

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DARPA SUBOFF DENİZALTI MODELİ İLE BU MODELDEN YENİ
TÜRETİLEN FORMLARIN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ
(HAD) İLE SAYISAL DİRENÇ HESABI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gökhan BUDAK

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Programı

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DARPA SUBOFF DENİZALTI MODELİ İLE BU MODELDEN YENİ
TÜRETİLEN FORMLARIN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ
(HAD) İLE SAYISAL DİRENÇ HESABI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Gökhan BUDAK
(508131101)**

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Serdar BEJİ

MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 508131101 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Gökhan BUDAK**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**DARPA SUBOFF DENİZALTI MODELİ İLE BU MODELDEN YENİ TÜRETİLEN FORMLARIN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) İLE SAYISAL DİRENÇ HESABI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Serdar BEJİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Abdi KÜKNER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

.....
Prof. Dr. Ahmet ERGİN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **25 Mayıs 2015**

Babama,

ÖNSÖZ

Tez süresince hiçbir zaman ilgisini esirgemeyen ve bilgisiyle çalışmama ışık tutan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Serdar Beji'ye, sormuş olduğum sorulara net bir şekilde cevaplar veren Arş. Gör. Cumhuriyet İncekara, Arş. Gör. Gürbüz Bilici, Arş. Gör. Ali Doğrul ve Arş. Gör. Mustafa Kemal Özalp'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmam boyunca her zaman destek olan Arş. Gör. Gökrem Benek, Arş. Gör. A. Gültekin Avcı, Arş. Gör. Onur Usta ve Arş. Gör. Turgay Köroğlu'na, en önemlisi de beni destekleyen hayat arkadaşım Merve İnan Budak'a teşekkür ederim.

Mayıs 2015

Gökhan BUDAK
(Araştırma Görevlisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
SEMBOLLER.....	xi
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	2
1.2 Sayısal Direnç Hesabı Ön Çalışması.....	3
2. DENİZALTI FORMLARININ BELİRLENMESİ.....	7
2.1 Darpa Suboff Model	7
2.2 Yeni Türetilen Formlar.....	9
2.3 Kontrol Hacmi ve Ağ Örgüsünün Oluşturulması.....	16
2.4 Ağ Örgüsü Analizi.....	19
3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ VE DİRENÇ HESABI	23
3.1 Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$ Türbülans Modeli	24
3.2 Darpa Suboff Denizaltı Modelinin Direnç Hesabı	24
3.3 Yeni Türetilen Formların Direnç Hesabı.....	28
3.4 Darpa Suboff Deney Sonuçları ile Sayısal Hesaplamaların Kıyaslanması	30
3.5 Yeni Türetilen Formlar ile Darpa Suboff Modelin Kıyaslanması.....	31
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	37
KAYNAKLAR	39
ÖZGEÇMİŞ.....	41

SEMBOLLER

L	: Araç boyu
V	: Hız
ρ	: Yoğunluk
S	: Islak alan
R	: Çap
$R_{maksimum}$	: Maksimum çap
r_h	: Boyutsuz denklem katsayısı
ξ	: Boyutsuz denklem katsayısı
K_0	: Boyutsuz denklem katsayısı
K_1	: Boyutsuz denklem katsayısı
Δy	: Sınır tabaka ilk kalınlığı
ν	: Kinematik viskozite
μ	: Dinamik viskozite
Re	: Reynolds sayısı
y^+	: Sınır tabakada duvara en yakın hücrenin merkezinin duvara olan uzaklığı

KISALTMALAR

HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CFD	: Computational Fluid Dynamics
2D	: Two-Dimensional
LES	: Large-Eddy Simulation
ITTC	: International Towing Tank Conference
SST	: Shear Stress Transport

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	: Darpa Suboff model numarası 5470 olan tekne formuna ait direnç değerleri.....	9
Çizelge 2.2	: Ağ örgüsüne bağlı direnç değerleri	20
Çizelge 3.1	: Darpa Suboff modele ait direnç değerleri.	28
Çizelge 3.2	: Form 11'e ait direnç değerleri	28
Çizelge 3.3	: Form 12'e ait direnç değerleri	28
Çizelge 3.4	: Form 13'e ait direnç değerleri	29
Çizelge 3.5	: Form 21'e ait direnç değerleri	29
Çizelge 3.6	: Form 22'e ait direnç değerleri	29
Çizelge 3.7	: Form 23'e ait direnç değerleri	29
Çizelge 3.8	: Form 31'e ait direnç değerleri	29
Çizelge 3.9	: Form 32'e ait direnç değerleri	30
Çizelge 3.10	: Form 33'e ait direnç değerleri	30
Çizelge 3.11	: Darpa Suboff modele ait deney direnç değerleri.....	30

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	: Düz levha için kontrol hacmi.....	3
Şekil 1.2	: Gambit'te yapılan ağ örgüsü.	4
Şekil 1.3	: İterasyon sayısı boyunca değerlerin yakınsaması.	5
Şekil 2.1	: Rhinoceros 5.0'da çizilmiş Darpa Suboff denizaltı modeli.	8
Şekil 2.2	: Rhinoceros 5.0'da çizilmiş yeni türetilen modellerin baş ve kık formları	10
Şekil 2.3	: Kontrol hacmi.	16
Şekil 2.4	: y^+ değerinin fiziksel gösterimi.....	17
Şekil 2.5	: Kontrol hacmi ağ örgüsü ...	18
Şekil 2.6	: Form üzerinde ve etrafındaki ağ örgüsü.....	18
Şekil 2.7	: Ağ örgüsünün ANSYS Workbench kesit görüntüsü ...	19
Şekil 2.8	: Ağ örgüsü akış diyagramı ...	20
Şekil 2.9	: y^+ değerinin model boyunca değişimi ...	21
Şekil 3.1	: Fluent yazılım programı arayüzü ...	23
Şekil 3.2	: Akış modelinin seçilmesi ...	25
Şekil 3.3	: Akışkana ait veriler ...	25
Şekil 3.4	: Başlangıç koşulları. ...	26
Şekil 3.5	: Akışkan hızının girilmesi ...	26
Şekil 3.6	: Akışkanın kontrol hacmine giriş yönü ...	27
Şekil 3.7	: Yakınsamanın gösterilmesi ...	27
Şekil 3.8	: Darpa Suboff modele ait hız-direnç grafiği.....	31
Şekil 3.9	: Rhinoceros 5.0'da çizilmiş denizaltı formu Form 13.....	32
Şekil 3.10	: Değişen hız değerlerine karşılık gelen boyutsuz direnç katsayıları... ..	33
Şekil 3.11	: 5.14 m/s hız değerindeki Darpa Suboff modelin statik basınç dağılımı	34
Şekil 3.12	: 5.14 m/s hız değerindeki Form 13'ün statik basınç dağılımı....	34
Şekil 3.13	: 5.14 m/s hız değerindeki Darpa Suboff modelin hız vektörleri ...	35
Şekil 3.14	: 5.14 m/s hız değerindeki Form 13'e ait hız vektörleri	36

DARPA SUBOFF DENİZALTI MODELİ İLE BU MODELDEN YENİ TÜRETİLEN FORMLARIN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) İLE SAYISAL DİRENÇ HESABI

ÖZET

Son zamanlarda tamamen olmasa da araştırmacıların büyük bir çoğunluğunun deneysel çalışmak yerine bilgisayar yazılımları kullanması teknolojinin gelişmesiyle beraber artan talebi karşılayabilmek açısından bu yazılımların gelişimini de beraberinde getirmiştir. Bilgisayar yazılımlarının bu derece geliştirilmesi akademik çalışmalarda bulunan kişilerin daha kısa sürede mevcut sorunlara dair bilgi sahibi olmaları açısından faydalı olmuştur. Yapılan araştırmalarda özellikle bilgisayar yazılımları sayesinde elde edilen verileri önceden deneyleri yapılarak elde edilmiş verilerle kıyaslama yapmak suretiyle doğruluğunu test etmek ve güvenilir sonuçlara ulaşılabilindiğini görmek daha fazla araştırmacının bilgisayar yazılımlarını kullanmasına neden olmuştur.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılım programları sayesinde araştırmacılar özellikle tasarım aşamasında önemli bilgiler edinebilmektedir. Bu bilgiler ışığında tasarlanması planlanan araçlar için göreceli olarak bir fikir sahibi olunmaktadır. Özellikle gemi ön tasarım aşamasında ilk metot olarak tasarlanan gemilere benzer formda olan ve önceden üretilmiş gemilerin bilgilerinden yola çıkarak bilgi edinilmektedir. Bu bilgiler tasarım aşamasında detaylı bilgiler edinilmesini sağlasa da performans periyotlarında detaylı bilgiler edinilmesini sağlamamaktadır. İkinci metot ise model deneyleri yapılmış ve deney sonuçları bilinen formlardan faydalanmaktır. Model deneyleri yapılmış olan formlar çok daha güvenilir ve doğru sonuçlara ulaşabilmek için oldukça önem arz etmektedir. Ancak her zaman deney düzeneği kurabilmek ve karar verebilmek için çok fazla zamanın bulunmadığı durumlar olabilmektedir. İşte bu durumlarda bilgisayar yazılımları kullanmak hem gereksiz maliyetleri engelleyecek hem de sayısal olarak tam ve doğru bir sonuç olmasa da göreceli olarak bilgi sahibi olunmasını sağlayacaktır. Gereksiz maliyetler denmesinin nedeni tasarım aşamasında özellikle de birden fazla seçeneğin test edileceği durumlarda deney araç gereçleri ve deney düzeneğinin kurulması gibi masrafların oluşabilmesidir.

Bu çalışmanın başlığı “Darpa Suboff Denizaltı Modeli ile Bu Modelden Türetilen Formların Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile Sayısal Direnç Hesabı” olup, direnç açısından mümkün olduğunca iyi bir denizaltı formuna ulaşmak hedeflenmiştir. Özellikle belirtilmelidir ki amaçlanan denizaltı formunda yelken, takıntı ve pervane olmaksızın yalın gövde üzerinde çalışılmış ve bu doğrultuda bulunan sonuçlar birbiri içinde kıyaslanmıştır. Başlangıçta da belirtildiği üzere kullanılan bilgisayar programından elde edilen sonuçların doğruluğunu teyit edebilmek için önceden model deneyi yapılarak elde edilmiş direnç değerleriyle, bilgisayar yazılımı kullanılarak elde edilen sonuçların kıyaslanması ve ardından mevcut form üzerinde küçük değişiklikler yapılarak, optimum nitelenebilecek bir form oluşturulabilme yaklaşımı izlenmiştir. Bu sebeple literatürde Darpa Suboff ismiyle bilinen denizaltı formuna ait denklemler kullanılarak belirlenen denizaltı formu, Rhinoceros bilgisayar yazılımı yardımıyla üç

boyutlu olarak çizilmiştir. Çizilen yalın gövde için direnç analizi yapılabilmesi ve bu analiz neticesinde elde edilen direnç değerleriyle deney verilerinin kıyaslanabilmesi çalışmamızda diğer denizaltı formlarına referans olacağından, hesaplamalardaki hata oranı belirlenmiştir. Hesaplanan bu hata oranlarının makul bir aralıkta çıkmasının ardından kıyaslanması hedeflenen denizaltı formları çizilmiştir. Bu formlar oluşturulurken, mevcut referans form olarak belirlenen Darpa Suboff denizaltı modeli üzerinde baş ve kık formlarında küçük değişiklikler yapma yoluna gidilmiştir. Oluşturulan tüm değişik baş formları tüm değişik kık formları ile ayrı ayrı birlikte kullanılarak çok sayıda birbirinden farklı denizaltı formları oluşturulmuş ve bu formların herbiri için HAD yazılım programı olan ANSYS-Fluent yazılım programları kullanılarak direnç değerleri sayısal olarak hesaplanmıştır. Referans forma ait deney sonuçları içerisinde farklı hızlardaki direnç değerleri mevcut olduğundan çalışmamızda belirlediğimiz üç farklı hız için direnç değerleri elde edilmiş ve birbiri ile kıyaslanarak baş ve kık formu için direnç açısından en uygun tasarımın belirlenmesine çalışılmıştır.

NUMERICAL RESISTANCE CALCULATION OF DARPA SUBOFF SUBMARINE AND NEW SUBMARINE MODELS BY USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

SUMMARY

Lately, most researchers prefer using computer softwares instead of doing experiments of models. For this reason, software technology has been increasingly improving and researchers use these softwares to make necessary calculations about their work models. In other words, the more the use of software becomes popular, the more the technology advances. These advanced softwares are useful for academic researches particularly due to relatively longer time required for model experiments. Numerical modeling on the other hand enables researchers to make faster decisions. Moreover, experiment tools and equipment can be both expensive and require longer labour. Researchers know that the model experiments are more accurate and more reliable than other methods. However, using software is more practical than doing model experiment at the preliminary study stage.

The resistance is the force that arises due to the motion of an object inside a fluid. Calculation of the resistance is probably the most significant parameter in the long process of designing a submarine. Therefore, obtaining an optimal form in terms of the resistance characteristics is an important stage.

Designers use several methods to calculate the resistance force. These methods consist of three main approaches: first, use of data from previously designed similar forms, second use of results from model experiments, and finally use of numerical techniques via available softwares. The method of using data from previously designed similar forms has the disadvantage of obtaining accurate results for the exact form in hand. Despite of the fact that the experimental model tests give the most reliable resistance values, the designers tend to use softwares because of the relatively higher expense and duration of conducting experiments.

Fast numerical solutions by the use of softwares provide a convenient way of analyzing the resistance characteristics of different types of submarine forms. For this reason, an optimum submarine form in terms of resistance characteristics may be obtained by repeatedly using a software for different forms. After calculating the resistance values of a generic submarine form, by introducing relatively minor changes to the shape, an optimum submarine form with least possible resistance could be achieved. The resistance characteristics of a vessel is particularly important as it determines the fuel consumption characteristics of the vessel for its entire life of service. Therefore, a fuel-efficient optimum hull form is a quite essential problem to solve.

For practical purposes then employing a software to calculate the resistive force of a submarine is an acceptable approach. Thanks to Computational Fluid Dynamics (CFD) methods, researchers can obtain important relatively reliable information about their model at the design stage. Thus, virtually unlimited data may be obtained for models

without resorting to costly and time consuming model experiments. Therefore, CFD methods are most preferred by designers.

Studies are usually conducted by first performing tests for the numerical results. For a form with known experimental data the numerical computations are done and compared with experimental values to determine the reliability of the numerical results and to fix the adjustable parameters, if needed. Following such tests the calibrated numerical model may be run for other forms.

As the title of this work implies the subject matter of this thesis is to obtain an optimum submarine hull form in terms of resistance characteristics by introducing slight variations to a given generic submarine form, preferably built before. It must be emphasised that the form of the intended submarine has no rudder, appendances, and propeller. It consists of an entirely bare hull form.

In the first chapter, information about the previous studies first is given. The experimental resistance results of the Darpa Suboff model, which is the selected generic model in this work, are then compared with the numerical calculations. The comparisons indicate around 10% of differences between the two approaches. However, such differences are both inevitable and acceptable for the purposes of comparing different forms. Although the absolute results do contain some errors these errors are approximately the same for all the forms tried therefore a comparatively better hull form may be selected by comparing the resistance values of these different forms used. This simple approach is basically the method followed in this work.

