

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**VİSKOZ / POTANSİYEL HIZ BİRLEŞTİRME YÖNTEMİ İLE POD / STRUT
BİRLEŞİM BÖLGESİNDEKİ YUVARLATMA GEOMETRİSİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Eren ÖZSU**

Anabilim Dalı : GEMİ İNŞAATI MÜHENDİSLİĞİ

Programı : GEMİ İNŞAATI MÜHENDİSLİĞİ

AĞUSTOS 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**VİSKOZ / POTANSİYEL HIZ BİRLEŞTİRME YÖNTEMİ İLE POD / STRUT
BİRLEŞİM BÖLGESİNDEKİ YUVARLATMA GEOMETRİSİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Eren ÖZSU
(508022002)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30 Aralık 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 17 Ağustos 2010

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ali Can TAKİNACI (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ömer GÖREN (İTÜ)
Prof. Dr. Alim Rüstem ASLAN (İTÜ)
Prof. Dr. Mesut GÜNER (YTÜ)
Prof. Dr. Mehmet ATLAR (UNEW)**

AĞUSTOS 2010

ÖNSÖZ

Bana bu konuda çalışma olanağı sağlayan, her zaman destekleyen ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam, Sayın Prof. Dr. A. Yücel ODABAŞI'nı, tezimin son günlerinde kaybetmenin derin üzüntüsü içerisindeyim. Kendisine bana ve mesleki gelişimime olan değerli katkıları için teşekkür edebilmek için bu doktora çalışmasını saygılarımla Sayın ODABAŞI'na ithaf ediyorum.

Doktora çalışmam süresince her zaman danıştığım, yardım ve desteklerini gördüğüm ve nihayetinde bu tezi birlikte tamamladığım kıymetli hocam Sayın Doç.Dr. Ali Can TAKİNACI'ya teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarım sırasında katkıda bulunan çalışma arkadaşlarım Sayın Salih OBUT ve Dr.Günhan KAYTAZ'a, doktora çalışmalarım süresince her zaman yanımda olan aileme ve hayat arkadaşım Nihan DERİNÖZ'e değerli katkılarından dolayı minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Ağustos 2010

Eren ÖZSU
Gemi İnşaatı Yük. Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
SEMBOL LİSTESİ	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Kapsam	4
1.3 Yöntem	5
2. LİTERATÜR TARAMASI	9
2.1 Potansiyel Akım Teorisi	10
2.1.1 Green Teoremi ve Tekilliklerin Yüzey Üzerinde Dağıtılması	10
2.1.2 VFLOW'da Potansiyel Akım Teorisinin Kullanımı	13
2.2 Viskoz Akım Teorisi (RANS)	17
2.3 FLUENT Programı ile Türbülanslı Akışların Modellenmesi	21
2.3.1 Ağ Örgüsü Modellenmesi	22
2.3.2 FLUENT Programında Kullanılabilen Türbülans Modelleri	23
2.4 Takıntı / Gövde Bağlantıları	24
2.5 Denizaltı (D/A) Üzerindeki Girdaplar	36
3. PANEL METODU İLE YAPILAN HESAPLAMALAR	39
3.1 Giriş	39
3.2 Panel Metotları	39
3.3 Yüzey Ayırıklaştırılması	42
3.4 Yüzey Normalleri	44
3.5 Küre için Hesaplar	44
3.6 Szantyr Pod	47
3.7 Pod / Strut	48
3.8 İmaj Modeli	49
3.9 İz Örgüsü	50
3.10 Pod/Strut Dışındaki Akım Hatları	51
3.11 Yüzey Üzerinden Bırakılan Akım Hatları	53
3.12 Düzlemlerde Hesaplanan Hız Profili	54
3.13 Gelen Hızların Tanımlanması	56
3.14 Sonuç	58
4. VİSKOZ AKIM METODU İLE YAPILAN HESAPLAMALAR	61
4.1 Giriş	61
4.2 Viskoz Hesaplamalarda Takip Edilen İşlem Adımları	61
4.3 Ağ Modelinin Oluşturulması	62
4.4 Yüzey Ağının Oluşturulması	62
4.5 Sınır Şartlarının Tanımlanması	64
4.6 Hesap Değişkenleri	65
4.7 Ağ Örgüsü (Grid) Adaptasyonu	66

4.7.1 Kullanılan Türbülans Modeli	69
4.8 Viskoz Akım Metodu ile Elde Edilen Sonuçlar	69
4.8.1 Sayısal Sonuçlar	69
4.8.2 Pod/Strut Etrafındaki Akım	71
4.9 Sonuç	74
5. ÖNDER KENARDAKİ AKIM AYRILMASI	75
5.1 Giriş	75
5.2 Önder Kenardaki Akım Ayrılması	75
5.3 VFLOW'da Modellenen Önder Kenar Akım Ayrılması	77
5.4 FLUENT'de Modellenen Önder Kenar Akım Ayrılması	79
5.5 Girdabın Varlığı ve Şekli	82
5.5.1 Düşük Kesme Kuvveti Hattı (LOLS)	85
5.6 Sonuçların İrdelenmesi	86
5.7 Sonuç	86
6. VİSKOZ/POTANSİYEL AKIM HIZ BİRLEŞTİRME METODU (COUPLING)	87
6.1 Giriş	87
6.2 Hız Birleştirme Metodu (Coupling)	87
6.3 Potansiyel Akımda Sınır Tabaka Hesaplamaları	91
6.3.1 Deplasman Kalınlığı	92
6.3.2 Laminar Sınır Tabaka Formülasyonu	93
6.3.3 Türbülanslı Sınır Tabaka Formülasyonu	93
6.3.4 Laminar Sınır Tabaka Başlangıç Koşulu Düzeltmesi	94
6.3.5 Panel Merkezinde Sınır Tabaka Hesabı	94
6.4 Viskoz Akımda Sınır Tabaka Hesaplamaları	95
6.4.1 Sınır Tabaka Ağı Oluşturulması	97
6.4.2 Sınır Tabaka İçerisinde Boyutsuz Mesafe Değeri y^+ Dağılımı	99
6.4.3 İlk Hücre Yüksekliğinin Tayin Edilmesi	100
6.5 Hız Profili Hatları	101
6.5.1 Sınır Tabaka Hızlarının Okunması	103
6.5.1.1 Üç Eksendeki Noktasal Hızların Düzgünleştirilmesi ve Gösterimi ..	105
6.6 Potansiyel ve Viskoz Çözümün Birleştirilmesi	107
6.6.1 Birleştirme Sonrası Düzlemlerdeki Hız Konturları	107
6.6.2 Birleştirme Sonrasında Elde Edilen Basınç Katsayısı ve Akım Hatları ..	108
6.6.3 Pervane Düzlemi Hız Konturlarının Değişimi	111
6.7 Sonuçlar	114
7. POD STRUT BİRLEŞİMİ GEOMETRİ DEĞİŞİMİ	115
7.1 Giriş	115
7.2 Pod / Strut Birleşimi Geometri Değişimi	115
7.3 Pod/Strut Yüzey Birleştirme (Blending)	116
7.3.1 Bütün Yuvarlatma Konulması	116
7.3.2 Baş Yuvarlatma Konulması	117
7.4 Karşılaştırmalı Analizler	119
7.4.1 Potansiyel Akış Analizleri Sonucunda Dört Farklı Pod Üzerindeki Basınç Dağılımının Değişimi	120
7.4.2 Atnalı Girdabının Oluşumu	123
7.4.2.1 Potansiyel Çözümde Elde Edilen Sonuçlar	123
7.4.2.2 Viskoz Çözümde Elde Edilen Sonuçlar	125
7.5 Baş Yuvarlatma Eklenmesinin Hız Birleştirme Metodu ile İrdelenmesi	127
7.6 Sonuç	130
8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	131
8.1 Öneriler	133
KAYNAKLAR	135
EKLER	141

KISALTMALAR

AIAA	: American Institute of Aeronautics and Astronautics
BEM	: Boundary Element Method (Sınır Elemanları Metodu)
BMTI	: BMT International Inc
CFD	: Computational Fluid Dynamics (Hesaplama Akışkanlar Dinamiği)
D/A	: Denizaltı
DNS	: Direct Numerical Simulation (Doğrudan Sayısal Benzeşim)
FASTPOD	: Fast Ship Applications for Pod Drives
FF	: Forward Fillet
FF02	: Forward Fillet R=0.2
FF03	: Forward Fillet R=0.3
FF04	: Forward Fillet R=0.4
FLUENT	: Hesaplama Akışkanlar Dinamiği ile Çözüm Yapan Ticari Program
GAMBIT	: Sonlu Elemanlar Yöntemi için Ağ Oluşturma Programı
HAD	: Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
HPH	: Hız Profil Hattı Laser Doppler Anemometry
ITTC	: International Towing Tank Conference
LDA	: Laser Doppler Anemometry
LES	: Large Eddy Simulation (Büyük Girdap Benzeşimi)
NACA	: National Advisory Committee for Aeronautics
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NURBS	: Non Uniform Rational B-Splines
OPTIPOD	: Optimum Design and Implementation of Azimuthing Pods for the Safe and Efficient Propulsion of Ships
PMARC	: Panel Method Ames Research Center (Potansiyel Akım Yöntemi ile Çözüm Yapan FORTRAN Programı)
RANS	: Reynolds Averaged Navier Stokes (Reynolds Ortalamalı Navier Stokes Denklemleri)
RAM	: Bilgisayar Bellek Kapasitesi (Random Access Memory)
SIMPLE	: Semi-Implicit Pressure Linked Equations
SST	: Shear Stress Transport
VFLOW	: Potansiyel Akım Yöntemi ile Çözüm Yapan FORTRAN Programı
3DDP	: 3D Double Precision

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Akış Özellikleri ve Türbülans Başlangıcının Sınıflandırılması.....	21
Çizelge 2.2 : FLUENT'te Duvar Fonksiyonu Modelinin Seçim Kriterleri (Url-2)	23
Çizelge 2.3 : FLUENT'te Türbülans Modelinin Seçimi Hakkında Genel Bilgiler (Url 2)	24
Çizelge 2.4 : Kanat Gövde Bağlantıları Uygulama Alanları	25
Çizelge 2.5 : Önder Kenar Akım Ayrılması Konusundaki Literatür Taraması Özeti	35
Çizelge 2.6 : Denizaltı (D/A) Üzerindeki Girdaplar.....	36
Çizelge 3.1 : Panel Metotlarının Tarihsel Gelişimi ve Temel Özellikleri.....	40
Çizelge 3.2 : Pod/Strut Geometrik Veriler	42
Çizelge 4.1 : Viskoz Çözüm Hesap Değişkenleri.....	66
Çizelge 5.1 : Potansiyel ve RANS Çözücü Arasındaki Farklar	77
Çizelge 6.1 : Sınır Tabaka Ağı.....	97
Çizelge 6.2 : k Katsayısı Seçimi İçin Öngörülen Değerler	103
Çizelge 6.3 : FLUENT 'ten alınan Sınır Tabaka Hızları (Örnek olarak beş noktadaki hız verisi)	105
Çizelge 7.1 : Pod/Strut Yüzey Birleştirme Seçenekleri.	116
Çizelge 7.2 : Baş Yuvarlatma Pod/Strut Birleşim Yarıçapları.	118
Çizelge 7.3 : Basınç Katsayısı ve Pod Üzerinde Gözlendiği Yerler	121
Çizelge 7.4 : Çözüm Metotları ve Sürelerinin Karşılaştırılması.....	130

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Kavramsal Tasarım; Askeri Gemiler İçin Podlu İtme Sistemi(Url-1)	3
Şekil 2.1 : Problem Çözüm Bölgesi Gösterimi	13
Şekil 2.2 : Eğimli Yüzeylerdeki Sınır Tabaka Gösterimi	27
Şekil 2.3 : Akım Hatları ile Atnalı Girdabı Gösterimi ($z=0$ m)	27
Şekil 2.4 : Kontrol Hacmi ve Düzlemlerin Gösterimi (Alin ve Fureby, 2008)	28
Şekil 2.5 : Kontrol Hacmi ve Düzlemlerin Gösterimi	29
Şekil 2.6 : Kontrol Hacmi ve Düzlemlerin Gösterimi	29
Şekil 2.7 : Denizaltı Kulesi Atnalı Girdabı Gösterimi (Alin ve Fureby, 2008)	30
Şekil 2.8 : Akım Hatları ve Hız Vektörleri ile Atnalı Girdabı Gösterimi (Alin ve Fureby, 2008)	31
Şekil 2.9 : Mehta Tarafından Kullanılan Kanat Kesitleri (Eliptik, Süper-Eliptik ve Kama Eliptik Kesitler), Mehta (1984)	32
Şekil 2.10 : Önder Kenara Yerleştirilen Emiş Kanalı Deney Düzeneği (Barberis ve diğ., 1997)	34
Şekil 2.11 : D/A Üzerindeki Girdapların Temsili Gösterimi (Faltinsen, 2005)	36
Şekil 2.12 : D/A Kulesi Girdap Gösterimi Yandan Görünüş (Werle, 1988)	37
Şekil 3.1 : Szantyr Pod Geometrisi	41
Şekil 3.2 : NACA 066 Strut Geometrisi	41
Şekil 3.3 : Panel Metodunda Kullanılan Elemanlar	42
Şekil 3.4 : Panel Merkezlerinden Dışarı Yönlü Normal Vektörler	44
Şekil 3.5 : Birim Küre Geometrisi Üzerinde Basınç Dağılımı	45
Şekil 3.6 : Küre Geometrisi için Basınç Katsayısı ve Hız Grafiği	46
Şekil 3.7 : Küre Üzerinde Analitik Basınç Katsayısının Değişimi	46
Şekil 3.8 : Szantyr Pod I Geometrisi	47
Şekil 3.9 : Szantyr Pod I Geometrisi için Hesaplanan Basınç Katsayısı Grafiği	47
Şekil 3.10 : Szantyr Pod I Geometrisi için Literatürde Verilen Basınç Katsayısı (Gupta, 2004)	48
Şekil 3.11 : Pod/Strut İmaj Modeli	49
Şekil 3.12 : İzler Kenar İz Örgüsü	50
Şekil 3.13 : Hücum Açısı Altında İzler Kenarın Uçlarında Gözlenen İz Deformasyonu (wake roll-up) ve Akım Hatları	51
Şekil 3.14 : Szantyr Pod için Akım Hatları ve Dışarıdaki Hız Vektörleri	52
Şekil 3.15 : Pod Etrafındaki Akım Hatları	53
Şekil 3.16 : Yüzeydeki Akım Hatları	54
Şekil 3.17 : Akım Hatları, $x=3.455$ m Pervane Düzlemi	55
Şekil 3.18 : Strut Arkasındaki Düzlemde Hız Vektörleri, $x=3.455$ m Pervane Düzlemi	56
Şekil 3.19 : Gövde Yüzeyinde Tanımlanmış Normal Hızın Gösterimi	57
Şekil 3.20 : Gelen Hız Verilen Önder Kenar Bölgesinde Akım Hatları	58
Şekil 4.1 : Pod/Strut Hacimsel Ağ Örgüsü Örnek Gösterimi	62
Şekil 4.2 : Pod/Strut Yüzey Elemanları Merkez Kesitteki Ağ Hassasiyet Gösterimi	63
Şekil 4.3 : Viskoz Çözüm Sınır Koşulları Gösterimi	65
Şekil 4.4 : Sınır Koşulları Gösterimi Pervane Düzlemleri	65
Şekil 4.5 : Sınır Tabaka Ağı	67
Şekil 4.6 : Z yönündeki Hıza Bağlı Ağ Adaptasyonu Gösterimi	68
Şekil 4.7 : Kütlesel Fark Değerinin Yakınsaması	70

Şekil 4.8 : 104 Saniye Sonunda Direnç Katsayısının Yakınsaması	70
Şekil 4.9 : Pod/Strut Yüzeyinde Basınç Katsayısının Dağılımı	71
Şekil 4.10 : Simetri Düzlemindeki Hız Konturları	72
Şekil 4.11 : 75 Saniye Sonrasındaki Hız Profilleri	72
Şekil 4.12 : YZ Düzlemindeki Hız Konturları	73
Şekil 4.13 : Simetri Düzlemindeki Türbülans Yoğunluğu	74
Şekil 4.14 : Türbülans Yoğunluğu	74
Şekil 5.1 : Köşe Akımı Gösterimi (East ve Hoxey, 1968)	75
Şekil 5.2 : Deney ile Görüntülenen Engel Öncesinden Ayrılan Akım Hatları (East ve Hoxey, 1968)	76
Şekil 5.3 : D/A Kulesi/Tekne Birleşiminde Oluşan Atnalı Girdabı (Werle, 1988)	76
Şekil 5.4 : Strut Önünde Oluşan Atnalı Girdabı	78
Şekil 5.5 : Simetri Düzlemi Girdap Hüzmesi	78
Şekil 5.6 : Pod/Strut Birleşiminde Görülen Atnalı Girdabı	80
Şekil 5.7 : Atnalı Girdabı Yüksek Hız Profili Yandan Görünüş	80
Şekil 5.8 : Yüzeyden Bırakılan Akım Hatları ve Atnalı Girdabı	81
Şekil 5.9 : Pod/Strut Birleşimi Öncesinde Oluşan Akım Hatları	81
Şekil 5.10 : Önder Kenardaki Akım Hatları	82
Şekil 5.11 : $Y=0$ Düzleminde X Yönündeki Yerel Hız ($x = 1.64$ m)	83
Şekil 5.12 : Atnalı Girdabını Gösteren Akım Hatları	83
Şekil 5.13 : Simetri Düzlemi Hız Konturları	84
Şekil 5.14 : Önder Kenardaki Hız Vektörleri ve Girdabın Başlangıcı	84
Şekil 5.15 : Pod Yüzeyindeki Atnalı Girdabı Hız Vektörleri	85
Şekil 5.16 : Pod /Strut Üzerindeki Kesme Kuvveti Dağılımı	85
Şekil 6.1 : Viskoz Potansiyel Akış Hız Birleştirme (Coupling) Metodu	90
Şekil 6.2 : Viskoz Potansiyel Akış Hız Birleştirme (Coupling) Metodu	91
Şekil 6.3 : Düz Levha Üzerindeki Sınır Tabaka ve Deplasman Kalınlığı.	92
Şekil 6.4 : Deplasman Kalınlığı	92
Şekil 6.5 : Laminar ve Türbülanslı Akım için Sınır Tabaka Gösterimi	93
Şekil 6.6 : Eğimli Yüzeylerdeki Sınır Tabaka Başlangıç Düzeltmesi.	94
Şekil 6.7 : $Z=0$ Düzlemindeki Sınır Tabaka Hız Profili, $x=1.025$ m.	96
Şekil 6.8 : $Y=0$ Düzlemindeki Sınır Tabaka Hız Profili ($x=1.025$ m).	96
Şekil 6.9 : $Z=0$ Simetri Düzlemindeki Sınır Tabaka Ağı	97
Şekil 6.10 : Sınır Tabaka Büyüme Miktarı Gösterimi	98
Şekil 6.11 : $Y=0$ Düzlemindeki Sınır Tabaka Ve Kontrol Hacmi Ağı	99
Şekil 6.12 : Simetri Düzlemindeki Sınır Tabaka Ağı.	99
Şekil 6.13 : Pod Yüzeyinde y^+ Değerleri	100
Şekil 6.14 : Hız Profili Hatları	101
Şekil 6.15 : Panel Merkezleri Üzerinde Hız Profil Hatları.	102
Şekil 6.16 : Pod Yüzeyi Üzerinden Deltanın Katlarının Gösterimi.	102
Şekil 6.17 : VFLOW'da hesaplanan ve Sınır Tabakayı Tanımlayan Nokta Bulutu.	104
Şekil 6.18 : Sınır Tabakayı Temsil Eden Noktalardaki Hız Konturları.	104
Şekil 6.19 : Pod Yüzeyinde Sınır Tabaka Hız Düzgünleştirilmesi.	106
Şekil 6.20 : Pod Üzerindeki Sınır Tabaka Hızı.	107
Şekil 6.21 : Pervane Düzleminde Hız Konturu Farkları.	108
Şekil 6.22 : Ön Pervane Düzleminde Eksenel Hız Konturu Farkları ($x=1.055$ m).	108
Şekil 6.23 : Birleştirme Sonrasında Merkez Kesitteki Basınç Katsayısının Dağılımı.	109
Şekil 6.24 : Sınır Tabaka İçerisinden Bırakılan Akım Hatları $x=0.5$ m (Birleştirilmiş Çözüm)	110
Şekil 6.25 : Sınır Tabakadan Bırakılan Akım Hatları (Viskoz Çözüm)	111
Şekil 6.26 : Ön ve Arka Pervane Düzlemleri.	111
Şekil 6.27 : Atnalı Girdabının Zamana Bağlı Değişimi	112
Şekil 6.28 : Atnalı Girdabının Zamana Bağlı Değişimi (Birleştirilmiş gösterim).	112
Şekil 6.29 : Atnalı Girdabı Akım Hatları, Pervane Düzlemi Arkadan Görünüş.	113

Şekil 6.30 : Arka Pervane Düzlemindeki Eksenel Hızlarının Karşılaştırılması.....	113
Şekil 7.1 : Pod Bütün Yuvarlatma ile Birleştirme $R=0.06$ [m].....	117
Şekil 7.2 : Birleştirme Yarıçaplarının Görünümü.....	118
Şekil 7.3 : Birleştirme Yarıçaplarının Görünümü.....	119
Şekil 7.4 : Szantyr Pod ve FF02–FF03 ve FF04 Pod Basınç Katsayısı Konturları	121
Şekil 7.5 : Szantyr Pod ve FF02-FF03 ve FF04 Pod Basınç Konturları	122
Şekil 7.6 : (a) Szantyr Pod Basınç Konturları (b) FF04 Pod Basınç Konturları.....	123
Şekil 7.7 : Orjinal Pod Önder Kenar Akım Hatları, Üstten Görünüş.....	124
Şekil 7.8 : FF04 Önder Kenar Akım Hatları, Üstten Görünüş	124
Şekil 7.9 : FF04 Önder Kenar Akım Hatları	125
Şekil 7.10 : Viskoz Çözümde Arka Pervane Hız Dağılımları ($x = 3.455$ m)	126
Şekil 7.11 : Viskoz Çözümde FF04 Öner Kenar Akım Hatları	126
Şekil 7.12 : Pod Üzerinde FF02 Podu için Oluşturulan Nokta Bulutu	128
Şekil 7.13 : Hız Birleştirme Metodu ile FF02 için Elde Edilen Sonuçlar.....	129

SEMBOL LİSTESİ

B_{JK}	K Paneli Üzerindeki Birim Kaynak Şiddetinin J Paneli Kontrol Noktası Üzerinde Etkilediği Hız Potansiyeli Etkime Katsayısı
C_{JK}	K Paneli Üzerindeki Birim Kaynak Şiddetinin J Paneli Kontrol Noktası Üzerinde Etkilediği Hız Potansiyeli Etkime Katsayısı
C_{JL}	İz Panelleri Etkime Katsayısı Terimi
C_P	Basınç Katsayısı
D	Çap (Boru çapı)
Δ	Deplasman Kalınlığı
D_h	Hidrolik Çap Değeri
ds	Birim Uzunluk
F	Hacimsel bir Kuvvet Nedeni İle Oluşan İvme
$FLV_x (K)$	K Paneli için Fluentten Alınan X Yönündeki Hız
$FLV_y (K)$	Fluentten Alınan Y Yönündeki Hız
$FLV_z (K)$	Fluentten Alınan Z Yönündeki Hız
$H(x,y,z, \xi, \eta, \zeta)$	Denklem 2.10'da açıklanmıştır.
k	Katsayı (Bölüm 6)
k	Türbülans Kinetik Enerjisi (Bölüm 4)
L	Boy
$\bar{n}$	Birim Normal Vektör
p	Basınç
Pr	Prandtl Sayısı
Ra	Ragleigh Sayısı
Re	Reynolds Sayısı
S	Cisim Yüzeyi
S_∞	Dış Kontrol Yüzeyi
S_B	Cisim Yüzeyi
S_ε	Entegrasyon Dışında Tutulan Cisim Yüzeyi
$S-P$	Yüzey ile P Noktası Arasında
S_W	İz Yüzeyi
T	Kanat Kalınlığı
t	Zaman Sabiti
u	x Yönündeki Hız
U^*	Periyodik ve Rastgele Hız Bileşenlerinin Toplamı
u'	x Yönündeki Çalkantı Bileşeni
$\bar{U}$	Ortalama Hız
U_t	Toplam Hız
u_x	X Yönündeki Hız
u_y	Y Yönündeki Hız
u_z	Z Yönündeki Hız
u_*	Kesme Hızı
$\left(\overline{u'v'} \right)_x$	Reynolds Gerilmeleri (x Yönündeki)
$\left(\overline{u'w'} \right)_x$	Reynolds Gerilmeleri (x Yönündeki)
$\left(\overline{u'v'} \right)_y$	Reynolds Gerilmeleri (y Yönündeki)
$\left(\overline{u'w'} \right)_z$	Reynolds Gerilmeleri (z Yönündeki)
v	y Yönündeki Hız
v'	y Yönündeki Çalkantı Bileşeni
$\left(\overline{v'v'} \right)_y$	Reynolds Gerilmeleri(y Yönündeki)

$\overline{(v'w')}_y$	Reynolds Gerilmeleri(y Yönündeki)
$\overline{(v'w')}_z$	Reynolds Gerilmeleri(z Yönündeki)
V_{inf}	Giriş Hızı
VNP	Paneldeki Normal Hız
VNP(K)	K Paneli için Normal Hız
VNPFL(K)	K Paneli için Fluentten Alınan Normal Hız
V_{norm}	Normal Yöndeki Hız
V_K	K Paneli için Hız
V_x	X Yönündeki Hız
V_y	Y Yönündeki Hız
V_z	Z Yönündeki Hız
V_∞	Serbest Akım Hızı
W	İz Yüzeyi
W	z Yönündeki Hız
w'	z Yönündeki Çalkantı Bileşeni
$\overline{(w'w')}_z$	Reynolds Gerilmeleri(z Yönündeki)
X_c	Panel Merkezi X Koordinatı
X_{DEL}	Sınır Tabakanın X Koordinatı
Y_{DEL}	Sınır Tabakanın Y Koordinatı
y^+	Boyutsuz Duvar Fonksiyonu Değişkeni
Z_{DEL}	Sınır Tabakanın Z Koordinatı
α	Açı
β	Açı
δ^*	Deplasman Kalınlığı
δ_{BL}	Sınır Tabaka Kalınlığı
Δt	Zaman Aralığı
ε	Yayınım Oranı
$\phi = \Phi - \phi_\infty$	Pertürbasyon Potansiyeli
ϕ_∞	Sonsuzdaki Potansiyel
ϕ	Pertürbasyon Potansiyeli
Φ	Sonsuzdaki Potansiyel
Φ_L	Alt Yüzeydeki Pertürbasyon Potansiyeli
μ	Dinamik Viskozite (Bölüm 6)
μ	Duble Şiddeti
ρ	Birim Hacim Başına Kütle
σ	Kaynak Şiddeti
$\vec{v}$	Hız Vektörü
τ_w	Duvar Kayma Gerilmesi
∇	Nabla Operatörü
$\vec{r}$	P Noktasındaki ds Elemanına Olan Mesafe
Φ_i	İçerideki Potansiyel
Φ_U, Φ_L	Üst /Alt Yüzeydeki Pertürbasyon Potansiyeli
Φ_p	P Noktasındaki Potansiyel
Φ	Toplam Potansiyel
ω	Küresel Cisim Yüzeyi Yarıçapı (Bölüm 2)
ω	Spesifik Yayınım Oranı (Bölüm 4)
$\xi(\xi, \eta, \zeta)$	Keyfi Seçilen Bir Nokta

VİSKOZ / POTANSİYEL HIZ BİRLEŞTİRME YÖNTEMİ İLE POD / STRUT BİRLEŞİM BÖLGESİNDEKİ YUVARLATMA GEOMETRİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Günümüzde podlu itme sistemlerinin gemi tahrik sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Podlu itme sisteminin geometrik özellikleri pod gövdesi ve pod ve gemi arasında yer alan strut etrafındaki akım özelliklerinin iyileştirilmesi amacı ile farklı şekillerde tasarlanmaktadır. Tahrik sistemi performansı, pod/pervane etkileşimi, akustik ve titreşim gibi gemi kıcı akış özelliklerinden kaynaklanan problemler sayısal ve deneysel çalışmalar yürütülerek incelenmekte olan bir araştırma konusudur.

Bu doktora çalışmasının amacı podlu itme sistemlerinin tasarımında, viskoz ve potansiyel akım hesap yöntemlerinin birleştirilerek kullanılmasına dayanan bir tasarım yaklaşımının sunulmasıdır.

Literatürde Szantyr Pod olarak bilinen 4.53 m boyundaki jenerik bir pod/strut geometrisi etrafındaki akım panel metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Elipsoid şeklindeki Pod ile gemi arasında, bir kesişim çizgisi ile poda bağlanan NACA 066 kesitli bir strut kullanılmaktadır. Hesaplamalarda akımın üzerinden geçtiği varsayılan pod ve strut dış yüzeyleri, kenarları birbirleri ile kesişen çeşitli bölümlere ayrılmış ve her bir yüzey panellere bölünmüştür. Pod ve strut geometrisi potansiyel ve viskoz akım hesap yöntemleri kullanılarak incelenmiş ve yüzey etrafındaki akım özellikleri her iki çözücü ile hesaplanmıştır. Viskoz çözümdeki cidara yakın bölgedeki yerel hızlar, potansiyel çözümdeki sınır şartları güncellenerek hesaba dahil edilmiştir. Böylelikle potansiyel akıma viskozite etkileri dahil edilmiş olmaktadır. Viskoz yerel hız bileşenleri, herbir panel üzerindeki yeni kaynak terimi olarak eklenmekte ve sonrasında pod yüzeyi üzerinde yerel viskoz etkiler dahil edilerek çözüme geçilmektedir. Viskoz ve potansiyel hesap yönteminin birleştirilmesi ile 3 boyutlu potansiyel çözüme viskoz akım özellikleri ithal edilerek hesaplama zamanı daha kısa ve ekonomik olan bir yaklaşım getirilmiştir. Kanat/gövde bağlantılarında, kanadın önder kenarındaki basınç gradyeninin de etkisi ile akım yavaşlamakta ve strut boyunca ilerleyen atnalı girdabını oluşturmaktadır. Pod/strut birleşim bölgesinde sistematik geometri değişikliği yapılarak atnalı girdabının etkileri pervane düzlemi üzerindeki hız dağılımları çizdirilerek incelenmiştir. Seçilen üç farklı baş yuvarlatma yüzey sürekliliği dikkate alınarak birleşim bölgesine uygulanmış ve pod etrafındaki akımın atnalı girdabını ortadan kaldıracak şekilde düzgünleştirdiği anlaşılmıştır.

Bu doktora tezi kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda, bu tez çalışmasında geliştirilen hız birleştirme yönteminin iyi bir ön tasarım aracı olarak kullanılabileceği görülmüştür.

EVALUATION OF FILLET GEOMETRY IN POD / STRUT JUNCTION USING VISCOUS / INVISCID VELOCITY COUPLING

SUMMARY

Podded propulsors have been widely used in marine propulsion industry in the last decade. Pod designs are varying in terms of pod/strut shapes to improve flow characteristics around the podded propulsors. Flow related properties such as propulsion performance, pod/propeller interaction and vibration/acoustics are investigated by numerical methods.

The main objective of this thesis is to present a design approach based on viscous/inviscid coupling of the flow modeling methods for podded propulsor design.

Surface panel method is used to calculate the flow around a well-known pod/strut model, namely Szantyr pod A, with a given length of 4.53 m. Szantyr pod has a strut with NACA 066 profile connected to the pod gondola with a smooth intersection line. In the calculations, the surface is divided into separate patches defining the strut and the pod connected with this intersection line. The pod/strut geometry has been analyzed both in potential and viscous RANS solver. The viscous flow characteristics around the pod are evaluated. The near field velocity components are derived from the viscous solution and applied to the potential solver as modified boundary condition. Viscous velocity components are set as the new panel source strengths and the potential flow computation is finalized with viscous near field data. With the coupling of viscous and potential method, the viscous flow characteristics are imported to 3D potential solution. So that, a fast and economical solution is obtained. The horseshoe vortex developing from the leading edge side of pod/strut is a typical problem for this kind of junction flows. Flow retardation with the effect of adverse pressure in the upstream side creates a vortex traveling downstream around the strut. The presence of this vortex flow is observed in the propeller planes downstream. The differences in propeller plane velocity contours are plotted and the effect of viscous flow is presented. Selected three different modifications are applied to the pod strut connection. It is observed that this modification affected the flow characteristics by eliminating the horseshoe vortex.

As a conclusion, the design approach aimed in this study seems to be an effective tool covering both geometry and viscous effects to achieve the desired propeller plane velocity distribution.

1. GİRİŞ

Gemi kıcı akış probleminde tekne formu, pervanelerin büyüklükleri, kık formundaki çeşitli takıntılar, pervane düzlemine gelen hız dağılımını ve akış kalitesini önemli derecede etkilemektedir.

Birbirleri arasındaki mesafe nispeten kısa olan tekne kıcı ve pod/strut gibi iki yüzey pervanesinin çalışması ile daha da karmaşık bir akış karakteristiğinin oluşmasına neden olmaktadır. Konvansiyonel sevk sistemi düşünüldüğünde pod için pervaneye gelen akış daha düzgün olacak şekilde yerleşim yapılabilmesi bu sistemin potansiyel avantajları arasındadır.

Yolcu gemileri başta olmak üzere giderek yaygınlaşmakta olan podlu itme sistemleri konvansiyonel sevk sistemlerine nazaran pervaneye daha düzgün akım gelmesi, elektrik motorlarının kullanılması nedeni ile daha verimli, daha iyi denizcilik ve manevra özellikleri göstermesi gibi pek çok avantajlar sağlamaktadır.

Podlu itme sistemi dümen ve tahrik sisteminin birleştirildiği veya birlikte kullanıldığı bir sevk sistemi olması sebebi ile tahrik motoru ve şaft arasındaki mesafenin en aza indiği bir itme sistemidir. Pod gövdesi içerisine yerleştirilen elektrik motorları doğrudan pervane veya pervanelere bağlanmakta ve gemi içerisinde önemli bir kullanılabilir hacim kazanılmasına imkan vermektedir.

Tahrik sisteminin önemli bileşenleri olan motor, dişli ve yataklama sistemi ve pervanelere olan kolay erişim imkanı bakım ve onarım açısından da avantajlar sağlamaktadır. Podlu itme sistemlerinde pervane podun önünde veya arkasında yer alabildiği gibi ön ve arkasında olacak şekilde de yerleştirilebilmektedir. Pervanesinin podun arkasında yer aldığı konfigürasyon iten tip (pusher type) podlu itme sistemi olarak adlandırılmaktadır. Pervanesinin podun önünde yer aldığı konfigürasyon ise çeken tip (pull/tractor type) podlu itme sistemi olarak adlandırılmaktadır. Pervaneye gelen akımın en düzgün olduğu bu konfigürasyonun kontrol edilebilirlik, verimlilik ve konfor açısından avantajlar sağladığı bildirilmektedir (Blenkey, 1997). Pervanelerin önde ve arkada birlikte kullanıldığı seçenek ikiz tip (twin rotating) olarak tanımlanmaktadır.

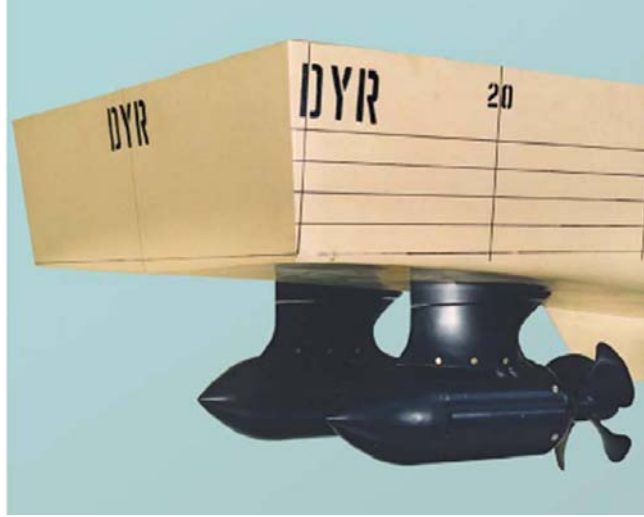
Anılan avantajların yanında konvansiyonel sevk sistemlerine nazaran toplam sistem verimi açısından %2-4 mertebesinde iyileşme sağlayan podlu itme sistemleri alanında pod etrafındaki akımın hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılarak modellendiği çalışmalar yürütülmüştür (Gupta, 2004). Konu hakkında potansiyel akım yöntemi ile modelleme çalışmaları yapılmıştır (Ghassemi ve Allievi, 1999). Viskoz akım yöntemi ile yürütülen modelleme çalışmalarına örnek olarak Sanchez, C. ve diğ. (1999) verilebilir. Podlu itme sisteminin sayısal olarak modellenmesi konusundaki çalışmalara örnek olarak pod gövdesi, strut ve pervanenin birlikte çözülmesine dayanan bir hesaplama metodu Bal ve Güner (2009) tarafından önerilmiştir.

Podlu itme sistemleri konusunda sanayi ve akademik ortakların yer aldığı önemli araştırma projeleri yürütülmüş ve podlu itme sistemleri ile ilgili mevcut bilgi birikimi modelleme ve deneysel çalışmalar ile geliştirilmiştir. Avrupa Birliği Araştırma Direktörlüğü tarafından 5. ve 6. Çerçeve programları kapsamında yürütülen OPTIPOD ve devamı niteliğindeki FASTPOD projeleri, Avrupa ölçeğindeki geniş katılımcı yapısı ile podlu itme sistemleri hakkında yürütülen en kapsamlı araştırma projeleri olmuştur.

Podlu itme sistemleri hakkında ITTC bünyesinde bir ihtisas komitesi kurulmuş ve konu teknik açıdan tarifiyerek ilk defa uluslararası ölçekte yayınlanmıştır. Mevcut durumun belirlenmesi, teknik terimlerin derlenmesinin yanında model havuzunda yürütülecek deney prosedürleri, manevra, stabilite, hesaplama esasları ve performans kriterleri gibi pek çok konu komite tarafından incelenmiş ve teknik rapor olarak sunulmuştur (Atlar ve diğ., 2005).

Gemi tasarımı açısından önemli avantajlar sağlayan podlu itme sistemleri askeri gemiler için de ilgi çekici bulunmuş ve podlu itme sistemine sahip askeri gemiler konusunda da çeşitli araştırmalar yürütülmektedir (Ball, 2004). Verimlilik, manevra kabiliyeti ve denizcilik özelliklerinin yanında elektrikli gemi kavramı içerisindeki önemli rolü nedeni ile podlu itme sistemleri dikkat çeken bir seçenek olmaktadır. Podlu itme sistemleri içerisinde yer alan elektrik motorlarının sualtı akustiği ve geminin gürültü profili ile ilgili çalışmaların yürütülmekte olduğu bilinmektedir (Sigrist ve diğ., 2004).

Askeri bir gemi içerisinde kazanılan kullanılabilir hacim, ilave yük ve depolama kapasitesi getirmekte ve bir bütün olarak elektrikli tahrik sistemi tercih edilen bir tasarım/yerleşim esnekliği sağlamaktadır (Hodge ve Mattick, 2008). Podlu itme sistemlerinin askeri gemilerde kullanılması ile ilgili örnek bir gösterim Şekil 1.1’de sunulmuştur. (Url-1)



Şekil 1.1 : Kavramsal Tasarım Askeri Gemiler İçin Podlu İtme Sistemi (Url-1).

1.1 Tezin Amacı

Bu doktora çalışmasında podlu itme sistemlerinin tasarımında, viskoz akım (FLUENT) ve potansiyel akım (VFLOW) hesap yöntemlerinin birleştirilerek kullanılmasına dayanan hibrid bir tasarım yaklaşımının sunulması amaçlanmıştır.

Viskoz ve potansiyel akış metodu kullanılarak pod etrafındaki akış özelliklerinin hesaplanması sonrasında çözüm zamanı açısından hızlı ve ekonomik olan üç boyutlu potansiyel metoda, viskoz çözümden elde edilen sınır tabaka etkilerinin eklenmesi öngörülmüştür. Viskoz çözümde elde edilen pod/strut yüzeyindeki hız profili potansiyel akış modelinde noktasal hız girdileri olarak kullanılmış ve böylelikle potansiyel akış kodu viskoz etkiler altında dolaylı olarak çalıştırılmıştır.

Çalışmanın bir değer amacı ise, podun strut ile birleşim bölgesinde oluşan atnalı girdabının etkilerinin geometri değişikliği ile giderilmesinin incelenmesidir. Pod ve strut için viskoz ve potansiyel akış metodu kullanılarak yapılan çözümlerde podun strut ile birleşim bölgesinde atnalı girdabının varlığı ispatlanmış ve pod/strut birleşim bölgesinde geometri değişikliği yapılarak değişimin akım özelliklerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Birleşim bölgesinde önder kenara uygulanan üç farklı yuvarlatma ile farklı pod modelleri oluşturulmuştur. Potansiyel, viskoz ve birleştirilmiş metod kullanılarak Pod/strut birleşim geometrisine bağlı olarak yüzeydeki ve akış bölgesindeki akım hatları incelenerek pervane düzlemindeki hızlar hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalar ve geometri değişikliği sonrasında, Pod/strut birleşim bölgesinde ortaya çıkan atnalı girdabının engellendiği görülmüştür.

1.2 Kapsam

Doktora çalışmasında askeri gemilerde kullanılabilecek bir tahrik ünitesi seçeneğinin hidrodinamik açıdan irdelenmesi, pod ve strut ünitesinin etrafındaki akış özelliklerinin incelenerek pervane düzlemi üzerine indüklenen hızların hesap edilmesi amaçlanmaktadır. Tez kapsamında pod ve strut üzerine çalışmalar yapılmış ve pervane analizi kapsam dışında tutulmuştur.

Gemi kığı akış probleminin çözülmesi podlu sevk sistemlerinin modellenmesi için kritik düzeyde önemlidir. Gemi kığındaki pod üzerine gelecek hız ve iz kalitesi problemin sınır şartlarının belirlenmesinde kullanılmalıdır.

Doktora çalışmasında irdelenen konularla ilgili yayınlanmış literatür taranmıştır. Bölüm 2’de çalışma kapsamında kullanılan yöntemlerin teorisinin açıklanabilmesi ve yapılan çalışmaların sonuçlarının irdelenmesi açısından faydalı olduğu düşünülen literatür taraması özeti sunulmuştur.

Bölüm 3’de potansiyel akım yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar açıklanmış, yöntemin incelenen geometrilerin modellenmesi için uygunluğu araştırılmış ve elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

Bölüm 4’de viskoz akım yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar açıklanmış ve elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

Bölüm 5’de panel metodu ve viskoz metot kullanılarak yapılan çözümlerde gözlenmiş olan önder kenar akım ayrılması irdelenmiştir.

Bölüm 6’da viskoz çözümle potansiyel çözümün birleştirilmesi amacı ile yapılan çalışmalar açıklanmış ve elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

Bölüm 7’de ise arka pervane düzlemindeki hız dağılımının düzgünleştirilmesi amacı ile pod strut birleşim bölgesinde incelenen farklı geometrik şekiller açıklanmıştır. Birleşim bölgesi önder kenarında kullanılan farklı yarıçaplara sahip yuvarlatmalar ile üç ayrı pod geometrisi oluşturulmuştur. Önerilen hız birleştirme yaklaşımı, yuvarlatma yapılmış bir pod için uygulanmış ve sayısal hesap sonuçları gösterilmiştir. Farklı pod strut birleşim şekillerinin atnalı girdabının oluşumuna olan etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

Çalışmanın sonunda önerilen hız birleştirme yaklaşımının avantajları ve gelecekte yapılması gereken çalışmalar değerlendirilmiş, muhtemel konu başlıkları ve önerilere yer verilmiştir. Pervane etkilerinin eklenmesi, parametrik yüzeyler ile pod/strut birleşim yüzeyinin tanımlanması ve tersine hesaba dayalı tasarım değişikliği yapılması gibi konular öneriler halinde sunulmuştur.

1.3 Yöntem

Panel metodu kullanılarak, öncelikle analitik çözümü bilinen birim yarıçaplı küre için hesaplar yapılmıştır. Literatürde Szantyr podu olarak bilinen pod için boy ile normalize edilen birim hız ile hesaplamalar yapılmıştır. Aynı hesap NACA066 kesitli strut eklenmiş pod için de tekrarlanmıştır. Yapılan hesaplar sonucunda basınç dağılımı, iz örgüsü, hız profili ve atnalı girdabının varlığı akım hatları yardımı ile incelenmiştir.

Viskoz akım yöntemi kullanılarak pod ve strut içeren geometri için hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar sonucunda basınç katsayısının dağılımı, iz örgüsü, akım hatları, hız profili ve atnalı girdabının varlığı incelenmiştir.

Her iki yöntemle elde edilen sonuçların uyumlu olduğu görüldükten sonra yeni bir hesaplama yöntemi olarak viskoz ve potansiyel akımın birleştirilmesine (viscous/inviscid velocity coupling) dair bir öneri geliştirilmiştir. Önerilen metot sınır tabaka etkilerini esas alan potansiyel akım çözümü ile hızlı ve güvenilir bir yaklaşım geliştirilmesini kapsamaktadır.

Viskoz çözümle potansiyel çözümün birleştirilmesi amacı ile FLUENT programındaki sonuçlar doğru kabul edilerek, sınır tabaka hız değerleri VFLOW'daki potansiyel akım hesabına eklenmiştir. Yüzeydeki sınır şartının değiştirilmesi ile daha hassas sonuçlara ulaşılması hedeflenmiştir. FLUENT programından elde edilen viskoz çözümün doğru kabul edilmesi yapılan hız birleştirme çalışmasının sonuçlarının doğruluğu açısından önemlidir. Bu nedenle viskoz hesaplarda kullanılan modelde sınır tabaka ağ modeli, boyutsuz mesafe değeri y^+ dikkate alınarak oluşturulmuş, literatürde yer alan ağ hassasiyeti kriterleri gözetilmiştir (Gupta, 2004). Önerilen yöntemde cidara yakın hızların okunacağı yüzey normali yönündeki mesafe, deplasman kalınlığı esas alınarak belirlenen bir k katsayısı ile kademelendirilmiş ve hız değerlerinin okunacağı mesafe kullanıcı tarafından tayin edilecek şekilde seçeneleştirilmiştir.

Geliştirilen yöntem açısından kullanılacak türbülans modeli de seçeneleştirilebilir niteliktedir. Hız birleştirme açısından cidara yakın hızların elde edilebileceği bir veri setinin olması yeterlidir. Gemi arkası akış problemlerinde kullanılan modellerin hangisinin kullanılacağı ve viskoz çözümün güvenilirliği kullanıcı tarafından tayin edilmektedir.

Türbülans modellerinin kullanıldığı benzetim çalışmalarında sonuçların deney verileri ile karşılaştırılması en uygun doğrulama yöntemidir. Podlu itme sistemi etrafındaki akımın deneysel olarak incelendiği çalışmalar mevcuttur. Bunlara örnek olarak Wang ve diğ. (2004) tarafından akımın LDA (Laser Doppler Anemometry) ölçüm tekniği kullanılarak incelendiği deneysel çalışma verilebilir. Bu doktora çalışmasında viskoz modelin hesaplama imkanları dahilinde hassas bir ağ yapısı ile oluşturulmuş olması ve baş yuvarlatmalı pod konfigürasyonları için sonuçların birebir karşılaştırılabileceği bir deney veri setinin literatürde verilmemiş olması nedeni ile FLUENT sonuçları doğru kabul edilmiştir. Geliştirilen yöntemde panel üzerindeki hız verileri pod boyunca düzgünleştirmeye tabi tutularak viskoz çözümden elde edilen ham verilerin eklenmesi öncesinde yerel hataların önüne geçilmesine imkan verilmiştir.

Ayrıca cisim yüzeyine yakın hız değerlerinin, bir deney verisinden elde edilmiş olması durumunda potansiyel çözüme doğrudan eklenerek kullanılabilmesi söz konusu edilebilir. Bu husus tezde önerilen hız birleştirme yaklaşımından daha ileri bir seçenektir ve bu çalışmada viskoz modelden elde edilen hızlara odaklanılmıştır.

Birleştirme sonrası pervane düzlemindeki hız konturu, basınç katsayısının dağılımı, akım hatları ve atnalı girdabının varlığı araştırılmıştır. Atnalı girdabının ortadan kaldırılması için Pod/Strut birleşiminde akımın durmasının önüne geçecek geometri değişiminin yapılması gerektiği görölmüş ve atnalı girdabının etkilerinin azaltılacağı yeni bir geometri önerilmiştir. Birleşim bölgesinde önder kenara, pod ve strut yüzeylerine yüzey sürekliliğini sağlayan bir yuvarlatma yüzeyi eklenerek üç farklı pod geometrisi oluşturulmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Hesaplamalı akışkanlar mekaniği alanında akım alanı çözümü için çeşitli hesaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Söz konusu yöntemler belirli kabuller altında problemin fiziği, sınır şartları ve çözüm hassasiyeti gibi değişkenlere göre farklılıklar göstermektedir. Hesaplama yönteminde kullanılan teori sonuçların beklenen özelliklerine göre seçilmekte ve kullanılan programlar teorinin sunduğu imkanlar dahilinde sonuçlar vermektedir.

Gemi etrafındaki akış alanında kullanılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) uygulamalarında genellikle gemi düzgün bir akıma karşı hareket edecek şekilde modellenmektedir. Model havuzları nezdinde 1994 yılında yapılan bir çalışmaya göre, gemi dalga direnci ve açık-deniz denizcilik hesaplamalarında Sınır Elemanları Metodu (BEM) kullanımının, ticari denizcilik projelerinde toplam cironun %40-50 mertebelerinde yaygın ve önemli bir yer tuttuğu görülmüştür. Viskoz etkilerin esas alındığı RANS metodu uygulamalarının giderek yaygınlaşmakta olduğu ve gelecekte %30-40 seviyesindeki kullanım oranının artacağı değerlendirilmiştir. Ancak aynı çalışmada Sınır Elemanları Metodu'nun en azından 2020 yılına kadar endüstrinin en temel hesaplama aracı olarak kullanılmaya devam edeceği öngörülmüştür (Bertram, 2000).

Panel metotlarının yaygın olarak kullanılmasının yanında, viskoz akım modeline dayalı hesaplamalarda ağ hassasiyeti, türbülans modelinin seçilmesi ve sonuçların yorumlanması gibi hususlar nedeni ile, deneyimli kullanıcılara ihtiyaç duyulmaktadır. İki metot arasında hesaplama zamanı açısından belirgin bir fark bulunmaktadır. Bu anlamda her iki çözümden elde edilen verilerin birleştirilmesine dayalı bir yaklaşımın, ön tasarım seviyesindeki çalışmalar açısından avantaj getireceği değerlendirilmiştir. Viskoz akım etkilerini içeren bir panel metodu kullanılması yaklaşımının, dizayn değişikliklerinin hızlı ve pratik olarak yapılabilmesine imkan vereceği düşünülmüştür.

Bu çalışmada potansiyel ve viskoz akım hesabı yapan paket programlar kullanılmıştır. Panel metodu ve Reynolds Ortalamalı viskoz akış formülasyonu hakkında özet bilgi başlıklar halinde verilmiştir.

2.1 Potansiyel Akım Teorisi

Potansiyel teoremin üç boyutlu cisimlere uygulanmasında, analizi yapılacak model sonsuz akışkan içerisinde tanımlanmış kapalı yüzeylerden oluşmaktadır. Akışkan viskozitesiz, sıkıştırılmaz, sabit yoğunluğa sahip ve akım irrotasyonel olarak kabul edilmektedir. Denklem 2.1’de süreklilik denklemi verilmiştir.

$$\vec{\nabla} \times \vec{v} = \begin{Bmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \\ \partial/\partial z \end{Bmatrix} \times \vec{v} = 0 \quad (2.1)$$

Potansiyel akımda hız vektörünün üç bileşeni birbirlerine bağlı bir formdadır. Her üç yöndeki hızlar birbirleri ile potansiyel değeri üzerinden bağlı olup, potansiyelin x,y,z yönlerindeki türevleri o yöndeki hız değerlerini vermektedir.

$$\vec{v} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \vec{\nabla} \phi \quad (2.2)$$

Hız alanı skaler bir büyüklük olan ϕ potansiyelin gradyeni olarak tarif edilebilir ve süreklilik denkleminde kullanılırsa Laplace denklemi elde edilmiş olmaktadır. Böylelikle problem üç eksenindeki bilinmeyenler yerine potansiyelin hesaplanması ile basitleştirilmiş olmakta ve hesaplama zamanı açısından avantaj sağlamaktadır.

Yüzeyler genellikle dörtgensel elemanlar ile oluşturulmakta ve akışkan içerisinde iç ve dış olmak üzere iki adet bölge tanımlanmaktadır. Hidrodinamik akış problemleri genellikle dış akış problemi olarak çözülmektedir. Yapılacak hesaba bağlı olarak iç veya dış bölge zahiri (fiktif) olacak şekilde hesaba katılmaktadır.

2.1.1 Green Teoremi ve Tekilliklerin Yüzey Üzerinde Dağıtılması

V hacmi içerisinde S kapalı yüzeyi ile tanımlanan bir akış problemi için Laplace denkleminin iki çözümü düşünüldüğünde, diverjans teoremi uygulanarak iki farklı potansiyel ϕ ve ϕ olarak ifade edildiğinde Denklem 2.3 yazılabilir (Newman, 1977).

$$\begin{aligned} \iint_S \left[\phi \frac{\partial \phi}{\partial n} - \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} \right] ds &= \iiint_V \nabla \cdot (\phi \nabla \phi - \phi \nabla \phi) dV \\ &= \iiint_V (\phi \nabla^2 \phi + \nabla \phi \cdot \nabla \phi - \phi \nabla^2 \phi - \nabla \phi \cdot \nabla \phi) dV \\ &= 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'de ϕ yerine kaynak teriminin potansiyeli yazılırsa ve kaynak şiddeti $m = 1$ olmak üzere, $\xi(\xi, \eta, \zeta)$ noktasındaki kaynak şiddetini temsilen $\mathbf{x}(x, y, z)$ alan noktasındaki birim kaynak şiddeti Denklem 2.4'deki gibi verilir.

$$\phi = \frac{1}{4\pi r} = (1/4\pi) \cdot [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2]^{-1/2} \quad (2.4)$$

Denklem 2.4'de verilen alan noktası, ϕ değeri değişmeksizin kaynak noktası ile değiştirilerek Laplace denklemini sağlayacak şekilde düzenlenir. Green teoremi ile kaynak potansiyeli her iki koordinat sistemine göre de tanımlanabilmektedir. Entegrasyonda matematiksel olarak eşdeğer sonuçları veren ancak fiziksel anlamda farklı bir ifadeye ulaşılmış olmaktadır.

Denklem 2.4'ün Denklem 2.3'e göre düzenlenmesinde önemli bir husus ortaya çıkmaktadır. Kaynak potansiyeli $r = 0$ noktasında Laplace denklemini sağlamamaktadır ve Denklem 2.3'de kaynak şiddeti V hacmi içerisinde tanımlı değildir. Burada kaynak noktası yarıçapı $r = \varepsilon$ olan ve S_ε yüzeyi ile temsil edilen küçük bir yarı küre olarak tanımlanmaktadır. Böylece S ve S_ε kapalı yüzeylerinde entegrasyon yapılabilir olmaktadır. Denklem 2.3 yeniden düzenlenerek Denklem 2.5 veya Denklem 2.6 yazılır.

$$\frac{1}{4\pi} \iint_{S+S_\varepsilon} \left[\phi \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial n} \right] ds = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{4\pi} \iint_S \left[\phi \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial n} \right] ds = -\frac{1}{4\pi} \iint_{S_\varepsilon} \left[\phi \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial n} \right] ds \quad (2.6)$$

Limit değeri $\varepsilon \rightarrow 0$ alındığında S_ε alan değeri $4\pi r^2$ ve $1/r$ 'nin normal yöndeki türevi $-1/r^2$ olarak hesaplanmış olur. Denklem 2.6'da sağ taraf terimi $1/r^2$ oranında tekildir ve $4\pi r^2$ alan değeri ile çarpıldığında ikinci terimin katkısı kalmamaktadır. ε 'nin yeterince küçük değerleri için potansiyel ϕ sabit kabul edilerek integralin dışına alınır ve sonuçta Denklem 2.6, Denklem 2.7 olarak yazılabilir.

$$-\frac{1}{4\pi} \phi(x, y, z) \iint_{S_\varepsilon} \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r} ds = -\phi(x, y, z) \quad (2.7)$$

Eğer (x,y,z) noktası S yüzeyi içerisinde ise Denklem 2.8 yazılabilir.

$$\phi(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi} \iint_S \left[\phi \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial n} \right] ds \quad (2.8)$$

Denklem 2.8 ile hız potansiyeli, normal duble ve kaynak terimlerinin S yüzeyi üzerine dağıtılarak temsil edildiği bir ifadedir. Green teoreminin manipülasyonları ile kaynak veya dublelere dayalı daha farklı alternatif integrallerin elde edilmesi mümkündür. Eğer (x,y,z) noktası S yüzeyinin üzerinde tanımlanmış ise S_ε yüzeyi yarım küre ile ifade edilerek Denklem 2.9'daki değerin yarısı olacak şekilde hesaba dahil edilebilir ve Denklem 2.9'daki şekilde yazılabilir.

$$\phi(x, y, z) = -\frac{1}{2\pi} \iint_S \left[\phi \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial n} \right] ds \quad (2.9)$$

Eğer (x,y,z) noktası S yüzeyinin dışında tanımlanmış ise, Denklem 2.3 geçerlidir ve değiştirilmeksizin kullanılabilir. Burada Denklem 2.5 veya Denklem 2.6'da verilen sol taraf terimi sıfır olarak alınmaktadır.

İki boyutlu problemde ise $1/r$ terimi $\log r$ ile ve yüzey integralleri çizgisel integral ile değiştirilerek benzer sonuçlar elde edilir. Bu durumda 4π ve $2\pi r$ terimleri $-1/2$ ile çarpılmaktadır.

Denklem 2.9 genellikle bir gemi yüzeyi veya benzer hareketli bir cisim üzerindeki hız potansiyelinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Yüzeydeki normal türev değeri bilinmekte ve Denklem 2.9 bilinmeyen potansiyel değerlerinin sayısal metotlarla belirlenmesinde kullanılmaktadır. Sınırlandırılmamış sonsuz akışkan içerisinde hareket eden cisim için, Denklem 2.9'da verilen integral cisim yüzeyi S_B üzerinde tanımlanmaktadır.

Pek çok problemde cisim, serbest su yüzeyi, taban yüzeyi ve kanal duvarları gibi başka yüzeyler ile sınırlandırılmış akışkan içerisinde tanımlanmaktadır. Bu gibi problemlerde her bir sınır yüzeyi üzerinde kaynak potansiyeli düzenlenerek ve Laplace denklemini sağlayan ilave sınır şartları tanımlanarak Denklem 2.9'un çözümü elde edilebilir. Örnek olarak Green fonksiyonu Denklem 2.10'daki gibi yazılabilir.

$$G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) = 1/r + H(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) \quad (2.10)$$

H fonksiyonu Laplace denklemini sağlayan herhangi bir fonksiyon olmak üzere, Denklem 2.9'daki kaynak potansiyeli düzenlenerek Denklem 2.10'da verilen Green fonksiyonu Denklem 2.11'deki gibi düzenlenebilir.

