

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GEMİ FORMU, DÜMEN VE PERVANE ETKİLEŞİMİNİN SAYISAL  
İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Ömer Kemal KINACI**

**Gemi ve Deniz Teknolojisi Anabilim Dalı**

**Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Programı**

**HAZİRAN 2013**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GEMİ FORMU, DÜMEN VE PERVANE ETKİLEŞİMİNİN SAYISAL  
İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Ömer Kemal KINACI  
508082101**

**Gemi ve Deniz Teknolojisi Anabilim Dalı**

**Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Abdi KÜKNER**

**HAZİRAN 2013**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 508082101 numaralı Doktora Öğrencisi **Ömer Kemal KINACI**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**Gemi Formu, Dümen ve Pervane Etkileşiminin Sayısal İncelenmesi**" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Prof. Dr. Abdi KÜKNER** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. Şakir BAL** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Mesut GÜNER** .....  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Kadir SARIÖZ** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN** .....  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **16 Mayıs 2013**  
**Savunma Tarihi :**    **27 Haziran 2013**



*Eşime ve kızıma,*



## ÖNSÖZ

Doktora yapmak bu yola giren herkesin bildiği gibi oldukça sancılı bir süreçtir ve bu dönemi nispeten daha rahat atlatabilmek için önünüzü açan hocalarınızın, size huzur veren bir ailenizin ve yardımsever dostlarınızın olması gerekir. Şanslıyım ki ben hepsine sahiptim. Tezin ortaya çıkmasında bana baştan sona yardımcı olan danışman hocam Prof. Dr. Abdi Kükner'e bana kattıklarından dolayı ve bana en az kendi öğrencisi kadar vakit ayırarak ilgilenen hocam Prof. Dr. Şakir Bal'a ise sabır ve ilgisinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Sıkıntılı günlerde beni hep dinleyen anneme ve babama; bana yaklaşık 7 yıldır eşlik eden ve akademik hayatımda desteğini bir gün olsun esirgemeyen eşime ayrı bir paragraf açmak isterim. Moralimi ve çalışma azmimi hep onlar sayesinde üst düzeyde tutmayı başarabildim.

Tezlerin önsöz kısımlarında teşekkür furyası bitmez. Ama emeklerini takdir etmeden geçemeyeceğim arkadaşlarım ve bazı noktaları aşmakta bana destek veren insanlar çok. Tezi yönlendiren ve bana her daim desteğini hissettiren hocam Prof. Dr. Mesut Güner'e, birikimlerini paylaşmaktan çekinmeyen Yaşar Gül ve Ferdi Çiçek'e, CFD analizleri esnasında bilgilerine çokça danıştığım arkadaşlarım Ali Doğrul ve Yasemin Arıkan'a, CAD konusunda bana hep destek olan Cem Çolakoğlu'na, belki farkında olmasa da benim doktora yapmam için önümdeki engeli kaldıran Doç. Dr. Barbaros Okan'a, yüksek lisans yapmama destek vererek benim önümü açan eski müdürüm Galip Ülgen'e, eğitim hayatım boyunca uzaktan hep desteğini hissettiğim Mustafa Tuna'ya, kendilerinden çok şey öğrendiğim Yıldız ve İTÜ'deki tüm hocalarıma ve beraber birçok şey paylaştığım arkadaşlarıma teşekkür ederim. Herkesin ismini şu küçük alanda anamasam da hepsine tek tek çok minnettarım.

Mayıs 2013

Ömer Kemal KINACI



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xxi
<b>1 GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Bir Cismin Akışkan İçerisindeki Konumu ve Problemin Tanımı .....	1
1.2 Tez Çalışmasının Temel Amacı ve İzlenen Yol .....	3
1.2.1 İzlenen yol.....	3
1.2.2 Amaç.....	4
1.3 Özgün Değer ve Yaygın Etki .....	5
1.3.1 Özgün değer .....	5
1.3.2 Yaygın etki.....	5
1.4 Problemin Tarihsel Gelişimi ve Literatür Taraması.....	6
<b>2 YÖNTEMLER.....</b>	<b>13</b>
2.1 Sınır Elemanları Yöntemi (SEM).....	13
2.1.1 Laplace denklemi.....	13
2.1.2 Green teoremi .....	14
2.1.3 Green teoreminin kanat teorisine uygulanması.....	15
2.1.4 Sınır elemanları yönteminin matematiksel ifadesi .....	18
2.2 Sonlu Hacim Yöntemi (SHM) .....	21
2.2.1 Transport denklemi.....	21
2.2.2 RANSE denklemi .....	29
2.2.3 Sonlu hacim yönteminin matematiksel ifadesi.....	30
<b>3 BAZI TEMEL PROBLEMLERİN ÇÖZÜMÜ .....</b>	<b>33</b>
3.1 İki Boyutlu Silindir Etrafındaki Akış .....	33
3.1.1 Analitik çözüm .....	34
3.1.2 Viskoz olmayan çözümler.....	37
3.1.3 Viskoz olmayan akımda yöntemlerin değerlendirilmesi .....	40
3.1.4 Viskoz akımda çözümler.....	41
3.1.5 Viskoz akımda yöntemin değerlendirilmesi .....	42
3.2 Kalınlığı Olmayan Düz Bir Levha Etrafındaki Akış.....	42
3.2.1 Analitik çözüm .....	42
3.2.2 Sabit şiddetli kaynak yöntemi .....	43
3.2.3 Sabit şiddetli kaynak – dipol yöntemi .....	44
3.2.4 Yöntemlerin değerlendirilmesi.....	46
3.3 İki Boyutlu Hidrofoil Etrafındaki Akış .....	46
3.3.1 Deney sonuçları.....	46
3.3.2 Hücum açısının sıfır olduğu durum.....	47

3.3.3	Hücum açılı durumu.....	51
3.3.4	Yöntemlerin değerlendirilmesi .....	55
3.4	İki Boyutlu Etkileşim Problemi .....	55
3.4.1	Doğrudan bulma yöntemi .....	56
3.4.2	İteratif yöntem.....	57
3.4.3	Elde edilen sayısal sonuçlar .....	59
3.4.4	Kullanılan zaman .....	62
3.5	Etkileşim Problemi İçin Değişik Parametrelerin Etkisi .....	64
3.5.1	Yöntem .....	65
3.5.2	Sayısal uygulama .....	67
3.5.3	Yöntemin doğrulanması .....	70
3.5.4	Parametrik sayısal sonuçlar .....	70
3.5.5	Parametrelerin genel bir değerlendirmesinin yapılması.....	77
3.6	Küre Etrafındaki Akış .....	78
3.6.1	Analitik çözüm.....	78
3.6.2	Viskoz olmayan çözüm .....	81
3.6.3	Viskoz çözüm.....	83
3.6.4	Yöntemin değerlendirilmesi .....	84
3.7	Kanat Etrafındaki Akış .....	85
3.7.1	Sınır elemanları yöntemi .....	87
3.7.2	Sonlu hacim yöntemi.....	90
3.8	Çözülen Problemler Işığında Yöntemlerin Değerlendirilmesi .....	93
<b>4</b>	<b>GEMİ – DÜMEN ETKİLEŞİMİ.....</b>	<b>97</b>
4.1	Örnek Geminin Tanıtılması .....	98
4.2	Sayısal Uygulama .....	99
4.3	Bulgular .....	101
4.4	Sonuç.....	106
<b>5</b>	<b>GEMİ – PERVANE ETKİLEŞİMİ.....</b>	<b>107</b>
5.1	Kullanılan Gemi ve Pervanenin Hidrostatik Özellikleri .....	109
5.2	Yöntem .....	111
5.3	Açık Su Testi Yapılan Pervanenin HAD Sonuçları ile Karşılaştırılması. 112	
5.4	Yalın Tekne İçin HAD Yönteminin Gerçeklenmesi.....	117
5.5	Gemi Pervane Etkileşiminin Pervane Performansına Etkisi .....	120
5.6	Sonuç.....	128
<b>6</b>	<b>GEMİ – PERVANE – DÜMEN ETKİLEŞİMİ .....</b>	<b>131</b>
6.1	Kullanılan Gemi, Pervane ve Dümenin Özellikleri .....	132
6.2	Yöntem .....	133
6.3	Gemi, Pervane ve Dümen Etkileşimi .....	134
6.4	Sonuç.....	138
<b>7</b>	<b>SONUÇLAR.....</b>	<b>141</b>
	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>145</b>
	<b>EKLER .....</b>	<b>149</b>
	<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>189</b>

## **KISALTMALAR**

<b>HAD</b>	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
<b>RANSE</b>	: Reynolds – Averaged Navier Stokes Denklemi
<b>LDV</b>	: Lazer Doppler Hız Ölçer
<b>DWT</b>	: Deadweight Tonnage
<b>DTC</b>	: Duisburg Test Case
<b>DTMB4119</b>	: David Taylor Model Basin 4119
<b>SEM</b>	: Sınır Elemanları Yöntemi (Metodu)
<b>SHM</b>	: Sonlu Hacim Yöntemi (Metodu)
<b>SIMPLE</b>	: Semi – Implicit Method for Pressure – Linked Equations



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 3.1 : Silindir için hız ve potansiyel değerleri .....	36
Çizelge 3.2 : Doğrudan bulma yönteminin zaman tüketim sonuçları .....	63
Çizelge 3.3 : İteratif yöntemin zaman tüketim sonuçları.....	63
Çizelge 3.4 : Küre için hız ve basınç değerlerinin analitik sonuçları.....	81
Çizelge 4.1 : Geminin hidrostatik özellikleri.....	99
Çizelge 4.2 : Takıntılı ve takıntısız durumdaki dirençlerin karşılaştırılması.....	101
Çizelge 5.1 : DTC gemisinin ana boyutları .....	110
Çizelge 5.2 : DTC pervanesinin detayları.....	110
Çizelge 5.3 : Üç değişik yolla bulunan DTMB4119 pervane performansı .....	113
Çizelge 5.4 : Farklı yöntemlerin deney sonucuna göre hata oranları.....	114
Çizelge 5.5 : Pervane performansı için HAD'ın hata yüzdeleri .....	117
Çizelge 5.6 : HAD ve deneysel yollarla hesaplanan direnç katsayısı değerleri.....	120
Çizelge 5.7 : Gemi gövdesinin pervane performansına etkisi .....	123
Çizelge 6.1 : Dümencilik ve dümensiz pervane performansı.....	136
Çizelge C.1: İki boyutlu silindirin koordinatları.....	162
Çizelge F.1 : 0° NACA0012 ile 5° NACA4412 kanat koordinatları. ....	187



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Akış içindeki cisimler süperpoze edilerek çözülemezler. ....	1
Şekil 2.1 : C kapalı eğrisinin normal birim vektörü.....	14
Şekil 2.2 : C kapalı eğrisinin normal birim vektörü [26].....	15
Şekil 2.3 : Cisim ve iz yüzeyi üzerinde panel dağılımı [26].....	19
Şekil 2.4 : Panel numaralandırması ve keyfi P noktası ile ilişkisi .....	20
Şekil 2.5 : Kütleli debinin izahı için izafi bir A hacmi.....	25
Şekil 2.6 : Kontrol hacmi ve yüzeye normal vektör.....	26
Şekil 2.7 : 1 – boyutta sonlu hacim yönteminin ayrıklaştırılması [28] .....	31
Şekil 3.1 : Serbest akım içerisine yerleştirilmiş bir dipol [26] .....	34
Şekil 3.2 : Düzgün akım içerisine bir dipolün yerleştirilmesi .....	36
Şekil 3.3 : Silindirin farklı panel sayılarında kaynak yöntemi sonuçları.....	37
Şekil 3.4 : Silindirin farklı panel sayılarında kaynak – dipol yöntemi sonuçları.....	38
Şekil 3.5 : Sonlu hacim yönteminin kullandığı ağ yapısı .....	39
Şekil 3.6 : Sonlu hacim yönteminin analitik yöntemle karşılaştırılması .....	40
Şekil 3.7 : Sonlu hacim yöntemiyle silindir etrafındaki akım hatları.....	41
Şekil 3.8 : Sonlu hacim yöntemiyle silindir etrafındaki hız vektörleri.....	41
Şekil 3.9 : Kaynak [29]’daki akım hattının gösterilişi .....	42
Şekil 3.10 : Düz levhada basınç dağılımı için analitik sonuç .....	43
Şekil 3.11 : Kaynak yöntemiyle düz levha üzerindeki basınç dağılımı .....	44
Şekil 3.12 : Kaynak – dipol yöntemiyle düz levha üzerindeki basınç dağılımı.....	44
Şekil 3.13 : Kaynak – dipol yöntemiyle analitik sonucun karşılaştırılması .....	45
Şekil 3.14 : NACA0012 için deneysel basınç dağılımı sonuçları [30].....	47
Şekil 3.15 : Kaynak yöntemiyle literatürdeki sonucun karşılaştırılması .....	48
Şekil 3.16 : Kaynak – dipol yöntemiyle literatürdeki sonucun karşılaştırılması .....	49
Şekil 3.17 : Kaynak – dipol yöntemiyle artan panel sayısında alınan sonuç .....	49
Şekil 3.18 : Sonlu hacim yöntemi için kurulan ağ eleman örgüsü.....	50
Şekil 3.19 : Sonlu hacim yöntemiyle kaynak – dipol yönteminin karşılaştırılması...50	
Şekil 3.20 : Sonlu hacim yöntemi ile hesaplanan hidrofoil etrafındaki akım hızı .....	51
Şekil 3.21 : Asimetrik akış için kaynak yöntemi sonuçları .....	51
Şekil 3.22 : Asimetrik akış için kaynak – dipol yöntemi sonuçları .....	52
Şekil 3.23 : Asimetrik akış için sonlu hacim yöntemi sonuçları.....	54
Şekil 3.24 : Sonlu hacim yöntemi ile hidrofoil etrafındaki akım vektörleri .....	55
Şekil 3.25 : Doğrudan bulma yönteminde sistemin bir panel üzerindeki gösterilişi..56	
Şekil 3.26 : Tandem hidrofoil sisteminin temsili .....	60
Şekil 3.27 : Mesafenin 1.05 olduğu durumda farklı yöntemlerin verdiği sonuçlar ...60	
Şekil 3.28 : Mesafenin 1.5 olduğu durumda farklı yöntemlerin verdiği sonuçlar .....	61
Şekil 3.29 : Mesafenin 2 olduğu durumda farklı yöntemlerin verdiği sonuçlar .....	62
Şekil 3.30 : Doğrudan bulma ve iteratif yöntemlerin zaman kullanımı .....	64
Şekil 3.31 : Geliştirilen kodun algoritması .....	69
Şekil 3.32 : Kaynak [31]’de kat kat hidrofoil sisteminin temsili .....	70
Şekil 3.33 : Literatür sonuçlarıyla geliştirilen kodun sonuçlarının karşılaştırılması..70	

Şekil 3.34 : Mesafe etkisinin temsili .....	72
Şekil 3.35 : Mesafe değişikçe kanatların ürettiği sirkülasyon değerleri .....	72
Şekil 3.36 : Kalınlık değişikçe arkadaki kanadın ürettiği sirkülasyon değerleri .....	74
Şekil 3.37 : Kalınlık değişikçe öndeki kanadın ürettiği sirkülasyon değerleri .....	74
Şekil 3.38 : Hücüm açısının etkileşimli ve etkileşimsiz hallerdeki etkisi .....	76
Şekil 3.39 : Arkadaki hidrofoilin kort boyu değişiminin sirkülasyon üzerine etkisi .....	77
Şekil 3.40 : Küre etrafındaki akışın temsili .....	79
Şekil 3.41 : Küre etrafındaki akış için sonlu hacim yönteminin kurulması .....	82
Şekil 3.42 : Viskoz olmayan durum için küre etrafındaki akış hızı .....	82
Şekil 3.43 : Viskoz olmayan durum için küre etrafındaki hız vektörleri .....	83
Şekil 3.44 : Küre için viskoz olmayan çözüm ile viskoz çözümün karşılaştırılması .....	84
Şekil 3.45 : Sonlu hacim yönteminin analitik sonuçla karşılaştırılması .....	84
Şekil 3.46 : İki boyutlu akış ile üç boyutlu akış farkının açıklanması için bir resim .....	86
Şekil 3.47 : SEM ile 400 panele ayrılmış kanat üzerindeki basınç dağılımı .....	87
Şekil 3.48 : SEM ile 1600 panele ayrılmış kanat üzerindeki basınç dağılımı .....	88
Şekil 3.49 : Aynı kanat için açıklık oranının 8 olduğu durumda basınç dağılımı .....	89
Şekil 3.50 : Aynı kanat için iki boyutlu durumda basınç dağılımı .....	89
Şekil 3.51 : Açıklık oranının 8 olduğu durum ile 2-B sonucun karşılaştırılması .....	90
Şekil 3.52 : Kanat etrafındaki akışın çözülmesi için kullanılan ağ yapısı .....	91
Şekil 3.53 : Viskoz olmayan akış için SHM ile bulunan basınç dağılımı .....	91
Şekil 3.54 : Viskoz akış için SHM ile bulunan basınç dağılımı .....	92
Şekil 3.55 : Viskoz akış için SHM ile bulunan basınç dağılımı .....	93
Şekil 3.56 : Küre ile silindir üzerindeki basınç dağılımlarının karşılaştırılması .....	94
Şekil 4.1 : Kullanılan geminin kış formunun görünümü .....	99
Şekil 4.2 : Dümensiz durumda gemi kış tarafındaki akım hatlarının görünümü .....	103
Şekil 4.3 : Dümensiz durumda gemi kış tarafındaki akım hatlarının görünümü .....	103
Şekil 4.4 : Sırasıyla dümensiz (a) ve dümensiz (b) durumda pervane iz yüzeyleri .....	104
Şekil 4.5 : Dümensiz durumda gemi üzerindeki toplam basınç dağılımı .....	105
Şekil 4.6 : Dümensiz durumda gemi üzerindeki toplam basınç dağılımı .....	105
Şekil 5.1 : DTC teknesinin genel bir görünümü .....	110
Şekil 5.2 : DTMB4119 için sonuçların karşılaştırılması .....	113
Şekil 5.3 : Açık su pervanesi akış bölgesinin bir görünümü .....	114
Şekil 5.4 : Pervane performansı için HAD ile deney sonuçlarının karşılaştırılması .....	115
Şekil 5.5 : $J = 0.8$ için pervane izinin görünümü .....	116
Şekil 5.6 : Pervane üzerinde basınç katsayısı dağılımının görünümü .....	116
Şekil 5.7 : Yalın tekne akış bölgesinin bir görünümü .....	118
Şekil 5.8 : HAD ile ITTC57 sonuçlarının karşılaştırılması .....	119
Şekil 5.9 : Altan akışkan bölgesinin görünümü .....	121
Şekil 5.10 : Sistemin yakınsaklığını gösteren parametrelerin görünümü .....	122
Şekil 5.11 : Pervane performansı üzerinde geminin varlığının etkisi .....	122
Şekil 5.12 : Gemi etkileşimli pervane üzerindeki akım hatları .....	124
Şekil 5.13 : Açık su pervanesi üzerindeki akım hatları .....	124
Şekil 5.14 : Kış taraftaki basınç katsayısı konturları .....	125
Şekil 5.15 : Pervane nominal ve efektif izlerinin karşılaştırılması .....	125
Şekil 6.1 : Dümensiz durumda gemi kış tarafındaki akım hatlarının görünümü .....	132
Şekil 6.2 : Pervaneyi kapsayan akışkan bölgesinin gösterimi .....	134
Şekil 6.3 : Pervaneyi kapsayan akışkan bölgesinin gösterimi .....	135
Şekil 6.4 : Dümensiz ve dümensiz pervane performans grafiği .....	135
Şekil 6.5 : Dümensiz durumda pervaneden çıkan akım hatları .....	137
Şekil 6.6 : Pervane yüzeyi üzerindeki basınç dağılımı .....	138

<b>Şekil C.1</b> : İki boyutlu silindir geometrisi .....	162
<b>Şekil F.1</b> : 0° hücum açılı durumda NACA0012 kanat geometrisi.....	188
<b>Şekil F.2</b> : 5° hücum açılı durumda NACA4412 kanat geometrisi.....	188



## **GEMİ GÖVDE FORMU, DÜMEN VE PERVANENİN SEVK SİSTEMİ AÇISINDAN ETKİLEŞİMİNİN İNCELENMESİ**

### **ÖZET**

Cisimler etrafındaki akış problemleri oldukça karmaşık problemlerdir ve ancak belirli yaklaşımlar yapılarak özel şartlar altında çözümler. Tüm takıntıları yerinde olan bir gemi etrafındaki akışın çözülmesi uzun seneler boyunca tek tek yapılmış ve birbirleriyle olan etkileşimleri göz ardı edilmiştir. Son yıllarda hızla gelişen bilgisayar teknolojisi vasıtasıyla ise bu sorunlar zamanla aşılmaktadır. Artık türbülans modelleri kullanılarak bir gemi etrafındaki akış dümen ve pervanesiyle birlikte çözülebilir hale gelmiştir.

Bilgisayar teknolojisinin baş döndürücü bir hızla gelişmesi ile Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğini (HAD) baz alan ticari bilgisayar programları da gelişmiş ve daha ulaşılabilir olmuştur. Dolayısıyla son senelerde HAD kullanılarak yapılan makale ve tezlerin sayısı müthiş derecede artmıştır. Bu çalışmanın da bir kısmı ticari bir HAD programı kullanılarak yapılmıştır.

Tezin konusu gemi, dümen ve pervane etkileşiminin incelenmesi olmasına rağmen; konuya hemen giriş yapılmamış ve önce bazı temel problemler çözülerek akış içindeki cisimleri etkileyen parametrelerin anlaşılmasına çalışılmıştır. Etkileşimi etkileyen parametrelerin incelenmesi için ticari HAD programı kullanılmasının yanında, yazar kendi bilgisayar kodlarını da geliştirmiştir. HAD programı sonlu hacim yöntemi tabanında yazılmışken, bu tez kapsamında geliştirilen bilgisayar programları sınır elemanları yöntemini baz alarak yazılmıştır.

Tezin ana konusuna adım adım yaklaşma prensibine dayanarak çalışmaya öncelikle iki boyutlu cisimlerden başlanılmıştır. İki boyutlu tek cisim etrafındaki akışın çözümlemesi çeşitli yöntemlerle yapılmıştır. Daha sonra iki boyutlu bir akışta etkileşim problemi incelenmiş ve belirli parametrelerin akışı nasıl etkilediği araştırılmıştır. İki boyutlu analizler kapsamlı olarak anlaşıldıktan sonra üç boyutlu cisimler etrafındaki akışa geçilmiş ve daha sonra tezin ana konusu olan gemi, dümen ve pervanenin birbirleriyle olan etkileşiminin incelenmesine geçilmiştir.

Gemi, pervane ve dümenin akış içindeki etkileşiminin birçok farklı koldan incelenmesi mümkündür. Bu çalışmada etkileşim hidromekanik açıdan incelenmiştir. Gemi sevk sisteminin en önemli parçalarından birisi pervanedir ve pervaneye gelen akımın mümkün olduğunca düzgün olması istenir. Pervane dizaynı yapılırken, pervane iz yüzeyine gelen akış hızı (genellikle deneysel olarak) gemi takıntısızken hesaplanır ancak dümen pervaneye gelen akımı değiştirir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada pervane dizaynı yapılırken dümen etkilerinin hesaba katılmasının önemi anlatılmıştır.

Bir gemi üretim safhasına geçmeden evvel sevk sisteminin denenmesi için öncelikle pervane açık su testine tabi tutulur. Deney havuzunda pervane tek başına çalıştırılır ve itme, tork, verim gibi performans kriterleri açısından incelenir. Pervane

optimizasyonu açık su testinden gelen sonuçlara göre yapılır. Ancak açık denizde pervane tek başına çalışmamakta; gemi ve dümenle bir takım oluşturarak sevk sistemini yönetmektedir. Dolayısıyla pervanenin açık su performansının iyi olması her gemiye uygulanabileceği anlamına taşımamaktadır. Pervane optimizasyonu yapılırken veya pervane performansı incelenirken gemi ve dümenin etkileri hesaba katılarak işlem yapılmalıdır.

Her ne kadar bilgisayar teknolojisi çoğu engeli ortadan kaldırmış olsa da, sayısal çalışmalar henüz yolun başındadır. Geliştirilmeye açık birçok alan bulunmakta ve bugünkü haliyle hala birçok kabul yapılarak çözümler alınabilmektedir. Bu çalışmada gemi, dümen ve pervane etkileşimi incelenirken serbest su yüzeyi ve kavitasyon gibi bazı durumlar ihmal edilmiştir. Tüm fiziksel hadiselerin hesaplara katılarak incelenmesi gerçek duruma bir adım daha yaklaşılmasını sağlayacaktır.

# **INVESTIGATION OF THE INTERACTION BETWEEN THE SHIP HULL FORM, THE RUDDER AND THE PROPELLER IN TERMS OF SHIP PROPULSION**

## **SUMMARY**

Flow around arbitrary bodies is quite a complex phenomena and is usually solved by making some special assumptions under some conditions. The flow around a ship with all its appendages were usually investigated one by one for each part and then superimposed together to unite for a solution. With this approach, the interaction between the appendages and the ship were ignored. However thanks to the robust improvements in computer technology, scientists overcame these problems and are now able to solve the flow around a ship with all its appendages using turbulence models implemented in commercial computational fluid dynamics codes.

The rapid progress made in computer technology has allowed commercial CFD codes to arise and today they are even accessible for undergraduate students. Due to this reason, studies involving CFD have highly escalated. CFD solutions are included in this study as well.

In accordance with the methods that is used during the thesis study, these methods are explained in detail first to fully grasp the theory. The foundation of the boundary element method relies on the concept of potential theory. Potential flows use Laplace equation with Green function to go to a solution; therefore, these equations are explained in the text first. Then for the numerical implementation, fundamentals of boundary element method is explained. Although a commercial software is used for the RANSE solution that is applied in this study and no code developed, the theory of the transport equation that RANSE relies on is mentioned. Knowledge of RANSE is significant because CFD is a huge arena; if the user is not friendly with the theory, then any problems that occur during obtaining a result cannot be faced. After the theory is tackled, the concept of finite volume method is explained for the numerical scheme that is implemented in the commercial software used in this study.

Eventhough the main subject of this thesis is the interaction between the ship and its appendages, the study did not start from there right away. Some benchmark problems whose solutions already exist in literature were first solved and the parameters affecting the interaction inside the fluid flow were understood. Besides making use of the prepacked commercial CFD codes, the author has also developed his own codes. The commercial CFD code used in this study is solving the fluid flow with the finite volume method while the developed codes solve the flow with the boundary element method.

The work for this thesis has started from two dimensional flow around simple geometries. The solution for a two dimensional object in a uniform flow is found with various methods. These simple geometries include cylinders, flat plates and hydrofoils. Then, the interaction phenomena for a 2 – D flow for multiple bodies is solved and the parameters affecting the interaction in the flow is investigated. First, the efficiency and the accuracy of the iterative boundary element method (which is also addressed as IBEM) is presented. When time consumption values were compared with the direct boundary element method, IBEM has proved its worth by returning quicker solutions. A computer code implementing the IBEM was developed for both non-lifting and lifting bodies and using this code, the general behaviours of some parameters were investigated. These parameters include the distance effect, thickness effect, angle of attack effect and the chord length effect. The computer code is flexible to be developed; therefore, any parameter that is needed to be examined can be added to the code which is given in the index. After extensive work has been put into two dimensional flows, three dimensional flows were investigated. Flow around a sphere and a three dimensional wing was solved and the results were examined. The developed code was calibrated with benchmark results.

After all the attention turned to solving the ship flow with the rudder and the propeller with the interaction each part makes on each other. First of all, the effect of a rudder that is appended at the stern of a hull was examined. The results were derived under four cases and it is found out that the rudder creates an extra resistance, regulates the chaotic flow at the stern (especially transom sterns submerged under water), changes the nominal wake of a propeller and alters the pressure (especially in the regions close to the aft). Secondly, the effect of a ship hull on a propeller was investigated. When compared with the open water propellers, the performance of a propeller behind a ship hull is found to be totally different. Although, the general trend seems to be in accordance with the open water condition, the maximum efficiency and calculated self – propulsion point of a ship is otherwise. The streamlines released from the propeller, the pressure contours on the propeller and the wake characteristics are varied. In this part of the thesis, the CFD analysis of the open water propeller and the bare ship hull are also given as a validation. As a last section; the ship hull, the propeller and the rudder were all solved together to take one more step ahead for the real case. However; due to the reasons that are explained in the relevant section, the tryout was not a success. The generated flow in this case is found to be nonphysical and therefore, the derived results cannot be trusted.

The interaction of the ship, the rudder and the propeller may be investigated in many different aspects. In this study, the interaction was looked through from the hydromechanical view. One of the most important parts of the ship propulsion system is the propeller and it is desired that the propeller receives uniform flow as much as possible. During propeller design, the propeller wake is usually calculated without a rudder (usually in an experimental manner) however a rudder changes the flow that the propeller receives. One of the focuses of this study is to explain the importance of including the rudder effects while designing a propeller.

Before the production stage of a ship, the propeller is subjected to an open water test to prove its efficiency in ship propulsion. The propeller is rotated in open water only by itself and the performance parameters such as thrust, torque and open water efficiency are observed. Propeller design and optimization is made according to the results obtained from the model tests. However, the propeller does not work by itself in the open sea; it is a part of a team with the ship and the rudder to promote the efficiency in terms of propulsion. Therefore, one cannot argue that the propeller is an optimum propeller for every ship. When a propeller is tested, the effects of the ship and the rudder should also be included for better approximation of the propulsion efficiency.

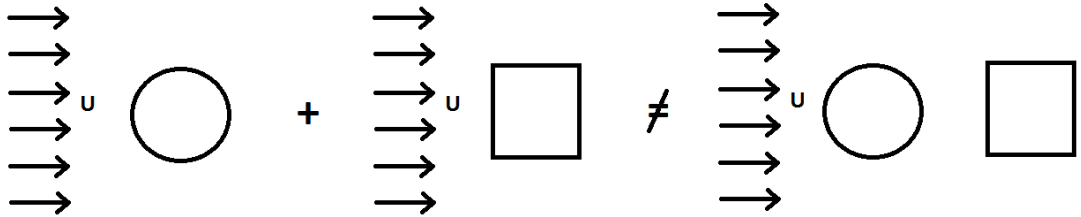
Eventhough the highly advanced computer technology eliminated many barriers, numerical studies involving the flow around a ship is only at the start. There are many aspects and methods to be improved for obtaining better results and still, there are a lot of assumptions being made for calculations. While investigating the interaction of the ship hull, the rudder and the propeller in this study, the effects of the free surface and the cavitation were neglected. Calculations including all physical aspects will lead to take one more step ahead for a better approximation of the real case.



## 1. GİRİŞ

### 1.1 Bir Cismin Akışkan İçerisindeki Konumu ve Problemin Tanımı

Herhangi bir cisim bir akışkan içerisine konulduğu zaman akışkanda bir düzensizlik yaratır. Eğer akışkan içerisinde birden fazla cisim varsa o zaman bunların konumlarının yanısıra birbirlerine olan etkileşimi de akışta ilave bir düzensizlik meydana getirir. Bu durum şöyle izah edilebilir: Örneğin, serbest akışın olduğu bir akışkan içerisine bir silindirin konulduğunu gözönüne alalım. Silindir serbest akışı bozacak dolayısıyla akış artık düzenli serbest akış olarak ele alınmayacaktır. Yine aynı serbest akışın içerisine bu sefer bir dikdörtgenler prizması konulduğunu düşünelim. Bu durumda dikdörtgenler prizması da serbest akışı bozacak ancak etrafındaki akım prizmanın geometrisine göre şekillenecektir. Eğer bu cisimler birbirini takip edecek şekilde konumlandırılırsa o zaman da arkadaki cisim öndeki cismin yarattığı akım içerisinde olacağı gibi aynı zamanda arkadaki cisim öndeki cismin akımını da etkileyerek akışkanda düzensizlik oluşturacaktır.



Şekil 1.1 : Akış içindeki cisimler süperpoze edilerek çözülemezler.

Bu iki cismin akışkan içerisinde özellikle birbirine yakın olacak şekilde konumlandırıldığını farz edelim ve buna göre cisimlerin etrafındaki akışkanın durumunu incelemeye çalışalım. Bu cisimlerin etrafındaki akışı, cisimlerin akışkan içerisinde her birinin tek başına buldukları durum gözönüne alınmak suretiyle çözümleri yapılabilir. Bunların süperpozisyonuyla elde diledik bir çözüm ise sadece bir yaklaşım çözümünü oluşturacaktır. Ancak bu süperpoze işlemi lineer sistemlerde uygulanabilir. Bu yaklaşım yapılırken, iki cisim etrafındaki akışı lineer kabul edip süperpozisyon ilkesi buna göre uygulanmaktadır. Oysaki, gerçekte durum bundan farklıdır ve akış lineer değildir. İki cisim de akışı bozduğu gibi bu iki cismin

birbirleriyle olan etkileşimi de akışı farklı bir şekilde tekrar bozacaktır. Bu bakımdan cisimleri tek tek ele almak bir yaklaşım olabilecektir, ancak gerçek durumu tamamıyla temsil etmeyecektir. Şekil 1.1’de bu durum gösterilmeye çalışılmıştır.

Cisimler etrafındaki akışlar, akışkan içerisindeki başka bir cisim konumu itibariyle değiştiğinde, cismin bazı özellikleri de bunun paralelinde değişecektir. Örneğin bir kanat için bu durum gözönüne alınacak olursa, kanadın kaldırma kuvveti ya da stall açısının değişmesi mümkündür. Cisimler birbirlerine ne kadar yakın olurlarsa birbirlerinden o kadar çok etkilenirler. Örneğin bir gemiyle dümen sistemi incelendiğinde, ortalama bir kanat formuna sahip olduğu farzedilen (NACA0006 veya NACA0012 kanat kesiti gibi) dümenin stall açısı açık suda genellikle  $15 - 20^\circ$  arasında olacaktır. Ancak gemi arkasındaki dümenler genellikle  $35^\circ$ ’ye kadar dönüş yapabilmektedirler ve dümen  $35^\circ$  açıyla bile çalışsa stall durumuna girmez. Bunun sebebi dümenin önündeki gemiyle etkileşime girmesi ve bir nevi geminin arkasında kanattan ziyade kanatçık görevi görmesidir. Akışkan içerisinde iki kanadın etkileşimi konusu ileriki bölümlerde daha detaylı olarak incelenmiştir.

Gemiyle dümen sistemine ek olarak konvansiyonel gemilerde bir de pervane bulunur. Pervane, geminin arkasında çalışır ve dümene gelen akışı değiştirir. Açık suda çalışan bir pervane üzerine gelen akışkan hızı üniform iken geminin arkasında çalışan pervaneye gelen akışkan aynı olmayıp farklılık gösterecektir. Pervaneler genelde gemilerin kıç taraflarındaki çok karmaşık akım alanlarında çalışırlar. Bu akım yüksek derecede türbülanslı ve düzensiz olabilmektedir. Bu zorlukların yanı sıra pervanenin varlığı da ayrı bir problem yaratır. Pervane yüzeyindeki hız dağılımı kısmi olarak gemi etrafındaki potansiyel akışa bağlıyken, büyük bir kısmı ise viskoz akışa bağlıdır. Bu sebepten dolayı pervane yakınında herhangi bir noktadaki akım hızı; sadece akımın kendi hızıyla, pervaneden dolayı oluşan hızın toplamıyla oluşmaz. Bu hızlardan başka olarak bir de etkileşim bileşeni vardır [1].

Gemi, dümen ve pervane üçlüsünün birbirleriyle etkileşimi dolayısıyla çok kapsamlı bir konudur. Bu üç bileşenin birbirleriyle olan etkileşimlerini çeşitli kombinasyonlarda incelemek mümkündür:

- Gemi – dümen etkileşimi
- Gemi – pervane etkileşimi
- Pervane – dümen etkileşimi

- Gemi – dümen – pervane etkileşimi

Yukarıda verilen analiz konuları iki veya daha fazla sistemin gözönüne alınarak incelenmesini kapsar. Oysa, bilgisayar teknolojisinin günümüzde olduğu kadar gelişmiş olmadığı, eski yıllarda bu sistemlerin herbiri tek başına ele alınmak suretiyle incelenmeye çalışılırdı. Bu konu ile ilgili daha detaylı bilgi problemin tarihsel gelişimi bölümünde verilmekte ayrıca literatür kısmındaki yayınlardan da bulunabilmektedir.

## **1.2 Tez Çalışmasının Temel Amacı ve İzlenen Yol**

### **1.2.1 İzlenen yol**

Daha önceden de bahsedildiği gibi gemi, dümen ve pervane sistemini beraber ele alarak akışı çözümlenmeye çalışmak oldukça karmaşık bir iştir. Bu zahmetli işin çözümünü doğrudan ele almadan önce konu kapsamı içerisinde bulunan bazı temel çalışmaları gözönüne alıp incelemek problemin anlaşılmasında ve çözümünde oldukça faydalı olacaktır. En başta iki boyutlu tek cisim etrafındaki akışa bakacak olursak; bunun çeşitli yöntemlerle çözülmüş olduğunu ve elde edilen sonuçlarında ya analitik ya da literatürde bulunan deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığını görebilmekteyiz. Bu çalışmalarda geometriler basit tutulmaya çalışılmış, daha çok bu yöntemlerin altyapıları ve kullanılan yöntemlerin hangi problemlerde uygulanabilecekleri incelenmiştir.

Daha sonraki aşamada, yine iki boyutlu olarak, cisimlerin akış içerisindeki etkileşimleri ele alınmış ve denenen yöntemler içerisinde bu tezdeki konuya en uygun yöntem seçilmeye çalışılmıştır. Ayrıca cisimlerin etkileşim şiddetini belirleyen parametrelere bakılmış ve bu parametrelerin gemi ve dümen sistemini nasıl etkileyecekleri irdelenmiştir.

İki boyutlu durumda etkileşim ve etkileşimin şiddetini etkileyen parametreler incelendikten sonraki aşamada üç boyutlu cisimler için çalışmalar yapılmıştır. Küre ve kanat gibi basit geometriler etrafındaki üç boyutlu akım incelenerek, iki boyutlu yaklaşım ile üç boyutlu yaklaşım arasındaki farklılıklara bakılmış ve bu farklılıkların hangi durumlarda daha önemli olduğu araştırılmıştır. Üç boyutlu cisimlerin incelemesinden sonra da tez çalışması kapsamındaki gemi, dümen ve pervane sistemi ele alınmıştır.

Yapılan tez çalışmasında kullanılacak yöntemi belirlemeden önce, ele alınabilecek yaklaşımlara öncelik verilmiştir. Bu yaklaşımlar mümkün olabildiğince geniş tutulmaya çalışılmış ve farklı çözüm yöntemlerinin ne gibi sonuçlar verdiğine bakılarak, tezde kullanılacak en doğru yöntem seçilmeye çalışılmıştır. Bu yöntemlerin detaylı açıklaması ileriki bölümlerde anlatılmıştır.

Belirlenen yöntemle gemi ve pervane etrafındaki akış, içerisinde başka herhangi bir cisim olmadan çözülmüştür. Daha sonra gemi, dümen ve pervanenin etkileşimleri çeşitli kombinasyonlarda incelenerek her parçanın birbiri üzerindeki etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalar esnasında deney verileri olan gemiler kullanılmıştır. Elde edilen çözümler, deney sonuçlarıyla veya ampirik formüllerle karşılaştırılmış ve çözümlerin doğruluğu araştırılmıştır.

### **1.2.2 Amaç**

Dünyada 2008 yılında yaşanan ekonomik krizle beraber enerji fiyatlarının tavana vurmasıyla gemilerin işletim masrafları çok yüksek meblağlara ulaşmıştır. Yakıt masraflarında sağlanabilecek çok küçük yüzdeli düşüşler bile büyük kazançlar sağlamaktadır. Dolayısıyla bu tez çalışmasının amaçlarından biri de yeni inşa edilecek gemilerin yakıt masraflarını azaltacak önlemlerin, gemi henüz inşa edilmeden önce dizayn aşamasında alınmasını sağlayacak çalışmaların yapılmasıdır. Bu projeden elde edilecek olan veriler sonucunda gemi direncinde azalma olacağından yakıt tasarrufu sağlanacaktır. Ayrıca geminin sevki ile ilgili olan kısımlarının (pervane, dümen ve kış formunun) birbirleriyle olan etkileşimi incelenmesinin getireceği faydaların ışığında makinenin ömrü ve geminin performansı artacaktır. Projeden elde edilecek sonuçlar, bir ülkenin ticaret filosundaki gemilere uygulandığı zaman kazanılacak olan mali değer çok büyük meblağlara erişebilecektir. Bu da ülkenin kaynaklarının daha iyi ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayacaktır. Bunun yanı sıra uygun pervanenin seçimi ve gemideki konumunun doğru bir şekilde belirlenmesiyle kavitasyon problemine neden olan etkiler bu şekilde minimuma indirilecek ve pervane erozyonunun önüne geçilebilecektir. Bu durum da geminin sevk sisteminin performansını artıracak ve pervanenin erozyon kaybının ve titreşiminin yarattığı ilave problemleri ve maliyetleri de ortadan kaldıracaktır. Böylece pervane optimizasyonu aynı zamanda gürültü ve yorulmayı da azaltarak malzeme mukavemetine katkıda bulunacak dolayısıyla kanat kırılmaları engellenebilecektir. Bu bakımdan yapılan bu çalışma, gemilerde yanlış

seçilen pervanelerden dolayı oluşan sevk problemlerinin doğurduğu hataların düzeltilmesi ve daha verimli bir sevk sisteminin elde edilmesini sağlayacak bir çalışma olacaktır.

### **1.3 Özgün Değer ve Yaygın Etki**

#### **1.3.1 Özgün değer**

Gemi ve takıntılarının etkileri üzerine yapılmış birçok araştırma ve çalışma bulunmasına rağmen gemi dümen ve pervanesinin bir arada olduğu bir sistemi kapsayan ve her bir takıntının etkilerini kapsamlı araştıran bir çalışmanın bugüne kadar bilindiği kadarıyla yapılmadığıdır. Geminin sadece belirli kısımlarını ele alarak analize tabi tutmak (örneğin sadece gemi, dümen veya pervane etrafındaki akımın modellenmesi gibi), problemi bütün olarak ele alıp etkin bir sonuca ulaşmaktan uzak kalmaktadır. Bundan önceki yapılan çalışmalarda bu durumun eksikliği hissedilmiş ve dolayısıyla problemin bütünüyle modellenmesinin getireceği zorluklar nedeniyle gemi ve/veya takıntıları bazı yaklaşımlarla yaklaşık olarak temsil edilmeye çalışılmıştır. Bu bakımdan bütün problemi anlayabilecek ve sevk sisteminde makul ölçülerde iyileştirme sağlayabilecek kapsamlı bir çalışma yapmak mümkün olmamıştır. Dolayısıyla gerçek ortamdaki bir sevk sisteminin karşılaşılabilecek problemlerin optimize edilebilmesi için gemi kış formu, dümen ve pervanesinin aynı ortam içerisinde birbirlerine olan etkileşiminin de incelenmesi gerçek optimizasyonu ortaya koyacaktır. Bu sebepten dolayı bu tez çalışmasının, hali hazırda geliştirilmeye açık durumda bulunan gemilerin akışkan içerisindeki hareketinin hidrodinamik analizi için özgün bir katkı sağlamaktadır. Bütün problem ele alındıktan sonra geliştirilecek optimum pervane ise sevk sisteminin iyileştirilmesine katkıda bulunacaktır.

#### **1.3.2 Yaygın etki**

Denizcilik sektöründe gemi sahiplerinin en çok etkilendikleri kısımların başında gemilerin bakım ve onarım maliyetleri ile yakıt giderleri gelmektedir. Tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalar sistemik bir biçimde üretilecek gemilere uygulandığında sağlanacak tasarruf ile yakıt giderleri azaltılması mümkün olacaktır. Dolayısıyla az yakıt harcanmasının getirdiği avantajdan dolayı havaya daha az NOx değerleri salınacağından daha çevreci tekne tasarımları elde edilebilecektir. Ayrıca uygun pervanesinin kullanılmasıyla mukavemette iyileştirmeler elde edilerek bakım

onarım maliyetlerinde azalma sağlanacaktır. Bu da gemilerin işletme maliyetini düşürecektir. Kısaca izah etmek gerekirse, bu tez çalışmasının sağlayacağı katma değerler şunlar olacaktır.

- 1) Düzeltilmiş form ve optimum pervanenin bulunması gibi sevk sistemindeki iyileştirmeler ile yakıt tasarrufu sağlanacaktır.
- 2) Az yakıt kullanımı dolayısıyla havaya NOx salınımı azalacak; dolayısıyla geçmişe oranla nispi olarak daha çevre dostu bir tasarım elde edilecektir.
- 3) Pervanenin en uygun yerde ve formda olmasıyla dolaylı olarak mukavemette iyileştirmeler sağlanacaktır. Böylece pervane kanat kırılması, erozyon gibi istenmeyen durumlarla karşılaşma riski azalacaktır. Bakım ve onarım maliyetleri düşecek, armatörlerin işletme giderleri azaltılabilecektir.

#### **1.4 Problemin Tarihsel Gelişimi ve Literatür Taraması**

Akış problemlerinin sayısal yöntemlerle çözümü çok büyük bir işlem kapasitesi gerektirmektedir. Akışın bütünüün modellenebilmesi ve akışkan içerisinde bulunabilecek karmaşık geometrilerin elemanlara ayrılarak tek tek çözülmesi gerekli bilgi ve hesap yöntemleri ile bilgisayar program olanakları olmadan altından kalkabilecek bir iş değildir. Bu sebepten dolayı akışkan içerisindeki cisimlerin matematiksel yollarla modellenebilmesi fikri oldukça eskilere dayanmasına rağmen, bu alandaki gelişmeler bilgisayar teknolojisinin gelişmesine bağlı kalmıştır. Dolayısıyla bu konu ile ilgili gelişmelerin başlangıcı genel olarak 20. yüzyılın ikinci yarısına dayanır.

Bu konu üzerine yapılmış olan çalışmalar incelenecek olursa; temelde çalışmanın ilk başlangıç noktası 1929'da O. D. Kellogg'un yayınladığı *Foundations of Potential Theory* makalesine dayanır [2]. Ancak konu üzerindeki asıl gelişme potansiyel yöntemin sınır elemanları yöntemiyle birleştirerek kullanılmasıyla sağlanmıştır. Dolayısıyla Hess ve Smith'in 1962 yılında yapmış olduğu çalışma bu yoldaki bir kilometre taşı olarak ele alınabilir [3]. O zamana kadar yapılan çalışmalarda akışkan içerisindeki cismin slender (yani ince bir şerit şeklinde) olduğu kabul edilmekteydi. Bu yöntem kapsamında herhangi üç boyutlu bir cisim iki boyutlu panellere ayrılması suretiyle, her panel kaynak ve kuyuyla temsil edilmiş ve cismin etrafındaki kuvvet ve basınç dağılımı bulunmuştur. 1975 yılında ise William C. Webster, Hess ve Smith'in çalışmasındaki problemler olan sorunlu panel geometrisi ve yüksek işlemci

gereksinimi sıkıntılarını tespit etmiş ve cisim üzerindeki panel şeklini değiştirerek daha kısa sürede daha iyi sonuçlar elde etmeyi başarmıştır [4]. Noblesse ve Triantafyllou ise 1983 yılında mermi ucu (ogive) ve elipsoitler için potansiyel akışı bazı yaklaşımlar kullanarak çözmüş ve bu yaklaşımlarla ürettiği formüllerin gemi dalga direncinin hesaplanmasında kullanılabileceğini öne sürmüştür [5].

1990'lı yıllara gelindiğinde ise; çalışma konuları artık gemiler etrafındaki akışlardan ziyade takıntıların etrafındaki akışın çözülmesi işine yönelmiştir. Son yıllarda tek başına gemi etrafındaki akımı modelleme konusunu ele alan makaleye pek rastlanmamaktadır. Sadece 2001 yılında Rigby ve meslektaşlarının gemi etrafındaki akımı modelleme üzerine bir çalışma yapmışlar; klasik problemde hızları hesaplarken kullanılan panel üzerindeki kolokasyon noktalarını cismin üzerine taşımayı ve serbest su yüzeyi sınır şartınının uygulanmasını zorlu kılmışlardır [6]. Bu çalışma dışında gemi etrafındaki akımın modellenmesi ile pek ilgilenilmemiş; ilgi, takıntıların etrafındaki akımın çözülmesi konusuna yönelmiştir. 1991'de Maitre ve Rowe, potansiyel tabanlı yöntemle bir gemi pervanesi etrafındaki akımı modellemiştir [7]. Pervane göbeğinin ve izin etkisinin sayısal sonuçlara etkisi incelenmiş ve kullanılan yöntemin slender cisimler için uygun sonuçlar verdiği savunulmuştur. 1994 yılında Chang-Sup Lee ve arkadaşlarının yayınladığı çalışmada (Dirichlet tipi sınır şartı kullanarak) yüzey panel yöntemiyle önceden belirlenmiş bir basınç dağılımına göre bir hidrofoil dizaynı yapılmaya çalışılmıştır [8]. Aynı yıl Willis ve araştırmacı arkadaşları bir gemi dümeninin ürettiği hidrodinamik kuvvetlerin sayısal çalışmasını yapmıştır [9]. Fakat bu tarihlerden itibaren sadece bir gemi, pervane veya dümen etrafındaki akımla ilgilenmenin tek başına yetmediği anlaşılmaya başlanmıştır. Bu yüzden aynı makalede gemi de basit bir yaklaşımla temsil edilmeye çalışılmış ve dümen ile geminin açıklık mesafesinin etkilerinin ne boyutta olduğu bulunmaya çalışılmıştır.

90'lı yılların ardından artık baş döndürücü bir hızla gelişmeye başlayan bilgisayar teknolojisi sayesinde işlem kapasitesi daha yüksek makinelerde daha büyük hesaplar yapılabilir hale gelmiştir. Dolayısıyla bilim insanları artık sadece tek cisim etrafındaki akım üzerine çalışmak zorunda kalmamışlardır. Önce 1991 yılında Landweber ve diğer araştırmacı arkadaşları viskoz olmayan akışkan içerisinde hareket eden iki cisim arasındaki etkileşimi Lagrangian form kullanarak incelemiştir [10]. Bu çalışmada düzenli akım içerisinde cisimlerden bir tanesinin sabit olduğu ve

diğerinin ona yaklaştığı düşünölmüştür. Elde edilen sonuç; etkileşim kuvvetlerini bulabilmek için basit ifadeler sunmuş ve hareket eden cismin hızını, rölatif pozisyonunun fonksiyonu cinsinden tanımlamaya imkân vermiştir. Akışkan içerisindeki cisimlerin birbirlerinin üzerindeki etkilerinin oldukça önemli olduğunun kavranması, yakın çalışan iki geminin birbirlerinin üzerindeki etkisinin incelenmesini de gerekli kılmıştır. Literatürdeki bu boşluğu 1993 yılında Korsmeyer ve arkadaşları sınırlı sularda gemi etkileşim kuvvetlerini hesaplayarak gidermeye çalışmıştır [11]. Çalışmanın ana hedefi, herhangi bir kanaldan geçen iki geminin birbirlerine olan etkisinin incelenmesi olmuştur. Bu çalışmada serbest su yüzeyinin sakin ve gemilerin de slender olduğu varsayılmıştır. 1999'da K. I. Matveev ve I. I. Matveev'in Ocean Engineering dergisinde yazmış olduğu teknik raporda, ardışık hidrofoillerin birbirlerine olan etkileşiminin kaldırma kuvveti / sürüklenme (lift / drag) oranını artırdığı ve bunun yüksek hızlı teknelerde hangi şartlar altında kullanılabileceği yazılmıştır [12]. Şakir Bal'ın 2008 yılında yaptığı çalışmada ise, akışkan içerisinde hareket eden bir geminin iz ve serbest su yüzeyiyle olan etkileşimleri incelenmiştir [13]. Geminin su altında kalan kısmı sabit şiddetli kaynak ve duble dağılımlarıyla temsil edilmiş ve iteratif bir çalışma yapılarak birbirleri üzerindeki etkileri gözlemlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar deney sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve kullanılan yöntemin hızlı bir şekilde yakınsayarak (az iterasyonla) uyumlu sonuçlar verdiği görölmüştür.

Üzerinde çalışılması söz konusu olan bu tez çalışmasına ilham veren kaynaklardan en önemlisi Da Qing Li ve Gilbert Dyne'nin 1995'te yayınladığı pervane dümen etkileşimini inceleyen makalesidir [14]. Li aynı zamanda bu konu üzerinde Chalmers Üniversitesinde doktora yapmıştır. Çalışmada lineer yöntem kullanılmış; akımın düzenli ve aynı zamanda pervane kanat sayısının sonsuz olduğu kabul edilmiştir. Dümen girdap ve kaynak kuyu dağılımlarıyla tanımlanmış ve girdap ağ yöntemiyle performans karakteristikleri incelenmiştir. Pervane girdap şeritleriyle tanımlanmış ve kaldırıcı hat teorisiyle performans karakteristikleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar deney sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve uyumlu oldukları teyit edilmiştir. Değişik geometrik oranların etkileri de çalışmada ele alınmış ve bazı durumlarda açık su verimini %1.7'ye kadar artırabildiği görölmüştür. 2006 yılında ise Keuning ve diğer araştırmacı arkadaşlarının yaptığı çalışmada yelkenli teknelerde salma ve dümen etkileşimi incelenmiştir [15]. Bu makalede salmadaki bazı geometrik

değişikliklerin ve akımın aşağı sapma açısının (downwash) dümen ve iz üzerindeki etkileri gözlemlenmeye çalışılmıştır. Benzer bir konudaki çalışmayı 2008 yılında Kang ve arkadaşları tek pervaneli çift dümenli gemiler üzerine yapmıştır [16]. Araştırmacılar problemi dinamik analiz yöntemiyle çözme yoluna gitmiş ve tekne, pervane ve çift dümen arasındaki etkileşimleri farklı hızlardaki gemi deneylerinden elde edilen belirli katsayılarla ifade etmişlerdir. Elde edilen sonuçlarla bu tip gemilerin kullanılabilirliğini tartışmışlardır. Yine pervane dümen etkileşimini ele alan çalışmalardan biri Szantyr'e aittir [17]. 2007 yılında yayınlanan çalışmasında çalışan bir pervane ve dümenin hidrodinamik etkileşimini inceleyen bir program geliştirmiştir. Diğer iki çalışmadan farklı olarak Szantyr'in bu çalışmasında zamanın etkileri göz önünde tutulmuş ve gemi formunun bu iki takıntı üzerindeki etkisi kısmen de olsa incelenmiştir. Sonuçlar literatürde var olan bazı deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Tchieu ve arkadaşlarının 2010 yılında yaptığı çalışma iki boyutlu viskoz olmayan akışkan içerisinde iki cismin hareketli etkileşimini incelemiştir [18]. Çalışmada; ilk cisim sabitken, ikinci cismin birinciye doğru yanaştığı halde iki cismin birbirlerine etkileri ve, iki cismin de birbirine doğru hareket ettiği durumda birbirleri üzerinde olan etkileri gözlemlenmeye çalışılmıştır. Geleneksel olarak kullanılan potansiyel teorinin yanında ek ve tamamlayıcı olarak konformal haritalama (conformal mapping) yöntemi de kullanılmıştır. Bu çalışmadan altı sene önce ise Wang, düzensiz akım içerisinde birbirine paralel iki silindirin hızları ve boyutları değiştikçe birbirlerinden nasıl etkileneceğini anlamaya çalışmıştır [19].

Bilgisayar teknolojisinin ilerlemesi sadece geminin bütün kısmıyla beraber ele alınmasını sağlamamış, aynı zamanda bilim adamlarını gerçeğe daha yakın sonuçlar elde etme arayışına da sürüklemiştir. Kouh ve arkadaşlarının 1996'da yaptıkları çalışmada eğimli yüzeylerin daha iyi temsil edilebilmesi için yüksek mertebede kaynak dağılımlı panel yöntemi kullanılmıştır [20]. Chang-Sup Lee ve Justin E. Kerwin'in 2003 tarihli çalışması ise iki boyutlu probleme B-Spline yüksek mertebeli panel yöntemi kullanarak yaklaşmış ve çözüme çok daha az panelle ulaşabilmiştir [21]. Böylece bu iki çalışmada da keskin eğimli yüzeylerde hata mertebesi azaltılarak daha yakın sonuçlar elde edilebilmiştir.

Bir geminin direnç değerlerini deney yapmadan tam olarak elde etmek günümüzde mümkün görülmemektedir. Bu değerleri elde etmek için akımın viskoz olarak alınması ve genel bir türbülans çözümü olması gerekir. Fakat bugün hala türbülansın

tam olarak çözülebilmesi daha henüz elde edilememiştir. Dolayısıyla türbülans etkilerinin hesaplara dahil edilebilmesi için sayısal yöntemler kullanma zorunluluğu doğmuştur. Ancak potansiyel yöntem, bilindiği gibi, viskoziteyi ihmal etmektedir. Bu bakımdan direnç veya gemi kış formu etrafındaki akışın modellenmesi gibi viskozitenin etkilerinin büyük olduğu hesaplamalar için potansiyel yöntem tek başına kullanılamaz. Hoekstra ve Raven, gemi kış tarafındaki akımın iyileştirilmesi için potansiyel ve sınır tabaka teorilerini eşleştirerek kullanmış ve gemi kışındaki etkileşimlerle baş edebilmenin en pratik yolunun bu olduğunu savunmuştur [22]. Ancak yine de elde ettikleri sonuçlar türbülansın akışa olan etkilerini kapsamaktan uzak kalmıştır. Bazı yaklaşımlar ve istatistiksel yöntemlerle türbülansın etkileri akışkan momentum denklemi olarak bilinen Navier – Stokes Denklemi içine yerleştirilerek kullanılabilir. Bu yaklaşım RANSE (Reynolds Averaged Navier – Stokes) olarak anılmakta ve sınır elemanları yerine sonlu hacimler yöntemiyle uygulama yoluna gidilmektedir. Konu hakkındaki çalışmalar genel olarak potansiyel yöntemle başlamasına karşın, potansiyel yöntem bu etkinliğini artık zamanla RANSE’ya devretmeye başlamıştır. Bu sebepten dolayı artık RANSE denklemlerini kullanan paket programlar çok etkili olmuşlar ve konu hakkındaki çalışmaların özünü oluşturmaya başlamışlardır.

70’li yılların sonlarında sınır elemanları yöntemini uygulayan potansiyel teori neredeyse tüm çalışmaların altyapısını oluşturuyorken, 80’li yıllarda sonlu hacim veya sonlu farklar yöntemini kullanan RANSE yöntemi zamanla potansiyel teorinin yerini almaya başlamıştır. Markatos ve Willis, takıntılı bir cisim için – o zamanlar henüz yeni yeni gelişmekte olan – sonlu farklar yöntemiyle  $k - \epsilon$  türbülans modelini kullanarak çözüm aramışlardır [23]. Yöntem yeni gelişme safhasında amatör kişiler tarafından yazılan kodlarla ilerleme sağlamaya çalışılırken zaman içerisinde ticari paket programlar geliştirilmiş ve dolayısıyla yöntemin yaygınlığı ve kullanılabilirliği artmıştır.

İleriki bölümlerde tezin sayısal sonuçları anlatılırken verilecek olan konuyla ilgili literatür incelendiğinde, RANSE denklemlerini kullanan ticari paket programlar ile ne kadar çok çalışma yapıldığı daha iyi bir şekilde görülecektir. Bilgisayar teknolojisinin günümüz koşullarından daha da ileriye gitmesiyle birlikte RANSE’a rakip olabilecek ve daha kapsamlı hesaplar için kullanılabilen DES (Detached Eddy

Simulation), LES (Large Eddy Simulation) gibi yöntemler gelişmekte ve daha yaygın olarak kullanılmaktadır.



## 2. YÖNTEMLER

### 2.1 Sınır Elemanları Yöntemi (SEM)

Bu tez çalışmasında sınır elemanları yöntemi, yöntemin teorisini sayısal olarak çözen bir bilgisayar programı kodlanarak uygulanmıştır. Sınır elemanları temel olarak Green Teoremi'ne dayanır. Green Teoremi potansiyel akışların çözümü için kullanılır; bu yöntemde akış içerisindeki her cisim akışı pertürbe eder ve bir potansiyel yaratır.

Green Teoremi, sonsuz bir akışkan içerisinde bulunduğu farz edilen cismin sınırlarına sayısal olarak uygulanır. Cisim yüzeyi panellere bölünerek, bu paneller üzerine çeşitli potansiyel akış türleri (kaynak, kuyu, dipol vb.) dağıtılır. Bu panellerin akışkana indüklediği potansiyeller hesaplanarak akışın nasıl geliştiği hesaplanır.

#### 2.1.1 Laplace denklemi

Mühendislikte karşılaşılan problemlerden çoğu Legendre Denkleminin bir formuna sahiptir. Legendre Denklemi;

$$\nabla^2 \Psi(\vec{r}) + k^2(\vec{r})\Psi(\vec{r}) = F(\vec{r}) \quad (2.1)$$

olarak ifade edilmektedir. Laplace Denklemi k ve F'in sıfıra eşit olduğu durumlarda elde edilir:

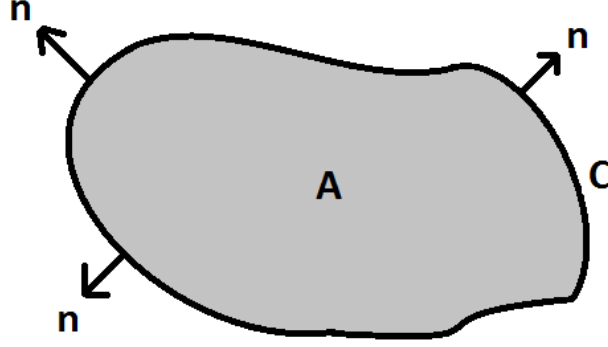
$$\nabla^2 \Psi(\vec{r}) = 0 \quad (2.2)$$

Laplace Denklemi; elektrostatik, magnetostatik, potansiyel akış problemleri, ısı transferi gibi birçok alanda geçerlilik göstermektedir [24].

Laplace Denklemi ikinci mertebeden bir kısmi diferansiyel denklemdir ve bu denklemin çözümleri harmonik fonksiyon olarak tanımlanmaktadır. Bilindiği gibi ikinci kısmi türevleri sürekli olan fonksiyonlara harmonik fonksiyon adı verilmektedir. Dolayısıyla Laplace Denkleminin geçerli olduğu tüm akışkan bölgesinde akışın; potansiyeli, hızı (potansiyelin birinci türevi) ve ivmesi (potansiyelin ikinci, hızın birinci türevi) süreklidir.

### 2.1.2 Green teoremi

Green teoremi; kontrol hacmi olarak seçilen bir akışkan bölgesinin yüzeyindeki kuvveti, kontrol hacmine bağlar. Örneğin, şekil 2.1’de de gösterilen C kapalı eğrisinin bir A bölgesini sınırladığı ve  $\mathbf{n}$  ( $\vec{n}$ ) vektörünün ise bu kapalı eğriye normal dışa doğru bir birim vektör olduğu olduğu farz edilsin.



Şekil 2.1 : C kapalı eğrisinin normal birim vektörü.

$\mathbf{F}$ , A alanı üzerinde tanımlanmış bir vektör alanı olarak tanımlanmış ise, Green Teoremine göre,

$$\oint_C \vec{F} \cdot \vec{n} ds = \int_A \nabla \cdot \vec{F} dA \quad (2.3)$$

ifadesi geçerli olur. Genel kabul doğrultusunda C boyunca alınan çizgisel integralin saat yönünün tersine doğru olduğu kabul edilsin. Bu durumda  $\vec{n}$  ( $\vec{n}$ ) birim vektörü,

$$\vec{n} = \frac{dy}{ds} \hat{i} - \frac{dx}{ds} \hat{j}$$

olarak tanımlanacaktır. F kuvveti bileşenlerine ayrılarak,

$$\mathbf{F} = P\hat{i} + Q\hat{j}$$

olarak yazıldığında (2.3) no.’lu denklemin sol tarafı,

$$\oint_C \vec{F} \cdot \vec{n} ds = \oint_C (P\hat{i} + Q\hat{j}) \cdot \left( \frac{dy}{ds} \hat{i} - \frac{dx}{ds} \hat{j} \right) ds = \oint_C (Pdy - Qdx) \quad (2.4)$$

halini alır. Böylece (2.3) no.’lu denklemde genel hali verilen Green Teoremi,

$$\oint_C (Pdy - Qdx) = \int_A \left( \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} \right) dA \quad (2.5)$$

olarak da yazılabilir [25].

### 2.1.3 Green teoreminin kanat teorisine uygulanması

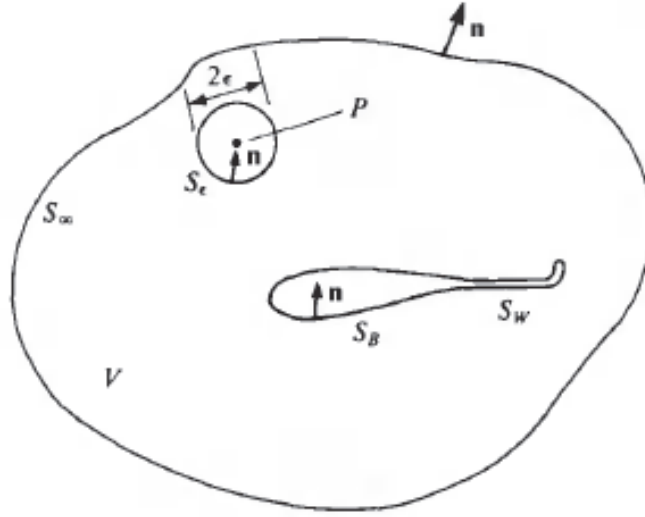
Kanat etrafındaki potansiyel akışın çözülmesi için Green Fonksiyonu'nun çözülmesi gerekir. Kanat ve etrafındaki akışkan bölgesinin temsili görünümü şekil 2.2'de verilmiştir. Green teoremindeki dış kuvvet  $F$ ;

$$\vec{F} = \Phi_1 \nabla \Phi_2 - \Phi_2 \nabla \Phi_1 \quad (2.6)$$

olarak tanımlanırsa, Green Fonksiyonu,

$$\int_S (\Phi_1 \nabla \Phi_2 - \Phi_2 \nabla \Phi_1) \cdot \vec{n} dS = \int_V (\Phi_1 \nabla^2 \Phi_2 - \Phi_2 \nabla^2 \Phi_1) dV \quad (2.7)$$

olarak ifade edilir.  $\Phi_1$  ve  $\Phi_2$ 'nin neye tekabül ettikleri aşağıda izah edilecektir. Burada  $F$  vektörünü (2.6) no.'lu denklemdeki gibi tanımlamakta herhangi bir sıkıntı yoktur. Aşağıda da gösterileceği gibi dış kuvvet  $F$ 'i bu şekilde seçmek bazı kolaylıklar sağlayacaktır.