In the second chapter, Darpa Suboff model form is generated from the equations given in the previous studies with the help of Rhinoceros modeling software. The hull form is divided into four parts due to its axisymmetric form. After this division, new forms are generated by introducing slight variations to the bow and the stern patterns of the selected Darpa Suboff model.

Basically, three different bow forms and three different stern forms have been generated. These different bow and stern patterns are combined with each other so that a total of 9 new submarine forms are created. After generating the new forms, the control volumes are drawn for all of them. The control volumes are then imported into ANSYS Workbench software. Then, the mesh generation is carried out by the use of ANSYS Workbench software.

In the third chapter, the control volumes with generated mesh systems are imported to the ANSYS-Fluent software. SST $k-\omega$ turbulence model is chosen in order to model the turbulence in the flow. SST $k-\omega$ turbulence model is based on $k-\epsilon$ and $k-\omega$ turbulence models. This selection means that the turbulence model acts as $k-\omega$ model near wall regions and $k-\epsilon$ model faraway the wall regions.

The flow speeds are set as 5.14 m/s, 6.10 m/s and 7.16 m/s as taken from the published experimental data for making comparisons of different cruise velocities. Momentum, turbulent kinetic energy and specific dissipation rate are calculated by using second order upwind scheme. After these steps, the resistance of Darpa Suboff model has been calculated by Ansys-Fluent. Results of calculations are given in tables and graphs are drawn. Then CFD results are compared with the published experimental measurements of the Darpa Suboff model. For the velocity 5.14 m/s, the difference is about 8%, for velocities 6.10 and 7.16, the difference is slightly higher and about 9%. These differences are deemed to be within acceptable limits. Afterwards, using the same cruise speeds of 5.14 m/s, 6.10 m/s and 7.16 m/s, the resistance values for the newly

created submarine forms are calculated again by using the same CFD programme with previously set parameter values. The obtained resistance coefficients are shown in the graphs.

In the fourth chapter, all the resistance values of the newly generated and generic submarine forms have been compared. According to these comparisons made based on the numerical calculations, it is observed that the “Form 13” is the best among all. It is inferred that if the model experiments are to be done for all the generated forms, the “Form 13” is expected to perform best hence give the optimum form sought in this study.

1. GİRİŞ

Bir araç tasarımı yapılmak istendiğinde ilk olarak ön tasarım hesaplamaları yapılmaktadır. Tasarım hesaplamaları, ayrıntılar gözetilmeksizin çoğu kez kısa süre içinde öngörülerin de yardımıyla elde edilen hesaplamalardan oluşmaktadır denebilir. Ön tasarım hesaplamalarının en önemli işlevi tasarıma yanlış noktadan başlanmasını engellemektir. Öyle ki en başta yapılan hatalar zincirleme olarak ileriki aşamalarda diğer hataları da beraberinde getirecektir. Tasarımın ileri aşamalarındaki kararları verebilmek için başlangıçta sağlam temeller üzerine oturan ön hesaplamalara gerek duyulmaktadır.

Bir deniz aracı tasarımında formu oluşturmak önemli konulardan biridir. Formun şekline karar verebilmek için bir takım verilere ihtiyaç duyulur. Bir form oluşturmaının ilk aşaması genellikle önceden yapılmış ve tasarlanacak olan forma benzerliği olan formlardan faydalanmaktır. Bu durum tasarım aşamasında yeterli olsa da performans aşamasında yeterli bilgi sağlayamamaktadır. İkinci aşamada ise model deneyleri yapılmış ve deney sonuçları verilmiş formlara ait sonuçlar ve bazı sayısal yaklaşımlardan faydalanılır (Navier-Stokes denklemleri, sayısal integral yaklaşımı gibi.) [1]. Ancak bu durum özgün formların oluşturulmasına pek olanak vermemektedir. Öte yandan model deneyleri yardımıyla yeni bir form geliştirilmek istendiğinde tasarlanan formun modelinin oluşturulması ve model deneylerinin yapılması gerekliliği hem karar verme sürecini uzatmakta hem de maliyetleri yükseltmektedir. Bu nedenlerle, geliştirilen bilgisayar programları ön tasarım aşamasında deney düzenekleri kurulmasına gerek kalınmaksızın tasarımcılara, geliştirilmek istenen tasarımın karakteristikleri konusunda fikir verebilmektedir. Her ne kadar deney sonuçlarıyla bütünüyle örtüşmese de tasarım aşamasında nispeten güvenilir ön bilgiler edinebilmek açısından oldukça yararlıdır. Bu bağlamda, Computational Fluid Dynamics (CFD) yazılımları ön tasarım problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır [2].

Daha önce yapılan çalışmalarda, Mohammed ve diğerleri 2013'te yayımlanan makalelerinde direnç değerleri bilinen bir denizaltıyı referans alarak farklı yöntemlerle

elde edilen direnç değerlerini, deneylerden bulunan direnç değerleri ile kıyaslamışlardır. Kullanılan yöntemlerden birisi de CFD yöntemidir ki bu yöntemle yaklaşık %10 hatalı sonuçlar elde edilmiştir [3]. Gross ve diğerleri 2011 yılında yaptıkları çalışmada Darpa Suboff denizaltı modelinin farklı hücum açılarındaki deney direnç sonuçları ile yazılım programı kullanarak elde ettikleri sonuçları kıyaslamışlardır [4]. Nathan 2012 yılında yazmış olduğu tezinde Darpa Suboff model numarası 5470 olan denizaltı formunun yazılım programı kullanarak çeşitli hızlardaki direncini hesaplamıştır [5]. Feng ve diğerlerinin 2015'te yayımlanan çalışmalarında yüksek Reynolds sayısında Darpa Suboff denizaltı modelinin direnç değerini LES (Large-Eddy Simulation) modelini kullanarak hesaplamaya çalışmışlar ve deney sonuçlarıyla kıyaslamışlardır [6].

“Darpa Suboff Denizaltı Modeli ile Bu Modelden Türetilen Formların Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile Sayısal Direnç Hesabı” başlıklı bu çalışmada, teknolojinin gelişmesiyle beraber geliştirilen bilgisayar yazılımları kullanılarak, akışkan kaynaklı direnç değerlerini en düşük seviyeye indirebilmek için referans seçilen takıntısız bir denizaltı modelinin baş ve kık formlarını değiştirerek diğerlerine kıyasla en düşük direnç değerine sahip formun belirlenmesi hedeflenmektedir. Elde edilecek formun, sevk ve hidrodinamik açısından en uygun form olup olmayacağı konusunda çalışmayı karmaşıktırmama açısından zorunlu olarak göz önüne alınmamaktadır.

1.1 Tezin Kapsamı ve Amacı

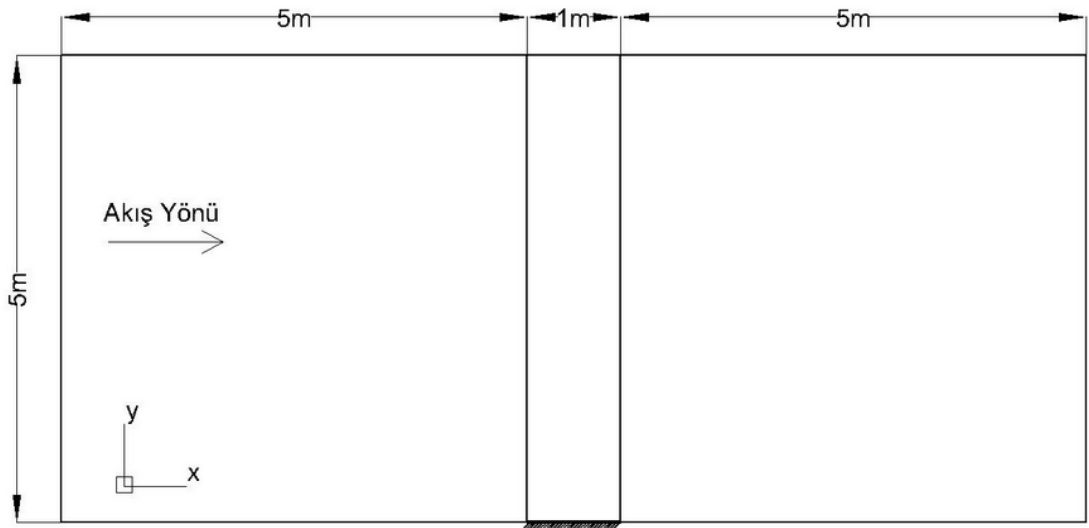
Model deneyi yapılmış ve direnç değerleri bu deneyler sonucunda hesaplanmış denizaltı formu Darpa Suboff, referans form olarak seçilmiştir. Seçilen referans formun baş ve kık formlarında çeşitli değişiklikler yapmak suretiyle 3 adet baş formu ve 3 adet kık formu türetilmiştir. Referans olarak seçilen forma ait hesaplanan direnç değerleri, deney sonuçlarıyla kıyaslanmış ve kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu belirlenmiştir. Bu test aşamasının ardından, türetilen yeni formlar için yazılım programının parametreleri aynı tutularak direnç değerleri sayısal olarak hesaplanarak referans forma ait değerlerle kıyaslamalar yapılmıştır. Bütün sayısal direnç değerleri, bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) programı olan ANSYS-Fluent 14.5 kullanılarak takıntısız denizaltı formları için hesaplanmıştır.

Bu çalışmada hedeflenen amaç, mevcut Darpa Suboff denizaltı formu üzerinde küçük değişikliklerle türetilen yeni denizaltı formlarının yazılım programı vasıtasıyla direnç hesabının yapılarak optimum bir denizaltı formuna ulaşmaktır.

1.2 Sayısal Direnç Hesabı Ön Çalışması

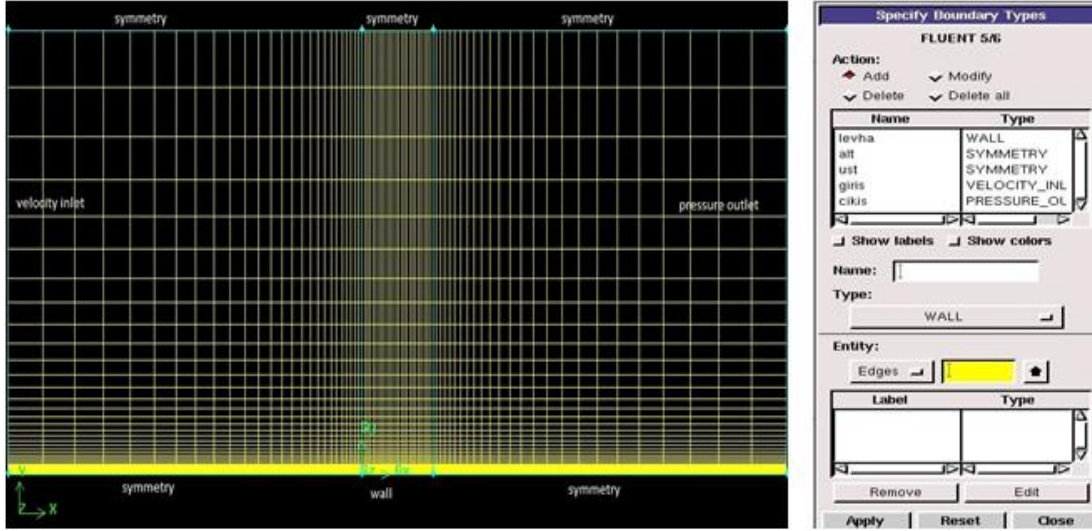
Çalışmanın yapılacağı denizaltı formunun HAD yazılım programıyla hesaplanmasına geçmeden önce kullanılacak yazılım programına ilişkin temel özelliklerin ve seçilecek parametrelerin belirlenmesine aşına olunabilmesi amacıyla nispeten basit sayısal test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, genel bir başlangıç olarak türbülanslı akış altında iki boyutlu (2D) düz bir levhanın direnç hesabı göz önüne alınmaktadır.

Yapılan bu test çalışmasında, levha boyu (L) 1 m. ve hız (V) 1 m/s olarak tanımlanmış olup şekil 1.1’de gösterildiği gibi kontrol hacmi oluşturulmuştur.



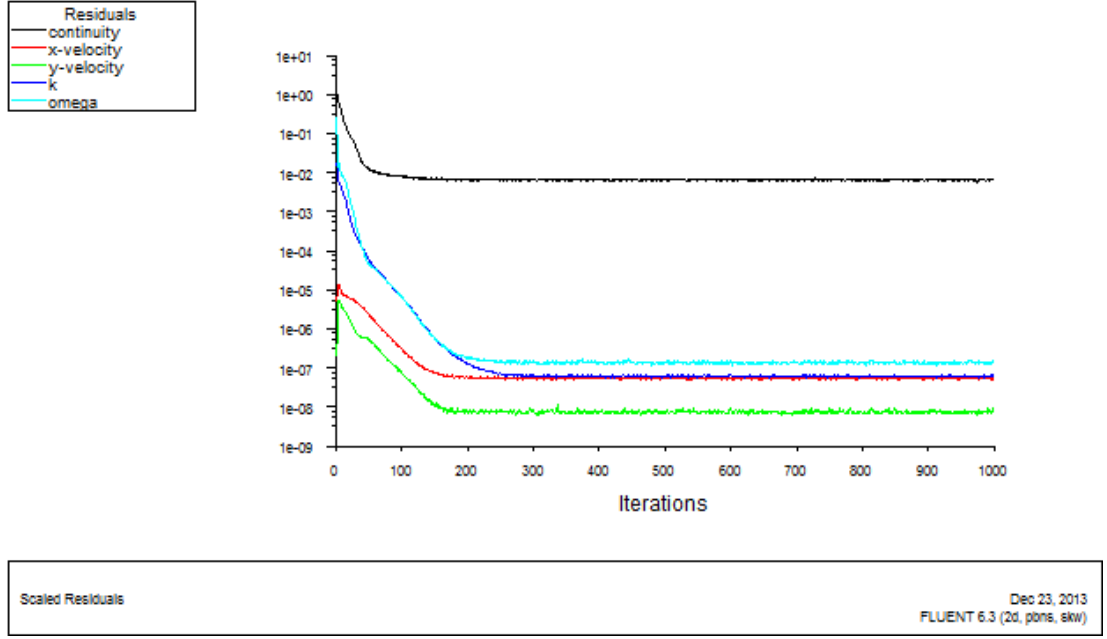
Şekil 1.1 : Düz levha için kontrol hacmi.

Gambit yazılım programında oluşturulan kontrol hacmi için akışın sisteme giriş kısmı *velocity inlet* olarak, akışın çıkış kısmı *pressure outlet* olarak tanımlanmıştır. Levha, *wall* olarak ve diğer kısımlar simetri olarak belirlenmiştir. Simetri olarak belirlenmesiyle akışın geldiği şekliyle diğer tarafa geçmesi sağlanmaktadır. Kontrol hacminin sınır koşulları tanımlandıktan sonra şekil 1.2’de görüldüğü üzere uygun ağ örgüsü yapılarak kontrol hacmi, analizin yapılacağı Fluent yazılım programına aktarılacak hale getirilmiştir.



