



## Investigation of turbulence models by using static tow tank tests of DARPA SUBOFF

Hediye Atik\*

Aerospace and Aeronautical Engineering Department, Faculty of Engineering, Atılım University, Ankara, 06830, Turkey

### Highlights:

- DARPA SUBOFF static drift hydrodynamic coefficients
- Numerical investigation of mesh sizes and turbulence models using ANSYS Workbench software
- Verification of numerical results using experimental data

### Keywords:

- Hydrodynamics coefficients
- CFD
- discretization error
- GCI
- turbulence models

### Article Info:

Research Article  
Received: 12.06.2020  
Accepted: 16.10.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.748378

### Correspondence:

Author: Hediye Atik  
e-mail:  
hediye.atik@atilim.edu.tr  
phone: +90 533 813 0568

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, the method which is going to be followed during the calculations of hydrodynamic coefficients of DARPA SUBOFF was determined by static drift tests simulations. The proper mesh size selection was accomplished and computational results were compared with the experimental results which were carried out at 14 million Reynolds number at 0 to 18 degrees drift angle. After selection of suitable mesh, the options for turbulence models were investigated as seen in Figure A.

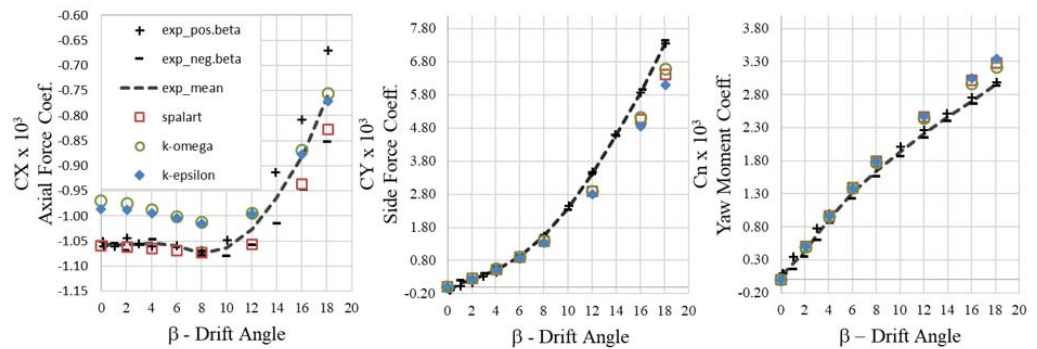


Figure A. Comparison of experimental data with computational results for different turbulence models

**Purpose:** The purpose of this study is to determine the computational method for calculating DARPA SUBOFF hydrodynamics parameters which shall be used in six degree of freedom mathematical model for manoeuvring simulations.

### Theory and Methods:

The commercial software ANSYS Workbench was used in the study. The proper mesh size selection was accomplished by using Grid Convergence Index (GCI) which is based on Richardson Extrapolation method. The discretization error bands around the solutions with three different mesh sizes were estimated. The computational results which were obtained with Spalart Almaras, Realizable k- $\epsilon$  and SST k- $\omega$  models were compared with experimental data.

### Results:

The discretization error bands for three different mesh sizes were determined. For the finest mesh, the error band was 0.3% for axial force coeff. (CX), 8.4% for side force coeff. (CY), and 4.0% for yaw moment coeff. (Cn) at 6° drift angle. When the finest mesh results were compared with the experimental data at the same angle, the relative errors were observed as 1.0% for CX and CY and 0.5% for Cn. The computations at drift angle between 0° and 18° were accomplished with three different turbulence models. While Spalart Almaras model gave the closest results to the experimental data for CX at small drift angles, Realizable k- $\epsilon$  and SST k- $\omega$  models gave better results at high angles. Even though all models gave similar results for CY and Cn, SST k- $\omega$  model gave the closest results to the experimental data.

### Conclusion:

For practical applications up to 18° drift angles, one-equation Spalart Almaras turbulence model is evaluated as adequate. For the applications at high drift angles, two-equation SST k- $\omega$  turbulence model is recommended to be re-assessed according to the maximum drift angle limit.



## Türbülans modellerinin DARPA SUBOFF statik sürükleme testi üzerinden incelenmesi

Hediye Atik\*<sup>ID</sup>

Atılım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Havaçılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, 06830, Ankara, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- DARPA SUBOFF statik yana kayma açılarında hidrodinamik katsayılar
- ANSYS Workbench yazılımı ile çözüm ağı ve türbülans modellerinin sayısal incelemesi
- Sayısal sonuçların deneysel veri ile doğrulanması

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 12.06.2020  
Kabul: 16.10.2021

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.748378

#### Anahtar Kelimeler:

Hidrodinamik katsayılar,  
HAD,  
ayırıklaştırma hatası,  
GCI,  
türbülans modelleri

#### ÖZ

Bu çalışmada DARPA SUBOFF su altı aracının manevra benzetimlerinde kullanılacak hidrodinamik katsayılarının hesaplanmasında izlenecek yöntem statik sürükleme (İng. static drift) test benzetimleri ile belirlenmiştir. Su altı araçlarının manevralarının belirlenmesinde kullanılan hidrodinamik katsayıların sayısal olarak yeterli doğrulukta elde edilmesi, çözümlemelerde kullanılan çözüm ağı ve türbülans modelleri ile ilişkilidir. Çalışmada ticari yazılım olan ANSYS Workbench yazılımı kullanılmıştır. Uygun çözüm ağı büyüklüğünün belirlenmesi Richardson Extrapolation metoduna dayalı Grid Convergence Index (GCI) yöntemi ile yapılmıştır. Bu yöntemle Spalart Almaras türbülans modeli kullanılarak üç farklı çözüm ağı büyüklüğü ile elde edilen sonuçların etrafındaki ayırıklaştırma hata bandı tahmin edilmiştir. Bunun yanısıra bu çözümler 14 milyon Reynolds sayısında 0 ila 18 derece yana kayma açılarında yapılan testlerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Eleman sayısındaki artış ile çözümleme sonuçlarının deneysel veriye yaklaştığı gözlenmiştir. Uygun çözüm ağı seçiminin ardından Realizable k-ε ve SST k-ω modelleri ile analizler tekrarlanarak türbülans modeli opsiyonları incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, 18 derece yana kayma açısına kadar bir-denklemlilik Spalart Almaras türbülans modelinin pratik uygulamalar için uygun olduğu değerlendirilmiştir. Yüksek kayma açıları için ele alınması gereken durumlarda iki-denklemlilik SST k-ω türbülans modelinin kullanımının tekrar değerlendirilmesi tavsiye edilmektedir.

## Investigation of turbulence models by using static tow tank tests of DARPA SUBOFF

### H I G H L I G H T S

- DARPA SUBOFF static drift hydrodynamic coefficients
- Numerical investigation of mesh sizes and turbulence models using ANSYS Workbench software
- Verification of numerical results using experimental data

#### Article Info

Research Article  
Received: 12.06.2020  
Accepted: 16.10.2021

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.748378

#### Keywords:

Hydrodynamic coefficients,  
CFD,  
discretization error,  
GCI,  
turbulence models

#### ABSTRACT

In this study, the method which is going to be followed during the calculations of hydrodynamic coefficients of DARPA SUBOFF submarine in manoeuvring simulations was determined by static drift tests simulations. Accurate prediction of hydrodynamic coefficients which are used in underwater vehicle manoeuvres is related with mesh and turbulence models used in solutions. The commercial software ANSYS Workbench was used in the study. The proper mesh size selection was accomplished by using Grid Convergence Index (GCI) which is based on Richardson Extrapolation method. The discretization error band around the solutions obtained for three different mesh sizes were estimated with Spalart Almaras turbulence model. In addition, these solutions were compared with the experimental results which were carried out at 14 million Reynolds number at 0 to 18 degrees drift angles. It was observed that numerical results get closer to the experimental results as the number of elements increases. After selection of suitable mesh, the options of turbulence models were investigated by repeating the analyses with Realizable k-ε and SST k-ω models. At the end of study, one-equation Spalart Almaras turbulence model is evaluated as adequate for practical applications upto 18 degrees of drift angle. For the applications at high drift angles, two-equation SST k-ω turbulence model is recommended to be re-assessed.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hava aracı tasarımlarında olduğu gibi su altı araç tasarımlarında da cisim etrafında oluşan akış araç performansına doğrudan tesir etmektedir. Su altı aracının manevra kabiliyetinin belirlenmesi, güvenli dalış ve acil çıkış manevraları gibi kritik manevraların tasarımında önemli olmaktadır. Bu sebeple, aracın manevra benzetim modellerinde kullanılacak hidrodinamik katsayıların yüksek doğrulukta bulunması kritik öneme sahiptir.

Günümüzde bu katsayılar deneysel ve sayısal akışkanlar dinamiği yöntemleri ile belirlenmektedir. Deneylerde, geometrinin gerçek boyutlarda kullanılamaması sebebiyle Reynolds (Re) sayısının gerçek durumdan farklı olması, modelin akış içine tutucu kollar vasıtasıyla yerleştirilmesi, kullanılan ölçerlerdeki belirsizlikler gibi sebeplerden dolayı katsayıların yüksek doğrulukta bulunması güç olabilmektedir. Ayrıca deneylerin pahalı ve hazırlık sürelerinin uzun olması sebebiyle kavramsal ve ön tasarım aşamasında kullanılması pratik olmamakta, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) tabanlı yöntemler ön plana çıkmaktadır. Mühendislik uygulamalarında deneyler sayısal yaklaşımların doğrulamasında kullanılırken, sayısal yaklaşımlar ise deneylerin kurgulanmasında bir ön adım niteliğindedir. HAD ve deneyler birlikte kullanıldığında birbirlerini destekleyici ve tamamlayıcı olmaktadır.

Sayısal çalışmalar genellikle akış fiziğinin tümüyle temsil edilmesinde sınırlamalara sahiptir. Bununla birlikte testlere göre zaman ve bütçesel anlamda daha ucuzdur. Deneysel olarak çok pahalı olan ve hatta bazı zamanlar mümkün olmayan akış görüntüleme işlemi HAD tabanlı yöntemlerle çok rahat gerçekleştirilebilmektedir. Bu HAD tabanlı yöntemlerin su üstü ve su altı araçlarda kullanımı son yıllarda oldukça artmıştır. Ayrıca hidrodinamik kuvvetlerin önemli bir kısmı ağdalı akıştan kaynaklanmakta ve büyük kanatlara sahip hava araçlarına göre üzerlerinde oluşan hidrodinamik kuvvetlerin çoğu gövdeden kaynaklanmaktadır. Bu sebeple, hidrodinamikçiler için gövdeden kaynaklı kuvvetlerin hassas bulunması, özellikle de yüksek akış açılarında önemli bir problemdir [1].