Şekil 2.2 : C kapalı eğrisinin normal birim vektörü [26].

Burada  $S$  boyunca integre edilen yüzey cisim yüzeyiyle beraber, iz bölgesini ve akışkan sınırlarını da kapsamaktadır:

$$S = S_B + S_W + S_\infty \quad (2.8)$$

Akışkan içerisinde, akışı pertürbe eden her cisim bir potansiyel yaratır. Şekil 2.2'de verilen durumda akışkan içerisinde akışı bozan bir kanat bulunmaktadır ve bu kanat akışkanın her noktasında bir potansiyel indüklemektedir. Green Fonksiyonundaki  $\Phi_2$ 'yi akışkanın herhangi bir bölgesinde indüklenen potansiyele ( $\Phi$  olarak

adlandırılmı)  $\Phi_1$ 'i de temel potansiyel akışlardan olan kaynağın potansiyeline eşitlenirse,

$$\Phi_1 = \frac{1}{r} , \quad \Phi_2 = \Phi \quad (2.9)$$

olarak yazılır. Bu durumda (2.8) no.'lu denklemde verilen Green Denklemi aşağdaki hali alır:

$$\int_S \left( \frac{1}{r} \nabla \Phi - \Phi \nabla \frac{1}{r} \right) \cdot \vec{n} \, dS = 0 \quad (2.10)$$

şekil 2'de görölen herhangi bir P noktasındaki potansiyel hesaplanmak istenirse, bu nokta akışkan bölgelinin dışındaymış gibi davranılarak integrasyonun dışına atılır. Bunun için P noktası, etrafında şekil 2.2'deki gibi yarıçapı  $\epsilon$  olan bir küre çizilerek çizgisel integral ile akışkan bölgelinin dışına çıkarılır. Bu şekilde (2.10) no.'lu denklem aşağdaki hale gelir:

$$\int_{S+küre \, \epsilon} \left( \frac{1}{r} \nabla \Phi - \Phi \nabla \frac{1}{r} \right) \cdot \vec{n} \, dS = 0 \quad (2.11)$$

P noktası etrafındaki küre üzerinde küresel koordinatlar tanımlanırsa;

$$\vec{n} = -\vec{e}_r , \quad \vec{n} \cdot \nabla \Phi = -\frac{\partial \Phi}{\partial r} , \quad \nabla \left( \frac{1}{r} \right) = -\left( \frac{1}{r^2} \right) \vec{e}_r \quad (2.12)$$

(2.11) no.'lu denklem;

$$-\int_{küre \, \epsilon} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{\Phi}{r^2} \right) dS + \int_S \left( \frac{1}{r} \nabla \Phi - \Phi \nabla \frac{1}{r} \right) \cdot \vec{n} \, dS = 0 \quad (2.13)$$

olarak yazılır. P küresinin yüzey alanı;

$$\int_{küre \, \epsilon} dS = 4\pi\epsilon^2 \quad (2.14)$$

olacaktır. Akışkan içerisindeki potansiyelin gradyanının çok ufak konumsal değişikliklerde çok büyük olmadığı varsayılarak  $\frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0$  olarak kabul edilirse (2.13) no.'lu denklemdeki ilk terim,

$$-\int_{küre \, \epsilon} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{\Phi}{r^2} \right) dS = -\int_{küre \, \epsilon} \left( \frac{\Phi}{r^2} \right) dS = -4\pi\Phi(P) \quad (2.15)$$

olur. Dolayısıyla (2.13) no.'lu denklem aşağdaki hali alacaktır:

$$\Phi(P) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left( \frac{1}{r} \nabla \Phi - \Phi \nabla \frac{1}{r} \right) \cdot \vec{n} \, dS \quad (2.16)$$

Burada P, şekil 2.2'de temsili resmi verilmiş olan akışkan bölgesi içerisinde herhangi bir nokta olabilir. Akışkan bölgesi dışında veya kanadın içinde bulunamaz. P noktası

akışkan bölgesi sınırları içerisinde olmadığı takdirde potansiyeli sifıra eşit olur. P noktasının kanat içerisinde olduğu farz edilerek denklem (2.14) yeniden yazılırsa;

$$0 = \frac{1}{4\pi} \int_S \left( \frac{1}{r} \nabla \Phi_i - \Phi_i \nabla \frac{1}{r} \right) \cdot \vec{n} dS \quad (2.17)$$

elde edilir. Bu denklem, (2.10) no.'lu denklemle de uyumludur. Burada  $\Phi_i$  kanat içindeki potansiyeldir. P'nin tekrar akışkan içerisinde bir nokta olduğu düşünülerek, (2.16) no.'lu denklemin genişletilmiş halde tekrar yazılması;

$$\Phi(P) = \frac{1}{4\pi} \int_{S_B} \left( \frac{1}{r} \nabla (\Phi - \Phi_i) - (\Phi - \Phi_i) \nabla \frac{1}{r} \right) \cdot \vec{n} dS + \frac{1}{4\pi} \int_{S_W + S_\infty} \left( \frac{1}{r} \nabla \Phi - \Phi \nabla \frac{1}{r} \right) \cdot \vec{n} dS \quad (2.18)$$

denklemini doğurur. Akışkan sınırlarını kapsayan  $S_\infty$  yüzeyi ile ilgili integral kısaca,

$$\Phi_\infty(P) = \frac{1}{4\pi} \int_{S_W + S_\infty} \left( \frac{1}{r} \nabla \Phi - \Phi \nabla \frac{1}{r} \right) \cdot \vec{n} dS \quad (2.19)$$

yazılıp, iz yüzeyinin ince bir yüzey olduğu ve sürekli bir bölge olduğu varsayımı yapılarak (2.18) no.'lu denklem şu hali alacaktır:

$$\Phi(P) = \frac{1}{4\pi} \int_{S_B} \left( \frac{1}{r} \nabla (\Phi - \Phi_i) - (\Phi - \Phi_i) \nabla \frac{1}{r} \right) \cdot \vec{n} dS - \frac{1}{4\pi} \int_{S_W} \Phi \vec{n} \cdot \nabla \frac{1}{r} dS + \Phi_\infty(P) \quad (2.20)$$

(2.20) no.'lu denklemin içerisinde bulunan  $\Phi - \Phi_i$  terimi akışkan içerisindeki cismin iç ve dış potansiyeli arasındaki zıplamayı, yani cismin varlığını ve dolayısıyla üzerindeki dipol dağılımını ( $\mu$ ) temsil eder.  $\nabla(\Phi - \Phi_i)$  terimi ise potansiyellerin normal yöndeki türevleri arasındaki farkı temsil etmektedir, bu da cisim üzerindeki kaynak dağılımının ( $\sigma$ ) bir göstergesidir. Matematiksel olarak ifade edilirse kaynak ve dipol;

$$-\mu = \Phi - \Phi_i \quad , \quad -\sigma = \nabla(\Phi - \Phi_i) \quad (2.21)$$

olarak yazılır. Kaynak ve dipol şiddetlerinin başındaki eksi, normal doğrultu yönünün cismin içine doğru olmasından kaynaklanır. Kaynak ve dipol şiddet terimlerini (2.20) no.'lu denklemin içine taşıyarak kanat etrafındaki akışın çözülmesi için gerekli denklem elde edilir [26]:

$$\Phi(P) = \frac{1}{4\pi} \int_{S_B} \left[ \sigma \left( \frac{1}{r} \right) - \mu \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{1}{r} \right) \right] + \frac{1}{4\pi} \int_{S_W} \left[ \mu \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{1}{r} \right) \right] dS + \Phi_\infty(P) \quad (2.22)$$

Bu denklem genellikle sınır elemanları yöntemiyle cisim panellere ayrılarak sayısal olarak çözülür ve genellikle iki tip sınır şartı kullanılır. İndirekt yöntem Neumann tipi sınır şartıdır; problem potansiyelin türevi yani hız tabanlı olarak çözülür. Cisim üzerindeki normal hızın sifıra eşit olması prensibine dayanır. Doğrudan Bulma

yöntemi (Direkt) ise Dirichlet tipi sınır şartını kullanır ve problemi potansiyel tabanlı olarak çözer. Dirichlet tipi sınır şartında Neumann tipi sınır şartından da faydalanılır ve cisim içindeki potansiyel keyfi olarak seçilen bir sabite eşitlenerek Green Fonksiyonu çözülür. Doğrudan Olmayan (İndirekt) yöntemin uygulaması daha kolay olmasına karşın, sayısal olarak Dirichlet tipi sınır şartı daha sağlam sonuçlar vermektedir.

(2.22) no.'lu denklem ile cisim üzerindeki kaynak ve dipol dağılımı bulunarak buradan teğetsel hızlara geçilir (viskozite ihmal edildiği için duvar üzerinde kaymama koşulu olmadığı unutulmamalıdır). Teğetsel hızlar bulunduktan sonra da Bernoulli denklemi ile cisim üzerindeki basınç dağılımı bulunur. Hızların bulunması aynı zamanda cisim etrafındaki sirkülasyon ve kaldırma kuvvetinin bulunmasını da sağlayacaktır.

#### 2.1.4 Sınır elemanları yönteminin matematiksel ifadesi

Sınır elemanları yöntemi ile ilgili ilk kitap Brebbia tarafından 1978 yılında yazılmış; o tarihe kadar mühendislik alanında uygulamaları sınırlı kalmıştır. Hess ve Smith'in bir kanat etrafındaki akışı çözmek için geliştirdiği yöntem, bütün mühendislik alanlarında uygulanabilecek komple bir yöntem olmaktan ziyade yalnızca özel bir problemin çözümüne yönelik bir yöntemdir [27]. Ancak Hess ve Smith'in geliştirdiği yöntem bugün gemi ve uçak mühendisliği alanlarında halen yoğun olarak kullanılmaktadır.

Sınır elemanları yöntemi birçok diferansiyel denklemin sayısal çözümü için kullanılabilir. Ancak bu çalışmada cisimler etrafındaki akış inceleneceğinden akışkanlarda kütle korunumunu da ifade eden Laplace denkleminin çözümü için kullanılacaktır. (2.2) no.'lu denklemde de verildiği gibi Laplace denklemi;

$$\nabla^2 \Phi = 0$$

olarak ifade edilmişti. Bu denklemi sağlayan  $\Phi$  potansiyeli ise (2.22) no.'lu denklemde verilmişti.

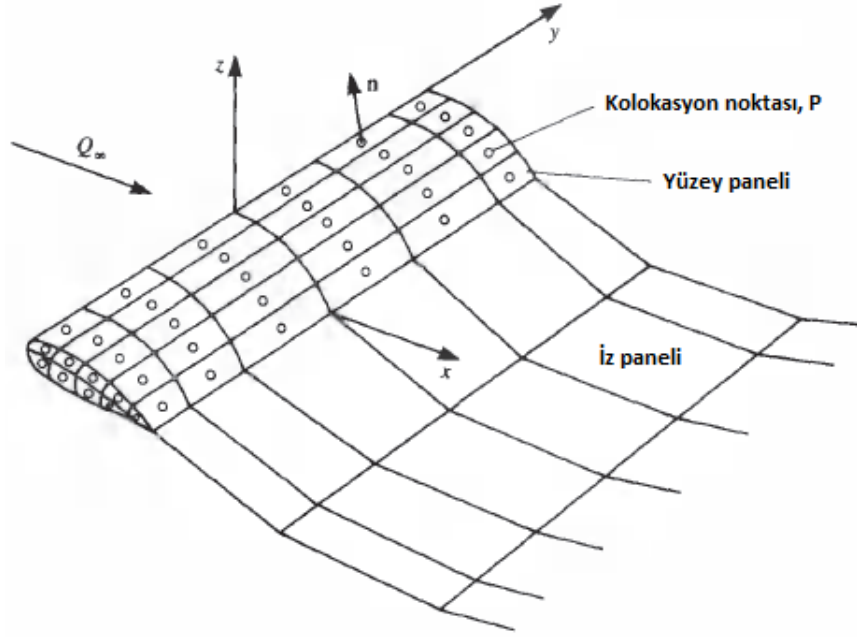
$$\Phi(P) = \frac{1}{4\pi} \int_{S_B} \left[ \sigma \left( \frac{1}{r} \right) - \mu \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{1}{r} \right) \right] + \frac{1}{4\pi} \int_{S_W} \left[ \mu \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{1}{r} \right) \right] dS + \Phi_\infty(P)$$

Bu denklemin sınır elemanları yöntemi vasıtasıyla çözümü seçilen sınır şartına göre değişecektir. Dirichlet tipi sınır şartında sabit  $\Phi_\infty(P)$  değeri keyfi olarak seçilebilir.

Bu şekilde  $\Phi_{\infty}(P) = \Phi(P)$  olarak seçilerek, (2.22) no.'lu denklem sayısal olarak yeniden yazıldığında;

$$\sum_{k=1}^N \frac{1}{4\pi} \int_{cisim} \mu \mathbf{n} \cdot \nabla \left( \frac{1}{r} \right) dS + \sum_{k=1}^{N_w} \frac{1}{4\pi} \int_{iz} \mu \mathbf{n} \cdot \nabla \left( \frac{1}{r} \right) dS - \sum_{k=1}^N \frac{1}{4\pi} \int_{cisim} \sigma \left( \frac{1}{r} \right) dS = 0 \quad (2.23)$$

Sınır elemanları yöntemi cisim ve akışkanda bıraktığı iz yüzeyini panellere ayırarak sayısal olarak çözüm yapar. Cisim, iz yüzeyi ve koordinat eksen takımının seçimi şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Cisim ve iz yüzeyi üzerinde panel dağılımı [26].

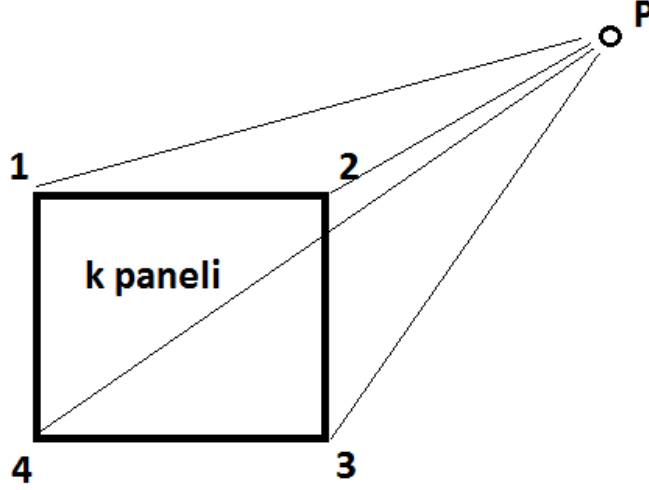
(2.23) no.'lu denklemde verilen toplam ifadesi cisim yüzeyi üzerinde N adet, iz yüzeyi üzerinde ise  $N_w$  adet panel bulunduğunu kabul etmektedir. Bu denklem ile cisim ve iz yüzeyi üzerinde bulunan kaynak ve dipollerin toplamının sifıra eşit olduğu gösterilmektedir. ( $\Phi_{\infty}(P) = \Phi(P)$  seçildikten sonra) Bu denklemin sifıra eşit olmaması Laplace denklemini ihlal edecektir. (2.23) no.'lu denklemdeki integrasyon ise panel yüzeyi boyunca alınmaktadır. Paneller dörtgen olarak seçildiğinde cisim üzerinde herhangi bir panel üzerinde bulunan P noktası üzerinde k paneline ait dipolün etki katsayısı;

$$\left. \frac{1}{4\pi} \int_{1,2,3,4} \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{1}{r} \right) dS \right]_k = C_k \quad (2.24)$$

olarak tanımlanır. Aynı şekilde, cisim üzerinde herhangi bir panel üzerinde bulunan P noktası üzerinde k paneline ait kaynağın etki katsayısı ise;

$$\frac{-1}{4\pi} \int_{1,2,3,4} \left( \frac{1}{r} \right) dS \Big]_k = B_k \quad (2.25)$$

olarak verilir. k panelinin uç noktaları ile P noktası arasındaki bağlantı şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : Panel numaralandırması ve keyfi P noktası ile ilişkisi.

(2.23) no.'lu denklemde k paneli cisim, l paneli ise iz yüzeyi üzerinde tanımlanmıştır. (2.24) ve (2.25) no.'lu denklemlerden faydalanarak (2.23) no.'lu denklem cisim içerisinde bulunan keyfi bir P noktası için yeniden yazılırsa,

$$\sum_{k=1}^N C_k \mu_k + \sum_{l=1}^{N_w} C_l \mu_l + \sum_{k=1}^N B_k \sigma_k = 0 \quad (2.26)$$

elde edilir. (2.26) no.'lu denklemin sol tarafındaki üçüncü teriminde kaynak şiddetleri Neumann tipi sınır şartı vasıtasıyla belirlenerek denklemin sağ tarafına atılır. Geriye bilinmeyenler olarak cisim ve iz yüzeyi üzerindeki dipol şiddetleri kalacaktır. İz yüzeyi panelleri üzerindeki dipol şiddetleri Kutta şartı sayesinde cisim yüzeyi üzerindeki dipol şiddetleri cinsinden tanımlanabilir. Örneğin kanadın üst yüzeyindeki bir panelin dipol şiddeti  $\mu_1$ , kanadın alt yüzeyindeki (üst yüzeydeki panele komşu) panelin dipol şiddeti ise  $\mu_2$  olarak tanımlanırsa, iz yüzeyi üzerindeki dipol şiddeti  $\mu_3$ ;

$$\mu_3 = \mu_1 - \mu_2$$

olarak tanımlanabilir. Dolayısıyla iz yüzeyine komşu olan panellerin etki katsayılarına iz yüzeyinden gelen etkilerin katılması gerekecektir. Bu yöntemle iz yüzeyi üzerindeki dipol şiddeti  $\mu_l$ , cisim yüzeyi üzerindeki dipol şiddeti  $\mu_k$  cinsinden

yazılabilecektir. Bu durumda (2.26) no.'lu denklemin ikinci terimi de birinci terimin içine dahil edilerek;

$$\sum_{k=1}^N A_k \mu_k = - \sum_{k=1}^N B_k \sigma_k \quad (2.27)$$

yazılır. Burada sol taraftaki etki katsayısının  $C_k$ 'dan  $A_k$ 'ya döndüğüne dikkat edilmelidir. Bunun sebebi yukarıda anlatıldığı gibi iz yüzeyi dipollerinin cisim yüzeyi dipolleri cinsinden yazılması sebebiyledir. Bu iki etki katsayısı arasındaki ilişki;

$$\text{panel izler kenarda değilse} \rightarrow A_k = C_k$$

$$\text{panel izler kenarda ise} \rightarrow A_k = C_k \pm C$$

şeklinde.  $C$ , iz yüzeyi dipollerinden gelen etki katsayısını temsil etmektedir. (2.27) no.'lu denklemde bilinmeyen artık bir tek  $\mu_k$  değeridir. Bu denklem matris formatına çevrilerek çözüldüğünde cisim yüzeyi üzerindeki dipol şiddetleri bulunmuş olacaktır.

## 2.2 Sonlu Hacim Yöntemi (SHM)

Bu çalışmada sonlu hacim yöntemi, ticari bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programı kullanılarak uygulanmıştır. Bu tip programlar problemlerin çözümü için genel olarak transport denklemini kullanırlar. Transport denklemi çok geniş bir perspektifte akış problemlerinin çözümü için kullanılabilir. Taşınım ve difüzyon problemleri akış momentum denkleminin daha genel bir ifadesi olan transport denklemiyle çözülebilir. RANSE denklemleri ise transport denkleminin daha özel bir hali olarak anılabilir.

Sonlu hacim yöntemi, analitik olarak çözümü olmayan bir diferansiyel denklemin sayısal olarak çözülmesi için kullanılır. Yöntemin içeriği anlatılmadan önce, analitik çözümleri olmayan ve ticari HAD programlarının kullandığı transport ve RANSE denklemlerinin anlatılması daha uygun olacaktır.

### 2.2.1 Transport denklemi

Çoğu akış çözümlemesinde genel olarak üç korunum kanunundan bahsedilebilir. Bu korunum kanunları;

- Kütlelerin korunumu
- Momentumun korunumu ve
- Enerjinin korunumu

olarak ifade edilir. Gemi mühendisliğini ilgilendiren alanların birçoğunda akış sıkıştırılmaz olarak kabul edilecektir. Akış sıkıştırılmaz olduğunda basınçla sıcaklığın değişmediği kabul edilir. Dolayısıyla enerjinin korunumu çoğu gemi mühendisliği problemlerinde ihmal edilir.

Bu korunum kanunlarının genel ifadesi transport denklemi sayesinde verilebilir:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\vec{V}) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S_\phi \quad (2.28)$$

Burada  $\phi$ , akışkanın bir özelliği olarak verilmektedir.  $S_\phi$  ise kaynak terimi olarak verilmektedir.  $\phi = 1$  olarak ele alındığında kütle korunumu denklemi elde edilir:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{V}) = 0 \quad (2.29)$$

$\phi$ , üç boyutlu akışkan hareketini ifade ediyorsa buradan akışkanın momentum denklemi elde edilebilir.  $\phi = u$  olarak yazıldığında, x yönündeki hareket denklemi elde edilir:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u\vec{V}) = \nabla \cdot (\mu\nabla u) - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x \quad (2.30a)$$

$\phi = v$  olarak yazıldığında y yönündeki hareket denklemi elde edilir:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v\vec{V}) = \nabla \cdot (\mu\nabla v) - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y \quad (2.30b)$$

$\phi = w$  olarak yazıldığında ise z yönündeki hareket denklemi elde edilecektir:

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w\vec{V}) = \nabla \cdot (\mu\nabla w) - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z \quad (2.30c)$$

$\phi$  sıcaklık terimi olarak yazıldığından enerji denklemini de elde etmek mümkündür [28]. Ancak bu çalışmada akış sıkıştırılmaz kabul edildiğinden dolayı enerji denklemine ihtiyaç duyulmamıştır.

### 2.2.1.1 Kütle korunumu denkleminin çeşitli formları

Transport denklemi ifadesinde  $\phi = 1$  olarak ele alındığında kütle korunumunu ifade eden denklem no. (2.29) elde edilmişti. Kütle korunum denkleminin eldesi ileriki bölümlerde anlatılacaktır. Bu bölümde yalnızca, akışın belirli hallerinde kütle korunum denkleminin ne türlü halleri alabildiğiyle ilgilenilecektir.

Akışın sıkıştırılmaz olması, yoğunluğun herhangi bir parametrenin etkisinde değişmediği ve sabit kaldığını gösterir. Bu durumda (2.29) no.'lu denklemde genel

hali verilmiş olan kütlenin korunum denkleminde yoğunluk  $\rho$  sabit kalacaktır. Dolayısıyla sıkıştırılmaz akış için yoğunluk değişkeni zamana ve konuma göre alınan türevlerin dışına alınabilir. Böylece kütlenin korunum denklemi;

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2.31)$$

halini alır. Bu denklemin sol tarafındaki ilk terim zamana bağlı herhangi bir parametre olmamasından dolayı sifıra eşit olacaktır. Sol tarafın ikinci teriminde ise yoğunluk denklemin sağ tarafına atılarak;

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2.32)$$

denklemi elde edilir.

Akışın daimi olduğu durumda zamana bağlı herhangi bir olay gelişmeyecektir. Dolayısıyla bu durumda  $\partial/\partial t = 0$  olacağından, kütlenin korunumu denklemi;

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.33)$$

Akış hem daimi, hem de sıkıştırılmaz ise, yine yoğunluk terimini türev ifadesinin dışına çıkararak;

$$\rho \nabla \cdot \vec{V} = 0 \rightarrow \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2.34)$$

yazılabilir. Akışın yalnızca sıkıştırılmaz olduğu durum için verilen kütlenin korunumu denklemi ile (denklemler no. (2.32)) akışın hem sıkıştırılmaz, hem de daimi olduğu durum için verilen kütlenin korunumu denkleminin (denklemler no. (2.34)) birbirine eşit olduğuna dikkat edilmelidir. Denklem no. (2.32)'de akışın daimi olup olmadığı ile ilgili herhangi bir bilgi verilmemesine karşın, denklem kendiliğinden daimiymiş gibi davranmaktadır. Akışın daimi olmayan ve sıkıştırılmaz olduğu durumlar için zaman terimini katmanın farklı yöntemleri bulunmaktadır [26]. Ancak bu doktora çalışmasında tüm çözümler akışın daimi olduğu kabulü ile yapıldığından bu konuya değinilmeyecektir.

### 2.2.1.2 Momentumun korunumu denkleminin çeşitli formları

Momentumun korunumu denklemleri, transport denkleminde  $\phi$  değişkeninin yerine hız parametresinin uzaydaki bileşenlerinin konmasıyla elde edilmişti. Bu bölümde momentumun korunumu denklemlerinin çeşitli halleri ve bazı özel durumları

anlatılacaktır. Momentumun korunumu denkleminin elde edilişi daha sonra anlatılacaktır.

Akış potansiyel olarak kabul edilirse (2.30) no.'lu denklem setinde verilen Navier – Stokes denklemleri, viskoz terimler ihmal edilmek suretiyle Euler denklemlerine dönüşür. Bunun yanında akış zamandan bağımsız olarak tanımlanırsa, zamana bağlı terimler de denklemden çıkarılabilir. Bu durumda Euler denklemleri;

$$x \text{ yönündeki hareket denklemi: } \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho \vec{g}_x \quad (2.35a)$$

$$y \text{ yönündeki hareket denklemi: } \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho \vec{g}_y \quad (2.35b)$$

$$z \text{ yönündeki hareket denklemi: } \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho \vec{g}_z \quad (2.35b)$$

olarak yazılabilir. Akış viskoz ve daimi (yani zamandan bağımsız) olduğunda denklem seti;

$$x \text{ yönündeki hareket denklemi: } \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = \nabla \cdot (\mu \nabla u) - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho \vec{g}_x \quad (2.36a)$$

$$y \text{ yönündeki hareket denklemi: } \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = \nabla \cdot (\mu \nabla v) - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho \vec{g}_y \quad (2.36b)$$

$$z \text{ yönündeki hareket denklemi: } \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = \nabla \cdot (\mu \nabla w) - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho \vec{g}_z \quad (2.36b)$$

olarak yazılır. Momentum denklemleri yalnızca iki boyutlu akış durumları için de geçerlidir. Bu durumda denklem sayısı üçten ikiye inecektir; çoğu durumda z yönündeki hareket denklemi korunum denklemleri içerisinden çıkartılır.

Euler denkleminde, belirli matematiksel dönüşümlerle, Euler denkleminde belki de çok daha bilinen Bernoulli denklemi elde edilebilir. Basit olması açısından bir boyutlu Euler denklemi yazılacak olunursa;

$$\nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho \vec{g} \quad (2.37)$$

burada, akış bir boyutlu olduğundan dolayı  $u\vec{t} = \vec{V}$  ve  $\nabla = \frac{d}{dx}$  olacaktır. Dolayısıyla (2.37) no.'lu denklem;

$$\frac{d}{dx}(\rho u u) = -\frac{dp}{dx} + \rho \vec{g} \quad (2.38)$$

halini alacaktır. Burada (2.37) no.'lu denklemin sağ tarafındaki kısmi türevin (2.38) no.'lu denklemde normal türeve döndüğüne (akış bir boyutlu olarak kabul edildiği

için basınç artık tek değişkene bağlıdır) dikkat edilmelidir. (2.38) no.'lu denklem düzenlenerek yazıldığında;

$$\rho \int u du = - \int dp + \rho \vec{g} \int dx \quad (2.39)$$

şeklini alır. İntegral çözümlenerek denklemin genel ifadesi yazıldığında ve  $\vec{g} = -g\vec{i}$  olarak tanımlandığında Bernoulli denkleminin genel ifadesi elde edilecektir:

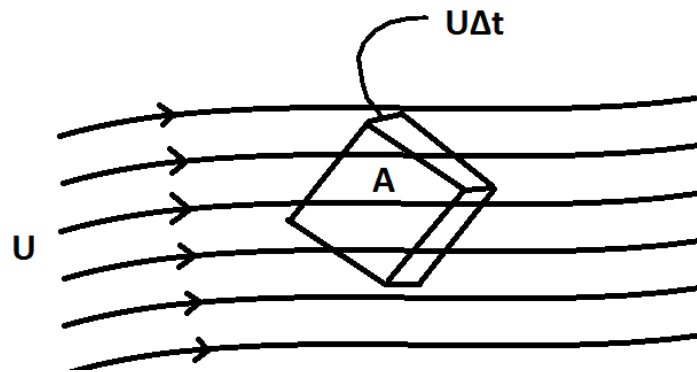
$$p + \frac{1}{2}\rho u^2 + \rho gx = \text{sabit} \quad (2.40)$$

Burada  $\frac{1}{2}\rho u^2$  hidrodinamik,  $\rho gx$  ise hidrostatik basıncı verir.  $p$  ise atmosferik basıncı ifade eder.

### 2.2.1.3 Kütlelerin korunum denkleminin elde edilmesi

Kütlenin korunum denklemini izah etmeye başlamadan önce debi kavramının iyi bilinmesi gerekir. Bu bölümde aslında kütleli debiden bahsedilecektir ancak kısa olması bakımından isim olarak sadece debi kullanılacaktır. Hareketli ve  $U$  hızında akan bir akışkan içerisinde şekil 1'deki gibi geçirgen bir  $A$  yüzeyinin bulunduğu farz edilsin. Bu  $A$  yüzeyine dik olan bir de  $\vec{n}$  normal vektörü bulunmaktadır. Herhangi bir  $t$  anında  $A$  yüzeyinde olan akışkan  $\Delta t$  kadar zaman sonra belirli bir mesafe kat edecektir. Yine bu kat ettiği mesafe şekil 2.5'te  $U\Delta t$  olarak gösterilmiştir.  $A$  yüzeyinden geçen akışkanın  $\Delta t$  kadar zaman sonra oluşturduğu hacim şöyle ifade edilir:

$$\Delta V = U_n A \Delta t$$



Şekil 2.5 : Kütleli debinin izahı için izafi bir  $A$  hacmi.

Burada  $U_n$ ;  $U$  hızıyla akan akışkanın  $A$  yüzeyine normal  $\vec{n}$  doğrultusundaki bileşenidir.

$$U_n = \vec{U} \cdot \vec{n}$$

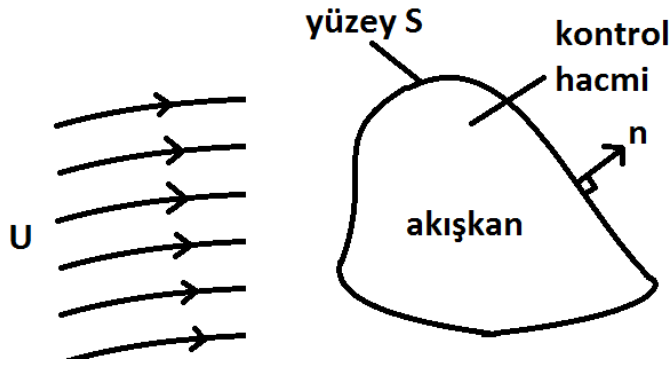
Taranan hacimden geçen kütle;

$$\Delta m = \rho \Delta V = \rho U_n A \Delta t$$

olarak ifade edilir. Debi ise aynı alandan birim saniyede geçen kütle miktarıdır:

$$Q = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho U_n A$$

Kütlenin korunumu denkleminin elde edilişi için U hızıyla akan herhangi bir akış içerisinde bir kontrol hacmi seçildiğini farz edilsin. Bu durum şekil 2.6'da temsil edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 2.6 : Kontrol hacmi ve yüzeye normal vektör.

Seçilen kontrol hacmi içindeki kütlenin korunması için; S yüzeyinden içeri giren debiyle, kontrol hacmi içindeki zamana bağlı kütle artışının eşit olması gerekir. Bu durum matematiksel olarak şu şekilde izah edilebilir:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint \rho dV = - \oiint \rho \vec{U} \cdot \vec{n} dS \quad (2.41)$$

Denklemin sağ tarafına diverjans teoremi uygulanarak;

$$\oiint \rho \vec{U} \cdot \vec{n} dS = \iiint \nabla \cdot (\rho \vec{U}) dV \quad (2.42)$$

elde edilir. (2.41) no.'lu denklemde zamana göre türev integral içerisine alınıp, sağ taraf (2.42) no.'lu denklemle değiştirilirse;

$$\iiint \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \iiint \nabla \cdot (\rho \vec{U}) dV = 0 \quad (2.43)$$

(2.43) no.'lu denklem kütlenin korunumu denkleminin integral halidir. İntegraller alınarak diferansiyel durumuna geçilirse, kütlenin korunumu denklemi aşağıdaki şekli alacaktır:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (2.44)$$

#### 2.2.1.4 Momentumun korunumu denkleminin elde edilmesi

Akışkanda momentumun korunumu denklemi aslında Newton'un ikinci hareket yasasına dayanır. Newton'un ikinci hareket yasasına göre, bir cisim üzerindeki net kuvvet onun momentumunun zamanla değişimi ile orantılıdır. Genel olarak  $F = ma$  olarak bilinen bu yasanın genel hali;

$$F = \frac{d}{dt}(m\vec{U}) \quad (2.45)$$

olarak yazılmaktadır. Momentum, kütle ile hızın çarpımıdır. Momentumun zamanla değişimi ise cisim üzerindeki net kuvveti verecektir.

Akışkanlarda momentumun korunumu Navier – Stokes denklemi olarak da adlandırılmaktadır. Momentumun korunum denklemini elde etmek için (2.45) no.'lu denklemin sağ ve sol tarafları parçalara ayrılacaktır. Denklemin sol tarafı  $F$ , ikiye ayrılır:

- Dış kuvvetler: Yerçekimi, elektromanyetik kuvvet vs. gibi kuvvetler olabilir. Akışkan problemleri için yerçekimi kuvveti olarak geçecektir.
- Yüzeyle etkileyen kuvvetler: Cismin yüzeyine basınç ve kayma gerilmeleri etkir. Bu gerilmeler cisim üzerinde bir kuvvet yaratır.

Akışkan içerisindeki cismin birim kütesine düşen dış kuvvete  $f$  denecek olursa, sonsuz küçük bir elemana etkileyen toplam dış kuvvet;

$$\vec{f}dm = \vec{f}\rho dV$$

olur. Birim yüzeye gelen dış kuvvet akışkan içerisindeki bütün cismin yüzeyi boyunca entegre edilirse;

$$Dış kuvvet = \iiint_V \rho \vec{f} dV$$

halini alır.

Akış içerisindeki cisme etkileyen yüzey kuvvetler ikiye ayrılabilir. Bunlar; cisme dik olarak etkileyen basınç kuvveti ve cisme yatay olarak etkileyen ve kayma gerilmelerinden oluşan viskoz kuvveti olarak adlandırılırlar. Cismin sonsuz küçük bir  $dS$  yüzeyine etkileyen basınç kuvveti  $-pdS$  olarak alınır. Dolayısıyla;

$$Basınç kuvveti = - \iint_S pdS$$

Yüzeye etkiyen kayma kuvveti ise  $F_{viskoz}$  olarak adlandırılırsa yüzeye etkiyen kuvvet;

$$Yüzeye\ etkiyen\ kuvvet = - \iint_S p dS + F_{viskoz}$$

olarak bulunur. Dolayısıyla Newton'un ikinci hareket yasasını veren (2.45) no.'lu denklemin sol tarafı şu hali alacaktır:

$$F = \iiint_V \rho \vec{f} dV - \iint_S p dS + F_{viskoz} \quad (2.46)$$

Denklemin sağ tarafı  $\frac{d}{dt}(m\vec{U})$  ikiye ayrılır:

- Kontrol hacmi yüzeyinden çıkan momentum akışı
- Kontrol hacminde zamana bağlı olarak değişen momentum azalması,

Yukarıda momentumun kütle ile hızın çarpımı olduğu belirtilmişti. Kontrol hacminin yüzeyinden kaçan momentum akışı ise kütleli debi ile akış hızının çarpımı olacaktır. Kütleli debi ile akış hızı,

$$Kütleli\ debi = \iint_S \rho \vec{U} \cdot \vec{dS} \quad , \quad Akış\ hızı = \vec{U}$$

olarak ifade edilir. Bu durumda kontrol hacminin yüzeyinden kaçacak olan momentum akışı şu şekilde ifade edilecektir:

$$Kontrol\ hacmi\ yüzeyinden\ çıkan\ momentum\ akışı = \iint_S (\rho \vec{U} \cdot \vec{dS}) \vec{U}$$

Kontrol hacminde zamana bağlı olarak değişen momentum azalması ise;

*Kontrol hacminde zamana bağlı olarak değişen momentum azalması*

$$= \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV \cdot \vec{U}$$

olarak verilir. Bu durumda (2.45) no.'lu denklemin sağ tarafı şu hale gelecektir:

$$\frac{d}{dt}(m\vec{U}) = \iint_S (\rho \vec{U} \cdot \vec{dS}) \vec{U} + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV \cdot \vec{U} \quad (2.47)$$

Denklemler (2.46) ile denklemler (2.47) birleşerek denklemler (2.48)'in içine atıldığında momentumun korunumu denkleminin integral hali elde edilmiş olur:

$$\iiint_V \rho \vec{f} dV - \iint_S p dS + F_{viskoz} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV \cdot \vec{U} + \iint_S (\rho \vec{U} \cdot \vec{dS}) \vec{U} \quad (2.48)$$

Momentum denkleminin diferansiyel halini elde etmek için (2.48), no.'lu denklemin sağ ve sol taraflarının ikinci terimlerine diverjans teoremi uygulanarak, tüm denklemi hacimsel bazda yazmak gerekecektir. Sol tarafın ikinci terimine diverjans teoremi uygulandığında;

$$\iint_S p dS = \iiint_V \nabla p dV \quad (2.49)$$

elde edilir. Sağ tarafın ikinci terimine diverjans teoremi uygulandığında ise;

$$\iint_S (\rho \vec{U} \cdot \vec{dS}) \vec{U} = \iiint_V \nabla \rho \vec{U} \vec{U} dV \quad (2.50)$$

ifadesi bulunacaktır. (2.49) ve (2.50) no.'lu denklemler (2.48) no.'lu denklemde yer değiştirildiğinde denklem;

$$\iiint_V \rho \vec{f} dV - \iiint_V \nabla p dV + F_{viskoz} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV \cdot \vec{U} + \iiint_V \nabla \rho \vec{U} \vec{U} dV$$

halini alır. Bu denklem integrallerden kurtarılıp düzenlenerek yeniden yazılırsa, momentumun korunumu denkleminin diferansiyel (en bilinen) hali elde edilmiş olur:

$$\frac{\partial(\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) = -\nabla p + \rho \vec{f} + F_{viskoz} \quad (2.51)$$

$F_{viskoz}$ 'un yerine lineerleştirilmiş kayma gerilmesi ifadesi yazılıp, üç boyutlu uzayda momentum denklemleri yeniden yazılırsa, momentum korunum denklemleri x, y ve z düzlemlerinde şu halleri alacaklardır:

$$x - momentum: \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (2.52a)$$

$$y - momentum: \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (2.52b)$$

$$z - momentum: \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (2.52c)$$

### 2.2.2 RANSE denklemi

Yukarıda transport denklemi anlatılırken bahsedilen momentum denklemi maddesel türev kullanılarak tansörel notasyonda aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = F_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 u_i \quad (2.53)$$

Doktora tezi kapsamında yapılan çalışmada gemi ve takıntıları etrafındaki akım incelenmiştir. Gemiler yüksek Reynolds sayılarında çalıştıklarından, etraflarındaki akım önemli derecede türbülanslıdır. Türbülanslı akışların karmaşık yapısından kaynaklanan ve önceden tam olarak kestirilemeyen etkilerinden dolayı parametrelerin zaman içerisinde ortalama değerleri alınarak sonuca gitmek bir yöntem olarak kullanılabilir. Bu yaklaşım (RANSE) Navier – Stokes ile süreklilik denklemlerinin zaman içerisinde ortalamalarının alınması ile tansör notasyonunda şu denklemi doğurur:

$$\rho \frac{D\bar{u}_i}{Dt} = F_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 \bar{u}_i - \rho \left( \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_i} \right) \quad (2.54)$$

Burada  $\bar{u}_i, \bar{p}$  ve  $\overline{u'_i u'_j}$  parametrelerin, zaman içindeki ortalama değerlerini ifade etmektedir. Kısaca bahsetmek gerekirse;  $u, v, w$  gibi değerler bir noktadaki akımın hızıyken,  $u', v', w'$  aynı noktadaki akım hızındaki salınımlardır. Akım hızının, zaman içindeki salınımlarla parametrelerin ortalaması arasındaki ilişki şöyle ifade edilmektedir.

$$u = \bar{u} + u' \quad v = \bar{v} + v' \quad w = \bar{w} + w' \quad (2.55)$$

RANSE denklemindeki son terim Reynolds gerilmeleri bileşenidir ve yöntemin yaklaşımından ileri gelen zaman içerisindeki salınımları ifade eder. Benzer şekilde süreklilik denklemi ise şu şekilde ifade edilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \rho \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \rho \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (2.56)$$

### 2.2.3 Sonlu hacim yönteminin matematiksel ifadesi

Sonu hacim yönteminin akış problemleri için uygulaması daha önceden de söylendiği gibi transport denklemi vasıtasıyla olur. Transport denkleminin bir adı da taşınım – dağıtım (convection – diffusion) denklemdir. Gemi mühendisliğini ilgilendiren akış problemlerinde dağıtımın etkisi azdır; genellikle taşınım daha önemli olmaktadır. Hatırlanacağı gibi transport denklemi,

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\vec{V}) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S_\phi \quad (2.57)$$

olarak verilmişti. Bu çalışmadaki bütün çözümler daimi akış için yapılacağından, denklemdeki zamana bağlı parametre sifira eşitlenerek, daimi transport denklemi;

$$\nabla \cdot (\rho\phi\vec{V}) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S_\phi \quad (2.58)$$

olarak yazılabilir. Seçilen bir kontrol hacmi boyunca (2.57) no.'lu denklem entegre edilirse;

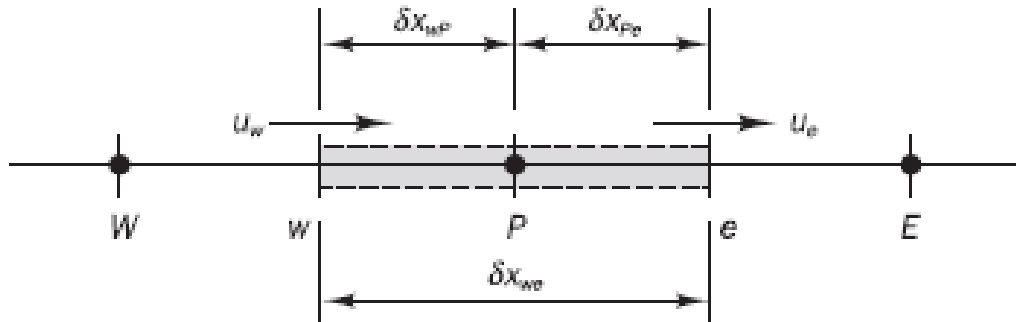
$$\int_A \mathbf{n} \cdot (\rho \phi \mathbf{u}) dA = \int_A \mathbf{n} \cdot (\Gamma \text{grad} \phi) dA + \int_{KH} S_\phi dV \quad (2.59)$$

daimi transport denkleminin belirli bir kontrol hacmindeki integral formu elde edilir. Sonlu hacim yönteminin matematiksel ifadesi basit olması açısından bir boyutlu akış durumu için tanımlanacaktır. Bir boyutlu korunum denklemleri;

$$\text{Kütlenin korunumu: } \frac{d(\rho u)}{dx} = 0 \quad (2.60a)$$

$$\text{Momentumun korunumu: } \frac{d(\rho u u)}{dx} = \frac{dp}{dx} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \rho g_x \quad (2.60b)$$

Korunum denklemleri (2.58) no.'lu denklem uyardığında seçilen belirli bir kontrol hacmi boyunca entegre edilmelidir. Belirli bir P noktasında yapılacak hesap için seçilen kontrol hacmi şekil 2.7'de verilmiştir. (Burada verilen P noktası basıncı ifade eden p ile karıştırılmamalıdır.)



Şekil 2.7 : 1 – boyutta sonlu hacim yönteminin ayrıklaştırılması [28].

(2.58) no.'lu denklemde verilen entegrasyona göre korunum denklemleri sayısal olarak yazıldığında;

$$(\rho u A)_e - (\rho u A)_w = 0$$

$$(\rho u A u)_e - (\rho u A u)_w = \left[ \left( \mu A \frac{du}{dx} \right)_e - \left( \mu A \frac{du}{dx} \right)_w \right] + \int_{KH} S_\phi dV$$

Bu ifadedeki basınç ve yerçekimi ile ilgili terimler transport denklemindeki kaynak terimi olarak adlandırılan  $S_\phi$ 'nin içine atılmıştır. Yerçekiminin ihmal edildiği durumda kaynak terimi yalnızca basınç teriminden meydana gelecektir.  $F = \rho u$  ve  $D = \mu / \delta x$  kısaltmaları yapılarak korunum denklemleri yeniden yazıldığında;

$$F_e - F_w = 0 \quad (2.61a)$$

$$F_e A u_e - F_w A u_w = D_e A (u_E - u_P) - D_w A (u_P - u_W) + (p_e - p_w) \quad (2.61b)$$

elde edilir. Burada akışkan hız alanının bir şekilde bilindiği farz edilerek işlemlere başlanmaktadır. Sonlu hacimler yöntemi iteratif bir yöntemdir. Dolayısıyla hız alanı için bir ilk değer belirlenerek işlemlere başlanmalıdır. Belirli sayıda iterasyon sonrasında işlemler yakınsayacak ve sayısal sonuçlar elde edilecektir. Ancak bu ilk belirlenecek hız alanı değerleri iteratif yöntemin yakınsaması için önemlidir. Sonlu hacimler yönteminin en önemli sorunlarından bir tanesi de yöntemin yakınsaması sorunudur. Başlangıçta doğru bir şekilde ilk değerler seçilerek ve akışkan bölgesi iyi bir şekilde ağlarla örülerek yöntemin en azından daha kısa sürede yakınsaması sağlanabilir [28].

### **3. BAZI TEMEL PROBLEMLERİN ÇÖZÜMÜ**

Bu bölümde literatürde sonuçları belli olan bazı temel problemlerin farklı yöntemlerle çözümleri yapılmıştır. Sonuçlar, sınır elemanları ve sonlu hacimler yöntemleri kullanılarak alınmış ve yöntemlerin birbirlerine olan üstünlükleri her bölüm sonunda değerlendirilmiştir.

Bölüm boyunca akış içerisindeki cisimlerin etkileşimini belirleyen temel parametreler de incelenmiştir. Bu temel parametreler yine sınır elemanları ve sonlu hacimler yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Sonlu hacimler yöntemi, temel problemlere ticari HAD programı kullanılarak uygulanmış; sınır elemanları yönteminin uygulaması ise geliştirilen kodlar sayesinde olmuştur. Bölüm boyunca sonuçları kullanılan FORTRAN kodları ekte verilmiştir.

Viskoz çözümlerin gerektirdiği durumlarda sonlu hacimler yönteminin getirdiği faydalardan yararlanılırken, viskoz olmayan çözümlerde sınır elemanları kodları kullanılmıştır. Bölüm sonunda ise kullanılan tüm çözüm yöntemlerinin bir değerlendirmesi yapılmıştır.

#### **3.1 İki Boyutlu Silindir Etrafındaki Akış**

Bu bölümde sınır elemanlar ve sonlu hacim yöntemleri kullanılarak iki boyutlu akışkan içerisinde tamamen batmış halde bulunan bir silindir etrafındaki akış incelenmeye çalışılmıştır. Akış önce potansiyel olarak kabul edilerek çözülmüş ve bulunan sonuçlar hem sınır elemanları yöntemi hem de sonlu hacim yönteminden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Daha sonra viskoz akımda sonlu hacim yönteminin etkinliği irdelenmiştir.

Silindir etrafındaki akışın temel parametrelerini anlamak adına boyutsuz çalışılmış ve silindirin yarıçapı ile serbest akımın hızı 1 birim olarak alınmıştır. Silindir; sırasıyla 10, 20, 100 panelle temsil edilmek suretiyle sayısal yöntem üzerindeki etkinliği araştırılmaya çalışılmıştır.

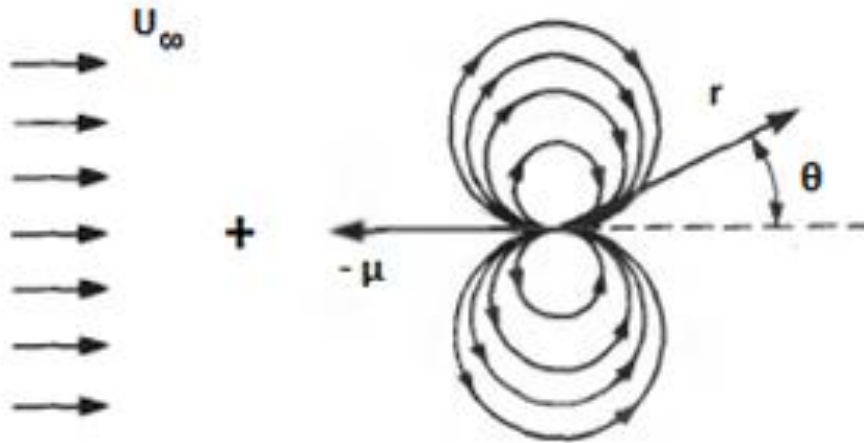
Silindir etrafındaki akış aşağıda verilen iki yöntemle modellenmiştir. Bunlar sırayla:

- Sınır elemanları yöntemi
  - o Sabit şiddetli kaynak yöntemi
  - o Birleşik kaynak – dipol yöntemi
- Sonlu hacim yöntemi'dir.

Bu yöntemler analitik yöntemle karşılaştırılarak etkinlikleri incelenmiştir.

### 3.1.1 Analitik çözüm

Silindir etrafındaki akış bir dipol ve serbest akım ile temsil edilebilir. Şekil 3.1'de verildiği gibi +x yönünde hareket eden bir serbest akım ile -x yönlü bir dipolün süperpoze edilmesi silindir etrafındaki potansiyel akışı verecektir. Analitik çözüm için silindirik koordinatlar kullanılacaktır. Yön olarak +x yönü ve dönüş yönü olarak da saat yönünün tersi pozitif olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.1 : Serbest akım içerisinde yerleştirilmiş bir dipol [26].

Serbest akımın potansiyeli  $\Phi_1$ , dipolün potansiyeli  $\Phi_2$  ile gösterilirse;

$$\Phi_1 = U_\infty r \cos \theta \quad \text{ve} \quad \Phi_2 = \frac{\mu \cos \theta}{2\pi r}$$

olarak verilir. Bu iki potansiyelin süperpoze edilmesi ile;

$$\Phi_T = \Phi_1 + \Phi_2 = U_\infty r \cos \theta + \frac{\mu \cos \theta}{2\pi r}$$

toplam hız potansiyeli elde edilir. Hız potansiyelinin radyal ve eksenel yönlerdeki türevleri radyal ve eksenel hızları verecektir:

$$q_r = \frac{\partial \Phi_T}{\partial r} = \left( U_\infty - \frac{\mu}{2\pi r^2} \right) \cos \theta$$

$$q_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi_T}{\partial \theta} = - \left( U_\infty + \frac{\mu}{2\pi r^2} \right) \sin \theta$$

Burada  $q_r$  radyal hızı,  $q_\theta$  ise eksenel hızı göstermektedir. Kinematik sınır şartına göre silindir üzerindeki radyal hız sıfır olacağından bütün  $\theta$  açıları için  $q_r = 0$  olacaktır. Bu durumda;

$$r = \left( \frac{\mu}{2\pi U_\infty} \right)^{1/2}$$

Radyal bileşen  $r$  silindirin yarıçapı  $R$  olarak alınır, dipol şiddeti;

$$\mu = 2\pi U_\infty R^2$$

olarak bulunur. Dipol şiddeti  $\mu$ ; toplam potansiyel  $\Phi_T$ , radyal hız  $q_r$  ve eksenel hız  $q_\theta$  ifadesinde yerine konulduğunda  $R$  yarıçaplı bir silindir etrafındaki akış alanı elde edilmiş olur:

$$\Phi = U_\infty \cos \theta \left( r + \frac{R^2}{r} \right)$$

$$q_r = U_\infty \cos \theta \left( 1 - \frac{R^2}{r^2} \right)$$

$$q_\theta = -U_\infty \sin \theta \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right)$$

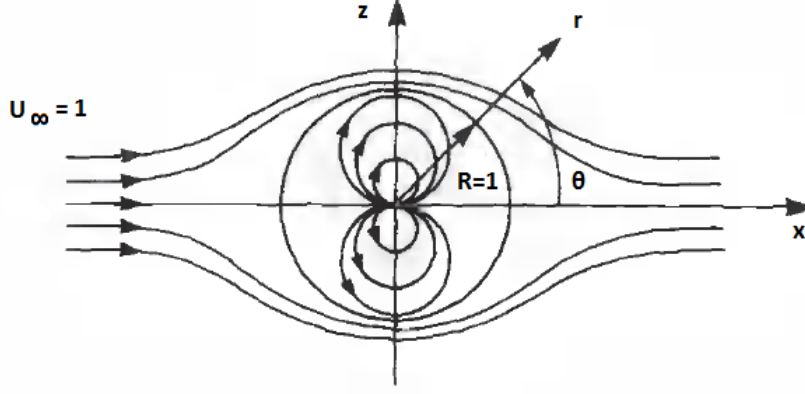
Silindirin yarıçapı  $R = 1$  ve serbest akım hızı  $U_\infty = 1$  olarak alındığında;

$$\Phi = \cos \theta \left( r + \frac{1}{r} \right)$$

$$q_r = \cos \theta \left( 1 - \frac{1}{r^2} \right)$$

$$q_\theta = -\sin \theta \left( 1 + \frac{1}{r^2} \right)$$

elde edilir [26]. Burada  $r$ , hızı ya da potansiyeli bulunmak istenen noktanın dipolün bulunduğu noktaya olan mesafesini vermektedir.  $\theta$  ise  $r$  doğrusunun  $x$  eksenine yaptığı açıdır. Bu parametreler şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 : Düzgün akım içerisine bir dipolün yerleştirilmesi.

Cisim üzerindeki hız ve potansiyeller bulunmak istendiğinde  $r = 1$  iken değişik  $\theta$  açılarında değerlerin bulunması gerekir.  $\Delta\theta = 0.1\pi$  olarak alındığında hız ve potansiyel çizelge 3.1’de verilen değerleri almaktadır:

Çizelge 3.1 : Silindir için hız ve potansiyel değerleri.

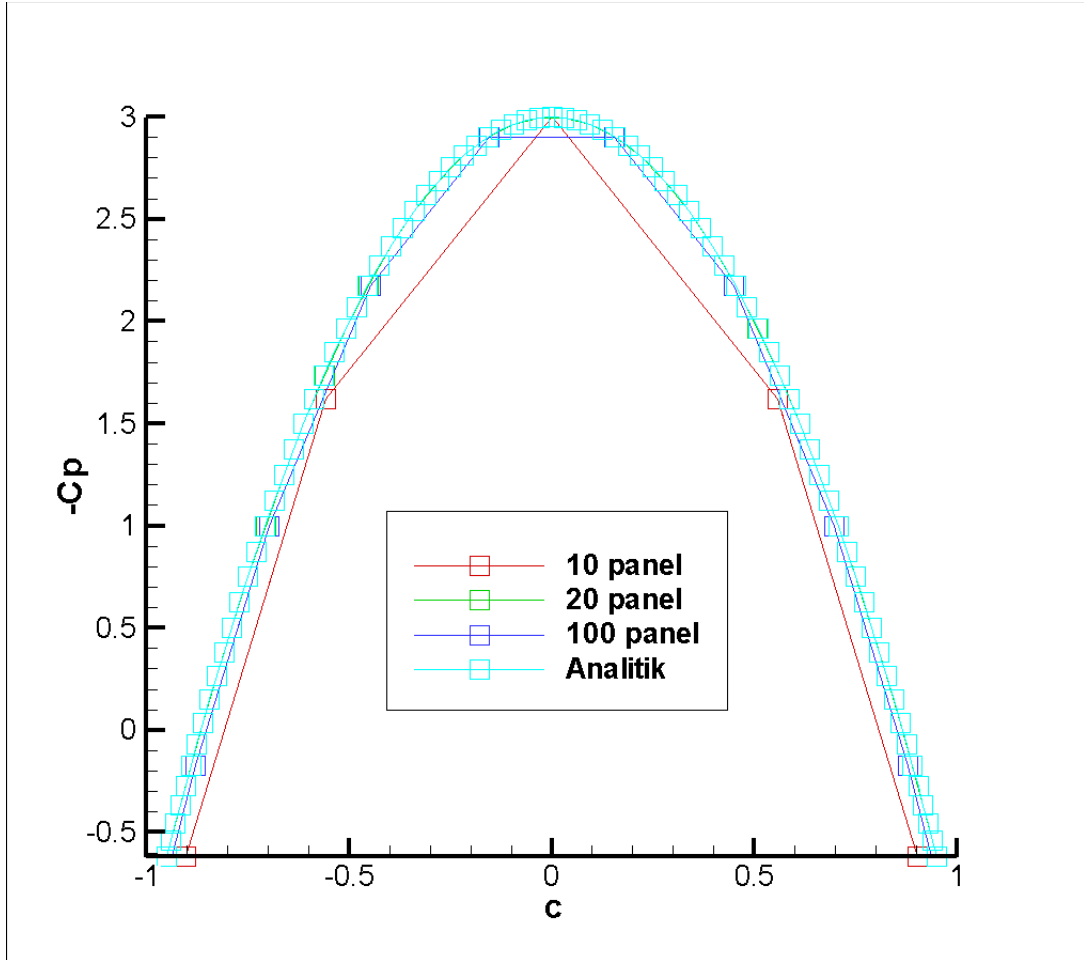
$r$	$\theta$	$\Phi$	$q_r$	$q_{\theta}$
1	0	2	0	0
1	0.3142	1.9021	0	-0.6180
1	0.6283	1.6180	0	-1.1756
1	0.9425	1.1756	0	-1.6180
1	1.2566	0.6180	0	-1.9021
1	1.5708	0	0	-2
1	1.8850	-0.6180	0	-1.9021
1	2.1991	-1.1756	0	-1.6180
1	2.5133	-1.6180	0	-1.1756
1	2.8274	-1.9021	0	-0.6180
1	3.1416	-2	0	0

Çizelge 3.1’de silindirin sadece üst tarafı için sonuçlar verilmiştir. Alt taraf için de sonuçlar benzerdir. Ayrıca, Tablo 1’deki  $q_{\theta}$  değerleri, silindirin üst tarafı için dipol saat yönünde döndüğünden negatif olarak çıkmıştır. Sonuçlar Kartezyen koordinat sisteminde verilmemiştir.

### 3.1.2 Viskoz olmayan çözümler

#### 3.1.2.1 Sabit şiddetli kaynak yöntemi

Sabit şiddetli kaynak yöntemi kullanılarak silindir etrafındaki akış çözülmeye çalışılmıştır. Sırasıyla 10, 20 ve 100 panel kullanılarak çözüm aranmış ve serbest akımın hızı  $+x$  yönünde 1 birim olarak alınmıştır. Ancak akımın  $y$  yönündeki bileşeni yoktur. Cisim, geometri sınırları boyunca sabit şiddetli kaynaklar kullanılarak temsil edilmiştir.

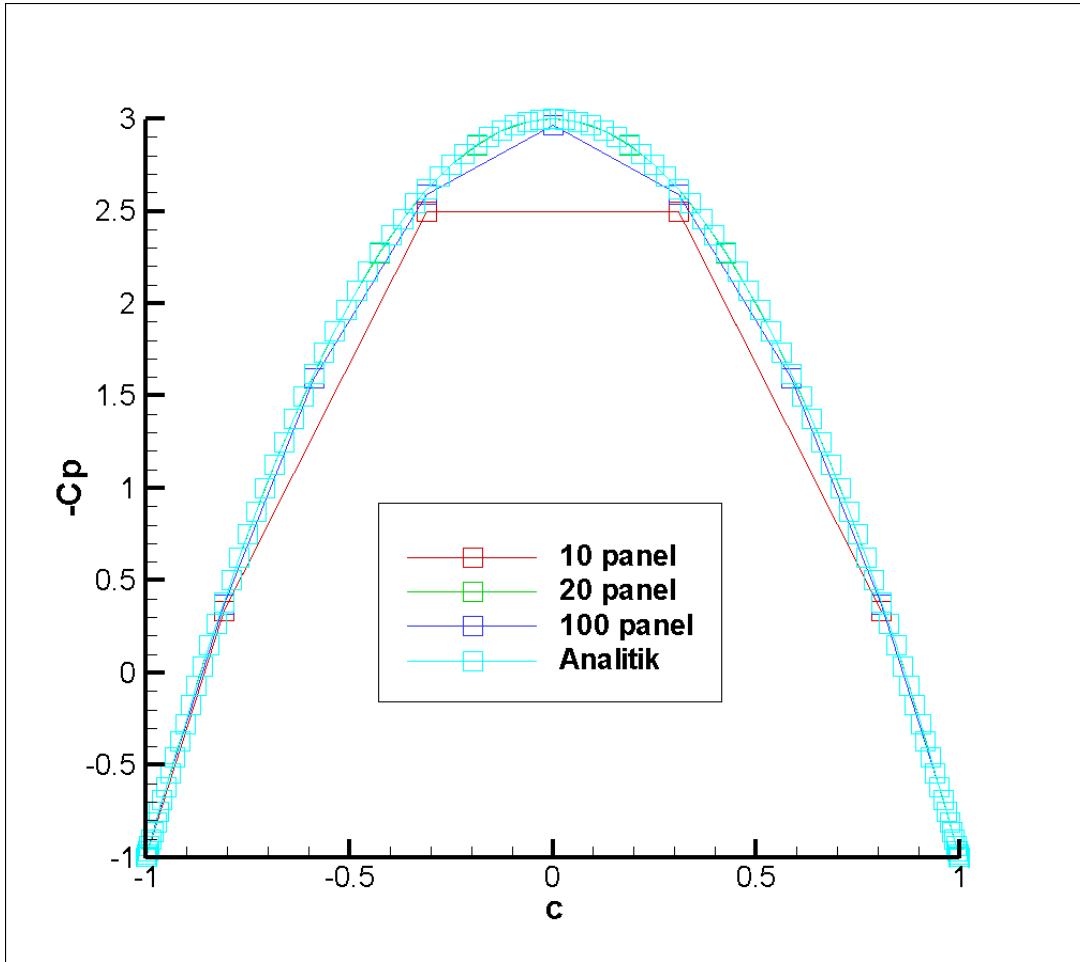


Şekil 3.3 : Silindirin farklı panel sayılarında kaynak yöntemi sonuçları.

Şekil 3.3'ten de görülebileceği gibi panel sayısı arttıkça sayısal çözüm analitik çözüme yaklaşmaktadır. 100 panele çıkıldığında sayısal sonuçla analitik sonuç neredeyse üst üste oturmaktadır. Matematiksel olarak, panel sayısı sonsuza giderken sayısal sonucun limiti analitik sonuca eşit olmaktadır.

### 3.1.2.2 Sabit şiddetli kaynak – dipol yöntemi

Panellere ayrılmış silindir üzerinde kaynak ve dipol dağıtılarak silindir etrafındaki akış çözülmektedir. Daha önce yapıldığı gibi sırasıyla 10, 20 ve 100 panel kullanılarak çözüm aranmıştır. Akım +x yönünde 1 birimdir; y yönünde bileşeni yoktur. Cisim, geometri sınırları boyunca sabit şiddetli kaynak ve dipoller konulmak suretiyle temsil edilmiştir.



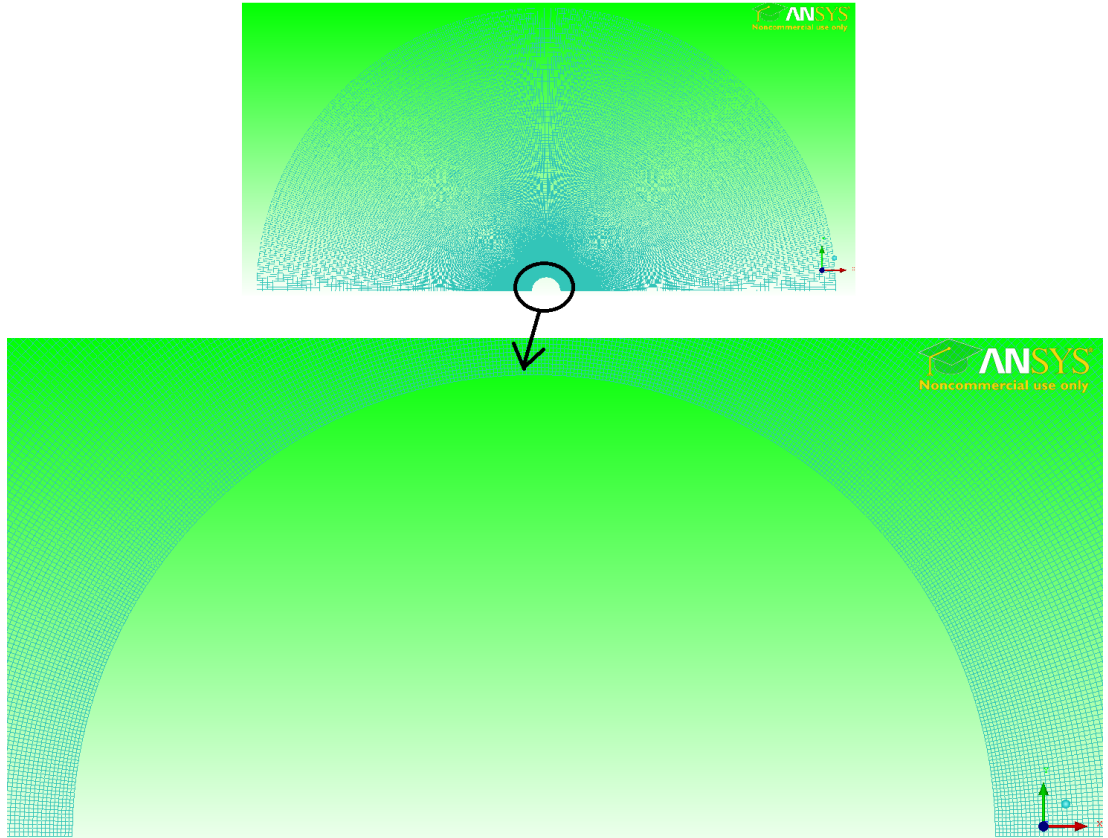
Şekil 3.4 : Silindirin farklı panel sayılarında kaynak – dipol yöntemi sonuçları.

Şekil 3.4'te görüldüğü gibi sabit şiddetli kaynak yönteminde belirtildiği şekliyle panel sayısı arttıkça sayısal çözüm analitik çözüme yaklaşmaktadır. Matematiksel olarak, panel sayısının sonsuza gitmesi durumunda sayısal sonucun limiti analitik sonuçla eşit olmaktadır.