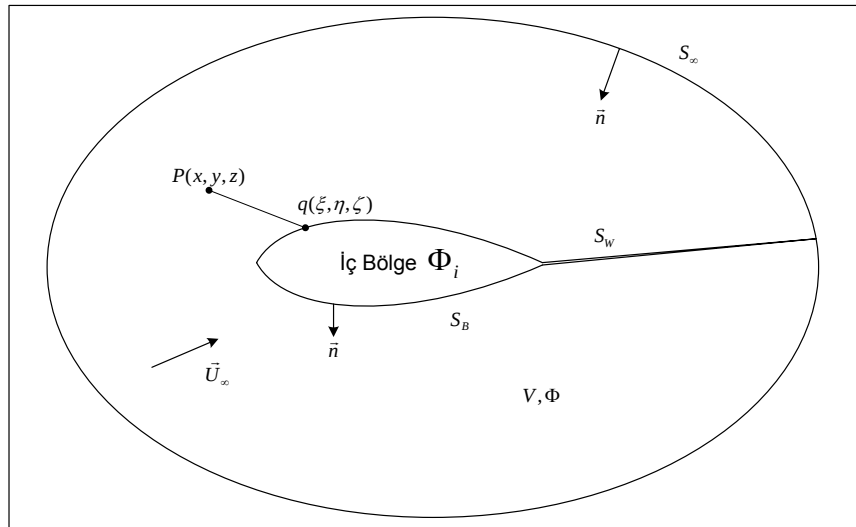
$$\iint_S \left(\phi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \phi}{\partial n} \right) ds = \begin{cases} 0 \\ -2\pi\phi(x, y, z) \\ -4\pi\phi(x, y, z) \end{cases} \quad (2.11)$$

Denklem 2.11'de (x,y,z) noktası kapalı S yüzeyinin kapattığı hacmin dışında ise 0, yüzeyin üzerinde ise $-2\pi\phi(x, y, z)$ ve yüzeyin kapattığı hacmin içerisinde ise $-4\pi\phi(x, y, z)$ olarak alınmaktadır (Newman, 1977). Hesaplama bölgesi Şekil 2.1'de sunulmuştur.

2.1.2 VFLOW'da Potansiyel Akım Teorisinin Kullanımı

Potansiyel akımın anlatılması için problemin çözüm bölgesini tarif etmek gerekmektedir. Sınırları S olan üç boyutlu bir V bölgesi düşünöldüğünde cisim bölgeyi ikiye bölmekte ve kapalı bir yüzey olarak modellenmektedir. Birim normal vektör, yüzeyden akışkana doğru pozitif olarak yönlenmiştir. S bölgesi Şekil 2.1'de gösterildiğı gibi cisim yüzeyi S_B , iz yüzeyi S_W ve dış kontrol yüzeyi S_∞ 'dan oluşmuştur.

Potansiyel akım modelinde cismin hareketli $\vec{U}_\infty$ hız alanı içerisinde sabit olarak durduğu kabul edilmektedir. V bölgesi içerisindeki akışkanın viskozitesiz, sıkıştırılmaz ve irrotasyonel olduğu düşünöldüğünde, bu bölgede Laplace denklemini sağlayan bir hız potansiyelinin varlığından bahsedilebilir (Lamb, 1932).



Şekil 2.1 : Problem Çözüm Bölgesi Gösterimi.

Her iki bölgedeki hız potansiyellerinin Laplace denklemini sağladığı kabul edilmektedir.

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (2.12)$$

$$\nabla^2 \Phi_i = 0 \quad (2.13)$$

Sayısal çözüm için iç ve dış olarak ayrılmış iki yüzeye Green Teoremi uygulandığında genel formu Denklem 2.11'de verilen ifade P noktası için Denklem 2.14 haline dönüşmektedir (Katz ve Plotkin, 2001).

$$\Phi_P = \frac{1}{4\pi} \iint_{S+W+S_\infty} (\Phi - \Phi_i) \bar{n} \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right) dS - \frac{1}{4\pi} \iint_{S+W+S_\infty} \left(\frac{1}{r} \right) \bar{n} \cdot (\nabla \Phi - \nabla \Phi_i) dS \quad (2.14)$$

Burada ilk integral birim alan başına şiddetleri $(\Phi - \Phi_i)$ olan cisim, iz ve sonsuzdaki $(S_B + S_W + S_\infty)$ yüzeye dağıtılmış dublelerden gelen terimdir. İkinci integral terimi, birim alan başına tanımlanan şiddetleri $-\bar{n} \cdot (\nabla \Phi - \nabla \Phi_i)$ olan yüzeye dağıtılmış kaynak terimlerinin katkısını temsil etmektedir.

Sonsuzdaki pertürbasyon potansiyeli ve iz yüzeyindeki kaynak terimleri sıfır olacağından, bir başka ifade ile iz yüzeyi cisim yüzeyinden farklı olarak yük taşımadığından, sadece cisim üzerine gelen düzgün akışa ait potansiyel terimi kalmaktadır. Sonuç olarak Denklem 2.12 Denklem 2.15'de verildiği şekilde basitleştirilmiş olmaktadır.

$$\begin{aligned} \Phi_P &= \frac{1}{4\pi} \iint_S (\Phi - \Phi_i) \bar{n} \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right) dS - \frac{1}{4\pi} \iint_S \left(\frac{1}{r} \right) \bar{n} \cdot (\nabla \Phi - \nabla \Phi_i) dS \\ &+ \frac{1}{4\pi} \iint_W (\Phi_U - \Phi_L) \bar{n} \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right) dS + \Phi_{\infty P} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Yüzey üzerindeki keyfi bir P noktasında Denklem 2.15'de verilen integraller tekil değerlere dönüşecektir. Bu nedenle yüzeyde nokta merkezli bir yarım küre tanımlanarak, yüzey deforme edilmekte ve entegrasyondan hariç tutulmaktadır. Yüzey ile P noktası arasında yapılan bu işlem integrasyonda (S-P) indisi ile tanımlanmıştır. Entegrasyon, bu yarım küre yüzeyli deformasyonda küre yarıçapı r 'nin sıfıra götürülmesi ile P noktasındaki katkı $1/2(\Phi - \Phi_i)_P$ olarak elde edilmektedir.

Böylelikle iç yüzeydeki bir nokta için Denklem 2.16'da sunulduğu gibi ortaya çıkmaktadır.

$$\begin{aligned}\Phi_P &= \frac{1}{4\pi} \iint_{S-P} (\Phi - \Phi_i) \bar{n} \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right) dS - \frac{1}{4\pi} \iint_S \left(\frac{1}{r} \right) \bar{n} \cdot (\nabla \Phi - \nabla \Phi_i) dS \\ &+ \frac{1}{4\pi} \iint_W (\Phi_U - \Phi_L) \bar{n} \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right) dS + \Phi_{\infty P} - \frac{1}{2} (\Phi - \Phi_i)_P\end{aligned}\quad (2.16)$$

Kürenin yüzeydeki entegrasyondan hariç tutulmasını temsilen S-P tanımı yapılmakta ve r değerinin sıfıra gitmesi ile P noktasındaki katkı Denklem 2.16'da son terim olarak eklenmektedir.

Problemin çözümü için iç yüzeyde Dirichlet sınır koşulu kullanılır. Toplam potansiyel Φ , sonsuzdaki potansiyel ϕ_∞ ve bir pertürbasyon potansiyelinin $\phi = \Phi - \phi_\infty$ toplamı olarak ifade edilmiş olur. İç potansiyel Φ_i zahiri (fiktif) akış için kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılmamakla birlikte yüzeyde akım geçişinin var olduğu membran hesaplamaları bu formülasyon ile yapılabilir.

İç yüzey üzerindeki bir nokta için Denklem 2.16 düzenlenecek olursa Denklem 2.17 elde edilir.

$$\begin{aligned}0 &= \frac{1}{4\pi} \iint_{S-P} \Phi \bar{n} \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right) dS - \frac{1}{4\pi} \iint_S \left(\frac{1}{r} \right) \bar{n} \cdot (\nabla \Phi - \nabla \phi_\infty) dS \\ &+ \frac{1}{4\pi} \iint_W (\Phi_U - \Phi_L) \bar{n} \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right) dS - \frac{1}{2} \phi_P\end{aligned}\quad (2.17)$$

Duble ve kaynak şiddetleri Denklem 2.18 ve 2.19'da verildiği gibi sırasıyla yazılacak olursa ;

$$4\pi\mu = \phi = (\Phi - \phi_\infty) \quad (2.18)$$

$$4\pi\sigma = -\bar{n} \cdot (\nabla \Phi - \nabla \phi_\infty) \quad (2.19)$$

Yüzeydeki normal hızın sıfır olması veya bilinen bir değer olması halinde yüzeydeki kaynak şiddeti ;

$$\sigma = \frac{1}{4\pi} \cdot (V_{norm} - \bar{n} \cdot \bar{V}_\infty) \quad (2.20)$$

Yüzeydeki normal hızın sıfır veya bilinen ve dolayısı ile tanımlanabilen bir değer olması ile yüzeye gelen hız vektörü bilinmektedir. Denklem 2.18 ve Denklem 2.19, Denklem 2.17'de yerine konduğunda cisim yüzeyinde tek bilinmeyen olarak duble değerleri kalmaktadır. Kaynak ve duble şiddetleri bilindiğinde, herhangi bir P noktasındaki potansiyel Denklem 2.21 ile ifade edilmektedir.

$$\Phi_P = \iint_S \mu \bar{n} \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right) dS + \iint_S \left(\frac{\sigma}{r} \right) dS + \iint_W \mu_w \bar{n} \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right) dS + \phi_{\infty_P} + K \mu_P \quad (2.21)$$

Denklemde K olarak verilen değişkenin üç farklı şekilde tanımlanabilir:

- P yüzeyde değilse; $K = 0$
- P yüzeyin içerisinde veya dışarısında ise sırası ile; $K = 2\pi$ veya -2π
- P yüzeyle bir açı yapıyor ise; $K = \text{açı}$

Yüzey paneller ile ifade edilerek ayrıklaştırma yapılmakta ve panel üzerindeki kaynak ve duble şiddetleri sabit kabul edilmektedir. Dolayısı ile paneller üzerinde ayrık yüzey integralleri hesap edilebilmektedir.

İntegraller her bir panel için toplanmaktadır. P noktası iç yüzey üzerinde ve panel merkezinde tanımlanmakta, P noktasına sahip panelin yüzey integrali sıfır değerini almakta ve böylelikle bu panel için formülasyonda sadece $-2\pi\mu_P$ terimi kalmaktadır. Diğer paneller için yüzey integrali hesaplanmakta ve P noktasının bulunduğu panelde $-2\pi\mu_P$ terimi sıfır alınmaktadır. Bu şekilde her bir panel için tekrarlanan bu işlem ile, duble terimlerinin bilinmediği eşzamanlı (simultane) doğrusal (lineer) denklem takımı elde edilmektedir.

Hesapta yüzey integralleri her bir panel için panel merkezlerine etkiyen birim tekillik şiddeti başına hız potansiyeli etkiye katsayılarını temsil etmektedir. Böylelikle Denklem 2.22 elde edilmiş olur.

$$\sum_{K=1}^N (\mu_K C_{JK}) + \sum_{K=1}^N (\sigma_K B_{JK}) + \sum_{L=1}^N (\mu_L C_{JL}) = 0 \Big|_{J=1,N} \quad (2.22)$$

Burada;

$$B_{JK} = \iint_K \frac{1}{r} dS \quad (2.23)$$

ve

$$C_{JK} = \iint_K \bar{n} \cdot \nabla \left(\frac{1}{\bar{r}} \right) dS \quad (2.24)$$

$$C_{JL} = -2\pi \quad (2.25)$$

Denklem 2.24 ve Denklem 2.25 yalnızca geometriye bağlı terimler olup, bütün paneller için çözümlenerek etkime katsayısı matrisinin oluşturulmasında kullanılmaktadır. Denklem 2.23 ve Denklem 2.24 bütün paneller için çözümlenerek etkime katsayıları matrisi oluşturulmaktadır. Hız ile ilişkili olması nedeni ile bilinen kaynak terimleri matriste sağ tarafa alınmaktadır.

Panel komşuluğundaki panellerde kaynak ve duble değerleri yüzeye dağıtılmış olduğu için yüzey entegrasyonu ile hesaplanırken, uzak paneller noktasal kaynak ve dubleler olarak çözümlenir (Katz ve Plotkin, 2001). Etkime katsayıları matrisi oluşturulduktan sonra bilinmeyen iz ve cisim yüzeyindeki duble değerleri iz yerleştirme (time stepping wake-wake relaxation) yöntemi ile iteratif olarak elde edilir. Yüzey üzerindeki bütün tekilliklerin bilinmesi ile panel kontrol noktalarındaki hızlar yüzey türevi ile hesaplanabilir. Hızlar duble şiddetinin istenilen doğrultudaki yüzey türevi ile hesaplanmış olur. Hızların bilinmesi ile de Denklem 2.26 yardımı ile basınç katsayısı elde edilmektedir.

$$C_P = 1 - \frac{V_K^2}{V_\infty^2} \quad (2.26)$$

2.2 Viskoz Akım Teorisi (RANS)

Akıştaki bütün taşınım (transport) terimlerinin zaman ve uzayda periyodik ve düzensiz salınımlar gösterdiği hali türbülanslı akış olarak tarif edilmektedir. Akış alanındaki hareketi tanımlayan Navier-Stokes denklemleri sıkıştırılamaz akışlar için tansör notasyonunda yazılacak olursa Denklem 2.27 ve Denklem 2.28 şeklinde tanımlanmaktadır.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.27)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.28)$$

Buradaki değişkenler zamana ve uzaysal koordinatlara bağıllık gösteren anlık nicelikler olarak tarif edilmektedir.

Reynolds ortalaması teknikleri kullanılarak akışkanın hareket değişkenlerini (hız ve basınç gibi) zamandan bağımsız ortalama bileşen ve zamana bağlı salınan bileşene Denklem 2.29' daki ifade ile ayırmak mümkündür (Ünal, 2007).

$$\vec{u}(\vec{x}, t) = \vec{U}(\vec{x}) + \vec{U}^*(\vec{x}, t) \quad (2.29)$$

Süreklilik denklemi gereği kontrol hacmi içerisine girmekte ve çıkmakta olan akışkan aynı miktarda olmalıdır. Bir başka ifade ile sıkıştırılamaz bir akışkan için birim zamanda kontrol hacmi içerisindeki akışkan kütlesi değişimi (mass flux) sıfır olmalıdır. 3 boyutlu süreklilik denklemi tansör notasyonundan kurtarılarak Denklem 2.30'daki gibi verilmiştir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.30)$$

Sıkıştırılamaz bir akışkan için momentumun korunumu esası ile Navier-Stokes denklemleri Denklem 2.31'deki gibi yazılabilir. Denklemden basınç ve üç yöndeki hızlar birbirleri ile bağımlı haldedir ve denklemin özel birkaç hal haricinde analitik çözümü bulunmamaktadır.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (2.31)$$

Akış içerisindeki değişkenlerin ortalamasının alınması ile türbülans davranışının modellenmesi ilk defa Reynolds tarafından önerilmiştir. Bu noktada hız ve basınç değişkenleri Denklem 2.32'de gösterildiği gibi akış içerisinde zamana bağlı olarak değişim gösteren çalkantı terimleri olarak ayrıştırılmış olmaktadır.

$$u = U + u' \quad v = V + v' \quad w = W + w' \quad p = P + p' \quad (2.32)$$

Navier-Stokes denklemlerindeki değişkenlerin ayrıştırılması ile zamana bağlı Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri elde edilmiş olmaktadır. Bu formu ile süreklilik denklemi düzenlenerek Denklem 2.33'deki gibi verilmektedir.

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (2.33)$$

Zaman ortalama Navier-Stokes denklemleri için momentum denklemi Denklem 2.34'de verilmiştir. Denklemden ilave terimler olan Reynolds gerilmeleri görülmektedir (Molland ve Turnock, 2007).

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} \\ &= \frac{-1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) \\ & \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} \\ &= \frac{-1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} \\ &= \frac{-1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

Denklemlerde p basınç, ν kinematik viskozite ve t zamanı temsil etmektedir. Navier Stokes denklemleri ve süreklilik denklemi doğrusal olmayan bağlı (coupled) kısmi diferansiyel denklemler oluşturmaktadır. Söz konusu denklemlerin analitik çözümü yapılamamaktadır ve sayısal bir yaklaşım ile çözüm aranmaktadır. Denklemden hız ve basınç terimleri ortalama değerler ile ifade edilerek sayısal çözümü olacak hale getirilmektedir. Hız terimleri u, v, w; çalkantı ve u' , v' ve w' terimleri olarak tanımlanır. Bu nedenle de sayısal yaklaşıma RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) denklemleri denilmektedir.

Zamana bağılı gemi etrafı akışlarında genellikle türbülans salınım frekansları ve akış hızı arasında uygun zaman adımları seçilerek Reynolds ortalaması yaklaşımı uygulanarak sayısal çözüme gidilmektedir. Böylelikle Reynolds gerilmeleri haricinde, diğer terimler üzerindeki türbülans salınımlarının etkisi ortadan kaldırılmış olur. Ancak çözüm için ortalama hızların dikkate alınacağı bir türbülans modeline ihtiyaç duyulmaktadır.

Literatürde farklı türbülans modelleri uygulamaları ile birlikte yer almaktadır. Türbülans modellerinde Reynolds gerilmeleri terimleri ortalama hızlar ile ilişkilendirilerek çözüme gidilmektedir. Bu birleştirme işlemi Reynolds gerilmelerinin direk formülasyon ile (herhangi bir cebirsel ifade ile) hesaplanabileceği gibi çeşitli mertebelerdeki diferansiyel denklemlerin ana çözüme paralel olarak yürütülmesi ile de yapılabilir. Sıfır denklemlerli veya muhtelif denklemlerli türbülans modelleri kullanılarak daha doğru sonuçlar veren çözümler aranmaktadır. Türbülans modelleri genel bir sınıflandırma ile dört ana başlık altında tarif edilmektedir. Bu modeller, sıfır denklemlerli cebirsel türbülans modeli, bir ve iki denklemlerli modeller ve Gerilme (Stress) Taşıma Modelleri olarak sınıflandırılmaktadır. Sıfır denklemlerli modellerde, Reynolds gerilmeleri doğrudan matematiksel bir ifade ile kullanılarak hesaplanmaktadır. Diğer modellerde diferansiyel denklemlerin paralel olarak çözümü aranmakta ve bu işlem önemli hesaplama zamanları kullanılarak yapılabilir.

Yaygın olarak kullanılan türbülans modelleri aşağıdaki gibi listelenebilir :

- Spalart Almaras (1 denklem)
- $k-\varepsilon$ (2 denklem)
- $k-\omega$ (2 denklem)
- DNS (Doğrudan Sayısal Benzeşim)
- LES (Büyük Girdap Benzeşimi)

Söz konusu modellerin uygulamadaki problemlerin fiziğine göre çok sayıda türetilmiş versiyonları mevcuttur. Havacılıkta yaygın olarak kullanılan Spalart-Almaras modelinin yanında en yaygın türbülans modelinin $k-\varepsilon$ olduğu bilinmektedir. 1990 ile başlayan yılların sonlarına doğru yaygınlaşan ve temelde $k-\varepsilon$ modelinin geliştirilmiş bir versiyonu olan $k-\omega$ modelinde ise, türbülans frekansı olarak adlandırılabilir kinetik enerji ve yayılım oranına bağlı ($\omega = \varepsilon/k$) bir değişken kullanılmakta ve hidrodinamik deney sonuçları ile daha uyumlu sonuçlar elde edildiği bildirilmektedir. $k-\omega$ türbülans modelinin yüksek ağ elemanı sayısına bağlı olduğu ve yüksek kapasitede hesaplama altyapısı gerektiği bilinmektedir (Molland ve Turnock, 2007).

DNS (Direct Numerical Simulation) ve LES (Large Eddy Simulation) modeli (Sagaut, 2001), hidrodinamik analizlerde hemen hemen hiç kullanılmayan modeller olmuştur. Çok yüksek ağ hassasiyeti gerektiren bu modellerin zamana bağlı çözümlerinde iki denklemlili k-ε ve k-ω modellerine göre çok küçük zaman adımlarının seçilmesi gerekmekte, hesaplama altyapısı açısından uygulanabilir olmamaktadır. Ayrıca DNS ve LES modellerinin düşük Reynolds sayılarında yeterli hassasiyette sonuçlar vermediği ve bu modellerin halen geliştirilmesi ihtiyacı olduğu bildirilmektedir (Bertram, 2000).

RANS metodunda hız ve basınç arasındaki ilişkiyi tanımlayan metotlar kullanılmaktadır. Bunlar arasında en çok kullanılan algoritmalar aşağıda listelenmiştir.

- PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators)(Issa, 1986)
- SIMPLE (Semi-Implicit Pressure Linked Equations) (Patankar ve Spalding, 1972)

Bu metotlar ile hesaplamalarda basınç düzeltmesi yapılmaktadır. Metotlar arasında problemin fiziksel özelliklerine göre sayısal stabilite ve hesaplama süresi dikkate alınarak tercihler yapılması gerekmektedir. Bahse konu metotlar pek çok ticari RANS programlarında seçenek olarak sunulmakta ve kullanıcının tercihinine göre hesaplamalarda kullanılmaktadır (Molland ve Turnock, 2007).

2.3 FLUENT Programı ile Türbülanslı Akışların Modellenmesi

Akıştaki bütün taşınım (transport) terimlerinin zaman ve uzayda periyodik ve düzensiz salınımlar gösterdiği hali türbülanslı akış olarak tarif edilmektedir. Reynolds sayısı Re , taşınım (transport) terimlerindeki karışım miktarı ve akımın sınıflandırılması ile ilgili en önemli kriterdir. İç ve dış akışları ve türbülanslı akış özellikleri Çizelge 2.1’ de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1 : Akış Özellikleri ve Türbülans Başlangıcının Sınıflandırılması.

Akış Türü	Türbülans Başlangıcı Değeri	Kriter Formülasyonu
Dış Akışlar	Yüzey Boyunca Akışlar: $Re_x \geq 5 \times 10^5$ Engel Önündeki Akışlar: $Re_x \geq 2 \times 10^4$	$Re_L = \frac{\rho UL}{\mu}, L = x, D, D_h$
İç Akışlar	Yüzey Akışları: $Re_{Dh} \geq 2300$	
Doğal Taşınım	$Ra \geq 10^9 Pr$	$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\alpha\nu}$ (Rayleigh Sayısı)

Dış akışlarda akımın türbülanslı kabul edilebileceği sınır değerleri iki şekilde sınıflandırmak mümkündür. Yüzey boyunca olan akışlarda Reynolds sayısının 5×10^5 değerini aşması türbülanslı akışın başlangıcı kabul edilmektedir. Akım bir engel ile karşılaşmakta ise bu değer 2×10^4 olarak alınmaktadır. Benzer şekilde boru içindeki akış gibi iç akışlarda hidrolik çapa bağlı Reynolds sayısının 2300 mertebesini geçmesi, türbülans etkilerinin görülmeye başlanacağı sınır değer olarak kabul edilmektedir. Çizelge 2.1'de FLUENT programında konu hakkında kabul gören genel bilgilere yer verilmiştir ve bu kriterler akış özelliklerine göre farklılıklar gösterebilir. (Url-2)

2.3.1 Ağ Örgüsü Modellenmesi

FLUENT'te sınır tabaka içerisindeki akış özelliklerinin doğru modellenmesi için ağ örgüsünün doğru bir şekilde planlanarak oluşturulması gerekmektedir. Reynolds Sayısının tahmin edilerek oluşturulacak olan ağ örgüsünün cidardan olan yüksekliğinin ayarlanması doğru sonuçlar elde edilebilmesi için şarttır. Seçilen ağ örgüsünün geometrisi ve ilk hücre yüksekliğinin hesaplanması çözüme başlanmadan önce planlanan önemli konulardır.

Laminar akış özelliğine sahip bir akış modeli için seçilen ağ örgüsü, türbülanslı akışın çözüleceği problemde farklılık arz etmektedir. Türbülanslı akış için yapılan ağ örgüsünde, sınır tabaka içerisinde alt katmanlara bölünmesi gerekmektedir. Akış özelliklerinin çözümlenmesi beklenen bölgeye göre ilk hücre yüksekliği belirlenmektedir. Sınır tabaka içerisindeki akış davranışının incelenmesi gerekiyor ise İyileştirilmiş Duvar Fonksiyonu modelinin kullanılması gerekmektedir. Hücre merkezinin esas alındığı ilk hücre yüksekliği seçimi türbülanslı akışlarda boyutsuz duvar mesafesi olarak adlandırılan y^+ değerinin 1 ve 30 arasında olduğu ara katman (buffer layer) içerisinde kalmaması gerekmektedir. (Url-2)

FLUENT programında duvar fonksiyonu modelinin seçilmesi ile ilgili bilgi Çizelge 2.2'de sunulmuştur.

Çizelge 2.2 : FLUENT’te Duvar Fonksiyonu Modelinin Seçim Kriterleri (Url-2).

Duvar Fonksiyonu Modeli	Duvar Fonksiyonu Değeri	Uygulama/Kullanım Alanı
İyileştirilmiş Duvar Modeli	$y_p^+ \approx 1$ ve $y_p^+ \approx 5$ arasında ise ilk hücre laminar alt tabaka içerisindedir.	Düşük Re Sayılı Akışlarda
Standart Duvar Fonksiyonları Modeli	$y_p^+ \geq 30 - 300$ arasında ise ilk hücre logaritmik tabaka içerisindedir.	Yüksek Re Sayılı Akışlarda
İki Katmanlı (Non-Equilibrium) Duvar Fonksiyonları Modeli	Standart Duvar Fonksiyonları ile aynı limitlerde ve basınç düşümü etkilerinin arandığı akışlarda kullanılmaktadır.	Hafifçe Ayrılan ve Yeniden Birleşen Akışlarda
Kullanıcı Tarafından Belirlenen Duvar Fonksiyonları	Kullanıcı ara yüzünde tarif edilmektedir.	Kullanıcı Tarafından Seçilen Akışlarda

Hesaplama kapasitesi oluşturulacak ağ kalitesi ile doğrudan ilişkilidir. Akım ayrılması veya yeniden birleşme (re-attachment) gibi akım özelliklerinin incelendiği problemlerde sınır tabaka içerisinde mümkün olan en hassas ağ yapısının kurulması önemlidir. y^+ değerinin 1’in altında olduğu bir ağda dahi ilk hücre ve cidar arasında birkaç katmanın yerleştirilmesi genel uygulama bilgisi olarak değerlendirilmektedir.

2.3.2 FLUENT Programında Kullanılabilen Türbülans Modelleri

FLUENT programında, mühendislik uygulamalarında karşılaşılan akışların bütün fiziksel özelliklerinin aynı anda modellendiği tek bir türbülans modeli bulunmamaktadır. Bu nedenle yıllar içerisinde araştırma ekipleri tarafından geliştirilen ve ihtiyaçlara göre özelleşmiş türbülans modelleri ortaya çıkmıştır. Ticari programlar içerisinde genel kabul gören farklı türbülans modelleri yer almaktadır. Kullanıcı problemin sınır şartları ve özelliğine göre türbülans modelini tayin etmekte ve çıkan sonuçların yeterliliğine göre hangi türbülans modelinin kullanılması gerektiğine kendisi karar vermektedir.

Türbülans modellerinin seçimi hakkındaki genel bilgiler Çizelge 2.3’de sunulmuştur (Url-2).

Çizelge 2.3 : FLUENT’te Türbülans Modelinin Seçimi Hakkında Genel Bilgiler(Url 2).

Türbülans Modeli	Özellikleri	Uygulama / Avantajları
Spalart-Almaras Modeli	Tek denklemlilikli model	Havacılık uygulamalarında kullanılmaktadır. Yüksek hızlı duvar etrafı akışlarda tercih edilmektedir.
Standart k- ϵ Modeli	En basit iki denklemlilikli model	İlk iterasyonlarda kullanılan güvenilir bir türbülans modelidir.
Standart k – ω Modeli	Kinetik Enerji ve Spesifik yayılım oranını ω (ϵ/k) esas alan modeldir.	Düşük Re sayılı akışlarda, duvar ile sınırlandırılan ve geçiş bölgesi akışlarında tercih edilmektedir.
SST k – ω Modeli	Standart k – ω Modeli benzeridir Yakın duvarda k- ϵ olarak davranır Serbest akımda k- ω olarak davranır	Yaygın olarak dış akışlarda güvenilir sonuçlar vermektedir. Akım ayrılması ve yüksek basınç gradyeninin olduğu akışlarda tercih edilmektedir.
Reynolds Stress Modeli	Beş denklemlilikli model	Karmaşık 3 boyutlu akışlarda kullanılır. Çözüm zamanı ve hafıza gerektirmektedir.

2.4 Takıntı / Gövde Bağlantıları

Kanat/gövde bağlantıları havacılık, denizcilik ve turbomakina tasarımı alanlarında sıklıkla rastlanan ve akış özelliklerinde farklı değişimlerin olduğu önemli bir bölgedir. Genellikle birbirlerine dik açılarda bağlanan yüzeylerin önünde oluşan akım yavaşlaması ve bağlantı bölgesinin devamında akımın ayrılması veya yeniden bağlanması (re-attachment) şeklindeki davranış dikkatle incelenmesi gereken bir konudur. Dış akışın önemli olduğu havacılık ve denizcilik uygulamalarında kullanılan kanatçık, dümen levhası gibi takıntılar, dış gövde üzerine yerleştirilmektedir ve gövde takıntılar ile karşılıklı etkileşim içerisinde olmaktadır. Literatürde konu hakkında önemli miktarda deneysel çalışma bulunmaktadır. Kanat / gövde bağlantı bölgesindeki akış hesaplamalı akışkanlar mekaniği yöntemleri ile de çalışılmakta olan bir araştırma alanıdır.

Kanat/gövde bağlantıları hakkında literatürde yer alan uygulama alanları aşağıdaki Çizelge 2.4’de listelenmiştir.

Çizelge 2.4 : Kanat Gövde Bağlantıları Uygulama Alanları.

Uygulama Alanı	Birleşim Bölgesi	Dezavantajları	Kaynaklar
Havacılık	Kanat / Gövde	Direnç, Aeroakustik	Mehta (1984)
	Stabilizer Fin / Gövde	Titreşim	Kubendran ve diğ. (1988)
Denizcilik	Dümen/Tekne	Pervane Düzlemi Hız Dağılımı	Devenport ve Simpson (1992)
	Denizaltı Kulesi / Gövde	Direnç, Hidroakustik	Barberis ve diğ. (1997)
Turbomakinalar	Kanatçık / Türbin	Türbülans, Kaviteasyon	Lewis ve diğ. (1993)
Hidrolik Yapı Tasarımı	Köprü Ayakları	Erozyon, Oyulma	Şahin ve Öztürk (2009)

Yazarlar Çizelge 2.4’de listelenen çalışmalarında, kanat gövde bağlantılarında ortaya çıkan akım düzensizliklerinin uygulama alanı açısından dezavantajlarından bahsetmiş ve istenmeyen girdap etkilerinin azaltılması konusunda alınabilecek önlemler hakkında bilgiler vermiştir.

Havacılıkta karşılaşılan kanat/gövde birleşimi atnalı girdabının görüldüğü en tipik örnektir. Bu tip bağlantılarda oluşan atnalı girdabı titreşim ve akustik problemlere neden olduğu kadar, gövde üzerindeki akımda bozulmalara neden olmakta ve kanat üzerindeki kaldırma kuvvetini olumsuz etkilemektedir.

Ayrıca oluşan girdabın düzensizliği (bimodal unsteadiness) nedeni ile uçaklarda kontrol problemlerinin ortaya çıkmasına sebebiyet vermektedir (Devenport ve diğ., 1990; Ölçmen ve Simpson, 2006).

Atnalı girdabı yerel Reynolds sayısı ve akım yönündeki girdaplılık şiddetinin artması nedeni ile birleşim bölgesinde yüksek ısı transferinin yapılabilmesine imkan vermektedir. Turbomakinalarda kanatçık türbin duvarı bağlantı bölgesinde bu tip girdabın etkileri deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Kanat / gövde bağlantılarında ısı transferi konusunda yürütülen deneysel çalışmalar sonucunda, ısı transferinin girdap şiddeti ile doğrudan ilişkili olduğu ortaya çıkmıştır. Lewis ve diğ., (1993) soğutma ihtiyacının önemli olduğu problemlerde atnalı girdabının etkilerinin olumlu yönde kullanılabilmesi amacı ile deneysel çalışmalar yürütülmüş ve birleşim bölgesindeki ısı transferi ile ilgili kapsamlı ölçümler yapılmıştır.

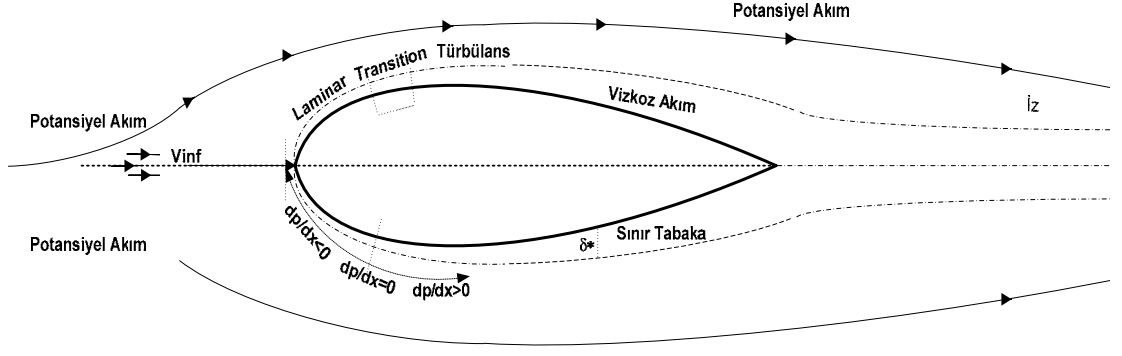
Bir yapı elemanının serbest akıma normal yönde konumlanmasını gerektiren uygulamalardan birisi de inşaat/hidrolik mühendisliği alanında kullanılan köprü taşıyıcı ayaklardır. Köprü ayağının ön tarafında akımın yavaşlamasından kaynaklanan atnalı girdabı gözlemlenmektedir. Bir nehir veya kanal içerisinde zemine sabitlenen genellikle silindirik kesitlere sahip ayakların etrafında zaman içerisinde çukurlanma ve oyulma gözlemlenmekte ve bu da yapının stabilitesini olumsuz etkilemektedir. Konu hakkında rüzgar tünelleri kullanılarak yürütülen deneysel çalışmalar literatürde verilmektedir. (Şahin ve Öztürk, 2009)

Denizcilikte karşılaşılan atnalı girdabı takıntıların gövde ile bağlantı bölgesinde ortaya çıkmaktadır. Yalpa finlerinin gövde ile birleşim bölgesi, geminin başından itibaren kalınlaşarak gelmekte olan sınır tabakanın fin önünde atnalı girdabı oluşmasına neden olmaktadır. Benzer şekilde bir denizaltının gövde ve kulesinin birleşim bölgesi atnalı girdabı için tipik bir örnek teşkil etmektedir. Kule sonrasında gövde boyunca devam eden girdaplı akım, pervane düzlemine yüksek hızla girmekte ve iz kalitesi ve akustik açıdan olumsuzluklara neden olmaktadır.

Dış akışlarda takıntı gövde birleşim bölgesinde atnalı girdabı olarak adlandırılan ve davranışı belirgin olarak gözlemlenen bir girdap oluşmaktadır. Girdap nedeni ile birleşim bölgesine yüksek momentumda serbest akımın taşınması sonrasında bu bölgedeki kayma gerilmeleri artmakta ve direnç artışı görülmektedir. Cisim etrafında hemen hemen simetrik olarak oluşan girdabın bacaları izdeki süreksizliği tetiklemekte ve pervane kanatları ve dümen levhaları ile etkileşime girmektedir.

Kanat üzerindeki basınç dağılımı temelde potansiyel akımın etkisi ile belirlenmektedir. Yüzeydeki basınç dağılımında viskozite etkileri daha düşük seviyede olmaktadır. Akımın yavaşlaması nedeni ile kanadın burun bölgesinden itibaren basınç giderek düşmekte ve bu bölgede negatif (favorable) basınç gradyeni oluşmaktadır.

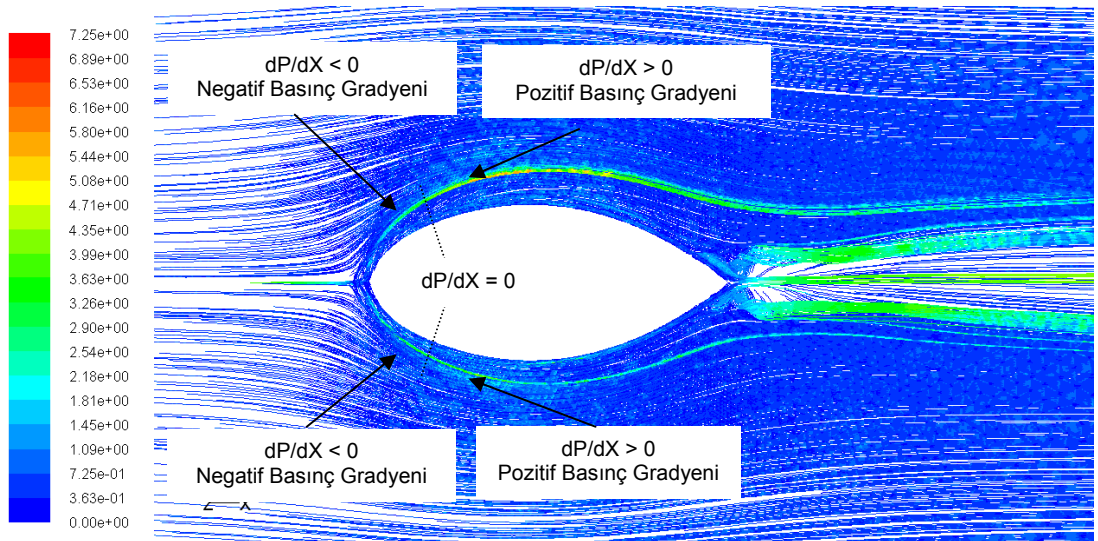
Devamında kanat kesitinin şekline bağlı olarak kanat üzerindeki bir hat boyunca basınç değişimi sıfır olmakta ve kanat kesitinin kalınlaştığı bölgede pozitif (adverse) basınç gradyeni gözlemlenmektedir. Şekil 2.2 pozitif ve negatif basınç gradyeni tanımlamasında, oluşmakta olan sınır tabakanın yüzeyden mümkün olduğunca ayrılmaması kastedilmektedir.



Şekil 2.2 : Eğimli Yüzeylerdeki Sınır Tabaka Gösterimi.

Bu çalışmada incelenen Pod strut birleşimi akış karakteristiklerinin ani değişimler yaptığı bir bölgedir. Strut önünde serbest akım yavaşlamakta ve de strut kesitinin en kalın olduğu bölgede ise en yüksek değerini almaktadır. Birleşim bölgesinde yavaşlayan akım dönme eğilimi göstererek pod boyunca dönerek ilerleyen bir girdap oluşmaktadır. Şekil 2.3'de, pozitif ve negatif basınç gradyeni bölgesi ve yerel hızlara bağlı olarak gösterilen atnalı girdabı görülmektedir.

Bu çalışmada incelenen pod/strut birleşiminin ön ve arka tarafında pervane çalışacağı kabul edilmektedir. Her iki düzlemde de çalışacak pervanenin varlığı, akustik ve titreşim açısından düşünüldüğünde, özellikle arka pervane düzlemindeki hız dağılımı açısından olumsuz etkilere sahiptir. Atnalı girdabının strut etrafında oluşan her iki bacağı pervane düzlemine doğrudan gelmektedir. İz kalitesi açısından en azından arka pervane düzleminde mümkün olduğunca düzgün bir hız dağılımı istenilmektedir.

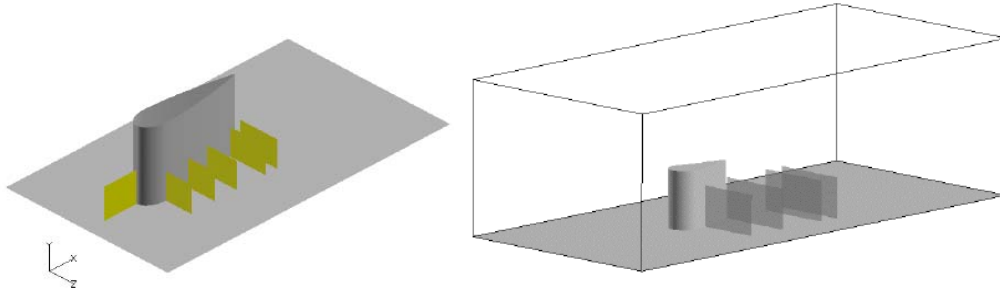


Şekil 2.3 : Akım Hatları ile Atnalı Girdabı Gösterimi (z=0 m).

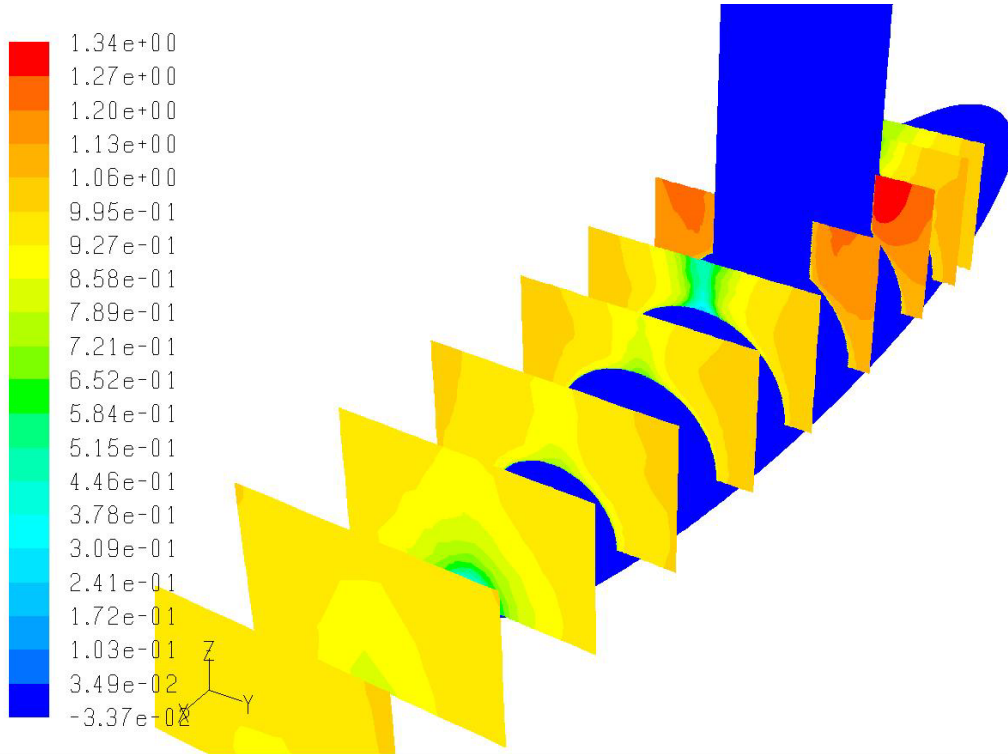
Kanat etrafından başlayarak atnalı girdabının oluşmasının akış içerisinde istenmeyen etkilere neden olduğu bilinmektedir (Ölçmen ve Simpson, 2006). Literatürde yaygın olarak incelenen bu problemin, klasik kanat ve düz bir levha birleşimi olarak modellendiği görülmektedir (Devenport ve diğ., 1990; Ölçmen ve Simpson, 2006).

Genellikle yatayda yer düzlemine dik olarak yerleştirilen kanadın önündeki akım yavaşlamasına bakılmakta ve bu bölgede oluşan girdabın etkilerinin kanat etrafında ve takip eden eşdeğer düzlemlerdeki hız konturları incelenmektedir. Bu düzlemlerde çizdirilen eksenel hız vektörlerindeki değişim ile atnalı girdabının varlığı ve şiddeti hakkında kestirimler yapılmaktadır.

Yapılan çalışmalarda girdap etkilerinin izlenmesinde kullanılan düzlemler Şekil 2.4, Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da sunulmuştur. Alin ve Fureby (2008), yalnızca kanat etrafındaki akımın izleneceği düzlemleri Şekil 2.4'te görüldüğü gibi yerleştirmiştir.

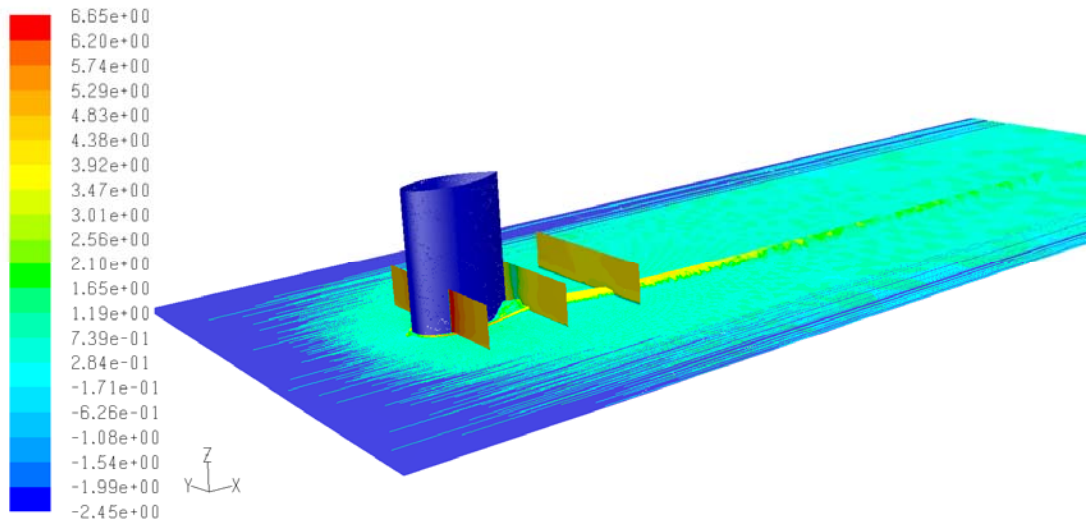


Şekil 2.4 : Kontrol Hacmi ve Düzlemlerin Gösterimi (Alin ve Fureby, 2008).



Şekil 2.5 : Kontrol Hacmi ve Hız Düzlemlerinin Gösterimi.

Şekil 2.5’de gösterildiği gibi, atnalı girdabının pod boyunca ilerleyişi, cisim etrafında oluşturulan düzlemlerdeki hız dağılımı incelendiğinde anlaşılmaktadır. Şekil 2.4 ve Şekil 2.8’de literatürde bir kanat için oluşturulan kontrol hacmi ve hız düzlemleri görülmektedir. Yalnızca strut için yapılan viskoz hesapta kullanılan kontrol hacmi Şekil 2.6’da gösterilmiştir. Kanat kesitleri farklı olmakla birlikte Şekil 2.4 ve Şekil 2.6 benzerlik göstermektedir. Şekillerde atnalı girdabı, akım hatları ve oluşturulan hız düzlemleri görülmektedir.



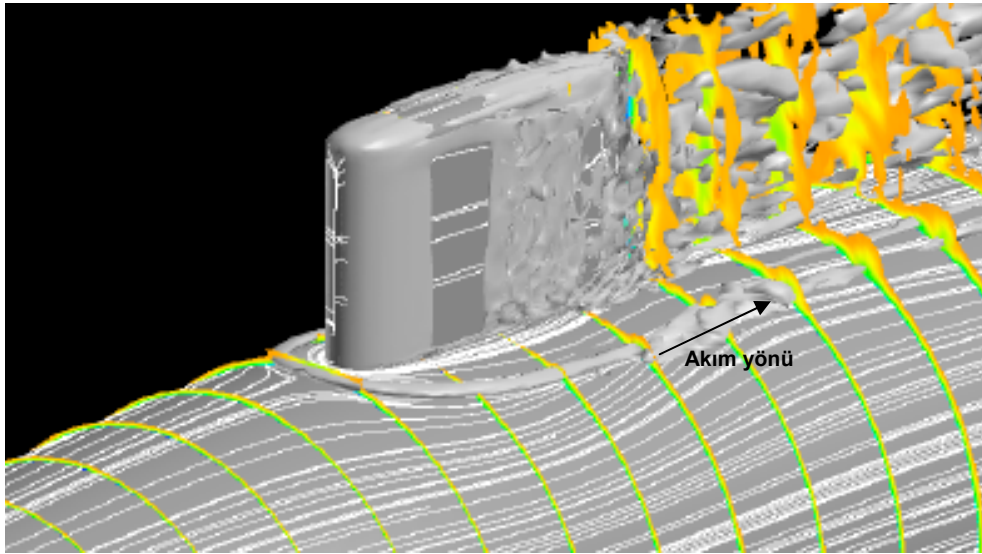
Şekil 2.6 : Kontrol Hacmi ve Düzlemlerin Gösterimi.

Kanadın önündeki simetri düzlemi ve kanat boyunca serbest akıma dik yönde yerleştirilen düzlemler atnalı girdabının izlendiği tipik kesitlerdir. Eşdeğer yükseklikteki dik düzlemler üzerindeki hız dağılımı girdap bacaklarının gözlemlendiği yerler olup, yerel vektörlerdeki değişiklikler ile hız dağılımı hakkında bilgi edinilmektedir.

Deneysel çalışmalarda ise bu düzlemlerdeki hızlar çeşitli yöntemler ile ölçülmekte ve serbest akıma göre daha yüksek hıza sahip olan girdabın varlığı gösterilmektedir. Atnalı girdabı akım yönünde uzayan (vortex stretching) dar bir hüzme şeklindedir ve kolayca ayırt edilebilen bir yapıdadır.

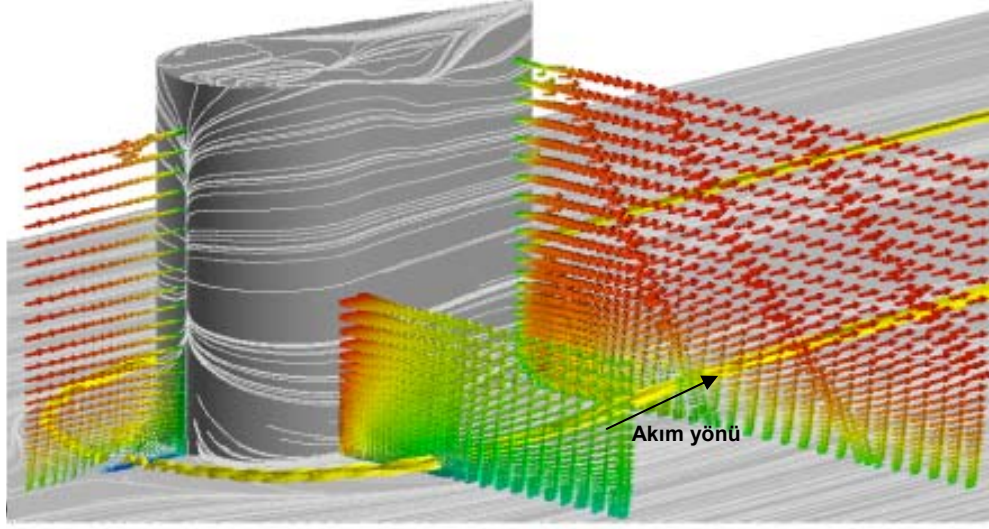
Alin ve Fureby (2008) tarafından denizaltılar ile ilgili yayınlanan güncel bir çalışmada kullanılan geometri Şekil 2.7’de sunulmuştur. Bu çalışma doğrudan denizaltı kulesinin incelendiği güncel bir kaynak olması açısından ilgi çekicidir. Makalede 3 farklı türbülans modelinin kullanıldığı anlatılmakta ve atnalı girdabının şiddetinin en doğru şekilde tahmin edilmesinin amaçlandığı görülmektedir.

Simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırıldığı çalışmada zaman ortalamalı RANS çözümünde girdap bacaklarının etkilerinin uzak bölgede zayıfladığı ortaya konulmuştur.



Şekil 2.7 : Denizaltı Kulesi Atnalı Girdabı Gösterimi (Alin ve Fureby, 2008).

Şekil 2.7’de kule önünde akımın yavaşladığı birleşim bölgesinden itibaren başlayan ve kule boyunca ilerlemekte olan atnalı girdabı görülmektedir. Kanat etrafında ise genellikle sonuçların deney sonuçları ile uyumlu sonuçlar verdiği bildirilmiştir (Şekil 2.8), (Alin ve Fureby, 2008). Girdap ilerlemekte iken yerel akımda düzensizliklere neden olarak kule etrafındaki düzlemlerdeki hız dağılımını olumsuz etkilediği açıkça görülmektedir.

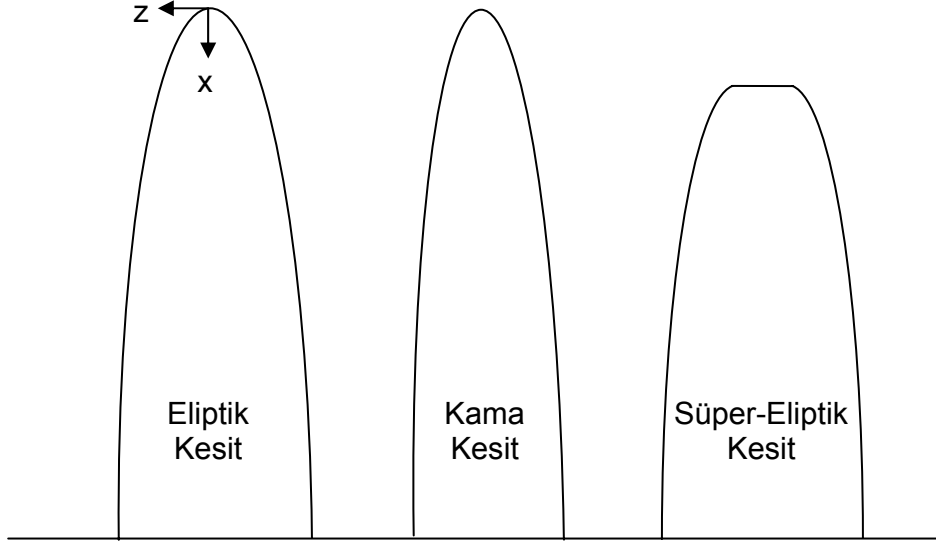


Şekil 2.8 : Akım Hatları ve Hız Vektörleri ile Atnalı Girdabı Gösterimi (Alin ve Fureby, 2008).

Kanat gövde bağlantıları ile ilgili çalışmalar 1982'den itibaren Mehta (1984), Shabaka ve Bradshaw (1981) tarafından yürütülmüştür. Mehta (1984) tarafından üç farklı burun kesiti için yapılan deneysel çalışma sonucu olarak, atnalı girdabının kanat uç kesitine doğrudan bağlı olduğu ortaya çıkmıştır. Kanat uç kesitinin (burun kesiti), kanat etrafındaki basınç gradyenini doğrudan etkilediğini ve dolayısı ile atnalı girdabının oluşumunu etkileyen en önemli faktör olduğunu belirlemiştir.

Mehta tarafından yapılan deneylerde eliptik, süper eliptik ve kama (wedge) formundaki üç farklı burun şekli kullanılmış ve simetri eksenindeki birleşim bölgesinde oluşan vektörler karşılaştırılarak girdabın etkilerinin en aza indirildiği kesitler belirlenmiştir. Çalışmaların sonucunda girdap şiddeti ve şeklinin burundaki kütyapı ile doğrudan ilişkili olduğu anlaşılmıştır. Mehta (1984) tarafından deneylerde kullanılan temsili kanat kesitleri Şekil 2.9'da sunulmuştur.

1990 yılından başlayan dönemde konu hakkındaki en kapsamlı araştırmalar Virginia Polytechnic Enstitüsü ve Virginia Üniversitesi'nde Devenport, Simpson ve Ölçmen tarafından yürütülmüştür (Devenport ve diğ., 1990; Ölçmen ve Simpson, 2006). Bir çok araştırmacının yaptığı deneysel ve hesaplamalı çalışmalar Simpson ve Devenport tarafından yayınlanmış, birleşim bölgesinde ısı transferi, zaman bağlı hız değişimi, sınır tabaka hız dağılımı ve akustik ölçümler gibi geniş kapsamlı ölçüm sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 2.9 : Mehta Tarafından Kullanılan Kanat Kesitleri (Eliptik, Süper-Eliptik ve Kama Eliptik Kesitler), Mehta (1984).

Rood ve Antony (1985) tarafından yapılan çalışmada pozitif hücum açılarındaki kanadın izler kenar şeklinin de birleşim bölgesi girdabına etkisi olduğu bildirilmiştir. Küçük hücum açılarında izler kenar civarındaki basınç gradyeninin atnalı girdabını şiddetini arttırdığı ve akımdaki bozulmanın daha geniş bir alanda görüldüğü deneysel çalışmalarla ortaya konulmuştur.

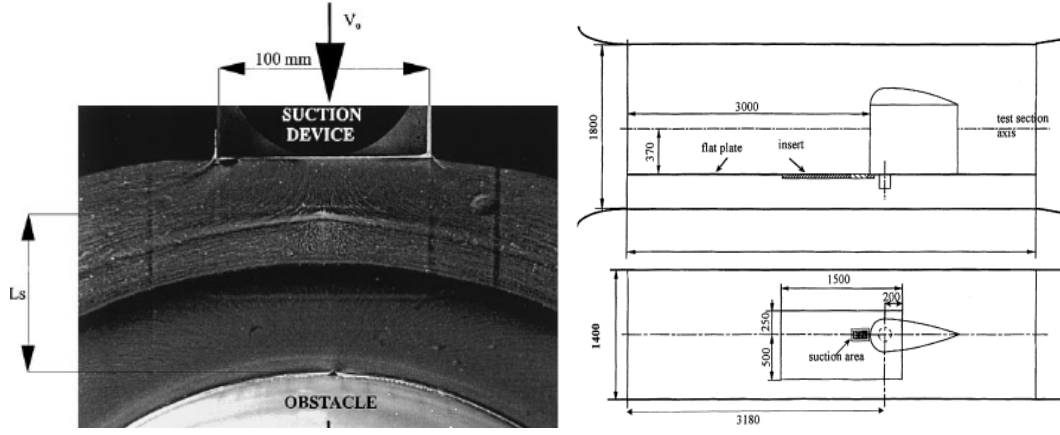
Birleşim bölgesinde geniş düzgünleştirme (fairing) kullanımının etkileri deneysel çalışmalarla incelenmiş ve böyle bir akım düzenleyicinin önder kenar akım ayrılmasını engellediği görülmüştür (Kubendran ve diğ., 1998). Önder kenarda dolgun bir yüzey kullanılması ile girdap bacaklarının şiddeti azaltılmış ve daha düzgün bir iz elde edilmiştir. Kanat gövde birleşim bölgesinde keskin açılarla yuvarlatma kullanımı araştırılmış ancak girdap üzerindeki olumlu etkilerine rağmen akımın açılı geldiği hallerdeki ayrılma ve bozunumun büyük olduğu ortaya çıkmıştır (Pierce ve diğ., 1988).

Havacılıkta birleşim bölgesinde kanat gövde etkileşim direncini azaltması sebebi ile kanat çevresi boyunca yerleştirilen yuvarlatmalar tercih edilmektedir. Uçak gövdesinde kanat etrafına konulacak üç farklı yuvarlatma için deneysel çalışmalar yayınlanmış ancak açılı hallerdeki asimetrik etkilerin varlığı nedeni ile net bir sonuca varılamadığı bildirilmiştir (Pierce ve diğ., 1988).

