

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DURAN BİR HAVA YASTIKLI ARAÇTA YASTIK
AERODİNAMİĞİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Makina Müh. Kenan KAYA

**FBE Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı Isı Proses Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Oktay ÖZCAN

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	iii
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
TABLO LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Hava Yastıklı Araçlar Hakkında.....	1
2. HAVA YASTIĞI TEORİSİ	6
2.1 Katı Yüzey Üzerinde Asılı Duran Bir Hava Yastıklı Araçta İnce Çevresel Jet Teorisi	9
2.2 Su Yüzeyi Üzerinde Asılı Duran Bir Hava Yastıklı Araçta Hava Yastığı Performansı	12
3. SAYISAL YÖNTEMLER.....	14
3.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)	14
3.1.1 Çözüm Adımları	15
3.1.2 Yönetici Denklemler.....	16
3.1.3 Türbülans Modelleri	18
3.1.4 Ayırıklaştırma	21
3.1.5 Cebirsel Denklemlerin Sayısal Çözümü.....	25
4. TAŞIT AERODİNAMİĞİNDE BİR SAYISAL ÇÖZÜM UYGULAMASI: AHMED MODELİ	26
4.1 Giriş	26
4.2 Sayısal Çözüm	27
4.2.1 Problem Kurulumu	27

4.2.2	Sonuçlar	29
5.	HAVA YASTIĞI AKIŞININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ.....	35
5.1	Havada Asılı Durma Hali	35
5.1.1	Geometri	35
5.1.2	Problem Kurulumu ve Sayısal Çözüm	37
5.1.3	Sonuçlar	41
5.1.4	Farklı Fan Basıncı ve Hava Açıklıkları ile Yapılan Çözümler.....	52
5.2	Süzülme Hareketi	54
6.	SONUÇLAR.....	64
	KAYNAKLAR.....	65
	ÖZGEÇMİŞ	66

SİMGE LİSTESİ

A	Alan
A_D	Serbest akıma dik doğrultudaki projeksiyon alanı
A_L	Planform alan
B_c	Hava yastığı genişliği
c	Akım katsayısı
$c_{\varepsilon 1}, c_{\varepsilon 2}, c_{\mu}$	k - ε türbülans modeli sabitleri
c_D	Sürüklenme katsayısı
c_L	Kaldırma kuvveti katsayısı
f	Bağıl hava açıklığı
F_D	Toplam kaldırma kuvveti
F_L	Toplam kaldırma kuvveti
h	Hava açıklığı
k	Türbülans kinetik enerjisi
\bar{k}	Zaman ortalaması alınmış türbülans kinetik enerjisi
l_c	Hava yastığı uzunluğu
L	Araç uzunluğu
L_j	Nozül çevre uzunluğu
\dot{m}_{ac}	Hava açıklığından geçen kütleli hava debisi
\dot{m}_{fan}	Fandan geçen kütleli hava debisi
$\dot{m}_{nozül}$	Nozülden geçen kütleli hava debisi
N_e	Kaldırma gücü
p	Basınç
P_c	Hava yastığı basıncı
P_t	Nozüldeki toplam jet basıncı
Q	Hacimsel hava debisi
Re	Reynolds sayısı
S_c	Hava yastığı yüzey alanı
S_{ij}	Deformasyon hızı tansörü

S_ϕ	ϕ ' ye bağlı kaynak terimi
t	Nozül genişliği
$u_{i,j,k}$	Hızın i, j, k bileşenleri
U_x	Hız vektörünün x eksenini doğrultusundaki bileřeni
U_∞	Serbest akım hızı
V	Hacim
V_j	Ortalama jet hızı
W	Araç ağırlığı
x, y, z	Üç boyutlu kartezyen koordinat sistemi eksenleri
δ_{ij}	Kronecker delta
$\Delta P_{düşey}$	Düşey fanların yarattığı basınç farkı
ΔP_{yatay}	Yatay fanın yarattığı basınç farkı
ε	Türbülans sönümlenme katsayısı
ϕ	Ayrıklaştırmada çözüm değişkeni
η_d	Hava kanalı verimi
η_f	Fan verimi
Γ	Difüzyon katsayısı
μ_t	Türbülans viskozitesi
ν	Kinematik viskozite
ρ	Yoğunluk
ρ_a	Hava yoğunluğu
θ	Jet akımı orta düzleminin araç taban düzlemiyle yaptığı açı
τ	Kayma gerilmesi

KISALTMA LİSTESİ

3ddp	3-dimensions double precision
DES	Detached Eddy Simulation
DNS	Direct Numerical Simulation
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
LES	Large Eddy Simulation
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RSM	Reynolds Stress Model
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Açık basınç odalı ve çevresel jetli hovercraftın şematik gösterimi	2
Şekil 1.2	Hava yastıklı araçların sınıflandırılması.....	3
Şekil 1.3	Modern hava yastıklı araç örnekleri.....	4
Şekil 2.1	Katı yüzey üzerinde asılı duran bir hava yastıklı aracın enine kesit görünüşü	9
Şekil 2.2	Su yüzeyi üzerinde asılı duran bir hava yastıklı aracın enine kesit görünüşü.....	12
Şekil 3.1	Yapısal olan ve yapısal olmayan ağı bir gösterimi.....	23
Şekil 3.2	Merkezi P noktası olan bir kontrol hacminin tek boyutlu gösterimi.....	24
Şekil 4.1	Ahmed modelinin geometrisi	26
Şekil 4.2	Ahmed modelinin çözüm ağı içerisindeki konumu.....	28
Şekil 4.3	Oluşturulan çözüm ağı.....	28
Şekil 4.4	Yakınsama değerlerinin iterasyon sayısına göre değişimini gösterir grafik	30
Şekil 4.5	$z=0$ simetri düzleminde türbülans kinetik enerjisi kontürleri	32
Şekil 4.6	$z=0$ simetri düzleminde, araç arka bölgesinde hız tarafından renklendirilmiş hız vektörleri.....	32
Şekil 4.7	Türbülans kinetik enerjisi tarafından renklendirilmiş hız vektörleri.....	34
Şekil 5.1	Hava yastıklı araç geometrisi	37
Şekil 5.2	Hava yastıklı araç geometrisinin çözüm ağı içerisindeki yerleşimi	38
Şekil 5.3	Oluşturulan çözüm ağı.....	38
Şekil 5.4	Aracın iç kısmında oluşturulan ağ. Solda $x=-0.8$ m düzlemi, sağda $z=0$ m düzlemi	39
Şekil 5.5	Çözüm ağı yüzeylerindeki sınır şartları	40
Şekil 5.6	Yakınsama değerlerinin iterasyon sayısına göre değişimi.....	42
Şekil 5.7	$x=-0.5$ m simetri düzleminde toplam basınç (Pa) kontürleri... ..	43
Şekil 5.8	$y=0.0475$ m düzleminde toplam basınç kontürleri.....	44
Şekil 5.9	$z=0$ m simetri düzleminde toplam basınç (Pa) kontürleri.....	44
Şekil 5.10	$y=0.005$ m düzleminde hız (m/s) kontürleri.....	45
Şekil 5.11	Çeşitli yz düzlemlerinde hız (m/s) vektörlerinin görünümü	47
Şekil 5.12	$y=0.005$ m düzleminde hız vektörleri (I bölgesi)	48
Şekil 5.13	$z=0$ m simetri düzleminde hız vektörleri (I bölgesi).....	48
Şekil 5.14	$y=0.005$ m düzleminde hız vektörleri (II bölgesi).....	49

Şekil 5.15	$z=0$ m simetri düzleminde hız vektörleri (<i>II bölgesi</i>).....	49
Şekil 5.16	Nozülün hemen üst bölgesindeki hız kontür ve vektörleri	51
Şekil 5.17	a) Kaldırma kuvveti katsayısının hava açıklığına göre değişimi b) Kaldırma kuvvetine ait sabit hava açıklığı eğrileri c) Kaldırma kuvvetine ait sabit basınç eğrileri.....	53
Şekil 5.18	Yatay doğrultuda hareketin inceleneceği çözüme esas araç geometrisi.....	54
Şekil 5.19	$z=0$ m simetri düzlemindeki hız kontür ve vektörleri	58
Şekil 5.20	$y=0.13125$ m düzleminde araç arka bölgesindeki hız vektörleri.....	58
Şekil 5.21	$x=0.1$ m düzleminde araç arka bölgesindeki hız vektörleri	59
Şekil 5.22	$z=0.175$ m düzlemindeki hız kontür ve vektörleri	60
Şekil 5.23	$y=0.005$ m düzlemindeki hız kontür ve vektörleri.....	61
Şekil 5.24	$x=-0.5$ m düzleminde toplam basınç kontürleri	62
Şekil 5.25	$y=0.0475$ m düzleminde toplam basınç kontürleri.....	62

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Bağıl hava açıklığına göre f katsayıları.....	11
Tablo 3.1 Bazı türbülans modelleri.....	19
Tablo 4.1 Sayısal çözüm sonuçları ile deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	31
Tablo 5.1 İnce ve kaba ağ ile yapılan çözüm sonuçlarının karşılaştırılması.....	41
Tablo 5.2 Tüm çözümlere ait kaldırma kuvveti ve kaldırma kuvveti katsayısı değerleri.....	52
Tablo 5.3 İkinci tip harekete ait çözümlerin sonuçları.....	55

ÖNSÖZ

Yeryüzündeki hemen hemen bütün kara, deniz ve hava taşıtlarının tasarımı sırasında göz önüne alınan ölçütler arasında aerodinamik kuvvetlerin bu araçlar üzerinde oluşturduğu etki önemli bir yer tutar. Bu aerodinamik kuvvetler kaldırma ve sürüklenme kuvvetleridir ve taşıtın hareketini gerçekleştirdiği platforma ve aracın yapması istenilen hareket durumuna göre bu kuvvetler istenir veya istenmez. Örneğin kaldırma kuvveti bir kara taşıtının yol tutuş niteliğini kötü yönde etkilerken, hava taşıtlarında bu kuvvet mümkün olduğunca az enerji harcanarak yaratılmaya çalışılır. Aynı şekilde kara ve su taşıtlarına göre daha yüksek bir hızla hareket eden bir araç olan uçağa uçuş sırasında etki eden sürüklenme kuvvetlerinin az olması istenirken; iniş sırasında aracın hızını azaltabilmesi için sürüklenme kuvvetlerinden faydalanılmaya çalışılır ve aracın tasarımı buna göre yapılır.

Tasarım aşamasında bu aerodinamik etkilerin tespit edilebilmesi için, araç geometrisine esas oluşturan bir model üzerinde bazı deneyler gerçekleştirilir. 18. yüzyılın başlarından bu yana bu deneyler “rüzgar tüneli” denilen ve kurulumu oldukça pahalı olan özel ortamlarda gerçekleştirilmektedir. Buna karşılık son yıllarda; sayısal çözüm yöntemlerinden yola çıkılarak yazılan algoritmaların daha da iyileştirilmesi ile ortaya çıkmış olan bilgisayar kodları, sözü edilen aerodinamik benzetimlerin bilgisayar ortamında da yapılmasına olanak sağlayan hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin(HAD) ortaya çıkmasına ön ayak olarak klasik yöntemin yanında yeni bir yol açmıştır.

Bu çalışmaya esas oluşturan işlemlerin gerçekleştirilmesi sürecinde de HAD’ nin sunduğu olanaklardan mümkün olduğunca yararlanılmaya çalışılmış, ele alınan araç modeli için geçerli olan aerodinamik karakteristikler tamamıyla sayısal çözüm sonuçlarına dayanılarak elde edilmiştir.

Burada incelenmiş olan hava yastıklı taşıt geometrisi ve bu geometriye ait boyutların saptanmasında Yeditepe Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Mehmet AKGÜN’ ün önerilerinden faydalanılmıştır. Sayısal inceleme sonrasında elde edilen sonuçlar, Yeditepe Üniversitesi’ nde imal edilmesi planlanan bir hava yastıklı taşıtın tasarımında kullanılabilir.

Başta bu tez çalışmasını yürütürken bilgi birikiminden faydalandığım, bütün bu süre içerisinde yönlendirmeleriyle ve desteğiyle bana yardımcı olan saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Oktay ÖZCAN’ a; maddi ve manevi olarak her zaman bana destek olan ve bu çalışmanın tamamlanmasında büyük payı olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Bu çalışmada bir hava yastıklı araç modelinin aerodinamik karakteristikleri üç boyutlu daimi bir türbülanslı akış durumu için sayısal olarak incelenmiştir.

Sayısal çözümler, hesaplamalı akışkanlar dinamiği(HAD) alanında yaygın olarak kullanılan bir akış modelleme programı olan FLUENT yardımı ile yapılmıştır.

İlk olarak hava yastıklı araçlar ve bunlara ilişkin ortaya çıkmış olan teorilerden bahsedilmiş, bunu takiben hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin temelleri üzerinde durulmuş ve sonrasında taşıt aerodinamiği alanında yaygın olarak bilinen bir referans araç modeli olan Ahmed modeli üzerinde sayısal çözüm uygulaması yapılmıştır.

Son olarak sayısal çözümler yatay doğrultuda hareketsiz olup havada asılı duran bir hava yastıklı araç için gerçekleştirilmiş, hava yastığı oluşumu ve buradaki akış hareketleri ile ilgili sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu çözümler değişen fan basınçları ve hava açıklıkları için tekrarlanarak sonuçlar arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Daha sonra yatay doğrultuda ilerleyerek süzülme hareketi yapan araç için sayısal çözümler yapılmış ve çeşitli çözüm ağları ve sınır şartları için çözümler tekrarlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hava yastıklı araç, hesaplamalı akışkanlar dinamiği(HAD), aerodinamik.

ABSTRACT

This study focuses on numerical solution for a three-dimensional, steady turbulent flow over and inside an air cushion vehicle(ACV) model in order to investigate the aerodynamic characteristics it has.

Numerical solutions have been carried out by means of a widely used computational fluid dynamics (CFD) flow modeling software, FLUENT.

Firstly, some information about ACV' s and related theories has been introduced; and then briefly fundamentals of the CFD have been handled. Afterwards, a numerical solution has been applied on a well-known reference vehicle model: Ahmed body.

Finally, some numerical solutions have been carried out for the subject ACV model with various values of fan pressure and air clearance parameters, in case of hovering mode. After that, numerical solutions for planing motion of the ACV model have been executed for different boundary conditions and solution domains.

Keywords: Air cushion vehicle(ACV), computational fluid dynamics(CFD), aerodynamics.

1. GİRİŞ

1.1 Hava Yastıklı Araçlar Hakkında

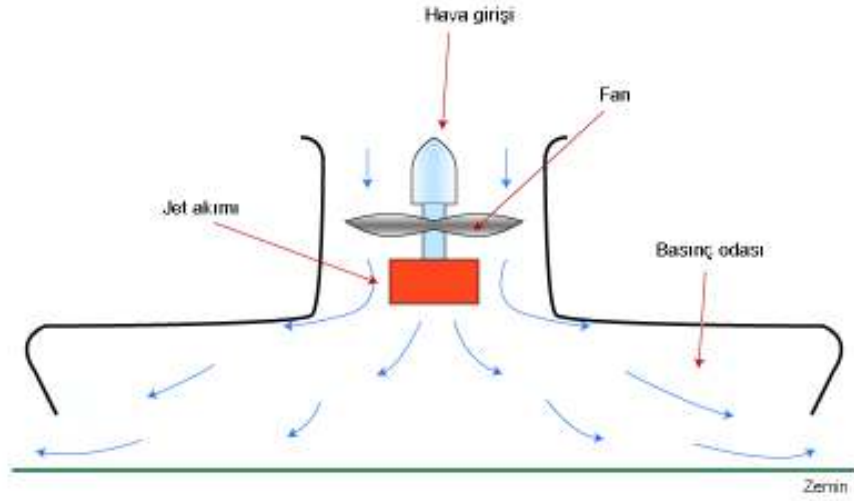
Hava yastıklı araç, “yastık” olarak tabir edilen basınçlandırılmış hava tarafından alttan desteklenen ve bu sayede yüzeyle herhangi bir temasta bulunmaksızın veya kısmen temas ederek hareket eden araçların genel adıdır. Hava yastıklı araçlar öteleme hareketini oluşturulan bu hava yastığı üzerinde gerçekleştirdiklerinden konvansiyonel araçlara göre daha az yüzey sürtünmesine maruz kalırlar. Bazı araçlar da hava yastığının sağladığı bir diğer avantaj olan, çeşitli yüzeyler (katı, sıvı) üzerinde hareket edebilme yeteneğine sahiptir.

İlk olarak 1716 yılında İsveçli bilim adamı Emanuel Swedenborg’ un hava yastığı oluşturma düşüncesini ortaya atmasından sonra, birçok bilim insanı bunun üzerine teoriler ve modeller geliştirmiştir. 1900’ lü yılların başlarına kadar, hava yastığı alanında geliştirilen teorilerin gerçek anlamda tam olarak uygulanması imkansızdı; çünkü havayı basınçlandırmak için gerekli olan gücü sağlayacak bir motor henüz icat edilmemiş olmakla beraber, yastık içerisindeki havanın dış ortama sızmasının ne şekilde önleneceği de bilinmiyordu.

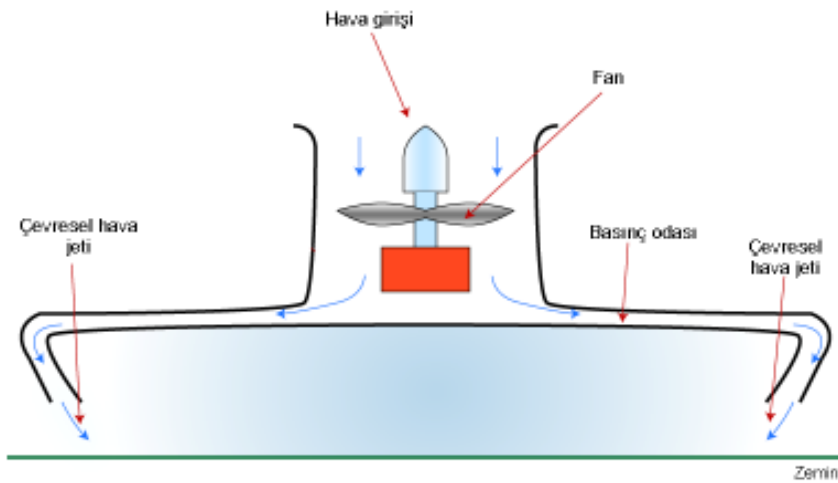
Birçok teknolojik gelişmede olduğu gibi hava yastıklı araç teknolojisinde de askeri alanda duyulan ihtiyaçlar gelişmeyi tetikleyici unsur olmuştur. I. dünya savaşının, uçak teknolojisinde yol açtığı gelişmeler sonrasında yüzeye yakın seviyede hareket eden bir uçağa etkiyen kaldırma kuvvetinin daha fazla olduğu fark edilmiştir. Bu, “yer etkisi” olarak bilinir. Basınçlı hava oluşturmak için gereken güç ise, artık motorlarla sağlanabiliyordu. Bunun sonucunda hava yastığı oluşturma ilkesine göre çalışan ilk araç 1916 yılında Avusturya donanması için geliştirildi. II. dünya savaşı sırasında uçaklarda yer etkisinden başarılı bir şekilde faydalanılması hava yastıklı araçlarda da aynı özelliğin kullanılması için çalışmaları beraberinde getirdi. Fakat hava yastığı içerisindeki havanın korunması hala büyük bir problemdi.

Geliştirilen ilk hava yastıklı araçlar açık basınç odası ilkesine göre çalışıyordu. Buna göre fan tarafından oluşturulan hava jeti doğrudan aracın alt kısmını oluşturan basınç odasına gönderiliyordu. Bu modelin şematik gösterimi Şekil 1.1.a’ da görülebilir.

1950' li yılların ortalarında İngiliz Christopher Cockerell, içbükey bir araç gövdesi kullanarak jet akımını aracın yan yüzeylerinden merkezine doğru yönlendirecek bir mekanizma tasarladı. Bu modelde bir fan yardımı ile aracın yan yüzeylerinde çevresel jet oluşturuluyordu ve bu jet akımı yastığı alttan çevreliyordu. Bu, “çevresel jet” ilkesi olarak bilinir. Böylece aracın alt kısmındaki havanın kaçması problemi çözülmüştü, yastık basıncı daha kararlıydı ve araç daha fazla yükselebiliyordu. Cockerell 1955 yılında bu ilkeye göre çalışan bir model geliştirdi ve buna “hovercraft” ismini verdi. O tarihten bu yana hava yastıklı araçlar ailesi içerisinde bu model esas alınarak tasarlanan ve hem karada, hem de suda gidebilen araçlar bu adla anılmaktadır.



a.

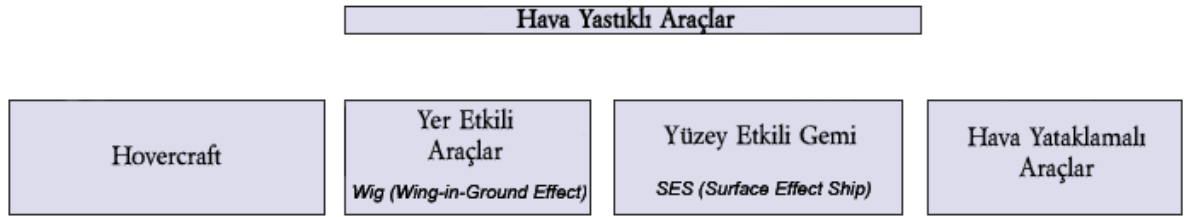


b.

Şekil 1.1 a. Açık basınç odalı ve b. Çevresel jetli hovercraftın şematik gösterimi

Sivil amaçlarla kullanılan ilk hovercraft, Cockerell tarafından dizayn edilen ve SR.N1 adı verilen araçtı. Maksimum hızı 100 m/s ' ye kadar çıkabilen bu araç yaklaşık 9.58 m uzunluk, 7.62 m genişlik ve 3.08 m yüksekliğe sahipti ve hareket halinde yüksekliği 3.31 m ' ye çıkmaktaydı. 1959 yılında Fransa ile İngiltere arasındaki Manş Kanalı üzerinde yaklaşık 40 km ' lik mesafeyi 2 saatlik bir sürede başarıyla geçmiştir. Bu deneme sürüşü hovercraftın kabiliyetlerini ve aynı zamanda zaafalarını da göstermiştir. Bu eksikliklerden en önemlisi aracın fazla yükselememesi nedeniyle engel açıklığının yetersiz kalmasıydı.

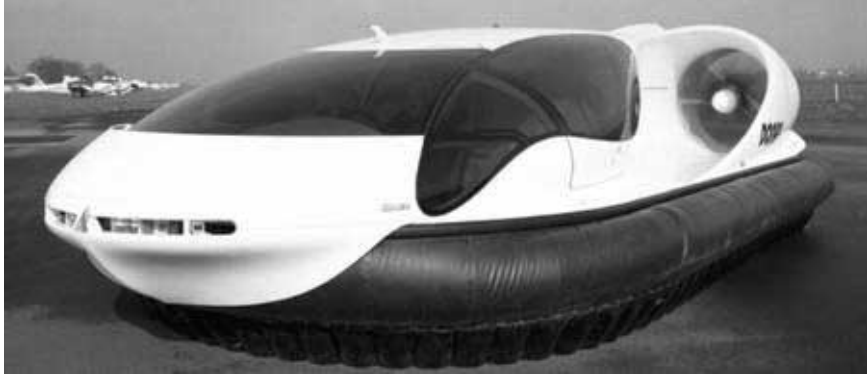
1960' larda İngiliz mühendis Cecil Latimer-Needham, basınç odasını çevreleyen bir esnek eteğin araca eklenmesi fikrini öne sürdü. Bu etek hareket sırasında havayı içeride tutarken, bir engelle karşılaştığında şekil değiştirebiliyordu; bu da engel açıklığının artmasını ve aracın engelleri sönümlenme yeteneğinin daha da iyileşmesini sağlamıştır.



Şekil 1.2 Hava yastıklı araçların sınıflandırılması

Hava yastıklı araç sınıfında sayılan diğer araçlar yer etkili araçlar, yüzey etkili gemi ve hava yataklamalı araçlardır. Yer etkili araçlar yere yakın mesafede hareket eden uçaklar olarak düşünülebilir. Daha önce de belirtildiği gibi, yere yakın uçan bir uçağa etkiyen kaldırma kuvvetleri kilometrelerce yüksekte uçan bir uçağa göre daha fazla olmaktadır. Yüzey etkili gemiler ise ön ve arka taraflarda esnek etek, yanlarda ise etek yerine katı bir duvarın kullanıldığı hovercraft şeklindedir. Bu araçlarda yanlardan hava sızıntısı olmadığından aynı kaldırma kuvvetini sağlamak için harcanması gereken güç de azalır. Hava yataklamalı araçlar ise yüzey etkili gemilerin kökenini oluşturup, aracın alt yüzeyi ile zemin arasında havayı ince bir film tabaka halinde hapsetme ilkesine dayanır.

Bu çalışmanın sonraki bölümlerinde “hovercraft” kelimesi yerine, yine aynı tür aracı belirtmek için “hava yastıklı araç” ifadesi kullanılmıştır.



a.



b.



c.

Şekil 1.3 Modern hava yastıklı araç örnekleri. a. Hovercraft b. Yüzey etkili gemi c. Kanat-yer-etkili araç

Bu çalışmada inceleme konusu olan, hava yastıklı araçlar sınıfına ait olan bir hovercraft modelidir. Model geometrisi, yukarıda kısaca açıklanmaya çalışılmış olan çevresel jet ilkesine uyan bir tasarımla bilgisayar ortamında oluşturulduktan sonra; bilgisayar benzetimi yoluyla model çalıştırılarak oluşan hava yastığının gösterdiği davranışlar gözlenmiştir. Bilgisayar ortamında gerçekleştirilen bu deneyler, akışkanlar mekaniğindeki temel denklemleri sayısal olarak çözen bir yazılım kullanılarak yapılmıştır.

Kısaca hava yastıklı araçların tarihsel gelişimleriyle beraber bir sınıflandırmasının da yapıldığı bu bölümden sonra bu çalışmadaki ikinci bölümde; hava yastığı ile ilgili ortaya konulmuş bazı teorilere değinilmiş, bunlardan birkaçı en temel kavramlarıyla açıklanmaya çalışılmıştır. Böylece sayısal benzetim yazılımını kullanırken parametrelere doğru yerde doğru değerlerin verilebilmesi için gereken temel bilginin bir kısmının verilmesi amaçlanmıştır.

Üçüncü bölümde ise; akışkanlar mekaniği içinde özelleşmiş sayısal çözüm metotlarının meydana getirdiği bir disiplin olan hesaplamalı akışkanlar dinamiği, temel kavramlarıyla anlatılmaya çalışıldı. Bu aynı zamanda benzetim yazılımını oluşturan kodların dayandığı temeldir.