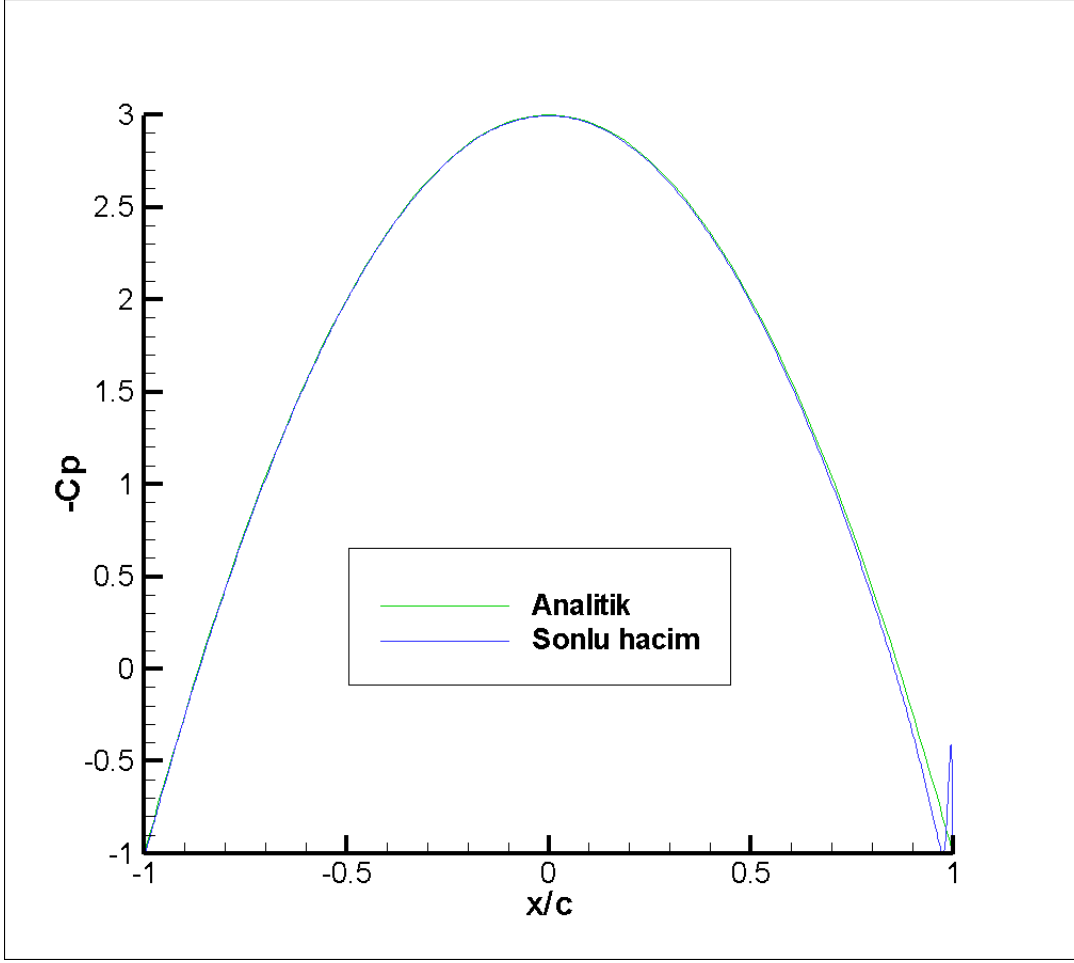
### 3.1.2.3 Sonlu hacim yöntemi

Silindir etrafındaki akış, sonlu hacim yöntemiyle viskoz olmayan akımda çözülmektedir. Yarıçapı 1 birim olan silindire, +x yönünde 1 birim hızla akışkan gönderilmiştir. Akışkan alanı silindir çapının 20 katı olarak seçilmiş ve bu akışkan

alanına 80.000 mesh (ağ) atılmıştır. Simetri olduğundan dolayı sadece silindirin üst kısmı için meshleme yapılmış ve dolayısıyla gereksiz işlem hacminden kaçınılmaya çalışılmıştır. Şekil 3.5'te ilgili ağ yapısının bir görünümü verilmiştir. 1000 iterasyon işlemi sonrasında sonuçların yakınsadığı görülmüştür. Silindirin arka bölgesi dışındaki kısımda sonucun tatmin edici olduğu görülmüştür. Ancak sınır elemanları yöntemiyle karşılaştırıldığında sonlu hacim yönteminin yetersiz kaldığı görülmektedir. Özellikle silindirin arka tarafında bu yetersizlik iyice belirginleşmiş ve yöntemin analitik sonuçları yakalamadaki göreceli başarısızlığı açık bir şekilde ortaya çıkmıştır.  $0.9 < x/c < 1$  bölgesinde gözlenebilen bu farklılık şekil 3.6'da bariz olarak görülmektedir.



Şekil 3.5 : Sonlu hacim yönteminin kullandığı ağ yapısı.



Şekil 3.6 : Sonlu hacim yönteminin analitik yöntemle karşılaştırılması.

### 3.1.3 Viskoz olmayan akımda yöntemlerin değerlendirilmesi

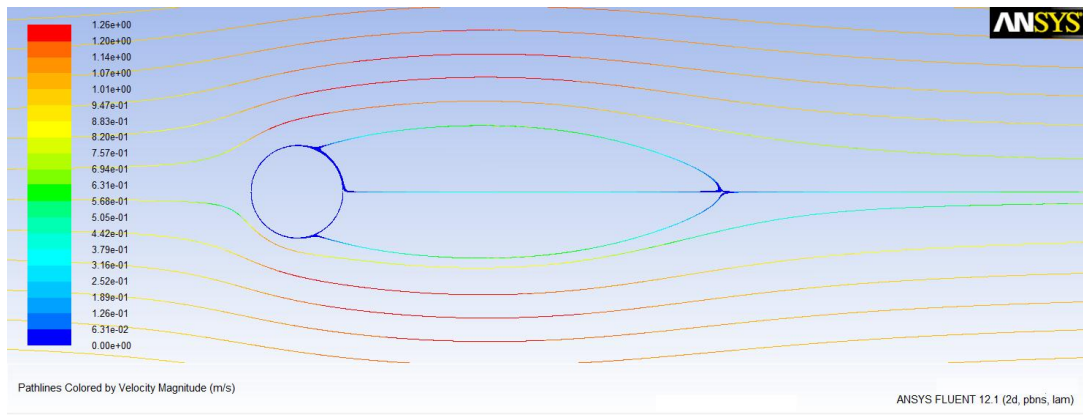
Kaynak, kalınlık temsili için oldukça iyi bir temel potansiyel akış çeşididir. Simetrik cisimler için tek başına yeterli olduğu sabit şiddetli kaynak yönteminin yüksek panel sayılarında analitik sonuçla neredeyse birebir sonuçlar vermesinden anlaşılabilir. Sabit şiddetli kaynak – dipol yöntemi de benzer sonuçlar vermektedir. Ancak, işlem yükü sabit şiddetli kaynak yöntemine göre daha fazla olduğundan karmaşık geometrilere daha uzun çözüm zamanı gerekmektedir. Dolayısıyla sınır elemanları yöntemleri arasında sabit şiddetli kaynak yöntemi silindir etrafındaki akış için en uygun yöntemdir.

Sonlu hacim yöntemi ise, sınır elemanları yöntemine oranla daha başarısız olmaktadır. Sınır elemanları yöntemi neredeyse analitik yöntemle üst üste sonuçlar verirken, sonlu hacim yönteminin ürettiği sonuçlar cismin arka tarafındaki akımı iyi çözmemiştir. Dolayısıyla, potansiyel akış için sınır elemanları yönteminin kullanılması daha iyi sonuçlar verecektir.

### 3.1.4 Viskoz akımda çözümler

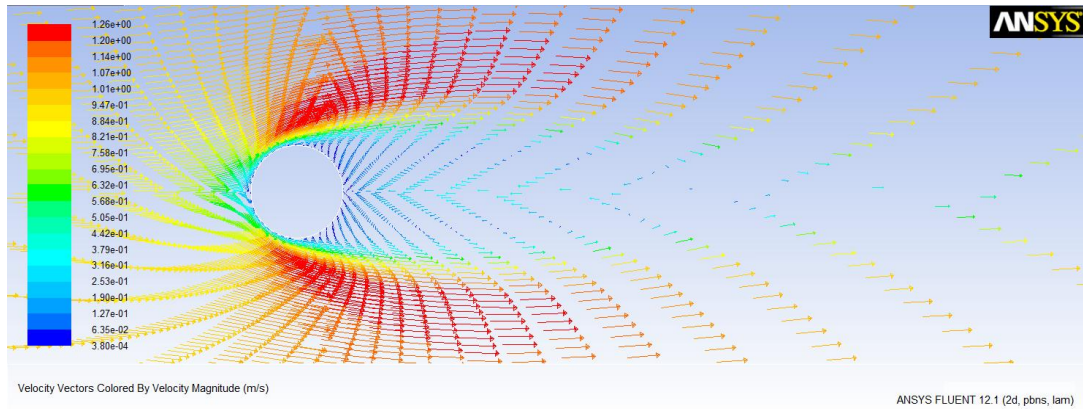
#### 3.1.4.1 Sonlu hacim yöntemi

Sonlu hacim yönteminin viskoz akımdaki etkinliğini görmek bakımından  $Re = 25$  olan bir akışkan içerisinde konulmuş bir silindir etrafındaki akım çözülmüştür. Önceki uygulamada olduğu gibi yarıçapı 1 birim olan silindire, +x yönünde 1 birim hızla akışkan gönderilmiştir. Akışkan alanı silindir çapının 20 katı olarak seçilmiş ve bu akışkan alanına 40.000 mesh (ağ) atılmıştır. Silindirin arka tarafında oluşan girdap alanının iyi izlemek için bu uygulamada silindirin bütünü modellenmiştir. Silindir etrafındaki akım hatları şekil 3.7’de verilmektedir.



Şekil 3.7 : Sonlu hacim yöntemiyle silindir etrafındaki akım hatları.

Şekil 3.8’de ise silindir etrafındaki hız vektörleri görülmektedir. Burada cismin iz bölgesinde oluşan simetrik girdapları görmek mümkündür.



Şekil 3.8 : Sonlu hacim yöntemiyle silindir etrafındaki hız vektörleri.

Sumer ve Fredsoe  $5 < Re < 40$  aralığında silindir etrafındaki akım rejimini şekil 8’deki gibi resmetmiştir [29]. İz bölgesindeki hapsolmuş girdap akımı sonlu hacim yöntemi ile iyi bir şekilde yakalanmıştır.



Şekil 3.9 : Kaynak [29]'daki akım hattının gösterilişi.

Sonlu hacim yöntemi viskoz olmayan akım için iyi sonuçlar veremese de, laminar akımda yeterli sonuçlar vermeyi başarmıştır. Şekil 3.7 ve şekil 3.8, şekil 3.9 ile karşılaştırıldığında bu durum daha net olarak anlaşılmaktadır.

### 3.1.5 Viskoz akımda yöntemin değerlendirilmesi

Sonlu hacim yöntemi bir önceki bölümde de anlatıldığı gibi deney sonuçları ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Yöntem; etkinliğinin görülmesi için düşük Reynolds sayılarında denenmiş ve silindirin arka tarafındaki hapsolmuş girdap akımı yakalanmıştır. Şekil 3.8'de görülebilen iz bölgesindeki hız vektörleri de beklentiyi karşılar görünümündedir.

Başta yapılan kabuller gereği, sınır elemanları yönteminin tek başına viskoz akımlarda kullanılması mümkün değildir. Ancak sınır tabaka gibi ek yöntemlerle birlikte çalıştırıldığı zaman akışın viskoz etkilerini kapsayabilir. Bu sebepten, sonlu hacim yöntemi bu durumda tercih sebebi olmaktadır.

## 3.2 Kalınlığı Olmayan Düz Bir Levha Etrafındaki Akış

### 3.2.1 Analitik çözüm

Katz ve Plotkin [26], kalınlığı olmayan düz bir levhanın alt ve üst tarafındaki basınç katsayısı farkını;

$$\Delta C_p = 4 \sqrt{\frac{c-x}{x}} \alpha$$

ve boyutsuz kaldırma kuvveti katsayısını da:

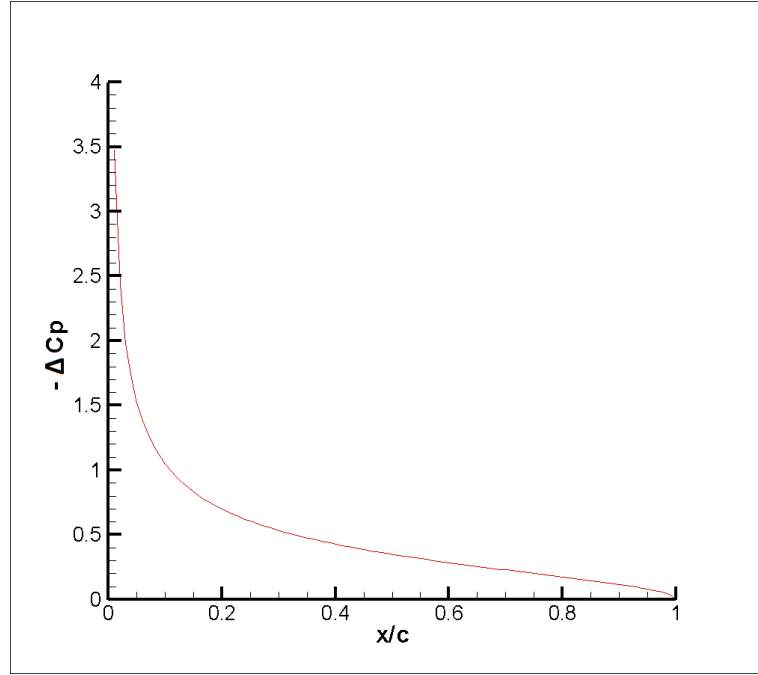
$$C_l = 2\pi\alpha$$

olarak vermektedir. Denklemlerin nasıl türetildiği konusu ile ilgili detaylar için verilen kaynağa başvurmak yeterli olacaktır.

Buna göre  $5^\circ$  hücum açısında düz ve kalınlıksız bir levhanın kaldırma kuvvet katsayısı;

$$C_l \cong 0.5483$$

olarak bulunmuş ve bu levhanın basınç katsayısı değişim dağılımı da şekil 3.10'da verilmiştir.

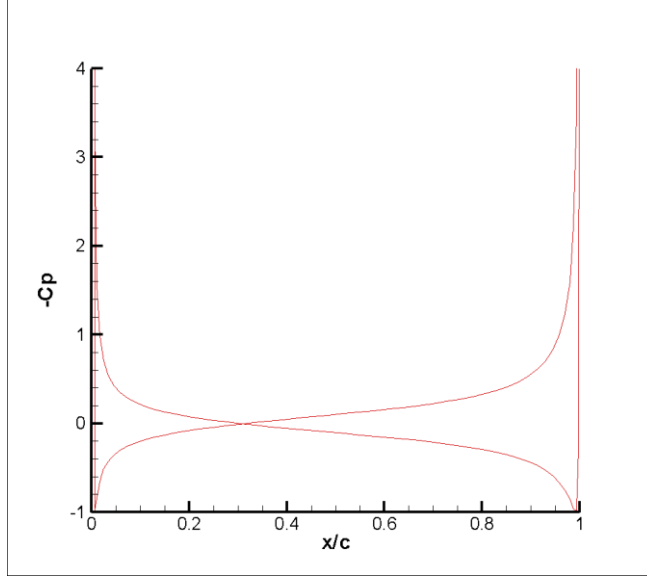


Şekil 3.10 : Düz levhada basınç dağılımı için analitik sonuç.

### 3.2.2 Sabit şiddetli kaynak yöntemi

Sabit şiddetli kaynak yöntemi kullanılarak düz bir levha etrafındaki akım bazı kabuller yapılmak suretiyle temsil edilmeye çalışılmıştır. Öncelikle, yöntemin tutarlı sonuçlar verebilmesi için kapalı bir cisim için çözdürülmesi gerekmektedir. Dolayısıyla kalınlıksız düz bir levha yerine belirli bir kalınlığı olan ancak kort boyuna oranla kalınlığın çok küçük kaldığı bir geometri seçilmiştir. Cismin kalınlığı kort boyunun 0.001'i oranındadır. Bu kadar küçük bir kalınlığın düz bir levhayı belli bir yaklaşıklıkla temsil edeceği düşünülmüştür. Cisim 100 panel ile temsil edilmiştir.

Cismin etrafındaki basınç katsayısı dağılımı şekil 3.11'de verilmektedir.

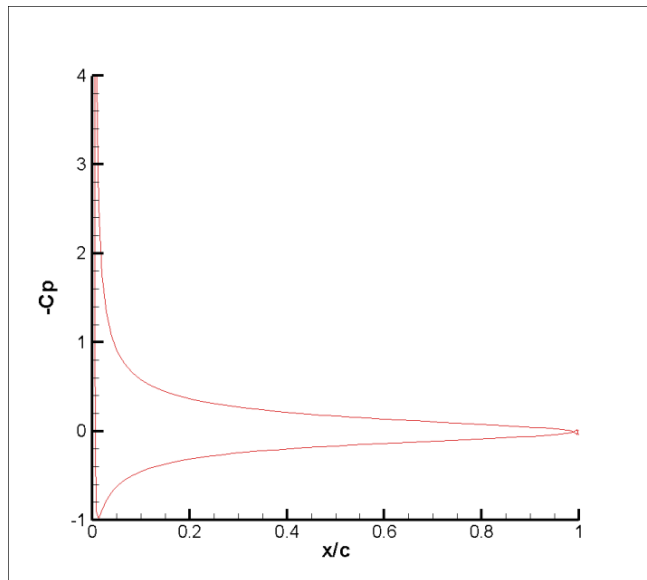


Şekil 3.11 : Kaynak yöntemiyle düz levha üzerindeki basınç dağılımı.

Kutta şartı gereği izler kenarda hız sıfıra eşit olacağından,  $x/c = 1$  iken  $C_p = 1$  olması ya da en azından belli bir değere doğru yakınsaması gerekmektedir. Ancak yöntem yetersiz kaldığından dolayı izler kenarda yöntem ıraksamakta ve olumsuz sonuçlar vermektedir.

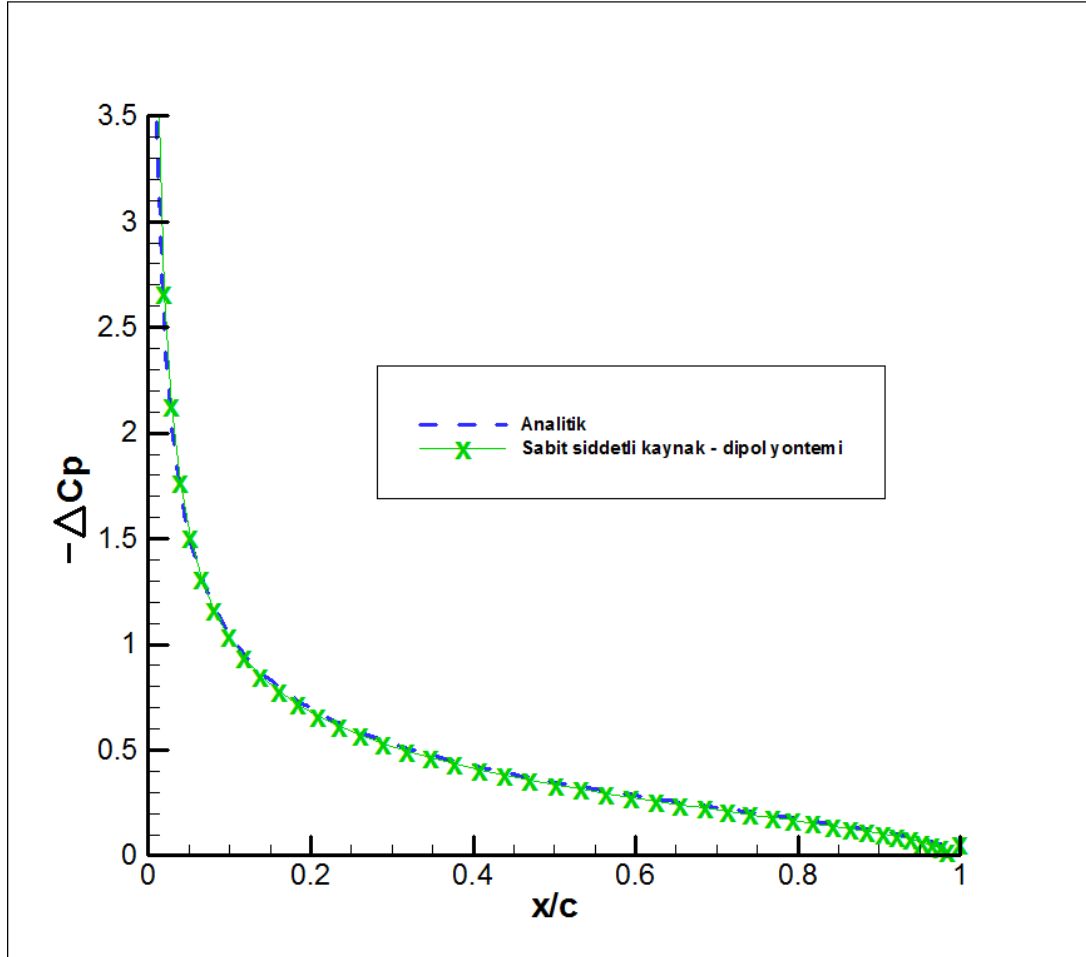
### 3.2.3 Sabit şiddetli kaynak – dipol yöntemi

Sabit şiddetli kaynak – dipol yöntemi kullanılarak düz bir levha etrafındaki akış temsil edilmiştir. Sabit şiddetli kaynak yönteminde kullanılan aynı geometri burada da kullanılmıştır. Cisim etrafındaki basınç katsayısı dağılımı şekil 3.12’de gösterilmektedir.



Şekil 3.12 : Kaynak – dipol yöntemiyle düz levha üzerindeki basınç dağılımı.

Yöntemin analitik sonuçla karşılaştırılmasının yapılabilmesi için sabit şiddetli kaynak – dipol yönteminin düz levhanın alt ve üst kısmındaki basınç katsayısı farkının hesaplanması gerekir. Bu fark hesaplandıktan sonra analitik sonuçla yapılan karşılaştırma şekil 3.13’te verilmiştir.



Şekil 3.13 : Kaynak – dipol yöntemiyle analitik sonucun karşılaştırılması.

Şekil 3.13’ten de görüldüğü gibi sabit şiddetli kaynak – dipol yöntemi oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Sonuçlar analitik yöntemle neredeyse bire bir örtüşmektedir.

Sabit şiddetli kaynak – dipol yöntemi kullanılarak boyutsuz kaldırma kuvveti katsayısı hesabı ise;

$$C_l \cong 0.5402$$

sonucunu vermektedir. Bu durumda bağıl hata hesaplanırsa;

$$\text{Bağıl hata} = \frac{0.5402 - 0.5483}{0.5483} = 0.0148 \rightarrow \text{Bağıl hata} = \%1.48$$

olarak bulunur.

### 3.2.4 Yöntemlerin değerlendirilmesi

Sabit şiddetli kaynak yönteminde geometriyi modellerken sadece kaynak kullanılmaktadır. Kaynak, geometrilerin kalınlıklarını temsil etmekte oldukça kullanışlı bir temel potansiyel akış şeklidir. Ancak asimetric cisimlerin kullanımında tek başına yetersizdir ve hücum açılı olan düz bir levha etrafındaki akışta simetriyi bozar. Bu gibi durumlarda kaynağın yanında başka bir potansiyel akışın kullanılması gerekir.

Cisimlerdeki asimetriyi ve iz bölgesini iyi tanımlayabilmek için dipol kullanılması bu sorunu çözmektedir. Sabit şiddetli kaynak – dipol yöntemi yukarıdaki sonuçlardan da izlenebileceği gibi olumlu sonuçlar vermektedir.

### 3.3 İki Boyutlu Hidrofoil Etrafındaki Akış

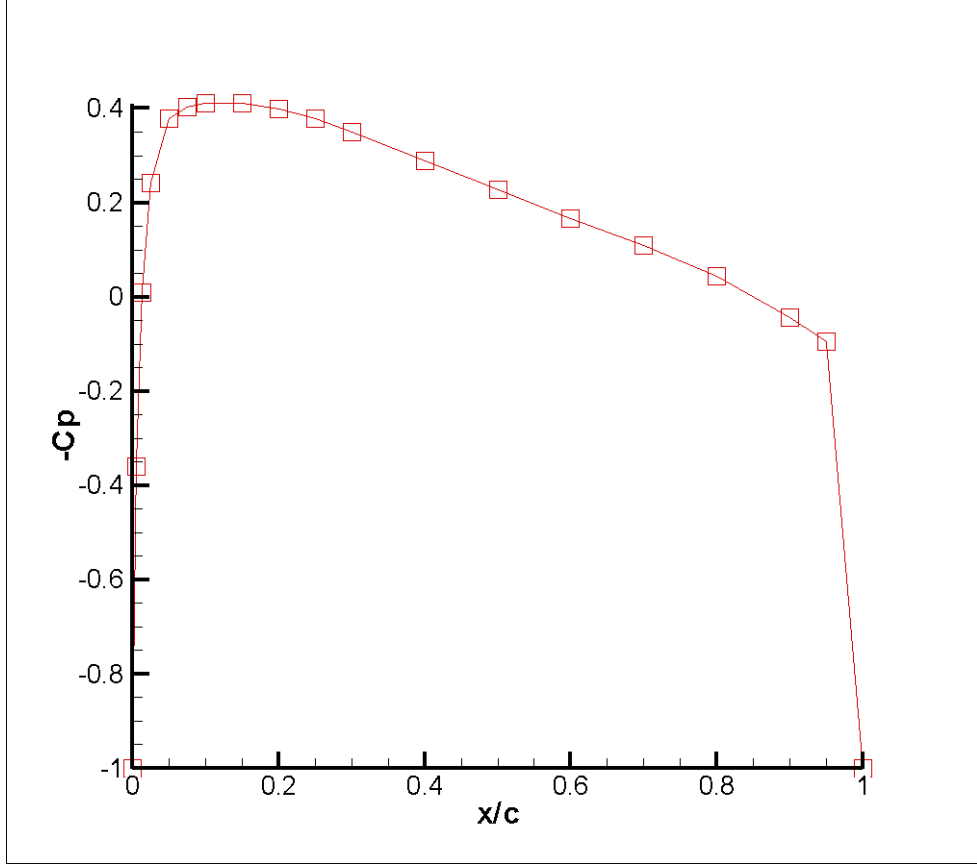
Sınır elemanlar ve sonlu hacim yöntemleri kullanılarak iki boyutlu akışkan içerisinde tamamen batmış halde bulunan iki boyutlu bir hidrofoil etrafındaki akış bulunmaya çalışılmıştır. Öncelikle simetrik ve sıfır hücum açısı durumunda olan bir hidrofoil etrafındaki akım çözülmüştür. Daha sonra simetrik ama belirli bir hücum açısına sahip olan (dolayısıyla akıştaki simetriyi bozan) bir hidrofoil etrafındaki akım çözülmüştür.

Her iki durum için de sabit şiddetli kaynak, sabit şiddetli kaynak – dipol ve sonlu hacim yöntemleri kullanılmış ve elde edilen hidrofoil üzerindeki basınç dağılımı ile kaldırma kuvveti katsayısı değerleri karşılaştırılmıştır.

Seçilen hidrofoil NACA0012 kanat kesidine sahiptir. Akıştaki simetrinin bozulduğu durumda hücum açısı  $5^\circ$  olarak belirlenmiştir.

#### 3.3.1 Deney sonuçları

Abbott ve Doenhoff'un *Theory of Wing Sections* adlı kitabında [30] yayınlanmış olan NACA0012 kanat kesiti etrafındaki (negatif) basınç dağılımının deney sonuçları şekil 3.14'te verilmiştir:



Şekil 3.14 : NACA0012 için deneysel basınç dağılımı sonuçları [30].

Kesit simetrik olduğundan hücum açısının sıfır olduğu durumlarda kaldırma kuvveti katsayısı sifira eşit olacaktır.  $5^\circ$  hücum açısını bulunduğu durumda ise çok yüksek Reynolds sayılarında ( $10^6 - 10^7$  arası) NACA0012 kesidine etkileyen kaldırma kuvvet katsayısı (grafikten yaklaşık olarak okunabildiği kadarıyla):

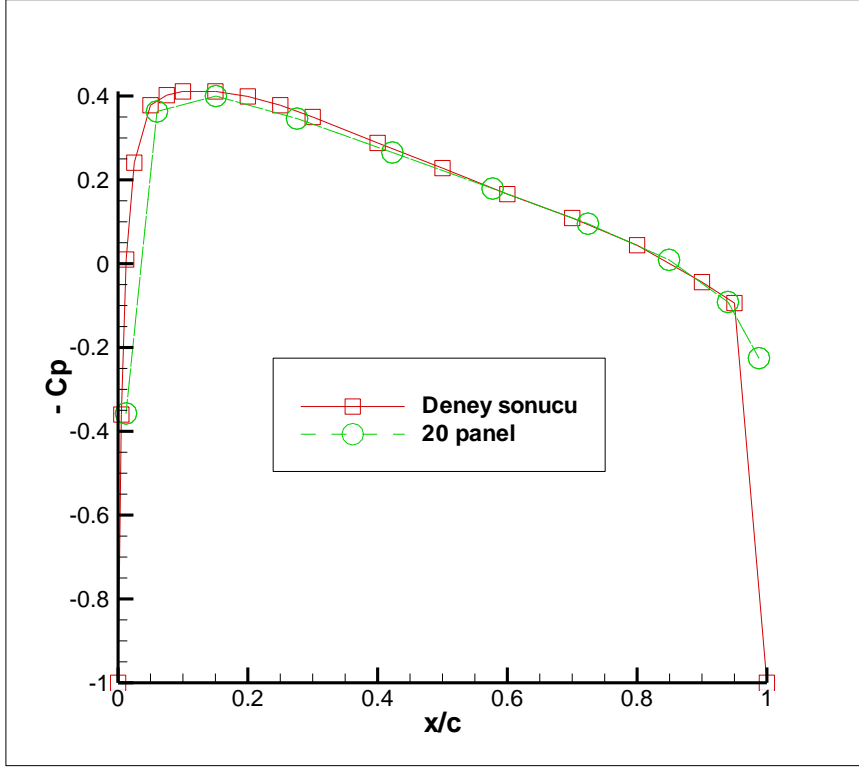
$$C_l \cong 0.58$$

olarak verilmiştir. Sınır elemanları ve sonlu hacim yöntemlerinin etkinliği bu deney verilerine göre irdelenecektir.

### 3.3.2 Hücum açısının sıfır olduğu durum

#### 3.3.2.1 Sabit şiddetli kaynak yöntemi

NACA0012 etrafındaki akış, profil 20 panel ile temsil edilerek sabit şiddetli kaynak yöntemi ile çözülmüştür. Hidrofoilin kort boyu ve gelen akımın şiddeti birim olarak alınmıştır. Bu durumda sabit şiddetli kaynak yönteminin verdiği hidrofoil üzerindeki basınç katsayısı dağılımı şekil 3.15'te verilmektedir.



Şekil 3.15 : Kaynak yöntemiyle literatürdeki sonucun karşılaştırılması.

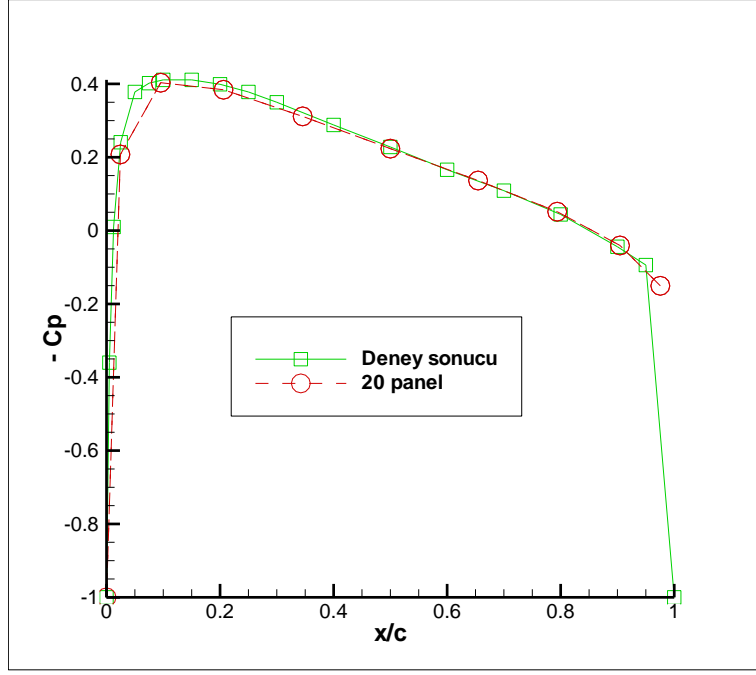
Akım potansiyel olarak kabul edildiğinden hidrofoilin önder ve izler kenarlarında akım hızı sıfır olacaktır. Bu durumda boyutsuz basınç katsayısı uç noktalarda;

$$-C_p = -\left(1 - \frac{v^2}{U_{inf}^2}\right) = -1$$

olmalıdır. Bu durum, şekil 1'den de görülebileceği üzere deney sonuçlarında teoriyi doğrular nitelikte çıkmaktadır. Sabit şiddetli kaynak yöntemi ise 20 panelli çözümde önder ve izler kenarda -1 değerine doğru yakınsamakta ancak -1 noktasını tam olarak yakalayamamaktadır. Panel sayısı sonsuza giderken sayısal sonuç teorik sonuca eşit olacağından panel sayısını artırarak uç noktalarda arzulanan değerler yakalanabilmektedir. Genel olarak sabit şiddetli kaynak yönteminin paralel sonuçlar verdiği sonucuna varılabilir.

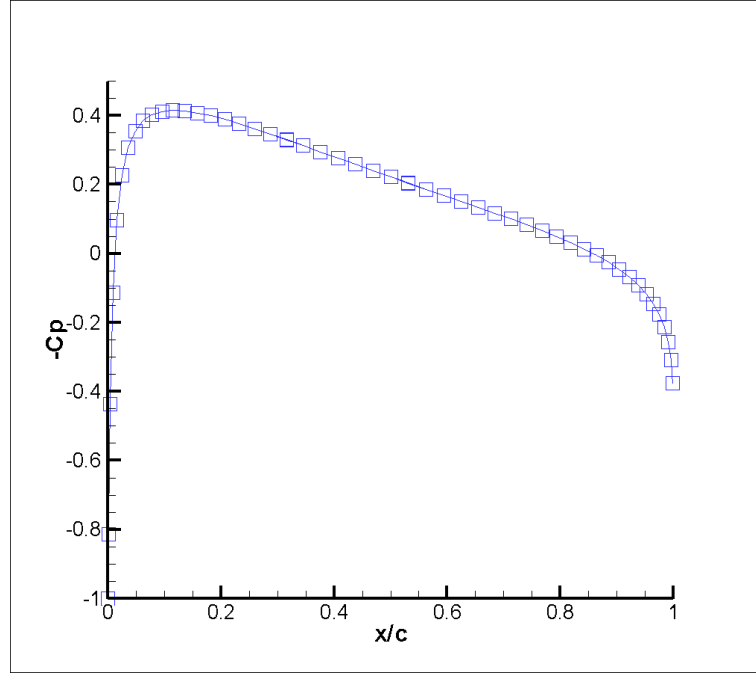
### 3.3.2.2 Sabit şiddetli kaynak – dipol yöntemi

Sabit şiddetli kaynak – dipol yöntemi kullanılarak NACA0012 profil kesiti etrafındaki basınç katsayısı dağılımı çözülmeye çalışılmıştır. Hidrofoilin kort boyu ve gelen akımın hızı birimdir. Sabit şiddetli kaynak – dipol yönteminin hidrofoil üzerinde verdiği basınç katsayısı dağılımı şekil 3.16'da verilmektedir.



Şekil 3.16 : Kaynak – dipol yöntemiyle literatürdeki sonucun karşılaştırılması.

Sabit şiddetli kaynak – dipol yöntemi, sabit şiddetli kaynak yöntemiyle benzer sonuçlar vermiş; ve uç noktalarda -1 değerine doğru gitme eğilimi göstermiştir. Panel sayısı arttıkça sonuçlar istenen değerlere daha da yaklaşacaktır. Bu durumun tespitinin yapılması için panel sayısı 100'e çıkarılarak tekrar çözüm yapılmış ve şekil 3.17'deki sonuç elde edilmiştir.

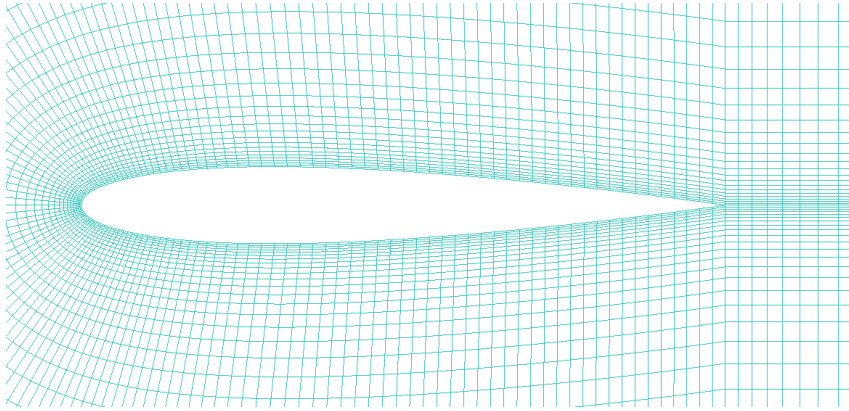


Şekil 3.17 : Kaynak – dipol yöntemiyle artan panel sayısında alınan sonuç.

Dolayısıyla, sabit şiddetli kaynak – dipol yöntemi de yeterli sonuçlar verdiği ve panel sayısı arttıkça gerçek değerlere daha da yakınlığı anlaşılmaktadır.

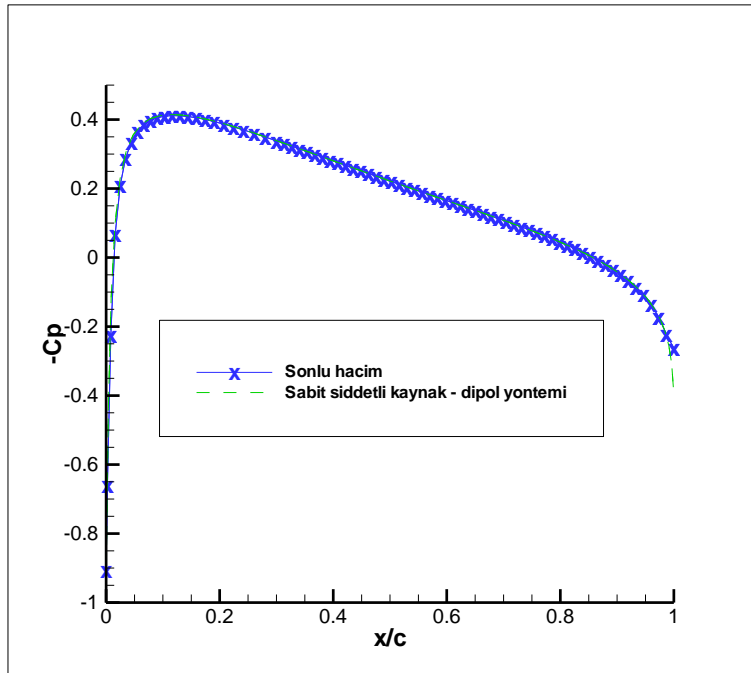
### 3.3.2.3 Sonlu hacim yöntemi

NACA0012 profili etrafındaki akım sonlu hacim yöntemi ile çözülmüş ve sonuçlar 100 panelli sabit şiddetli dipol yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Akışkan alanına 12150 mesh atılmış ve 1 birim boyunda olan NACA0012 profili için 30 birimlik akışkan alanının yeterli olacağı düşünülmüştür. Hidrofoil etrafındaki mesh görüntüsü şekil 3.18’de verilmiştir.



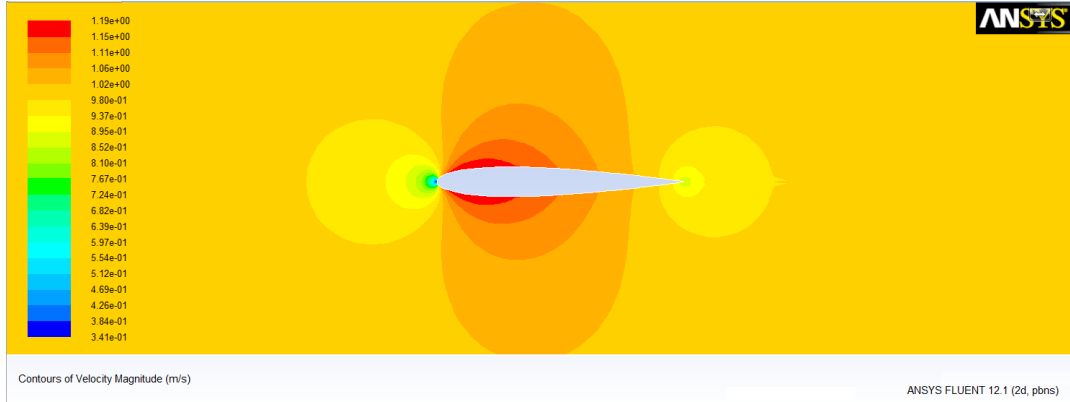
Şekil 3.18 : Sonlu hacim yöntemi için kurulan ağ eleman örgüsü.

Sonlu hacim yöntemi ile sabit şiddetli dipol yönteminin karşılaştırılması şekil 3.19’da gösterilmiştir.



Şekil 3.19 : Sonlu hacim yöntemiyle kaynak – dipol yönteminin karşılaştırılması.

Sonlu hacim yöntemi de sınır elemanları yöntemi gibi olumlu sonuçlar vermiştir. Ancak yine de uç noktalarda sınır elemanları yöntemi ile daha başarılı sonuçlar alındığı görülmektedir. Hidrofoil etrafındaki akım hızları şekil 3.20’de gösterilmiştir.



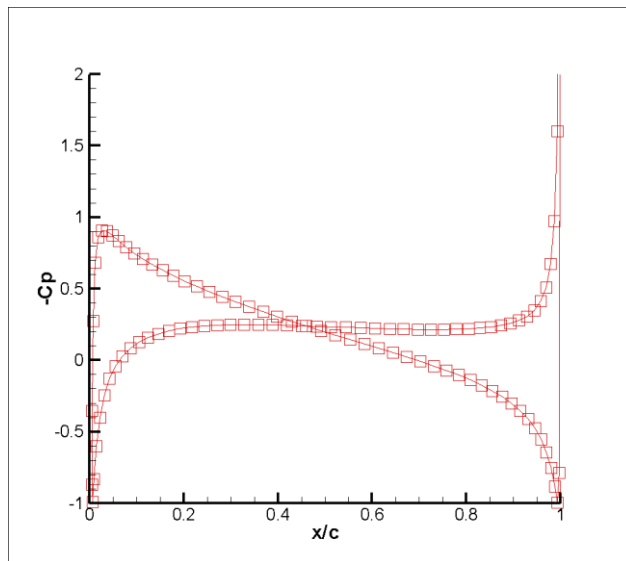
Şekil 3.20 : Sonlu hacim yöntemi ile hesaplanan hidrofoil etrafındaki akım hızı.

Sonlu hacim yönteminin doğruluğunun teyidini görmek adına hidrofoile etkien toplam kaldırma kuvveti hesaplanmış ve  $L = 8.6 * 10^{-7}$  olarak bulunmuştur. Akışta simetri bozulmadığından sonlu hacim yöntemi kaldırma kuvvetini sıfıra çok yakın bir değer olarak doğru bir şekilde bulmayı başarmıştır.

### 3.3.3 Hücüm açılı durum

#### 3.3.3.1 Sabit şiddetli kaynak yöntemi

$5^\circ$  hücüm açılı durumda NACA0012 etrafındaki akım sabit şiddetli kaynak yöntemiyle çözülmüştür. Kort boyu ve gelen serbest akım hızı birer birimdir. Hidrofoil üzerindeki basınç katsayısı dağılımı şekil 3.21’de verilmektedir.



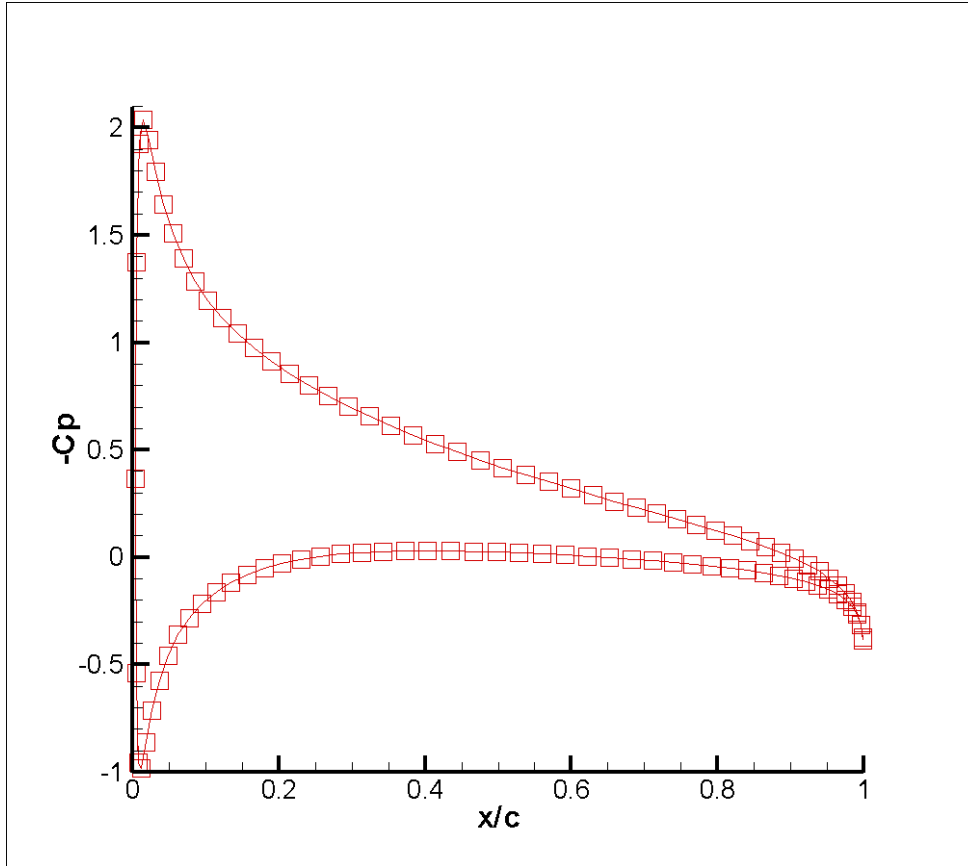
Şekil 3.21 : Asimetrik akış için kaynak yöntemi sonuçları.

Kaynak, akış içerisinde kalınlığı temsil etmek için oldukça kullanışlı bir temel potansiyel akış şeklidir. Ancak akışta simetri bozulduğu zaman tek başına kullanımı yetersiz kalmaktadır. Burada da; akış içerisindeki simetrinin, hücum açısının varlığı sebebiyle bozulmasından dolayı izler kenardaki negatif basınç katsayısı -1'e yakınsamamaktadır.

Sabit şiddetli kaynak yönteminin ürettiği sonuç asimetrik akışlarda ıraksamaktadır. Sınır şartları söz konusu yöntemle ihlal edilmekte; bu sebepten dolayı hücum açılı durumlar için söz konusu yöntem başarısız olmaktadır.

### 3.3.3.2 Sabit şiddetli kaynak – dipol yöntemi

Kort boyu bir birim olan NACA0012 profili etrafındaki iki boyutlu akım sabit şiddetli kaynak – dipol yöntemiyle çözümlenerek sonuçları incelenmiştir. Hidrofoil üzerine gelen akım hızı ile akışkan yoğunluğunun birer birim ve hücum açısının  $5^\circ$  olduğu durumda hidrofoil üzerindeki basınç katsayısı dağılımı şekil 3.22'de verilmiştir.



Şekil 3.22 : Asimetrik akış için kaynak – dipol yöntemi sonuçları.

Beklendiği gibi hidrofoilin uç noktalarında negatif basınç katsayısı -1 değerine doğru yakınsamaktadır. Yöntem ile hidrofoil etrafında hesaplanan sirkülasyon değeri ise;

$$\Gamma \cong 0.298$$

olarak bulunmuştur. Kutta – Joukowsky teoremine göre, kaldırma kuvveti;

$$L = \rho U \Gamma$$

ile hesaplanır. Akışkan yoğunluğu ve gelen akım hızı birer birim olarak verildiğinden; bu durumda kaldırma kuvveti;

$$L = \Gamma = 0.298$$

olarak bulunur. Kaldırma kuvveti iki boyutlu cisimler için aynı zamanda;

$$L = \frac{1}{2} \rho C_l V^2 c$$

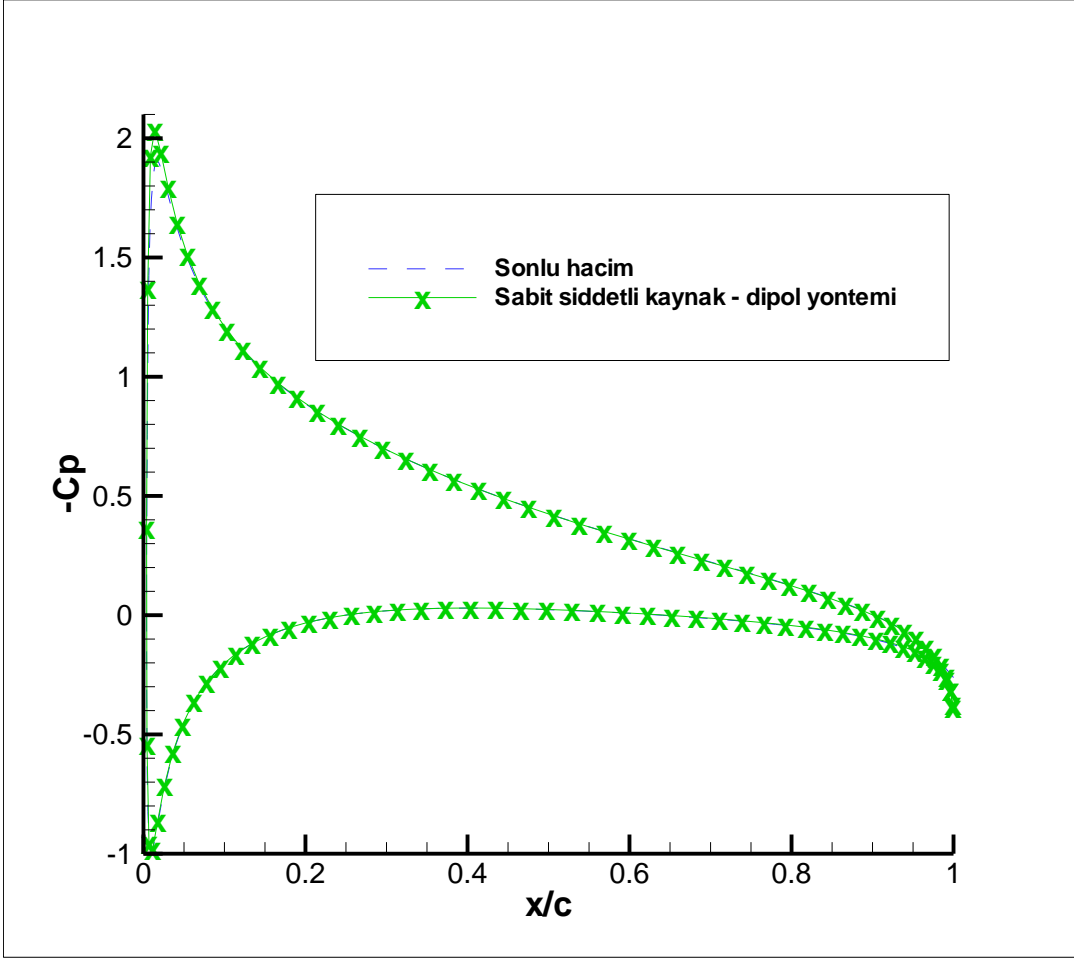
şeklinde ifade edilerek, buradan kaldırma kuvveti katsayısı hesaplanabilir. Dolayısıyla kaldırma kuvveti katsayısı;

$$C_l = \frac{2L}{\rho V^2 c} = \frac{2 * 0.298}{1 * 1^2 * 1} = 0.596$$

olarak bulunur. Önceki kısımlardan hatırlanabileceği gibi deney sonuçlarının verdiği kaldırma kuvveti katsayısı için  $C_l = 0.58$  yaklaşık değeri verilmişti. Dolayısıyla yöntemin, deney sonucuna yaklaşık olarak %2-3 yakınlığında kabul edilebilir bir sonuç verdiği görülmüştür.

### 3.3.3.3 Sonlu hacim yöntemi

Sonlu hacim yöntemi ile 5° hücum açılı durumda kendisine doğru gelen bir birimlik serbest akımı karşılayan ve kort boyu bir birim olan NACA0012 profilinin etrafındaki akım çözülmüştür. Akışkanın yoğunluğunun bir birim olduğu kabul edilmiştir. Akışkan alanının uzunluğu 30 birim, yüksekliği ise 20 birim alınmış; ve akışkan alanı 12150 dörtgen mesh ağı ile örülmüştür. Elde edilen sonucun, geometriyi 100 panel kullanarak temsil eden sınır elemanları yöntemi ile karşılaştırması şekil 3.23'te verilmiştir.



Şekil 3.23 : Asimetrik akış için sonlu hacim yöntemi sonuçları.

Sonlu hacim yöntemi sınır elemanları yöntemi ile uyumlu sonuçlar göstermiştir. Hidrofoilin büyük bir bölümünde basınç katsayısı dağılımı sabit şiddetli kaynak – dipol yönteminin verdiği sonuçlarla örtüşmektedir.

Hidrofoil için bulunan kaldırma kuvveti değeri;

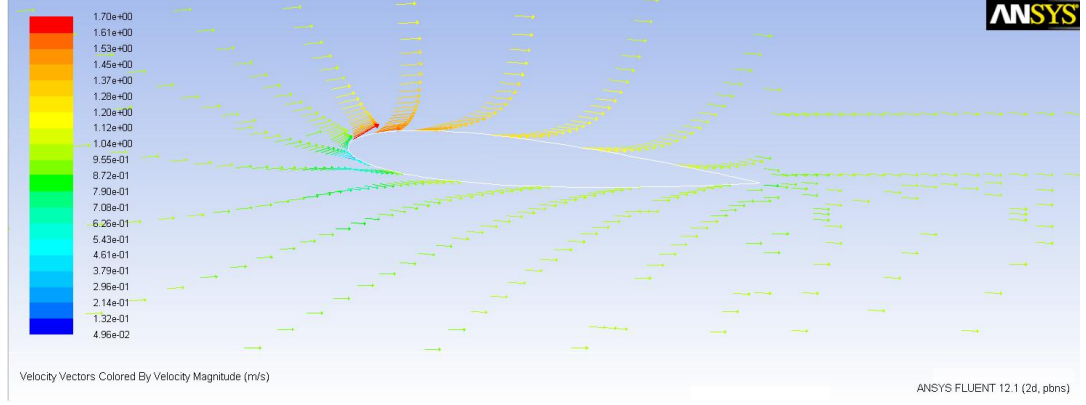
$$L \cong 0.2975$$

olarak verilmektedir. Bu durumda elde edilen kaldırma kuvvet katsayısının değeri;

$$C_l = \frac{2L}{\rho V^2 c} = \frac{2 * 0.2975}{1 * 1^2 * 1} = 0.595$$

olarak elde edilecektir. Hatırlanacağı gibi bir önceki bölümde sabit şiddetli kaynak – dipol yöntemi ile bulunan sonuç  $C_l = 0.596$ 'ydı. Birbirleri arasındaki fark hesaplandığında bu farkın binde ikiden az olduğu görülmektedir. Bu da iki yöntemin birbirleriyle ne kadar uyumlu sonuçlar verdiğinin bir kanıtıdır.

Hidrofoil yakınlarındaki akım vektörleri şekil 3.24'te verilmiştir.



Şekil 3.24 : Sonlu hacim yöntemi ile hidrofoil etrafındaki akım vektörleri.

### 3.3.4 Yöntemlerin değerlendirilmesi

NACA0012 profili etrafındaki akım hem hücum açılı hem hücum açısız durumda (her ikisi de sınır elemanları yönteminin uygulamaları olmak üzere) üç ayrı yöntem ile incelenmiş ve bu yöntemlerin yetkinlikleri araştırılmıştır. Yöntemler, literatürde bulunan deney sonuçları ile önce bu sonuçlar karşılaştırılmış, aksi taktirde birbirleri ile karşılaştırılarak sonuçların tutarlılığı araştırılmıştır.

Hücum açısının sıfıra eşit olduğu durumda üç yöntem de uyumlu sonuçlar vermiştir. Ancak hücum açısının sıfırdan farklı olduğu durumda sabit şiddetli kaynak yönteminin verdiği sonuçlar, akıştaki simetrisinin bozulmasından dolayı olumsuzdur. Akıştaki asimetriyi temsil edebilmek için kaynakla beraber dipol kullanılması gerekir. Sabit şiddetli kaynak – dipol yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla ve genel hidrodinamik bilgileriyle (izler kenarda Kutta şartının sağlanması) uyumlu olduğu görülmüştür. Sonlu hacim yöntemi de gerek basınç dağılımı gerek kaldırma kuvveti hesabı bakımından iyi sonuçlar vermektedir.

### 3.4 İki Boyutlu Etkileşim Problemi

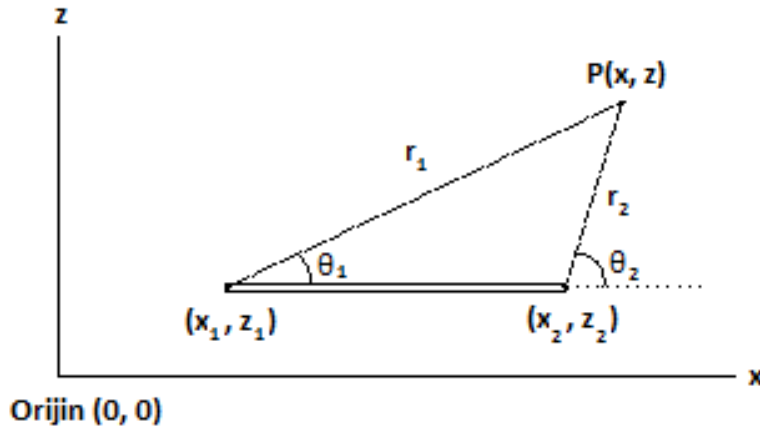
İki boyutlu etkileşim problemi ayrı olarak birkaç şekilde incelenmiştir. Etkileşim problemine etkiyen ana parametreler olarak da; cisimlerin konumları ve aralarındaki mesafe, cisimlerin hücum açıları, kalınlıkları ve kort boyu uzunlukları gözönüne alınmıştır.

Etkileşim probleminin iki biçimde çözülmesi mümkündür. Bunlardan ilki olan Doğrudan Bulma yöntemi, akışkan içerisindeki bütün cisimlerin panellerini bir bütün olarak ele alarak çözmektedir. Diğer yöntem olan İteratif yöntem ise cisimleri önce akışkan içerisinde tek başınaymışçasına çözer ve daha sonra diğer cisimler

üzerindeki etkileri hesaba katar. Birkaç hesaplama turundan sonra doğrudan çözüm yöntemin ulaştığı sonuçları çok yakın bir şekilde yakalar. İteratif yöntemle çözüm daha kısa zamanda sonuç vermektedir.

### 3.4.1 Doğrudan bulma yöntemi

Bu yöntemde akışkan içerisindeki bütün geometriler panellere ayrılır ve bu panellerin üzerinde seçilen kolokasyon noktalarına temel potansiyel akış birimleri (kaynak, dipol vs.) dağıtılır. Her kolokasyon noktası Green Teoremi'ni sağlamak zorundadır. Bir panel üzerinde sistemin görünümü şekil 3.25'teki gibi olacaktır:



Şekil 3.25 : Doğrudan bulma yönteminde sistemin bir panel üzerindeki gösterilişi.

Paneller üzerine kaynaklar dağıtırlarsa, panel üzerindeki toplam potansiyeli veren ifade:

$$\Phi = \frac{\sigma}{2\pi} \int_{x_1}^{x_2} \ln \sqrt{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2} dx_0$$

şeklinde olup, yatay ve düşey hızlarda toplam potansiyelin x ve z doğrultusundaki türevleri alınarak bulunur. Bu durumda u ve w hızları;

$$u = \frac{\sigma}{2\pi} \int_{x_1}^{x_2} \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2} dx_0$$

$$w = \frac{\sigma}{2\pi} \int_{x_1}^{x_2} \frac{z - z_0}{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2} dx_0$$

formunu alır. Söz konusu panel  $z = 0$  eksenine yerleştirilip integraller çözümlerse,

$$u = \frac{\sigma}{2\pi} \ln \frac{r_1}{r_2}$$

$$w = \frac{\sigma}{2\pi} [\theta_2 - \theta_1]$$

elde edilir [26]. Burada;

$$r_1 = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + z_1^2}$$

$$r_2 = \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + z_2^2}$$

olarak kısaltılmıştır. Panel  $z = 0$  eksenine yerleştirildiğinden dolayı  $z_0 = 0$  olduğundan  $r_1$  ve  $r_2$ 'de yerine konmamıştır.

Yatay ve düşey hızlar bilinmeyen kaynak kuvveti  $\sigma$ 'nın bir fonksiyonudur. Tüm paneller için  $u$  ve  $w$  hesaplanıp Green Teoremi'nde yerine konursa satır ve sütun sayısı panel sayısına eşit olan bir matris elde edilir. Örneğin  $N$  sayıda panel olduğunda Green Teoremi'ni oluşturan  $N$  sayıda denklem bulunur. Buradan da  $N \times N$  matrisi elde edilir.

Green Teoremi'ni çözebilmek için akışkan hızının bilinmesi gerekir. Panellerin etki katsayısı  $I_{ij}$  ve kaynak şiddeti  $S_i$  olarak ifade edilirse Green Teoremi'ne göre;

$$I_{ij} * S_j = STM_i = \text{Akışkan hızı}$$

$$i = j = 1, 2, 3, \dots, N$$

denklemini elde edilir. Burada  $STM$ , sağ taraf matrisinin kısaltmasıdır. Green Teoremi'nde akışkan hızını baz alan terimin denklemin sağ tarafına atılmasıyla elde edilir. Akışkan içerisinde her biri  $N$  adet panel içeren iki adet cisim bulunduğu  $i$  ve  $j$  değerleri  $2N$ 'ye kadar uzanacak ve dolayısıyla matris  $2N \times 2N$  elemana sahip olacaktır.

Kaynak kuvvetleri bulunduğu cisim üzerindeki teğetsel kuvvetler hesaplanabilmektedir. Bu teğetsel kuvvetlerden de Bernoulli Denklemi vasıtasıyla basınç dağılımına geçilebilir.

### 3.4.2 İteratif yöntem

Akışkan içerisindeki cisimler karmaşık yapılara sahip olduklarında ve hassas ölçümler gerektiğinde çok yüksek panel sayılarında temsil edilmeleri gerekebilir. Örneğin, her biri 1000 panelle temsil edilen iki cisim doğrudan bulma yöntemiyle çözüldüğü takdirde sağ taraf matrisi  $2000 \times 2000$  boyutunda olacak ve dolayısıyla bellek 4,000,000 elemanı hafızasında saklamak zorunda kalacaktır. Matrisin sahip olduğu eleman sayısı toplam panel sayısının karesi oranında artacaktır ve bu da kimi durumlarda çok uzun hesaplama sürelerine yol açabilecektir.

Böyle durumlarda alternatif yöntem iteratif bir yol izlemektir. İteratif yöntem problemi her cisim için ayrı ayrı çözer ve bir cismin akışkan içerisindeki varlığından dolayı diğer cisimlerin bundan nasıl etkilendiği bir sonraki iterasyonda ele alınır.

Örneğin iki NACA kanat profilinin akışkan içerisindeki etkileşimi çözülecek olursa, ilk önce bu kanat profillerinden biri seçilir (bu kanat profilini birinci kanat profili olarak adlandıralım) ve sanki akışkan içerisinde tek başınaymış gibi çözüm yapılır. Yukarıda doğrudan bulma yönteminde de anlatıldığı gibi bu durumda Green Denklemi'nin sol tarafında etki katsayılarıyla kaynak kuvvetlerinin çarpımı bulunur. Sağ tarafta ise akış hızıyla ilgili terim yer alır. Bu şekilde birinci kanat profilinin kaynak kuvvetleri bulunur. Daha sonra bu kaynakların diğer NACA kanat profilinin (ikinci kanat profili) üzerinde indüklediği hızlar ve bu hız değerleri hafızada tutulur.

Birinci kanat profili ile yapılan işlemler bittikten sonra, ikinci kanat profiliyle ilgilenilir. Green Denklemi'nin sol tarafı yine aynı şekildedir: ikinci kanat profilinin etki katsayıları ile bu kanat profilinin kaynak kuvvetlerinin çarpımı sol tarafta yer alır. Ancak denklemin sağ tarafı için durum bu kez farklı olacaktır. Green Denklemi'nin sağ tarafında akış hızı değeriyle birlikte bu sefer birinci kanat profilinin ikinci kanat profili üzerinde indüklediği hızlar da yer alacaktır. Bu iki hız değeri toplanarak sağ taraf matrisini oluşturacaktır.

Çözülecek iki NACA profilinin de aynı geometriye sahip olması durumunda iki kanat profili için de Green Denklemi'nin sol tarafı aynı kalacaktır. Değişen kısım sadece denklemin sağ tarafı olacaktır. Eğer etkileşimsiz olarak bu iki NACA profili için de ayrı ayrı çözüm yapılsaydı, denklemin hem sağ tarafı hemde sol tarafı birbirine eşit olacaktı. Ancak etkileşim olması sebebiyle sağ taraf matrisi her iterasyonda değişir ve bu durumda bulunacak olan kaynak kuvvetlerinin farklı olmasına yol açar. Ancak birkaç iterasyon sonra bu kaynak kuvvetleri belirli değerlere yakınsayacaklardır. Böylece iteratif yöntemle gelinen bu noktanın doğrudan bulma yönteminin verdiği sonuçlarla çok yakın olması beklenir.