Sabit levha üzerine yerleştirilen kanat uçlarına sabit yarıçaptaki bir yuvarlatmanın konulması deneysel olarak çalışılmıştır (Devenport ve Simpson, 1992). Deney düzeneğinde kanadın gövdeye bağlantı hattı tamamen sabit yarıçaplı dairesel kesitli bir yuvarlatma ile birleştirilmiştir. NACA 0020 kesitli kanat ile yapılan rüzgar tüneli deneyleri sonucunda simetri düzleminde önder kenardan 0.45T kanat kalınlığı kadar önde akım ayrılması gözlemlenirken, 0.27T mesafede belirgin bir başka hat görülmüştür. Bu hattın akım ayrılmasını iki farklı bölgeye bölen düşük kesme kuvvetleri hattı (line of low shear) olduğu sonucuna varılmıştır. Kanat arkasındaki iz bölgesinde birleşen yüksek ve düşük kesme kuvvetleri hattı kanat arkasında balık kuyruğu şeklini aldığı görülmüştür. İki farklı sınır tabaka kalınlığı ile tekrarlanan deneylerin sonucunda sabit yarıçaptaki bir yuvarlatma kullanılmasının, önder kenar akım ayrılmasının önüne geçemediği ve dolayısı ile atnalı girdabının oluşmasını engelleyemediği görülmüştür. Bu aslında beklenen bir sonuç olarak yorumlanmaktadır. Sabit yarıçaplı yuvarlatma kullanmak sonuç olarak köşe bölgedeki akım yavaşlamasını engellememektedir. Böyle bir yuvarlatma konulduğunda akımın durma noktasının yeri bir miktar değişmekte ancak atnalı girdabının oluşması engellenememektedir. Girdap merkezinin yeri değişmekte iken kanat boyunca olan etkilerinin devam ettiği gözlemlenmiştir.

Atnalı girdabının engellenmesi konusunda bir başka yaklaşım da birleşim bölgesine gelen sınır tabaka kalınlığının azaltılmasıdır. Sabit yarıçapta yuvarlatma kullanımına benzer şekilde birleşim bölgesine üçgen kesitli bir yuvarlatma konularak deneysel çalışmalar yürütülmüştür (Barberis ve diğ., 1997). Rüzgar tünelinde yapılan deneylerde sabit bir yuvarlatma kullanılarak birleşim bölgesindeki hız vektörleri çizdirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Devenport ve diğ., (1990) tarafından bildirilenler ile benzer şekilde çıkmıştır. Atnalı girdabının engellenmesi için bir başka çözüm de birleşim bölgesi öncesinde bir emiş kanalı açılmasıdır.

Kullanılan deney düzeneği Şekil 2.10'da sunulmuştur. Bu deneylerde esas olarak kanat üzerine doğru kalınlaşarak gelmekte olan sınır tabakanın düzlemsel emiş kanalı sayesinde yeniden incelererek girdap oluşumunu engellediği gözlemlenmiştir. Farklı emiş debileri ile köşe girdabının şiddeti arasındaki ilişki deney sonuçları ile irdelenmiş, emiş kanalının atnalı girdabının etkilerini azaltmakta olduğu ortaya konulmuştur.



Şekil 2.10 : Önder Kenara Yerleştirilen Emiş Kanalı Deney Düzeneği (Barberis ve diğ.,1997).

Bilindiği gibi rüzgar ve su tünellerinin tasarımında tabanda oluşan sınır tabaka benzer şekilde inceltilmekte ve azaltılmaktadır. Su tünellerinde akışkan ile mümkün olduğunca aynı hızda hareket eden taban tasarımının tek amacı, sınır tabaka kalınlığının azaltılmasıdır (Barberis ve diğ.,1997). Deneydekine benzer şekilde rüzgar ve su tünellerinde emiş kanalları kullanılmaktadır. Akım ayrılmalarının en aza indirilmesinin amaçlandığı bu tip uygulamalar köşe girdabının azaltılması açısından kullanışlı olabilir ancak pratikte çok uygulanabilir bir seçenek değildir. Gerçek harici (dış) akışların var olduğu havacılık, denizcilik gibi uygulamalarda birleşim bölgesi önünde bir emiş kanalı her zaman kullanışlı olmamaktadır. Söz konusu emiş kanalı, çok özel uygulamalarda soğutma kanalı olarak kullanılabilmeyle birlikte yaygın bir seçenek değildir.

Atnalı girdabının oluşumunun engellenmesi için daha basit ve uygulanabilir bir seçenek önerilmiştir (Devenport ve Simpson, 1992). Birleşim bölgesine kanadın efektif boyunu arttıracak bir yuvarlatma konularak bu bölgedeki akım yerel olarak hızlandırılmaktadır. Böylelikle atnalı girdabını oluşturan etkiler ortadan kaldırılmakta ve daha düzgün bir iz elde edilmektedir. Kanat burnunda pozitif ve negatif basınç gradyeni bölgesinin daha geniş bir alana yayılması sayesinde akım ayrılması engellenmekte ve atnalı girdabının etkileri bertaraf edilmektedir.

Sonuç olarak atnalı girdabı, birleşim bölgesinin şekli ve birleşim bölgesine kadar gelen sınır tabaka kalınlığı olmak üzere iki temel faktörden etkilenen bir akış olayıdır. Birleşim şeklinin etkilerinin sınır tabaka kalınlığına göre daha baskın olduğu bilinmektedir (Devenport ve Simpson, 1992).

Baş yuvarlatma ile yapılan deneylerde iki farklı sınır tabaka kalınlığı incelenmiş ancak atnalı girdabının oluşumu ve kanat arkasındaki girdap şiddetinin çok etkilenmediği görülmüştür.

Girdabın oluşmasında burun bölgesindeki basınç gradyeninin en temel faktör olması sebebi ile birleşim bölgesine yerleştirilecek bir yuvarlatmanın anlamlı bir çözüm olacağı ortaya çıkmaktadır. Devenport ve Simpson (1992) tarafından yapılan deneylerde sabit bir levha üzerine kanat yerleştirilmiş ve kanadın burun bölgesine baş yuvarlatma konulmuştur. Baş yuvarlatma atnalı girdabının oluşmasını engellemiş ve kanat arkasındaki iz düzlemi üzerinde düzgün bir hız dağılımı elde edilmesini sağlamıştır. Yuvarlatmalı ve klasik kesitli bir kanada ait hız dağılımları karşılaştırılmış ve düzgün hız dağılımı farkları irdelenmiştir. Baş yuvarlatma farklı hücum açılarında da incelenmiş ve Kubendran ve diğ. (1988)'in kullandığı keskin baş yuvarlatmaya göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Üç boyutlu yüzeylere uygulanacak yuvarlatma şekli yüzey sürekliliğinin korunması açısından oldukça önemlidir. Yuvarlatmanın üç boyutlu eğrisel kesitli kanat ve gövde üzerine kırıklık içermeden bağlanması gerekmektedir. Bu çalışmada uygulanan baş yuvarlatma, pod ve strut yüzeyini yumuşak bir şekilde bağlamaktadır.

Yapılan literatür incelemesinin sonuçları incelendiğinde, konu hakkında yapılan farklı çalışmalar arasında baş yuvarlatma konulmasının en uygun yaklaşım olduğu ortaya çıkmaktadır. Her bir çalışmanın amacı ve ana fikri, eşdeğer konu başlığı altında incelenmiş ve ana hatları ile literatür taramasının sonuçları Çizelge 2.5'de listelenmiştir.

Çizelge 2.5 : Önder Kenar Akım Ayrılması Konusundaki Literatür Taraması Özeti.

Yazarlar	Konu	Atnalı Girdabı Hakkında Sonuç ve Görüşler
Mehta (1984)	Burun şekli revizyonu (3 farklı kanat burnu)	Burun şekli girdap şiddetini doğrudan etkilemektedir.
Kubendran (1988) Sung (1998)	Keskin baş yuvarlatma	Keskin yuvarlatma etkili olabiliyor ancak manevra açılarında akım bozulmuş ve girdap şiddeti artmıştır.
Barberis (1997)	Sabit yarıçapta kanat etrafında tam yuvarlatma	Girdap oluşumu engellenememiştir.
	Birleşim bölgesi önünde emiş kanalı	Yerel sınır tabakanın bir emiş kanalı ile inceltilmesi sonrasında girdap şiddeti azaltılmıştır.
Devenport ve Simpson (1992) Ölçmen (2006)	Sabit yarıçapta kanat etrafında tam yuvarlatma	Girdap oluşumu engellenememiştir.
	Sınır tabaka kalınlığı değişiklikleri	Girdap oluşumu engellenememiştir.
	Baş yuvarlatma	Atnalı girdabının oluşumu engellenmiştir.

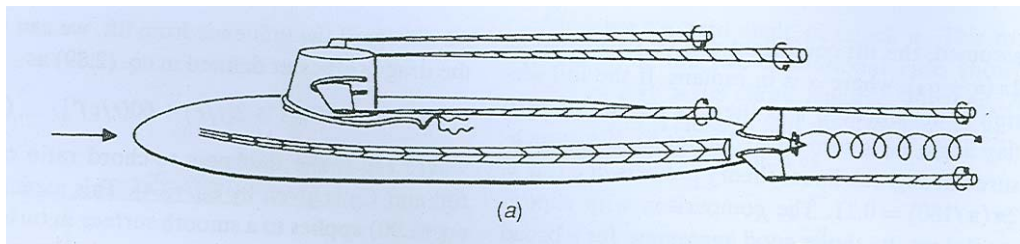
Girdabın etkilendiği iki temel faktör olan şekil ve sınır tabaka etkileri bu doktora tezi kapsamında yapılan çalışmalarda irdelenmiştir. Şekil değişimi, pod ve strutin NURBS yüzeyleri kullanılarak birleştirilmesi ile incelenmiştir. Yeni geometriler için potansiyel ve viskoz akım metotları kullanılarak analizler yapılmıştır. Hız birleştirme yaklaşımı ile yapılan analizle de sınır tabaka etkileri çözüme ithal edilmiştir. Böylelikle atnalı girdabının oluşumu iki eğrisel yüzeyin NURBS yüzeyi kullanılarak birleştirilmesi ile şekil açısından ve viskoz potansiyel akım hız birleştirme yaklaşımı ile de sınır tabaka etkilerinin gösterilmesi açısından irdelenmiştir. Yapılan çalışmaya ait detaylar Bölüm 7’de anlatılmıştır.

2.5 Denizaltı (D/A) Üzerindeki Girdaplar

Dalmış bir durumdaki denizaltı formu üzerinde kule, kontrol yüzeyleri gibi takıntılar etrafında girdapların oluştuğu bilinmektedir. Küçük açılardaki manevralarda gövde üzerinde de girdaplar oluşmakta ve gövde boyunca girdapların etkisi gözlemlenmektedir. Faltinsen (2005) tarafından listelenen söz konusu girdapların denizaltı üzerindeki oluşum bölgeleri ve nedenleri, özet olarak Çizelge 2.6’da verilmiştir. İlgili referansta bu gösterimin Lugt (1981) tarafından alındığı bildirilmektedir.

Çizelge 2.6 : Denizaltı (D/A) Üzerindeki Girdaplar.

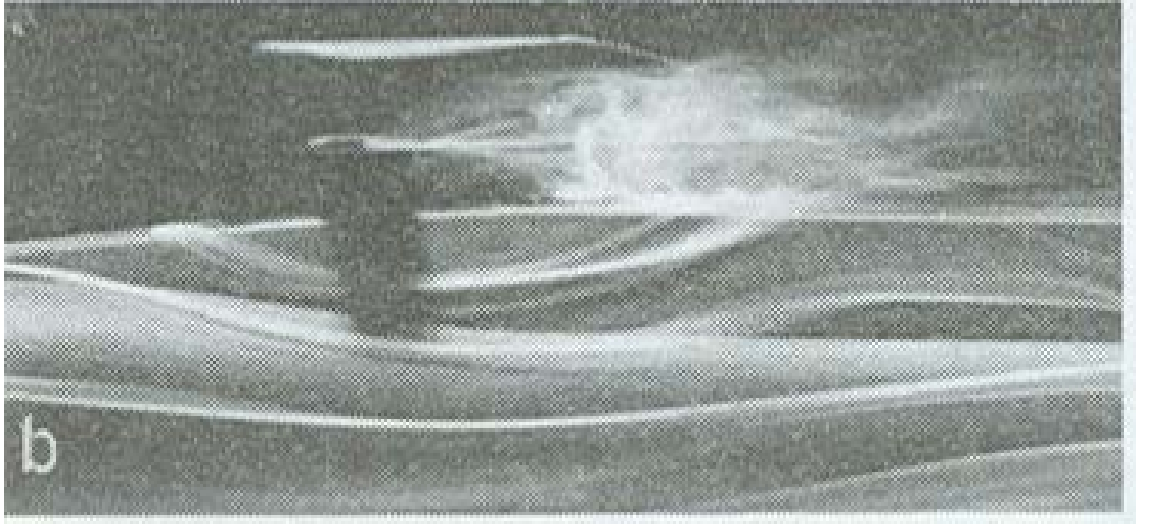
D/A Girdap Oluşumu		
Girdap Adı	Bölgesi	Temel Nedeni
İzler Kenar Girdapları	Fin, Kaldırıcı Yüzeyler	Sirkülasyon, Kaldırma, Takıntı
Kule Kök Girdapları	Kule	Yüksek basınç gradyeni, Yüksek açılı köşenin varlığı
Temel Akım Ayrılması	Tekne Üzeri	Sınır Tabaka
İtici Girdapları	Pervane / Dümen	Yüksek Basınç ve Dönme Hareketi
Yanal Akım Girdapları	Tekne Üzeri	Kısa kenar kort boyunda yanal akış



Şekil 2.11 : D/A Üzerindeki Girdapların Temsili Gösterimi (Faltinsen, 2005).

Şekil 2.11’de manevra yapmakta olan bir denizaltı (D/A) üzerindeki akım ayrılımları, ve D/A üzerindeki girdap gösterimi sunulmuştur. Faltinsen (2005) tarafından örnek resim ile gösterilen kule önündeki atnalı girdabının varlığı Şekil 2.11’de görülmektedir.

Werle (1988) tarafından, denizaltı model deneylerinden alınan örnek bir resim Şekil 2.12’de sunulmuştur. Burada kule önünde oluşan atnalı girdabının gövde boyunca ilerleyişi görülmektedir.



Şekil 2.12 : D/A Kulesi Girdap Gösterimi Yandan Görünüş (Werle, 1988).

3. PANEL METODU İLE YAPILAN HESAPLAMALAR

3.1 Giriş

Bu bölümde, literatürde Szantyr Pod olarak bilinen 4.53 m boyundaki örnek bir pod/strut geometrisi etrafındaki akım, panel metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Elipsoid şeklindeki Pod ile tekne yüzeyi arasında poda bağlanan NACA 066 kanat kesitli bir strut kullanılmaktadır (Szantyr, 2001). Hesaplamalarda akımın üzerinden geçtiği varsayılan pod ve strut dış yüzeyleri, kenarları birbirleri ile kesişen yüzey parçalarına ayrılmış ve her bir yüzey panellere bölünmüştür.

3.2 Panel Metotları

Sınır Elemanları Metodu veya yaygın olarak kullanılmakta olan tanımı ile yüzey panel metotları, karmaşık ve daha gerçekçi geometrilerin modellenenebildiği ve cisim yüzeyinde sınır koşullarının daha iyi tanımlanabildiği sayısal yöntem olarak tarif edilmektedir (Katz ve Plotkin, 2001). Panel metodunda cisim yüzeyi üzerine dağıtılmış tekilliklerin kullanılması ile çözüm süresi kısaltılarak zamandan tasarruf edilmiştir. Karmaşık da olsa cismi oluşturan yüzeylerin paneller halinde tarif edilmesi ve çözümün panel yüzeyleri üzerindeki tekilliklerin şiddetlerinin hesaplanmasıyaklaşımı ile panel metotları, bütün kontrol hacmi içerisinde hesaplama yapmaya dayanan sayısal metotlara göre daha uygulanabilir metotlardır.

1970 yıllarında kullanılmaya başlayan panel metotları ile kaldırıcı yüzeylerin kalınlığı gerçek kanat kesitlerine sahip geometriler ile doğrudan tanımlanarak hesaplama detayları açısından kullanışlı ve verimli bulunmuştur (Molland ve Turnock, 2007). Üç boyutlu ilk başarılı örnek olarak anılan ve Hess ve Smith (1972) tarafından önerilen metodunun kullanımı hakkında önemli miktarda araştırma faaliyetleri yürütülmüş ve havacılık ve denizcilik uygulamalarında büyük seviyede bilgi birikimi oluşmuştur. Panel metotlarının tarihsel gelişimi ve temel özellikleri Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

Çizelge 3.1 : Panel Metotlarının Tarihsel Gelişimi ve Temel Özellikleri.

Metot Adı	Yılı	Panel Geometrisi	Sınır Koşulları
Douglas-Neumann	1962	Düz	Neumann
Woodward I	1966	Düz	Neumann
USSAERO	1973	Düz	Neumann
Hess I	1972	Düz	Neumann
MCAIR	1980	Düz	Dirichlet
SOUSSA	1980	Parabolik	Dirichlet
Hess II	1981	Parabolik	Neumann
PANAIR	1981	Bölünmüş Alt Paneller	Neumann ve Dirichlet
VSAERO	1982	Düz	Neumann ve Dirichlet
QUADPAN	1983	Düz	Dirichlet
PMARC	1987	Düz	Neumann ve Dirichlet

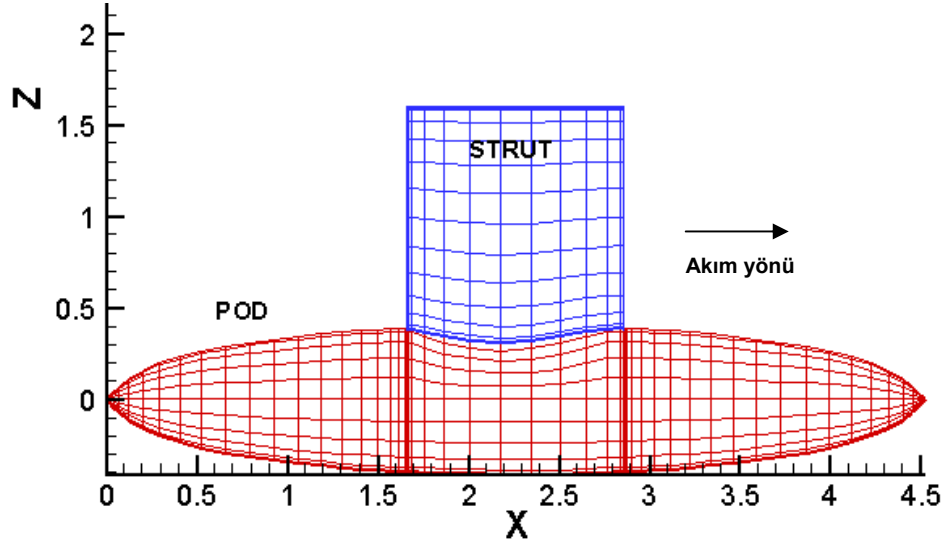
Yüzeyin basit geometik panellerle temsil edildiği ve sabit şiddette tekliklerin kullanıldığı panel metotları düşük mertebeli (low order) panel metodu olarak adlandırılmaktadır. Parabolik veya polinomlar ile ifade edilen panel ve sabit olmayan tekliklerin kullanıldığı metotlar, yüksek seviyeli (higer order) panel metotları olarak adlandırılmaktadır. Yüksek seviyeli panel metotları ile düşük seviyeli panel metotları arasında hesaplama zamanı gözetilerek yapılacak bir karşılaştırmada, çözüm hassasiyeti açısından büyük farklılıkların olmadığına anlaşılmıştır (Katz ve Plotkin, 2001). Düşük mertebeli panel metotlarında panellerin yerleşimindeki yerel hatalar sonucu büyük ölçekte etkilememekte ve bu sayede uygulamada kullanım kolaylığı getirmektedir.

Yıllar içerisinde geliştirilen panel metotları uygulama alanları açısından çeşitlendirilebilmektedir. Temelde havacılık sektörü araştırmaları için NASA desteği ile Analytical Methods firması tarafından geliştirilen en gelişmiş program PMARC olarak bilinmektedir. Geliştirmelere uygun olması açısından açık bir yapıda hazırlanan PMARC kodu yıllar içerisinde 14. sürümüne kadar getirilmiş önemli bir yüzey panel kodudur.

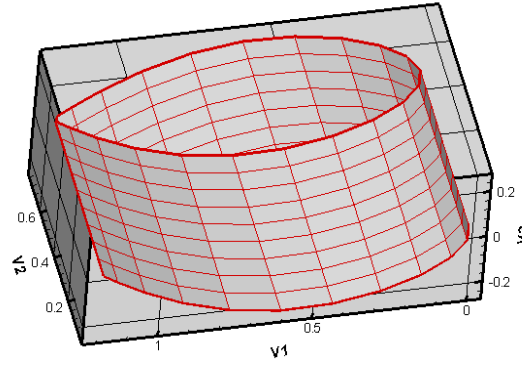
VFLOW programı 1990 yılında BMTI firması tarafından PMARC programı deneyimi üzerine kurgulanarak geliştirilmiştir. VFLOW programı denizcilik uygulamalarında kullanılmak üzere, modüler alt rutinler halinde açık bir yapıda planlanmış bir panel metodu kodudur. Program kaynak ve dublelerin birleşik olarak kullanılmasına imkan vermekte, gemi kığı ve takıntıların arkasındaki iz oluşumu gibi kaldırma etkilerini dikkate almaktadır. Programda uzak alan indüklenmiş hız bileşenlerinin hesabında, PMARC kodundan farklı olarak çok kutuplu (multipole) seri açılımı kullanılmıştır. Programda üç boyutlu cisim yüzeyi üzerindeki her bir panel, kendisine komşu dört panel ile birlikte düşünülmekte, hız hesapları yapılmakta ve böylece sayısal

hesaplamalar analitik yöntemlere kıyasla oldukça hızlı sonuçlandırılmaktadır (Jane, 1990).

Bu doktora çalışması kapsamında kullanılan pod ve strut geometrisi Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de sunulmuştur. Szantyr pod ve NACA 066 kesitlerine ait geometrik veriler EK A’da verilmiştir.



Şekil 3.1 : Szantyr Pod Geometrisi.



Şekil 3.2 : NACA 066 Strut Geometrisi.

Gupta (2004) çalışmasında elipsoid yapıda olan podun boyu 4.53 m, azami genişliği ise 0.4 m olarak verilmiştir. NACA 066 kanat kesitli strutın yüksekliği 1.6 m olarak tanımlanmıştır. Szantyr podu literatürde yaygın olarak bilinen ve ticari olarak uygulanmamış temsili bir geometridir. Yapılan hesaplamalarda tek bir pod/strut geometrisi kullanılmıştır. Elipsoid pod ve kanat kesiti geometrisi Gupta (2004) tarafından verildiği şekilde, EK A’da sunulduğu gibi kullanılmıştır.

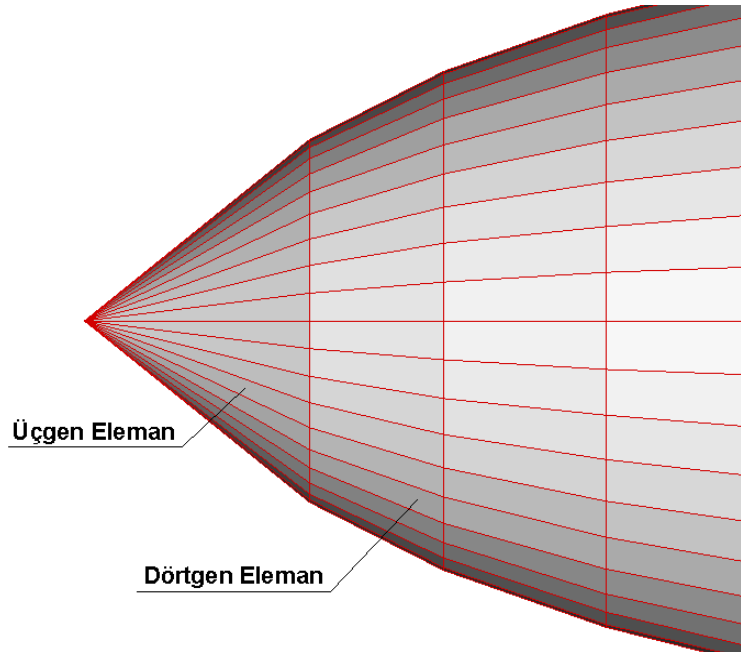
Hesap sonuçlarının gösteriminde pod ve strut kort boyu, genişliği ise pod ve strut kalınlığı T kullanılarak boyutsuzlaştırılmıştır. Pod ve strut için verilen kort boyu ve geometrik sınır değerleri Çizelge 3.2’de sunulmuştur.

Çizelge 3.2 : Pod/Strut Geometrik Veriler.

Pod Strut Sınır Değerleri		
	Pod	Strut
Boy [m]	4.53	1.200
Genişlik [m]	0.81	0.518
Yükseklik [m]	0.81	1.600

3.3 Yüzey Ayrıklaştırılması

Panel metodunda yapılan hesaplamalarda cisim yüzeyi üçgensel ve dörtgensel elemanlar ile temsil edilmektedir. Geometri formülasyonunda genellikle dörtgensel elemanlar tercih edilmekle birlikte, gerektiğinde cisim geometrisinin düzgün bir şekilde oluşturulabilmesi için üçgen elemanlar da kullanılabilir. Bir nokta ile tamamlanan dörtgensel panel dilimleri pratikte küre, elipsoid gibi üç boyutlu cisim yüzeylerinin başlangıç veya bitiş panelleri olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.3 : Panel Metodunda Kullanılan Elemanlar.

Literatürde dörtgensel yüzey elemanlara panel, bu elemanların kullanıldığı metoda da yüzey panel metodu denilmektedir. Bir panel üzerindeki dört köşe birleşim noktası ve yüzey üzerinde birbirleri ile komşuluk halindeki dört adet kenar yapılan hesaplamaların temelini oluşturmaktadır. Panel metodunda bir panele ait alanın bulunması, alan merkezi ve yüzey normalinin tayini gibi basit geometrik ilişkiler

yardımları ile sayısal açıdan hızlı bir programlama altyapısı sağlanmış olmaktadır. Panellerin kenarları üzerinde çizgisel entegrasyon ve komşu paneller arasındaki etkileşim kolaylıkla hesaplanmaktadır.

Potansiyel akımda, Laplace denklemi yardımı ile son derece kullanışlı bir sayısal hesap imkanı ortaya çıkmaktadır. Gauss tarafından geliştirilen Diverjans teoremi yardımı ile hacimler yüzey integrallerine dönüştürülmekte ve Green teoremi ile yüzey integralleri çizgisel integrallere çevrilmektedir. Sınır elemanları yönteminde, tekil çözümlerin üst üste getirilmesi sayesinde ayrıklaştırılan yüzeylere ait hesaplamalar, matrisler yardımı ile karmaşık üç boyutlu şekillerin modellenmesini sağlamaktadır.

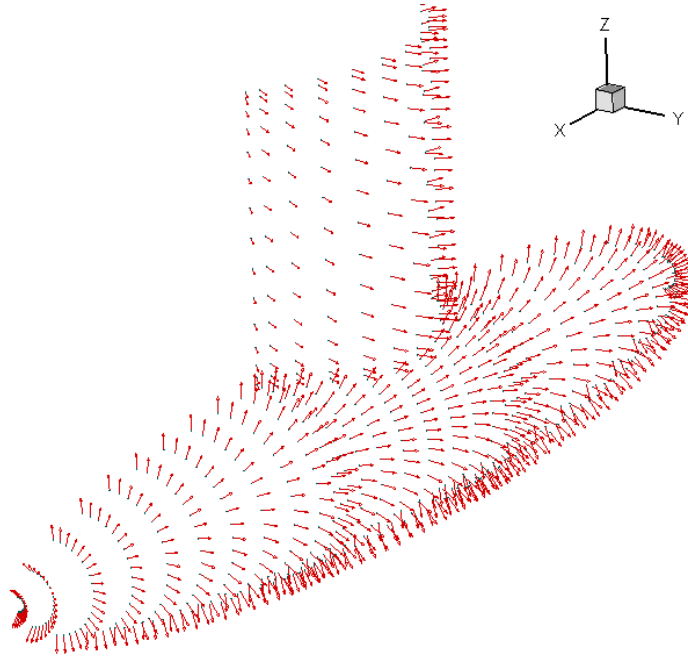
Pod için yapılan hesaplar temel olarak hesaplanan potansiyelin türevi ile hızların bulunmasını içermektedir. Hızlara bağlı olarak basınç katsayısı ve diğer hidrodinamik özellikler hesaplanmaktadır. İşlem adımları aşağıda listelenmiştir.

1. Kesitlerin tanımlanması
2. Yüzeyin oluşturulması
3. Birim normal vektörlerin hesaplanması
4. Etkime katsayılarının hesaplanması
5. Potansiyelin hesaplanması
6. Üç boyutlu hızların hesaplanması
7. Basınç katsayısının hesaplanması
8. Kuvvetlerin hesaplanması
9. Akım hatlarının hesaplanması
10. İndüklenen hızların hesaplanması

Hızların hesap edilmesi ile istenilen yüzeylerdeki indüklenmiş hız değerleri gösterilerek akıma ait yerel değerlendirmeler yapılabilmektedir. Cisim yüzeyindeki veya cisimden uzakta tanımlanan bir noktadan geçen akım hatları hesaplanabilmektedir.

3.4 Yüzey Normalleri

Pod geometrisi oluşturulurken geometrinin oluşturulmasında yüzeyler belirli parçalara ayrılarak paneller oluşturulmaktadır. Kesitlerin tanımlanma sırası yüzeyin normal vektörlerinin cisimden dışarı veya içeri doğru oluşması ile ilgilidir. Bu nedenle hesaba başlamadan önce hesaplamalarda kullanılacak olan birim normal vektörlerinin kontrol edilmesi gerekmektedir. Pod üzerindeki normal vektörlerin gösterimi Şekil 3.4’de verilmiştir. Görüleceği gibi her bir panele ait yüzey normalleri cisim yüzeyinden dışarı doğru bakacak şekilde tanımlanmıştır.



Şekil 3.4 : Panel Merkezlerinden Dışarı Yönlü Normal Vektörler.

3.5 Küre için Hesaplar

Pod ile ilgili hesaplamalara başlamadan önce ilk adım olarak tez çalışması kapsamında çeşitli alt rutinler ve ara yüzler eklenerek geliştirilen bilgisayar programı sonuçları (VFLOW) analitik çözümü bilinen bir geometri ile denenmiş ve hesaplama sonuçlarının doğrulaması yapılmıştır.

VFLOW programında birim hız altındaki birim küre için hesaplamalar yapılmış ve analitik sonuçlar ile uyumlu netice elde edilmiştir. Böylelikle küre üzerindeki basınç dağılımının doğru bir şekilde hesaplandığı görülmüş ve pod için yapılacak hesapların güvenilirliği teyit edilmiştir.

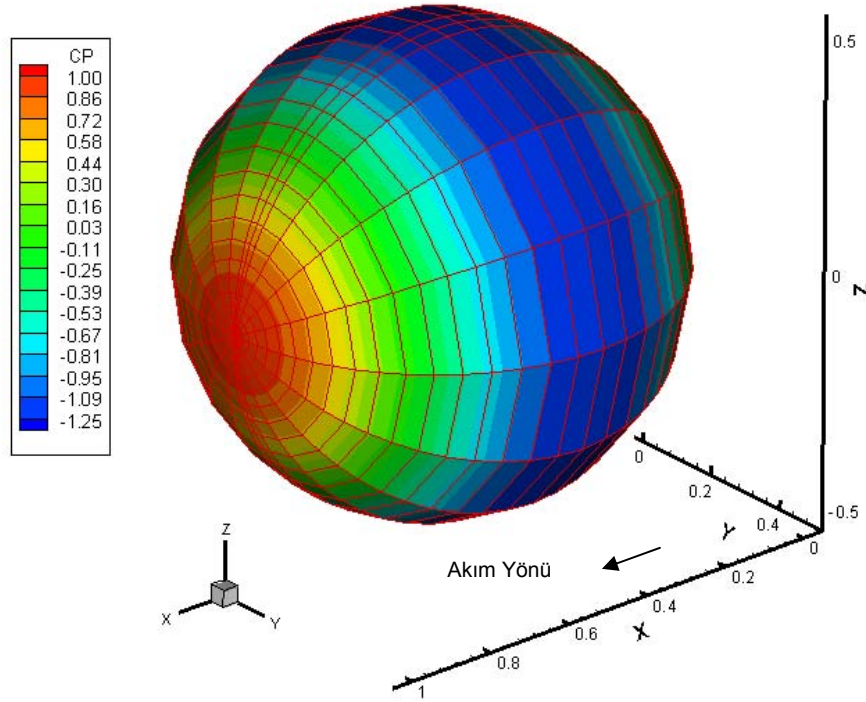
Hesapların yapıldığı küre üzerindeki basınç katsayısı dağılımı ve analitik çözümler karşılaştırmalı basınç katsayısı (C_p) grafiği Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da sunulmuştur. Aynı geometri için analitik basınç katsayısı dağılımı ise Şekil 3.7'de sunulmuştur. Basınç katsayısı grafiği XZ düzlemi üzerinde yer alan merkez kesit (simetri hattı) için çizdirilmiştir.

Küre üzerindeki basınç katsayısı analitik olarak Denklem 3.1'de verilen formülasyon ile hesaplanmaktadır.

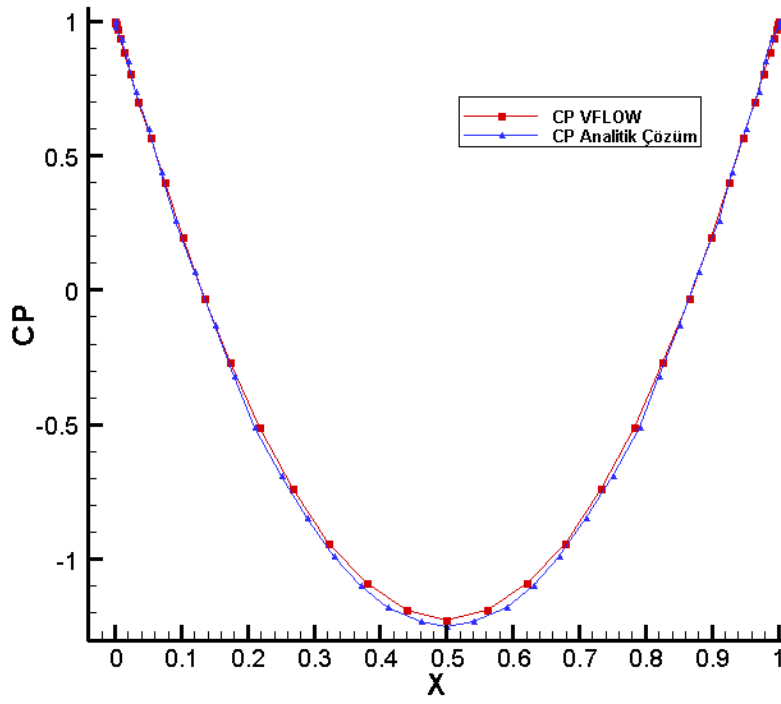
$$C_p = 1 - \frac{9}{4} \cdot \sin^2(\theta) \quad (3.1)$$

VFLOW programında basınç katsayısı Denklem 3.2 ile hesaplanmaktadır.

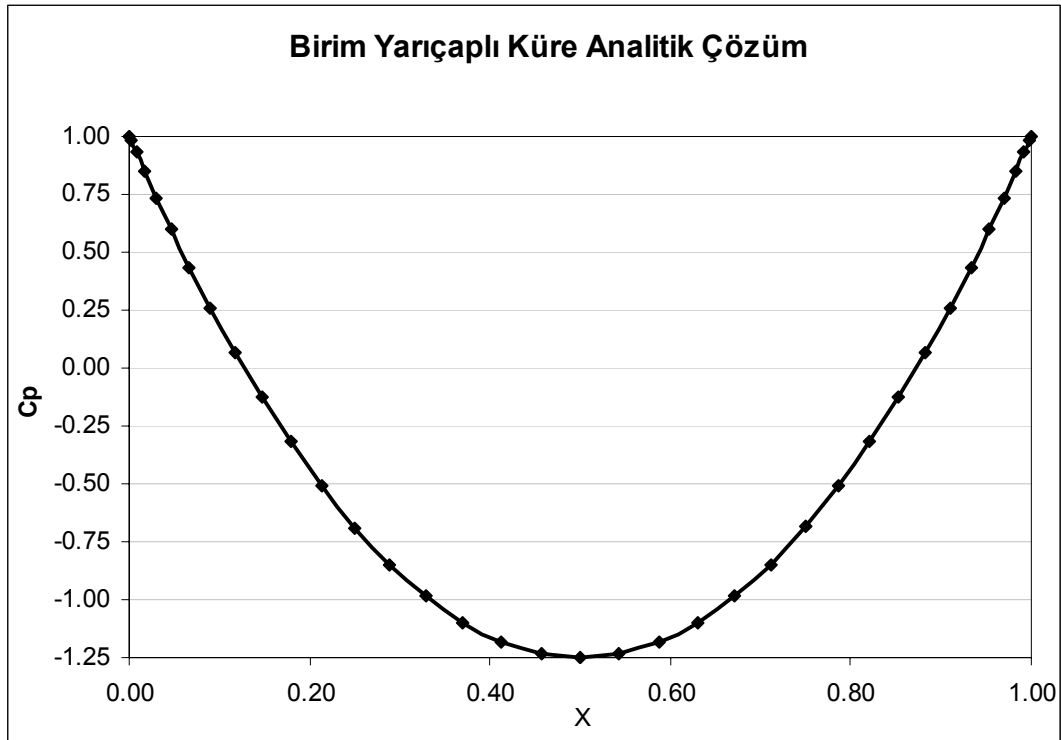
$$C_p = 1 - \frac{V_K^2}{V_\infty^2} \quad (3.1)$$



Şekil 3.5 : Birim Küre Geometrisi Üzerinde Basınç Dağılımı.



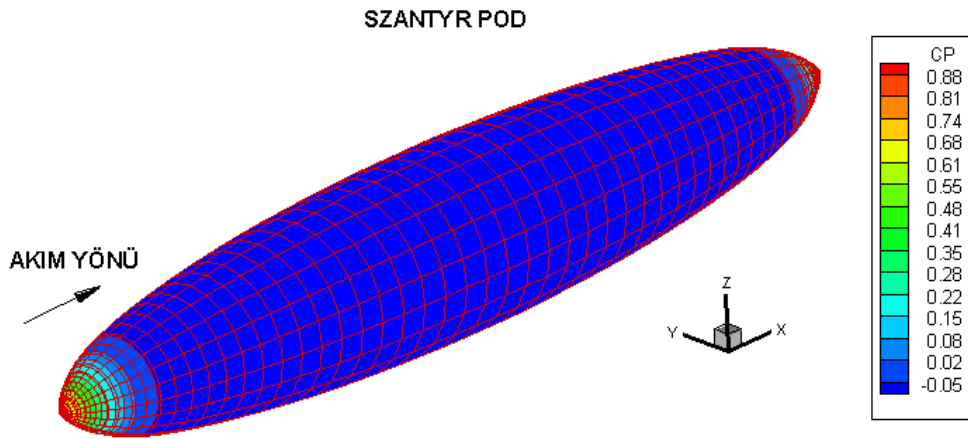
Şekil 3.6 : Küre Geometrisi için Basınç Katsayısı ve Hız Grafiği.



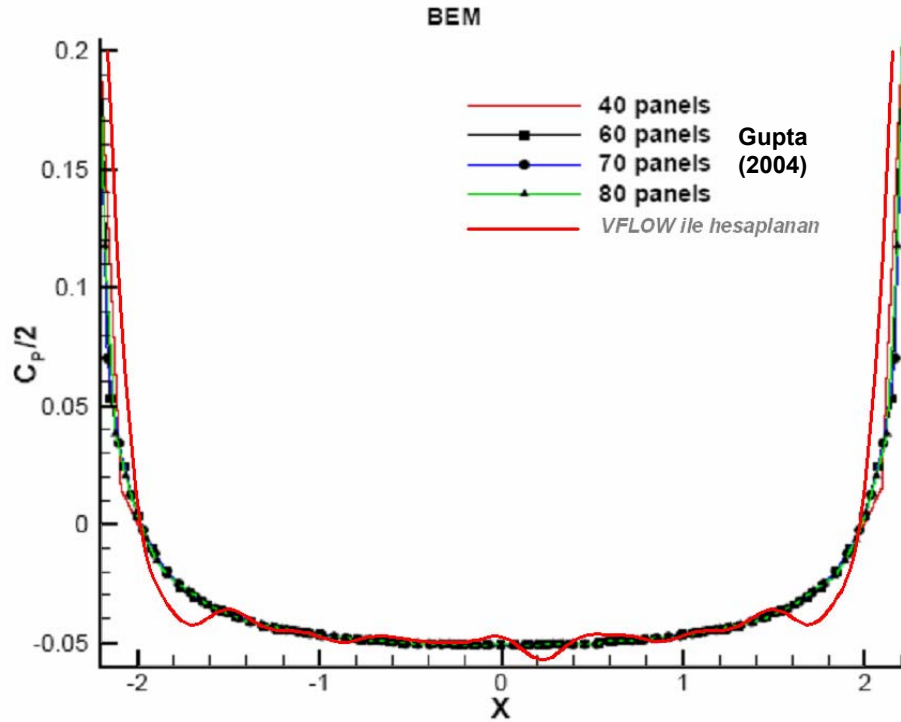
Şekil 3.7 : Küre Üzerinde Analitik Basınç Katsayısının Değişimi.

3.6 Szantyr Pod

VFLOW programında küre için yapılan hesapları takiben Szantyr podu için birim hız ile hesaplar tekrarlanmış, Gupta (2004) çalışmasında elde edilenler ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Kaynak strut eklenmemiş elipsoid pod gövdesi için oluşturulan geometri ve merkez kesitteki basınç katsayısı (C_p) değerleri Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da sunulmuştur.

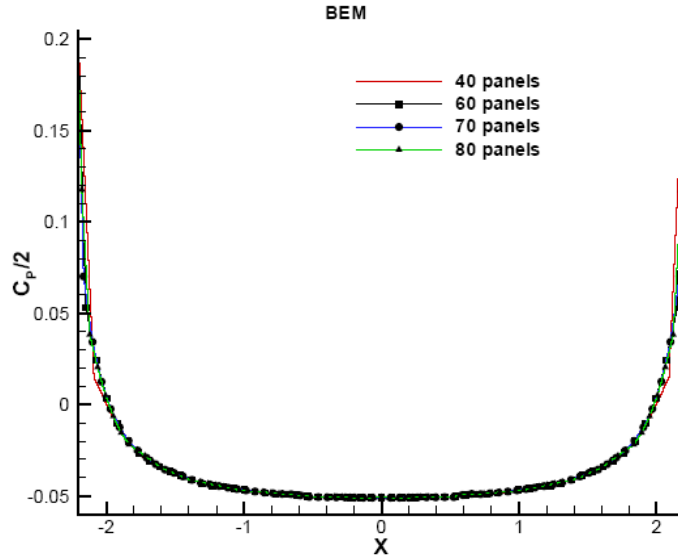


Şekil 3.8 : Szantyr Pod I Geometrisi.



Şekil 3.9 : Szantyr Pod I Geometrisi için Hesaplanan Basınç Katsayısı Grafiği.

Yapılan hesaplarda VFLOW sonuçları karşılaştırma yapılabilmesi amacı ile literatür sonuçları ile birlikte çizdirilmiştir. Bu geometri için Gupta (2004) tarafından verilen basınç katsayısı eğrisi Şekil 3.10'da sunulmuştur.



Şekil 3.10 : Szantyr Pod I Geometrisi için Literatürde Verilen Basınç Katsayısı (Gupta, 2004).

Şekilde görüldüğü üzere VFLOW'da hesaplanan basınç katsayısı eğrisi literatürde verilen değerler ile mertebe olarak uyumludur. Kullanılan panel sayısı, kesitlerin tanımlandığı aralıklar veya yüzey parçalarının birleştirilmesinde ortaya çıkan yerel uyumsuzluklar basınç katsayısında yerel uyumsuzlukların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Cisim geometrisinin daha düzgün tanımlanması ve hassas geometrik verilerin kullanılması ile yerel uyumsuzluklar önlenabilir. Sonuç olarak Ek-A'da sunulan mevcut geometrik veriler ile yapılan VFLOW hesaplarında ortaya çıkan yerel farklılıklar programdan kaynaklanmamaktadır ve hesapların doğruluğu kabul edilebilir seviyededir.

3.7 Pod / Strut

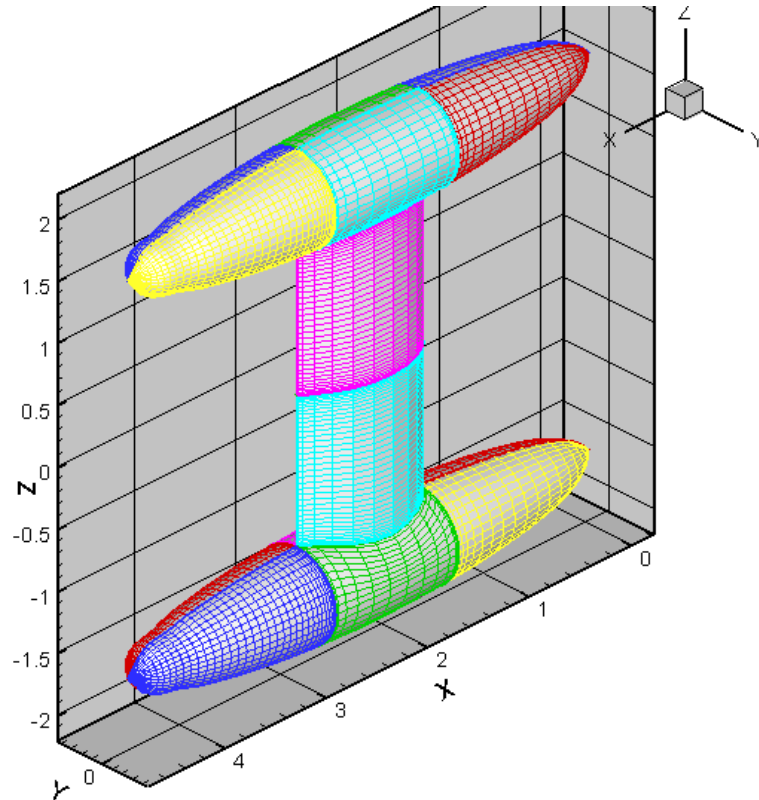
Uygulamada genel hali ile elipsoid olan podun gemi kıçında kullanılması için tekneye bağlanabileceği strut olarak ifade edilen bir yapısal elemanın olması gerekmektedir. Kanat kesitli olan strut içerisinde, podlu itme sistemine ait çeşitli kablo ve boru bağlantıları ve ilgili yardımcı üniteler/ekipmanlar yer almaktadır. Önemli bir yapısal eleman olan strut içerisinde, gemi üzerinde generatörler tarafından üretilmekte olan elektriksel güç kabloları geçmekte ve bu sayede pod gövdesinde yer alan elektrik motoru enerjilendirilmektedir.

Hidrodinamik olarak ise kanat kesitli bir eleman ile elipsoid şeklindeki podun bağlantı yüzeyi, akış özellikleri açısından özenle incelenmesi gereken bir konudur. Strut'ın ön yüzünde akım hızının sıfır olduğu bir düzlem vardır ve pod yüzeyi ile bağlantılı olan bu bölgede akım yerel bir engel ile karşılaşmaktadır.

Pod ve strut yüzeyinde yüksek basınç gradyeni olması nedeni ile akım hatları bu bölgede dikkatle incelenmiş ve akım ayrılması veya oluşan girdaba dair V_x , V_y , V_z hız bileşenleri hesaplanmıştır.

3.8 İmaj Modeli

VFLOW programında pod tam olarak veya yarı kesitler verilerek simetrik olarak hesaplanabilmektedir. Sınır koşullarının doğru olarak verilebilmesi ve serbest su yüzeyi veya kavitasyon tüneli üst duvarı etkisinin ihmal edilebilmesi için geometrinin simetrik bir imajı da hesaba katılmaktadır. Şekil 3.11'de kullanılan pod/strut modeli ve imajı sunulmuştur. Hesaplamalarda kullanılan imaj modeli üzerindeki sonuçlar zahiri kabul edilmektedir.

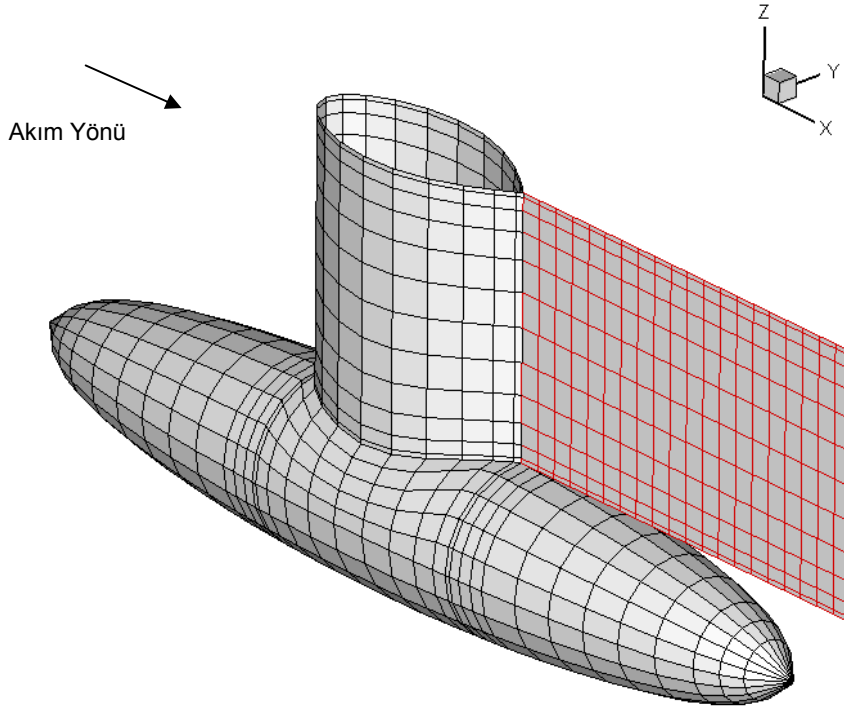


Şekil 3.11 : Pod/Strut İmaj Modeli.

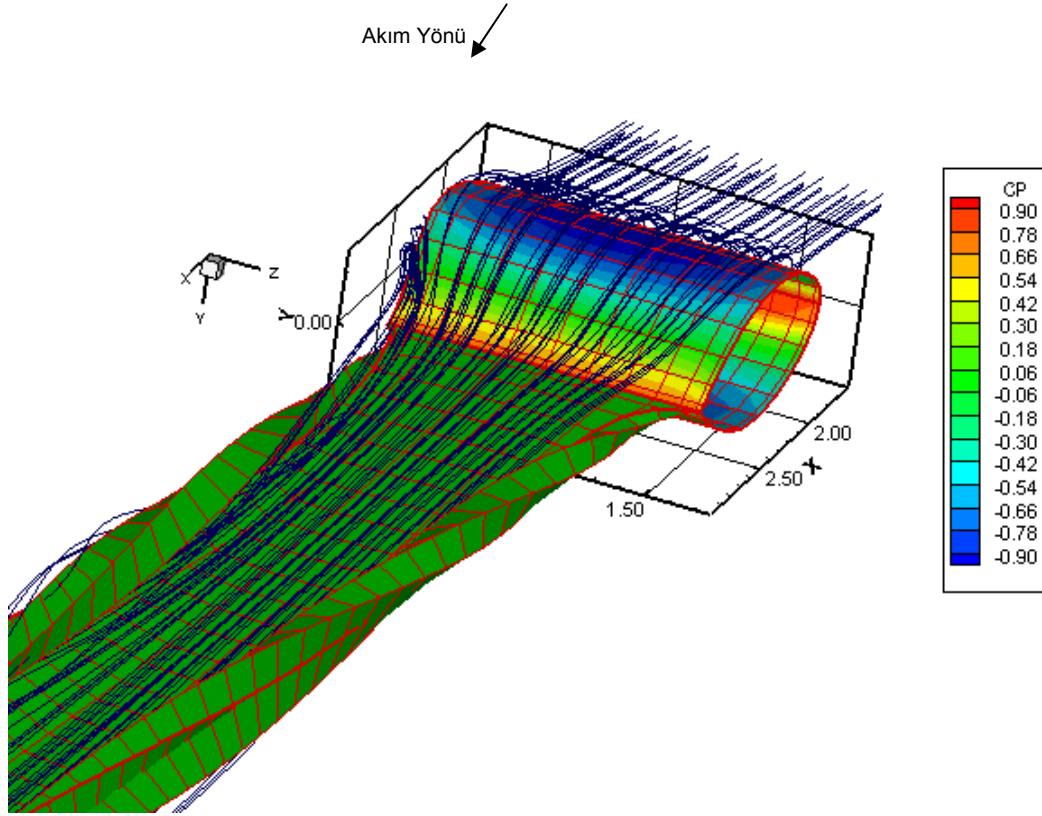
3.9 İz Örgüsü

Panel metodunda kaldırıcı yüzeyler üzerindeki kaldırma kuvvetinin hesaplanabilmesi için kuvvet taşımayan sanal bir yüzey olarak iz örgüsü tanımlanmaktadır. Kesit etrafındaki sirkülasyon Kutta-Jukowski teoremi gereği cismin arkasında bir akış oluşturmalıdır. Takip kenarı üzerinde tanımlanan akım ayrılma çizgisinden itibaren yeri, uzunluğu ve şekli tahmin edilerek verilen iz örgüsü üzerindeki noktaların duble değerleri hesaplanmaktadır.

Strut'ın izler kenarından bırakılan iz örgüsü, NACA 066 kanat kesitli struta ait izin modellenmesini sağlamaktadır. İz yerleştirme işleminde her bir iterasyon adımı için iz örgüsü ilerleme hızı nispetinde izler kenara eklenmekte ve iz noktaları yerel hız ile yerleştirilmektedir. İz yüzeyindeki deformasyonlar en son iterasyon adımı için gözlenmektedir. Normalde iz örgüsü herhangi bir hücum açısı tanımlandığında deforme olmaktadır. Bir başka ifade ile pod/strut hız vektörü ile açı yapacak şekilde bir manevra yapmakta ise iz örgüsünün şeklinde yerel değişiklikler olmaktadır. Sıfır hücum açısı altındaki strut için akımın simetrik olması nedeni ile kaldırma kuvveti oluşmamakta ve belirgin bir iz deformasyonu gözlemlenmemektedir. İzler kenardan bırakılan iz örgüsü Şekil 3.12'de verilmiştir. Hücum açısı altında izler kenarın uçlarında gözlenen iz deformasyonu (wake roll-up) ve akım hatları Şekil 3.13'de verilmiştir.



Şekil 3.12 : İzler Kenar İz Örgüsü.

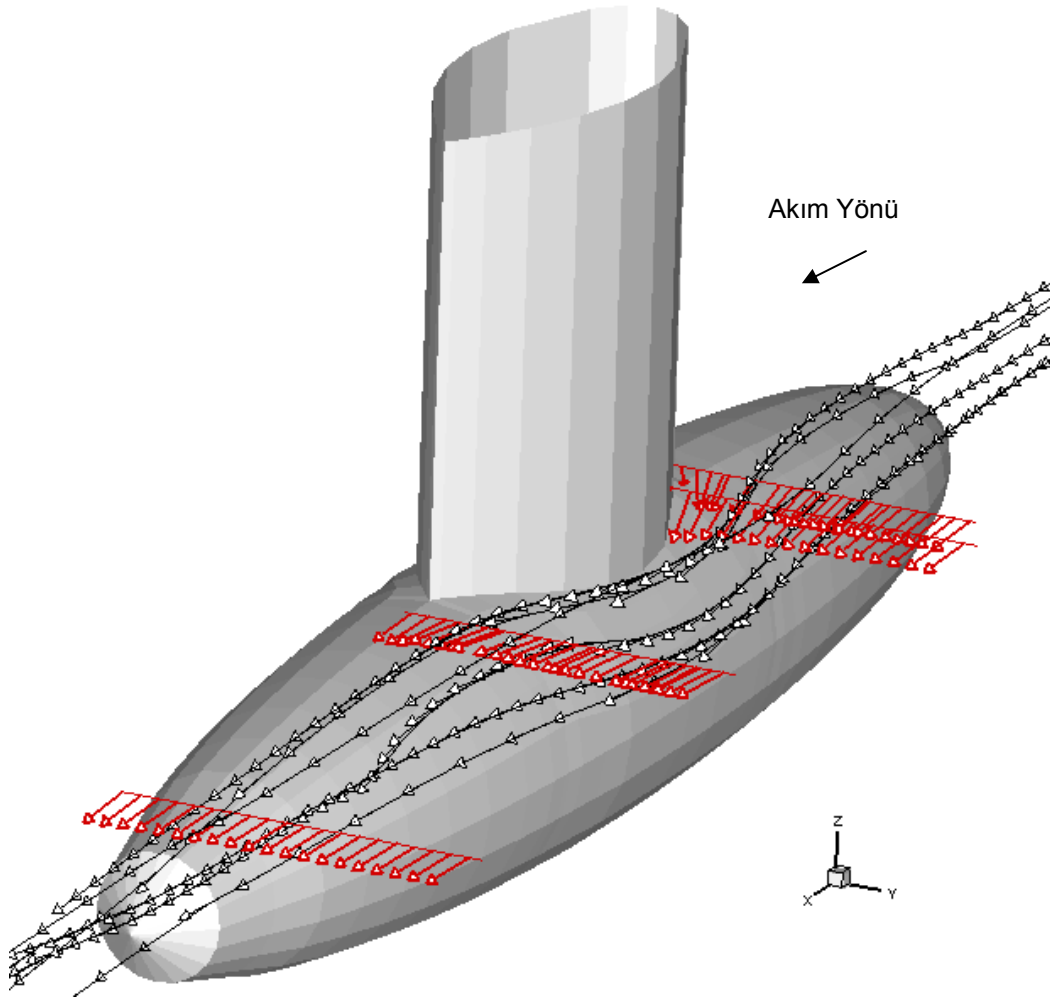


Şekil 3.13 : Hücum Açısı Altında İzler Kenarın Uçlarında Gözlenen İz Deformasyonu (wake roll-up) ve Akım Hatları.

3.10 Pod/Strut Dışındaki Akım Hatları

Panel metodu kullanılarak cisim yüzeyi üzerinde olmayan (off-body points) noktalarda oluşan hızlar da hesaplanabilmektedir. Pod yüzeyi dışındaki noktalarda hesaplanan akım hatları Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’de sunulmuştur.