Hidrodinamik tasarım uygulamalarında kullanılacak HAD araçlarının geliştirilmesi ve bu çözümlerin kullanılmadan önce doğrulama ve geçerliliğinin gösterilmesi gerekmektedir. Böylece hesaplanan katsayıların güvenilirliği belirlenerek yazılımların kullanımı sırasında belirsizliklerinin ne seviyede olduğu tespit edilmektedir. Fakat gizlilik sebebiyle su altı araçların gövde şekli ve deneysel sonuçları genellikle açık kaynaklarda bulunmadığından doğrulamada kullanılacak sına ma modelleri su altı araçları için çok fazla değildir. 1980'li yıllarda Amerika Birleşik Devletleri Savunma Sanayii Gelişmiş Araştırma Projeleri Ajansı, DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), geleceğin gelişmiş su altı araçlarının geliştirilmesine yön verme amaçlı HAD (İng. CFD) analiz araçlarının geliştirildiği projelere destek

vermiştir. Destek kapsamında akışkanlar dinamiği yazılımlarının geçerlenmesinde kullanılmak üzere DARPA SUBOFF olarak isimlendirilen eksenel simetrik gövdeye sahip geometrilerin deneysel ölçüm çalışmaları, farklı geometrik konfigürasyonlar için farklı akış koşullarında ve farklı deneysel altyapılarda gerçekleştirilmiştir [2]. Testler sonucunda, eksenel simetrik gövde etrafında ayrıntılı akış ölçümleri ile birlikte kuvvet ve moment ölçümleri elde edilmiştir. Bu test kampanyaları hakkında ayrıntılı bilgiler ve elde edilen sonuçlar David Taylor Research Center, Ship Hydrodynamics Bölümü (DTRC/SHD) tarafından raporlanmış, konferans ve sempozyumlarda sunulmuştur [3-6]. Bu test sonuçları açık kaynak olarak paylaşıldığından su altı araç hidrodinamiği çalışan araştırmacılar için de önemli bir kaynak olmuştur.

Lin vd. [7] yatay düzlemdeki manevra türevlerinin etkin bir şekilde bulunabilmesi için deneysel bir yöntem geliştirmişlerdir. Deney düzlemsel hareket mekanizması ile (İng. planar motion mechanism) çekme tank (İng. tow tank) test altyapısında yapılmıştır. Yarım ölçekli DARPA SUBOFF geometrisinin gövdesi ve gövdeye eklenti yapılan yelken, dümen ve diğer parçaların bulunduğu farklı konfigürasyonlarla testler gerçekleştirilmiştir. Test yönteminin yapılabilirliğinin değerlendirilmesi ve sonuçların doğrulanması amacıyla elde edilen sonuçlar DTRC/SHD tarafından yapılan testlerin sonuçları [5] ile karşılaştırılmış geliştirilen test yönteminin başarımlı ve test sonuçlarının belirsizlikleri ile ilgili sonuçlar bu çalışma ile sunulmuştur.

Shadlaghani ve Mansoorzadeh [8] hidrodinamik katsayıların elde edilmesinde kullanılan durağan test manevraları ile düzlemsel hareket mekanizmasıyla elde edilen durağan olmayan test manevralarının sonuçlarını incelemiştir. Sına ma modeli olarak DARPA SUBOFF geometrisi kullanılmış ve yine DTRC/SHD tarafından yapılan testlerin sonuçları [5] ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, durağan olmayan daha karışık test manevraları yerine basit olan durağan test manevralarının kullanılması tavsiye edilmiştir.

Deneysel yöntemlerin geliştirilmesinin yanı sıra DARPA SUBOFF geometrisi ve test sonuçları birçok su altı aracı tasarımcısı tarafından kullanılan ve geliştirilen yazılımlar için sına ma modeli olarak kullanılmaktadır.

Sung vd. [9] sıkıştırılamaz Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS) denklemlerine dayalı sayısal akışkanlar dinamiği yazılımı geliştirmişlerdir. Geliştirilen yazılım ile eksenel simetrik geometri olan DARPA SUBOFF modeli ile 0, 4, 8, 12 ve 16 derece hücum açılarında çözümlenmeler yapılmış, analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada yazılımda kullanılan sıfır denklemli Baldwin-Lomax türbülans modelinin yerterliliği ve modelde yapılan değişiklikler sunulmuştur. Türbülans modelinde yapılan değişikliklerin hesaplamalarda doğruluğu arttırdığı fakat ek iyileştirmelerin yapılması gerektiği belirtilmiştir.

Jonnalagadda vd. [10] sıkıştırılmaz Navier Stokes denklemleri için çoklu-çözüm ağı (İng. multigrid), çoklu-blok (İng. multiblock) sayısal metodunu geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu yazılımın başarımı, üç farklı DARPA SUBOFF konfigürasyonu için farklı akış açılarındaki kuvvet ve moment sonuçlarının deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmasıyla gösterilmiştir. Yazılımda sıfır-denklemli Baldwin Lomax türbülans modeli kullanılmıştır. Farklı hücum açıları için analiz sonuçları deneysel sonuçlara türbülans modelinde değişiklik yapılarak yaklaştırılabilmektedir. Fakat yazılımın çözüm ağı tip ve sayısına göre performansının değerlendirilmesi için türbülans modeli sabit tutulmuştur. Çalışmada O-tipi ve C-tipi çözüm ağları kullanılmış, C-tipi çözüm ağının sayısal sonuçların doğruluğunu artırdığı gösterilmiştir.

Yang ve Löhner [11] ise sıkıştırılmaz akış RANS denklemleri için düzensiz çözüm ağı ile sonlu elemanlar yöntemi kullanan paralel çözücü geliştirmiştir. Bu çözücü de Baldwin-Lomax türbülans modelini kullanmaktadır. Çalışmada DARPA SUBOFF geometrisi üzerindeki basınç ve yüzey sürtünme katsayıları elde edilerek deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çözücünün farklı akış açıları için gürbüz ve etkin olduğu gösterilmiştir. Çözücünün amacı aksel simetrik gövdeli geometriler için kuvvet ve momentlerin bulunması olduğu, henüz kuvvet ve moment değerlerinin bulunmasına yönelik çalışmaların tamamlanmadığı belirtilmiştir.

Hollanda, Amerika Birleşik Devletleri, Almanya, İngiltere, Avusturya ve Kanada'lı altı farklı kurumdan oluşan Denizaltı Hidrodinamik Çalışma Grubu'nun (The Submarine Hydrodynamic Working Group-SHWG) ortaklaşa yaptığı HAD tabanlı çalışmada RANS denklemleri kullanılmış ve su altı aracının etrafındaki akış ile hidrodinamik kuvvet ve momentleri farklı sürekli taşınım hareketi (İng steady drift motion) için tahmin etmişlerdir [12]. Çalışmaya altı farklı ülkeden katılan araştırmacılar, ticari ve kendi geliştirdikleri yazılımları farklı türbülans modelleri ve çözüm ağları ile kullanmışlar, DARPA SUBOFF geometrisi için kullandıkları yazılımların kabiliyetlerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Analizlerde hesaplanan hidrodinamik kuvvet ve momentler deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak doğrulamaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada türbülans modeli seçiminin önemli olduğu, gelişmiş türbülans modelleri ile sonuçların %10 doğruluk bandında olduğunu fakat türbülans modelinden kaynaklı hatalar sebebiyle sonuçların bu band dışına çıkabileceği belirtilmiştir.

Sezen vd. [13] DARPA SUBOFF sına modelini E1619 pervanesi ile birlikte direnç ve öz-sevk analizlerini RANS analizleri ile gerçekleştirerek su altı aracının öz-sevk tahminlerinde HAD yazılımının kullanımını değerlendirmişlerdir. Çalışmada ticari yazılım olan STAR CCM yazılımını altı yüzlü çözüm ağı elemanları ile kullanmışlardır. Endüstriyel analizlerde yaygınlıkla kullanılan k-ε türbülans modelini kullanırken yüzey  $y^+$  değerlerinin 30'dan büyük olmasına dikkat etmişlerdir.

Farklı hızlarda yapılan analizler deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış, HAD yönteminin direnç ve öz-sevk parametrelerinin elde edilmesinde tatmin edici sonuçlar aldıklarını belirtmişlerdir. Ayrıca kış bölgesindeki akış hem kış takıntılı bulunan hem de bulunmayan konfigürasyonlar için incelenerek hız dağılımlarına etkisi gösterilmiştir.

Özden ve Çelik [14] su altı aracının sevk özelliklerini belirleyen kış koniklik açısının etkilerini HAD yöntemi ile araştırmışlardır. Çalışmalarında DARPA SUBOFF geometrisinin deplasman hacmini sabit tutarak farklı koniklik açılara ve farklı boy-genişlik oranlarına sahip geometriler elde etmişlerdir. Bu farklı geometriler ile pervaneli ve pervanesiz akış analizleri gerçekleştirmişlerdir. HAD analizleri ticari yazılım olan ANSYS Fluent yazılımı ile SST k-ω türbülans modeli ile gerçekleştirilmiştir. Çözüm ağı Pointwise yazılımı ile ilk elemanın boyutsuz uzaklığı olan  $y^+$  değeri 50 olacak şekilde oluşturulmuştur. Farklı hızlarda yapılan direnç analizlerinde deneysel veri ile uyumlu sonuçlar alınmış, 9,15 m/s hıza kadar yapılan analizlerde en fazla %6 oranında fark olduğu tespit edilmiştir. Farklı kış koniklik açıları ile yapılan analizlerde kış koniklik açısı arttığında itme azalması görülmüş, orijinal DARPA geometrisinin en verimli durum olduğu belirtilmiştir.

DARPA SUBOFF geometrisi ile yapılan test ve analizler, gövde üzerinde kalın sınır tabaka ile beraber girdaplı akış yapılarının oluştuğunu göstermektedir. Gövdenin arka kısmının konik bir şekilde daralması göreceli küçük akış açılarında dahi kuyruk kısmında ayrılmanın oluşmasına neden olmaktadır. Gövdenin kuyruk kısmındaki akışın doğru modellenmesi, su altı aracının kuvvet ve momentlerinin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir. Son yıllarda su altı aracının iz bölgesinin daha iyi tahmin edebilmek amacıyla büyük girdapların çözümlendiği LES (İng. Large Eddy Simulation) benzetimlerine başvurulduğu görülmektedir. Feng vd. [15] DARPA SUBOFF geometrisinin yelken ve dümen bulunan eklentili konfigürasyonunun direnç değerlerini daha hassas tahmin etmek amacıyla  $2,65 \cdot 10^7$  Reynolds sayısında benzetimler gerçekleştirilmiştir. Bu benzetimlerde 20 milyon elemana sahip düzenli çözüm ağı kullanmışlardır. Deneysel veri ile yapılan karşılaştırmalar direnç kuvvet katsayısında %1,56 oranında fark olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada hesaplama zamanı ile ilgili bilgi verilmemiştir. Fakat LES metodu ile yapılan literatürde bulunan farklı analizlerde verilen değerler çözümlene zamanının endüstriyel uygulamalar için kullanılabilirliğinin henüz mümkün olmadığını göstermektedir. Örneğin, Posa ve Balaras [16] tarafından yapılan LES çözümünde eklentili DARPA SUBOFF geometrisi Jimenez vd. [17] tarafından yapılan benzer test durumu olan  $1,2 \cdot 10^6$  Reynolds sayısında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kış bölgesinde bulunan eklentilerin yarattığı iz bölgesi incelenmiş, dokuz çap uzunluğundaki iz bölgesinin hassas yakalandığı belirtilmiştir. Çözümleme zamanı olarak Cray XT5 bilgisayar kümesinde 1000 çekirdek kullanarak toplam 700.000 CPU zamanı kullanıldığı, pervaneli durum için bu zamanın 6 milyon CPU saatine çıktığı belirtilmiştir.