Bu tip problemleri elle çözmek oldukça çok zahmetlidir. Dolayısıyla bir bilgisayar kodu yazılarak çözüm yapılması daha kolay olmaktadır. Yazılacak bilgisayar kodunun akış şeması aşağıda gösterildiği şekilde olmalıdır.

$$I1_{ij} * S1_j = STM1_i$$
$$STM1_i = \text{Akış hızı}$$

*İTERASYONU BAŞLAT*

$$I2_{ij} * S2_j = STM2_i$$
$$STM2_i = \text{Akış hızı} + OV1_i$$
$$I1_{ij} * S1_j = STM1_i$$
$$STM1_i = \text{Akış hızı} + OV2_i$$

*İTERASYONU TEKRAR BAŞLAT*

Burada  $OV1_i$  birinci cismin ikinci cisim üzerinde indüklediği hızları gösterirken  $OV2_i$  ise ikinci cismin birinci cisim üzerinde indüklediği hızlara karşılık gelmektedir. Yukarıda verilen akış şemasından da görülebileceği gibi ilk aşamada (henüz iterasyon başlamadan önce) birinci kanat profilinin kaynak kuvvetleri hesaplanırken ikinci kanat profilinin etkileri hesaba dahil edilmemiştir. İlk cisimden elde edilen bu sonuçlar iterasyonun başlangıç değerlerini oluşturur. Daha sonra iterasyon başladığında sağ taraf matrisleri (bazen çok az da olsa) sürekli olarak değişkenlik gösterecektir. Ancak yukarıda verilen şema bilgisayar programına aktarıldığı takdirde sonsuz bir döngüye girer ve bir sonuç vermez. Burada hesaplamayı kesmek için belirli bir parametre belirlenerek yakınsaklığı incelenmelidir. Bu çalışmada hesaplar yapılırken kaynak kuvvetlerinin yakınsaklığı incelenmiştir. Tamamlanmış son iterasyonda hesaplanan kaynak kuvvetleriyle bir önceki iterasyonda hesaplanan kaynak kuvvetleri karşılaştırılmış ve aralarındaki farkı  $10^{-5}$ 'ten küçük olması durumunda program sonlandırılmıştır.

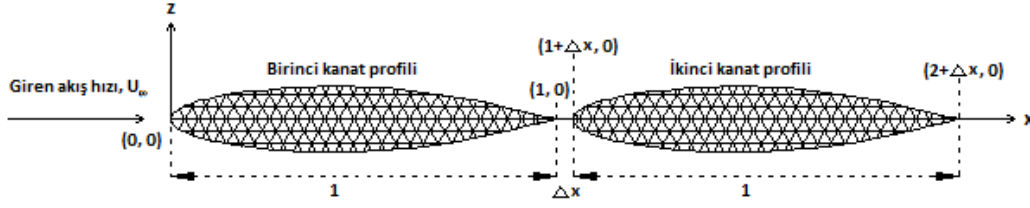
Döngü sonlandığında cisim üzerindeki teğetsel hızlar bulunur; daha sonra buradan Bernoulli denklemiyle basınca geçilir.

İteratif yöntemle yapılan çözümde bellekte 4,000,000 eleman tutmaya ihtiyaç yoktur. Bunun yerine iki adet 1,000,000 eleman hafızada tutulması yeterlidir. Böylece çok yüksek hassasiyetle ve daha kısa sürede çözüme ulaşmak mümkündür.

### **3.4.3 Elde edilen sayısal sonuçlar**

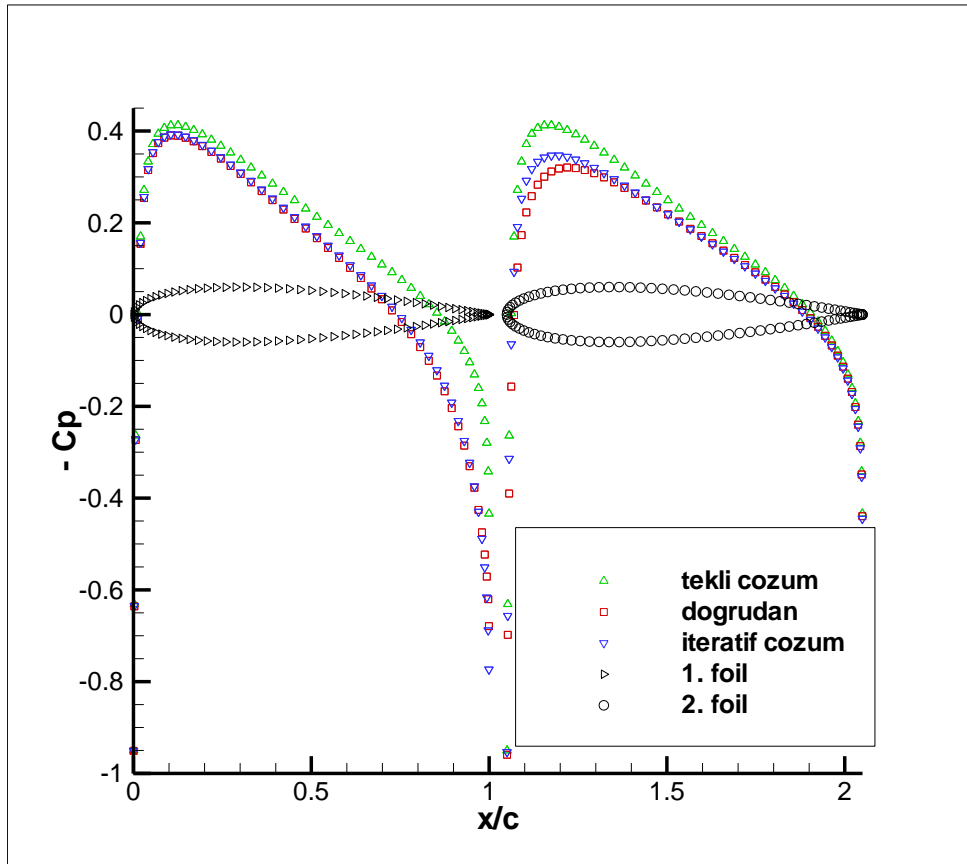
Sayısal sonuçlar,  $z = 0$  eksenine yatırılıp öndeki hidrofoilin izler kenarıyla arkadaki hidrofoilin önder kenarı arasında  $\Delta x$  birim mesafe konan iki NACA profili üzerinden

değerlendirilmiştir. Akış  $+x$  yönündedir. Problemin görünümü şekil 3.26'da verilmiştir.



Şekil 3.26 : Tandem hidrofoil sisteminin temsili.

Kanat kesitlerinin ikisi de NACA0012 profilidir. İki cismin giriş uçları arasındaki mesafe olan  $1 + \Delta x$ ,  $\Delta x$ 'in 0.05, 0.5 ve 1 değerleri olarak ele alınmış ve çözümler bu aralık için verilmiştir. İki yöntemde de çözümler her cisim için 100'er panel alınarak yapılmıştır. Dolayısıyla toplam panel sayısı 200'dür. Yalnızca tekil durumdaki çözüm için sadece 100 panel kullanmıştır. Bunun sebebi de akışkan içerisinde tek cisim olarak göz önüne alınmasından dolayı çözümler aranmasıdır.



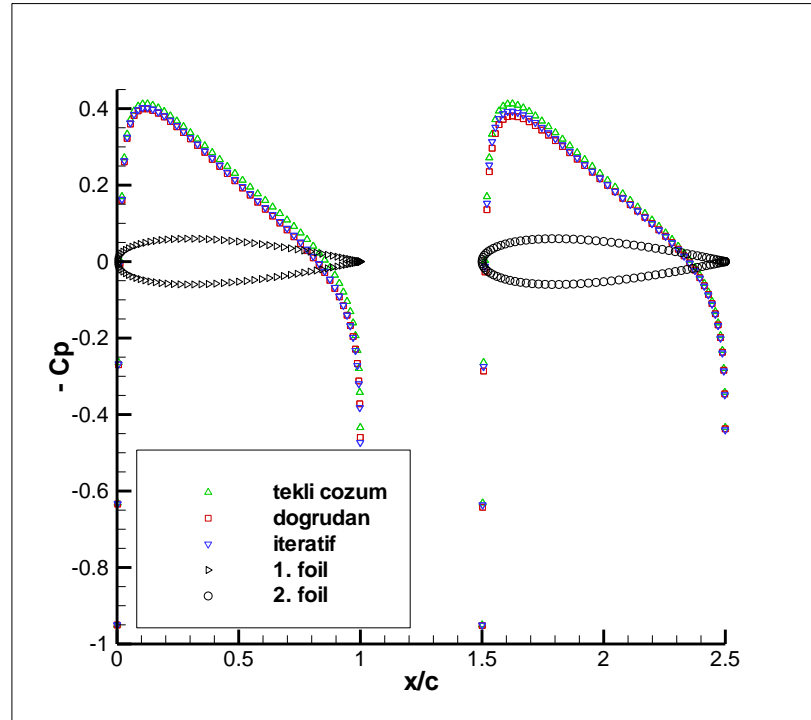
Şekil 3.27 : Mesafenin 1.05 olduğu durumda farklı yöntemlerin verdiği sonuçlar.

Şekil 3.27'de giriş uçları arasındaki mesafe 1.05 olan iki NACA0012 profili etrafındaki boyutsuz basınç katsayısı dağılımları verilmiştir. Cisimler yakın

olduklarından dolayı burada etkileşimler çok belirgin olarak görülmektedir. Burada yeşil noktalarla verilen sonuçlar tekil çözümün verdiği basınç dağılımlarıdır. Yani problemin etkileşimsiz olarak verdiği sonuçlardır. Kare sembolleri doğrudan bulma yöntemin, ters üçgen sembolleri ise iteratif yöntemin verdiği sonuçlardır. Bu tip çalışmalardaki genel eğilime uymak adına grafik  $-C_p$  dağılımını vermektedir.

Etkileşimin çok kuvvetli olduğu bu mesafeden çıkarılacak iki sonuç bulunmaktadır. İlk olarak etkileşimsiz çözüm (yeşil noktalar) ile etkileşimli çözümün (mavi ve kırmızı noktalar) arasındaki farka dikkat edilmelidir. Cisimlerin birbirleri üzerinde ne denli etkili oldukları basınç dağılımlarının farklılaşmasından anlaşılabilir. Çıkarılacak ikinci sonuç ise iteratif yöntemin oldukça iyi sonuç verdiğidir. Yalnızca ikinci kanat profiline giriş ucu bölgesindeki farklılık dışında iteratif yöntem doğrudan bulma yönteminin verdiği basınç dağılımını neredeyse birebir olarak yakalamayı başarmıştır. Panel sayısının artırılması, ikinci kanat profiline giriş ucunda doğrudan bulma yöntemiyle iteratif yöntemin çok daha yakın sonuçlar vermesine yol açacaktır.

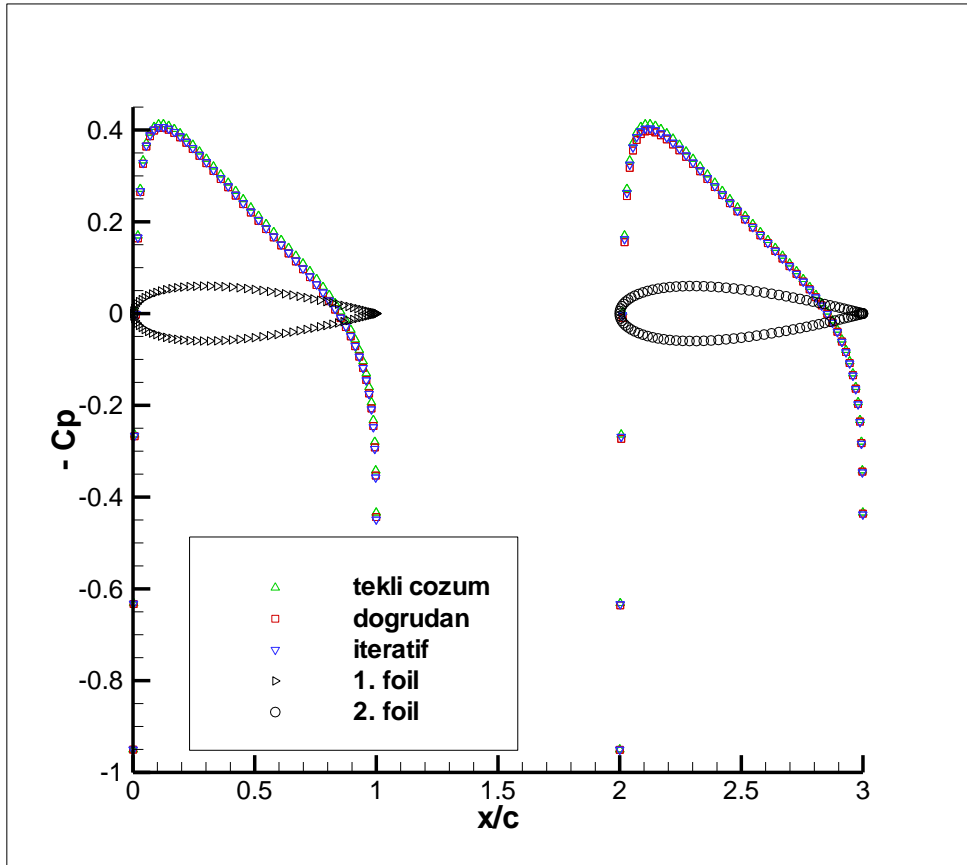
Şekil 3.28’de ise iki adet NACA0012 kanat profiline giriş uçları arasındaki mesafe 1.5 birimdir. Aradaki mesafenin artması etkileşimin etkisini kaybetmesine yol açmaktadır.



Şekil 3.28 : Mesafenin 1.5 olduğu durumda farklı yöntemlerin verdiği sonuçlar.

Aradaki mesafenin artmasından dolayı hidrofoiller arasındaki etkileşim azalmıştır. Şekilden de anlaşılacağı gibi sonuçlar, beklendiği şekliyle, birbirine yaklaşmıştır. Aradaki mesafenin artmasıyla sonuçların üst üste gelmesi beklenir. Dolayısıyla mesafenin sonsuz olduğu durumda iki hidrofoilin birbirleriyle etkileşimi sıfır olacaktır.

Mesafenin artmasıyla doğrudan bulma ve iteratif yöntemler de aynı şekilde birbirlerine çok yakın sonuçlar üretecektir. Sonsuz mesafede doğrudan bulma ve iteratif yöntemler birbirleriyle eşit sonuçlar verir. Şekil 3.29'da mesafenin daha da uzaklaşmasıyla çıkarılan sonuçların daha iyi görülebileceği bir durum verilmiştir. Bu durumda iki hidrofoilin giriş uçları arasındaki mesafe 2 birimdir.



Şekil 3.29 : Mesafenin 2 olduğu durumda farklı yöntemlerin verdiği sonuçlar.

#### 3.4.4 Kullanılan zaman

İteratif yöntemin kullanılabilirliği daha kısa zamanda sonuç verebilmesinden kaynaklanır. Normalde doğrudan bulma yönteminin kullanılabildiği ve kısa zamanda iyi sonuçlar verebildiği durumlarda iteratif yöntemin kullanılmasına gerek yoktur.

Yukarıda verilen sayısal sonuçlarda iteratif yöntemin doğrudan bulma yöntemine göre çok yakın sonuçlar verdiği görülebilir. Yöntemlerin zaman tüketimlerinin karşılaştırılması da bu bölümde yapılacaktır.

İki yöntemde de iki adet NACA0012 kanat kesiti kullanılmış ve aralarındaki mesafe ile panel sayıları artırılmıştır. Yöntemler 1.01, 1.05, 1.15, 1.5, 2 ve 3 birim mesafelerde ve 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 ve 500 panel sayısı için denenmiştir. doğrudan bulma yönteminin sonuçları çizelge 3.2’de, iteratif yöntemin sonuçları ise çizelge 3.3’de verilmiştir.

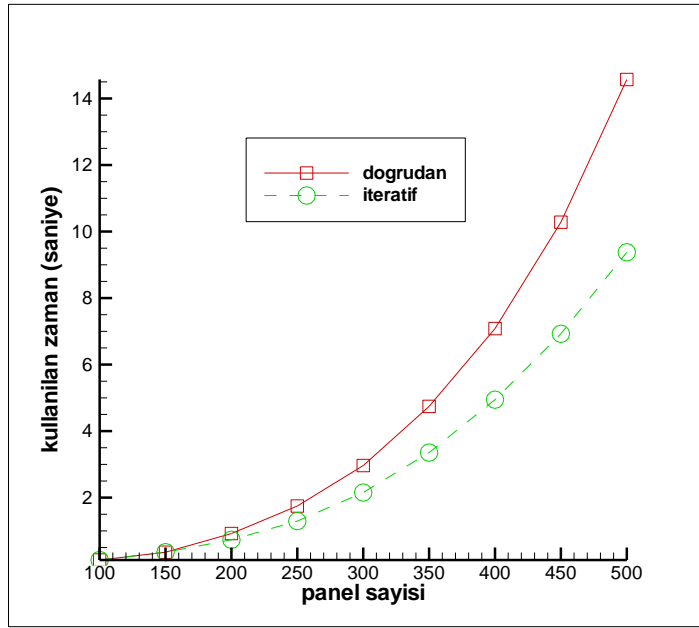
**Çizelge 3.2 : Doğrudan bulma yönteminin zaman tüketim sonuçları.**

	<b>1.01</b>	<b>1.05</b>	<b>1.15</b>	<b>1.5</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>100</b>	0.109	0.125	0.125	0.125	0.14	0.125
<b>150</b>	0.359	0.374	0.374	0.374	0.374	0.359
<b>200</b>	0.905	0.92	0.905	0.889	0.889	0.92
<b>250</b>	1.732	1.747	1.732	1.716	1.732	1.747
<b>300</b>	2.98	2.995	2.98	2.995	2.98	2.964
<b>350</b>	4.742	4.742	4.711	4.742	4.742	4.742
<b>400</b>	7.051	7.036	7.051	7.082	7.036	7.082
<b>450</b>	10.249	10.218	10.249	10.249	10.296	10.28
<b>500</b>	14.555	14.57	14.68	14.664	14.555	14.57

**Çizelge 3.3 : İteratif yöntemin zaman tüketim sonuçları.**

	<b>1.01</b>	<b>1.05</b>	<b>1.15</b>	<b>1.5</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>100</b>	0.187	0.187	0.14	0.156	0.14	0.125
<b>150</b>	0.499	0.499	0.359	0.359	0.343	0.359
<b>200</b>	1.014	1.014	0.718	0.718	0.718	0.733
<b>250</b>	1.778	1.841	1.295	1.31	1.295	1.295
<b>300</b>	3.026	3.011	2.184	2.153	2.153	2.153
<b>350</b>	4.742	4.649	3.354	3.37	3.385	3.354
<b>400</b>	6.895	6.911	4.898	4.945	4.976	4.945
<b>450</b>	9.703	9.688	6.942	6.958	6.973	6.926
<b>500</b>	13.151	13.166	9.407	9.438	9.438	9.376

İki yöntem de aynı bilgisayarda çözülmüştür. Bilgisayar, Intel Core2 Duo CPU E8500 @ 3.16GHz (32 bit) işlemcisine ve 4GB RAM'e sahiptir. Tablolardan da izlenebileceği üzere, sonuçlar mesafe 1.05'i geçene kadar birbirine çok yakındır. Bu mesafeye kadar iteratif yöntem sadece çok ufak bir kazanç sağlamaktadır. Ancak mesafe 1.05 birimi geçtiği zaman iteratif yöntemin kullanılabilirliği ortaya çıkmaktadır. Mesafe arttıkça iteratif yöntem daha fazla zamandan tasarruf edecektir. Şekil 3.30'da farklı panel sayılarında doğrudan bulma ve iteratif yöntemlerin kullandıkları zamanın bir grafiği verilmiştir.



Şekil 3.30 : Doğrudan bulma ve iteratif yöntemlerin zaman kullanımı.

Burada kare sembolleri ile gösterilen eğri doğrudan bulma yönteminin zaman kullanımını temsil etmekteken, daire sembolleri ile gösterilen kesikli eğri iteratif yöntemin harcadığı zamanı göstermektedir. Şekil 3.30'da verilen grafik 3 birim mesafe için verilmiştir.

Kısaca özetlemek gerekirse etkileşimin çok yüksek derecede olduğu mesafelerde iteratif yöntem küçük bir avantaj sağlarken, etkileşim derecesinin azalmasıyla (yani mesafenin artmasıyla) iteratif yöntemin üstün olduğu noktalar ortaya çıkmaktadır.

### 3.5 Etkileşim Problemi İçin Değişik Parametrelerin Etkisi

Etkileşim problemi akışkan içerisindeki bütün cisimler için geçerlidir. Bu cisimler üst üste veya arka arkaya konumlandırılabilirler. Üst üste iki hidrofoil durumu kat kat

hidrofoiller, arka arkaya iki hidrofoil durumu ise tandem hidrofoiller olarak adlandırılırlar.

Tandem hidrofoil sistemine bütün gemi tiplerinde rastlanabilir. Örneğin öndeki kanat geminin su hattı alanını, arkadaki kanat ise bir dümenin kesitini temsil ettiğini gözönüne alalım. Böyle bir modelin çözümünü tandem hidrofoil sistemiyle yapabiliriz. Bunun dışında özel tip teknelerde de bu sistemle karşılaşmak mümkündür. Örneğin bir hidrofoil tekne tandem hidrofoil ilkesine göre çalışır.

Tandem hidrofoil sistemine etkileyen birçok parametre vardır. Bu parametrelerin sisteme etkisinin tam olarak bilinmesi halinde geminin

- sevk performansı artırılabilir.
- direnci azaltılabilir.
- manevra kabiliyeti artırılabilir.

İlk etapta akla gelmeyen başka birçok yerde tandem hidrofoillerle karşılaşmak mümkündür. Örneğin uçaklarda kanatların arkasına takılan flaplar da tandem hidrofoil sistemi ilkesine göre çalışır. Dolayısıyla, konuya hakim olunması daha başka yerlerde başka türlü kazançlar sağlayabilir.

### **3.5.1 Yöntem**

Problemin çözümü için düşük mertebeli ve iki boyutlu iteratif sınır elemanları yöntemi kullanılmıştır. Akış içindeki cisim, sınırları üzerine kaynak ve dipoller beraber dağıtılarak temsil edilmiş ve Dirichlet tipi sınır şartı kullanılarak çözüm yoluna gidilmiştir. Düşük mertebeli panel yönteminin seçilmesinin sebebi, teorisinin ve kodlamasının daha kolay olması, daha ekonomik bilgisayarlarda çalışabilmesi ve karmaşık geometrilere bile yeterli sonuçlar verebilmesindedir. İteratif sınır elemanları yöntemi ile birlikte kullanıldığında panel sayısı muazzam ölçüde artırıldığında bile çok kısa sürede sonuçlar verebilmektedir.

Önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi potansiyel akış elemanlarından biri olan kaynak, kalın geometrileri modellemede oldukça başarılı ancak asimetric cisimler için yetersiz kalmaktadır. Dipol ise asimetric cisimleri modellemede oldukça başarılıyken, cisim kalınlaştıkça ürettiği sonuçların hata payı artmaktadır. Bu sebepten dolayı kaynak ve dipol cisim sınırları üzerinde beraber dağıtılarak yöntemin mümkün olduğunca fazla geometriye hitap etmesi sağlanmıştır. Yöntemde önce kaynaklar cisim üzerine dağıtılır ve daha sonra Dirichlet tipi sınır şartı kullanılarak

cisim sınırlarına dağıtılan dipol kuvvetleri hesaplanır. Dirichlet tipi sınır şartı kullanılması Neumann tipi sınır şartı kullanılmasına göre daha hassas sonuçlar verir. Bunun sebebi Neumann tipi sınır şartı hız cinsinden hesap yaparken Dirichlet tipi sınır şartının potansiyel cinsinden hesap yapmasıdır. Hız potansiyelin türevidir, dolayısıyla nümerik olarak hesaplanan hızlarda az da olsa bir hata payı bulunması mümkündür. Neumann tipi sınır şartında hesaplanan bu hızlardaki hata payları ileriki işlemlerde büyüyebilir ve sonuçlarda hata payının artmasına sebep olabilir.

İrrotasyonel, sıkıştırılmaz ve viskoz olmayan bir cisim etrafındaki akış Laplace Denklemi ile tanımlanır ve toplam potansiyel  $\phi^*$ 'nin sifıra eşit olduğunu ifade eder.

$$\nabla^2 \phi^* = 0 \quad (3.1)$$

Green Teoremine göre, Laplace Denklemi'nin genel bir çözümü iki boyutlu bir cisim yüzeyi üzerine kaynak ve dipol dağıtılarak verilebilir:

$$\phi^*(x, y, z) = -\frac{1}{2\pi} \int_{S_B} \left[ \sigma \ln r - \mu \frac{\partial}{\partial n} (\ln r) \right] - \frac{1}{2\pi} \int_{S_W} \mu \frac{\partial}{\partial n} (\ln r) dS + \phi_\infty(P) \quad (3.2)$$

Bu denklemde  $\sigma$  ve  $\mu$  sırasıyla kaynak ve dipolü temsil etmektedir. Değişken  $r$  mesafeyi,  $\phi_\infty$  ise serbest akışın potansiyelini temsil eder.  $\vec{n}$ , yüzey  $S$ 'e normal yönde bir vektördür ve yönüde hidrofoilin içine doğrudur. Yüzey  $S$ , geometrinin kendi yüzeyiyle birlikte aynı zamanda iz yüzeyini de kapsar.

$$S = S_B + S_W \quad (3.3)$$

Neumann tipi sınır şartı yüzey üzerinde normal hız olmadığını ifade eder. Bu da şu şekilde yazılır:

$$\nabla(\phi + \phi_\infty) \cdot \vec{n} = 0 \quad (3.4)$$

Yöntemde Dirichlet tipi sınır şartı kullanıldığı söylenmişti. Hızı baz alan Neumann tipi direkt sınır şartından, hız potansiyelini baz alan Dirichlet tipi indirekt sınır şartına geçilirse denklem;

$$\phi_i^* = (\phi + \phi_\infty)_i = const. \quad (3.5)$$

halini alır. Dirichlet tipi sınır şartı Green Teoremi'ne uygulandığında;

$$\phi_i^*(x, y, z) = -\frac{1}{2\pi} \int_{S_B} \left[ \sigma \ln r - \mu \frac{\partial}{\partial n} (\ln r) \right] - \frac{1}{2\pi} \int_{S_W} \mu \frac{\partial}{\partial n} (\ln r) dS + \phi_\infty(P) = const. \quad (3.6)$$

elde edilir. Burada denklemin sağ tarafı için herhangi bir sabit seçilmesi mümkündür. Cisim içinde kalan hız potansiyeli serbest akışın hız potansiyeline eşit seçilirse;

$$-\frac{1}{2\pi} \int_{S_B} \left[ \sigma \ln r - \mu \frac{\partial}{\partial n} (\ln r) \right] - \frac{1}{2\pi} \int_{S_W} \mu \frac{\partial}{\partial n} (\ln r) dS = 0 \quad (3.7)$$

elde edilir. Neumann tipi sınır şartı yeniden düzenlenirse;

$$\frac{\partial \phi^*}{\partial n} = \nabla(\phi + \phi_\infty) * \vec{n} = \frac{\partial \phi}{\partial n} + \nabla \phi_\infty * \vec{n} = \frac{\partial \phi}{\partial n} + \vec{n} * \overrightarrow{Q_\infty} = 0 \quad (3.8)$$

pertürbasyon potansiyelinin türevi bulunur. Bu normal yöndeki serbest akışın hızına eşitlenir:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -\vec{n} * \overrightarrow{Q_\infty} \quad (3.9)$$

Hız potansiyelinin normal yöndeki türevini kaynak kuvvetine eşitlersek;

$$\sigma = \frac{\partial \phi_i^*}{\partial n} - \frac{\partial \phi^*}{\partial n} = \frac{\partial \phi_i}{\partial n} - \frac{\partial \phi}{\partial n} = -\frac{\partial \phi}{\partial n} = \vec{n} * \overrightarrow{Q_\infty} \quad (3.10)$$

elde edilir. Böylece (3.7) no.'lu denklemdeki tek bilinmeyen dipol kuvveti  $\mu$  olur. Uygulanacak sayısal yöntem dipole kuvvetlerini elde etmeye yönelik olacaktır.

### 3.5.2 Sayısal uygulama

Denklem (3.6)'da verilen ve Dirichlet tipi sınır şartını kullanan Green Teoremi'ndeki S yüzeyi N adet panel için yazılabilir. Dolayısıyla bu denklem cisim ve iz yüzeyindeki her panel için;

$$\sum_{j=1}^N \frac{1}{2\pi} \int_{panel} \sigma \ln r - \sum_{j=1}^N \frac{1}{2\pi} \int_{panel} \mu \frac{\partial}{\partial n} (\ln r) dS + \phi_\infty = \text{sabit} \quad (3.11)$$

olarak yazılır. Daha derli toplu bir ifade için bazı kısaltmalar yapılması;

$$\frac{1}{2\pi} \int_{panel} \ln r dS |_j = B_j \quad (3.12)$$

$$-\frac{1}{2\pi} \int_{panel} \frac{\partial}{\partial n} \ln r dS |_j = C_j \quad (3.13)$$

ve (3.12) ile (3.13) no.'lu denklemlerdeki değişkenleri denklem no. (3.11)'de yerine konulmasıyla,

$$\sum_{j=1}^N B_j \sigma_j + \sum_{j=1}^N C_j \mu_j = 0 \quad (3.14)$$

elde edilir. Burada (3.11) no.'lu denklemin sağ tarafındaki "sabit",  $\phi_\infty$ 'a eşitlenerek denklem (3.14)'te kullanılmıştır.  $B_j$   $\sigma_j$  ve  $C_j$   $\mu_j$  sırasıyla kaynak ve dipollerin indükledikleri potansiyel değerleridir. İz üzerindeki paneller 14 no.'lu denklemin ikinci terimi içerisine dahildir. Katz ve Plotkin'in *Low Speed Aerodynamics* kitabında etki katsayıları olan  $B_j$  ve  $C_j$  şöyle tanımlanmıştır [26]:

$$B_j = \frac{1}{4\pi} \left\{ (x_j - x_1) \ln[(x_j - x_1)^2 + z^2] - (x_j - x_2) \ln[(x_j - x_2)^2 + z^2] \right. \\ \left. + 2z \left( \tan^{-1} \frac{z}{x_j - x_2} - \tan^{-1} \frac{z}{x_j - x_1} \right) \right\} \quad (3.15)$$

$$C_j = \frac{1}{2\pi} \left( \tan^{-1} \frac{z}{x_j - x_2} - \tan^{-1} \frac{z}{x_j - x_1} \right) \quad (3.16)$$

Neumann sınır şartının kullanılmasıyla,

$$\sigma_j = \vec{n}_j * \vec{Q}_\infty \quad (3.17)$$

olarak bulunur. (3.11) no.'lu denklemde tek bilinmeyen dipol etki katsayısı (şiddeti) olan  $\mu_j$  olarak kalır. Bu denklem N kere (panel sayısına) bağlı olacak şekilde yazılarak sağ tarafı  $B_j \sigma_j$ 'a eşit olan bir matris elde edilir. Cisim ve iz üzerindeki panellerde bilinmeyen  $\mu_j$  değerleri bu matris çözülerek bulunabilir.

Akış içinde birden fazla cismi daha hızlı çözebilmek için iteratif yöntem kullanılmıştır. Yöntem, (3.18) no.'lu denklem takımında ve şekil 1'de anlatılmaya çalışılmıştır. Kullanılan bazı kısaltmalar ise aşağıda verilmiştir:

$B1_j, C1_j, B2_j, C2_j$  : 1. ve 2. cisim için etki katsayıları,

$\sigma1_j, \mu1_j, \sigma2_j, \mu2_j$  : 1. ve 2. cismin kaynak ve dipol şiddetleri,

$STM1_j, STM2_j$  : 1. ve 2. cisim için sağ taraf matrisleri olarak tanımlanmıştır.

$$C1_j * \mu1_j = STM1_j \quad (3.18a)$$

$$STM1_j = B1_j * \sigma1_j \quad (3.18b)$$

İTERASYONU BAŞLAT

$$C2_j * \mu2_j = STM2_j \quad (3.18c)$$

$$STM2_j = B2_j * \sigma2_j + C11_j + B11_j \quad (3.18d)$$

$$C1_j * \mu1_j = STM1_j \quad (3.18e)$$

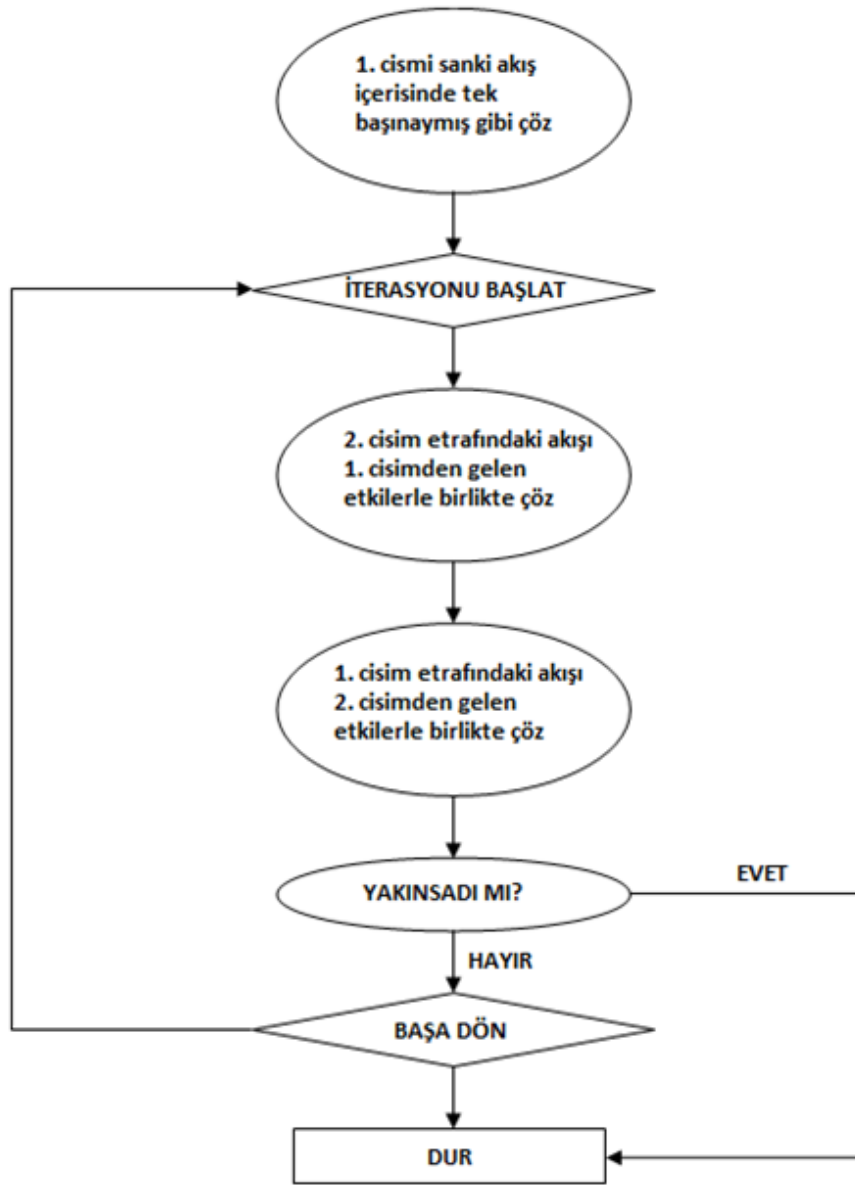
$$STM1_j = B1_j * \sigma1_j + C12_j + B12_j \quad (3.18f)$$

İTERASYONU TEKRAR BAŞLAT

EĞER  $\epsilon <$  (belirlenen hassasiyet)  $\rightarrow$  DUR!

Yöntem başlangıçta, ilk cismi akış içerisinde sanki tek başınaymışçasına – yani ikinci cismin etkilerini birinci cismin üzerine eklemeyen – çözmektedir. Bu ilk adım,

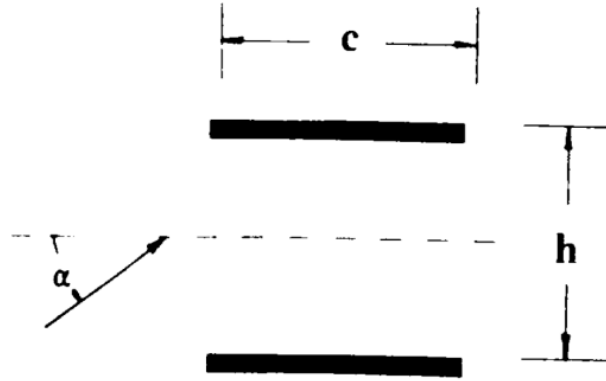
yöntemde iterasyonun ilk başlangıç değerini oluşturur ve daha sonra çoklu cismin etkileri denklemlerin sağ tarafları üzerinden eklenir. İterasyon devam ettikçe cisimler üzerine dağıtılan dipol şiddetleri sürekli değişir ve iterasyon sayısı arttıkça da bu değişimlerin miktarı azalır. Cisimlerin dipol şiddetleri belirli bir noktadan sonra değişmez ya da çok az değişime uğrar. Belirli bir  $\epsilon$  değeri programa girilirse, program tanımlanan noktadan sonra iterasyonu durdurur. Bu durumda gerekli hassasiyet yakalanmış olur. Bu noktada, iki cisim üzerindeki basınç dağılımı da en son iterasyonda bulunan dipol şiddetleri üzerinden hesaplanır. Şekil 3.31’de programın akış şeması verilmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.31 : Geliştirilen kodun algoritması.

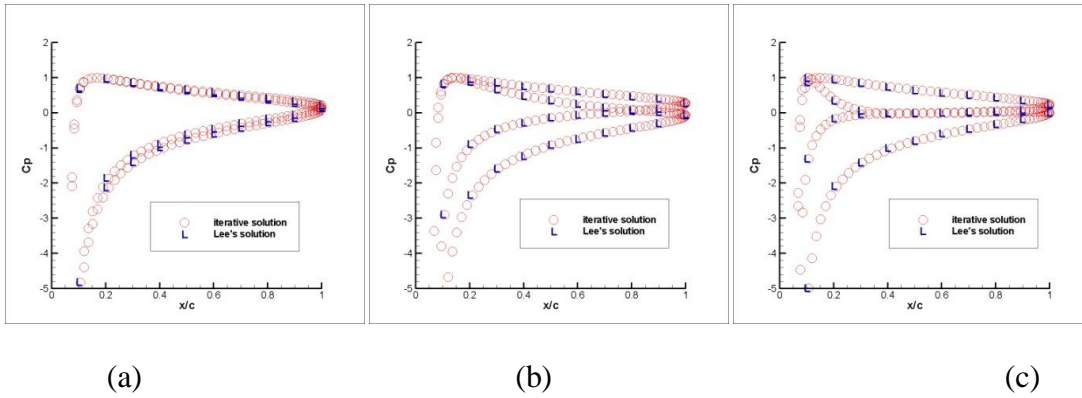
### 3.5.3 Yöntemin doğrulanması

Yöntem, Lee ve ekibinin kat kat hidrofoil sistemi için yaptığı çalışmayla karşılaştırılmıştır [31]. Bu çalışmada  $c$  kort boyunda üst üste iki ince levha aralarında bir  $h$  mesafesi bulunacak şekilde yerleştirilmiştir. Hücüm açısı  $\alpha$  olarak belirlenmiş ve şematik olarak şekil 3.32’de verilmiştir. Bu şekil sözü edilen çalışmadan alınmıştır.



Şekil 3.32 : Kaynak [31]’de kat kat hidrofoil sisteminin temsili.

Çalışmada  $h$ ’ın üç farklı değeri; 7.501, 0.877 ve 0.228 için levhalar üzerinde basınç dağılımları gözönüne alınmıştır. Hücüm açısı  $\alpha = 20^\circ$ ’dir. Şekil 3.33’teki üç grafikte  $x/c$  boyunca verilen  $C_p$ ’ler incelendiğinde alınan sonuçların çok uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 3.33 : Literatür sonuçlarıyla geliştirilen kodun sonuçlarının karşılaştırılması.

### 3.5.4 Parametrik sayısal sonuçlar

Yöntemin doğrulaması yukarıda anlatıldığı gibi kat kat hidrofoiller için yapılmıştır. Parametrik sayısal sonuçlar ise tandem hidrofoil sistemi için verilecektir. Sonuçlar dört ayrı parametre için incelenmiştir. Bu parametreler mesafe, kalınlık, hücüm açısı ve kort boyudur. Bu parametreler belirli aralıklarda değiştirilerek hidrofoiller

etrafındaki oluşan sirkülasyonun şiddetine bakılmıştır. Sirkülasyon, kaldırma kuvveti kavramının temelini oluşturmaktadır. Kutta – Joukowsky Teoremine göre kaldırma kuvveti;

$$L = \rho \Gamma V \quad (3.19)$$

olarak ifade edilir. Çalışmada hız ve yoğunluk birer birim olarak alındığından;

$$L = \Gamma$$

olur. Kaldırma kuvvetinin ayrıca,

$$L = \frac{1}{2} \rho c V^2 C_l \quad (3.20)$$

şeklinde yazılması da mümkündür. Bu denklemde c kort boyunu ifade eder ve yine bu çalışmada büyüklüğü 1 birim olarak alındığından;

$$L = \frac{1}{2} C_l = \Gamma$$

$$\Gamma = 2C_l \quad (3.21)$$

bağıntısı yazılabilir. Bu bağlamda sirkülasyon ile boyutsuz kaldırma kuvveti katsayısı arasında geçiş yapmak da mümkündür. Değişkenlerin boyutsuz oldukları unutulmamalıdır. Sirkülasyon  $\Gamma$  şu şekilde boyutsuzlaştırılmıştır:

$$\Gamma = \frac{\Gamma^*}{V \cdot c} \quad (3.22)$$

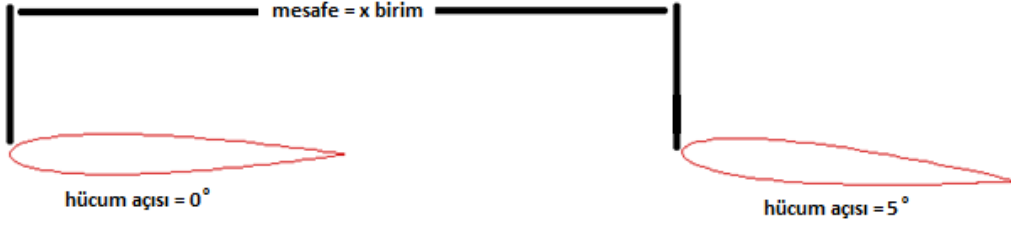
Burada  $\Gamma^*$  boyutlu sirkülasyon değeri iken,  $\Gamma$  boyutsuz sirkülasyon değeridir. Kutta – Joukowsky teoreminden anlaşılacağı üzere kaldırma kuvveti ile sirkülasyon doğru orantılıdır. Dolayısıyla sirkülasyonun bilinmesi kaldırma kuvveti kavramı hakkında yeterli fikir verecektir.

Bütün durumlarda hidrofoiller 100 pannelle temsil edilmişlerdir.

#### 3.5.4.1 Mesafe etkisi

Mesafenin etkisini doğru okuyabilmek için bazı parametreleri sabit tutmak gerekir. Akışı ilk karşılayan cismin (bundan sonra birinci hidrofoil olarak adlandırılacaktır) hücum açısı  $0^\circ$  iken, arkasındaki cismin (bundan sonra ikinci hidrofoil olarak adlandırılacaktır) hücum açısı  $5^\circ$  olarak belirlenmiştir. Burada aslında öndeki hidrofoilin gemiyi, arkadaki hidrofoilin ise dümeni temsil ettiği de düşünülebilir. İki hidrofoil için de kanat kesiti olarak NACA0012 seçilmiştir ve kort boyları 1 birim olarak alınmıştır. Bahsedilen tandem hidrofoil sistemi için değişen tek parametre iki

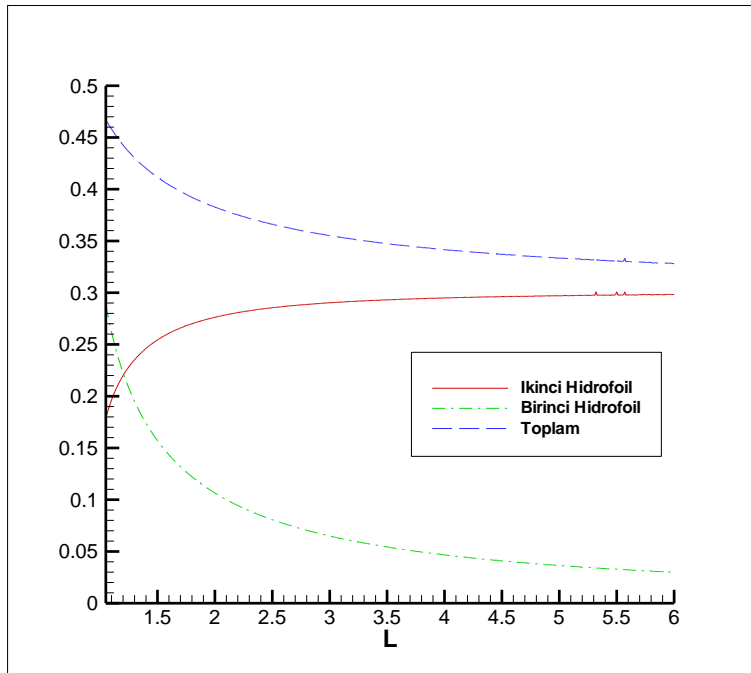
hidrofoil arasındaki mesafedir. Hidrofoil arasındaki mesafe denirken iki hidrofoilin giriş uçları arasındaki mesafe kastedilmektedir. Anlatılan sistemin daha görsel hali şekil 3.34’te verilmiştir.



Şekil 3.34 : Mesafe etkisinin temsili.

Akış içerisindeki 5° hücum açılı tek NACA0012 hidrofoili için sirkülasyon 0.298 olarak bulunmuştur. Abbott ve Doenhoff’un deneysel olarak yaptığı çalışmada ise aynı hidrofoil için kaldırma kuvveti katsayısı 0.58 olarak verilen grafiklerden okunmuştur [30]. Denklem (3.22) kullanılarak sirkülasyon hesaplanırsa söz konusu durum için bulunan deneysel sonuç 0.29 olarak ortaya çıkmaktadır. Deneysel sonuca göre bulunan sayısal sonucun hata payı ise %3’ten bile küçüktür.

Tandem hidrofoil durumunda bulunan iki hidrofoilin sirkülasyon bağlamında birbirleri üzerindeki etkileri şekil 3.35’te görülebilir. Burada  $\Gamma$  daha önceden de söylendiği gibi boyutsuz sirkülasyon değeri iken, L iki hidrofoilin giriş uçları arasındaki mesafedir.



Şekil 3.35 : Mesafe değiştiğinde kanatların ürettiği sirkülasyon değerleri.

Mesafe arttıkça, ikinci hidrofoilin sirkülasyonu artmaktadır ve teorik olarak mesafe sonsuza yaklaştıkça akış içerisinde sanki tek başınaymışçasına hareket edecektir. Aynı durum birinci hidrofoil ve toplam sirkülasyon için de geçerlidir. Mesafe sonsuza doğru yol aldıkça, birinci hidrofoilin de sirkülasyonu 0 değerine doğru gitmektedir. Zaten beklenen de budur; simetrik cisimler etrafında sirkülasyon ve dolayısıyla kaldırma kuvveti oluşmaz. Sonsuz mesafe durumunda toplam sirkülasyonda birinci hidrofoilin herhangi bir katkısı olmayacak; toplam sirkülasyon ikinci hidrofoilin sirkülasyonuna eşit olacaktır. Zaten şekil dikkatli incelenirse, ikinci hidrofoilin sirkülasyonu ile toplam sirkülasyon aynı yere doğru gittiği görülebilir.

Birinci hidrofoilin, herhangi bir hücum açısına sahip olmamasına rağmen, yaklaşık 1.2L/c değerine kadar ikinci hidrofoilden daha fazla sirkülasyon ürettiği ayrıca not edilmelidir. Bu bölge ( $1 < L/c < 1.2$ ) iki hidrofoil arasındaki etkileşimin en etkili olduğu bölge olarak adlandırılabilir.

Şekil 3.35'te mesafe 5 – 5.5 civarındayken sirkülasyon değerinde çok ufak da olsa sıçramalar meydana geldiği görülecektir. Bu durum sayısal çözümlemenin bazı kararsız davranışlarından meydana geliyor olabilir.

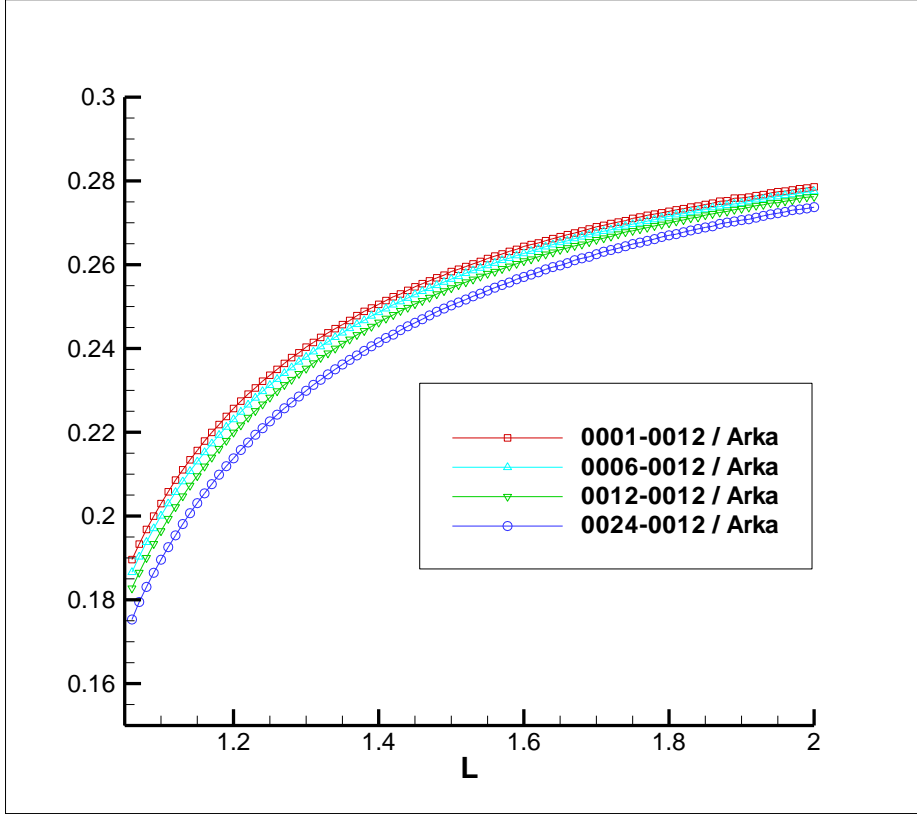
#### **3.5.4.2 Kalınlık etkisi**

Kalınlık etkisi incelenirken, ikinci hidrofoil kanat kesiti sabit tutulmuş (NACA0012 kanat kesiti) ve birinci hidrofoilin kanat kesiti değiştirilmiştir. Birinci hidrofoilin hücum açısı  $0^\circ$  iken, ikinci hidrofoilin hücum açısı  $5^\circ$ 'dir. İki hidrofoilin kort boyu da birer birimdir. Birinci hidrofoilin kalınlığının değişimine göre, hidrofoillerin sirkülasyon değerindeki değişimler incelenmiştir.

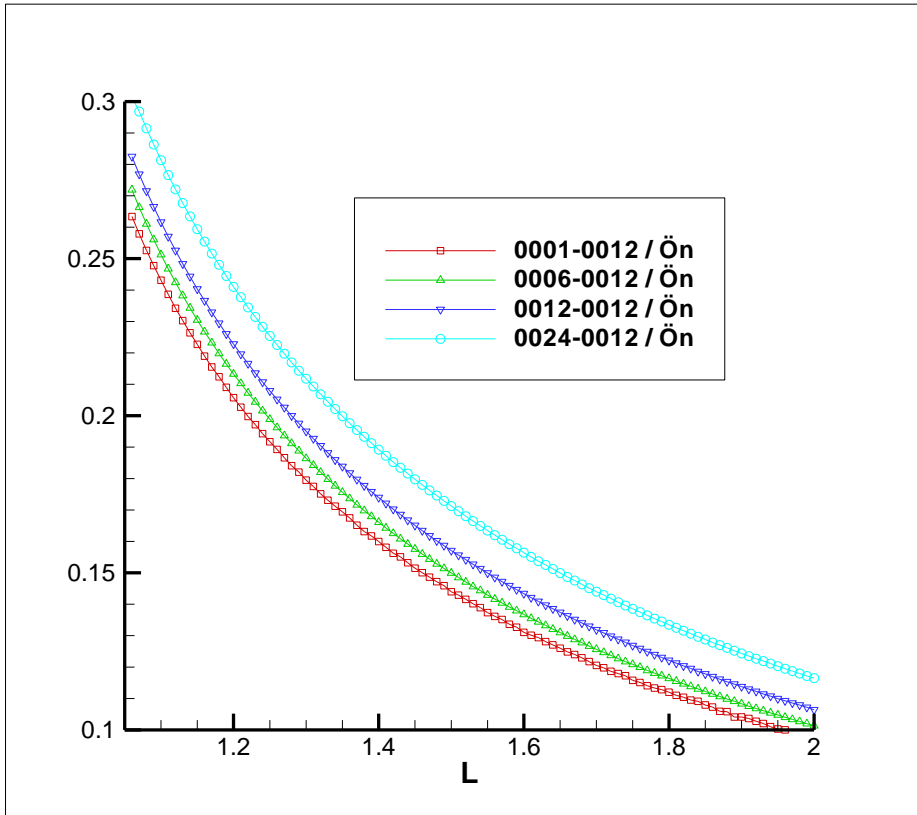
Birinci cismin kalınlığının, ikinci cismin sirkülasyonu üzerindeki etkisi değişen mesafeyle birlikte şekil 3.36'da verilmiştir.

Şekil 3.36'ya göre birinci hidrofoilin kalın olması ikinci hidrofoilin sirkülasyonunu düşürmektedir. Dolayısıyla geminin daha ince olması, dümene daha fazla kaldırma kuvveti gitmesini sağlayacaktır.

Birinci cismin kalınlığının, birinci cismin sirkülasyonu üzerinde değişen mesafeyle birlikte etkisi şekil 3.37'de verilmiştir.



Şekil 3.36 : Kalınlık değıştikçe arkadaki kanadın ürettiği sirkülasyon değeri.



Şekil 3.37 : Kalınlık değıştikçe öndeki kanadın ürettiği sirkülasyon değeri.

Şekil 3.37’de birinci hidrofoilin sirkülasyonunun nasıl etkilendiği verilmektedir. Grafiğe göre gemi inceldikçe geminin sahip olduğu sirkülasyon azalmaktadır ve bu da geminin manevra kabiliyetini düşüren bir durumdur. Gerçekten de gemilerdeki durum da bu şekilde meydana gelmektedir. Gemiler inceldikçe manevra kabiliyetleri azalmaktadır.

Birinci hidrofoil kanat kesitinin sabit tutulup ikinci hidrofoil kanat kesitinin değiştirilmesi de yapılabilecek çalışmalar arasındadır ancak bu durumda açıkça bellidir ki ikinci hidrofoilin kalınlığı arttıkça, toplam sirkülasyon ve ikinci hidrofoilin sirkülasyonu artacaktır.

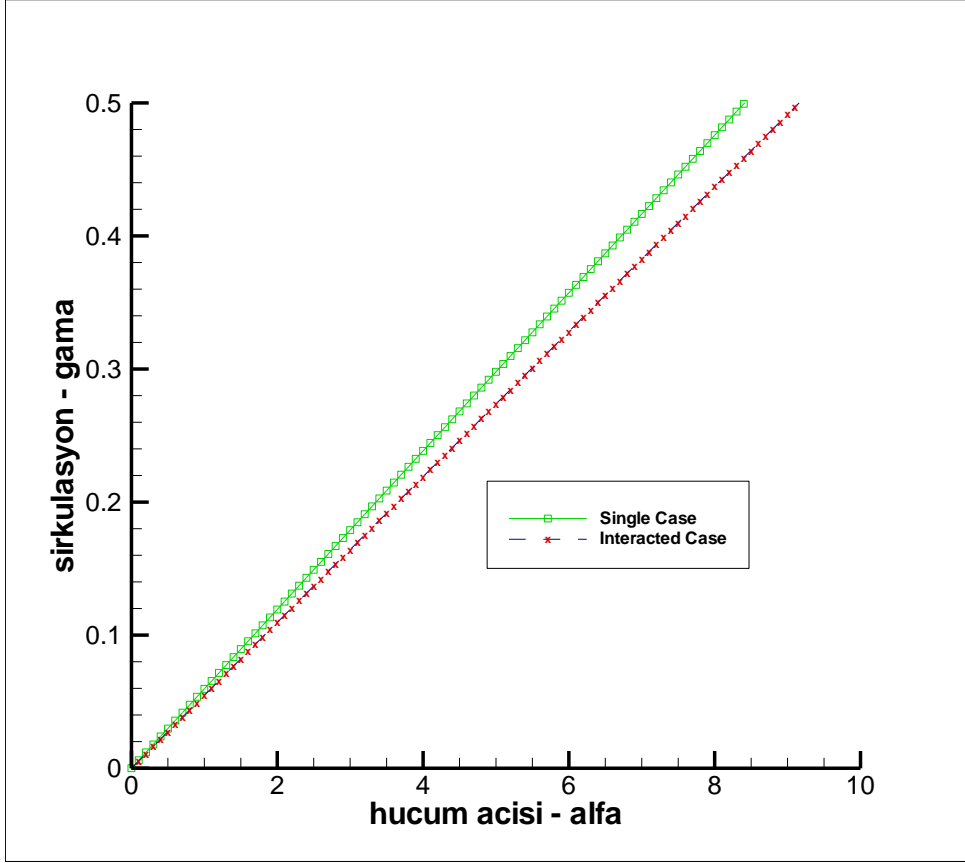
#### **3.5.4.3 Hücüm açısı etkisi**

Gemi, seyir halindeyken herhangi bir hücüm açısına maruz kalmayacaktır ancak dümen geminin rota tutması için sağa veya sola dönebilir. Bu durumda akış dümen üzerine belirli bir hücüm açısıyla gelecektir. Bu bölümde bu durumun incelenecektir; birinci hidrofoil sıfır hücüm açısına sahipken, ikinci hidrofoilin hücüm açısı değişken olacaktır.

Gerçek akışlarda belirli bir hücüm açısından sonra kanatlar stall’a girerler ve kaldırma kuvvetleri önemli ölçüde düşer. Ancak potansiyel akışta durum böyle değildir; hücüm açısı arttıkça kaldırma kuvveti de lineer olarak artar. Etkileşimler potansiyel akış kabulüyle incelendiğinden dolayı stall etkisi burada hesaplara dahil edilmemiştir.

İkinci hidrofoilin hücüm açısı arttıkça üzerindeki kaldırma kuvvetinin artacağı aşıkardır; ancak akışkan içerisinde tek başınayken kaldırma kuvvetinin artış miktarıyla, başka bir cisim varken olan artış miktarı karşılaştırılabilir. Dolayısıyla bu bölümde etkileşimli ve etkileşimsiz durumlarda hücüm açısının etkisi verilmiştir.

İki hidrofoil de NACA0012 kanat kesitine sahiptir ve kort boyları birer birimdir. İki hidrofoilin giriş uçları arasındaki mesafe 2 birime sabitlenmiştir. Etkileşimli ve etkileşimsiz durumlarda artan hücüm açısıyla sirkülasyonun değişimi şekil 3.38’de verilmiştir. Burada  $\alpha$  hücüm açısını temsil etmektedir.



Şekil 3.38 : Hücum açısının etkileşimli ve etkileşimsiz hallerdeki etkisi.

#### 3.5.4.4 Kort boyunun etkisi

Kort boyunun etkisi; ikinci hidrofoilin kort boyunun (KB2), iki hidrofoilin giriş uçları arasındaki mesafeyle (L) olan oranı sabitlenerek incelenecektir. Birinci hidrofoilin kort boyu 1 birimdir ve L / KB2 oranı 2 birime sabitlenmiştir. KB2 0.01 birimden 1 birime kadar değiştirilmiş ve bu durumda,

$$\frac{L}{KB2} = 2$$

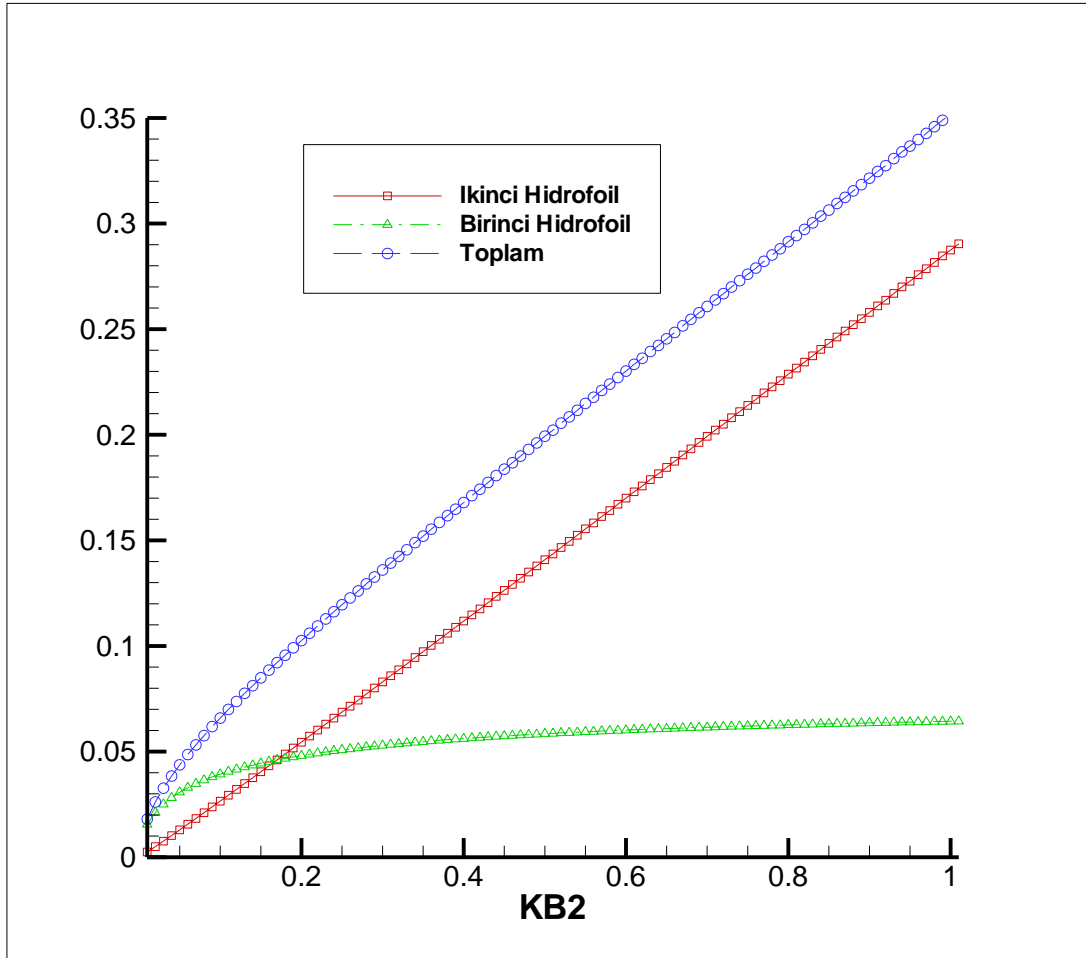
olacak şekilde L mesafesi de değişmek durumunda kalmıştır. Birinci hidrofoilin hücum açısı  $0^\circ$ , ikinci hidrofoilin hücum açısı ise  $5^\circ$ 'dir. İki hidrofoil de NACA0012 kanat kesitine sahiptir. İkinci hidrofoilin kort boyu sürekli bir değişime tabi tutularak birinci hidrofoil, ikinci hidrofoil ve toplam sirkülasyon değerleri incelenmiştir.

Beklendiği gibi ikinci hidrofoilin sirkülasyonu neredeyse lineer bir şekilde artış göstermiştir. Bunun sebebi kort boyunun artmasının başka bir cisimle olan etkileşimi domine etmesidir. Yani kort boyunun artırılmasıyla değişen kaldırma kuvveti

miktarı, etkileşimden kaynaklanan kaldırma kuvveti değişimine oranla çok daha fazladır.

Birinci hidrofoil, ikinci hidrofoilin kort boyunun artmasından dolayı olarak etkilenir. Dolayısıyla, ikinci hidrofoilin kort boyunun artmasıyla birinci hidrofoilin kaldırma kuvveti de artacaktır; ancak bu artış etkileşimin etkisini kaybetmesiyle yavaş yavaş kaybolacaktır.

Daha sağlıklı bir yorum yapılabilmesi için şekil 3.39 incelenmelidir.



Şekil 3.39 : Arkadaki hidrofoilin kort boyu değişiminin sirkülasyon üzerine etkisi.

### 3.5.5 Parametrelerin genel bir değerlendirmesinin yapılması

Yapılan analizde daha önceden de belirtildiği gibi birinci hidrofoilin gemi, ikinci hidrofoilinse dümen olduğu düşünülebilir. Gemiyle dümenin etkileşiminin ön dizayn aşamasında basit bir şekilde görülebilmesi için potansiyel yöntem kullanılabilir. Kalınlık, mesafe, kort boyu ve hücum açısı gibi parametreler hem birinci hem ikinci hidrofoil için değiştirilerek bu parametrelerin iki hidrofoil için de kaldırma kuvvetini nasıl değiştirdiği incelenebilir.

Etkileşim probleminde değişik parameterlerin tespit edilen etkileri madde madde şu şekilde sıralanabilir:

- Mesafe arttıkça sistemin toplam kaldırma kuvveti artar. İkinci hidrofoile daha fazla kaldırma kuvveti etkimesi gerekiyorsa, birinci hidrofoile daha yakın tutulmalıdır.
- Geminin manevra kabiliyetinin artırılması isteniyorsa, genişliği artırılmalıdır. Dümenin kalınlaşması kaldırma kuvvetinin artması bakımından olumludur.
- Birinci hidrofoil, ikinci hidrofoilin kaldırma kuvvetini azaltır. Mesafe arttıkça ikinci hidrofoilin kaldırma kuvveti artarken, birinci hidrofoilin kaldırma kuvveti düşer.
- Kanadın kort boyunun artırılması kaldırma kuvveti üretimi açısından olumludur.