Şekil 1.2 : Gambit’te yapılan ağ örgüsü.

Gambit’te yapılan çizim kaydedilerek Fluent’te açılmış ve ilk olarak çizilen şeklin ölçeği kontrol edilmiştir. Sonrasında yapılan ağ örgüsünün herhangi bir sorunun olup olmadığının anlaşılabilmesi için test edilmiştir. Yapılan ağ örgüsünde herhangi bir sorun olmadığı görüldükten sonra akış için $k-\omega$ türbülans modeli seçilmiştir. Fluent’te kayıtlı olarak mevcut su (water) seçeneğinin seçilmesinin ardından, sınır koşullarının belirlenmesi kısmında daha önceden Gambit’teki çizimde belirtilen *velocity inlet* olarak tanımlanan akışın giriş kısmında akış hızı x- eksenı boyunca 1 m/s olarak tanımlanmıştır. Sınır koşulları kaydedildikten sonra ekranda iterasyon yapılırken yakınsamanın olup olmadığını görebilmek amacıyla ve belirlenen değerlerin hassasiyet ölçülerini girebilmek için monitors – residual seçeneğine tıklanıp, burada gerekli hassasiyet değerleri yazdırılmıştır. Daha sonra başlangıç koşulu olarak sistemin *velocity inlet* şeklinde tanımlanan kısmı seçilmiş, seçim işleminden sonra daha önce sınır koşullarına girilen hız değeri x- eksenı boyunca 1 m/s olarak ekranda görülmüş ve onay verilmiştir. Böylece sistem koşturma (run) için hazır hale gelmiştir. Yeterli miktarda iterasyon sayısı programa yazılıp analiz sonuçları hesaplanmıştır. Yeterli miktarda iterasyon sayısı ile kast edilen en basit haliyle değerlerin ekranda görülen grafik üzerinde yakınsadığını gözle görmek ve bu yakınsamanın da bir müddet daha devam ettiğini gözlemleyecek kadar olması anlamına gelmektedir. İterasyon bitiminde Şekil 1.3’te görülen yakınsama elde edilmiş ve daha fazla iterasyon yapılmamıştır. Düz levha için Fluent’te direnç değeri yaklaşık 2.3 N olarak okunmuştur.



Şekil 1.3 : İterasyon sayısı boyunca değerlerin yakınsaması.

Bu test için Reynolds sayısı yaklaşık 10^6 olup, akış türbülanslı rejimdedir. Fluent’te okunan direnç değeri ile deneylere dayalı olarak geliştirilen ITTC 1957 denkleminde elde edilen sonuçlar aşağıda kıyaslanmaktadır.

ITTC 1957 denklemleri

$$R_f = \frac{1}{2} \rho S V^2 \quad (1.1)$$

$$C_f = \frac{0.075}{(\log Re - 2)^2} \quad (1.2)$$

olarak verilir ki bu bağıntılarda, ρ akışkanın yoğunluğu, S ıslak alan ve V akışkanın hızıdır.

Yukarıdaki ifadeler kullanılarak elde edilen direnç değeri 2.34 N dur. Fluent yardımıyla hesaplanan değer ise 2.31 N olduğu göz önüne alındığında hata yüzdesi %3 olmaktadır ki bu hata da kesinlikle kabul edilebilir sınırlar içerisindedir.

2. DENİZALTI FORMLARININ BELİRLENMESİ

2.1 Darpa Suboff Model

Referans forma karar verilirken öncelikle seçilecek forma ait direnç deneyler sonuçlarının elde edilebilir olmasına dikkat edilmiştir. Bu nedenle Mart 1989'da Nancy ve diğerleri tarafından yayımlanan raporda Darpa Suboff denizaltı modeli için model no. 5470 olarak isimlendirilen form dikkate alınmıştır [7]. Modelin formunu oluşturabilmek için verilen denklemler kullanılarak x - y düzleminde noktalar belirlenmiştir. Rhinoceros yazılım programında oluşturulan bu noktalardan geçen eğri çizilmiş ve eğri 360 derece döndürülmek suretiyle elde edilmiştir. Referans form eksenal simetrik olup şekil 2.1'de gösterilmiştir.

Model Boyu $L=4.356$ m

Maksimum Çap $R_{\text{maksimum}}=0.508$ m.

Baş formu,

$$0 Ft \leq x \leq 3,333333 Ft$$

$$R = R_{\text{maksimum}} \{ (1.126395101x(0.3x-1))^4 + 0.442874707x^2 (0.3x-1)^3 + 1 - ((0.3x-1)^4 (1.2x+1))^{(1/2.1)} \} \quad (2.1)$$

$$R_{\text{max}} = \frac{5}{6} Ft$$

Paralel gövde,

$$3.333333 Ft \leq x \leq 10.645833 Ft$$

$$R = R_{\text{max}}$$

Kıç formu ,

$$10.645833 Ft \leq x \leq 13.979167 Ft$$

$$R = R_{\text{maksimum}} \{ r_h^2 + r_h K_0^2 + (20 - 20r_h^2 - 4r_h K_0 - 1/3 K_1)^3 + (-45 + 45r_h^2 + 6r_h K_0 + K_1)^4 + (36 - 36r_h^2 - 4r_h K_0 - K_1)^5 + (-10 + 10r_h^2 + r_h K_0 + 1/3 K_1)^6 \}^{(1/2)} \quad (2.2)$$

$$r_h = 0.1175$$

$$K_0 = 10$$

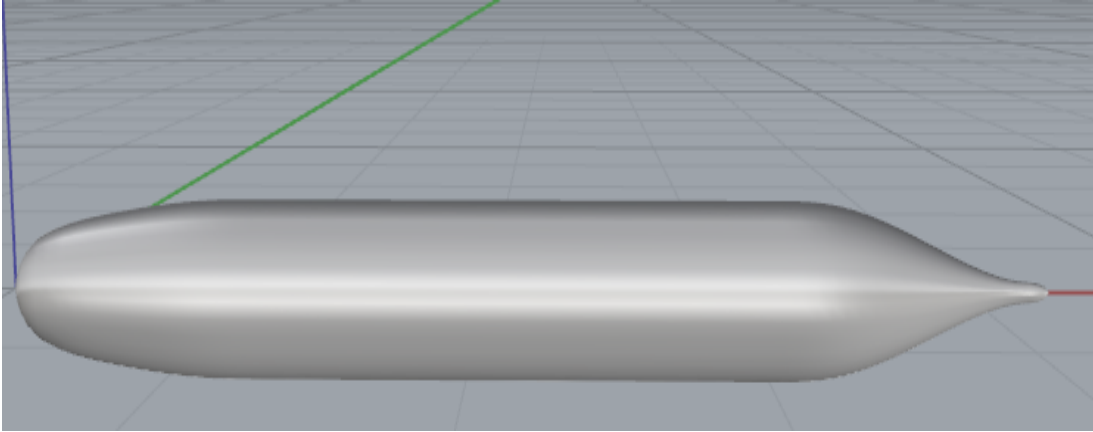
$$K_1 = 44.6244$$

$$\xi = \frac{13.979167 - x}{3.333333}, \quad x : \text{Feet}$$

ve

$$13.979167 \text{ Ft} \leq x \leq 14.291667 \text{ Ft}$$

$$R = 0.1175 R_{\text{maksimum}} [1 - (3.2x - 44.733333)^2]^{(1/2)} \quad (2.3)$$



Şekil 2.1 : Rhinoceros 5.0’da çizilmiş Darpa Suboff denizaltı modeli.

Formu oluşturulan Darpa Suboff denizaltı modelinin model numarası 5470 olan forma ait çeşitli hızlar için deney sonuçları Haziran 1998’de Han-Lieh Liu tarafından rapor olarak sunulmuştur [8]. Bu raporda verilen direnç değerleri çizelge 2.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1 : Darpa Suboff model numarası 5470 olan tekne formuna ait direnç değerleri.

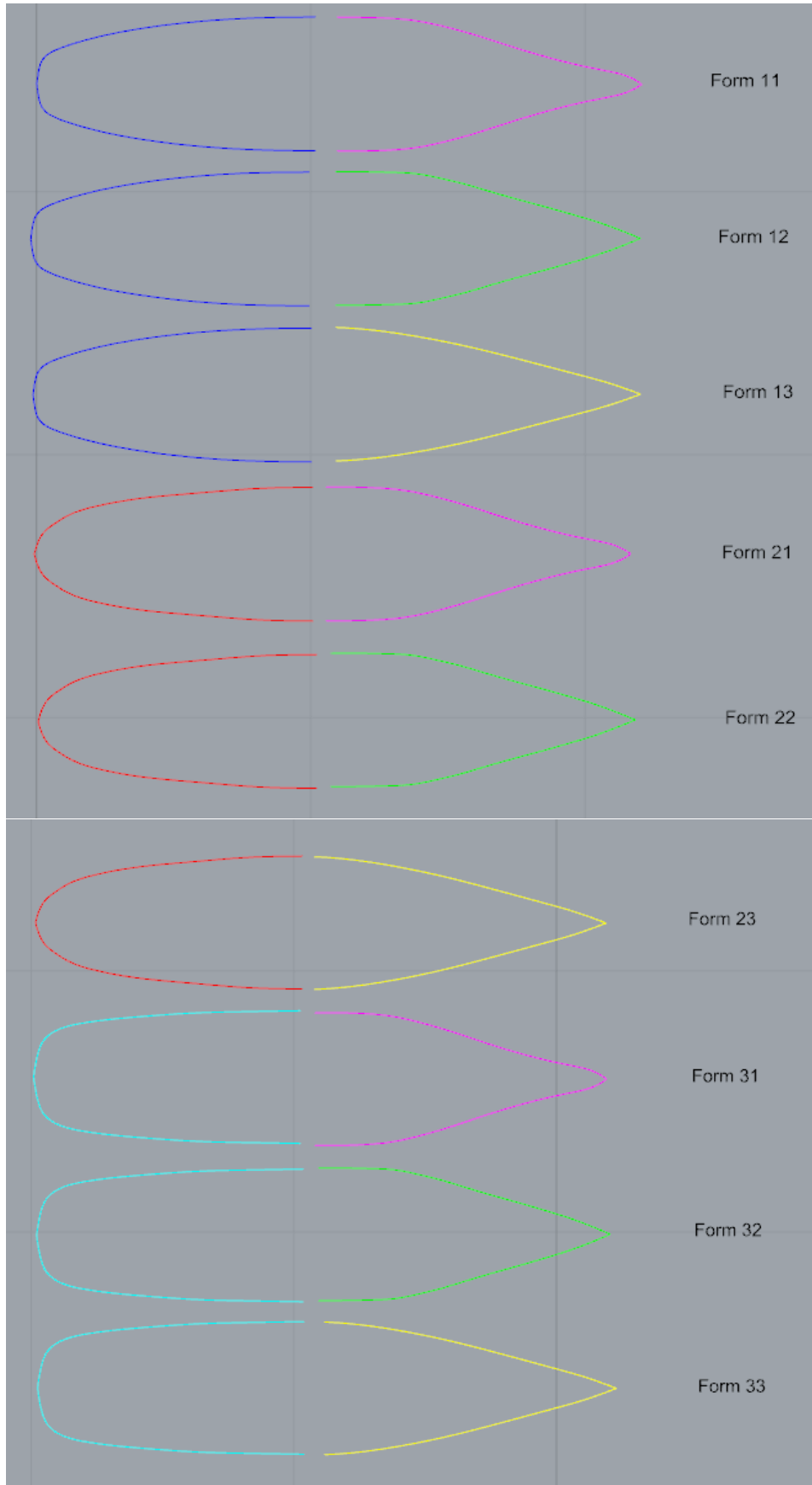
Hız (knots)	Model Direnci (N)
5.92	87.40
10.00	242.2
11.84	332.9
13.92	451.5
16.00	576.9
17.99	697.0

Yukarıda verilen değerler içerisinde takıntısı, yelkeni ve pervane kısımları olmadan sadece takıntısız gövde (bare hull) sonuçları seçilmiş olup, farklı hızlar içerisinde 10 knots (5.1444 m/s), 11.84 knots (6.091 m/s) ve 13.92 knots (7.161 m/s) hızları alınmıştır.

Bu durumda seçtiğimiz takıntısız form için yukarıda belirtilen hızlara karşı gelen deney direnç değerlerinin sırasıyla 242.2 N, 332.9 N ve 451.5 N olduğu görülmektedir.

2.2 Yeni Türetilen Formlar

Yeni denizaltı formlarının türetilmesi, referans olarak kabul edilen Darpa Suboff denizaltı modelinin baş ve kık formlarında küçük değişiklikler yapılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece, yeni 3 adet baş formu ve 3 adet kık formu oluşturulmuş ve bu formlar ayrı ayrı birbirleriyle eşleştirilerek toplamda 9 ayrı denizaltı formu belirlenmiştir. Yeni türetilen baş ve kık formları şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Rhinoceros 5.0’da çizilmiş yeni türetilen modellerin baş ve kık formları.

Formlara verilmiş olan numaralar, ilk numara baş formunu ifade edecek şekilde ikinci numara ise kık formunu ifade edecek şekilde oluşturulmuştur. Örneğin Form 11, Baş Formu 1, paralel gövde ve Kık Formu 1 kullanılarak oluşturulmuştur.