Akışın ortalama değerleri ile ilgilenildiği mühendislik uygulamalarında kullanılan RANS çözümleri akış içindeki girdapları (İng. eddies) modellediğinden çözüm süreleri başedilebilir büyüklükte olmakta ve bu sebeple günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. RANS çözümleri, gemi ve su altı araçların tasarımında manevra özelliklerinin hassas olarak belirlenmesi ve görevleri sırasında beklenen manevraların yapılabildiğinin gösteriminde iki farklı şekilde kullanılmaktadır. İlk yöntemde, su aracının pervane ve kontrol yüzeylerinin hareketleri zamana bağlı akış analizlerine dahil edilmektedir. Son yıllarda gerçek zamanlı analizlerin yapıldığı iki farklı çalışma örnek olarak referans [18] ve [19]'da verilmiştir. İkinci yöntemde ise RANS analizleri su aracının hidrodinamik parametrelerinin türevlerinin bulunmasında kullanılırken, hidrodinamik katsayılar matematiksel modeller yardımıyla hesaplanarak hareket denklemlerinde kullanılırlar. İkinci yöntemde su aracının yörüngesi daha hızlı hesaplanabildiğinden kavramsal tasarım aşamasında, yörünge tahmini ve parametrelerin duyarlılık analizlerinde kullanılmaktadır. Sukas ve diğerleri [20] gemi manevralarının benzetimi için geliştirdikleri yazılıma 3 serbestlik dereceli matematiksel model ve ampirik yaklaşımları entegre ederek tanker gemisi (KVLCC2) ve savaş gemisinin (DTMB545) manevra kabiliyetlerini incelemişler ve test sonuçları ile karşılaştırmasını yapmışlardır. MANSIM olarak adlandırdıkları bu yazılım ile hidrodinamik türevlerin ve dümen parametrelerinin gemi manevra performansına etkileri incelenerek duyarlılık analizleri yapılmıştır. Sonuçlar doğrusal moment türevlerinin ve dümen parametrelerinin manevra hareketine etkisinin önemli olduğunu göstermiştir. Bu çalışmanın da desteklediği gibi yörünge analizlerinin tahmini büyük oranda hidrodinamik katsayıların hassas bir şekilde bulunmasına bağlı olmaktadır. Bettle'in yaptığı çalışmada [21] acil çıkış manevrası benzetimi ampirik yaklaşımlarla bulunan hidrodinamik katsayılar kullanılarak yapılmıştır. Bu benzetimler zamana bağlı RANS çözümü ile yapılan benzetimler ile karşılaştırılarak yunuslama açısında %10 fark tespit edildiği belirtilmiş, bu farkın hidrodinamik katsayı hesaplama yönteminden kaynaklı olduğu belirtilmiştir. Bu sebeple, günümüzde birçok araştırmacı hassas yörünge tahmini yapabilmek amacıyla pervane ve kontrol yüzey hareketlerinin etkisini içeren gerçek zamanlı RANS benzetimlerini farklı manevra ve su araçlarında çalışmaktadırlar [22-24]. Akış fiziğinin doğru modellenmesi ve geometri üzerinde oluşan kuvvet ve moment değerlerinin hassas belirlenmesinde uygun türbülans model seçimi önemli etkiye sahiptir. Ayrıca, kullanılan çözüm ağı, Navier Stokes denklemlerinin ayrıklaştırma (İng. discretisation) hatasına sebep olmakta ve seçimi yapılan türbülans modeline uygun çözüm ağı kullanılmaması durumunda model hatasını da arttırmaktadır. Geçmiş yıllarda yapılan çalışmalar çözüm ağı ve türbülans modeli seçiminin analiz sonuçlarında önemli etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, eksenel simetrik gövdeye sahip DARPA SUBOFF geometrisinin manevra benzetiminde kullanılacak hidrodinamik katsayı veri tabanının ticari bir yazılım olan ANSYS Fluent yazılımı elde edilmesinden önce yapılan ön

analizler ve değerlendirmeler sunulmuştur. Çözüm ağı büyüklüğünün seçimi ayrıklaştırma hatasının bulunması ile belirlenmiştir. Ayrıklaştırma hatasının çözümleme sonuçlarındaki oranının belirlenmesi, katsayıların altı serbestlik dereceli (6 DOF) hareket denklemleri vasıtasıyla yapılacak manevra benzetimlerinin belirsizlik analizlerinin yapılmasında önemli rol olmaktadır. Ayrıca kullanılacak ticari yazılımın bünyesinde bulunan bir ve iki-denklemli türbülans modellerinin hidrodinamik katsayılara etkisi değerlendirilecektir. Türbülans modellerinin, gövde üzerindeki ağdalı alt-katmanı (İng. viscous sub-layer) çözümlenebilmesi amacıyla  $y^+$  değerinin 1'den küçük olmasına dikkat edilmiştir. Çözümleme sonuçları test sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulaması yapılmıştır. Çözüm ağı ve türbülans modeli seçimleri için yapılan değerlendirmeler DTRC/SHD tarafından yapılan sürüklenme test sonuçları ile desteklendiğinden benzer geometri ve akış durumları için kullanılabilir. Ayrıca, dinamik katsayıların bulunması amacıyla yapılacak sayısal analizlerde de bu çalışma sonuçları yol gösterici nitelikte olacağından zamandan tasarruf edilmesini sağlayacaktır.

## 2. DOĞRULAMA GEOMETRİSİ VE TESTLERİ (VERIFICATION GEOMETRY AND TESTS)

Bu çalışmada, HAD çözümlerinin doğrulaması amacıyla tasarlanan ve test edilen eksenel simetriye sahip DARPA SUBOFF gövde geometrisi kullanılmıştır. Geometrinin ayrıntıları Groves vd. [3] tarafından tarif edilmiş ve temel geometrik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** DARPA SUBOFF geometrisinin temel parametreleri  
(DARPA SUBOFF geometry main parameters)

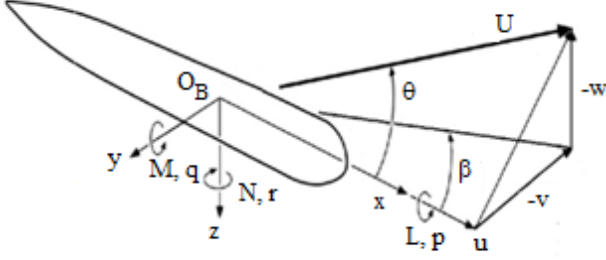
Toplam Boy (m)	Loa	4,356
Referans Uzunluk (m)	Lpp	4,261
En büyük Çap (m)	Dmax	0,508
Yüzerlilik Merkezi (baştan) (m)	LCB	2,013

Sayısal analizler ile karşılaştırmalarda bu geometrinin çekme tank testlerinden elde edilen sonuçları kullanılmıştır [5]. Roddy ve diğerlerinin yaptığı çalışmada [5] ölçülen kuvvet ve moment katsayı değerlerinin düşük Reynolds sayılarında Reynolds sayısı arttıkça değiştiği,  $Re=1,0 \times 10^7$  sayısından itibaren değişimin artık durduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple testler model ölçek etkisinin gözlenmediği referans uzunluk kullanılarak hesaplanmış  $Re=1,4 \times 10^7$  sayısında gerçekleştirilmiştir. Ölçülen hidrodinamik kuvvet ve momentler, Şekil 1'de gösterilen eksen takımına göre verilmiştir. Momentler yüzerlilik merkezine göre ölçülmüş, kuvvet (FX, FY, FZ) ve momentlerin (Mx, My, Mz) katsayılara dönüştürülmesi referans uzunluk kullanılarak aşağıdaki gibi yapılmıştır (Eş. 1-Eş. 2).

$$C_{X,Y,Z} = \frac{FX,FY,FZ}{\frac{1}{2}\rho VL_{pp}^2} \quad (1)$$

$$C_{m,n,l} = \frac{Mx,My,Mz}{\frac{1}{2}\rho VL_{pp}^3} \quad (2)$$

Eş. 1 ve Eş. 2’de  $\rho$  suyun yoğunluğu,  $V$  ise su altı aracı hızının  $\vec{V} = (u, v, w)$  büyüklüğüdür. Yana kayma açısı (İng. drift angle)  $\beta = \tan^{-1}(v/u)$  olarak tanımlanmış ve tanıma göre pozitif yana kayma açısı ( $\beta$ ) durumunda akış su aracının sol tarafından gelmektedir.



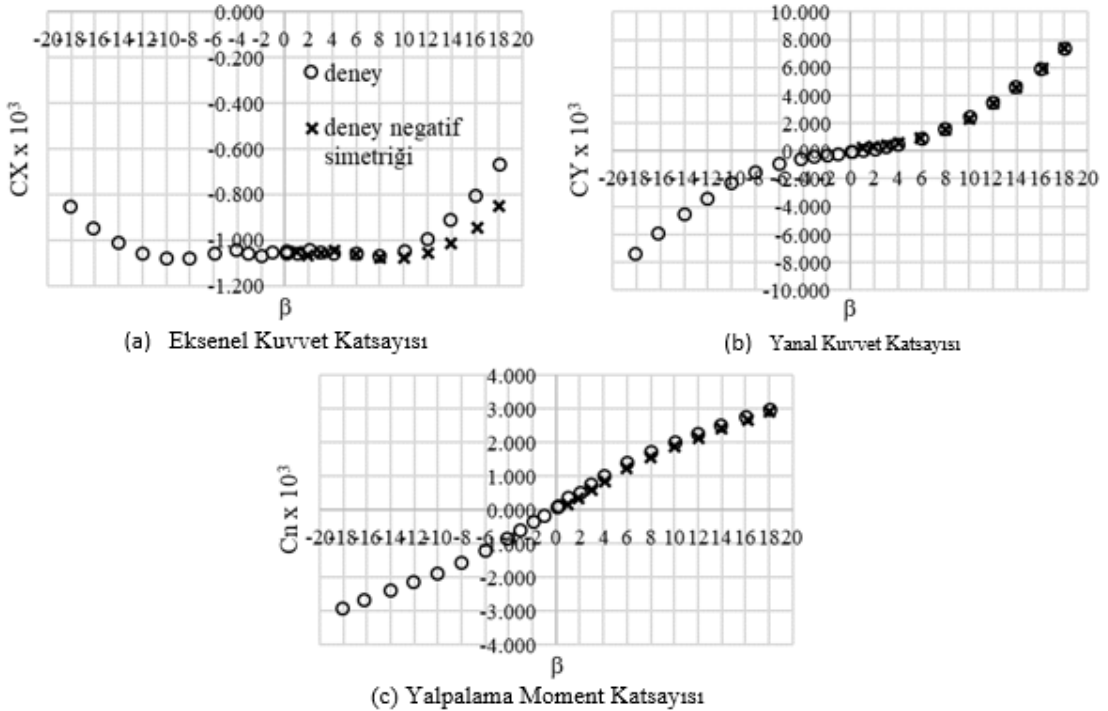
Şekil 1. Eksen takımı tanımı (Axis system definition)

1990 yılında Roddy tarafından yapılan testlerde Konfigürasyon 3’e karşılık gelen doğrulama modeli ile ölçülen aksenal kuvvet, yanall kuvvet ve yalpalama moment katsayıları [5] Şekil 2’de verilen grafiklerle sunulmuştur. Deney sonuçlarının simetrikliğinin gösterimi amacıyla negatif yana kayma açılarındaki değerler pozitif yana kayma açısının tarafına da yansıtılmıştır. Yanall kuvvet ve moment ölçümleri pozitif ve negatif yana kayma açıları için birbirine yakın olmakla birlikte aksenal kuvvet katsayısında özellikle yüksek yana kayma açılarında deneysel veride simetrisinin olmadığı görülmektedir. Ölçümlerdeki asimetrisinin, testlerde modelin ek tutucu kollarla taşınması ve geometride az da

olsa yapılan değişimler sonucu akışta oluşan asimetrisinden kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir.

### 3. AKIŞ ÇÖZÜCÜSÜ (FLOW SOLVER)

Çalışmada, çözüm hacim geometrisinin oluşturulmasında ANSYS WorkBench 19R.1 versiyonu altında bulunan Design Modeller yazılımı, çözüm ağının oluşturulmasında Mesh yazılımı ve akış çözümünde Fluent 19R1 yazılımı kullanılmıştır. Fluent çözücüsü Navier Stokes denklemlerini sonlu hacim yöntemi (İng. finite volume method) ile çözmektedir. Navier Stokes denklemleri ile uygun çözüm ağı ve zaman adımı ile zamanda ve uzayda tüm türbülans boyutları yakalanabilse de CPU ihtiyacı mühendislik uygulamaları için yeterli değildir. Bu sebeple, Fluent yazılımında günümüzde en çok benimsenen denklemlerin Reynolds-ortalamasını alan yöntem uygulanmaktadır. Bu yöntemde tüm büyüklükteki türbülans yapıları akıştan çıkarılarak, akış değişkenlerinin ortalama değerleri elde edilir. Fakat ortalaması alınan denklemlerde (Reynolds Averaged Navier Stokes, RANS) ek olarak Reynolds stress ve akı değişkenleri ortaya çıkmakta ve bu değişkenlerin de uygun türbülans modelleri ile elde edilmesi gerekmektedir. ANSYS Fluent bünyesinde RANS simülasyonlarında kullanılmak üzere bir-denklemli Spalart Almaras , iki-denklemlili k-ε ve k-ω türbülans modelleri ile V2-F ve Reynolds Stress modelleri bulunmaktadır. Yazılımda RANS türbülans modellerinin yanısıra Scale-Resolving Simulation (SRS) modelleri de mevcuttur. Tüm bu modeller ile ilgili teorik bilgi ve uygulama tavsiyeleri Fluent Kullanıcı ve Teori [25, 26] dokümanlarında verilmiştir. Farklı akış problemleri için başarılı olan ve kabul görmüş tek bir türbülans modeli bulunmadığından eldeki problem için en



Şekil 2. Deneysel veri [5] (Experimental data [5])

uygun türbülans modelinin seçilmesi gerekmektedir. Türbülans modellerinin seçimi akış fiziğine, analizden beklenen doğruluk seviyesine, eldeki hesaplama kaynaklarına ve simülasyon sonuçlarını elde etmek için ne kadar süreye ihtiyaç duyulduğuna göre değişebilmektedir. Sezen vd. [13] çalışmasında CPU zamanından tasarruf etmek için SST türbülans modeli yerine yüksek basınç değişimlerinin görülmediği durumlarda kullanılması tavsiye edilen ve birçok benzer çalışmada kullanılan  $k-\epsilon$  modelini kullanmayı tercih ettiklerini belirtmişlerdir. Ponkratov ve Zegos [27] ise açık deniz gemi test sonuçları ile karşılaştırdıkları RANS analizlerinde Shear Stress Transport (SST)  $k-\omega$  modelini kullanmışlardır. Karşılaştırma yapılan gemi direnç, pervane itki, tork ve mil hızı gibi parametrelerde tatmin edici sonuçlar aldıklarını raporlamışlardır. Bu çalışmada, tasarım çalışmalarında yaygınlıkla kullanılan bir ve iki-denklemlilik türbülans modelleri, Fluent yazılımının kullanım tavsiyeleri gözönüne alınarak kullanılmıştır [25]. Spalart Almaras türbülans modeli kinematik türbülans viskozite için taşınım denkleminin çözümlendiği göreceli basit, tek denklemlilik türbülans modelidir. Bu model özellikle havacılık uygulamaları için geliştirilmiş, yüzey üzerinde elverişsiz basınç değişimlerinin (İng. adverse pressure gradient) görüldüğü geometrilerde (airfoil, kanat, uçak gövdesi, füzeler, gemi gövdeleri, vb.) sınır tabaka çözüm ağının hassas çözümlenmesiyle birlikte ( $y^+ < 1$ ) iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir [29]. Fluent yazılımında modelin  $y^+$  değerinden bağımsız düşünüldüğü ve  $y^+$  değerinin 1'den büyük olduğu durumlarda Enhanced Wall Treatment (EWT) seçeneği ile kullanılacağı belirtilmiştir. Bu modelde akış eğriliği ve yüzerlilik etkisinin yansıtılarak türbülans modelinde iyileştirmeler yapılabileceği belirtilmiştir.

İki-denklemlilik türbülans modelleri endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanılan modellerdir.  $k-\epsilon$  türbülans modeli Launder ve Spalding [30] tarafından önerilmiş ve endüstriyel akış / ısı transferi problemlerinde gürbüz ve ekonomik olmasının yanında yeterli doğrulukta sonuçlar vermesi sebebiyle en yaygın kullanılan model olmuştur. Fakat bu modelin akış ayrılmasına duyarlılığı yetersiz kabul edilmektedir; dolayısıyla akım ayrılma noktasının gerçek duruma kıyasla ne kadar doğru olduğu tartışılabilir. ANSYS Fluent,  $k-\epsilon$  türbülans modeli ailesi içerisinde Reliazable  $k-\epsilon$  modelinin, Enhanced Wall Treatment (EWT) opsiyonu ile birlikte kullanılmasını önermektedir. Hatta şiddetli sınır tabaka ayrılmasının görüldüğü dış akış analizlerinde bu modelin kullanılması tavsiye edilmemektedir.  $k-\omega$  türbülans modeli ise elverişsiz basınç değişimlerini ve akış ayrılmasını daha başarılı tahmin etmektedir. Fakat bu model de yüzey üzerinde oluşan ağdalı akış dışındaki akışın türbülans kinetik enerji ( $k$ ) ve özgül yayılım oranı (İng. specific dissipation rate) ( $\omega$ ) değerlerine çok duyarlıdır. Bu sebeple standart  $k-\omega$  modelinden ziyade Shear Stress Transport (SST)  $k-\omega$  modelinin kullanılması tavsiye edilmektedir. SST modeli aerodinamik akışlarda en çok kullanılan modeldir ve sıklıkla duvar sınır tabaka özelliklerini Spalart Almaras modeline göre daha doğru tahmin etmektedir [25].

Çalışmanın ilk kısmı olan çözüm ağı büyüklüğünden kaynaklı ayrıklaştırma hatalarının değerlendirildiği doğrulama analizlerinde, göreceli daha basit ve çözüm süresi açısından daha ekonomik olan Spalart Almaras modeli kullanılmıştır. Sonrasında eldeki problem için uygun olabileceği değerlendirilen çözüm ağı ile farklı yana kayma açılarında yapılan analizler Reliazable  $k-\epsilon$  modeli ve SST  $k-\omega$  modeli ile tekrarlanmıştır. Reliazable  $k-\epsilon$  modeli ANSYS Fluent kullanıcı el kitabında tavsiye edildiği üzere Enhanced Wall Treatment opsiyonu ile kullanılmıştır. Bunun yanısıra basınç değişimlerinin etkisini modele dahil edilmesi amacıyla basınç gradyan etki (İng. pressure gradient effects) opsiyonu da etkinleştirilmiştir. İki-denklemlilik türbülans modellerinde akışın durma noktası (İng. stagnation point) çevresinde türbülans enerjisinin olması gerektiğinden fazla üretildiği bilinmektedir. Bu sebeple türbülans denklemlerinde bununla ilgili terim kısıtlanabilmektedir. Yazılımda bu işlem üretim sınırlayıcı (İng. production limiter) opsiyonunun etkinleştirilmesi ile yapılmaktadır. Girdap ağdalılığı (İng. eddy-viscosity) türbülans modellerinin diğer bir zayıf noktası ise akış çizgilerinin eğimine olan duyarlılıklarıdır. Tüm modellerde bu etkinin dahil edilmesi için eğrilik düzeltme (İng. curvature correction) opsiyonu da dahil edilmiştir. Türbülans modelleri ile ilgili diğer opsiyonlar ve katsayılarda herhangi bir değişiklik yapılmamış, yazılımın saptanmış varsayılan değerleri kullanılmıştır. Türbülans modellerinin kullanımı ile ilgili ayrıntılı bilgiye ANSYS Fluent kullanıcı dokümanından [25] elde edilebilir.

Reliazable  $k-\epsilon$  modeli ve SST  $k-\omega$  modellerinde sınır koşulları türbülans parametreleri için türbülans yoğunluğu ve türbülans ağdalılık oranları kullanılmıştır. Karşılaştırmada kullanılacak deneysel sonuçların serbest akış türbülans parametreleri bilinmediğinden %5 orta seviye türbülans yoğunluğu ve %10 türbülans viskozite oranı kullanılmıştır. Modellerin doğruluğunu arttırmak amacıyla ikinci dereceden sayısal yöntemler tercih edilmiştir. Tüm türbülans modellerinin sonuçları test sonuçları ile karşılaştırılarak eldeki problem için tavsiyelerde bulunulmuştur.