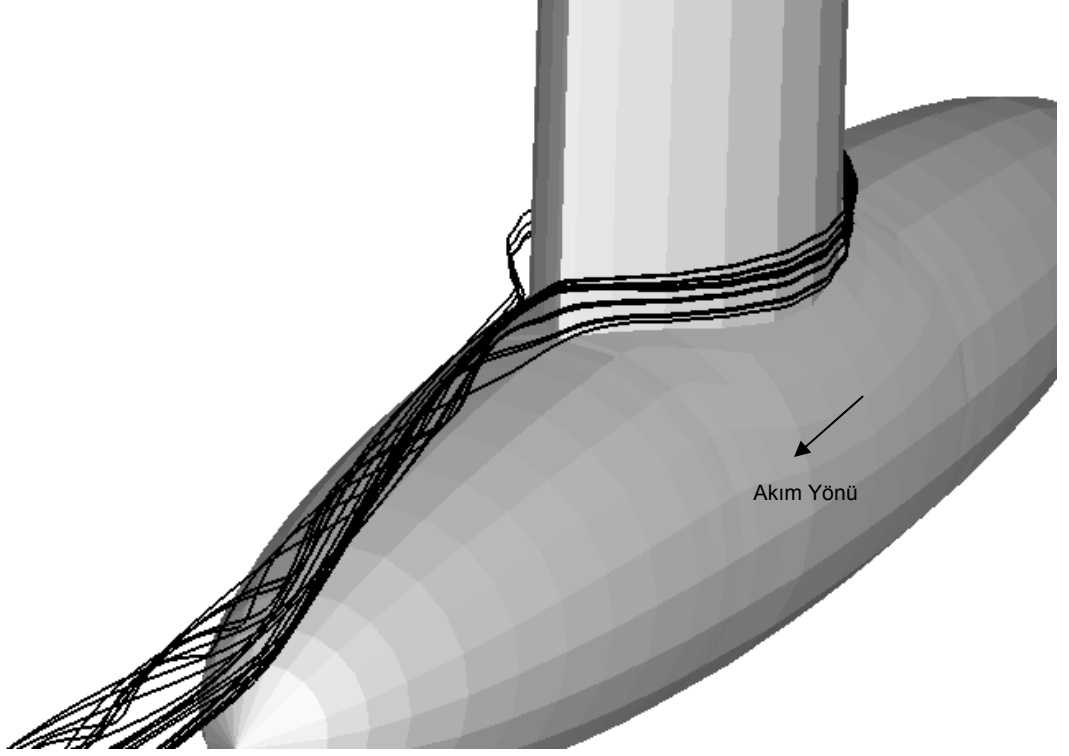
Şekil 3.14’de gösterildiği üzere VFLOW’da yapılan bir akım benzetim çalışmasında keyfi seçilen noktalardan başlatılacak akım hatları tanımlanabilmektedir. Pod etrafındaki yerel hız değerleri akım hatlarının şeklini belirlemektedir. İstenilen sıklıkta ve sayıda bırakılabilen akım hatları sayesinde pod etrafındaki akım temsili olarak görselleştirilmiş olmaktadır.



Şekil 3.14 : Szantyr Pod için Akım Hatları ve Dışarıdaki Hız Vektörleri.

Benzer şekilde yerel hızların gözlemlenmesinin önemli olduğu düşünülen ve konumu kullanıcı tarafından belirlenen hatlardaki hız vektörleri çizdirilerek tek bir hat boyunca hızın yönündeki değişim görülebilmektedir. Şekil 3.13’de konumları ve sıklığı keyfi olarak belirlenen hatlar üzerindeki hız vektörleri, pod etrafındaki hızın değişimi hakkında bilgi vermektedir.

Akım hatları üzerinde, tanımlanan düğüm noktalarındaki hız vektörlerinin de çizdirilmesi söz konusudur. VFLOW programı ile cisim etrafındaki akım özellikleri hesaplanırken aynı zamanda, yerel akış özellikleri hakkında görsel fikir veren alt rutinler de geliştirilmiştir. Şekil 3.15’de strut önünden bırakılan akım hatlarının, cisim yüzeyi etrafında hesaplanan konumları görülmektedir.



Şekil 3.15 : Pod Etrafındaki Akım Hatları.

Akım hatları cisim yüzeyinden içeri girmemekte pod boyunca serbest akım yönünde ilerlemektedir.

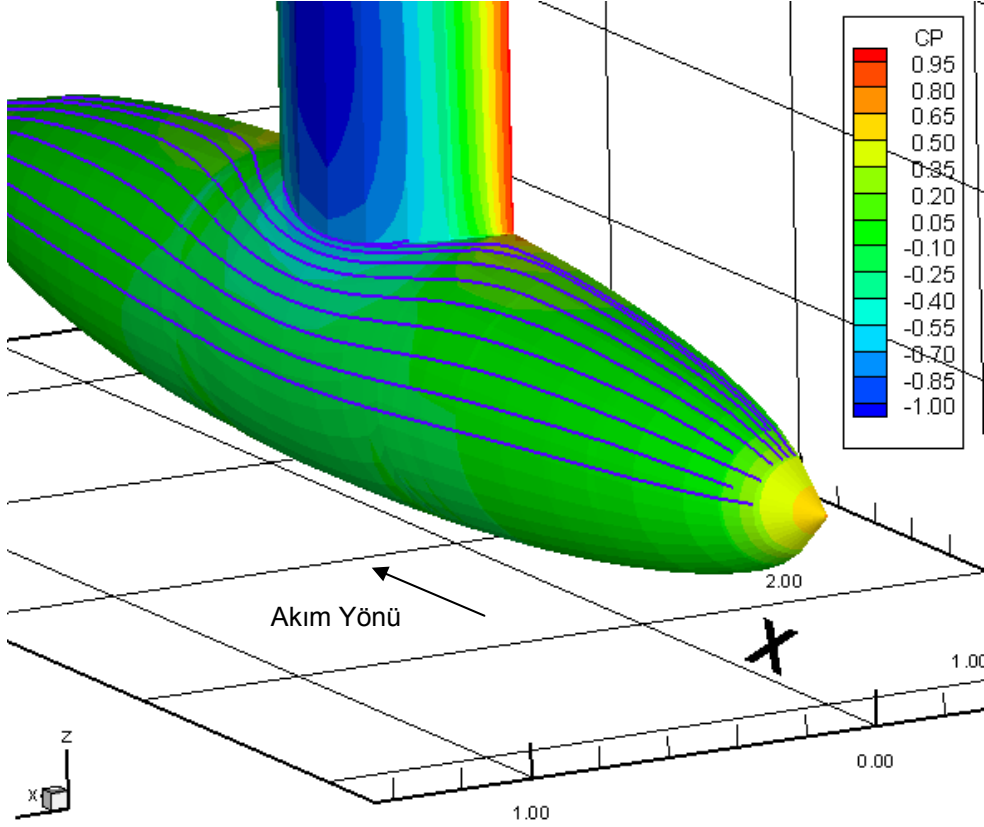
3.11 Yüzey Üzerinden Bırakılan Akım Hatları

Panel metodu kullanılarak cisim yüzeyinde akım hatları hesaplanmakta ve akım ayrılmasının olacağı yerler gözlemlenebilmektedir. Yüzeydeki hız-basınç dağılımına göre çizdirilen bazı akım hatlarının yüzey şekli boyunca devam etmekte olduğu Şekil 3.16'da görülmektedir.

Szantyr pod için serbest hızın $V=4.53$ m/s olduğu durumdaki yüzey akım hatları çizdirilmiştir. Yüzeydeki akım hatları, podun baş bölgesinde yer alan panel merkezlerinden başlayacak şekilde tanımlanmakta ve cisim yüzeyi boyunca şekil değişikliğine uğramaktadır.

Bu özelliği ile model deneylerinde mürekkep vb. boyalar kullanılarak yapılan akım hatlarının yerleştirilmesi faaliyeti ile benzerlik kurulabilir. Deneylerde yüzey üzerinden bırakılan boya takip edilmekte ve yüzeydeki akım hakkında görsel bilgi edinilmektedir. Ancak panel metodlarında yüzey sürtünmesi ve akım ayrılması gibi konular ihmal edilmekte olduğundan, yüzeydeki akım hattı herhangi bir akım ayrılması veya yeniden birleşme hattı ile karşılaştığında hesap sonlandırılmaktadır.

Sonuç olarak VFLOW programı kullanılarak pod üzerinde oluşacak olan akım hatlarına ait veriler elde edilebilmektedir. Bu doktora çalışmasında çıktı dosyasının görselleştirilebilmesi için yazılan bir çözüm sonrası işlem (post-process) alt rutini kullanılarak da görselleştirilebilmektedir.

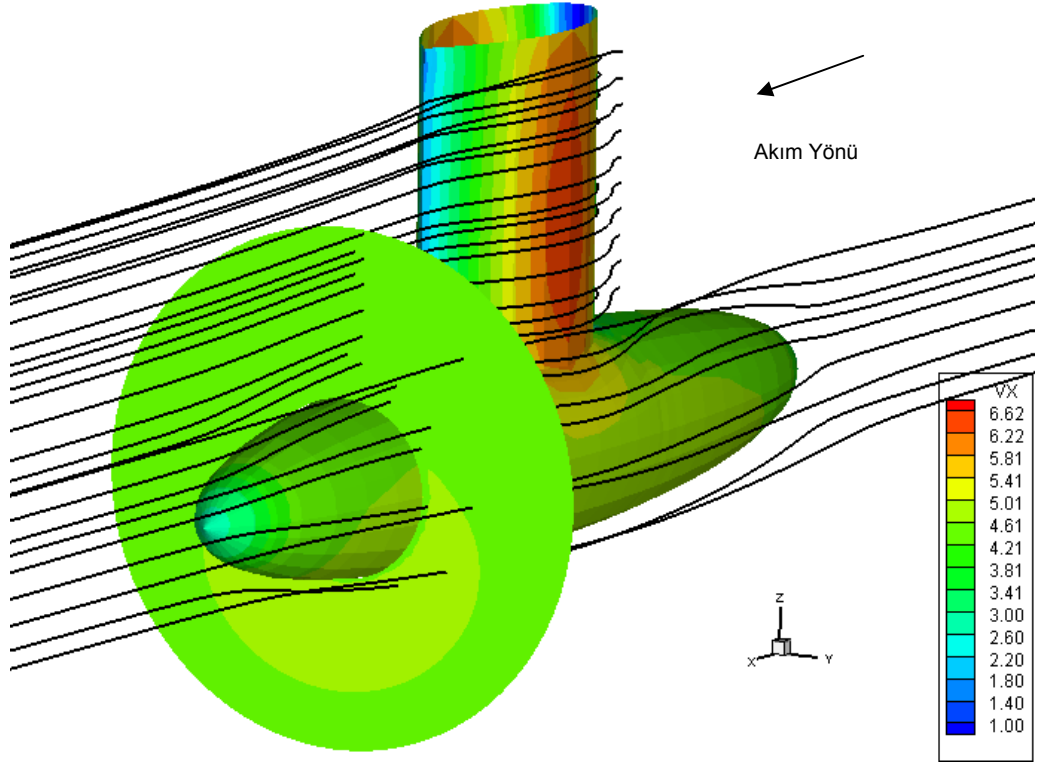


Şekil 3.16 : Yüzeydeki Akım Hatları.

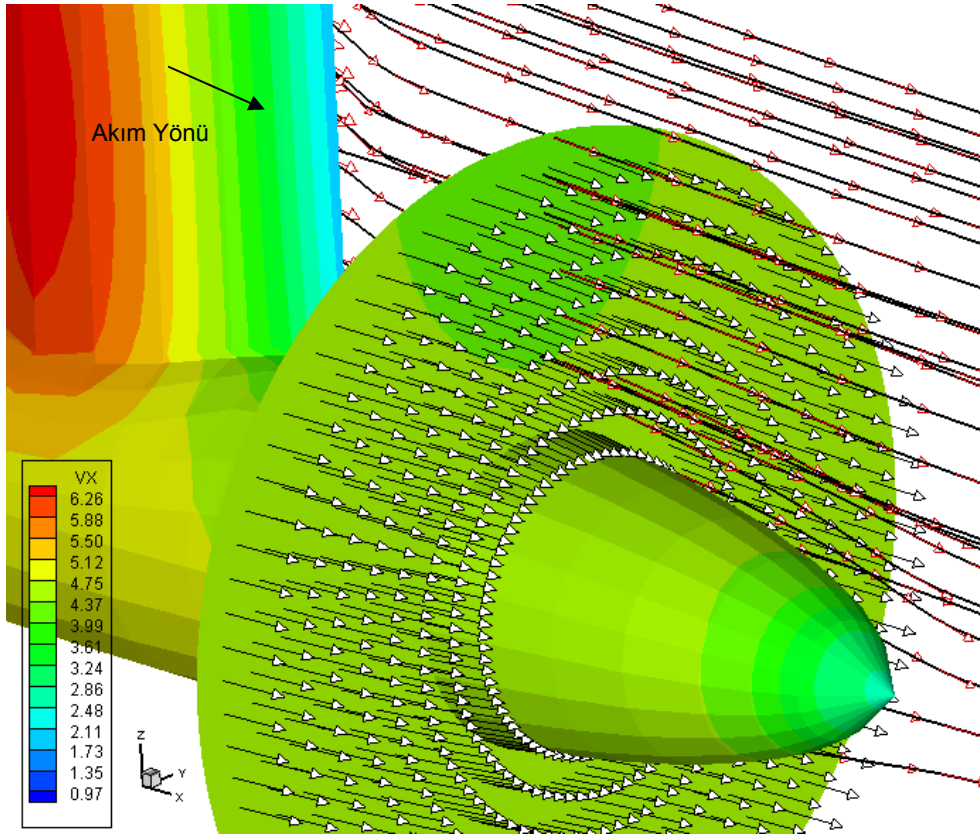
3.12 Düzlemlerde Hesaplanan Hız Profili

Pod etrafındaki akımın etkileri hakkındaki incelemelerde önemli bir veri de istenilen düzlemlerdeki hız konturları ve bu düzlemler üzerinde çizdirilen hız vektörleridir. VFLOW programında cisim etrafında istenilen yerde dört köşe noktası ile tanımlanacak düzlemlerdeki hız dağılımı hesaplanabilmektedir. Genellikle tercih edilen düzlemler serbest akıma dik yöndeki düzlemler tercih edilmektedir. Bu düzlemlerde cismin varlığı nedeni ile etrafındaki hız dağılımı farklılıklar göstermektedir. Eğer belirli bir düzlem üzerinde girdabın varlığı aranmakta ise düzlem üzerindeki ortalama akım hızlarından farklı bir hız konturunun olması beklenmelidir.

Pod ve strut geometrisi için önemli kabul edilebilecek düzlemler ön ve arka pervane düzlemleridir. Pod boyunca 1.055 m ve 3.455 m mesafedeki iki düzlem pervane düzlemi olarak tanımlanmıştır (Szantyr, 2001). Söz konusu düzlemler dairesel ve dörtgensel olarak tanımlanabilmekte ve bu düzlemi ağ şeklinde tanımlayan noktalardaki hız değerleri hesaplanmaktadır. Örnek olarak Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de podun arka pervane düzlemindeki hız dağılımı gösterilmiş ve bu düzlem içerisinde geçen akım hatları, hız vektörleri ile birlikte sunulmuştur.



Şekil 3.17 : Akım Hatları, x=3.455m Pervane Düzlemi.



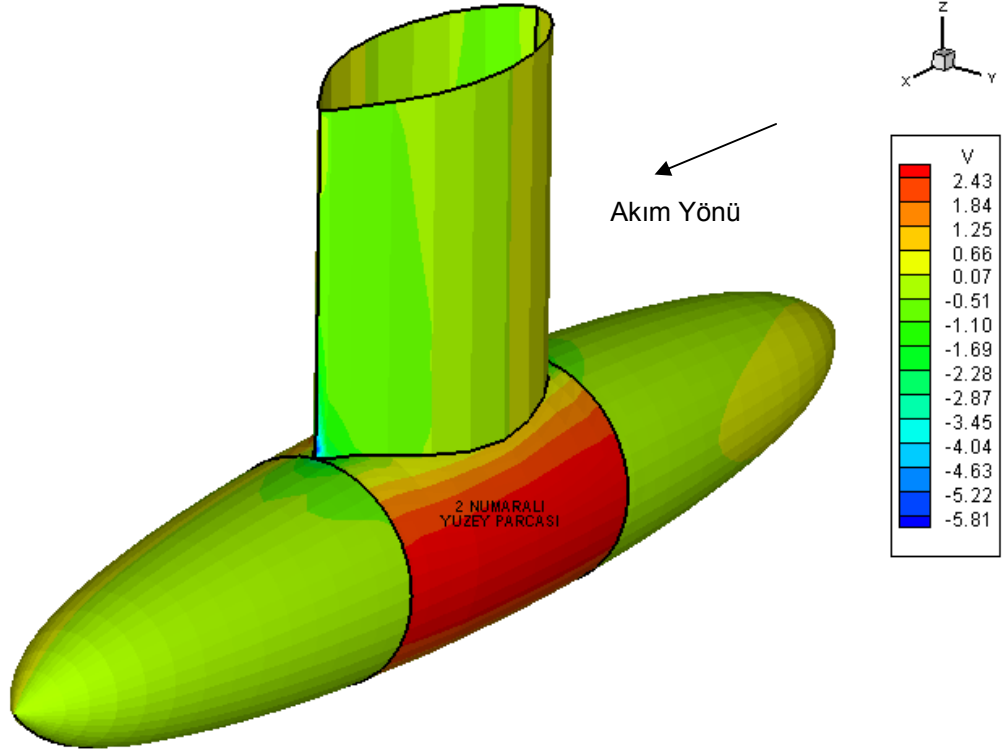
Şekil 3.18 : Strut Arkasındaki Düzlemde Hız Vektörleri, $x=3.455$ m Pervane Düzlemi.

3.13 Gelen Hızların Tanımlanması

VFLOW'da genel çözümler için cisim üzerine gelen hız ve hız vektörünün cisim eksenine ile yaptığı açı tanımlanmaktadır. Bilindiği gibi panellerin yüzey normalleri yönündeki hız değeri sıfır ve/veya sabit kabul edilmektedir. Teoride yer aldığı şekli ile normal yöndeki hızların bilinmesi ile kaynak terimleri hesaplanmakta ve bilinmeyen duble şiddetleri aranmaktadır.

VFLOW'da paneller üzerinde normal hız tanımlanabilmesi, yapılacak olan hız birleştirme çalışması için alt yapı niteliği taşımaktadır. Verilen örneklerde bu özellik bilinçli olarak büyük hız değerleri ile gösterilmiş ve akıma olan etkilerinin anlaşılması sağlanmıştır. Hız birleştirme çalışması yapılırken viskoz hızlar, Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de gösterilen örneklerden farklı olarak her bir panel üzerine normal yönde tanımlanacak ve bütün paneller viskoz hızların etkisi ile yeniden düzenlenmiş olacaktır.

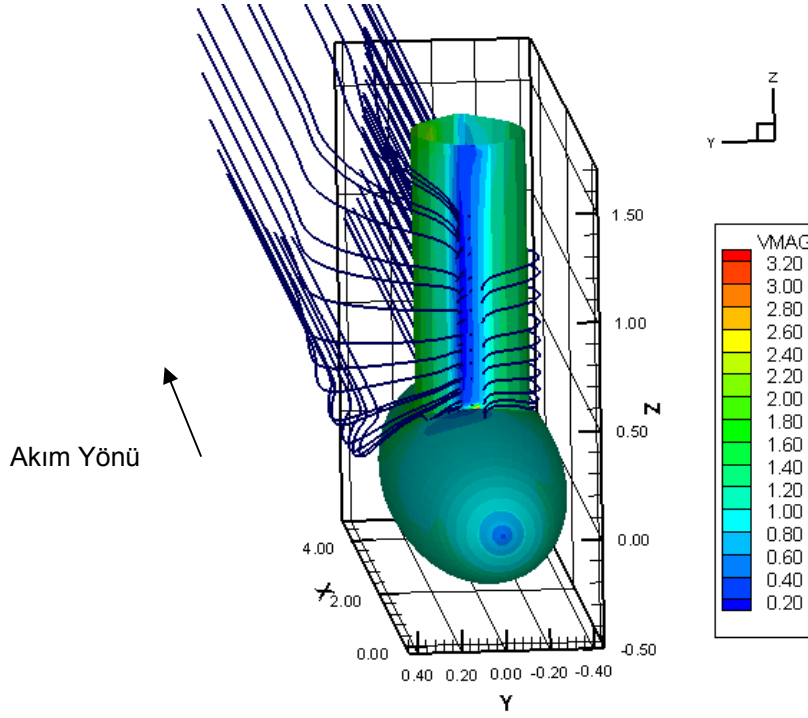
Eğer panelin normal doğrultudaki hız değerleri biliniyorsa hesaplamalarda her bir panel veya daha genel hali ile bir yüzey için tanımlanarak cismin yüzeyindeki hız değerleri bulunabilir. Şekil 3.19'da görülen gövde yüzeyi için normal hız tanımlanmış ve pod/strut yüzeyi üzerindeki hız hesabındaki etkileri incelenmiştir.



Şekil 3.19 : Gövde Yüzeyinde Tanımlanmış Normal Hızın Gösterimi.

Şekil 3.19'da sunulan pod yüzeyi 5 farklı yüzey parçası ile tanımlanmıştır. Burada VFLOW programındaki normal yönde hız tanımlama özelliğini göstermek amacı ile, 2 numaralı yüzey parçasına gerçekçi olmayan bir normal hız tanımlanmıştır. Hesaplama tamamlandığında 2 numaralı yüzey parçası üzerindeki hızın podun diğer yüzeyleri üzerindeki değerleri de etkilediği görülmektedir.

Test amacı ile tanımlanan abartılmış normal hız değeri, Şekil 3.19'da 2 numaralı yüzey üzerinde koyu renk ile görülmektedir. Podun 2 numaralı yüzey parçası üzerinden dışarı doğru bir akımın tanımlanmış olması, serbest akım yönünde bırakılan akım hatlarını da etkilemiştir.



Şekil 3.20 : Gelen Hız Verilen Önder Kenar Bölgesinde Akım Hatları.

Geometriyi oluşturan yüzey parçalarında yer alan tüm paneller üzerinde normal hız tanımlamanın yanında, keyfi seçilen paneller üzerinde de normal hız tanımlaması yapılabilir. Örnek oluşturması açısından bir sıra halindeki panellere gerçekçi olmayan büyüklükte normal hız tanımlanmıştır. Bu bölgeden geçmekte olan akım hatlarının cisim yüzeyinden uzaklaşmakta olduğu Şekil 3.20’de gösterilmiştir. Gerçekte hızın sıfır olduğu strut önder kenarına normal hız tanımlanınca akım hatları değişikliğe uğramıştır.

3.14 Sonuç

Bu bölümde panel metotlarının tarihsel gelişimi, kullanılan sınır şartları ve önemli kabul edilen özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir. Bu doktora çalışması kapsamında kullanılan pod ve strut etrafındaki akımın çözüldüğü VFLOW programı tanıtılmış, küre için yapılan çözümün analitik çözüm ile uyumluluğu gösterilmiştir. Buradan hareketle pod için yapılan hesaplamalarda basınç katsayısının literatürde verilen sonuçlarla uyumlu olduğu gösterilmiştir.

VFLOW’da iz modelinin oluşturulması, çözüm aşamasında kullanılan imaj modeli gibi konular hakkında açıklayıcı bilgiler verilmiştir. Tamamlanan bir çözümün değerlendirilmesi amacı ile pod üzerinde ve etrafındaki akım hatlarının nasıl çizdirileceği hakkında örnek resimler ve uygulamalar anlatılmıştır. Pervane

düzlemleri üzerindeki hız dağılımı, hız vektörlerinin çizilmesi ve normal hız tanımlaması yapılarak VFLOW sonuçlarını gösteren şekillere yer verilmiştir.

VFLOW panel metodu programının tez çalışmasının amacı doğrultusunda hız birleştirme yaklaşımının gerçekleştirilebilmesi için önem arz eden imkan ve kabiliyetleri sunulmuştur.

4. VİSKOZ AKIM METODU İLE YAPILAN HESAPLAMALAR

4.1 Giriş

Panel metodu ile yapılacak olan çözümde viskoz hızların etkisini göstermek amacı ile viskoz akım metodu ile yapılan çözüm sonucunda elde edilen hızlar, sınır şartı değişikliği yapılarak her bir panel üzerine normal hız olarak tanımlanacaktır. Böylece Bölüm 6'da ayrıntılı şekilde açıklanan ve hız birleştirme metodu olarak tanımlanan yöntemle, panel metodu ile yapılan çözümlerde viskoz akımla elde edilen sınır tabaka hız değerlerinin etkisi de dikkate alınmış olacaktır.

Viskoz akım yöntemi ile pod ve strut üzerinde oluşacak hızların tayini amacı ile FLUENT programı kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan hesaplara ait detaylar ve elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmuştur.

4.2 Viskoz Hesaplamalarda Takip Edilen İşlem Adımları

Akışkan içerisinde hareket eden bir cismin sonlu hacimler yöntemi ile viskoz çözümü için hesaplamalar öncesinde çeşitli hazırlık çalışmalarının yürütülmesi gerekmektedir. Pod ve strut katı ve yüzey modeli hazırlanarak FLUENT viskoz akış hesaplama programı için ağ örgüsü oluşturulmuştur. Hesaplama esnasında takip edilen işlem adımları aşağıda sıralanmıştır.

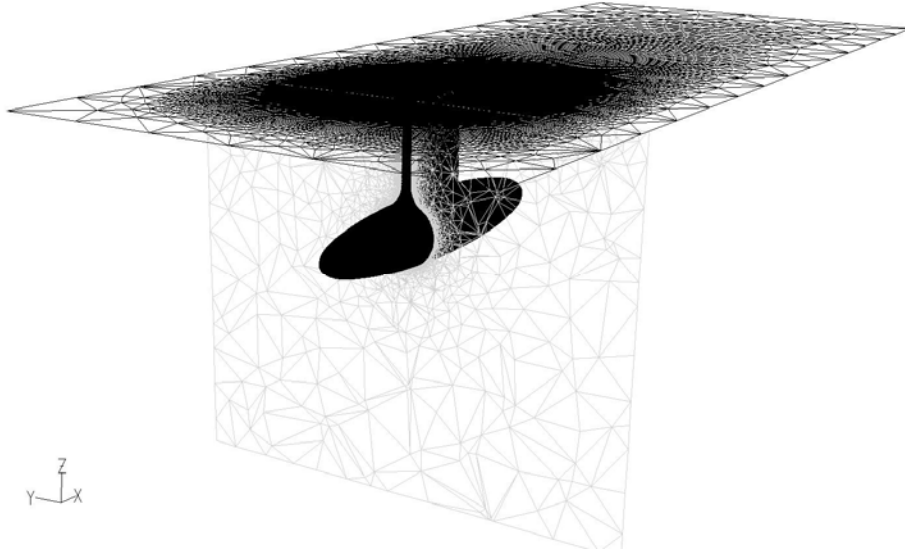
- Katı modelin oluşturulması,
- Kontrol hacminin tanımlanması,
- Ağ modelinin oluşturulması,
- Sınır tabaka ağının oluşturulması,
- Sınır şartların tanımlanması,
- Çözüm boyunca sayısal hesap değişkenlerinin izlenmesi,
- Sonuçların değerlendirilmesi.

Katı modelden türetilen yüzeyler, çözümün yapılacağı kontrol hacmi içerisine yerleştirilerek duvar olarak tanımlanmaktadır. Kontrol hacminin akım özelliklerini etkilemeyecek şekilde boyutlandırılması ve sınır şartlarının doğru verilmesi

gerekmektedir. Oluşturulan ağ modeli ve eleman sayısı çözümden beklenen hassasiyet ve hesaplama altyapısı dikkate alınarak kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Bu noktada ağ kalitesini gösteren hücre çalıklığı (skewness), elemanların oranları gibi çeşitli kriterler kullanılarak yeterli görülen eleman sayısı seçilmektedir. Sınır tabaka ağı dikkatlice modellenerek boyutsuz duvar mesafesi kriterine uygunluğu izlenmektedir. Doğru sonuçlar elde etmek için giriş akımına dair türbülans yoğunluğu, giriş hızı gibi başlangıç koşulu girdileri, problemin fiziksel özelliklerine uygun bir şekilde verilmelidir. Çözüm boyunca tanımlanan yakınsaklık kriteri takip edilmekte ve sonrasında elde edilen sonuçlar incelenmektedir.

4.3 Ağ Modelinin Oluşturulması

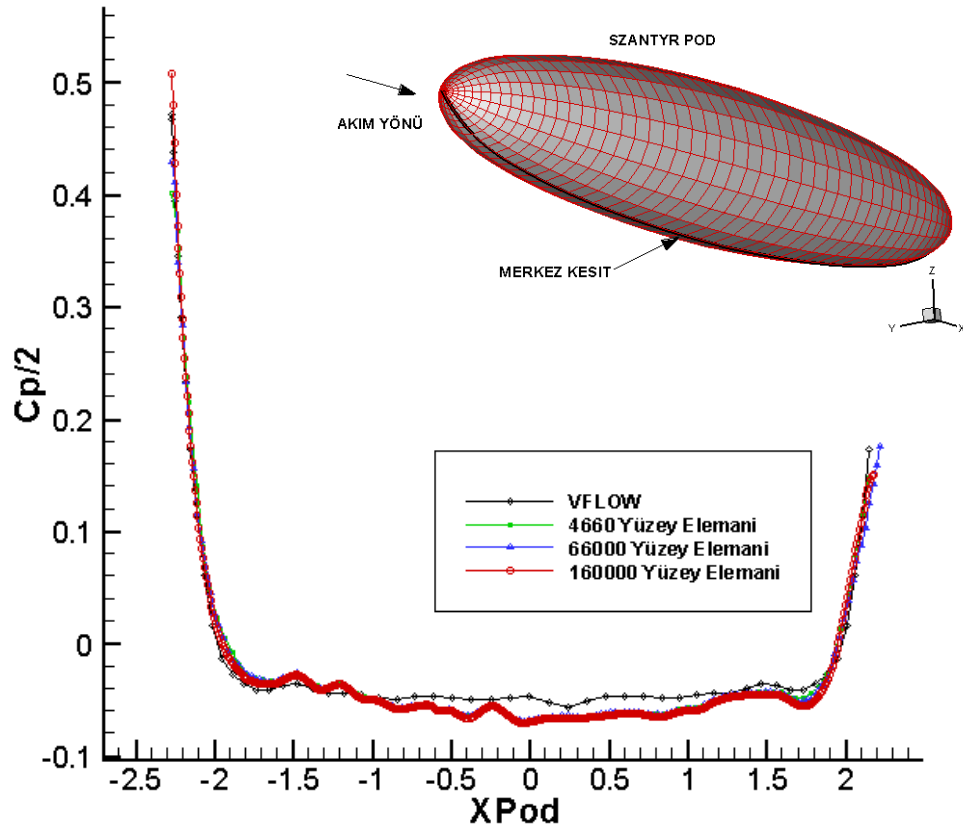
Viskoz çözüm için ihtiyaç duyulan ağ modeli GAMBIT programında oluşturulmuş ve modelin genel bir gösterimi Şekil 4.1’de sunulmuştur. Kontrol hacmi içerisinde hacim ağı oluşturulmadan önce kenar ve yüzeylerdeki ağ örgüsü tanımlanmıştır. Böylelikle önemli olduğu düşünülen bölgelerde istenilen ağ sıklığı elde edilmiştir.



Şekil 4.1 : Pod/Strut Hacimsel Ağ Örgüsü Örnek Gösterimi.

4.4 Yüzey Ağının Oluşturulması

Yapılacak akış analizinde kontrol hacmi içerisindeki ağın yeterli hassasiyette olduğunun kontrol edilebilmesi için sonuçların ağdan bağımsız olduğunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla farklı hassasiyetlerdeki modeller aynı sınır şartları için çözümlenerek, sonuçların birbirine yakınsayacağı eleman sayısının tayin edilmesi önemlidir.



Şekil 4.2 : Pod/Strut Yüzey Elemanları Merkez Kesitteki Ağ Hassasiyet Gösterimi.

Pod/strut yüzeyinde yer alan eleman sayısı esas alınarak yapılan çözümlerde simetri düzlemi üzerindeki merkez kesitteki basınç katsayısı çizdirilmiştir. Şekil 4.2’de üç farklı yüzey elemanı sayısı için hesaplanan Cp değerleri gösterilmiştir.

Pod yüzeyinde sırası ile 4660, 66 000 ve 160 000 üçgensel yüzey elemanı kullanılarak hesaplanan basınç katsayısı eğrisi, Gupta (2004) tarafından verilen değerler ile uyumlu olduğu bilinen ve VFLOW programında hesaplanan eğri ile birlikte çizdirilmiştir. Basınç katsayısı eğrisinde görülen yerel uyumsuzluklar, pod gövdesi için literatürde verilen yarı genişlik değerleri kullanılarak oluşturulan boyuna tiriz (spline) eğrileri ve katı model arasındaki yerel farklardan ileri gelmektedir ve sonuçların uyumluluğu kabul edilebilir bir seviyededir.

Sınır tabaka ağının yeterli hassasiyette oluşturulabilmesi amacı ile hesaplara 160 000 elemanlı pod ile devam edilmiştir. Pod/strut yüzeyinde 160 000 eleman kullanılmakta iken sınır tabaka içerisinde yaklaşık 2.66 Milyon eleman yer almıştır. Kontrol hacmi içerisinde ise 1.5 Milyon eleman kullanılmıştır. Sınır tabaka dışındaki bölgede başlangıçta anılan eleman sayısı ağ adaptasyonu yapılarak artırılmıştır. Sonuç olarak viskoz hesaplarda toplam 4.15 Milyon eleman kullanılmıştır.

y^+ değerinin 5 civarında olabilmesi için ilk hücre yüksekliğinin milimetre mertebesinde seçilmesi gerekmektedir. Bu nedenle daha çok yüzey elemanına sahip ağın güvenilirliği test edilmiş ve bu nedenle tercih edilmiştir.

4.5 Sınır Şartlarının Tanımlanması

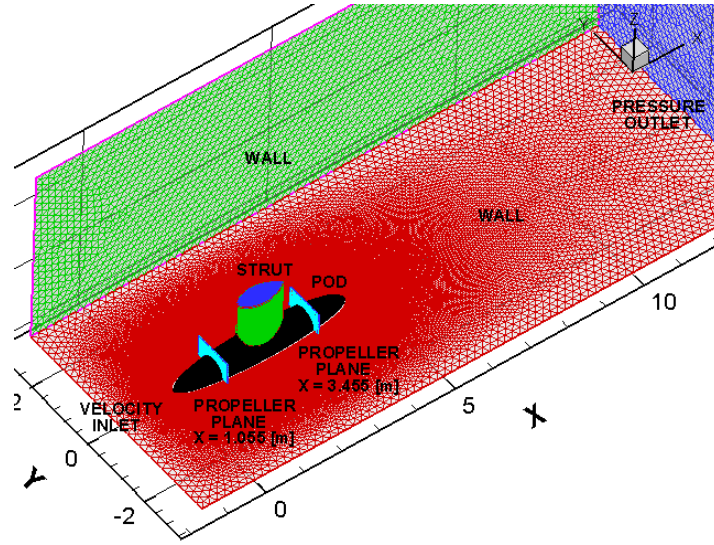
Viskoz çözümde üç boyutlu model kullanılmıştır. Kontrol hacmi içerisinde akımın bir yüzeyden girdiği varsayılmakta ve Pod/Strut üzerinden geçerek çıkış yüzeyinden çıktığı kabul edilmektedir. Çözümde akımın bir tünel veya kanal içerisinde cisme doğru ilerlediği ve pod sabit olacak şekilde akımın hareket etmekte olduğu varsayılmaktadır. Pod yüzeyinin başlangıcında tanımlanan koordinat sisteminin orijini sabit ve akımın hareketli olduğu kabul edilmektedir.

Çözümde kullanılan sınır koşulları;

- Giriş (Velocity Inlet)
- Çıkış (Pressure Outlet)
- Pod/Strut Yüzeyi (Wall)
- Tünel Dış Kenarları (Wall)
- İç Hacim Akışkan (Interior Fluid)

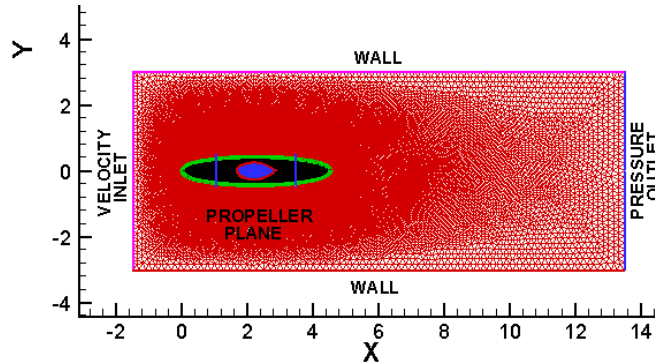
olarak tanımlanmıştır.

Kontrol hacmi x yönünde $-1.5 \leq x \leq 13.5$ m arasında alınırken pod $0 \leq x \leq 4.53$ m arasına yerleştirilmiştir. YZ düzlemi $-3 \leq y \leq 3$ m; $0 \leq z \leq 5.5$ m aralığında tanımlanarak pod simetri ekseninde tutulmuştur. Hesaplamalarda referans olarak alınan Szantyr podu üzerinde 1.055 m ve 3.455 m mesafede ön ve arka pervanelerin yerlerini temsilen iki ayrı pervane düzlemi tanımlanmıştır. Kontrol hacmine akımın girdiği yüzey giriş olarak tanımlanmış ve giriş hızı $V_{inf} = 4.53$ m/s olarak verilmiştir. Sınır şartları Şekil 4.3'de sunulmuştur. Giriş hızı sınır şartı verilirken akışkan içerisindeki başlangıç türbülans seviyesi ile ilgili değişkenler de tanımlanmaktadır. Yürütülen viskoz akım hesaplamalarında kullanılan türbülans kinetik enerjisi k ve spesifik yayılım oranı ω değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.3 : Viskoz Çözüm Sınır Koşulları Gösterimi.

Giriş hızı V_{inf} düzgün (üniform) olarak verilmiş ve diğer yönler için herhangi bir hız bileşeni tanımlanmamıştır. Akım çıkış ucunda ise serbest bırakılmış ve herhangi bir basınç veya hız profili koşulu eklenmemiştir. Şekil 4.4'de gösterilen pod ve tünel yüzeyleri, akımın hiçbir şekilde içine giremeyeceği duvar sınır şartı olarak kabul edilmiş ve duvardan da akıma bir etki gelmeyecek şekilde tanımlanmıştır.



Şekil 4.4 : Sınır Koşulları Gösterimi Pervane Düzlemleri.

4.6 Hesap Değişkenleri

Viskoz çözümde (FLUENT) toplamda 75 saniye süren bir hesap koşturulmuştur. Bu süre sayısal deneyler sonucu belirlenmiş olup, akım zamandan bağımsız hale gelmektedir. Hesaplamalarda 2.4 GHz AMD Opteron işlemcili ve 12 GB RAM bellek kapasiteli bir iş istasyonu kullanılmıştır. Pervane kanadı arkasında oluşan girdabın incelendiği bir çalışmada yapılan simülasyonlarda deney verilerine en yakın sayısal çözümlerin $k-\omega$ SST türbülans modeli kullanıldığında elde edildiği bilinmektedir (Flaszynski ve diğ., 2009). Ağ adaptasyonu kullanılarak akım içerisindeki girdabın yakalanması konusunda literatürde yer alan bilgiler doğrultusunda bu çalışmada

türbülans modeli olarak k- ω SST kullanılmıştır. 75 saniye kontrol hacmi içerisindeki akımın kararlı hale geleceği yeterince uzun bir süre olarak belirlenmiş ve hesaplamalarda en az değer olarak seçilmiştir. Simülasyonlar ortalama 120 saniyeye kadar devam ettirilmiş ancak yapılacak karşılaştırmalar için 75 saniye esas alınmıştır.

Basınç hız düzeltmesi için PISO algoritması tercih edilmiştir (Issa, 1986). 0.1 saniyelik adımlar ile zaman ayarlanmış ve her bir zaman adımında maksimum 40 iterasyon adımına izin verilmiştir. Programın menüsünden elde edilen hesap detayları EK B'de sunulmuştur. Hesaplarda kullanılan sınır şartları ve hesap değişkenleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Viskoz Çözüm Hesap Değişkenleri.

Viskoz Çözüm Hesap Değişkenleri	
Çözücü (Solver)	3DDP
Türbülans Modeli	k- ω SST
Yoğunluk (kg/m ³)	998.2
Dinamik Viskozite (kg/m-s)	1.003×10^{-3}
Giriş Hızı	u = 1; (4.53 m/s) v = 0 w = 0
Türbülans Kinetik Enerjisi k (m ² /m ²)	7.6695×10^{-3}
Spesifik Yayınım Terimi ω (1/s)	1.118×10^{-1}
Pod Yüzeyi Modeli	Duvar

4.7 Ağ Örgüsü (Grid) Adaptasyonu

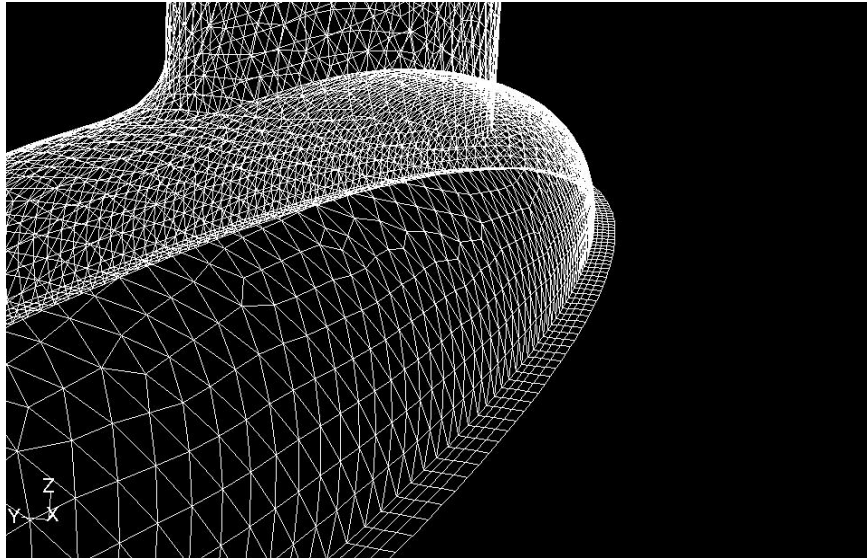
Viskoz çözüm için hazırlanan hacim modellemesinde kullanılan ağ örgüsünün sıklığı sonuçları doğrudan etkilemektedir. Problemden farklılık göstermesi beklenen akış özelliklerine göre ağ örgüsü sıklığının çözüm içerisinde ayarlanması gerekmektedir. Sınır tabaka hızlarının da önemli olduğu problemlerde yeterince küçük elemanlardan oluşan bir yüzey ağı üzerine kurulmuş sınır tabaka ağının kullanılması önemlidir. FLUENT/T-Grid programı kullanılarak yüzeylerin basitleştirilmesine gerek kalmaksızın sınır tabaka ağı oluşturulmaktadır. Sınır tabaka ağı sonrasında kontrol hacmi içerisinde yer alan bölgeye göreceli olarak daha geniş elemanlardan oluşan prizmatik ağ eklenmektedir. Böylelikle toplam ağ hücresi sayısı kontrol edilebilmekte ve ihtiyaç duyulmayan bölgelerin sık bir ağ ile tanımlanmasının önüne geçilmiş olmaktadır.

Pod yüzeyinden başlayarak tanımlanan sınır tabaka ağı üzerine kurulan hacim ağı, kontrol hacminin duvarlarına kadar genişleyerek gitmektedir. Literatürde pod/strut

benzeri problemler için yaklaşık 2 Milyon hücreden oluşan hacim ağı kullanımının yeterli olduğu görülmüştür (Gupta, 2004).

Zamana bağlı viskoz çözümlerde akım, her bir adım sayısında kontrol hacmi boyunca başlangıçta belirlenen zaman aralığı kadar ilerlemektedir. Akış özellikleri her an için farklılık göstermekte ve yenilenen hesap değişkenleri bir sonraki adımda kullanılmaktadır. Temel seviyedeki hesaplamalarda sabit bir yapıda kurgulanan ağ örgüsü, çözümün sonuna kadar korunmakta ve akım özellikleri hesaplanmaktadır.

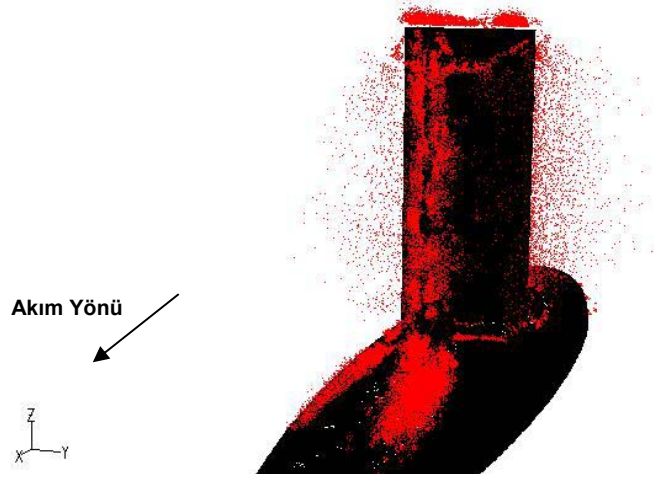
Kontrol hacmi içerisinde akım özellikleri gibi, ağ örgüsünün de güncellenmesi imkanı vardır. FLUENT programında ara adımlarda elde edilen hız, basınç, girdaplılık gibi anlık yerel veriler kullanılarak ağ örgüsü de güncellenebilmektedir. Bu noktada sonuçların hassaslaştırılması açısından ağ adaptasyonu (grid adaptation) olarak tanımlanan önemli bir avantaj ortaya çıkmaktadır. Sınır tabakaya eklenen ve hacim içerisinde sık bir ağ kullanılmaksızın kurulan bir ağ, zamana bağlı çözümdeki simülasyon adımları arasında sıklaştırılabilmektedir. Böylelikle çözüm ilerledikçe ihtiyaç duyulan değişkenlere göre ağ sıklığı kontrol edilerek hesaplama kapasitesi optimum kullanılabilmektedir. Bir başka ifade ile kontrol hacmi içerisinde önemli değişimlerin beklenmediği yerlerde ağ genişletilmekte ve toplam ağ elemanı sayısı kontrol edilebilmektedir. Sınır tabaka ağının yüzeydeki gösterimi Şekil 4.5'de sunulmuştur.



Şekil 4.5 : Sınır Tabaka Ağı.

Ağ adaptasyonu çeşitli şekillerde gerçekleştirilebilmektedir. Örneğin belirli bir skaler büyüklük eşik değeri olarak kullanılarak istenilen hassasiyet ayarlanabilmektedir. Girdaplılık ve yerel hızların önemli olduğu bu çalışmada gradyan tanımı dikkate alınarak adaptasyon yapılmıştır. Atnalı girdabı kanat kesitli strut önünden başlayarak

pod boyunca dönerek ilerlemekte olduğundan Y ve Z yönündeki hız değerlerine sahiptir. O halde serbest akım X yönünden gelmekte iken atnalı girdabı pod/strut birleşim bölgesinde X bileşenini kaybetmekte ve diğer bileşenlerinde görece bir değişim göstermektedir. Adaptasyon Y ve Z yönündeki hız değişimi esas alınarak yerel ağ örgüsündeki sayının artırılması ile yapılmıştır. Normalize değerler kullanılarak yapılan adaptasyonda, hızın değişiminin çok olduğu bölgedeki ağ sayıca artırılarak bir sonraki adımda daha hassas olarak hesaplanmaktadır. Örnek olarak atnalı girdabı için, akım içerisinde izlenmek istenen X yönündeki girdaplılık ve Z yönündeki hız değişimi gibi birden fazla değişken seçilerek ağ adaptasyonu yapılabilmektedir. Şekil 4.6'da Z yönündeki hızın değişimine bağlı bir adaptasyonda hacim ağı içerisinde bölünecek hücreler gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : Z yönündeki Hıza Bağlı Ağ Adaptasyonu Gösterimi.

Strutın önünden başlayarak akım yönünde ilerleyen bir hatta, girdap nedeni ile Z hızı değişmekte olduğundan buradaki hücreler adaptasyon için işaretlenmiştir. Adaptasyon ile bir sonraki adımda, strut arkasında görülen bölgede Z yönündeki hız daha hassas hesaplanacak ve hacim ağının diğer bölümlerinde bir değişiklik yapılmayacaktır.

Adaptasyon yapılmayan bölgelerdeki hesaplamalar eksik veya daha az doğru değildir. Adaptasyon bütün hacim içerisindeki hücrelere uygulanmakta ve tanımlanan kriterler bazında değişim gösteren hücrelere odaklanıldığı anlamına gelmektedir. Zamana bağlı bir çözümde adaptasyon ihtiyacı giderek azalmakta ve akımın yerel seviyedeki davranışına göre şekillendirilen bir ağ örgüsü elde edilmektedir.

4.7.1 Kullanılan Türbülans Modeli

Viskoz hesaplamalarda iki denklemlilik modeller arasında yer alan $k-\omega$ SST türbülans modeli kullanılmıştır. Wilcox (2006) tarafından önerilen $k-\omega$ modeli, kuvvetli pozitif basınç (adverse pressure gradient) gradyenlerinin ve sınır tabakanın var olduğu harici (dış) akış problemlerinde kullanılan ve cidar kenarı bölgesinde hassas sonuçlar elde edilen bir türbülans modelidir. Bu modelin kullanımında giriş sınır şartı için serbest akımın ω değeri doğru seçilmesi gerekmektedir. $k-\epsilon$ türbülans modelinin serbest akım değeri daha az duyarlı olması nedeni ile $k-\omega$ ve $k-\epsilon$ modellerinin birlikte kullanımına olanak sağlayan çeşitli yaklaşımlar ortaya konulmuştur. Kuvvetli pozitif basınç gradyeni altında yakın bölgede $k-\omega$ olarak davranan ve duvardan uzaklaştıkça $k-\epsilon$ gibi davranan bir model önerilmiştir (Menter, 1993). Böylelikle girişteki değeri seçimindeki esneklik elde edilmiş ve sınır tabaka için doğru modellenmesi imkanı kazanılmıştır. Visköz çözümde, dış akışlarda kullanılmak üzere geliştirilmiş, Menter (1993) modelinin bir benzeri olan $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) türbülans modeli kullanılmıştır. Pod/strut etrafındaki viskoz akımın çözümünde bütün duvarlar için sınır tabaka modellenmiş ve duvar yakın kenarı literatürde önerilen en uygun yaklaşım kullanılarak çözülmüştür. $k-\omega$ SST modeli, bir kanat arkasında oluşan girdabın ağ adaptasyonu ile çözüldüğü bir çalışmada, deney sonuçları ile en uyumlu sonuçların elde edildiği türbülans modeli olarak belirlenmiştir (Flaszynski ve diğ., 2009).

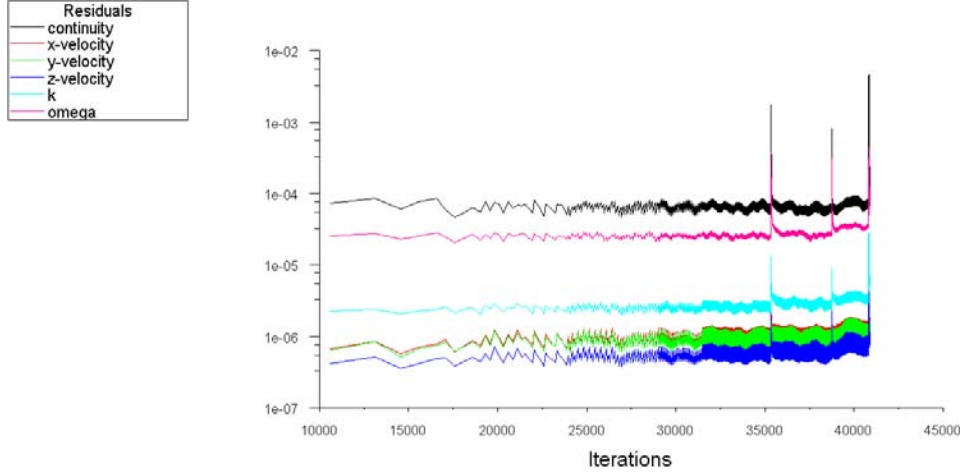
4.8 Visköz Akım Metodu ile Elde Edilen Sonuçlar

Viskoz çözüme ait sonuçlar sayısal ve pod etrafındaki akım özellikleri olmak üzere iki başlık altında incelenmiştir.

4.8.1 Sayısal Sonuçlar

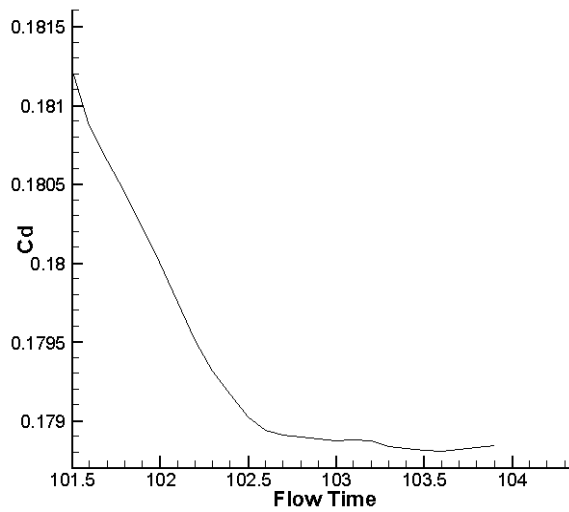
Viskoz hesapta çözümün doğruluğu için kontrol hacmi içerisindeki fiziksel bir büyüklüğün farkları izlenmektedir. Genellikle kontrol hacmine giren ve çıkan kütlelerin korunacağı esasına dayanarak tanımlanmış kütle fark değeri (mass source residual) yakınsaklık analizi için kullanılmaktadır. Kütle fark değeri kontrol hacmi içerisindeki her bir hücreye giren net kütle akılarının mutlak toplamı olarak ifade edilmektedir (Molland ve Turnock, 2007). Çözümün yakınsaklığının anlaşılması için süreklilik denkleminde göre bu fark değeri, kullanıcı tarafından belirlenen bir hata aralığı kriterine göre sıfırlanması beklenmektedir. Kütle fark değeri birimi kg/s olarak cinsinden tanımlanmaktadır.

Şekil 4.7’de sunulan eğrilerde süreklilik denklemi, hesaplanmakta olan hızlar ve türbülans değerlerinin iterasyon adımlarına göre değişimi gösterilmiştir. İterasyonlarda genel olarak fark değerleri yakınsaklığı için 10^{-4} mertebesinin yeterli olduğu bilinmektedir. Eğrilerde gözlemlenen ani değişimler, ağ adaptasyonu sonrasındaki ilk değerleri göstermekte ve iterasyona devam edildikçe eleman sayısı artırılan güncellenmiş ağ için bu değerlerin tekrar kararlı hale geldiği görülmektedir.



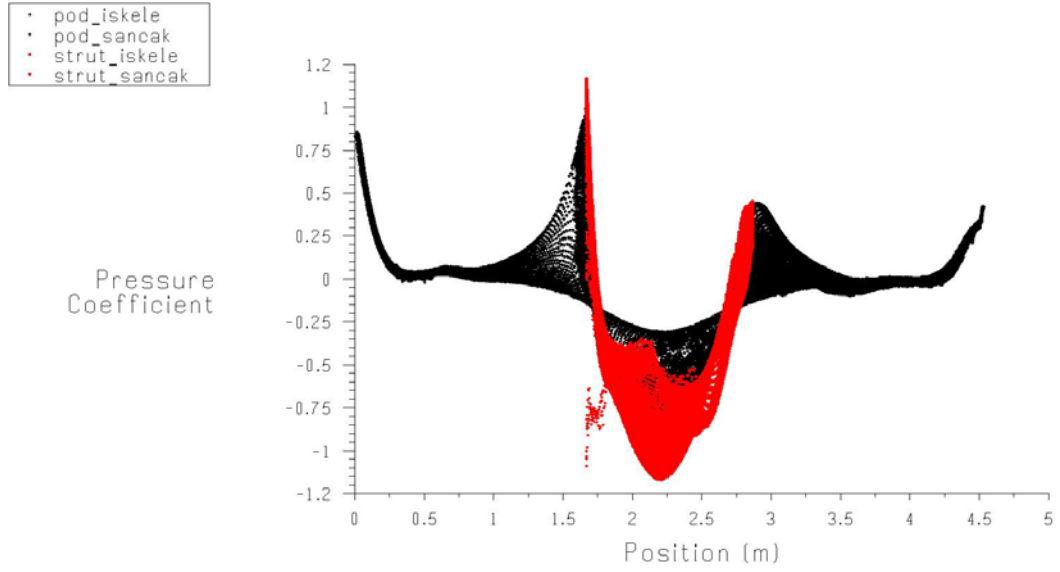
Şekil 4.7 : Kütlesel Fark Değerinin Yakınsaması.

FLUENT programında viskoz çözüm yapılmış ve çözümde sayısal yakınsamanın yanında fiziksel büyüklüklerin yakınsaması izlenmiştir. Sayısal değerlerin yanında akım ile ilgili fiziksel bir değer izlenmesi gerekmektedir. Şekil 4.8’de toplam çözüm süresi içerisinde direnç katsayısının yakınsadığı ve yüzey üzerindeki basınç dağılımının potansiyel akış programının sonuçları ile benzer çıktığı görülmüştür.



Şekil 4.8 : 104 Saniye Sonunda Direnç Katsayısının Yakınsaması.

Pod ve strut yüzeyi üzerindeki basınç katsayısı pod boyunca çizdirilmiş ve Şekil 4.9'da sunulmuştur.

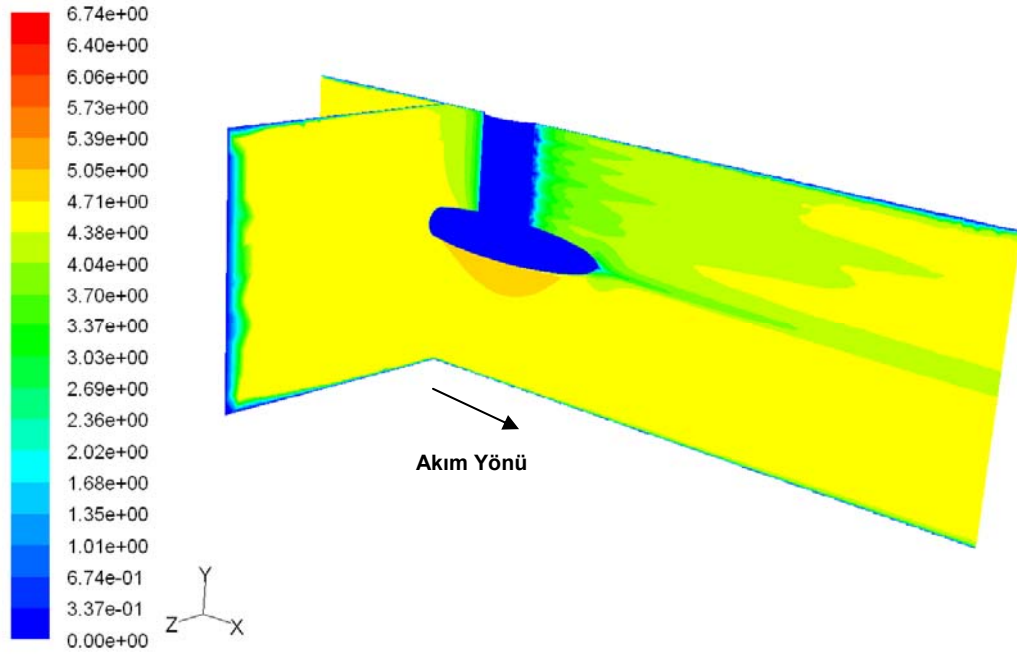


Şekil 4.9 : Pod/Strut Yüzeyinde Basınç Katsayısının Dağılımı.