Form 11'e ait denklemler;

Baş formu,

$$0 \leq x \leq 0.01236$$

$$y = -2486.9x^3 - 181.41x^2 + 8.5895x + 0.00002 \quad (2.4)$$

$$0.01236 \leq x \leq 1.016$$

$$y = 0.3006x^3 - 0.6872x^2 + 0.5591x + 0.0855 \quad (2.5)$$

Paralel gövde,

$$1.016 \leq x \leq 3.245$$

$$y = 0.254$$

Kık formu,

$$3.245 \leq x \leq 4.356$$

$$y = 0.2524x^3 - 3.0018x^2 + 11.583x - 14.348 \quad (2.6)$$

Form 12'ye ait denklemler;

Baş formu,

$$0 \leq x \leq 0.01236$$

$$y = -2486.9x^3 - 181.41x^2 + 8.5895x + 0.00002 \quad (2.7)$$

$$0.01236 \leq x \leq 1.016$$

$$y = 0.3006x^3 - 0.6872x^2 + 0.5591x + 0.0855 \quad (2.8)$$

Paralel gövde,

$$1.016 \leq x \leq 3.245$$

$$y = 0.254$$

Kıç formu,

$$3.245 \leq x \leq 4.356$$

$$y = 0.1618x^3 - 2.022x^2 + 8.0824x - 10.211 \quad (2.9)$$

Form 13'e ait denklemler;

Baş formu,

$$0 \leq x \leq 0.01236$$

$$y = -2486.9x^3 - 181.41x^2 + 8.5895x + 0.00002 \quad (2.10)$$

$$0.01236 \leq x \leq 1.016$$

$$y = 0.3006x^3 - 0.6872x^2 + 0.5591x + 0.0855 \quad (2.11)$$

Paralel gövde,

$$1.016 \leq x \leq 3.245$$

$$y = 0.254$$

Kıç formu,

$$3.245 \leq x \leq 4.356$$

$$y = 0.0507x^3 - 0.6895x^2 + 2.8015x - 3.3072 \quad (2.12)$$

Form 21'e ait denklemler;

Baş formu,

$$0 \leq x \leq 0.08988$$

$$y = 254.54x^3 - 48.991x^2 + 3.7653x + 0.0014 \quad (2.13)$$

$$0.08988 \leq x \leq 1.016$$

$$y = 0.2541x^3 - 0.5939x^2 + 0.5031x + 0.0936 \quad (2.14)$$

Paralel gövde,

$$1.016 \leq x \leq 3.245$$

$$y = 0.254$$

Kıç formu,

$$3.245 \leq x \leq 4.356$$

$$y = 0.2524x^3 - 3.0018x^2 + 11.583x - 14.348 \quad (2.15)$$

Form 22'ye ait denklemler;

Baş formu,

$$0 \leq x \leq 0.08988$$

$$y = 254.54x^3 - 48.991x^2 + 3.7653x + 0.0014 \quad (2.16)$$

$$0.08988 \leq x \leq 1.016$$

$$y = 0.2541x^3 - 0.5939x^2 + 0.5031x + 0.0936 \quad (2.17)$$

Paralel gövde,

$$1.016 \leq x \leq 3.245$$

$$y = 0.254$$

Kıç Formu,

$$3.245 \leq x \leq 4.356$$

$$y = 0.1618x^3 - 2.022x^2 + 8.0824x - 10.211 \quad (2.18)$$

Form 23'e ait denklemler;

Baş formu,

$$0 \leq x \leq 0.08988$$

$$y = 254.54x^3 - 48.991x^2 + 3.7653x + 0.0014 \quad (2.19)$$

$$0.08988 \leq x \leq 1.016$$

$$y = 0.2541x^3 - 0.5939x^2 + 0.5031x + 0.0936 \quad (2.20)$$

Paralel gövde,

$$1.016 \leq x \leq 3.245$$

$$y = 0.254$$

Kıç formu,

$$3.245 \leq x \leq 4.356$$

$$y = 0.0507x^3 - 0.6895x^2 + 2.8015x - 3.3072 \quad (2.21)$$

Form 31'e ait denklemler;

Baş formu,

$$0 \leq x \leq 0.06986$$

$$y = 784.63x^3 - 124.35x^2 + 7.2913x + 0.0013 \quad (2.22)$$

$$0.06986 \leq x \leq 1.016$$

$$y = 0.1972x^3 - 0.4435x^2 + 0.3482x + 0.1529 \quad (2.23)$$

Paralel gövde,

$$1.016 \leq x \leq 3.245$$

$$y = 0.254$$

Kıç formu,

$$3.245 \leq x \leq 4.356$$

$$y = 0.2524x^3 - 3.0018x^2 + 11.583x - 14.348 \quad (2.24)$$

Form 32'ye ait denklemler;

Baş formu,

$$0 \leq x \leq 0.06986$$

$$y = 784.63x^3 - 124.35x^2 + 7.2913x + 0.0013 \quad (2.25)$$

$$0.06986 \leq x \leq 1.016$$

$$y = 0.1972x^3 - 0.4435x^2 + 0.3482x + 0.1529 \quad (2.26)$$

Paralel gövde,

$$1.016 \leq x \leq 3.245$$

$$y = 0.254$$

Kıç formu,

$$3.245 \leq x \leq 4.356$$

$$y = 0.1618x^3 - 2.022x^2 + 8.0824x - 10.211 \quad (2.27)$$

Form 33'e ait denklemler;

Baş formu,

$$0 \leq x \leq 0.06986$$

$$y = 784.63x^3 - 124.35x^2 + 7.2913x + 0.0013 \quad (2.28)$$

$$0.06986 \leq x \leq 1.016$$

$$y = 0.1972x^3 - 0.4435x^2 + 0.3482x + 0.1529 \quad (2.29)$$

Paralel gövde,

$$1.016 \leq x \leq 3.245$$

$$y = 0.254$$

Kıç formu,

$$3.245 \leq x \leq 4.356$$

$$y = 0.0507x^3 - 0.6895x^2 + 2.8015x - 3.3072 \quad (2.30)$$

2.3 Kontrol Hacmi ve Ağ Örgüsünün Oluşturulması

Hem Darpa Suboff model hem de yeni türetilen formların kontrol hacimleri oluşturulurken, denizaltı modelinde eksenel simetrinin korunması nedeniyle, simetri eksenine göre formun 1/4'lük kısmı göz önüne alınarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Böylece denizaltı model boyuna L olmak üzere 2.5L ön tarafta, 6.5L arka tarafta ve 5L üst tarafta açıklık bırakılarak Şekil 2.3'de gösterildiği gibi bir kontrol hacmi oluşturulmuştur. Denizaltı modelinde yelken, pervane gibi takıntılar olmadığından sadece takıntısız gövde üzerinde çalışılacağından kontrol hacmi oluşturulurken büyük açıklıklara gereksinim duyulmamıştır ki bu durum yazılım programında sayısal hesaplamaların daha kısa sürede gerçekleştirilmesine olanak vermiştir.



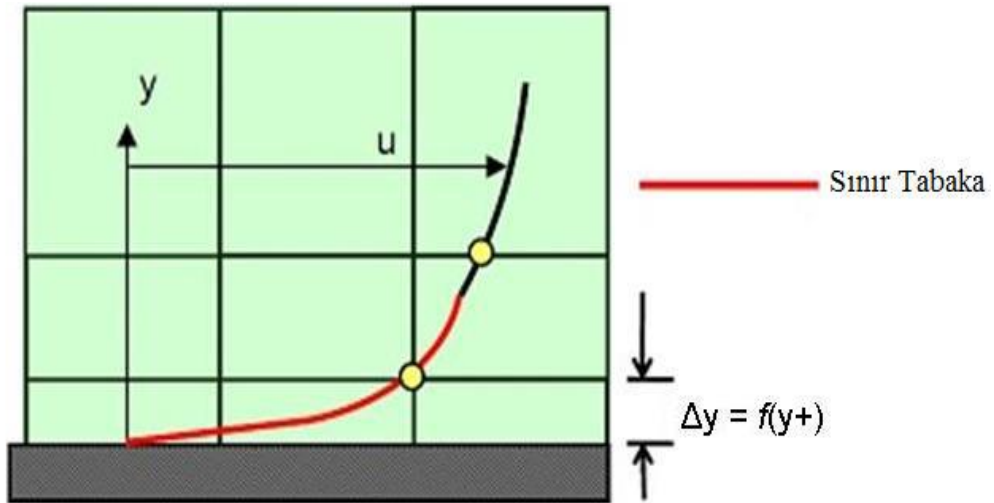
Şekil 2.3 : Kontrol hacmi.

Ağ örgüsü oluşturulurken, yüzey üzerinde yeterince sık ve yüzeyden uzaklaştıkça da uygun oranda azalan bir örgü şeklinde oluşturulmuştur. Yine bu örgünün oluşturulması sırasında y^+ ve Reynolds sayısına dikkat etmek güvenilir sonuçlar elde edebilmek açısından çok önemlidir. Boyutsuz bir büyüklük olan y^+ değeri şekil 2.4'de gösterilmektedir. Sınır tabaka ilk kalınlığını hesaplamak için aşağıdaki denklemden yararlanılabilir veya y^+ hesaplayıcısı kullanılabilir [9].

$$\Delta y = L y^+ \sqrt{74} \text{Re}_L^{-13/14} .1000 \quad (2.31)$$

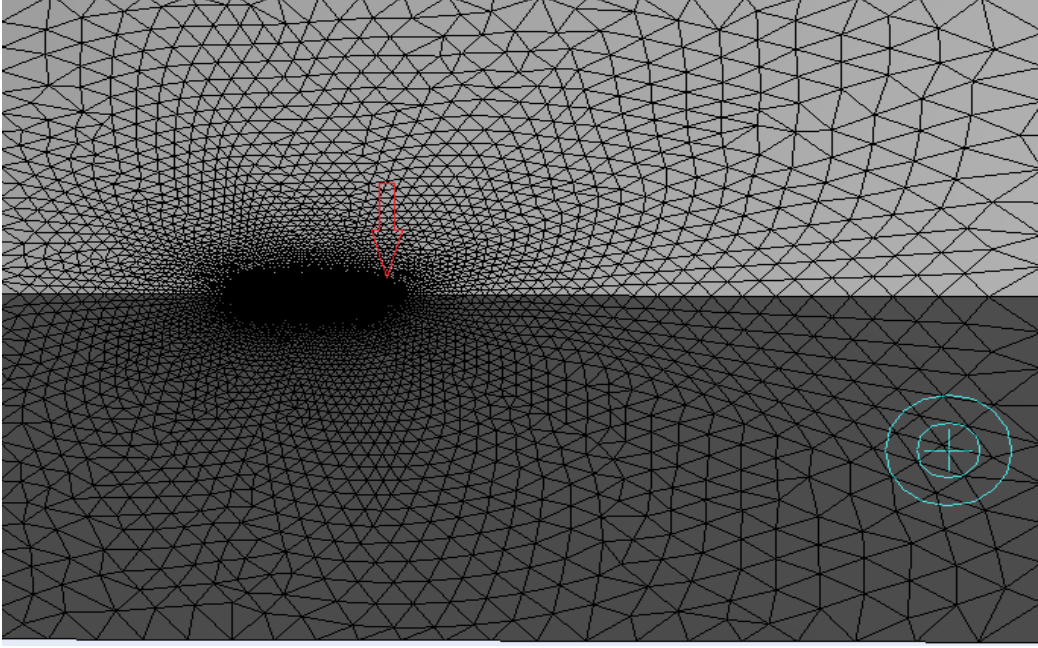
$$\text{Re}_L = VL/\nu \quad (2.32)$$

Yukarıdaki ifadelerde, Δy : Sınır tabaka ilk kalınlığı (mm), ν : Kinematik viskozite, V : Seyir hızı, L : Cismin boyu olmaktadır.



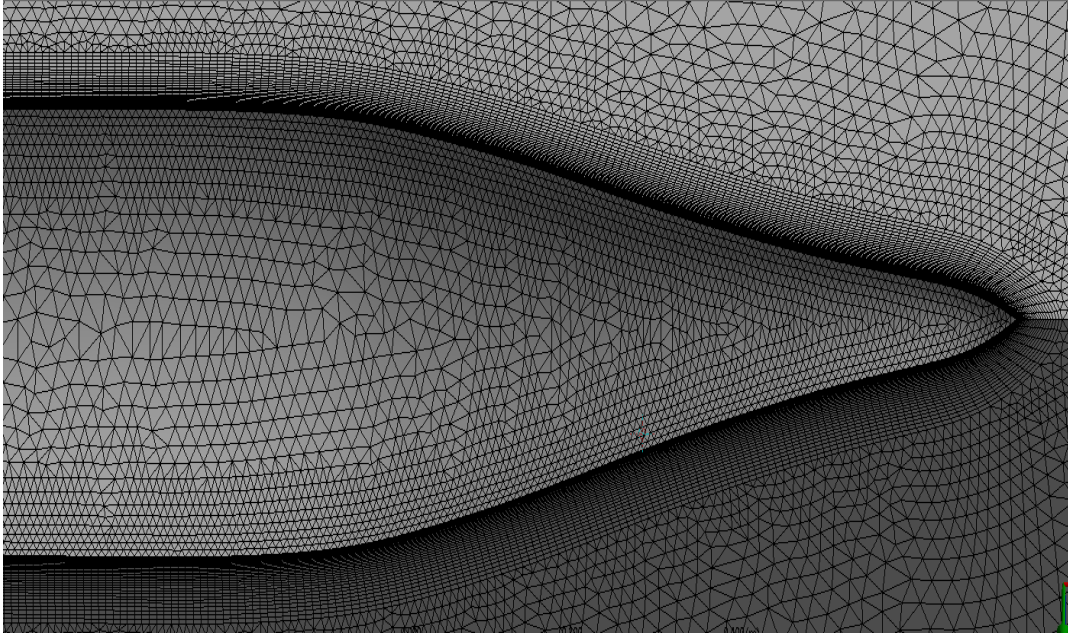
Şekil 2.4 : y^+ değerinin fiziksel gösterimi [10].

Bu çalışmada ağ örgüsünü oluşturabilmek için Rhinoceros yazılım programında çizilen kontrol hacmi ANSYS Workbench yazılım programına aktarılmış ve otomatik ağ örgüsü kullanılmıştır. Ancak daha önce de bahsedildiği üzere, yüzey üzerinde daha sık, yüzeyden uzaklaştıkça daha seyrek ağ örgüsü oluşturabilmek için otomatik ağ örgüsü kısmında belirlenen sınır tabaka kalınlığı, büyüme oranı gibi veriler değiştirilmek suretiyle ağ örgüsünde ince ayarlamalarla ağ örgüsüne niahi şekli verilmiştir. Şekil 2.5'de kontrol hacmi üzerindeki ağ örgüsü gösterilmektedir.

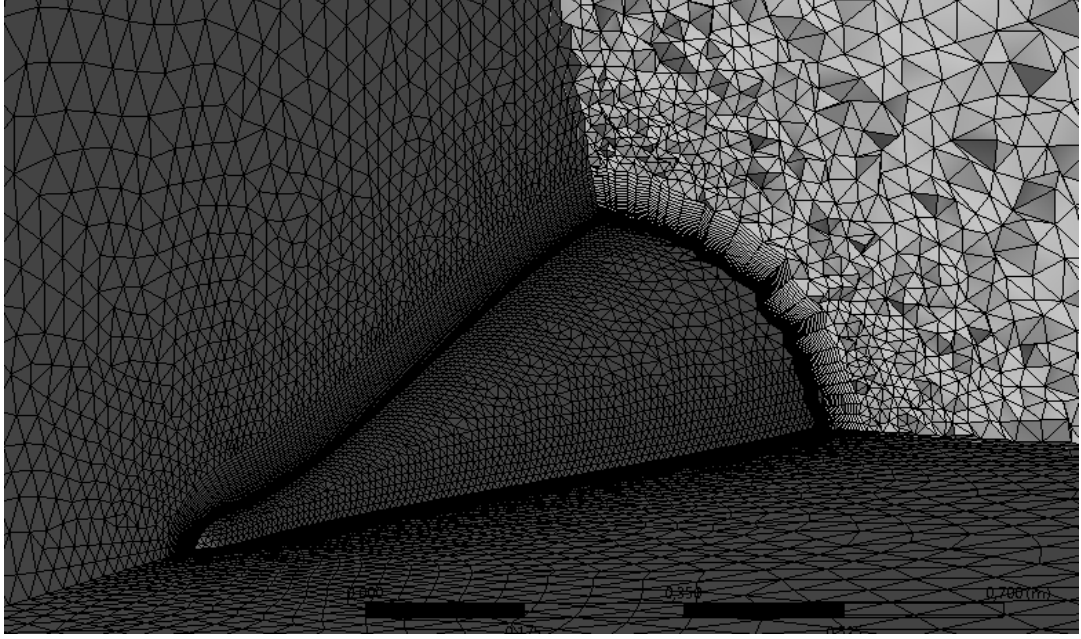


Şekil 2.5 : Kontrol hacmi ağ örgüsü.