#### 4. DOĞRULAMA ANALİZLERİ (VERIFICATION ANALYSES)

Analiz sürecinin ilk önemli adımı, doğru büyüklükte analiz hacminin oluşturulmasıyla başlamaktadır. Geometri, ANSYS Workbench altındaki Design Modeler yazılımına yüklenerek etrafındaki analiz hacmi oluşturulmuştur. Analiz hacminin büyüklüğü sınır yüzey koşullarının doğru uygulanmasına izin verecek büyüklükte seçilirken, analiz süresini gereksiz şekilde uzatmayacak boyutta olmasına dikkat edilmiştir. Analiz hacmindeki yüzeylere uygun sınır koşullarının tanımlanması çözümlerinin doğruluğu, hassasiyeti ve çözüm süresi bakımından önemli olmaktadır. DARPA SUBOFF geometrisinin yüzeylerine hızın sıfır alındığı kaymaz duvar (İng. no slip wall) sınır koşulu tanımlanmıştır. Akışın çözüm hacmine girdiği ön yüzey hız girişi (İng. velocity inlet), akışın analiz hacmini terkettiği

arka yüzey ise basınç çıkışı (İng. pressure outlet) olarak tanımlanmıştır. Hacmin DARPA SUBOFF geometrisinin etrafındaki dört yan yüzeylere yine hız giriş sınır koşulu tanımlanmıştır. Hız giriş sınır koşulunda düzenli akış hızının büyüklüğü ve yönü verilmiştir. Yapılan ön analizlerde çözüm hacminin ve sınır koşullarının uygunluğu kontrol edilerek Şekil 3'te boyutları verilen hacmin kullanılmasının uygun olduğu değerlendirilmiştir. Sınır koşulları ve çözüm ağı büyüklüğü ile ilgili bilgi ve tavsiyeler Fluent yazılımının kullanıcı kılavuzundan [25] ve Jiuyan Tu ve diğerleri [28] tarafından yazılan sayısal akışkanlar dinamiği kitabından elde edilebilir.

Çalışmanın bu kısmında çözüm ağı boyutlarından kaynaklı hataların ortaya konulması ve uygun çözüm ağının belirlenmesi için analizler yapılmıştır. Çözüm ağından kaynaklı belirsizliklerin bulunması için ASME Fluids Engineering Division [31] tarafından önerilen Richardson Extrapolation yöntemine dayalı Grid Convergence Index (GCI) metodu uygulanmıştır. Bu yöntemde üç farklı eleman sayısına sahip çözüm ağı kullanılması tavsiye edilmiştir. Üç boyutlu her bir çözüm ağı için genel eleman büyüklüğü (h) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Eş. 3).

$$h = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta V_i) \right]^{1/3} \quad (3)$$

Burada N çözüm ağındaki eleman sayısına,  $\Delta V_i$  ise her bir çözüm ağı elemanının hacmine karşılık gelmektedir. Eş. 3'te hesaplanan genel eleman büyüklükleri kuvvet ve moment değerleri gibi integral büyüklükler için kullanılmaktadır. Üç çözüm ağı ( $h_1 < h_2 < h_3$ ) için büyüklüklerin oranından küçültme oranları (r) Eş. 4 ile belirlenmektedir.

$$r_{21} = \frac{h_2}{h_1}, \quad r_{32} = \frac{h_3}{h_2} \quad (4)$$

Çözüm ağından kaynaklı farkların anlamlı olarak ortaya konulabilmesi için küçültme oranlarının 1,3 oranından küçük olmaması tavsiye edilmektedir. Farklı eleman büyüklükleri ve sayıları DARPA SUBOFF geometrisinin yüzeyine farklı

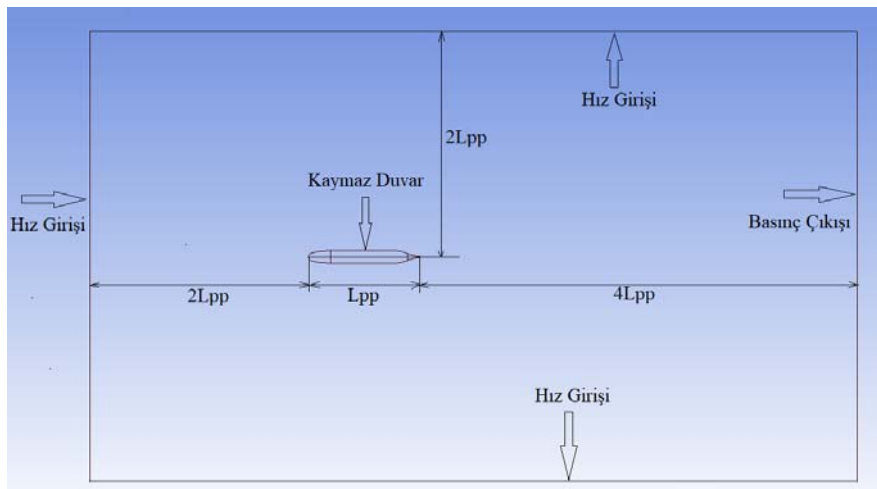
büyüklüklerde elemanlar atılarak elde edilmiştir. Geometrinin burnuna, orta gövdesine ve kuyruk kısmına farklı eleman büyüklükleri küçültme oranlarını 1,3'ün altına düşürmeyecek şekilde tanımlanmış, hem yüzeyde hem de hacimde çözüm ağı eleman büyüklükleri arasında 1,2 geçiş oranı kullanılmış ve tüm çözüm ağları için bu oranlarda değişiklik yapılmamıştır. Kullanılan yüzey çözüm ağı parametreleri Tablo 2'de ve görselleri Şekil 4'te verilmiştir.

**Tablo 2.** Çözüm ağı büyüklükleri (Mesh sizes)

Çözüm ağı büyüklükleri	1	2	3
Burun (m)	$1,5 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-2}$	$4 \times 10^{-2}$
Gövde (m)	$1,7 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^{-2}$	$6 \times 10^{-2}$
Kuyruk (m)	$0,5 \times 10^{-2}$	$10^{-2}$	$2 \times 10^{-2}$
Eleman sayısı (N)	3.070.300	1.387.815	617.448
Genel eleman büyüklüğü (h)	0,133	0,173	0,226

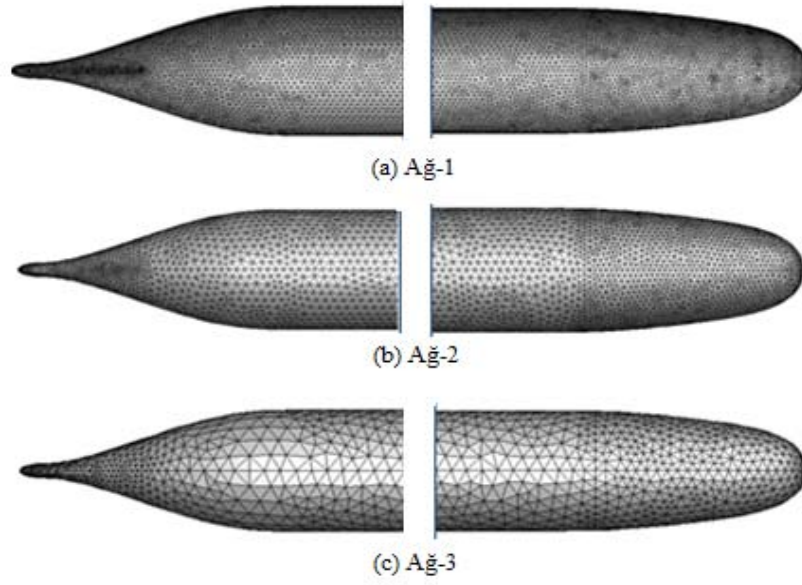
Çözüm ağı, türbülans modellerinin doğruluğu açısından da çok önemlidir. Kaymaz duvar üzerinde, düzenli çözüm ağının kullanılması ve düzenli çözüm ağının sınır tabakayı kapsayacak şekilde en az 10 elemandan oluşturulması genel bir uygulamadır. Sınır tabakanın yüksek doğrulukta çözümlenmesi gereken durumlarda ilk elemanın duvardan uzaklığına tarif eden boyutsuz büyüklük olan  $y^+$  değerinin 1'den küçük kullanılması gerekmektedir. Çalışmada türetilen üç çözüm ağı için DARPA SUBOFF geometrisinin üzerine sınır tabakanın ağdalı alt kısmını (İng. viscous sub-layer) yakalayacak 30 katmanlı düzenli çözüm ağı elemanları atılmış,  $y^+$  değerinin tüm duvar üzerinde 1'den küçük olmasına dikkat edilmiştir. Yapılan ön analizler ile düzenli çözüm ağının sınır tabakayı kapsadığı ve  $y^+$  değerlerinin 1'den küçük olduğu görülmüştür. Yana kayma açısının sıfır olduğu deney noktasının 3 numaralı çözüm ağı ile elde edilen yüzey  $y^+$  değerleri Şekil 5'te verilmiştir.

Üç farklı uygun çözüm ağının oluşturulmasının ardından çözümlerinin ana gayesi olan anahtar değişkenler bulunarak raporlanmıştır. Bu çalışmada DARPA SUBOFF geometrisinin manevra benzetimi için akış açısına bağlı oluşan katsayıların yeteri doğrulukta bulunması

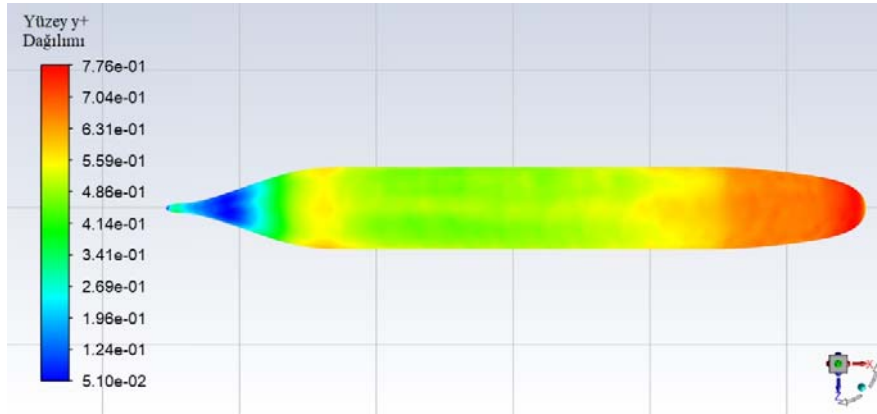


**Şekil 3.** Çözüm hacmi ve sınır koşulları (Solution domain and boundary conditions)





Şekil 4. Yüzey çözüm ağı (Surface mesh)

Şekil 5.  $\beta = 0^\circ$  için elde edilen yüzey  $y^+$  değerleri (Surface  $y^+$  values for  $\beta = 0^\circ$ )

amaçlanmaktadır. Başka bir deyişle yana kayma durumunda, yanal kuvvet ve yalpalama momenti, hücum açısında normal kuvvet ve yunuslama momentlerinin doğru tahmin edilmesi gerekmektedir. Deneysel çalışmada [5], geometrinin kayma açısına göre tüm kuvvet ve moment değerleri verilmiş fakat yanal kuvvet ve yalpalama momentinin elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu sebeple çözüm ağından kaynaklı ayırıklaştırma hatasının tahmininde aksenal kuvvet, yanal kuvvet ve yalpalama moment katsayıları kullanılmıştır. Çözümlemeler Spalart Almaras türbülans modeli ile 6 derece yana kayma açısında gerçekleştirilmiştir. Çözümlemlerde yineleme yakınsamasının garanti edilmesi amacıyla normalize edilmiş artıkların  $10^{-5}$  mertebesine inmesi beklenilmiştir.

Üç farklı genel eleman büyüklüğüne ( $h_1 < h_2 < h_3$ ) sahip çözüm ağları ile yapılan analizlerde kullanılan metodların gerçekleşen hassasiyet derecesi Eş. 5-Eş. 7 ile bulunmaktadır [31].

$$p = \frac{1}{\ln(r_{21})} |\ln|\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}| + q(p)| \quad (5)$$

$$q(p) = \ln\left(\frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s}\right) \quad (6)$$

$$s = 1. \operatorname{sgn}\left(\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}}\right) \quad (7)$$

Bu eşitliklerde  $\varepsilon_{32} = \Phi_3 - \Phi_2$ ,  $\varepsilon_{21} = \Phi_2 - \Phi_1$ , söz konusu parametrenin ( $\Phi$ ) çözüm ağları arasındaki farklarını,  $\Phi_k$  ise k. çözüm ağı ile elde edilen parametrenin çözüm sonucunu göstermektedir. Küçültme oranlarının sabit olması durumunda  $q(p) = 0$  olmaktadır. Eş. 5 ve Eş. 7 ile hesaplanacak p, ilk tahmin yapılarak yinelemeli olarak bulunmaktadır.

Gerçekleşen hassasiyet derecesi ile analizlerde kullanılan sayısal metodların hassasiyet derecesinin uyumlu olması kullanılan çözüm ağlarının asimtotik aralıkta olduğunun

göstergesi olmakla birlikte tersi çözümlerinin yetersiz olduğunu göstermemektedir. Çözüm ağı eleman büyüklüğünün sıfıra gitmesi durumunda tahmin edilen değer ( $\phi_{ext}^{21}$ ), 1. ve 2. çözüm ağı ile elde edilen sonuçlar ile Eş. 8 kullanılarak bulunmaktadır.

$$\phi_{ext}^{21} = (r_{21}^p \phi_1 - \phi_2) / (r_{21}^p - 1) \quad (8)$$

2 ve 3. çözüm ağı ile tahmin edilen asimptotik değer ( $\phi_{ext}^{32}$ ) de benzer şekilde hesaplanabilmektedir. Gerçekleşen hasasiyet derecesi p ile birlikte aşağıdaki hatalar hesaplanarak çözüm ağından kaynaklı hataların tahmini yapılmaktadır.

Yaklaşık göreceli hata (İng. Approximate relative error) Eş. 9'te verildiği gibi bulunur.

$$e_a^{21} = \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \quad (9)$$

Tahmini göreceli hata (İng. Extrapolated relative error) Eş. 10'da verildiği gibi bulunur.

$$e_{ext}^{21} = \left| \frac{\phi_{ext}^{21} - \phi_1}{\phi_{ext}^{21}} \right| \quad (10)$$

Grid Convergence Index (GCI) (sık çözüm ağı kullanıldığında) Eş. 11'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$GCI_{fine}^{21} = \frac{1.25 e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \quad (11)$$

GCI, eldeki sayısal metod ile çözüm ağı eleman büyüklüğü sıfıra giderken yaklaşılabilecek çözüm sonucuna olan yüzdesel uzaklığı vermektedir. Başka bir deyişle, GCI elde edilen çözüm etrafındaki hata bandı büyüklüğünü tarif etmektedir. 6 derece yana kayma açısı ile elde edilen sonuçlar ve hesaplanan GCI değerleri Tablo 3'te sunulmuştur.

**Tablo 3.** Ayırıklaştırma hatası için yapılan hesaplamalar (Calculations for discretization error)

	CX	CY	Cn
N1	3.703.000	3.703.000	3.703.000
N2	1.387.815	1.387.815	1.387.815
N3	617.447	617.447	617.447
r21	1,303	1,303	1,303
r32	1,310	1,310	1,310
$\phi_1$	-1,069 x 10-3	8,950 x 10-4	1,392 x 10-3
$\phi_2$	-1,087 x 10-3	9,809 x10-04	1,375 x 10-3
$\phi_3$	-1,233 x 10-3	1,195 x10-3	1,352 x 10-3
p	7,76	3,34	1,19
$\phi_{ext}^{21}$	-1,067 x 10-3	8,345 x 10-4	1,436 x 10-3
$e_a^{21}$	%1,6	%9,6	%1,2
$e_{ext}^{21}$	%0,25	%7,2	%3,1
$GCI_{fine}^{21}$	%0,3	%8,4	%4,0
$GCI_{fine}^{32}$	%2	%18,6	%5,5

Tablo 3 incelendiğinde eksenel kuvvet, yanal kuvvet ve yalpalama moment katsayılarının çözüm ağı sıklaştırıldıkça

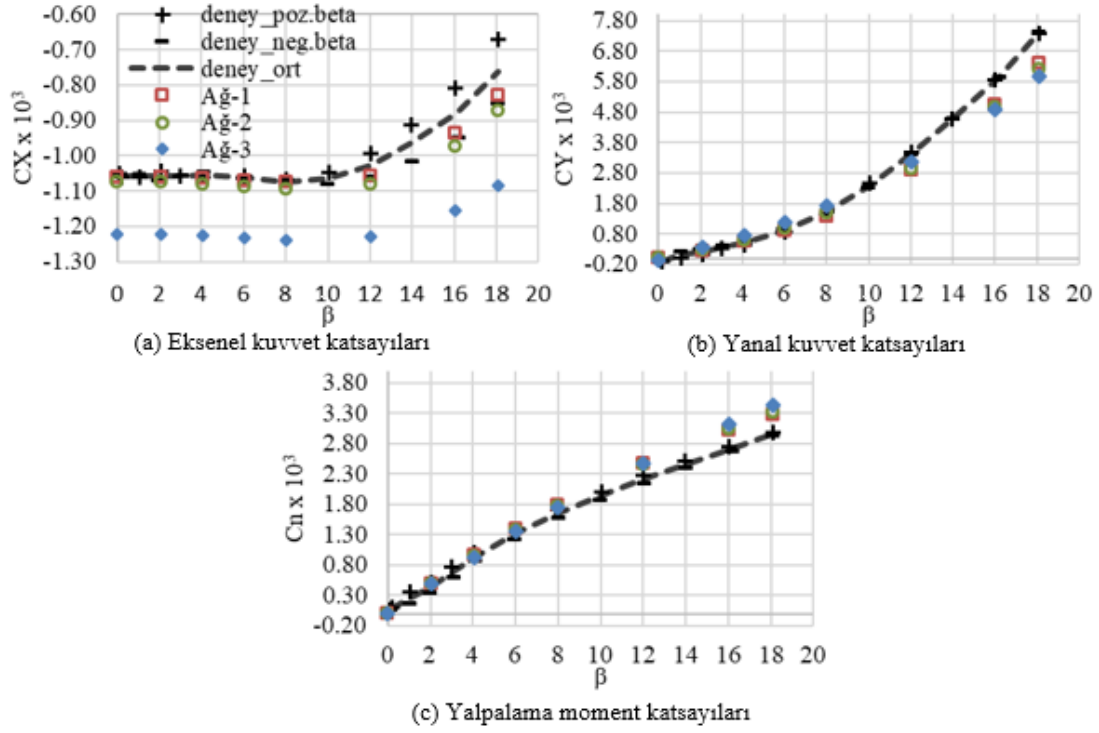
bir yönde yakınsama içinde olduğu görülmektedir. Elde edilen GCI değerlerinin 1 numaralı en sık çözüm ağı (Ağ-1) için tüm üç parametre için oldukça küçük olduğu görülmektedir. Doğal olarak 2 numaralı çözüm ağının (Ağ-2) kullanılması hata bandı tahmininde artışa sebep olmaktadır. Her üç çözüm ağı ile elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Tablo 4'te verilmiştir. 6 derece yana kayma açısı için yapılan analizlerde en sık çözüm ağı ile elde edilen parametreler deney sonuçlarına en fazla %1 hata ile yaklaşmıştır. Ağ-2 ile elde edilen katsayılar yanal kuvvet katsayısı dışında deneysel veriye oldukça yakın görülmektedir.

**Tablo 4.** Analiz sonuçlarının deneysel veri ile karşılaştırılması. (Comparison of analysis results with experimental data.)

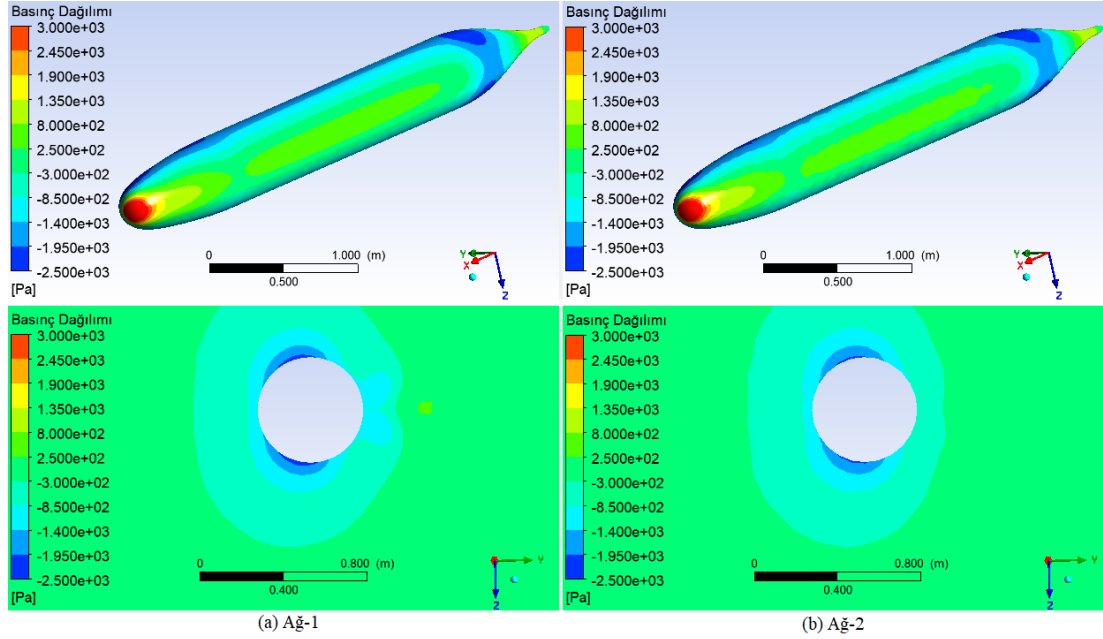
	CX	CY	Cn
Deney sonucu	-1,059 x 10 <sup>-3</sup>	8,860 x 10 <sup>-4</sup>	1,385 x 10 <sup>-3</sup>
Analiz-çözüm ağı 1	-1,069 x 10 <sup>-3</sup>	8,950 x 10 <sup>-4</sup>	1,392 x 10 <sup>-3</sup>
deney-analiz % fark	1,0	1,0	0,5
Analiz-çözüm ağı 2	-1,087 x 10 <sup>-3</sup>	9,809 x 10 <sup>-4</sup>	1,375 x 10 <sup>-3</sup>
deney-analiz % fark	2,7	10,7	0,7
Analiz-çözüm ağı 3	-1,233 x 10 <sup>-3</sup>	1,195 x 10 <sup>-3</sup>	1,352 x 10 <sup>-3</sup>
deney-analiz % fark	16,4	34,9	2,4

