının arasındaki farkın artış durumu da pervanenin çözüm ağı yapısı ve dolayısıyla  $y+$  değerinin hıza bağlı olarak değişimiyle açıklanabilir.



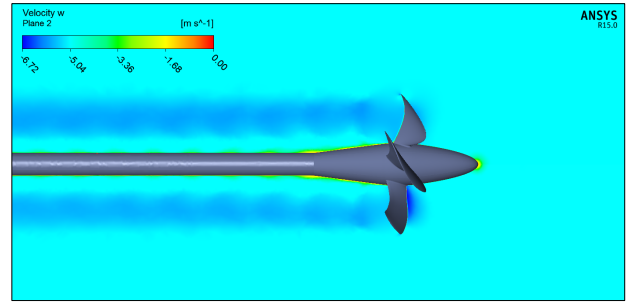
**Şekil 17.** VP 1304 Pervanesi Farklı İlerleme Hızlarında Performans Eğrileri.

Analiz sonucunda elde edilen görseller incelendiğinde pervanenin suya girdiği kenarda (leading edge) yüksek basınç (Şekil 18) ve pervane arkasında hızlanan suyun hız dağılımının (Şekil 19) doğru bir şekilde elde edildiği söylenebilir.

VP 1304 standart test pervanesinde DTMB 4119 pervanesinden farklı olarak akışkanın giriş tarafı shaft tarafından değil pervane tarafındaki yüzeydendir. Bu nedenle pervanenin shaft tarafına doğru suyun hızlandığı gözlemlenmiştir. Bu durum akışkanın akış hacmine giriş yüzeyinin konumundan kaynaklanmaktadır.



**Şekil 18.** VP 1304 Pervane Üzerindeki Basınç Dağılımı.



**Şekil 19.** VP 1304 Pervane Arkasında Hız Dağılımı.

#### 4. Sonuç

Literatürde DTMB 4119 ve VP 1304 kodlarıyla bilinen standart pervanelerin HAD yöntemiyle analizleri yapılmıştır.

Bu çalışmadaki DTMB 4119 pervanesi HAD analiz sonuçlarıyla açık su testi sonuçları ile ve panel ve RANS metotlarıyla gerçekleştirilmiş olan çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bulunan pervane performans değerlerindeki hata oranının %1 ile %3 arasında olduğu görülmüştür.

VP 1304 standart pervanesi analiz sonuçları ile açık pervane su testi sonuçları karşılaştırıldığında, bulunan performans değerlerindeki hata oranlarının benzer şekilde %1 ile %3 arasında olduğu hesaplanmıştır. Diğer sonuçlarda da hata olabileceği varsayımı ile karşılaştırılarak bulunan hata oranlarının kabul edilebilir oranlarda olduğu düşünülmüştür.

Hesaplanan ve %3 altında kalan hata payı değerleri, aynı metot ve analiz ortamında yapılacak benzer pervane performansı ve optimizasyonu çalışmalarında, elde edilecek sonuçları

değerlendirmek için kullanılacaktır.

### Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

No conflict of interest was declared by the authors.

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### Kaynaklar

Ansys Kullanıcı Rehberi, 2018

Ansys Teori Rehberi, 2018

Bal, Ş. (2011). A method for optimum cavitating ship propellers. *Turkish journal of engineering and environmental sciences*, 35(3), 319-338.

Barkmann, 2011 U. Barkmann, Potsdam Propeller Test Case (PPTC) – Open Water Tests with the Model Propeller VP1304 Report 3752, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam (2011)

Becchi, P., & Pittaluga, C. (2005). Comparison between RANSE calculation and Panel Method Results for the Hydrodynamic Analysis of Marine Propeller. RINA Marine CFD, Royal Institution of Naval Architects.

Brizzolara, S., Villa, D., & Gaggero, S. (2008). A systematic comparison between RANS and Panel Methods for Propeller Analysis. *Proc. Of 8th International Conference on Hydrodynamics*, Nantes, France.

Bulten, N., & Oprea, A. I. (2006, September). Evaluation of McCormick's rule for propeller tip cavitation inception based on CFD results. In *Sixth International Symposium on Cavitation*. Wageningen: American Institute of Physics.

Carlton, J. *Marine Propellers and Propulsion*. Butterworth-Heinemann, Second Edition, August 6, 2007 USA, ISBN-10: 0750681500.

Ekinci, S., Çelebi, U. B., Bal, M., Amasyali, M. F., & Boyaci, U. K. (2011). Predictions of oil/chemical tanker main design parameters using computational intelligence techniques. *Applied Soft Computing*, 11(2), 2356-2366.

Gaggero, S., & Brizzolara, S. (2007). Exact modeling of trailing vorticity in panel method for marine propeller. *Proceedings of ICMRT*. Ischia (IT).

Kawamura, T. (2006). Simulation of unsteady cavitating flow around marine propeller using a RANS CFD code. In *6th International Symposium on Cavitation*, Wageningen, Nederland, 2006.

Kulczyk, J., SKRABURSKI, Ł., & ZAWIŚLAK, M. (2007). Analysis of screw propeller 4119 using the Fluent system. *Archives of civil and mechanical engineering*, 7(4), 129-137.

Lee, C. S., Kim, G. D., & Kerwin, J. E. (2004). A B-spline higher order panel method for analysis of steady flow around marine propellers. In *25-th*

*Symposium on Naval Hydrodynamics* (Vol. 1, pp. 174-189).

Li, Da-Qing. (2006). Validation of RANS predictions of open water performance of a highly skewed propeller with experiments. *Journal of Hydrodynamics*, Ser. B. Volume 18, Issue 3, Supplement, July 2006, Pages 520-528

Mach, 2011 K.P. Mach, Potsdam Propeller Test Case (PPTC) – LDV Velocity Measurements with the Model Propeller VP1304, Report 3754, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam (2011)

Morgut, M. ve Nobile, E. Influence of the Mass Transfer Model on the Numerical Prediction of the Cavitating Flow around a Marine Propeller. *Second International Symposium on Marine Propulsors, SMP'11*, Hamburg, Germany, June 2011.

Philips, A. B., Turnock, S. R., Furlong, M., Evaluation of manoeuvring coefficients of a self-propelled ship using a blade element momentum propeller model coupled to a Reynolds averaged Navier Stokes flow solver, *Ocean Engineering*, Volume 36, Issues 15-16, November 2009, Pages 1217-1225.

Rhee S.H., Joshi S., Computational Validation for Flow around Marine Propeller using Unstructure Mesh Based Navier-Stokes Solver. *JSME International Journal Series B*, Vol. 48, pp.562-570, 2005.

Seil, G. J., Widjaja, R., Anderson, B., & Brandner, P. A. (2008). Computational Analysis of Submarine Propeller Hydrodynamics and Validation Against Experimental measurement. In *Underwater Defence Technology Pacific 2008* (Vol. 400, pp. CD-Rom).