Şekil 2.6’da model denizaltı formu üzerinde ve form etrafındaki ağ örgüsü ve şekil 2.7’de ANSYS Workbench programında yapılan ağ örgüsünün kesit görüntüsü gösterilmiştir.



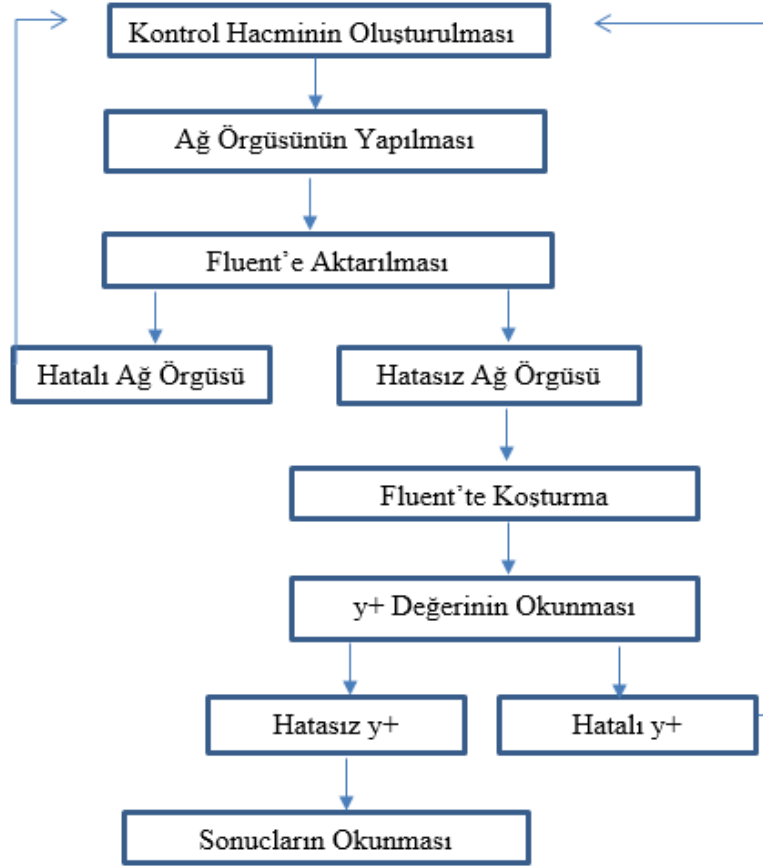
Şekil 2.6 : Form üzerinde ve etrafındaki ağ örgüsü.



Şekil 2.7 : Ağ örgüsünün ANSYS Workbench kesit görüntüsü.

2.4 Ağ Örgüsü Analizi

Oluşturulan ağ örgüsüne bağlı olarak artan veya azalan ağ örgüsü sayısı, sayısal hesaplama süresini doğrudan etkilediği için hesaplama süresini ve istenen doğruluk derecesini dikkate alarak en uygun ağ örgüsü seçilmelidir. Böylece, gereksiz süre kaybına neden olabilecek bir ağ örgüsü yerine değerlerde küçük değişimleri gözardı etmek göreceli olarak daha hızlı sonuç alınmasını sağlayacaktır. Literatürde genellikle ağ örgüsü adedi $\sqrt{2}$ oranında arttırmak ya da azaltmak suretiyle en uygun ağ örgüsüne ulaşılacak hedeflenilmiştir. Doğru ve güvenilir bir ağ yapısı oluşturabilmek için şekil 2.8’de basit haliyle gerçekleştirilen akış diyagramı gösterilmektedir.



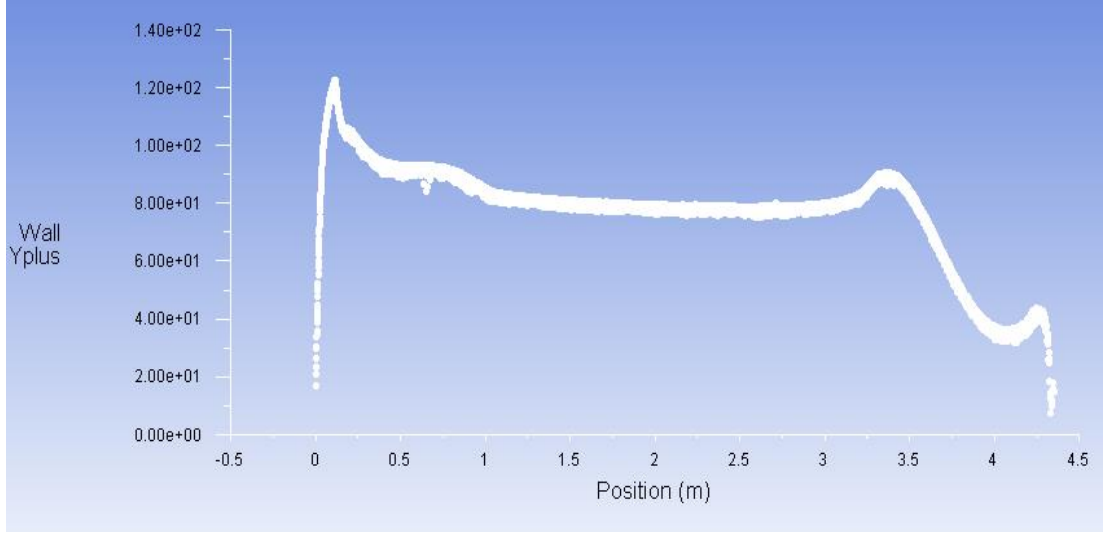
Şekil 2.8: Ağ örgüsü akış diyagramı.

Bu çalışmamızda 3 farklı ağ örgüsü oluşturulmuş ve analiz neticesinde sayısal değişimlerin küçük olması nedeniyle süre olarak daha kısa sayısal hesaplama süresi sağlayan ağ örgüsü seçilmiştir. Yapılan çalışmada, ağ örgüsünün seçilmesinde formların birbiri ile kıyaslanması hedeflendiğinden uygun ağ örgüsü seçiminin önemi gözardı edilemez.

Çizelge 2.2 : Ağ örgüsüne bağlı direnç değerleri.

Ref. Darpa Suboff	Hız (m/s)	Direnç (N)	Yaklaşık Ağ Örgüsü Adedi	Ağ Örgüsü Modeli
1	5.1444	226.72	1250000	A (kötü)
2	5.1444	224.36	1800000	B (iyi)
3	5.1444	223.8	2500000	C (çok iyi)

Çizelge 2.2’de ağ örgüsü modeline bağlı olarak referans forma ait 5.1444 m/s hızdaki direnç değerleri verilmiştir. Reynolds sayısı yaklaşık $2.23 \cdot 10^7$ ve y^+ değeri 79 olup model boyunca y^+ grafiği Şekil 2.9’da gösterilmiştir.

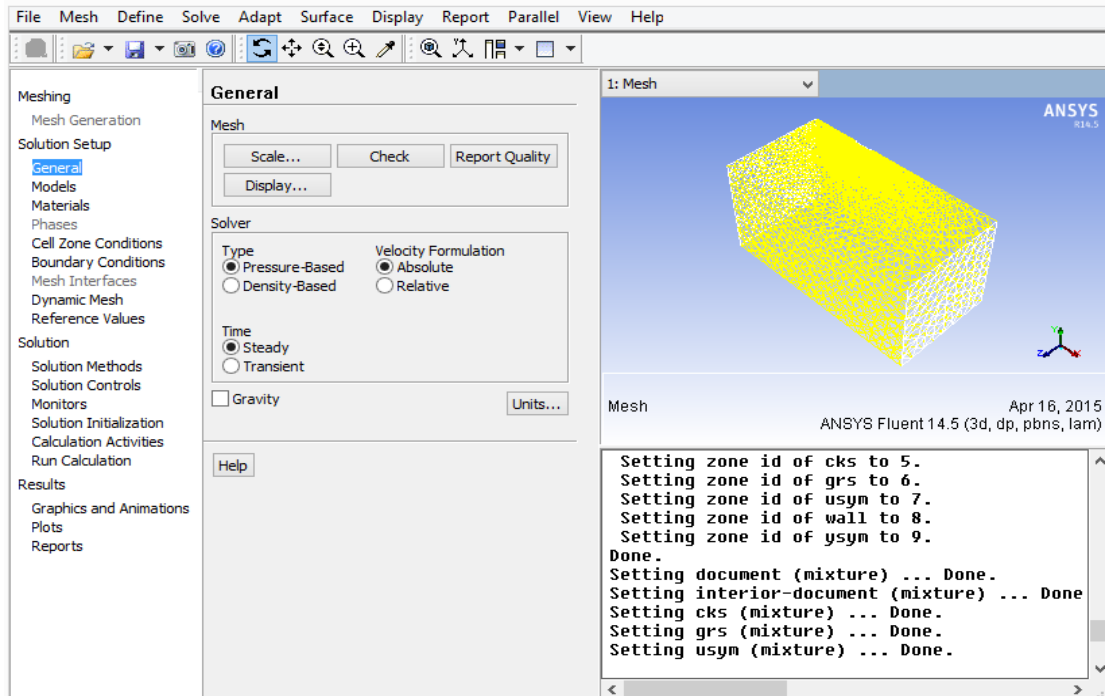


Şekil 2.9: y^+ değerinin model boyunca değişimi.

Darpa Suboff modeli için seçilen y^+ değerinin, elde edilecek direnç değerleri açısından güvenli sınırlarda olduğu kanısına varılmıştır (CFD tartışma forumlarından elde edilen bilgiler sonucunda). Türetilen bütün formlarda model boyu ve eni sabit olduğundan ayrıca kontrol hacminin sınırları da değiştirilmediği için B (iyi) ağ örgüsü modeli uygulanmıştır. Bütün formlar için y^+ değeri 5.1444 m/s hız için 79-80 olarak seçilmiştir.

3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ VE DİRENÇ HESABI

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) akışkan türüne bağlı olarak oluşan direncin hesaplanması için kullanılabilen bir bilgisayar yazılımıdır. Bu programların en önemli üstünlüğü, oluşturulan form için nispeten güvenilir verileri deneylere kıyasla oldukça az bir harcama ile ve kısa sürede sağlamasıdır. Herhangi bir form için oluşturulan kontrol hacmi ve kontrol hacmine yapılan ağ örgüsü kullanılarak, yüksek maliyetli deney araç ve gereçlerine gerek kalmaksızın incelenen karakteristikler hakkında fikir edinilebilmektedir. Böylece tasarlanan formlara ait büyüklükler birbiriyle kıyaslanarak kendi aralarında sıralanabilmektedir. Kontrol hacminin ve ağ örgü sayısının büyüklüğüne bağlı olarak sayısal çözüm süresi değişebilmektedir. Bu sürenin azalıp artması kullanılan bilgisayarların işlemci hızlarıyla da doğrudan ilişkilidir. Ancak şu nokta vurgulanmalıdır ki yapılan sayısal simülasyonların ardından doğruluğundan kuşku duyulmayan verilere ulaşmak ancak model deneyleriyle mümkündür.



Şekil 3.1 Fluent yazılım programı arayüzü.

Mevcut çalışmamızda ANSYS Workbench 14.5'te oluşturulan ağ örgüsü yine aynı yazılım programında mevcut olan Fluent yazılım programına aktarılmış ve sayısal direnç hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1'de Fluent yazılım programının arayüzü gösterilmektedir.

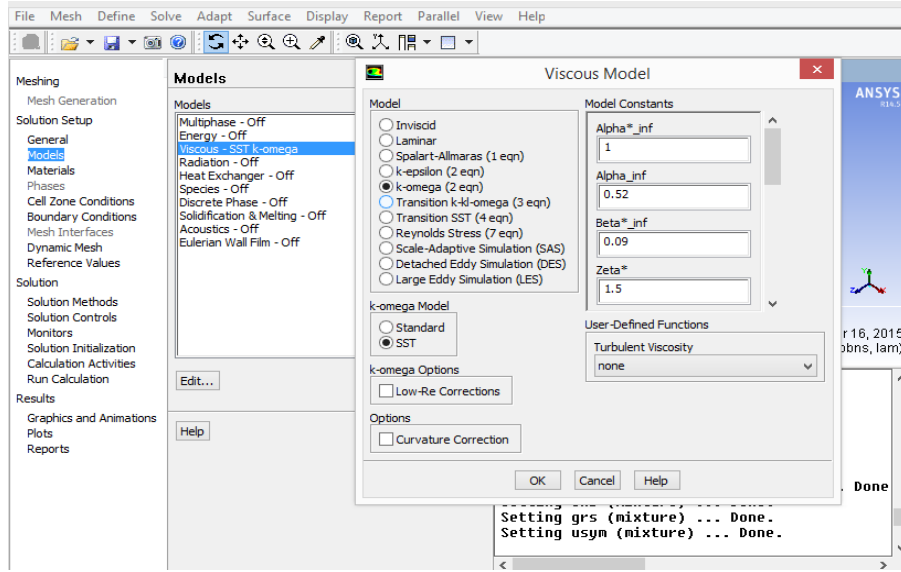
3.1 Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$ Türbülans Modeli

SST $k-\omega$ türbülans modeli iki denklemlili türbülans modeli olarak adlandırılır. Akışın türbülansa bağlı özelliklerini ifade edebilmek amacıyla hareket denklemlerine iki adet hareket denklemi ilave edilmiştir. İlave edilen bu denklemler vasıtasıyla kinetik enerji yayılımı ve kinetik enerji dağılımı hesaplanabilmektedir. SST $k-\omega$ modeli tam ve sağlam bir şekilde formüle edilen uzak bölge içindeki serbest akımdaki $k-\epsilon$ türbülans modeli ile duvar yakınındaki bölgedeki $k-\omega$ türbülans modelinin etkin bir şekilde harmanlamak için Menter tarafından geliştirilen iki denklem eklenmiş viskozite modelidir. Bu harmanlamayı başarabilmek için $k-\epsilon$ türbülans modeli $k-\omega$ türbülans modeline dönüştürülür. SST $k-\omega$ türbülans modeli bazı geliştirmeler dışında standart $k-\omega$ benzerdir. Standart $k-\omega$ türbülans modeli ve dönüştürülmüş $k-\epsilon$ türbülans modeli karışım fonksiyonu ile çarpılmış ve her iki modele de birlikte eklenmiştir. Karışım fonksiyonu $k-\omega$ türbülans modelinin aktif olduğu duvar yakınındaki bölge içerisinde 1 olarak ve dönüştürülmüş $k-\epsilon$ türbülans modelinin aktif olduğu yüzeyden uzaktaki bölgede ise 0 olarak tasarlanmıştır. Modelleme sabitleri de farklıdır[11],[12],[13],[14]. Literatürde kullanımı ve önerilen bir türbülans modeli olduğundan ayrıca daha hassas sonuçlar elde edebilmek adına bu çalışmada SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılmıştır.