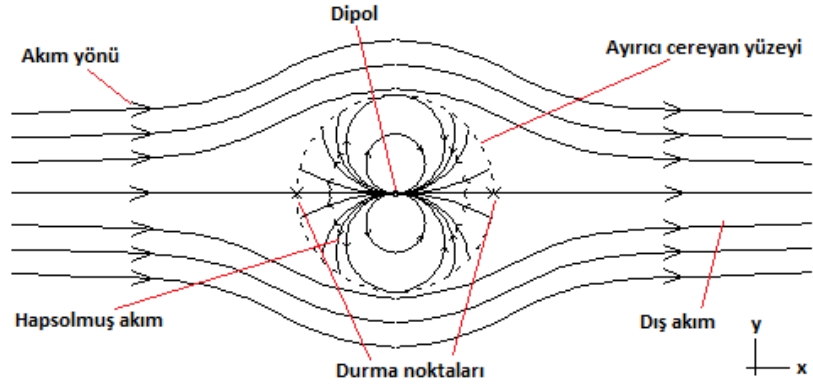
### **3.6 Küre Etrafındaki Akış**

Sonlu hacim yöntemi kullanılarak akışkan içerisinde tamamen batmış halde bulunan bir küre etrafındaki akış çözülmeye çalışılmıştır. Akış önce potansiyel kabul edilip, buradan sonlu hacim yönteminin verdiği sonuçlar analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Daha sonra viskoz akışlarda yöntemin verdiği sonuçlar irdelenmiştir.

Kürenin yarıçapı ve küre üzerine gelen akış hızı 1 birim olarak alınmıştır. İncelenecek değerler boyutsuz olarak ele alındığından değerlerin bu şekilde alınması daha kullanışlı olacaktır. Ayrıca akışkanın ne olduğu da bu analiz için önemsiz olmaktadır.

#### **3.6.1 Analitik çözüm**

Üç boyutlu bir dipol ve serbest akışın süperpoze edilmesi ile küre etrafındaki potansiyel akışı modellemek teorik olarak mümkündür.



Şekil 3.40 : Küre etrafındaki akışın temsili.

Şekil 3.40'tan da görülebileceği üzere +x yönünde akmakta olan bir akımın önüne yerleştirilen ve yönü -x doğrultusunda olan üç boyutlu bir dipol akışı ikiye ayırır. Üç boyutlu ikiye ayıran bu yüzeye ayırıcı cereyan yüzeyi adı verilir. Ayırıcı cereyan yüzeyi üzerinde normal doğrultudaki hız bileşeni sifıra eşittir. Bu yüzey üzerinde potansiyel akış kabulünden dolayı yalnızca teğetsel hızlar olabilir. Ayırıcı cereyan yüzeyinin dışında kalan bölgeye dış akım, içinde kalan bölgeye ise hapsolmuş akım adı verilir. Dolayısıyla ayırıcı cereyan yüzeyi aslında küre yüzeyini temsil etmiş olmaktadır.

Küresel koordinat sisteminde üç boyutlu dipol ile serbest akışın indüklediği potansiyeller birbirine eklenerek toplam potansiyel elde edilir:

$$\Phi = U_{\infty} r \cos \theta + \frac{\mu \cos \theta}{4\pi r^2}$$

Hız potansiyelinin konuma göre türevi alındığında hız alanı elde edilir:

$$q_r = \frac{\partial \Phi}{\partial r} = \left( U_{\infty} - \frac{\mu}{2\pi r^3} \right) \cos \theta$$

$$q_{\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} = - \left( U_{\infty} + \frac{\mu}{4\pi r^3} \right) \sin \theta$$

$$q_{\varphi} = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} = 0$$

Küre yüzeyinde ( $r = R$ ) normal hız sifıra eşit olacaktır:

$$q_r = \frac{\partial \Phi}{\partial r} = \left( U_{\infty} - \frac{\mu}{2\pi R^3} \right) \cos \theta = 0$$

Bu durumun sağlanması için ya  $\cos \theta$ , ya da parantez içindeki değer sifıra eşit olmalıdır. Parantez içindeki değer sifıra eşit olması durumu, dipolün şiddetini verir:

$$U_{\infty} - \frac{\mu}{2\pi R^3} = 0 \rightarrow \mu = 2U_{\infty}\pi R^3$$

Dipol şiddeti, hız potansiyeli ve hız alanı değerlerinin içine taşındığında;

$$\Phi = U_{\infty} \cos \theta \left( r + \frac{R^3}{2r^2} \right)$$

$$q_r = U_{\infty} \cos \theta \left( 1 - \frac{R^3}{r^3} \right)$$

$$q_{\theta} = -U_{\infty} \sin \theta \left( 1 + \frac{R^3}{2r^3} \right)$$

Küre etrafındaki basınç dağılımını elde etmek için  $r = R$  durumundaki hız değerleri bulunmalıdır:

$$q_r = 0 \text{ ve } q_{\theta} = -\frac{3}{2}U_{\infty} \sin \theta$$

Hız değerleri incelenerek şekil 3.40'ta da gösterilen durma noktalarının  $\theta = 0$  ve  $\theta = \pi$  konumlarında olduğu bulunabilir. Bernoulli denklemleri kullanılarak;

$$p - p_{\infty} = \frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2 \left( 1 - \frac{9}{4}\sin^2 \theta \right)$$

elde edilir. Boyutsuz basınç katsayısı ise;

$$C_p = \frac{p - p_{\infty}}{\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2} = \left( 1 - \frac{9}{4}\sin^2 \theta \right)$$

olarak bulunur [26]. Boyutsuz basınç katsayısına kısaca bir göz atıldığında durma noktalarında bu değer 1'e eşit olduğu fark edilecektir. Bu değer küre üzerindeki maksimum değerdir ve ayrıca Kutta şartının sağlandığının da göstergesidir. Maksimum hızın olduğu  $\theta = \pi/2$  ve  $\theta = 3\pi/2$  gibi konumlarda ise basınç katsayısı minimum değerini alır. Gerekli işlemler yapıldığında bu değer de  $C_p = -5/4$  olduğu bulunacaktır. Kürenin simetrik bir cisim olmasından ve akıştaki simetriyi bozmamasından dolayı lift (kaldırma) ve drag (direnç) değerleri de sıfıra eşit olmalıdır.

$\theta$ 'ya farklı değerler verilerek küre üzerindeki hız ve basınç dağılımı bulunabilir. Basit bir kod yazılarak küre kesiti 10 parçaya bölündüğünde bulunan boyutsuz basınç katsayısı çizelge 3.4'te verilmiştir:

**Çizelge 3.4 :** Küre için hız ve basınç değerlerinin analitik sonuçları.

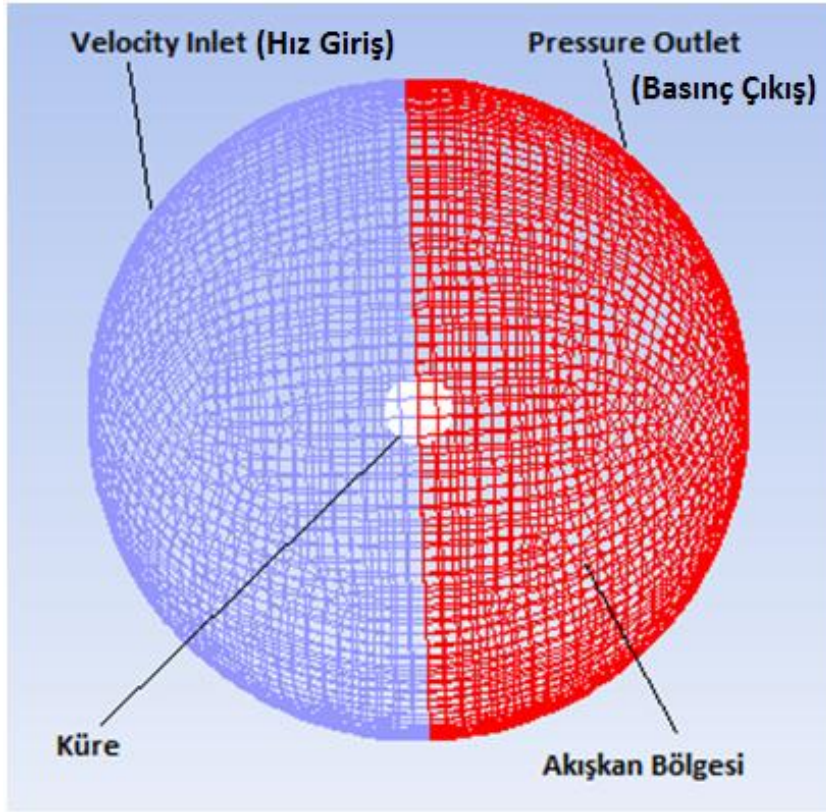
$\theta$	$q_\theta$	$C_p$
0.8090	-0.8817	0.2226
0.3090	-1.4266	-1.0351
-0.3090	-1.4266	-1.0351
-0.8090	-0.8817	0.2226
-1	0	1
-0.8090	0.8817	0.2226
-0.3090	1.4266	-1.0351
0.3090	1.4266	-1.0351
0.8090	0.8817	0.2226
1	0	1

### 3.6.2 Viskoz olmayan çözüm

Viskoz olmayan çözüm için sonlu hacimler yöntemi kullanan ticari bir yazılım (ANSYS Fluent) kullanılmıştır.

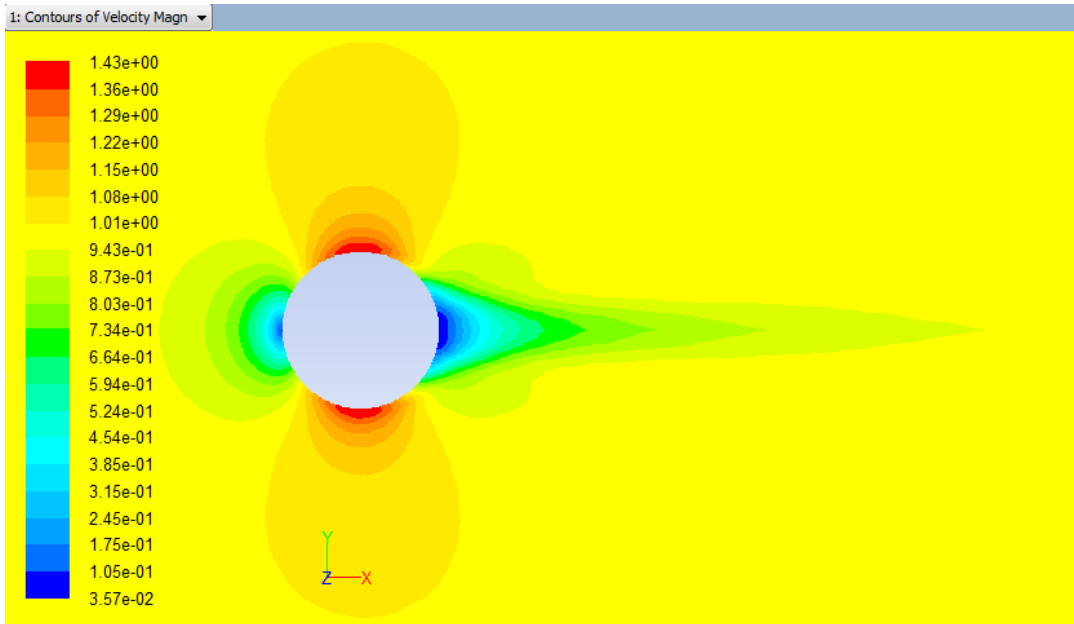
Küre yüzeyi, 10280 dörtgen eleman kullanılarak temsil edilmiştir. Sınırları teorik olarak sonsuz uzaklıkta olan akışkan bölgesi seçimi içinse yarıçapı 10 birim olan başka bir küre seçilmiştir. Çözümü yapılacak olan asıl küre akışkan bölgesi olarak seçilen büyük kürenin tam merkezinde yer almaktadır. Akışkan bölgesi olarak seçilen küre yüzeyi yine 10280 dörtgen eleman kullanılarak temsil edilmiş; tüm akışkan hacmi ise 209600 hexahedral (altı yüzlü) elemana bölünmüştür. En kötü elemanın kalitesi yaklaşık olarak 0.38 bulunmuştur. Bu gibi analizlerde en kötü eleman kalitesinin yaklaşık olarak 0.7'nin altında olması beklenir.

Akışkan hacmini oluşturan büyük kürenin bir yüzüne “velocity inlet” sınır şartı verilerek birim hız değeri girilmiştir. Çıkış sınır şartı ise “pressure outlet” olarak belirlenmiştir. (bkz. Şekil 3.41) Basınç ve momentum ikinci dereceden ele alınmıştır.

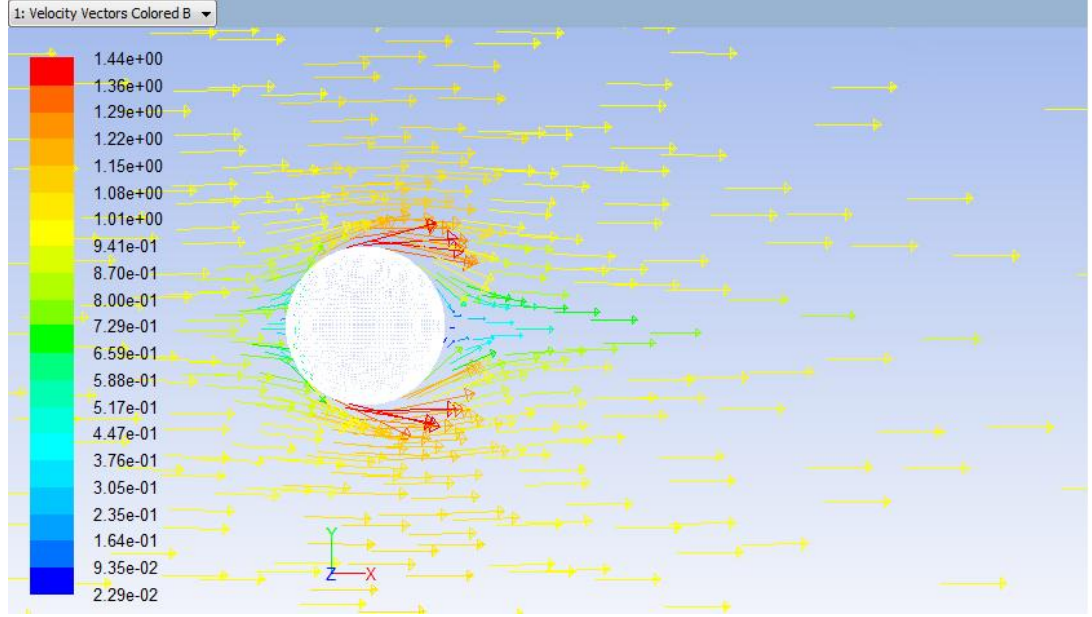


Şekil 3.41 : Küre etrafındaki akış için sonlu hacim yönteminin kurulması.

Küre etrafındaki toplam akış hızı şekil 3.42’de görülmektedir. Burada kürenin başıyla sonundaki durma noktaları açıkça görülebilmektedir. Beklendiği gibi kürenin üst ve alt kısımlarında akış hızı en yüksek değerleri almaktadır. Şekil 3.43’te ise küre etrafındaki akış hız vektörleri görülmektedir.



Şekil 3.42 : Viskoz olmayan durum için küre etrafındaki akış hızı.

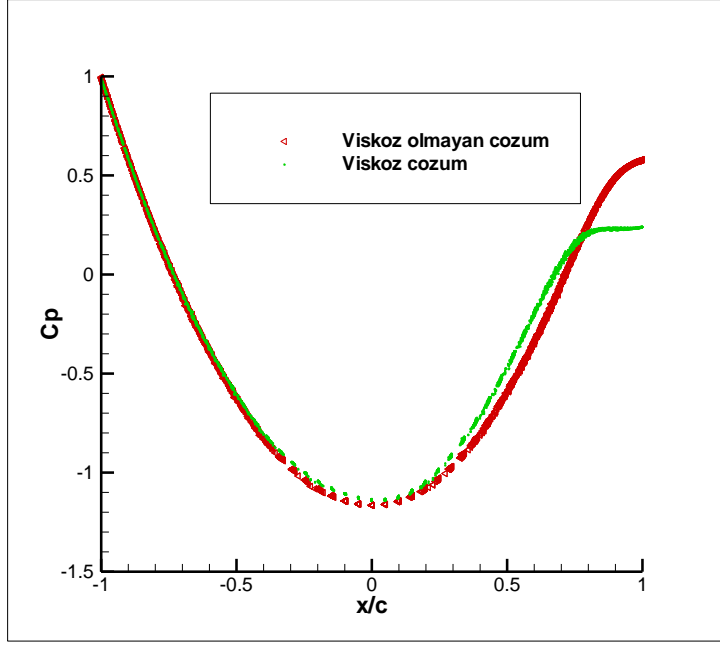


Şekil 3.43 : Viskoz olmayan durum için küre etrafındaki hız vektörleri.

### 3.6.3 Viskoz çözüm

Viskoz çözüm sonuçlarını alabilmek için yine ANSYS Fluent kullanılmıştır. Küre etrafındaki ağ elemanı örgüsü bir önceki bölümdekiyle aynıdır. Aynı ağ eleman örgüsü HAD programında bu sefer viskozitenin etkileri hesaba dahil edilerek çözülmüştür.

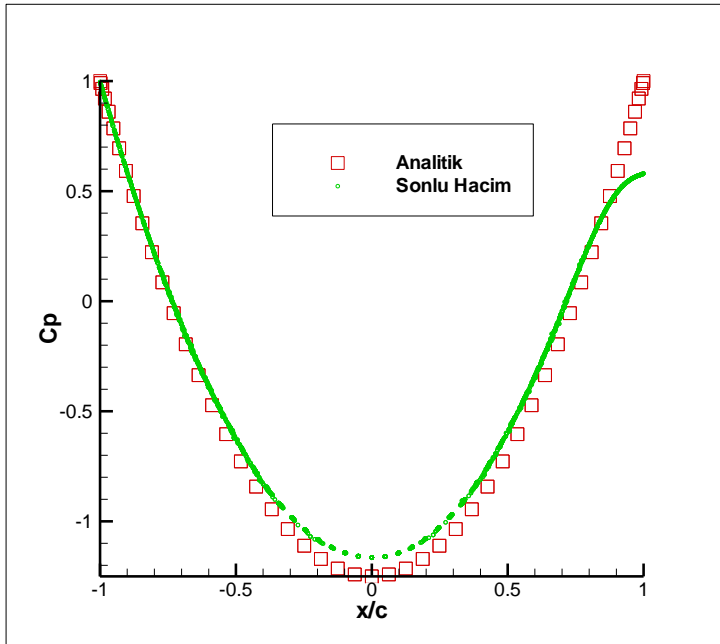
Küre gibi küt cisimler etrafındaki akışta viskozite yüksek derecede türbülans yaratan bir faktör olarak rol oynar. Viskoz etkiler sebebiyle kürenin iz bölgesinde, kürenin yüzeyinden kopan girdaplar yer alır ve bu kopan girdaplar küre etrafındaki akışın belirli bir rejime oturmasını engeller. Bu yüzden, zamandan bağımsız analizler yapabilmek için yüksek Reynolds sayılarına çıkılması ve iz bölgesindeki faaliyetin belirli bir alana hapsedilerek etkilerinin azaltılması gerekmektedir. Dolayısıyla bu bölümde çözülen küre etrafındaki viskoz akışın Reynolds sayısı  $2 \cdot 10^7$  olarak seçilmiştir. Karşılaştırma, viskoz olmayan çözüm ile boyutsuz basınç dağılımı verilerek yapılacaktır. Farklı Reynolds sayılarında kaldırma kuvveti ve boyutsuz basınç dağılımlarındaki değişiklikler çok küçük seviyede kaldığından [30] bu bölümde ihmal edilmişlerdir. Şekil 3.44'te viskoz çözüm ile viskoz olmayan çözüm durumlarında küre üzerindeki boyutsuz basınç dağılımlarının karşılaştırmaları yapılmıştır.



Şekil 3.44 : Küre için viskoz olmayan çözüm ile viskoz çözümün karşılaştırılması.

### 3.6.4 Yöntemin değerlendirilmesi

Küre etrafındaki boyutsuz basınç katsayısı dağılımı ise Şekil 3.45'te analitik çözümle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Analitik çözüm yapılırken, sonlu hacim yönteminin doğruluğunun ne ölçüde olduğunu saptamak için küre kesiti 100 parçaya ayrılmış ve karşılaştırma bu duruma göre yapılmıştır. Grafiğe bakarak sonlu hacim yönteminin küre gibi küt cisimlerde bile (izler kenar bölgesi dışında) yeterli sonuçlar verebildiği söylenebilir.



Şekil 3.45 : Sonlu hacim yönteminin analitik sonuçla karşılaştırılması.

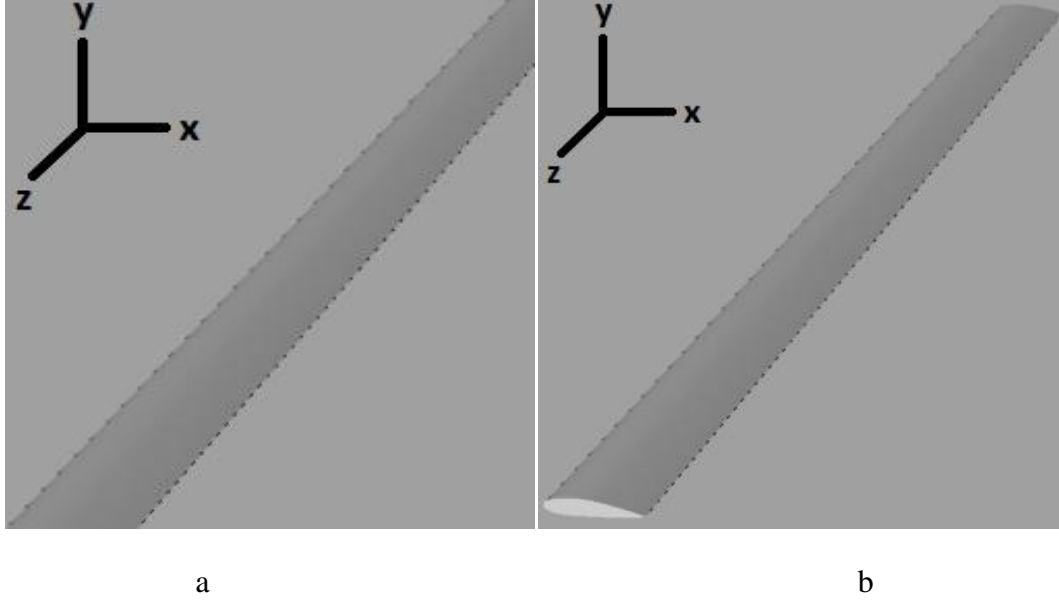
Sonlu hacimler yöntemini kullanarak analitik sonuçlara daha yakın sonuçlar almak mümkündür. Akışkan bölgesini modelleyen eleman sayısının ve kalitesinin artırılması sonuçlara olumlu yansıyacak ve gerçek sonuçlara daha da yaklaşmayı sağlayacaktır.

Sonlu hacim yöntemi ile hesaplanan boyutsuz lift katsayısı değeri de beklendiği gibi sifira çok yakın çıkmaktadır (y doğrultusunda  $1.2 \cdot 10^{-16}$ , z doğrultusunda  $2.3 \cdot 10^{-5}$ ). Bu da yöntemin doğru sonuçlar verebildiğinin başka bir göstergesi olarak kabul edilebilir.

### **3.7 Kanat Etrafındaki Akış**

Gemi ve takıntılarının etrafındaki akış gözönüne alındığında üç boyutlu uzay ortamında modelleme yapmak gerekir. Ancak üç boyutlu çözümler, zaman alıcı ve çözülmesi zor olduklarından her zaman kullanmak mümkün olmayabilir. Böyle durumlarda iki boyutlu kanat teorisi devreye girmektedir. İki boyutlu ortamda çalışmak hem daha kolaydır hem de daha çabuk sonuç verir. Ayrıca hidromekaniğin en önemli konularından olan kaldırma kuvvetinin izahı iki boyutlu ortamda daha kolaydır. Kanat, pervane gibi çoğu üç boyutlu mekanizma, iki boyutlu kanat kesitlerinden oluşur. Dolayısıyla bu kanat kesitlerini inceleyerek kaldırma kuvvetlerini artırabilmek, üç boyutlu ortama geçildiğinde de kaldırma kuvvetinin artmasını sağlayacaktır. Ancak burada iki boyutlu kanat kesitlerini birleştirerek üç boyutlu bir kanadın etrafındaki akışın modellenebileceği fikrinin önüne geçilmelidir. Üç boyutlu kanatlarda uçlardaki akım sapması (downwash) sebebiyle, kanat etrafındaki basınç ve hızlar kanadın uç noktalarında farklı olacaktır [1].

Daha önceki bölümlerde iki boyutlu kanat etrafındaki akış çözülmüştü. Üç boyutlu kanat etrafındaki akış ise iki boyutlu akışa oranla biraz daha farklıdır. İki boyutlu akış ile üç boyutlu akışın farkı için öncelikle şekil 3.46 incelenmelidir.



**Şekil 3.46 :** İki boyutlu akış ile üç boyutlu akış farkının açıklanması için bir resim.

Şekil 3.46a'daki gibi bir durumda kanadın  $z$  doğrultusunda herhangi bir sonu yoktur. Kanat  $z$  eksenini boyunca sonsuza kadar uzanır. Bu durumda  $z$  eksenini doğrultusunda akışta herhangi bir değişim olmaz. Dolayısıyla iki boyutlu çözümler bu gibi kanat açıklığının çok yüksek olduğu durumlarda yeterli sonuçlar verecektir.

Şekil 3.46b'deki durumda ise kanat yine  $z$  eksenini boyunca uzanmasına karşın, sonludur. Baş ve sonu bellidir. Bu gibi durumlarda kanat uçlarında akımlarda kaçmalar meydana gelir ve bu  $z$  eksenini boyunca akıştaki simetriyi bozar. Kanat uçlarında akım farklılaştığı için, kanat üzerindeki basınç dağılımı değişir. Dolayısıyla bu gibi durumlarda çözümler üç boyutlu kanat için yapılmalıdır.

Kısaca özetlemek gerekirse; kanat açıklığının sonsuz veya çok büyük olduğu durumlarda iki boyutlu analiz, kanat açıklığının sonlu veya nispeten küçük olduğu durumlarda ise üç boyutlu analiz yapmak gerekir.

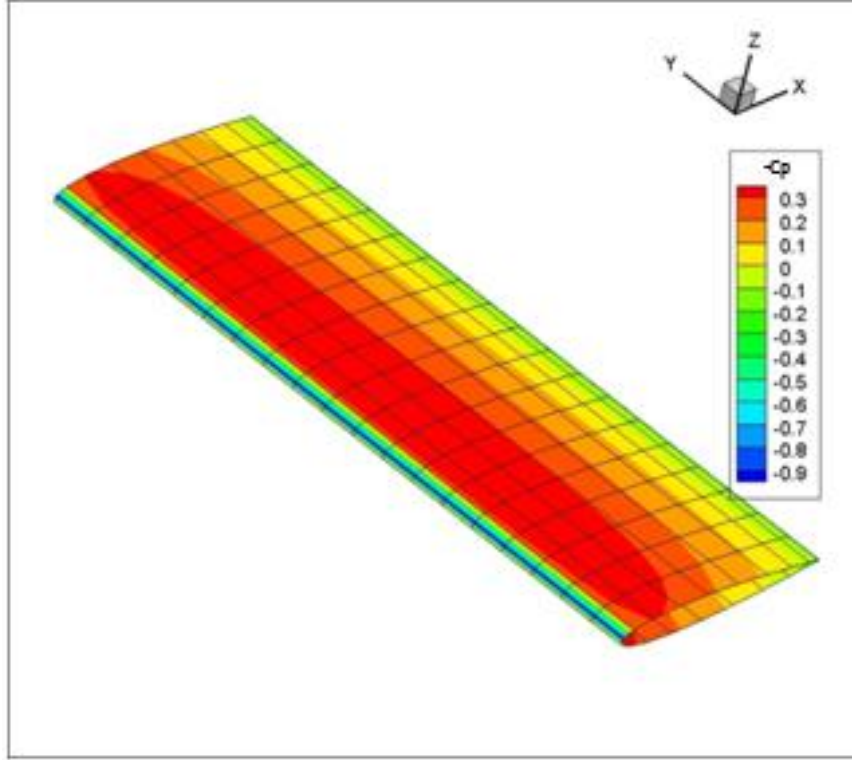
Bu bölümde üç boyutlu kanat etrafındaki akış incelenecektir. Dolayısıyla kanat açıklığı sonlu ve küçüktür. Kanat uçlarındaki akım sapması ve bu akım sapmasının kanat üzerindeki basıncı nasıl değiştirdiği bu bölümde görülebilir.

Kanat etrafındaki akış iki yöntemle incelenmiştir:

- Sınır elemanları yöntemi: Bu yöntemde akış potansiyeldir.
- Sonlu hacim yöntemi: Akış potansiyel veya viskoz olarak incelenebilir.

### 3.7.1 Sınır elemanları yöntemi

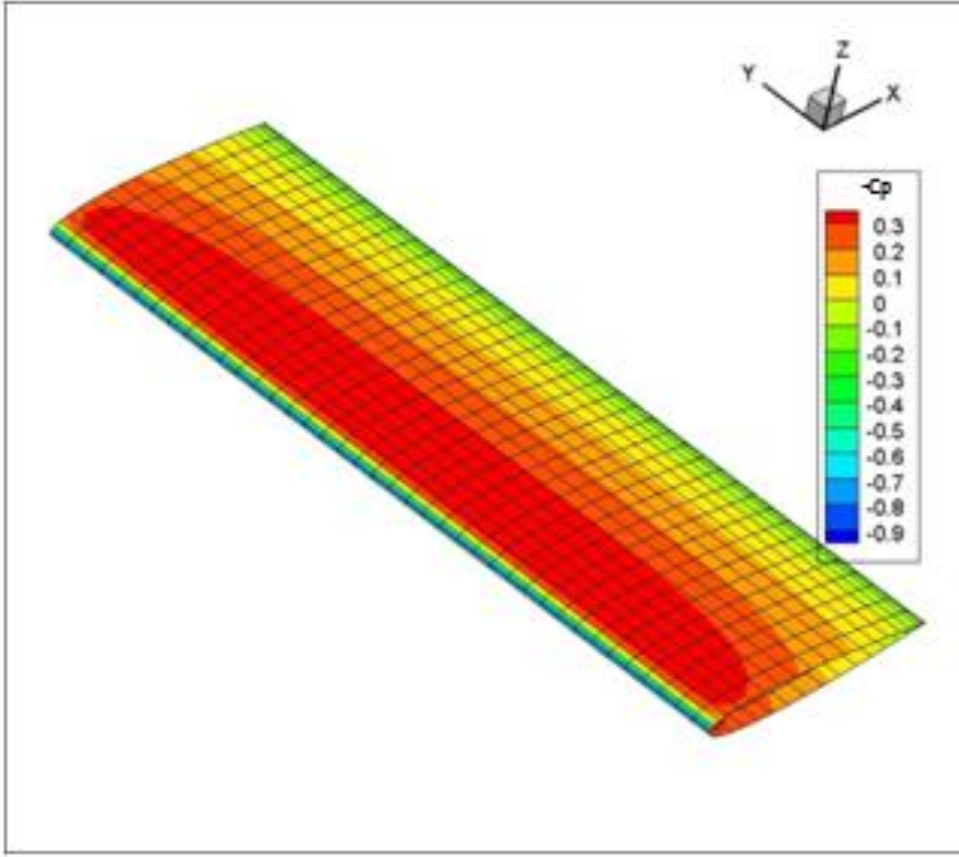
Sınır elemanları yöntemi ile bir adet NACA0012 kanadı etrafındaki akım çözülmüştür. Kanadın hücum açısı  $0^\circ$ 'dir ve kanadın açıklık oranı 3 olarak alınmıştır. 400 ve 1600 panel için çözümler üretilmiştir. Sonuçlar şekil 3.47 ve şekil 3.48'den takip edilebilir.



Şekil 3.47 : SEM ile 400 panele ayrılmış kanat üzerindeki basınç dağılımı.

Şekil 3.47'de 400 panel için kanat etrafındaki negatif boyutsuz basınç katsayısı dağılımı verilmiştir. Kanat uçlarındaki akım kaçması (downwash) şekilden rahatlıkla tespit edilebilir. Bu akım kaçması iki boyutlu çözümlerle incelenemez. Kanat uçlarındaki dikey panellerin akıma olan etkisi çok az olduğundan bu paneller (şekilden de görülebildiği gibi) çözümlere dahil edilmemiştir.

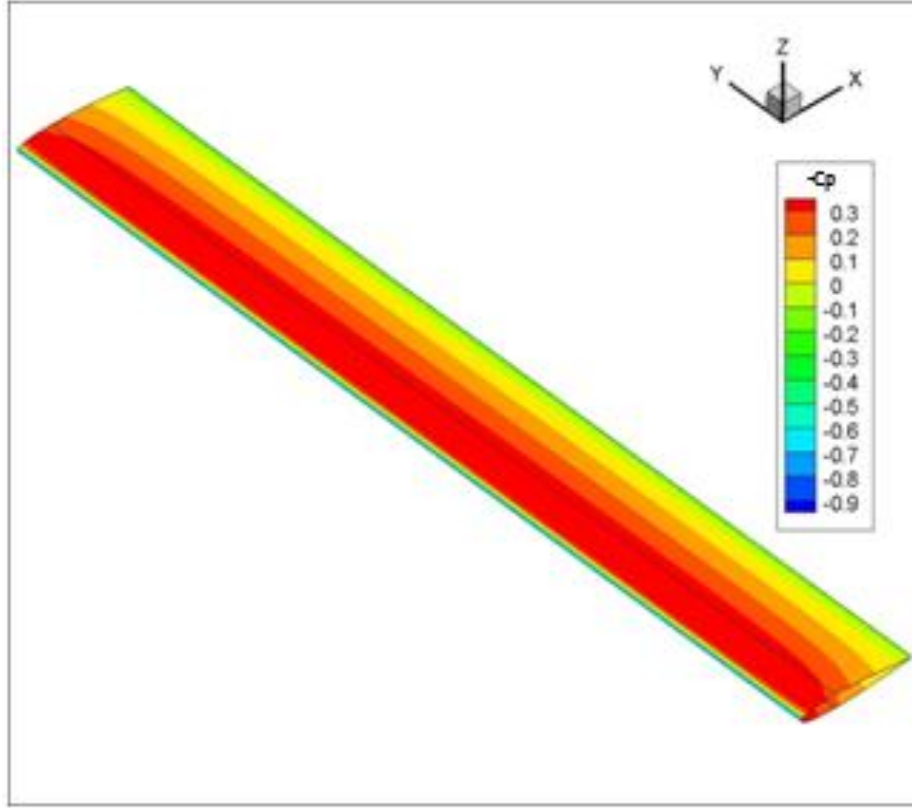
Şekil 3.48'de ise 1600 panel için kanat etrafındaki negatif boyutsuz basınç katsayısı dağılımı verilmiştir. Burada sonuçların çok fazla değişmediği şekil 3.47 ile karşılaştırıldığında görülebilir. Sınır elemanları yönteminin avantajlarından birisi de budur: bu yöntemi kullanarak az elemanla cisim ve etrafındaki akım çok rahat ve iyi bir hassasiyetle temsil edilebilir olmaktadır. Şekil 3.47 ve şekil 3.48'de yöntemin kanat üzerindeki durma noktalarını da gayet iyi yakaladığı görülebilir.



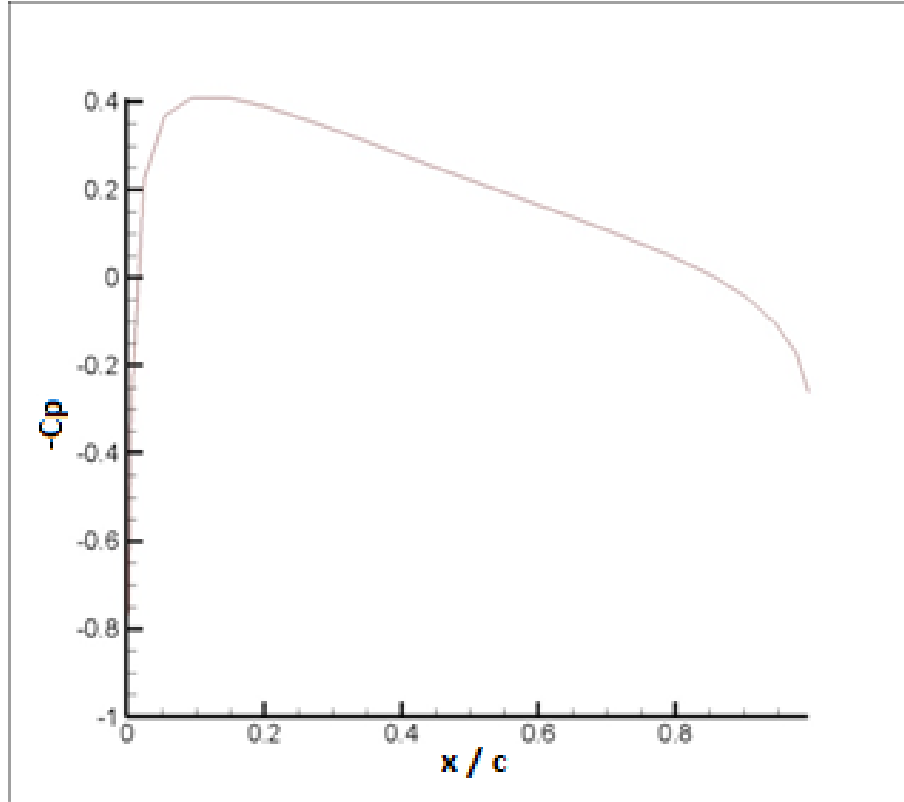
**Şekil 3.48** : SEM ile 1600 panele ayrılmış kanat üzerindeki basınç dağılımı.

Kanat açıklık oranı arttıkça, üç boyutlu çözümler iki boyutlu çözümlere doğru yakınsar. Ancak yine de iki boyutlu çözümlerde kanat uçlarındaki akım kaçmasının gözlenmesinin mümkün olmadığı unutulmamalıdır. Şekil 3.49’da kanat açıklık oranı 8 olan ve 1600 panelden oluşan (x yönünde 40, y yönünde 40 panel) bir NACA0012 foilinin etrafındaki basınç dağılımı verilmiştir. (Panellerin bu sefer kanat üzerinde gösterilmesine gerek görülmemiştir.)

Şekil 3.50’de ise iki boyutlu ve 40 panelli bir NACA0012 foili üzerindeki basınç dağılımı verilmiştir. Görüldüğü gibi kanatın uçlardaki yüzde 5’lik dilimleri dışarı çıkarıldığında üç boyutlu çözüm ile iki boyutlu çözüm neredeyse birebirdir. Maksimum değeri (ki bahsedilen negatif  $C_p$  değeridir) 0.4 civarındayken minimum değer beklendiği gibi -1’e doğru gitmektedir. (Kutta şartından dolayı hız durma noktalarında 0 olur.) Şekil 3.47, 3.48 ve 3.49’da kanat giriş ucunda negatif basınç değerinin -1’e yakın olduğu gözlemlenebilir. Ayrıca şekil 3.50’de de giriş ve çıkış ucundaki durma noktaları bellidir.

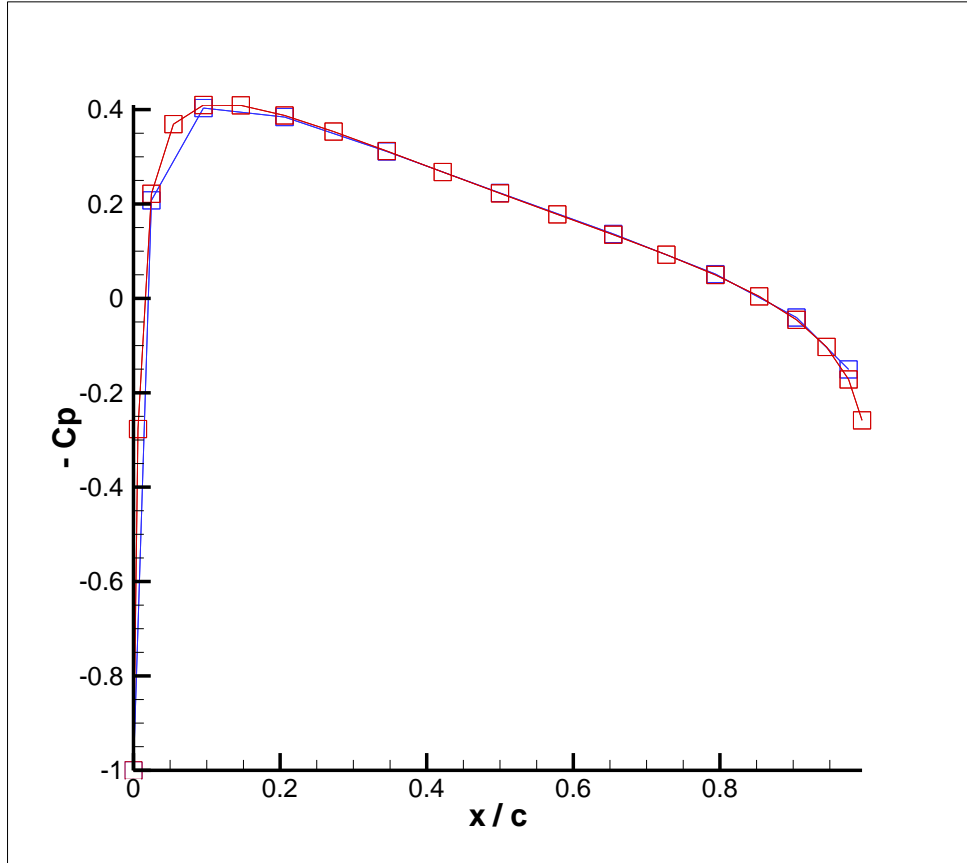


Şekil 3.49 : Aynı kanat için açıklık oranının 8 olduğu durumda basınç dağılımı.



Şekil 3.50 : Aynı kanat için iki boyutlu durumda basınç dağılımı.

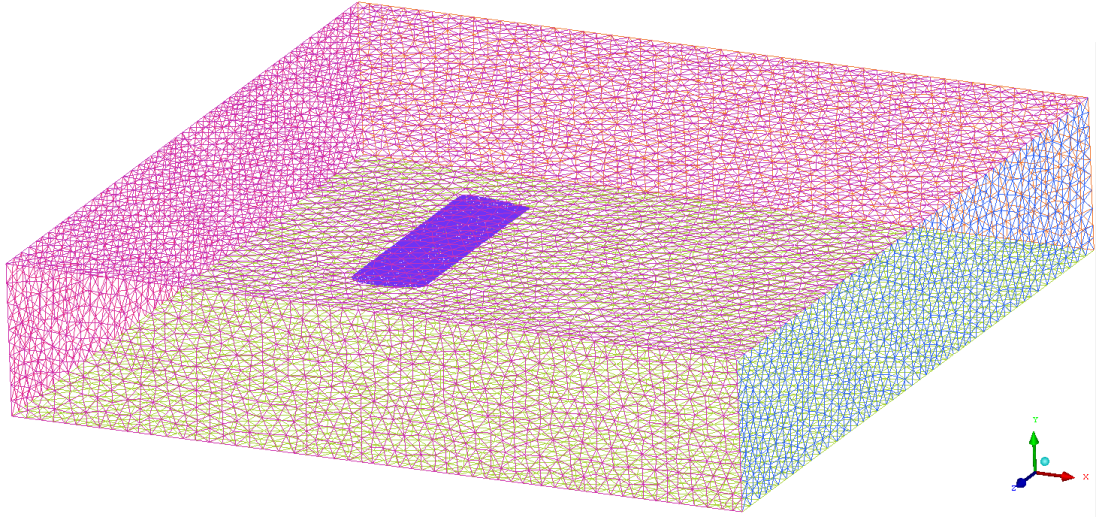
Kanat açıklık oranı arttıkça, üç boyutlu çözümler iki boyutlu çözümlere yakınsıyorsa bu durumda üç boyutlu bir çözümün orta kesitinden bir basınç dağılımı grafiği çıkartıldığında bunun iki boyutlu çözümle uyumlu olması gerekir. Bu durum şekil 3.51’de incelenmiştir. Mavi ile gösterilen eğri iki boyutlu çözüme aitken, kırmızı ile gösterilen eğri üç boyutlu çözümün orta kesitinden alınan basınç dağılımı grafiğidir.



Şekil 3.51 : Açıklık oranının 8 olduğu durum ile 2-B sonucun karşılaştırılması.

### 3.7.2 Sonlu hacim yöntemi

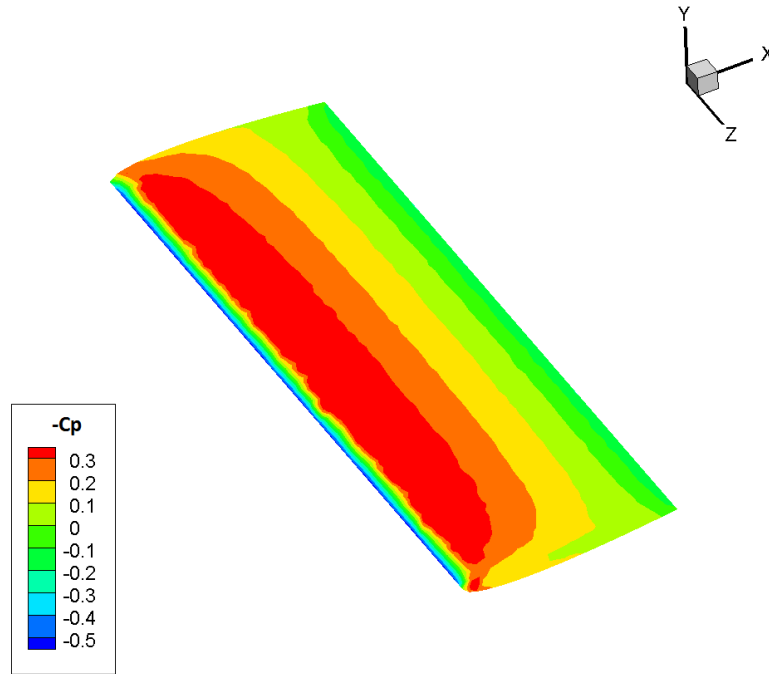
Sonlu hacim yöntemiyle NACA0012 foili etrafındaki akış viskoz ve viskoz olmayan şekilde ayrı ayrı çözülmüştür. Kanat hücum açısı  $0^\circ$ 'dir. Akış, kanat açıklığının 3 olduğu durum için çözülmüştür. Paket programla çözülen problem için kullanılan ağ yapısı şekil 3.52'de verilmiştir.



Şekil 3.52 : Kanat etrafındaki akışın çözülmesi için kullanılan ağ yapısı.

### 3.7.2.1 Viskoz olmayan çözüm:

Akışkan içerisinde tamamen batmış halde bulunan foil kaviteasyon ve serbest su yüzeyi etkileri ihmal edilerek çözülmüştür. Akımda viskozite ihmal edilmektedir. Kanat açıklığının 3 olduğu durumda foil üzerindeki boyutsuz basınç katsayısı dağılımı şekil 3.53'te verilmiştir.



Şekil 3.53 : Viskoz olmayan akış için SHM ile bulunan basınç dağılımı.

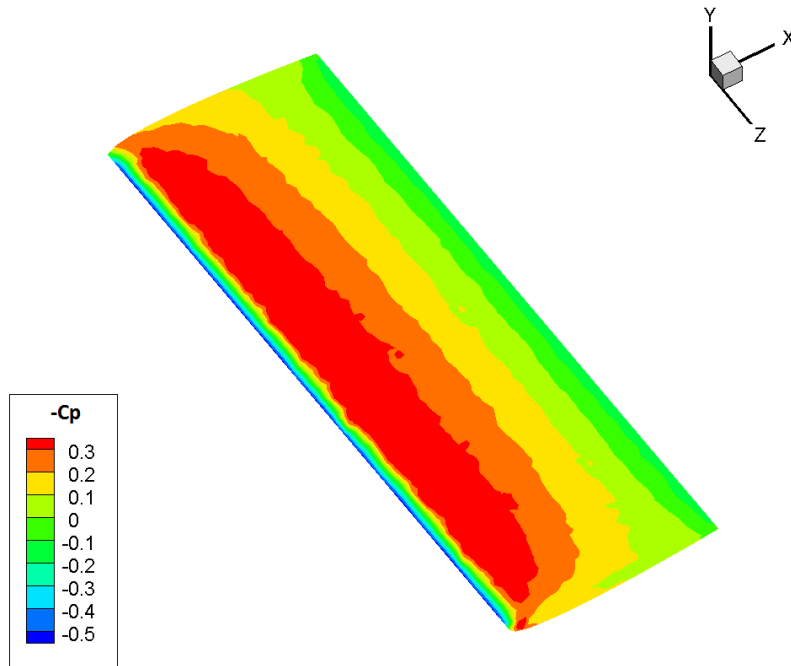
Şekil 3.53'te verilen ve Euler denklemini kullanarak sonlu hacim yöntemiyle çözülen kanat etrafındaki boyutsuz basınç katsayısı dağılımını, şekil 3.48'de verilen ve potansiyel teori kullanan sınır elemanları yöntemiyle karşılaştırmak yerinde

olacaktır. İki şekilde verilen basınç konturları incelendiğinde yöntemlerin paralel sonuçlar verdiği söylenebilir. Şekil 3.53'deki konturların belirli yerlerde dalgalanmasının sebebi ağ elemanı yapısından kaynaklanmaktadır. Kanat yüzeyine daha sık eleman atılmasıyla bu dalgalanma ortadan kaldırılabilir. Şekilde ayrıca foil üzerinde durma noktaları açıkça da görülebilmektedir.

### 3.7.2.2 Viskoz çözüm:

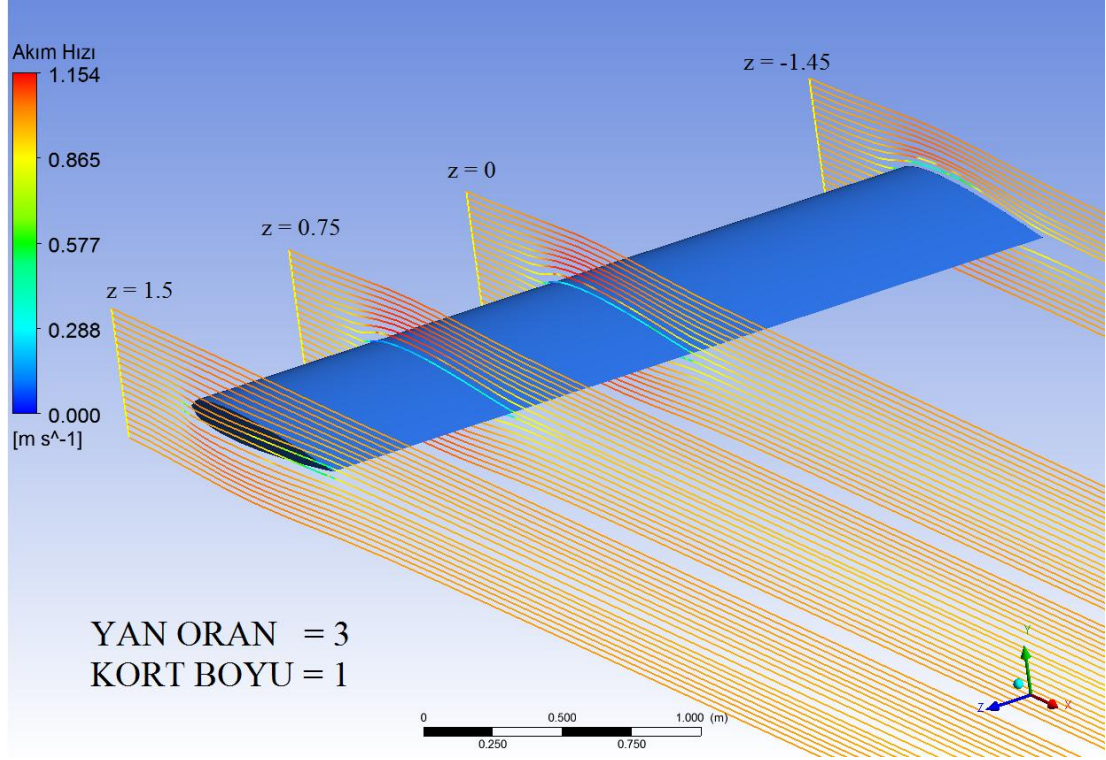
Akışkan içerisinde tamamen batmış halde bulunan foil, kavitasyon ve serbest su yüzeyi etkileri ihmal edilerek çözülmüştür. Akım viskozdur. Kanat gibi ince kesitli cisimlerde (çok yüksek hızlara çıkılmadığı takdirde) türbülans oluşmayacağından akım laminer çözülmüştür. Kanat açıklığının 3 olduğu durumda foil üzerindeki boyutsuz basınç katsayısı dağılımı şekil 8'de verilmiştir.

Şekil 3.53'te Euler denklemiyle çözülen kanat etrafındaki boyutsuz basınç katsayısı dağılımı ile, şekil 3.54'te verilen ve Navier – Stokes denklemiyle çözülen kanat etrafındaki boyutsuz basınç sayısı karşılaştırıldığında akımda viskozitenin etkilerinin anlaşılması mümkün olacaktır. Şekiller incelenerek viskoz ve viskoz olmayan akış çözümlerinin benzer sonuçlar verdiği söylenebilir. Bu da akımın viskozitesinin kanat gibi ince kesitli cisimler için bazı analizlerde ihmal edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 3.54 : Viskoz akış için SHM ile bulunan basınç dağılımı.

Viskoz akışta çözülen kanat etrafındaki akım hatlarının kesitsel bazda bir görünümü şekil 3.55’te verilmektedir. Burada kanadın tam uç noktasına isabet eden  $z = 1.5$  noktasında akımın kıvrılarak hidrofoilin etrafından dolaştığına dikkat edilmelidir. Aynı şekilde kanadın tam ters tarafında biraz daha içeriden alınan akım hattında ise ( $z = -1.45$  noktası) iz bölgesinin nasıl oluştuğu incelenmelidir. Bu bölgede



Şekil 3.55 : Viskoz akış için SHM ile bulunan basınç dağılımı.

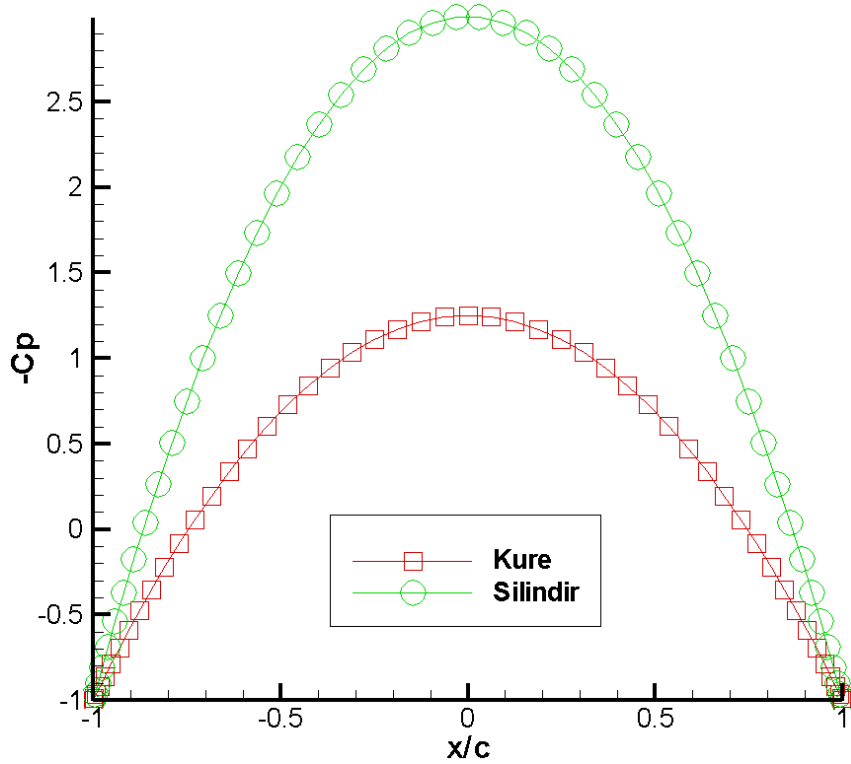
### 3.8 Çözülen Problemler Işığında Yöntemlerin Değerlendirilmesi

Bu bölümde bazı temel problemler, çeşitli teoriler bazı sayısal uygulamalara tabi tutularak, çözülmüştür. Çözümlerde iki sayısal yöntem kullanılmıştır. Bunlardan birincisi sınır elemanları yöntemi, ikincisi ise sonlu hacim yöntemidir. Sınır elemanları yöntemi, potansiyel teori ile birleştirilerek kullanılmış; sonlu hacim yöntemi ise ya RANSE denklemleriyle ya da Navier – Stokes denklemleriyle eşleştirilmiştir. RANSE, türbülansın oluştuğu durumlarda tercih edilmiş; akımın laminar olması durumunda Navier – Stokes denkleminin çözülmesi yeterli sonuçlar vermiştir.

Yöntemler, literatürde var olduğu takdirde, analitik sonuçlarla karşılaştırılıp değerlendirilmiştir. Analitik sonuçların bulunmadığı durumlarda ya farklı

yöntemlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır, ya da yine literatürde önceden sayısal ya da deneysel çözümlere yapılmış cisimler kullanılarak yöntemler değerlendirilmiştir.

Bölüm boyunca anlatılan analizlerde fark edilebileceği üzere, akımın viskozitesinin önemli olduğu durumlarda potansiyel yöntem yetersiz kalmaktadır. Aslında potansiyel yöntemi, sınır tabaka yöntemi ile birleştirerek kullanmak mümkündür; ancak sınır tabaka yöntemi iki boyutlu cisimler için verilmiştir ve yöntemin üç boyutlu sonuçları tatmin edici değildir. Ayrıca sınır tabaka yöntemi laminar akıslarda daha iyi sonuçlar vermekte türbülansın başladığı akımlarda yeterli hassasiyeti yakalayamamaktadır. Bu sebeplerden dolayı sınır elemanları yönteminin kullanımı sadece viskozitenin cisim üzerinde etkilerinin az olduğu durumlar ile sınırlı kalmıştır.



Şekil 3.56 : Küre ile silindir üzerindeki basınç dağılımlarının karşılaştırılması.

Ancak sınır elemanları yönteminin, sonlu hacim yöntemine nazaran çok daha hızlı sonuçlar verdiği bir gerçektir. Sınır elemanları yönteminde, sadece akış içerisinde söz konusu cisim yüzeyi modellenmekte ve etrafındaki akış bu cismin yarattığı potansiyelden etkilenerek akmaktadır. Sonlu hacim yönteminde ise durum farklıdır. Bu yöntemde akış içerisindeki cisim, tüm akış bölgesiyle birlikte modellenmelidir. Cisim etrafındaki akış, seçilen akış bölgesinin sınırlarından herhangi bir şekilde

etkilenmemelidir. Bu sebepten dolayı akış sınırları cisimden çok uzakta bir yerlerde seçilmelidir. Bu da modellenecek bölgenin hacmini artırır ve çok yüksek eleman sayılarına ihtiyaç duyulur. Ayrıca sınır elemanları yönteminde sadece yüzey ağ elemanlarıyla örülüp iki boyutlu panellerle temsil edilebilirken, sonlu hacim yönteminde ağ elemanları üç boyutlu olmalıdır. Üç boyutlu eleman modellemesi iki boyutlu eleman modellemesine oranla çok daha zaman alıcı ve zahmetlidir. Dolayısıyla sonlu hacim yöntemiyle pratik çözüm almak mümkün olamamaktadır.

Sınır elemanları yöntemi bölüm boyunca iki farklı şekilde uygulanmıştır. Bunların birincisi sabit şiddetli kaynak yöntemi, ikincisi ise sabit şiddetli kaynak – dipol yöntemidir. Temel potansiyel akışlardan olan kaynak akışı ile akışkan içerisindeki cisim kalınlığı oldukça iyi temsil edilebilir. Ancak kaynak ile akıştaki asimetriyi temsil etmek mümkün değildir. Yine temel akışlardan olan dipol akışı ise akışkan içerisindeki asimetriyi temsil edebilmesi sebebiyle kullanılmalıdır. Yalnız dipol, kalın cisimlerin temsilinde tek başına kullanılmamalıdır. İnce cisimler yalnızca dipol ile belirli bir yere kadar iyi bir şekilde temsil edilebilirken, silindir gibi küt cisimlerde yeterli sonuçlar vermekten uzak kalmaktadır. Yapılabilecek en iyi şey, bu iki temel potansiyel akışı beraber kullanmaktır. Dolayısıyla sabit şiddetli kaynak yöntemi yalnızca belirli durumlarda iyi sonuçlar verebilirken, sabit şiddetli kaynak – dipol yöntemi daha geniş bir perspektife hitap edebilmektedir.

Örneğin, sabit şiddetli kaynak yöntemi ile silindir etrafındaki akışın iyi bir şekilde modellenebildiği bu bölümün en başında gösterilmiştir. Aynı şekilde iki boyutlu hücum açısız bir foil etrafındaki akış da bu yöntemle yeterli sonuçlar vermiştir. Ancak hücum açılı ince bir levha etrafındaki akış ile asimetrik bir foil etrafındaki akışın temsili için bu yöntem yetersiz kalmıştır. Bu analizler sabit şiddetli kaynak – dipol yöntemiyle yapılmalıdır.

Akış içerisinde birden fazla cisim olduğu durumlarda sınır elemanları yöntemleri iki farklı şekilde uygulanabilir. Birinci yol en iyi bilinen yol olan doğrudan bulma yöntemidir. İkinci yol ise iteratif yaklaşımı kullanmaktır. Doğrudan bulma yöntemi, daha zahmetsiz ve kullanışlı olmasına karşın, yüksek panel sayılarında zaman tüketimi konusunda problem yaratabilir. İteratif yöntem, zaman tüketimi konusunda daha başarılıdır. Ayrıca iteratif yöntem bazı başka problemlerin çözümü için de kapılar açmaktadır. Örneğin, serbest su yüzeyinin dahil olduğu durumlarda iteratif

yöntem kullanılmalıdır. Prof. Dr. Şakir BAL'ın bu konuda çeşitli makaleleri mevcuttur. İteratif yöntem hakkında detaylı bilgi için bu makaleler incelenebilir.

Cisimler etrafındaki akışın çözümünde iki boyutlu yaklaşım ancak cismin açıklığının büyük olması durumunda kullanılmalıdır. Kısa cisimlerin kenarlarından akım sapması olacağından bu sapmaları iki boyutlu analizlerde temsil etmek mümkün olmayacaktır. Bu sapmalar ancak üç boyutlu analizlerde temsil edilebilir. Cisim açıklığının büyük olduğu durumlarda da cismin kenarlarından sapmalar olacaktır; ancak cismin çok büyük bir bölgesinde akış iki boyutlu gibi davranacak ve uç bölgeler dışında akım yüzeyi takip ederek iki boyutlu yaklaşımla paralel sonuçlar verecektir. Bu gibi durumlarda, eğer özel olarak cismin uç bölgelerindeki akım incelenmiyorsa, iki boyutlu yaklaşımın kullanılması yerinde olacaktır.

Örneğin aynı yarıçapa sahip bir küreyle bir silindir etrafındaki akım iki boyutlu incelenmek istenirse, hem küre hem de silindir aynı iki boyutlu kesitleri vereceklerdir. İki kesit de aynı geometriye sahip olduğundan, bu kesitler üzerinde yapılacak iki boyutlu analiz iki cisim için de aynı sonucu verecektir. Ancak bu iki cisim üç boyutlu analize tabi tutulup üzerinden bir kesit alınarak karşılaştırma yapıldığında iki boyutlu analizle üç boyutlu analizin farkı ortaya çıkacaktır. Şekil 3.56'da bir küre ile bir silindir üzerindeki boyutsuz basınç katsayısı dağılımının karşılaştırılması yapılmıştır. Bu şekilde de anlaşılacağı üzere küre, silindire nazaran daha kısa olduğundan dolayı, akımı üzerinde tutamamış ve dolayısıyla boyutsuz basınç katsayısı silindirinkinden farklı bir şekilde oluşmuştur.

#### 4. GEMİ – DÜMEN ETKİLEŞİMİ

Bir geminin sevk verimini artırmanın en önemli yöntemlerinden birisi gemi kış tarafındaki akımı düzenlemektir. Bu bölgeye yapılacak belirli müdahaleler gemi direncini önemli ölçüde düşürmekte faydalı olabilir. Ancak bu müdahalelere girişmeden önce bu bölgedeki akımın ve – özellikle kış bölgesinde çokça bulunan – takıntıların (dümen, pervane, skeg vs.) akıma etkilerinin iyi bilinmesi gerekir.

Dümen, geminin sağlıklı manevra yapabilmesi için hayati bir önem taşır. Manevra kabiliyetini artırmasının yanında; dümenlerin, kış taraftaki akımı düzenlemesi bakımından da bir rolü bulunmaktadır. Son dönemlerde podlu pervanelerin kullanım sayısının artmasına karşın, halen çoğu gemi dümenli olarak üretilmektedir [32]. Dümen, geminin kış tarafındaki akımı önemli ölçüde değiştirir. Dolayısıyla pervane üzerine gelecek akım, dümenli ve dümensiz hallerde farklı olabilecektir. Bu çalışmada, pervane iz yüzeyi üzerinde dümenin etkisi incelenecektir.

Kış taraftaki akım, gemi ve takıntıları arasındaki etkileşimden çokça etkilenir. Bu etkileşimin hakkındaki literatür oldukça geniştir. 1980’li yıllarda yaygınlaşmaya başlayan bilgisayar teknolojisi ile öncelikle basit formlu cisimlerin etrafındaki akışın çözülmesi için bilgisayar programları yazılmış; genellikle sınır tabaka teorisi kullanılarak gemilerin kış tarafındaki akımın çözülmesine çalışılmıştır. Hoekstra ve Raven, gemi kış tarafındaki akımın iyileştirilmesi için potansiyel ve sınır tabaka teorilerini eşleştirerek kullanmış ve gemi kışındaki etkileşimlerle baş edebilmenin en pratik yolunun bu olduğunu savunmuştur [22]. Markatos ve Willis, takıntılı bir cisim için – o zamanlar henüz yeni yeni gelişmekte olan – sonlu farklar yöntemiyle  $k - \varepsilon$  türbülans modelini kullanarak çözüm aramışlardır [23]. Rood ve Anthony, pervanenin baş tarafına bir takıntı koyarak pervane üzerine gelen akımı deneysel bir yöntemle incelemişlerdir [33]. Takıntının pervane üzerindeki akımı ne ölçüde değiştirdiği örnek bir gemi üzerinde gözlemlenmeye çalışılmıştır.

Literatürdeki çoğu çalışma pervane ve gemi etkileşimi üzerinedir. Bu konu hakkında birçok deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Felli ve Felice, pervane izini LDV yöntemiyle deneysel olarak analiz etmişlerdir [34]. Böylece konu hakkında yapılacak

olan sayısal çalışmaların önünü açmaya çalışmışlardır. Gemi, dümen ve pervanenin hepsinin birden etkileşimini göz önüne alan makaleler de mevcuttur. Lungu ve Pacuraru, dümeni ve pervanesi bulunan bir konteyner gemisi etrafındaki akımı RANSE kullanan ticari bir yazılımla çözmüşlerdir [35]. Çalışmada pervanenin dönmesinin etkisi de hesaplara katılmış ve pervane iz yüzeyindeki hız ve basınç dağılımları elde edilmiştir. Muscari ve ekibinin yaptığı hem deneysel hem sayısal sonuçları içeren çalışmada tüm takıntıları yerinde olan bir gemi etrafındaki akış incelenmiştir [36]. Deneysel çalışma LDV, sayısal çalışma ise RANSE çözücü bir ticari programla yapılmıştır. Carlton ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada ise pervane, dümen ve geminin, dümen dizaynı üzerinden etkileşimi ele alınmıştır. Farklı dümen formlarının sevk verimine olan etkileri bu etkileşime dayanarak incelenmiştir [37].

Literatürde sadece pervane ve dümen etkileşimi üzerine yapılmış çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmaların en önemlilerinden birisi Szantyr'e aittir. Çalışmada pervane kaldırıcı yüzey, dümen ise sınır elemanları yöntemi kullanarak çözülmüş ve birbirlerine olan etkileri incelenmiştir [38]. Deney verisi olan durumlarda sayısal sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak yöntemin etkinliği test edilmiştir. Felli ve ekibinin yaptığı çalışmada, geminin kendisi olmadan pervane ve dümenin birbirleriyle olan etkileşimi deneysel olarak incelenmiştir [39]. Çalışmada pervane arkasında çalışan dümenin performansını etkileyen düzensiz akımın etkilerine vurgu yapılmıştır. Hanseong Lee ve arkadaşlarının 2003 yılında yaptığı çalışma pervane dümen etkileşimini göz önüne alarak dümende oluşabilecek kavitasyonu incelemiştir [40]. Konu üzerine yapılmış yüksek lisans tezleri de mevcuttur. Fahad Mohammed'in Dr. S. A. Kinnas danışmanlığında yaptığı çalışmada pervane uç girdabının dümene olan etkileri incelenmiştir [41]. Çalışmada kaldırıcı hat yöntemi ile HAD çözen ticari yazılım FLUENT beraber kullanılmıştır. Yine S. A. Kinnas'ın yürüttüğü çalışmada pervaneden gelen akıma maruz kalan dümen üzerindeki tabaka kavitasyonu incelenmiştir [42]. Çalışmada girdap ağ, sınır elemanları ve sonlu hacimler yöntemleri bir arada kullanılarak sonuca gidilmiştir.

#### **4.1 Örnek Geminin Tanıtılması**

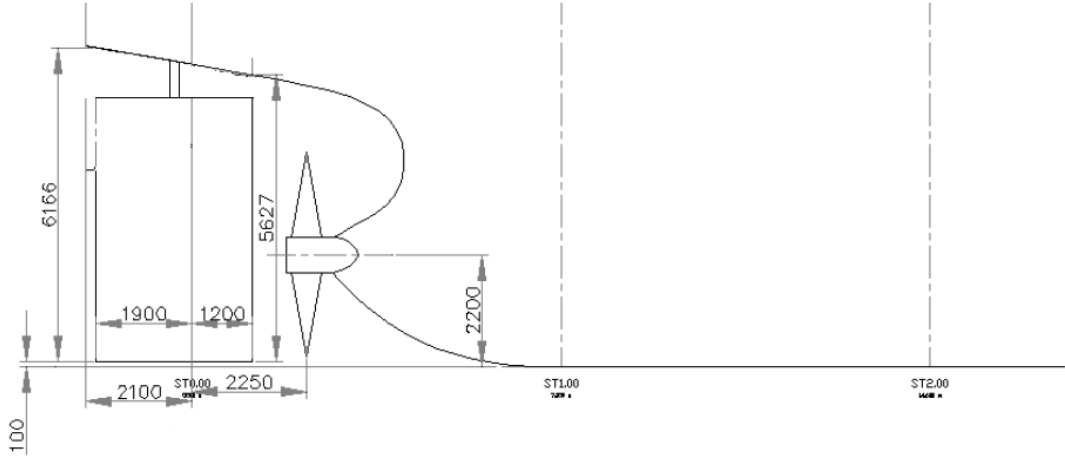
Çalışmada kullanılan gemi 1500DWT'luk bir kargo gemisidir. Eldeki deneysel verilerle uyum ve hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde önemli bir katsayı olan  $y^+$

değerlerini arzulanan aralıkta tutabilmek adına geminin kendisi yerine 1/20 ölçeğindeki modeli sayısal olarak çözülmüştür. Geminin ve modelinin bazı hidrostatik özellikleri çizelge 4.1’de verilmiştir.

**Çizelge 4.1 :** Geminin hidrostatik özellikleri.

		MODEL	SHIP
Su hattı boyu uzunluğu (m)	$L_{WL}$	7.420	148.4
Su hattı genişliği (m)	B	1.125	22.5
Draft (m)	T	0.375	7.5
Deplasman hacmi ( $m^3$ )	$\Delta$	2.582	20656
Yalın tekne ıslak alan ( $m^2$ )	$A_{WS}$	12.037	4814.8
Dümen ıslak alan ( $m^2$ )	$A_R$	0.099	39.6
Blok katsayısı	$C_B$	0.825	0.825

Kullanılan gemide dümen gemiye bir dümen şaftı vasıtasıyla bağlanmıştır. Geminin kış tarafının tüm takıntılarıyla birlikte görünümü ise şekil 4.1’den görülebilir.



**Şekil 4.1 :** Kullanılan geminin kış formunun görünümü.

## 4.2 Sayısal Uygulama

Daha önce de söylendiği gibi çalışmada RANSE denklemlerini kullanarak sonlu hacim yöntemi ile çözüm yapan ticari bir yazılım kullanılmıştır (FLUENT). Akışkan bölgesi önce ticari yazılımın sağladığı ağ örgüsü kurma programında modellenmiş (GAMBIT), daha sonra programın kendisi kullanılarak çözüme gidilmiştir.

Dümenin etkisinin anlaşılabilmesi için gemi etrafındaki akış iki şekilde çözülmüştür:

- Yalın gemi etrafındaki akış
- Dümen takılmış halde gemi etrafındaki akış

İki ayrı çözüm için iki ayrı akışkan bölgesi modellenmiştir. Yalın gemi etrafındaki akışın çözülebilmesi için yaklaşık olarak 780,000 eleman, dümenli haldeki durum içinse yaklaşık 820,000 eleman kullanılmıştır. Burada eleman sayılarının farklı olmasının sebebi, dümenin varlığı sebebiyle bu bölgedeki akımın daha detaylı incelenebilmesi için elemanların sık kullanılmasıdır. Dolayısıyla dümenli durumda yaklaşık 40,000 fazla eleman kullanılmıştır.

Elemanlar üçgen piramit şeklinde kullanılmıştır. Üçgen piramit ile ağ örmek diğer ağ örme yöntemlerine nispeten daha kolay ve pratik olduğundan tercih edilmiştir. Elemanların kalitesinin iki durumda da analiz yapabilmek için yeterli durumda olduğu tespit edilmeden analizlere başlanmamıştır.

Pratik çözüm elde edebilmek açısından serbest su yüzeyi çalışmaya dahil edilmemiştir. Dolayısıyla çözümler sonsuz su derinliğinde “double body” olarak yapılmış; serbest su yüzeyinin olası etkileri çalışmada ihmal edilmiştir. Geminin sadece su altı formu paket programın sağlamış olduğu ağ örgüsü kurma programında modellenmiş ve normalde serbest su yüzeyinin bulunduğu alan simetri eksenini olarak alınmıştır.

Benzer bir şekilde pervanenin dönme etkisi de hesaplara katılmamıştır. Çalışmanın amacı, dümenin pervane iz yüzeyini ne ölçüde değiştirdiğini anlamak olduğundan iki durum da aynı şartlarda pervanesiz çözdürülmüştür. Dolayısıyla şaft ve pervane göbeğinin etkisi de ihmal edilmiştir. Bu etkinin daha sonra hesaplara dahil edilmesi düşünülmektedir.

Türbülans modeli olarak standart  $k - \epsilon$  modeli “standard wall function” ile kullanılmıştır.  $k - \epsilon$  türbülans modeli hakkında daha detaylı bilgi için kaynak [28]’e bakılabilir. Basınç hız eşleştirmesi için (velocity-pressure coupling) önce SIMPLE algoritması denenmiş ancak yakınsamada bazı problemler olduğundan SIMPLEC kullanılmış ve başarılı olduğu görülmüştür. SIMPLEC’in, SIMPLE’a oranla çok daha hızlı yakınsadığı tespit edilmiştir. Sonlu hacim yöntemi en küçük kareler yöntemi kullanılarak çözülmüş ve basınç, momentum, türbülans kinetik enerjisi (turbulent kinetic energy) ve türbülans yayılım oranı (turbulent dissipation rate) için “second order upwind” yöntemi kullanılmıştır.

### 4.3 Bulgular

Model takıntılı ve takıntısız halde, gemi hızı 11.5knot'a tekabül edilecek şekilde çözdürülmüştür. Gemi model uyumunu sağlamak için Froude benzerliğinden faydalanılmış ve model hızı 1.4953m/s olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar dört ayrı durum için gözlenmiştir:

Gözlem 1: Dümenin yarattığı ekstra direnç

Gözlem 2: Dümenli ve dümensiz durumda kıç taraftaki akım hatları

Gözlem 3: Dümenli ve dümensiz durumda izdeki değişimler

Gözlem 4: Dümenin gemi basınç dağılımı üzerindeki etkileri

#### Gözlem 1:

Daha önceden de belirtildiği gibi, dümen (diğer her takıntı gibi) gemi direncine ekstra bir katkı yapar. Ancak açık su testinden elde edilen dümen direnci ile takıntısız haldeki gemi direncini toplayarak toplam direnci hesaplamak yalnızca bir yaklaşım olabilir. Akışkan içinde bulunan her cisim birbirleriyle etkileşime girecektir [43]. Dolayısıyla, pervanesiz ve diğer başka herhangi bir takıntının olmadığı durumda, gemi toplam direncini şu şekilde ifade etmek daha doğru olacaktır:

$$R_{toplam} = R_{takıntısız\ gemi} + R_{dümen} + R_{gemi-dümen\ etkileşimi}$$

$R_{gemi-dümen\ etkileşimi}$ 'nin nasıl elde edildiği anlatılacaktır. Ancak önce tablo 2 incelenerek etkileşim direnciyle ilgili bir fikir elde edilmesi mümkündür.

**Çizelge 4.2 :** Takıntılı ve takıntısız durumdaki dirençlerin karşılaştırılması

	R <sub>yalın tekne</sub> (N)	R <sub>dümen</sub> (N)
Dümenli	41.0907	0.9525
Dümensiz	40.3736	-

Çizelge 4.2'den hareketle, dümenli ve dümensiz durumlar için;

$$R_{toplam} = R_{takıntısız\ gemi} \quad (dümensiz\ durum\ için)$$

$$R_{toplam} = R_{takıntılı\ gemi} + R_{dümen} \quad (dümenli\ durum\ için)$$

Çizelge 4.2'den de anlaşılacağı üzere, dümenli durumda toplam direnç yalnızca dümen sebebiyle artmamış; aynı zamanda geminin direncini de etkilemiştir. Bu sebeple dümenli ve dümensiz durum için gemi direnci arasında bir ayırım yapılması gerekir. Bu farka etkileşim direnci adı verilirse, bu direnç şu şekilde ifade edilir:

$$R_{gemi-dümen\ etkileşimi} = R_{takıntılı\ gemi} - R_{takıntısız\ gemi}$$

Dolayısıyla denebilir ki, dümenin yarattığı ekstra direnç yalnızca dümenin kendi direnci değildir; aynı zamanda gemiyle yaptığı etkileşimin payı da bu ekstra direncin içinde yer alır. İncelenen durumda etkileşim direnci 0.7171N olarak bulunmuştur. Bu değer gemi direnciyle karşılaştırıldığında pek büyük görünmemesine rağmen; dümen direncinin 0.9525N olduğu göz önüne alınırsa, etkileşim direncinin dümenin kendi direncinin neredeyse %75'ine tekabül ettiği anlaşılacaktır.

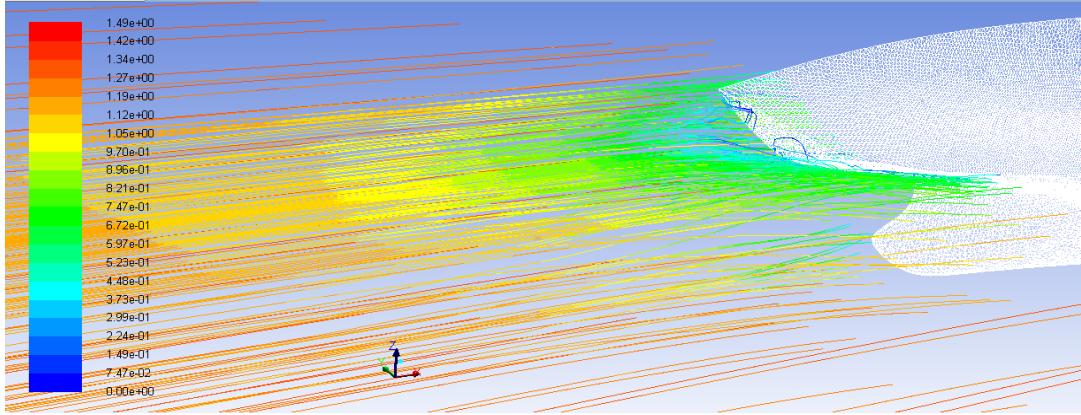
Dümenin varlığının yarattığı bütün ekstra direnç hesaplandığında 1.6696N kadar toplam dirence bir katkı yaptığı hesaplanır. Bu da toplam dirence yaklaşık %4'lük bir katkı demektir.

#### Gözlem 2:

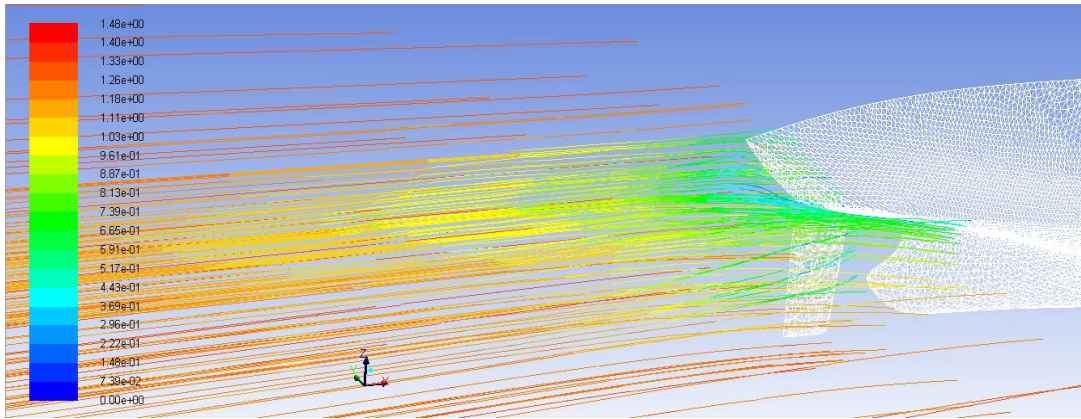
Dümenin varlığı toplam dirence ekstra bir katkı yapmaktadır. Yarattığı ekstra direnç pek istenmeyen bir hadise olsa da; bu durum, dümenin gemi manevra ve hareketindeki vazgeçilmez rolünün yanında önemsiz kalmaktadır. Buna karşın dümenin bazı başka faydaları da bulunmaktadır. İyi dizayn edilmiş bir dümen, gemi kış tarafındaki akımı düzenleyerek sevk verimine olumlu katkıda bulunur.

Ayna kışlı bir geminin kış tarafı suya girdiği zaman, arka tarafta (ayna kışın ne kadarının suya battığına da bağlı olarak) büyük girdaplar meydana gelir. Bu girdap geminin ayna kışına yapışık ve bir ayırıcı cereyan yüzeyi ile dış akımdan ayrılır. Bu yüzey, girdabı hapseden ve gemiye yapıştıran yüzeydir. Arkada oluşan girdap böylece gemiye bağlanır ve hareket halinde olan gemiyle birlikte bu akışkan kütle de hareket eder. Dolayısıyla sevk sistemi artık yalnızca gemiyi değil, gemiyle birlikte bu su kütlelerini de beraberinde götürmek durumunda kalır. Bu durum, arzulanan bir durum değildir çünkü ekstra bir direnç yaratır. Bu durumun oluşmasını engelleyebilmek için kış taraftaki akımın düzenlenmesi gerekir. Dümen iyi dizayn edildiği takdirde bu görevi görebilir. Dümenin kış taraftaki akımı nasıl düzenlediği şekil 4.2 ve 4.3'ten görülebilir. Şekil 4.2'deki dümensiz durumda akımın bir kısmının

ayna kıça doğru geri döndüğü ancak şekil 4.3'teki dümenli durumda ise akım hatlarının daha düzenli olduğu fark edilecektir.



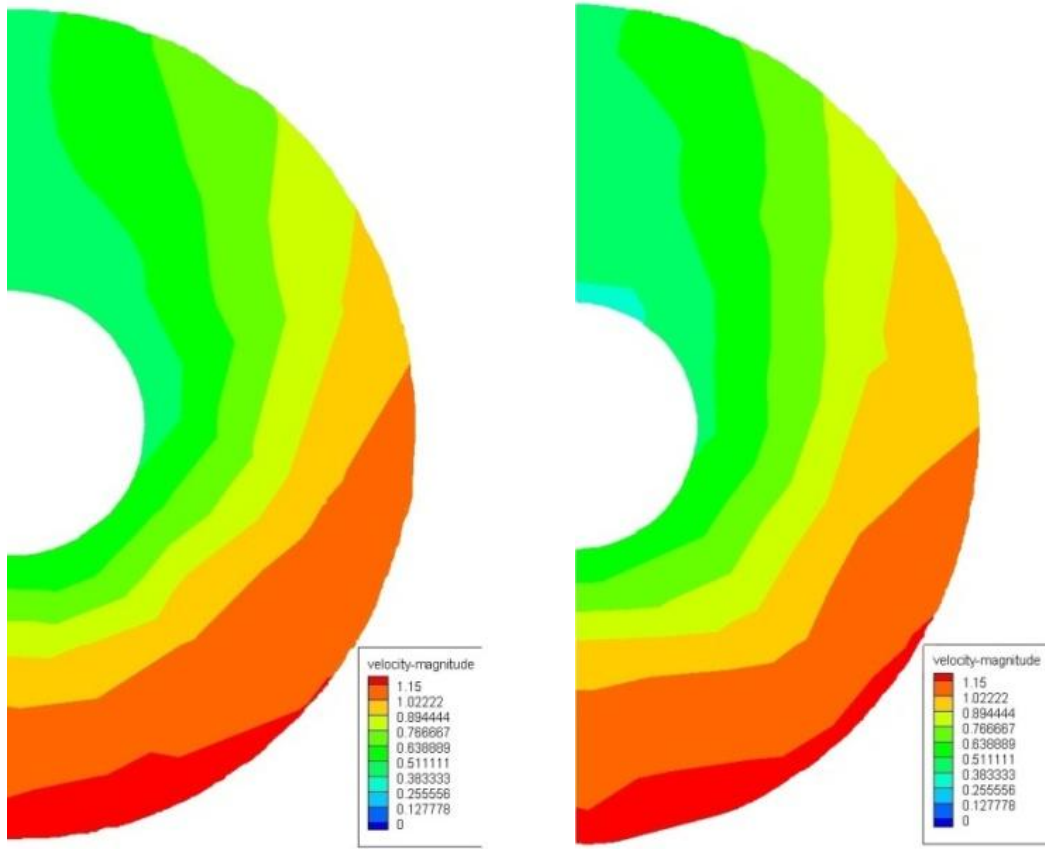
Şekil 4.2 : Dümensiz durumda gemi kıç tarafındaki akım hatlarının görünümü.



Şekil 4.3 : Dümenli durumda gemi kıç tarafındaki akım hatlarının görünümü.

### Gözlem 3:

Model havuzunda deneyler genellikle dümensiz olarak yapılırlar ve pervane dizaynına bu deneyden çıkan iz dağılımı ile başlanır. Ancak dümen izi önemli ölçüde değiştiren bir faktördür. Dümenin yerinde olmadığı bir durumda pervanenin ve dolayısıyla sevk sisteminin en verimli halde olduğu söylenemez. Sevk verimi daha yüksek bir gemi için model deneyleri yapılırken dümen de gerçek yerinde bulunmalıdır. Şekil 4.4a ve 4.4b pervane iz yüzeyini, dümenli ve dümensiz hallerde karşılaştırmaktadır. Akımda simetriyi bozan herhangi bir durum bulunmadığından iz yüzeyinin yarısının verilmesi yeterli görülmüştür.

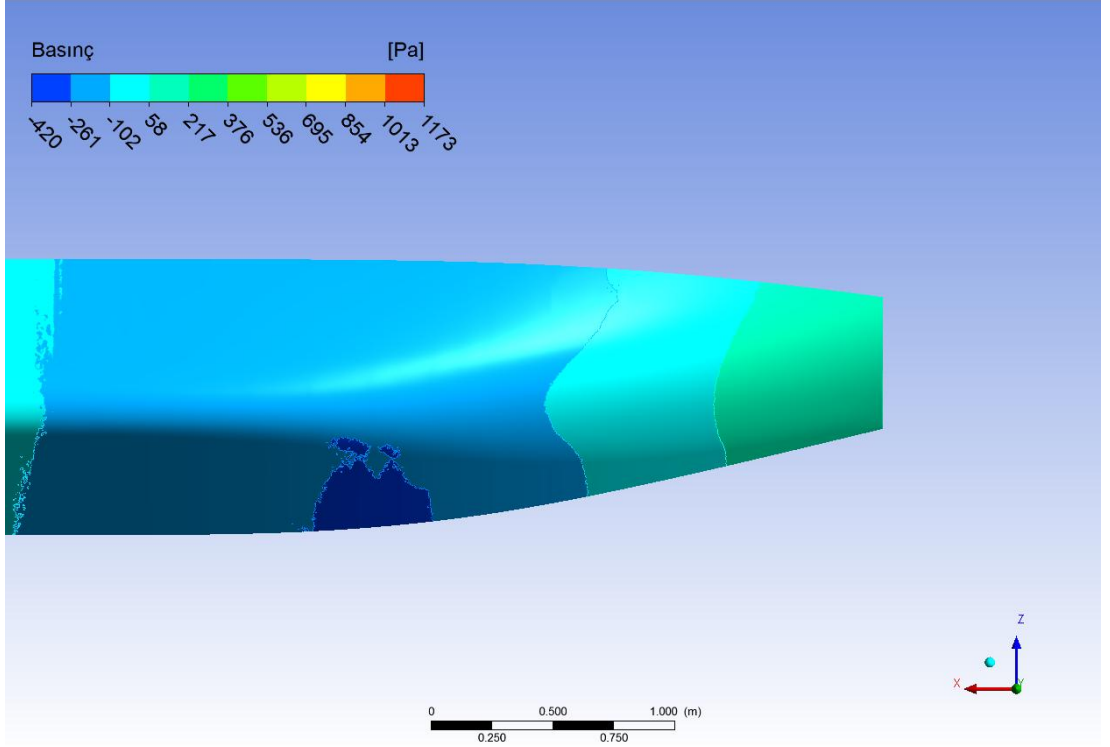


**Şekil 4.4 :** Sırasıyla dümensiz (a) ve dümenli (b) durumda pervane iz yüzeyleri.

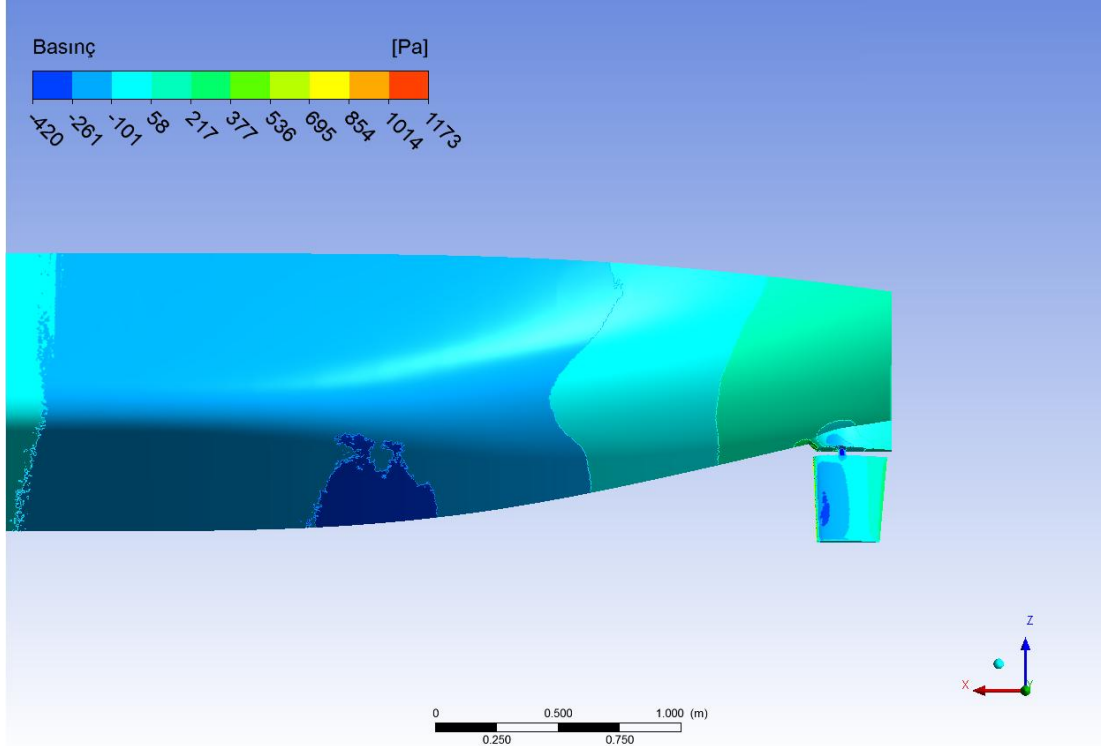
Şekil 4.4a ve 4.4b'den, dümenin pervane iz yüzeyi üzerindeki etkisi anlaşılmaktadır. Gemi düz rota tuttuğunda dümenin giriş ucunda bir durma hattı meydana gelir. Bu durma hattı üzerinde akış hızı sıfır olur ve yakınlarında ise sıfıra yakın değerler alır. Pervane iz yüzeyi de dümene çok yakın bir bölge olduğundan, durma hattı etrafında pervane iz yüzeyi üzerinde hızların düşmesi beklenir. Bu durum şekil 4.4b'de pervane göbek kısmı civarında gözlenebilmektedir. İz yüzeyi üzerindeki maksimum hız da dümenli durumda düşmüştür. Ayrıca şekil 4.4'te verilen durumda dümen açısının  $0^\circ$  olduğu unutulmamalıdır. Daha yüksek hücum açılarında dümenin pervane iz yüzeyi üzerindeki etkisi daha vurucu olarak gözlenebilir.

#### Gözlem 4:

Gemi ile dümenin akış içerisinde birbirleriyle etkileşimleri sonucu, gemi gövdesi üzerindeki basınç dağılımları dümensiz durumla karşılaştırıldığında değişecektir. Gemi üzerinde yapılacak hesaplar için (gerçek durum dümenli olduğundan dolayı) dümenli çalışmak hesaplardaki hata paylarını azaltmak ve doğru değerlere bir adım daha yakın olmak anlamına gelecektir. Dümenin, gemi gövdesi üzerindeki basınç dağılımını nasıl değiştirdiği şekil 4.5 ve 4.6'dan incelenebilir.



Şekil 4.5 : Dümensiz durumda gemi üzerindeki toplam basınç dağılımı.



Şekil 4.6 : Dümenli durumda gemi üzerindeki toplam basınç dağılımı.

Şekil 4.5 ve 4.6'da verilen toplam basınç, serbest su yüzeyinin etkileri hesaba katılmadığından, sonsuz derinlik için verilmiştir. Bu yüzden hidrostatik basınç toplam basınç içine dahil edilmemiştir.

Dümen, geminin bütünü düşünülduğünde basınç dağılımını büyük bir ölçüde değiştirmemesine karşın, kendi mevcut bulunduğu bölgede bazı farklılıklar yaratmaktadır. Ancak geminin sevk sisteminin kıç bölgesindeki ufak farklılıklardan dahi etkileneceği göz önünde bulundurulduğunda dümenin varlığı hesapları değişmesine yol açacaktır.

#### **4.4 Sonuç**

Bir geminin suyla temas eden bütün parçaları akış içerisinde birbirleriyle etkileşim yaratır. Bu çalışmada, örnek bir gemi üzerinde, dümenin pervaneye gelen akımı nasıl etkilediği incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, uygun pervane tasarımı yapmak veya ana makine gücü hesabı için geminin dümenli halde incelenmesinin faydalı olacağı anlaşılmaktadır. Zira takıntıların genel olarak bütününün akış içerisinde ele alınması daha kusursuz sonuçlar elde edilmesinde yardımcı olacaktır.

Eldeki veriler – nominal iz dağılımı – literatürde örnekleri çokça bulunan kaldırıcı yüzey programlarından birine girilerek gemiye uygun bir pervane seçimi yapılabilir. Ancak gemi için en uygun pervane bulunmak isteniyorsa nominal iz dağılımı yerine efektif iz dağılımı kullanılmalıdır. Efektif iz dağılımı ise ancak pervanenin de gerçek konumunda bulunduğu durumda elde edilebilir.

Gerçek duruma yaklaşmak adına bir adım daha atılması ve pervanenin dönme etkisinin de hesaplara dahil edildiği çalışmalar yapılması gerekmektedir. Bunun için gemi, dümen ve pervane komple modellenerek ağ örgüsü ona göre kurulmalı ve pervane dönme hareketi yapan bir “hareketli duvar” olarak tanımlanarak tüm gemi etrafındaki akış modellenmeye çalışılmalıdır.

## 5. GEMİ – PERVANE ETKİLEŞİMİ

Son 30 yılda müthiş bir hızla ilerleyen bilgisayar teknolojisi sayesinde, gemi direnci ve sevki problemlerinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) çözümlerinin yeri oldukça artmıştır. Geniş bir literatür taraması yapan iyi bir gözlemci, son senelerde yapılmış uluslar arası makale ve bildirimleri incelediğinde HAD ile yapılan çalışmalarının çokluğunu fark edecektir. Gelişmiş bilgisayarlar ile HAD kullanılarak geçmişte oldukça karmaşık görünen birçok problem bugün artık aşılabilir bir seviyeye gelmiştir. Dolayısıyla gerek bilim insanları, gerek piyasada çalışan mühendisler artık daha karmaşık problemlerin çözümlerine odaklanmışlardır. Deneysel yöntem, dün olduğu gibi bugün de bu karmaşık problemlerin çözümünde etkili bir yol sunmaktadır; ancak laboratuvar kurmanın ve kurulacak laboratuvarlarda gerekli deneyi yapmanın maliyetli olması bu tip işlerle uğraşan çevreleri sayısal yöntemler kullanmaya itmiştir. Ayrıca deneyler vasıtasıyla, bütün görülmek istenene tamamen erişim sağlanamamakta, akışın ancak belirli kısımlarını incelemek mümkün olabilmekteken; HAD ile çözümü yapılmış bir akışın arzulanan bütün özelliklerinin görülmesi mümkün olmaktadır [44].

Daha önce de kullanılmasına rağmen, bilgisayarlar özellikle 1980'ler sonrasında önemli gelişmeler kaydetmişlerdir. Dolayısıyla, 1980'ler öncesinde analizler genellikle viskozite ve türbülansın etkileri için içine dahil edilmeden potansiyel yöntemlerle yapılmaktaydı. Akışkan içerisinde tek bir cisim için çözüm alınabilmekteydi ve yalnızca gemi, dümen veya pervane etrafındaki akım için çözümler aranmaktaydı. Ancak bilgisayarlar daha karmaşık problemler için sonuç alınabilmesine yol açmış ve dolayısıyla dikkatler yalnızca bir geometri için değil, birkaç geometri için çözüm alınabilmesine kaymıştır. Böylece artık analizler sadece gemi için değil gemi ve takıntılarının beraber çözümü için yapılmaya başlamıştır. Bilgisayarların etkili olarak kullanılmaya başlanmasıyla ilk ilgi çeken konu ise gemi pervane etkileşimi olmuştur. Örneğin, gemiciler için önemli bir konferans olarak kabul edilen Symposium on Naval Hydrodynamics'in tarihi incelendiğinde, pervane gemi etkileşimi ilk olarak 1984 yılında sempozyumun 15.'si düzenlendiğinde ciddi olarak ele alınmıştır. Bu sempozyumda gemi pervane etkileşimi üzerine oturumlar

düzenlenmiş ve bu oturumlarda çeşitli bildiriler sunulmuştur. Daha önce 1980’de yapılan sempozyumda ise bu konu üzerine bir adet bile bildiri yapılmamıştır. 1984’teki 15. sempozyumda iki oturumda toplam sekiz adet bildiri sunulmuş ve bunların birçoğunu sayısal çözümlerin önünü açmak için yapılan deneysel çalışmalar teşkil etmiştir. Bu çalışmalardan bir tanesi Zhou ve Yuan’a aittir [45]. Çalışmalarında iki denklemlilik  $k - \varepsilon$  türbülans modeli kullanılarak gemi kıç tarafındaki viskoz akım çözülmüştür. Pervane modellemesi ise kaldırıcı hat yöntemi vasıtasıyla yapılmıştır. Uyguladıkları yöntemle itme azalması ve efektif izi yakın olarak hesaplamışlardır.

Konu hakkında yapılan deneysel çalışmalar sayısal çalışmalardan fazladır. Bunun sebebi pervane gibi dönen bir cismin varlığının hesapları ve akışı karmaşıklaştırmasıdır. Fakat bunun yanında ticari ve profesyonel bazı HAD kodlarının yaygınlaşması bilim adamlarının bu konuda birçok çalışma yapmasına ve konu hakkında daha detaylı öngörülere sahip olmasını sağlamıştır. Bu doktora çalışması sayısal olarak yapıldığından dolayı literatürdeki araştırmalar da daha çok sayısal çalışmalar üzerine yapılmıştır. Shen ve ekibinin yaptığı çalışmada pervanesi takılı bir geminin hidrodinamik performansı incelenmiştir. HAD vasıtasıyla RANSE denklemleri çözülerek sonuca gidilmiş ve sayısal olarak elde edilen sonuçlar literatürde var olan deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak gerçekleştirilmiştir [46]. Yine bir geminin hidrodinamik performansı Tocu ve Lungu tarafından incelenmiş ve çalışmalarında serbest su yüzeyinin etkileri de hesaplara dahil edilmiştir [47]. Stück ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise gemi – pervane etkileşimi nezdinde bir geminin izi optimize edilmiş ve gemi formu bu etkilere göre yeniden dizayn edilmiştir [48]. Lee ve Chen gemi – pervane etkileşimini kavitasyon açısından incelemişler ve pervane üzerinde oluşan kavitasyonu bu etkileşimin ne ölçüde tetiklediğini araştırmışlardır [49]. Szelangiewicz ve Abramowski, gemi direnci ve sevki doğrultusunda tekne formu modifikasyonu üzerine çalışmışlardır [50, 51, 52]. Çalışmalarının bir kısmında pervane hidrodinamik karakteristiği üzerinde tekne formunun etkisini incelemişlerdir.

Bilim adamları HAD ile RANSE denklemlerini çözerek yalnızca gemi – pervane etkileşimi üzerine değil, gemi – pervane – dümen etkileşimi üzerine de çalışmışlardır. Bir konteyner gemisi ve takıntıları etrafındaki akış sonlu hacimler yöntemiyle RANSE denklemleri kullanılarak Lungu ve Pacuraru tarafından çözülmüştür [35]. Pervanenin dönme etkileri hesaba dahil edilmiş ve efektif iz hesabı

yapılmıştır. Muscari ve ekibinin yaptığı çalışmada gemi ve takıntıları etrafındaki akış sayısal ve deneysel olarak çözülmüştür [36]. Deneysel çalışmalar LDV kullanılarak yürütülmüş, sayısal çalışmalarda ise RANSE çözen ticari bir HAD programı kullanılmıştır.

Gemi ve takıntıları etrafındaki akışın anlaşılması için yapılan ve literatürde yayınlanmış birçok makale bulunmaktadır. Felli ve Felice'nin çalışmasında pervane izi deneysel olarak LDV ile incelenmiştir [34]. Deneysel çalışma ileride yapılacak olan sayısal çalışmaların önünü açmak için yapılmıştır. Yine Felli ve ekibinin yaptığı başka bir çalışmada ise gemi olmadan pervane – dümen ilişkisi incelenmiştir [39]. Çalışma, pervane arkasında çalışan dümene gelen çürük suyun sevk performansını düşürdüğü hipotezine dayanmaktadır. Carlton ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada gemi ile takıntıları arasındaki akış etkileşimi; HAD, model deneyleri ve seyir tecrübelerine dayanarak incelenmiştir [37]. Bu etkileşim daha ileri boyutlarda dümen dizayn edebilme adına araştırılmıştır. Çalışmada, farklı modeller için dümenin genel sevk verimine etkisi incelenmiştir.

### **5.1 Kullanılan Gemi ve Pervanenin Hidrostatik Özellikleri**

Doktora tez çalışmasının bu bölümünde; sayısal çalışmalara ışık tutması için formu ve deney sonuçları internette dağıtılan ve bir post-panamax konteyner gemisi olan DTC (Duisburg Test Case) adlı gemi kullanılmıştır [53]. Kullanılan gemi ve pervanenin geometrilerine Duisburg – Essen Üniversitesi'nin internet sitesinden ulaşılabilir. Aynı sayfada; deneysel sonuçların yayınlandığı Ship Technology Research dergisinde yayınlanan makale de bulunabilir.

Geminin ve modelin ana boyutları çizelge 5.1'de verilmiştir. Model 1 / 59.407 ölçeğindedir. Pervane ile ilgili detaylar ise çizelge 5.2'de verilmiştir. Yine pervane için de model ölçeği 1 / 59.407'dir.

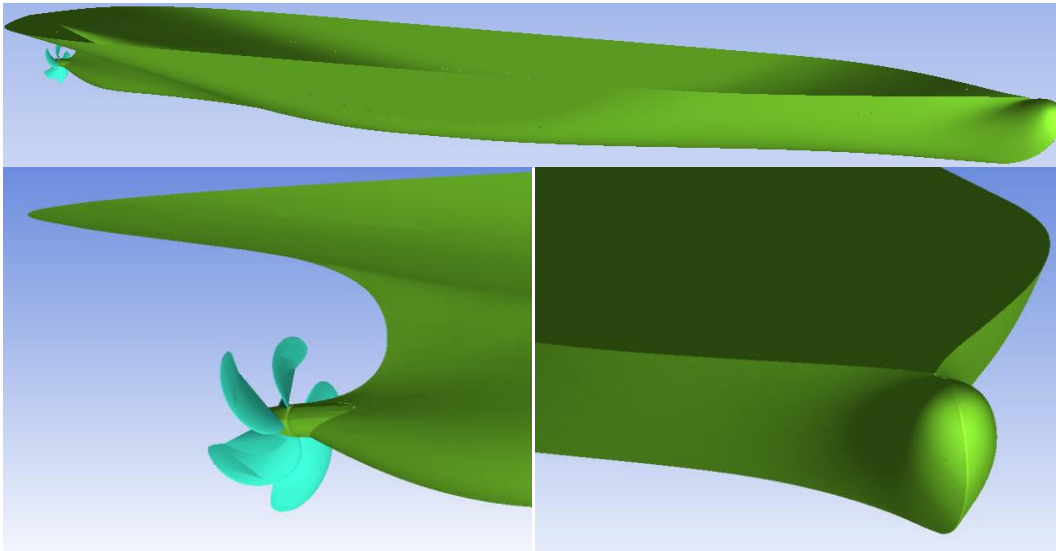
DTC gemisinin sualtı formu şekil 5.1a'da verilmektedir. Kıç ve baş formlarının yakınlştırılmış görünümü ise sırasıyla şekil 5.1b ve şekil 5.1c'de verilmiştir. Şekillerde serbest su yüzeyinin üstündeki kısmı görünmemektedir. Gemi ve pervane ile ilgili daha detaylı bilgiler için [53] no.'lu kaynak incelenebilir. Aynı makalede geminin model ölçeğinde yapılan deney sonuçları da verilmiştir.

Çizelge 5.1 : DTC gemisinin ana boyutları.

	(birim)	Model ölçeği	Tam ölçek
$L_{pp}$	(m)	5.976	355
$B_{wl}$	(m)	0.859	51
$T_m$	(m)	0.244	14.5
$V$	(m <sup>3</sup> )	0.827	173467
$C_B$	-	0.661	0.661
$S_w$	(m <sup>2</sup> )	6.243	22032

Çizelge 5.2 : DTC pervanesinin detayları.

	(birim)	Model ölçeği	Tam ölçek
$D_P$	(m)	0.15	8.911
$P_{0.7} / D_P$	-	0.959	0.959
$A_e / A_0$	-	0.8	0.8
$c_{0.7}$	(mm)	0.054	3.208
$\theta_{eff}$	(°)	31.97	31.97
$d_h / D_P$	-	0.176	0.176



a) DTC tekne formunun perspektif görünümü. b) Pervane ile birlikte teknenin kış formu. c) Balb ile birlikte teknenin baş formu.

Şekil 5.1 : DTC teknesinin genel bir görünümü.

## 5.2 Yöntem

Bu bölümde gemi – pervane ilişkisi ticari bir RANSE (Reynolds Averaged Navier Stokes Equation) çözücü programla incelenmiştir. Kullanılan yöntem ile ilgili detaylı bilgiye “Yöntemler” bölümünden erişilebilir. Bu bölümde daha kısa bir halde yöntem anlatılmaya çalışılmıştır. Bilindiği gibi akışkan momentum denklemi Navier – Stokes adını alır ve şu şekilde ifade edilir:

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = F_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 u_i \quad (5.1)$$

Ancak gemiler yüksek Reynolds sayılarında çalıştıklarından, etraflarındaki akım önemli derecede türbülanslıdır. Türbülanslı akışların karmaşık yapısından kaynaklanan ve önceden tam olarak kestirilemeyen etkilerinden dolayı parametrelerin zaman içerisinde ortalama değerleri alınarak sonuca gitmek bir yöntem olarak kullanılabilir. Bu yaklaşım (RANSE) Navier – Stokes ile süreklilik denklemlerinin zaman içerisinde ortalamalarının alınması ile tansör notasyonunda şu denklemi doğurur:

$$\rho \frac{D\bar{u}_i}{Dt} = F_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 \bar{u}_i - \rho \left( \frac{\partial \bar{u}'_i \bar{u}'_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.2)$$

Burada  $\bar{u}_i, \bar{p}$  ve  $\bar{u}_i \bar{u}_j$  parametrelerin, zaman içindeki ortalama değerlerini ifade etmektedir. Kısaca bahsetmek gerekirse;  $u, v, w$  gibi değerler bir noktadaki akımın hızıyken,  $u', v', w'$  aynı noktadaki akım hızındaki salınımlardır. Akım hızının, zaman içindeki salınımlarla parametrelerin ortalaması arasındaki ilişki şöyle ifade edilmektedir [28].

$$u = \bar{u} + u' \quad v = \bar{v} + v' \quad w = \bar{w} + w' \quad (5.3)$$

RANSE denklemindeki son terim Reynolds gerilmeleri bileşenidir ve yöntemin yaklaşımından ileri gelen zaman içerisindeki salınımları ifade eder. Benzer şekilde süreklilik denklemi ise şu şekilde ifade edilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \rho \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \rho \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (5.4)$$

Bu çalışmada akış daimi ve sıkıştırılamaz olarak kabul alınmış ve serbest su yüzeyinin etkileri ihmal edilmiştir. Sıkıştırılamaz akım nedeniyle enerjinin korunumu denklemi otomatik olarak düşer ve geriye sadece kütle korunumu (süreklilik) ve

momentumun korunumu (Navier – Stokes) denklemi kalır. Gerekli sadeleştirmeler yapıldığında denklemler şu hali alacaklardır:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (5.5a)$$

$$\rho(\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} - \rho(\frac{\partial \bar{u}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial z}) \quad (5.5b)$$

$$\rho(\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} - \rho(\frac{\partial \bar{v}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}'w'}{\partial z}) \quad (5.5c)$$

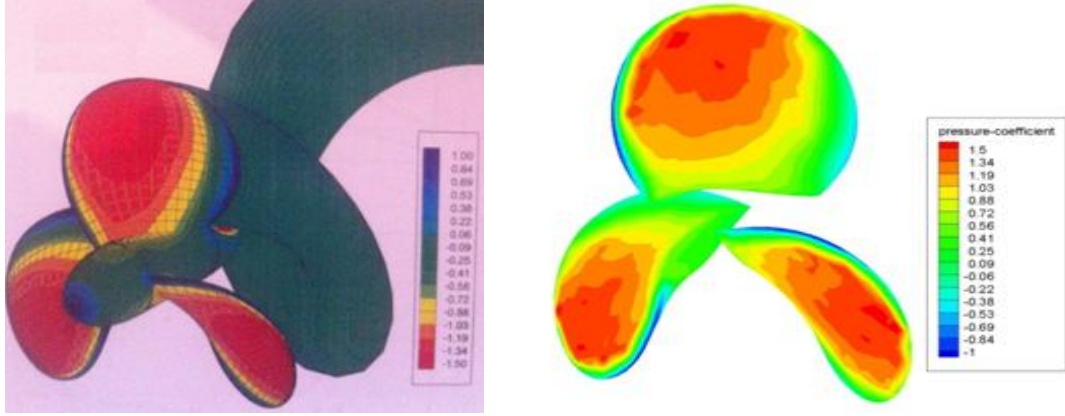
$$\rho(\bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} - \rho(\frac{\partial \bar{w}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}'w'}{\partial z}) \quad (5.5d)$$

Burada bilinmeyen parametreler,  $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{p}, u', v', w'$  olarak 7 tanedir. Kütle ve momentum korunumundan gelen 4 adet denkleme türbülans modelleri ve sınır şartlarının sağladığı denklemler eklendiği zaman problem matematiksel olarak çözülebilir bir hal almış olur. Kullanılan türbülans modeli hakkında bir sonraki bölümde bilgi verilmiştir.

### 5.3 Açık Su Testi Yapılan Pervanenin HAD Sonuçları ile Karşılaştırılması

Gemi – pervane ilişkisine geçmeden önce akış içerisinde tek başına çalışan bir pervanenin sonuçları HAD ile karşılaştırılarak hem yöntemin etkinliği test edilmeye çalışılmış, hem de etkileşim için bir ışık tutması amaçlanmıştır. Bunun için literatürde üzerine birçok çalışma yapılmış olan DTMB4119 pervanesi ticari bir HAD programı kullanılarak çözülmüş ve elde edilen sonuçlar hem başka yöntemlerle hem de deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

HAD programında yapılan seçimlere burada değinilmeyecek, daha ileriki kısımlarda bahsedilecektir. Ancak DTMB4119 için yapılan çözümlerde seçilen bütün faktörler DTC pervanesi için de kullanılmıştır. DTMB4119 pervanesi için bulunan basınç katsayısı dağılımı Brandner'in çözümleriyle karşılaştırılmıştır [54]. Bu karşılaştırmaya şekil 5.2'den ulaşılabilir. Şekil 5.2a'daki renk seçimlerine uygun olunması açısından şekil 5.2b'de eksi basınç katsayısı dağılımı verilmiştir.



a) Brandner [54] tarafından yayınlanan DTMB4119 basınç katsayısı dağılımı. b) Bu çalışmada bulunan DTMB4119 basınç katsayısı dağılımı.

**Şekil 5.2 :** DTMB4119 için sonuçların karşılaştırılması.

DTMB4119 için ticari HAD programı vasıtasıyla elde edilen sonuçlar literatürde daha önce yapılmış potansiyel çözümlerle karşılaştırıldığında daha iyidir. HAD sonuçları, deney sonuçlarına potansiyel yöntemlerin verdiği sonuçlardan daha yakındır. DTMB4119 için üç farklı yolla elde edilen sayısal değerler çizelge 5.3'te verilmiştir. Kaldırıcı yüzey ve deney sonuçları Bal'ın çalışmasından alınmıştır [55]. Bu çalışmada; yapılan deney sonuçlarının en doğru sonuçları verdiği kabul edilerek, kullanılan yöntemlerin hata payları deney sonuçları ile karşılaştırılarak alınmıştır. İki yöntemin de deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında hata yüzdeleri ise çizelge 5.4'te verilmektedir.

**Çizelge 5.3 :** Üç değişik yolla bulunan DTMB4119 pervane performansı.

J	HAD			KALDIRICI YÜZEY			DENEY		
	$K_t$	$K_q$	$\eta$	$K_t$	$K_q$	$\eta$	$K_t$	$K_q$	$\eta$
0.5	0.276	0.0455	0.4831	0.2606	0.0456	0.4546	0.285	0.0477	0.489
0.6	0.2396	0.0405	0.5651	0.2305	0.0418	0.5264	-	-	-
0.7	0.2011	0.0351	0.638	0.1969	0.038	0.5771	0.2	0.036	0.632
0.8	0.1615	0.0296	0.6952	0.1634	0.0304	0.684	-	-	-
0.833	0.1488	0.0278	0.7099	-	-	-	0.146	0.028	0.692
0.9	0.1223	0.024	0.73	0.1262	0.0266	0.6794	0.12	0.0239	0.725
1	0.0809	0.0179	0.7182	0.0868	0.019	0.7269	-	-	-
1.1	0.0379	0.0114	0.583	0.0452	0.0152	0.5203	0.034	0.0106	0.575

**Çizelge 5.4 :** Farklı yöntemlerin deney sonucuna göre hata oranları.

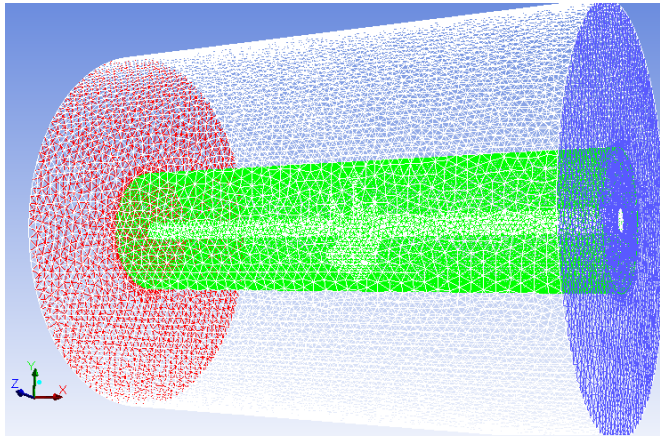
J	CFD			LIFTING SURFACE		
	K <sub>t</sub>	K <sub>q</sub>	η	K <sub>t</sub>	K <sub>q</sub>	η
0.5	3.1579	4.6122	1.2065	8.5614	4.4025	7.0348
0.7	0.5470	2.5000	0.9404	1.5500	5.2632	8.6867
0.9	1.8806	0.4167	0.6849	4.9128	10.1504	6.2897
1.1	10.2902	7.0175	1.3722	24.7788	30.2632	9.5130

Çizelge 5.4’te verilen hata şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$Hata = \left| \frac{(HAD \text{ veya Kaldırıcı yüzey}) - Deney}{\text{maks}(HAD \text{ veya Kaldırıcı yüzey}, Deney)} \right|$$

Çizelge 5.3 ve 5.4’ten de görülebileceği üzere, HAD ile bulunan sonuçlar deneysel sonuçlarla daha uyumludur. Çözüm için seçilen bütün faktörler DTC için de seçilmiştir. Seçilen faktörler ile ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir.

Açık su pervanesi etrafındaki akışın çözümü için 1 milyon dört – yüzü (tetrahedral) ağ elemanı kullanılmıştır. Referans olarak alınan [53] no.’lu kaynağa uygunluk açısından su yoğunluğu 998.47kg/m<sup>3</sup> ve su kinematik viskozitesi 1.044\*10<sup>-6</sup>m<sup>2</sup>/s olarak alınmıştır. Standart duvar fonksiyonu seçimi ile “Realizable  $k - \epsilon$ ” türbülans seçimi yapılmıştır. Kavitasyon etkileri ihmal edilmiştir. Pervanenin suya iyice battığı ve serbest su yüzeyinin etkilerinin pervane üzerinde görülmediği kabul edilmiştir. Akışkan bölgesi ikiye ayrılmıştır: pervanenin bulunduğu iç bölge pervane ile birlikte dönmekteyken, dış bölgede herhangi bir dönüş hızı tanımlanmamıştır. Akış bölgesinin bir görünümü için şekil 5.3 incelenebilir.



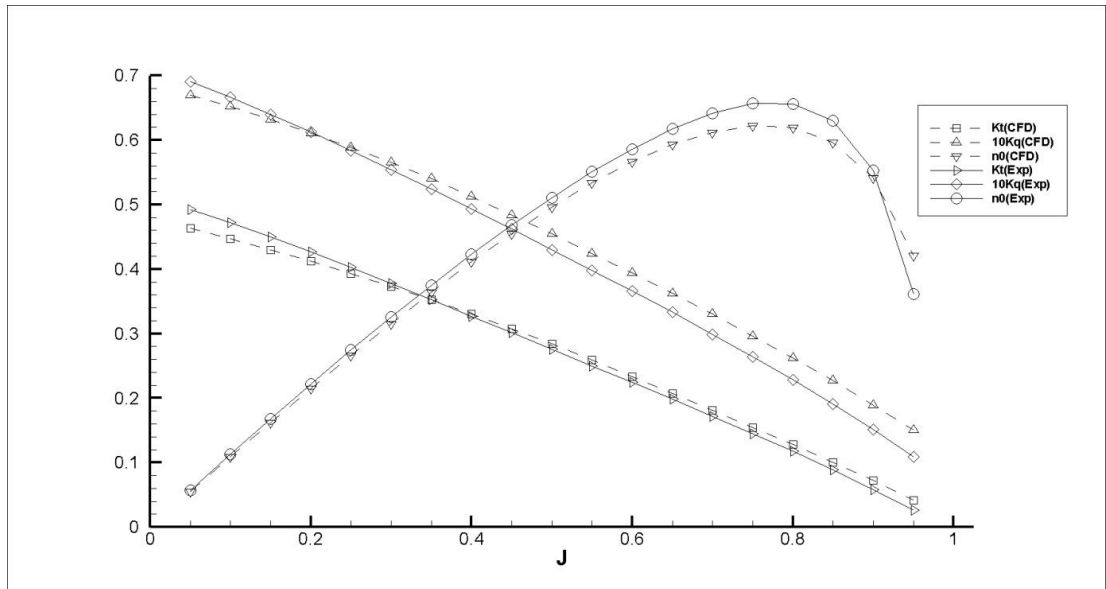
**Şekil 5.3 :** Açık su pervanesi akış bölgesinin bir görünümü.

Pervane ile birlikte dönen iç akışkan bölgesinin dönüş hızı pervanenin dönüş hızıyla eşittir. Akışkan bölgesine giren akış hızı sabit tutulmuş; ilerleme katsayısı  $J$ 'yi değiştirmek için pervane dönüş hızı değiştirilmiştir. Hatırlanacağı gibi ilerleme katsayısı  $J$ ;

$$J = \frac{V_A}{n \cdot D}$$

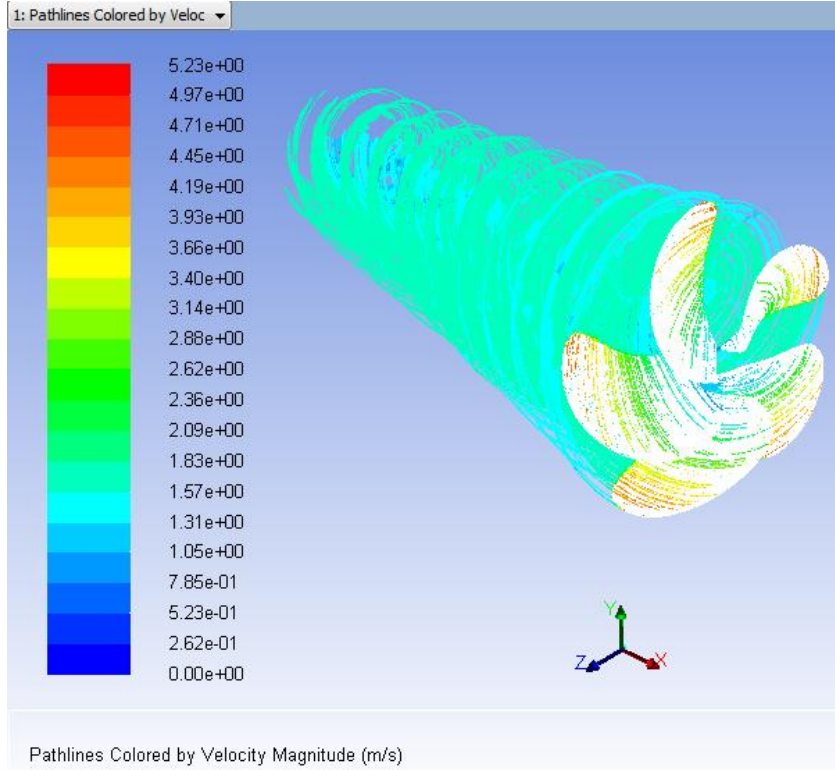
olarak ifade edilmektedir. Burada  $V_A$ , akışkan bölgesine giren akışın hızıdır. Bu hız sabitken, pervane dönme hızını temsil eden  $n$  sürekli değişerek ilerleme katsayısı  $J$ 'yi değiştirmektedir.  $D$  ise pervane çapıdır. Analizlerde akışkan bölgesine giren akış hızı  $V_A = 1.335\text{m/s}$  olarak alınmıştır.

Dış akışkan bölgesinin sınırları duvar olarak tanımlanmıştır. Pervane kanatları etrafındaki hücrelerle beraber dönmektedirler (relative to adjacent cell zone). Türbülans yoğunluğu %1 olarak alınmıştır. Basınç hız eşleştirmesi için SIMPLE ve en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Basınç, momentum, türbülans kinetik enerji ve türbülans dağılım oranı hep ikinci dereceden seçilmiştir. Rahatlatma faktörleri (under – relaxation factors) değiştirilmemiş, önceden varsayılan değerler olarak bırakılmıştır. Sonuçlar yaklaşık 1,000 iterasyonda yakınsamıştır. HAD sonuçlarıyla deney sonuçlarının karşılaştırılması şekil 5.4'te verilmiştir. Sonuçların tablolaştırılmış hali ise çizelge 5.5'ten görülebilir.

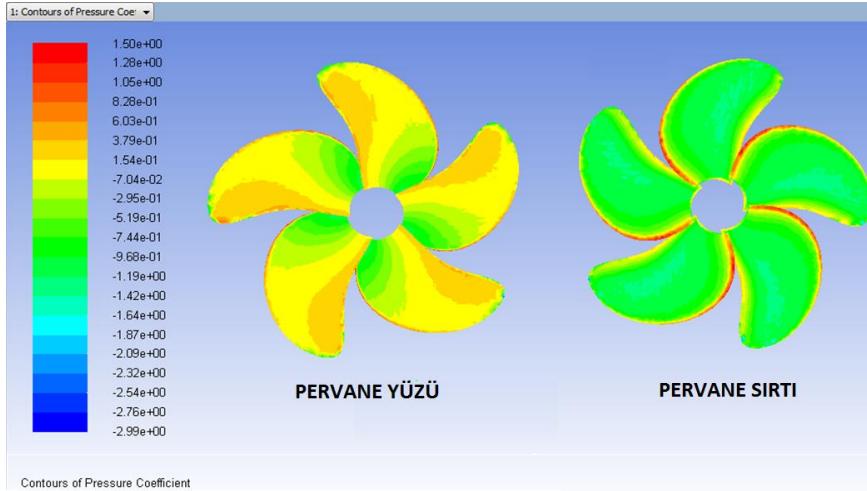


Şekil 5.4 : Pervane performansı için HAD ile deney sonuçlarının karşılaştırılması.

Pervanenin dönerek yarattığı akım hatları, pervane kanatlarından çıkan akım takip edilerek izlenebilir. İlerleme katsayısı  $J = 0.8$  için şekil 5.5'te pervane izi ve şekil 5.6'da basınç katsayısı dağılımı verilmiştir.



Şekil 5.5 :  $J = 0.8$  için pervane izinin görünümü.



Şekil 5.6 : Pervane üzerinde basınç katsayısı dağılımının görünümü.

**Çizelge 5.5 :** Pervane performansı için HAD'ın hata yüzdeleri.

J	HAD			DENEY			HATA %		
	K <sub>t</sub>	10K <sub>q</sub>	η <sub>0</sub>	K <sub>t</sub>	10K <sub>q</sub>	η <sub>0</sub>	K <sub>t</sub>	10K <sub>q</sub>	η <sub>0</sub>
0.05	0.463	0.669	0.055	0.492	0.691	0.057	5.89	3.18	3.51
0.1	0.447	0.652	0.109	0.472	0.667	0.113	5.30	2.25	3.54
0.15	0.43	0.632	0.162	0.45	0.64	0.168	4.44	1.25	3.57
0.2	0.412	0.611	0.215	0.427	0.613	0.222	3.51	0.33	3.15
0.25	0.393	0.589	0.266	0.403	0.584	0.275	2.48	0.85	3.27
0.3	0.373	0.565	0.315	0.378	0.554	0.326	1.32	1.95	3.37
0.35	0.353	0.54	0.364	0.353	0.524	0.375	0.00	2.96	2.93
0.4	0.33	0.512	0.411	0.327	0.493	0.423	0.91	3.71	2.84
0.45	0.307	0.484	0.455	0.302	0.462	0.468	1.63	4.55	2.78
0.5	0.284	0.455	0.496	0.276	0.43	0.511	2.82	5.49	2.94
0.55	0.259	0.424	0.534	0.25	0.398	0.551	3.47	6.13	3.09
0.6	0.233	0.394	0.566	0.225	0.366	0.586	3.43	7.11	3.41
0.65	0.207	0.362	0.593	0.199	0.333	0.617	3.86	8.01	3.89
0.7	0.181	0.33	0.612	0.172	0.299	0.642	4.97	9.39	4.67
0.75	0.154	0.296	0.622	0.145	0.264	0.657	5.84	10.81	5.33
0.8	0.128	0.262	0.619	0.118	0.228	0.656	7.81	12.98	5.64
0.85	0.1	0.227	0.596	0.089	0.191	0.63	11.00	15.86	5.40
0.9	0.072	0.189	0.541	0.058	0.151	0.553	19.44	20.11	2.17
0.95	0.042	0.15	0.421	0.026	0.109	0.361	38.10	27.33	14.25

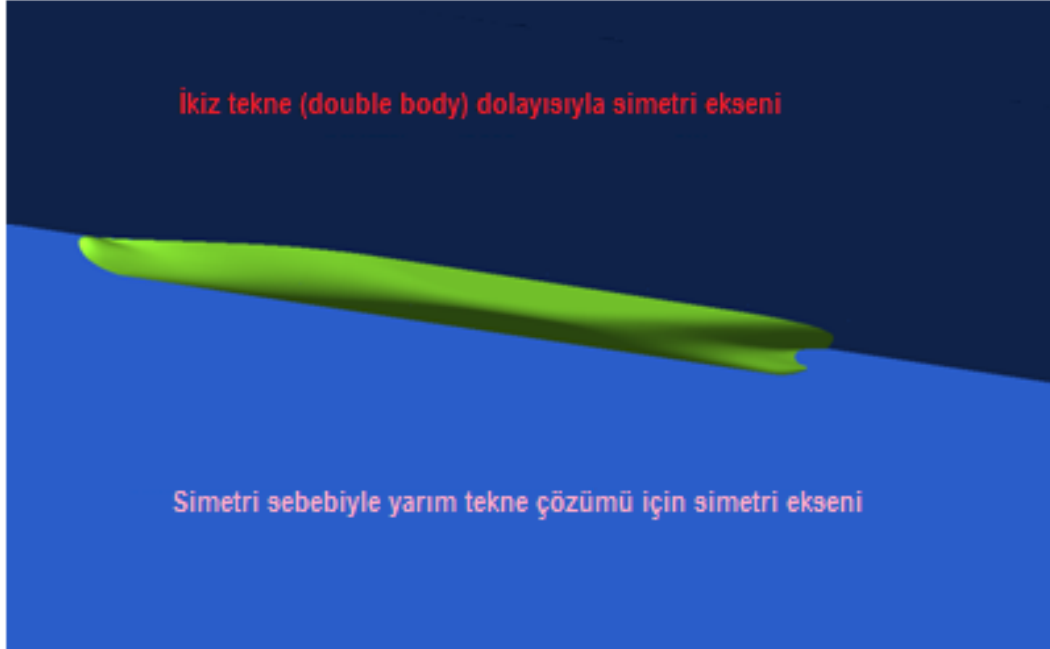
HAD ile deney sonuçları arasındaki fark genellikle az olmakla birlikte ilerleme katsayısı arttıkça hata payları kısmen yükselmektedir. Hata;

$$Hata = \left| \frac{HAD - Deney}{\max(HAD, Deney)} \right|$$

#### 5.4 Yalın Tekne İçin HAD Yönteminin Gerçeklenmesi

Yalın tekne etrafındaki akış 1.2 milyon dört – yüzlü ağ elemanı kullanılarak çözülmüştür. HAD programında teknenin simetrik olmasından dolayı sadece yarısı

modellenmiş ve simetri eksenini belirleyerek çözüm süresi kısaltılmaya çalışılmıştır. Dalga direncinin etkileri ihmal edilmiştir; dolayısıyla teknenin suya tamamen batmış olduğu kabul edilmektedir. Şekil 5.7’de akışkan bölgesinin bir görünümü verilmiştir.



Şekil 5.7 : Yalın tekne akış bölgesinin bir görünümü.

[53] no.’lu kaynakta yapılan deney sonuçlarıyla uyumlu olması açısından su yoğunluğu  $998.8\text{kg/m}^3$  ve su kinematik viskozitesi  $1.09 \cdot 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$  olarak belirlenmiştir. Standart duvar fonksiyonu, “realizable  $k - \varepsilon$ ” türbülans modeli ile kullanılmıştır. Kaviteleşmenin ve serbest su yüzeyinin etkileri ihmal edilmiştir. Türbülans yoğunluğu %1 ve türbülans viskozite oranı 1 olarak belirlenmiştir. SIMPLE algoritması, en küçük kareler yöntemi ile birlikte basınç – hız eşleştirmesi için kullanılmıştır. Basınç, momentum, türbülans kinetik enerji ve türbülans dağılım oranı hep ikinci dereceden seçilmiştir. Rahatlatma faktörleri en başta varsayılan değerlerle kullanılmasına rağmen, problemin yakınsamasında problemler olmuştur. Dolayısıyla momentum, türbülans kinetik enerji ve türbülans dağılım oranı 0.1’e kadar düşürülmüştür. Bu değerlerin düşürülmesi yakınsamış sonucun daha geç elde edilmesi anlamına gelmektedir. Kararlı ve yakınsamış sonuçlar yaklaşık 10,000 iterasyon sonunda elde edilmiştir.

Geminin toplam direnç katsayısı üçe ayrılabilir;

$$C_T = C_F + C_{VP} + C_W$$

Burada,  $C_F$  sürtünme direnci katsayısı,  $C_{VP}$  viskoz basınç direnci katsayısı ve  $C_W$  ise dalga direnci katsayısını temsil etmektedir. Serbest su yüzeyi etkilerinin ihmal edilmesinden dolayı dalga direnci katsayısı sıfıra eşittir:

$$C_W = 0 \rightarrow C_T = C_F + C_{VP}$$

Dolayısıyla, bu bölümde toplam direnç viskoz basınç direnciyle sürtünme direncinin toplamından elde edilir. Sürtünme katsayısı ITTC1957 formülasyonu ile belirlenebilir:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log Re - 2)^2}$$

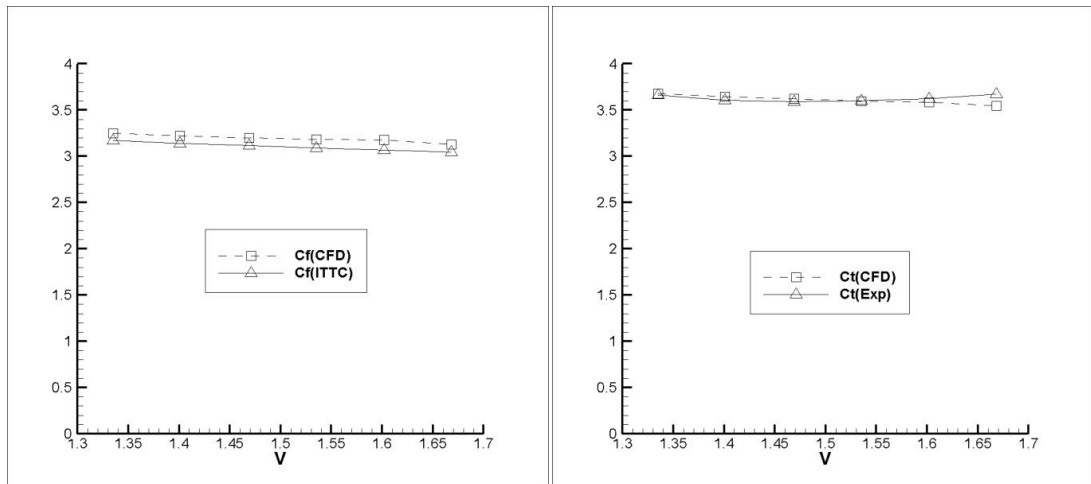
Re, Reynolds sayısını temsil eder ve,

$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu}$$

olarak ifade edilir. Sürtünme direnci katsayısı  $C_F$  ve toplam direnç katsayısı  $C_T$ 'nin değerleri çizelge 5.6'da verilmiştir. Sürtünme direnci katsayısında en büyük hata payı %2.5 iken, toplam direnç katsayısında en büyük hata payı %3.5 olarak ortaya çıkmıştır. Hata hesabı,

$$Hata = \left| \frac{C_{(HAD)} - C_{(Deney)}}{\max(C_{(Deney)}, C_{(HAD)})} \right|$$

HAD yöntemiyle bulunan sonuçlar, deney ve ITTC57 sonuçlarıyla oldukça uyumlu çıkmıştır.



a)  $C_F$  açısından karşılaştırma. b)  $C_T$  açısından karşılaştırma

**Şekil 5.8** : HAD ile ITTC57 sonuçlarının karşılaştırılması.

**Çizelge 5.6 :** HAD ve deneysel yollarla hesaplanan direnç katsayısı değerleri.

v (m/s)	HAD		DENEY		HATA %	
	$C_F \times 10^3$	$C_T \times 10^3$	$C_F \times 10^3$ (ITTC)	$C_T \times 10^3$	$C_F$	$C_T$
1.335	3.249	3.676	3.170	3.661	2.432	0.408
1.401	3.220	3.643	3.142	3.605	2.422	1.043
1.469	3.200	3.621	3.116	3.588	2.625	0.911
1.535	3.185	3.596	3.092	3.602	2.920	0.167
1.602	3.179	3.585	3.069	3.623	3.460	1.049
1.668	3.126	3.544	3.047	3.670	2.527	3.433

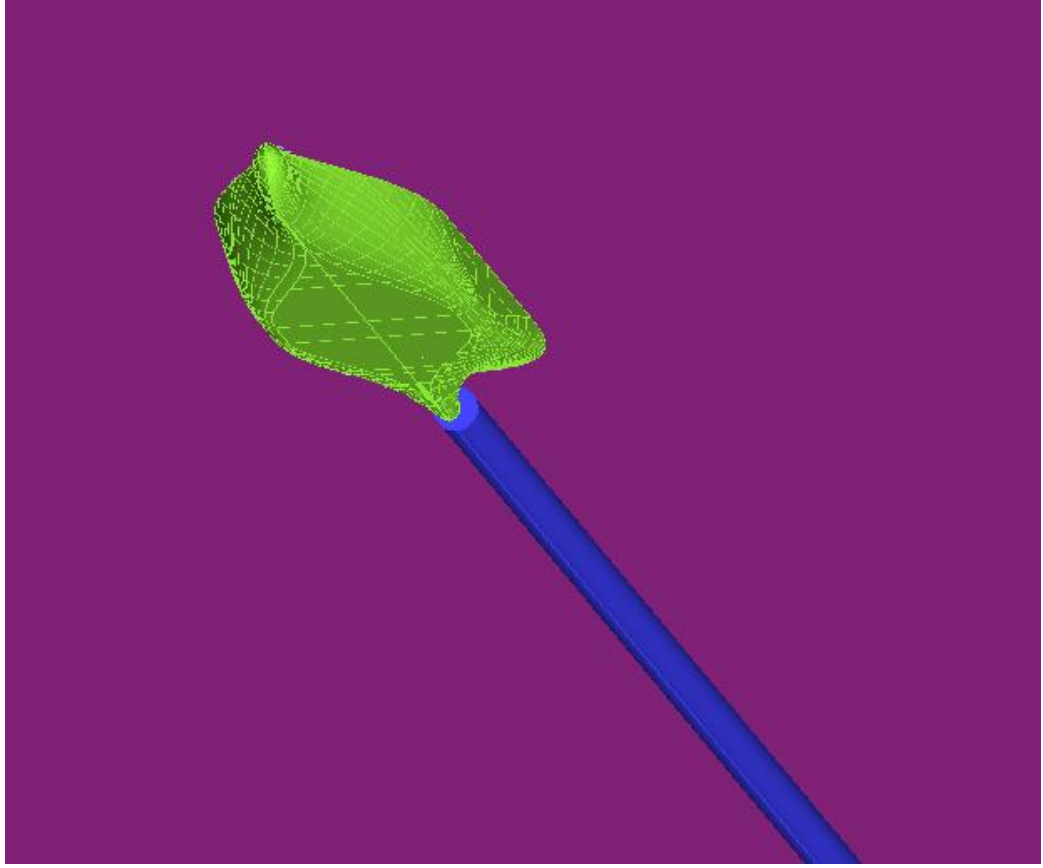
Çizelge 5.6'da verilen  $C_F$  ve  $C_T$  değerleri sırasıyla şekil 5.8a ve şekil 5.8b'de verilmektedir.

Tam ölçekteki gemi için form faktörü [53] no.'lu kaynakta 0.145 olarak verilmiştir. HAD kullanılarak bulunan form faktörü ise 0.131 olarak tespit edilmiştir. Bulunan değerlerin deneyle uyumlu bir sonuç olduğu düşünülmektedir.

### 5.5 Gemi Pervane Etkileşiminin Pervane Performansına Etkisi

Geminin pervane üzerindeki etkisini doğru bir şekilde yakalayabilmek ve yüksek derecede türbülanslı akımı yeterli bir biçimde çözebilmek için daha sık ağ elemanı kullanılmış ve akışkan bölgesi yaklaşık 6 milyon dört – yüzlü elemana bölünmüştür. Su yoğunluğu ve su kinematik viskozitesi açık su pervane çözümündekilerle eşit alınmıştır; bu değerler sırasıyla  $998.47\text{kg/m}^3$  ve  $1.044 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 'dir. Standart duvar fonksiyonu, “realizable  $k - \varepsilon$ ” türbülans modeli ile kullanılmıştır. Kaviteleşimin etkileri yok sayılmıştır. Çözüm ikiz tekne (double body) durumu için yapılmış ve serbest su yüzeyinin etkileri dolayısıyla ihmal edilmiştir. Akışkan bölgesi ikiye ayrılmıştır; birinci bölge pervane kanatlarını içine alan ve pervane ile birlikte dönen bölgedir. İkinci bölge ise teorik olarak sınırsız olduğu farzedilen ve geminin içinde hareket ettiği dış akış bölgesidir. Pervane döndüğü için akıştaki simetriyi bozmakta ve problemin yarım tekne için çözümünü mümkün kılmamaktadır. Bu sebepten

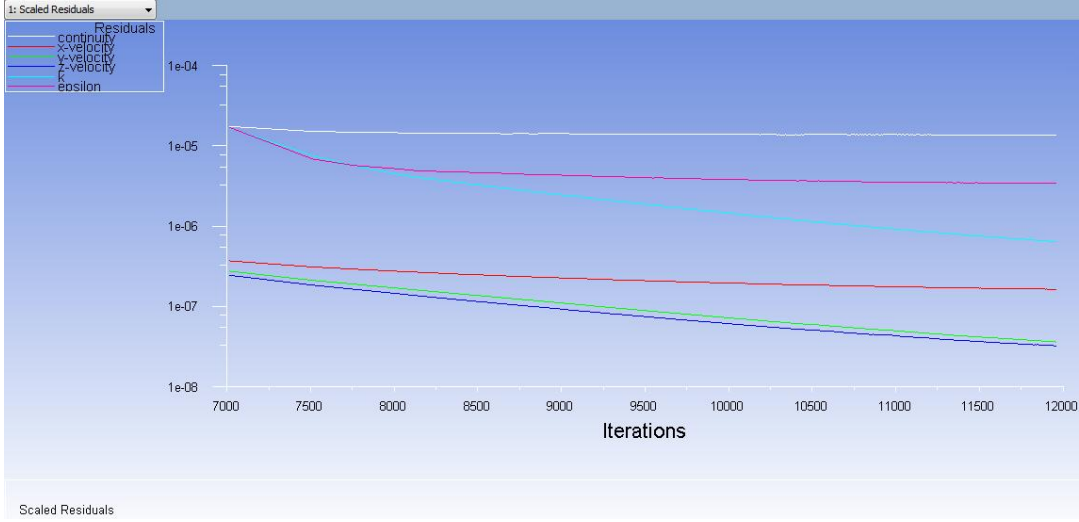
dolayı bütün sualtı tekne formu modellenmiştir. Akışkan bölgesinin daha net bir görünümü için şekil 5.9 incelenebilir.



**Şekil 5.9 :** Alttan akışkan bölgesinin görünümü. Mavi silindir içindeki bölge pervaneyi kapsamakta ve iz bölgesini temsil etmektedir

Analizler esnasında akışkan giriş hızı sabit tutulmuş ve pervane devri yeni ilerleme katsayıları elde etmek adına değiştirilmiştir. Pervane izini kapsayan akışkan bölgesi pervane ile beraber hareket etmektedir.

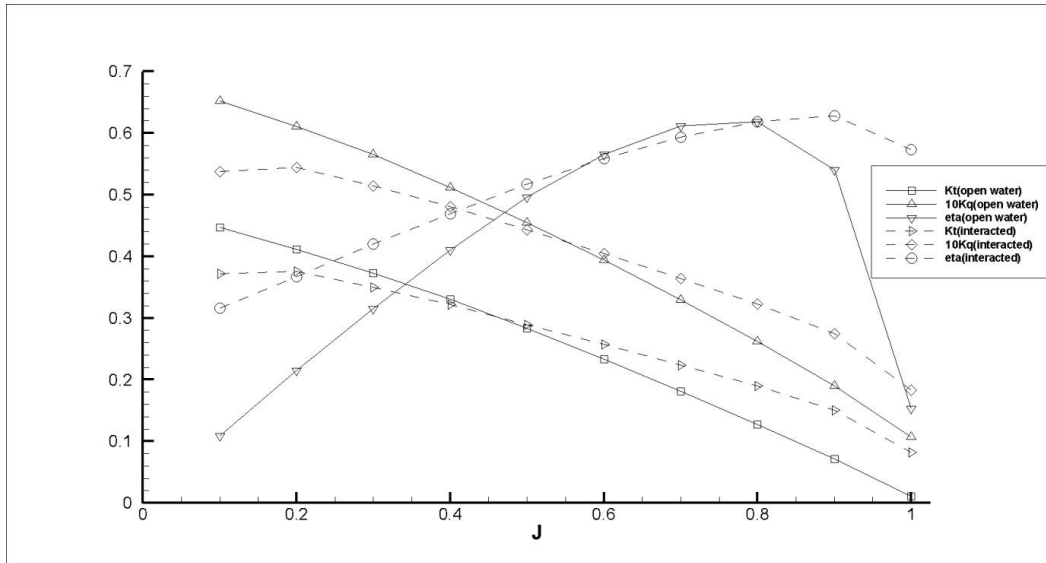
Türbülans yoğunluğu %1 ve türbülans viskozite oranı 1 olarak alınmıştır. SIMPLE algoritması, en küçük kareler yöntemi ile birlikte basınç – hız eşleştirmesi için kullanılmıştır. Basınç, momentum, türbülans kinetik enerji ve türbülans dağılım oranı hep ikinci dereceden seçilmiştir. Analizin yakınsaklığı sağlanmış ve bunun için rahatlatma faktörleri ihtiyaç duyulduğunda düşürülmüştür. Yaklaşık 10,000 iterasyon sonrasında analizler yakınsamıştır. Şekil 5.10, ilerleme katsayısı  $J = 0.6$  için analizin yakınsaklığını gösteren grafiği vermektedir.



Şekil 5.10 : Sistemin yakınsaklığını gösteren parametrelerin görünümü.

Gemi gövdesinin varlığı, pervane iz yüzeyine gelen akım hızını değiştirir. Açık su testlerinde pervane iz yüzeyinin her bir noktasına gelen hız birbirine eşitken; gemi gövdesi, iz yüzeyinin her noktasındaki hızı farklılaştırır. Ancak ilerleme katsayısı gibi bazı değerlerin hesabı için pervane hızı sadece bir tanedir. Her noktada ayrı bir ilerleme katsayısı hesabı yapmak pratikte faydasız olacağından, bu durumu aşmak için iz yüzeyindeki hızların bir ortalaması alınır. Böylece pervane için bir adet ağırlıklı hız ortalaması elde edilir. İlerleme katsayısı hesabında bu hız değeri kullanılır.

Pervane performansı üzerinde gemi gövdesinin etkisi ( $K_t$ ,  $K_q$ ,  $\eta_0$  değerleri cinsinden) şekil 5.11’de verilmiştir.



Şekil 5.11 : Pervane performansı üzerinde geminin varlığının etkisi.

Şekil 5.11’de verilen grafiğin tablolaştırılmış hali çizelge 5.7’de verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, gemi gövdesi pervane performansını önemli ölçüde değiştirmektedir.

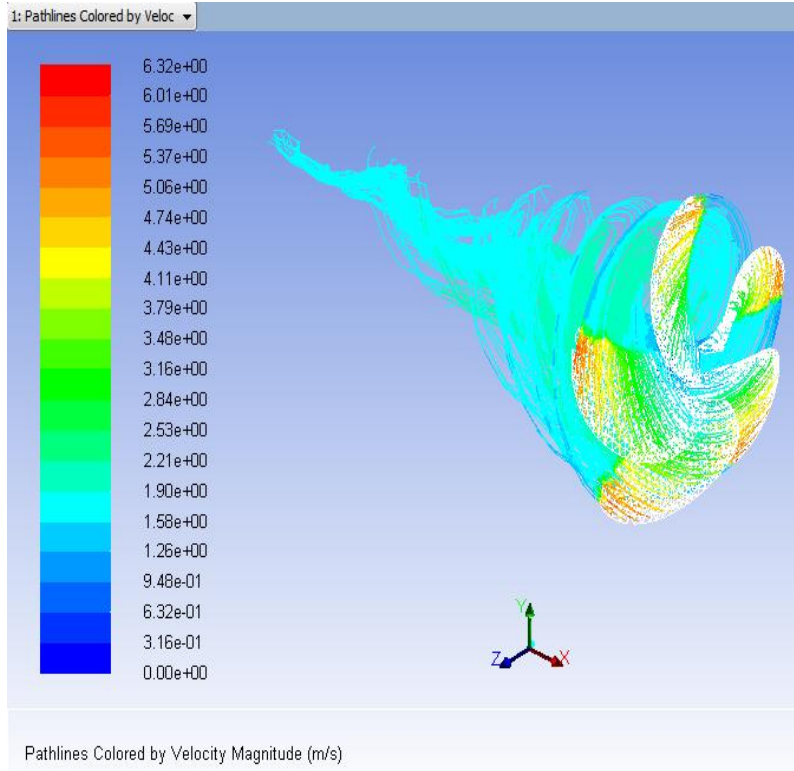
**Çizelge 5.7 :** Gemi gövdesinin pervane performansına etkisi.

J	AÇIK SU DURUMU			GEMİNİN OLDUĞU DURUM		
	$K_t$	$10K_q$	$\eta_0$	$K_t$	$10K_q$	$\eta_0$
0.1	0.4468	0.6517	0.1091	0.3721	0.5372	0.3157
0.2	0.4118	0.6110	0.2145	0.3754	0.5441	0.3671
0.3	0.3733	0.5653	0.3153	0.3494	0.5141	0.4201
0.4	0.3302	0.5119	0.4106	0.3215	0.4811	0.4689
0.5	0.2836	0.4547	0.4963	0.2894	0.4431	0.5176
0.6	0.2333	0.3937	0.5659	0.2572	0.4046	0.5588
0.7	0.1810	0.3295	0.6120	0.2235	0.3639	0.5935
0.8	0.1275	0.2623	0.6188	0.1898	0.3226	0.6181
0.9	0.0715	0.1894	0.5405	0.1501	0.2743	0.6278
1	0.0103	0.1069	0.1534	0.0817	0.1836	0.5729

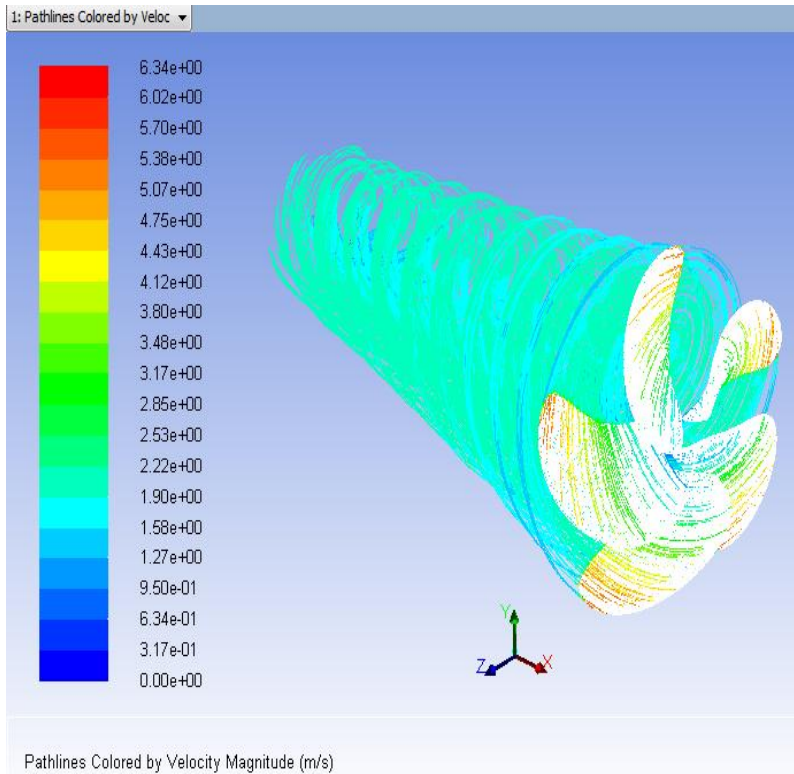
Gemi gövdesinin bulunduğu durumda, pervane itme katsayısı düşük ilerleme katsayılarında düşmekte ve yüksek ilerleme katsayılarında yükselmektedir. Ancak itme katsayısındaki bu farklılık tork katsayısı tarafından telafi edilmektedir. Çoğu ilerleme katsayısında (yalnızca ufak verim kayıplarının olduğu ilerleme katsayısı 0.6 ile 0.8 arası dışında), pervane verimi etkileşimli durumda açık su testi durumundan daha yüksekte çıkmaktadır. Açık su pervanesinin azami verimi ilerleme katsayısı  $J = 0.8$ ’de ve 0.6188 iken, etkileşimli durumda ilerleme katsayısı  $J = 0.9$ ’da ve 0.6278’dir.

Etkileşimli durumda pervane kanatlarından sıyrılan akım hatları, açık su testi durumuna nazaran çok daha karmaşık ve kaotiktir.  $J = 0.661$  için pervane devri ile oluşan akım hatlarının görünümü şekil 5.12’de verilmiştir. Etkileşimli durumda pervane izi, açık su durumuna oranla çok daha sıkışmıştır. Bunun sebebi, geminin arkasında oluşan türbülanslı bölgede çalışan pervanenin performans kaybından kaynaklanıyor olabilir. Şekil 5.11’den de hatırlanacağı gibi  $J = 0.661$  civarında pervane performansı gemi etkileşimli durumda daha düşüktür. Açık su pervanesinin  $J$

= 0.661 için pervane devri ile oluşan akım hatlarının görünümü ise şekil 5.13'te verilmektedir.

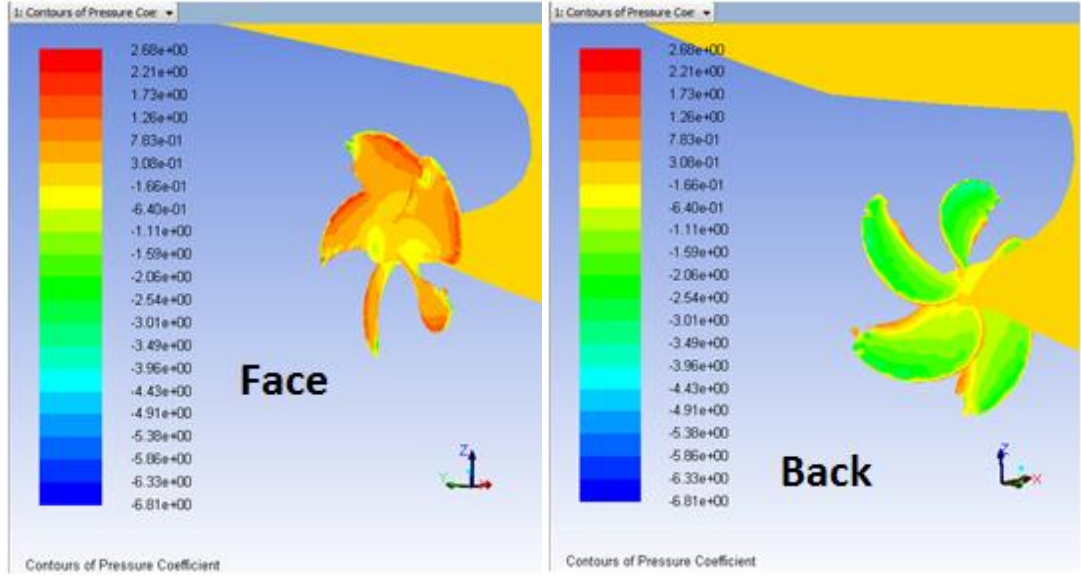


Şekil 5.12 : Gemi etkileşimli pervane üzerindeki akım hatları.

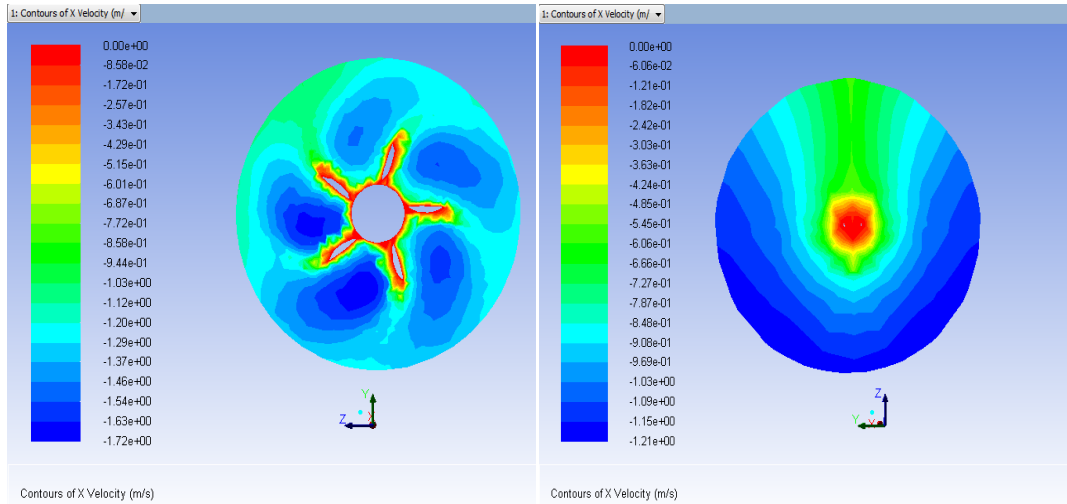


Şekil 5.13 : Açık su pervanesi üzerindeki akım hatları.

Geminin kıç tarafındaki basınç katsayısı dağılımı şekil 5.14'te verilmiştir. Pervanenin önü ve arkasındaki basınç katsayısı dağılımı da aynı şekilden incelenebilir. Şekil 5.15a'da efektif iz (bu bölümdeki çalışmanın dümensiz olduğu unutulmamalıdır), şekil 5.15b'de ise nominal iz görülebilir. Efektif ve nominal iz konturları pervane ekseninden alınmıştır. Şekiller ilerleme katsayısı  $J = 0.661$  durumu için verilmiştir.



Şekil 5.14 : Kıç taraftaki basınç katsayısı konturları.



a) Efektif iz. b) Nominal iz

Şekil 5.15 : Pervane nominal ve efektif izlerinin karşılaştırılması.

HAD analizlerinden üretilen sonuçlar, sevk deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bunun için geminin kendini sevk etme noktasının tespit edilmesi gerekmektedir.

Modelin hızı 1.335m/s olarak belirlenmiştir ve tablo 4 kullanılarak interpolasyon yoluyla toplam direnç katsayısı  $C_T = 3.661 \cdot 10^{-3}$  olarak bulunmaktadır. O zaman toplam direnç,

$$R_T = \frac{1}{2} \rho S_w v^2 C_T = \frac{1}{2} \cdot 998.47 \cdot 6.243 \cdot 1.335^2 \cdot 3.661 \cdot 10^{-3} \cong 20.34N$$

Geminin kendini sevk edebilmesi için toplam dirençle beraber pervanenin kendi yarattığı direnci karşılaması gerekmektedir. Ancak pratik bir çözüm için pervane itmesi toplam dirence eşit kabul edilebilir. Tablo 3'teki etkileşimli durumdan ve itme katsayısı denklemini kullanarak geminin kendini sevk etmesi gereken  $K_t$ 'nin ilerleme katsayısı  $J = 0.6$  ile  $J = 0.8$  arasında olduğu okunabilir.

$$J = 0.6 \rightarrow K_t = 0.2333 \rightarrow T_{J=0.6} \cong 28.61N$$

$$J = 0.7 \rightarrow K_t = 0.7 \rightarrow T_{J=0.7} \cong 18.26N$$

Pervane, gemi toplam direncini ancak bu iki ilerleme katsayısı arasında çalışarak karşılayabilir. Geminin istenen hızda kendini sevk edebilmesi için  $T - R_T = 0$  dengesinin sağlanması gerekmektedir. Bu değeri sağlayan ilerleme katsayısının en hassas şekilde bulunması, geminin kendini sevk eder durumunun en iyi izahını verecektir. Bunun için öncelikle bir ilerleme katsayısı tahmini yapılması gerekli, bu ilerleme katsayısında  $T - R_T = 0$  eşitliğine ne kadar uzaklıkta olduğu gözlenmeli ve en son aşamada da bu eşitliğin kendisi sağlanmalıdır. Bu şekilde yapılan bir analiz ile geminin kendini sevk eder durumdaki pervane ilerleme katsayısı  $J = 0.661$  olarak bulunmuştur. Pervanenin sağladığı itme ile gemi toplam direnci arasındaki fark -0.2 kadar cüzi bir miktar çıkmış, bu da kabul edilebilir bir hata payı olarak düşünülmüştür.

İlerleme katsayısı  $J = 0.661$  olarak tespit edildikten sonra HAD çözücüsünden itme ve tork katsayıları okunmuştur. Gemi etkileşimli durumda itme ve tork katsayıları,

$$K_{t(etkileşimli)} = 0.237 \quad , \quad K_{q(etkileşimli)} = 0.038$$

olarak bulunmuştur. Bu değerlerin tespitinden sonra ilerleme katsayısı  $J = 0.661$  için açık su pervane durumu analiz edilmiş ve bu durumdaki itme ve tork katsayıları ise,

$$K_{t(açık su)} = 0.202 \quad , \quad K_{q(açık su)} = 0.036$$

olarak bulunmuştur.

Rölatif – rotatif verimin ifadesi;

$$\eta_R = \frac{K_q(\text{açık su})}{K_q(\text{etkileşimli})}$$

olarak verilir. Geminin kendini sevk edebildiği ilerleme katsayısı için rölatif – rotatif verim ise bu ifadeden,

$$\eta_R = 0.947$$

olarak hesaplanır. [53] no.'lu kaynakta yayınlanan deney sonuçlarının verdiği değer 0.959'dur. Hesaplanan ile deney arasındaki hata payı %1 civarında bulunmuştur.

Tekne veriminin ifadesi;

$$\eta_H = \frac{1 - t}{1 - w}$$

olarak verilir. Dolayısıyla tekne verimi itme azalması katsayısı t ve iz katsayısı w'ya bağlı bir parametredir. İtme azalması katsayısı t ve iz katsayısı w'nun ifadeleri sırasıyla aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$t = 1 - \frac{R_T}{T}$$
$$w = 1 - \frac{v_A}{V}$$

Burada T, pervanenin sağladığı itme iken,  $R_T$  geminin pervanesiz durumdaki toplam direncidir.  $v_A$  aksenal hızların yüzey boyunca entegre edilerek, pervane disk alanına bölünmesiyle elde edilir. v ise gemi hızıdır.

Bu notasyon takip edilerek, itme azalması ve iz katsayıları;

$$t = 1 - \frac{20.34}{21.71} = 0.063 \quad \text{ve} \quad w = 1 - \frac{1.182}{1.335} = 0.115$$

olarak belirlenir. Buradan yola çıkarak tekne verimi ise;

$$\eta_H = \frac{1 - 0.063}{1 - 0.115} = 1.059$$

olarak hesaplanır. Kaynak [53]'te tekne verimi için hesaplanan değer  $\eta_H = 1.249$ 'dur. Ancak bu kaynakta, geminin kendini sevk ettiği ilerleme katsayısı ölçülen değerler üzerinden interpolasyon yapılarak bulunmuştur. Bu çalışmada ise geminin kendini sevk ettiği ilerleme katsayısı iteratif bir yöntemle tespit edilmiştir. İlerleme

katsayılarının sağladığı itmelerin gradyanı büyük olabilir ve bu da interpolasyon gibi yöntemlerle bulunan sonuçların güvenilirliğinin şüpheli olmasına yol açar. Dolayısıyla, bu tez çalışması kapsamında bulunan geminin kendini sevk ettiği ilerleme katsayısının orijinal makaleye göre daha güvenilir olduğu düşünülmektedir.

Burada, tekne verimindeki farka serbest su yüzeyi ve kavitasyonun etkilerinin tesir edebileceği düşünülebilir. Pervaneyi tutan şaft derinliğinin yeterli mesafede olmasından dolayı, serbest su yüzeyinin etkileri ihmal edilebilir. Dolayısıyla tekne verimini büyük ölçüde değiştirebileceği düşünülmemektedir. Kavite ise ayrıca incelenmesi gereken bir hadisedir. Pervane üzerinde oluşabilecek kavite, itmeyi azaltıcı bir etki gösterir ve pervane yüzeyine gelen hız konturlarını da değiştirecektir. Dolayısıyla, bu durumda hem itme azalması katsayısı  $t$ , hem de iz katsayısı  $w$  değişeceğinden tekne verimi farklı değerler alabilecektir. Pervanede kavite oluşup oluşmadığı kontrol edilmeli, oluştuğu takdirde etkilerinin ne denli büyük olduğu tespit edilmelidir. Daha sonra elde edilen tekne verimi, deneyde bulunan tekne verimiyle karşılaştırılmalıdır. Ancak bu çalışmada kavite etkileri ihmal edilmiştir, bu sebeple bahsedilen yöntem ancak başka bir çalışma konusu olarak incelenebilir.

## 5.6 Sonuç

Doktora tez çalışmasının bu bölümünde; bir gemi gövdesinin pervane performansına etkisi, deneyleri yapılarak formu internette yayınlanmış bir gemi üzerinde (Duisburg Test Case – DTC) incelenmiştir. Bunun için öncelikle, pervanenin açık su durumu ve yalın tekne için analizler yapılmış ve validasyon için bulunan bazı parametreler deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. İki durum için de yeterli sonuç alındığı görüldükten sonra, gemi ve pervane birlikte analize tabi tutulmuş ve geminin pervane performansına olan etkileri incelenmiştir. Açık su pervanesinin verim grafiği ilerleme katsayısına göre daha çok değişkenlik gösterirken, gemi etkileşimli durumda pervane veriminin daha istikrarlı olduğu söylenebilir. Bu yorum, üretilen eğrilerin eğiminin etkileşimli durumda daha düşük değerlerde olması sebebiyle yapılmıştır. İlerleme katsayısındaki değişiklik gemi etkileşimli durumda verimi daha az etkilemektedir. Gemi etkileşimli durumda azami verim açık su durumuna göre daha yüksek çıkmıştır. Açık suda azami verim  $J = 0.8$ 'de görülürken, etkileşimli durumda

azami verim  $J = 0.9$ 'da gerekleŒmiŒtir. Üretilen sonuçlar, rölatif – rotatif ve tekne verimleri hesaplanarak gerekelendirilmiŒtir.

DTC gemisinin sevk performansında elbette dümenin de bir katkısı olacaktır. Bu bölümde yapılan alıŒmada dümen, yapılan analizlerin dıŒında tutulmuŒtur. Daha gereki bir senaryo dümenli durumda kavitasyon ve serbest su yüzeyi etkilerinin de hesaplara dahil edilmesiyle elde edilir.

Kaynak no. [53]'te, DTC pervanesinin en uygun pervane olup olmadığından bahsedilmemiŒtir. En uygun pervanenin tespit edilmesi, geminin sevk verimini artıracaktır. Yukarıda bahsedilen tüm etkilerin dahil edildiği gereki bir alıŒma ortamında bulunacak olan en uygun pervane, daha iyi bir dizayn için atılacak önemli bir adım olacaktır.



## 6. GEMİ – PERVANE – DÜMEN ETKİLEŞİMİ

Pervane ve dümen açık su testleri geminin direnç ve sevki açısından önemlidirler. Bu testlerde dizayn edilmiş pervane ve dümenin açık suda tek başlarına performansları ölçülerek, üretilecek olan geminin arkasına monte edildiklerinde performansının ne olacağı hakkında fikir elde edilmesi beklenir.

Ancak açık su testleri yalnızca bir yaklaşımdan ibarettir. Gerçek geminin arkasında çalışıklarında pervane ve dümenin geminin gövdesiyle nasıl bir takım olacakları ve ne gibi bir uyum içerisinde çalışacakları meçhuldür. Gövdeyi geçen akımın pervane ve dümene ne etkide tesir edeceğinin çözümlenebilmesi için tüm modelin birlikte çalışması gerekir. Bu şekilde gemi, pervane ve dümenin birbirlerine olan etkileri daha iyi çözümlenebilir.

Deney havuzunun niteliklerine bağlı olarak yapılabilecek ölçümler değişir. Deneysel yöntemde genellikle modeller dümensiz olarak çekilirler. Ancak bu şekilde bir ölçüm ile bütün geminin takıntılarıyla birlikte performansının nasıl olduğunun belirlenmesi yetersiz kalır. Yapılabilecek en iyi şey gemiyi tüm takıntılarıyla ele alarak bir bütün halinde nasıl çalıştığını tespit etmek olacaktır.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) böyle bir olanak sunmaktadır. Geminin bütün parçalarının modellenmesi ve birbirine doğru ölçeklerde eklenmesiyle bütün model oluşturularak akışkan içine yerleştirilir ve çözüm yöntemi buna göre seçilir. Ancak pervane arkasında çalışan dümen, çözüm yöntemi belirlenirken bir takım sıkıntılar yaratmaktadır.

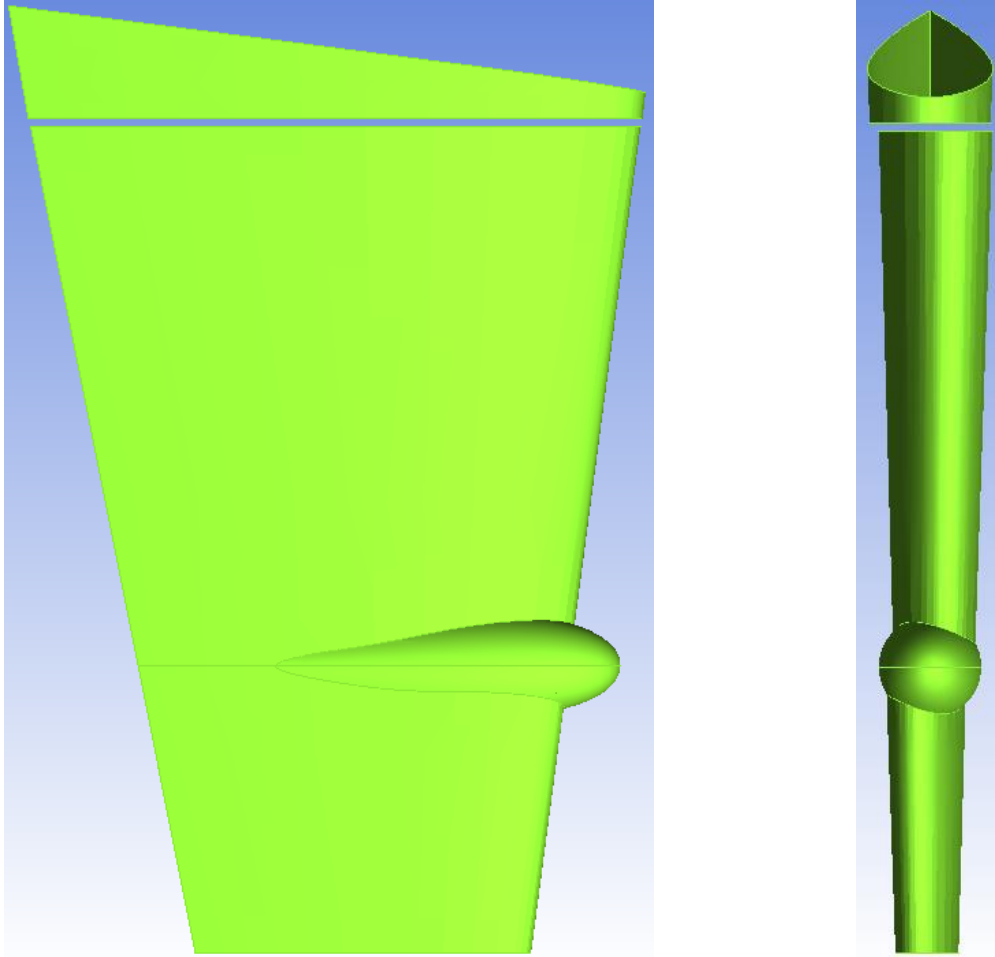
Bilindiği gibi pervane, gemi arkasındaki akımı döndürerek itme sağlar. Pervanenin akıma verdiği helezonik dönüş, gemi – pervane etkileşiminde de anlatıldığı gibi hareketli koordinat sistemi tanımlanarak ve bu hareketli koordinat sistemini akışkan bölgesinin sonuna kadar uzatılarak HAD programına izah edilir. Ancak pervanenin arkasında bulunan dümen, tanımlanan hareketli koordinat sistemi bölgesinin önünde bir engel oluşturur. Dolayısıyla bu hareketli koordinat sistemi akışkan bölgesinin sonuna kadar tanımlanamaz ve dümenin hemen önünde kesilmek durumunda kalır.

Bu da dümene gelen akışkanın fiziksel olarak doğru tanımlanamamasına yol açar ve sevk sisteminin dümenli halde doğru algılanamamasına neden olabilir.

Bu bölümde gemi – pervane – dümen etkileşimi hareketli koordinat sistemi tanımlanarak ele alınacak ve sevk ve direnç üzerindeki etkilerinin ne ölçüde tespit edilebileceği araştırılacaktır. Bölüm sonunda elde edilen veriler 5. bölümün sonuçlarıyla karşılaştırılarak dümenin, tüm gemi sistemine olan etkisi irdelenecektir.

### 6.1 Kullanılan Gemi, Pervane ve Dümenin Özellikleri

Bu bölümde kullanılan gemi ve pervanenin hidrostatik özellikleri bölüm 5.2’de verilmiştir. Kullanılan dümenin görünümü ise şekil 6.1’de verilmiştir.



a) Yandan görünüş (solda). b) Önden görünüş (sağda)

**Şekil 6.1** : Dümenin genel bir görünümü görünümü.

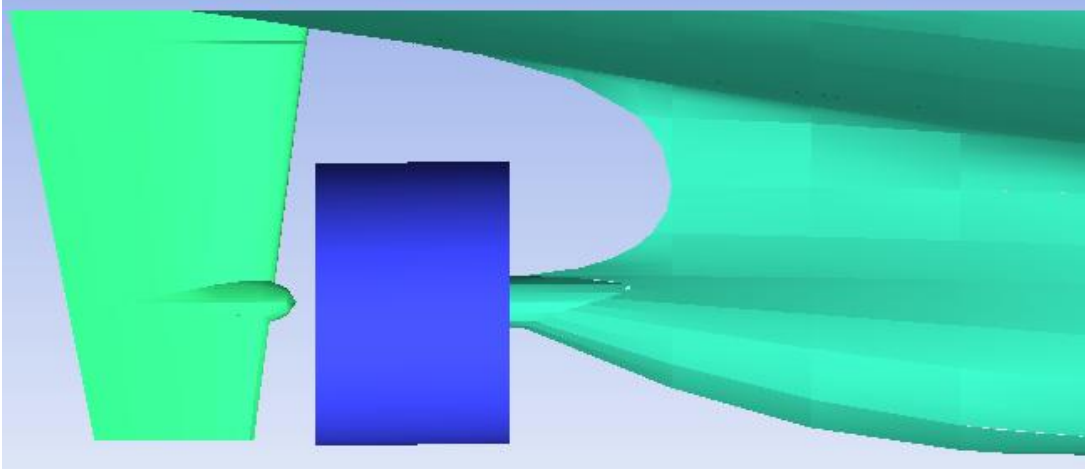
Şekil 6.1b’de görülebileceği üzere gemide kullanılan dümen hafif bükülmüştür (twisted rudder). Bükülü dümenlerin, geminin sevk ve manevrasına olan değişik etkileri literatürde incelenmiştir. Ahn ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada bükülü

dümenlerin kavitasyon oluşumunu engelleme veya geciktirme gibi özellikleri olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir [56]. Aynı çalışmada bükülü dümenlerin gemi performansını artırdığı sayısal olarak kanıtlanmış ve bunun yanında manevra üzerindeki olumlu etkilerine de değinilmiştir. Bükülü dümenlerin, yarı balanslı dümenlerle karşılaştırıldıklarında iskele ve sancak yönüne dönüşleri daha dengeli yapabildikleri tespit edilmiştir. Cusanelli ve Karafiath'ın çalışmasında ise bükülü dümenler enerji tasarrufu sağlama maksadıyla kullanılmıştır [57]. Çalışmada HAD yöntemi ile bükülü dümenlerin potansiyel olarak sağlayabilecekleri yakıt tasarrufu tespit edilmeye çalışılmıştır. Shen ve ekibinin yaptığı çalışmada ise geleneksel dümenlerin belirli bir yöne dönerken daha erken kavitasyona maruz kaldığı ve bu durumlarda dümen yüzeyinde ciddi bir yüzey kavitasyonu olduğu belirtilmiştir [58]. Çalışmada oluşabilecek kavitasyonu azaltmak adına bükülü dümenlerin kullanılması önerilmiş ve deneysel yolla bükülü dümenlerin daha az kavitasyon oluşturdukları kanıtlanmıştır.

Bükülü dümenler pervane su huzmesi bölgesinde akımı düzenleme maksadı taşırlar. Literatürdeki çalışmalarda da anlatıldığı üzere geminin manevra kabiliyetini ve sevk verimini artırmada önemli rol oynarlar. Ancak buna rağmen bükülü dümenler akademik olarak henüz yeterince incelenmemişlerdir ve dolayısıyla kullanımları da henüz kısıtlıdır.

## **6.2 Yöntem**

Gemi pervane ve dümenin etkileşimi HAD'ın sunduğu olanaklar sayesinde RANSE çözücü bir program kullanılarak incelenmiştir. Gemi etrafındaki akış bölgesi ikiye ayrılarak çözüme gidilmiştir. Pervanenin bulunduğu bölge, pervane şaftından dümenin olduğu yere kadar bir silindir içerisinde ayrı bir akışkan bölgesi olarak tanımlanmıştır. Akış bölgesinin görünümü şekil 6.2'de görülebilir. Bu bölgenin katı bir cisim olmadığı, yalnızca akış bölgesinin tanımlanmasında kullanıldığına dikkat edilmelidir. Bu bölgede hareketli koordinat sistemi tanımlanmış (moving reference frame – MRF) ve pervanenin dönüşü bu şekilde temsil edilmiştir.



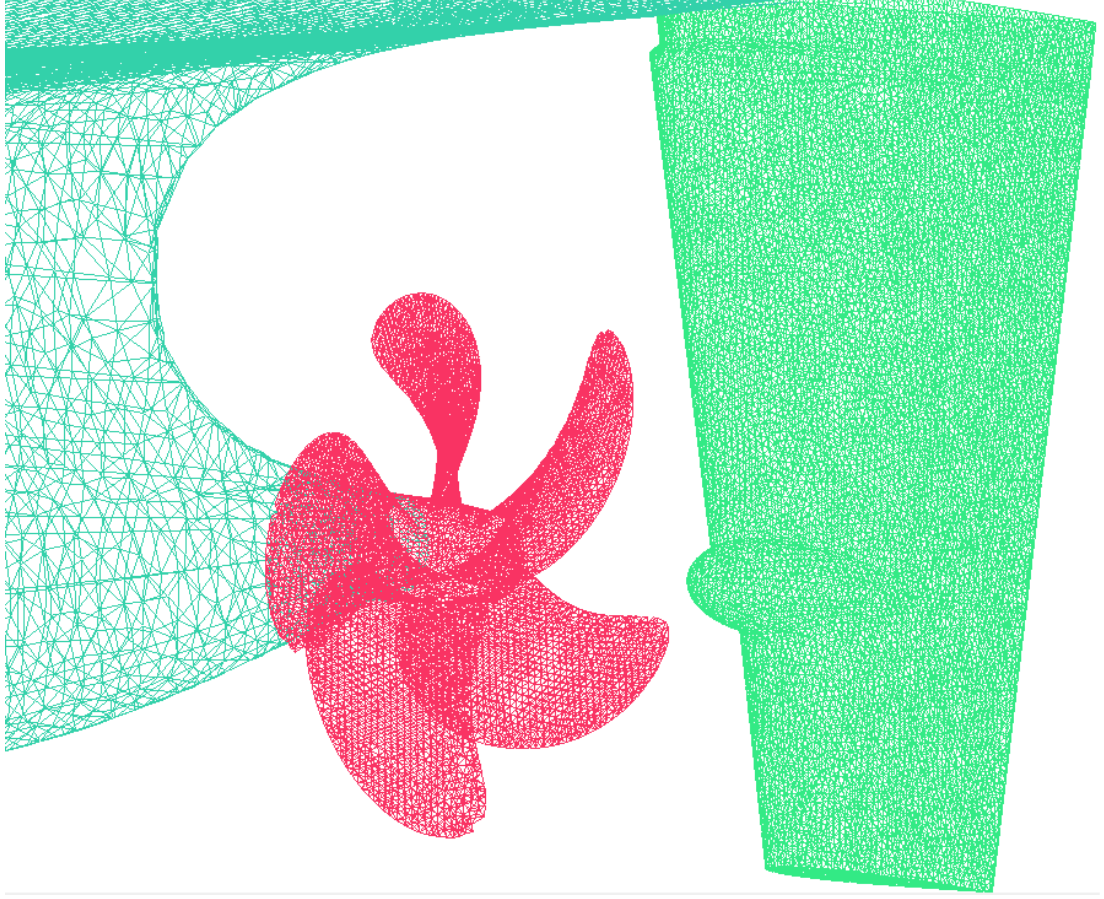
**Şekil 6.2 :** Pervaneyi kapsayan akışkan bölgesinin gösterimi.

Pervanenin bulunduğu bölgenin dışında kalan akış bölgesinde ise herhangi bir dönüş tanımlanmamış, bölgeye yalnızca geminin hızına denk düz akış verilmiştir. Bu çalışmada gemi kıç bölgesindeki akımın temsili önemli olduğundan pervanenin içinde bulunduğu akış bölgesinde çok sık eleman kullanılmıştır. Dıştaki akış bölgesinde ise yalnızca gemi yüzeyine yakın yerlerde çok sık elemanlar kullanılmış; gemiden uzaklaştıkça elemanların boyları büyümüş ve sayıları azalmıştır. Bir önceki bölümde 6 milyon dört – yüzlü eleman kullanılmışken, bu bölümde 3 milyon eleman çözümlerin yakınsaması için yeterli olmuştur. Kıç bölgesinde kullanılan ağ yapısının bir görünümü için şekil 6.3 incelenmelidir. Su yoğunluğu ve su kinematik viskozitesi 5. bölümle uyumludur. Seçilen çözüm yöntemleri de gemi – pervane çözümü ile uyumlu olarak seçilmiştir; RANSE çözücü programda seçilen bütün faktörler bölüm 5.6’da izah edilmiştir. Kaviteasyon ve serbest su yüzeyi etkileri ihmal edilmiştir.

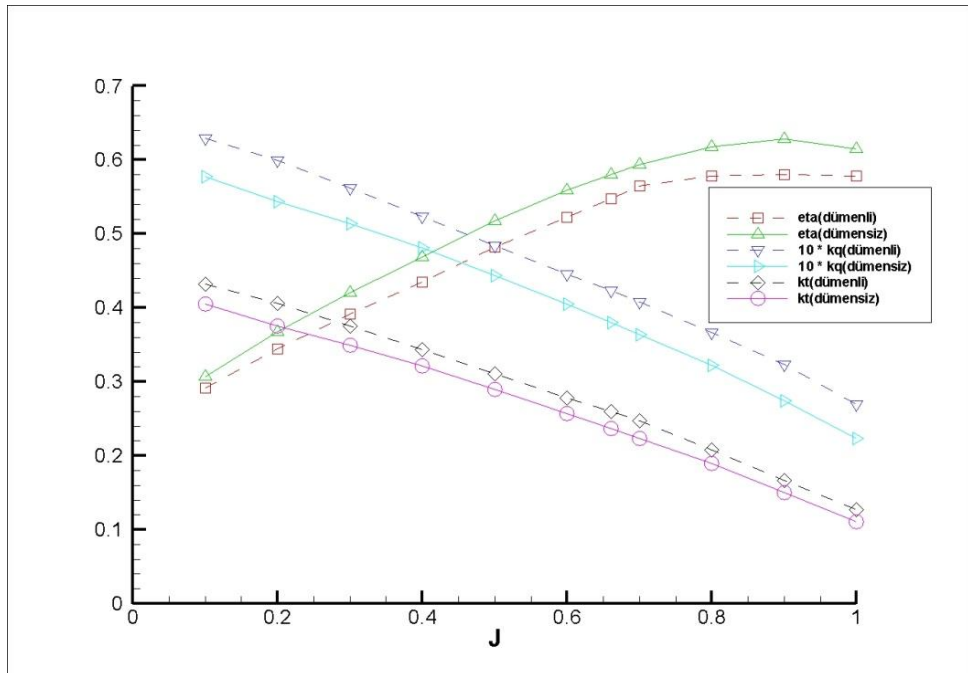
Analizler esnasında akışkan giriş hızı sabit tutulmuş ve pervane devri yeni ilerleme katsayıları elde etmek adına değiştirilmiştir. Pervaneyi kapsayan akışkan bölgesi pervane ile beraber hareket etmektedir.

### **6.3 Gemi, Pervane ve Dümen Etkileşimi**

Dümenin, pervane performansına olan etkisi şekil 6.4’te verilmiştir. Bu şekilden de anlaşılacağı gibi dümenli durumda pervaneni sağladığı itme artmasına karşın, pervane verimi düşmüştür. Bunun sebebi pervanenin sağladığı tork artışının itme artışından fazla olmasıdır.



Şekil 6.3 : Pervaneyi kapsayan akışkan bölgesinin gösterimi.



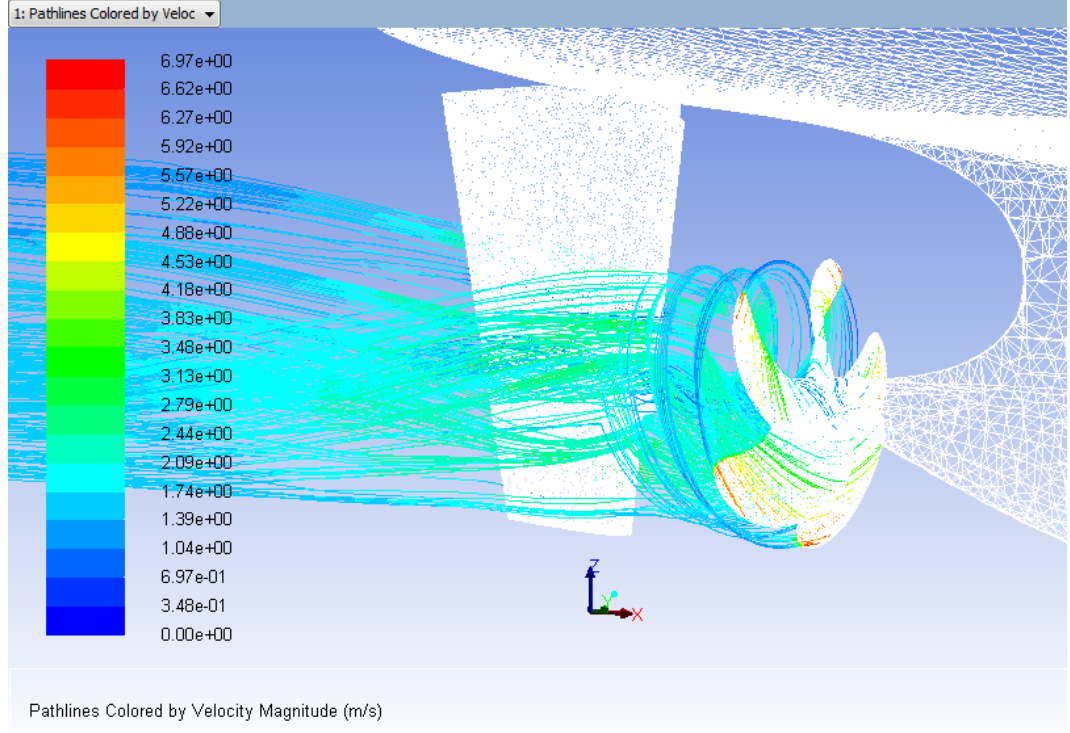
Şekil 6.4 : Dümenli ve dümenli pervane performans grafiği.

Dümenin yerinde bulunduğu durumda gemi arkasındaki basınç yükselir. Dümenin varlığından dolayı gemiyi geçerek pervaneye gelen akışkan hızı yavaşlar. Bu da pervane veriminin düşmesine sebep olur. Dümenli durumda pervanenin itme ve tork değerlerinin artmasına karşın, verimi düşmüştür. Şekil 6.4'te verilmiş olan grafiğin sayısal değerleri çizelge 6.1'de verilmiştir.

**Çizelge 6.1** : Dümenli ve dümensiz pervane performansı

J	DÜMENSİZ DURUM			DÜMENLİ DURUM		
	$K_t$	$10K_q$	$\eta_0$	$K_t$	$10K_q$	$\eta_0$
0.1	0.3721	0.5372	0.3157	0.4320	0.6289	0.2915
0.2	0.3754	0.5441	0.3671	0.4062	0.5991	0.3446
0.3	0.3494	0.5141	0.4201	0.3753	0.5619	0.3913
0.4	0.3215	0.4811	0.4689	0.3430	0.5232	0.4351
0.5	0.2894	0.4431	0.5176	0.3108	0.4844	0.4816
0.6	0.2572	0.4046	0.5588	0.2785	0.4456	0.5227
0.7	0.2235	0.3639	0.5935	0.2470	0.4078	0.5650
0.8	0.1898	0.3226	0.6181	0.2075	0.3666	0.5785
0.9	0.1501	0.2743	0.6278	0.1666	0.3235	0.5798
1	0.0817	0.1836	0.5729	0.1270	0.2697	0.5781

Gemi, pervane ve dümenin bulunduğu durumda pervaneyi geçen akım hatlarının görünümü şekil 6.5'te verilmiştir. Ancak kullanılan yöntemin bazı noktalardaki yetersizliği sebebiyle akım hatlarında fiziksel bir hata mevcuttur. Dümenli durumda akım hatlarında şekil 5.12'de görülebileceği gibi bir büzülme meydana gelmesi beklenirken, şekil 6.5'te akım hatlarında bir büzülme görülmemektedir. Bu da akım hatlarındaki fiziksel hatanın bir delili olarak gösterilebilir.



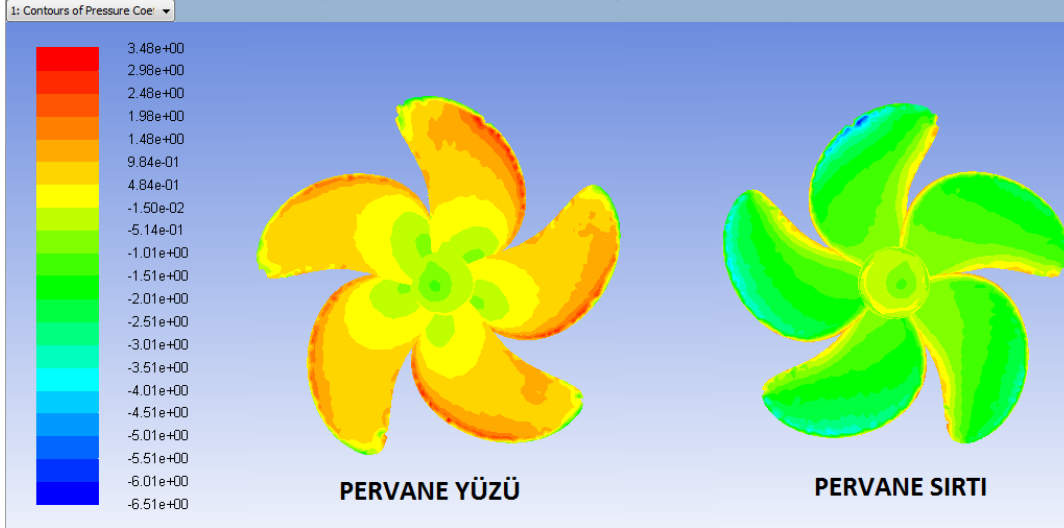
**Şekil 6.5 :** Dümenin olduğu durumda pervaneden çıkan akım hatları.

Pervane akış bölgesinin hareketli koordinat sistemi tanımlanarak HAD programına ifade edildiği daha önce belirtilmişti. Ancak hareketli koordinat sistemi her türlü problem için uyumlu bir çözüm yöntemi değildir. Nitekim dümenin yerinde bulunduğu durumda pervane iz bölgesi, geminin içinde bulunduğu akışkan bölgesinin sonuna kadar uzatılamamıştır. Bu durum akışın doğru tanımlanamamasına ve akış fiziğinin yanlış gösterimine yol açar. Bu hatanın sebebi aşağıda anlatılmaya çalışılmıştır.

Gemi gövdesini geçerek pervanenin içinde bulunduğu hareketli koordinat sistemi tanımlanan iç akışkan bölgesine gelen bir akışkan parçacığını ele alalım. Bu parçacık dış akış bölgesinde pervane yakınlarna gelene kadar pervanenin sebep olduğu herhangi bir dönme hareketine sahip olmayacaktır. Parçacık pervanenin de içinde bulunduğu iç akış bölgesine girdiği andan itibaren bu bölgede tanımlanmış hareketli koordinat sistemi sayesinde bir dönmeye sahip olur ve bölge dışına çıkana kadar bu dönme özelliğini sürdürür. Dış bölgede ise herhangi bir dönüş tanımlanmamıştır ve parçacık iç akış bölgesinin dışına çıktığı anda aynı şekilde dönmeyecektir. Ancak gerçek durumda pervanenin dönüşü sebebiyle parçacık bir ivme kazanır ve gemiden iyice uzaklaşıp viskoz sönüm etkisinde bu özelliğini kaybedene kadar dönmeye

devam eder. Bu sebepten dolayı pervaneyi geçerek dümene gelen akım hatları hareketli koordinat sistemi tanımlanarak düzgün görüntülenememektedir.

Dümen gemi kıç tarafındaki akımı yavaşlatarak bu bölgedeki basıncı artırır. Bölgedeki basınç artışı pervane yüzeyi üzerindeki basıncı da artırır. Şekil 6.6'da dümenli durumda pervane yüzeyi üzerindeki basınç katsayısı dağılımı görülmektedir.



Şekil 6.6 : Pervane yüzeyi üzerindeki basınç dağılımı.

#### 6.4 Sonuç

Dümen, gemi kıç bölgesindeki akım hızını ve basınç alanını değiştirir. Akım hızı ve basıncındaki değişiklik, gemi ve pervane üzerinde çeşitli etkilerin oluşmasını beraberinde getirir. Dümen, manevra için hayati bir önem taşımaya karşın ekstra bir direnç üretir ve pervane verimini düşürür. Bu sebeple iyi dizayn edilmiş bir dümen manevra kabiliyetini artırmanın yanında direnç ve sevk yönünden de kazançlar sağlayabilecektir. Ayrıca kavitasyon gibi istenmeyen hadiselerin önüne geçmek için gemiye monte edilecek dümenin iyi seçilmesi gerekir.

Bükülü dümenler kavitasyonu engellemede, yakıt tasarrufu sağlamada ve geminin manevra kabiliyetini artırmada etkilidirler. Gemi gövdesi ve pervanesiyle tasarımı iyi yapılmış bükülü bir dümen gemi direncini azaltırken, manevra kabiliyetini artıracaktır.

Tezin bu bölümünde bükülü bir dümenin gemi – pervane ilişkisi üzerine etkisi araştırılmıştır. Dümen, pervaneye gelen akımı yavaşlatarak pervane verimini düşürür. Ayrıca kıç taraftaki basıncı artırarak pervane üzerine binen yükü de artırır. Pervane daha ağır bir yük altında çalışır ve daha fazla itme ve tork üretir. Ancak üretilen tork,

itmeye oranla daha fazla olduğu için toplamda pervane verimi düşer. Bu bölümde yapılan analizlerde dümene gelen akış açısı  $0^\circ$  olarak alınmıştır. Dümene gelen akış açısının değişmesi pervane ve sevk verimi üzerinde farklı etkiler yaratacaktır.

Dümenin gemi kış tarafındaki etkileri incelenirken pervane hareketi, hareketli koordinat sistemi tanımlanarak incelenmiştir. Bir önceki bölümde de aynı yöntem uygulanarak pervanenin ürettiği akım hatları doğru tasvir edilmişti. Ancak pervaneyi kapsayan iz bölgesi dış akış bölgesinin sonuna kadar uzatılmıştı. Bu bölümde ise pervane iz bölgesi, arkasında bulunan dümen sebebiyle, kısıtlı bir bölgede tanımlanabilmiş ve bu da akım hatlarının fiziksel olarak yanlış görünmesine sebep olmuştur. Akım hatlarının doğru tarif edilebilmesi için başka bir yöntem ihtiyacı duyulmaktadır. İnternette yapılan bazı araştırmalar sonucunda hareketli ağ elemanları kullanılmasının bu gibi fiziksel olarak hatalı akım hatlarının üretilmesini engelleyeceği öğrenilmiştir. Doktora sonrasında yapılması düşünölen çalışmalar arasında hareketli ağ elemanı kullanarak pervane hareketinin temsilinin yapılması da bulunmaktadır.



## 7. SONUÇLAR

Akışkan içerisinde bulunan her cisim birbirleriyle etkileşim yaratır. Bu etkileşimin etkisi mesafe azaldıkça artar; mesafe arttıkça azalır. Gemi, dümen ve pervane birbirlerine çok yakın çalışan üç ayrı sistemdir; ancak bir bütün halinde geminin sevk performansını tayin ederler. Dolayısıyla bu üç ayrı sistemin iyi bir takım olabilmesi ve birbirleriyle uyumlu çalışabilmesi için her parçanın etrafındaki akımın diğerleri tarafından iyi bir şekilde etkilenmesi gerekir. Akımı düzgün alan parçalar sevk sisteminin verimini artıracaktır; çürük su alan parçalar veya akım ayrılmasının olduğu durumlar ise sevk sisteminin performansını düşürecektir.

Her ne kadar dümen daha basit bir geometri olsa da, gemi gövdesi ve pervane için aynı şey söylenemez. Gemi gövdesi ve pervane dümenle karşılaştırıldıklarında daha kompleks formlara sahiptir; bunun yanında pervanenin dönme hareketini yapması işleri iyice zorlaştırır. Gemi, pervane ve dümenin birbirlerini nasıl etkilediklerinin incelenmesi için öncelikle basit geometriler üzerinde etkileşimin belirli parametreleri nasıl değiştirdiğinin gözlenmesi gerekir. Ancak bu şekilde daha karmaşık bir yapı olan gemi, pervane ve dümen üçlüsünün birbirleriyle nasıl daha verimli çalışacaklarının tespiti yapılabilir.

Dolayısıyla bu tez boyunca bu şekilde bir yol takip edilmiştir. Böylece değişik parametrelerin etkileşimdeki etkisi, yapılan çalışmaların gerçekleşmesi ve geliştirilen kodların daha basit ortamlarda denenebilmesi sağlanabilmiştir. Temel problemler çözülerek asıl problem ele alınmadan önce bir ısınma turu atıldığından bahsedilebilir.

Temel problemlerin çözümü boyunca önce cisimler tek başına çözülerek etkileşimin etkilerinin anlaşılabilmesi için bir altyapı oluşturulmuştur. Düz levha, silindir, küre ve kanat gibi nispeten daha basit geometriler etrafındaki akış ilk olarak tek başına çözülmüştür. Daha sonra ikinci bir geometrinin akış içerisine girmesiyle bu cisimler etrafındaki akışın nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Çalışma boyunca; cisimlerin iki ve üç boyutlu ortamlarda ne gibi değişimlere uğradıkları, potansiyel ve viskoz akımda nasıl davrandıkları ve farklı potansiyel akış çözümlerinde ne gibi sonuçlar verdiği

incelenmiştir. Mesafe, kalınlık, hücum açısı ve kort boyu gibi bazı parametrelerin cisimlerin etkileşimine nasıl tesir ettikleri gözlenmiştir.

Temel problemlerin çözümü boyunca elde edilen birikimlerden, doktora tezinin asıl konusu olan gemi, pervane ve dümen etkileşimine geçildiğinde istifade edilmiştir. Çalışmada öncelikle gemi ve dümen problemi ele alınmış ve dümenin pervane iz yüzeyini ne ölçüde değiştirdiği incelenmiştir. Bilindiği gibi deney havuzlarında sevk sistemi genellikle dümensiz olarak yapılır. Tez çalışmasının bu bölümünde dümenin, sevk hesaplarına dahil edilmesinin önemi anlatılmaya çalışılmıştır. Dümen akış içerisinde bir basınç alanı yaratır ve bu basınç alanının pervane üzerindeki etkileri incelenmeden sevk sisteminin veriminin tayini eksik bir şekilde yapılmış olur. Ayrıca dümen yalnızca geminin manevra kabiliyetini artırmak için değil, akımı düzenlemek için de kullanılabilir.

Gemi gövdesi ile dümenin ilişkisi incelendikten sonra, gövdenin bu sefer pervane ile olan etkileşimi incelenmiştir. Pervane testleri, deney havuzunda açık suda yapılır ve pervanenin sağladığı itme, tork ve açık su verimi gibi değerleri hesaplanır. Elde edilen değerlere göre pervanenin iyi bir pervane olup olmadığının değerlendirmesi yapılır. Ancak gerçek deniz ortamında pervane tek başına değil, gemi ve diğer takıntılarla beraber çalışır. Gemi gövdesinin olduğu durumda pervanenin nasıl çalışacağı model deneylerinden elde edilen bir sonuç değildir. Son yıllarda gelişen bilgisayar teknolojisi sayesinde HAD vasıtası ile gemi gövdesinin olduğu durumda pervanenin nasıl çalışacağını bir hesabı yapılabilmektedir. Tez çalışmasının bu bölümünde gemi gövdesinin pervane verimi üzerindeki etkileri incelenmiş ve açık suda ürettiği değerlerden farkı tespit edilmiştir. Pervanenin daha gerçekçi olarak sevk verimine nasıl tesir ettiğinin bu yolla tespitinin daha doğru olacağı düşünülmektedir.

Gemi gövdesinin ayrı ayrı dümen ve pervaneyle olan etkileşimi incelendikten sonra tüm sistemin bir bütün halinde çözülmesi kısmına geçilmiştir. Bu kısımda dümenin gemi gövdesi ve pervane ilişkisine etkisi incelenmiş ve pervane karakteristiğini nasıl değiştirdiği gösterilmiştir. Önceki bölümlerde yapılan çözüm yöntemi bu bölümde de kullanılmış; ancak ilgili bölümde de bahsedilen belirli sebepler yüzünden elde edilen akımın fiziksel olarak hatalı olduğu ortaya çıkmıştır. Bu istenmeyen durumun düzeltilmesi için kayıcı ağ elemanları kullanılmalıdır. Ancak kayıcı ağ elemanlarının kullanılması zamana bağlı çözüm yapmayı beraberinde getirir; bu da daha zahmetli

ve zaman alıcı çözümleri gerektirir. Pratik çözümlerin elde edilmesi kayıcı ağ elemanları kullanarak mümkün olmamaktadır.

Tez çalışması boyunca üretilen sonuçlar belirli kabuller yapılarak elde edilmiştir. Analizlerde serbest su yüzeyi ve kavitasyonun etkileri ihmal edilmiştir. Ayrıca türbülansın çözümü için evrensel bir sonucun henüz literatürde bulunmamış olması türbülans modelleri kullanmayı gerektirir. Bu türbülans modellerinin seçimi ise kullanılan ağ elemanları sayısı ile bağlantılıdır. Daha çok ağ elemanı ile gerçek sonuca daha yakın sonuçlar verebilecek türbülans modellerinin seçilebilmesi mümkündür. Yapılan kabullerin azaltılması veya ağ elemanlarının artırılarak farklı türbülans modellerinin seçilmesi daha gerçekçi sonuçlar alınmasının önünü açacak ancak daha kuvvetli bilgisayarlar ve daha çok zaman gerektirecektir. Bu açıdan bakıldığında, model deneyleri HAD ile karşılaştırıldığında sevk veriminin tayini için bugün hala daha güvenilir görünmektedir. Ancak gelecekte olacak gelişmelerle birlikte HAD'ın daha gerçekçi sonuçlar üreteceği ve model deneylerine olan ihtiyacı bir nebze de olsa azaltacağı düşünülmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Kerwin, J. E.** (2001). Hydrofoils and Propellers, MIT Open Courseware.
- [2] **Kellogg, O. D.** (1929). *Foundations of Potential Theory*. Springer Verlag, Berlin.
- [3] **Smith, A. M. O., and Hess, J.** (1962). *Calculation of Non-Lifting Potential Flow About Three-Dimensional Bodies*. Douglas Aircraft Company, Report E. S. 40622.
- [4] **Webster, C. W.** (1975). The Flow About Arbitrary, Three-Dimensional Smooth Bodies. *Journal of Ship Research*, 19(4), 206-218.
- [5] **Noblesse, F., Triantafyllou, G.,** (1983). Explicit Approximations for Calculating Potential Flow About a Body. *Journal of Ship Research*, 27(1), 1-12.
- [6] **Rigby, S. G., Nicolaou, D., Sproston, J. L., Millward, A.,** (2001). Numerical Modeling of the Water Flow Around Ship Hulls. *Journal of Ship Research*, 45(2), 85-94.
- [7] **Maitre, T. A., Rowe, A. R.** (1991). Modeling of Flow Around a Marine Propeller Using a Potential-Based Method. *Journal of Ship Research*, 35(2), 114-126.
- [8] **Lee, C. S., Kim, Y. G., Suh, J. C.** (1994). A Surface Panel Method for Design of Hydrofoils. *Journal of Ship Research*, 38(3), 175-181.
- [9] **Willis, C. J., Crapper, G. D., Millward, A.** (1994). A Numerical Study of the Hydrodynamic Forces Developed by a Marine Rudder. *Journal of Ship Research*, 38(3), 182-192.
- [10] **Landweber, L., Chwang, A. T., Guo, Z.** (1991). Interaction Between Two Bodies Translating in an Inviscid Fluid. *Journal of Ship Research*, 35(1), 1-8.
- [11] **Korsmeyer, F. T., Lee, C. H., Newman, J. N.** (1993). Computation of Ship Interaction Forces in Restricted Waters. *Journal of Ship Research*, 37(4), 298-306.
- [12] **Matveev, K. I., Matveev, I. I.** (2000). Tandem Hydrofoil System. *Ocean Engineering*, 28, 253-261, Teknik Not.
- [13] **Bal, Ş.** (2008). Prediction of Wave Pattern and Wave Resistance of Surface Piercing Bodies by a Boundary Element Method. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 305-329.
- [14] **Li, D. Q., Dyne, G.** (1995). Study of Propeller-Rudder Interaction Based on a Linear Method. *International Shipbuilding Progress*, 42(431), 235-258.

- [15] Keuning, J. A., Katgert, M., Vermeulen K. J. (2006). Keel-Rudder Interaction on a Sailing Yacht. *19th International HISWA Symposium on Yacht Design and Yacht Construction*, Amsterdam.
- [16] Kang, D., Nagarajan, V., Hasegawa, K., Sano, M. (2008). Mathematical Model of Single-Propeller Twin-Rudder Ship, *Journal of Marine Science Technology*. 207-222.
- [17] Szantyr, J. (2007). Mutual Hydrodynamic Interaction Between the Operating Propeller and the Rudder. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 7(3), 191-203.
- [18] Tchieu, A. A., Crowdy, D., Leonard, A. (2010). Fluid – structure interaction of two bodies in an inviscid fluid. *Physics of Fluids*, 22(10).
- [19] Wang, Q. X. (2004). Interaction of two circular cylinders in inviscid fluid. *Physics of Fluids*, 16(12), 4412 – 4425.
- [20] Kouh, J. S., Ho, C. H. (1996). A High Order Panel Method Based on Source Distribution and Gaussian Quadrature. *Ship Technology Research*, 43, 38-47.
- [21] Lee, C. S., Kerwin, J. E. (2003). A B-Spline Higher-Order Panel Method Applied to Two-Dimensional Lifting Problem. *Journal of Ship Research*, 47(4), 290-298.
- [22] Hoekstra, M., Raven, H. C. (1980). Calculation of viscous – inviscid interaction in the flow past a ship after body. *13<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics*, 583 – 600.
- [23] Markatos, N. C. G., Wills, C.B. (1980). Prediction of viscous flow around a fully submerged appended body. *13<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics*, 631 – 650.
- [24] Bayın, S. (2004). *Fen ve Mühendislik Bilimlerinde Matematik Yöntemler*. Ders Kitapları Anonim Şirketi.
- [25] Barcellos, A., Stein, S. K. (1997). *Calculus ve Analitik Geometri*. Cilt 2, Literatür Yayıncılık.
- [26] Katz, J., Plotkin, A. (1991), *Low-Speed Aerodynamics – From Wing Theory to Panel Methods*. McGraw-Hill, Inc. International Edition.
- [27] Brebbia, C. A., Dominguez, J. (1992). *Boundary Elements – An Introductory Course*. McGraw-Hill, New York.
- [28] Versteeg, H. K., Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method*. 1<sup>st</sup> ed.
- [29] Sumer, B. M., Fredsoe, J. (2006). *Hydrodynamics Around Cylindrical Structures*. London : World Scientific Publishing.
- [30] Abbott, I. H., Von Doenhoff, A. E. (1959). *Theory of Wing Sections – Including a Summary of Airfoil Data*. Dover Publications, Inc. New York.
- [31] Lee, Y. T., Bein, T. W., Feng, J. Z., Merkle, C. L. (1991). *Unsteady Flows in Rotor-Stator Cascades*. David Taylor Research Center.

- [32] **Bal, Ş., Güner, M.** (2009). Sayısal bir yöntem ile podlu pervane analizi. *İTÜ Dergisi*, 8(2), 3 – 16.
- [33] **Rood, E. P., Anthony, D. G.** (1989). An experimental investigation of propeller/hull/appendage hydrodynamic interactions. *17<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics*, s. 395 – 414.
- [34] **Felli, M., Di Felice F.** (2005). Propeller wake analysis in nonuniform inflow by LDV phase. *Journal of Marine Science and Technology*, s. 159 – 172.
- [35] **Lungu, A., Pacuraru, F.** (2009). Numerical study of the hull-propeller-rudder interaction. *Numerical Analysis and Applied Mathematics*, International Conference 2009, 2, 693 – 696.
- [36] **Muscari, R., Felli, M., Di Mascio, A.** (2011). Analysis of the flow past a fully appended hull with propellers by computational and experimental fluid dynamics. *Journal of Fluids Engineering*, 133.
- [37] **Carlton, J., Radosavljevic, D., Whitworth, S.** (2009). Rudder – Propeller – Hull Interaction: The Results of Some Recent Research, In-Service Problems and Their Solutions. *First International Symposium on Marine Propulsors*, Trondheim.
- [38] **Szantyr, J. A.** (2007). Mutual hydrodynamic interaction between the operating propeller and the rudder. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 7(3), 191 – 203.
- [39] **Felli, M., Roberto, C., Guj, G.** (2009). Experimental analysis of the flow around a propeller-rudder configuration. *Experiments in Fluids*, 147 – 164.
- [40] **Lee, H., Kinnas, S. A., Gu, H., Natarajan, S.** (2003). Numerical modeling of rudder sheet cavitation including propeller/rudder interaction and the effects of a tunnel. *Fifth International Symposium on Cavitation (CAV2003)*, Osaka.
- [41] **Mohammed, F., Kinnas, S. A.** (Danışman) (2006). *Propeller Lifting Line/Rudder Interaction* (Yüksek Lisans Tezi). Texas Austin Üniversitesi.
- [42] **Kinnas, S. A., Lee, H., Gu, H., Natarajan, S.** (2007). Prediction of sheet cavitation on a rudder subject to propeller flow. *Journal of Ship Research*, 51(1), 65 – 75.
- [43] **Kinacı, Ö. K., Kükner, A., Bal, Ş.** (2012). A Parametric Study on Tandem Hydrofoil Interaction. *Hydman 2012*, 145-155.
- [44] **Zhang, Z., Liu, H., Zhu, S., Zhao, F.** (2006). Application of CFD in ship engineering design practice and ship hydrodynamics. *Journal of Hydrodynamics*, 18(3), 315 – 322.
- [45] **Zhou, L. D., Yuan, J. L.** (1984). Calculation of the turbulent flow around the stern and in the wake of a body of revolution with the propeller in operation. *15<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics*, s. 279 – 290
- [46] **Shen, H., Gomri, A., Chen, Q.** (2011). The hydrodynamic performance prediction of ship hull with propeller. *International Conference on*

*Applied Mechanics, Materials and Manufacturing*, 117 – 119, 598 – 601, Shenzhen.

- [47] **Tocu, A. M., Lungu, A.** (2008). Free – surface flow features in the stern region of a propelled ship. *Numerical Analysis and Applied Mathematics International Conference*, 767 – 770.
- [48] **Stück, A., Kröger, J., Rung, T.** (2011). Adjoint-based Hull Design for Wake Optimisation. *Ship Technology Research*, 58(1), 34 – 44.
- [49] **Lee, S. K., Chen, H. C.** (2005). The influence of propeller/hull interaction on propeller induced cavitating pressure. *ISOPE 2005*, Seoul, 25 – 33.
- [50] **Szelangiewicz, T., Abramowski, T.** (2009). Numerical analysis of influence of ship hull form modification on ship resistance and propulsion characteristics. Part I, influence of hull form modification on ship resistance characteristics. *Polish Maritime Research*, 16(1), 3 – 8.
- [51] **Szelangiewicz, T., Abramowski, T.** (2010). Numerical analysis of influence of ship hull form modification on ship resistance and propulsion characteristics. Part II, influence of hull form modification on wake current behind the ship. *Polish Maritime Research*, 17(1), 3 – 9.
- [52] **Szelangiewicz, T., Abramowski, T.** (2010). Numerical analysis of influence of ship hull form modification on ship resistance and propulsion characteristics. Part III, influence of hull form modification on screw propeller efficiency. *Polish Maritime Research*, 17(1), 10 – 13.
- [53] **el Moctar, O., Shigunov, V., Zorn, T.** (2012). Duisburg Test Case: Post-Panamax Container Ship for Benchmarking. *Ship Technology Research*, 59(3), 50 – 65.
- [54] **Brandner, P.** (1998). Calculation results for the 22<sup>nd</sup> ITTC Propulsor Committee Workshop on Propeller RANS/PANEL Methods. *22<sup>nd</sup> ITTC Propulsion Committee Propeller RANS/Panel Method Workshop*, Grenoble.
- [55] **Bal, Ş.** (2011). A method for optimum cavitating ship propellers. *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, 35, 139 – 158 .
- [56] **Ahn, K., G. H., Choi, D. I., Son et al.** (2012). Hydrodynamic Characteristics of X – Twisted Rudder for Large Container Carriers. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 4(3), 322 – 334.
- [57] **Cusanelli, D., Karafiath, G.** (2012). Hydrodynamic Energy Saving Enhancements for DDG 51-Class Ships. *Naval Engineers Journal*, 124(2), 123 – 138.
- [58] **Shen, Y. T., Jiang, C. W., Remmers, K. D.** (1997). A Twisted Rudder for Reduced Cavitation. *Journal of Ship Research*, 41(4), 260 – 272.

## **EKLER**

**EK A:** Sabit şiddetli kaynak panel yöntemiyle tek cisim etrafındaki akış

**EK B:** Sabit şiddetli kaynak dipol yöntemiyle tek cisim etrafındaki akış

**EK C:** Ek A ve Ek B için örnek bir girdi dosyası

**EK D:** Sabit şiddetli kaynak panel yöntemiyle etkileşimin hesaplanması

**EK E:** Sabit şiddetli kaynak dipol yöntemiyle etkileşimin hesaplanması

**EK F:** Ek D ve Ek E için örnek bir girdi dosyası

## EK A – SABİT ŞİDDETLİ KAYNAK PANEL YÖNTEMİYLE TEK CİSİM ETRAFINDAKİ AKIŞ

```
PARAMETER(NDIM=500)

DIMENSION
EP(NDIM,2),EPT(NDIM,2),PT1(NDIM,2),PT2(NDIM,2),TH(NDIM),
&CO(NDIM,2),A(NDIM,NDIM),G(NDIM),DLEN(NDIM),CP(NDIM),
&XN(NDIM),ZN(NDIM),DL(NDIM),B(NDIM,NDIM)

OPEN(9,FILE='new_geom.dat')

OPEN(10,FILE='output.dat')

PI=3.1415927

TPI=2.0*PI

FPI=4.0*PI

M=201

M1=M+1

ALPHA=0.

ALPHA=ALPHA*PI/180.

UINF=1.0

UINF2=UINF*UINF

DO I=1,M1

READ (9,*) EPT(I,1),EPT(I,2)

END DO

DO I=1,M1

EP(I,1)=EPT(M1-I+1,1)

EP(I,2)=EPT(M1-I+1,2)

END DO
```

```

DO I=1,M
PT1(I,1)=EP(I,1)
PT2(I,1)=EP(I+1,1)
PT1(I,2)=EP(I,2)
PT2(I,2)=EP(I+1,2)
DLEN(I)=SQRT((PT2(I,1)-PT1(I,1))**2+(PT2(I,2)-PT1(I,2))**2)
END DO

```

```

DO I=1,M
DZ=PT2(I,2)-PT1(I,2)
DX=PT2(I,1)-PT1(I,1)
TH(I)=ATAN2(DZ,DX)
RL=SQRT(DX*DX+DZ*DZ)
DZ=DZ/RL
DX=DX/RL
XN(I)=-DZ
ZN(I)=DX
END DO

```

```

DO I=1,M
CO(I,1)=(PT2(I,1)-PT1(I,1))/2+PT1(I,1)
CO(I,2)=(PT2(I,2)-PT1(I,2))/2+PT1(I,2)
END DO

```

```

DO I=1,M

```

```

DO J=1,M
XT=CO(I,1)-PT1(J,1)
ZT=CO(I,2)-PT1(J,2)
X2T=PT2(J,1)-PT1(J,1)
Z2T=PT2(J,2)-PT1(J,2)
X=XT*COS(TH(J))+ZT*SIN(TH(J))
Z=-XT*SIN(TH(J))+ZT*COS(TH(J))
X2=X2T*COS(TH(J))+Z2T*SIN(TH(J))
Z2=0.
  IF (I.EQ.1) DL(J)=X2
R1=SQRT(X*X+Z*Z)
R2=SQRT((X-X2)*(X-X2)+Z*Z)
TH1=ATAN2(Z,X)
TH2=ATAN2(Z,X-X2)
  IF (I.EQ.J) THEN
    UL=0.0
    WL=0.5
  ELSE
    UL=LOG(R1/R2)/TPI
    WL=(TH2-TH1)/TPI
  END IF
  U=UL*COS(-TH(J))+WL*SIN(-TH(J))
  W=-UL*SIN(-TH(J))+WL*COS(-TH(J))
  A(I,J)=-U*SIN(TH(I))+W*COS(TH(I))
  B(I,J)=U*COS(TH(I))+W*SIN(TH(I))
END DO

```

```

        A(I,M1)=SIN(TH(I))
END DO

CALL GAJOR(M,A,G,NDIM)

DO I=1,M
    VEL=0.0
    DO J=1,M
        VEL=VEL+B(I,J)*G(J)
    ENDDO !END OF J LOOP
    CP(I)=1.0-(VEL+COS(TH(I)))**2
    WRITE(10,*) CO(I,1),-CP(I)
END DO

    CLOSE(10)

END

SUBROUTINE GAJOR(M,A,G,NDIM)
DIMENSION A(NDIM,NDIM),G(NDIM)
EPS=1.E-8
M1=M+1
DETER=1.
DO 9 K=1,M
    DETER=DETER*A(K,K)
    IF (ABS(A(K,K)).GT.EPS) GOTO 5

```

```

WRITE(10,202)
202 FORMAT('SMALL PIVOT-MATRIX MAY BE SINGULAR')
GOTO 1
5  KP1=K+1
DO 6 J=KP1,M1
6  A(K,J)=A(K,J)/A(K,K)
A(K,K)=1.
DO 9 I=1,M
IF (I-K) 21,9,21
21 IF (A(I,K)-0.) 20,9,20
20 DO 8 J=KP1,M1
8  A(I,J)=A(I,J)-A(I,K)*A(K,J)
A(I,K)=0.0
9  CONTINUE
DO 12 I=1,M
12 G(I)=A(I,M1)
1  RETURN
END

```

## EK B – SABİT ŞİDDETLİ KAYNAK DİPOL YÖNTEMİYLE TEK CİSİM ETRAFINDAKİ AKIŞ

PARAMETER(NDIM=500)

DIMENSION

EP(NDIM,2),PT1(NDIM,2),PT2(NDIM,2),TH(NDIM),CO(NDIM,2),

&

A(NDIM,NDIM),G(NDIM),EPT(NDIM,2),SIG(NDIM),PHI(NDIM),DL(NDIM),

& XN(NDIM),ZN(NDIM),CP(NDIM)

OPEN(9,FILE='naca0012-100panels(5) - 1.dat')

OPEN(10,FILE='0012-100(5)-cp-cdsm.dat')

PI=3.1415927

TPI=2.0\*PI

M=100

M1=M+1

ALPHA=0.

ALPHA=ALPHA\*PI/180.

UINF=1.

UINF2=UINF\*UINF

CHORD=1.0

DO I=1,M1

READ (9,\*) EPT(I,1),EPT(I,2)

END DO

DO I=1,M1

EP(I,1)=EPT(M1-I+1,1)

EP(I,2)=EPT(M1-I+1,2)

END DO

DO I=1,M

PT1(I,1)=EP(I,1)

PT2(I,1)=EP(I+1,1)

PT1(I,2)=EP(I,2)

PT2(I,2)=EP(I+1,2)

DL(I)=SQRT((PT2(I,1)-PT1(I,1))\*\*2+(PT2(I,2)-PT1(I,2))\*\*2)

END DO

DO I=1,M

DZ=PT2(I,2)-PT1(I,2)

DX=PT2(I,1)-PT1(I,1)

TH(I)=ATAN2(DZ,DX)

RL=SQRT(DX\*DX+DZ\*DZ)

DZ=DZ/RL

DX=DX/RL

XN(I)=-DZ

ZN(I)=DX

END DO

DO I=1,M

CO(I,1)=(PT2(I,1)-PT1(I,1))/2+PT1(I,1)

CO(I,2)=(PT2(I,2)-PT1(I,2))/2+PT1(I,2)

```

END DO

TOTSIG=0.

DO I=1,M

SIG(I)=SIN(TH(I))*UINF

TOTSIG=TOTSIG+SIG(I)*DL(I)

END DO

IWAKE=1

DO I=1,M

TEMP=0.

TEMP1=0.

DO J=1,M

WK=0.

IF (IWAKE.EQ.1) THEN

IF (J.EQ.1.OR.J.EQ.M) THEN

XW=CO(I,1)-PT2(M,1)

ZW=CO(I,2)-PT2(M,2)

RW2=XW*XW+ZW*ZW

WAKE=ATAN(ZW/XW)/TPI

WK=WAKE

IF (J.EQ.1) THEN

WK=-WAKE

END IF

END IF

END IF

```

```

XT=CO(I,1)-PT1(J,1)
ZT=CO(I,2)-PT1(J,2)
X2T=PT2(J,1)-PT1(J,1)
Z2T=PT2(J,2)-PT1(J,2)
X=XT*COS(TH(J))+ZT*SIN(TH(J))
Z=-XT*SIN(TH(J))+ZT*COS(TH(J))
X2=X2T*COS(TH(J))+Z2T*SIN(TH(J))
Z2=0.
  IF (I.EQ.1) DL(J)=X2
R1=SQRT(X*X+Z*Z)
R2=SQRT((X-X2)*(X-X2)+Z*Z)
TH1=ATAN2(Z,X)
TH2=ATAN2(Z,X-X2)
  IF (I.EQ.J) THEN
    A(I,J)=0.5+WK
  ELSE
    A(I,J)=-((TH2-TH1)/TPI+WK)
  END IF
TEMP=TEMP+(SIG(J)/TPI)*(X*LOG(R1)-(X-X2)*LOG(R2)+Z*(TH2-TH1)-
X2)
END DO
A(I,M1)=TEMP
END DO

CALL GAJOR(M,A,G,NDIM)
DO I=1,M

```

```

PHI(I)=UINF*CO(I,1)+G(I)

END DO

GAMA=0.

DO I=1,M-1

R=(DL(I+1)+DL(I))/2.

VEL=(PHI(I)-PHI(I+1))/R

GAMA=GAMA+VEL*R

CP(I)=1.-VEL*VEL/UINF2

WRITE(10,*) PT2(I,1),CP(I)

END DO

TOTCL=0.

CP(M)=CP(1)

DO I=1,M

DCL=CP(I)*DL(I)*COS(TH(I))/CHORD

TOTCL=TOTCL+DCL

END DO

CL=-TOTCL*SIN(ALPHA)

WRITE(*,*) -TOTCL,-2*GAMA

TETA=TPI

DT=TPI/M

DO I=1,M

TETA=TETA-DT

CPANALY=1.0-4.0*(SIN(TETA))**2

WRITE(11,*) COS(TETA),-CPANALY

```

ENDDO

END

SUBROUTINE GAJOR(M,A,G,NDIM)

DIMENSION A(NDIM,NDIM),G(NDIM)

EPS=1.E-8

M1=M+1

DETER=1.

DO 9 K=1,M

DETER=DETER\*A(K,K)

IF (ABS(A(K,K)).GT.EPS) GOTO 5

WRITE(8,202)

202 FORMAT('SMALL PIVOT-MATRIX MAY BE SINGULAR')

GOTO 1

5 KP1=K+1

DO 6 J=KP1,M1

6 A(K,J)=A(K,J)/A(K,K)

A(K,K)=1.

DO 9 I=1,M

IF (I-K) 21,9,21

21 IF (A(I,K)-0.) 20,9,20

20 DO 8 J=KP1,M1

8 A(I,J)=A(I,J)-A(I,K)\*A(K,J)

A(I,K)=0.0

9 CONTINUE

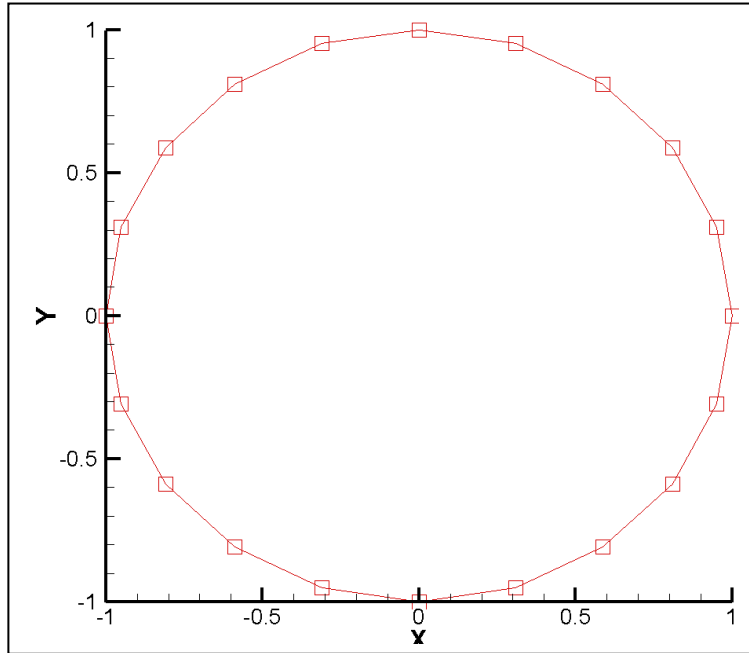
```
DO 12 I=1,M
12 G(I)=A(I,M1)
1 RETURN
END
```

## EK C – EK A VE EK B İÇİN ÖRNEK BİR GİRDİ DOSYASI

Burada Ek A ve Ek B’de verilen programlarda girdi olarak kullanılabilir örnek bir dosya verilmiştir. Bu dosyada koordinatları verilen geometri yarıçapı bir birim olan bir dairedir. Ek A ve Ek B’deki programlara girdi olarak kullanılacak dosyada, koordinatları verilen geometrinin sıralanış biçiminin yönü önemlidir. Burada, fark edilebileceği gibi koordinatlar saat yönünün tersi yönünde verilmiştir.

Çizelge C.1 : İki boyutlu silindirin koordinatları.

X	Y
1	0
0.9511	0.309
0.809	0.5878
0.5878	0.809
0.309	0.9511
0	1
-0.309	0.9511
-0.5878	0.809
-0.809	0.5878
-0.9511	0.309
-1	0
-0.9511	-0.309
-0.809	-0.5878
-0.5878	-0.809
-0.309	-0.9511
0	-1
0.309	-0.9511
0.5878	-0.809
0.809	-0.5878
0.9511	-0.309
1	0



Şekil C.1 : İki boyutlu silindir geometrisi.

## EK D – SABİT ŞİDDETLİ KAYNAK PANEL YÖNTEMİYLE ETKİLEŞİMİN HESAPLANMASI

PARAMETER(NDIM=1000)

DOUBLE PRECISION EP1(NDIM,2),EPT1(NDIM,2),PT11(NDIM,2),

&TH1(NDIM),CO1(NDIM,2),A1(NDIM,NDIM),G1(NDIM),DLEN(NDIM),CP1(NDIM),

&CP2(NDIM),XN1(NDIM),ZN1(NDIM),DL(NDIM),B1(NDIM,NDIM),EP2(NDIM,2),

&EPT2(NDIM,2),PT21(NDIM,2),PT22(NDIM,2),CO2(NDIM,2),TH2(NDIM),

&XN2(NDIM),ZN2(NDIM),UI1(NDIM,NDIM),WI1(NDIM,NDIM),UI2(NDIM,NDIM),

&WI2(NDIM,NDIM),A2(NDIM,NDIM),B2(NDIM,NDIM),G2(NDIM),PT12(NDIM,2),

&AI1(NDIM,NDIM),BI1(NDIM,NDIM),AI2(NDIM,NDIM),BI2(NDIM,NDIM)

real etime

real elapsed(2)

real total

OPEN(9,FILE='naca0012-500panels - 1.dat')

OPEN(10,FILE='naca0012-500panels - 2.dat')

OPEN(11,FILE='0012-0012(500)-1.05.dat')

PI=3.1415927

TPI=2.0\*PI

M=500

M1=M+1

DO I=1,M1

READ (9,\*) EPT1(I,1),EPT1(I,2)

READ(10,\*) EPT2(I,1),EPT2(I,2)

END DO

DO I=1,M1

EP1(I,1)=EPT1(M1-I+1,1)

EP1(I,2)=EPT1(M1-I+1,2)

EP2(I,1)=EPT2(M1-I+1,1)+1.05

EP2(I,2)=EPT2(M1-I+1,2)

END DO

DO I=1,M

PT11(I,1)=EP1(I,1)

PT12(I,1)=EP1(I+1,1)

PT11(I,2)=EP1(I,2)

PT12(I,2)=EP1(I+1,2)

PT21(I,1)=EP2(I,1)

PT22(I,1)=EP2(I+1,1)

PT21(I,2)=EP2(I,2)

PT22(I,2)=EP2(I+1,2)

END DO

```

DO I=1,M
DZ1=PT12(I,2)-PT11(I,2)
DX1=PT12(I,1)-PT11(I,1)
TH1(I)=ATAN2(DZ1,DX1)
RL1=SQRT(DX1*DX1+DZ1*DZ1)
DZ1=DZ1/RL1
DX1=DX1/RL1
XN1(I)=-DZ1
ZN1(I)=DX1
DZ2=PT22(I,2)-PT21(I,2)
DX2=PT22(I,1)-PT21(I,1)
TH2(I)=ATAN2(DZ2,DX2)
RL2=SQRT(DX2*DX2+DZ2*DZ2)
DZ2=DZ2/RL2
DX2=DX2/RL2
XN2(I)=-DZ2
ZN2(I)=DX2
END DO

```

```

DO I=1,M
CO1(I,1)=(PT12(I,1)-PT11(I,1))/2+PT11(I,1)
CO1(I,2)=(PT12(I,2)-PT11(I,2))/2+PT11(I,2)
CO2(I,1)=(PT22(I,1)-PT21(I,1))/2+PT21(I,1)
CO2(I,2)=(PT22(I,2)-PT21(I,2))/2+PT21(I,2)
END DO

```

```
CALL SRCSTR(CO1,PT11,PT12,TH1,A1,B1,M,NDIM) !A1 MATRISI
DUZENLENDI
```

```
CALL GAJOR(M,A1,G1,NDIM) !A1 MATRISI BOZULDU
```

```
CALL SRCSTR(CO2,PT21,PT22,TH2,A2,B2,M,NDIM) !A2 MATRISI
DUZENLENDI
```

```
U=1
```

```
ITER=0
```

```
TMPIT=1000
```

```
DO H=1,TMPIT
```

```
    ITER=ITER+1
```

```
    CALL SRCSTR(CO1,PT11,PT12,TH1,A1,B1,M,NDIM) !A1 MATRISI
    DUZELTILDI
```

```
    CALL INTRC(CO2,PT11,PT12,TH1,UI2,WI2,AI2,BI2,M,NDIM,G1)
```

```
    DO I=1,M
```

```
        A2(I,M1)=0.0
```

```
        DO J=1,M
```

```
            A2(I,M1)=A2(I,M1)+AI2(I,J)*G1(J)
```

```
        END DO
```

```
        A2(I,M1)=A2(I,M1)+SIN(TH2(I))
```

```
    END DO
```

```
    CALL GAJOR(M,A2,G2,NDIM) !A2 MATRISI BOZULDU
```

```
    CALL SRCSTR(CO2,PT21,PT22,TH2,A2,B2,M,NDIM) !A2 MATRISI
    DUZELTILDI
```

```
    CALL INTRC(CO1,PT21,PT22,TH2,UI1,WI1,AI1,BI1,M,NDIM,G2)
```

```
    DO I=1,M
```

```

A1(I,M1)=0.0

DO J=1,M
A1(I,M1)=A1(I,M1)+AI1(I,J)*G2(J)
END DO

A1(I,M1)=A1(I,M1)+SIN(TH1(I))

END DO

CALL GAJOR(M,A1,G1,NDIM) !A1 MATRISI BOZULDU

IF(H.EQ.U) THEN

GS=G1(1)

U=U+2

ELSE IF(H.EQ.U-1) THEN

GE=G1(1)

END IF

IF(ABS(GE-GS).LE.1E-5) EXIT

END DO

WRITE(*,*) 'TOTAL NUMBER OF ITERATIONS: ',ITER

WRITE(*,*)

DO I=1,M

VEL=0.0

DO J=1,M

VEL=VEL+B1(I,J)*G1(J)+BI1(I,J)*G2(J)

END DO

CP1(I)=1.0-(VEL+COS(TH1(I)))**2

WRITE(11,*) CO1(I,1),-CP1(I)

```

```
END DO
```

```
DO I=1,M
```

```
VEL=0.0
```

```
DO J=1,M
```

```
VEL=VEL+B2(I,J)*G2(J)+BI2(I,J)*G1(J)
```

```
END DO
```

```
CP2(I)=1.0-(VEL+COS(TH2(I)))**2
```

```
WRITE(11,*) CO2(I,1),-CP2(I)
```

```
END DO
```

```
total = etime(elapsed)
```

```
print *, 'End: total=', total, ' user=', elapsed(1),
```

```
&      ' system=', elapsed(2)
```

```
stop
```

```
END
```

```
SUBROUTINE INTRC(CO,PT1,PT2,TH,UI,WI,AI,BI,M,NDIM,G)
```

```
DOUBLE PRECISION CO(NDIM,2),PT1(NDIM,2),PT2(NDIM,2),TH(NDIM),
```

```
&G(NDIM),UI(NDIM,NDIM),WI(NDIM,NDIM),AI(NDIM,NDIM),BI(NDIM,NDI  
M)
```

```
PI=3.1415927
```

```
TPI=2.0*PI
```

```
UINF=1.0
```

```
DO I=1,M
```

```

DO J=1,M
XT=CO(I,1)-PT1(J,1)
ZT=CO(I,2)-PT1(J,2)
X2T=PT2(J,1)-PT1(J,1)
Z2T=PT2(J,2)-PT1(J,2)
X=XT*COS(TH(J))+ZT*SIN(TH(J))
Z=-XT*SIN(TH(J))+ZT*COS(TH(J))
X2=X2T*COS(TH(J))+Z2T*SIN(TH(J))
Z2=0.0
R1=SQRT(X*X+Z*Z)
R2=SQRT((X-X2)*(X-X2)+Z*Z)
TH1=ATAN2(Z,X)
TH2=ATAN2(Z,X-X2)
UL=LOG(R1/R2)/TPI
WL=(TH2-TH1)/TPI
UI(I,J)=UL*COS(-TH(J))+WL*SIN(-TH(J))
WI(I,J)=-UL*SIN(-TH(J))+WL*COS(-TH(J))
AI(I,J)=-UI(I,J)*SIN(TH(I))+WI(I,J)*COS(TH(I))
BI(I,J)=UI(I,J)*COS(TH(I))+WI(I,J)*SIN(TH(I))
END DO
END DO
END

SUBROUTINE SRCSTR(CO,PT1,PT2,TH,A,B,M,NDIM)
DOUBLE PRECISION CO(NDIM,2),PT1(NDIM,2),PT2(NDIM,2),TH(NDIM),
&A(NDIM,NDIM),B(NDIM,NDIM)

```

```

PI=3.1415927
TPI=2.0*PI
M1=M+1
DO I=1,M
  DO J=1,M
    XT=CO(I,1)-PT1(J,1)
    ZT=CO(I,2)-PT1(J,2)
    X2T=PT2(J,1)-PT1(J,1)
    Z2T=PT2(J,2)-PT1(J,2)
    X=XT*COS(TH(J))+ZT*SIN(TH(J))
    Z=-XT*SIN(TH(J))+ZT*COS(TH(J))
    X2=X2T*COS(TH(J))+Z2T*SIN(TH(J))
    Z2=0.
    R1=SQRT(X*X+Z*Z)
    R2=SQRT((X-X2)*(X-X2)+Z*Z)
    TH1=ATAN2(Z,X)
    TH2=ATAN2(Z,X-X2)
    IF (I.EQ.J) THEN
      UL=0.0
      WL=0.5
    ELSE
      UL=LOG(R1/R2)/TPI
      WL=(TH2-TH1)/TPI
    END IF
    U=UL*COS(-TH(J))+WL*SIN(-TH(J))
    W=-UL*SIN(-TH(J))+WL*COS(-TH(J))
  
```

A(I,J)=-U\*SIN(TH(I))+W\*COS(TH(I))

B(I,J)=U\*COS(TH(I))+W\*SIN(TH(I))

END DO

A(I,M1)=SIN(TH(I))

END DO

END

SUBROUTINE GAJOR(M,A,G,NDIM)

DOUBLE PRECISION A(NDIM,NDIM),G(NDIM)

EPS=1.E-8

M1=M+1

DETER=1.

DO 9 K=1,M

DETER=DETER\*A(K,K)

IF (ABS(A(K,K)).GT.EPS) GOTO 5

WRITE(10,202)

202 FORMAT('SMALL PIVOT-MATRIX MAY BE SINGULAR')

GOTO 1

5 KP1=K+1

DO 6 J=KP1,M1

6 A(K,J)=A(K,J)/A(K,K)

A(K,K)=1.

DO 9 I=1,M

IF (I-K) 21,9,21

21 IF (A(I,K)-0.) 20,9,20

20 DO 8 J=KP1,M1

```
8  A(I,J)=A(I,J)-A(I,K)*A(K,J)
   A(I,K)=0.0
9  CONTINUE
   DO 12 I=1,M
12  G(I)=A(I,M1)
1  RETURN
   END
```

## EK E – SABİT ŞİDDETLİ KAYNAK DİPOL YÖNTEMİYLE ETKİLEŞİMİN HESAPLANMASI

PARAMETER(NDIM=500)

DOUBLE PRECISION

EP1(NDIM,2),EPT1(NDIM,2),PT11(NDIM,2),TH1(NDIM),

&CO1(NDIM,2),A1(NDIM,NDIM),G1(NDIM),DLEN(NDIM),CP1(NDIM),CP2(NDIM),

&XN1(NDIM),ZN1(NDIM),DL(NDIM),B1(NDIM,NDIM),EP2(NDIM,2),TH2(NDIM),

&EPT2(NDIM,2),PT21(NDIM,2),PT22(NDIM,2),CO2(NDIM,2),B2(NDIM,NDIM)

&XN2(NDIM),ZN2(NDIM),UI1(NDIM,NDIM),WI1(NDIM,NDIM),UI2(NDIM,NDIM),

&WI2(NDIM,NDIM),A2(NDIM,NDIM),G2(NDIM),DL1(NDIM),BI1(NDIM,NDIM),

&AI1(NDIM),AI2(NDIM),BI2(NDIM,NDIM),SIG1(NDIM),SI1(NDIM),SI2(NDIM),

&SIG2(NDIM),S1(NDIM),S2(NDIM),DL2(NDIM),PHI1(NDIM),PHI2(NDIM),

&PT12(NDIM,2),PTOT1(NDIM),PTOT2(NDIM)

OPEN(9,FILE='naca0001-100panels - 1.dat')

OPEN(10,FILE='naca0001-100panels - 2.dat')

OPEN(11,FILE='0001-0001-1.01.dat')

OPEN(12,FILE='gorunum.dat')

PI=3.1415926535

TPI=2.0\*PI

M=100

M1=M+1

UINF=1.0

UINF2=UINF\*\*2

CHORD=1.0

DO I=1,M1

READ (9,\*) EPT1(I,1),EPT1(I,2)

READ(10,\*) EPT2(I,1),EPT2(I,2)

END DO

DO I=1,M1

EP1(I,1)=EPT1(M1-I+1,1)

EP1(I,2)=EPT1(M1-I+1,2)

EP2(I,1)=EPT2(M1-I+1,1)+1.01

EP2(I,2)=EPT2(M1-I+1,2)

END DO

DO I=1,M1

WRITE(12,\*) EP1(I,1),EP1(I,2)

END DO

DO I=1,M1

WRITE(12,\*) EP2(I,1),EP2(I,2)

END DO

DO I=1,M

PT11(I,1)=EP1(I,1)

PT12(I,1)=EP1(I+1,1)

PT11(I,2)=EP1(I,2)

PT12(I,2)=EP1(I+1,2)

DL1(I)=SQRT((PT12(I,1)-PT11(I,1))\*\*2+(PT12(I,2)-PT11(I,2))\*\*2)

PT21(I,1)=EP2(I,1)

PT22(I,1)=EP2(I+1,1)

PT21(I,2)=EP2(I,2)

PT22(I,2)=EP2(I+1,2)

DL2(I)=SQRT((PT22(I,1)-PT21(I,1))\*\*2+(PT22(I,2)-PT21(I,2))\*\*2)

END DO

DO I=1,M

DZ1=PT12(I,2)-PT11(I,2)

DX1=PT12(I,1)-PT11(I,1)

TH1(I)=ATAN2(DZ1,DX1)

RL1=SQRT(DX1\*DX1+DZ1\*DZ1)

DZ1=DZ1/RL1

DX1=DX1/RL1

XN1(I)=-DZ1

ZN1(I)=DX1

DZ2=PT22(I,2)-PT21(I,2)

DX2=PT22(I,1)-PT21(I,1)

```

TH2(I)=ATAN2(DZ2,DX2)

RL2=SQRT(DX2*DX2+DZ2*DZ2)

DZ2=DZ2/RL2

DX2=DX2/RL2

XN2(I)=-DZ2

ZN2(I)=DX2

END DO

```

```

DO I=1,M

CO1(I,1)=(PT12(I,1)-PT11(I,1))/2+PT11(I,1)

CO1(I,2)=(PT12(I,2)-PT11(I,2))/2+PT11(I,2)

CO2(I,1)=(PT22(I,1)-PT21(I,1))/2+PT21(I,1)

CO2(I,2)=(PT22(I,2)-PT21(I,2))/2+PT21(I,2)

END DO

```

```

CALL DPLSTR(CO1,PT11,PT12,TH1,SIG1,S1,A1,M,NDIM) !A1 MATRISI
DUZENLENDI

```

```

CALL GAJOR(M,A1,G1,NDIM) !A1 MATRISI BOZULDU

```

```

CALL DPLSTR(CO2,PT21,PT22,TH2,SIG2,S2,A2,M,NDIM) !A2 MATRISI
DUZENLENDI

```

```

U=1

```

```

ITER=0

```

```

TMPIT=200

```

```

DO H=1,TMPIT

```

```

    ITER=ITER+1

```

```
CALL DPLSTR(CO1,PT11,PT12,TH1,SIG1,S1,A1,M,NDIM) !A1 MATRISI
DUZELTILDI
```

```
CALL INTRC(CO2,PT11,PT12,TH1,SIG1,SI2,AI2,M,NDIM,G1)
```

```
DO I=1,M
```

```
A2(I,M1)=-AI2(I)+SI2(I)+S2(I)
```

```
END DO
```

```
CALL GAJOR(M,A2,G2,NDIM) !A2 MATRISI BOZULDU
```

```
CALL DPLSTR(CO2,PT21,PT22,TH2,SIG2,S2,A2,M,NDIM) !A2 MATRISI
DUZELTILDI
```

```
CALL INTRC(CO1,PT21,PT22,TH2,SIG2,SI1,AI1,M,NDIM,G2)
```

```
DO I=1,M
```

```
A1(I,M1)=-AI1(I)+SI1(I)+S1(I)
```

```
END DO
```

```
CALL GAJOR(M,A1,G1,NDIM) !A1 MATRISI BOZULDU
```

```
IF(H.EQ.U) THEN
```

```
GS=G1(1)
```

```
U=U+2
```

```
ELSE IF(H.EQ.U-1) THEN
```

```
GE=G1(1)
```

```
END IF
```

```
IF(ABS(GE-GS).LE.1E-5) EXIT
```

```
END DO
```

```
WRITE(*,*) 'TOTAL NUMBER OF ITERATIONS: ',ITER
```

```
WRITE(*,*)
```

```

DO I=1,M

PHI1(I)=UINF*CO1(I,1)+G1(I)

PHI2(I)=UINF*CO2(I,1)+G2(I)

END DO

GAMA1=0.

DO I=1,M-1

R1=(DL1(I+1)+DL1(I))/2.

VEL1=(PHI1(I)-PHI1(I+1))/R1

CP1(I)=1.-VEL1*VEL1/UINF2

WRITE(11,*) PT12(I,1),-CP1(I)

GAMA1=GAMA1+VEL1*R1

END DO

WRITE(*,*) 'CIRCULATION OF 1ST BODY  :',-GAMA1

GAMA2=0.

DO I=1,M-1

R2=(DL2(I+1)+DL2(I))/2.

VEL2=(PHI2(I)-PHI2(I+1))/R2

CP2(I)=1.-VEL2*VEL2/UINF2

WRITE(11,*) PT22(I,1),-CP2(I)

GAMA2=GAMA2+VEL2*R2

END DO

WRITE(*,*) 'CIRCULATION OF 2ND BODY  :',-GAMA2

WRITE(*,*) 'TOTAL CIRCULATION      :',-GAMA1-GAMA2

```

```

TOTCL1=0.

TOTCL2=0.

CP1(M)=CP1(1)

CP2(M)=CP2(1)

DO I=1,M

DCL1=CP1(I)*DL1(I)*COS(TH1(I))/CHORD

TOTCL1=TOTCL1+DCL1

DCL2=CP2(I)*DL2(I)*COS(TH2(I))/CHORD

TOTCL2=TOTCL2+DCL2

END DO

WRITE(*,*)

WRITE(*,*) 'CIRCULATION OF 1ST BODY  :',-TOTCL1/2

WRITE(*,*) 'CIRCULATION OF 2ND BODY  :',-TOTCL2/2

WRITE(*,*) 'TOTAL CIRCULATION      :',-TOTCL1/2-TOTCL2/2

CLOSE(11)

END

SUBROUTINE DPLSTR(CO,PT1,PT2,TH,SIG,S,A,M,NDIM)

DOUBLE PRECISION CO(NDIM,2),PT1(NDIM,2),PT2(NDIM,2),TH(NDIM),

&A(NDIM,NDIM),SIG(NDIM),S(NDIM)

PI=3.1415927

TPI=2.0*PI

M1=M+1

UINF=1.0

```

```

IWAKE=1

DO I=1,M

S(I)=0.0

DO J=1,M

WK=0.

IF (IWAKE.EQ.1) THEN

IF (J.EQ.1.OR.J.EQ.M) THEN

XW=CO(I,1)-PT2(M,1)

ZW=CO(I,2)-PT2(M,2)

RW2=XW*XW+ZW*ZW

WAKE=ATAN(ZW/XW)/TPI

WK=WAKE

IF (J.EQ.1) THEN

WK=-WAKE

END IF

END IF

END IF

SIG(J)=UINF*SIN(TH(J))

XT=CO(I,1)-PT1(J,1)

ZT=CO(I,2)-PT1(J,2)

X2T=PT2(J,1)-PT1(J,1)

Z2T=PT2(J,2)-PT1(J,2)

X=XT*COS(TH(J))+ZT*SIN(TH(J))

Z=-XT*SIN(TH(J))+ZT*COS(TH(J))

X2=X2T*COS(TH(J))+Z2T*SIN(TH(J))

Z2=0.

```

```

R1=SQRT(X*X+Z*Z)
R2=SQRT((X-X2)*(X-X2)+Z*Z)
TH1=ATAN2(Z,X)
TH2=ATAN2(Z,X-X2)
IF (I.EQ.J) THEN
  A(I,J)=0.5+WK
ELSE
  A(I,J)=-((TH2-TH1)/TPI+WK)
END IF
S(I)=S(I)+(SIG(J)/TPI)*(X*LOG(R1)-(X-X2)*LOG(R2)+Z*(TH2-TH1)-X2)
END DO
A(I,M1)=S(I) !SAĞ TARAF VEKTÖRÜ
END DO
END

SUBROUTINE INTRC(CO,PT1,PT2,TH,SIG,SI,AI,M,NDIM,G)
DOUBLE PRECISION CO(NDIM,2),PT1(NDIM,2),PT2(NDIM,2),TH(NDIM),
&AI(NDIM),SIG(NDIM),SI(NDIM),G(NDIM)
PI=3.1415927
TPI=2.0*PI
UINF=1.0
IWAKE=1
DO I=1,M
  SI(I)=0.
  AI(I)=0.
  DO J=1,M

```

WK=0.

IF (IWAKE.EQ.1) THEN

IF (J.EQ.1.OR.J.EQ.M) THEN

XW=CO(I,1)-PT2(M,1)

ZW=CO(I,2)-PT2(M,2)

RW2=XW\*XW+ZW\*ZW

WAKE=ATAN(ZW/XW)/TPI

WK=WAKE

IF (J.EQ.1) THEN

WK=-WAKE

END IF

END IF

END IF

SIG(J)=UINF\*SIN(TH(J))

XT=CO(I,1)-PT1(J,1)

ZT=CO(I,2)-PT1(J,2)

X2T=PT2(J,1)-PT1(J,1)

Z2T=PT2(J,2)-PT1(J,2)

X=XT\*COS(TH(J))+ZT\*SIN(TH(J))

Z=-XT\*SIN(TH(J))+ZT\*COS(TH(J))

X2=X2T\*COS(TH(J))+Z2T\*SIN(TH(J))

Z2=0.

R1=SQRT(X\*X+Z\*Z)

R2=SQRT((X-X2)\*(X-X2)+Z\*Z)

TH1=ATAN2(Z,X)

TH2=ATAN2(Z,X-X2)

```

AI(I)=AI(I)+(G(J))*(-(TH2-TH1)/TPI+WK)
SI(I)=SI(I)+(SIG(J)/TPI)*(X*LOG(R1)-(X-X2)*LOG(R2)+Z*(TH2-TH1)-X2)
END DO
END DO
END

SUBROUTINE GAJOR(M,A,G,NDIM)
DOUBLE PRECISION A(NDIM,NDIM),G(NDIM)
EPS=1.E-8
M1=M+1
DETER=1.
DO 9 K=1,M
DETER=DETER*A(K,K)
IF (ABS(A(K,K)).GT.EPS) GOTO 5
WRITE(10,202)
202 FORMAT('SMALL PIVOT-MATRIX MAY BE SINGULAR')
GOTO 1
5 KP1=K+1
DO 6 J=KP1,M1
6 A(K,J)=A(K,J)/A(K,K)
A(K,K)=1.
DO 9 I=1,M
IF (I-K) 21,9,21
21 IF (A(I,K)-0.) 20,9,20
20 DO 8 J=KP1,M1
8 A(I,J)=A(I,J)-A(I,K)*A(K,J)

```



```

X=XT*COS(TH(J))+ZT*SIN(TH(J))
Z=-XT*SIN(TH(J))+ZT*COS(TH(J))
X2=X2T*COS(TH(J))+Z2T*SIN(TH(J))
Z2=0.
R1=SQRT(X*X+Z*Z)
R2=SQRT((X-X2)*(X-X2)+Z*Z)
TH1=ATAN2(Z,X)
TH2=ATAN2(Z,X-X2)
PTOTD=PTOTD-(G(J)/TPI)*(TH2-TH1)
PTOTS=PTOTS+(SIG(J)/TPI)*(X*LOG(R1)-(X-X2)*LOG(R2)+Z*(TH2-TH1)-
X2)
END DO
PTOT(I)=PTOTD-PTOTS
XTE=0.5*(PT1(1,1)+PT2(M,1))
YTE=0.5*(PT1(1,2)+PT2(M,2))
XTE2=ENDWAKE*TLENGTH*COS(ALPHA)
YTE2=ENDWAKE*TLENGTH*SIN(ALPHA)
ANGWK=ATAN2(YTE2-YTE,XTE2-XTE)
XTT=COX(1,1)-COX(M,1)
YTT=COX(1,2)-COX(M,2)
UU=UINF*COS(ALPHA)
VV=UINF*SIN(ALPHA)
DELPHI=G(1)-G(M)+(UU*XTT+VV*YTT)
WI=ATAN2(CO(I,2)-YTE,CO(I,1)-XTE)/TPI
WI2=ATAN2(CO(I,2)-YTE2,CO(I,1)-XTE2)/TPI
WI=WI-ANGWK/TPI

```

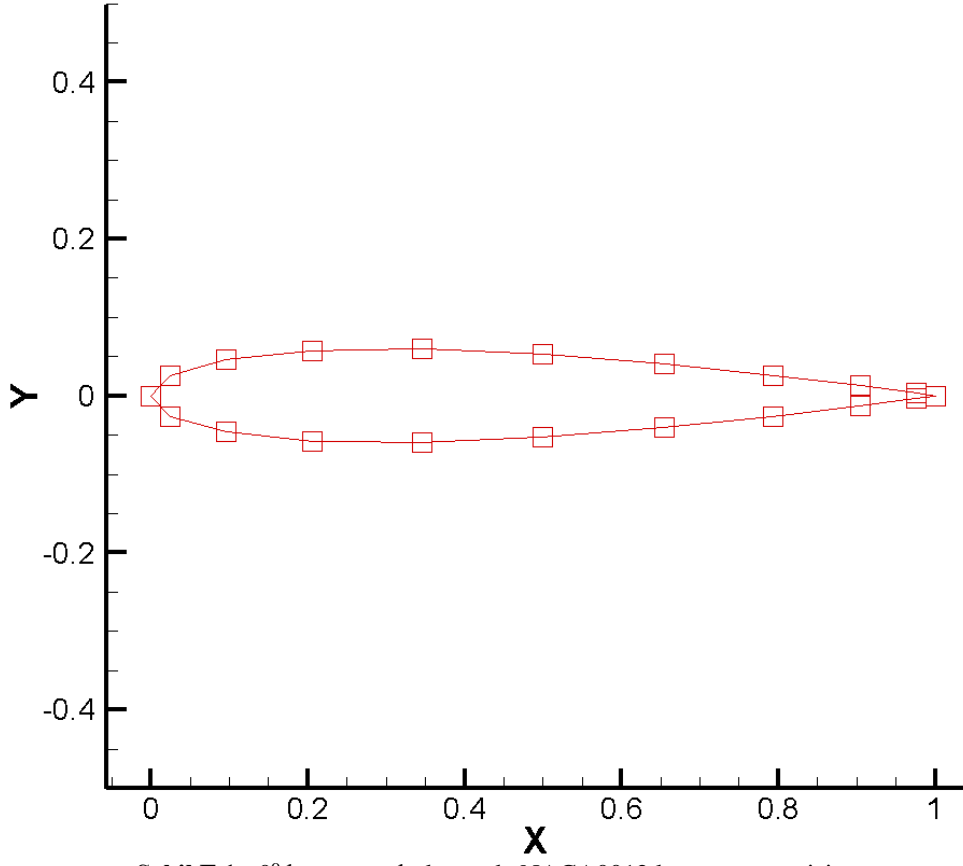
```
W12=W12-ANGWK/TPI
IF (W1.LT.0.) W1=W1+1.
IF (W12.LT.0.) W12=W12+1.
PTOT(I)=PTOT(I)-(W1-W12)*DELPHI
END DO
END
```

## EK F – EK D VE EK E İÇİN ÖRNEK BİR GİRDİ DOSYASI

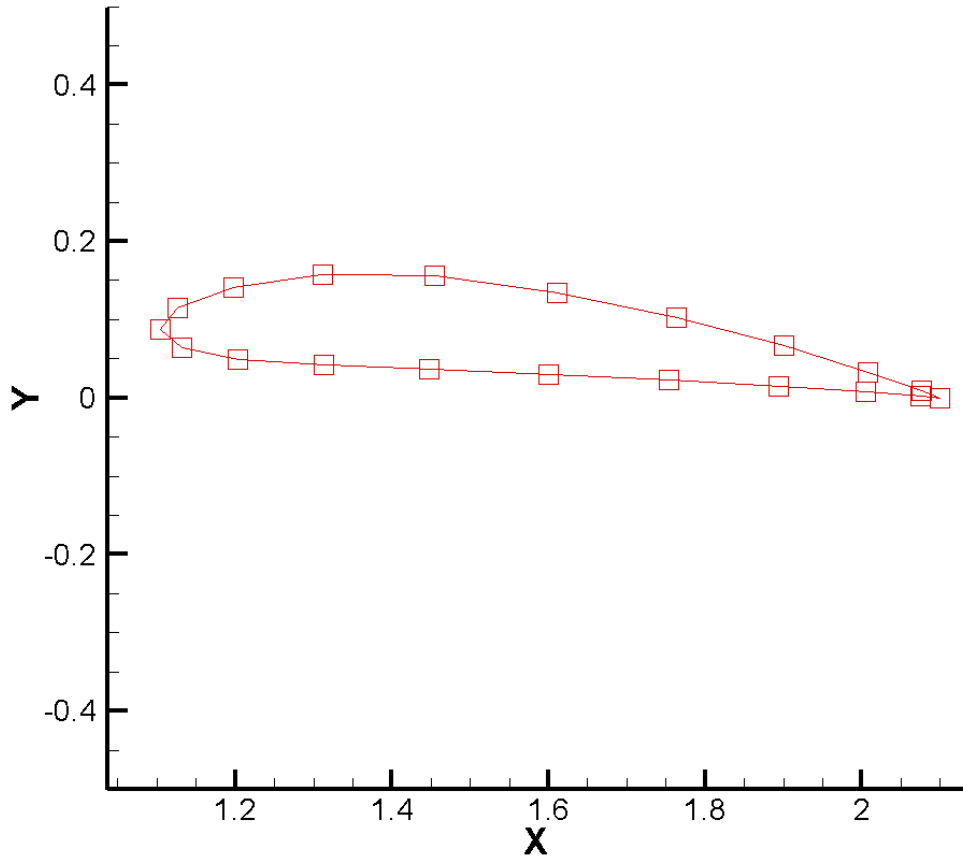
Ek D ve Ek E’de iki cisim etrafındaki akış incelendiğinden iki adet geometri dosyası girdi olarak kullanılmalıdır. Buradaki örnekte kort boyu bir birim olan bir NACA0012 hidrofoili ile 5° hücum açısında yine kort boyu bir birim olan bir NACA4412’nin geometrisi ardışık halde verilmiştir. İki hidrofoilin giriş ucu arasındaki mesafe 1.1 birimdir.

**Çizelge F.1 :** 0° hücum açılı NACA0012 ile 5° hücum açılı NACA4412 kanat koordinatları.

NACA0012		NACA4412 - (5°)	
X	Y	X	Y
1	0	2.1	0
0.9755	0.0034	2.0764	0.0087
0.9045	0.0129	2.0076	0.0328
0.7939	0.0261	1.8999	0.0665
0.6545	0.0404	1.7632	0.1029
0.5	0.0526	1.6104	0.1347
0.3455	0.0594	1.4550	0.1555
0.2061	0.0577	1.3113	0.1573
0.0955	0.0460	1.1975	0.1415
0.0245	0.0259	1.1261	0.1155
0	0	1.1038	0.0872
0.0245	-0.0259	1.1311	0.0640
0.0955	-0.0460	1.2033	0.0496
0.2061	-0.0577	1.3123	0.0420
0.3455	-0.0594	1.4478	0.0368
0.5	-0.0526	1.6002	0.0299
0.6545	-0.0404	1.7542	0.0227
0.7939	-0.0261	1.8934	0.0147
0.9045	-0.0129	2.0042	0.0072
0.9755	-0.0034	2.0754	0.0019
1	0	2.1	0



Şekil F.1 : 0° hücum açılı durumda NACA0012 kanat geometrisi.



Şekil F.2 : 5° hücum açılı durumda NACA4412 kanat geometrisi.

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad:** Ömer Kemal KINACI

**Doğum Yeri ve Tarihi:** İstanbul / 06-02-1984

**Adres:** Barbaros Bulvarı – Yıldız Teknik Üniversitesi

**E-Posta:** kinaci@yildiz.edu.tr

**Lisans:** Deniz Teknolojisi Mühendisliği – İTÜ (Mezuniyet 2007)

**Yüksek Lisans:** Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği – İTÜ (Mezuniyet 2009)

### Mesleki Deneyim ve Ödüller:

- Yıldız Teknik Üniversitesi, Araştırma Görevlisi, Şubat 2010 – Devam ediyor.
- Anadolu Tersanesi, Planlama Mühendisi, Haziran 2007 – Ekim 2008
- Yıldız Tersanesi, Planlama Mühendisi, Eylül 2006 – Mart 2007

### Yayın ve Patent Listesi:

#### Ulusal Dergilerdeki Yayınlar:

- Kınacı, Ö. K., Kükner, A., Bal, Ş., Pervane İz Yüzeyi Üzerinde Dümen Etkisinin İncelenmesi İçin Bir Uygulama, Gemi ve Deniz Teknolojisi, Issue 192, pp. 12-15, (2012)
- Aydın, M., Bal, Ş., Kepeçler, T., Gündoğdu, O., Şener, B., Kınacı, Ö. K., Yıldız, B., Yılmaz, A. İ., Kara ve Deniz Bağlantılı Marmara Ambulans Sistemi (MAS), Gemi ve Deniz Teknolojisi, Issue 191, pp. 17-23, (2012)
- Kükner, A. , Kınacı, O. K., Bodrum Tipi Gulet Yat Serilerinin Matematiksel Modellenmesi, Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi, Issue 181, pp. 13-17, (2009)

#### Ulusal Bildiri

- Çakıcı, F., Kınacı, Ö. K., Yüksek Froude Sayılarında Çalışan Hidrofoiller Üzerinde Serbest Su Yüzeyi Etkisi, Gemi İnşaatı ve Deniz Teknolojisi Teknik Kongresi 2012, pp. 183-192, (2012)

- Kınacı, Ö. K., Kükner, A., Bal, Ş., Pervanenin İz Yüzeyi Üzerinde Dümen Etkisinin İncelenmesi İçin Bir Uygulama, Gemi İnşaatı ve Deniz Teknolojisi Teknik Kongresi 2012, pp. 131-142, (2012)

#### **Uluslar arası Bildiri**

- Doğrul, A., Çakıcı, F., Kınacı, Ö. K., Bayraktar, S., Investigation of the Effects of Gurney Flap on the Lift OF NACA 0012 Airfoil in Varying Lengths, Hydman 2012, pp. 79-88, (2012)
- Kınacı, Ö. K., Kükner, A., Bal, S., A Parametric Study on Tandem Hydrofoil Interaction, Hydman 2012, pp. 145-155, (2012)
- Kinaci, O. K. , Kukner, A. , Bal, S., Interactive Effects of 2-D Bodies in Non-Lifting Flows, INT-NAM 2011, pp. 817-826, (2011)
- Kukner, A. , Kinaci, O. K., A Mathematical Model for Bodrum Type Gulet Vessel's Series, IMAM 2009, Vol. 1, pp. 195-202, (2009)

#### **TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR**

- Kınacı, Ö. K., Kükner, A., Bal, Ş., On the Propeller Performance of DTC – Post Panamax Containership, International Journal of Ocean System Engineering, Vol. 3, No. 2, (2013) – (Kabul yazısı alınmıştır. Temmuz ayında yayınlanması beklenmektedir.)
- Kınacı, Ö. K., Kükner, A., Bal, Ş., Pervane İz Yüzeyi Üzerinde Dümen Etkisinin İncelenmesi İçin Bir Uygulama, Gemi ve Deniz Teknolojisi, Issue 192, pp. 12-15, (2012) – (Mükerrer yayındır. GMO 2012 Kongre Yönetim Kurulu tarafından seçilerek dergide yayınlanmıştır.)
- Kınacı, Ö. K., Kükner, A., Bal, Ş., Pervanenin İz Yüzeyi Üzerinde Dümen Etkisinin İncelenmesi İçin Bir Uygulama, Gemi İnşaatı ve Deniz Teknolojisi Teknik Kongresi 2012, pp. 131-142, (2012)
- Kınacı, Ö. K., Kükner, A., Bal, S., A Parametric Study on Tandem Hydrofoil Interaction, Hydman 2012, pp. 145-155, (2012)
- Kinaci, O. K. , Kukner, A. , Bal, S., Interactive Effects of 2-D Bodies in Non-Lifting Flows, INT-NAM 2011, pp. 817-826, (2011)