Dördüncü bölümde bir ön çalışma olarak, taşıt aerodinamiğinde bir sayısal çözüm uygulaması işlendi. Bu uygulama, gerçek rüzgar tüneli deney verilerinin güvenilir bir referans olarak mevcut olması ve karşılaştırma yapabilme olanağına sahip olunmasının getirdiği avantajla sayısal yöntemlerin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla üzerinde birçok kez sayısal çözüm yapılmış olan Ahmed modelidir. Bu bölümde de yapılan sayısal çözümün sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

Beşinci ve son bölüm, bu çalışmanın asıl konusunu oluşturmaktadır. Bu bölümde hava yastıklı aracın çeşitli hareket durumları için sayısal çözüm öncesi problemin kurgulanma aşaması ve sonraki adımda nasıl bir çözüm metodu kullanıldığı ayrıntılı olarak açıklanmıştır ve çözümlerin sonuçları sayısal ve görsel öğelerle sunularak bunların taşıdığı anlamlar açıklanmaya çalışılmıştır.

2. HAVA YASTIĞI TEORİSİ

Hava yastığı teorisinin gelişimi, hava yastıklı araçlarda esnek etek kullanma fikrinin ortaya çıkışıyla çok yakından ilgilidir.

İlk hava yastıklı araçların çıkış noktası, deniz araçlarında gövdenin suyla temas eden yüzeylerine hava ile yataklama yapmak suretiyle araca etkiyen sürüklenme kuvvetlerinin azaltılmasıydı. 20. yy' ın başlarında, gövdesinin baş tarafı su yüzeyiyle belli bir açı yaparak su üzerinde hareket eden yüksek hızlı yelkenlilerle yaşanan deneyimlerle birlikte, hava yataklamasının suyun neden olduğu sürtünme kuvvetlerini azalttığı fark edildi (Yun ve Bliault, 2000). Bu teknelerde kaldırma kuvveti hidrostatik olmaktan çok, hidrodinamik etkilerle oluşurken gövdenin suyla temas eden yüzey alanı azalmaktaydı. Fakat hidrodinamik dalga direncini azaltmak zordu. Bu nedenle, daha kalın bir hava yastığı oluşturulması ve havanın suyla temas eden yüzeylere püskürtülmesi düşüncesi doğdu.

Bu teorinin uygulaması, 1958 yılında Çin' de geliştirilen “açık basınç odalı hava yastıklı araç” modelinde görülmektedir. Bu modelde hava yastığı ince duvarlarla çevriliydi ve bu duvarların altındaki hava açıklığı çok küçüktü. Bu da su ve kara üzerinde kayarak hareket etmesine neden oluyordu ve bu yüzden gerçek bir amfibik araç olmaktan uzaktı.

Cockerell' in geliştirdiği “çevresel jet” ilkesine göre, hava yastığı sürekli püskürtülen havayla besleniyordu ve yüksek hızlı çevresel hava perdesiyle de yastığın hava kaçırmaması sağlanıyordu. Hava aracın alt tarafına yakın dar bir kanala doğru püskürtülüyordu ve bu hava akımı merkeze doğru yol alarak hava yastığını alttan çevreliyordu. Bu durumda hava yastığı verimi, havanın doğrudan yastık içerisine püskürtüldüğü açık basınç odalı hava yastıklı araç modelinde olduğundan kat kat daha yüksekti. Buna rağmen, bu teorinin uygulandığı bir araç olan SR-N1 modelinin hem suda, hem de karada hareket edebilme yeteneği kısıtlıydı. Yine de bu teori, bundan sonrası için önemli bir temel teşkil etmiştir (Yun ve Bliault, 2000).

1960' larda birçok bilim insanı çevresel jetli hava yastığını açıklamaya yardımcı olan çeşitli teoriler üzerinde çalışmıştır. Bunlar arasında ince jet teorisi, kalın jet teorisi, jet denge teorisi ve değişik hava yastığı ve bölümlenme kombinasyonlarının etkisini inceleyen çeşitli araştırmalar vardır.

Hava yastıklı araçlarda yastığı içerisinde tutan ve daha büyük derinlikli bir yastığa olanak veren bir esnek etek kullanma düşüncesi, hava yastıklı araç teknolojisinde bir adım daha ileriye gidilmesini sağladı. SR-N1 modelinde jet nozüllerine etek eklenmesiyle bu aracın engel açıklığı büyük ölçüde artırılarak hem karada, hem suda gidebilme özelliği iyileştirilmiş oldu.

Çevresel jet ilkesine göre çalışan araçların kalkış yaparak su yüzeyi üzerinde süzülebilmesi için hava açıklığı, yüzey üzerinde yastık basıncından dolayı oluşan dalga genliklerinin en az 0.5 - 0.8 katı kadar olmalıdır (Yun ve Bliault, 2000). Eğer araç altındaki boşluk bundan daha küçük olursa araç gövdesinin su dalgalarıyla olan teması artacak ve bu da sürüklenme kuvvetini artıracaktır. Fakat esnek etek kullanıldığı durumda etek, dalgaların hareketine göre şekil alacağından; hava açıklığı aracın kalkış şartı için büyük bir etken olmaktan çıkar.

Aynı nedenden dolayı, esnek etekli hava yastıklı araçların dalgalı ve görece düzgün su yüzeyinde “tümsek hızı” olarak adlandırılan eşik değerini aşarak hızlanmaları daha kolaydır. Tümsek hızı, hava yastığının oluşturulmasından sonra aracın ileri doğru hareketini sağlayabilmesi için sahip olması gereken hız değeridir. Burada tümsek, hava yastığı tarafından aracın hemen ön tarafında oluşturulan dalgalardır. Tümsek hızına ulaşıldığında sürüklenme kuvveti de en büyük değerine çıkar, bu hız değeri hava ve dalga şartlarıyla değişmekle beraber yaklaşık 4 ile 6 *m/s* civarındadır (Yun ve Bliault, 2000). Fakat etek kullanılan bir hava yastıklı araç için, havada asılı kalma durumundan ileri hareket durumuna geçiş sırasında maksimum sürüklenme kuvvetine karşı gelmek için harcanması gereken güç daha yüksektir.

Sürüklenme kuvvetlerinin azaltılabilmesi için, çeşitli yastık geometrisi ve etek tasarımları hakkında araştırmalar yapılmıştır. Esnek etekle jetin uzatılması sonrasında, daha kısa uzatmaların kullanıldığı torba eteklerin yolu açıldı. Daha sonra 1960' ların sonunda ise jet uzatmanın yerini “parmak” olarak adlandırılan kıvrımlar aldı. Böylece, bu tip eteklerde hava açıklığı düşük yastık veriminden dolayı daha az olurken; etkin yastık derinliği büyük ölçüde arttı, sürüklenme kuvveti ve bununla beraber güç tüketimi azaldı.

Tasarımları 1960' lardan günümüze sürekli olarak geliştirilen torba ve parmak tip etekler, giderek olumlu yönde gelişme gösteren direnç karakteristikleri ve pürüzlü yüzeyler üzerinde sürüş kolaylığını sağlayan hassasiyeti (elastisitesi) ile oldukça büyük öneme sahiptir.

Bugün gelinmiş olan aşamada, hava yastıklı araçlarda havada asılı kalma durumundan ileri hareket durumuna geçiş ile ilgili problemler teknik olarak artık kilit öneme sahip değillerdir. Bundan daha önemli olan, esnek eteğin araçta arzu edilen yüzebilirlik gerekliliklerini sağlamasıdır. Bu bakımdan, “dalga pompalama” önemli bir kavram olarak tanımlandı ve bunun bir sonucu olarak tasarımcılar daha çok sarsıntı sönümlenme karakteristikleri üzerinde durdular.

Hava yastıklı araçlarda tasarım sırasında göz önüne alınan parametrelerden biri; hava açıklığının, jet nozülü genişliğine oranı olan bağıl hava açıklığıdır. Ancak; hava açıklığı, hava yastığının performansını belirlemek için tek ölçüt değildir. Fakat yine de; tecrübeli bir tasarımcı, hava açıklığına bakarak yastık performansı hakkında doğru bir fikir edinebilir.

Aracın kaldırma gücünün bağıl hava açıklığı yerine yine boyutsuz bir parametre olan akım katsayısına göre belirlenmesinin daha doğru olacağı rahatlıkla söylenebilir. Bu yöntem aynı zamanda daha kullanışlıdır. Hava yastıklı araçlar için akım katsayısı şu şekilde ifade edilir:

$$c = \frac{Q}{S_c \sqrt{2 \frac{P_c}{\rho}}} \quad (2.1)$$

c : Akım katsayısı (*boyutsuz*)

Q : Hacimsel debi (m^3 / s)

p_c : Yastık basıncı (Pa)

ρ : Akışkan yoğunluğu (kg / m^3)

S_c : Yastık yüzey alanı (m^2)

Hava yastıklı araçlarda akım katsayısı c için, 0.015 ile 0.050 arasında değişen değerler alınır (Yun ve Bliault, 2000).

Akım katsayısı metodu aracın sadece durgun su yüzeyi üzerinde hareket etmesi durumunda yeterlidir. Gerçekte, araç çoğunlukla dalgalı su yüzeyi üzerinde sarsıntılı bir hareket yapar. Bu nedenle hava yastıklı aracın su dalgaları içerisindeki dikey hareketinin de incelenip buna göre yeterli basınçlı hava akışının sağlanması gerekir. “Dalga pompalama” metodu bununla ilgilenir.

Momentum yasasına göre,

$$hp_c = \rho_a V_j^2 t (1 + \cos \theta) \quad (2.2)$$

h : Hava açıklığı (m)

p_c : Yastık basıncı (N / m^2)

ρ_a : Hava yoğunluğu (kg / m^3)

V_j : Ortalama jet hızı (m / s)

t : Nozül genişliği (m)

θ : Jet orta düzleminin araç taban düzlemiyle yaptığı açı ($^\circ$)

Burada dikkat edilmesi gereken husus; hava açıklığı h parametresinin, esnek etek kullanıldığı durumda etekle yüzey arasındaki mesafe olacaktır.

Jet akımının toplam basıncı,

$$P_t = \frac{1}{2} \rho_a V_j^2 + fp_c \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilebilir.

P_t : Nozüldeki toplam jet basıncı (N / m^2)

f : Bağlı hava açıklığı katsayısı (*boyutsuz*)

Burada bağlı hava açıklığı h/t dir. f katsayısı ise bağlı hava açıklığına göre aşağıdaki tablodan seçilir (Yun ve Bliault, 2000).

Tablo 2.1 Bağıl hava açıklığına göre f katsayıları

h/t	f
1	0.75
2	0.65
3	0.54
≥ 4	0.5

Jet nozüllerinden geçen hacimsel hava debisi ise,

$$Q = V_j t L_j \quad (2.4)$$

olarak yazılabilir.

Q : Nozülden püskürtülen hava hacimsel debisi (m^3 / s)

L_j : Nozülün çevre uzunluğu (m)

Aracın kaldırma gücünü,

$$N_e = \frac{QP_t}{75\eta_f\eta_d} \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edebiliriz.

N_e : Kaldırma gücü (kW)

η_f : Fan verimi

η_d : Hava çekiş verimi (*Fanın çektiği havayı aracın iç kısımlarına ileten kanal verimi*)

Yastık basıncının üniform bir dağılım gösterdiği kabul edilirse, verilen bir yastık basıncının kaldırabileceği araç ağırlığı,

$$W = p_c S_c \quad (2.6)$$

W : Araç ağırlığı (N)

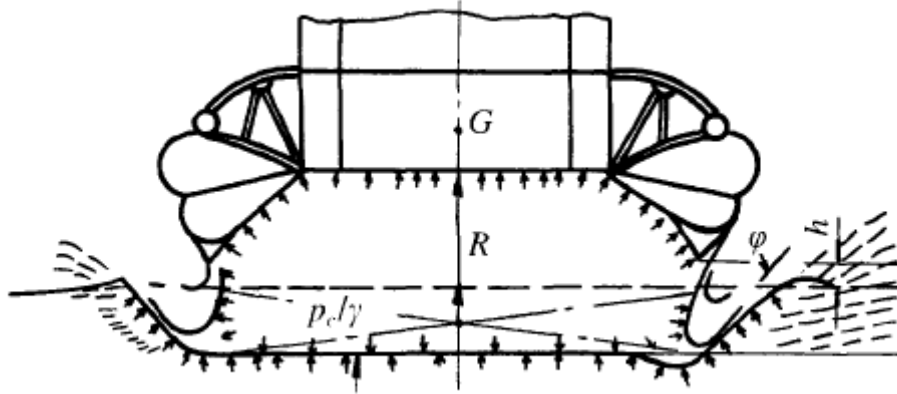
p_c : Yastık basıncı

S_c : Yastık yüzey alanı (m^2)

Buraya kadar açıklanan bu hava yastığı teorisinde, basitleştirme adına havanın viskozitesi dikkate alınmamıştır. Bunun sebebi, türbülanslı viskoz akışı ifade eden denklemlerin fazlasıyla karmaşık olmasıdır. Nozüllerde viskoziteye ilişkin kabul edilebilir bir yaklaşım elde etmek mümkünken, esnek etek kısmında analitik bir işlem yapmak oldukça zordur.

2.2 Su Yüzeyi Üzerinde Asılı Duran Bir Hava Yastıklı Araçta Hava Yastığı Performansı

Bir hava yastıklı aracın su yüzeyi üzerinde asılı durumdaki tipik davranışı Şekil 2' de görülmektedir.



Şekil 2.2 Su yüzeyi üzerinde asılı duran bir hava yastıklı aracın enine kesit görünüşü (Yun ve Bliault, 2000).

Eğer nozüllerden püskürtülen hava jetinin düşey bileşenlerinin yaratacağı tepki ihmal edilirse, yastığın kaldırma kuvveti katı yüzey üzerindeki harekete benzer şekilde,

$$W = p_c S_c \quad (2.7)$$

olarak ifade edilir.

Yastık yüzeyi $S_c = l_c B_c$ eşitliğinden hesaplanır. l_c yastık uzunluğu, B_c ise her iki yandaki eteklerin en uç kısımları arasındaki uzunluktur.

l_c / B_c oranı aracın hızını, motor gücünü ve yüzebilirliğini büyük ölçüde etkiler. Düşük hızlarda bu oran arttıkça aracın yüzebilirliği de artar; orta büyüklükteki hızlarda l_c / B_c oranı sürüklenme kuvvetiyle ters orantılıdır, menzil artar ve maksimum sürüklenme kuvveti de düşer. Çok büyük olmayan araçlarda l_c / B_c oranı tipik olarak 2,0 seçilir (Yun ve Bliault, 2000).

Hava yastıklı aracın ağırlığı, yastık basıncı sebebiyle yer değiştiren su hacminin ağırlığına eşittir. Bu yer değiştirmeden dolayı buradaki gerçek hava açıklığı, eteğin en alt ucu ile yastık basıncından etkilenmeyen su seviyesi arasındaki düşey mesafedir.

Eteğin tamamen hava ile dolması için gerekli minimum fan hızı, fanın yarattığı toplam basınç değişiminin yastık basıncına eşit olduğu zamandaki hızdır. Tam bu anda aracın ağırlığı tamamıyla yastığın sağladığı kaldırma kuvveti tarafından dengelenir; fakat henüz hava açıklığı sıfırdır, bu nedenle araçtan dışarıya hava kaçıışı yoktur.

Aracın yüzey üzerinde asılı kalarak süzülme durumuna geçebilmesi için, araç yüzer haznesinin su yüzeyinden ayrılması ve böylece hava yastığının araca alttan etki edebilmesi gerekir. Çünkü etek yüksekliği her zaman yastık basıncından (mSS) daha büyüktür. Bu yüzden aracın alt kısmında veya etekte su yüzeyine yakın olacak şekilde bir delik açılır. Bu delik vasıtasıyla araç altındaki su dışarı tahliye edilir.

3. SAYISAL YÖNTEMLER

3.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

Akışkanlar mekaniğinde kullanılan temel denklemler çoğunlukla kısmi türevler içeren, çözümü zor denklemlerdir. Belirli şartlar altındaki bir akışkanın davranışının öngörülebilmesi için bu temel denklemler üzerinde birtakım basitleştirici ön kabuller yaparak teorik çözüm bulunabilir. Fakat tahmin edilebileceği gibi bu, gerçek durumla birebir örtüşmez. Bu durumda akışkanlar mekaniği uygulamalarında karşılaşılan problemlerin analiz edilebilmesi için eşzamanlı olarak iki yol izlenmekteydi: Deneysel ve teorik.

Deneysel akışkanlar dinamiğinin temeli 17. yüzyılda Fransa ve İngiltere’ de atılmıştır. 18. ve 19. yüzyıllarda da akışkanlar dinamiği teorisinde ilerlemeler kaydedildi. Sonuç olarak akışkanlar dinamiği uygulamaları üzerinde yapılan çalışmalar bir yanda salt teori, diğer yanda da deneysel sonuçların karşılaştırılmasından oluşuyordu. 1960’ lara kadar, araştırma çalışmaları bu iki ayrı esas üzerinden yürütülmekteydi. Fakat deneysel çalışmaların maliyetinin yüksek olması ve kurulumunun zaman alması gibi olumsuzlukların yanında, deney düzeneğinde bazı ortam şartlarının sağlanması da imkansızdı (örneğin çok yüksek sıcaklık veya yüksek Mach sayısı gibi şartlar altında bir rüzgar tüneli) (Tu vd., 2008).

Bugün, yüksek işlem hızı ve kapasitesine sahip bilgisayarların ve aynı zamanda fizik problemlerinin çözümünde daha doğru sonuç veren sayısal algoritmaların ortaya çıkması, akışkanlar mekaniğinin çeşitli uygulamalarının incelenme yönteminde yeni bir çığır açmıştır. Böylece akışkanlar mekaniği, matematik ve bilgisayar programlama bilimlerinin sunduğu olanaklarla; hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), herhangi bir akışkanın hareketiyle ilgili problemlerin çözümüyle ilgilenen ve bunu yaparken de çeşitli sayısal yöntem ve algoritmalar kullanan, akışkanlar mekaniği içinde bir disiplin olarak ortaya çıkmıştır. Bu da akışkanlar mekaniği alanında yapılan çalışmalarda deneysel ve teorik metottan sonra üçüncü bir yaklaşımın izlenmesine olanak vermiştir.

Başlangıçta HAD büyük oranda sadece havacılık ve uzay bilimleri alanındaki araştırma-geliştirme çalışmalarında yer bulurken, günümüzde neredeyse bütün mühendislik alanlarında karmaşık problemlerin çözümünde güçlü bir araç olarak kullanılmaktadır. HAD’ nin

kullanıldığı alanlar arasında otomotiv, imalat, inşaat, çevre ve gemi mühendisliği uygulamaları sayılabilir.

Genel olarak fen bilimlerinde sayısal çözüm tekniklerinin gelişimi, yönetici denklemlerin kurulumu ve çözümü ile bu çözümlere getirilen çeşitli yaklaşımların gelişimine bağlıdır. HAD ile birlikte yönetici denklemlerdeki bazı özel terimlerin üzerinde daha ayrıntılı bir analiz yapabilmek mümkün olmuştur. HAD; gerçek akışkan hareketinin benzetimi yoluyla hem deneysel, hem teorik yöntemleri bünyesinde toplayarak akışkanlar mekaniğinde alternatif bir unsur olmuştur. Analitik yaklaşımların mümkün olmadığı karmaşık akış problemlerinin çözümü, deneysel yöntemlere nazaran daha kısa zamanda ve daha düşük maliyetli araştırma-geliştirme çalışmaları yapılabilmesi, ayrıca deneysel testlerde gerçekleştirilmesi veya tekrarlanabilmesi mümkün olmayan senaryoların (örneğin nükleer kazalar, deprem, tsunami vb.) analiz edilmesi olanaklı hale gelmiştir.

Fakat HAD' nin alışlagelmiş deneysel yöntemlerin yerini aldığı henüz söylenemez (Tu vd., 2008). Örneğin rüzgar tünelleri, gerçek akış tiplerinin küçük ölçekte benzetimi yapılarak çok doğru sonuçların alındığı bir ekipman olarak hala kullanılmaktadır. Çok fazlı akış, kaynama, yoğuşma vb gibi HAD' nin henüz yetersiz kaldığı uygulamalarda deneysel yöntemler hala birincil önemini korumaktadır. Diğer yandan, hesaplama hataları nedeniyle gerçek durum ile bilgisayarlı benzetim sonuçları arasında farklar olmaktadır. Sayısal sonuçlar, görsel olarak incelenirken, çok doğru olmamasına rağmen gerçek duruma uygun oldukları izlenimini verebilir. Bu nedenle verilerin doğruluğu onaylanmadan önce derinlemesine incelenmesi gerekmektedir.

3.1.1 Çözüm Adımları

Bir akış probleminin sayısal olarak çözümü aşağıdaki adımlardan oluşur:

- 1- İlk olarak, söz konusu akışkan hareketini matematiksel olarak ifade eden yönetici denklemler belirlenir. Buradan genellikle bir kısmi diferansiyel denklemler sistemi elde edilir.
- 2- Sonrasında, sayısal işlemleri gerçekleştirebilmek amacıyla bu denklemler üzerinde “ayrıklaştırma” olarak adlandırılan bir dönüşüm uygulanır.

- 3- Ayırıklaştırma sonucunda; akış olayının meydana geleceği, sonlu sayıda noktalardan/hacimlerden oluşan bir alan veya hacim oluşturulur. Bu, çözüm ağıdır.
- 4- Son olarak da, başlangıç ve sınır şartları belirlenerek problemin çözümüne başlanır.
- 5- Çözüm yeterince ilerletildikten sonra, sonuçlar sayısal veya görsel olarak incelenerek yorumlanır.

Yukarıda sayılan adımlar, bugün piyasada bulunan paket programlar sayesinde hızlı bir şekilde uygulanabilmektedir. Bu programlar, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi denklemlerini çeşitli sayısal yöntemlere göre uyarlanmış biçimde ifade eden kodları bir arada içerir ve bu nedenle bu programları kullanan bir kullanıcı çözüme 3. adımdan başlar.

Bu tür programlar üç ana elemandan oluşur:

Ön işlemci: İncelenmesi söz konusu olan geometrinin oluşturulması veya halihazırda var olan geometrinin içe aktarılması ve bu geometrinin çevresinde, akış olayının meydana geleceği bir çözüm ağı yaratılması ön işlemcide gerçekleştirilir. Sınır şartları da belirlenerek problem çözülmeye hazır hale getirilir.

Çözücü: Ön işlemcide oluşturulan çözüm ağı çözücüye aktarılır ve yönetici denklemlerin bir ifadesi olan sayısal kodlar bu ağ üzerinde çalıştırılır. Öncesinde, çözümün hangi akış modeliyle çözüleceği tespit edilir ve başlangıç şartları girilir.

Son işlemci: Son işlemcide, çözümün sonuçları sayısal veya görsel olarak incelenir.

Bu çalışmada ön işlemci olarak GAMBIT, işlemci ve son işlemci olarak da FLUENT yazılımı kullanılmıştır.

3.1.2 Yönetici Denklemler

Akışkanlar mekaniğinde, akışkanın hareketini matematiksel olarak ifade eden yönetici denklemlerin temeli şu üç yasaya dayanır (Anderson, 1995; Versteeg ve Malalesekera, 1995; Tu vd., 2008):

- Akışkan içerisinde ele alınan çok küçük bir kontrol hacminin yüzeylerinden geçen toplam kütle akısı, o hacim içerisindeki kütlenin zamana göre değişimine eşittir. Bu yasa “kütlenin korunumu yasası” olarak bilinir.
- Aynı hacim elemanı için; yüzeylerden geçen toplam momentum akısı, hacim içerisindeki momentumun zamanla değişimine eşittir. Bu aynı zamanda söz konusu hacme uygulanan net kuvvete eşittir. Bu, “momentumun korunumu” yasasıdır.
- Hacim elemanının toplam enerjisindeki değişim, ısı transferi miktarındaki ve hacim elemanı üzerinde yapılan işteki değişimin toplamına eşittir. Bu da “enerjinin korunumu” yasasıdır.

Bu üç ilkeyi en genel haliyle; sıkışabilir, zamana bağlı, ağdalı akış için ifade eden denklemler Navier-Stokes* denklemleridir. Bu çalışmada üç boyutlu sıkışamaz, ağdalı, sabit viskozite ve yoğunlukta, adyabatik ve daimi akış (hacim kuvvetleri ihmal) uygulamaları söz konusu edileceğinden; yönetici denklemler, Navier-Stokes denklemlerinden zamana göre kısmi türev ve yoğunluğun kısmi türevlerini içeren terimlerin ayıklanmasıyla elde edilir:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \quad (3.2.a)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] \quad (3.2.b)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \quad (3.2.c)$$

Burada ρ yoğunluk; u , v ve w hızlar; ν kinematik viskozite, p basınçtır. Yukarıdaki (3.1) denklemi “süreklilik”, (3.2.a-b-c) denklemleri “momentumun korunumu” denklemi olarak bilinir. Akış adyabatik olarak kabul edildiğinden enerjinin korunumu denklemi burada yazılmamıştır. Böylece dört bilinmeyene (u , v , w , p) karşılık dört denklem elde edilmiş olur.

* Geleneksel olarak akışkanlar mekaniğinde Navier-Stokes denklemleri momentumun korunumu denkleminde elde edilen tek bir denklemi ifade ederken (Currie, 1993), modern HAD literatüründe üç korunum denkleminin oluşturduğu bütün denklem sistemi bu adla anılır (Anderson, 1995).

3.1.3 Türbülans Modelleri

Mühendislik problemlerinde karşılaşılan akışların çoğu türbülanslı bir davranış gösterir. Küçük Reynolds sayılarında atalet kuvvetleri viskoz kuvvetlerden daha küçük olduğundan akışın herhangi bir noktasında meydana gelen bir karışma sönümlenir ve akış laminar olarak kalır. Fakat büyük Reynolds sayılarında atalet kuvvetleri akışta meydana gelen karışmanın şiddetini daha da artırabilecek kadar büyük olur ve akış türbülanslı hale geçer. Bu durumda hız ve basınç gibi parametreler kararsız ve kaotik bir hal alır.

Navier-Stokes denklemlerindeki hız ve basınç değerleri anlıktır. Türbülanslı akışta anlık hızlar zaman ortalaması alınmış hız ile çalkantı hızının toplamına eşittir:

$$\left. \begin{aligned} u &= \bar{u} + u' \\ v &= \bar{v} + v' \\ w &= \bar{w} + w' \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

Burada u , v , w anlık hızlar; \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} zaman ortalaması alınmış hızlar; u' , v' , w' ise çalkantı hızlarıdır. Navier-Stokes denklemlerinin zaman ortalaması alınmış hız ve basınç terimlerine göre düzenlenmiş şekli “Reynolds ortalama Navier-Stokes” (RANS-*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) denklemleri olarak adlandırılır (Versteeg ve Malalesekera, 1995; Tu vd., 2008).

Fakat RANS denklemleri kapalı bir denklem sistemi oluşturmak için yetersizdir. Çünkü türbülanslı akış için yapılan düzenlemelerle, denklemlere altı yeni bilinmeyen eklenir. Bunlar Reynolds gerilme terimleridir. Bu nedenle, eksik olan ifadeleri tamamlamak amacıyla çeşitli türbülans modelleri geliştirilmiştir. Bu modellerden bazıları Tablo 3.1 de görülmektedir.