3.2 Darpa Suboff Denizaltı Modelinin Direnç Hesabı

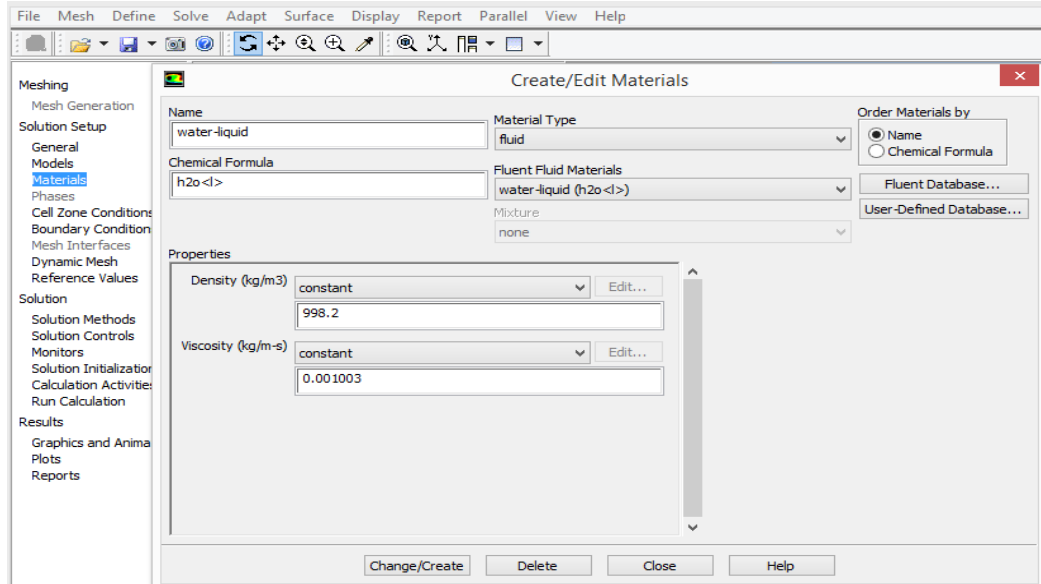
Ağ örgüsü yapılan Darpa Suboff denizaltı modelinin Fluent'e aktarılmasının ardından ölçek ve ağ örgüsü test edilmiştir. Fluent arayüzünün sol tarafında bulunan seçenekler

vasıtasıyla öncelikle models kısmından akış modeli olarak şekil 3.2’de görüldüğü üzere SST $k-\omega$ türbülans modeli olarak tanımlandı.



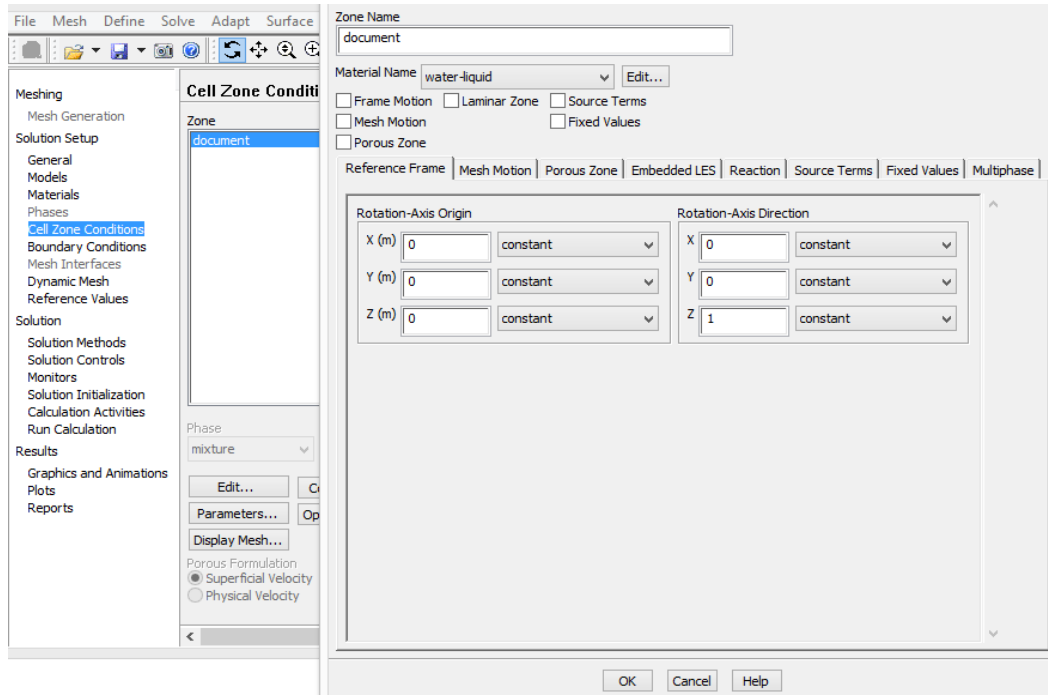
Şekil 3.2 : Akış modelinin seçilmesi.

Materials seçeneğinden akışkan türü olarak su seçildi. Şekil 3.3’de görüldüğü üzere Fluent’te tanımlı olan ve “Fluent Database” kutucuğu altında bulunan akışkana ait veriler yoğunluk (ρ) 998.2 kg/m^3 ve dinamik viskozite (μ) 0.001003 kg/m.s ’ dir.



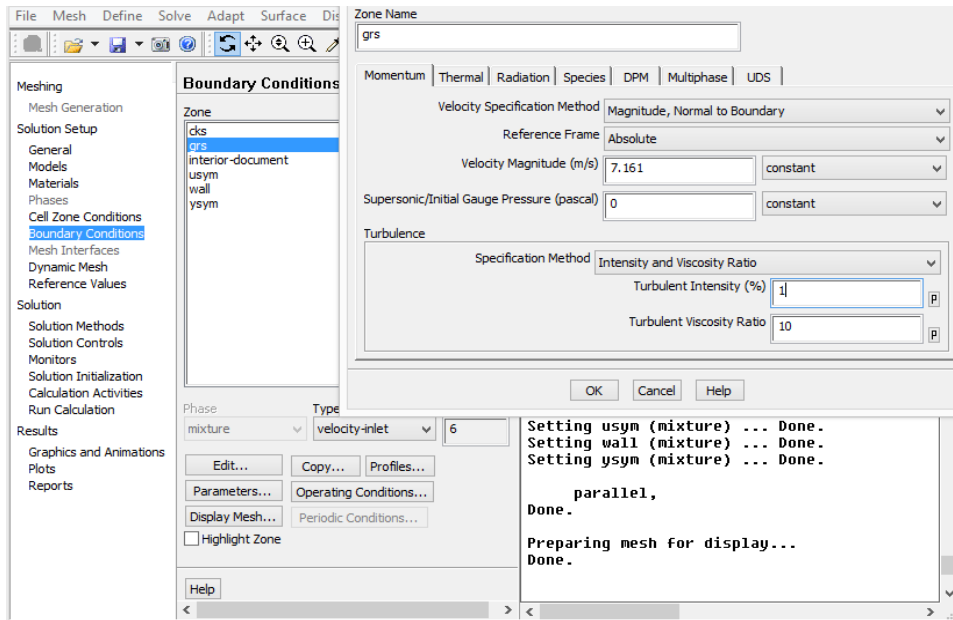
Şekil 3.3 : Akışkana ait veriler.

Seçilen akışkan *Cell Zone Conditions* seçeneğine tıklanarak şekil 3.4’de gösterildiği şekilde tanımlandı.



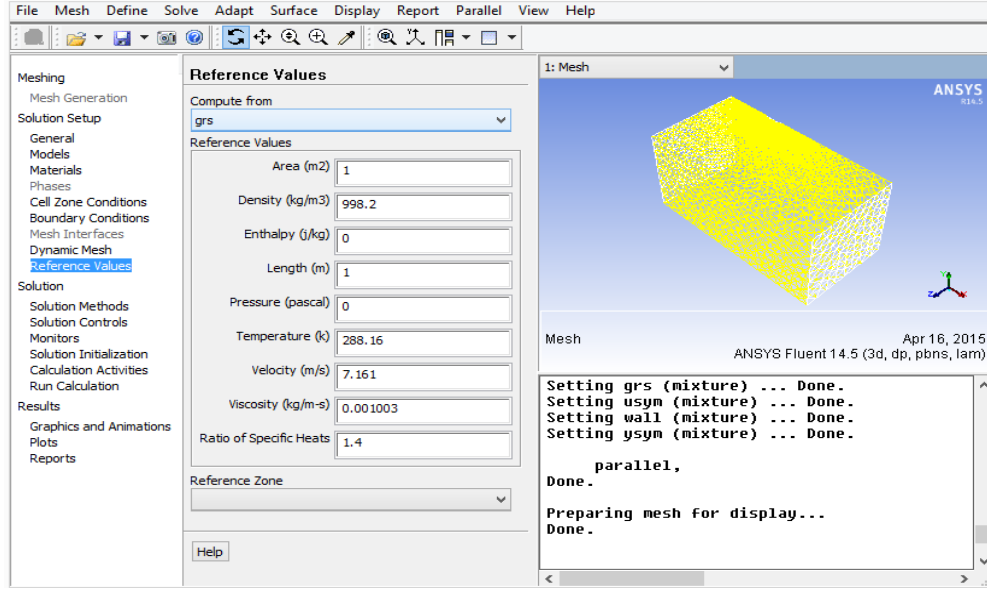
Şekil 3.4 : Başlangıç koşulları.

Boundary conditions kısmında ise akışkanın giriş kısmı için *velocity-inlet* seçilerek şekil 3.5’de görüldüğü gibi hız değeri girilmiştir. Aynı şekilde akışkanın çıkış kısmı içinde *pressure-outlet* seçilmiştir.



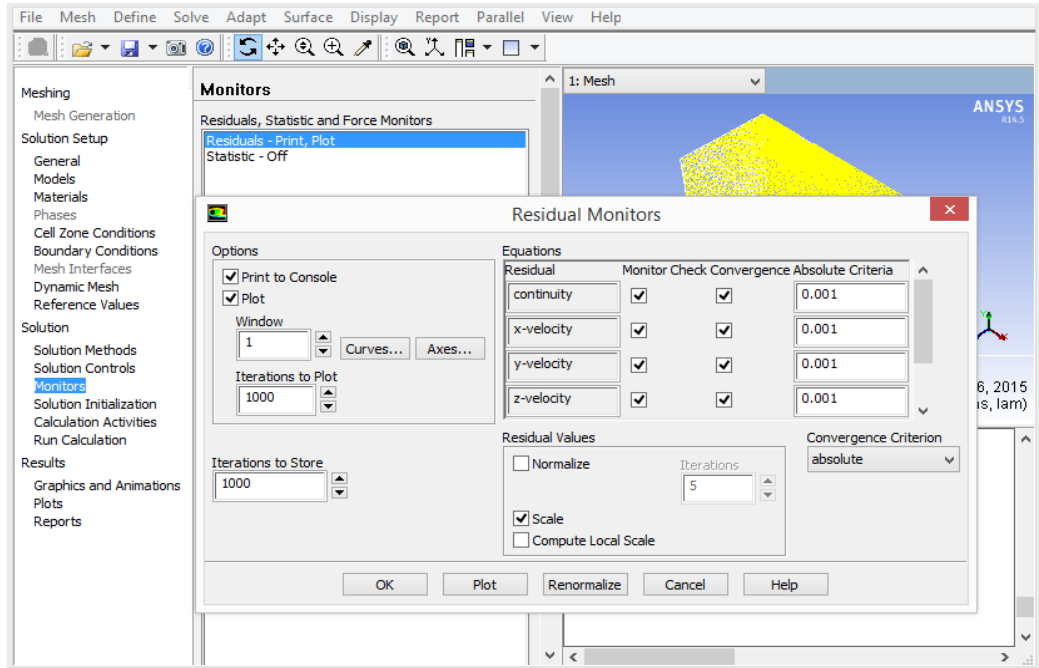
Şekil 3.5 : Akışkan hızının girilmesi.

Arayüzün sol tarafındaki kısımda bulunan reference values bölümünde işleme başlanılacak kısım şekil 3.6’da görüldüğü gibi giriş olarak onaylanmıştır.



Şekil 3.6 : Akışkanın kontrol hacmine giriş yönü.

Çözüm kısmında ise çözüm metodu olarak *second order upwind* seçeneği uygun görülmüştür. Çözüm boyunca ekranda görülmesi istenen grafikler ve yakınsamanın merteye olarak derecesi şekil 3.7’de gösterilen kısımdan belirlenebilmektedir..



Şekil 3.7 : Yakınsamanın gösterilmesi.

Gözlemlenmek istenen grafik ve veriler seçildikten sonra sayısal çözümleme için son aşama olan *run calculation* kısmına geçilmiştir. Bu kısımda iterasyon sayısı girilerek koşturma (run) başlatılmıştır. Koşturma boyunca grafiklerde ve verilerde

yakınsamanın olup olmadığı gözlenmiştir. Verilerde ve grafiklerde belli bir dönem sabitlik söz konusu olduğunda iterasyon durdurularak elde edilen direnç değerleri 3 farklı akış hızı için elde edilmiş ve Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Darpa Suboff modele ait direnç değerleri.

Ref. Darpa	Hız m/s	Reynolds Sayısı $\cdot 10^7$	Hesaplanan Direnç N	Alan m^2
1	5,1444	2,23	222,16	5,98
2	6,091	2,64	304,32	5,98
3	7,161	3,1	411,52	5,98

3.3 Yeni Türetilen Formların Direnç Hesabı

Yeni türetilen 3 baş ve 3 kık formu olduğundan, toplam 9 adet yeni denizaltı formu bulunmaktadır. Referans formla birlikte 10 adet form için 3 farklı hızda Bölüm 3.1’de belirtildiği üzere Fluent yazılım programı kullanılarak sayısal direnç hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Türetilen formlar için farklı hızlarda hesaplanan direnç değerleri çizelge 3.2 - çizelge 3.10’da verilmektedir.

Çizelge 3.2 : Form 11’e ait direnç değerleri.

Form 11	Hız m/s	Reynolds Sayısı $\cdot 10^7$	Hesaplanan Direnç N	Alan m^2
1	5,1444	2,23	227,44	6,088
2	6,091	2,64	311,52	6,088
3	7,161	3,1	421,24	6,088

Çizelge 3.3 : Form 12’ye ait direnç değerleri.

Form 12	Hız m/s	Reynolds Sayısı $\cdot 10^7$	Hesaplanan Direnç N	Alan m^2
1	5,1444	2,23	229	6,136
2	6,091	2,64	313,64	6,136
3	7,161	3,1	424,12	6,136

Çizelge 3.4 : Form 13'e ait direnç değerleri.

Form 13	Hız m/s	Reynolds Sayısı $\cdot 10^7$	Hesaplanan Direnç N	Alan m^2
1	5,1444	2,23	222,8	6,036
2	6,091	2,64	305,28	6,036
3	7,161	3,1	412,76	6,036

Çizelge 3.5 : Form 21'e ait direnç değerleri.