Ayrıca çözüm ağı büyüklüğüne bağlı olarak parametrelerin yana kayma açısı ile değişimlerini gözlemlemek amacıyla deneysel veriden 0 – 18 derece aralığından ara noktalarda da çözümlenmeler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 6'da sunulmuştur. Ağ-1 ve Ağ-2 ile elde edilen sonuçlar birbirine yakın ve küçük yana kayma açılarında deneysel veri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Yüksek yana kayma açılarında ise çözüm sonuçları negatif açılarda alınan test sonuçlarına yakındır. Ağ-3 ile elde edilen eksenel kuvvet katsayısında öteleme olduğu görülmektedir. Yanal kuvvet ve moment katsayılarında ağ sıklaştıkça deneysel veriye yaklaştığı görülmektedir. Düşük açılarda çözümlenme sonuçları deneysel veriye yakın görünmekte, açı arttıkça deneysel veri ile fark artmaktadır. Integral büyüklüklerdeki bu farklar çözüm ağının sıklığından kaynaklı akış parametrelerinin farklı hassasiyetlerde bulunması sebebiyle oluşmaktadır. Bu farklar çözümlenmelerde hız ve basınç gibi parametrelerin dağılımları incelendiğinde görülmektedir. En büyük farkın görüldüğü en yüksek yana kayma açısında elde edilen basınç dağılımları Şekil 7'de örnek olarak verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde yüzey basınç değerleri arasında küçük farklar bulunsun da en sık yüzey elemanlarına sahip Ağ-1 çözüm ağı ile dağılımında farklar olduğu görülmektedir. Çözüm hacmi incelendiğinde benzer şekilde akış parametrelerindeki değişimlerin büyük olduğu özellikle yüzey eğimlerinin fazla değiştiği kık bölgesinde farkların daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu farkları gösterimi için Şekil 7'de gövdenin bittiği ve kık bölgesinin başladığı bölgeden alınan bir kesitin basınç dağılımı verilmiştir.

Ağ-3 ile elde edilen sonuçlar Ağ-2 ile kıyaslandığında deneysel veriye olan uzaklığı sebebiyle kullanılması tavsiye edilmemektedir. Ağ-2'nin benzetimler için elde edilecek veri tabanı için yapılacak analizlerin sayısına bağlı olarak



Şekil 6. Ağ-1, Ağ-2 ve Ağ-3 için kuvvet ve moment katsayıları (Yaw moment coefficients for mesh-1, mesh-2, mesh-3)

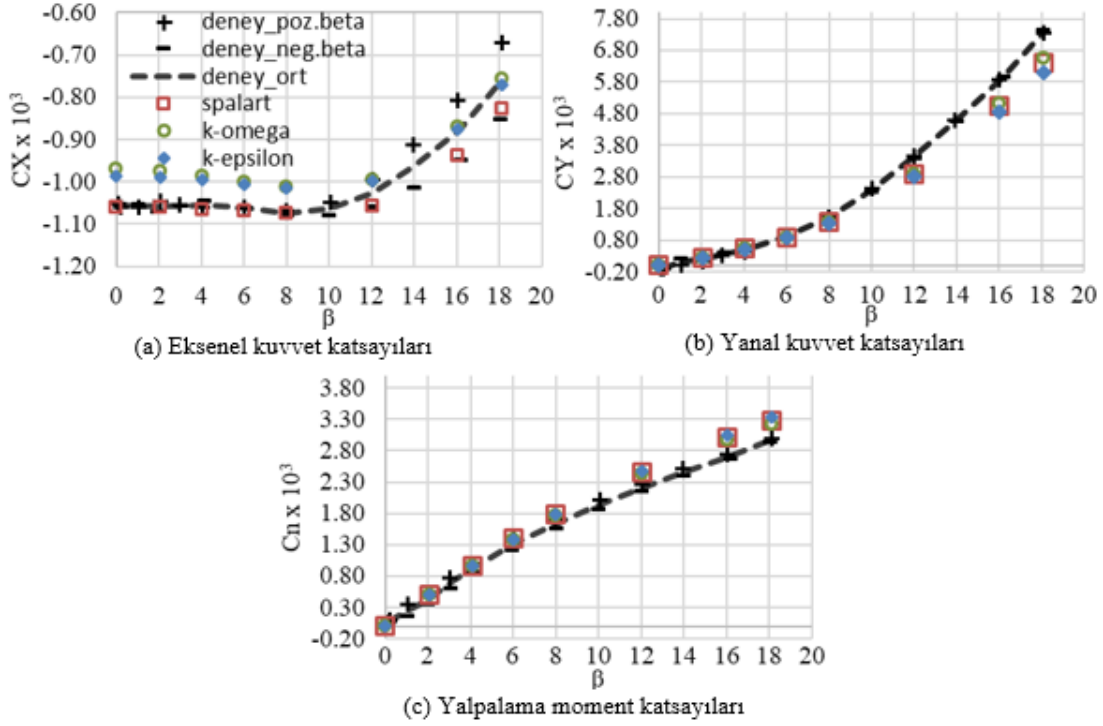


Şekil 7. 18 derece yana kayış açısında Ağ-1 ve Ağ-3 için yüzey basınç ve kış başlangıç kısmı kesit alanı basınç dağılımı (Surface pressure and section plane pressure distribution at the beginning of tail section at 18 degrees of side slip angle for mesh-1 and mesh-3)

süreden tasarruf etmek için tercih edilebilebileceği değerlendirilmektedir. Bu durumda, yanal kuvvet katsayısı için gerek deneysel veri ile arasındaki fark gerekse ayrıklaştırma hatası için tahmin edilen hata oranlarının benzetimlerde gözönüne alınması faydalı olacaktır. Bu çalışmada bir sonraki adım olan türbülans modeli seçimlerinde, en sık çözüm ağı olan Ağ-1 kullanılmıştır.

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Ağ-1 ile 0 ila 18 derece yana kayma açılarındaki yapılan analizler Reliazable k-ε modeli ve SST k-ω modeli ile tekrarlanmıştır. Elde edilen analiz sonuçları Şekil 8'de verilen grafiklerde sunulmuştur. Şekil 8'de eksenel kuvvet



**Şekil 8.** Farklı türbülans modelleri için kuvvet ve moment katsayılarının yana kayma açısı ile değişimi  
(Yaw moment coefficient wrt. drift angle for different turbulence models)

katsayı grafiği incelendiğinde küçük yana kayma açıları Spalart Almaras modelinin deneysel sonuçlarla benzer olduğu görülmektedir. Reliazable  $k-\epsilon$  modeli ve SST  $k-\omega$  modeli düşük açılarda eksenel kuvvet katsayısını daha küçük tahmin etmekte, fakat büyük açılarda Spalart Almaras modeline göre deneysel verinin ortalama değeri düşünüldüğünde daha başarılı olduğu görülmektedir. Büyük açılarda Spalart Almaras modeli negatif açılarda yapılan ölçümlere çok yakın çıkmaktadır. Düşük açılarda iki denklemli modellerin tek denklemli modele göre deneysel sonuçla arasında daha büyük fark olması bu modellerin serbest akıştaki türbülans parametrelerine olan duyarlılığını düşündürmüştür.  $k-\epsilon$  modellerinin akış ayrılmasına olan duyarlılığı ve  $k-\omega$  modellerinin serbest akış türbülans kinetik enerji ( $k$ ) ve özgül yayılım oranı ( $\omega$ ) parametrelerine göreceli daha güçlü duyarlılığı olduğu bilinmektedir [25]. Türbülans modelleri içerisindeki farklı deneysel verilere göre kalibre edilmiş türbülans parametreleri ile serbest akış türbülans parametrelerinin deneysel veri ile ölçülmüş değerleri çözümlenelerde kullanılarak modellerin daha başarılı sonuçlar vermesi sağlanabilmektedir. Fakat eldeki deneysel çalışmada bu parametrelere ait herhangi bir ölçüm bulunmadığından sonuçlara etkisi incelenememiştir.

Şekil 8'de verilen yanal kuvvet ve yalpalama moment katsayılarında tüm modeller özellikle küçük açılarda birbirine yakın sonuç vermiştir. Açılı arttıkça modeller arasında küçük farklar görülmüştür. En yakın sonucu SST  $k-\omega$  modeli verirken, 8 derece yana kayma açısından sonra tüm modeller ile deneysel sonuçlar arasında ortalama %10 civarında fark bulunmaktadır.

Tüm türbülans modelleri 0 ila 18 derece yana kayma açıları sergiledikleri başarıya gözönüne alındığında Spalart Almaras modelinin göreceli daha basit ve ekonomik model olması da gözönüne alınarak DARPA SUBOFF geometrisi manevra benzetimlerinde kullanılacak hidro dinamik katsayı veri tabanı hesaplamasında kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Spalart Almaras türbülans modeli düşük yana kayma açıları daha yüksek eksenel kuvvet tahmininde bulunduğu manevra benzetimlerinde menzil değeri için daha korunumlu sonuç verecektir. Tüm türbülans modellerinin yanal kuvvet ve moment katsayılarında benzer sonuç vermesi sebebiyle manevra davranışlarında önemli fark yaratmayacağı değerlendirilmektedir. Kullanılan hidro dinamik veri tabanı ile manevra benzetimlerinin yapılmasının ardından katsayılara uygulanacak belirsizlikler ile benzetimlerin tekrar edilerek katsayılara olan duyarlılıklarının belirlenmesi faydalı olacaktır. Bunun yanı sıra benzetimler ile daha yüksek açılarda hidro dinamik katsayıların belirlenmesi ihtiyacı değerlendirilmelidir. Manevra benzetimlerinde daha yüksek açılarda veriye ihtiyaç duyulması durumunda Spalart Almaras ve SST  $k-\omega$  modelinin en yüksek açı limiti için çözüm sonuçları karşılaştırılmasının yapılması tavsiye edilmektedir. Katsayılar arasındaki farkın yüksek olması durumunda SST  $k-\omega$  modelinin yüksek açılar için kullanılması değerlendirilmelidir. Dinamik analizlerde ihtiyaç duyulacak akış koşulları bu çalışmada yapılan koşullarına benzerlik göstermesi durumunda tavsiye edilen çözüm açıları ve türbülans modelinin kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Akış koşullarındaki farklılıklar laminar-türbülans geçiş noktasının farklı bir noktaya

kaymasına sebep olabileceğinden akış fiziğinde farklılıklar yaratabilecektir. Bu sebeple, makalede çalışılan koşullardan çok farklı akış koşulları için özellikle türbülans modellerinin test edilmesi faydalı olacaktır.

## 6. SİMGELER (SYMBOLS)

$\beta$	: Yana kayma açısı
$C_n$	: Yalpalama moment katsayısı
$C_X$	: Eksenel kuvvet katsayısı
$C_Y$	: Yanal kuvvet katsayısı
$D_{max}$	: En büyük gövde çapı
$\Delta V_i$	: Çözüm ağı eleman hacmi
$\varepsilon$	: İki çözüm ağı ile elde edilen ilgili parametre değerlerinin farkı
$\emptyset$	: Çözümleme sonucu ile elde edilen ilgili parametrenin değeri
FB	: Yüzerlik merkezi
FX	: Eksenel kuvvet
FY	: Yanal kuvvet
FZ	: Normal kuvvet
h	: Genel eleman büyüklüğü
$L_{oa}$	: Toplam boy
$L_{pp}$	: Referans uzunluk
$M_x$	: Yuvarlanma momenti
$M_y$	: Yunuslama momenti
$M_z$	: Yalpalama momenti
N	: Çözüm ağı elaman sayısı
r	: Çözüm ağı küçültme oranı
Re	: Reynolds sayısı
$\rho$	: Ortam yoğunluğu
p	: Çözümlemede gerçekleşen hassasiyet derecesi
V	: Hız büyüklüğü

## 7. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, DARPA SUBOFF geometrisi ile manevra benzetimlerinde kullanılmak üzere elde edilecek hidrodinamik katsayı veri tabanı analizleri için uygun çözüm ağı ve türbülans modeli seçimleri için yapılan analizler sunulmuş ve deneysel veri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Richardson Extrapolation metoduna dayalı GCI yönteminin uygulaması yapılarak kullanılacak çözüm ağına bağlı ayrıklaştırma hata tahmini gerçekleştirilmiştir. Her üç çözüm ağı ile Spalart Almaras türbülans modeli kullanılarak 0 ila 18 derece yana kayma aralığında çözümler yapılmıştır. Sonuçların deneysel veri ile karşılaştırması yapılarak, en fazla elemana sahip Ağ-1 ve orta seviye çözüm ağına sahip Ağ-2'nin çalışmadan beklenen doğruluk seviyesine göre kullanılabilirliği değerlendirilmiş ve en az çözüm ağı elemanına sahip Ağ-3'ün kullanılması uygun bulunmamıştır.

En fazla elemana sahip Ağ-1 ile iki-denklemlilik Reliazable  $k-\varepsilon$  modeli ve SST  $k-\omega$  modelleri kullanılarak analizler tekrar edilmiştir. Çalışmada ele alınan katsayılar ve açı aralığı düşünüldüğünde Spalart Almaras modelinin kullanılabilirliği değerlendirilmektedir. Spalart Almaras modelinin daha basit olması sebebiyle çözüm süresinden de tasarruf edilecektir. Fakat daha yüksek yana kayma açılarında

ihtiyaç duyulması durumunda Spalart Almaras ve SST  $k-\omega$  modelinin en yüksek açı limiti için çözüm sonuçları karşılaştırılması ve farkın büyük olması durumunda SST  $k-\omega$  modelinin yüksek açılar için kullanılması düşünülmelidir.

Bu çalışmada, daha önce de belirtildiği üzere, DARPA SUBOFF için uygun çözüm ağı ve türbülans modeli ile statik sürüklenme test simülasyonları gerçekleştirilerek belirlenmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda aynı teknenin hidrodinamik katsayıları; yan öteleme, savrulma gibi hareketlerin de sayısal olarak modellenmesiyle belirlenecektir. Çözüm ağı ve türbülans modeli seçimleri için yapılan değerlendirmeler DTRC/SHD tarafından yapılan sürüklenme test sonuçları ile desteklendiğinden bu analizler benzer akış koşulları için benzer şekilde kullanılabilir. Ayrıca, dinamik katsayıların bulunması amacıyla ileride yapılacak sayısal analizlerde de bu çalışma sonuçları yol gösterici nitelikte olacağından zamandan tasarruf edilmesini sağlayacaktır. Elde edilen hidrodinamik katsayılar 6 serbestlik dereceli olarak geliştirilen matematiksel modele girildiğinde DARPA SUBOFF su altı aracının manevra kabiliyetleri belirlenmiş olacaktır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Jeans T.L., Watt G.D., Gerber A.G., Holloway A.G.L., and Baker C.R., High Resolution Reynolds Averaged Navier Stokes Flow Prediction Over Axisymmetric Bodies with Tapered Tails, AIAA Journal, 47 (1), 19-32, January 2009.
2. Liu H.L., and Huang T.T.H., Summary of DARPA Suboff Experimental Program Data, Naval Surface Warfare Center, Carderock Division, Report Number: CRDKNSWC/HD-1298-11, 1998.
3. Groves N.C., Huang T.T., and Chang M., Geometric Characteristics of DARPA Models (DTRC Model nos. 5470 and 5471), DTRC/SHD-1298-01, March 1989.
4. Huang T.T.H., Liu H.L., and Groves N.C., Experiments of DARPA SUBOFF Program, DTRC/SHD-1298-02, December 1989.
5. Roddy R.F., Investigation of Stability and Control Characteristics of Several Configurations of the DARPA SUBOFF Model (DTRC 5470) from Captive-Model Experiments, DTRC/SHD-1298-08, September 1990.
6. Huang T., Liu H.-L., Groves N., Forlini T.J., Blanton J.N., and Gowing S., Measurements of Flows Over an Axisymmetric Body with Various Appendages in a Wind Tunnel: The DARPA SUBOFF Experimental Program, Proceedings 19th Symposium on Naval Hydrodynamics, National Academy Press, Washington D.C., 321-346, 1994.
7. Lin Y.H., Tseng S.H., and Chen Y.H., The Experimental Study on Maneuvering Derivatives of a Submerged Body SUBOFF by Implementing the Planar Motion Mechanism Tests, Ocean Engineering, 170, 120-135, December 2018.
8. Shadlaghani A., and Mansoorzadeh S., Calculation of Linear Damping Coefficients by Numerical Simulation of Steady State Experiments, Journal of Applied Fluid Mechanics, 9 (2), 653-660, 2016.

9. Sung C.H., Griffin M.J., Tsai J.F., and Huang T.T., Incompressible Flow Computation of Forces and Moments on Bodies of Revolution at Incidence, AIAA 93-0787, 31st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, January 11-14, 1993.
10. Jonnalagadda R., Taylor L., and Whitfield D., Multiblock Multigrid Incompressible RANS Computation of Forces and Moments on Appended SUBOFF Configurations at Incidence, AIAA-97-0624, 35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, January 6-9, 1997
11. Yang C., and Löhner R., Prediction of Flows over an Axisymmetric Body with Appendages, 8th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Busan, Korea, September 22-25, 2003.
12. Toxopeus S., Atsavapranee P., Wolf E., Daum S., Pattenden R., Widjaja R., Zhang J.T., and Gerber A., Collaborative CFD Exercise for Submarine in a Steady Turn, Proceedings of the ASME 2012, 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rio de Janeiro, Brazil July 1-6, 2012.
13. Sezen S., Dogrul A., and Bal S., Investigation of Self-Propulsion of DARPA SUBOFF by RANS Method, Ocean Engineering, 150, 258-271, 2018.
14. Özden Y.A., and Çelik F., Numerical Investigation of the Effects of Underwater Aft Cone Angle and Length-to-Beam Ratio on Hull Efficiency, GMO Journal of Ship and Marine Technology, 208, 72-88, June 2017.
15. Feng D., Wang X., Jiang F., and Zhang Z., Large Eddy Simulation of DARPA SUBOFF for  $Re = 2.65 \times 10^7$ , Journal of Coastal Research, 73, 687-691, 2015.
16. Posa, A., and Balaras, E., A numerical Investigation of the Wake of an Axisymmetric Body with Appendages, J. Fluid Mech. 792, 470–498, 2016.
17. Jiménez J. M., Reynolds R. T., and Smits A. J., The Effects of Fins on the Intermediate Wake of a Submarine Model, Journal of Fluids Engineering, 132 (3), 031102, 7, 2010.
18. Shen, Z., Wan, D., and Carrica, P.M., Dynamic Overset Grids in OpenFOAM with Application to KCS Self-Propulsion and Maneuvering, Ocean. Eng., 108, 287–306, 2015.
19. Ohashi, K., Kobayashi, H., and Hino, T., Numerical Simulation of the Free-Running of a Ship using the Propeller Model and Dynamic Overset Grid Method, Ship Technol. Res., 1–10, 2018.
20. Sukas, O. F., Kinaci, O., K., and Bal, S., Theoretical Background and Application of MANSIM for Ship Maneuvering Simulations, Ocean Engineering, 192, 106239, 2019.
21. Bettel, M., Unsteady Computational Fluid Dynamics Simulations of Six Degrees-of-Freedom Submarine Manoeuvres, (PhD Degree), University of New Brunswick, 2013.
22. Coe, R.G., Improved Underwater Vehicle Control and Maneuvering Analysis with Computational Fluid Dynamics Simulations. (PhD), Virginia Tech., 2013.
23. Sukas, O. F., Kinaci, O., K., and Bal, S., System-based Prediction of Maneuvering Performance of Twin-Propeller and Twin-Rudder Ship using a Modular Mathematical Model, Applied Ocean Research, 84, 145-162, 2019.
24. Kim, H., Ranmuthugula, D., Leong, Z.Q., and Chin, C., Six-DOF Simulations of an Underwater Vehicle Undergoing Straight Line and Steady Turning Manoeuvres, Ocean Engineering, 150, 102-112, 2018.
25. ANSYS Fluent User's Guide, ANSYS, Inc., Release 2020 R1, January 2020.
26. ANSYS Fluent Theory Guide, ANSYS, Inc., Release 2020 R1, January 2020.
27. Ponkratov, D., Zegos, C., Validation of Ship Scale CFD Self-Propulsion Simulation by the Direct Comparison with Sea Trials Results, The Fourth International Symposium on Marine Propulsors, Austin, Texas, USA, 2015.
28. Tu, J., Yeoh, G. H., and Liu, C., Computational Fluid Dynamics – A Practical Approach, Elsevier Ltd., A.B.D., 2018.
29. Spalart P., and Allmaras S., A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows, Technical Report, AIAA-92-0439, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992.
30. Launder B. E., and Spalding D. B., The Numerical Computation of Turbulent Flow, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3, 269–289, 1974.
31. Celik I. B., Ghia U., Roache, P. J., Freitas C.J., Coleman H. W., and Raad P.E., Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Application, Journal of Fluids Engineering, 130 (7), 078001, 2008.