Tablo 3.1 Bazı türbülans modelleri

RANS temelli modeller	- Spalart-Allmaras modeli - k- ϵ modeli - k- ω modeli - Reynolds gerilme modeli (RSM)
DNS (<i>Direct Numerical Simulation</i>) modeli	
LES (<i>Large Eddy Simulation</i>) modeli	
DES (<i>Detached Eddy Simulation</i>) modeli	

RANS temelli modellerden Spalart-Allmaras, k- ϵ ve k- ω modellerinde Reynolds gerilmeleri Boussinesq yaklaşımıyla elde edilirken, RSM modelinde gerilme denklemleri doğrudan çözülür. RSM modeli Navier-Stokes deklemlerine nazaran yedi ek denklem içerir, ve bu nedenle daha fazla bilgisayar kaynağı gerektirir. DNS modeli ise türbülanslı akışların en doğru şekilde çözüldüğü modeldir. Bu model hiçbir türbülans modeli kullanmadan, doğrudan Navier-Stokes denklemlerini çözer. Fakat oldukça yüksek işlemci kapasitesine ihtiyaç duyar. Çözüm zamanı $Re^{3/4}$ ile doğru orantılı olarak artar. LES modelinde ise büyük girdaplar çözülürken, görece daha küçük girdaplar modellenir. Genellikle RANS temelli modellere göre daha ince bir çözüm ağı oluşturulmasını gerektirir. Fakat bu model de yüksek kapasitede bilgisayar kaynağı gerektirdiğinden henüz uygulama alanı fazla değildir. DES modeli ise RANS ve LES modellerinin bir kombinasyonu olan karma bir modeldir. Bu modelde; duvar yakınındaki bölgeler RANS benzeri bir yaklaşımla, geri kalan serbest akış bölgesi de LES yaklaşımıyla çözülür.

k- ϵ modeli en çok kullanılan türbülans modellerindendir. Biri türbülans kinetik enerjisi k , diğeri türbülans sönümlenme katsayısı ϵ için olmak üzere iki adet transport denklemi içerir. k- ϵ modelinin *Standart*, *Realizable*, ve *RNG* olmak üzere çeşitli formülasyonları vardır. Bu model serbest akış bölgesi kayma tabakalarında (örn. jet akımları), duvar yakını bölgesi (sınır tabaka), ve arka bölge (*wake structure*) akışlarında iyi sonuçlar vermektedir (Bardina vd., 1997). Bu çalışmada da standart k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır.

3.1.3.1 Standart k-ε Modeli

k-ε modeli türbülans kinetik enerjisini etkileyen mekanizmalar üzerine odaklanır ve viskoz gerilmeler ile Reynolds gerilmeleri arasında bir benzeşim olduğu ön kabulünü yapar.

Türbülanslı bir akışta anlık toplam kinetik enerji, ortalama kinetik enerji ve türbülans kinetik enerjisinin toplamına eşittir (Versteeg ve Malalasekera, 1995):

$$K(t) = \bar{k} + k \quad (3.4)$$

$$\bar{k} = \frac{1}{2}(\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) \quad (3.5)$$

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (3.6)$$

Bousinessq hipotezi Reynolds gerilmeleri ile ortalama deformasyon oranı arasında bir ilişki kurmuştur:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3.7)$$

τ_{ij} Reynolds gerilmeleri, μ_t türbülans dinamik viskozitesi, k türbülans kinetik enerjisi, δ_{ij} ise Kronecker deltasıdır. i ve j indislerinin aldığı 1, 2, ve 3 değerleri kartezyen koordinat sisteminde sırasıyla x , y ve z ' yi belirtir. $(\bar{\quad})$ simgesi terimlerin zaman ortalamasının alındığını gösterir.

Türbülans dinamik viskozitesi de türbülans kinetik enerjisi ve türbülans sönümlenme katsayısının bir fonksiyonu olarak ifade edilir:

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.8)$$

Burada c_μ boyutsuz model katsayısı ve ε türbülans sönümlenme katsayısıdır.

k ve ε için yazılan türbülans transport denklemleri şu şekildedir :

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \tau_{ij} S_{ij} - \rho \varepsilon \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} S_{ij} - c_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.10)$$

S_{ij} zaman ortalaması alınmış hızlara göre hesaplanan deformasyon hızı tansörüdür :

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.11)$$

c_μ , σ_k , σ_ε , $c_{\varepsilon 1}$ ve $c_{\varepsilon 2}$ karakteristik model sabitleri olup ,

$$\left. \begin{array}{l} c_\mu = 0.09 \\ \sigma_k = 1.0 \\ \sigma_\varepsilon = 1.3 \\ c_{\varepsilon 1} = 1.44 \\ c_{\varepsilon 2} = 1.92 \end{array} \right\} \text{değerlerini alırlar (Versteeg ve Malalasekera, 1995).}$$

3.1.4 Ayırıklaştırma

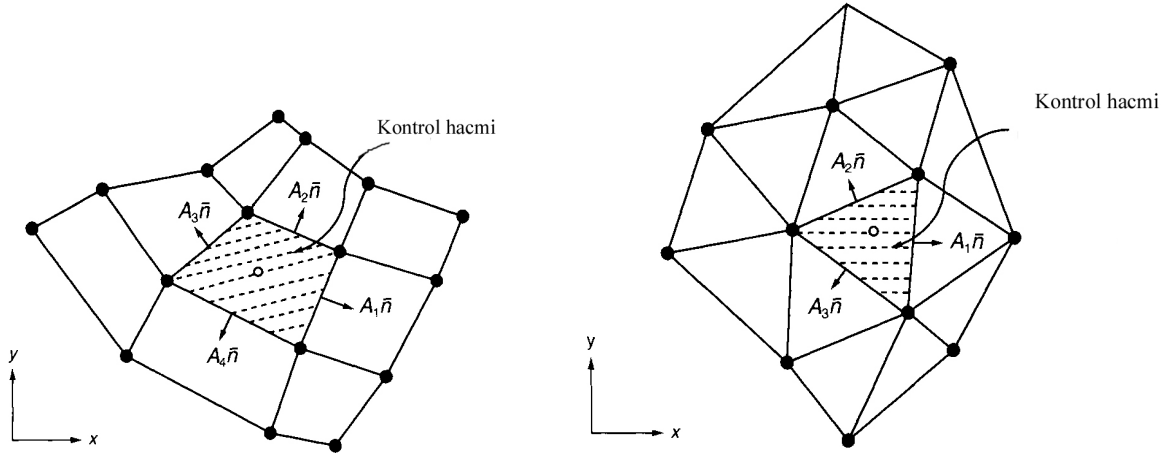
Kısmi diferansiyel denklemler veya integral denklemler gibi kapalı formdaki matematiksel ifadelerin analitik çözümleri, denklemlerin etki alanı boyunca sonsuz süreklilik gösteren bağımlı değişkenler içerir. Yalnızca kısmi diferansiyel denklemleri göz önüne aldığımızda ayırıklaştırma; kısmi türev içeren terimlerin, denklemin etki alanı içerisinde değişkenlerin sadece sonlu sayıda nokta veya bölge üzerinde tanımlandığı cebirsel ifadelere dönüştürülmesi işlemidir. Sayısal çözüm yapabilmek için; sonsuz süreklilik gösteren değişkenlerin, etki alanı içerisinde sonlu sayıda oluşturulmuş ayırık noktalara atanması gerekir. Bütün bu noktalar birlikte çözüm ağını oluşturur.

Çeşitli ayrıklaştırma yöntemleri vardır. Bunlar sonlu farklar, sonlu elemanlar ve sonlu hacimler metodudur (Anderson, 1995). Sonlu farklar metodunda; kısmi türevli terimler Taylor serisine açılarak değişkenlerin türevleri, uzay veya zamanda oluşturulmuş değişik noktalardaki değişken değerleri arasındaki farklar olarak ifade edilir. Sonlu elemanlar metodunda, göz önüne alınan akışın etki alanı her biri “eleman” olarak adlandırılan sonlu sayıda alt bölgeye ayrılır ve her alt bölgeye, bu bölgeler içindeki değişkenlerin değişimini ifade eden fonksiyonlar atanır. Bütün alt bölgelerdeki değişimlerin toplamı, tüm akış alanının tanımlanması için kullanılır.

Sonlu hacimler metodu, HAD içerisinde en çok kullanılan yöntemdir. Buna göre, çözüm alanı sonlu sayıda hacme bölünür ve her hacim için ayrı ayrı korunum denklemleri uygulanır. Değişken değerleri her kontrol hacminin merkezinde hesaplanır. Kontrol hacmi yüzeylerindeki değerlerin merkezdeki değerler cinsinden bulunması ise interpolasyonla yapılır. Her kontrol hacmi için, komşu düğüm noktalarındaki değerleri veren cebirsel denklemler elde edilir.

Sonlu hacimler metodunda noktalar yerine kontrol hacimleri kullanıldığı için çözüm ağını oluşturan hacimlerin geometrisi serbestçe seçilebilir. Her kontrol hacminin konumunun ve şeklinin düzenli dikdörtgenler prizması olduğu yapısal ağ (*structured grid*) yerine, hacimlerin geometri ve konumları için daha fazla seçenek sunan yapısal olmayan ağ (*unstructured grid*) kullanılabilir. Sonlu elemanlar metodunda kullanılan ağ tipi, sonlu hacimlerde de kullanılabilir. Böylece iki boyutlu çözümler için üçgenler ve dörtgenlerin, üç boyutlu durumda ise dörtyüzlü ve altıyüzlü hacimlerin karmasından oluşan bir çözüm ağı oluşturulabilir. Bu şekilde oluşturulan yapısal olmayan bir çözüm ağı, karmaşık geometriler içeren problemlerde büyük kolaylık sağlar. Bu yöntemin bir diğer üstünlüğü de fonksiyonları cisme uydurulmuş koordinat sistemine taşıyan dönüşüm denklemlerine ihtiyaç duyulmamasıdır.

Bu çalışmada kullanılan FLUENT programı da sonlu hacimler yöntemiyle ayrıklaştırma yapmaktadır.



Şekil 3.1 Yapısal olan (solda) ve yapısal olmayan (sağda) ağıın bir gösterimi (Tu vd., 2008).

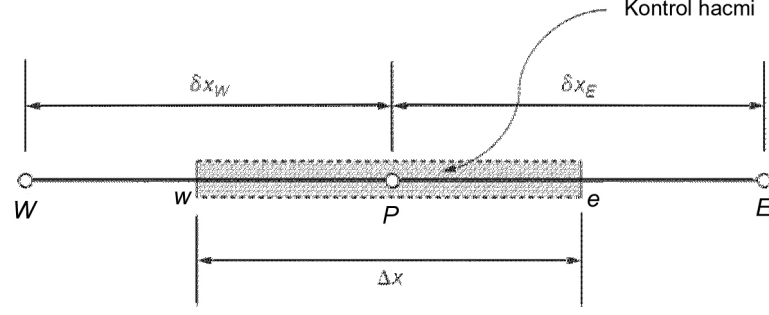
3.1.4.1 Sonlu Hacimler Metoduyla Yönetici Denklemlerin Cebirsel Hale Getirilmesi

Yönetici denklemlerin cebirsel hale getirilmesi için, şu üç duruma göre bir sayısal yöntem geliştirilir : (1) daimi akışta difüzyon, (2) daimi akışta difüzyon ve taşınım, (3) zamana bağlı akışta difüzyon ve taşınım.

ϕ genel olarak herhangi bir değişkeni ifade etmek üzere; bir boyutlu, daimi akışta ϕ değişkeninin salt difüzyonu olduğu durumda yönetici denklem şu şekildedir (Versteeg ve Malalasekera, 1995):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + S_{\phi} = 0 \quad (3.12)$$

Γ difüzyon katsayısını, S_{ϕ} kaynak terimini belirtmektedir.



Şekil 3.2 Merkezi P noktası olan bir kontrol hacminin tek boyutlu gösterimi (Tu vd., 2008).

İlk olarak (3.12) denklemi için Gauss teoremi uygulanır. Gauss teoremi genel haliyle şöyle ifade edilir:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{1}{\Delta V} \int_V \frac{\partial \phi}{\partial x} dV = \frac{1}{\Delta V} \int_A \phi dA^x \approx \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^N \phi_i A_i^x \quad (3.13)$$

Bu durumda (3.12) denklemindeki kısmi türev içeren terim şu hali alır:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = \frac{1}{\Delta V} \int_V \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dV = \frac{1}{\Delta V} \int_A \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dA^x \approx \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^N \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_i A_i^x \quad (3.14)$$

Burada tek boyutlu akış için $A_1^x = -A_w$ ve $A_2^x = A_e$ olur. Böylece denklem (3.14) aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e A_e - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w A_w \quad (3.15)$$

(3.12) denklemindeki ikinci terim, S_ϕ kaynak teriminin ΔV sonlu kontrol hacmi boyunca sabit kaldığı kabulüyle,

$$\frac{1}{\Delta V} \int_{\Delta V} S_\phi dV = S_\phi \quad (3.16)$$

olarak yazılır. Böylece, (3.12) denkleminin ayrılaştırılmış hali aşağıdaki gibi olur:

$$\frac{1}{\Delta V} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e A_E - \frac{1}{\Delta V} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w A_W + S_\phi = 0 \quad (3.17)$$

Parantez içerisindeki kısmi türev terimleri de ayrıca cebirsel şekilde ifade edildikten sonra denklem (3.17) şöyle yazılır:

$$\frac{\Gamma_e A_E}{\Delta V} \left(\frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_E} \right) - \frac{\Gamma_w A_W}{\Delta V} \left(\frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_W} \right) + S_\phi = 0 \quad (3.18)$$

3.1.5 Cebirsel Denklemlerin Sayısal Çözümü

Yönetici denklemlerin ayrıklaştırılması sonrasında lineer veya lineer olmayan bir cebirsel denklemler sistemi elde edilir. Bu denklem sisteminin çözümü için uygulanabilecek iki ayrı sayısal yöntem vardır: *direkt yöntemler* ve *iteratif yöntemler*.

Gauss eliminasyon metodu, Cramer kuralı, ve Thomas algoritması gibi yöntemler direkt yöntemler arasındadır. Bu yöntemlerde çözüme sonlu sayıda adım sonrasında ulaşılır.

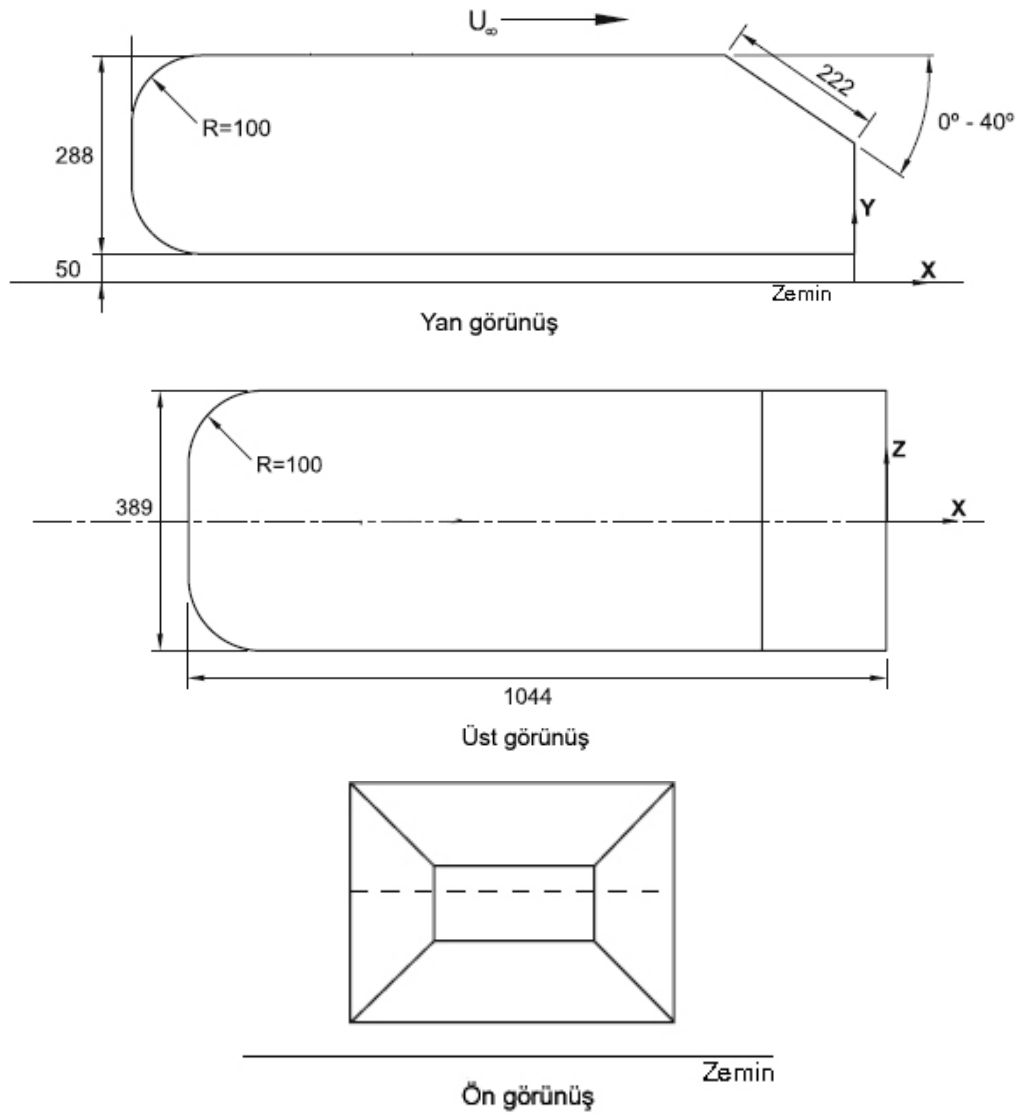
İteratif yöntemler ise verilen başlangıç değerlerinden çözüme başlayarak, belirlenen bir yakınsama kriterine ulaşılan kadar sürekli tekrarlanan algoritmalarından oluşur. Direkt yöntemlerin tersine, atılan sonlu sayıda adım sonrasında sonuca ulaşılmaz. İlk sonuçlar tahmini değerlerdir, bu değerler kullanılarak algoritma tekrar tekrar çalıştırılır ve asimptotik bir şekilde daima çözüme yaklaşılır. Akışkanlar mekaniğinde yönetici denklemler lineer olmadığından ve çok fazla sayıda değişken içerdiklerinden, iteratif yöntemlerle çözümü direkt yöntemlere göre daha kullanışlıdır.

Eğer sayısal çözüm giderek analitik çözüme yaklaşıyorsa çözüm “yakınsak”tır. Ayrıklaştırmadan kaynaklanan hatalar giderek küçülüyor veya sabit kalıyorsa çözümün “kararlı” olduğu söylenebilir.

4. TAŞIT AERODİNAMİĞİNDE BİR SAYISAL ÇÖZÜM UYGULAMASI: AHMED MODELİ

4.1 Giriş

Ahmed modeli; taşıt aerodinamiği alanında yapılan çalışmalarda bir referans olarak kabul edilmiş, basit bir geometriye sahip araç modelidir. Kara taşıtlarının arka bölgesinde oluşan girdaplı akımın zaman ortalamalı bir deneysel analizini yapmak üzere S. R. Ahmed ve ekibi tarafından geliştirilmiştir.



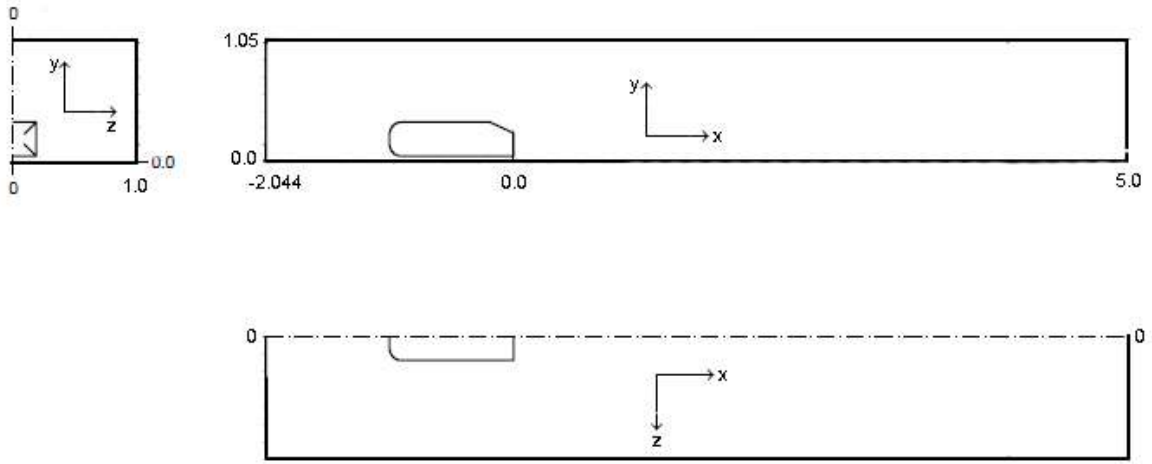
Şekil 4.1 Ahmed modelinin geometrisi (Uzunluk ölçüleri mm cinsindedir.)

Ahmed tarafından yapılan rüzgar tüneli deneylerinde aracın arka eğim açısının 0° ile 40° arasında 5° ’ lik farklarla değişen değerleri için sonuçlar elde edilmiştir ve sürüklenme kuvvetlerinin 30° ’ lik kritik arka eğim açısında en yüksek değere çıktığı görülmüştür. 30° ’ den büyük açılarda sürüklemeye ani bir düşüş ve arka bölge akımının yapısında büyük değişim olduğu gözlenmiştir. 30° ’ nin altındaki açılarda birbirine zıt yönde dönen güçlü girdap oluşumları vardır. Eğimli yüzeyle üst yüzeyin birleştiği kenarın orta kısmında akım ayrılması gerçekleşir ve eğimli yüzeyde akım tekrar birleşir. Kritik değerden büyük açılarda ise girdaplar çok fazla kuvvetli değildir. Akım aracın bütün üst yüzeyi ve kenarları boyunca ayrılır ve tekrar birleşmez (Lienhart vd., 2000).

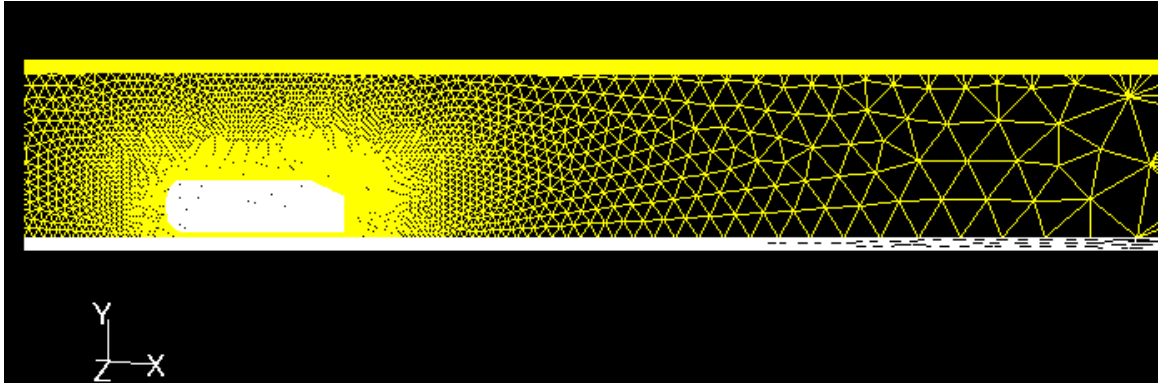
4.2 Sayısal Çözüm

4.2.1 Problem Kurulumu

Bu çalışmada Ahmed modelinin çevresindeki üç boyutlu akış, arka eğim açısının 25° ve araç çevresindeki hava hızının 40 m/s olduğu durum için incelenmiştir. Araç boyutları Şekil 4.1’ de gösterildiği gibidir. Ahmed modelinin üç boyutlu geometrisi *SOLIDWORKS* programı yardımıyla, tüm bilgisayar destekli tasarım programlarında yaygın olarak kullanılan ACIS formatında oluşturulmuş ve çözüm ağının oluşturulması işlemi için çizim dosyası GAMBIT programına aktarılmıştır. Çözüm ağı 7.044 m uzunluğunda, 2.0 m genişliğinde ve 1.05 m yüksekliğindedir. Çözüm ağının, $z=0\text{ m}$ düzlemine göre simetrisi alınacak olup; sadece bir yarısı işleme koyulacaktır. Böylece çözüm ağının genişliği 1.0 m ’ ye indirilmiş olacaktır.



Şekil 4.2 Ahmed modelinin çözüm ağı içerisindeki konumu (Ölçüler m cinsindedir.)



Şekil 4.3 Oluşturulan çözüm ağı

Araç uzunluğu L olmak üzere; araç ön tarafta $1L$, arka tarafta ise $5L$ boşluk kalacak şekilde çözüm alanı içerisine yerleştirilir. Bunun nedeni, aracın arka bölgesinde oluşan turbülansın sönümlenmesi için yeterince uzun bir mesafeye ihtiyaç duyulmasıdır. Aksi halde, simülasyon sonucunda gerçekçi olmayan bir akış ortaya çıkacaktır.

Çözüm alanı içerisinde yapısal olmayan bir ağı oluşturulmuştur. Hücre sayısı yaklaşık 800,000 civarındadır. Bunların yaklaşık 560,000 kadarı aracı ortalama 0.5 m mesafeden çevreleyen bölge içerisinde yer almaktadır.

Bir sonraki aşama sınır şartlarının atanmasıdır. Bu problem için sınır şartları girişte *velocity inlet*, çıkışta *pressure outlet*, zemin ve araç yüzeyleri için *wall*, üst ve iki yandaki yüzeylerde de *symmetry* olarak seçilir ve ağı dosyası FLUENT programında kullanılmak üzere dışa aktarılır.

Daha sonra ise FLUENT programı 3ddp (üç boyutlu, çift hassasiyet - *3 dimensions, double precision*) seçeneğinde çalıştırılır. *Grid* → *Info* → *Size* menüsünden; okutulan ağ dosyasındaki hücre, yüzey ve düğümlerin sayısı incelenebilir:

Grid Size

Level	Cells	Faces	Nodes	Partitions
0	796284	1608133	140424	1

1 cell zone, 8 face zones.