Form 21	Hız m/s	Reynolds Sayısı $\cdot 10^7$	Hesaplanan Direnç N	Alan m^2
1	5,1444	2,23	226,72	6,068
2	6,091	2,64	310,6	6,068
3	7,161	3,1	419,88	6,068

Çizelge 3.6 : Form 22'ye ait direnç değerleri.

Form 22	Hız m/s	Reynolds Sayısı $\cdot 10^7$	Hesaplanan Direnç N	Alan m^2
1	5,1444	2,23	228,84	6,148
2	6,091	2,64	313,52	6,148
3	7,161	3,1	423,88	6,148

Çizelge 3.7 : Form 23'e ait direnç değerleri.

Form 23	Hız m/s	Reynolds Sayısı $\cdot 10^7$	Hesaplanan Direnç N	Alan m^2
1	5,1444	2,23	222,16	6,012
2	6,091	2,64	304,32	6,012
3	7,161	3,1	411,52	6,012

Çizelge 3.8 : Form 31'e ait direnç değerleri.

Form 31	Hız m/s	Reynolds Sayısı $\cdot 10^7$	Hesaplanan Direnç N	Alan m^2
1	5,1444	2,23	234,76	6,204
2	6,091	2,64	321,6	6,204
3	7,161	3,1	434,88	6,204

Çizelge 3.9 : Form 32’ye ait direnç değerleri.

Form 32	Hız m/s	Reynolds Sayısı $\cdot 10^7$	Hesaplanan Direnç N	Alan m^2
1	5,1444	2,23	236,8	6,288
2	6,091	2,64	324,44	6,288
3	7,161	3,1	438,72	6,288

Çizelge 3.10 : Form 33’e ait direnç değerleri.

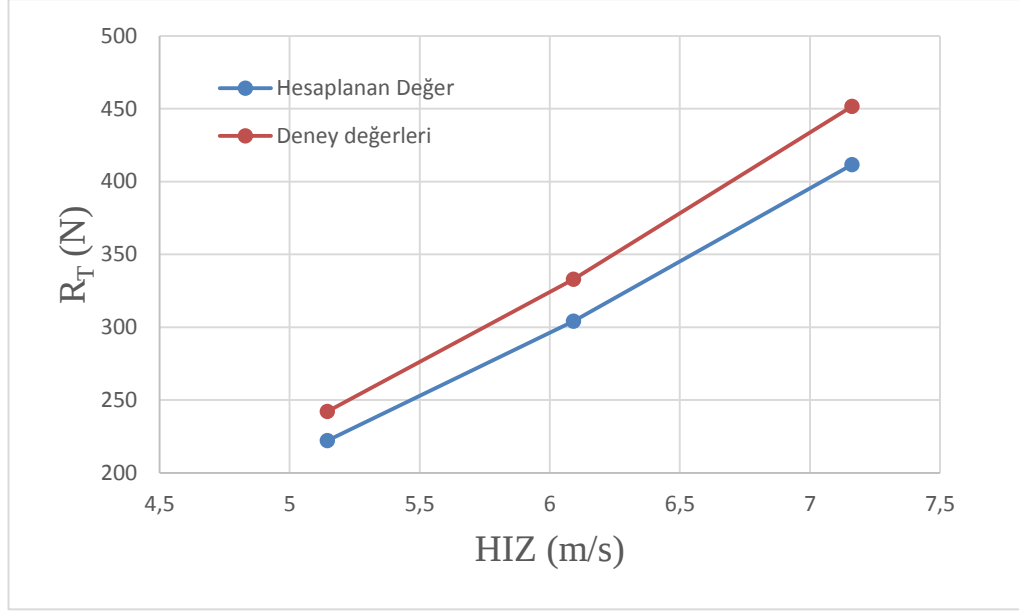
Form 33	Hız m/s	Reynolds Sayısı $\cdot 10^7$	Hesaplanan Direnç N	Alan m^2
1	5,1444	2,23	230,28	6,152
2	6,091	2,64	315,56	6,152
3	7,161	3,1	426,76	6,152

3.4 Darpa Suboff Deney Sonuçları İle Sayısal Hesaplama Sonuçlarının Kıyaslanması

Referans olarak belirlenen Darpa Suboff denizaltı modelinin deney sonuçları ile belirlenen 3 hıza dair direnç verileri (Bölüm 2.1) ve HAD yazılım programı Fluent’ten elde edilen direnç değerleri Çizelge 3.11’de birlikte verilmektedir.

Çizelge 3.11 : Darpa Suboff modele ait deney direnç değerleri.

Ref. Darpa	Hız m/s	Deney Direnç Değeri N	Hesaplanan Direnç N
1	5,1444	242,2	222,16
2	6,091	332,9	304,32
3	7,161	451,5	411,52

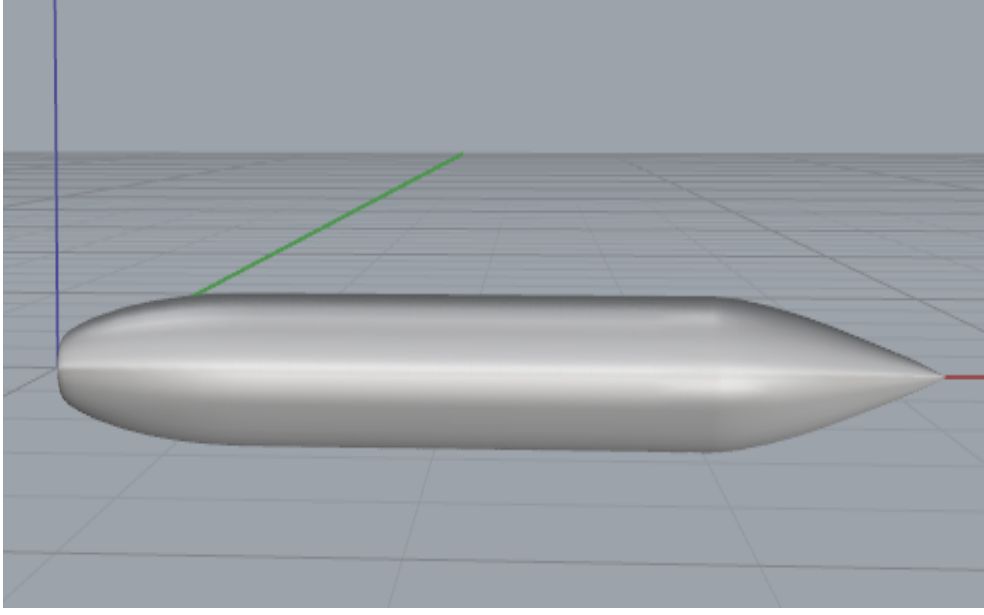


Şekil 3.8 : Darpa Suboff modele ait hız-direnç grafiği.

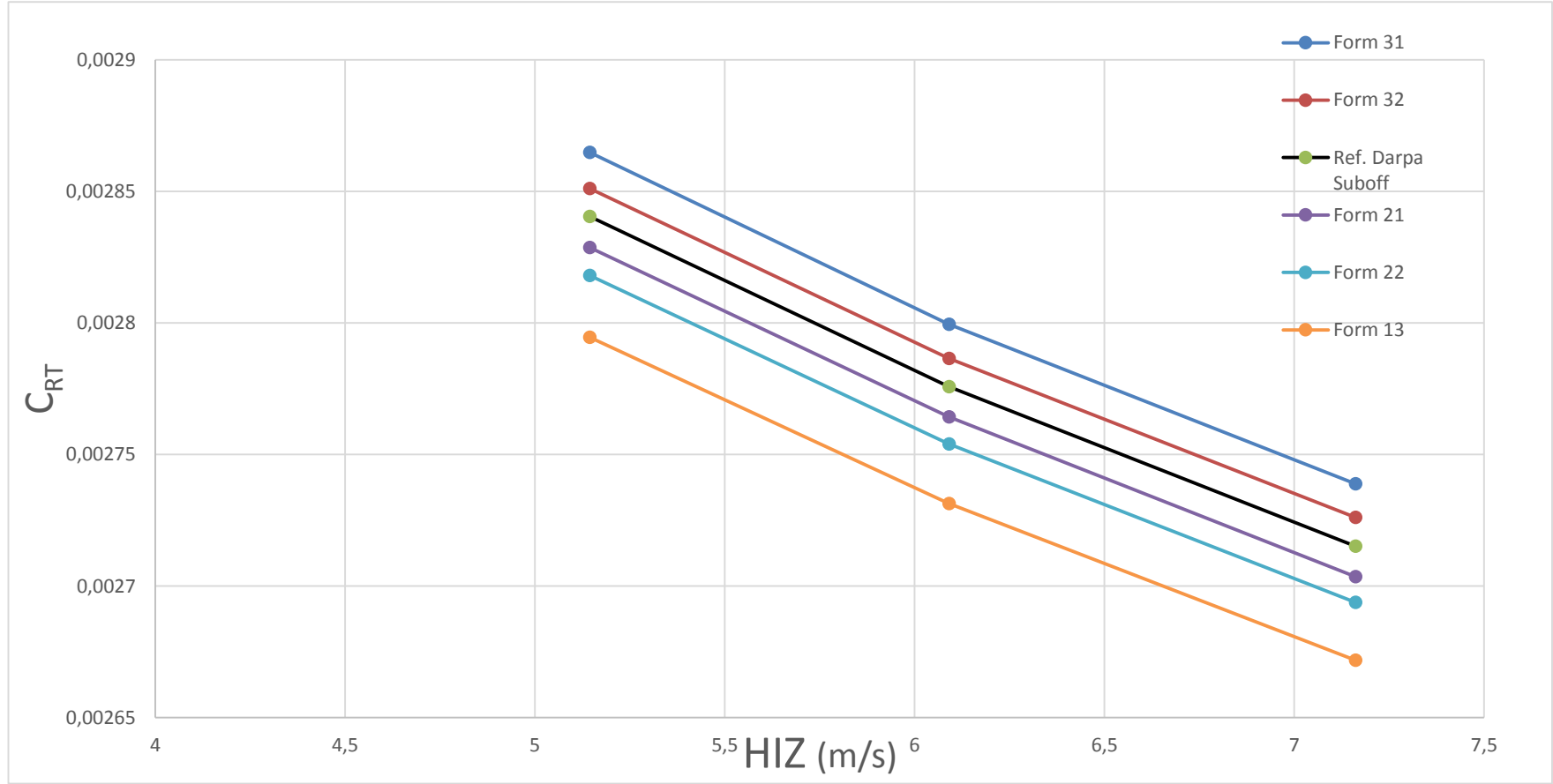
Şekil 3.8’da verilen grafikte deney verileri ile sayısal hesaplama sonucunda ulaşılan direnç değerleri arasında 5.1444 m/s hız için %8, 6.091 m/s ve 7.161 m/s hızları için yaklaşık %9 fark olduğu görülmektedir. Deney sonuçları doğru varsayıldığında, sayısal hesaplamalardaki bu hata oranlarının çok yüksek olmaması ve çalışmanın amacının farklı formların dirençlerinin birbirine göre kıyaslanması olduğu sebebiyle, kabul edilebilir hatalar sınırları içinde mütalaa edilmektedir. Ayrıca, sayısal hesaplamaların gerçekleştirileceği bütün formlar için bu hata oranının yaklaşık geçerli olmasından ötürü, göreceli direnç kıyaslamalarına dayanılarak belirlenecek en düşük direnç değerine sahip formun gerçekten de optimum form olacağı düşünülebilir.

3.5 Yeni Türetilen Formlar İle Darpa Suboff Modelin Kıyaslanması

Sayısal hesaplama sonucunda, yeni türetilen formlar ile Darpa Suboff modeline ait farklı hızlardaki boyutsuz direnç katsayısı değerleri Şekil 3.10’da grafik olarak verilmektedir. Grafikte verilen tüm denizaltı formları için elde edilen direnç-hız eğrileri kıyaslandığında, Form 13’ün (Şekil 3.9) gerek yeni türetilen formlar arasında gerekse referans olarak alınan Darpa Suboff denizaltı modeline göre direnç açısından daha iyi olduğu açıkça görülmektedir.

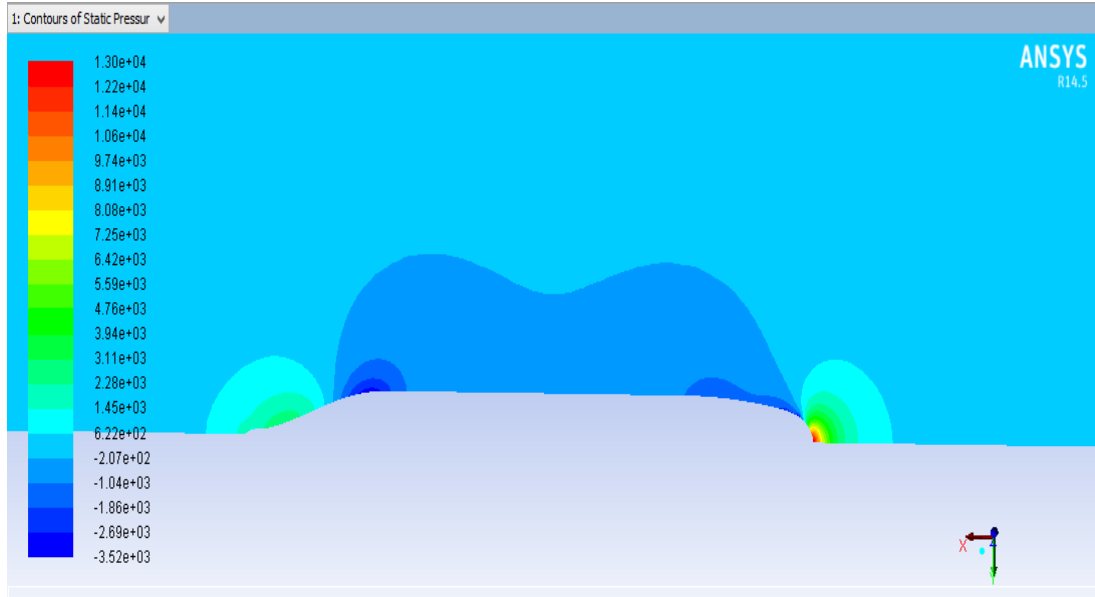


Şekil 3.9 : Rhinoceros 5.0’da çizilmiş denizaltı formu Form 13.