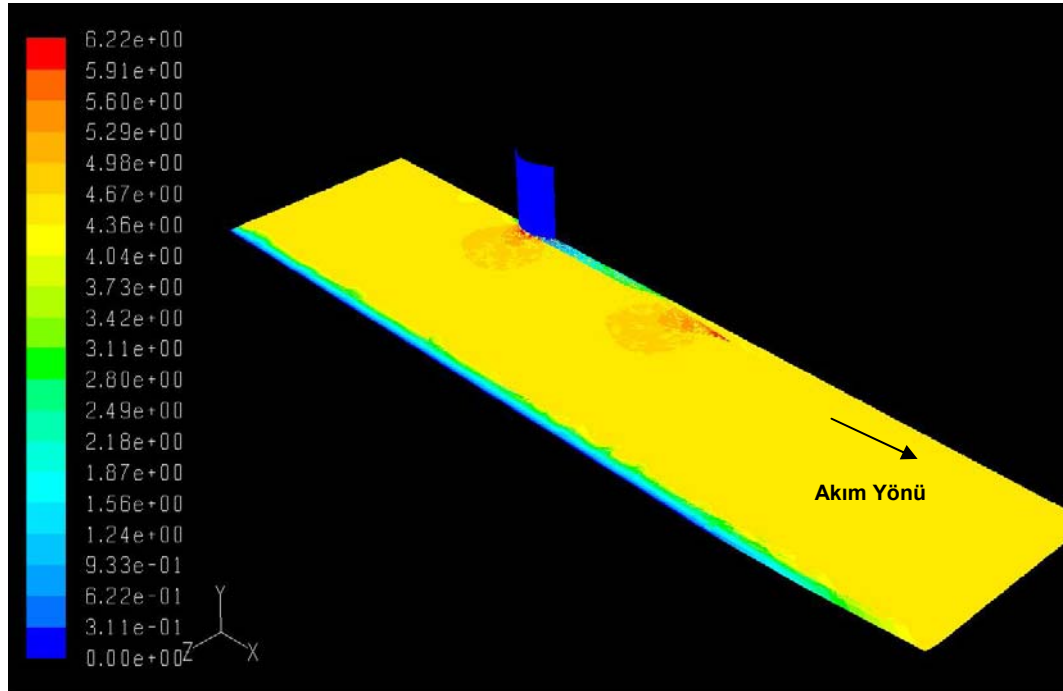
4.8.2 Pod/Strut Etrafındaki Akım

Yakınsaklık kriteri ve pod üzerindeki direnç katsayısının izlenmesi ile çözümün doğru olduğu anlaşılmaktadır. Sonuçlardan çok sayıda değişken ve temsili resim üretilebilmektedir. Akım hakkında fikir edinilmesi için çeşitli şekillere yer verilmiştir. Pod/strut yüzeyi ve komşuluğunda tanımlanan düzlemlerdeki ortalama hızlar (mean velocity), zamana bağlı hız profilleri, türbülans yoğunluğu, pod yüzeyi üzerindeki basınç dağılımı gibi özellikler şekiller halinde sunulmuştur.

Sonucun doğru olduğunu teyit eder şekilde, kontrol hacmi duvarları üzerinde hız dağılımı sınır şartı gereği sıfırdan başlamakta ve serbest akım hızına ulaşmaktadır. Pod gövdesinin arkasından başlayarak devam eden arka gövde izi (boat tail wake), simetri düzleminde strut arkasında bozulan hız konturları zamana bağlı akımın etkilerini göstermektedir (Şekil 4.10 ve Şekil 4.11).

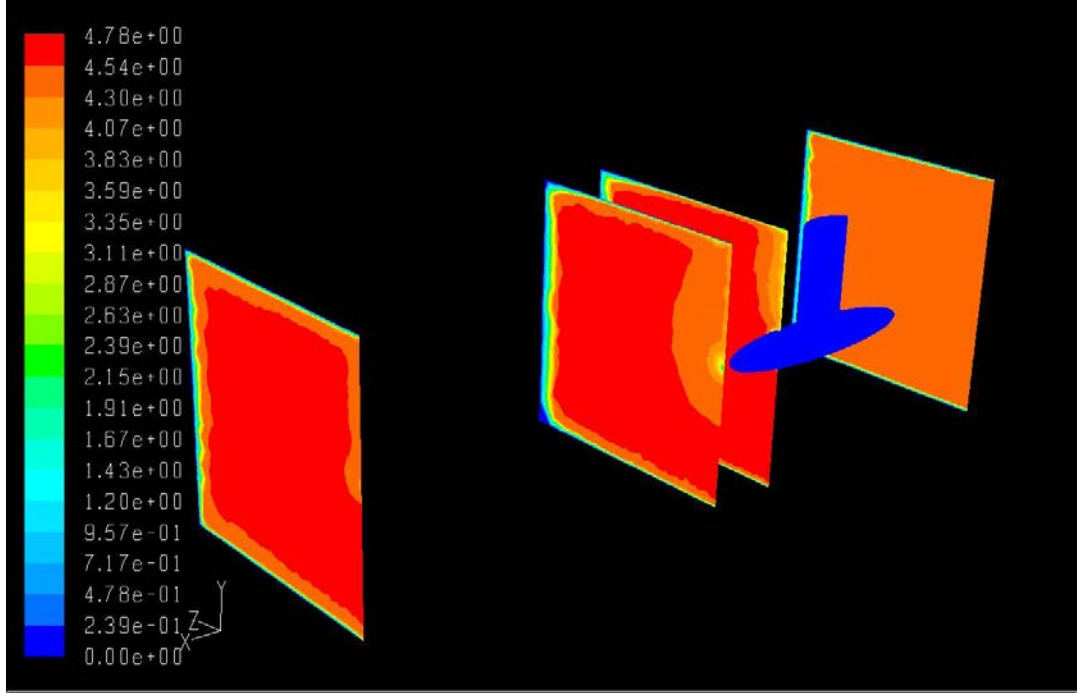


Şekil 4.10 : Simetri Düzlemindeki Hız Konturları.



Şekil 4.11 : 75 Saniye Sonrasındaki Hız Profilleri.

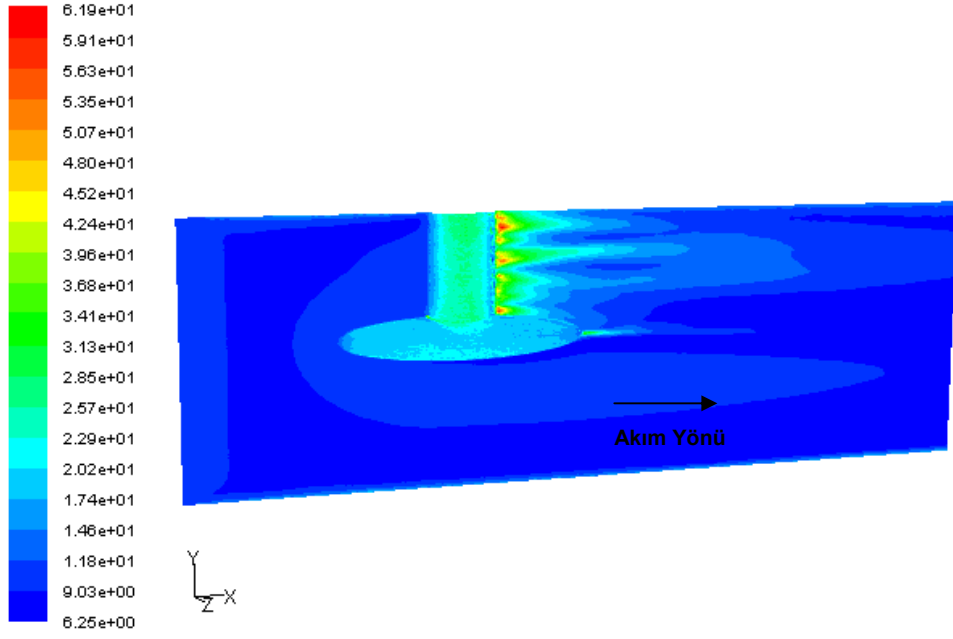
Hız profilleri zamana bağlı çözümün irdelenmesinde önemli bir göstergedir. Kontrol hacmi içerisinde $V_x = 4.53 \text{ m/s}$ olarak tanımlanan serbest akım hızı açıkça gözlemlenmekte ve strut etrafındaki yüksek akım hızının 75 saniye boyunca ilerlediği görülmektedir. Böylelikle zamana bağlı çözümde kontrol hacmi içerisindeki akımın hareket etmekte olduğu teyit edilmiş olmaktadır (Şekil 4.12).



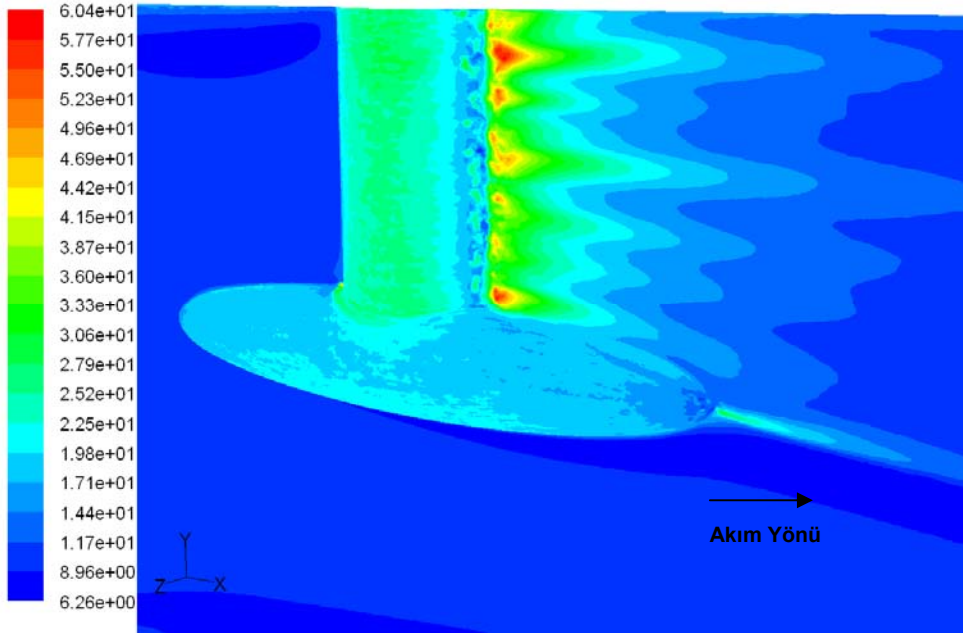
Şekil 4.12 : YZ Düzlemindeki Hız Konturları.

Kontrol hacmine giriş sınır şartı olarak verilen $V_x = 4.53$ m/s hızındaki serbest akım cismin etrafından geçerek kontrol hacmini terk etmektedir. Çözümün başından 75 saniye sonra yeterince gelişmiş (fully developed) akım YZ düzlemindeki hız konturları olarak izlenmektedir. Pod arkasında bozulan akımın etkileri x ekseninde tanımlanan düzlemlerde görülmektedir (Şekil 4.13).

Bu çalışmada referans olarak dikkate alınan Szantyr Podu üzerinde iki adet pervane düzlemi tanımlanmıştır. Pervane düzlemleri pod başından itibaren $x=1.055$ m ve $x=3.455$ m mesafede tanımlanan iki adet YZ düzlemidir. Strutin önünde ve arkasında tanımlanan pervane düzlemleri pod etrafındaki akımın incelendiği bölgedir. Pervane düzlemlerinin dışında kontrol hacmi içerisindeki akım hakkında fikir edinmek amacı ile hesabın yapıldığı tünel kesitindeki düzlemler de izlenmiştir (Şekil 4.14).



Şekil 4.13 : Simetri Düzlemindeki Türbülans Yoğunluğu.



Şekil 4.14 : Türbülans Yoğunluğu.

4.9 Sonuç

Hız birleştirme metodunda girdi olarak kullanılacak olan, pod ve strut üzerinde oluşan hızlar viskoz akım yöntemi (FLUENT) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu doktora çalışması kapsamında geliştirilen bir rutinle bu hızların VFLOW programına girdi olarak verilmesi sağlanmıştır.

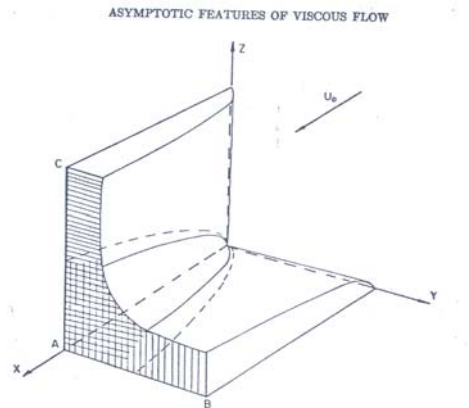
5. ÖNDER KENARDAKİ AKIM AYRILMASI

5.1 Giriş

Pod/strut birleşiminde atnalı girdabının varlığı bilinmektedir. Devenport (1992) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda düz bir levha ile NACA 0012 kesitli kanat birleşim bölgesinde atnalı girdabının oluştuğu gözlenmiştir. Bu bölümde aynı geometri kullanılarak hem panel metodu hem de viskoz akım metodu ile yapılan çözümlerle pod/strut bölgesindeki atnalı girdabının varlığı gösterilmiştir. Literatürde önder kenardaki akım ayrılması (leading edge separation) olarak tarif edilen olayda, akımın engel önünde bir girdap oluşturarak serbest akıma göre farklılık göstererek yönlenmesi kastedilmektedir (Devenport ve diğ., 1990).

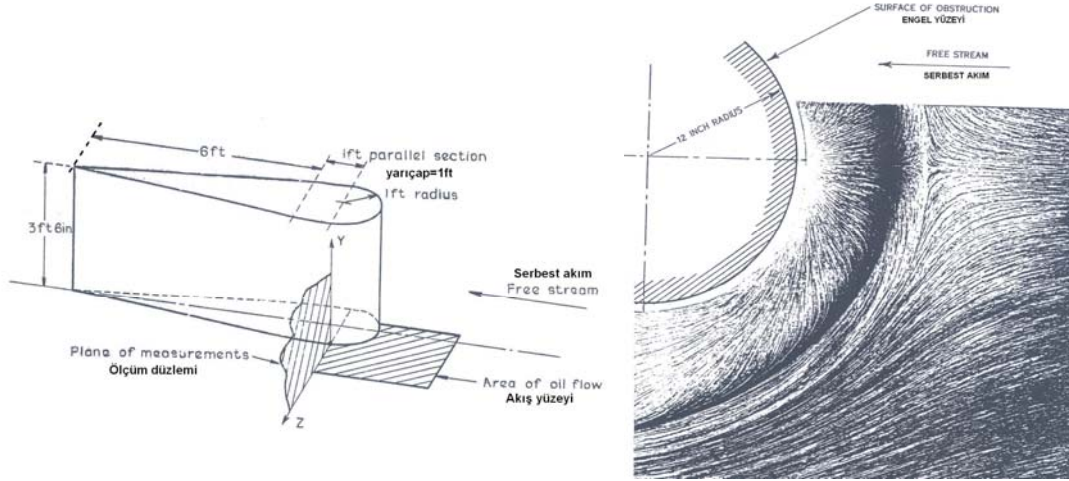
5.2 Önder Kenardaki Akım Ayrılması

Dik açılar ile birbirine bağlanan yüzeylerde hızdaki azalmanın etkisi ile akımın önder kenardan ayrılması konusu literatürde yer alan bir çalışma konusudur. 1970'lerde havacılık konusunda yapılan araştırmalara dair yayınlarda konunun "köşe akımı" olarak adlandırılan bir başlık altında incelendiği Şekil 5.1'de görülmektedir (Pal ve Rubin, 1971). Hidrodinamik açıdan düşünüldüğünde dümen, fin ve braket gibi dikey yüzeylerin tekne yüzeyine bağlanmasında benzer bir akış şekli oluşmaktadır. Köşeye son derece yakın bir bölgede yapılan ölçümlerde, cisim yüzeyinden gelen akıma doğru ters yönlü bir akımın oluştuğu ve akımın engelin bir miktar önünden ayrıldığı görülmektedir (Şekil 5.2) (East ve Hoxey, 1968).



Şekil 5.1 : Köşe Akımı Gösterimi (East ve Hoxey, 1968).

Düz bir levha üzerine yerleştirilen kanat kesitli bir engel üzerine gönderilen akım incelendiğinde, deneysel amaçla tabana bırakılan yağın önder kenarın ön tarafında bir ayrılma hattı oluşturduğu görülmektedir. Deney sonucunda ortaya çıkan akım hatları Şekil 5.2'de sunulmuştur (East ve Hoxey, 1968).



Şekil 5.2 : Deney ile Görüntülenen Engel Öncesi Ayrılan Akım Hatları (East ve Hoxey, 1968).

Havacılık endüstrisinin yanında, özel bir araştırma konusu olan denizaltılar için yapılan deneysel çalışmalarda da, tipik bir köşe akımı örneği olan gövde/kule birleşim bölgesi önünden başlayan önder kenar akım ayrılması gözlemlenmiştir Şekil 5.3 (Werle, 1988).



Şekil 5.3 : D/A Kulesi/Tekne Birleşiminde Oluşan Atnalı Girdabı (Werle, 1988).

VFLOW ve FLUENT programında yapılan hesaplamalarda Pod/Strut birleşim noktası öncesinde akım hatlarının bir girdap hüzmesi oluşturarak serbest akımdan ayrıldığı gözlenmiştir. Akım ayrılması ve girdap oluşumunun belirlenmesi çalışmalarında aynı geometri için potansiyel ve RANS çözücü kullanılmış ve

birbirleri ile paralellik gösteren sonuçlara ulaşılmıştır. Kullanılan hesaplamalı akışkanlar mekaniği (CFD) programları arasındaki en önemli fark viskoz etkilerin Laplace çözücü (VFLOW) bünyesinde kullanılamamasıdır. Bir başka deyişle VFLOW'da yapılan hesaplarda viskoz etkiler modellenememektedir. Potansiyel ve RANS çözücüler arasındaki temel farklar ana hatları ile Çizelge 5.1'de sunulmuştur.

Çizelge 5.1 : Potansiyel ve RANS Çözücü Arasındaki Farklar.

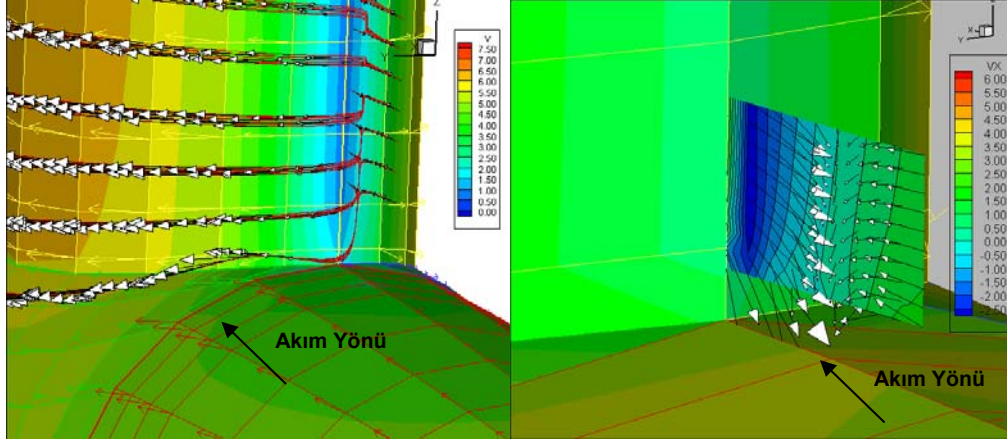
POTANSİYEL AKIŞ	VİSKOZ AKIŞ
Yüzey Ayrıklaştırması	Hacim Modellemesi ile Ayrıklaştırma
Geometri Kısıtı Yok	Ağ Örgüsüne Önemli Ölçüde Duyarlı Çözüm
Viskozite Etkileri İhmal Ediliyor • Akış irrotasyonel • Sıkıştırılmaz	Türbülans Modelleri Kullanılıyor • S-A • k-ω(2 denklem) • k-ϵ (2 denklem) • LES • DNS
Hızlı Çözüm	Uzun Hesaplama Zamanı
Zamandan Bağımsız Çözüm	Anlık Çözüm İçin Parabolik Denklem Takımı

Hesaplamalı akışkanlar mekaniğinde her iki çözümün de önemli avantajları bulunmaktadır. Potansiyel akış modelleri yüzey tanımlama ve ayrıklaştırma açısından son derece hızlı çözümlere imkan vermektedir. Farklı geometrilerin tanımlanması ve sınır koşulları problemin fiziksel özellikleri göz önüne alınarak dakikalar mertebesinde sonuçlandırılmaktadır. RANS çözücülerde ise zamana bağlı çözümler önemli hesaplama alt yapıları kullanılmasına karşın günler mertebesinde sonuçlanmaktadır. Viskoz çözüm ile akıma ait özellikler detaylı olarak hesaplanabilmektedir.

5.3 VFLOW'da Modellenen Önder Kenar Akım Ayrılması

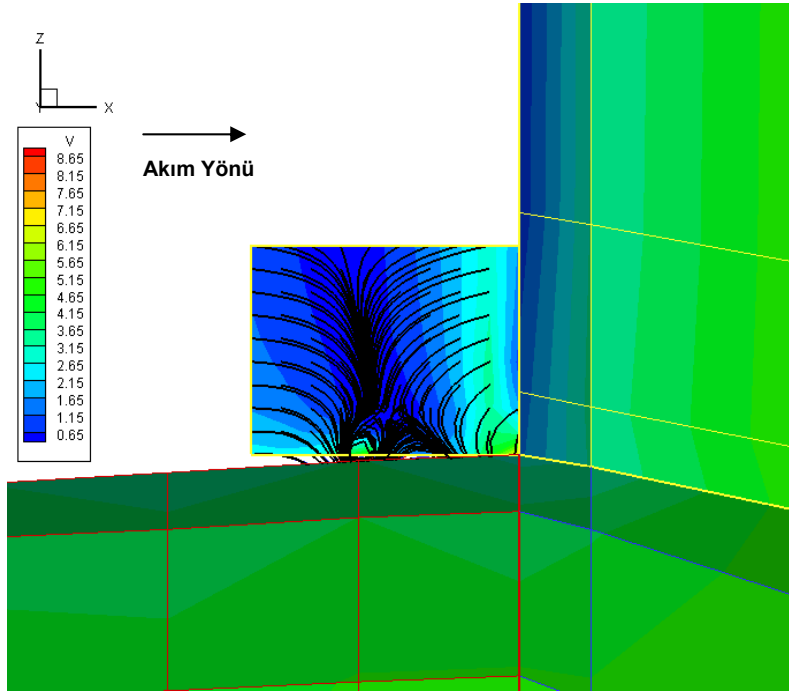
VFLOW programında modellenen Pod/Strut geometrisi 4.53 m/s serbest akım hızı için koşturulmuştur. Modelde bir dümen gibi modellenen strut arkasından iz ağı bırakılmış ve iterasyon adımları için izdeki değişim izlenmiştir.

Literatürde takıntı gövde birleşim bölgesindeki atnalı girdabının varlığının iki temel şekilde gösterildiği bilinmektedir. Kanadın önder kenar tarafında simetri düzleminde çizdirilen hız vektörleri atnalı girdabını oluşturan mekanizma hakkında önemli bir gösterge olmaktadır. Bu düzlemdeki hız vektörleri, önder kenara yaklaştıkça negatif değerler alarak yön değiştirmekte ve atnalı girdabına kadar önder kenardan ters yönlü bir hız dağılımı oluşmaktadır.



Şekil 5.4 : Strut Önünde Oluşan Atnalı Girdabı.

Şekil 5.4'de pod/strut birleşim bölgesi önünde, simetri düzlemi üzerindeki hız vektörleri ve bu düzlemden bırakılan akım hatları gösterilmiştir. Önder kenardan atnalı girdabına doğru ters yönlü hız vektörleri, durma noktasında y ve z bileşenlerine dönüşerek dönme eğilimi göstermekte ve devamında strut arkasına doğru ilerleyerek atnalı girdabını oluşturmaktadır.



Şekil 5.5 : Simetri Düzlemi Girdap Hüzmesi.

Şekil 5.5'de de görüldüğü gibi simetri ($y=0$) düzlemindeki akım hatları strut civarında bir girdabın varlığına işaret etmektedir. Serbest akım hızı ile birlikte podun arkasına doğru ilerleyen akım hatlarından bir bölümü, strut sonrasında bir dönme içerisindedir ve akım yönünde pod boyunca ilerlemektedir.

Girdabın diğ er bir gösterimi ise akıma dik yönde yerleştirilen düzlemlerdeki hız konturlarının izlenmesidir. Atnalı girdabının etkilerini gösteren düzlemlerdeki hız konturlarına, ilerleyen bölümlerde detaylı olarak yer verilmiştir.

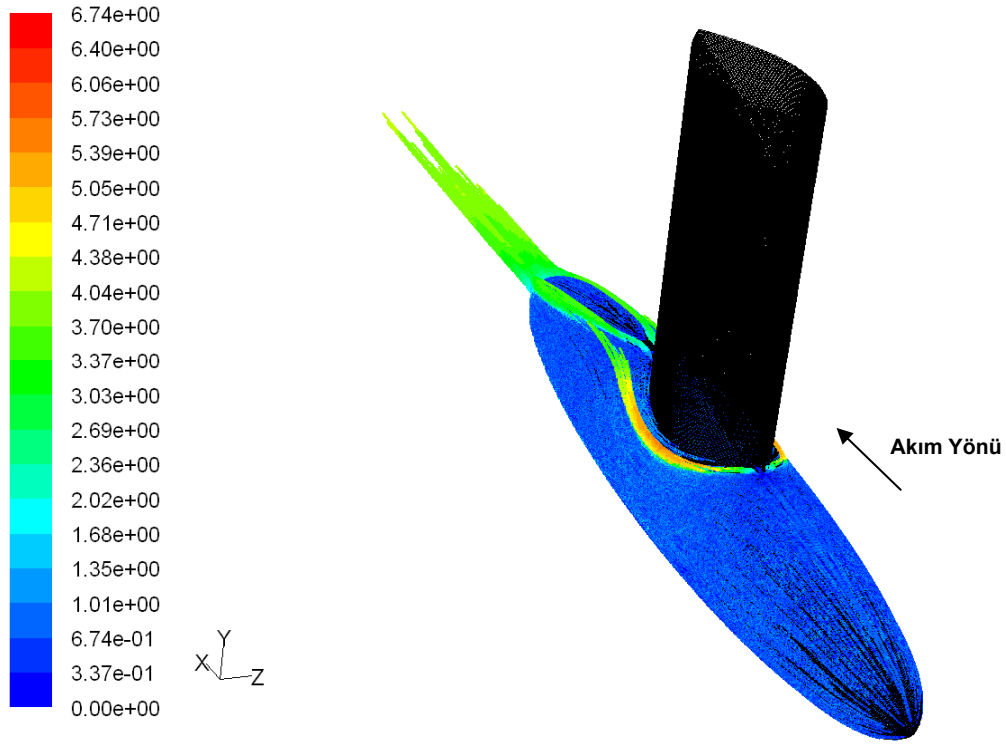
5.4 FLUENT’de Modellenen  nder Kenar Akım Ayrılması

RANS modeli olarak FLUENT programı kullanılarak yapılan 75 saniye süreli simülasyonlarda pod/strut birleşimi önünde bir girdabın oluştuğu görülmüştür. VFLOW’daki sonuçlara benzer şekilde akım hatları incelendiğinde yerel hızlardaki artış görülmekte ve bir grup akım hattının girdabın varlığını gösteren bir dönme şeklini aldığı gözlemlenmiştir.

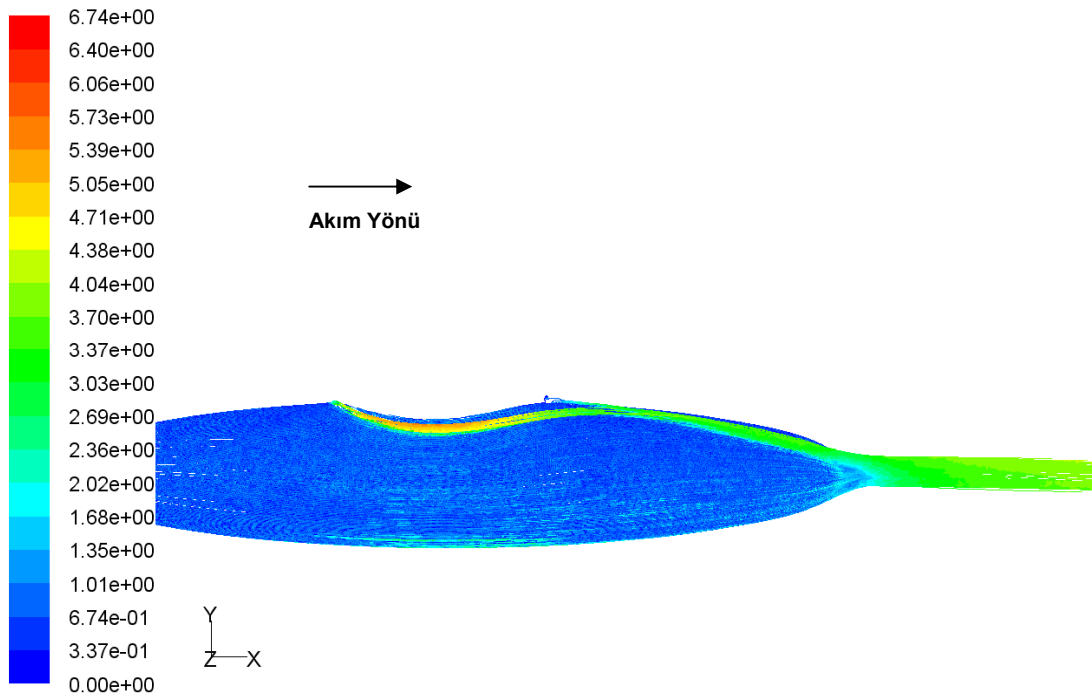
Bu modelde viskoz etkiler dahil edilerek hesap yapılmıştır ve serbest akım hızı $V=4.53$ m/s için sınır tabaka oluşumu gözlemlenmiştir. Akım hatları gösteriminde dikkat çekici bir husus, strut önünde başlatılan akım hatları üzerindeki yerel hızların sıfırdan serbest akım hızına kadar yükselmekte olmasıdır. Bu bölgedeki yüksek basınç/hız değişimi, atnalı girdabının serbest akımdan farklı davranarak pozitif basınç bölgesine kadar akımın hızlanmasına neden olmaktadır.

Genel olarak Pod boyunca strutın en kalın olduğu bölgede yükselen hız, pozitif basınç gradyeninin de etkisi ile serbest akım hızına gerilemektedir. Birleşim bölgesinde ayrılan akımın, atnalı şekli alarak pod boyunca ilerlemekte olduğu, hesap sonuçlarına ait şekillerde gösterilmiştir (şekil 5.6, şekil 5.7, şekil 5.8 ve şekil 5.9).

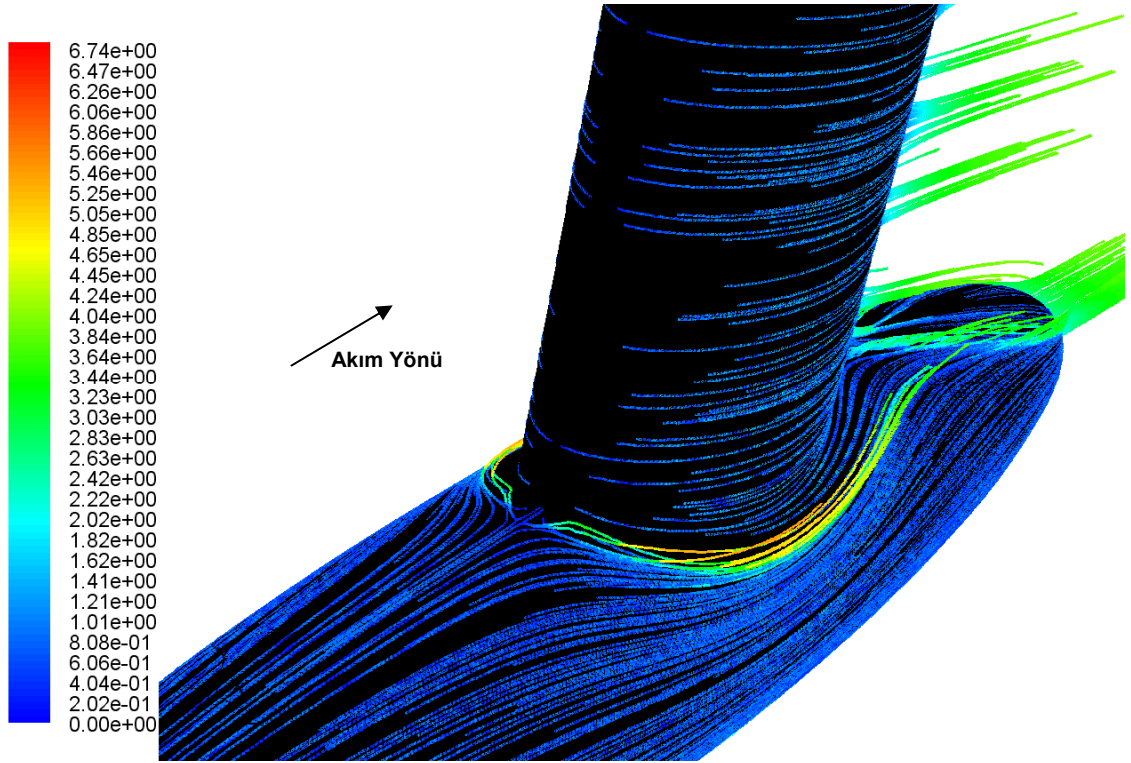
Pod/strut birleşimi civarında serbest akım, durma noktasından itibaren enteresan bir şekil almaktadır. Pod yüzeyine çok yakın bir yükseklikte akım kıvrılmakta ve durma noktasında açıkça gözlemlenen bir girdap hüzmesi şeklini almaktadır. Literatürde de tarif edildiği gibi atnalı girdabı geniş ölçekte etkisi görülen, zamana bağlı düşük frekanslı kararlı olmayan (unsteady bimodal unsteadiness) bir davranış göstermektedir (Devenport ve diğ., 1990).



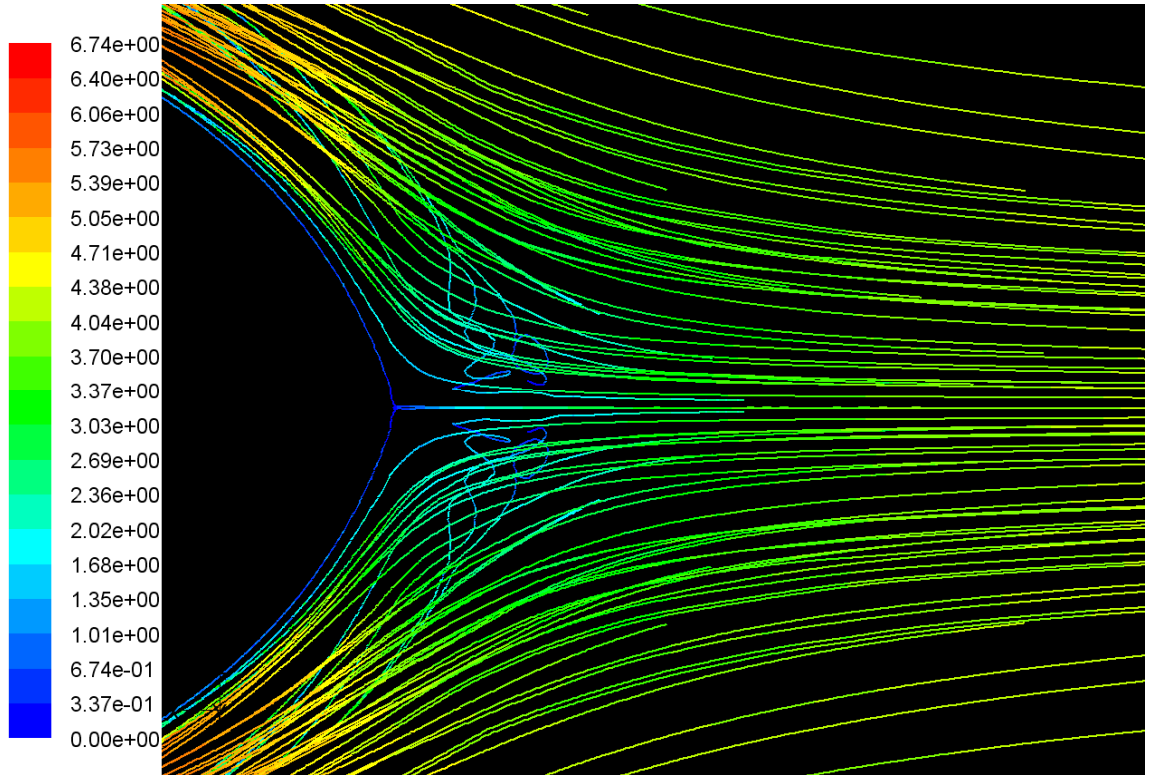
Şekil 5.6 : Pod/Strut Birleşiminde Görülen Atnalı Girdabı.



Şekil 5.7 : Atnalı Girdabı Yüksek Hız Profili Yandan Görünüş.



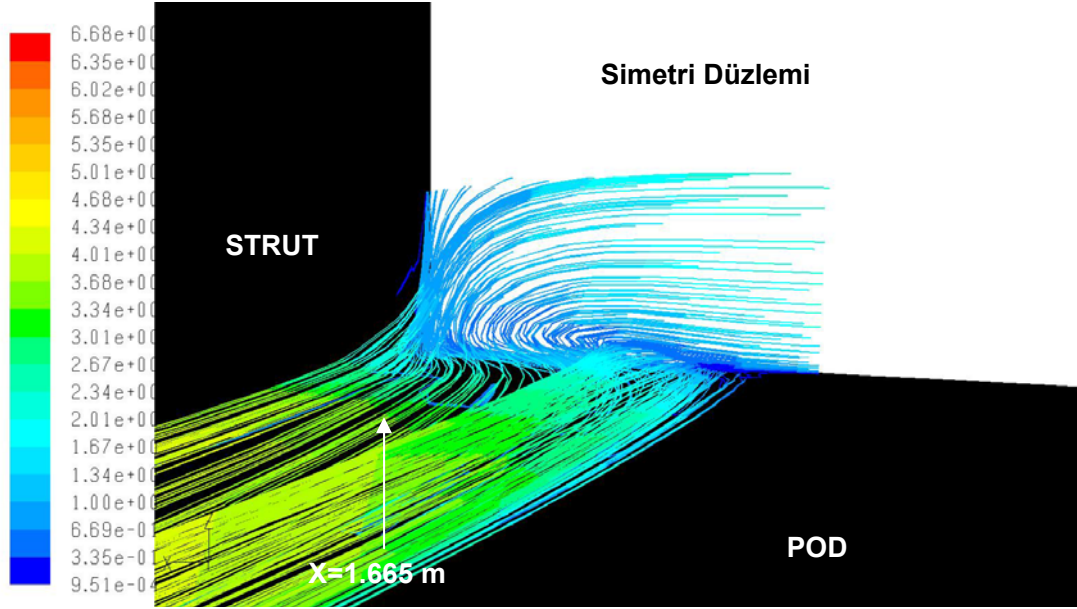
Şekil 5.8 : Yüzeyden Bırakılan Akım Hatları ve Atnalı Girdabı.



Şekil 5.9 : Pod/Strut Birleşimi Öncesinde Oluşan Akım Hatları.

5.5 Girdabın Varlığı ve Şekli

Yapılan viskoz hesaplamalarda da açıkça görülen pod/strut birleşimindeki girdabın varlığıdır. VFLOW'da elde edilen strut gerisindeki akım hatlarındaki dönme, FLUENT'de yapılan hesaplamalarda da gözlemlenmiştir (Şekil 5.10).

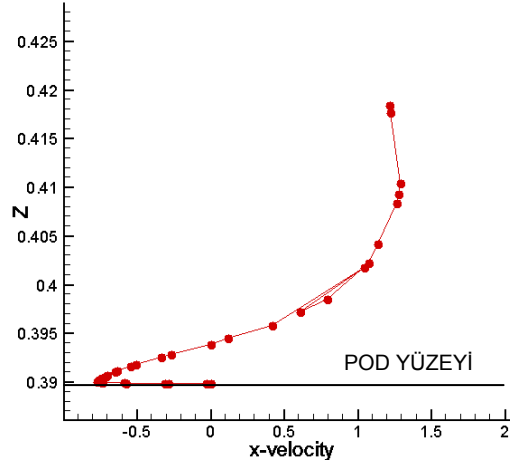


Şekil 5.10 : Önder Kenardaki Akım Hatları.

Atnalı girdabının oluştuğu bölgede yerel hızlardaki değişim incelendiğinde akım ayrılmasını işaret eden bir hız dağılımı görülmektedir. Strutin hemen önünde $x = 1.64$ m mesafede yer alan simetri düzlemindeki bir hatta negatif hızların görülmesi akım ayrılmasının önemli bir göstergesidir. Bu bölgede girdabın var olduğu noktadaki yerel hız profilinin benzer özellikler gösterdiği görülmüştür.

Yapılan hesaplamalarda sınır tabaka içerisinde başlayarak negatif işaretli x hızının, cisim yüzeyinden yukarı doğru gidildikçe tekrar pozitif değerler alarak artmakta olduğu görülmüştür. Pod yüzeyi üzerinden başlayarak X yönündeki hız değerinin değişimi Şekil 5.11'de sunulmuştur.

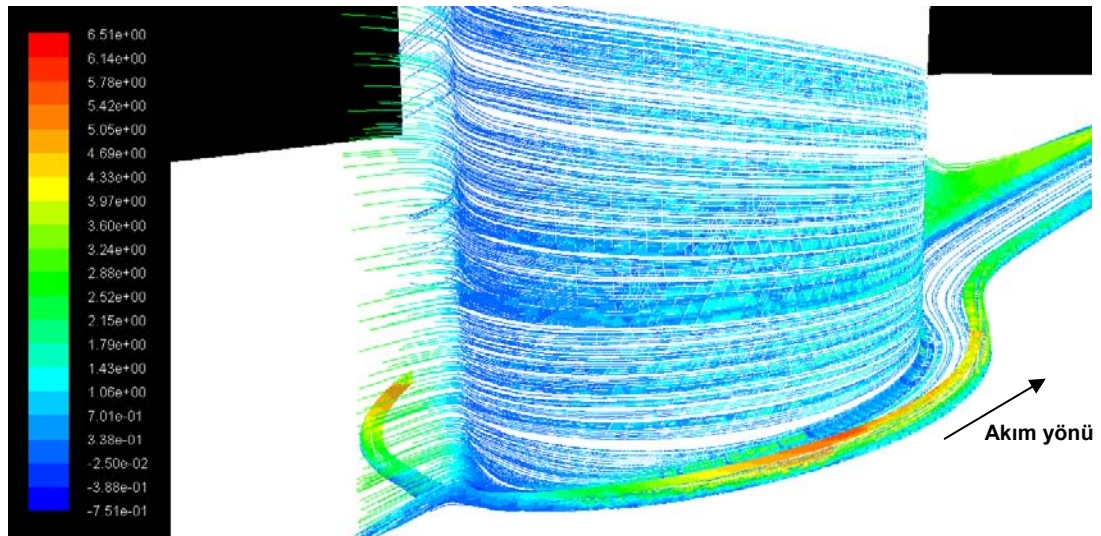
Atnalı girdabının oluşması sonrasında, serbest akım yönünde basıncın düşmeye başladığı negatif basınç (favourable pressure gradient) bölgesinde akımın tekrar ayrılması beklenmemektedir. Basınç gradyeninin akım yönünde giderek artmakta olduğu pozitif basınç (adverse pressure gradient) bölgesinde, sınır tabaka içerisinde belirgin bir yavaşlama olmakta ve akım strut yüzeyinden uzaklaşmaktadır. Söz konusu uzaklaşma izler kenar öncesinde yaklaşık 0.85-0.90 T mesafede gerçekleşmektedir (Devenport ve diğ., 1990).



Şekil 5.11 : Y=0 Düzleminde X Yönündeki Yerel Hız (x = 1.64 m).

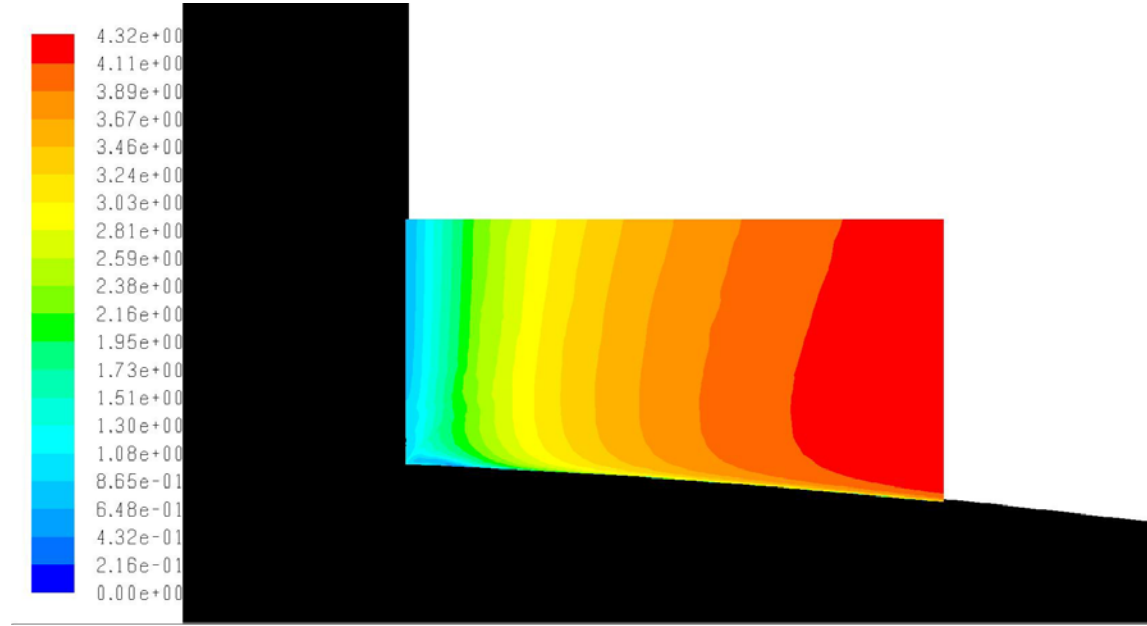
Atnalı girdabının oluşması sonrasında, serbest akım yönünde basıncın düşmeye başladığı negatif basınç (favourable pressure gradient) bölgesinde akımın tekrar ayrılması beklenmemektedir. Basınç gradyeninin akım yönünde giderek artmakta olduğu pozitif basınç (adverse pressure gradient) bölgesinde, sınır tabaka içerisinde belirgin bir yavaşlama olmakta ve akım strut yüzeyinden uzaklaşmaktadır. Söz konusu uzaklaşma izler kenar öncesinde yaklaşık 0.85-0.90 T mesafede gerçekleşmektedir (Devenport ve diğ., 1990).

Atnalı girdabının oluşması ile ilgili önemli göstergelerden olan simetri düzlemi hız vektörleri incelendiğinde, pod yüzeyinde sınır tabakanın da etkisi ile yerel hızların yavaşlamakta olduğu görülmektedir. Strut öncesinde oluşan akım yavaşlamasının girdap oluşumunu tetikleyen mekanizma olduğu açıkça görülmektedir. Simetri düzlemi hız vektörleri, Pod yüzeyinin hemen üzerinde ters yönlü bir hareketin olduğunu teyit etmektedir (Şekil 5.12).

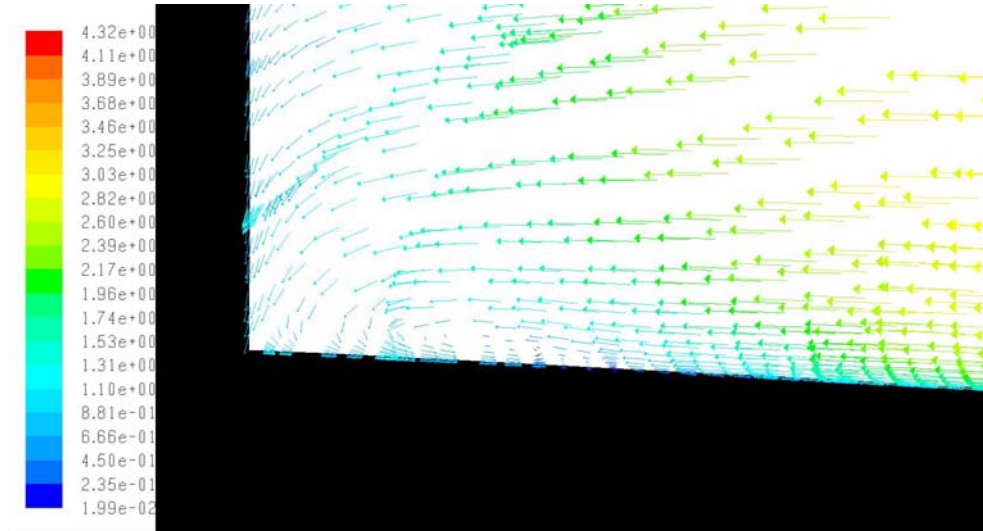


Şekil 5.12 : Atnalı Girdabını Gösteren Akım Hatları.

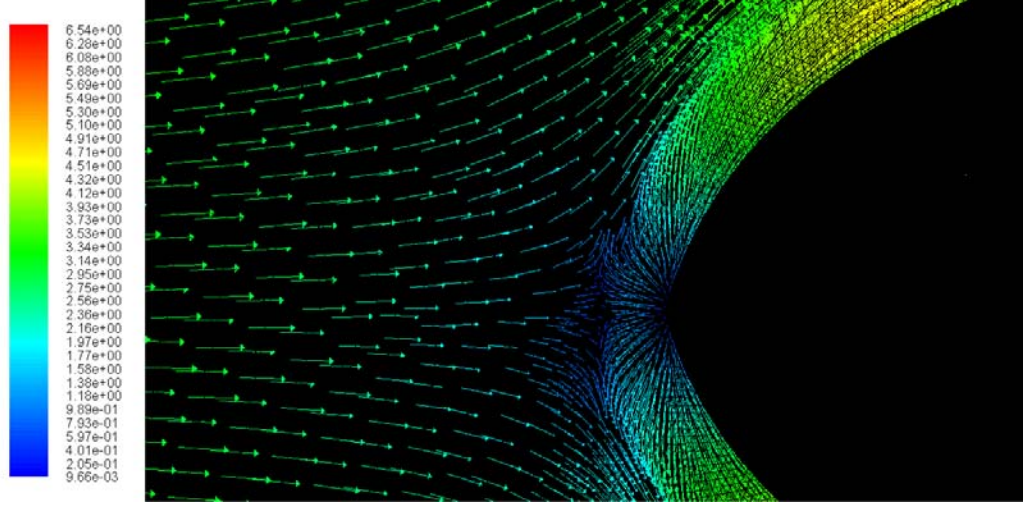
Hız konturları incelendiğinde de benzer sonuçların elde edildiği anlaşılmaktadır. Simetri düzlemi hız vektörleri ve hız konturları Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’de sunulmuştur.



Şekil 5.13 : Simetri Düzlemi Hız Konturları.



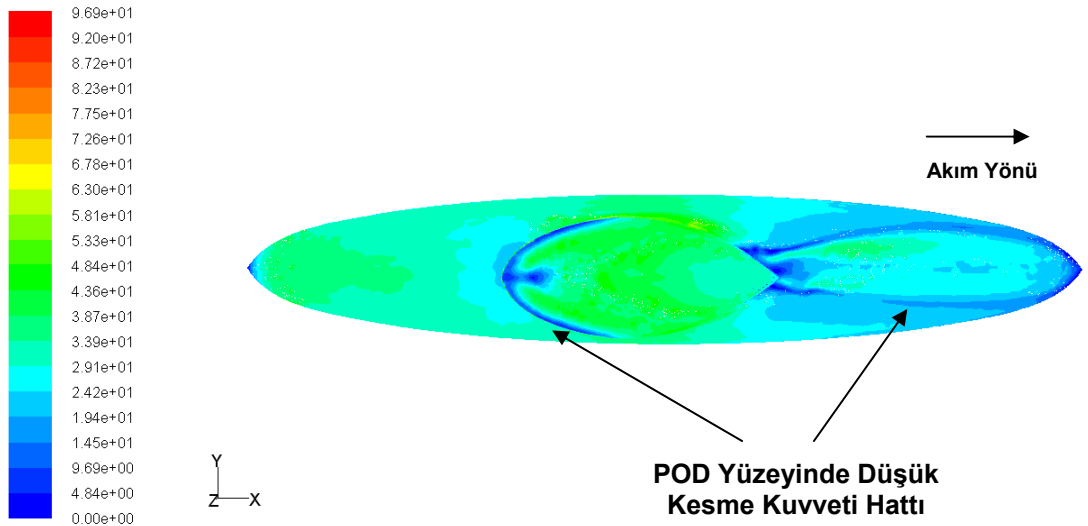
Şekil 5.14 : Önder Kenardaki Hız Vektörleri ve Girdabın Başlangıcı.



Şekil 5.15 : Pod Yüzeyindeki Atnalı Girdabı Hız Vektörleri.

5.5.1 Düşük Kesme Kuvveti Hattı (LOLS)

Atnalı girdabı birleşim bölgesine, serbest akımdan yüksek momentumda akışkan gelmesine neden olmaktadır. Bu nedenle strut ve pod yüzeyi yakın bölgesinde yüksek kesme kuvvetleri oluşmaktadır. Atnalı girdabı varlığının önemli bir göstergesi de pod yüzeyi üzerinde kesme kuvvetleri yüksek değerlerde iken girdap içerisinde önemli seviyede azalmış, hatta sıfır olan bir hattın ortaya çıkmış olmasıdır. Düşük kesme kuvveti hattı (LOLS; Line of Low Shear) olarak tanımlanan bu hat atnalı girdabının civarında gözlemlenmektedir. Şekil 5.16'da viskoz hesapta ortaya çıkan düşük kesme kuvveti hattı ve strütün etrafındaki yüksek kesme kuvveti bölgesi gösterilmiştir.



Şekil 5.16 : Pod /Strut Üzerindeki Kesme Kuvveti Dağılımı.

5.6 Sonuçların İrdelenmesi

Pod/Strut birleşiminde önder kenar akım ayrılması hakkında potansiyel ve viskoz akım simülasyonları, atnalı girdabının varlığını ortaya koymuştur. Simetri düzlemindeki hız vektörleri ve önder kenardan bırakılan akım hatları, girdabın şeklini ve pod boyunca ilerleyişini açıkça göstermiştir.

Literatürde akıma ait birçok değişkenin kanat kalınlığı olarak tanımlanan T 'ye göre boyutsuzlaştırıldığı görülmektedir. Yürütülen çalışmalarda bu konfigürasyon için, önder kenardaki akım ayrılması ve atnalı girdabının, kanat kalınlığının yaklaşık 0.1-0.2 katı ($0.2T$) arasındaki bir mesafede olduğu ortaya çıkmıştır.

Girdabın mevkisinin zamana bağlı olarak belirli bir aralıkta yer değiştirebileceği beklenen bir olaydır. Yapılan deneysel çalışmalarda gözlemlenen akım ayrılması birleşim bölgesinin, bir başka ifade ile köşenin var olduğu yerde kanadın ön kısmında $0.27T$ mesafede görüldüğü bildirilmektedir (Devenport, 1992). Strutin göreceli olarak kalın bir kesite sahip olması, kort boyunca podun eğrisel yüzeyinin varlığı, düz bir levha üzerine kanat yerleştirilerek yapılan deney setine göre farklılıklar göstermesi doğaldır. Genel itibarla sonuçların literatür ile uyumlu çıktığı görülmektedir.

Atnalı girdabının oluşumu ve şeklinin, takıntının geometrisi ve etrafında oluşturduğu basınç gradyanları ile doğrudan ilişkili olduğu bilinmektedir (Fleming ve diğ., 1992). Fleming ve diğ. (1992)'nin sonuçlarını destekler şekilde kanat uç kesitinin en önemli etken olduğu Mehta (1984) tarafından yapılan çalışmalarda bildirilmektedir. Ayrıca, takıntıya doğru gelmekte olan sınır tabakanın varlığı, atnalı girdabının başlangıcı açısından önemli bir diğer etkendir. Farklı sınır tabaka kalınlıkları ile yürütülen deneylerde, atnalı girdabının sınır tabaka kalınlık farklılıklarına nazaran daha çok basınç dağılımı ile ilgili bir olay olduğu anlatılmaktadır (Devenport ve diğ., 1992).

5.7 Sonuç

Köşe bölgesinde girdabın oluşmasında en temel etkenin basınç gradyanları olduğu görülmektedir. Bu bölgedeki girdaplı akım cismin şekli ve dolayısı ile basınç değişimi ile yönlenen bir akımdır. Viskoz etkiler ve birleşim bölgesi önünde kalınlaşan sınır tabaka, girdap oluşumunun yeri ve doğru modellenmesi ile ilgili önemli bir diğer etkendir. O halde pod/strut geometrisi için atnalı girdabının modellenmesinde de kullanılabilecek potansiyel çözüm ve viskoz çözümün birleştirildiği bir yöntem geliştirilmesi panel metodunun etkinliğini artıracak bir yaklaşım olacaktır.

6. VİSKOZ/POTANSİYEL AKIM HIZ BİRLEŞTİRME METODU (COUPLING)

6.1 Giriş

Viskoz/potansiyel akım hız birleştirme metodunun geliştirilmesindeki ana hedef panel metodu ile yapılacak çözümlerde viskoz hızları etkisinin de dikkate alınmasıdır.

Bu amaçla 3. Bölümde panel metodu ile yapılan çözümlere 4. Bölümde viskoz akım metodu ile yapılan çözümden elde edilen hızlar eklenmiştir. Bu doktora çalışması kapsamında geliştirilen ve bu bölümde detayları anlatılan yöntemle hız birleştirmesi yapılmıştır.

6.2 Hız Birleştirme Metodu (Coupling)

Potansiyel akış formülasyonunda yüzeydeki hızlar serbest akım hızının panel merkezlerine doğrudan etkimesi ile hesaplanmaktadır. Sınır koşulu olarak serbest akım hızı her bir panelin merkezine etkileyen bir kaynak terimi olarak kullanılmaktadır. Oluşturulan etkime katsayıları matrisine kaynak terimleri bilinen değerler olarak girmekte ve bilinmeyenler olarak cisim ve iz örgüsü yüzeyindeki duble değerleri hesaplanmaktadır. Zamana bağlı çözümde duble değerleri değiştirilerek izin yeni koordinatları için yeniden duble değerleri hesaplanmakta ve sonuç olarak potansiyel değerlerinin yüzey elemanları için X, Y ve Z doğrultularında türetilmesi ile hız değerleri elde edilmektedir. Hız ve basınç dağılımı Bernoulli formülü ile ilişkilendirilmiştir. Kuvvet ve kaldırma gibi fiziksel sonuçlar panel alanları yardımı ile hesaplanmaktadır.

Kaynak teriminde serbest akım hız vektörü, yüzey birim normal vektörleri ile çarpılarak elde edilmektedir. VFLOW'da Dirichlet sınır şartı için panel yüzeyindeki normal hız sıfıra eşitlenerek sağ taraf kaynak terimi bulunmaktadır. Panel merkezine etkileyen ve değeri bilinen bir başka normal hız değeri olması halinde, kaynak terimi bu hız değeri kullanılarak hesaplanabilmektedir.

Bu doktora çalışması kapsamında geliştirilen bir alt rutin ile VFLOW programında panel merkezine eklenecek ilave hızların tanımlanması mümkün hale gelmiştir. Bir başka ifade ile eğer panel merkezlerinde viskoz bir çözüme ait yerel hız değerleri biliniyor ise, VFLOW'da hesaplanamayan sınır tabaka içerisindeki hız değerlerinin

hesaba dahil edilebilmesi imkanı kazanılmıştır. Böylelikle potansiyel akış sınır şartı modifiye edilmiş olmakta ve hız profili ile ilgili viskoz etkilerin potansiyel akış hesabına yansıtılması mümkün olmaktadır.

Bu tez çalışmasında viskoz çözümle potansiyel çözümün birleştirilmesi amacı ile 4. Bölümde FLUENT programı kullanılarak elde edilen, sınır tabaka hız değerleri VFLOW'daki potansiyel akım hesabına eklenmiştir. Yüzeydeki sınır şartının değiştirilmesi ile daha hassas sonuçlara ulaşılması hedeflenmiştir.

Potansiyel akış çözümlerine viskoz akış etkilerinin dahil edilmesi için izlenen yöntem adımları aşağıda listelenmiştir.

1. Potansiyel akışta cisim üzerindeki basınç / hız gibi akım özelliklerinin bulunması,
2. Verilen hıza bağlı olarak laminar ve türbülanslı haller için sınır tabaka kalınlığının tayin edilmesi:
 - a. Laminar sınır tabaka için formülasyon
 - b. Türbülanslı sınır tabaka için formülasyon
 - c. Başlangıç sınır tabaka kalınlığı için yarıçap düzeltmesi
3. Viskoz hızların okunması için nokta bulutu dosyasının hazırlanması,
4. Bu noktalar için FLUENT'te hesaplanan viskoz hızların okunması,
5. VFLOW'da yapılan hesaplamada FLUENT'ten alınan normal hızların eklenmesi,
6. VFLOW'da nihai hız / basınç dağılımının çizdirilmesi

Ana işlem adımları yukarıda listelenen hız birleştirme metodunun uygulanmasına ait detaylar ve hazırlanan arayüz dosyaları hakkında bilgiler takip eden bölümlerde sunulmuştur.

Literatürde ise hız birleştirilmesi konusunda geometri ve hız modifikasyonu olmak üzere iki farklı yaklaşım söz konusudur (Katz ve Plotkin, 2001; Molland ve Turnock, 2007).

- Birinci yaklaşım: Geometri Modifikasyonu (2 boyutlu denklem)
Yüzeyin sınır tabaka kalınlığı eklenerek yeniden modellenmesi (Kafalı, 1967)
- İkinci yaklaşım: Hız Modifikasyonu
Mevcut geometride sınır tabaka hızlarının normal hız olarak eklenmesi
(Transpiration Velocity veya Blowing Velocity)

Birinci yaklaşım, viskoz bir çözüm elde mevcut değil ise 2 boyutlu bir formülasyon kullanılarak sınır tabaka kalınlığının yüzeye eklenmesi seçeneğidir. Literatürde genellikle tarif edildiği şekilde eğrisel yüzeylerde cisim aslında sınır tabakanın varlığı dolayısı ile tasarımılanan geometri yerine sınır tabaka dışını dikkate alan yeni bir geometri ile akıma maruz kalmaktadır. Bu nedenle yapılan bu düzeltme gerçek cisim yerine akıma maruz kalan zahiri geometrinin modellenmesi için yapılmaktadır. Burada yeni geometri elde edilmekte ve cisim sınır tabaka kalınlığı eklenmiş yeni bir geometri olarak yeniden modellenmektedir. Yüzeyde yapılan bu modifikasyon ile sınır tabaka etkileri hesaba dahil edilmiş olmaktadır.

İkinci yaklaşımda ise sınır tabaka hızlarına dair elde deneysel veriler veya bir viskoz çözüm var ise sınır tabaka içerisindeki (transpiration hızları) hız profili kullanılmaktadır. Söz konusu hızlar her bir panel için yüzeye normal yönde eklenerek yüzeydeki hızlar güncellenmektedir. Böylece her bir panel üzerindeki serbest akım hızından etkiyecek yerel hız düzenlenmiş olmaktadır.

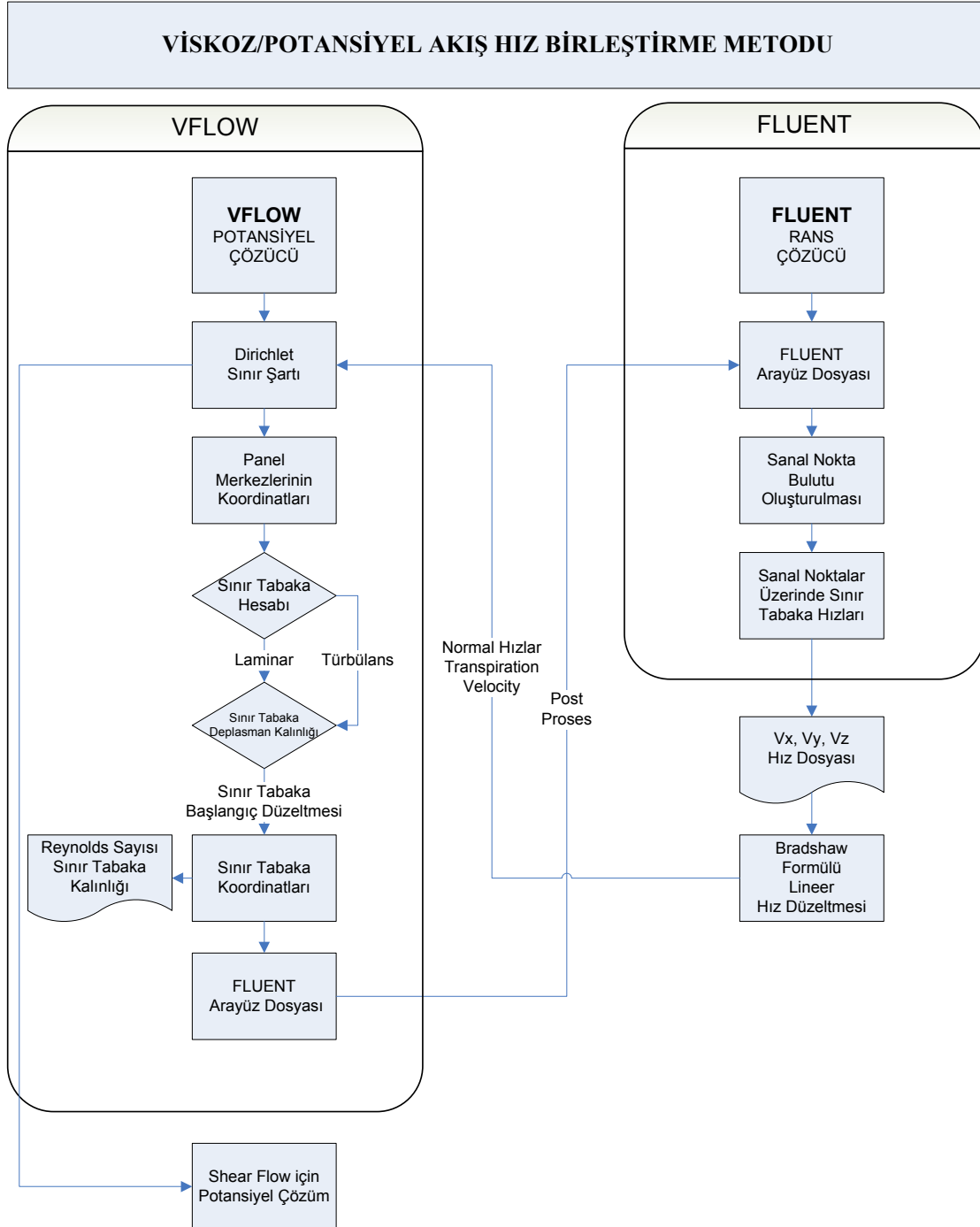
Bu çalışmada hız modifikasyonu yaklaşımı kullanılmıştır. Viskoz/potansiyel akım hız birleştirmesi yapılırken, sınır tabaka hızlarının birleştirilmesi yeterli görülmüştür. Bu amaca yönelik olarak potansiyel çözümde sınır tabakanın pod yüzeyinden olan uzaklığının tayin edilmesi yeterli olmaktadır.

Sınır tabaka kalınlığı hesabı, potansiyel çözüme ek bir rutin olarak eklenmiş ve hız birleştirme çalışmasında kullanılacak şekilde panel merkezleri üzerinde tanımlanan noktalarda yürütülmüştür. Pod yüzeyi boyunca sınır tabaka kalınlığı hesaplanarak ve yerel Reynolds sayısı dikkate alınarak akış rejimi tayin edilmiştir. Laminar akış bölgesinde Andersen (1985) formülasyonu ve türbülanslı akış bölgesinde Granville (1953) formülasyonu ile sınır tabaka kalınlığı hesaplanmıştır. Hız modifikasyonu yaklaşımına ait işlem adımları ana hatları ile Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de gösterilmiştir.

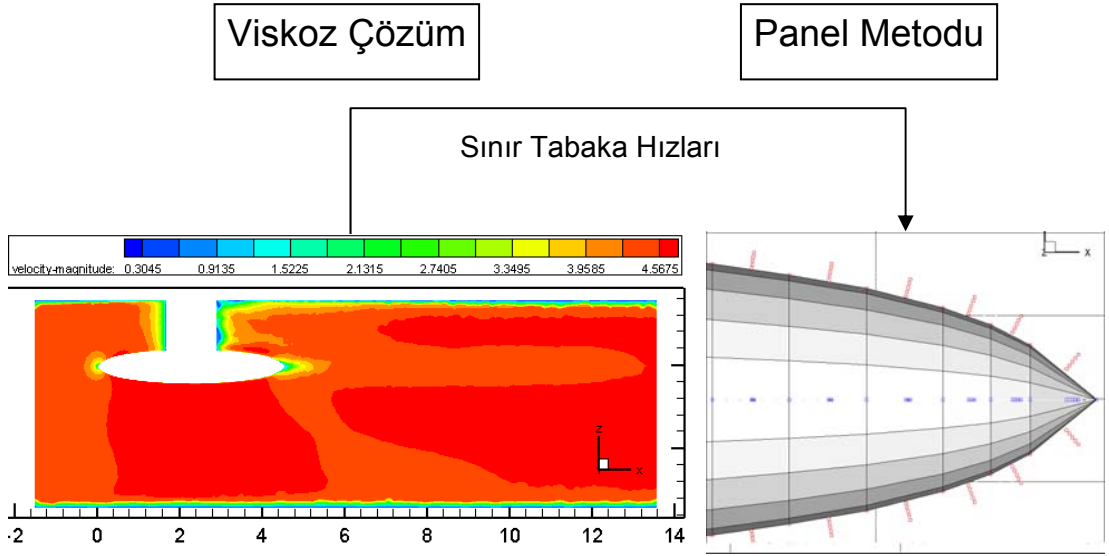
Geliştirilen ara rutinler kullanılarak VFLOW ve FLUENT aynı geometri ve hız koşullarında çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar kullanılarak hız birleşimi sağlanmıştır. Böylece Reynolds sayısı, deplasman kalınlığı gibi değişkenler bir dosyaya yazdırılarak hesabın doğruluğu ve akış özellikleri hakkındaki yerel bilgiler izlenebilir hale gelmiştir.

Bölüm 5’de açıklandığı gibi $V=4.53$ m/s serbest hızı için yapılan çözümde, Pod/strut birleşimi öncesinde akımın yavaşlaması beklenen bir sonuçtur. Strut merkez hattı üzerindeki yüksek basınç, akım hızının sıfıra indiği bir bölge oluşturmaktadır. Bu bölge, aynı zamanda pod ve struta ait sınır tabaka kalınlığının da sık bir şekilde yerleştirilmiş panellerle tanımlandığı bölge olması açısından önemlidir. Atnalı

girdabının başladığı bu bölgede viskoz etkiler dolayısı ile yerel hızlardaki değişimin potansiyel çözümde hesaba katılabiliyor olması kayda değer bir düzeltme olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 6.1 : Viskoz Potansiyel Akış Hız Birleştirme (Coupling) Metodu.



Şekil 6.2 : Viskoz Potansiyel Akış Hız Birleştirme (Coupling) Metodu.

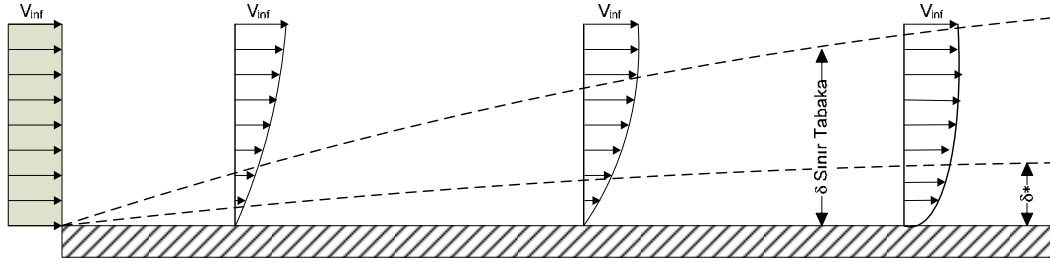
6.3 Potansiyel Akımda Sınır Tabaka Hesaplamaları

Potansiyel akımda viskoz etkiler hesaba dahil edilmediğinden sınır tabaka hakkında herhangi bir fiziksel özellik hesaplanamamaktadır. Çeşitli bir boyutlu ve iki boyutlu modeller ile sınır tabaka kalınlığı, momentum kalınlığı gibi özelliklere ait hesaplamalar literatürde yer almaktadır. Havacılık problemleri için geliştirilmiş modeller arasında yer alan Cebeci-Smith, Baldwin-Lomax ve Nash-Hicks modeli gibi türbülans modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalara paralel olarak geliştirilen iki boyutlu integral metodları, panel metotları ile birlikte kullanılan uygun türbülans modeli olarak kabul görmüştür. İki boyutlu çözüm yaklaşımı, karmaşık üç boyutlu problemlerde de belirli sınırlarla da olsa kullanılmaktadır. Örnek olarak integral metotları, akımın cisim boyunca geldiği kabul edilen problemlerde doğru sonuçlar vermekte, fakat büyük açılarla gelen (crossflow) akımlarda güvenilirliğini kaybetmektedir.

Potansiyel akımın çözüldüğü panel yüzeyleri üzerinde, bırakılan akım hatları boyunca üç farklı akım rejimine göre farklı sayısal kriterler uygulanarak sınır tabaka ve akım ayrılması tahmin edilmektedir. Bu yaklaşım ile sınır tabaka özellikleri, cismin genel yüzeyine göre yerel hız ve basınç değerlerinde farklılık arz eden bölgelerde genel bir tahmin yapılabilmekte ve sonuçlar RANS çözümlerine kıyasla hassas olmamaktadır. Laminar, geçiş ve türbülanslı rejimler için farklı yaklaşımlar kullanılmakta ve sonuç olarak potansiyel çözüme eklenen bir sınır tabaka analizi yapılmaktadır.

6.3.1 Deplasman Kalınlığı

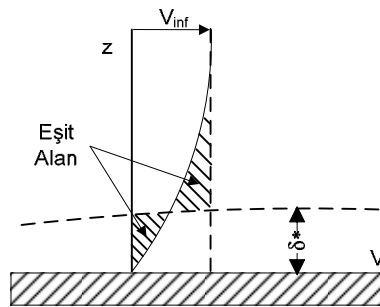
Temel akışkanlar mekaniğinden bilindiği üzere sabit bir levha boyunca gönderilen akım neticesinde levha yüzeyine yakın bölgede hızlar sıfıra yaklaşmakta ve bir sınır tabaka oluşmaktadır. Teğetsel hız bileşeninin yüzeyden başlayarak hızla serbest akım hızına ulaştığı bölge sınır tabaka olarak adlandırılmaktadır. Kort uzunluğu boyunca hız profilindeki değişiklikler Şekil6.3’de gösterilmiştir.



Şekil 6.3 : Düz Levha Üzerindeki Sınır Tabaka ve Deplasman Kalınlığı.

Sınır tabaka içerisinde önemli tanımlardan birisi de deplasman kalınlığıdır. Deplasman kalınlığı, sınır tabaka içerisindeki akımın debisinin veya akışkan akısındaki yavaşlamanın, ideal akış halindeki akımın debisinin herhangi bir noktada karşılaştırılması olarak tanımlanmaktadır. Deplasman kalınlığının fiziksel anlamı sınır tabaka dışındaki akım çizgilerinin ötelenme miktarıdır.

Şekil 6.4’de gösterildiği gibi deplasman kalınlığı cisim yüzeyi ile serbest akım arasında eşdeğer alanı oluşturan bir çizgidir ve genellikle sınır tabaka kalınlığının beşte biri mertebesinde bir yüksekliği tanımlamaktadır.



Şekil 6.4 : Deplasman Kalınlığı.

Geliştirilen potansiyel akış/viskoz hız birleştirimi yaklaşımında deplasman kalınlığı hesaplanarak bu noktalardaki üç yöndeki hız değerlerinin FLUENT çözümünden alınması ve VFLOW’daki formülasyona normal hız olarak eklenmesi hedeflenmiştir. VFLOW’a ve FLUENT’e verilen geometri, tiriz eğrileri ve yüzey modelleme programları kullanılarak oluşturulmuştur. Her iki programda, yüzey oluşturmada

ortaya çıkan farklardan dolayı yerel uyumsuzluklar oluşmaktadır. Böyle bir yerel uyumsuzluğa karşı, yüzeylerin ve kesitlerin örnekleme yolu ile karşılaştırılması yapılarak tedbir alınmıştır.

6.3.2 Laminar Sınır Tabaka Formülasyonu

Sınır tabakanın laminar bölgesinde, yerel Reynolds sayısı azami 5×10^5 olacak şekilde tanımlanmıştır. Bu bölge içerisindeki hesaplamalarda, laminar sınır tabakanın başlangıcı için Bölüm 6.3.4'de açıklanan bir düzeltme de yapılmıştır. Reynolds sayısı serbest akım hızı ve panel merkezlerinin kort boyuncaaki mevkileri X_c dikkate alınarak Denklem 6.1 kullanılarak hesaplanmaktadır.

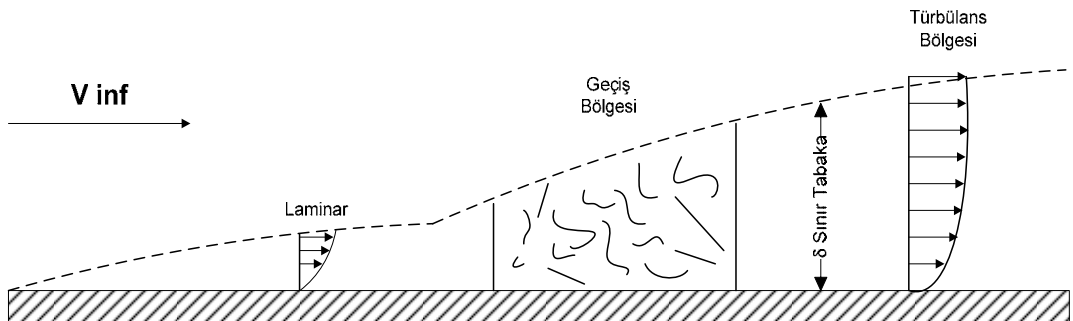
$$\delta_{BL} = \frac{X_c \times 5}{Re_x^{0.5}} \quad Re_x < 5 \times 10^5 \quad (6.1)$$

6.3.3 Türbülanslı Sınır Tabaka Formülasyonu

Türbülans başlangıcı olarak kort boyunca yerel Reynolds sayısının 5×10^5 den büyük olduğu kısım dikkate alınmıştır. Geçiş bölgesi için ayrıca bir tanımlama yapılmamış ve türbülanslı akım için Denklem 6.2'de verilen Granville formülü kullanılmıştır. (Granville, 1953).

$$\delta^* = \frac{X_c \times 0.0598}{(\log_{10}(Re_x) - 3.17)} \quad Re_x > 5 \times 10^5 \quad (6.2)$$

Şekil 6.5'de düz bir levha için laminar, geçiş ve türbülans bölgelerindeki sınır tabaka kalınlıklarının değişimi gösterilmiştir.

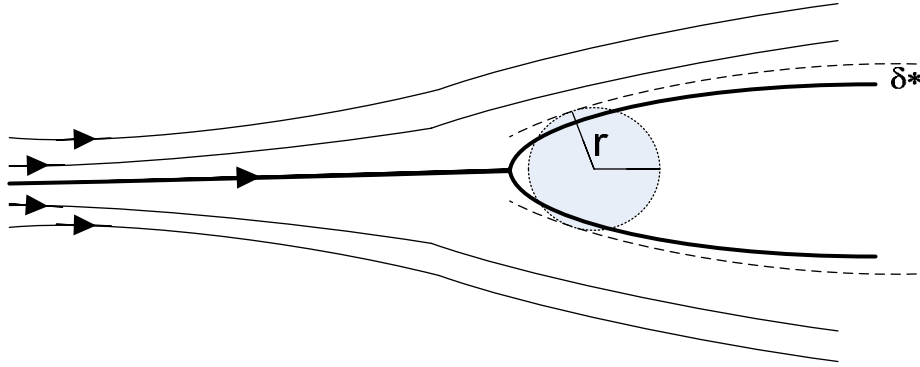


Şekil 6.5 : Laminar ve Türbülanslı Akım için Sınır Tabaka Gösterimi.

6.3.4 Laminar Sınır Tabaka Başlangıç Koşulu Düzeltmesi

Podun başlangıç noktası olan merkez hat üzerindeki ilk panellerde akım yavaşlamaktadır. Bu bölgede Reynolds sayısına bağlı sınır tabaka kalınlığı değerleri, podun diğer bölgelerine oranla daha küçük hesaplanmaktadır. Sınır tabakanın başlangıcındaki bu özel bölge için bir düzeltme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

Bu düzeltme yapılırken yüzey eğimine bağlı olarak tayin edilen yarıçap değeri için yerel Reynolds sayısı hesaplanmakta ve sabit bir deplasman kalınlığı atanmaktadır. Pod başındaki ilk kesitler incelendiğinde yüzeydeki eğrisellik için yapılacak düzeltmenin $X_c=0.1$ metre mertebesinde olacağı anlaşılmıştır. Reynolds sayısından bağımsız olarak yapılan deplasman kalınlığı düzeltmesinde, laminar veya türbülanslı hesap için $X_c=0.1$ metre mesafesi takip edilmektedir (Şekil 6.6).



Şekil 6.6 : Eğimli Yüzeylerdeki Sınır Tabaka Başlangıç Düzeltmesi.

Sözkonusu değer hesaplama rutinine dışarıdan verilen bir değerdir. Farklı cisimlere ait eğrisel yüzeylerin hesabı için değiştirilebilmektedir.

6.3.5 Panel Merkezinde Sınır Tabaka Hesabı

Hess ve Smith (1972) metodu temel alınarak oluşturulmuş pek çok potansiyel akış programında, ayırıklaştırma ve yüzey panellerinin tanımlanması standart bir prosedürdür. VFLOW programında panel köşe noktaları kullanılarak panel merkezleri bulunmakta (collocation points), global ve eleman koordinat sistemleri arasında dönüşümler yapılmaktadır. Yüzey normallerinin yönleri, birim vektörler ve panelleri oluşturan kenar çizgilerinin global koordinat sistemindeki mevkileri hesaplamalarda kullanılan parametrelerdir.

Bir panele ait yüzey normal vektörünün mevkisi ve panel merkezinin koordinatları yapılan sınır tabaka hesaplamalarında doğrudan kullanılmaktadır. Yerel Reynolds sayısı panelin merkez noktasının X koordinatı dikkate alınarak hesaplanmaktadır.

Bu değişkenler kullanılarak o paneldeki laminar bölge için sınır tabaka kalınlığı Denklem 6.3'de verildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$\delta_{BL} = \frac{X_c \times 5}{Re_x^{0.5}} \quad Re_x < 5 \times 10^5 \quad (6.3)$$

Hesaplanan deplasman kalınlığı panele ait birim normal vektör ile çarpılarak panel merkezine eklenmektedir. Böylelikle panel merkezi üzerinde yüzey normali doğrultusunda istenilen yükseklik deplasman kalınlığı olarak eklenmiş ve bu noktanın global koordinat sistemindeki noktaları belirlenmiş olmaktadır (Denklem 6.4, Denklem 6.5 ve Denklem 6.6).

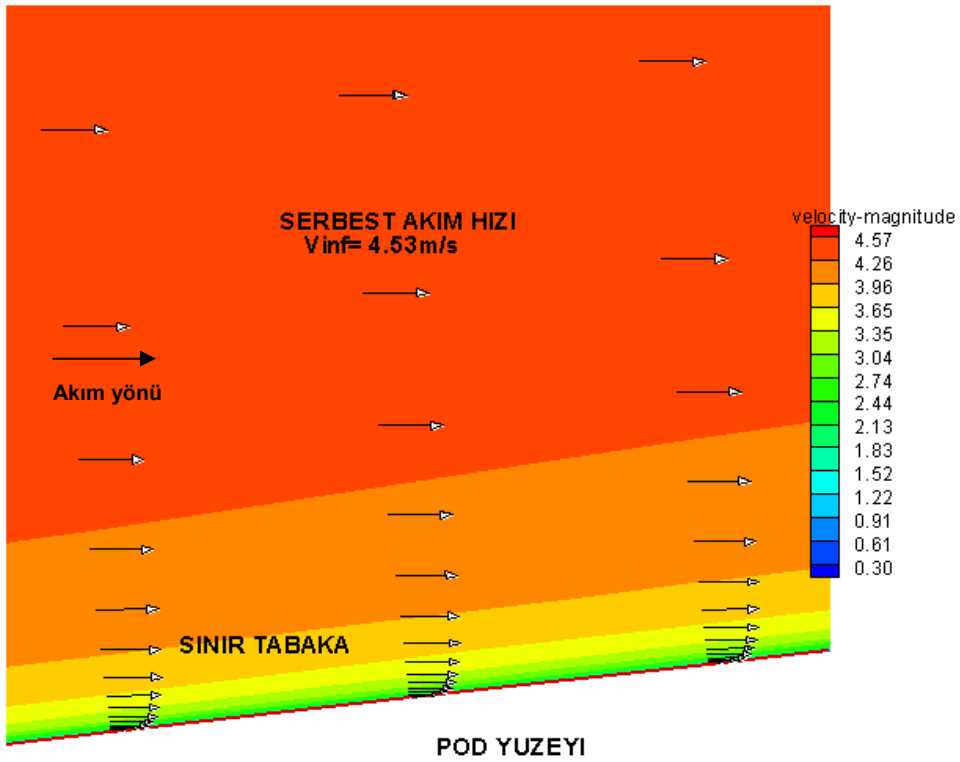
$$x_{DEL} = X_c + n_x \times \delta^* \quad (6.4)$$

$$y_{DEL} = Y_c + n_y \times \delta^* \quad (6.5)$$

$$z_{DEL} = Z_c + n_z \times \delta^* \quad (6.6)$$

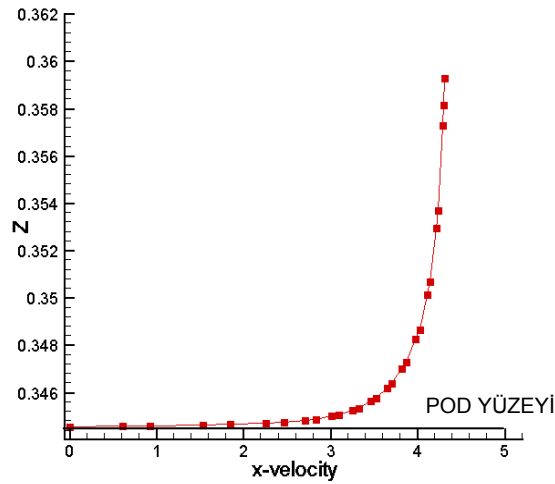
6.4 Viskoz Akımda Sınır Tabaka Hesaplamaları

FLUENT programında kontrol hacmi içerisinde viskoz etkiler altındaki hız değerleri doğrudan hesaplanmaktadır. Sınır şartı gereği viskoz akımda pod yüzeyindeki yerel hız değeri sıfır olmakta ve yüzey normali yönünde sınır tabaka boyunca artış göstererek serbest akımda potansiyel akım gibi davranmaktadır. Pod yüzeyi üzerinde baştan 1.025 metredeki strut öncesi bölgede simetri düzlemindeki hız dağılımı Şekil 6.7'de verilmiştir.



Şekil 6.7 : Z=0 Düzlemindeki Sınır Tabaka Hız Profili, x=1.025 m.

Simetri düzleminde baştan $x = 1.025$ m mesafedeki hız dağılımı incelendiğinde sınır tabaka içerisindeki hızın Pod yüzeyinden normal yönde 0.01 m yükseklikte serbest akım hızına ulaşıldığı görülmektedir. Bu noktadaki yerel hız değeri pozitif ve herhangi bir akım ayrılması gözlemlenmemektedir. Şekil 6.8’de görüleceği üzere x yönündeki yerel hız sıfırdan başlamaktadır. Grafikte sunulduğu gibi, pod yüzeyinin baştan $x = 1.025$ m mesafesinde, yüzey normali doğrultusunda Z yönündeki değeri $z = 0.344$ metredir. Bu değer pod yüzeyinin seçilen x istasyonuna karşılık gelen yarıçaptaki yüksekliğidir.



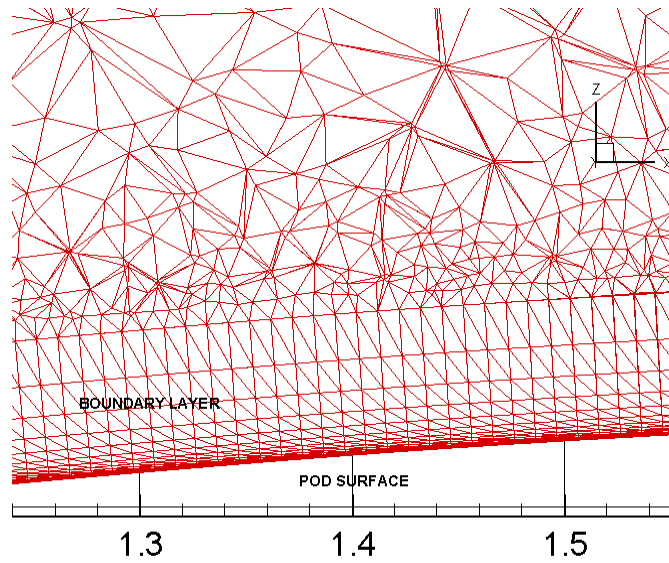
Şekil 6.8 : Y=0 Düzlemindeki Sınır Tabaka Hız Profili (x=1.025m).

6.4.1 Sınır Tabaka Ağı Oluşturulması

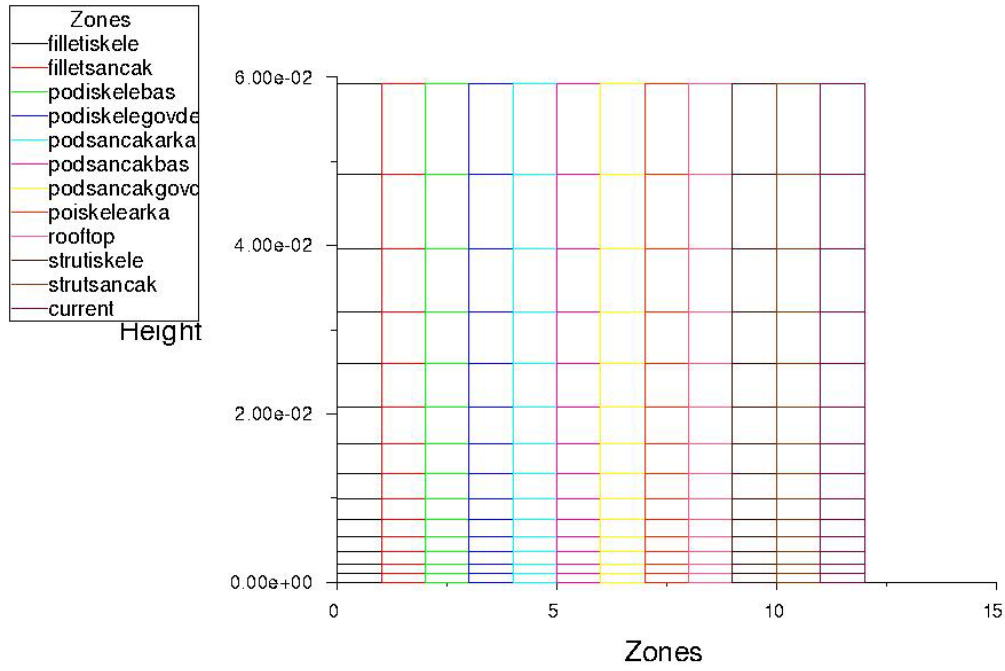
Viskoz çözümde sınır tabaka hızlarının doğru modellenebilmesi için iyi bir sınır tabaka ağı oluşturulması gereklidir. Yüzeye yeterince yakın ve düzgün bir ağ yapısı ile sınır tabaka içi doğru bir şekilde modellenmelidir. Pod modelinde sınır tabaka içerisinde 2.66 milyon eleman tanımlanmış ve ilk hücre yüksekliği 0.214 mm alınmıştır. 1.4 genişleme oranı ile toplamda sınır tabaka kalınlığı 57 mm olacak şekilde modellenmiştir (Çizelge 6.1). Çözümde kullanılan ağ modeli Şekil 6.9'da ve sınır tabaka gösterimi Şekil 6.10'da verilmiştir.

Çizelge 6.1 : Sınır Tabaka Ağı.

Sınır Tabaka Ağı	
İlk Hücre Yüksekliği [mm]	0.214
Tabaka Sayısı	14
Genişleme Oranı	1.4 (Geometrik Artım)
Sınır Tabaka Yüksekliği [mm]	57
Toplam Eleman Sayısı	2.66 Milyon



Şekil 6.9 : Z=0 Simetri Düzlemindeki Sınır Tabaka Ağı.



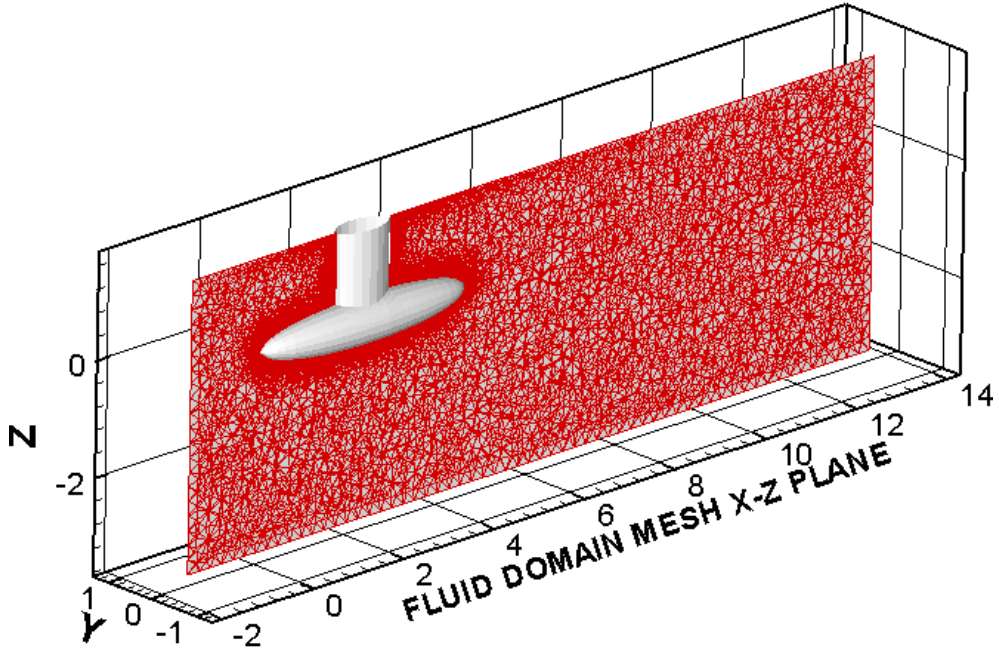
Şekil 6.10 : Sınır Tabaka Büyüme Miktarı Gösterimi.

Hesaplanan sınır tabaka yüksekliği, kullanılan hacim modelinin genişliğine nazaran son derece küçük değerlere sahiptir. Sınır tabakanın katmanlar halinde temsil edildiği ağı oluşturulması, ilk hücre yüksekliğinin milimetre hassasiyetinde olmasını gerektirmektedir.

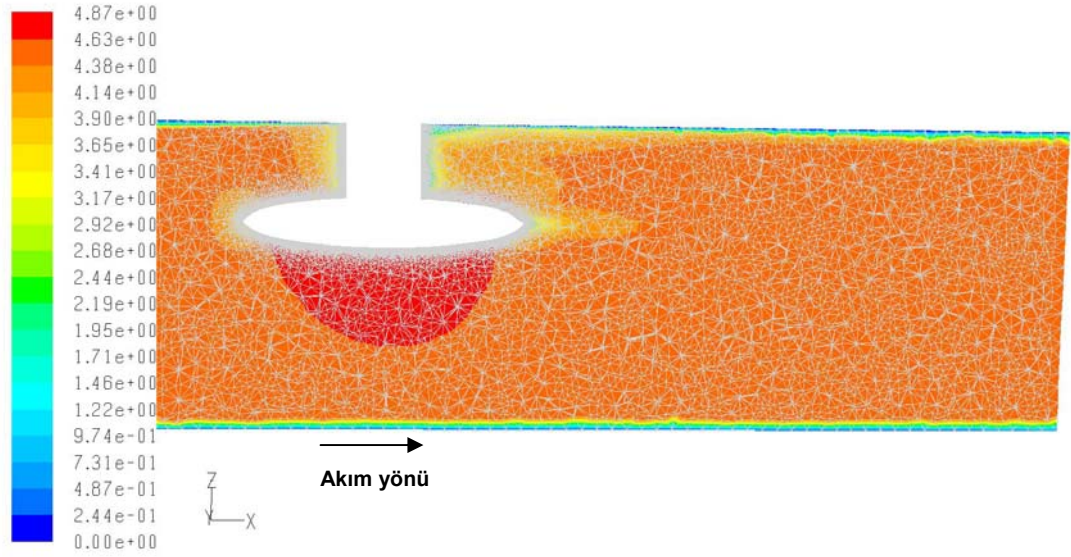
Mühendislik uygulamalarında karşılaşılan yüzeyler mekanik tasarım detayları veya karmaşıklığı nedeni ile çeşitli süreksizlikler içermektedir. Sınır tabaka ağının oluşturulması için yüzeyin detaylardan arındırılarak kullanılması, bir başka ifade ile basitleştirilmesi gerekmektedir. Ancak basitleştirilmiş veya ideal bir yüzey modeli kullanılsa bile milimetre hassasiyetinin korunması her zaman mümkün olmamaktadır.

Dış akışların var olduğu uçak, araç veya gemi gövdesi gibi problemlerde yüzey üzerindeki sınır tabaka ve çözüm ağı büyüklük açısından farklı modellenmektedir. Sınır tabaka içerisi görece küçük üçgensel elemanlarla tanımlanırken, çözüm ağı büyük prizmatik elemanlar kullanılarak modellenmektedir. Böylelikle toplam eleman sayısı makul bir seviyede tutulmakta ve akışta önemli değişimlerin beklenmediği bölgeler daha geniş elemanlarla tanımlanmaktadır. Doğru ve yeterince hassas bir yakın bölge ağı kullanıldığında çözümde yeterli hassasiyet yakalanmış olmaktadır.

Podun sınır tabaka ve kontrol hacminin modellenmesinde FLUENT/T-Grid programı kullanılmıştır. Çözümde kullanılan sınır tabaka ve kontrol hacim ağı Şekil 6.11’de ve Şekil 6.12’de verilmiştir.



Şekil 6.11 : Y=0 Düzlemindeki Sınır Tabaka Ve Kontrol Hacmi Ağı.



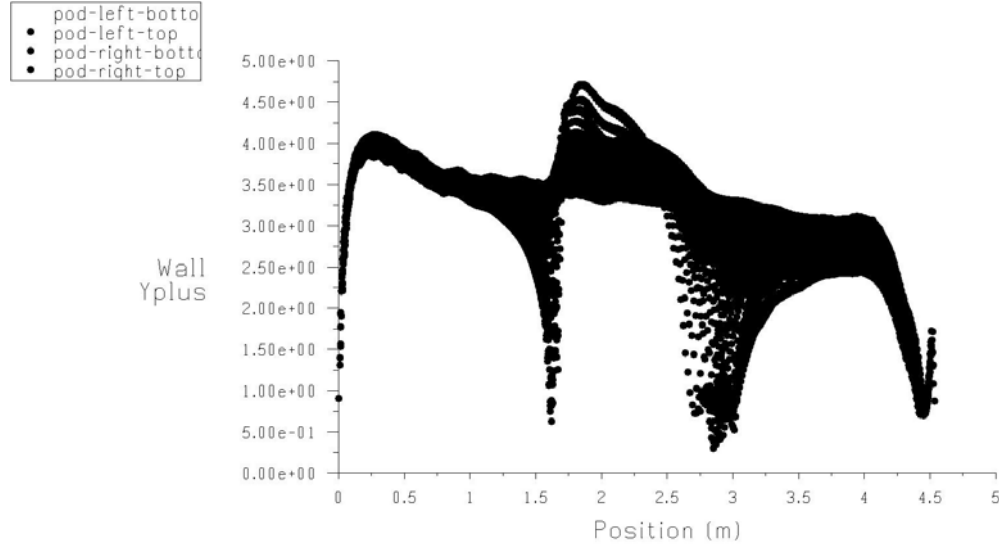
Şekil 6.12 : Simetri Düzlemindeki Sınır Tabaka Ağı.

6.4.2 Sınır Tabaka İçerisinde Boyutsuz Mesafe Değeri y^+ Dağılımı

Sınır tabaka içerisinde hassas bir çözüm elde etmek amacı ile iki milyon eleman kullanılmıştır. Yerel Reynolds sayısı, pod boyu ve sınır tabaka kalınlığı ilk hücre yüksekliğinin belirlenmesinde ihtiyaç duyulan değişkenlerdir. Prandtl tarafından geliştirilen Duvar Kanununa (The Law of the Wall) göre boyutsuz hız değeri u^+ boyutsuz mesafe değeri y^+ değerinin bir fonksiyonudur. y^+ değerinin 5'in altında olduğu viskoz alt tabakada hız profilinin lineer olduğu ve $u^+ = y^+$ olduğu varsayılmaktadır. Bu nedenle türbülanslı akışların var olduğu modellerde doğru

sonuçlara ulaşılabilmesi için ilk hücre yüksekliği pod yüzeyine yeterince yakın seçilmiş ve duvar fonksiyonu y^+ değeri 5 mertebesine getirilmiştir. (Url-2)

Hesaplamalarda kullanılan ağ modeline ait boyutsuz duvar mesafesi dağılımı Şekil 6.13’de sunulmuştur.



Şekil 6.13 : Pod Yüzeyinde y^+ Değerleri.

6.4.3 İlk Hücre Yüksekliğinin Tayin Edilmesi

Sınır tabaka ağının içerisinde geometrik oranla artış gösteren 14 katman kullanılmıştır. İlk hücre yüksekliğinin tayini için Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) Langley Araştırma Merkezi web sayfasında verilen yazılımdan yararlanılmıştır. (Url-3) Viskoz ağ aralığı hesaplama amacı ile hazırlanan bu programda, Re sayısı, istenilen y^+ değeri ve karakteristik boy, giriş verileri olarak kullanılmakta ve ilk hücre yüksekliği hesaplanmaktadır. y^+ hesabı için bu programda kullanılan formülasyon Denklem 6.7 ve Denklem 6.8’de verilmiştir.

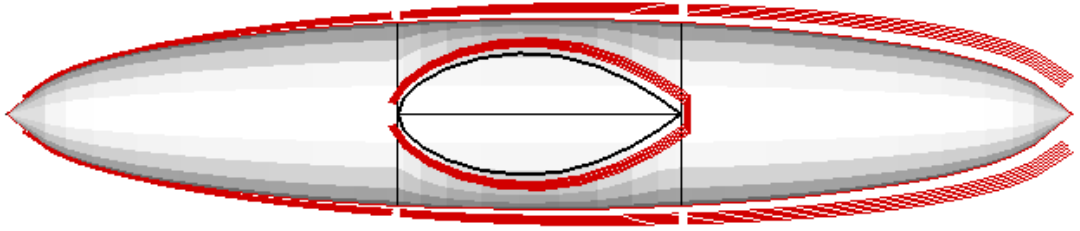
$$y^+ = \frac{u_* \cdot y}{\nu} \quad (6.7)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (6.8)$$

6.5 Hız Profili Hatları

Viskoz çözümden, yerel hızlar dikkate alınarak hesaplanan deplasman kalınlığı temel alınarak hız bileşenleri elde edilmiştir. Doğru hızların potansiyel akışa verilebilmesi amacı ile sınır tabaka içerisindeki hızların, deplasman kalınlığının katları olacak şekilde alınması ve farklı delta değerleri için hız profillerinin kontrol edilmesi gereklidir. Bu nedenle sınır tabaka formülasyonundan elde edilen kalınlığın içerisinde deltanın katlarına bağlı hız profili hatları tanımlanmıştır.

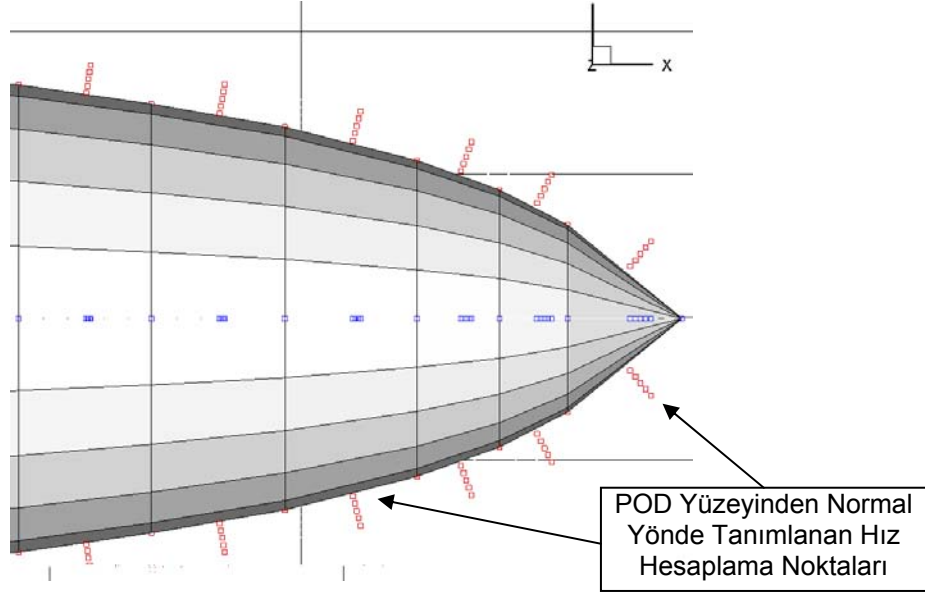
VFLOW programında hız profili hatları kullanılarak deplasman kalınlığının katları keyfi seçilebilmekte ve düzgünleştirme öncesinde kontrol edilmesi için kullanıcıya bırakılmaktadır. Bilindiği gibi gerçekte hızlar sınır tabaka kalınlığının dış bölgesinde serbest akım hızına ulaşmaktadır. Deplasman kalınlığının iki katına kadar alınan hız profili hatları örnek olarak Şekil 6.14'de sunulmuştur.



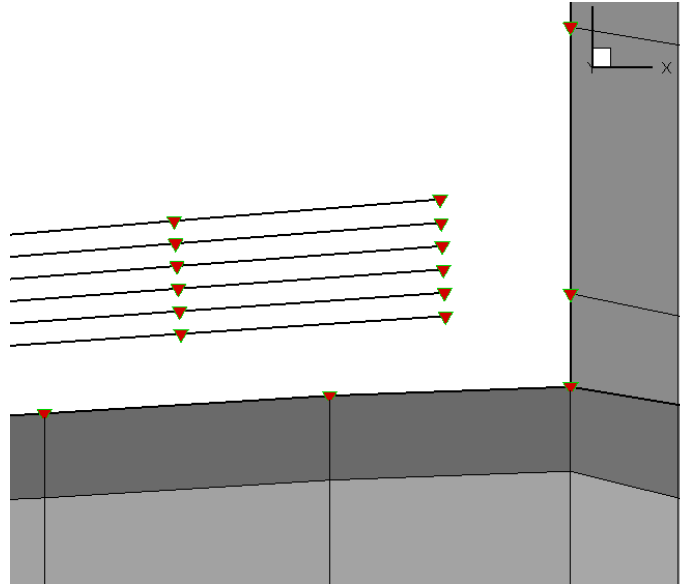
Şekil 6.14 : Hız Profili Hatları.

Profil hatları tanımlanmasının amacı, viskoz akımdaki sınır tabaka ağı kalitesine bağlı olarak, yerel viskoz hızların okunmasında kullanıcıya esneklik sağlanmasıdır. Hangi yükseklikten hız okunması gerektiği kullanıcı tarafından tayin edilerek deplasman kalınlığının keyfi seçilen katları için yerel hızların alınması sağlanmaktadır. Panel merkezleri üzerinde ilk hat deplasman kalınlığı olacak şekilde ihtiyaç duyulduğunda normal yönde bir kademelendirme yapılması imkanı kazanılmıştır. Pratikte ilk hat hesaplanan deplasman kalınlığını temsil etmekte ve hassas bir sınır tabaka ağı kullanıldığında diğer hız profili hatlarının kullanılmasına ihtiyaç duyulması beklenmemektedir.

Panel merkezleri üzerindeki hız profil hatları Şekil 6.15'de ve pod yüzeyi üzerindeki deltanın katlarının gösterimi Şekil 6.16'da verilmiştir.



Şekil 6.15 : Panel Merkezleri Üzerinde Hız Profil Hatları.



Şekil 6.16 : Pod Yüzeyi Üzerinden Deltanın Katlarının Gösterimi.

Alınan viskoz hızlar incelenerek seçilen hız profili düzgünleştirilmeye tabi tutulacak ve potansiyel hesaba dahil edilecektir. Böylelikle viskoz çözümdeki sınır tabaka karakteristiği hesaba hassas olarak dahil edilebilecek ve potansiyel akış çözümünde viskoz hızların etkisi hedeflendiği şekilde kullanılabilecektir.

FLUENT programında yapılmış viskoz çözümde doğru hızların alınabilmesi için deplasman kalınlığı bir katsayı ile çarpılmaktadır. Üç yön için kullanılan ifadeler Denklem 6.9, Denklem 6.10 ve Denklem 6.11’de sunulmuştur.

$$x_{DEL} = X_c + n_x \cdot \delta^* \cdot k \quad (6.9)$$

$$y_{DEL} = Y_c + n_y \cdot \delta^* \cdot k \quad (6.10)$$

$$z_{DEL} = Z_c + n_z \cdot \delta^* \cdot k \quad (6.11)$$

Yapılan hesaplarda deplasman kalınlığı ile çarpılan k katsayısı 1 ile 2 arasında seçilmiştir. Bu katsayının belirlenmesinde viskoz akım sınır tabaka hesabındaki doğruluğu temsilen cisim yüzeyine ait duvar fonksiyonu y^+ değerlerinin 0 ile 1 000 olduğu aralık kullanılmıştır. Duvar fonksiyonu değişkeni y^+ Çizelge 6.2’de sunulmuştur.

Çizelge 6.2 : k Katsayısı Seçimi İçin Öngörülen Değerler.

Deplasman Kalınlığı δ^*	k	Hız Profili Hattı	y^+
Delta	1.0	HPH 1.0 x Delta	0 – 5
Delta	1.2	HPH 1.2 x Delta	5 - 50
Delta	1.4	HPH 1.4 x Delta	50 - 300
Delta	1.6	HPH 1.6 x Delta	300 – 1 000
Delta	1.8	HPH 1.8 x Delta	300 – 1 000
Delta	2.0	HPH 2.0 x Delta	300 – 1 000

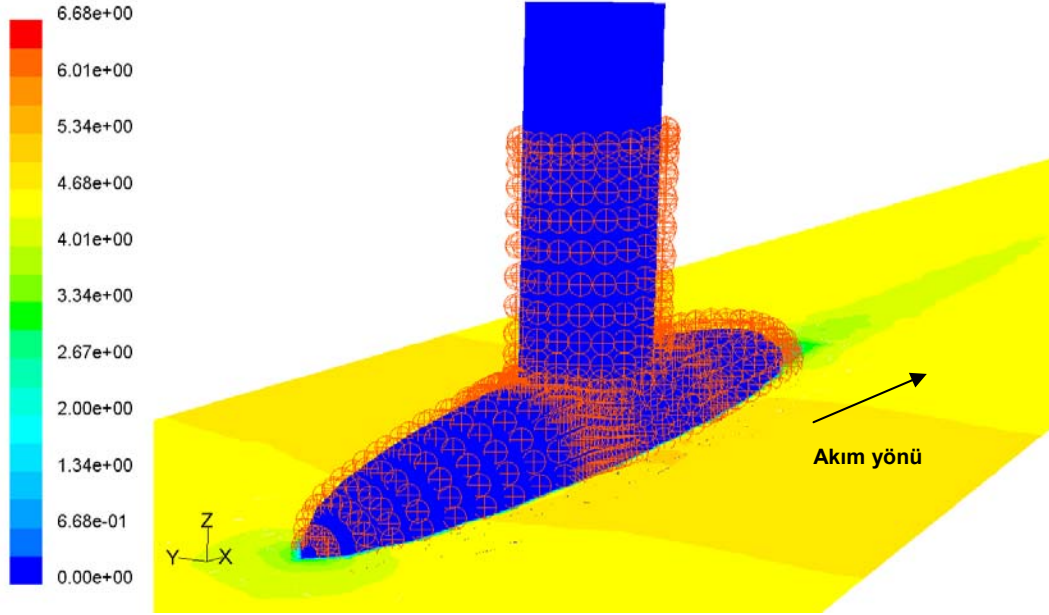
6.5.1 Sınır Tabaka Hızlarının Okunması

FLUENT programında çözümü yapılan bir probleme ait sonuçlar grafikler halinde sergilenebilmektedir. Akış karakteristiği ile ilgili değişkenler görsel veriler ile analiz edilebilmekle birlikte kullanıcı tarafından hazırlanan arayüzler ile istenilen fiziksel değerler hesaplatılabilmektedir.

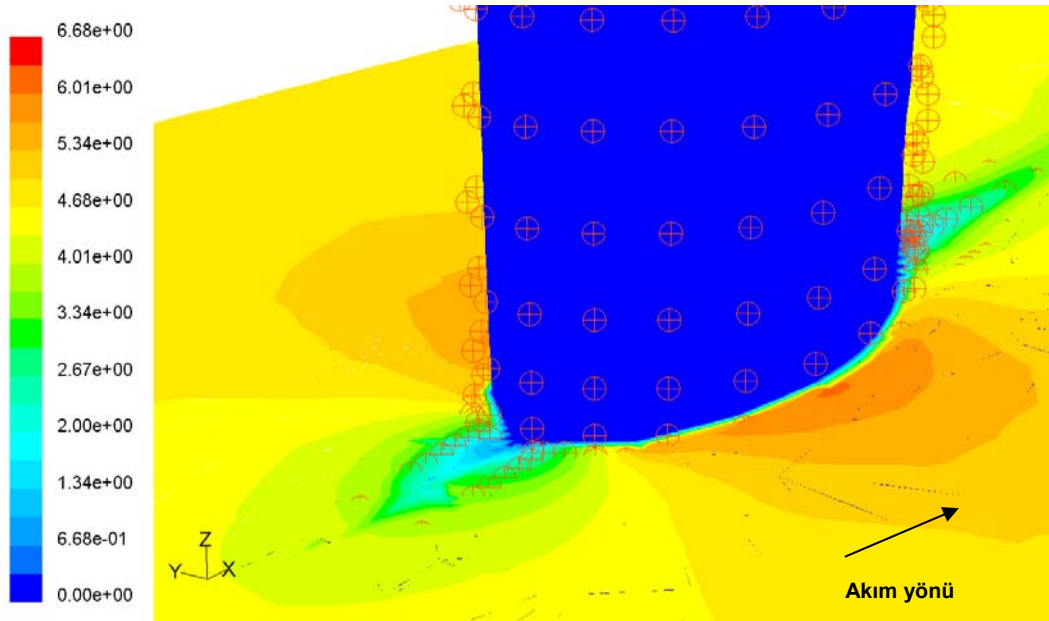
Pod/strut geometrisi için 75 saniye süreli viskoz çözüm sonrasında kontrol hacmi içerisindeki akım hatları, yüzeyler üzerindeki basınç dağılımına ait grafik ve resimler ile sonuçlar değerlendirilmektedir. FLUENT’te tamamlanmış bir analiz sonrasında (post process) istenilen yerlerde noktalar tanımlanabilmekte ve bu noktalardaki akış özellikleri incelenebilmektedir. Bu imkandan hareketle VFLOW programında hesaplanan sınır tabakaya ait nokta bulutu için her bir tekil noktadaki hız bileşenleri elde edilmiştir. Bunun için FLUENT programına okutulacak özel bir dosya bu tez çalışması kapsamında yazılan bir alt rutin ile VFLOW’a üretilmiş ve FLUENT formatında çalıştırılarak noktasal hız değerleri bir başka dosyaya yazdırılmıştır. Sonuç olarak sınır tabaka içerisinde kalan nokta bulutuna ait hız bilgileri tekrar VFLOW’a verilmek üzere hazırlanmıştır.

Hazırlanan arayüz dosyası ile elde edilen Pod/strut üzerindeki sınır tabakayı temsil eden noktalar Şekil 6.17’de gösterilmiştir. Şekil 6.18’de görülen düzlemdeki serbest akım hızı $V=4.53$ m/s değerindeki giriş akımıdır. Sınır tabaka içerisinde ölçülen

hızlar hiçbir zaman serbest akım hızına ulaşmamalıdır. Özellikle deplasman kalınlığı düşünüldüğünde serbest akım hızına oranla daha küçük hızların okunduğunun kontrol edilmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmada deplasman kalınlığı için öngörülen noktalardeki hız değerlerinin serbest akım hızından küçük olduğu görülmüştür. Yapılan kontroller sonucunda VFLOW'da yapılan deplasman kalınlığı hesabının viskoz çözüm ile uyum içerisinde olduğu teyit edilmiştir.



Şekil 6.17 : VFLOW'da hesaplanan ve Sınır Tabakayı Tanımlayan Nokta Bulutu.



Şekil 6.18 : Sınır Tabakayı Temsil Eden Noktalardaki Hız Konturları.

Akış hacmi içerisindeki bu sanal noktalarda hesaplanan hız değerleri bir çıkış dosyasına yazdırılarak panel merkezlerini temsil eden bir sıra içerisinde listelenmektedir. Elde edilen üç yöndeki hız bileşeni VFLOW'da yüzey normallerine etkiyecek hızlar olarak kullanılacaktır. O halde söz konusu hızların viskoz etkiler ile akımın yavaşladığı bölgelerdeki değerleri, potansiyel akış çözümünde panellere etkiyen hızların güncellenmesi açısından önemlidir. Şekil 6.17'de görüldüğü üzere, Pod/Strut birleşim bölgesindeki panel merkezlerinden deplasman kalınlığı kadar mesafedeki noktalardaki hız bileşenleri elde edilmektedir.

Sınır tabakanın varlığı dolayısı ile bu bölgedeki hızlar, VFLOW'da hesaplanamayan hız değerleridir. Viskoz/potansiyel akış hız birleştirilmesi sonrasında, VFLOW'dan elde edilecek yeni hız değerleri viskoz etkileri de temsil etmektedir.

6.5.1.1 Üç Eksendeki Noktasal Hızların Düzgünleştirilmesi ve Gösterimi

FLUENT çözümü kullanılarak elde edilen hızlar Çizelge 6.3'de sunulmuştur. Pod yüzeyi, 1 000'e yakın panel kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Pod/strut geometrisi için tekil hızlar bir dosyaya yazdırılmaktadır. Çizelge 6.3'de 5 panel merkezi için elde edilen hız değerleri örnek olarak sunulmuştur. Yüzeyi tanımlayan panel sayısının değiştirilmesinde bir engel yoktur. Geliştirilen hız birleştirme çalışmasında panel sayısı istenildiği şekilde artırılabilir.

Çizelge 6.3 : FLUENT 'ten alınan Sınır Tabaka Hızları (Örnek olarak beş noktadaki hız verisi).

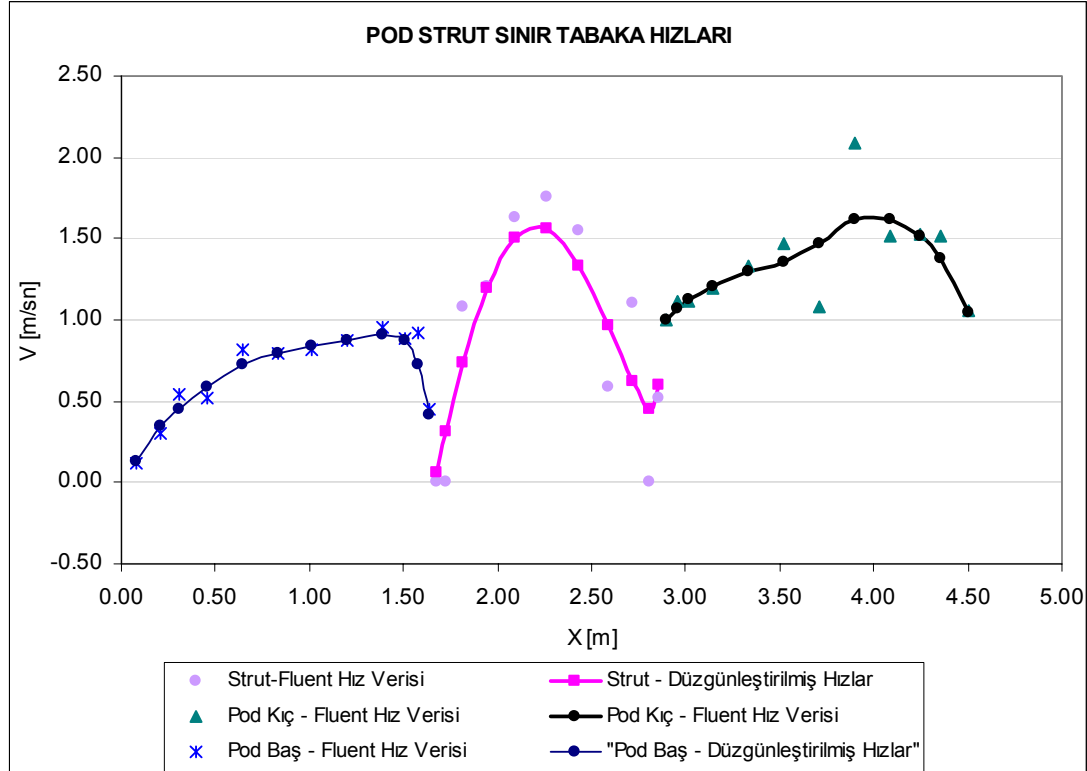
Node number	x	y	z	velocity-magnitude	x-velocity	y-velocity	z-velocity
1	0.078947	0.011063	-0.069857	0.125190	0.122010	0.013586	-0.014393
2	0.078947	0.032109	-0.063018	0.307842	0.300024	0.033409	-0.035393
3	0.078947	0.050011	-0.050011	0.359571	0.350439	0.039023	-0.041341
4	0.078947	0.063018	-0.032109	0.275327	0.268335	0.029880	-0.031655
5	0.078947	0.069857	-0.011063	0.063342	0.061733	0.006874	-0.007283

İki farklı program kullanılarak yapılan sayısal çözümde yüzeylerin tanımlanmasında noktaların koordinatlarında yerel farklılıklar oluşması olasıdır. Bu farkların etkilerinin azaltılması için elde edilen hız değerlerinin bir diğer programa aktarılmadan önce düzgünleştirilmesi gerekmektedir. Panel merkezlerini temsil eden tekil verilerin, yüzey geometrisini de dikkate alacak bir yöntem ile düzgünleştirilmesinde, üç noktadan doğru geçirme (lineer en küçük kareler) yöntemi kullanılmıştır.

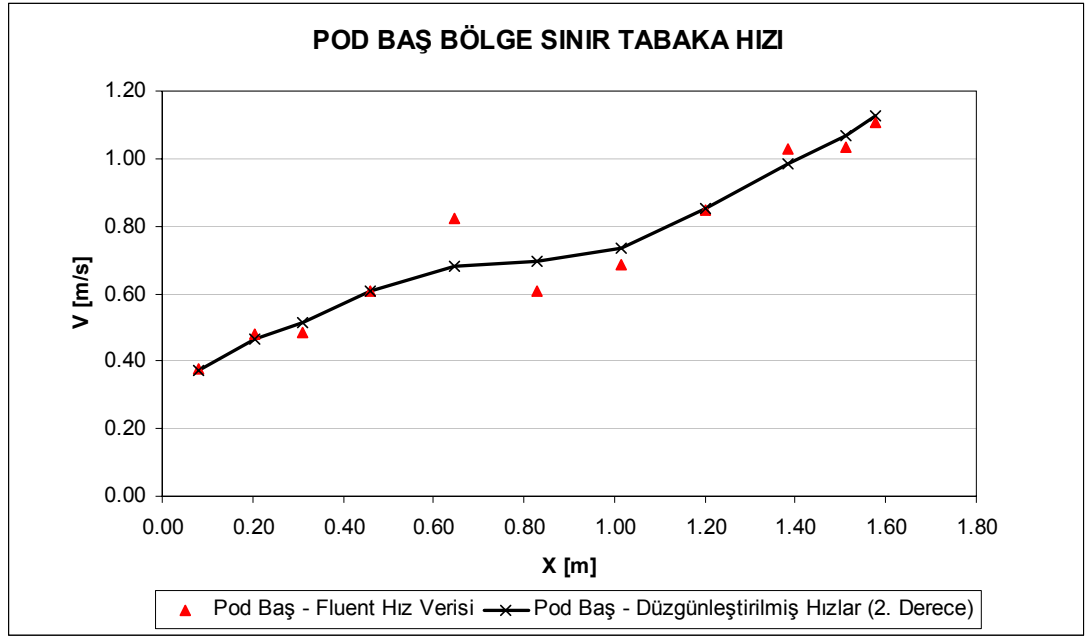
Hız dosyasından alınan ham veriler, akımın geliş yönü de dikkate alınarak pod boyunca düzgünleştirilmiştir. Bu amaçla Excel tabanlı bir kod hazırlanmış ve yapılacak düzgünleştirmeye ait değişkenler esnek bırakılmıştır. Verilerin süreksizliğe

karşı düzgünleştirilmesinde hazırlanan kod, hızları FLUENT'ten alınan dosyadan direk okunacak şekilde kurgulanmıştır.

Kort boyunca yapılan düzgünleştirmede üç tekil hız verisine ait yerel x koordinatları arasındaki ardışık fark değerleri kullanılmaktadır. Verilere uydurulacak (oturtulacak) eğrinin derecesi kullanıcı tarafından belirlenmektedir. $V=4.53$ m/s hız için ham ve düzgünleştirilen hızlar Şekil 6.19 ve Şekil 6.20'de sunulmuştur. Şekil 6.19'da verilen hızlar pod boyunca ilerleyen, simetri ekseninin komşuluğundaki panel şeridine aittir.



Şekil 6.19 : Pod Yüzeyinde Sınır Tabaka Hız Düzgünleştirilmesi.



Şekil 6.20 : Pod Üzerindeki Sınır Tabaka Hızı.

6.6 Potansiyel ve Viskoz Çözümün Birleştirilmesi

Düzgünleştirme sonrasında bu doktora çalışması kapsamında VFLOW'a eklenen bir alt rutin vastası ile FLUENT'ten alınıp düzgünleştirilen üç yöndeki hız bileşeni (V_x , V_y , V_z) panellere ait birim normal vektörler ile çarpılarak normal hız olarak eklenmektedir. Geliştirilen alt rutinde FLUENT'ten alınan hızları temsilen normal hız değişkeni VNPFL, x, y ve z yönündeki hız bileşenleri ise FLVX, FLVY ve FLVZ olarak adlandırılmıştır. Denklem 6.12 ve Denklem 6.13'de verilen formülasyon ile sınır tabaka hızları hesaba dahil edilmektedir.

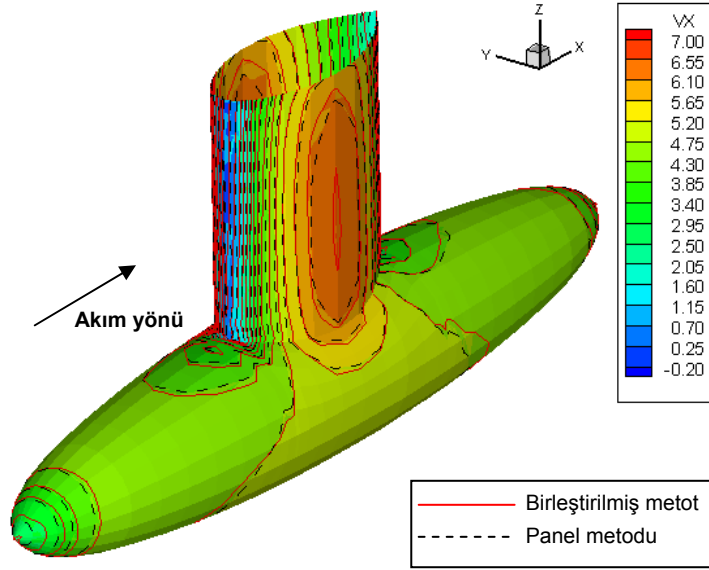
$$VNPFL(K) = FLV_x(K) \times X_N + FLV_y(K) \times Y_N + FLV_z(K) \times Z_N \quad (6.12)$$

$$VNP(K) = VNP(K) + VNPFL(K) \quad (6.13)$$

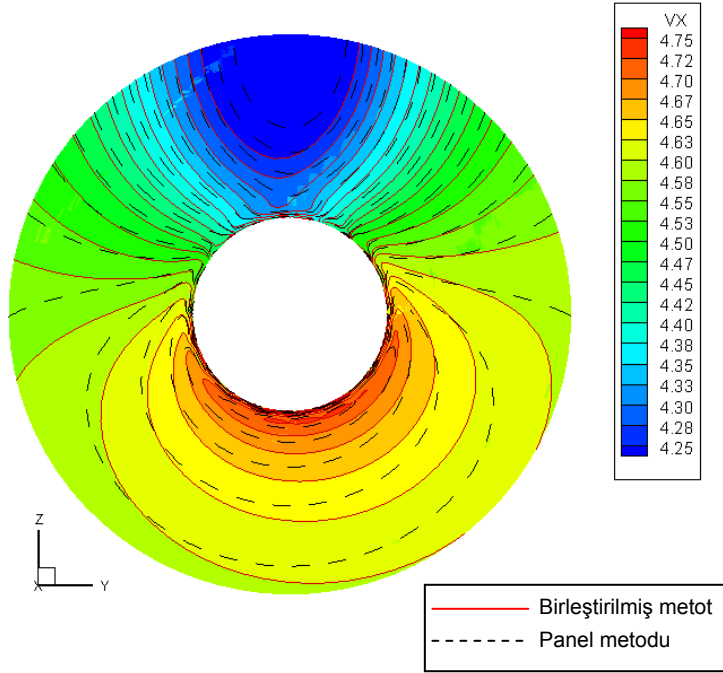
6.6.1 Birleştirme Sonrası Düzlemlerdeki Hız Konturları

Viskoz akımdan elde edilen üç yöndeki hız bileşeninin normal hız olarak verilmesi sonucunda elde edilen yeni çözümde, pervane düzlemi hız dağılımlarında farklılıklar olduğu görülmüştür. Bu potansiyel akım çözümü ile viskoz akım etkisi eklenmiş potansiyel akım çözümü (birleştirilmiş metot) arasındaki farklılığı ortaya koyan anlamlı bir sonuçtur. Pod yüzeyi üzerindeki hız konturları arasındaki farklar Şekil 6.21'de genel gösterim olarak sunulmuştur. Şekilde kesikli çizgiler potansiyel çözüme, düz çizgiler birleştirilmiş çözüme ait düzlemsel hız konturlarıdır.

Ön pervane düzleminde viskoz etkilerin eklenmesi ile oluşan hız konturu, potansiyel akım çözümü ile karşılaştırılmalı olarak Şekil 6.22’de sunulmuştur.



Şekil 6.21 : Pervane Düzleminde Hız Konturu Farkları.



Şekil 6.22 : Ön Pervane Düzleminde Eksenel Hız Konturu Farkları (x=1.055 m).

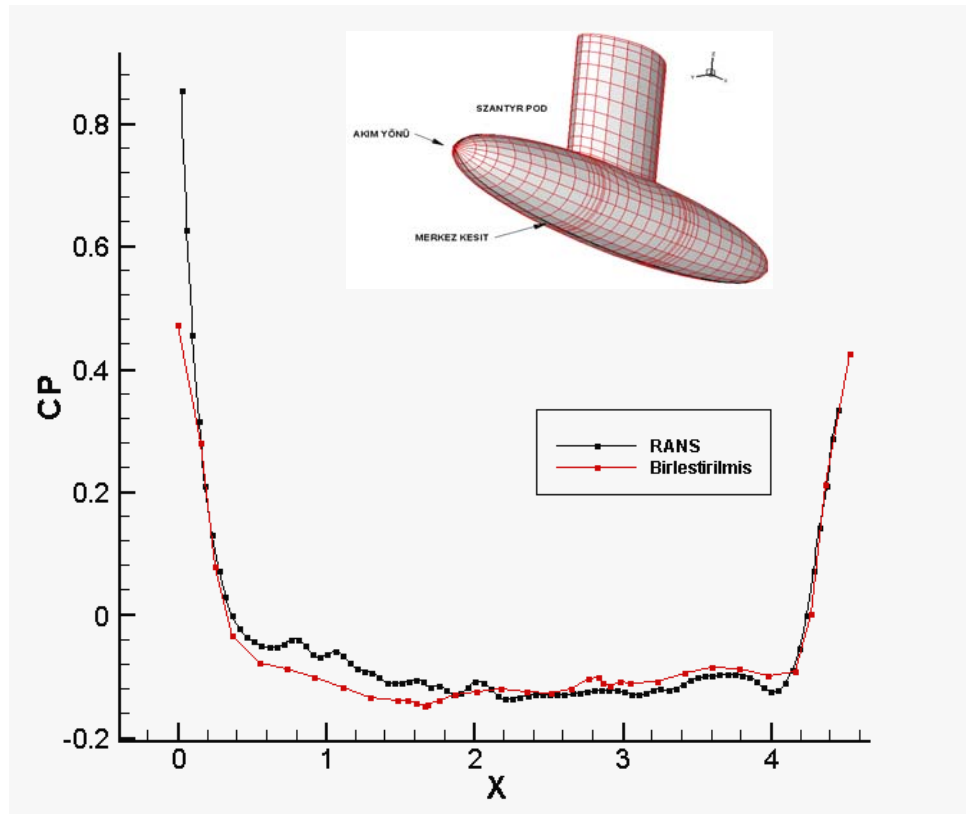
6.6.2 Birleştirme Sonrasında Elde Edilen Basınç Katsayısı ve Akım Hatları

Hız birleştirme işlemi sonrasında pod üzerindeki her bir panele viskoz etkiler nedeni ile farklı hız değerleri eklenmiştir. Potansiyel çözümde ideal olarak kabul edilen ve yalnızca panelin yüzey normaline bağlı olarak etkiyen hız, sınır tabaka hızlarına etkiyecek şekilde düzenlenmiştir. Söz konusu değişikliğin pod yüzeyindeki

basınç dağılımını etkilediği görülmüştür. Basınç katsayısının değişimi Şekil 6.23'de verilmiştir.

Alınan hızlar zamana bağlı viskoz çözümdeki herhangi bir anda oluşan anlık hızlar olduğu için o andaki yerel hız dağılımı potansiyel çözümde hız farklılıkları olarak görülmektedir. Türbülans etkileri nedeni ile klasik potansiyel akımda yüzey normalini takip ederek düzgün ve sürekli eğriler halinde çıkan basınç katsayısı, hız birleştirilmiş çözümde yerel süreksizlikler göstermektedir. Bu kısmen düzensiz basınç dağılımı eğrisi, aslında viskoz etkilerin varlığını göstermekte ve yapılan hız birleştirme işleminin beklenen bir sonucu olmaktadır.

Bir başka neden panel metodunda kullanılan yüzey elemanı sayısıdır. Geliştirilen hız birleştirme metodunda yüzeyde tanımlanan panel sayısı rahatlıkla artırılabilen ve istenilen bölgelerde daha yüksek hassasiyete ulaşılabilmektedir. Fakat, panel metodunda hassas sonuçlar elde etmek amacı ile panel sayısı artırılsa dahi, viskoz çözümdeki ağ elemanı sayısına ulaşılması doğal olarak mümkün değildir.

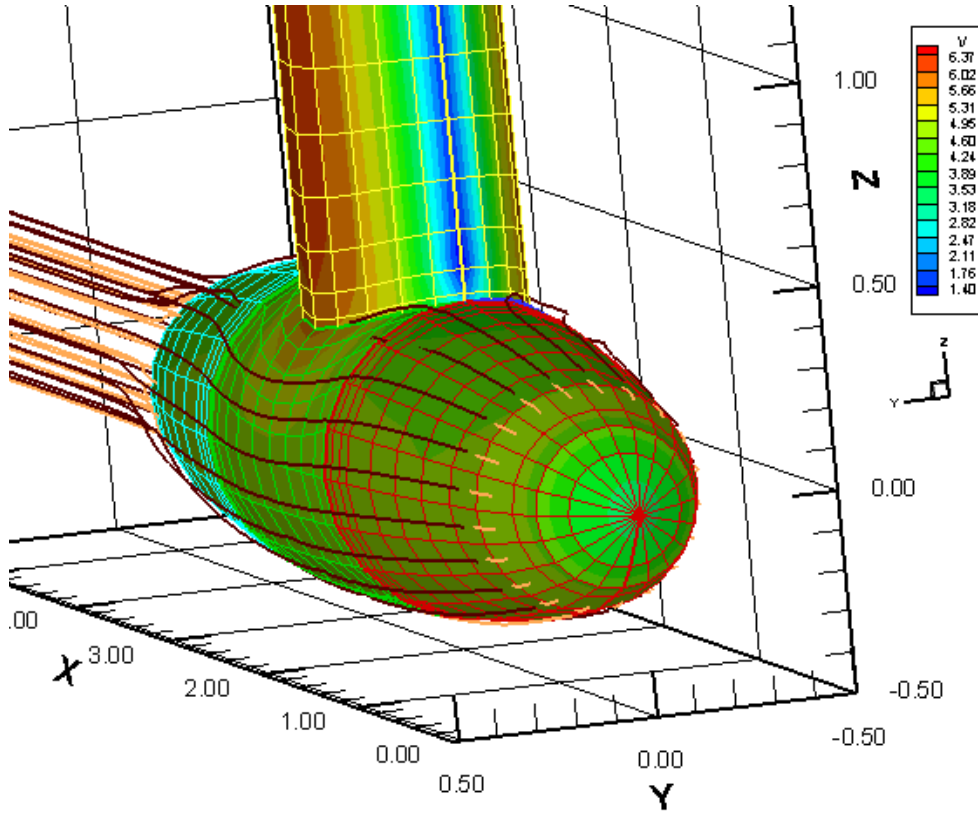


Şekil 6.23 : Birleştirme Sonrasında Merkez Kesitteki Basınç Katsayısının Dağılımı.

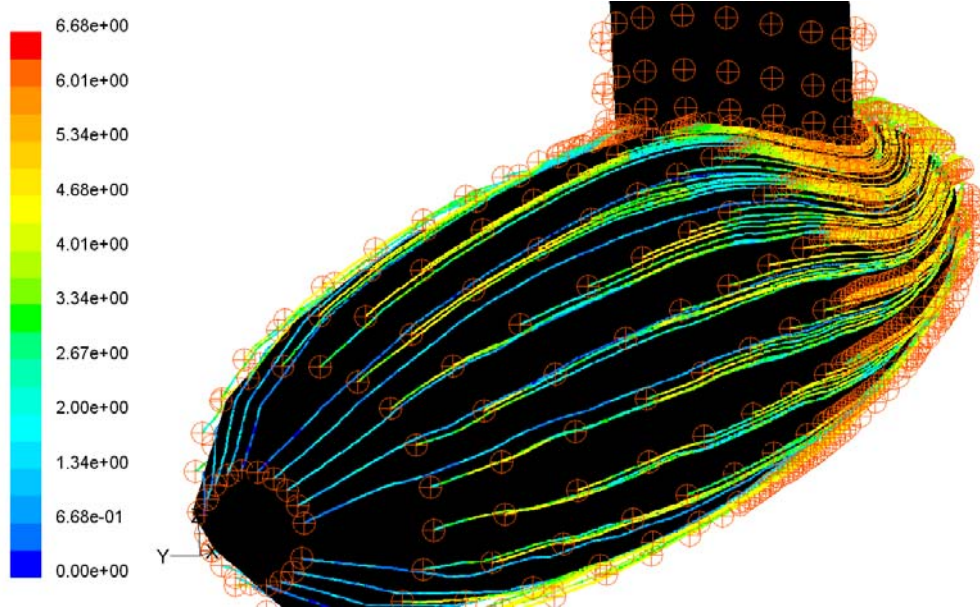
Şekil 6.23'de viskoz ve birleştirilmiş çözüm yöntemleri kullanılarak elde edilen basınç katsayısı dağılımları sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde birleştirilmiş çözümle elde edilen basınç dağılımı değerlerinin viskoz akımla elde edilen basınç dağılımı zarfı içinde yer aldığı görülmektedir.

Birleştirme sonrası elde edilen sonuçlara göre basınç katsayısının değişimi yerel seviyede de incelenmiştir. 75 saniye serbest akıma maruz kalan pod etrafındaki hızlar potansiyel hesaba dahil edildiğinde basınç katsayısı yerel seviyede farklılıklar göstermiştir. Pod üzerinde simetri düzleminden alınan bir hatta bu seviyedeki farklılıkların olması beklenen bir sonuçtur. Paneller arasında hız farklarının olması viskoz akımın etkisinin birleştirme sonucu potansiyel akım çözümüne yansıtıldığını göstermektedir.

Şekil 6.24 ve Şekil 6.25’de birleştirilmiş çözüm ve viskoz çözümle elde edilen akım hatları gösterilmiştir. Her iki yöntemle elde edilen akım hatlarının aynı davranışı göstermesi birleştirilmiş çözümün iyi bir yaklaşım aracı olacağının göstergesi olarak kabul edilmiştir.



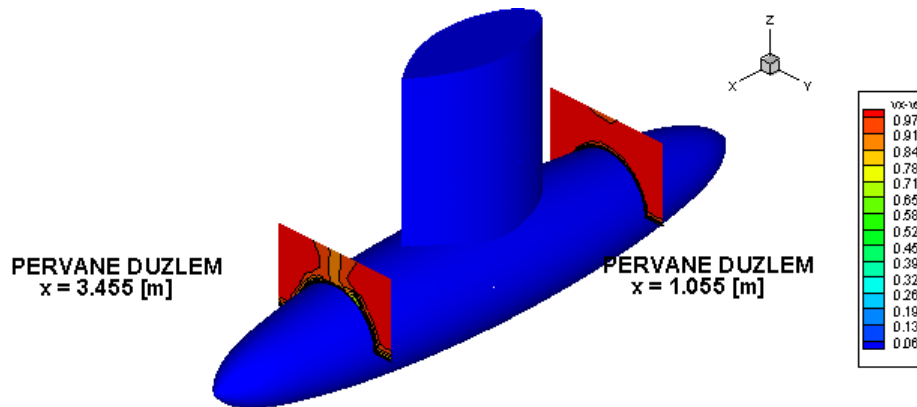
Şekil 6.24 : Sınır Tabaka İçerisinden Bırakılan Akım Hatları $x=0.5$ m (Birleştirilmiş Çözüm).



Şekil 6.25 : Sınır Tabakadan Bırakılan Akım Hatları (Viskoz Çözüm).

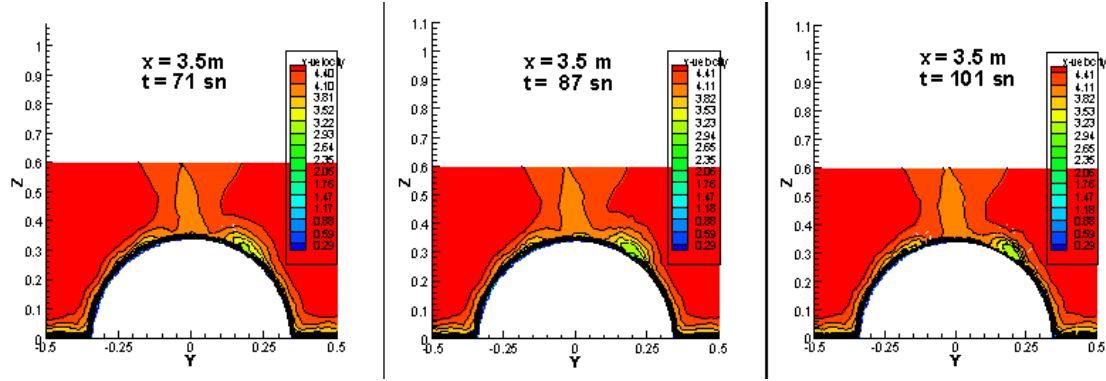
6.6.3 Pervane Düzlemi Hız Konturlarının Değişimi

5. Bölümde viskoz akım ve potansiyel akım ile yapılan çözümlerde gözlenen atnalı girdabı ile ilgili bilgiler verilmiştir. Potansiyel çözüme viskoz hızların eklenmesi sonrasında da Pod/Strut birleşim bölgesinde atnalı girdabının oluştuğu görülmüştür. Önder kenardan başlayarak pod boyunca ilerleyen atnalı girdabının olumsuz etkileri, pervane düzleminde hız farklılığı olarak gözlemlenmektedir. Bu düzlemde çalışacak pervane için mümkün olduğunca düzgün bir giriş hızı dağılımı tercih edilmekte ve eksenel simetrik bir akımın oluşması hedeflenmektedir. Atnalı girdabı bu düzlemde belirgin bir fark yaratarak pervane düzlemi hız dağılımını bozmaktadır. Atnalı girdabı zamana bağlı olarak da değişiklik göstermekte ve ilerleyen zaman adımlarında yerel farklılıklar oluşmaktadır. Podun arkasında gözlemlenen bu girdap, akım hatlarının pervane düzleminde geçtiği bölgededir. Sonuçların izlendiği pervane düzlemleri Şekil 6.26'da gösterilmiştir.



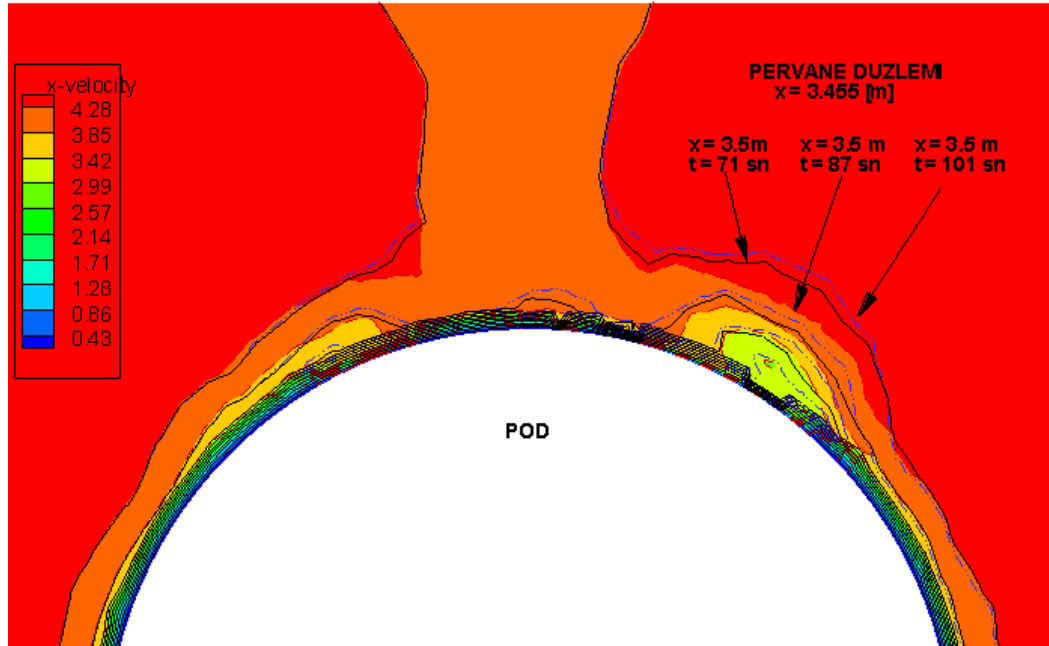
Şekil 6.26 : Ön ve Arka Pervane Düzlemleri.

Viskoz çözümle elde edilen atnalı girdabının arka pervane düzlemindeki zamana bağlı değişimi Şekil 6.27’de gösterilmiştir.



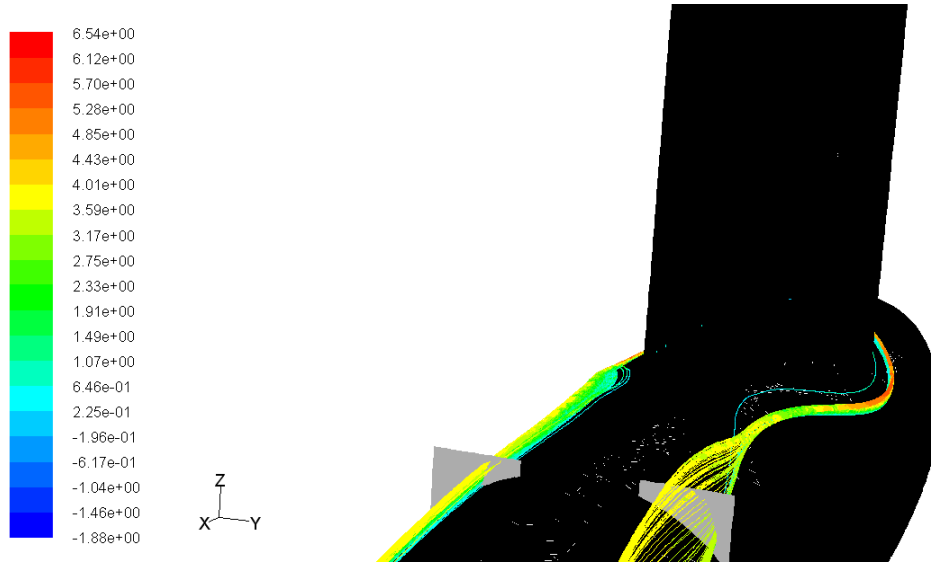
Şekil 6.27 : Atnalı Girdabının Zamana Bağlı Değişimi.

Şekil 6.27 ve Şekil 6.28’de zamana bağlı çözümün farklı anlarındaki 71s, 87s ve 101. saniyelerdeki girdabın hız dağılımına olan etkisi sunulmuştur. Görüldüğü üzere hız dağılımı zamana bağlı olarak değişmektedir.



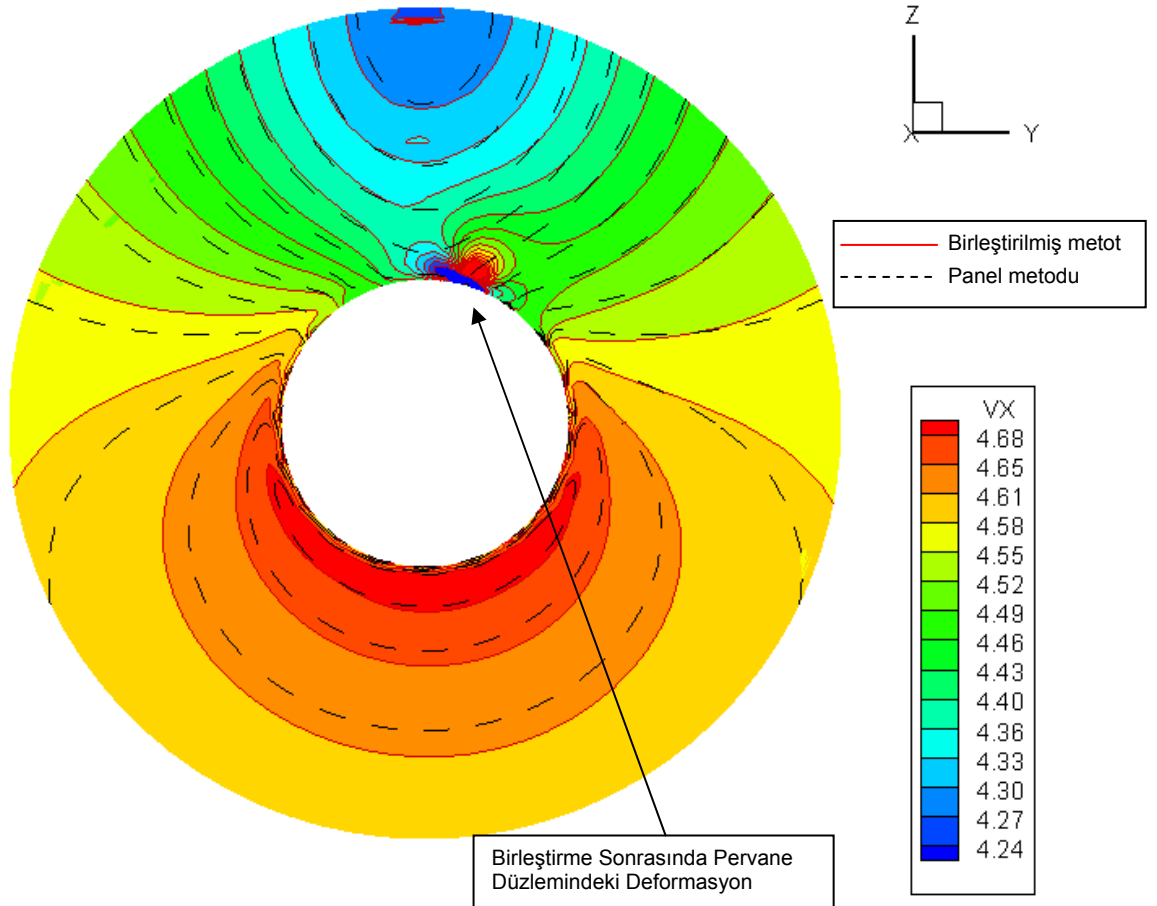
Şekil 6.28 : Atnalı Girdabının Zamana Bağlı Değişimi (Birleştirilmiş gösterim).

Şekil 6.29’da sunulan X yönündeki hız değerleri esas alınarak çizdirilen hız konturlarında girdabın pod boyunca ilerleyişi görülmektedir.



Şekil 6.29 : Atnalı Girdabı Akım Hatları, Pervane Düzlemi Arkadan Görünüş.

Hız birleştirilmesi sonrasında elde edilen pervane düzlemi akım hatları Şekil 6.30'da verilmiştir.



Şekil 6.30 : Arka Pervane Düzlemindeki Eksenel Hızlarının Karşılaştırılması.

6.7 Sonuçlar

VFLOW programı kullanılarak yapılan potansiyel hesap ve FLUENT programı kullanılarak yapılan viskoz hesap VFLOW programı ile birlikte çalışan alt rutinler geliştirilerek birleştirilmiştir. Birleştirilmiş çözümün aşamaları aşağıda özetlenmiştir.

- Potansiyel akıma, viskoz sınır tabaka hız verileri düzgünleştirilerek ithal edilmiştir.
- Önder kenardaki akım ayrılması viskoz etkiler de dahil edilerek daha hassas olarak modellenmiştir.
- Atnalı girdabı hız birleşimi sonucunda daha hassas bir şekilde modellenmiştir.
- Simölasyonlar sonucunda önder kenar bölgesinde atnalı girdabının oluştuğı gözlemlenmiştir.
- Atnalı girdabı potansiyel ve viskoz hesapta gözlemlendiğı mevkide ve literatür ile mertebe olarak uyumlu çıkmıştır.

Viskoz hızların eklenmesi sonrasında elde edilen sonuçlar birleşim bölgesinde atnalı girdabının oluşumunu açıkça ortaya koymaktadır. Basınç gradyenlerinin etkisi ile ortaya çıkan atnalı girdabı, viskoz akım özellikleri de ithal edilerek birleşik bir yöntem ile özölmüştür.

7. POD STRUT BİRLEŞİMİ GEOMETRİ DEĞİŞİMİ

7.1 Giriş

Önder kenar akım ayrılması ile ilgili yapılan literatür çalışmalarında geometri değişiminin önemli bir seçenek olduğu anlatılmıştır. Konu hakkında havacılık ile ilgili çalışmalarda uçak gövde ve kanat birleşim bölgesinde akımı düzgünleştirme amacı ile farklı kesit geometrileri incelenmiştir. Düz bir levha üzerinde kanat kesitli dümen veya denizaltı kulesi benzeri formlar deneysel olarak incelenmiş ve birleşim bölgesi üzerindeki akış karakteristikleri ölçülmüştür (Devenport ve Simpson, 1992; Mehta, 1984).

İz kalitesinin artırılması amacı ile pod strut birleşim bölgesinde farklı geometrik şekillerin denenmesi önem arz etmektedir. Bu bölümde farklı pod strut birleşim şekillerinin atnalı girdabın oluşumuna olan etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

7.2 Pod / Strut Birleşimi Geometri Değişimi

Literatürde iki yüzeyin birleştirilmesi ile ilgili çalışmalar, yürütülecek geometrik işlemin karmaşıklık seviyesine göre farklılıklar göstermektedir.

Temel yaklaşım olarak bir daire ve kanat kesitinin kesişim çizgisi ve kesişen alanlar kullanılarak yapılan çalışmalar bulunmaktadır (Barger ve Adams, 1993). Benzer şekilde bir yüzey parçasına ait iki kesit için düzlemsel istasyon noktaları arasında yarıçaplar kullanılarak birleştirme yapılmıştır (Gupta, 2004).

Üç boyutlu eğrisel yüzeylerin geometrik olarak birleştirilmesi ile ilgili çalışmalar incelenmiş ve farklı yaklaşımların kullanıldığı görülmüştür. Bezier eğrileri kullanılarak yapılan kesit değişimleri üç boyutlu çalışmaların önünü açmış ve eğrisel yüzeylerin matematiksel ifadeler kullanılarak birleştirilmesi sağlanmıştır (Bezier, 1966).

Düzgün olmayan rasyonel B-Spline Eğrileri (NURBS) kullanılarak oluşturulan eğrisel NURBS yüzeyleri, üç boyutta sürekliliğe sahip düzgün yüzeylerdir. Akım karakteristiğinin doğru bir şekilde modellenebilmesi için kırıklıklara sahip bir yüzeyde hesaplamalar yapmak tercih edilmemektedir. Bu tip yüzeyler, cisim yüzeyi ayrıklaştırılırken panellere dönüştürülmekte ve paneller arasında düzgün bir eğrisel

yüzey oluşturulması gerekmektedir. Panel metodunda yüzeyin doğru temsil edilmesi önemlidir ve yerel süreksizlikler hesapta yerel hatalara sebebiyet vermektedir.

7.3 Pod/Strut Yüzey Birleştirme (Blending)

Yüzey birleştirme işleminde pod ve struttan oluşan iki yüzey, bir NURBS yüzeyi tanımlanarak birleştirilmiş birleşim bölgesinin pod ve strut yüzeyleri arasında düzgün bir yüzey eğimi ile birleştirilmesi sağlanmıştır. Bu çalışma kapsamında birleşim bölgesindeki değişiminin, akım özelliklerine olan etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle yüzeyin süreksizlik içermeyen düzgün bir halde tanımlanması kritik seviyede önemlidir. Elde edilecek temel sonuç, eğrisel bir yüzey ile birleştirme yapılarak pod strut birleşiminde oluşan girdap şiddetinin azaltılmasıdır.

Elipsoid bir forma sahip olan pod gemi kışına kanat kesitli bir strut ile bağlanmaktadır. Podlu itme sistemlerinin aynı zamanda dümen olarak da kullanılması nedeni ile kanat kesitli strut kullanımı yaygın bir uygulamadır. Gemi kışına dümen levhasına benzer düşey olarak konumlandırılan strut Szantyr Podu için NACA 066 kesitli göreceli olarak kalın sayılabilecek bir formdur.

Elipsoid ve kanat kesitli iki yüzeyi NURBS yüzeyleri yardımı ile birleştirmesi ikişekilde yapılabilir:

- Sabit yarıçap
- Değişken yarıçap

Uygulanabilecek birleştirme seçenekleri Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1 : Pod/Strut Yüzey Birleştirme Seçenekleri.

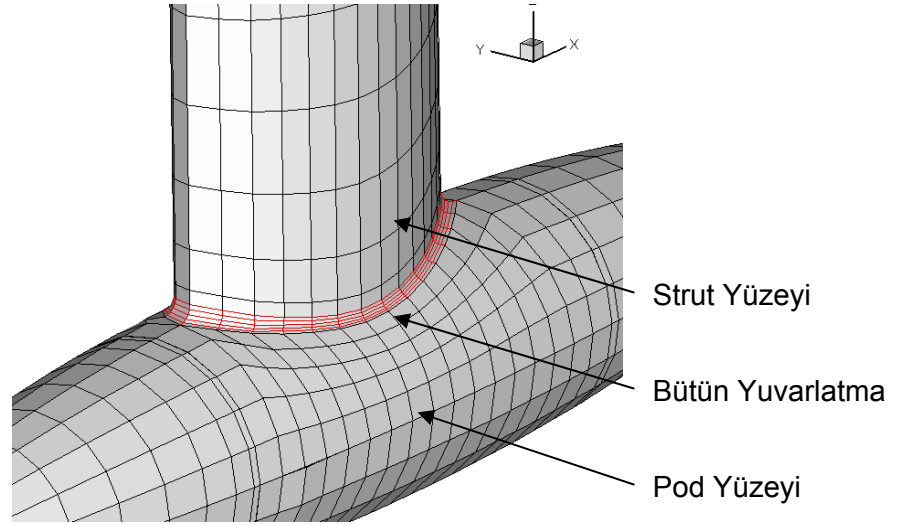
Seçenek 1		Seçenek 2	
Bütün Yuvarlatma	Yarıçap R [m]	Baş Yuvarlatma	Yarıçap R [m]
Sabit Yarıçap	$R = 0 - 0.16$	Sabit Yarıçap	–
Değişken Yarıçap	–	Değişken Yarıçap	$R = 0 - 0.4$

7.3.1 Bütün Yuvarlatma Konulması

Burada, pod ve strut olmak üzere iki farklı üç boyutlu yüzeyin kesişim çizgisi boyunca tüm noktaları sabit yarıçapta birbirlerine bağlanmış ve yüzeyler eğrisel bir yüzey parçası ile birleştirilmiştir. Yüzeyler birleştirme sonrasında tek bir yüzey olarak tanımlanmış ve cisim etrafındaki akım hesaplanmıştır.

Kesişim çizgisi boyunca tanımlanan sabit yarıçap değiştirildikçe cismin şekli değişmekte ve yeni bir geometri ortaya çıkmaktadır. Bütün yuvarlatma olarak adlandırılan bu birleşim şekli için yarıçap seçimi tasarımcı tarafından

belirlenebilecek bir değişkendir. Şekil 7.1’de $R= 0.06$ m olarak belirlenen yarıçaptaki birleştirme sunulmuştur.



Şekil 7.1 : Pod Bütün Yuvarlatma ile Birleştirme $R=0.06$ [m].

Barberis ve diğ. (1997) ve Devenport ve diğ. (1992) tarafından yapılan deneysel çalışmalar bütün yuvarlatma konulmasının atnalı girdabının ortadan kaldırılmasını sağlamadığını göstermiştir. Bu nedenle bu birleştirme geometrisinin atnalı girdabının oluşumuna etkisi irdelenmemiştir.

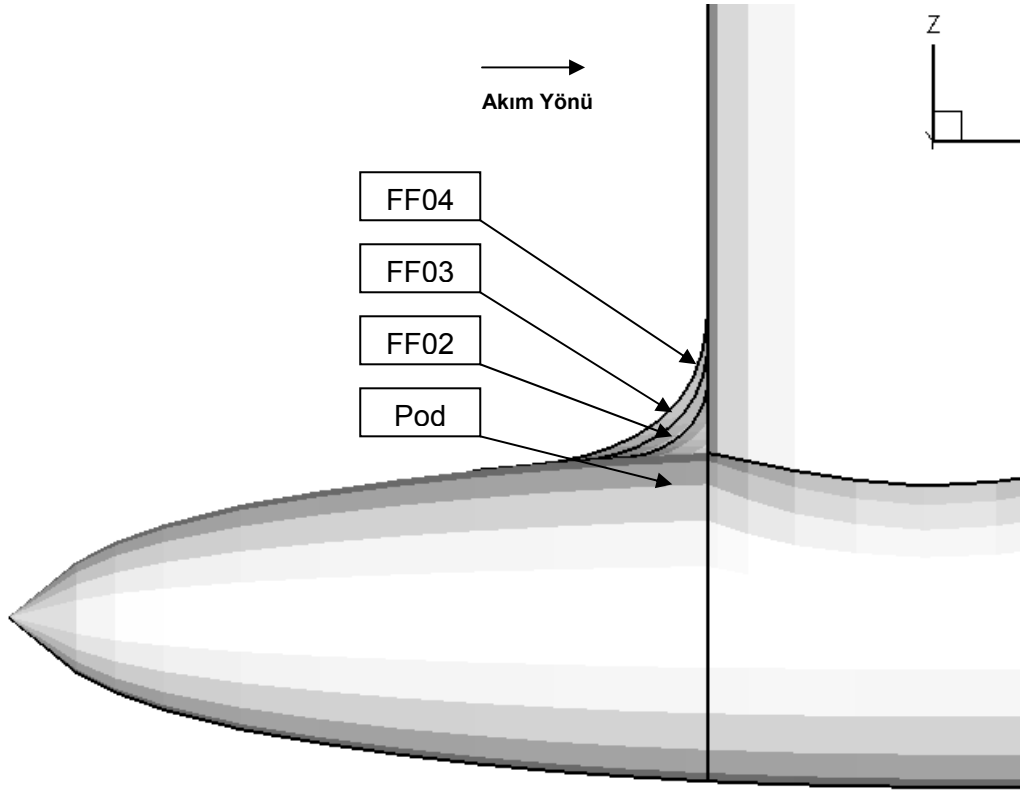
7.3.2 Baş Yuvarlatma Konulması

Kanat kesitli strut için baş bölgeye yuvarlatma konulması bu tez kapsamında akım ayrılması ve girdap oluşumunun incelenmesi için belirlenen birleşim seçeneğidir. Strut genişliği esas alınarak oluşturulan baş yuvarlatma formu sürekli bir NURBS yüzeyi olarak birleştirilmiştir. Baş yuvarlatma konularak yapılan deneysel çalışmalar incelenmiş ve yuvarlatma şeklinin sadece birleşim bölgesinde kullanıldığı görülmüştür (Barberis ve diğ., 1997; Devenport ve diğ., 1992). Düzgün bir geometrik yüzey elde etmek için baş yuvarlatma yarıçapının kesişim çizgisi boyunca değişken olması ve strutun en geniş kesitinde sıfır değeri alması gerekmektedir. Literatürde yer alan yuvarlatma şekillerinin daha çok uçak arka stabilizatör/dümen levhaları veya denizaltı kulesi gibi NACA 066 strut şekline göre görece daha küçük kesitlerde olduğu görülmektedir. Yukarıda açıklandığı gibi kanat kesitinin kalınlığı, yerleştirilebilecek en büyük yuvarlatma yarıçapını belirleyen etkindir. Podun elipsoid şekli ile NACA 066 kesitli strut için seçilen yuvarlatma yarıçapı ve yüzeye ait başlangıç ve bitiş değerleri Çizelge 7.2’de sunulmuştur.

Yapılan akış analizlerinde kullanılan Szantyr Podu ve üç farklı baş yuvarlatmalı pod Şekil 7.2’de sunulmuştur.

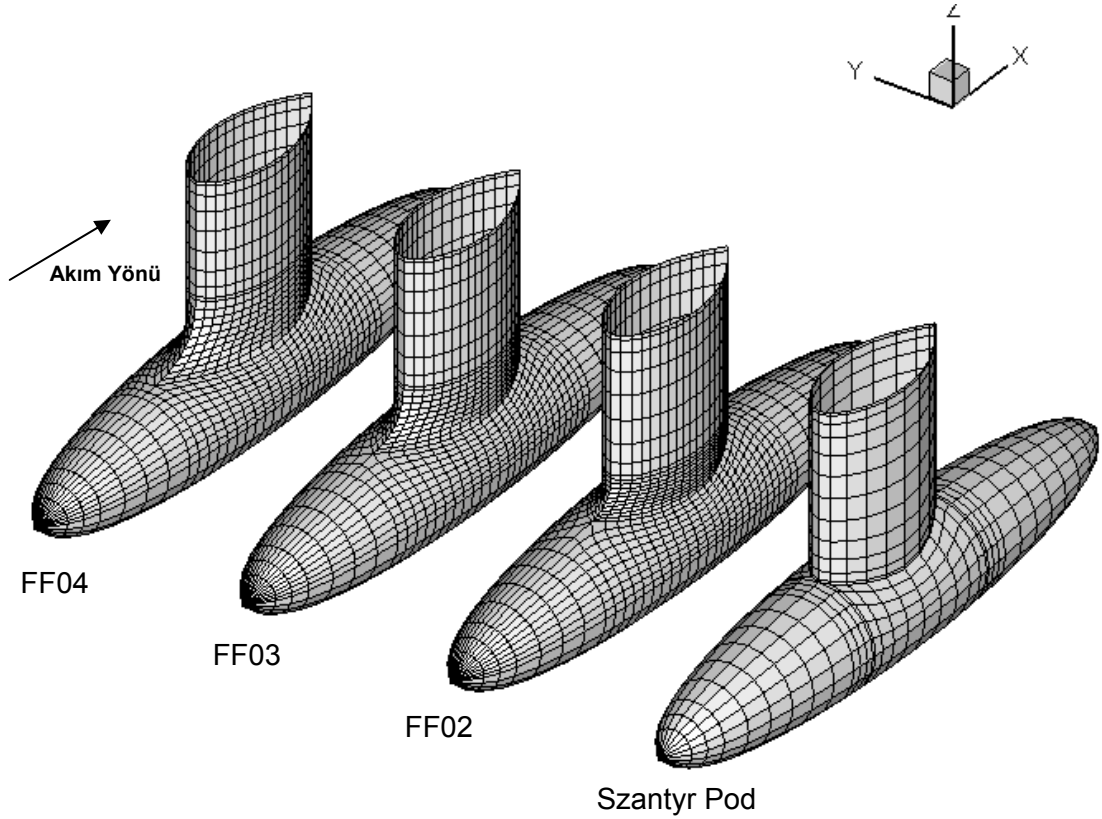
Çizelge 7.2 : Baş Yuvarlatma Pod/Strut Birleşim Yarıçapları.

Baş Yuvarlatma	Yarıçap [m]	Yuvarlatma Başı Koordinatı [m]	Yuvarlatma Sonu Koordinatı [m]	Kalınlık [m]
FF02	0.2	1.460	1.665	0.518
FF03	0.3	1.355	1.665	0.518
FF04	0.4	1.249	1.665	0.518



Şekil 7.2 : Birleştirme Yarıçaplarının Görünümü.

Farklı yarıçaplar için elde edilen yüzeyler ayrılaştırılmış ve VFLOW programında pod ve strut yüzeylerinde aynı sayıda panellere sahip modeller oluşturulmuştur. Birleştirilen yüzeyler haricindeki yüzey parçaları korunmuş ve yapılacak karşılaştırma çalışmalarında kullanılmak üzere eşdeğer bırakılmıştır. Szantyr Podu ve Çizelge 7.2'de geometrik özellikleri sunulan FF02, FF03 ve FF04 podları Şekil 7.3'de de gösterilmiştir.



Şekil 7.3 : Birleştirme Yarıçaplarının Görünümü.

Yapılan çalışmalarda, genel boyutları ile aynı olan ancak yüzey geometrisi değiştirilen podlar için bir tanımlama ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu noktada yapılan tanımlama, esas pod geometrisinde yapılan değişikliği de vurgulayacak şekilde baş yuvarlatma yarıçapları ile ilişkilendirilmiştir. Örneğin seçilen en büyük baş yuvarlatma yarıçapı $R=0.4$ metre olan pod strut modeli FF04 olarak adlandırılmıştır.

7.4 Karşılaştırmalı Analizler

Baş yuvarlatmalı podlar için bu çalışmada detayları daha önce açıklanan potansiyel ve viskoz akım yöntemleri kullanılarak analizler yapılmıştır. Giriş hızı pod boyu ile normalize edilebilmesi amacı ile x yönünde $V_x=4.53$ m/s olarak verilmiştir. Eşdeğer veriler ile yapılan simülasyonların sonucunda pod yüzeyindeki basınç dağılımı, simetri düzlemindeki basınç katsayısı ve atnalı girdabının oluşumu incelenmiştir. Her bir pod için birleşim bölgesindeki hız vektörleri ve akım hatları izlenerek geometri değişimi sonrasında atnalı girdabının varlığı araştırılmıştır.

5. Bölüm'de elde edilen sonuçlar irdelenerek atnalı girdabının oluşumunu etkileyen faktörler incelenmiştir. Konu hakkında literatürde verilen bilgiler doğrultusunda özellikle önder kenar birleşim bölgesindeki basınç değişiminin incelenmesine ağırlık verilmiştir.

Viskoz çözüm ile geometri değişiminin yukarıda belirtilen değişkenlere etkisinin irdelenmesi için 4 farklı model oluşturulup, bu modellerin analiz edilmesi gerekmektedir. Bahse konu süreç aynı modellerin panel metodu kullanılarak çözümüne göre oldukça uzun sürede yapılabilmektedir. Örnek bir süre karşılaştırma Çizelge 7.4'de verilmiştir. Ön tasarım faaliyetlerinin ekonomik sürede tamamlanabilmesi için potansiyel akım metodu kullanılarak çeşitli çaplardaki baş yuvarlatma eklenmesinin pod yüzeyindeki basınç dağılımına ve atnalı girdabının önlenmesine olan etkisi irdelenmiştir. Seçilen üç baş yuvarlatmalı pod için (FF02, FF03, FF04) viskoz çözümler de yapılmıştır. Bu bölümde elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

7.4.1 Potansiyel Akış Analizleri Sonucunda Dört Farklı Pod Üzerindeki Basınç Dağılımının Değişimi

Pod boyu ile normalize edilen giriş hızı ile VFLOW'da yapılan potansiyel akış analizlerinde pod yüzeyindeki basınç katsayıkonturları çizdirilmiştir. Dört farklı geometri için basınç katsayısının değişimi Şekil 7.4'de verilmiştir. Grafiklerde eşdeğer basınç katsayısı aralıkları kullanılmıştır. Şekil 7.4'de de görüleceği üzere Pod ile strut arasına eklenen yuvarlatma, strutun ön kısmında oluşan ters (adverse) basınç gradyenlerinin büyüklük ve yayılımını azaltmıştır. Şekil 7.5'de yuvarlatma eklenmemiş pod ve yuvarlatma eklenmiş podlara (FF02-FF03 ve FF04) ait basınç katsayısı dağılımı verilmiştir. Şekil 7.6 (a)'da yuvarlatma eklenmemiş pod ve Şekil 7.6 (b)'de FF04 ($R=0.4m$) yuvarlatma eklenmiş durumda strutın ön kısmındaki ve strut etrafında basınç katsayısı dağılımları verilmiştir.

Şekil 7.4, Şekil 7.5 ve Şekil 7.6'den görüleceği üzere yuvarlatma eklenmiş durumda, ters (adverse) basınç gradyenleri yuvarlatma olmayan duruma göre daha dar bir bölgede ve burna yakın kısımda gözlenmektedir. Yuvarlatma eklenmemiş ve eklenmiş durumlar için basınç katsayısının $X/T=0.61$ noktasından itibaren arttığı, bir başka deyişle ters basınç gradyenlerinin bu noktadan sonra gözlendiği görülmüştür. Çeşitli basınç katsayıları ve pod üzerine gözlendiği yerler Çizelge 7.3'de verilmiştir. Çizelge 7.3'den de görüleceği üzere yuvarlatma eklenmemiş pod için C_p değeri 0'dan 0.5'e $X/T=0.61$ ile $X/T=1.94$ arasında ulaşırken, FF04 için $X/T=0.61$ ile $X/T=1.79$ arasında ulaşmaktadır. Bir başka ifade ile ters (adverse) basınç gradyenleri yuvarlatma olmayan duruma göre daha küçük bir aralıkta gözlenmektedir.

Yuvarlatma yarıçapının bu azalmaya etkisi irdelendiğinde $R=0.2 m$ yarıçaplı yuvarlatmanın eklenmesi durumunda aralıkta oluşan fark 0.12 (X/T) mertebesinde

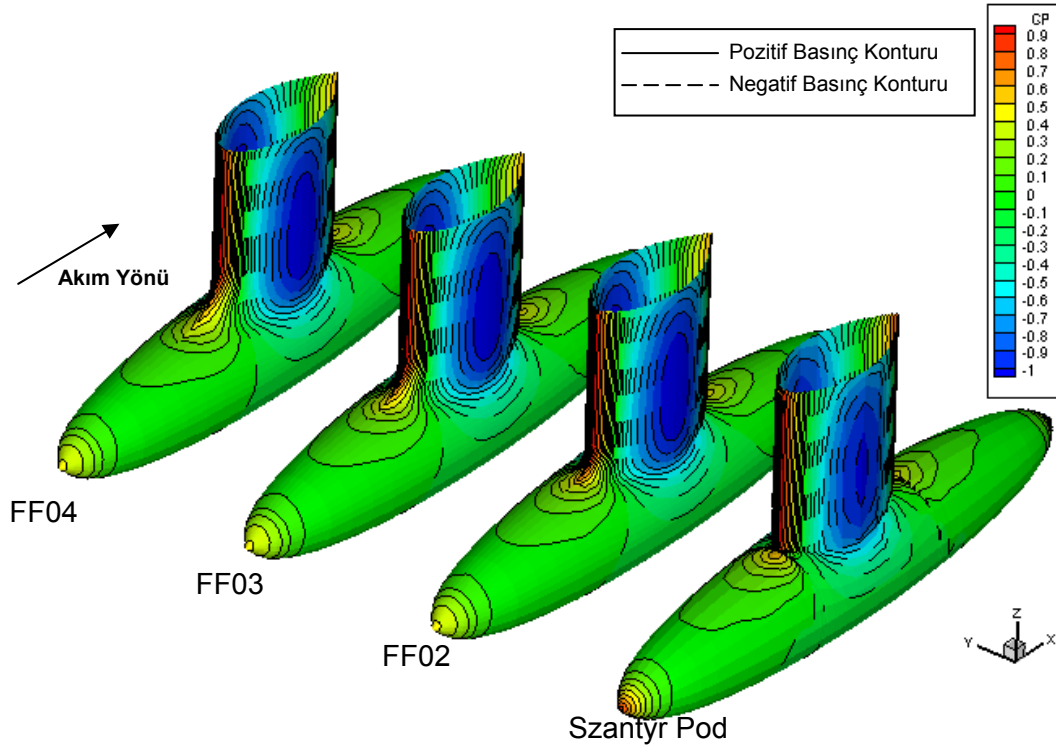
iken FF02 ile FF04 arasında oluşan fark 0.03 (X/T) mertebesinde olmaktadır. Sonuç olarak strutın ön kısmında ters (adverse) basınç gradyenlerinin gözlemlendiği aralığın azalmasıdaki en büyük etken yuvarlatmanın eklenmesidir. Yuvarlatma yarıçapının etkisi yuvarlatma eklenmesine oranla ikinci planda kalmaktadır.

Çizelge 7.3 : Basınç Katsayısı ve Pod Üzerinde Gözlemlendiği Yerler.

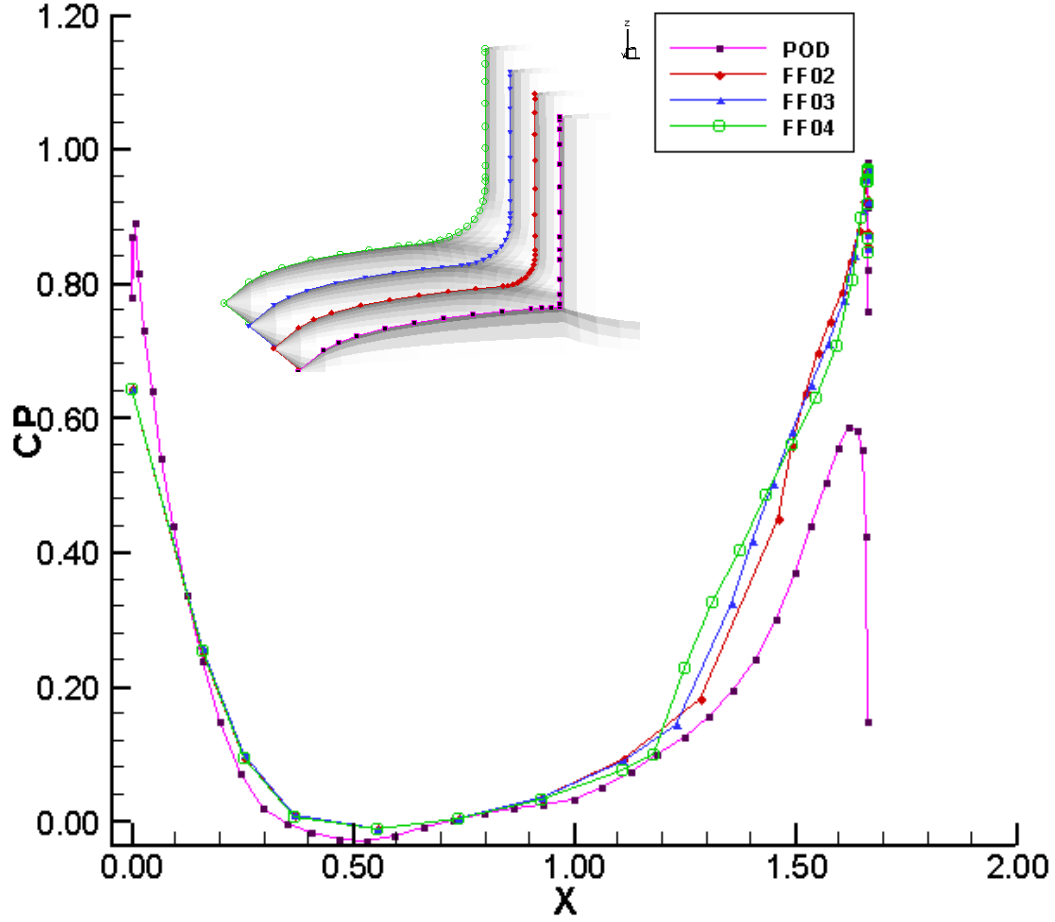
$C_p / (X/T)$	Szantyr Pod	FF02	FF03	FF04
0.00	0.61	0.61	0.61	0.61
0.20	1.69	1.60	1.57	1.52
0.30	1.79	1.68	1.65	1.60
0.40	1.87	1.76	1.72	1.69
0.50	1.94	1.82	1.79	1.79

Elde edilen sonuçların literatürde verilen deneysel sonuçlar ile de mertebe olarak uyumluluğundan bahsetmek mümkündür (Devenport ve diğ., 1992).

Podun baş bölgesinin (struta kadar olan kısmının) merkez kesitteki basınç değişimi Şekil 7.5’de verilmiştir. Orijinal pod üzerinde strut $x = 1.665$ m’den itibaren başlamaktadır ve çeşitli yuvarlatma yarıçapları için yuvarlatma başlangıç ve bitiş koordinatları ise Çizelge 7.2’de verilmiştir.



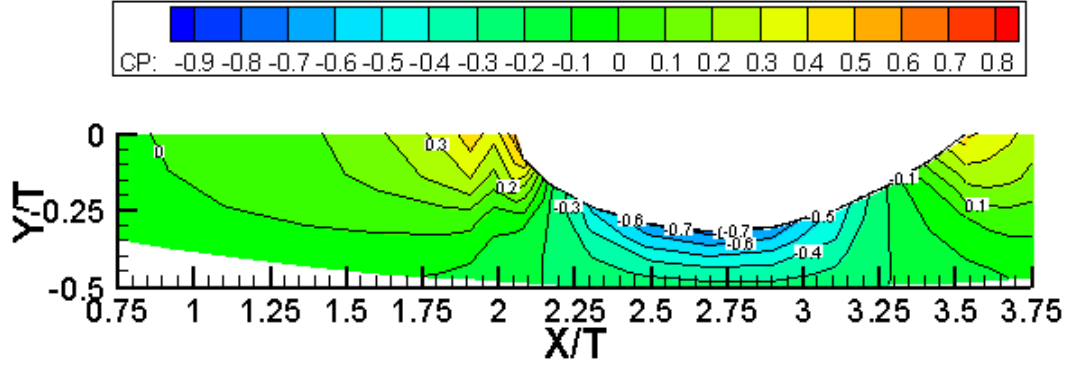
Şekil 7.4 : Szantyr Pod ve FF02–FF03 ve FF04 Pod Basınç Katsayısı Konturları.



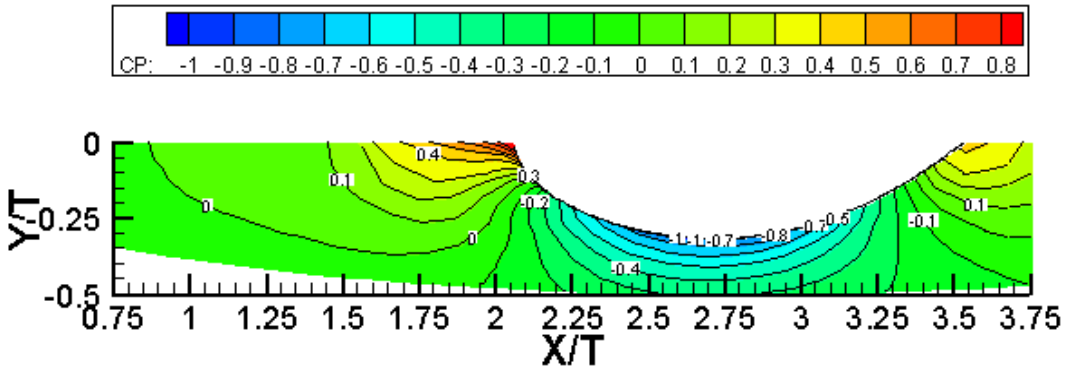
Şekil 7.5 : Szantyr Pod ve FF02-FF03 ve FF04 Pod Basınç Konturları.

Şekil 7.5'te sunulan grafikte, basınç katsayısı pod başından itibaren strütün başlangıç noktası olan $x=1.665$ m arasında çizdirilmiştir. Pod baş yüzeyinin merkez kesiti üzerinde (XZ düzleminde) basınç katsayısı, baş yuvarlatmaya sahip farklı podlar için değişiklik göstermektedir. En büyük yuvarlatmaya sahip FF04 podu üzerinde basınç daha geniş bir alanda değişmekte ve struta yaklaşıldıkça orijinal pod/strut bağlantısına göre daha yumuşak bir eğri ile tepe noktasına geldiği görülmektedir.

Şekil 7.6'da pod/strut birleşim bölgesinde basınç dağılımının değişimi daha belirgin olarak görülmektedir. İki pod yüzeyi üzerindeki basınç katsayısı konturların sıklığının farklı olduğu, orijinal pod üzerinde daha kısa bir mesafe aralığında basınç değişimi olduğu gözlenmektedir.



(a)



(b)

Şekil 7.6 : (a) Szantyr Pod Basınç Konturları (b) FF04 Pod Basınç Konturları.

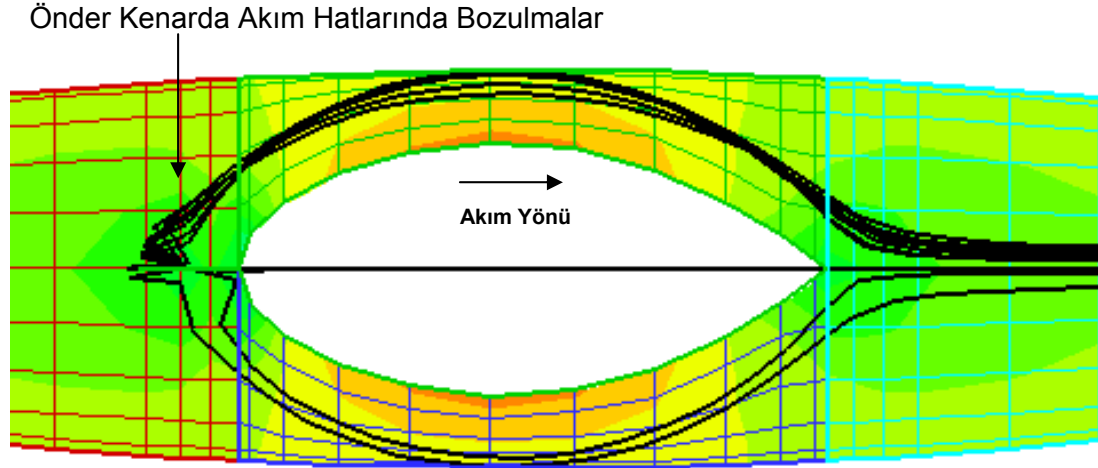
7.4.2 Atnalı Girdabının Oluşumu

Atnalı girdabının önder kenardaki durma noktasından itibaren negatif basınç bölgesinden pozitif basınç bölgesine geçilen mesafe ile ilişkili olduğu bilinmektedir (Fleming ve diğ., 1992). Bu kapsamda Devenport ve Simpson (1992) tarafından yapılan deneysel ölçümlerden baş bölgede sıfır konturunun görüldüğü yer ile kanat arkasında tekrar artmaya başlayan basınç hattı arasındaki mesafenin atnalı girdabını oluşumunda önemli bir etken olduğu bildirilmektedir. Birleşim bölgesine yuvarlatma eklenerek akımın yerel olarak hızlandırılması ile atnalı girdabının oluşumunun önlenildiği Devenport ve diğ. (1992) tarafından deneysel olarak gösterilmiştir.

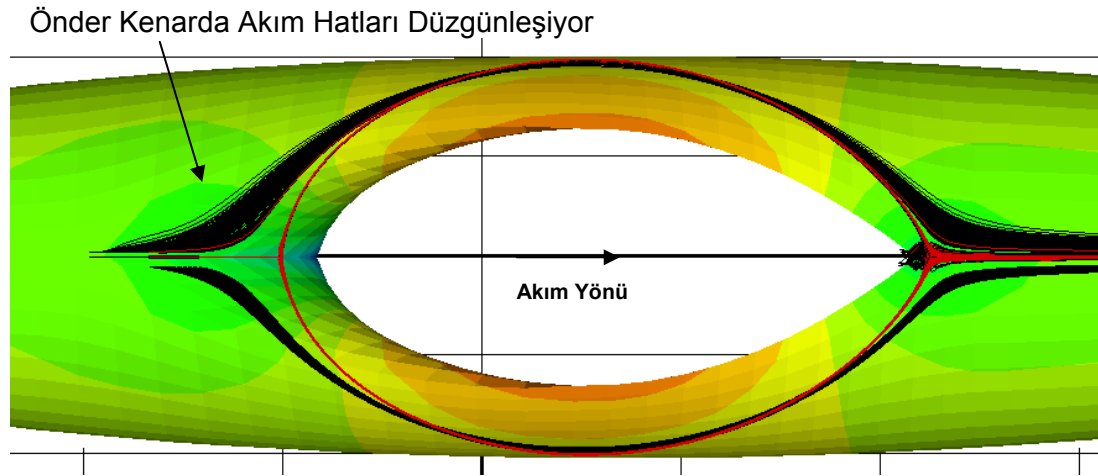
7.4.2.1 Potansiyel Çözümde Elde Edilen Sonuçlar

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda yuvarlatma eklenmiş podlarda panel metodu ile yapılan hesaplamalarda atnalı girdabının önüne geçildiği görülmüştür. Birleşim

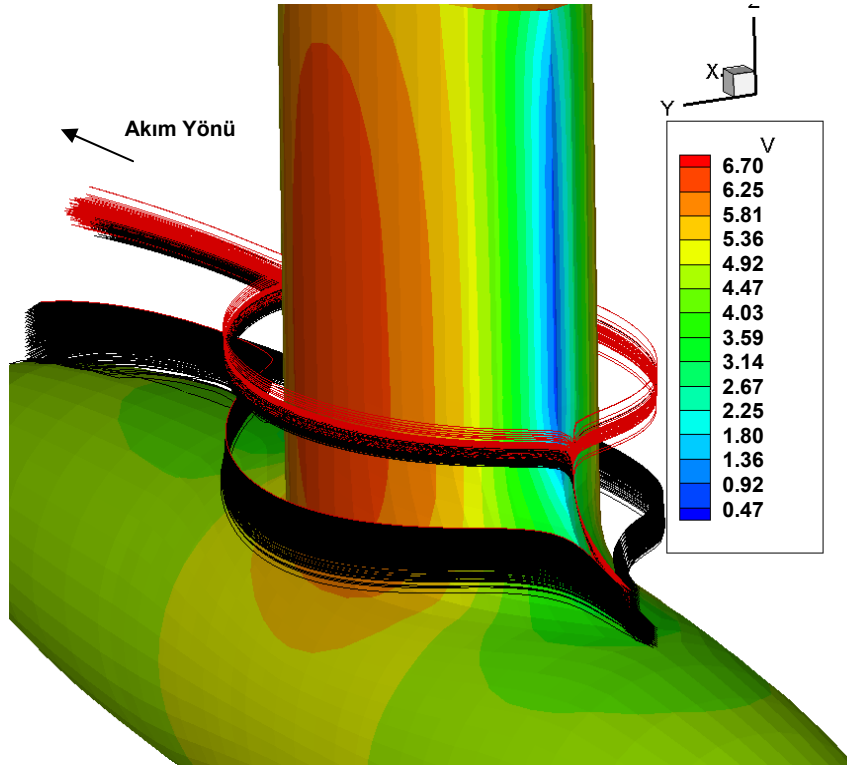
bölgesi civarında akım hatları bırakılarak atnalı girdabının oluşmadığı gösterilmiştir. Orijinal pod ve yuvarlatmalı FF04 pod için hesaplanan akım hatları Şekil 7.7, Şekil 7.8 ve Şekil 7.9’da sunulmuştur.



Şekil 7.7 : Orijinal Pod Önder Kenar Akım Hatları, Üstten Görünüş.



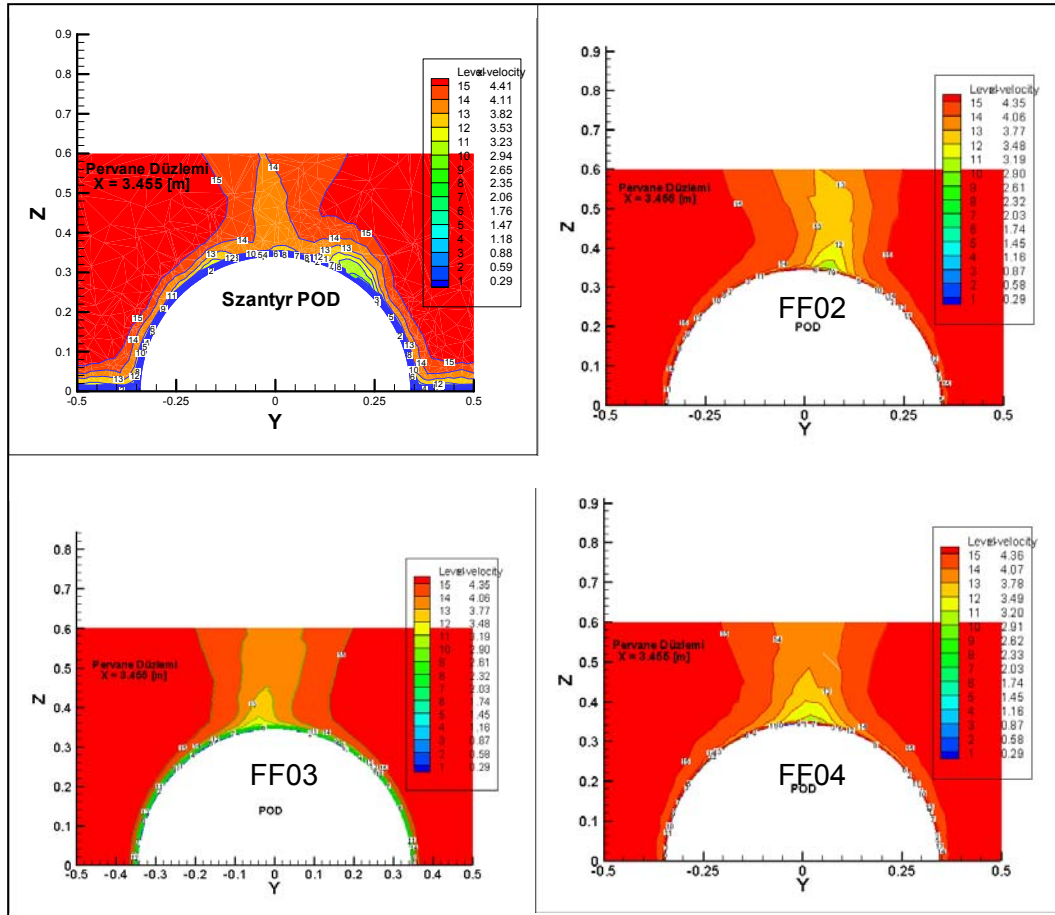
Şekil 7.8 : FF04 Önder Kenar Akım Hatları, Üstten Görünüş.



Şekil 7.9 : FF04 Önder Kenar Akım Hatları.

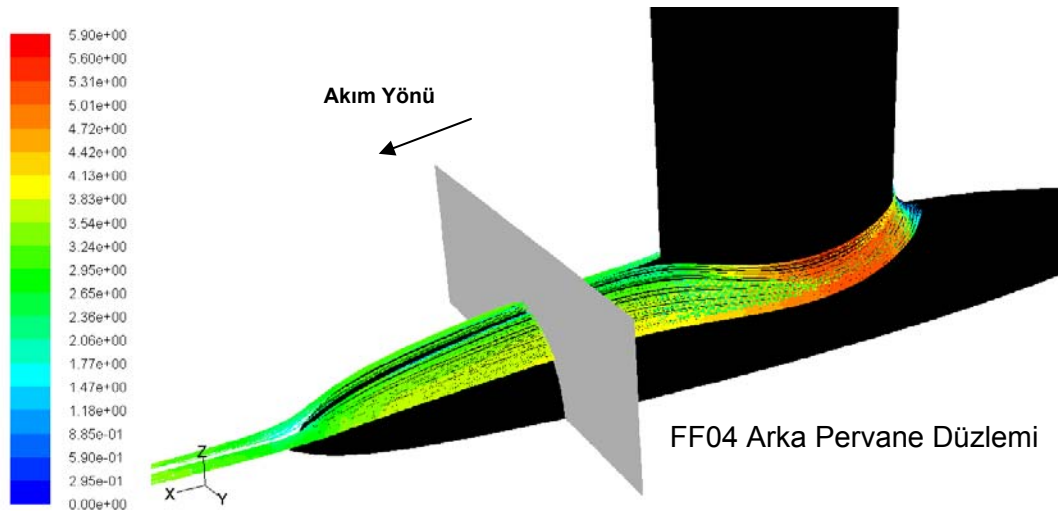
7.4.2.2 Viskoz Çözümde Elde Edilen Sonuçlar

Birleşim bölgesine yuvarlatma eklenerek akımın yerel olarak hızlandırılması ile atnalı girdabının oluşumunun engellendiği viskoz çözüm kullanılarak da gösterilmiştir. Şekil 7.11’de yuvarlatma eklenmemiş pod ve yuvarlatma eklenmiş podlara (FF02-FF03 ve FF04) ait arka pervane düzlemi hız dağılımı verilmiştir. Hız dağılımından da görüleceği üzere yuvarlatma eklendiğinde arka pervane düzleminde atnalı girdabı gözlenmemiştir. Elde edilen bu sonuç potansiyel akım ile elde edilen sonuçlar ile uyumludur.



Şekil 7.10 : Viskoz Çözümde Arka Pervane Hız Dağılımları ($x = 3.455$ m).

Şekil 7.10'da görüldüğü gibi, önder kenarda yuvarlatma eklenen podların arka pervane düzlemlerinde, atnalı girdabının etkisi görülmemektedir. Hız konturlarında gözlemlenen farklılık, strut arkasında ortaya çıkan izin etkisidir ve atnalı girdabı değildir.



Şekil 7.11 : Viskoz Çözümde FF04 Öner Kenar Akım Hatları.

7.5 Baş Yuvarlatma Eklenmesinin Hız Birleştirme Metodu ile İrdelenmesi

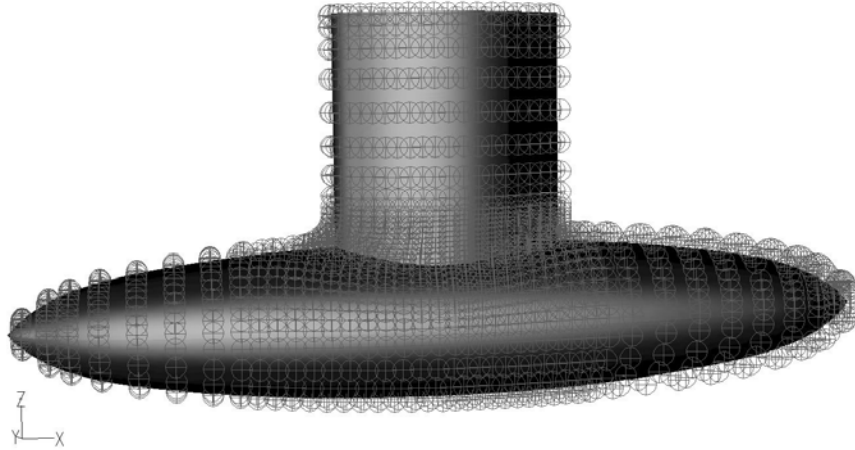
Dizayn değişiklikleri temel özellikleri belirlenen bir form için yerel seviyede yürütülen çalışmalardır. Gemi ve denizaltı tasarımında karşılaşılabilecek olası dizayn değişiklikleri, kontrol yüzeyleri veya dümenin yerleştirilmesi / tasarımı, takıntı gövde bağlantıları, takıntının kesitlerinin / şeklinin veya bağlantı açısının değiştirilmesi (sweep), yerel şekil değişiklikleri ve uç bölge (tip) değişiklikleri gibi örneklendirilebilir.

Yelkenli teknelerde salma veya yalpa sönmölendirici levhaların tasarımında birden fazla seçeneğin ön tasarım aşamasında incelenmesi ve akış hesaplarının yeni konfigürasyonlar için tekrarlanması söz konusu olabilmektedir. Bu tarz hesaplamaların çözüm süresi açısından hızlı ve güvenilir bir yaklaşım ile örneğin viskoz etkilerin ithal edilerek potansiyel metotla (hız birleştirme metodu) yürütülmesinin, bir ön tasarım aracı olarak kullanılması düşünülebilir.

NACA 066 kesitli strut eklenmiş Szantyr Pod için potansiyel metotla yapılan analizler 3. Bölümde, aynı geometri için viskoz çözüm kullanılarak yapılan çözümler ise 4. Bölümde anlatılmıştır. Bu bölümde ise 4. Bölümde elde edilmiş olan viskoz hızlar, $R=0.2$ m yarıçapında baş yuvarlatma eklenmiş poda (FF02) detayları 6. Bölümde anlatılmış olan hız birleştirme metodu kullanılarak eklenmiştir.

Baş yuvarlatma eklenerek yapılan dizayn değişikliği orijinal pod geometrisinden türetilmiş olmakla birlikte birleşim bölgesi geometrisi değiştirilmiş farklı bir pod modelidir. Söz konusu iki pod modeli arasındaki tek fark yuvarlatma bölgesi panelleridir. Paneller arasındaki farklılık nedeni ile önerilen hız birleştirme yaklaşımında orijinal geometri için yapılan viskoz çözümdeki hızlar kısmen kullanılmaktadır. Hız birleştirmesinde, her iki pod modelinin de geometrik olarak aynı olduğu baş yuvarlatma bölgesi haricindeki viskoz hızlar kullanılmıştır.

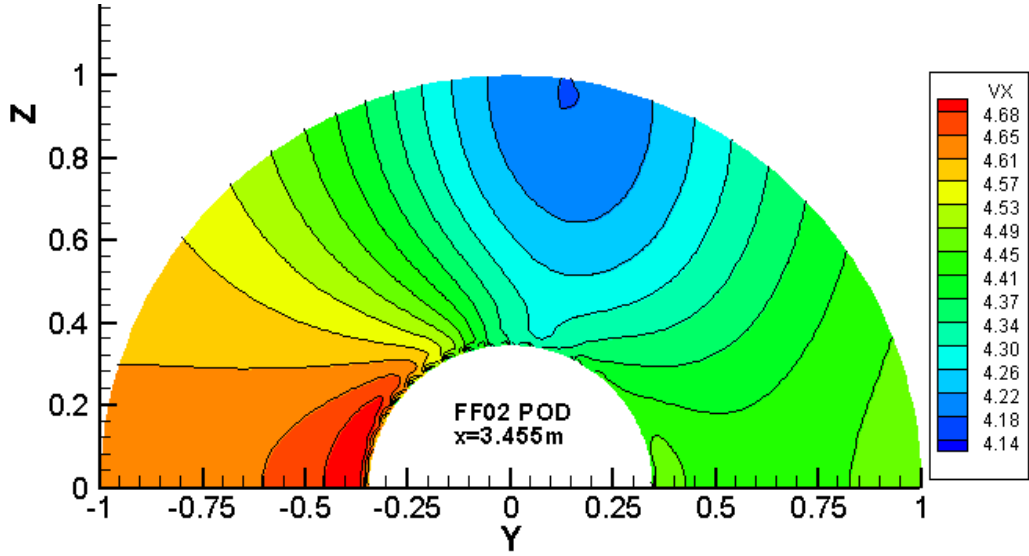
Burada yapılan çalışma ile baş yuvarlatması yapılmamış pod etrafından alınan viskoz hızlar baş yuvarlatması yapılan FF02 pod modeline eklenmiş ve böylece viskoz hız etkisinin geometri değişikliği yapılması amacı ile kullanılabilirliği gösterilmiştir. Viskoz çözümde pod/strut yüzeyine yakın bölgede yerel hızların alınması amacı ile oluşturulan nokta bulutu Şekil 7.12'de gösterilmiştir. Oluşturulan nokta bulutu dizayn değişikliği yapılan FF02 podu için tanımlanmıştır.



Şekil 7.12 : Pod Üzerinde FF02 Podu için Oluşturulan Nokta Bulutu.

6. Bölümde açıklandığı gibi birleştirilmiş metot kullanılarak her iki pod modelinin geometrik olarak aynı olduğu bölgelerde FF02 podu için yapılan yüzey ayrıklaştırmasında tanımlanan paneller/panel merkezleri için viskoz çözümdeki yerel hızları ithal etmek mümkündür. Yuvarlatma bölgesi panelleri üzerinde sınır şartı değişikliği ile eklenen viskoz hızlar tanımlanmamıştır. Hız birleştirilmesinin yapıldığı nihai hesaplamada bu paneller, viskoz hız etkisi yansıtılmış diğer paneller ile etkileşmektedir, diğer bir deyişle viskoz etkileri taşımaktadır.

Orijinal pod için mevcut viskoz çözümden ithal edilen hızlar atnalı girdabının etkisini taşıdığı halde, dizayn değişikliği içeren yeni çözümde atnalı girdabının yok olduğu görülmektedir. Bu da geliştirilen hız birleştirme metodunun potansiyel çözüme viskoz hızların eklenmesi konusunda başarılı olduğunun göstergesi olarak kabul edilebilir. Şekil 6.30'da hız birleştirilmesi sonrasında pod boyunca 3.455 m mesafede tanımlanan arka pervane düzleminde atnalı girdabının oluştuğu gösterilmiştir. Dizayn değişikliği yapılan ve viskoz hızlar eklenerek çözülen FF02 podunun arka pervane düzlemindeki hız dağılımı ise Şekil 7.13'de gösterilmiştir. Pervane düzlemi üzerindeki hız dağılımında atnalı girdabı etkisi görülmemektedir. Viskoz hızlar zamana bağlı çözümden elde edildiğinden yerel seviyede hız farklılıkları görülmektedir. Şekil 7.13'de verilen hız dağılımında bu farkların etkisi de simetri farkları şeklinde gözlenmektedir.



Şekil 7.13 : Hız Birleştirme Metodu ile FF02 için Elde Edilen Sonuçlar.

Akım içerisindeki cismin viskoz çözümü için yapılması gereken işlem adımları 4. Bölümde verilmiştir. Kabul edilebilir bir viskoz çözüm için gerekli olan ağ yapısı düşünüldüğünde panel metotlarına nazaran oldukça fazla noktada hesaplama yapılmış ve yerel hızlar elde edilmiştir. Dizayn değişikliği amacı ile potansiyel hesapta oluşturulan panel sayısı artırılarak yüzeyin daha hassas olarak modellenmesi mümkündür. Yapılacak şekil değişikliği sonrasında viskoz akım etkisi altındaki panel sayısı yüksek tutularak yapılan şekil değişikliğinin daha hassas olarak modellenmesi denenebilir. FF02 örneğinde birleşim bölgesinde tanımlanan ve dolayısı ile hız ilavesi yapılmayan yuvarlatma bölgesi panelleri, toplam panel sayısının % 10 mertebesinde tutulmuştur.

Sonuç olarak geliştirilen bu metot ile bir defa viskoz çözüm yapılarak elde edilmiş viskoz hızlar kullanılarak, yapılacak geometri değişikliği etkilerinin ön değerlendirmesinin, viskoz etkileri mümkün mertebe koruyarak yapılabilmesi mümkündür. Metodun en önemli avantajı çözüm süresinin kısa olmasıdır. Yine bu doktora çalışması kapsamında geliştirilen bir alt rutinle VFLOW programından elde edilen sonuçların görselleştirilmesi de sağlandığı için sonuçların görsel bir şekilde irdelenmesi de bir diğer avantajdır. Örnek olarak bu FF02 tasarım değişikliği uygulaması için kullanılan çözüm yöntemleri ve çözüm sürelerinin karşılaştırılması Çizelge 7.4’de verilmiştir. Çözüm sürelerinin sağlıklı bir şekilde karşılaştırılabilmesi için Çizelge 7.4’de tüm metotlar için kullanıcıya bağlı süreler olan, geometri değişikliği için girdi dosyası oluşturma süreleri dikkate alınmamıştır. Görüleceği üzere geliştirilen yöntem viskoz akıma kıyasla çözüm süresini oldukça

azaltmaktadır. Bu nedenle bir ön tasarım aracı olarak kullanılmasının uygun olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 7.4 : Çözüm Metotları ve Sürelerinin Karşılaştırılması.

Hesap Metodu	Süre (s)
Panel	120
Viskoz	2 600 000
Hız Birleştirme	180

7.6 Sonuç

Farklı pod/strut birleşim şekillerinin atnalı girdabına etkisi potansiyel ve viskoz akım ve hız birleştirme metotları kullanılarak irdelenmiştir. Yuvarlatma eklenmiş durumda, ters (adverse) basınç gradyenleri yuvarlatma olmayan duruma göre daha dar bir bölgede gözlenmektedir. Yuvarlatma yarıçapının etkisi yuvarlatma eklenmesine göre ikinci planda kalmaktadır.

Yapılan irdelemeler sonucunda; küçük/sınırlı geometri değişikliklerinin viskoz analiz sonuçlarında hissedilebilir değişikliklere yol açmayacağı kabulünden hareketle hız birleştirme yönteminin sınırlı geometrik değişiklikler içeren dizayn çalışmalarında başarı ile kullanılabileceği ve üstelik bu yaklaşımın çok daha ekonomik olduğu ortaya çıkmaktadır.

8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında pod ve strut etrafındaki akım potansiyel ve viskoz akım hesap yöntemleri kullanılarak incelenmiş ve yüzey etrafındaki akım özellikleri her iki çözücü ile hesaplanmıştır. Viskoz çözümdeki cidara yakın bölgedeki yerel hızlar, potansiyel çözümdeki sınır şartları güncellenerek hesaba dahil edilmiştir. Diğer bir deyişle, viskoz ve potansiyel akım hesap yöntemlerinin birleştirilerek kullanılmasına dayanan bir ön tasarım yaklaşımı geliştirilmiştir. Önerilen yaklaşım sınır tabaka etkilerini esas alan potansiyel akım çözümü ile hızlı ve güvenilir bir yaklaşım geliştirilmesini kapsamaktadır.

Geliştirilen ara rutinler kullanılarak VFLOW ve FLUENT aynı geometri ve hız koşullarında çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar kullanarak hız birleşimi sağlanmıştır. Böylece Reynolds sayısı, deplasman kalınlığı gibi değişkenler bir dosyaya yazdırılarak hesabın doğruluğu ve akış özellikleri hakkındaki yerel bilgiler izlenebilir hale getirilmiştir.

Birleştirme sonrası pervane düzlemindeki hız konturu, basınç katsayısının dağılımı, akım hatları ve atnalı girdabının varlığı araştırılmıştır. Atnalı girdabının ortadan kaldırılması için Pod/Strut birleşiminde akımın durmasının önüne geçecek geometri değişiminin yapılması gerektiği görülmüş ve atnalı girdabının etkilerinin azaltılacağı yeni bir geometri önerilmiştir. Her aşamada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Birim küre ve pod için panel metodu (VFLOW) ile elde edilen akım özellikleri ve basınç katsayısı dağılımlarının literatürde verilen değerlerle mertebe olarak uyumlu olduğu görülmüştür.
- FLUENT programında zamana bağlı çözüm yapılmış ve çözümde sayısal yakınsamanın yanında fiziksel büyüklüklerin yakınsaması izlenmiştir. 0.1 zaman adım ile 75 s süren viskoz simülasyonlarda her bir model için 45 000 iterasyon yapılmıştır. Sayısal değerlerin yanında akım ile ilgili fiziksel bir değerin izlenmesi gerekmektedir. Toplam çözüm süresi içerisinde direnç katsayısının yakınsadığı ve yüzey üzerindeki basınç dağılımının potansiyel akış programının sonuçları ile benzer çıktığı görülmüştür.

- Pod/Strut birleşiminde önder kenar akım ayrılması hakkında potansiyel ve viskoz akım simülasyonları, atnalı girdabının varlığını ortaya koymuştur. Simetri düzlemindeki hız vektörleri ve önder kenardan bırakılan akım hatları, girdabın şeklini ve pod boyunca ilerleyişini açıkça göstermiştir.
- Köşe bölgesinde girdabın oluşmasında en temel etkenin basınç gradyenleri olduğu görülmüştür.
- Bu bölgedeki girdaplı akım cismin şekli ve dolayısı ile basınç değişimi ile yönlenen bir akımdır. Viskoz etkiler ayrılmanın yeri ve doğru modellenmesi ile ilgili önemli bir diğer etkindir. Bu nedenle pod/strut geometrisi için atnalı girdabının modellenmesinde potansiyel çözüm ve viskoz çözümü birleştiren her iki faktörün de kullanılacağı bir yaklaşımın ortaya konulması gerekliliği görülmüştür.
- Viskoz hızların eklenmesi sonrasında elde edilen sonuçlar birleşim bölgesinde atnalı girdabının oluşumunu açıkça ortaya koymaktadır. Basınç gradyenlerinin etkisi ile ortaya çıkan atnalı girdabı, viskoz akım özellikleri de ithal edilerek birleşik bir yöntem ile çözülmüştür.
- Bu doktora tezi kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda, bu tez çalışmasında geliştirilen birleştirilmiş çözüm yönteminin iyi bir ön tasarım aracı olarak kullanılabileceği görülmüştür.
- Atnalı girdabının ortadan kaldırılması için Pod/Strut birleşiminde akımın durmasının önüne geçecek geometri değişiminin yapılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Birleşim bölgesi geometrisinin değiştirilmesi ile bu bölgedeki basınç dağılımı değiştirilerek akımın hızlandırılmasının sağlanabileceği öngörülmüştür.
- Geometri değişiminin atnalı girdabının oluşumuna etkisinin irdelenmesi için farklı modeller oluşturulup, bu modellerin oluşturulması gerektiği görülmüştür. Ön tasarım faaliyetlerinin ekonomik sürede tamamlanabilmesi için potansiyel akım metodu kullanılarak çeşitli yarıçaplardaki baş yuvarlatma eklenmesinin pod yüzeyindeki basınç dağılımına ve atnalı girdabının önlenmesine olan etkisi irdelenmiştir.
- Elde edilen sonuçlardan görülebileceği üzere pod ile strut arasına eklenen yuvarlatmanın, strutun ön kısmında oluşan ters (adverse) basınç gradyenlerinin büyüklük ve yayılımını azaltarak önder kenar akım ayrılmasını ortadan kaldırdığı gözlemlenmiştir. Yuvarlatma eklenmiş durumda, ters

(adverse) basınç gradyenlerinin yuvarlatma olmayan duruma göre daha dar bir bölgede ve burna yakın kısımda gözlemlendiği görülmüştür.

- Viskoz metotla yapılan çözümler ile yuvarlatma eklenmemiş pod ve yuvarlatma eklenmiş podlara (FF02-FF03 ve FF04) ait arka pervane düzlemi hız dağılımı incelenmiştir. Hız dağılımından da görüleceği üzere yuvarlatma eklendiğinde arka pervane düzleminde atnalı girdabı gözlenmemiştir. Elde edilen bu sonuç potansiyel akım ile elde edilen sonuçlar ile uyumludur.
- Yuvarlatma eklenmemiş ve eklenmiş durumlar için basınç katsayısının $X/T=0.61$ noktasından itibaren arttığı, bir başka deyişle ters basınç gradyenlerinin bu noktadan sonra gözlemlendiği görülmüştür. Çeşitli basınç katsayıları ve pod üzerine gözlemlendiği yerler incelendiğinde yuvarlatma eklenmemiş pod için C_p değeri 0'dan 0.5'e $X/T=0.61$ ile $X/T=1.94$ arasında ulaşırken, FF04 için $X/T=0.61$ ile $X/T=1.79$ arasında ulaşmakta olduğu görülmüştür.
- Yuvarlatma yarıçapının bu azalmaya etkisi irdelendiğinde $R=0.2$ m yarıçaplı yuvarlatmanın eklenmesi durumunda aralıkta oluşan fark 0.12 (X/T) mertebesinde iken FF02 ile FF04 arasında oluşan fark 0.03 (X/T) mertebesinde olmaktadır. Sonuç olarak strütin ön kısmında adverse (ters) basınç gradyenlerinin gözlemlendiği aralığın azalmasıdaki en büyük etken yuvarlatmanın eklenmesidir. Yuvarlatma yarıçapının etkisi yuvarlatma eklenmesine oranla ikinci planda kalmaktadır.

8.1 Öneriler

Elde edilen sonuçlar ile hız birleşimine dayalı hibrid bir sayısal yöntem önerilmiştir. Bu yöntem önerisinin mühendislik açıdan en büyük avantajı, yaygınlaşmakta olan viskoz hesap yöntemlerinin kullanımındaki görece uzun hesaplama sürelerini asgari seviyeye indirecek, dizayn değişikliklerinin hızlı ve pratik olarak yapılabilmesine imkan verecek bir yaklaşım getirilmesidir.

Form dizaynı çalışmalarında, yerel seviyedeki değişikliklerin yapılabilmesi için temel akış özellikleri bir defa viskoz çözümden elde edilmiş olan problemde, viskozite etkileri mümkün mertebe korunurken hızlı bir hesaplama imkanı kazanılabilecektir. Potansiyel çözümde yüzey panel sayısı artırılarak daha geniş viskoz veri kümesi kullanılabilir. Böylelikle istenen hassasiyetin yakalanması mümkün olabilecektir.

Podlu itme sistemi etrafındaki akımın incelendiği böyle bir hesapta pod/strut geometrisinin pervane ile birlikte hesaba dahil edilmesi önemli bir adım olacaktır. Birbirleri üzerine indüklenecek hızların hesaba katılması ile pod etrafındaki akım daha hassas bir şekilde modellenenecektir. Ardışık bir şekilde pod, strut ve pervane çözülerek belirli bir yakınsama kriterine kadar hesap devam ettirilebilir. Bir aşama sonrasında gemi yüzeyi de modele dahil edilerek daha detaylı analizlerin yapılması mümkün olabilir.

Yapılan geometri değişiminde hazır modellerin karşılaştırılması yerine, birleşim bölgesindeki yüzey parçasının parametrik yüzeyler ile ifade edilmesi ve pervane düzlemine konulacak bir iz kriterine göre iteratif bir şekilde form değişikliği yapılarak en uygun yüzeyin aranması gelecekte yapılabilecek önemli çalışmalar arasındadır. Pod/strut birleşim bölgesinin NURBS yüzeyleri ile tarif edilmesi ve hesap içerisinde yüzeylerin değiştirilmesi form dizaynı açısından anlamlı bir yaklaşım olacaktır. Böyle bir hesapta viskoz etkilerin hesaba dahil edilmesi halihazırda önerilen yaklaşım ile yapılabilecektir.

Optimizasyon şeması içerisinde uygun kesitlerin veya yüzey parçalarının aranması, kanat/gövde, takıntı/tekne veya pod/strut birleşimlerindeki en iyi geometrilerin sayısal hesap yöntemi ile aranması / bulunması gibi konular gelecekte odaklanılması öngörülen çalışma konuları arasındadır.

KAYNAKLAR

- Alin N., Fureby C.**, 2008. Large Eddy Simulation of Junction Vortex Flows, *Proceeding of 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 1-13.
- Anderson, J.D.**, 1985. *Fundamentals of Aerodynamics*, McGraw-Hill Higher Education, New York.
- Andoh M., Motosuke M., Honami S.**, 2009. Interaction of Longitudinal Vortex with Horseshoe Vortex – Configuration Effect of Longitudinal Vortex, *Proceeding of 39th AIAA Fluid Dynamic Conference*, 1-8.
- Atlar, M. (ed.)**, 2004. First International Conference on Technological Advances in Podded Propulsion. School of Marine Science and Technology, University of Newcastle, UK.
- Atlar, M., Allema, J.H., Ishikawa, S., Kim, S-E., Liu, P., Traverso, A., Sanchez-Caja, A., Sasaki, N.**, 2005. The Specialist Committee on Azimuthing Podded Propulsion, Final Report and Recommendations to the 24th ITTC, 24th ITTC Edinburgh vol.2, pp543-600, Edinburgh, UK.
- Bal Ş., Güner B.**, 2009. Performance Analysis of Podded Propulsors, *Ocean Engineering*, 36, 556-563.
- Ball W.**, 2004. Model Free Maneuvering in Calm Water by Partially Azimuthing Podded Drive, *International Journal of Maritime Engineering*, RINA, UK.
- Barberis D., Molton P., Malaterre T.**, 1997. Control of 3D Turbulent Boundary Layer Separation Caused by a Wing-Body Junction, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 16, 54-63.
- Barger R.L., Adams M.S.**, 1993. Automatic Computation of Wing-Fuselage Intersection Lines and Fillet Inserts With Fixed Area Constraint, NASA Technical Memorandum 4406, 1-17.
- Bertram, V.**, 2000. *Practical Ship Hydrodynamics*, Butterworth&Heinemann, Oxford.
- Bezier, P.**, 1966. *Definition Numerique des Courbes et Surfaces I*, Automatisme, XI, 625-632.
- Blazek, J.**, 2001. *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*, Elsevier Science, Oxford.
- Blenkey, N.**, 1997. Getting Twin Propeller Efficiency from a Pod: Marine Log.
- Billard, J.Y. (ed.)**, 2006. The 2nd International Conference on Technological Advances in Podded Propulsion, Brest, France.
- Bindiganavle, K.**, 2000. An Optimal Approach for Geometric Trimming of B-Spline Surfaces, MS Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University Mechanical Engineering Department.

- Chylek T., Balakrishnan L., Tiwari S. N.,** 1996. Investigation of Turbulent Separation at Wing-Body Junction Using Non-linear k-epsilon Turbulence Model, *Proceeding of 34th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 1-12.
- Crawford D., Borme A., Rahai H.Y.,** 1992. Turbulent Flow in the Wake of an Idealized Wing Body Junction, *Proceeding of 30th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 1-8.
- Devenport, W.J, Agarwal, N.K, Dewitz, M.B, Simpson, R.L, Poddar, K.,** 1990. Effects of a fillet on the Flow Past a Wing-Body Junction, *AIAA Journal* 28, 2017-2023.
- Devenport, W.J, Simpson, R.L, Dewitz, M.B, Agarwal, N.K,** 1992. Effects of a Leading-Edge Fillet on the Flow Past an Appendage-Body Junction, *AIAA Journal* 30, 2177-2183.
- Devenport, W.J, Simpson, R.L,** 1992. Flow Past a Wing-Body Junction – Experimental Evaluation of Turbulence Models, *AIAA Journal* 30, 873-881.
- East L.F., Hoxey R.P.,** 1968. Boundary Layer Effects In An Idealized Wing-Body Junction At Low Speed, Technical Report, Royal Aircraft Establishment.
- Faltinsen, O.M,** 2005. *Hydrodynamics of High Speed Marine Vehicles*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Flaszynski, P., Szantyr, J., Dymarski, P., Kraskowski, M.,** 2009. Numerical Prediction of Vortex Generated by Hydrofoil, First International Symposium on Marine Propulsors, SMP'09, Trondheim, NORWAY.
- Fluent 6.3 User's Guide,** 2006
- Fleming, J.L., Simpson, R.L, Devenport, W.J.,** 1992. An Experimental Study of a Turbulent Wing-Body Junction and Wake Flow, *AIAA 30th Aerospace Sciences Meeting*, 1-12.
- Fu S., Xiao Z., Chen H. , Zhang Y., Huang J.,** 2007. Simulation of Wing-Body Junction Flows with Hybrid RANS/LES Methods, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28, 1379-1390.
- Ghassemi, H., Allievi, A.,** 1999. A Computational Method for the Analysis of Fluid Flow and Hydrodynamic Performance of Conventional and Podded Propulsion Systems, *Oceanic Engineering International* 3(1), 101-115.
- Gorski J. J., Govindan T. R., Lakshminarayana B.,** 1985. Computation of Three-Dimensional Turbulent Shear Flows in Corners, *AIAA Journal* 23, 685-692.
- Goubault, P. and Pérrée, J.,** 2004. Parametric investigations designed to help focused pod technology development, Proceedings of the 1st International Conference on Technological Advances in Podded Propulsion, Newcastle University, UK.
- Granville, P. S,** 1953. The Calculation of the Viscous Drag of Bodies of Revolution, DTMB Technical Report No 849, Washington, USA.
- Gupta A.,** 2004. Numerical Prediction of Flows around Podded Propulsors, Ocean Engineering Group Report No: 04-6, The University of Texas at Austin, USA.

- Hess, J.L., Smith, A.M.O,** 1972. Calculation of Potential Flow About Arbitrary Three-Dimensional Lifting Bodies, Final Technical Report No MDC J5679-01, California, USA.
- Hodge, C.G. and Mattick, D.J.,** 2008. The Electric Warship Then, Now and Later, Proceedings of the International Naval Engineering Conference, Hamburg, Germany.
- Islam M. F., He M., Veitch B., Bose N.,Liu P.,** 2006. Hydrodynamic study of podded propulsors with systematically varied geometry. Proceedings of the 2nd International Conference on Technological Advances in Podded Propulsion, Brest, France.
- Issa, R.I.,** 1986. Solution of the Implicitly Discretized Fluid Flow Equations by Operator Splitting, *Journal of Computational Physics*, 62 (1), 40-45.
- Jane, K. C.,** 1990. Description of BMTI's Lifting and Non-Lifting Potential Flow System, BMTI Technical Report No SL.P1.002, Arlington, USA.
- Johnson M.J., Ravindra K., Andres R.,** 1994. Comparative Study of the Elimination of the Wing Fuselage Junction Vortex by Boundary Layer Suction and Blowing, Proceeding of 32nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1-8.
- Kafalı K.,** 1967. A Linearised Method for Calculating the Pressure Distribution of Thin Segmental Sections, *İTÜ Gemi Enstitüsü Bülteni No 20*, İstanbul.
- Kairouz K., Rahai H. R.,** 2002. Turbulent Junction Vortex with Upstream Ribbed Surface, Proceedings of 20th AIAA Applied Aerodynamics Conference, 1-11.
- Katz, J., Plotkin, A.,** 2001. *Low Speed Aerodynamics Second Edition*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Kubendran, L.R., Bar-Sever, A., Harvey, W.D.,** 1988. Flow Control in a Wing/Fuselage Type Juncture," AIAA 26th Aerospace Sciences Meeting , AIAA Makale No 88-0614.
- Lamb, H.,** 1932. *Hydrodynamics, Sixth Edition*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Lewis D.J, Simpson, R. L., Diller, T.L.,** 1993. Time Resolved Surface Heat Flux Measurements in the Wing/Body Junction Vortex, Proceeding of 31st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit,1-14.
- Lugt H.J.,** 1981. Numerical Modeling of Vortex Flows in Ship Hydrodynamics, a Review, Proceedings of Third International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, 297-316, Paris.
- Menter, F.R,** 1993. Zonal Two Equation k- ω Turbulence Models for Aerodynamic Flows, AIAA Paper 93-2906.
- Molland, A.F., Turnock, S. R.,** 2007. *Marine Rudders and Control Surfaces*, Butterworth&Heinemann, Oxford.
- Molloy, S., Veitch B., Bose N., Taylor, R., McNeill, A.,** 2004. Systematic Geometry Variation of Podded Propulsor Models, Proceedings of the 1st International Conference on Technological Advances in Podded Propulsion, Newcastle University, UK.
- Mehta, R. D.** 1984. Effect of Wing Nose Shape on the Flow in a Wing/Body Junction, *Aeronautical Journal*, December, 456-460.

- Newman, J.N.**, 1977. *Marine Hydrodynamics, Sixth Edition*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Ölçmen, M.S., Simpson, R. L.**, 2006. Some Features of Turbulent Wing-Body Junction Vortical Flow, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 27, 980-993.
- Pal, A., Rubin, S. G.**, 1971. Asymptotic Features of Viscous Flow Along a Corner, *Quarterly of Applied Mathematics*, 1971, 91-108.
- Patankar, S.V., Spalding, D.B.**, 1972. A calculation procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three Dimensional Parabolic Flows, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 25, 1787-1806.
- Pierce, F.J., Frangistas, G.A., Nelson, D.J.**, 1988. "Geometry Modification Effects on a Junction Vortex Flow", Proceedings of the Symposium on Hydrodynamic Performance Enhancement for Marine Applications, 37-44, Newport.
- Rood, E.P., Anthony D.G.**, 1985. "Tail Profile Effects on Unsteady Large Scale Flow Structure in the Wing and Plate Junction", Forum on Unsteady Flow, American Society of Mechanical Engineers, ASME FGD 27.
- Sagaut, P.**, 2001. *Large Eddy Simulations for Incompressible Flows: An Introduction*, Springer, Berlin, Germany.
- Şahin B., Öztürk N.A.**, 2009. Behavior of Flow at the Junction of Cylinder and Base Plate in Deep Water, *Measurement*, 42, 225-240.
- Sanchez-Caja, A., Rautaheimo, P., Siikonen, T.**, 1999. Computation of the Incompressible Viscous Flow Around a Tractor Thruster Using a Sliding-Mesh Technique, Proceedings of Seventh International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, France.
- Sigrist, J.F, Gervot, C., Laine, C., Le Bert, J.F, Barbarin, R.**, 2004. Numerical Model for Naval Pod, Proceedings of the 1st International Conference on Technological Advances in Podded Propulsion, Newcastle University, UK.
- Shabaka I.M.M.A.**, 1979. Turbulent Flow in a Simulated Wing/Body Junction, Ph.D. Thesis, Aeronautics Dept, Imperial College, London, England.
- Shabaka I.M.M.A., Bradshaw P.**, 1981. Turbulent Flow Measurements in an Idealised Wing/Body Junction, *AIAA Journal* 19, 131-132.
- Samareh A.J.**, 2004. Aerodynamics Shape Optimization Based on Free-Form Deformation, Proceeding of 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 1-12.
- Sung, C.H., Yang C.I., Kubendran, L.R.**, 1998. "Control of Horseshoe Vortex Junction Flow Using Fillet," Symposium on Hydrodynamic Performance Enhancement for Marine Applications, Newport.
- Szantyr J**, 2001. Hydrodynamic model experiments with pod propulsors, *Oceanic Engineering International*, 5(2), 95–103.
- Takinacı A.C.**, 1994. Bir Yüzey Panel Yöntemi ile Ağır Yüklü Gemi Pervanelerinin Hidrodinamik Analizi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Url-1** <<http://www.marinetalk.com/images/02-07-08/1.jpg>>, alındığı tarih 02.07.2008.

- Url-2** <<http://www.fluentusers.com/fluent/doc/ori/html/ug/node462.htm>>, alındığı tarih 12.03.2008.
- Url-3** <<http://geolab.larc.nasa.gov/APPS/YPlus/#MACH>>, alındığı tarih 12.03.2008.
- Ünal U.O.**, 2007. Girdap YarATICILARIN Dairesel Silindir Etrafındaki Akışa Etkisinin DeneySEL ve Hesaplamalı Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Wang, X.**, 2001. Geometric Trimming and Curvature Continuous Surface Blending for Aircraft Fuselage and Wing Shapes, MS Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University Mechanical Engineering Department.
- Wang, D., Atlar, M., Glover, E.J., Paterson, I.**, 2004, "Experimental Investigation of Flow Around a Podded Propulsor Using LDA", Proceedings of the 1st International Conference on Technological Advances in Podded Propulsion, Newcastle University, UK.
- Werle, H.**, 1988. Flow Phenomena Common to Aeronautical and Naval Domains (Visualizations Obtained at the ONERA Water Tunnels), France.
- Wilcox, D.C.**, 2006. Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries.
- Wong J.H., Png E.K.**, 2009. Numerical investigation of the Wing-Body Junction Vortex Using Various Large Eddy Simulation Models, Proceeding of 39th AIAA Fluid Dynamic Conference, 1-14.
- Zhang, X.**, 2005. Optimal Geometric Trimming of B-Spline Surfaces for Aircraft Design, Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University Mechanical Engineering Department.

EKLER

EK A: Szantyr Pod ve Strut Geometrisi

EK B: Viskoz Çözüm Hesap Değişkenleri

EK A : Szantyr Pod ve Strut Geometrisi

Szantyr Pod Geometrisi

X [m]	R [m]	X = X yönünde pod boyunca kesit tanımlanacak istasyonlar (m) R = Yarı genişlikler (m)
0.000	0.0000	
0.180	0.1602	
0.369	0.2217	
0.555	0.2655	
0.739	0.2993	
0.925	0.3264	
1.110	0.3483	
1.295	0.3659	
1.480	0.3798	
1.665	0.3904	
1.689	0.3916	
1.760	0.3947	
1.872	0.3988	
2.015	0.4024	
2.179	0.4046	
2.350	0.4046	
2.514	0.4024	
2.657	0.3988	
2.769	0.3947	
2.840	0.3916	
2.860	0.3904	
3.050	0.3798	
3.235	0.3659	
3.420	0.3483	
3.605	0.3264	
3.790	0.2993	
3.975	0.2655	
4.160	0.2217	
4.345	0.1602	
4.530	0.0000	

NACA 066 Strut Geometrisi

X [m]	Y [m]	Z [m]	X= Strutun X yönündeki koordinatı pod başı 0 noktası kabul edilmiştir. Y= Strutun Y yönündeki koordinatı Z= Strutun Z yönündeki koordinatı
1.665	0.000	1.600	
1.689	0.069	1.600	
1.760	0.135	1.600	
1.872	0.195	1.600	
2.016	0.239	1.600	
2.180	0.259	1.600	
2.350	0.248	1.600	
2.514	0.203	1.600	
2.658	0.138	1.600	
2.770	0.070	1.600	
2.841	0.019	1.600	
2.865	0.000	1.600	

EK B : Viskoz Çözüm Hesap Değişkenleri

Unsteady Calculation Parameters

Time Step (s) 0.1
Max. Iterations Per Time Step 40

Pressure-Velocity Coupling

Parameter Value

Type PISO
Skewness-Neighbour Coupling no
Skewness Correction 1
Neighbour Correction 1

Discretization Scheme

Variable Scheme

Pressure PRESTO!
Momentum Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy Second Order Upwind

Specific Dissipation Rate Second Order Upwind

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: EREN ÖZSU
Doğum Yeri ve Tarihi: Çorlu, 1976
Adres: TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi - Enerji Enstitüsü PK 21 41470 Gebze/Kocaeli
Lisans Üniversitesi: İstanbul Teknik Üniversitesi

Yayın Listesi:

- Özsu, E., 2002. "Gemilerin Elektrikle Tahriki ", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul,
- Özsu, E., Yagmur, E.A., Kaypmaz, T.C., Yılmaz, A., Tuncay, R.N., Kaypmaz, A., Akgün, F., Tiris, M., 2002, 2001, 2000. "Deniz Sistemleri Entegrasyonu Proje Final Raporu "Ship Service and Propulsion Systems".
- Unlu, N., Karahan, S., Tur, O., Uçarol, H., Özsu, E., Yazar, A., Turhan, L., Akgün, F., Tiris, M., 2003. "Elektrikli Araçlar", ISBN 975-403-306-4, Gebze, TUBİTAK-MAM.
- Uçarol, H., Tur, O., Özsu, E., Demirci, M., 2007. "Design and Prototype of a Split Drive Hybrid Electric Vehicle" EET.
- Barnes, J., Biscaglia, S., Brouwer, A., Conte, M., Dorda, A., Egger, B., Horstmann, J., Kasche, P., Kleindienst, S., Kumar, B.J., Muntwyler, U., Özsu, E., Passier, G., Pottinger, C., Santini, D., Saricks, C., Thibodeau, C., Turrentine, T., Uçarol, H., Walwijk, M., Vergels, F., Verhaeven, E., Walker, A., 2008. "Hybrid and Electric Vehicles-The Electric Drive Gains Momentum, Progress Towards Sustainable Transportation", IEA-IA-HEV Annual Report of Executive Committee and Annex I.
- Uçarol, H., Özsu, E., Tiris, M., 2008. "The Participation of Turkey to The Hybrid and Electric Vehicles Implementing Agreement of The International Energy Agency", ICAT'08 4th International Conference on Automotive Technologies, İstanbul, Turkey
- Kural, E., Demirci, M., Solak, Y., Cimen, M., Özsu, E., Uçarol, H., 2008. "Hybrid Electric Bus Design for Urban Transportation and Test Methodology for Emission Measurement", OTEKON'08 4th Automotive Technology Congress, Bursa, Turkey
- Kural, E., Ararat, Ö., Sezer, V., Solak, Y., Kutuk, O., Özsu, E., Uçarol, H., 2009. Development of a Hybrid Electric Mid-Sized Bus for Urban Transport, SAE 2009 International Powertrains, Fuels and Lubricants Congress, Florence, Italy
- Özsu, E., Takinacı, A., Odabaşı, A.Y., 2009. "Viscous/Inviscid Coupling Study for Podded Propulsors", Symposium on Marine Propulsors, SMP09, Trondheim, NORVEÇ