Sonrasında şu adımlar sırasıyla izlenir:

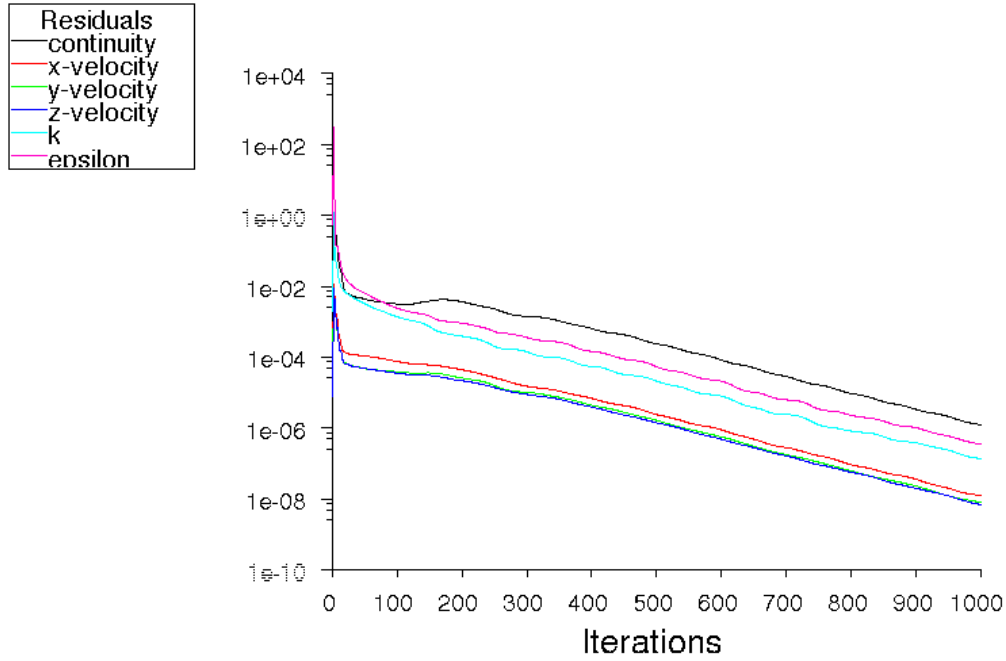
- Ağ dosyası *dm* cinsinden yaratılmış olduğundan ölçek oranı 0.1 girilerek ölçüler *m* birimine dönüştürülür.
- Çözücü model olarak *k-ε standard* türbülans modeli seçilir. Duvar fonksiyonları da “*standart*” olarak bırakılacaktır.
- Çözüm daimi akım için gerçekleştirilecektir.
- *Materials* menüsünde varsayılan akışkan olarak hava seçili olduğundan bunun için bir değişiklik yapılmasına gerek yoktur. Havanın yoğunluk ve viskozitesi sabit olarak alınacaktır.
- Girişteki *velocity inlet* sınır şartı için hız 40 *m/s* olarak seçilir. Bu hız çözüm ağının giriş yüzeyine dik olan hız, yani U_x hızıdır. Diğer sınır şartlarının parametreleri varsayılan haliyle bırakılır.
- Basınç-hız birleştirme metodu *SIMPLE* olacaktır. Ayrıklaştırma mertebesi bütün denklemler için *First order upwind* seçeneğinde ve rahatlatma altı faktörleri (*Under relaxation factors*) varsayılan haliyle bırakılır.
- Yakınsama mertebesi bütün değişkenler için 10^{-6} seçilir.
- Tahmini başlangıç değerleri giriş sınır şartından alınarak iterasyonlar başlatılır.

Çözüm ağındaki hücre sayısından bağımsızlığı kontrol etmek amacıyla, yukarıda sayılan çözüm adımları 1.6 milyon adet hücreye sahip daha ince bir ağ modeliyle tekrarlanmıştır.

4.2.2 Sonuçlar

Çözümler 1000 iterasyona kadar devam ettirilmiş olup; her biri 2.2 GHz saat hızında dört çekirdekli bir işlemci ve 3 GB belleğe sahip bir donanımda, kaba bir ağ kullanılan ilk çözüm

yaklaşık 5 saat zaman alırken, görece daha ince bir ağı kullanıldığı diğer çözüm yaklaşık 10 saatte tamamlanmıştır. Sonuç olarak iki çözümde de 10^{-6} yakınsama değerine ulaşılmıştır.



Şekil 4.4 Yakınsama değerlerinin iterasyon sayısına göre değişimini gösterir grafik

Sonuçların incelenmesinden önce, hesaplarda kullanılacak referans değerlerin doğru olarak girilmesi gerekir. Bu referans değerler şöyledir:

- Alan: 0.112 m^2 (Serbest akıma dik doğrultudaki projeksiyon alanı)
- Uzunluk: 1.044 m
- Hız: 40 m/s (Serbest akım hava hızı)
- Yoğunluk: 1.225 kg / m^3 (Serbest akım hava yoğunluğu)
- Dinamik viskozite: $1.7894 \cdot 10^{-5} \text{ kg / ms}$

Yapılan iki sayısal çözüm sonucunda bulunan toplam sürüklenme katsayısı (c_D) değerleri, Ahmed ve ekibi tarafından yapılmış olan deneysel çalışmanın sonuçlarıyla Tablo 4.1' de karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.1 Sayısal çözüm sonuçları ile deney sonuçlarının (Craft vd., 2001) karşılaştırılması

Sayısal Çözümler	Çözüm No	Hücre sayısı	İterasyon sayısı	Toplam sürüklenme katsayısı, c_D	% Hata
	1	800.000	1000	0,258	-9,474
2	1.600.000	1000	0,261	-8,421	
Deneysel çalışma			0,285		

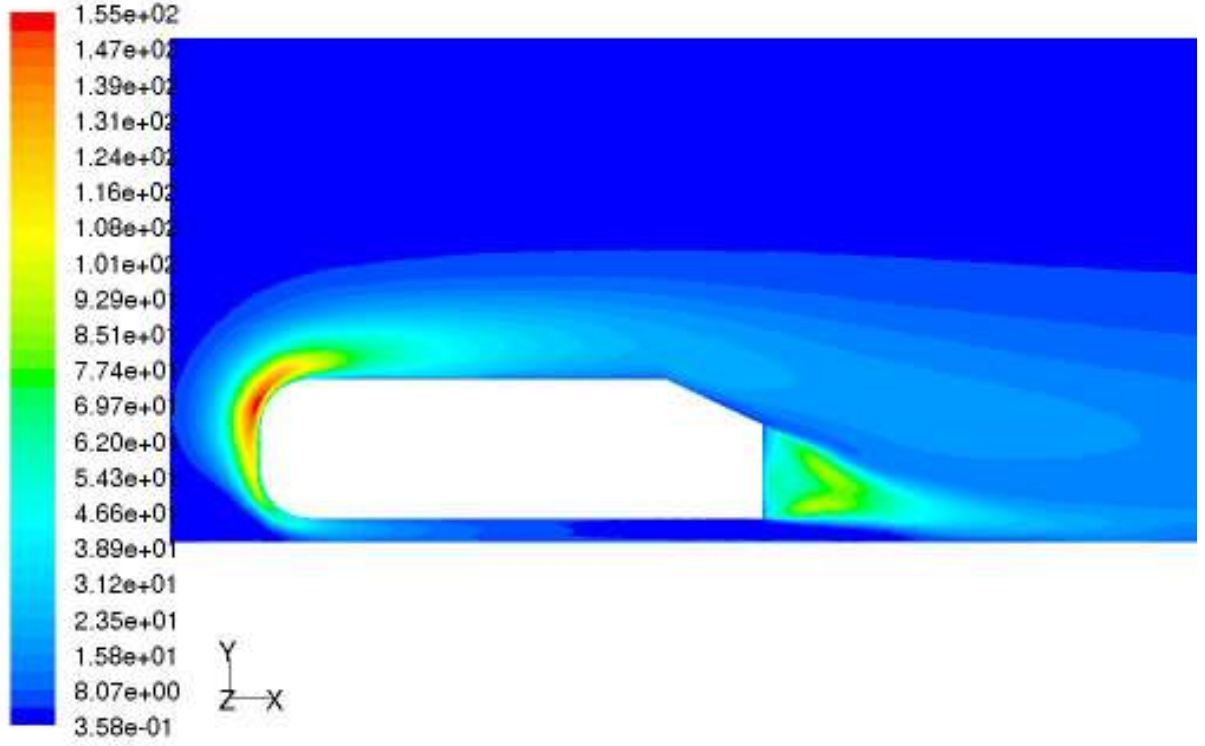
Burada toplam sürüklenme katsayısı,

$$c_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A_D} \quad (4.1)$$

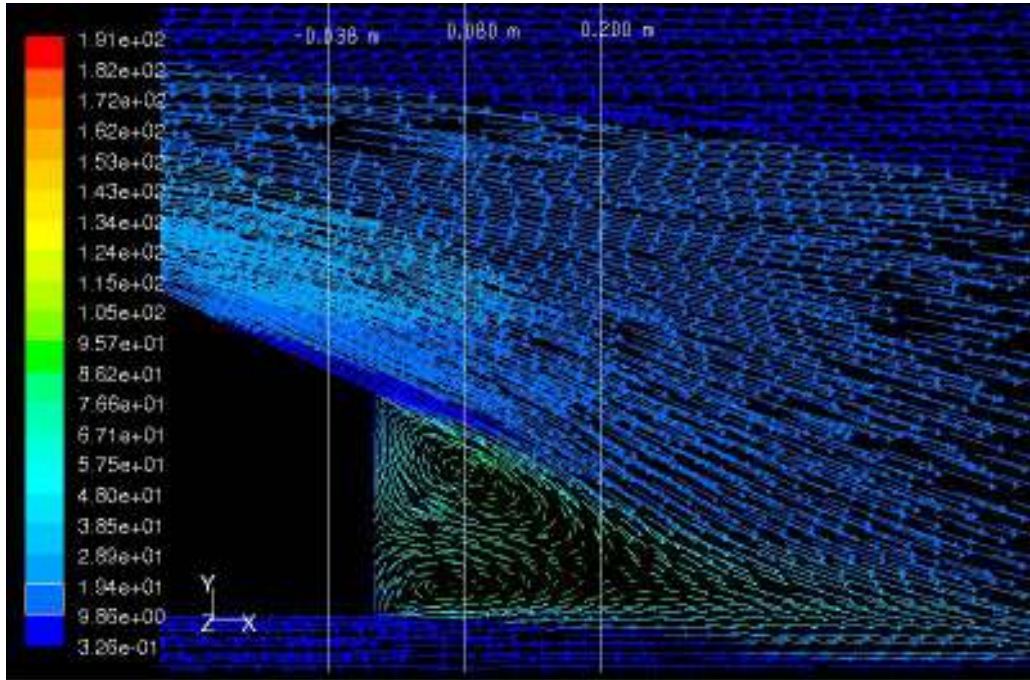
şeklinde hesaplanır (Anderson, 1991). F_D toplam sürüklenme kuvveti olup; ρ , U ve A_D yukarıda referans değerler kısmında belirlenmiş olan değerlerdir.

Ağ modelindeki hücre sayısından bağımsızlık kontrolü, sürüklenme katsayısı c_D ölçüt alınarak yapılmıştır. 1 nolu çözüm ile 2 nolu çözüm sonuçları arasında %1.15' lik bir değişim olduğu görülmektedir. $\pm \%5$ ' den az değişimler için hücre sayısından bağımsızlığın sağlanmış olduğu söylenebilir. 1.6 milyon adet hücreye sahip ağ ile yapılan çözüm referans kabul edilirse, sayısal çözüm sonucunun deney sonucundan %8.4 sapma gösterdiği görülür. Bu sapma büyük oranda, kullanılan *standart* $k - \varepsilon$ türbülans modelinin eksikliklerinden kaynaklanmaktadır.

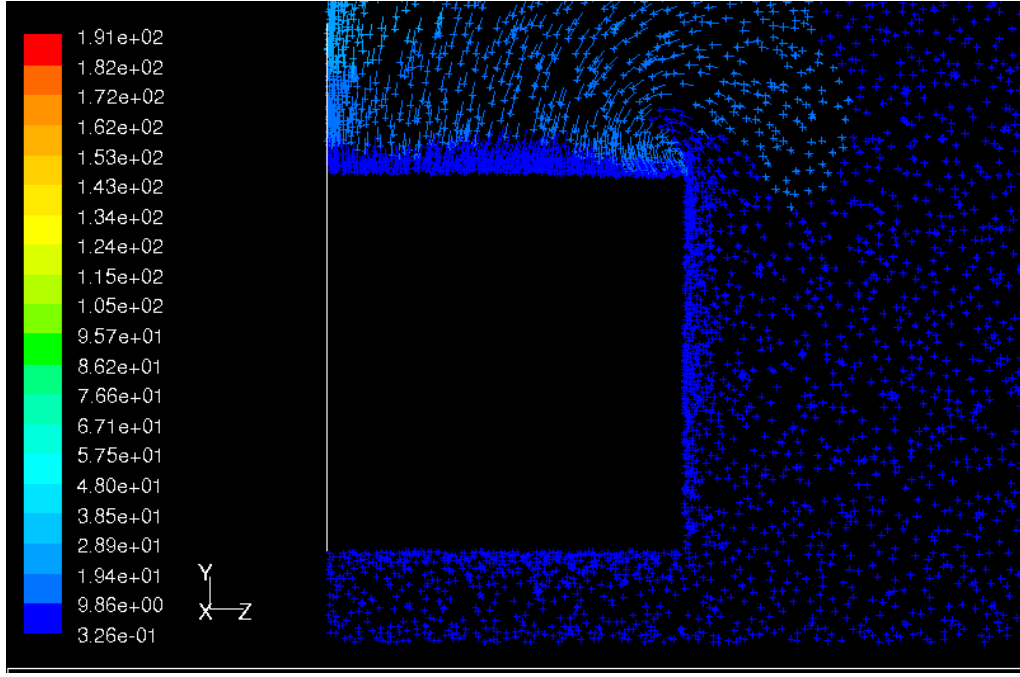
2 nolu çözüm için görüntülenen sonuçlar aşağıda gösterilmiştir:



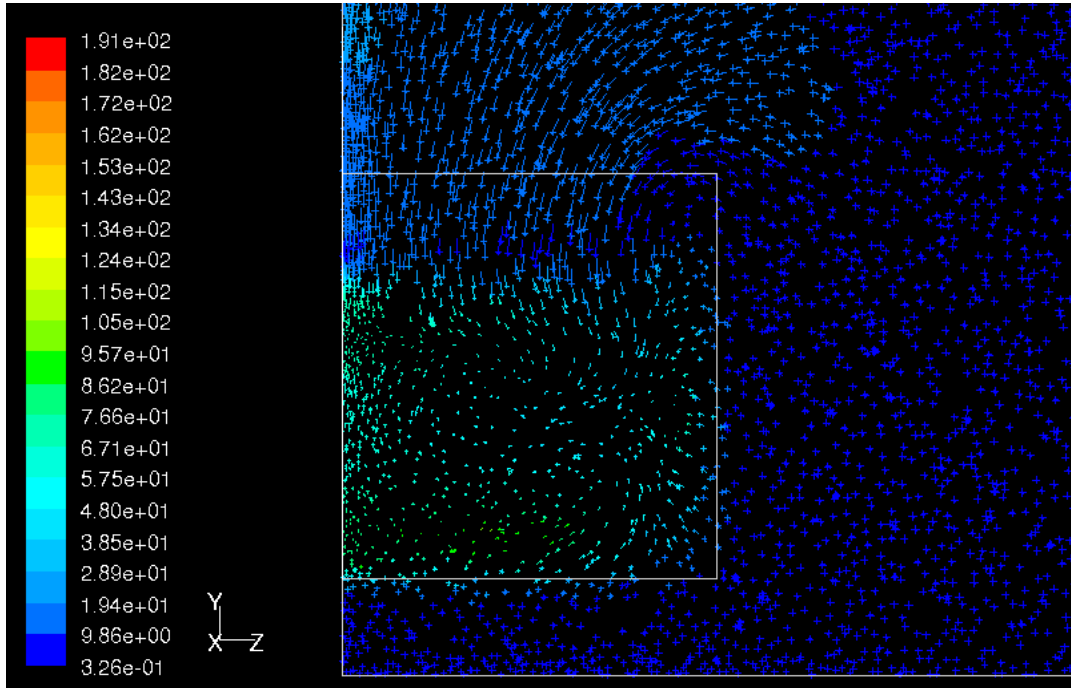
Şekil 4.5 $z=0$ simetri düzleminde türbülans kinetik enerjisi kontürleri



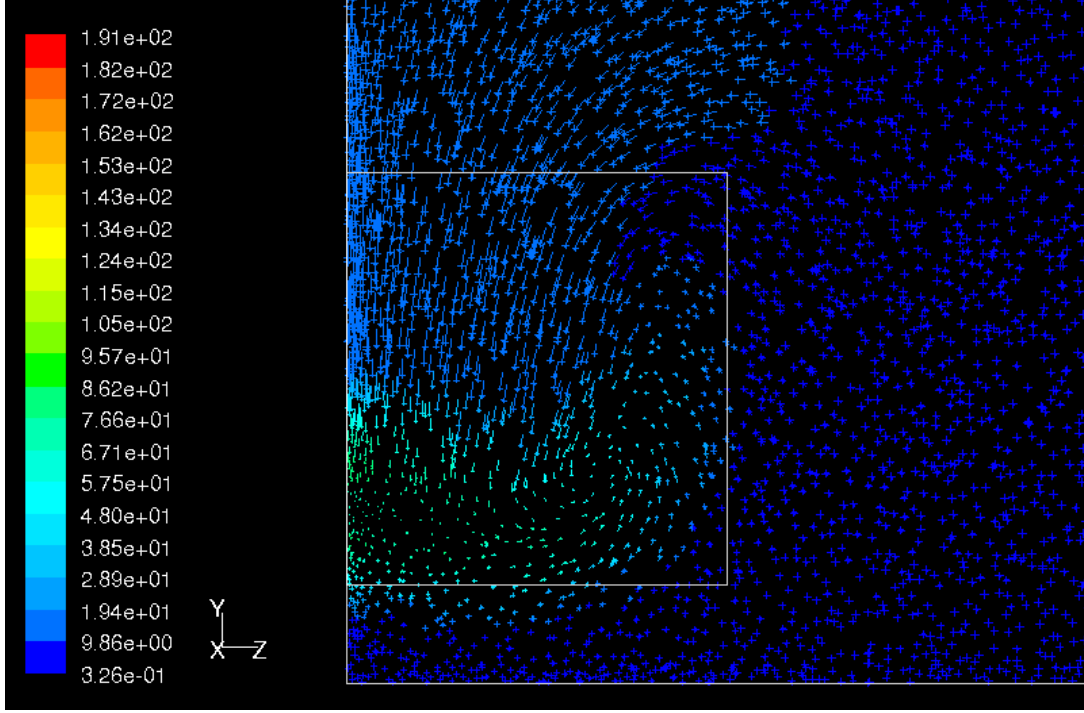
Şekil 4.6 $z=0$ simetri düzleminde, araç arka bölgesinde hız tarafından renklendirilmiş hız vektörleri



a) $x=-0.038$ m düzlemi (eğimli arka yüzey üzerinde)



b) $x=0.08$ m düzlemi (araç arka bölgesinin orta düzlemi)



c) $x=0.2$ m düzlemi (araç arka bölgesinin sonu)

Şekil 4.7 Türbülans kinetik enerjisi tarafından renklendirilmiş hız vektörleri

5. HAVA YASTIĞI AKIŞININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Hava yastıklı araçlarda hava yastığı aerodinamiği ile ilgili temel kavramlara ve yastıkta meydana gelen akışla ilgili bazı teorik yaklaşımlara daha önce kısaca değinilmişti. Bu bölümde ise verilen bir hava yastıklı araç geometrisinde yastık oluşumu sayısal olarak incelenecektir.

Sayısal çözümler aracın temelde iki ayrı hareket durumu için yapılmıştır:

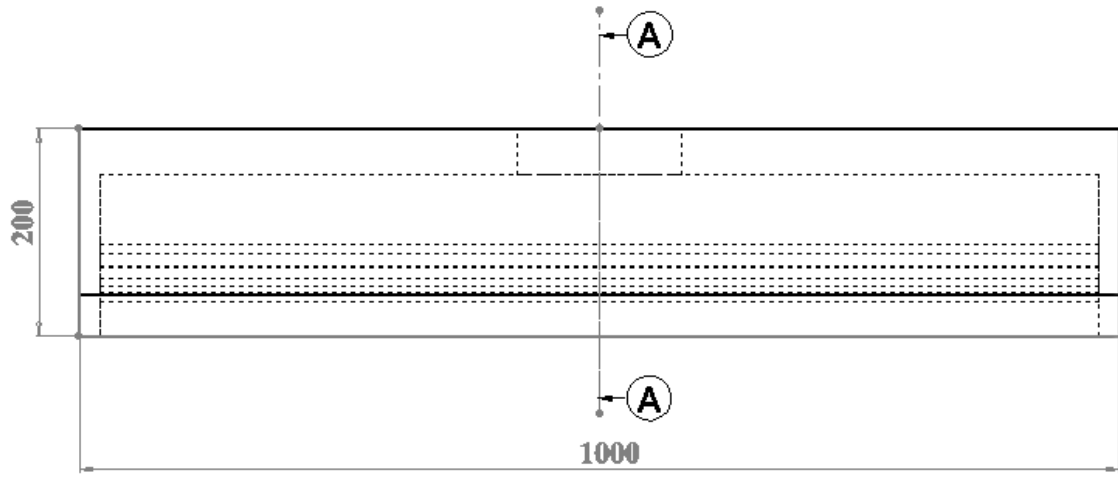
- 1- Yatay düzlemde hareketsiz olup, havada asılı durma hali (ileri hareket yok)
- 2- Süzülme hareketi: havada asılı kalarak yatay düzlemde ileri doğru gitme hali.

Her iki durumda da araç katı yüzey üzerinde hareket etmektedir. İncelenen araç çevresel jet ilkesine göre çalışmakta olup jet akımı basınç odasından nozüllere dağılırarak hava yastığına geçmektedir.

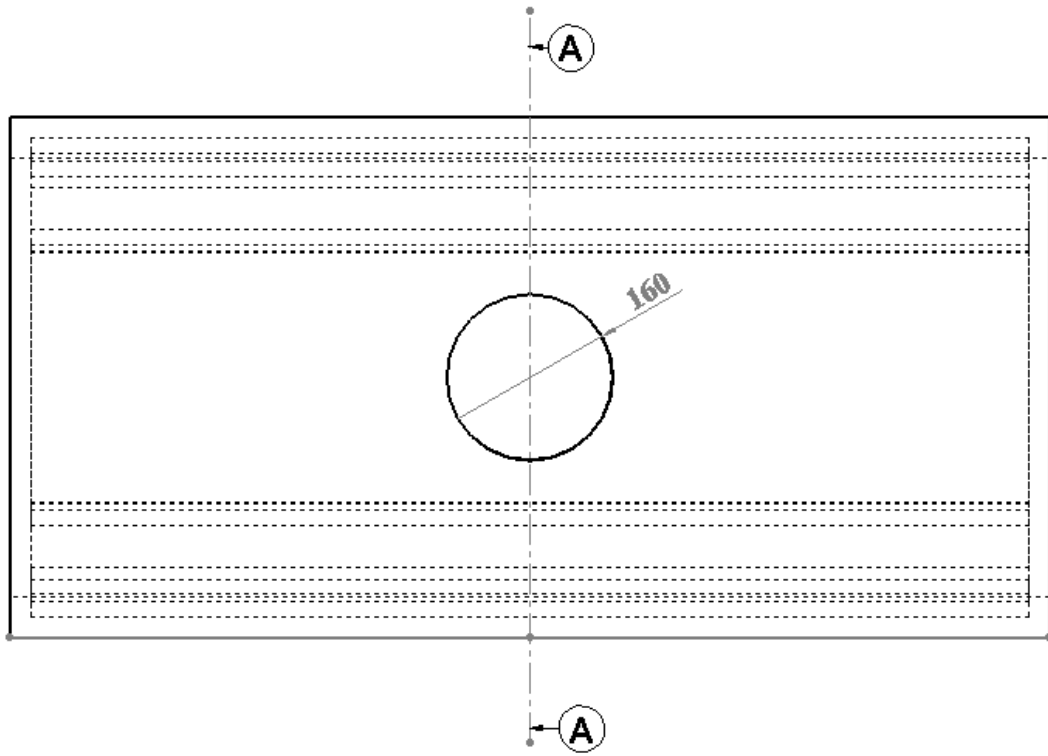
5.1 Havada Asılı Durma Hali

5.1.1 Geometri

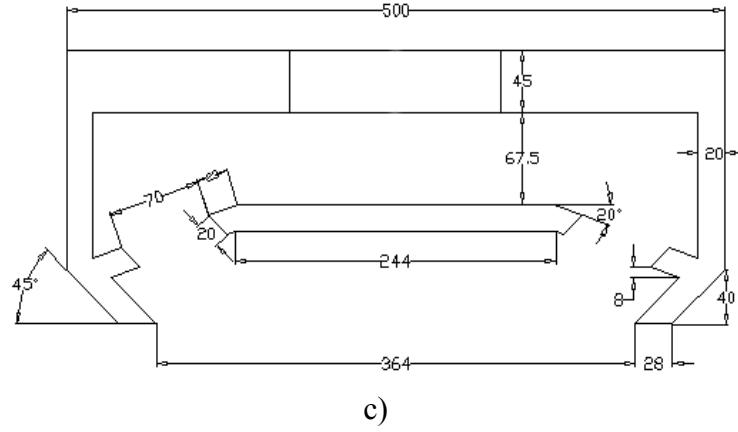
Hava yastıklı araca ait üç boyutlu geometri, *SOLIDWORKS* programı vasıtasıyla oluşturulmuştur. 1' inci tip hareketin incelendiği çözümlerde bir basitleştirmeye gidilerek, ileri doğru hareketi sağlayan pervaneler araç modeline dahil edilmemiş olup sadece yastığı oluşturan yatay fan bulunmaktadır.



a)



b)



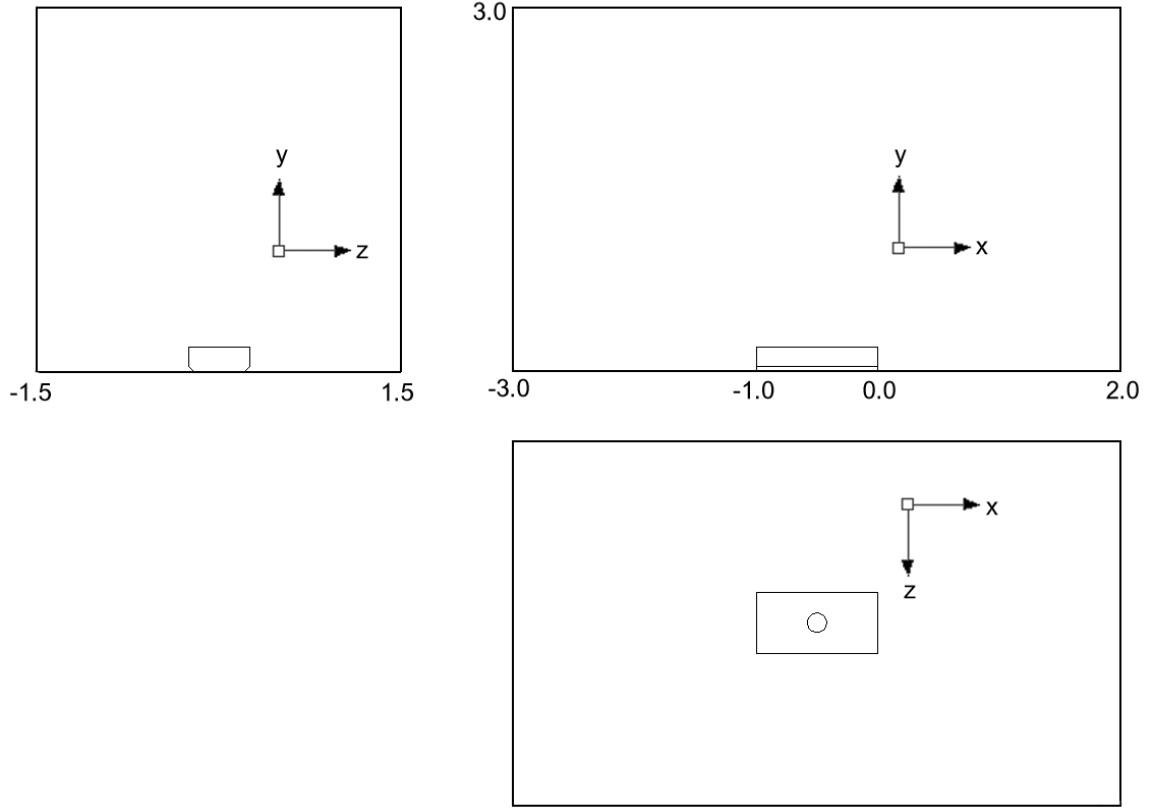
Şekil 5.1 Hava yastıklı araç geometrisi a) ön görünüş, b) üst görünüş, c) sol görünüş A-A kesiti (Ölçüler mm cinsindedir).

Araç modelinin teknik resimlerinde de görüldüğü gibi yastık yüksekliği 67.5 mm , etek yüksekliği 40 mm , jet nozüllerinin genişliği 70 mm , fan çapı ise 160 mm ' dir.

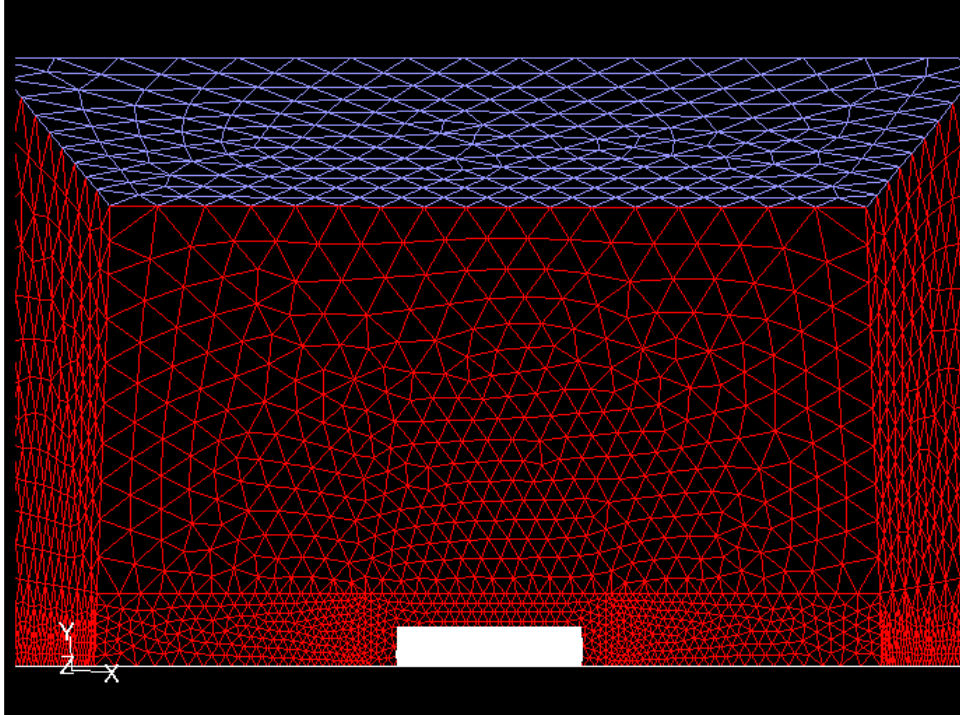
5.1.2 Problem Kurulumu ve Sayısal Çözüm

Oluşturulan araç geometrisi GAMBIT programına aktarıldıktan sonra, boyutları Şekil 5.2' de görüldüğü gibi bir çözüm alanı oluşturulmuştur. Hava yastıklı araç uzunluğu L olmak üzere; çözüm ağı uzunluğu $5L$, genişliği $3L$ ve yüksekliği de $3L$ kadardır. Aracın ileri doğru hareketi söz konusu olmadığından, çözüm ağı $z=0 \text{ m}$ ve $x=-0.5 \text{ m}$ düzlemlerinde simetriktir.

Hava yastıklı aracın hava açıklığının 10 mm , fan tarafından yaratılan basınç değişiminin de 3000 Pa olduğu durum için çözüm yapılacaktır. Bu nedenle araç, çözüm alanının alt yüzeyi ile arasında 10 mm boşluk kalacak şekilde çözüm alanına yerleştirilir.

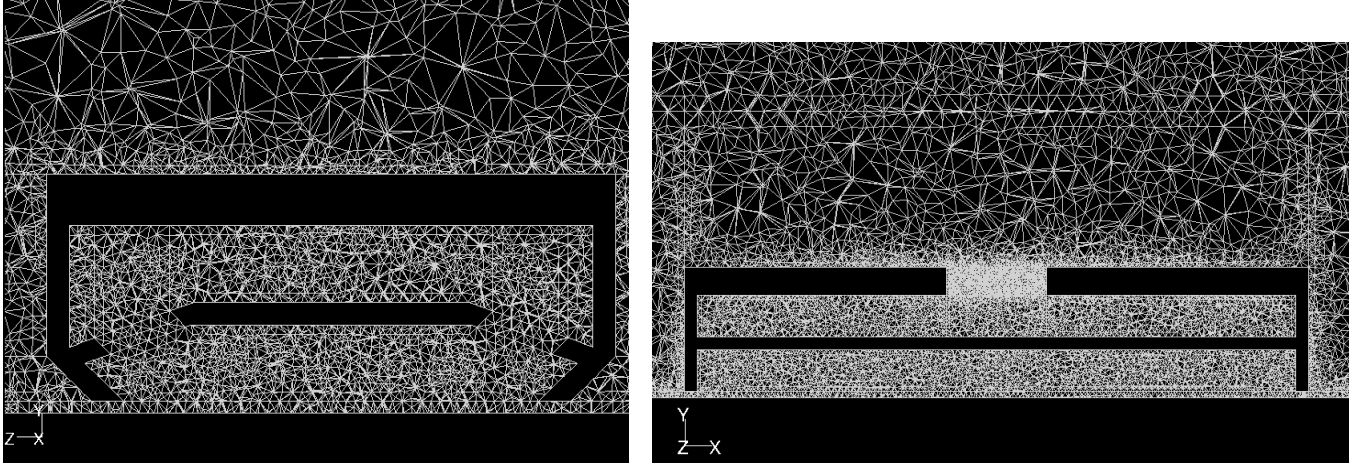


Şekil 5.2 Hava yastıklı araç geometrisinin çözüm ağı içerisindeki yerleşimi (Ölçüler m cinsindedir).



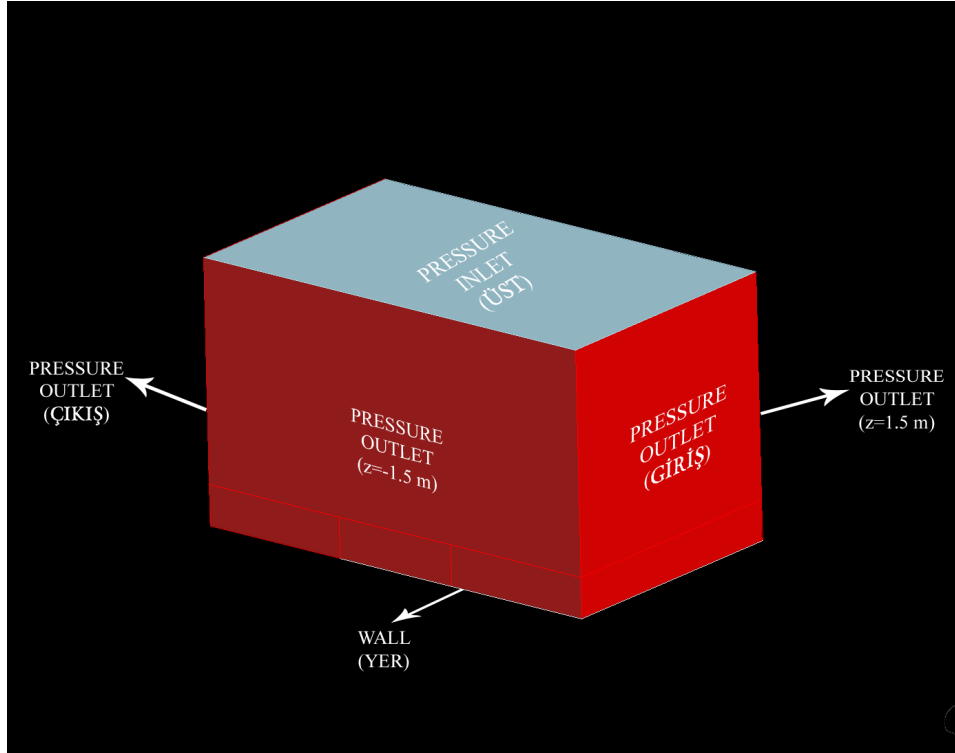
Şekil 5.3 Oluşturulan çözüm ağı

Yapısal olmayan bir ağ oluşturulmuş ve hücre sayısının araç etrafında yoğunlaşması sağlanmıştır. Burada hava yastığı ve çevresindeki akışkan hareketleri inceleneceğinden araç içerisinde görece daha sık bir ağ oluşturulmuştur. Toplam hücre sayısı 1 650 000 civarında olup, bunun yaklaşık 710 000 kadarı aracın iç kısmında bulunmaktadır. Yaklaşık 540 000 adet hücre de araç çevresine yığılmıştır. Bu da araç ve çevresini kapsayan 0.5 m^3 ' lük hacimde ağ yoğunluğunun yaklaşık olarak $2\,500\,000 \text{ adet-hücre}/\text{m}^3$ iken, çözüm alanının geri kalan kısmında ise $9\,000 \text{ adet-hücre}/\text{m}^3$ olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.4 Aracın iç kısmında oluşturulan ağ. Solda $x=-0.8 \text{ m}$ düzlemi, sağda $z=0 \text{ m}$ düzlemi.

Çözüm ağının giriş ve çıkış yüzeyleri ile $z=-1.5 \text{ m}$ ve $z=1.5 \text{ m}$ düzlemleri üzerindeki yüzeylerinde *pressure outlet*; üst yüzeyinde *pressure inlet* ve alt yüzeyinde de *wall* sınır şartı uygulanır. Araç iç ve dış yüzeyleri ile yatay fanda da sırasıyla *wall* ve *fan* sınır şartı seçilir.



Şekil 5.5 Çözüm ağı yüzeylerindeki sınır şartları

Sınır şartlarının belirlenmesinden sonra ağ dosyası FLUENT programına aktarılır ve sırasıyla şu adımlar takip edilir:

- Öncelikle ölçekleme yapılır. GAMBIT programında çizim *cm* ölçeğinde yapıldığından, 0.01 ölçekleme oranıyla uzunluklar *m* birimine dönüştürülür.
- Türbülans modeli *k-ε standart* olarak seçilir. Burada standart duvar fonksiyonları kullanılacaktır.
- Akışkan malzemesi için herhangi bir değişiklik yapılmayacaktır.
- *Fan* sınır şartı için fanın yarattığı basınç farkı 3000 *Pa* olarak sabit bir değerde alınır. Fan zonu ortalama alan vektörünün *y* bileşeninin değeri negatif değilse “*reverse fan direction*” seçeneği seçilir.
- *Pressure inlet* ve *pressure outlet* sınır şartları için bağıl basınç 0 *Pa* değerinde sabitlenir. Ters akış doğrultusunun tespit yöntemi ise “*yüzey normali doğrultusu*” olarak seçilir.
- Basınç-hız birleştirme metodu *SIMPLE*, ayrıklaştırma mertebesi *first order upwind* seçeneğinde olacaktır.
- Yakınsama mertebesi ise tüm değişkenler için 10^{-4} olarak ayarlanır.
- Tahmini başlangıç değerleri bütün sınırlardan alınır ve çözüm başlatılır.

Hücre sayısından bağımsızlık kontrolü için yaklaşık 900 000 adet hücreye sahip, daha kaba bir çözüm ağı için de aynı işlemler uygulanmıştır.

5.1.3 Sonuçlar

Sonuçlar incelenirken esas alınacak referans değerler şu şekilde olacaktır:

- Alan: 0.5 m^2 (Araç planform alanı)
- Uzunluk: 1 m
- Referans hız değeri fanın oluşturduğu jet hızı olarak alınır. Bu değer ortalama 38.824 m/s olarak okunur.
- Viskozite, yoğunluk, sıcaklık ve basınç değerleri varsayılan haliyle bırakılır.

İki ayrı çözüm için yapılan 1000 iterasyon sonrasında 10^{-3} mertebesinde bir yakınsamaya ulaşılmıştır. Bu çözümlere ait toplam kaldırma kuvveti katsayısı c_L ve toplam kaldırma kuvveti F_L değerleri Tablo 1' de görülmektedir.

Tablo 5.1 İnce ve kaba ağ ile yapılan çözüm sonuçlarının karşılaştırılması

Çözüm No	Hücre sayısı	Toplam kaldırma kuvveti, F_L (N)	Toplam kaldırma kuvveti katsayısı, c_L	% Değişim	
				% Δc_L	% ΔF_L
1	900.000	277,391	0,611	5,527	3,828
2	1.650.000	267,163	0,579		

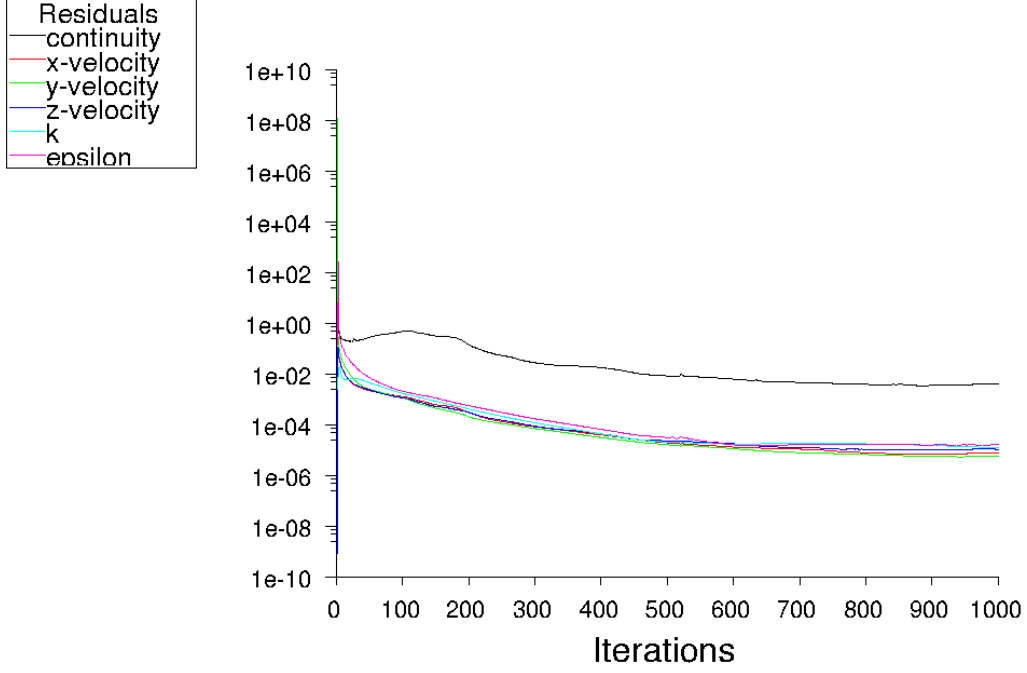
Burada toplam kaldırma kuvveti katsayısı,

$$c_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho U^2 A_L} \quad (5.1)$$

şeklinde hesaplanır. F_L toplam kaldırma kuvveti olup; ρ , U ve A_L yukarıda referans değerler kısmında belirlenen değerlerdir.

Toplam kaldırma kuvveti katsayısındaki %5.527 ve toplam kaldırma kuvvetindeki %3.828' lik fark hücre sayısından bağımsızlık açısından kabul edilebilirdir. Bu nedenle daha ince bir ağ oluşturulmasına gerek duyulmayıp 2 nolu çözüme ait sonuçlar referans alınacaktır.

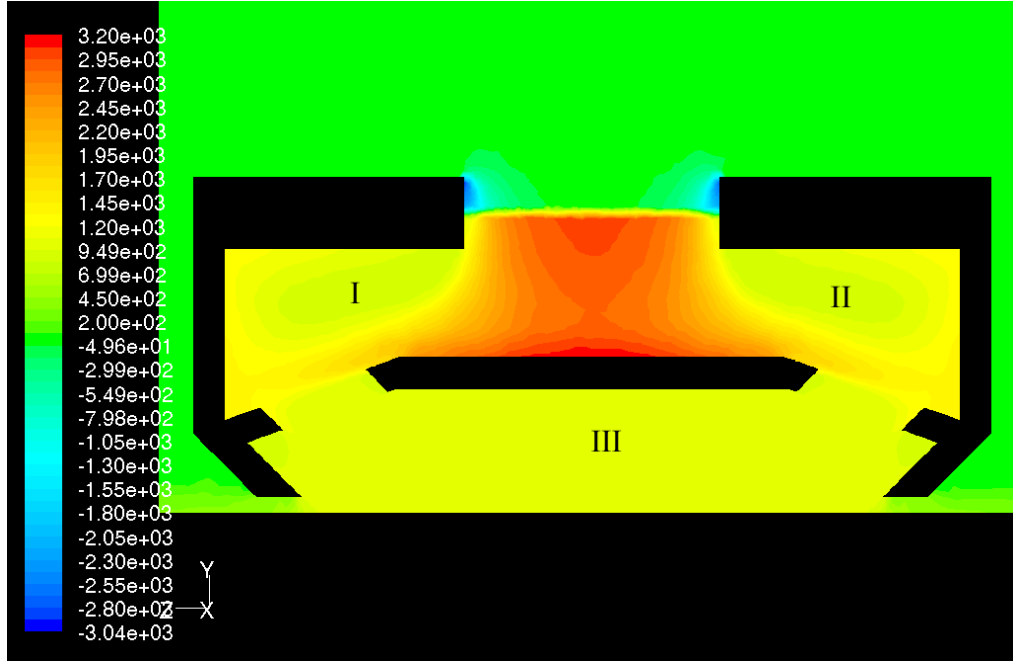
İterasyon sayısı ile artık değerlerin değişimi Şekil 5.6' da görülmektedir. Buna göre yaklaşık 600 iterasyondan sonra artıklardaki değişimlerin sifıra yaklaştığı görülür.



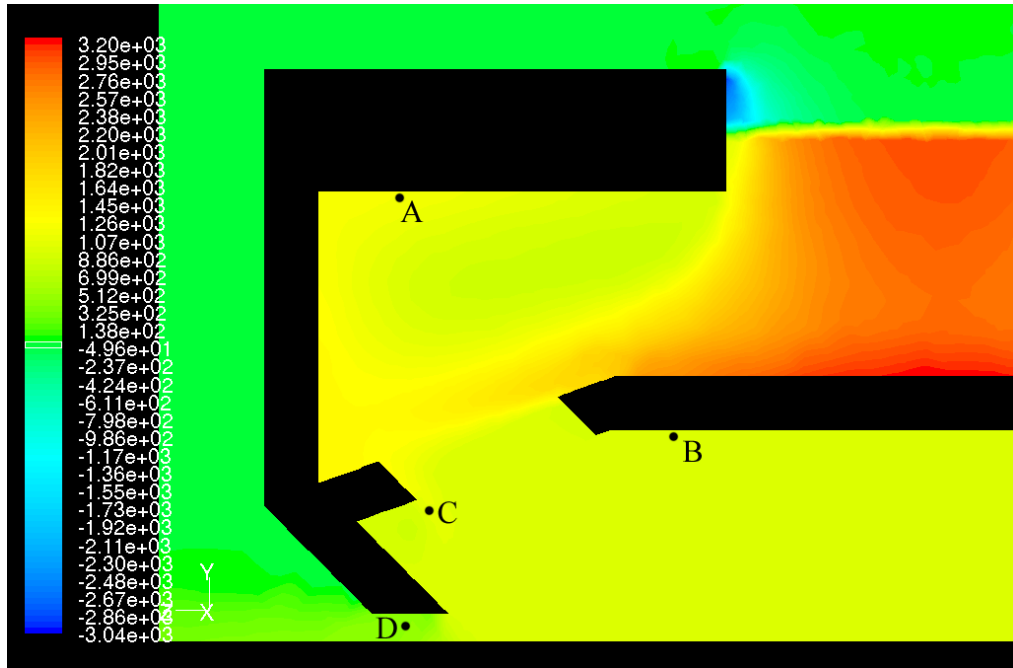
Şekil 5.6 Yakınsama değerlerinin iterasyon sayısına göre değişimi

5.1.3.1 Hız ve Basınçların Çeşitli Bölgelerde İncelenmesi

Daha önce de belirtilmiş olduğu gibi, bu bölümde hava açıklığının 10 mm ve fan basıncının 3000 Pa olduğu durumda yapılan çözümün sonuçları incelenecektir.



a)

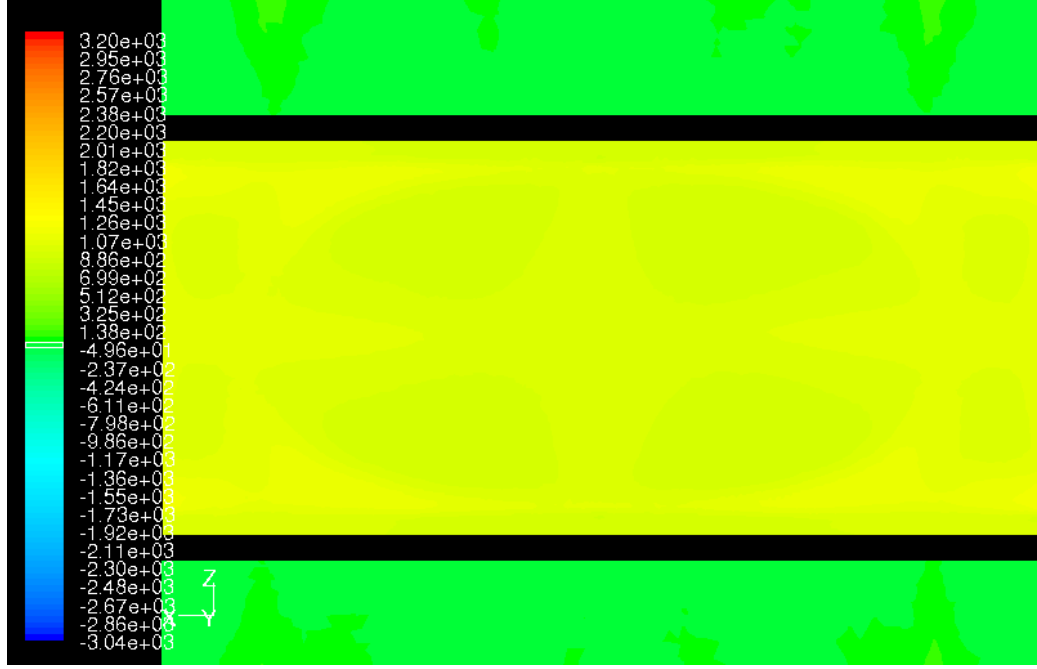


b)

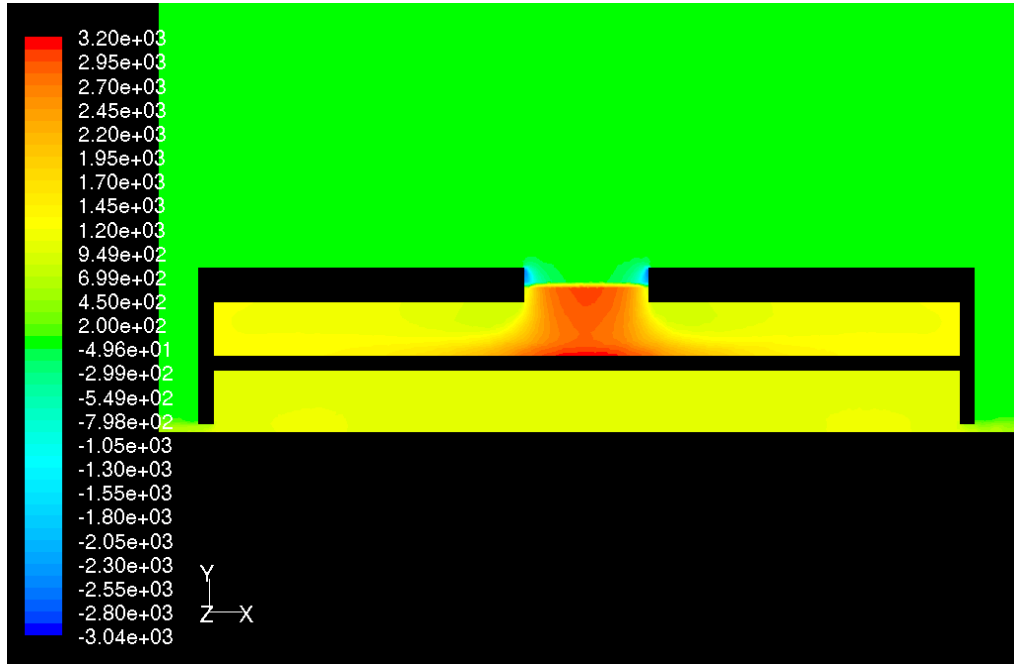
Şekil 5.7 $x=-0.5 m$ simetri düzleminde toplam basınç (Pa) kontürleri

Şekil 5.7.a' dan görülebileceği gibi; hava yastıklı araç içerisinde üç ayrı bölgede, yüksek basınçlı hava akımıyla çevrelenmiş; I, II ve III ile gösterilen alçak basınç alanları oluşmaktadır. Şekil 5.7.b' de hava yastığının çevresini saran koyu sarı renkli bölge, oluşan çevresel jet akımını göstermektedir. Üst bölmenin üst yüzeyine yakın A noktası civarında toplam basınç yaklaşık $1200 Pa$ ' dır. Üst bölme ile alt bölmeyi ayıran ara bölmenin alt

yüzeyine yakın B noktası civarında toplam basınç 1000 Pa , alt bölmeyi çevreleyen hava jeti üzerindeki C noktasında da yaklaşık 1100 Pa değerindedir. Hemen hava açıklığı bölgesindeki D noktasında ise toplam basınç 500 Pa olarak okunmuştur. Alt bölmede oluşan yastık toplam basıncı ortalama 1000 Pa 'dır. Çevresel hava jeti basıncıyla yastık basıncı arasındaki 100 Pa fark, hava yastığının oluşmasını sağlayan temel etkidir.

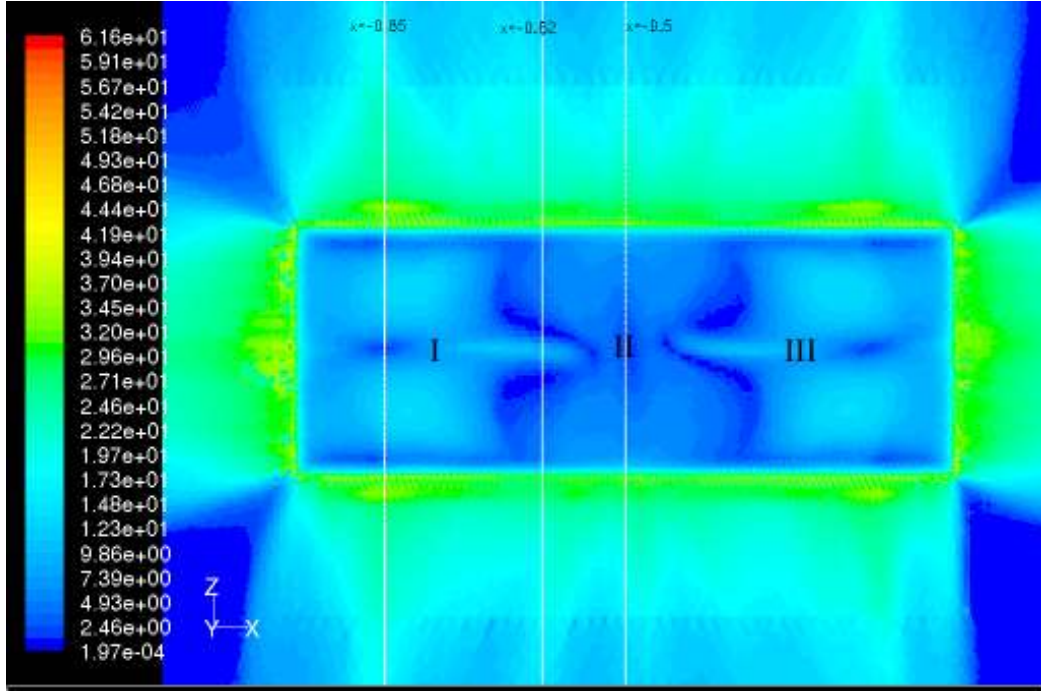


Şekil 5.8 $y=0.0475 \text{ m}$ düzleminde toplam basınç kontürleri



Şekil 5.9 $z=0 \text{ m}$ simetri düzleminde toplam basınç (Pa) kontürleri

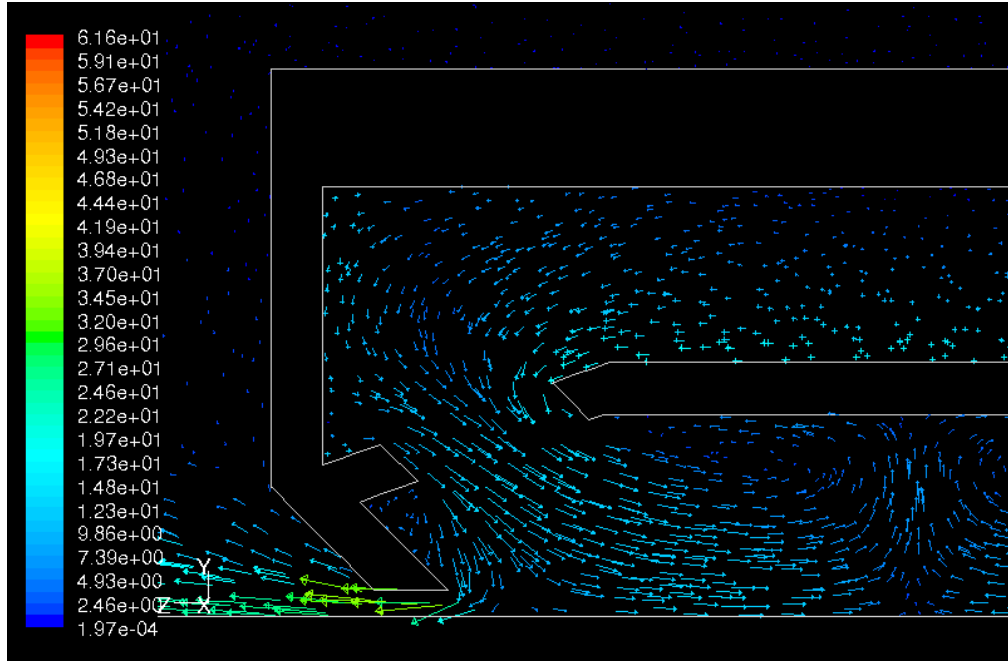
Yastığı yatay olarak bölen $y=0.0475$ m düzlemindeki basınç dağılımı Şekil 5.8' de gösterilmiştir. $z=0$ m düzlemine bakıldığında ise bu düzlem üzerinde; alt bölmenin ortasında ortalama yaklaşık 975 Pa basınçta, çevresine göre alçak basınçlı bir bölge olduğu gözlemlenmektedir.



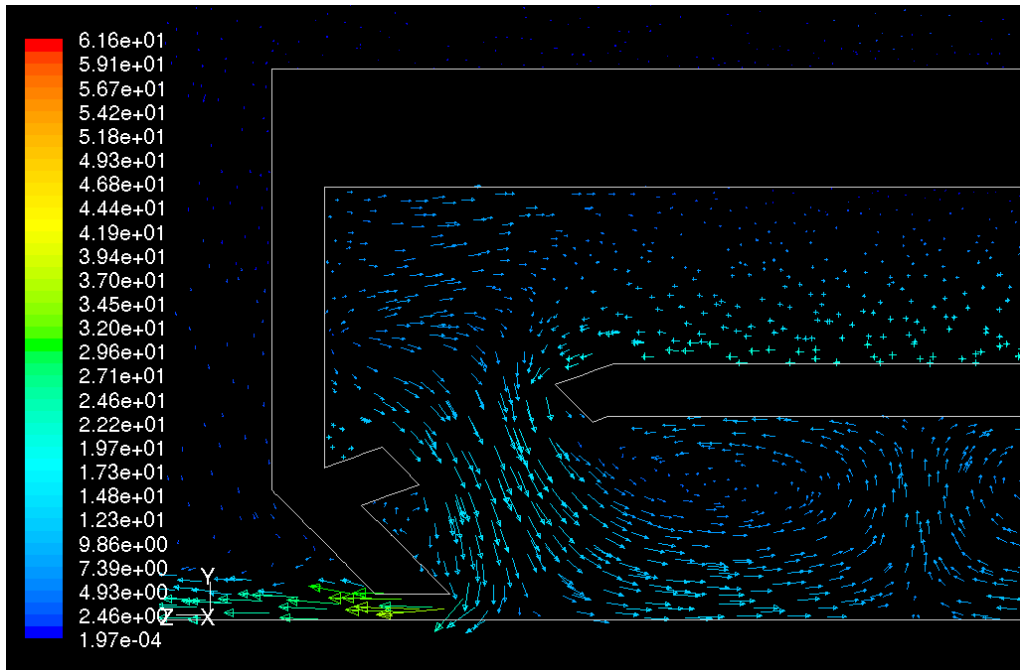
Şekil 5.10 $y=0.005$ m düzleminde hız (m/s) kontürleri

0.01 m yüksekliğindeki hava açıklığını yz düzleminde ikiye ayıran $y=0.005$ m düzlemindeki basınç değerlerine ait kontür grafiğinin gösterildiği Şekil 5.10' a bakılırsa; aracın en alt kısmında (hava açıklığı hizasında) x eksenı boyunca gidildiğinde I, II ve III gibi kabaca üç ayrı hız bölgesinin olduğu görülür. $x=-0.1$ m ile $x=-0.62$ m düzlemleri arasında kalan bölge olan I bölgesinde ve bu bölgenin $x=-0.5$ m düzlemine göre simetriği olan III bölgesinde, aracın xy düzlemine paralel olarak uzanan kenarları civarında düşük hız hatlarının olduğu görülmektedir. Bu hat boyunca jet akımının alt bölmeye geçiş açısı farklıdır ve zemin ile temas ettiği noktada ayrılarak buralarda durma noktaları oluşturur. Bu durma noktalarının oluşumu, $x=-0.85$ m düzleminde hız vektörlerinin gösterildiği Şekil 5.11.a' dan da gözlenebilir. Ortadaki II bölgesinde ise jet akımı, yastık içerisindeki hava akımını diğer iki bölgede olduğuna göre daha zayıf bir şekilde tutmaktadır ve yastık havasının bu bölgeden dışarıya kaçıışı daha fazla miktarda olacaktır. Fakat aracın yz düzlemine paralel olan kenarlarında jet akımının alt bölmeye geçebileceği nozüller bulunmadığından bu kenarların alt kısmı boyunca durma noktası oluşmamaktadır.

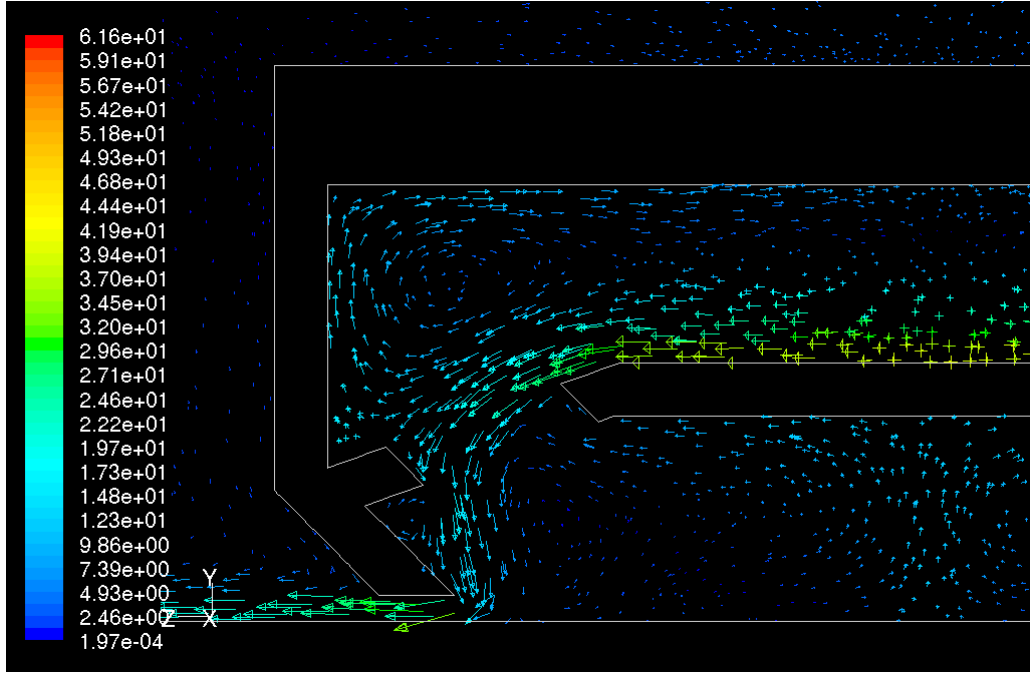
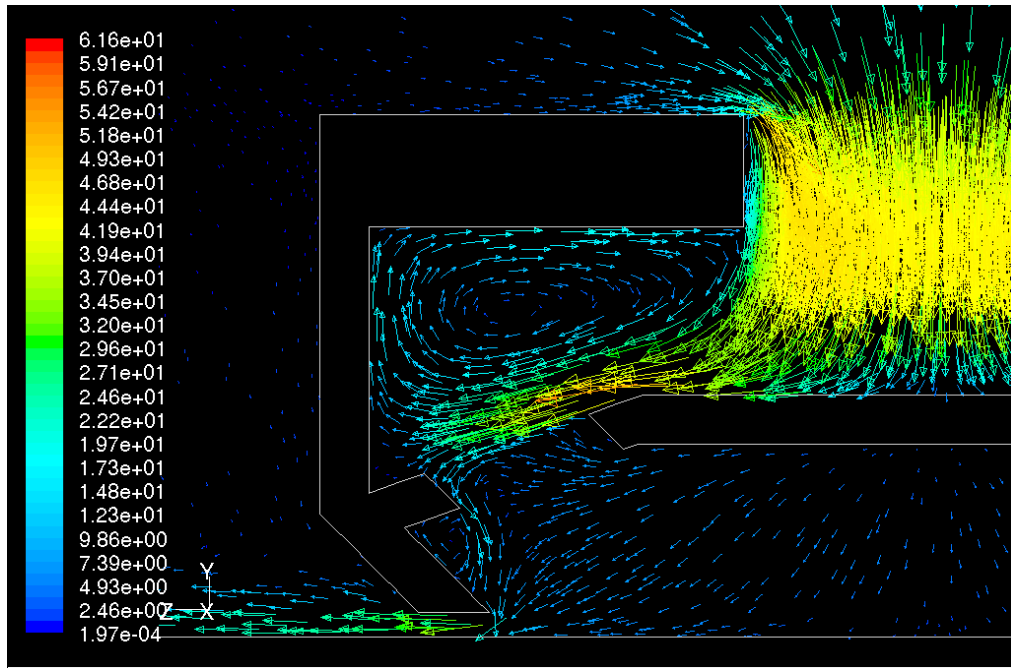
Aracın iç kısmındaki akış x eksenini boyunca çeşitli yz düzlemlerinde incelendiğinde, aracın iki ucundan $x=-0.5 m$ düzlemine yaklaştıkça jet akımının alt bölmeye giriş açısının ve buna bağlı olarak da durma noktalarının oluştuğu yerlerin değişim gösterdiği görülür. Bu değişim, Şekil 5.11.a-b-c ve d' de gözlenebilir.



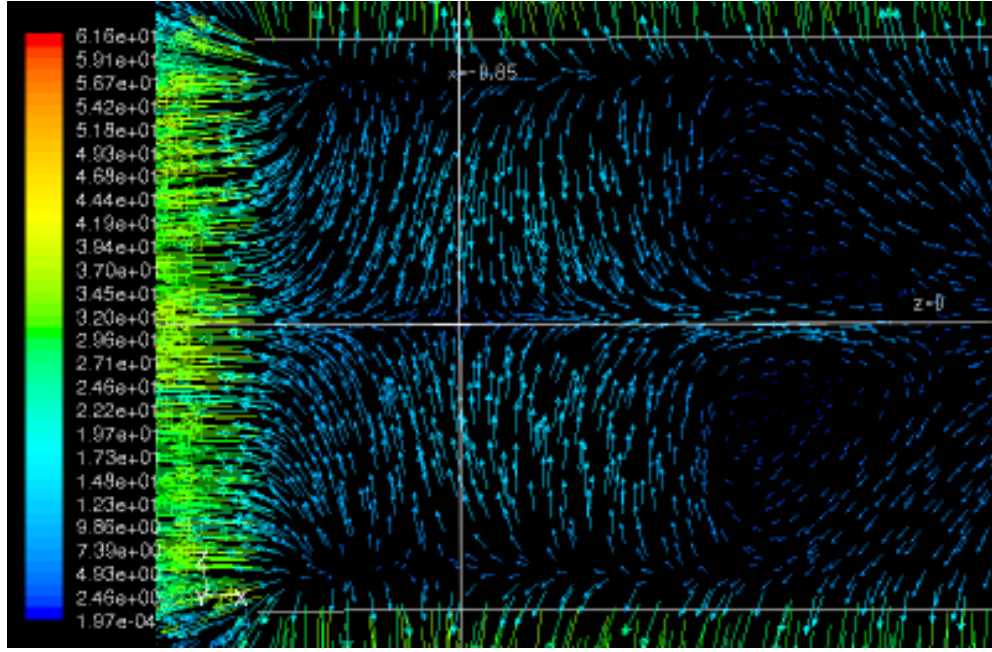
a) $x=-0.85 m$ düzlemi



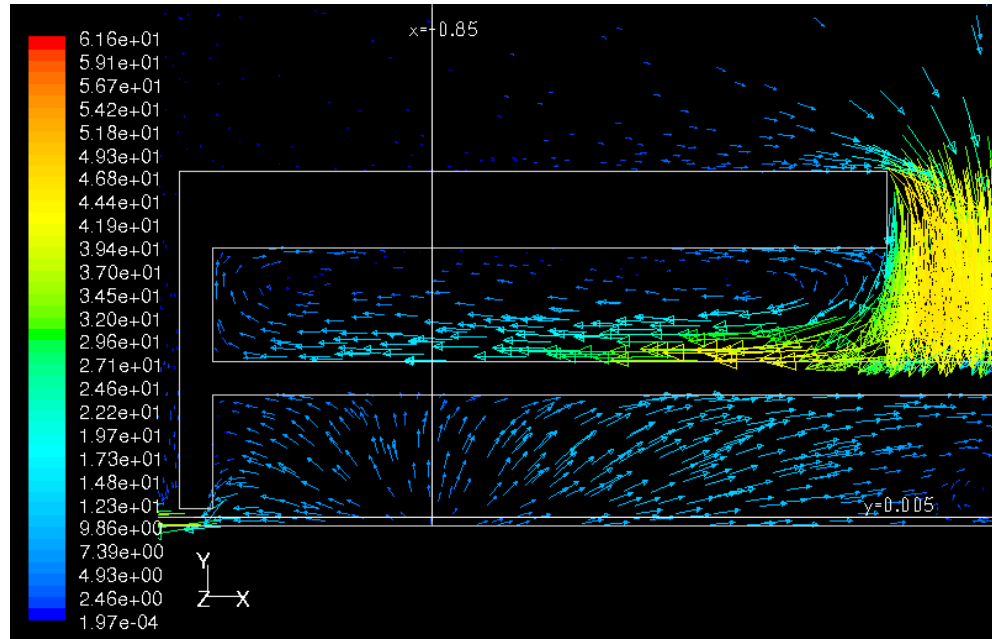
b) $x=-0.8 m$ düzlemi

c) $x = -0.62$ m düzlemid) $x = -0.5$ m simetri düzlemiŞekil 5.11 Çeşitli yz düzlemlerinde hız (m/s) vektörlerinin görünümü

Hava açıklığından dış ortama geçen hava kütleli akıları z doğrultusunda $34.3 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$, x doğrultusunda ise $27.4 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$ olarak hesaplanmıştır. z doğrultusunda dışarı kaçan hava kütleli akısının fazla olmasının nedeni, araçta x eksenine doğrultusunda uzanan nozüllerin ve bu nozüller aracılığıyla alt bölmeye geçen bir jet akımının olmasıdır.

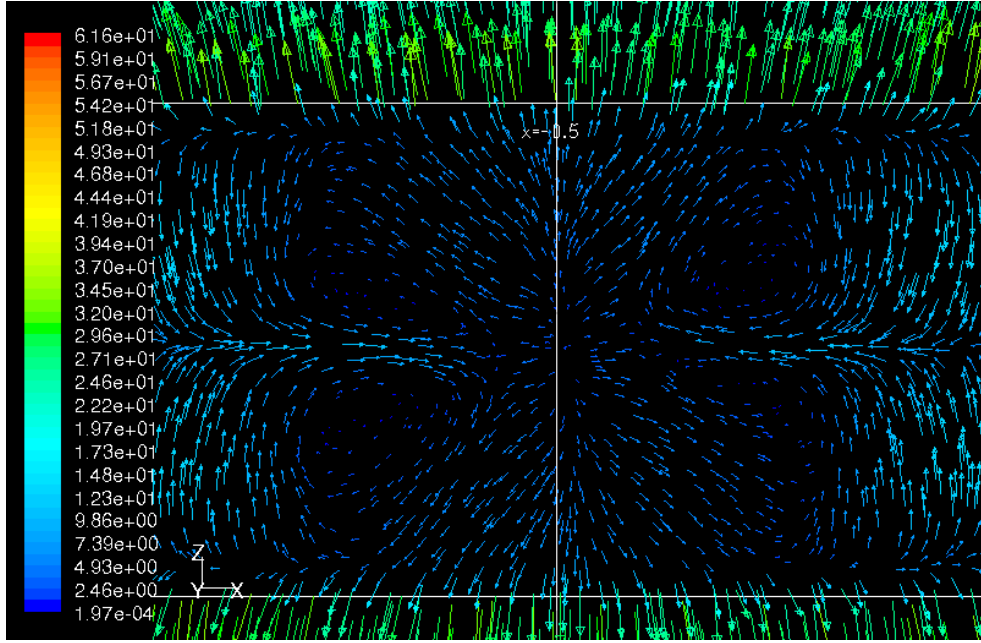


Şekil 5.12 $y=0.005$ m düzleminde hız vektörleri (*I bölgesi*)

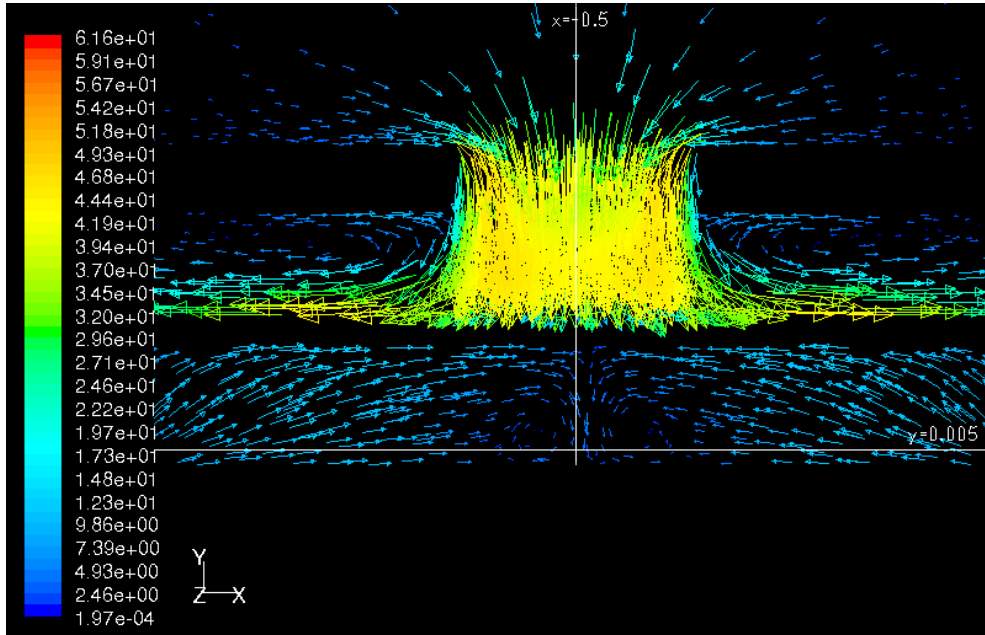


Şekil 5.13 $z=0$ m simetri düzleminde hız vektörleri (*I bölgesi*)

Şekil 5.10' da I ile gösterilen bölgedeki hız vektörlerini gösteren Şekil 5.12 ve Şekil 5.13 birlikte incelendiğinde; alt bölmede $x=-1.0$ m düzleminde $x=-0.85$ m düzlemine kadar (aracın ön kenarında), üst bölmeden alt bölmeye geçen akımın doğrudan aracın ön kısmındaki hava açıklığına yöneldiği; $x=-0.85$ m düzleminde $+x$ yönüne doğru ise yön değiştirerek aracın orta kısmına, yani II bölgesine yöneldiği görülür.

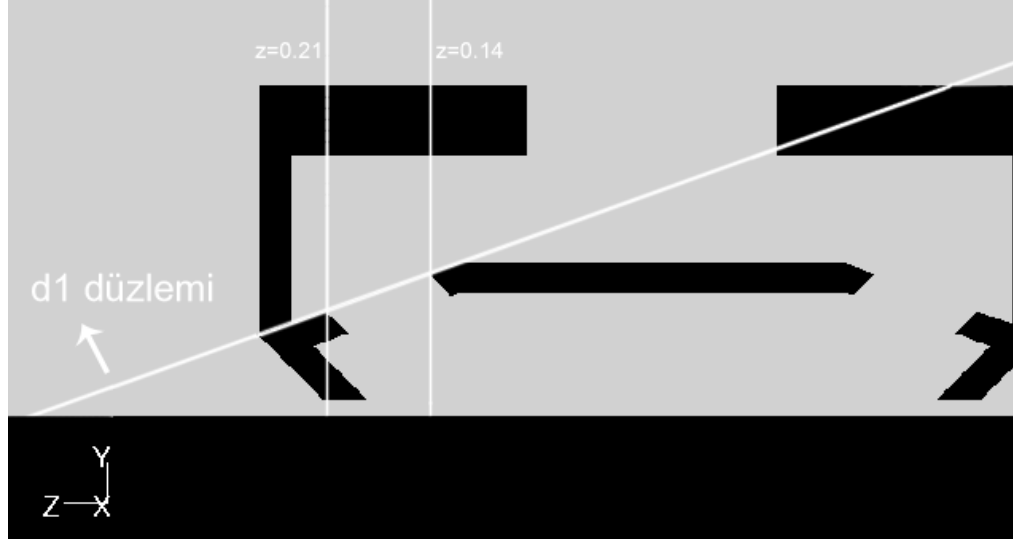
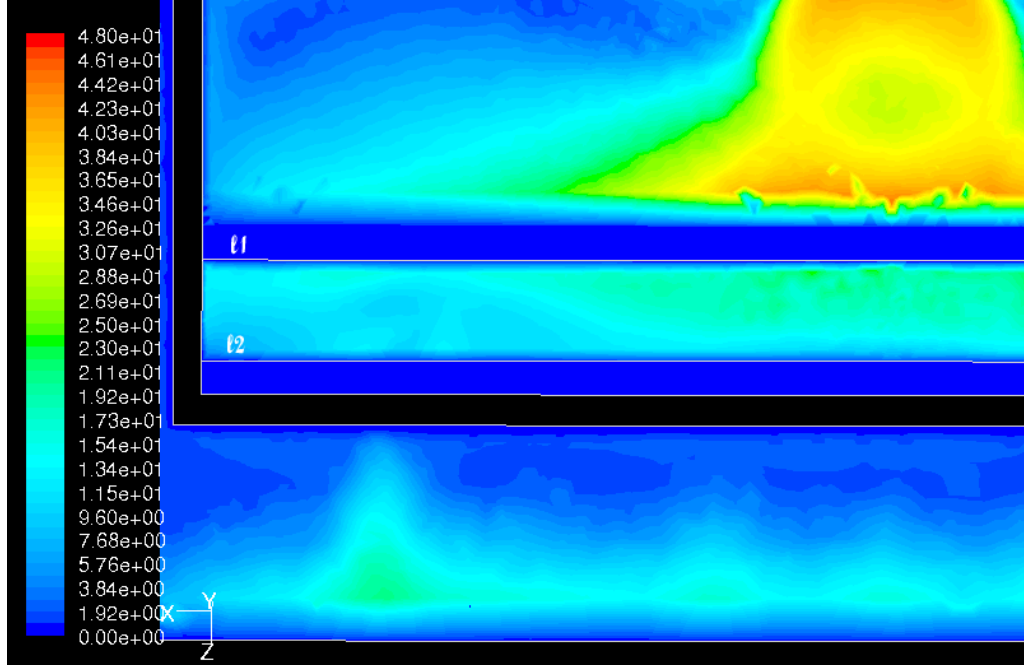


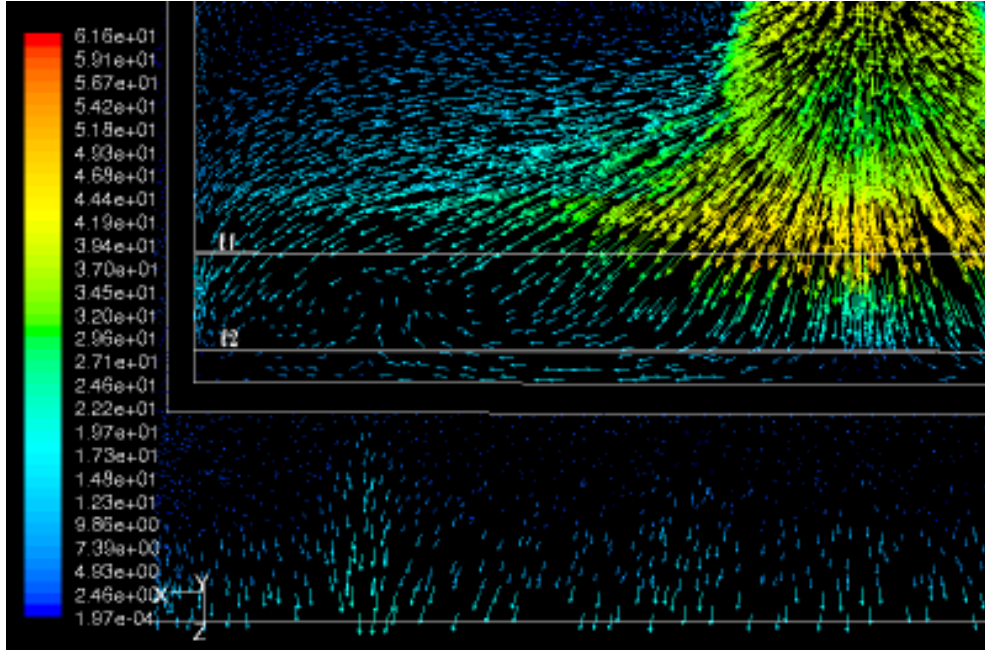
Şekil 5.14 $y=0.005$ m düzleminde hız vektörleri (II bölgesi)



Şekil 5.15 $z=0$ m simetri düzleminde hız vektörleri (II bölgesi)

Şekil 5.14 ve 5.15' de, I ve III bölgelerinden II bölgesine doğru birbirine zıt yönde hareket eden hava akımlarının alt bölmede $x=-0.5$ m simetri düzlemi boyunca birbirleriyle çarpışarak bir kısmının hava açıklığından dış ortama yöneldiği, bir kısmının da araç içerisinde kalarak girdaplar oluşturduğu görülmektedir.

a) $d1$ düzleminin konumub) $d1$ düzlemi üzerinde hız kontürleri



c) dl düzlemi üzerinde hız vektörleri

Şekil 5.16 Nozülün hemen üst bölgesindeki hız kontür ve vektörleri

Şekil 5.16.a ve 5.16.b' de nozül düzlemine paralel olan dl düzlemi üzerindeki hız kontür ve vektörleri görülmektedir. $l1$ ve $l2$ doğruları sırasıyla $z=0.14 m$ ve $z=0.21 m$ düzlemlerinin dl düzlemini kestiği doğrulardır ve nozülün dl düzlemi üzerindeki konumunu ve genişliğini belirtmektedirler.

Sürekli bir rejimde giren hava kütlesi çıkan kütleyle eşittir. Bunun kontrol edilmesi amacıyla fandan, nozüllerden ve hava açıklığından geçen hava kütleli debileri ayrı ayrı okunmuştur. Buna göre hava kütleli debileri,

$$\text{Fanda} \rightarrow \dot{m}_{fan} = 0.955 \text{ kg / s}$$

$$1 \text{ nozülde} \rightarrow \dot{m}_{nozül} = 0.459 \text{ kg / s}$$

$$\text{Hava açıklığında} \rightarrow \dot{m}_{ac} = 0.96 \text{ kg / s}$$

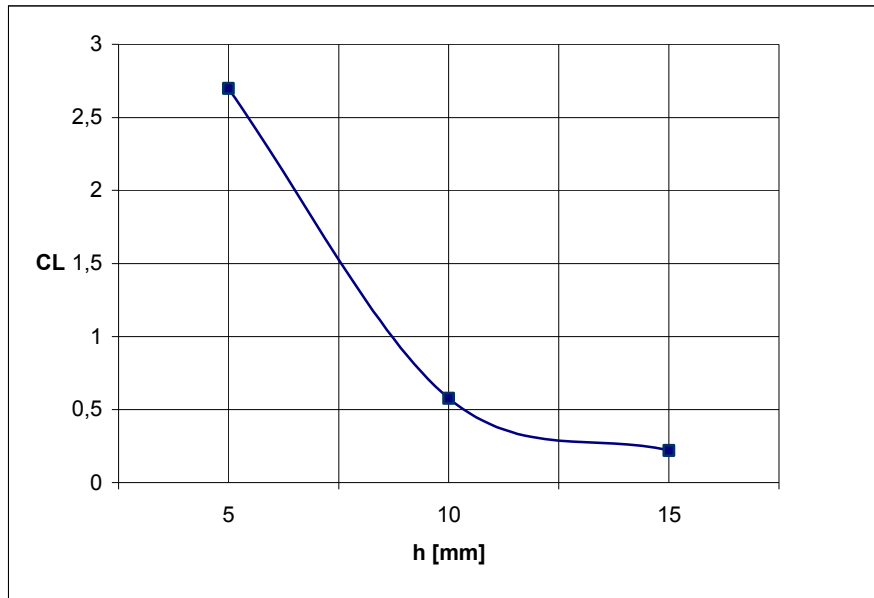
olarak okunmuştur. Hava açıklığından geçen hava debisi ile fandaki hava debisi birbiri ile tutarlı iken, nozüllerde okunan ile fandaki debi arasında %3.9 oranında bir hata olduğu görülmektedir.

5.1.4 Farklı Fan Basıncı ve Hava Açıklıkları ile Yapılan Çözümler

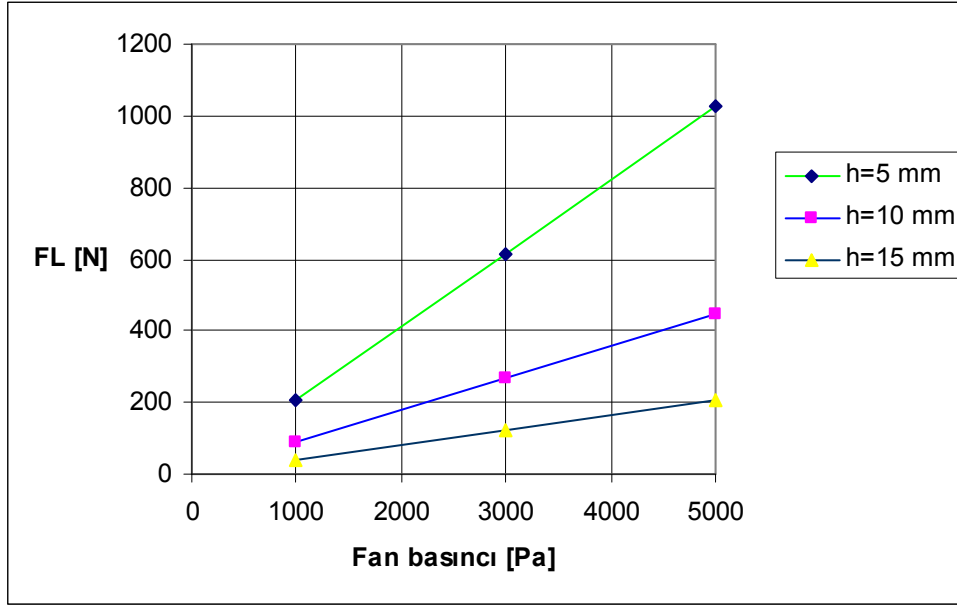
Hava yastıklı aracın 1' inci tip hareketi için (*havada asılı durma*) fan basıncının 3000 Pa ve hava açıklığının $h=10$ mm olduğu durumun yanı sıra; $h=5, 10, 15$ mm olduğu durumların her biri için 1000, 3000 ve 5000 Pa fan basınçlarında çözümler yapılmıştır. Yapılan tüm çözümlere ait bazı sonuçlar Tablo 5.2' de görülmektedir.

Tablo 5.2 Tüm çözümlere ait kaldırma kuvveti ve kaldırma kuvveti katsayısı değerleri

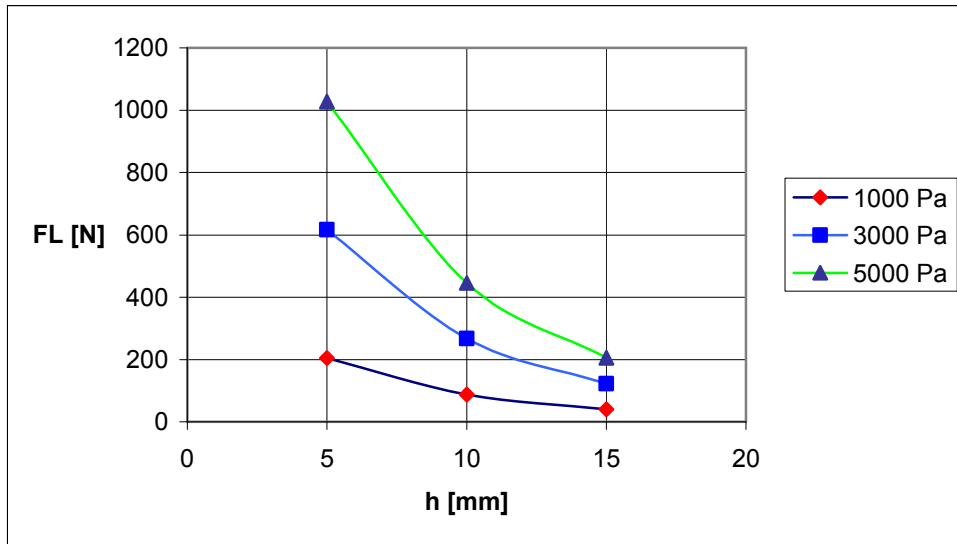
Hava açıklığı, h (mm)	Fan basıncı, ΔP (Pa)	Toplam kaldırma kuvveti, F_L (N)	Kaldırma kuvveti katsayısı, c_L	Hücre sayısı
5	1000	205,021	2,699	1.640.000
5	3000	616,743	2,689	1.640.000
5	5000	1027,848	2,684	1.640.000
10	1000	88,639	0,578	1.650.000
10	3000	267,163	0,579	1.650.000
10	5000	445,723	0,579	1.650.000
15	1000	40,819	0,221	1.690.000
15	3000	123,4	0,221	1.690.000
15	5000	205,631	0,221	1.690.000



a)



b)



c)

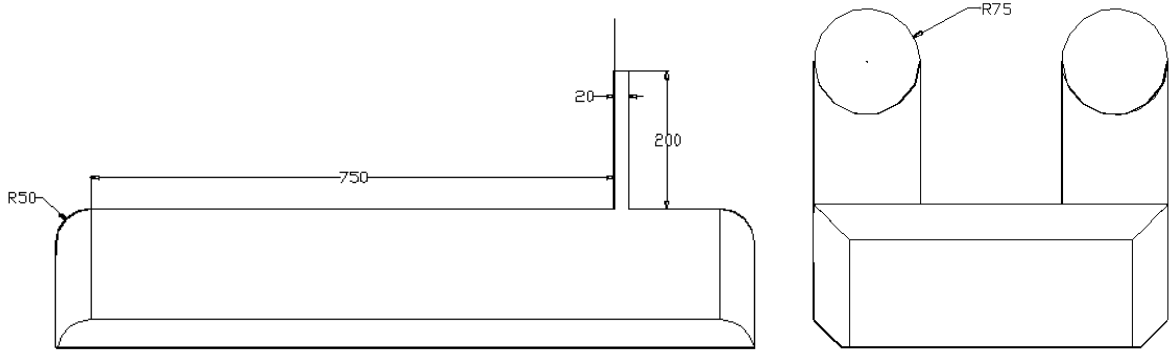
Şekil 5.17: a) Kaldırma kuvveti katsayısının hava açıklığına göre değişimi b) Kaldırma kuvvetine ait sabit hava açıklığı eğrileri c) Kaldırma kuvvetine ait sabit basınç eğrileri

Tablo 5.2' de de görüldüğü gibi sabit hava açıklığında kaldırma kuvveti katsayısı c_L , fan basıncına göre değişim göstermemektedir. Basınç sabit tutularak hava açıklığı değiştirildiğinde ise c_L ; Şekil 5.17.a' daki grafikte görüldüğü şekilde hava açıklığı ile ters orantılı, azalarak azalan bir değişim gösterir. Aynı grafik yaklaşık 12 mm' den daha büyük değerlerdeki hava açıklıklarında kaldırma kuvveti katsayısında çok küçük değişimler

olduğunu da göstermektedir. Şekil 5.17.b' ye bakıldığında kaldırma kuvveti F_L , sabit hava açıklığında basınçla doğrusal değişim gösterirken; hava açıklığı arttıkça basınç değişiminin kaldırma kuvvetinin değişimine etkisi de azalmaktadır. Şekil 5.17.c' ye göre basınç sabit tutulduğunda c_L ' nin gösterdiği değişime benzer bir şekilde hava açıklığı ile ters orantılı, azalarak azalan bir eğri oluşturur. Fakat basınç farkı azaltıldıkça bu değişimin giderek doğrusal bir hal aldığı görülür. Burada da basınç azaldıkça hava açıklığındaki değişimin kaldırma kuvvetindeki değişime etkisinin azaldığı görülmektedir.

5.2 Süzülme Hareketi

Süzülme hareketi; hava yastıklı aracın aynı anda hem havada asılı durma, hem de yatay doğrultuda hareket etmesini ifade eder. Bu nedenle bu çözümde araç geometrisinde bir değişiklik yapılarak, yatay doğrultuda hareketi sağlayan iki adet pervane eklenmiştir. Ayrıca aracın ön ve arka kısımları 50 mm yarıçapında yuvarlanmıştır. Diğer kısımlarda bir değişiklik yapılmamıştır.



Şekil 5.18 Yatay doğrultuda hareketin inceleneceği çözüme esas araç geometrisi (Ölçüler mm cinsindedir.)

Bu çözümde serbest akım hızı, aracın yatay doğrultuda hareketini sağlayan fanların araca vereceği hız olarak alınmamıştır. Aracın bir noktada sabitlendiği kabul edilerek bundan bağımsız bir serbest akım hızı verilmiştir.

Yapılan çözümlerle ilgili bazı parametreler şu şekildedir:

- Hava açıklığı $h=10 \text{ mm}$

- Yatay fanın yarattığı basınç farkı $\Delta P_{yatay} = 3000 Pa$
- Düşey fanların yarattığı basınç farkı $\Delta P_{düşey} = 1000 Pa$
- Serbest akım hava hızı $U_{\infty} = 5 m/s$

Referans değerler:

- Alan; kaldırma kuvveti katsayısı için $0.5 m^2$ (planform alan), sürüklenme katsayısı için $0.142 m^2$ (serbest akıma dik doğrultudaki projeksiyon alanı)'dir.
- Kaldırma kuvveti katsayısını (5.1) bağıntısı yardımıyla elde ederken esas alınacak referans hız, önceki çözümde olduğu gibi fanın yarattığı jet hızı olacaktır. Sürüklenme kuvveti için ise (4.1) bağıntısında U değeri için serbest akım hızı U_{∞} alınacaktır.
- Viskozite, yoğunluk ve basınç gibi değerler varsayılan değerleriyle bırakılır.

Hava yastıklı aracın 2' nci tip hareketi, yani süzülme hareketinin incelenmesinde; değişen çözüm ağı boyutları ve sınır şartları için çözümler yapılmıştır. Bu çözümlerin sonuçları Tablo 5.3' de görülebilir.

Tablo 5.3 2' nci tip harekete ait çözümlerin sonuçları

Çözüm no	Çözüm ağı boyutları				Sınır Şartları				Kaldırma kuvveti, F_L (N)	Kaldırma kuvveti katsayısı, c_L	Sürüklenme kuvveti, F_D (N)	Sürüklenme katsayısı, c_D	
	Uz.xGen.xYük.	Araç çevresindeki boşluk				Giriş	Çıkış	Yan yüzeyler					Üst
		Ön	Arka	Yan	Üst								
1	5Lx3Lx3L	L	3L	2.5L	2.8L	VI**	PO**	PO	PI**	209,491	0,408	9,263	4,260
2	15Lx3Lx3L	4L	10L	2.5L	2.8L	VI	PO	PO	PI	275,467	0,620	6,746	3,102
3	15Lx3Lx3L	4L	10L	2.5L	2.8L	VI	PO	S**	S	276,103	0,620	6,903	3,175
4	15Lx2Lx5L*	4L	10L	1.75L	4.8L	VI	PO	S	S	268,294	0,599	6,748	3,103
5	18Lx5Lx5L*	5L	12L	4.75L	4.8L	VI	PO	S	S	267,948	0,599	6,041	3,127

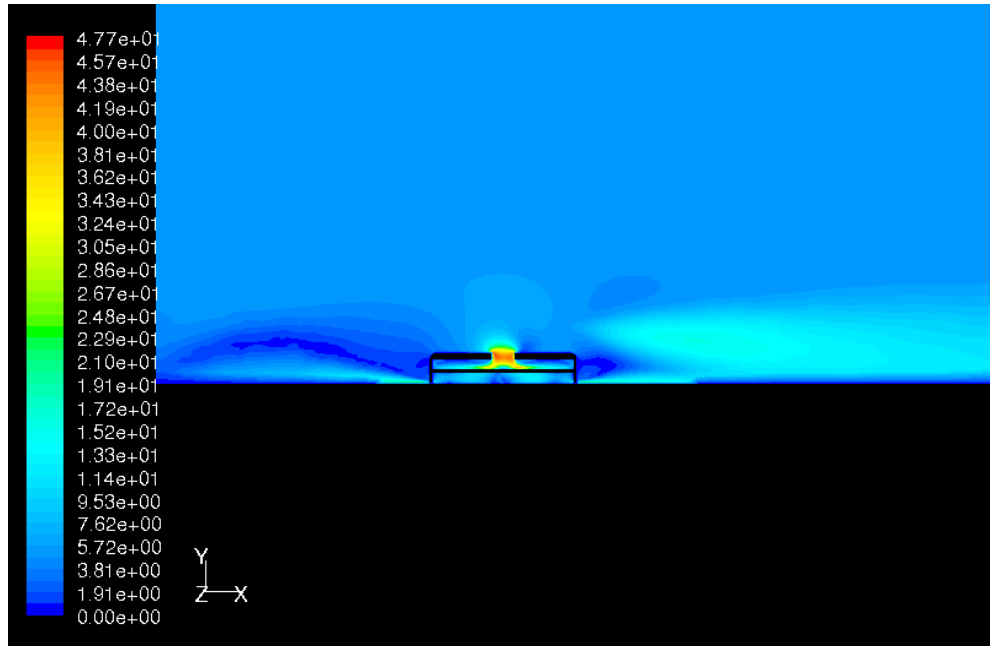
* Bu çözümlerde $z=0 m$ düzlemine göre simetrisi alınmış çözüm ağıyla işlem yapılmıştır.
** VI: Velocity inlet, PO: Pressure outlet, PI: Pressure inlet, S: Symmetry

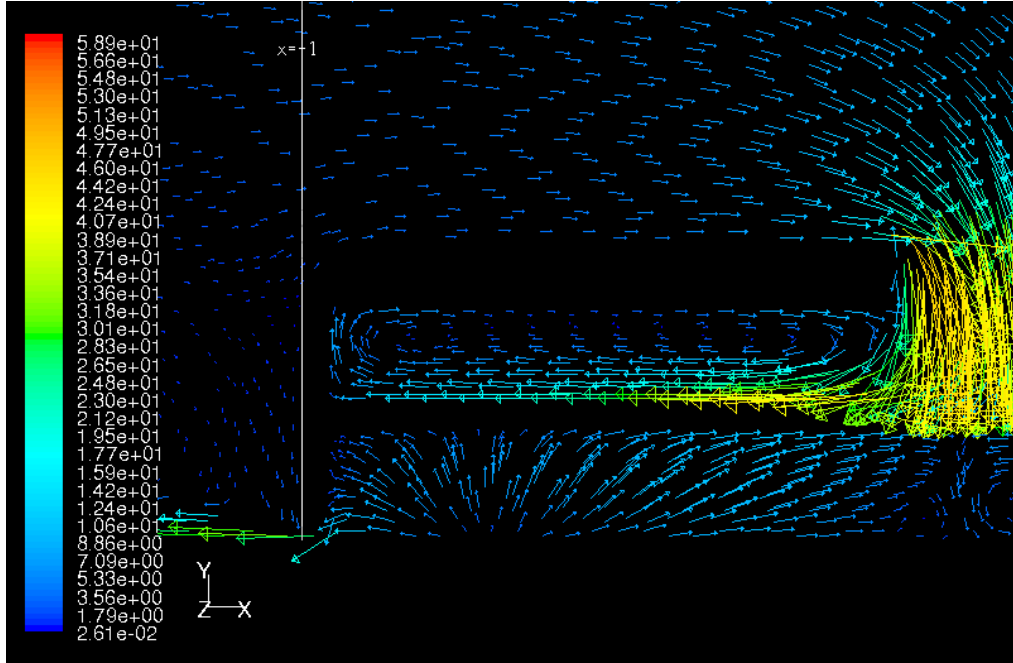
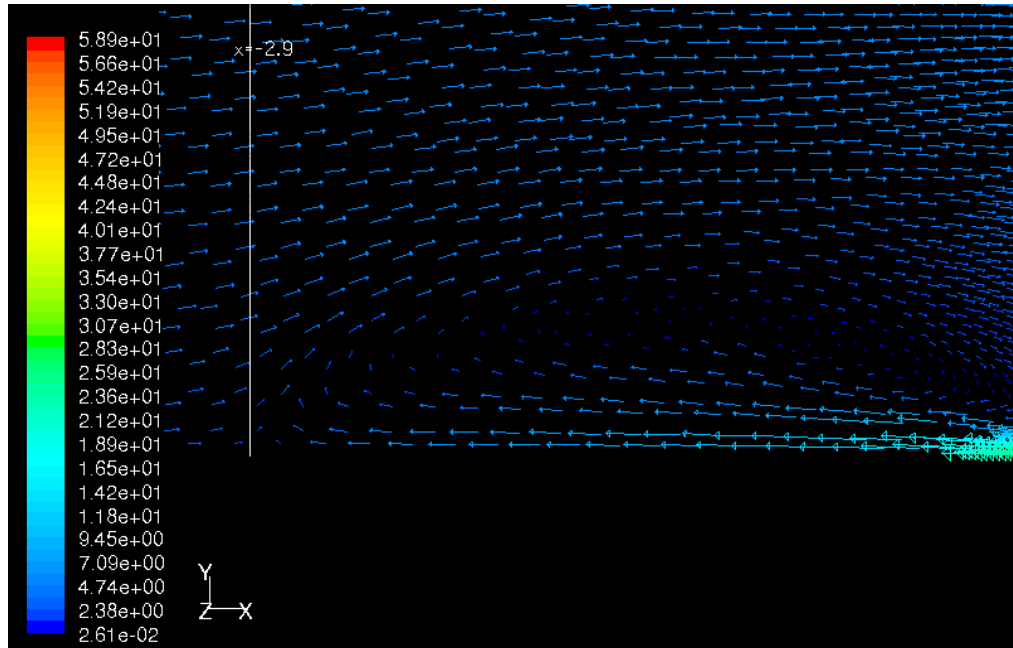
Tablo 5.3' de gösterilen bütün çözümlerde, çözüm ağındaki hücre sayıları 1.3 ile 1.6 milyon arasında değişmektedir.

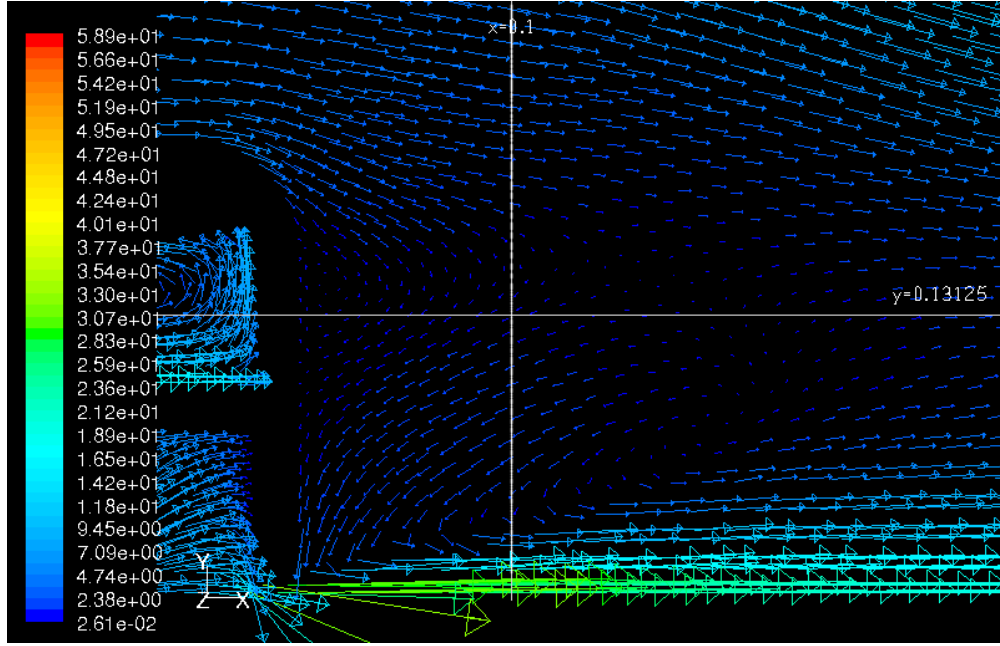
Bu tablonun bize gösterdiği sonuçları şöyle sıralayabiliriz:

- 1 ve 2 nolu çözümlerde sınır şartları sabit bırakılıp çözüm ağı boyutları değiştirilmiş ve sonuçlarda büyük değişim görülmüştür. Bu, 1 nolu çözümde kullanılan çözüm ağının yeterli büyüklükte olmadığını göstermektedir.
- 2 ve 3 nolu çözümlerde çözüm ağı büyüklüğü sabit tutularak, üst ve yan yüzeylerdeki sınır şartları değiştirilmiştir. Buna karşılık, sonuçlarda dikkate değer bir değişim olmamıştır. Bu da, aynı çözüm ağı için *symmetry* sınır şartı ve *pressure in/out-let* şartlarını kullanmanın bir değişim yaratmadığını göstermektedir.
- 3 ve 4 nolu çözümün karşılaştırılması, hücre sayısından bağımsızlık hakkında bize fikir vermektedir. 4 nolu çözüm $z=0$ m düzleminde ikiye bölünmüş bir çözüm ağıyla yapılmıştır ve her iki çözümdeki hücre sayısı yaklaşık 1.3 milyon civarındadır. Bu nedenle 4 nolu çözüm ağındaki hücre sayısı 3 nolu çözüm ağındaki hücre sayısının iki katı kadardır. Buna karşılık sonuçlarda yaklaşık %3 oranında değişimler olmuştur. (Çözüm ağı yüksekliğindeki değişimin 3 ve 4. çözümlerin sonuçları üzerinde etkisinin az olduğu söylenebilir; çünkü aracın x doğrultusundaki uzunluğu L , araç yüksekliğinin beş katıdır ve bu nedenle her iki çözüm ağı yüksekliğinin de yeterli olduğu kabul edilebilir.).
- 4 ve 5 nolu çözümler, çözüm ağının daha da büyütülmesinin sonuçları nasıl etkilediğini göstermektedir. Sonuçlar karşılaştırıldığında, %0.1 oranındaki değişimlerin ihmal edilecek düzeyde olduğu söylenebilir.

5 nolu çözüme ilişkin bazı sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

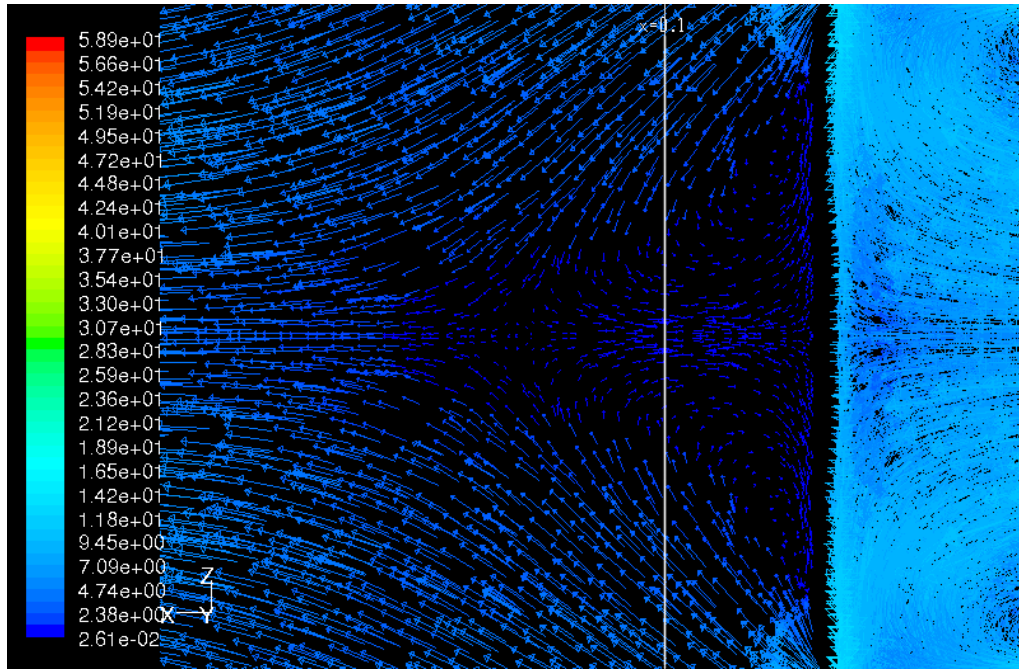


a) Hız kontürleri ($z=0\text{ m}$)b) Hava yastığı içerisindeki hız vektörleri ($z=0\text{ m}$)c) Araç ön bölgesindeki hız vektörleri ($z=0\text{ m}$)

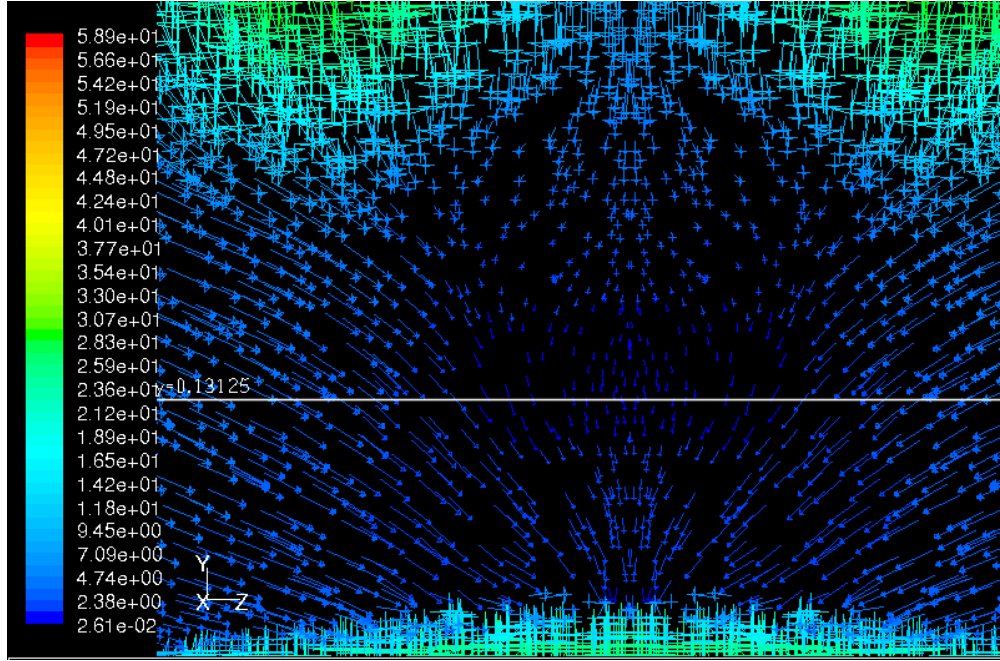


d) Araç arka bölgesindeki hız vektörleri ($z=0$ m düzlemi)

Şekil 5.19 $z=0$ m simetri düzlemindeki hız kontür ve vektörleri

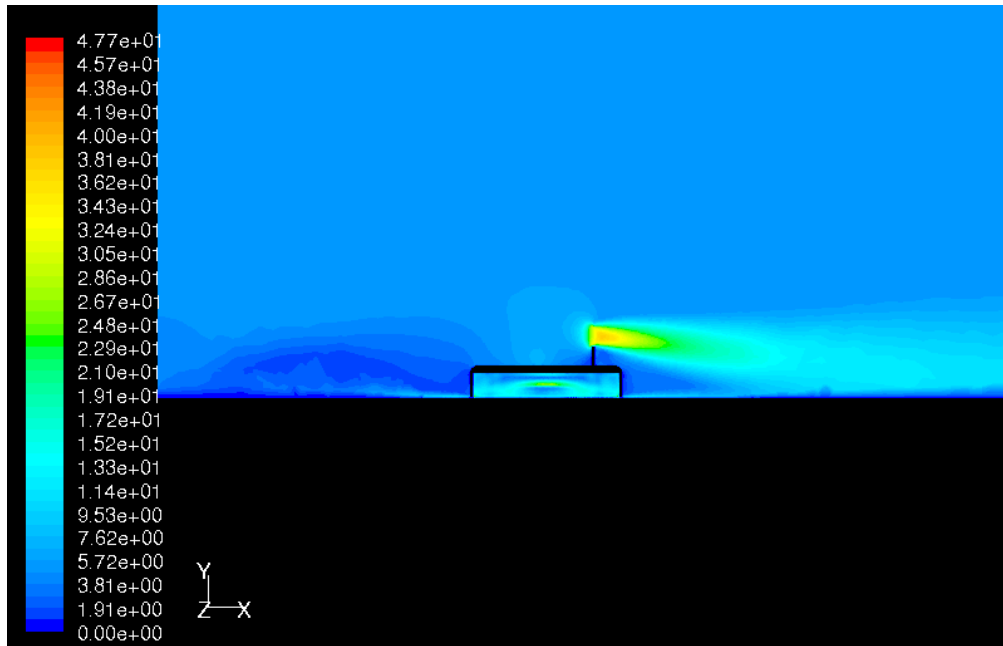


Şekil 5.20 $y=0.13125$ m düzleminde araç arka bölgesindeki hız vektörleri

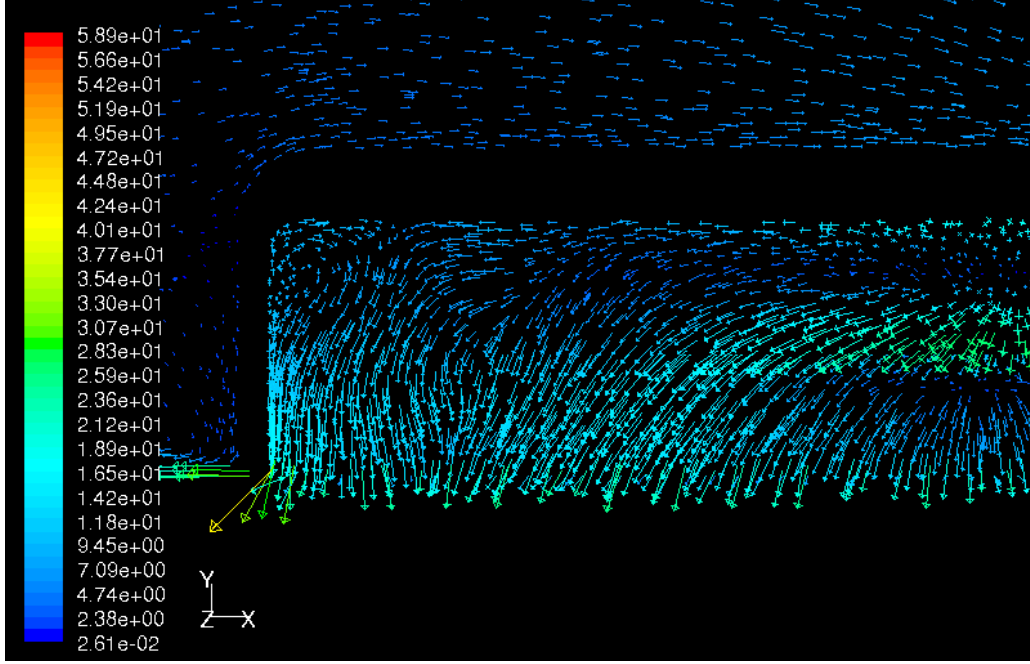


Şekil 5.21 $x=0.1$ m düzleminde araç arka bölgesindeki hız vektörleri

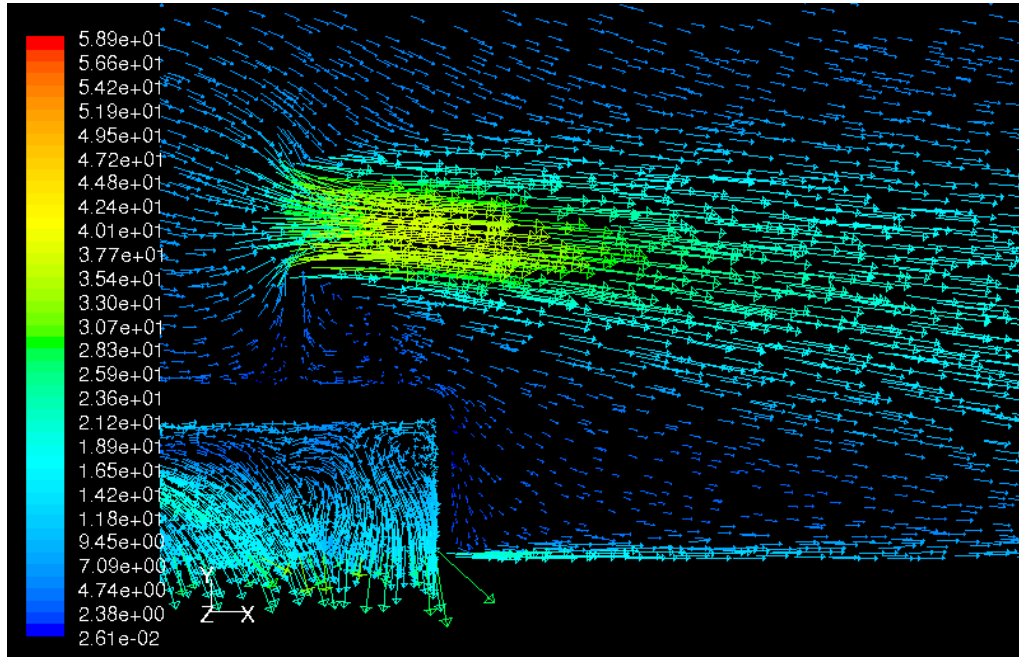
Şekil 5.19.d, Şekil 5.20 ve 5.21' e bakıldığında aracın arka bölgesinde sınırları koni benzeri bir şekil oluşturan düşük hız değerlerine sahip bir bölge oluştuğu görülür. Burada akım ayrılmalıdır ve girdap oluşumu vardır. Yaklaşık olarak $x=0.25$ m düzlemi civarında tekrar birleşmektedir.



a) Hız kontürleri ($z=0.175$ m düzlemi)

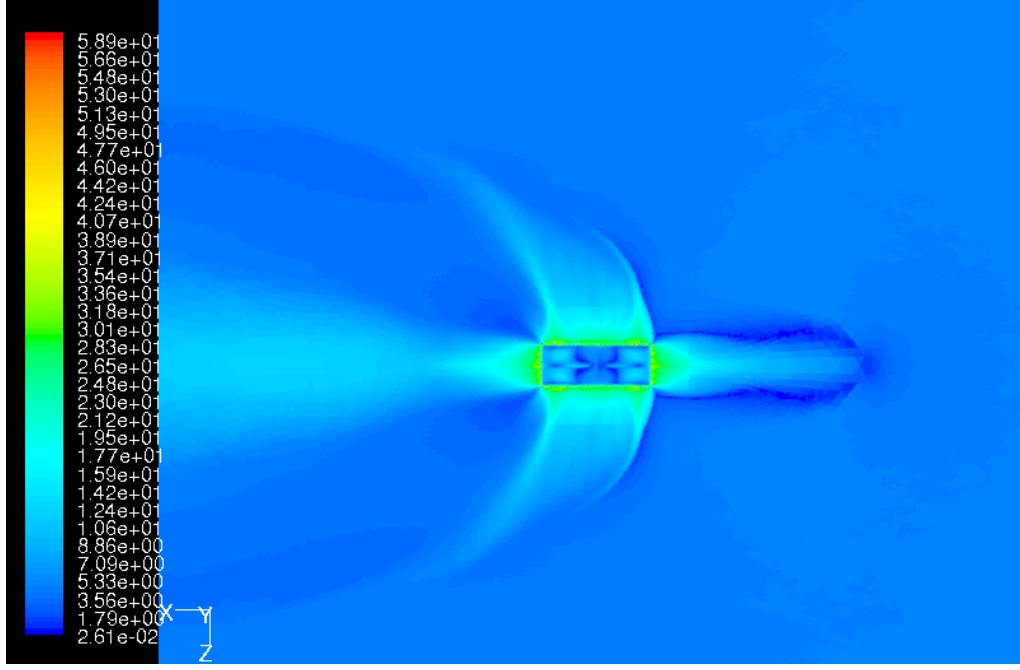


b) Hava yastığı içerisindeki hız vektörleri ($z=0.175$ m düzlemi)

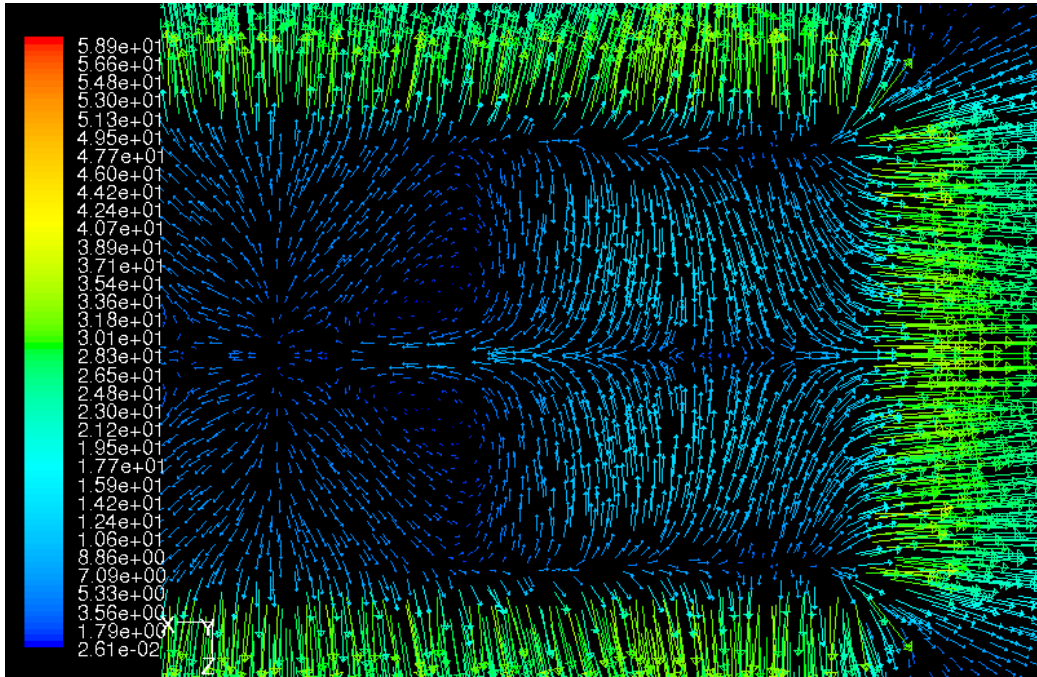


c) Araç arka bölgesindeki hız vektörleri ($z=0.175$ m düzlemi)

Şekil 5.22 $z=0.175$ m düzlemindeki (düşey fanı x eksenine doğrultusunda ikiye bölen düzlem) hız kontür ve vektörleri

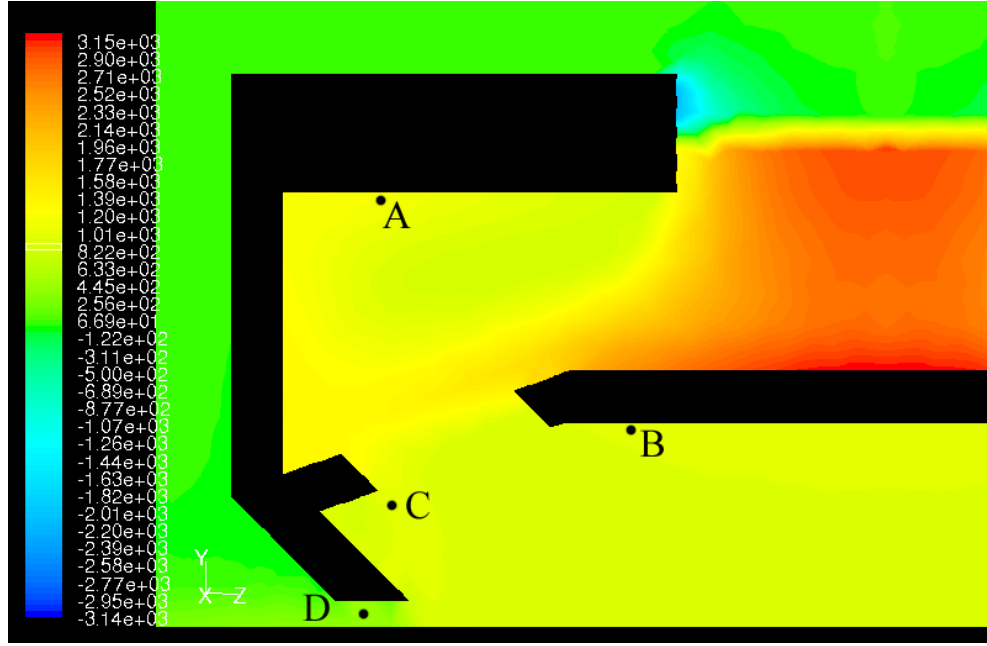


a) Hız kontürleri ($y=0.005$ m düzlemi)

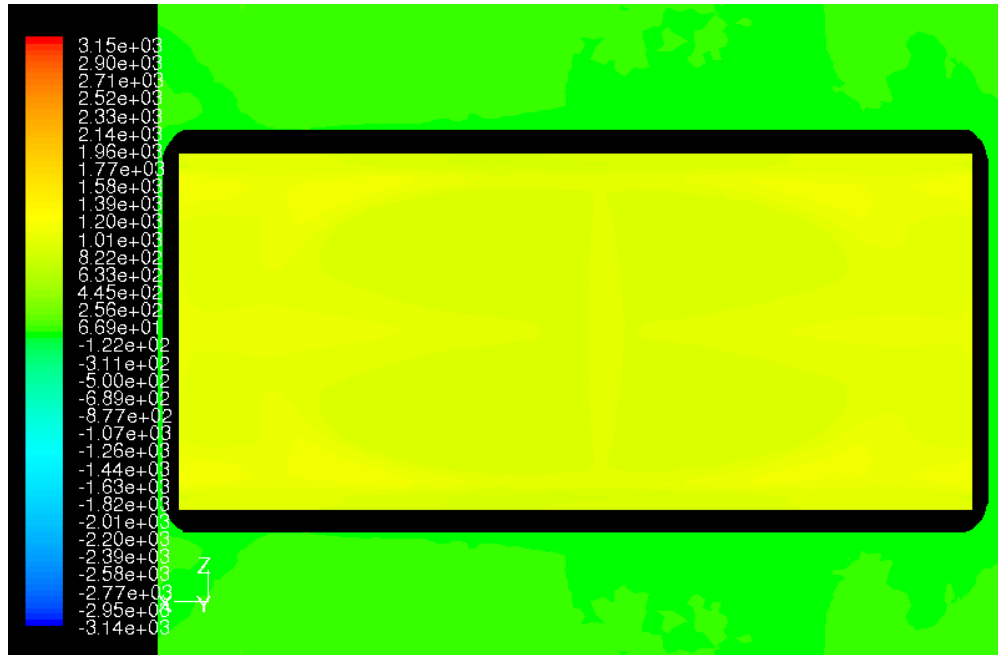


b) Hava yastığı içerisinde hız vektörleri ($y=0.005$ m düzlemi)

Şekil 5.23 $y=0.005$ m düzlemindeki hız kontür ve vektörleri



Şekil 5.24 $x=-0.5$ m düzleminde toplam basınç kontürleri



Şekil 5.25 $y=0.0475$ m düzleminde toplam basınç kontürleri

Şekil 5.19.a' ya bakıldığında, aracın önünde bir düşük hız bölgesi olduğu görülür. Şekil 5.19.c de bu bölgenin, hava yastığından sızan akımın serbest hava akımının hızını büyük oranda kesmesi sonucunda oluştuğunu gösterir. Bu da sürtünme kuvvetlerinin çok küçük bir değerde olmasını sağlar.

Şekil 5.23.b ile Şekil 5.12, Şekil 5.19.b ile de Şekil 5.13 karşılaştırıldığında, yastık içerisindeki akış hareketinin gözle görülür bir değişim göstermediği anlaşılabilir. Şekil 5.24 ise önceki bölümde Şekil 5.7' de gösterilmiş olan aynı A, B, C, D noktalarını göstermektedir. Bu noktalarda basınç değerleri önceki değerlerden farklı olarak (*bkz. s.41-42*) sırasıyla ortalama 1150, 975, 975 ve 410 *Pa* olarak okunmuştur. Hava yastığını yatayda yaklaşık olarak ortadan bölen düzlemdeki basınç kontürlerini gösteren Şekil 5.25 ile Şekil 5.8 de, havada asılı duran araç ile ileri doğru hareket yapan araçta hava yastığındaki basınç dağılımlarının az da olsa farklı olduğunu göstermektedir.

6. SONUÇLAR

Çevresel jet ilkesine göre çalışan bir hava yastıklı araç modelinin aerodinamiği üzerine yapılan sayısal çözümler sonucunda hava yastığında meydana gelen akış hareketleri değerlendirilmiştir. Hava yastığının performansını belirleyen en önemli faktör yastık havasının araç içerisinde belli bir basınçta tutulabilmesidir. Bunun için aracın alt hava açıklığının sınırlarını oluşturan tüm bir hat boyunca durma noktalarının oluşması en ideal durumdur. Bunu belirleyen etken ise, basınç odasından alt bölmeğe geçen jet akımının nozüle geliş açısıdır. Bu açının yaklaşık olarak 90° olduğu durumda durma noktalarının oluştuğu noktalar yastık havasının korunması için en elverişlidir. Bu durma noktalarının sayısının çoğaltılabilmesi ise araç geometrisinde değişiklikle mümkündür. Bunun için nozüllerin araç içerisindeki konumlarında bir değişiklik yapılabilir.

Aracın z eksenine paralel olan kenarları boyunca nozül bulunmaması nedeniyle yastık havasının x eksenini doğrultusunda tutulmasını sağlayan doğrudan bir jet akımı yoktur. Fakat buralarda nozül olması durumunda, x eksenini doğrultusundaki nozüllerden geçen hava akımı debisinin fanın hava çekiş kapasitesi artırılarak sabit tutulduğu veya mevcut durumda çekilen hava debisinin sabit tutularak x eksenini doğrultusundaki nozüllerden geçen hava debisinin azaltıldığı durumlardan hangisinin daha verimli bir hava yastığı oluşturacağı tespit edilmelidir.

Aracın süzülme hareketi yapması durumunun incelenmesi sonucunda araç ön bölgesinde sürüklenme kuvvetlerinin, hava yastığından çıkan hava akımı tarafından azaltıldığı görülmüştür. Buna rağmen sürüklenme katsayısı c_D yaklaşık olarak 3.127 gibi yüksek bir değerde bulunmuştur (*Ahmed modeli için sayısal çözüm sonucunda c_D 0.261 olarak elde edilmişti*). Yatay ve düşey fanların da, aracın dış yüzeyinde yüksek hız gradyanları yaratarak sürüklenme katsayısının artmasında etkili olduğu düşünülmektedir. Aracın iç kısmındaki akış ise simetrik bir karakterde olduğu için buradaki net sürüklenme kuvveti sıfırdır.

KAYNAKLAR

Anderson, J. D., (1995), Computational Fluid Dynamics, McGraw Hill, New York.

Anderson, J. D., (1991), Fundamentals of Aerodynamics, McGraw Hill, New York.

Bardina, J. E., Huang, P. G., Coakley, T. J., (1997), "Turbulence Modeling Validation, Testing and Development", NASA Technical Memorandum 110446, April 1997, California/USA.

Craft, T. J., Gant, S. E., Iacovides, H., Launder, B. E., Robinson, C. M. E., (2001), "Computational Study of Flow Around the Ahmed Car Body", 9th ERCOFTAC/IAHR Workshop on Refined Turbulence Modelling, 4-5 October 2001, Darmstadt/Germany.

Currie, I. G., (1993), Fundamental Mechanics of Fluids, Marcel Dekker, New York.

Hoessler, J., Beaudoin, JF., Perot, F., "Unsteady Separated Flow Over the Ahmed Body", IUTAM Symposium on Unsteady Separated Flows and Their Control, 18-22 June, 2007, Corfu/Greece.

Lienhart, H., Stoots C., Becker, S., (2000), "Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model)", DGLR Fach Symposium der AG STAB, 15-17 November, 2000, Stuttgart University, Germany.

Tu, J., Yeoh, G. H., Liu, C., (2008), Computational Fluid Dynamics, Elsevier, Oxford.

Versteeg, H. K., Malalasekera, W., (1995), An Introduction to Computational Fluid Dynamics, Longman Scientific & Technical, Harlow.

Yun, L., Bliault, A., (2000), Theory and Design of Air Cushion Craft, Arnold, London.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi 17.05.1984

Doğum Yeri Sivas

Lise 1998-2002 Bahçelievler Anadolu Lisesi

Lisans 2002-2007 Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi
Makina Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2008- Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri
Enstitüsü Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Isı Proses Programı