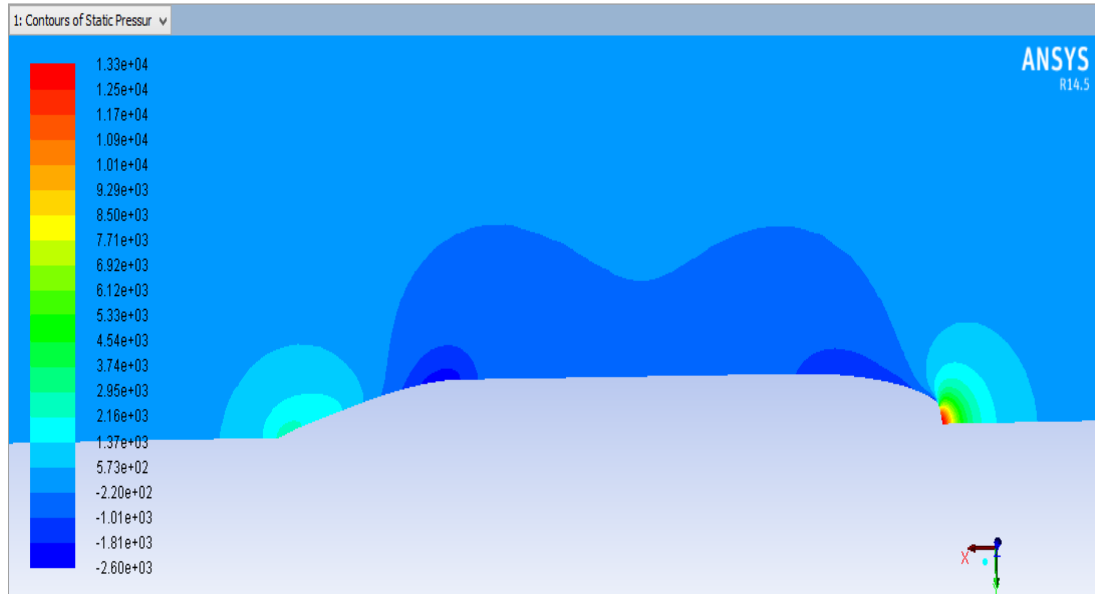


Şekil 3.10 : Değişen hız değerlerine karşılık gelen boyutsuz direnç katsayıları.

Ayrıca, Form 13 ile Darpa Suboff denizaltı modelinin 5.1444 m/s hız değeri için ANSYS-Fluent programında model boyunca statik basınç dağılımı şekil 3.11 ve şekil 3.12’de gösterilmektedir. Form 13’ün yüzey üzerindeki statik basınç dağılımı referans form olan Darpa Suboff modele göre özellikle de modelin kış formunda daha düzgün olduğu görülmektedir. Her iki modelin baş formlarındaki basınç dağılımı kıyaslandığında basıncın, Form 13’ün baş formunda daha şeffaf dağılıma sahip olduğu gözlemlenmektedir.

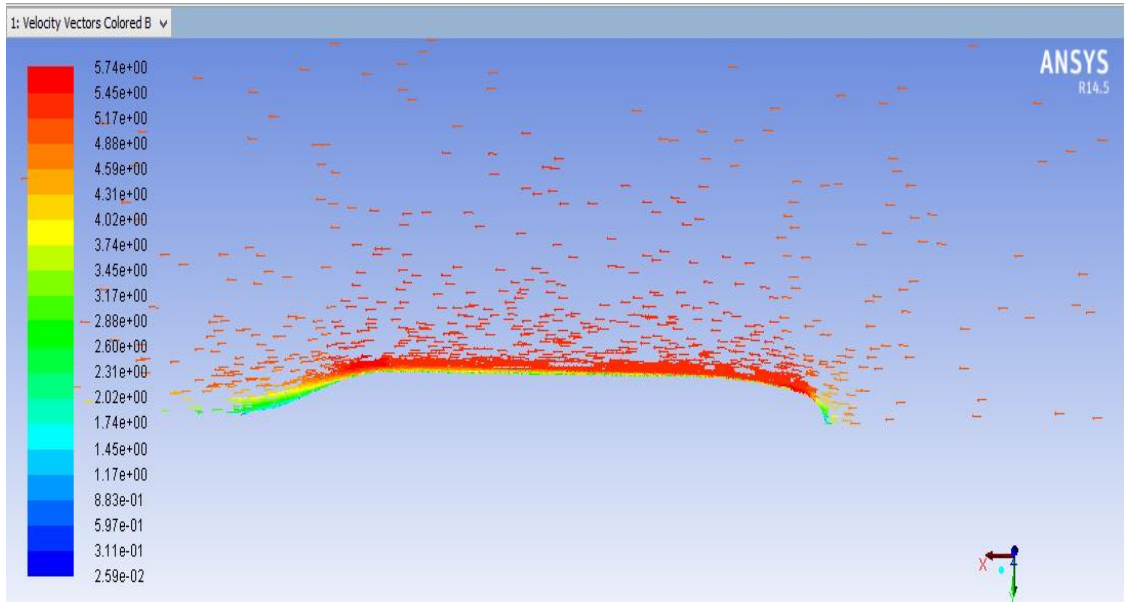


Şekil 3.11 : 5.14 m/s hız değerindeki Darpa Suboff modelin statik basınç dağılımı.

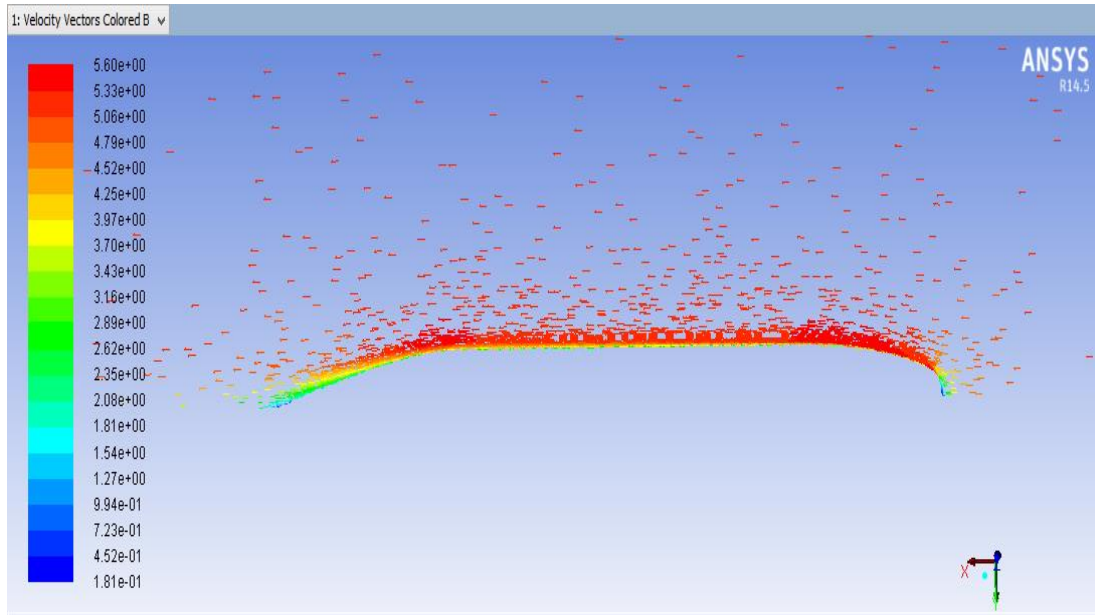


Şekil 3.12 : 5.14 m/s hız değerindeki Form 13’ün statik basınç dağılımı.

Bununla birlikte şekil 3.13 ve şekil 3.14'te Darpa Suboff ve Form 13'e ait hız vektörleri verilmiştir. Verilen grafiklerde hız vektörlerinin dağılımı kıyaslandığında Darpa Suboff modelin kış formunda yeni türetilen Form 13'e kıyasla akışın formu daha önce terk ettiği görülmektedir. Modelin eksenel simetri olmasından dolayı 4'te 1'i (çeyreği) üzerinde çalışıldığından verilen şekiller de modelin 4'te 1'lik bölümündeki değerleri göstermektedir. Böylece, bu çalışmanın sonucunda, Darpa Suboff denizaltı modelinin baş ve kış formlarında küçük değişiklikler yapılarak elde edilen yeni formlar arasında Baş Formu 1 ve Kış Formu 3 kullanılarak türetilen yeni denizaltı formu Form 13 takıntısız formunun direnç karakteristikleri açısından en uygun form olduğunu ifade edebiliriz.



Şekil 3.13 : 5.14 m/s hız değerindeki Darpa Suboff modelin hız vektörleri.



Şekil 3.14 : 5.14 m/s hız değerindeki Form 13'e ait hız vektörleri.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, öncelikle literatürde kabul görmüş bir denizaltı modeli olan Darpa Suboff denizaltı modeline ait değişik hızlardaki model deneylerine ait direnç değerleri, bir HAD programı kullanılarak elde edilmeye çalışılmıştır. Yapılan hesaplamaların deneysel sonuçlara kıyasla kabul edilebilir hata sınırları içinde sonuçlar vermesi kullanılan programın en azından ön hesaplamalar açısından güvenilir olduğunu göstermiştir. Bu testlerin ardından, referans olarak kabul edilen Darpa Suboff denizaltısının baş ve kış formlarında nispeten küçük değişiklikler yapılarak yeni formlar türetilmiş ve yeni türetilen bu formların direnç değerleri de sayısal olarak hesaplanmıştır. Direnç hesaplamaları yapılırken, referans model için belirlenen uygun ağ örgüsü bütün yeni formlarda aynı olacak şekilde uygulanmıştır. Yalnızca aynı ağ örgüsü değil, aynı zamanda yazılım programında kullanılan tüm parametreler de hepsi için aynı seçilmiştir. Böylece aynı tip uygulama ve aynı parametreler için gerçekleştirilen sayısal direnç değerleri, referans model olan Darpa Suboff denizaltı formuna ait direnç değerleriyle mukayese edilerek direnç açısından en uygun denizaltı formunun belirlenmesine çalışılmıştır.

Referans Darpa Suboff modelin ve yeni türetilen formların 5.1444 m/s, 6.091 m/s ve 7.161 m/s hızlarındaki direnç değerleri sayısal olarak hesaplanmıştır. Fluent programı kullanılarak bu üç farklı hız için elde edilen direnç değerleri, model deneyi yapılarak elde edilmiş direnç değerlerinden 5.1444 m/s için yaklaşık %8, 6.091 m/s ve 7.161 m/s için yaklaşık %9 daha küçük olacak şekilde elde edilmiştir. Deney sonuçları ile sayısal hesaplama sonuçları mukayese edildiğinde sayısal hesaplama sonuçlarının daha küçük bulunması nedenleri arasında deneyde yüzey üzerindeki bozulmalar ve pürüzlülük gibi direnci arttırıcı etkenler olabilirken kullanılan programda yüzeyin düzgün ve pürüzsüz olarak modellenmesi ve RANS denklemlerinde türbülans terimlerinin tam olarak hesaplanamaması söylenebilir. Darpa Suboff için yapılan ağ örgüsü türetilen diğer dokuz forma aynen uygulanmış ve aynı parametreler kullanılarak Fluent'te koşturulmuştur. Hesaplama koşullarının aynı tutulması nedeni ile hesaplama sonucu oluşacak hata oranlarının büyük ölçüde birbirine yakın olacağı varsayılmaktadır. Ayrıca, çalışmanın amacı kesin direnç değerlerine ulaşmaktan çok farklı formların

direnç değerlerini birbiri ile kıyaslamak olduğu için, hesaplamalardaki hataların etkisi en uygun formun belirlenmesinde daha da az olacaktır. Bu değerlendirmeler ışığında bakıldığında, diğer formlara kıyasla takıntısız tekne direnç değerleri en düşük form olan Form 13'ün çalışmada amaçlanan en uygun form özelliklerini sağladığı söylenebilir. Yeni türetilen formların model direnç deneyleri yapıldığında, Form 13 için elde edilecek direnç değerinin sayısal hesaplama sonucu bulunan değerden farklı çıkması muhtemeldir. Fakat diğer formların deney verilerine kıyasla direnç açısından daha iyi bir form olduğu sonucu büyük olasılıkla değişmeyecektir.

Bundan sonraki çalışmalarda yeni türetilen formlara ait model deneyleri yapılabilir ve ulaşılan deney sonuçları ile bu çalışmada sayısal hesaplama sonucu bulunan değerlerle kıyaslamalar yapılabilir. Bu alışma yalnızca direnç açısından en uygun formun belirlenmesi ile sınırlı tutulduğu için ayrıca stabilite ve sevk açısından herhangi bir değerlendirme yapılmamıştır. Hem direnç açısından, hem stabilite açısından, hem de sevk açısından en ideal formu oluşturabilmek için mevcut türetilen formların sevk ve stabilite karakteristiklerinin de göz önünde bulundurularak çok daha kapsamlı bir optimizasyon çalışması yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Wu, Y., Cui, W. and Zhou, G.** (2001). Practical Dizayn of Ships and Other Floating Structures, cilt 1, sf. 60.
- [2] **Yan, K., Zhao, F., Wu, C., Yang, L.** (t.y.). Numerical and experimental uncertainty analysis for the prediction of resistance and wave profile of a surface ship model, China.
- [3] **Moonesun, M., Javadi, M., Charmdooz, P. and Mikhailovich, K.U.** (2013). Evaluaiton of submarine model test in towing tank and comparison with CFD and experimental formulas for fully submerged resistance, Indian J. Mar. SCI., Vol. 42, No. 8, Aralık.
- [4] **Gross, A., Kremheller, A. and Fasel, H.F.** (2011). Simulation of flow over Suboff Bare Hull Model, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 4-7 Ocak, Orlando, Florida.
- [5] **Chase, N.** (2012). Simulations of the Darpa Suboff submarine including self-propulsion with the E1619 Propeller, The University of Iowa City, Iowa.
- [6] **Feng, D., Wang, X. and Zang, Z.** (2015). Large Eddy Simulation of DARPA SUBOFF for $Re = 2.65 \times 10^7$.
- [7] **Nancy, C.G., Thomas, T.H., Ming, S.C.** (1989). Geometric Characteristics of Darpa Suboff Models (DTRC Model Nos. 5470 and 5471), Ship Hydromechanics Department, David Taylor Research Center.
- [8] **Han-Lieh, L. and Thomas, T.H.** (1998). Summary of Darpa Suboff Experimental Program Data, Hydromechanics Directorate, Naval Surface Warfare Center, Carderock Division (NSWCCD).
- [9] **Url-1** <<http://www.cfd-online.com/Tools/yplus.php>>, alındığı tarih: 13.02.2015.
- [10] **Arslan, S.** (2013). Su Altı Araçları İçin Yeni Geliştirilen Hidrodinamik Modelleme Yöntemleri Kullanılarak Otonom Bir Su Altı Aracının Hidrodinamik Karakteristiğinin İncelenmesi (yüksek lisans tezi), İTÜ, İstanbul.
- [11] **Menter, F.R., Kuntz, M., Langtry, R.** (2003). Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model, Turbulence, Heat and Mass Transfer, 4.

- [12] **Karim M.M., Rahman, M.M., Alim, M.A.** (2010). Computation of Turbulent Viscous Flow around Submarine Hull Using Unstructured Grid, 25 Mayıs.
- [13] **Karim, M.M., Rahman, M.M., Alim, M.A.** (2011). Comparative study between flows around sphere and pod using finite volume method, Journal of Naval Architecture and Marine Engineering 8, sf. 49-58.
- [14] **Url-2** <[http://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model#Specific_Dissipation Rate](http://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model#Specific_Dissipation_Rate)>, alındığı tarih: 21.04.2015.
- [15] **ANSYS, Inc.** (2012). ANSYS Fluent User's Guide, Release 14.5.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Gökhan BUDAK
Doğum Yeri ve Tarihi : Kırkkale / 02.04.1987
E-Posta : budakg@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010, İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği