



**AĞIR TİCARİ BİR ARAÇTA FARKLI YAN AYNA MODELLERİNİN
AERODİNAMİK YAPIYA ETKİLERİNİN NÜMERİK OLARAK
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Oğuzhan KELEŞOĞLU

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ayhan BAYDIR

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2023

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**AĞIR TİCARİ BİR ARAÇTA FARKLI YAN AYNA
MODELLERİNİN AERODİNAMİK YAPIYA ETKİLERİNİN
NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

Oğuzhan KELEŞOĞLU

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ayhan BAYDIR

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2023

TEZ ONAY SAYFASI

Oğuzhan KELEŞOĞLU tarafından hazırlanan “Ağır ticari bir araçta farklı yan ayna modellerinin aerodinamik yapıya etkilerinin nümerik olarak incelenmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 12 / 06 / 2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Anabilim Dalı Adı Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ayhan BAYDIR

Başkan : Prof. Dr. İbrahim MUTLU
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ayhan BAYDIR
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Halil KILIÇ
Kırklareli Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

12 / 06 / 2023

İmza

Oğuzhan KELEŞOĞLU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AĞIR TİCARİ BİR ARAÇTA FARKLI YAN AYNA MODELLERİNİN AERODİNAMİK YAPIYA ETKİLERİNİN NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

Oğuzhan KELEŞOĞLU

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ayhan BAYDIR

Bu çalışmada, basitleştirilmiş bir ağır ticari araç modelinin 4 farklı ayna modeli ile 10, 15, 20 ve 25 m/s hızlarda aerodinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Aerodinamik direnç katsayıları (C_D), Ansys Fluent programında tespit edilmiştir. Analizlerde ağdan bağımsızlık çalışmaları yapılmıştır ve hata payının kabul edilebilir olduğu seviyede olduğu eleman sayısı ile farklı ayna tasarımlarının incelenmesine geçilmiştir. Kamera ayna (model 1) üzerinde aerodinamik direnç oluşturan bölgeler tespit edilmiş ve pasif akış kontrolü yöntemleri ile aerodinamik iyileşme elde edilmiştir. Aerodinamik direnç katsayısı model 2’de geleneksel aynalı modele göre %4,24, model 1’e göre %0,96 azalmıştır. Model 3’de ise geleneksel aynalı modele göre %6,24, model 1’e göre ise %1,13 azalmıştır.

2023, xi + 81 sayfa

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Aerodinamik, Yan Ayna, Nümerik Analiz.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT SIDE MIRROR MODELS ON AERODYNAMIC STRUCTURE IN A HEAVY COMMERCIAL VEHICLE

Oğuzhan KELEŞOĞLU

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Automotive Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Şükrü Ayhan BAYDIR

In this research, aerodynamic analysis of a simplified heavy commercial vehicle model was performed with four different mirror models at 10, 15, 20 and 25 m/s speeds. Aerodynamic drag coefficients (C_D) were determined in the Ansys Fluent program. In the analyses, independence studies from the mesh were made and the number of elements where tolerance was at an acceptable level and different mirror designs were examined. Areas that create aerodynamic drag on the camera mirror (model 1) have been determined and aerodynamic improvement has been achieved with passive flow control methods. The aerodynamic drag coefficient decreased by 4.24% in model 2 compared to the conventional mirrored model and by 0.96% compared to model 1. In model 3, it decreased by 6.24% compared to the conventional mirrored model and by 1.13% compared to model 1.

2023, xi + 81 pages

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Aerodynamics, Side Mirror, Numerical Analysis.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ayhan BAYDIR, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. İbrahim MUTLU'ya ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Halil KILIÇ'a her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Oğuzhan KELEŞOĞLU

Afyonkarahisar, 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
RESİMLER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 CFD ile İlgili Çalışmalar.....	3
2.2 Taşıtlarda Aerodinamik	6
2.2.1 Aerodinamik Kuvvetler.....	9
2.2.1.1 Sürüklenme Kuvveti.....	11
2.2.1.2 Kaldırma Kuvveti	14
2.2.1.3 Yanal Kuvvet.....	15
2.2.2 Aerodinamik Momentler	15
2.2.2.1 Yunuslama Momenti	16
2.2.2.2 Sapma (Yuvarlama) Momenti	17
2.2.2.3 Yalpa (Yana Kayış) Momenti	17
2.3 Aerodinamik Özelliklerin Belirlenme Yöntemleri	18
2.3.1 Yol Testleri.....	18
2.3.2 Rüzgâr Tünelleri.....	19
2.3.3 Nümerik Analiz Yöntemi	22
2.3.3.1 Diferansiyel Hareket Denklemleri.....	24
2.3.3.2 Standart k-ε Türbülans Modeli.....	26
3. MATERYAL ve METOT	28
3.1 Geometrik Model.....	28
3.2 Ağ Yapısı Oluşturma (Meshing) ve Ağdan Bağımsızlık.....	32
3.3 Sayısal Çözümleme Özelliklerinin Belirlenmesi	36

4. BULGULAR	41
4.1 Geleneksel Aynalı Model için Çözümleme Sonuçları.....	43
4.2 Model 1 için Çözümleme Sonuçları	44
4.3 Pasif Akış Kontrol Yöntemi ile Aerodinamik İyileştirme	46
4.3.1 Pasif Akış Kontrolü	46
4.3.2 Model 2 için Çözümleme Sonuçları.....	47
4.3.3 Model 3 için Çözümleme Sonuçları.....	49
4.4 Ayna Modellerinin Farklı Hızlarda Akım çizgisi Olarak Gösterilişi	51
4.4.1 10 m/s Hızındaki Çözümleme Sonuçları.....	51
4.4.2 15 m/s Hızındaki Çözümleme Sonuçları.....	55
4.4.3 20 m/s Hızındaki Çözümleme Sonuçları.....	59
4.4.4 25 m/s Hızındaki Çözümleme Sonuçları.....	63
4.5 Ayna Modellerinin Farklı Hızlarda Basınç Dağılımlarının Gösterilişi	67
4.5.1 10 m/s Hızındaki Çözümleme Sonuçları.....	67
4.5.2 15 m/s Hızındaki Çözümleme Sonuçları.....	69
4.5.3 20 m/s Hızındaki Çözümleme Sonuçları.....	71
4.5.4 25 m/s Hızındaki Çözümleme Sonuçları.....	73
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	75
6. KAYNAKLAR.....	78
ÖZGEÇMİŞ.....	81

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	İz düşüm alan
C_D	Hava direnci katsayısı
C_F	Kuvvet katsayısı
C_L	Kaldırma katsayısı
C_M	Moment katsayısı
C_P	Yunuslama momenti katsayısı
C_R	Yalpa momenti katsayısı
C_Y	Sapma momenti katsayısı
D	Karakteristik çap
F_D	Aerodinamik direnç
F_L	Aerodinamik kaldırma
F_Y	Yanal kuvvet
H	Yükseklik
L	Uzunluk
M	Moment
M_P	Yunuslama momenti
M_R	Yalpa momenti
M_X	X eksenine göre moment
M_Y	Y eksenine göre moment
M_Z	Z eksenine göre moment
P	Basınç
Ra	En-boy oranı
Re	Reynold sayısı
u	X eksenine göre hız
v	Y eksenine göre hız
V	Hız
q	Dinamik basınç
w	Z eksenine göre hız
W	Genişlik
ρ	Havanın yoğunluğu
μ	Havanın viskozitesi

Kısaltmalar

CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
GTS	Ground Transportation System
GUI	Graphical User Interface
HAD	Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
RVM	Rear View Mirror
TL	Türk Lirası
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Araçların sürüklenme katsayısının zaman içindeki değişimi.....	7
Şekil 2.2 Taşıt üzerindeki aerodinamik kuvvet, basınç, moment ve ağırlık merkezi gösterimleri.	11
Şekil 2.3 Statik basınç katsayı dağılımı.	11
Şekil 2.4 Bazı cisimlerin ölçülmüş aerodinamik direnç katsayıları.	13
Şekil 2.5 Taşıtları etkileyen aerodinamik momentler; M_x X eksenine göre moment (Yalpa momenti), M_y Y eksenine göre moment (Yunuslama momenti), M_z Z eksenine göre moment (Sapma momenti).....	16
Şekil 2.6 Açık devre rüzgâr tünelinin kesit çizimi.	19
Şekil 2.7 Kapalı devre rüzgâr tüneli kesiti.	20
Şekil 2.8 HAD süreçleri.	23
Şekil 2.9 Bir HAD analizinin yapısındaki üç ana elemanın aralarındaki bağlantı fonksiyonları.	24
Şekil 3.1 GTS modelinin 0° sapma açısında hız büyüklüğünü gösteren akış çizgileri.	28
Şekil 3.2 Ağır ticari araç çizimi.	29
Şekil 3.3 Basitleştirilmiş ağır ticari araç geometrisi.	29
Şekil 3.4 Basitleştirilmiş ağır ticari aracın geometri özellikleri.....	30
Şekil 3.5 Basitleştirilmiş ağır ticari araç geometrisinin kontrol hacmi modeli içerisindeki görünümü.	32
Şekil 3.6 Ağdan bağımsızlık grafiği.....	33
Şekil 3.7 Basitleştirilmiş ağır ticari araç modeli için çözüm ağı.....	35
Şekil 3.8 Geleneksel ayna modeli için çözüm ağı.....	35
Şekil 3.9 Ağ oluşturma işlemleri sonucundaki onay mesajı.	36
Şekil 3.10 Analizde kullanılacak geleneksel yan aynalı modelin referans değerleri.	37
Şekil 3.11 Seçilen çözüm metodlarının gösterimi.	38
Şekil 3.12 Aerodinamik direnç katsayısının iterasyona bağlı olarak gösterilmesi için yapılan ayarlamalar.	39
Şekil 3.13 1000 iterasyonda yakınsama.	40
Şekil 3.14 1000 iterasyonda modelin C_D grafiği ve yakınsama.	40

Şekil 4.1	Farklı bağlantı kollarına sahip kamera ayna modelleri, (a) Dikdörtgen bağlantı koluna sahip model 1, (b) Yarım elips bağlantı koluna sahip model 2, (c) Tam elips bağlantı koluna sahip model 3.	41
Şekil 4.2	Farklı hızlarda aerodinamik sürüklenme kuvvetinin değişimi.....	42
Şekil 4.3	20 m/s hızda geleneksel aynaya ait akım çizgileri (streamline).....	43
Şekil 4.4	20 m/s hızda geleneksel ayna üzerindeki basınç.....	44
Şekil 4.5	20 m/s hızda model 1'e ait akım çizgileri.	45
Şekil 4.6	20 m/s hızda model 1 üzerindeki basınç.	46
Şekil 4.7	20 m/s hızda model 2'ye ait akım çizgileri.	48
Şekil 4.8	20 m/s hızda model 2 üzerindeki basınç.	48
Şekil 4.9	20 m/s hızda model 3'e ait akım çizgileri.	49
Şekil 4.10	20 m/s hızda model 3 üzerindeki basınç.	50
Şekil 4.11	10 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri geleneksel ayna ve model 1.....	51
Şekil 4.12	10 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri model 2 ve model 3... 52	
Şekil 4.13	10 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri geleneksel ayna ve model 1.....	53
Şekil 4.14	10 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri model 2 ve model 3... 54	
Şekil 4.15	15 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri geleneksel ayna ve model 1.....	55
Şekil 4.16	15 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri model 2 ve model 3... 56	
Şekil 4.17	15 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri geleneksel ayna ve model 1.....	57
Şekil 4.18	15 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri model 2 ve model 3... 58	
Şekil 4.19	20 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri geleneksel ayna ve model 1.....	59
Şekil 4.20	20 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri model 2 ve model 3... 60	
Şekil 4.21	20 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri geleneksel ayna ve model 1.....	61
Şekil 4.22	20 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri model 2 ve model 3... 62	
Şekil 4.23	25 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri geleneksel ayna ve model 1.....	63

Şekil 4.24 25 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri model 2 ve model 3...	64
Şekil 4.25 25 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri geleneksel ayna ve model 1.....	65
Şekil 4.26 25 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri model 2 ve model 3...	66
Şekil 4.27 10 m/s hızda farklı ayna modellerinin basınç dağılımları geleneksel ayna ve model 1.....	67
Şekil 4.28 10 m/s hızda farklı ayna modellerinin basınç dağılımları model 2 ve model 3.	68
Şekil 4.29 15 m/s hızda farklı ayna modellerinin basınç dağılımları geleneksel ayna ve model 1.....	69
Şekil 4.30 15 m/s hızda farklı ayna modellerinin basınç dağılımları model 2 ve model 3.	70
Şekil 4.31 20 m/s hızda farklı ayna modellerinin basınç dağılımları geleneksel ayna ve model 1.....	71
Şekil 4.32 20 m/s hızda farklı ayna modellerinin basınç dağılımları model 2 ve model 3.	72
Şekil 4.33 25 m/s hızda farklı ayna modellerinin basınç dağılımları geleneksel ayna ve model 1.....	73
Şekil 4.34 25 m/s hızda farklı ayna modellerinin basınç dağılımları model 2 ve model 3.	74
Şekil 5.1 Farklı ayna modelleri için C_D katsayısı grafiği.	76

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1	Tasarımsal değişikliklerin aerodinamik katsayıya etkisi.	8
Çizelge 2.2	Bir sedan model araçta C_D katsayısının aracın belli kısımların dağılımı.....	9
Çizelge 3.1	Basitleştirilmiş aracın ve rüzgâr tüneli modellerinin geometri özellikleri..	30
Çizelge 3.2	10 m/s hızda yapılan ağdan bağımsızlık testi sonuçları.	33
Çizelge 3.3	Ağ yapısı karakteristikleri.	34
Çizelge 3.4	Oluşturulan eleman ağ yapısına ait kalite değerleri.	36
Çizelge 4.1	Farklı hız değerlerinde aerodinamik direnç katsayıları.....	42

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Açık devre rüzgâr tüneli.....	20
Resim 2.2 Kapalı devre rüzgâr tüneli.....	21



1. GİRİŞ

Günümüzde küresel iklim değişikliği nedeniyle otomotiv endüstrisinde, taşıtların yakıt tüketimini azaltmak için önemli çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmalardan bir tanesi de hiç kuşkusuz taşıtlarda aerodinamik iyileştirme çalışmalarıdır. Taşıtların aerodinamik yapıları, taşıtın konforu, yakıt tüketimi, yol tutuşu, ivmelenme özelliği gibi konuları doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle taşıtın aerodinamik tasarımı gerçekleştirilirken görsellik, müşteri beklentisi, maliyet gibi konularla birlikte aerodinamik yapıyı etkileyen hususlarda dikkat etmek bir zorunluluktur.

Ağır ticari araçlarda da aerodinamik özellikler yakıt tüketimi, yol tutuşu ve konfor gibi birçok konuyu doğrudan etkilemektedir. Örneğin; ağır ticari bir araçta motor tarafından üretilen toplam enerjinin %65'i aerodinamik sürtünmeyi yenmek için kullanılmaktadır. Bu yüzden ağır ticari araçlarda da aerodinamik iyileştirmeler hayati önem arz etmektedir. Yapılan bazı araştırmalarda, bir ağır ticari aracın C_D katsayısı %2 düşürüldüğünde yakıt tüketimi yaklaşık %1 olarak azalabileceği ve toplam aerodinamik sürtünme katsayısının %25 azaltılması halinde yılda toplam 7,5 milyon litre dizel yakıtın tasarruf edilebileceği ön görülmüştür (Salari vd. 2004).

Ağır ticari araçlarda yapılan aerodinamik iyileştirmelerden biride aynalar üzerinedir. Yan aynaların aerodinamik kuvvet katsayısına, %2 ila %6 oranında bir etkisi olmaktadır. Yapılacak bazı tasarımsal değişikliklerle ya da ayna teknolojisindeki yeni gelişmelerle aynalardaki aerodinamik iyileştirme optimum seviyeye ulaşabilir. Bu yeni teknolojilerden biride ağır ticari araçlarda da yaygın olarak kullanılmaya başlanan kamera ayna teknolojisidir. Geleneksel yan aynaların yerini alan bu aynalar boyut olarak, geleneksel aynaya göre çok daha az ön izdüşümü alanına sahiptir. Taşıtın sağ ve sol arkasını gösterecek şekilde yerleştirilen bu kameralara ek olarak, taşıtın kör noktalarında görülebilme imkânı sunmaktadır. Kameralardan aldığı görüntüyü kabin içerisindeki ekranlara yansıtarak sürücüye rahat bir sürüş konforu sunmaktadır. Üretici firmaların

verilerine göre kamera aynalar geleneksel aynalara göre %1,5 yakıt tasarrufu sağlamaktadır.

Bu çalışmada, ilk olarak basitleştirilmiş ağır ticari araç geometrisi olan Ground Transportation System (GTS) modeli kullanılarak geleneksel yan aynaların analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler 10, 15, 20 ve 25 m/s hızlarda ağır ticari araçların yasal olarak karayollarında çıkabileceği maksimum hız olan 90 km/h temel alınarak seçilmiştir. Ardından GTS modelinde kamera ayna monte edilmiş şekilde analizi gerçekleştirilmiş ve pasif akış kontrol yöntemi kullanılarak kamera ayna üzerinde aerodinamik iyileştirmeler yapılmıştır. Aynaların aerodinamik özellikleri 20 m/s hızda karşılaştırılmıştır. Fluent programında 4 ayna ve ağıdan bağımsızlık testi için toplam 26 analiz gerçekleştirilmiştir.

Tüm nümerik sonuçlar; akım çizgileri, basınç kontörleri, basınç dağılımları çıkarılarak değerlendirilmiştir. Gerekli görüldüğünde, cismin ardında oluşan türbülans yoğunlukları incelenmiştir. Bu şekilde, sürüklenme katsayılarında oluşan avantaj ve dezavantajlar aerodinamik karakteristiklerle ilişkilendirilmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 CFD ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Aktaş (2022) yaptığı çalışmasında, ağır ticari bir araçta kabin üzerinde ayrı ayrı güneşlik, yan ayna ve kabin uzatması yaparak aerodinamik yapıya etkilerini incelemiştir. Literatür araştırmasında bulunan bir çalışma ile doğrulama çalışması yapmıştır. Her tasarım için değişiklikler ayrı ayrı olarak %7,17 aerodinamik direnç katsayısını azaltırken, tüm bu değişiklikler bir model de toplandığında toplam aerodinamik direnç katsayısındaki azalma %5,25 olmuştur. Kabinden sonra aerodinamik iyileştirme yapmak amacıyla treyler üzerinde değişiklikler gerçekleştirmiştir. Bu amaçla treyler arkasına kuyruk ve kanat ekleyerek treyler arkasında oluşan düşük hız bölgesini ciddi oranda düşürmeyi başarmıştır. Treyler özelindeki çalışmalarda kuyruk %17 oranında aerodinamik direnci azalttığını ve kanat tasarımı ise %12 oranında bir azaltma sağladığını bulmuştur (Aktaş 2022).

Zhang vd. (2022) yaptıkları çalışmalarında, basitleştirilmiş bir ağır ticari araç olan GTS modelinin iz akışı üzerindeki en boy oranlarının etkilerini nümerik olarak incelemiştir. GTS'nin en-boy oranı Re için 6 farklı oranda model ile çalışmalar gerçekleştirmişlerdir ve iz akış topolojisi arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda aerodinamik direnç katsayısının en düşük olduğu modelin Re 'nin 1'e eşit olduğu model olduğunu belirlemişlerdir (Zhang vd. 2022).

Kamacı (2022) yaptığı çalışmasında, 20° ve 30° eğim açlarına sahip Ahmed Body arka eğimli yüzeyine, Ansys Fluent programında tek, iki, üç ve dört kanat ile tek uzun kanatlı beş farklı kanat modellerinin aerodinamik yapısını incelemiştir. Çalışma sonucunda referans çalışmadaki verilere en yakın çözüm modelinin %8,8'lik hata ile $k-\epsilon$ realizeble türbülans modeli ve Menter-Lenchner duvar fonksiyonu olduğunu bulmuştur.

Aerodinamik sürtünme katsayısı olarak 25°'lik eğim açısında üç kanatlı durum, kanatsız modele göre %2,6 oranında bir iyileşme olduğunu tespit etmiştir (Kamacı 2022).

İpçi (2020) yaptığı çalışmasında, klasik yan aynaların ve yan görüş kameralarının bir şehir içi otobüs modelinin aerodinamik sürükleme katsayısı üzerindeki etkilerini Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ile incelemiştir. Catia programında 1/5 ölçekte modellemiş ve Fluent programında analizini gerçekleştirmiştir. 1,3 milyon aę elemanıyla, 90 m/s ve üzeri serbest akış hızlarında gerçekleştirilen çözümlerde sürtünme katsayısını klasik yan aynalı otobüs için 0,539 ve yan görüş kameralı otobüs için 0,521 olarak belirlemiştir. Çalışma sonucunda klasik yan aynalı bir otobüsün sürtünme katsayısı aynasız otobüse göre %6,6 daha yüksek, yan ayna yerine kamera kullanılmasının sürtünme katsayısını %3,45 azalttığını belirlemiştir (İpçi 2020).

Balendra vd. (2020) yaptığı çalışmasında, bir Maruti Suzuki Ritz model otomobilin dikiz aynasını (RVM)  boyutlu tarayıcıyla tarayarak geometrisini çıkarmıştır. Ardından Catia programında gerekli düzenlemeler yapıp Fluent ortamına aktarıp mesh işlemine gerçekleştirmiştir. zm Fluent programında olan analiz sürecinde RVM'nin orijinal hali ve aerodinamik aıdan modifiye edilmiş hali karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda, RVM model aynayı damla formuna benzetmenin 108 km/h hızda sürtünme katsayısında %36'lık ve sürükleme kuvvetinde %45,7'lik bir avantaj sağladığı tespit edilmiştir (Balendra vd. 2020).

Arıkan (2020) yaptığı çalışmasında, Fiat punto model aracın bir yan aynasını üç boyutlu tarayıcıda taratarak geometrisini elde etmiştir. Geometriyi Fluent ortamına aktarıp k-ε türbülans modelinde 80, 100 ve 120 km/h hızlarda yan ayna için aerodinamik direnç katsayısını hesaplamıştır. Elde ettiği verileri kıyaslamak için üç farklı yan ayna modeli oluşturup, ideal ayna modelinin formunu araştırmıştır. Çalışmanın nihayetinde, aerodinamik olarak en uygun modelin yamuk formunda çizilen model olduğu ve en verimsiz modelin ise dikdörtgen model olduğunu tespit etmiştir (Arıkan 2020).

Al-Obaidi ve Otten (2018) yaptıkları çalışmalarında, yan aynaların boyutunun ve şeklinin kişisel bir aracın sürüklemesine etkisini değerlendirmişlerdir. Fluent programında k- ϵ türbülans modelinde yaptığı analizde Perodu Myvi ve bu model araçta geleneksel aynalarının aerodinamik sürüklenme katsayılarının ortalama sırasıyla 0,354 ve 0,175 olarak hesaplamışlardır. Aynaların boyutlarının ve şekillerinin etkisini analiz etmek için yan aynaların üç parametresini; ayak yüksekliği, ölçek faktörü ve yuva eğrilik yarıçapı Fluent programında incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, daha kısa bir yan ayna montajı, yan aynanın sürtünme katsayısını %1 ila %5 oranında azaltacağını, daha küçük bir ayna aynanın sürtünme katsayısını %14-43 oranında düşüreceğini ve muhafaza kavis yarıçapının arttırılması, yan aynanın sürüklenme katsayısını azaltacağını tespit etmişlerdir (Al-Obaidi ve Otten 2018).

Oran (2020) yaptığı çalışmasında, arka kesiti 25° eğik açılı bir Ahmed body modelinin aerodinamik sürtünme ve girdap yapılarının üzerindeki pasif kontrol modellerinin etkisini incelemiştir. Kavis kontrol yönteminde, 200 mm ila 1000 mm arasında eğimli yüzeye eğrilik yarıçapları vererek incelemiştir. Deflektör kontrol yönteminde, eğimli yüzeyin kenarına yerleştirilen deflektöre, %1'den %6'ya kadar gövde uzunluğu verilmiştir. En iyi sonuçların alındığı kavis ve deflektör kontrol modellerini birleştirip, optimum kontrol yöntemi olarak isimlendirmiştir. Oluşturduğu son haliyle Fluent programında analizini gerçekleştirmiştir. Sonuçlar Ahmed body modelinin sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Çalışmanın nihayetinde, %21,26 oranında sürtünme katsayısını düşürmüştür (Oran 2020).

Abinesh ve Arunkumar (2014) yaptıkları çalışmalarında, bir otobüsün sürtünme kuvvetini azaltmak için otobüsün dış yüzeyini ve yapısını aerodinamik olarak değiştirmeyi ve dolayısıyla yakıt tüketimini azaltmayı amaçlamışlardır. Sürtünme kuvvetini azaltmak için çalışmalarında iki prototip kullanılmıştır. Bunlar; mevcut Volvo şehirlerarası otobüs modeli ve bu otobüs modelinin modifikasyonudur. Çözüm Fluent programında 10'dan 100 km/h'a kadar on farklı hızda yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda, sürüklenme kuvvetini %10 düşürmüştür ve yakıt sarfiyatında %16,33 tasarruf modifiye edilen model ile sağlanmıştır (Abinesh ve Arunkumar 2014).

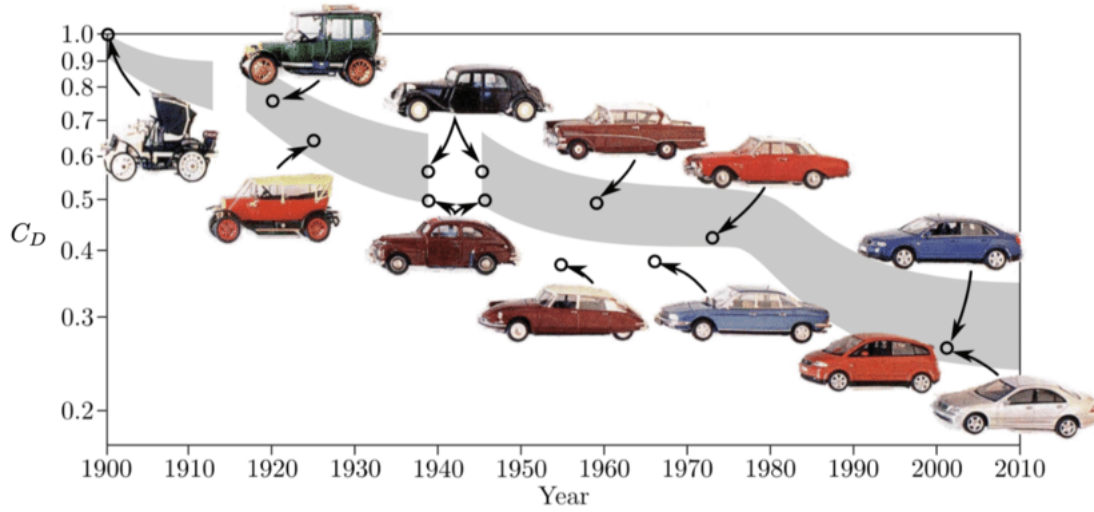
Murukesavan vd. (2013) yaptıkları çalışmalarında, Fluent programında k-ε modeli kullanarak bir binek otomobil için yan ayna geometrisi üzerindeki aerodinamik akış etkilerini değerlendirmişlerdir. Tasarlanan üç farklı geometri 17 m/s ve 33 m/s'lik iki giriş hız parametresi ile incelemişlerdir. Çalışma nihayetinde, yarım küre tasarımının daha az basınç katsayısı dalgalanması ve sürüklenme katsayısında en etkili tasarım olduğunu tespit etmişlerdir (Murukesavan vd. 2013).

Şelenbaş (2011) yaptığı çalışmasında, bir ağır kamyon modelinin geometri ve aksesuarları özelinde ön akış simülasyonu yapıp, optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. IGES formatında alınan kamyon geometrisini Gambit programında bazı düzenlemeler yapmıştır. Fluent programında polihedral tip hacimde yaklaşık 9 milyon elemanlı çözüm ağı oluşturmuştur. Hakkında fikir edinebilmek için bu ön çalışmada daha sonra Ankara rüzgâr tüneline yapacağı çalışmada kullanacağı parametrelere dikkat etmiştir. Çözümü Ankara rüzgâr tüneline çıkabileceği maksimum hız olan 80 m/s dikkate alınarak gerçekleştirmiştir. Çözümde k-ε çözüm modelini kullanmıştır. Çözüm sonucunda taşıtın yan deflektörler, aynalar ve güneşlik parçaları üzerinde çalışmış ve F_D değerini azaltmaya yönelik optimizasyonlar gerçekleştirmiştir. Elde ettiği verileri doğrulamak için 1/5 ölçekli kamyon modelinde rüzgâr tüneli testleri yapmıştır. Farklı rüzgâr tüneli hızlarında aerodinamik kuvvetlerin ölçümelerini, basınç ölçümelerini ve akış görüntüleme testlerini yapmıştır. Elde edilen verileri CFD sonuçlarıyla karşılaştırmıştır ve kamyon üzerindeki aksesuarlarda iyileştirmeler gerçekleştirmiştir (Şelenbaş 2011).

2.2 Taşıtlarda Aerodinamik

Aerodinamik, havanın katı cisimlerle etkileşimini inceleyen ve akışkanlar mekaniğinin bir alt dalı olan bir bilim dalıdır (Çengel ve Cimbala 2006). Havanın, katı cismin içinden veya dışından akmasına göre ayrılmaktadır. Örneğin; bir havalandırma borusundan havanın akması, bir uçağın ya da otomobilin hareketi aerodinamik akışlara örnektir. Taşıtlarda aerodinamik çalışmalar ilk araba üretildiğinde pek önem verilme de ilerleyen zamanlarda aerodinamik tasarımlarda önemli gelişmeler yaşanmıştır. 20. yüzyılın

başlarında 1,0 olan sürüklenme katsayısı günümüzde 0,25'lere kadar düşmüştür. Geçen yüzyılda sürüklenme katsayısındaki en çok iyileştirmenin 1970'li yıllardaki petrol krizinden kaynaklı yoğunlaşan çalışmaların sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Bu çalışmalar esnasında ve sonrasında da araç tasarımlarında rüzgâr tünellerinin kullanımı artmıştır. Bununla birlikte, son on yılda sürtünme katsayısında önemli bir iyileştirme gözlemlenmemesi sürtünme katsayısında bir sınıra ulaşıldığı fikrini doğurmuştur.



Şekil 2.1 Araçların sürüklenme katsayısının zaman içindeki değişimi (Hucho 2013).

Otomobil üreticilerinin düşündüğü sürüklenme katsayısındaki bir sınıra ulaşılmış olması düşüncesinin nedeni arka yolcu bölmesinin alanı, aracın şekli, motor soğutması ve estetik tasarım gibi bazı yönlerden daha fazla feragat edilemeyecek olmasıdır. Bu durum üreticileri farklı çözümler bulmaya yönlendirmiştir. Tavan eğimi, araca bir spoiler takılması ve yönü, aracın arka gövdesinde keskin kenarlar kullanımı ve taşıtlarda kamera ayna kullanılması gibi çözümler bu eğilimin sonucudur. Çizelge 2.1'de araç üzerinde yapılacak bazı değişikliklerin C_D katsayısında yüzdelik olarak nasıl değişiklik göstereceği görülmektedir.

Çizelge 2.1 Tasarımsal değişikliklerin aerodinamik katsayıya etkisi (Çetinkaya 2017).

Tasarımsal değişiklikler	C _D (%)
Taşıtın yüksekliğini 30 mm azaltmak	Yaklaşık -5
Çamurlukları düzleştirmek	-1...-3
Geniş lastikler	+2...+4
Gövde ile uyumlu pencereler	Yaklaşık -1
Gövde boşluklarının yalıtımı	-2...-5
Gövde altı paneller	-1...-7
Gizlenmiş farlar	+1...+10
Dış arka dikiz aynaları	+2...+5
Radyatör ve motor kompartımanından geçen hava	+4...+14
Fren soğutma düzenleri	+2...+5
İç havalandırma	Yaklaşık +1
Açık pencereler	Yaklaşık +5
Açık güneşlik	Yaklaşık +2
Üste monte edilmiş sörf çerçevesi	Yaklaşık +40

Otomobillerde olduğu gibi ağır ticari araçlarda da aerodinamik yapı yakıt tüketimini, yol tutuşunu ve aracın gürültü seviyesini önemli şekilde etkilemektedir. Yüksek sürtünme katsayısına sahip bir ağır ticari araçta, ivmelenme az olacağından dolayı yakıt tüketimi buna bağlı olarak artmaktadır. Bu sorunlara çözüm olması amacıyla zaman içerisinde birçok ağır ticari araç tasarımları yapılmıştır. Bu tasarımların amaçlarından biri hiç kuşkusuz sürtünme katsayısını düşürmek ve dolayısıyla iyi yol tutuşuna sahip, daha estetik görümlü, yüksek performanslı araçları üretmektir.

Taşıtlarda belli bir parçanın ya da kısmın aerodinamik sürüklenme katsayısına ne kadar etki ettiğini hesaplamak oldukça uğraştırıcı ve zor bir işlemdir. Yapılan araştırmalar neticesinde genel kabul görmüş bazı sayılar Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 Bir sedan model araçta C_D katsayısının aracın belli kısımlarına dağılımı (Katz 2016).

Taşıt Bölümleri	C_D
Gövde	0,050
Yan aynalar	0,015
Yan yüzeler	0,085
Motor bölmesi	0,024
Motor soğutma	0,048
Gövde altı + Şasi	0,085
Ön tekerlek + Süspansiyon	0,025
Arka tekerlek + Süspansiyon	0,023
Toplam Sürüklenme Katsayısı	0,355

2.2.1 Aerodinamik Kuvvetler

Aerodinamik kuvvetler taşıtın hareketleri esnasında hava ile etkileşimine bağlı olarak farklılık göstermektedir ve taşıtın performansını etkilemektedir. Taşıtlarda aerodinamik araştırmalar ilk başlarda sadece sürtünmeyi azaltmaya odaklıyken daha sonra kaldırma ve yanal kuvvetlerinde araç stabilizesi açısından büyük önem taşıdığı anlaşılmıştır. Örneğin; 1980’lerin başlarında tasarlanan bazı düşük sürtünme katsayısına sahip modellerin, özellikle yan rüzgâr koşullarında sürüldüğünde stabilizenin oldukça azalacak olması o dönemde stabilizenin hesaba katılmamış olmasıydı. Günümüzde yan rüzgârlar ve etkileri tasarımcılar tarafından çok dikkat edilen bir husustur. Bu yüzden akış fiziğine ilişkin daha fazla tutarlı ve gerçeğe yakın bilgiler elde etmek için daha düşük maliyetli olması sebebiyle hesaplamalı akışkanlar dinamiğine daha fazla önem verilmelidir.

Aerodinamik kuvvetler taşıt yüzeyinin çevresine dağılan basınçların bileşkesidir ve “basınç merkezi” olarak isimlendirilen bir noktaya etki etmektedir.

Bir araca etki eden aerodinamik kuvvetler ve momentler, Şekil 2.2'de katsayı biçiminde gösterilmiştir. Kuvvet ve moment katsayıları sırasıyla şu şekilde tanımlanır:

$$C_f = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (2.1)$$

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho v^2 A l} \quad (2.2)$$

F = Kuvvet (sürüklenme, kaldırma, yanal), N

M = Moment (yunuslama, sapma, yalpa), Nm

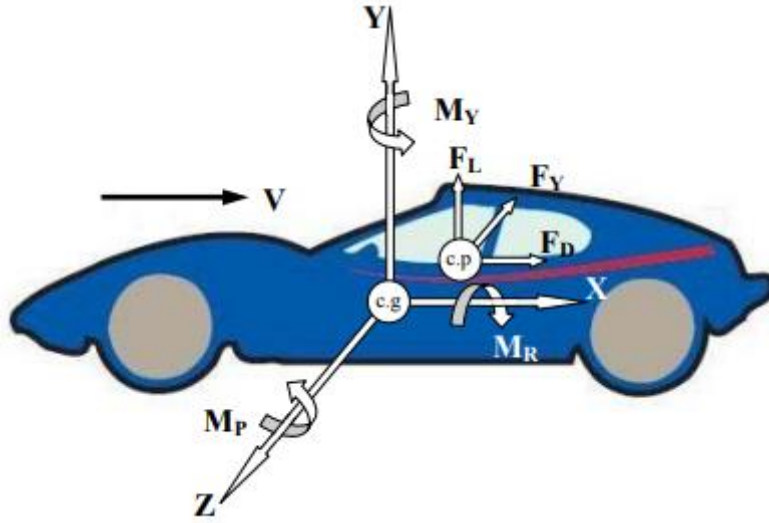
A = Taşıt kesit alanı, m²

l = Uzunluk, m

ρ = Havanın yoğunluğu, 1,255 kg/m³

V = Taşıt hızı, m/s

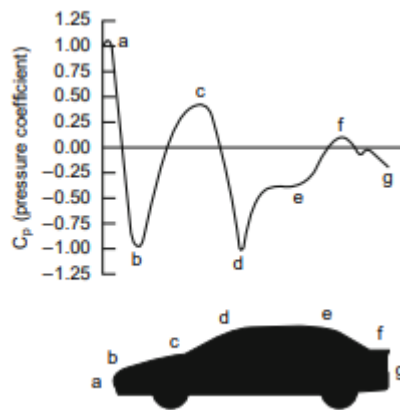
C = Birimsiz bir değer olan katsayıdır.



Şekil 2.2 Taşıt üzerindeki aerodinamik kuvvet, basınç, moment ve ağırlık merkezi gösterimleri (Demircioğlu 2007).

2.2.1.1 Sürüklenme Kuvveti

Sürüklenme kuvveti aracın hava içerisindeki hareketine karşı çıkan aerodinamik kuvvettir. Bir taşıt hava içerisinde hareket ederken, taşıtın hareketine karşı koyan havanın hareketi, Şekil 2.3’den de anlaşıldığı gibi tüm taşıt yüzeyinde değişen basınçlara neden olur.



Şekil 2.3 Statik basınç katsayı dağılımı (Crolla 2009).

Taşıtlarda aerodinamik sürüklenme, taşıtın boyuna, şekline ve akışkan hızına bağlıdır. Bu nedenle hava direnci katsayısı başka bir deyişle aerodinamik sürüklenme katsayısı adı verilen C_D ile gösterilen birimsiz bir katsayı meydana gelmektedir. Sürüklenme kuvveti aşağıdaki formülle ifade edilmektedir.

$$F_D = 0,5 \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot V^2 \quad (2.3)$$

Burada:

C_D = Aerodinamik sürüklenme katsayısı

F_D = Aerodinamik direnç kuvveti, N

ρ = Havanın yoğunluğu, kg/m^3

A = Taşıtın karakteristik iz düşüm alanı, m^2

V = Taşıt hızı, m/s

Yukarıdaki formülden de anlaşılacağı gibi taşıtlar yüksek hızlarda hareket ettiğinde sürüklenme kuvveti de artacaktır. Ayrıca cisimlerin üzerinde Reynold sayısı arttıkça C_D değeri düşecektir. Örnek olarak Şekil 2.4'te görüldüğü gibi küre üzerindeki akışta Re 'nin artmasıyla türbülanslı akışın ayrılması daha zor gerçekleşeceği için C_D değeri düşecektir. Bu yüzden Reynold sayısı C_D üzerinde etkilidir ve aşağıdaki formülle gösterilir.

$$Re = \frac{\mu D}{\rho V} \quad (2.4)$$

Burada:

Re = Reynold sayısı

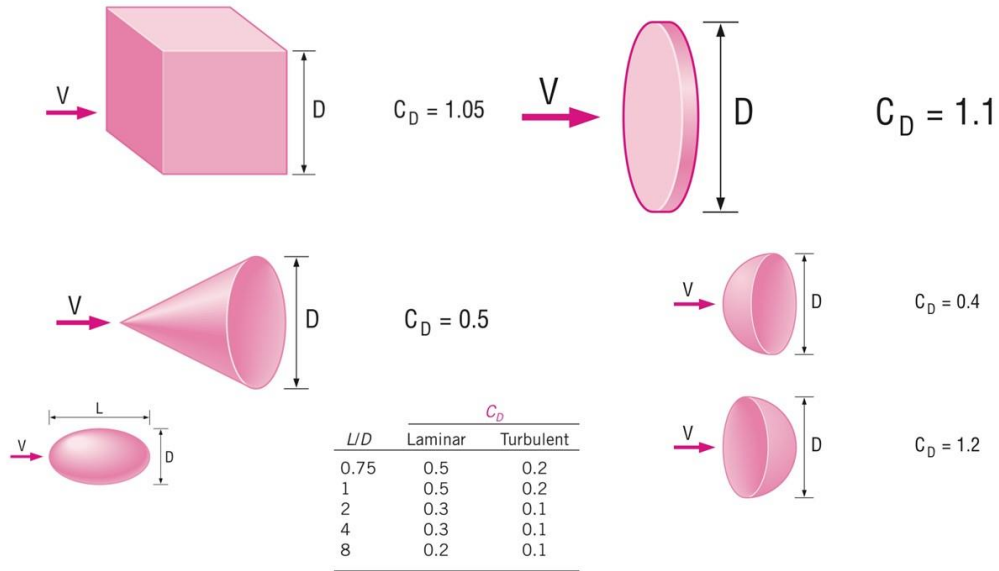
μ = Havanın dinamik viskozitesi $\text{kg/m}\cdot\text{s}^2$

D = Karakteristik çap , m^2

ρ = Havanın yoğunluğu, kg/m^3

V = Taşıtın hızı, m/s

Aerodinamik direnç katsayısını düşürmek için günümüz mühendisleri ve tasarımcılar çalışmalarına devam etmektedir. Tüm bu çalışmalar araçları daha fazla damla formuna benzetmek içindir. Şekil 2.4’de görüldüğü üzere keskin ve köşeli formlardan daha ziyade damla formuna benzeyen biçimlerin C_D değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalarda damla formuna benzetme gayretinin yaşam alanı, güvenlik ve estetik görünüm gibi sebeplerden dolayı taşıtta bir sınırı vardır. Yine de ön tampon, ön cam, arka cam, aynalar gibi bazı parçalardaki iyileştirmelerle C_D değerini düşürmeyi başarabilmektedirler.



Şekil 2.4 Bazı cisimlerin ölçülmüş aerodinamik direnç katsayıları (Çengel ve Cimbala 2006).

2.2.1.2 Kaldırma Kuvveti

Kaldırma kuvveti, bir arabanın üst kısmındaki hava akışının altındaki hava akışından daha hızlı olması nedeniyle oluşur. Bu tüm arabalarda bir dereceye kadar olur. Bernoulli teoremine göre hız arttıkça basınç azalır. Bu nedenle arabanın üst kısmı alt kısmından daha düşük bir basınca sahiptir ve sonuç olarak bir kaldırma kuvveti meydana gelir. Bir nesne tarafından oluşturulan kaldırma miktarı, havanın yoğunluğu, nesne ile hava arasındaki hız, havanın viskozitesi ve sıkıştırılabilirliği, havanın üzerinde aktığı yüzey alanı, şekli gibi bir dizi faktöre bağlıdır. Cismin akışa olan eğimi ya da hücum açısı olarak da adlandırılır.

$$C_L = \frac{F_L}{0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^2} \quad (2.5)$$

C_L = Kaldırma katsayısı,

F_L = Kaldırma kuvveti, N

ρ = Havanın yoğunluğu, kg/m³

V = Taşıt hızı, m/s

A = Taşıt ön iz düşüm alanı, m²

C_L aerodinamik kaldırma katsayısını temsil etmektedir ve araç gövdesi üzerinde üretilen kaldırmayı (lift) tanımlar. Araçlarda uçakların aksine olarak kaldırma kuvvetini düşük olması istenir. Kaldırma kuvvetini yüksek olması aracın yol tutuşunun kötüleşmesine ve özellikle virajlarda savrulmasına sebep olur. Ayrıca kaldırma kuvvetinin tersine bir kuvvet uygulandığında araç ve tekerleklerde sürtünme kuvvetine neden olacağı için yakıt sarfiyatını arttıracaktır. Bu nedenle kaldırma kuvveti belli bir seviyede tutulmalıdır.

2.2.1.3 Yanal Kuvvet

Havanın hareketinin taşıtın yönüne göre paralel olmadığı durumlarda meydana gelen aerodinamik kuvvetin bir yan bileşenidir. Taşıtlarda yanal kuvvetin oluşumunda herhangi bir yerden etki eden rüzgâr ya da aracın dönme anında meydana gelen doğrultu değişimidir. Yanal kuvvetin hesaplanması için kullanılan formül aşağıdaki gibidir:

$$C_Y = \frac{F_Y}{0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^2} \quad (2.6)$$

C_Y = Yanal kuvvet katsayısı

F_Y = Yanal kuvvet, N

ρ = Havanın yoğunluğu, kg/m³

V = Taşıt hızı, m/s

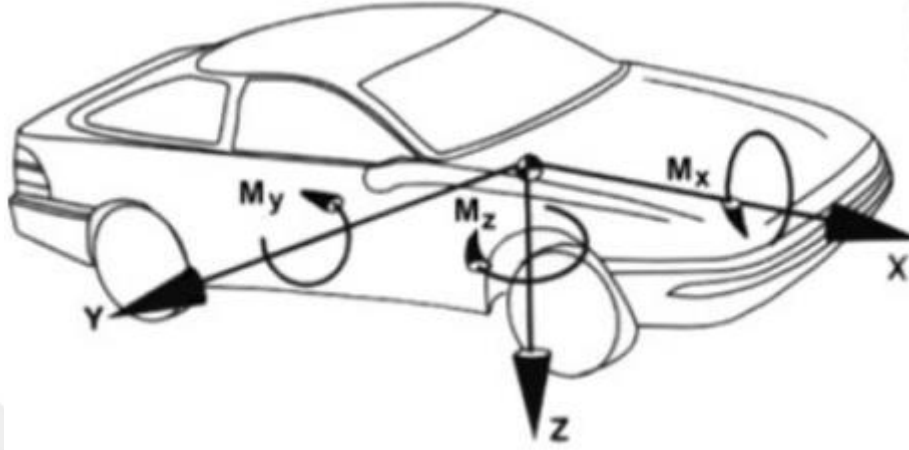
A = Taşıt ön iz düşüm alanı, m²

2.2.2 Aerodinamik Momentler

Aerodinamik kuvvetlerin taşıt dinamiğine etkisini hesaplamak için bu kuvvetlerin ağırlık merkezine taşımak gerekmektedir. Bu şartlarda dinamik analiz hesaplamaları yapabilmek için aerodinamik momentleri bilmek gerekmektedir. Bu momentler aerodinamik kuvvetler ile bu kuvvetlerin ağırlık merkezine olan uzaklıklarını çarparak bulunur. Aerodinamik kuvvetler üç bileşenden meydana geldiği için bunların ağırlık merkezine taşınması ile de üç aerodinamik moment oluşmaktadır. Bu momentler:

- M_x : Yalpa momenti (Rolling moment)
- M_y : Yunuslama momenti (Pitching moment)

- M_z : Sapma momenti (Yawing moment)



Şekil 2.5 Taşıtları etkileyen aerodinamik momentler; M_x X eksenine göre moment (Yalpa momenti), M_y Y eksenine göre moment (Yunuslama momenti), M_z Z eksenine göre moment (Sapma momenti) (Çetinkaya 2017).

2.2.2.1 Yunuslama Momenti (Pitching Moment)

Sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin meydana getirdiği aracın ön ve arkasından etki eden kaldırma kuvvetleri birbirine eşit olmadığı durumlarda oluşan moment yunuslama (pitching moment) momentidir (Demircioğlu 2007).

$$M_y = q \cdot A \cdot L \cdot C_y \quad (2.7)$$

Burada;

M_y = Yunuslama momenti, Nm

L = Taşıtın uzunluğu, m

C_y = Yunuslama momenti katsayısı,

q = Dinamik basınç, Pa

A = Aracın ön izdüşümü alanı, m².

2.2.2.2 Sapma (Yuvarlanma) Momenti (Yawing Moment)

Aracın iki yanından etkiyen yanal kuvvetlerin birbirlerine eşit olmadıkları durumlarda oluşan momente denir (yawing moment). (Demircioğlu 2007).

$$M_z = q \cdot A \cdot L \cdot C_z \quad (2.8)$$

Burada;

M_z = Sapma momenti, Nm

q = Dinamik basınç, Pa

A = Aracın ön izdüşümü alanı, m²

L = Akslar arasındaki uzunluk, m

C_z = Sapma moment katsayısı.

2.2.2.3 Yalpa (Yana kayış) Momenti (Rolling Moment)

Yanal rüzgârların aracın ön ve arkasına aynı şiddetle etki etmediği hallerde oluşan momente Yalpa (Yana kayış) (Rolling moment) momenti denir (Demircioğlu 2007).

$$M_x = q \cdot A \cdot L \cdot C_x \quad (2.9)$$

Burada;

M_x = Yalpa momenti, Nm

q = Dinamik basınç, Pa

A = Aracın ön izdüşümü alanı, m²

L = İki aks arası mesafe, m

C_x = Yalpa moment katsayısını ifade etmektedir.

2.3 Aerodinamik Özelliklerin Belirlenme Yöntemleri

Taşıtlarda aerodinamik özelliklerin belirlenmesi, taşıt geometrisinde yapılacak olan değişiklikler açısından çok önemlidir. Bu bağlamda aerodinamik özellikleri belirlemek için birçok yöntem vardır. Bazı deneysel ve uygulamalı olan bu yöntemlerde şu özellikleri belirlemek esastır:

- Taşıtları etkileyen aerodinamik katsayılar (sürüklenme ve kaldırma katsayıları)
- Taşıtın yüzeyindeki basınç dağılımı
- Akış görünümünün verileri

Yapılan deneyler gerçek taşıtlarla otoyollarda yapılacağı gibi rüzgâr tünellerinde ya da bazı bilgisayar programlarında da yapılabilmektedir.

2.3.1 Yol Testleri

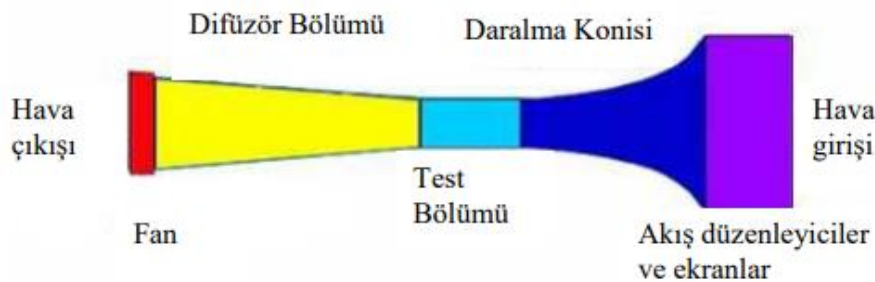
Gerçek taşıtlarla yapılan bu testlerde bazı zorluklara maruz kalınmaktadır ancak araştırmalar için en gerçekçi sonuçlarda bu testler nihayetinde elde edilebilmektedir. Bu testlerde kullanmak için bazı donanımlara ve mekanizmaya sahip olmak gerekir. Bu ekipmanlardan bazıları araç üzerinden veri elde etmek için ölçü donanımlardır ve bu ekipmanlara karşı oldukça hassas davranılmalıdır. Bu testlerde doğru bir şekilde aerodinamik direnci belirlemek için sapma (yuvarlanma) direnci bilinmek zorundadır çünkü gerçek yol şartlarında taşıt sapma direncine maruz kalmaktadır. Yuvarlanma

direncini belirleyebilmek için çevredeki rüzgârlardan taşıtı muhafaza etmek gerekmektedir. Bu nedenle taşıtları çevresel rüzgârlardan korumak için bir muhafaza ile kapatılır ve ölçümler gerçekleştirilir. Bir başka ölçüm testi yöntemi ise taşıtı belirli bir hızlanmadan sonra yavaşlamaya bırakılmasıdır. Bu yöntemle C_D katsayısını bulma hesabı, taşıt tamamen durana kadar kat ettiği mesafe ile yavaşlama ivmesinin ölçülmesi ile yapılmaktadır.

2.3.2 Rüzgâr Tünelleri

Rüzgâr tünelleri araçları hareket ettirmek yerine havayı belli bir hızla araçların üzerine hareket ettirme ilkesine dayanmaktadır. Rüzgâr tünelleri, çevresel şartları kontrol altında rahatça tutma imkânının yanında harici atmosferik şartlardan da bağımsız bir ortam sunmaktadır. Çalışma tertibatına göre iki tipte rüzgâr tüneli vardır. Bunlar; açık devre rüzgâr tüneli ve kapalı devre rüzgâr tünelleridir. Bu iki çeşidin altında da farklı amaçlar için geliştirilmiş türleri mevcuttur.

Açık devre rüzgâr tüneline hava akışı; daralma konisinden test bölümünün gerçekleştiği kısma kadar düz bir hatta ilerler ve ardından genişleme ve fan bölümü ile tekrar dış ortama geçiş yapar. Test bölümü sınırları olan bir odacık olarak veya belli sınırı olmayan bir boşluk olarak tasarımı yapılabilir. Şekil 2.6'da kapalı bir test bölümü olan açık devre rüzgâr tüneline çizimi gösterilmektedir.

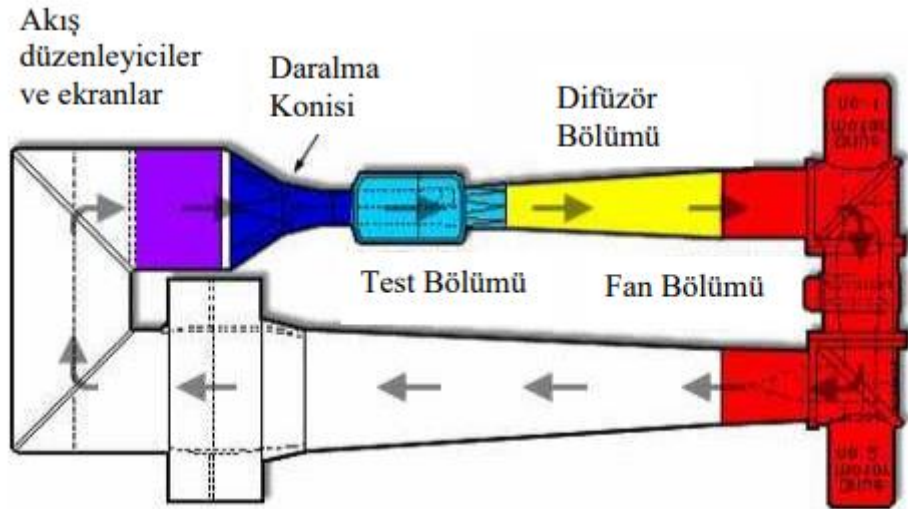


Şekil 2.6 Açık devre rüzgâr tüneline kesit çizimi (Kaykisizli 2006).



Resim 2.1 Açık devre rüzgâr tüneli (Kaykisizli 2006).

Kapalı devre rüzgâr tünelleri akışkanın tünel içerisinde sürekli olarak gezebildiği bir dizaynla tasarlanmıştır. Kapalı devre rüzgâr tünellerinde test bölümü açık veya kapalı olabilir. Bir kapalı devre rüzgâr tünelinin üstten görünüşünü Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7 Kapalı devre rüzgâr tüneli kesiti (Kaykisizli 2006).



Resim 2.2 Kapalı devre rüzgâr tüneli (Kaykisizli 2006).

İki farklı rüzgâr tünellerinin de kendine has avantajları olduğu gibi bazı dezavantajları da vardır. Örneğin açık devre rüzgâr tünellerinin avantajları ve dezavantajları şöyledir;

- İnşası ve giderleri daha ucuzdur.
- Tünelin içerisinde duman ile görüntüleme yapıldığı durumlarda açık olmasından dolayı kolayca bu duman ortamdan uzaklaştırılabilir ve temizlik problemi yoktur.

Dezavantajları olarak;

- Çalışma sahası açık devre olmasından dolayı ortam şartlarından etkilenebilir. Örneğin; ortam sıcaklığı veya soğukluğu gibi.
- Kapalı devre tünellere kıyasla aynı boyutta olsalar bile daha fazla enerji harcarlar.
- Açık devre tüneller gürültülüdür ve bunu engellemek maliyetlidir.

Kapalı devre rüzgâr tünelleri ise;

- Daha düzgün ve istenildiği seviyede bir akış elde edilebilir.
- Ortam şartlarından kapalı olması nedeniyle çok etkilenmez.
- Açık devre tünellere kıyasla aynı boyutta olsalar bile daha az enerji harcarlar.
- Gürültü oranı açık devre rüzgâr tünellerine kıyasla daha azdır.

Dezavantajları olarak;

- Kapalı devre rüzgâr tünelleri inşaatı ve idamesi açık devrelere kıyasla daha pahalıdır.
- Dumanla akış görüntüleme gibi tekniklerden sonra temizliğinin yapılması gerekir.
- Sıcaklığı belli bir seviyede tutmak zordur ve bazı donanımlara ihtiyaç vardır (Kaykisizli 2006).

2.3.3 Nümerik Analiz Yöntemi

Akışkanlar mekaniğinde, akışkanların belirli şartlar altındaki hareketlerini öngörmek için, kısmi türev içeren temel denklemlerin bazı basitleştirilmiş varsayımlar yaparak teorik çözümler bulma imkânı vardır. Ancak yüksek işlem hızına ve işlem gücüne sahip bu bilgisayarlarda yapılan teorik çözümler gerçek durumlarla tam olarak uyuşmamaktadır. Buna rağmen, hata payı olabildiğince düşürülebilir. Maliyetsiz olması ve deneysel olarak kurulumu imkânsız olan bazı durumların teorik olarak hesaplayabilme imkânı sunması yönlerinden hesaplamalı akışkanlar dinamiğini (HAD) akışkanlar dinamiğinin bir alt dalı olarak ortaya çıkarmıştır.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), bilgisayar simülasyonları kullanarak akış sistemleri, ısı transferleri ve kimyasal reaksiyonlar gibi durumları analiz edebilmektedir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin etkin bir şekilde kullanıldığı alanlara örnek olarak; içten yanmalı motorların tasarımı, uçakların ve araçların aerodinamiği, meteoroloji, binaların dış ortamı (rüzgâr yükleri ve havalandırma) verilebilir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin, yeni tasarımların tedarik sürelerinin ve maliyetlerinin azaltılması, tehlikeli koşullar altında çalışma sistemleri, kontrollü deneylerle çalışılması imkânsız sistemler ve sonuçların sınırsız düzeyde detaylandırılması gibi deneye dayalı yaklaşımlara göre birçok avantajı vardır. Hâlihazırda hesaplamalı akışkanlar dinamiği, deney yapmanın yerini tutmasa da problemleri çözmek için çok yararlı ve güçlü bir yöntemdir (Olosson 2011).

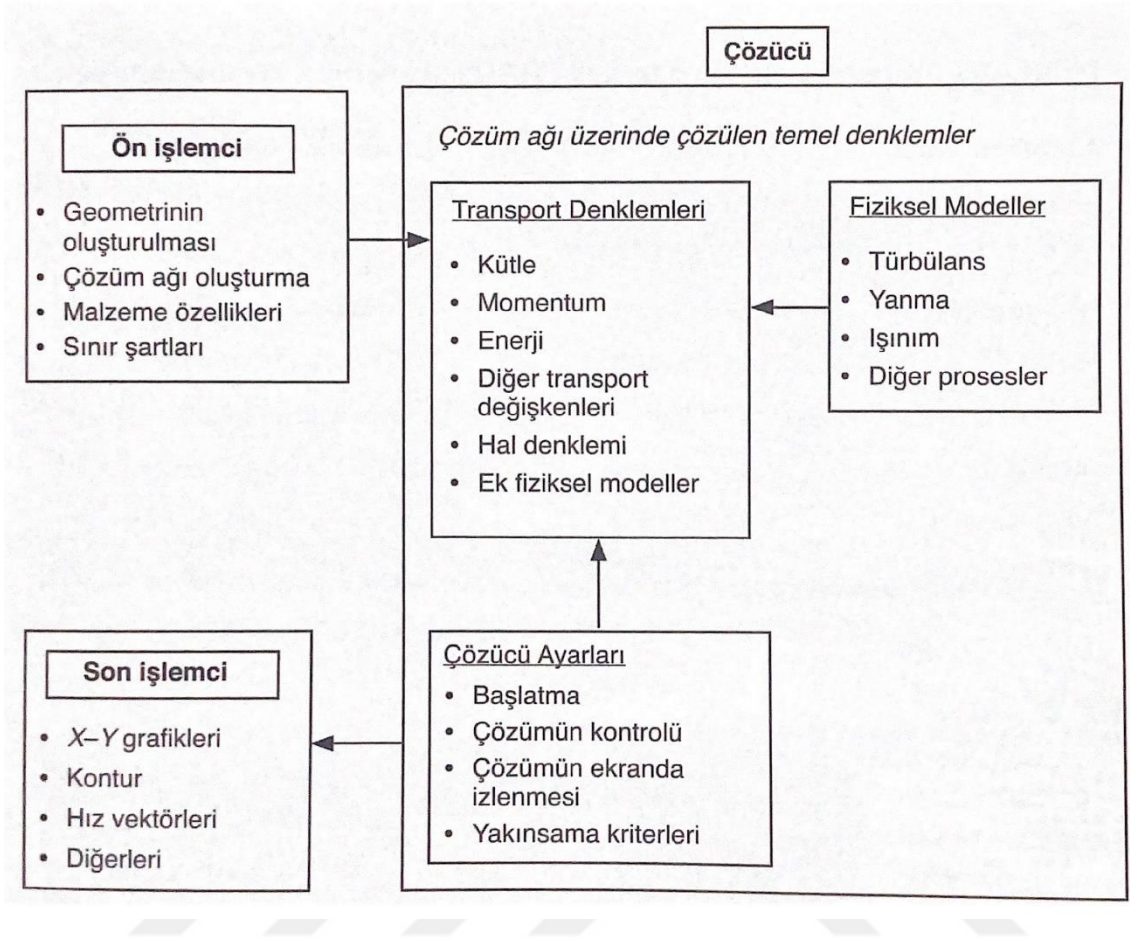


Şekil 2.8 HAD süreçleri (Olosson 2011).

İlk adım olarak geometri oluşturulur. CAD programları ile yapılan bu işlem bir modelin taranarak nokta bulutu halinde bilgisayar ortamına aktarılıp düzenlenmesi yaparak olabilmektedir. Geometri hava geçirmez olması gerekir ve bilgisayar gücünden tasarruf etmek için CAD modelinde akışı etkilemeyen gereksiz şeyler kaldırılabilir. Buna CAD temizleme denir. Bir sonraki adım ağ (mesh) oluşturmaktır. Bu genellikle bir ağ oluşturma programı tarafından otomatik olarak yapılır ve kullanıcıya ağ yapısını düzenleme olanağı sunmaktadır. Daha sonra akış bir çözücü tarafından simüle edilir. Simülasyon hazır olduktan sonra sıra son işleme gelir. Son işleme, verilerin alınmasını ve akışın analiz edilmesini içerir (Olosson 2011).

Tüm HAD yazılımları, çözülecek akışa ait parametrelerin girişi ve hesaplanan verilerin incelenmesi amacıyla kullanılan bir grafik ara yüzlerine (GUI) sahiptirler. Bu sebeple HAD yazılımları üç ana elemandan oluşmaktadır. Bunlar:

- Ön işlemci (Preprocessor)
- Çözücü (Solver)
- Son işlemci (Postprocessor).



Şekil 2.9 Bir HAD analizinin yapısındaki üç ana elemanın aralarındaki bağlantı fonksiyonları (Tu vd. 2018).

Şekil 2.9’da HAD analizleri içerisinde söz konusu üç elemanın arasındaki bağlantıları açıklayan genel hatları göstermektedir.

2.3.3.1 Diferansiyel Hareket Denklemleri

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği esas olarak, akışkanlar dinamiğindeki temel denklemlere dayanmaktadır. Bu denklemler fizikteki korunum yasalarının matematiksel ifadesini temsil etmektedir. Denklemlerin türetilmesinde aşağıda sıralanan fizik yasaları kullanılmıştır:

- Kütlenin korunumu yasası.

- Newton'un ikinci yasası: Momentumdaki değişim hızı, akışkana etki eden toplam kuvvetlere eşittir.
- Termodinamiğin birinci yasası: Enerjideki değişim hızı, akışkana aktarılan ısı ve akışkan üzerinde yapılan işin toplamına eşittir.

Süreklilik denklemi olarak kütle korunumu denklemini kullanırız ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.10)$$

Akışkan kütlesi ve ivmesi arasındaki bileşke kuvvet, Newton'un ikinci yasası olarak bilinen momentumun korunumu yasasına göre akışkanı etkileyen kuvvete eşittir. Eğer süreklilik denklemlerindeki eşitlikler momentum denklemlerine uyarlandığında Navier-Stokes denklemleri elde edilmiş olmaktadır.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right] \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right] \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] \quad (2.13)$$

Yukarıda kartezyen şekilde gösterilen bu denklemler, parametrik şekilde toplandığında denklem 2.14 elde edilmektedir.

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right] = \rho \cdot \vec{g} - \nabla p + \mu \cdot \nabla^2 \vec{V} \quad (2.14)$$

Denklem 2.10 süreklilik denklemidir. Denklem 2.14 momentumun korunumu denklemidir ve 2.11 - 2.12 - 2.13, denklem 2.14'ün kartezyen şekilde gösterimidir.

ρ = Yoğunluk, kg/m³

p = Basınç, Pa

u, v, w = Hız, m/s

ν = Kinematik viskozite, kg/m·s²

Enerji korunumu denkleminin çalışmanın bu kısmında yer almamasının nedeni çalışmanın adyabatik akış olarak kabul edilmesidir.

2.3.3.2 Standart k-ε Türbülans Modeli

Standart k-ε modeli türbülans kinetik enerji (k) ve türbülans yitim (dissipation) (ε) terimlerini kullanarak türbülans ölçeğinde çözüm yapmaktadır.

$$u = k^{0.5}, T = \frac{k}{\varepsilon} \rightarrow \vartheta_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.15)$$

Türbülans kinetik enerji ve türbülans yitim oranının hesaplandığı denklemler ise şu şekildedir.

$$\bar{v}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\vartheta + \frac{\vartheta_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.16)$$

$$\bar{v}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\varepsilon}{k} [C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\vartheta + \frac{\vartheta_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (2.17)$$

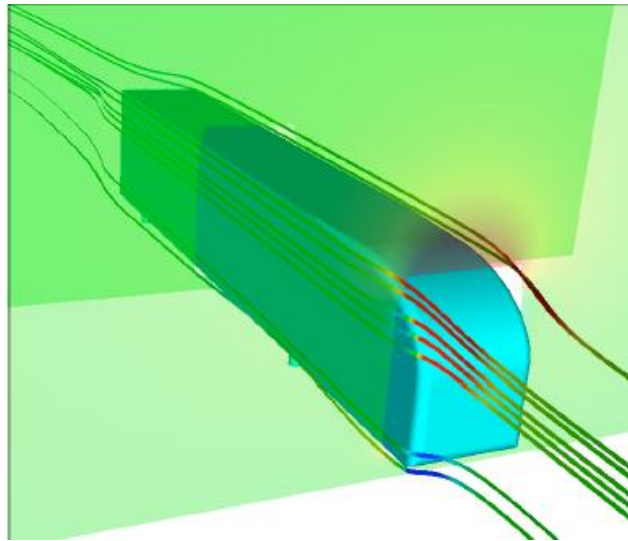
Yukarıda gösterilen denklemlerde bulunan katsayılar kullanım alanına uygun bir şekilde deneysel olarak belirlenebilir. Standart k-ε modeli için kullanılan değerler şu şekildedir (Aktaş 2022).

$$C_\mu = 0.009, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (2.18)$$

3. MATERYAL ve METOT

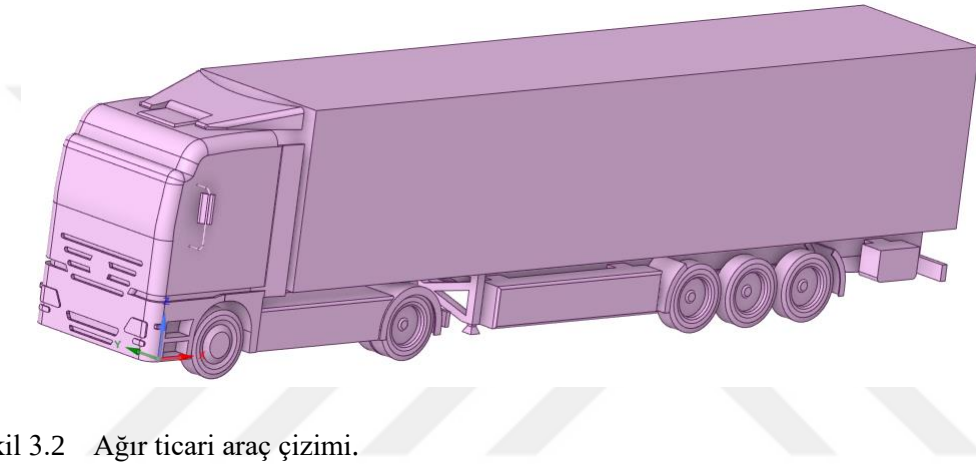
3.1 Geometrik Model

Bu çalışmada basitleştirilmiş bir çekici ve römorkun basitleştirilmiş geometrisinin 1/100 ölçeğinde küçültülmüş hali hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile farklı ayna modellerinin aerodinamik yapıya etkileri incelenmiştir. Çalışmada kullanılan modelde standart bir römork modeli ve Avrupa’da ve Türkiye’de yaygın olarak kullanılan bir çekici modeli esas alınarak basitleştirilmiştir. Geometri basitleştirilirken literatürde önceden yapılmış basitleştirmeler göz önünde bulundurulmuştur. Salari vd. (2004) yaptıkları çalışmalarında 8.sınıf ağır ticari bir aracın geometrisini basitleştirerek Ground Transportation System (GTS) adını verdikleri bir geometride çekici ve treyler arasındaki boşluğun, aracın alt gövdesini ve treyler tabanının aerodinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Gerçekteki geometriyle birebir ölçekte bir araç tasarlayıp deneysel çalışmalar gerçekleştirmek çok zaman alan karmaşık durumlardır. Bu durumda araç geometrisini ya da parçalarını basitleştirerek aynı sonuçları almak mümkündür. Böylece zamandan ve iş gücünden tasarruf ederek maliyet düşürmek amaçlanmaktadır.

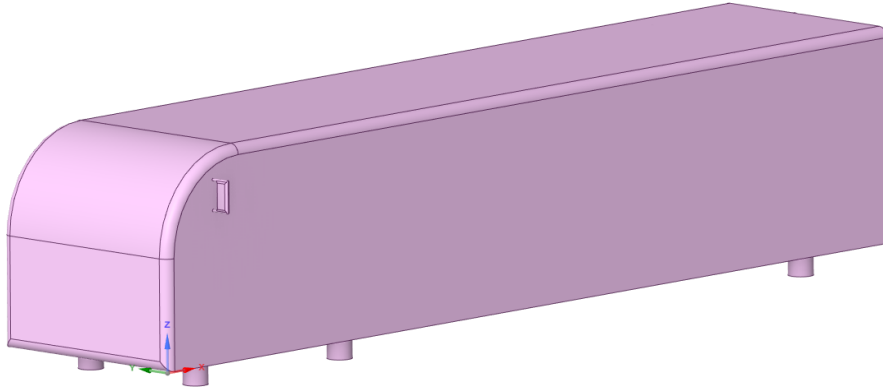


Şekil 3.1 GTS modelinin 0° sapma açısında hız büyüklüğünü gösteren akış çizgileri (Salari vd. 2004).

Çalışmada basitleştirilmiş geometri kullanılmasının bir nedeni de gerçek ağır ticari araç çizim datasında bulunan birçok küçük, kavisli ve ayrıntılı parçalar bulunmasıdır. Bu parçalar, aynalardaki aerodinamik yapı inceleneceği için bu çalışmada gereksizdir. Şekil 3.2'deki gerçeğe yakın olan bu çizim datasıyla istenen kalite düzeyinde ağ yapısı oluşturmak zorlaşmıştır. Daha kaliteli bir ağ yapısı elde etmek amacıyla Şekil 3.1'deki GTS modeli esas alınarak çizim datası basitleştirilmiş ve daha düz yapılar tercih edilmiştir.



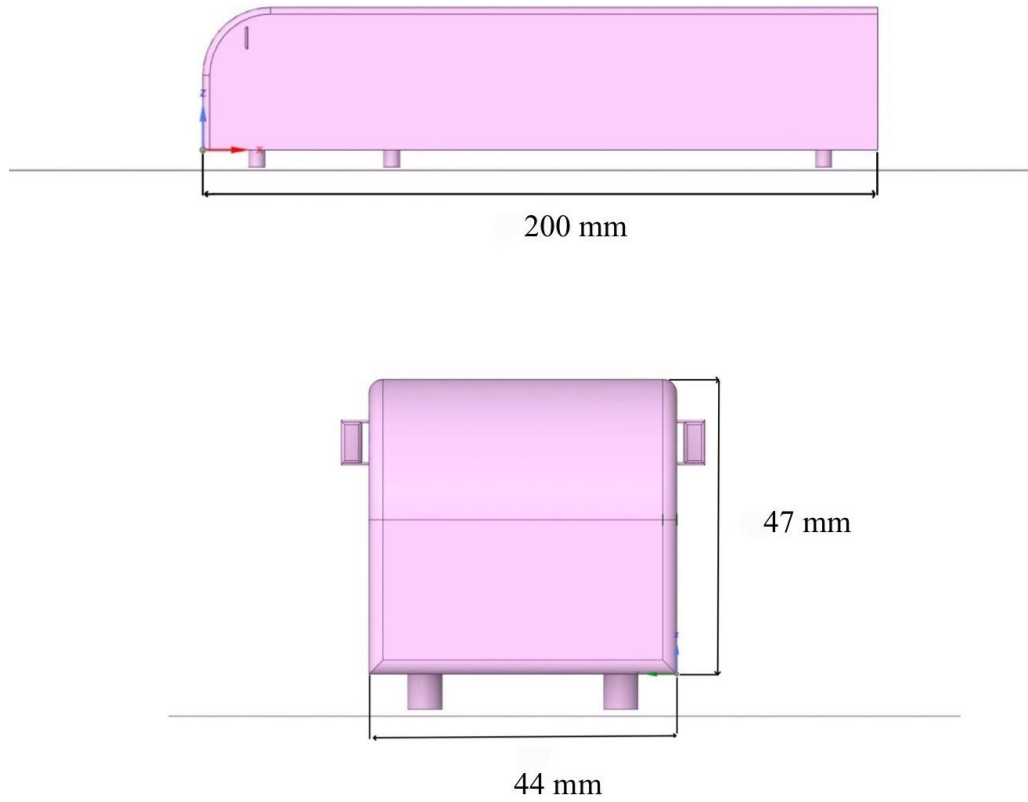
Şekil 3.2 Ağır ticari araç çizimi.



Şekil 3.3 Basitleştirilmiş ağır ticari araç geometrisi.

Çizelge 3.1 Basitleştirilmiş aracın ve rüzgâr tüneli modellerinin geometri özellikleri.

Geometri	Uzunluk (L)	Yükseklik (H)	Genişlik (W)
Taşıt Modeli	200 mm	47 mm	44 mm
Rüzgâr Tüneli Modeli	1400 mm	400 mm	400 mm

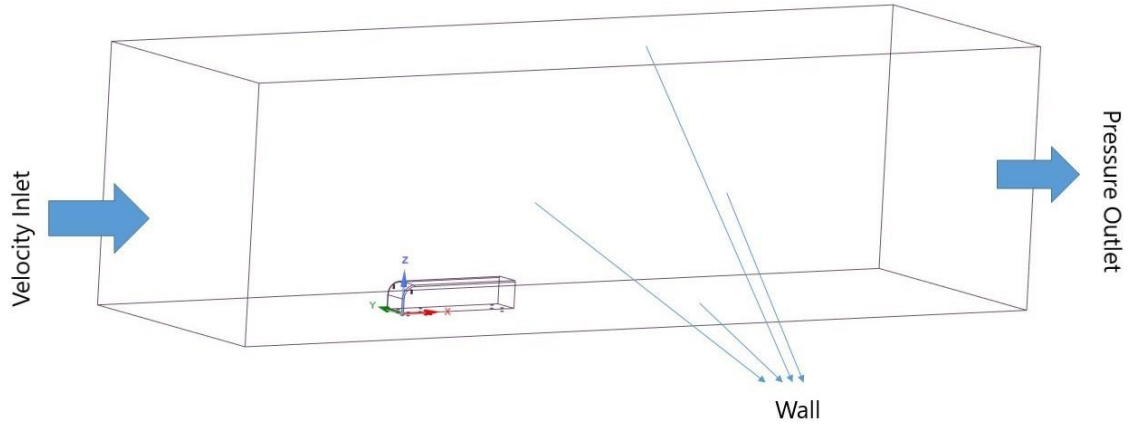


Şekil 3.4 Basitleştirilmiş ağır ticari aracın geometri özellikleri.

Taşıt modelinin analizlerinde Ansys Fluent, sürüm 22.1 HAD yazılımı kullanılmıştır. Ansys SpaceClaim modülünde taşıt modeli tasarlanmıştır ve kontrol hacmi enclosure komutu vasıtasıyla oluşturulmuştur. Ardından boolean komutu ile taşıt modeli kontrol hacmi içerisinden çıkartılır ve analizde kullanmak için dört farklı sınır şartı yüzeylere atanır. Bunlar;

- Velocity Inlet: Akışkan havanın girdiği yüzeydir. Hız sınır şartı sabit olarak buradan tanımlanır.
- Pressure Outlet: Akışkanın çıkış yaptığı yüzeydir. Sabit basınç sınır şartı buradan tanımlanır.
- Wall: Kontrol hacmini oluşturan uzun dikdörtgen kenar yüzeyleridir ve duvar sınır şartı kullanılmıştır.
- Truck: Aerodinamik özelliklerinin belirlenmesi istenilen çizim datası kalıp boşluğudur. Duvar sınır şartı kullanılmıştır.

Taşıtların aerodinamik analizleri yapılırken kararlı ve düzgün bir akış profili ve deney sonuçları elde etmek için oldukça büyük kontrol hacimlerine yani rüzgâr tüneli modellerine ihtiyaç duyulmaktadır. Literatür taraması yaparak önceki çalışmalara bakıldığında kontrol hacminin boyutları hususunda kesin bir kalıp bulunmamaktadır. Ancak birçok çalışmada kontrol hacminin geometri özelliklerini model taşıtın boyutlarıyla orantılı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada da kontrol hacmi boyutları, basitleştirilmiş ağır ticari araç geometrisi uzunluğuna (L) standardize edilmiştir. Taşıt modeli giriş kısmından 400 mm yani 2L olacak şekilde içeri yerleştirilmiştir ve arkasındaki uzunluğun boyu 4L'dir. 2L genişliğe sahip kontrol hacmini ortalayarak model yanlardan eşit şekilde konumlanmıştır. Gerçek çalışma koşullarını simüle etmek amacıyla lastiklerden sıvı geçmemesini sağlamak için model x ekseninin 1 mm üzerine yerleştirilmiştir (Al-Obaidi vd. 2018).



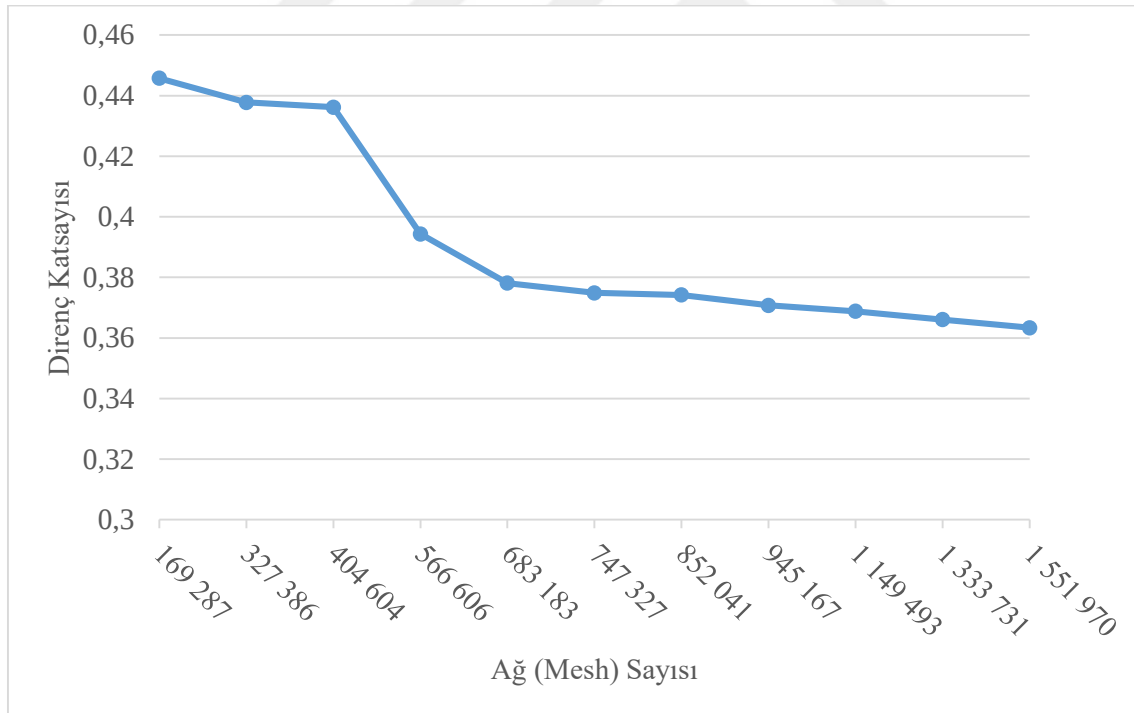
Şekil 3.5 Basitleştirilmiş ağır ticari araç geometrisinin kontrol hacmi modeli içerisindeki görünümü.

3.2 Ağ Yapısı Oluşturma (Meshing) ve Ağdan Bağımsızlık

Sayısal analiz çalışmalarının doğrulanmasında kullanılan metotlardan birisi de ağdan bağımsızlık testidir. Sayısal çözümlerde oluşturulan ağ sayısında artış olmasına rağmen sonuç belli bir noktadan sonra fazla değişmiyorsa, yapılan çözümlemede ağdan bağımsızlık elde edilmiş demektir. Bu çalışmada 11 farklı ağ sayılarında üçgensel hacim (tetrahedrons) ağ yapısı için 10 m/s (36 km/h) hızda ağdan bağımsızlık testi yapılmıştır. Basitleştirilmiş geometrinin ağ yapılarında üçgensel ağların en küçük ve en büyük boyutları değiştirilerek farklı sayılarda ağ yapıları oluşturulmuştur. Tüm bu çözümlerde kullanılan türbülans modeli aynıdır.

Çizelge 3.2 10 m/s hızda yapılan ağdan bağımsızlık testi sonuçları.

Ağ Sayısı	F_D	C_D
169 287	0,066728	0,445761
327 386	0,065534	0,437789
404 604	0,065294	0,436182
566 606	0,059029	0,394334
683 183	0,056602	0,378120
747 327	0,056117	0,374881
852 041	0,056017	0,374211
945 167	0,055499	0,370751
1 149 493	0,055206	0,368795
1 333 731	0,054797	0,366058
1 551 970	0,054394	0,363370



Şekil 3.6 Ağdan bağımsızlık grafiği.

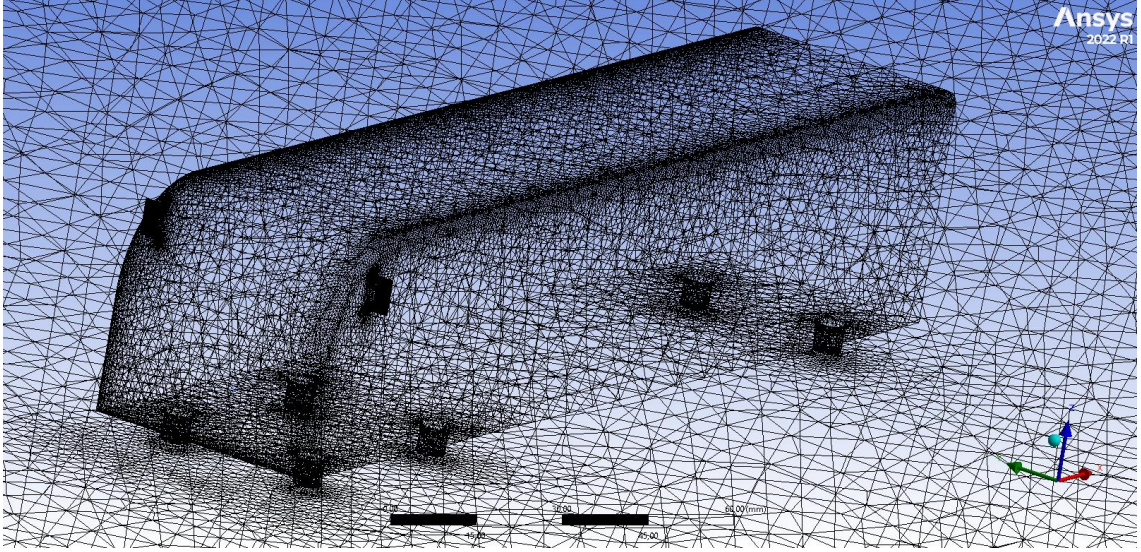
Ağdan bağımsızlığın sağlanması için 11 farklı ağ sayılarında testler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.2’de görüldüğü gibi 683 183 ağ sayısındaki çözümlerden sonra C_D sayısı

birbirine yakın değerlerde bulunmuştur. Bu veriler ışığında ağır ticari aracın sayısal çözümlerinde kullanılacak olan ağ elemanı sayısı 1 333 731 olarak belirlenmiştir. Analizin doğruluğu ve kararlılığını sağlamak amacıyla yeterli sayıda ağ oluşturmak gerekmektedir. Yetersiz sayıda ağ kullanımı analizde hatalara neden olurken, optimum seviyenin üzerinde ağ kullanımı ise gereksiz işlem süresine neden olmaktadır. Bu çalışmada tetrahedral ağ yapısı kullanılmıştır. Ansys Meshing Tool programında 1 333 731 ağ sayısındaki yapı oluşturulurken değiştirilen parametreler Çizelge 3.3’de verilmiştir.

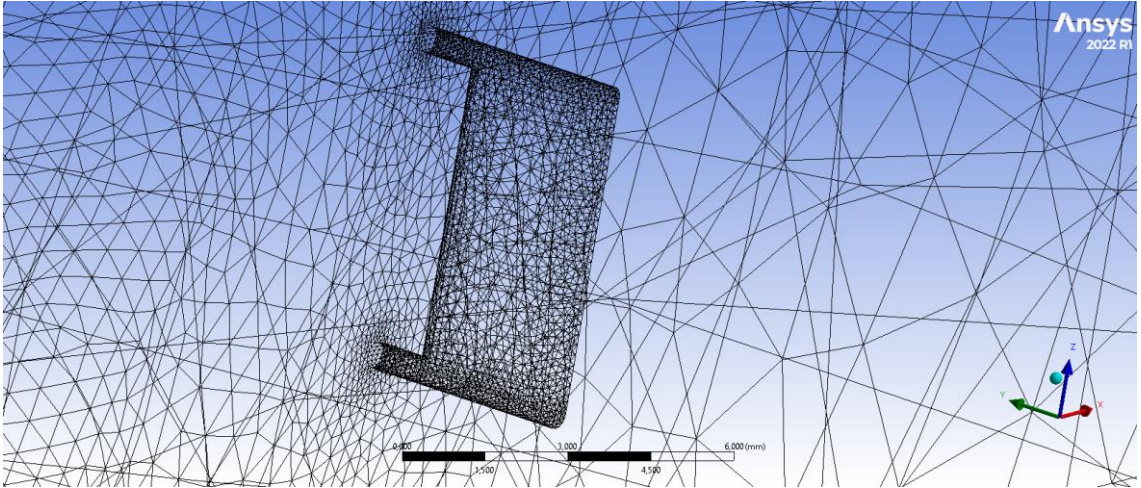
Çizelge 3.3 Ağ yapısı karakteristikleri.

Genel eleman ağ parametreleri	Global Mesh Parametreleri	Boyut
Eleman Boyutu	Element Size	10 mm
En büyük boy	Maximum Size	20 mm
Bozulma boyutu	Defeature Size	0,05 mm
En küçük eğrilik boyutu	Curvature Minimum Size	0,1 mm
Normal eğrilik açısı	Curvature Normal Angle	18°
Eğrilik	Skewness	0,7

Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de görüldüğü üzere çözüm ağ oluşturulurken akış ayrılmalarının olabileceği yerlerde mesh elemanı boyutları küçültülerek daha hassas bir analizin gerçekleşmesi hedeflenmiştir (Aktaş 2022). Gerekli ayarlamalar yapıldıktan sonra generate komutuyla mesh işlemi gerçekleştirilir. Toplam olarak 248 071 düğüm (nodes) ve 1 333 731 elemandan (elements) oluşturulmuştur.



Şekil 3.7 Basitleştirilmiş ağır ticari araç modeli için çözüm ağı.



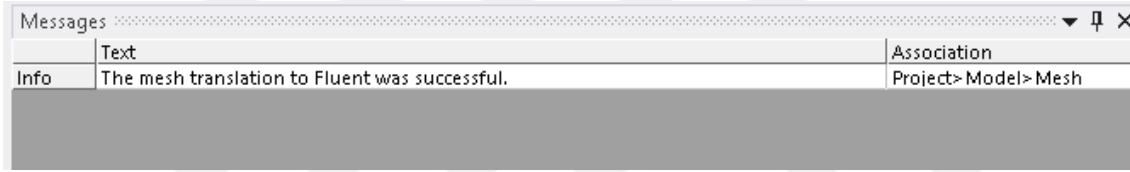
Şekil 3.8 Geleneksel ayna modeli için çözüm ağı.

Oluşturmanın ardından yeterli ağ kalitesinin elde edilip edilmediğini öğrenmek için eleman ağı kalitesi (mesh quality) bölümündeki “Mesh Metric” bölümü altındaki bazı değerlerin istenen aralıklarda olup olmadığı kontrol edilmelidir. Kaliteli bir ağ yapısı için bu bölümdeki diklik kalitesi (orthogonal quality) değerinin minimum 0,15 değerini altında olmaması, eğrilik(skewness) değerinin maksimum 0,9’dan küçük bir değer olması ve en-boy oranı (aspect ratio) değerinin ise maksimum 20’den az olması istenmektedir. Oluşturulan ağ yapısına ait ağ kalitesi değerleri Çizelge 3.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 Oluşturulan eleman ağı yapısına ait kalite değerleri.

	Orthogonal Quality (Diklik Kalitesi)	Skewness (Eğrilik)	Aspect Ratio (En-boy Oranı)
Minimum	0,22603	1,6477e-005	1,1591
Maksimum	0,99429	0,77397	5,9782
Ortalama	0,76766	0,23109	1,8465

Mesh işlemi sonucunda, oluşturulan ağ yapısının programda analiz edilemeyeceği onaylanmalıdır. Şekil 3.9’da oluşturulan ağ yapısının mesh modülündeki onay mesajı görünmektedir.

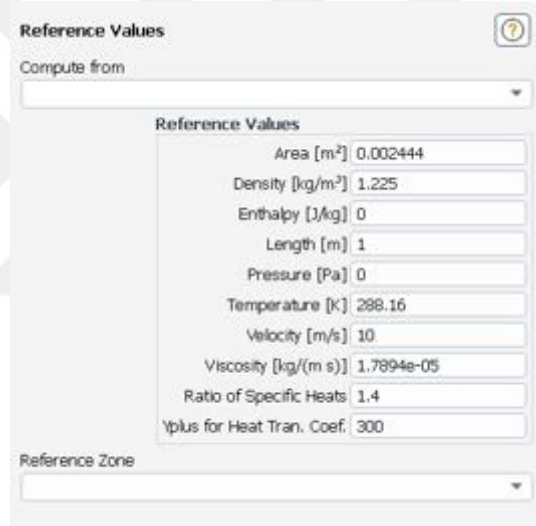


Şekil 3.9 Ağ oluşturma işlemleri sonucundaki onay mesajı.

3.3 Sayısal Çözümleme Özelliklerinin Belirlenmesi

Çözümlemeler Ansys Fluent, sürüm 22.1 HAD yazılımında, AMD Ryzen 5800x3D 3,4 GHz, 16 çekirdekli işlemci ve 32 GB 3200 MHz Ram donanımına sahip bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Fluent programı çözümleme yaparken sonlu hacimler metodunu esas kabul ederek enerji, momentum, türbülans ve süreklilik gibi parametrelerin integral denklemlerini kullanmaktadır. Oluşturulan ağ yapısı Fluent’e bağlandıktan sonra “Setup” bölümünden ağ yapısını kontrol etmek için “Check” yapılmıştır. Viskoz model olarak Standart k-ε türbülans modeli, duvar modeli için Menter-Lencher duvar modeli seçilmiştir. Materyaller bölümünde, akışkan olarak kullanacak olduğumuz havanın yoğunluğunu 1,225 kg/m³ olarak ayarlanmıştır. Daha öncesinde belirlenen sınır şartlarında giriş kısmı olarak seçilen Inlet bölümüne “Velocity Magnitude” kısmına

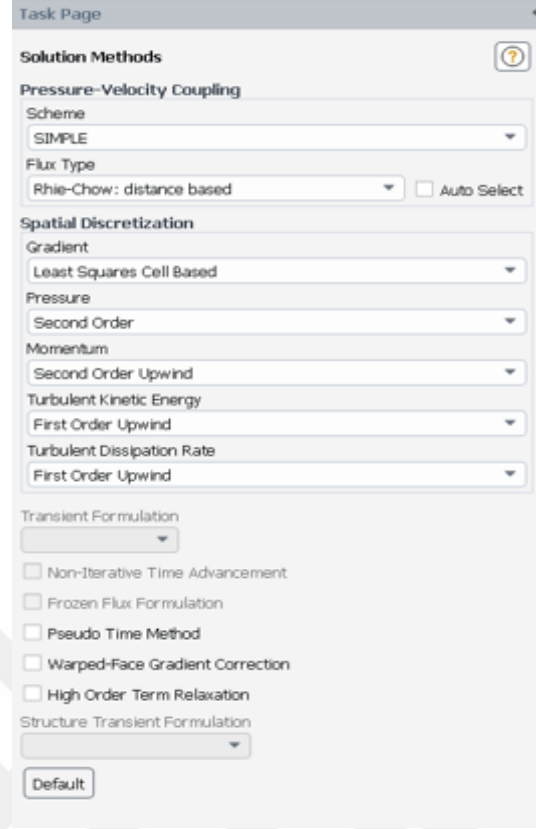
akışkan hızları girilmiştir. Akışkan hızları belirlenirken, bir ağır ticari aracın karayollarında çıkabileceği en yüksek yasal hız olan 90 km/h göz önünde bulundurularak 10 m/s (36 km/h), 15 m/s (54 km/h), 20 m/s (72 km/h) ve 90 km/h'a mukabil gelen 25 m/s değerleri girilmiştir. Fluent yazılımı HAD yaklaşımını kullanarak aerodinamik direnç kuvvetini denklem 2.3'de gösterildiği gibi hız, hava yoğunluğu ve taşıtın ön iz düşüm alanı gerekmektedir. Ön iz düşüm alanı değerini öğrenmek için “Results”, “Reports”, “Projected Area” adımlarını izleyerek, taşıtın konumlandırılıp hava girişinin olduğu x ekseninde “truck” seçilerek compute komutuyla alan hesaplanır. Bu çalışmadaki geleneksel yan aynalı modelin ön iz düşüm alanı 0,002444 m²'dir. Şekil 3.10'da geleneksel aynalı modelin referans değerleri gösterilmiştir.



Reference Values	
Area [m ²]	0.002444
Density [kg/m ³]	1.225
Enthalpy [J/kg]	0
Length [m]	1
Pressure [Pa]	0
Temperature [K]	288.16
Velocity [m/s]	10
Viscosity [kg/(m s)]	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4
Yplus for Heat Tran. Coef.	300

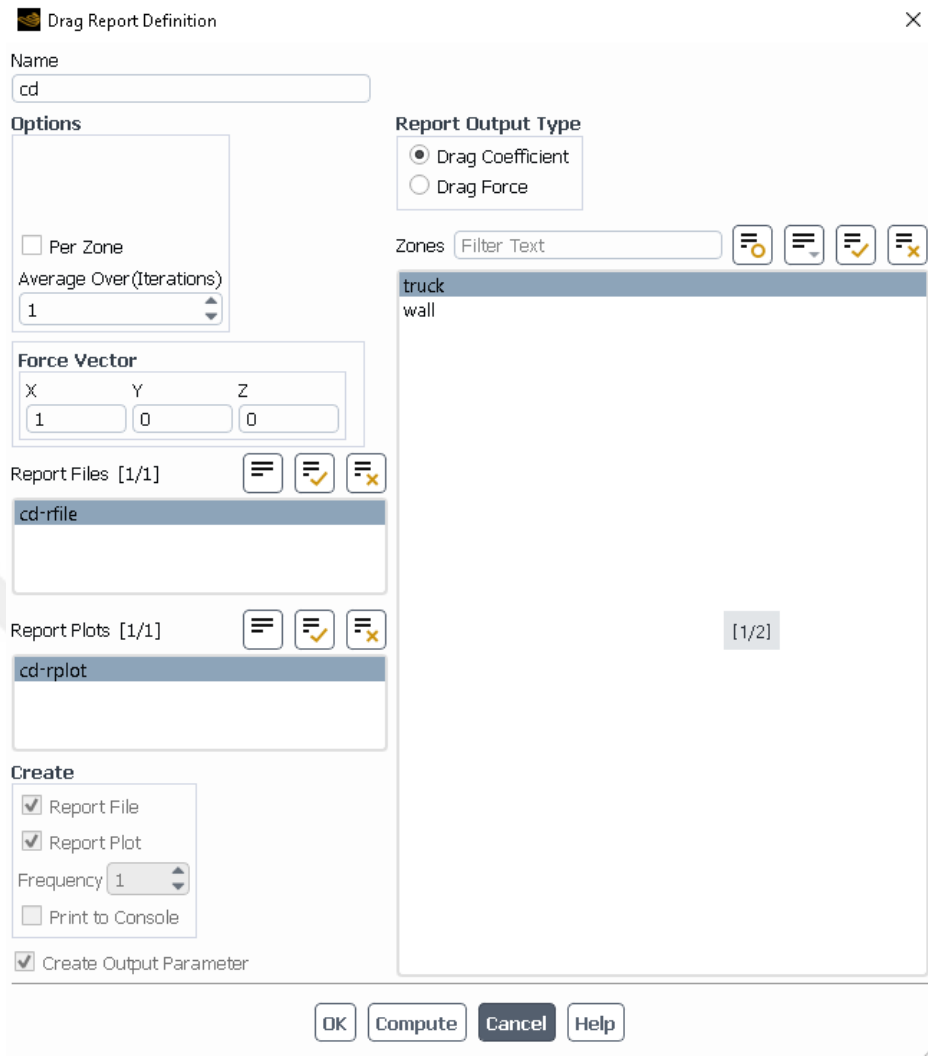
Şekil 3.10 Analizde kullanılacak geleneksel yan aynalı modelin referans değerleri.

Fluent programında “Solution Methods” bölümünde çözüm metodunu yani basınç-hız bağlantısı “Scheme” kısmında “Simple” seçilmiştir.



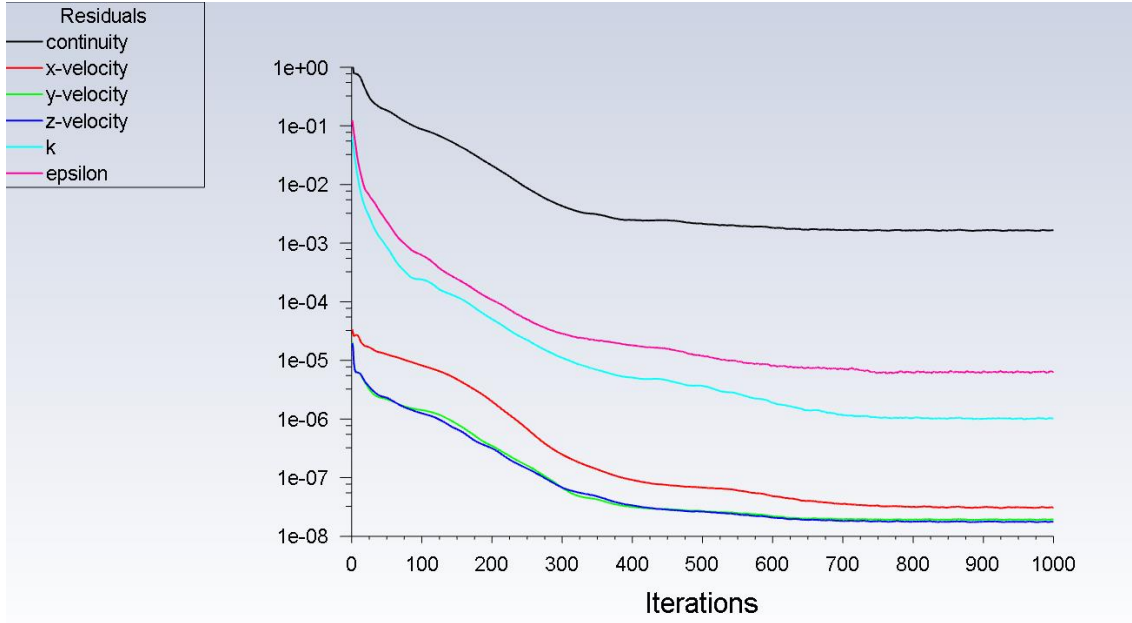
Şekil 3.11 Seçilen çözüm metodlarının gösterimi.

Aerodinamik direnç katsayısını grafik olarak görmek için “Report Definition” bölümüne girerek “New”, “Force Report”, “Drag” takip edilip yeni bir her iterasyonda gösterilen C_D grafiği elde edilmiştir. Grafik oluşturulurken havanın giriş yaptığı eksen olan x eksenini 1 değerinde, diğer eksenlerin ise 0 değerlerinde olması gerekmektedir ve sadece model “Truck” seçili olmalıdır.



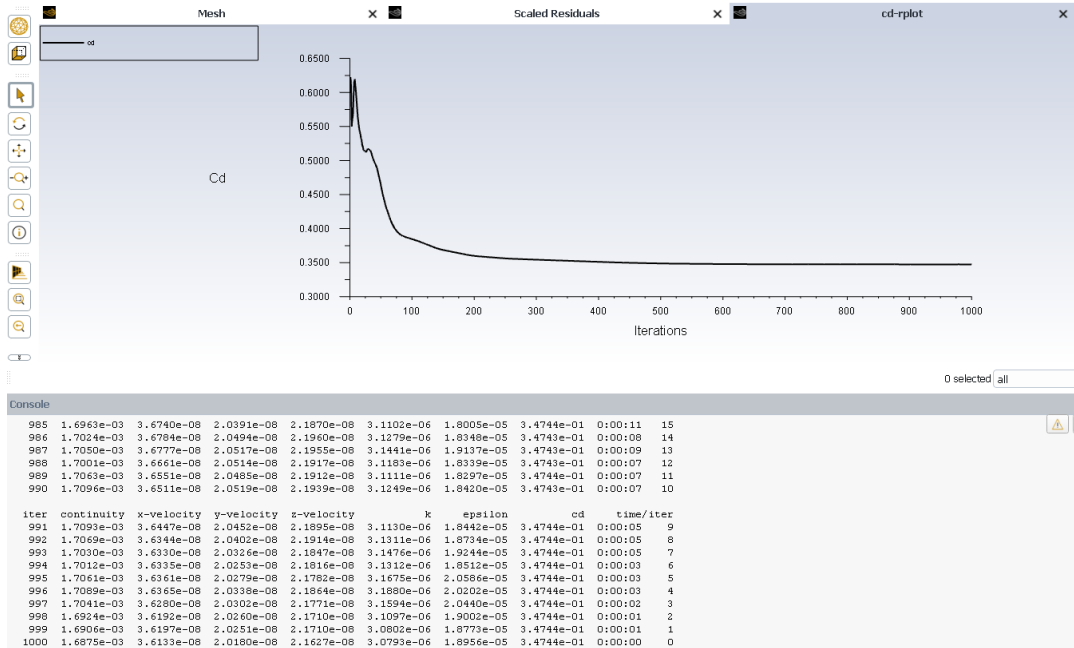
Şekil 3.12 Aerodinamik direnç katsayısının iterasyona bağlı olarak gösterilmesi için yapılan ayarlamalar.

Son olarak çözüm başlatma metodunu “Hybrid Initialization” seçip, her bir çözüm için 1000 iterasyonda hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan çözümlerin doğruluğu için “Residuals” değerlerinin çok küçük değerlerde yakınsaması ve oluşturulan C_D değeri grafiğininse aynı şekilde belli tekrarlamadan sonra yakınsaması gerekmektedir.



Şekil 3.13 1000 iterasyonda yakınsama.

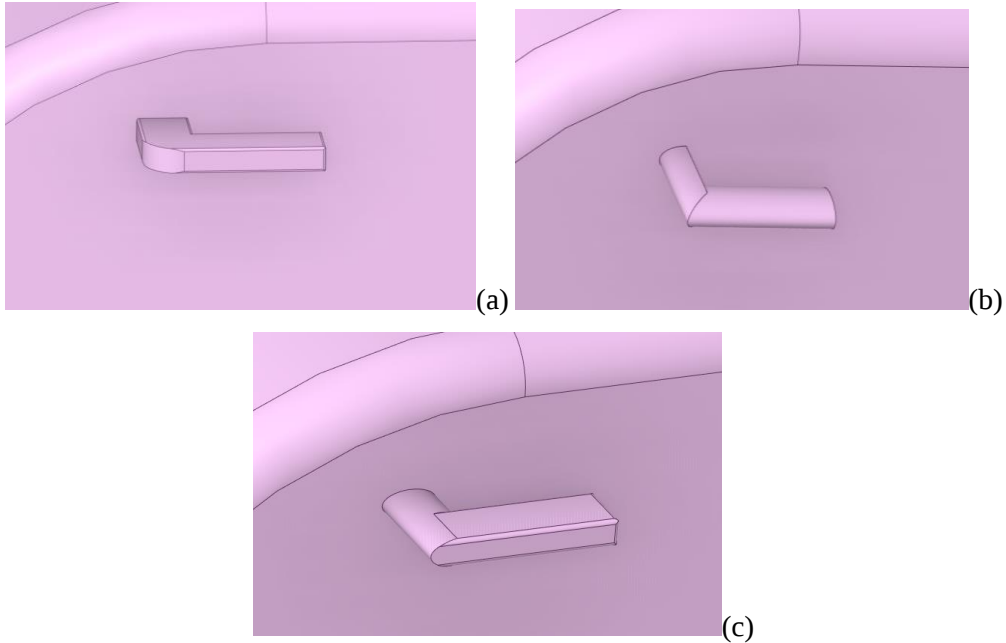
Bu analizlerde, 10, 15, 20 ve 25 m/s hız değerlerinde yapılmıştır ve aerodinamik direnç katsayısı hesaplanmıştır. Farklı ayna modellerinin karşılaştırılmasında 20 m/s hız değerindeki sonuçlar esas alınarak mukayese edilmiştir.



Şekil 3.14 1000 iterasyonda modelin C_D grafiği ve yakınsama.

4. BULGULAR

Ağır ticari bir aracın basitleştirilmiş modelinde geleneksel yan ayna modeli için yapılan nümerik analiz ile birlikte üç farklı yan ayna modelleri için CFD analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonradan tasarlanan üç ayna modeli de aynı iz düşüm alanına sahiptir. Ansys programının altındaki SpaceClaim uygulamasında tasarlanan aynalarda aynı sabit hız değerleri ile analiz yapılmıştır. Aynaların dış yüzey formlarının yapısı ile C_D arasındaki ilişki araştırılmak istenmiştir ve damla formuna benzetilmeye çalışılmıştır. Bu yüzden model 1’de kamera ayna bağlantı koluna dikdörtgen şekli, model 2’de kamera ayna bağlantı koluna yarım elips şekli, model 3’de ki bağlantı koluna ise tam elips şekli verilmiştir ve bu tasarımların aerodinamik yapıya etkileri gözlemlenmiştir. Analizlerin sonucunda aerodinamik direnç katsayısı, toplam hava direnci kuvveti, ayna ve taşıt yüzeylerindeki basınç dağılımını gösteren şekiller ve ayna ile model yüzeylerindeki akış ayrımlarını gösteren şekiller elde edilmiştir. Tüm aynaların aerodinamik yapıları birbirleriyle karşılaştırılmış ve en avantajlı olan ayna modelini belirlemek istenmiştir.



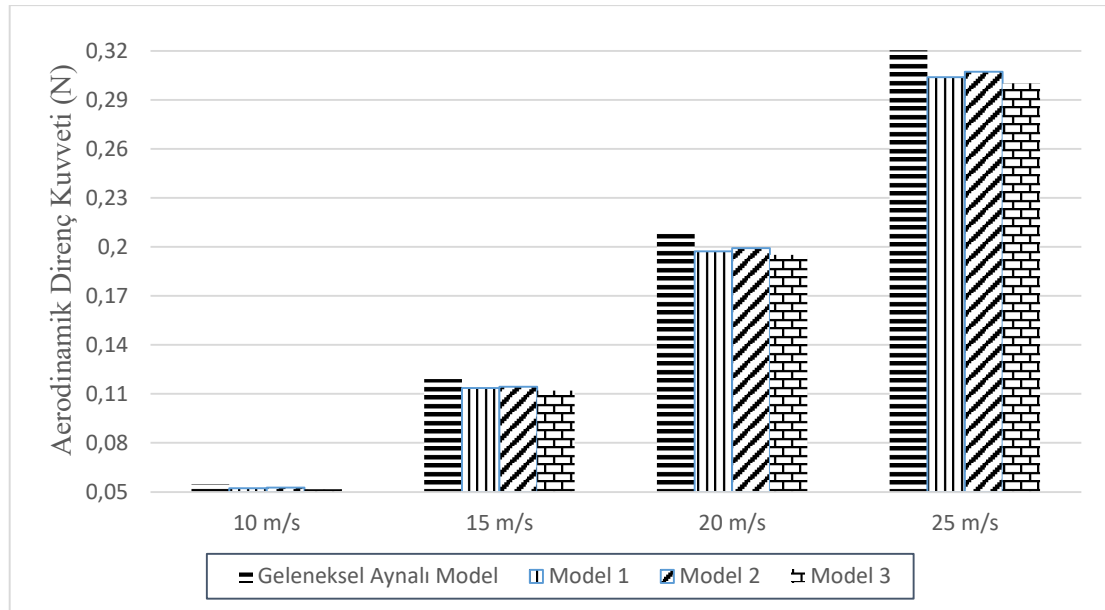
Şekil 4.1 Farklı bağlantı kollarına sahip kamera ayna modelleri, (a) Dikdörtgen bağlantı koluna sahip model 1, (b) Yarım elips bağlantı koluna sahip model 2, (c) Tam elips bağlantı koluna sahip model 3.

Yapılan analizlerde ayna modellerinin 10 m/s, 15 m/s, 20 m/s ve 25 m/s hızlarda aerodinamik direnç katsayı değerleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 1 Farklı hız değerlerinde aerodinamik direnç katsayıları.

Ayna Modeli	10 m/s hızda C_D değeri	15 m/s hızda C_D değeri	20 m/s hızda C_D değeri	25 m/s hızda C_D değeri
Geleneksel	0,36605	0,35329	0,34743	0,34233
Aynalı Model				
Model 1	0,34859	0,33700	0,32947	0,32481
Model 2	0,35113	0,33941	0,33268	0,32824
Model 3	0,34514	0,33265	0,32573	0,32078

Aerodinamik direnç katsayısı, ayna modellerini şekline bağlı olarak değişmesine rağmen, farklı hızlarda hız arttıkça da aerodinamik direnç katsayısında bir değişim olduğu gözlemlenmektedir. Aerodinamik direnç kuvvetinin farklı hız değerlerindeki değişimi Şekil 4.2’de gösterilmektedir.

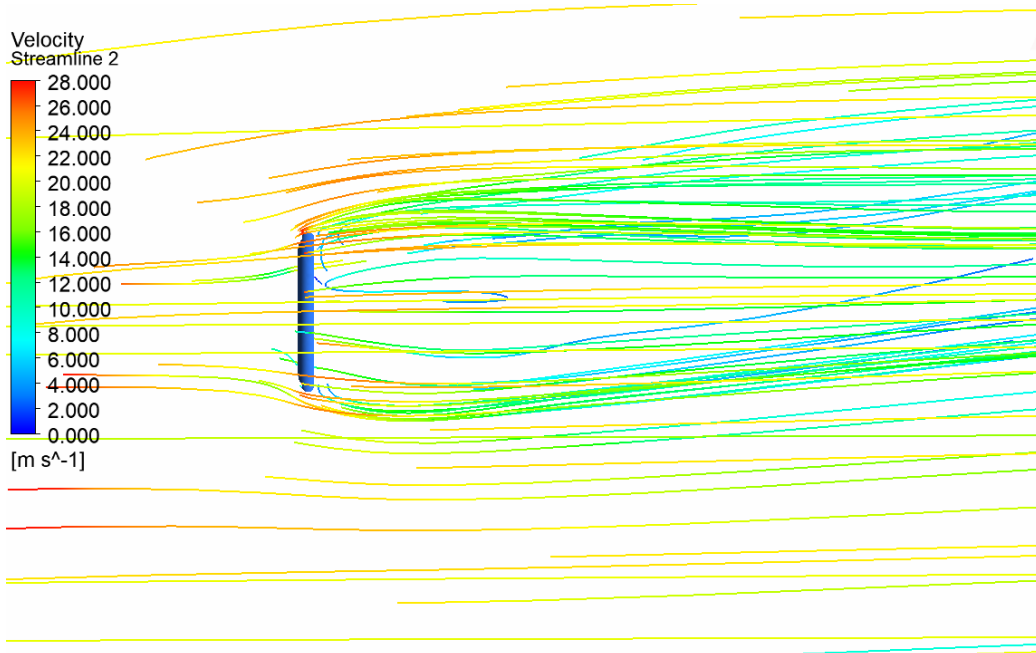


Şekil 4.2 Farklı hızlarda aerodinamik sürükleme kuvvetinin değişimi.

Geleneksel yan aynalı model için 15 m/s hızda aerodinamik direnç kuvveti 0,11899 N, 20 m/s hızda 0,20803 N, 25 m/s hızda ise 0,32028 N değerindedir. Tam elips formundaki kameralı aynalı model olan model 2’de aerodinamik sürüklenme kuvveti 15 m/s hızda 0,11204 N, 20 m/s hızda 0,19504 N, 25 m/s hızda 0,30012 N olarak bulunmuştur. Hız arttıkça aerodinamik sürüklenme kuvvetinin artmasının nedeni aerodinamik direnç kuvvetinin hızın karesi ile doğru orantılı olmasıdır. Aerodinamik direnç katsayısı ile ters orantılı olduğu için hız arttıkça C_D azalmaktadır.

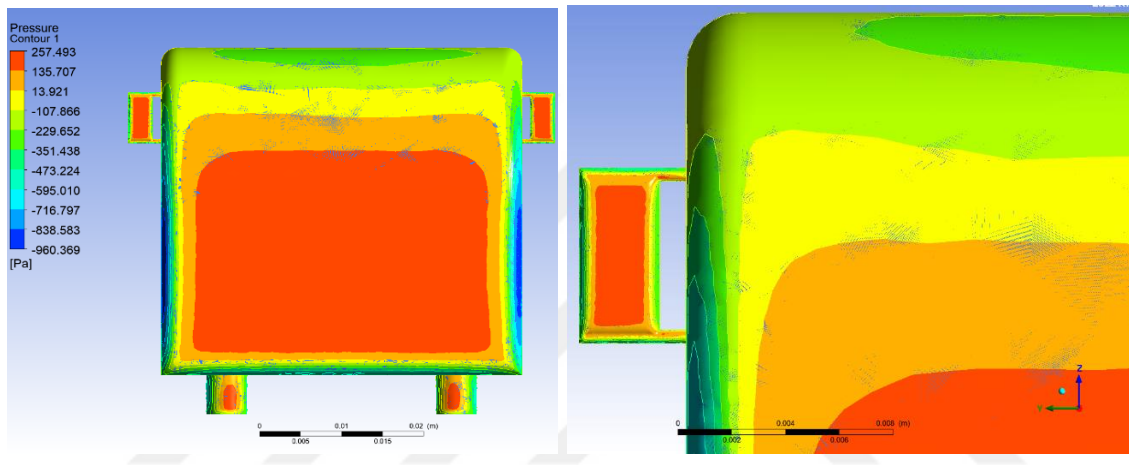
4.1 Geleneksel Aynalı Model için Çözümleme Sonuçları

Geleneksel aynalı model için 20 m/s hızda yapılan analizde model üzerine etki eden aerodinamik direnç kuvveti ve direnç katsayısı sırasıyla 0,20803 N ve 0,34743 olarak bulunmuştur. Toplam aerodinamik direnç katsayısının %80,4’ü basınç kaynaklı, %19,6’sı sürtünme kaynaklıdır.



Şekil 4.3 20 m/s hızda geleneksel aynaya ait akım çizgileri (streamline).

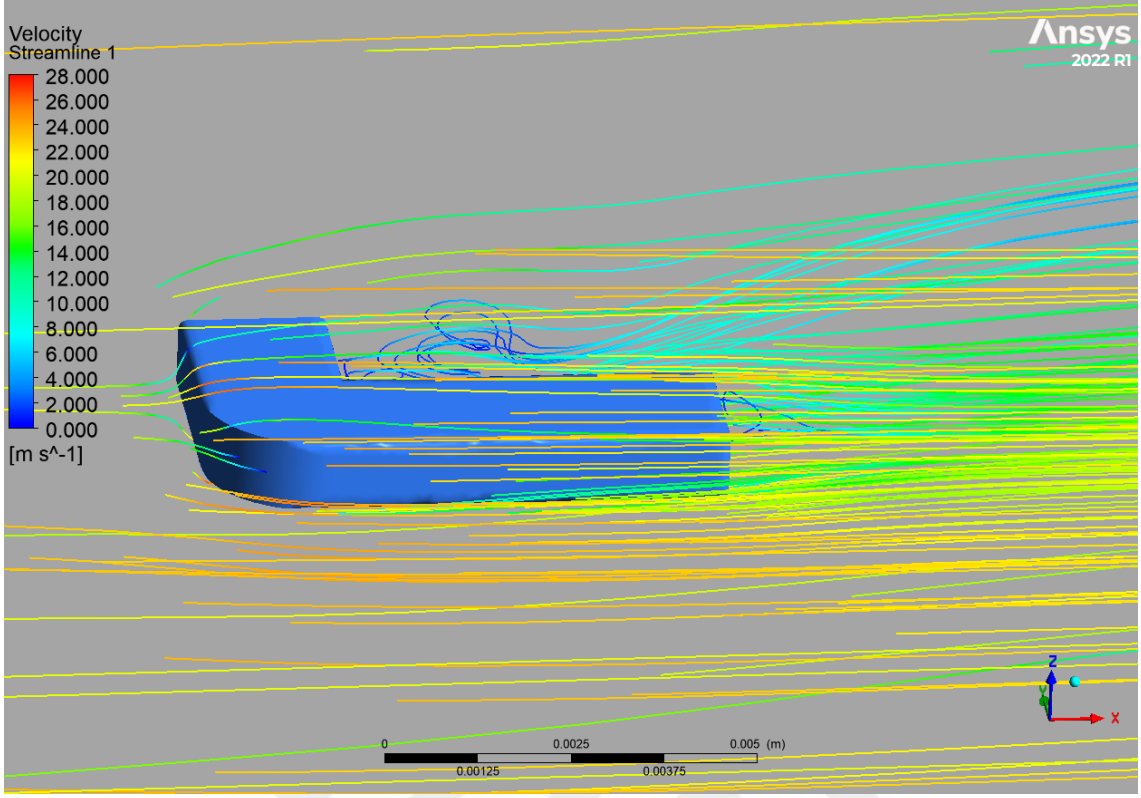
Şekil 4.3’de akış hızı akım çizgisi olarak gösterilmiştir. Burada gösterildiği üzere aynanın ön yüzey alanının geniş ve büyük olması ile arka yüzeyinde akış hızı ciddi şekilde düşmektedir ve negatif basınç bölgesi oluşmaktadır. Aynanın arkasında oluşan negatif basınç bölgesi aerodinamik direnç kuvvetini ciddi şekilde arttırmaktadır. Şekil 4.4’de geleneksel ayna üzerindeki basınç dağılımı verilmiştir. Aynanın ön yüzeyinde akışın dik olarak geldiği noktalarda basıncın en yüksek seviyelere çıktığı, daha kavisli yerlerde ise nispeten basıncın düştüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4 20 m/s hızda geleneksel ayna üzerindeki basınç.

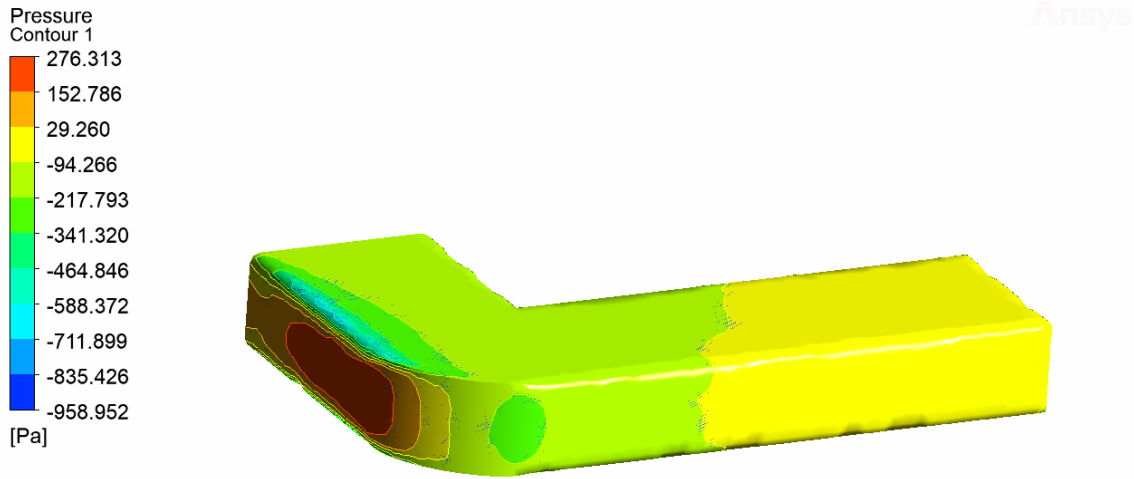
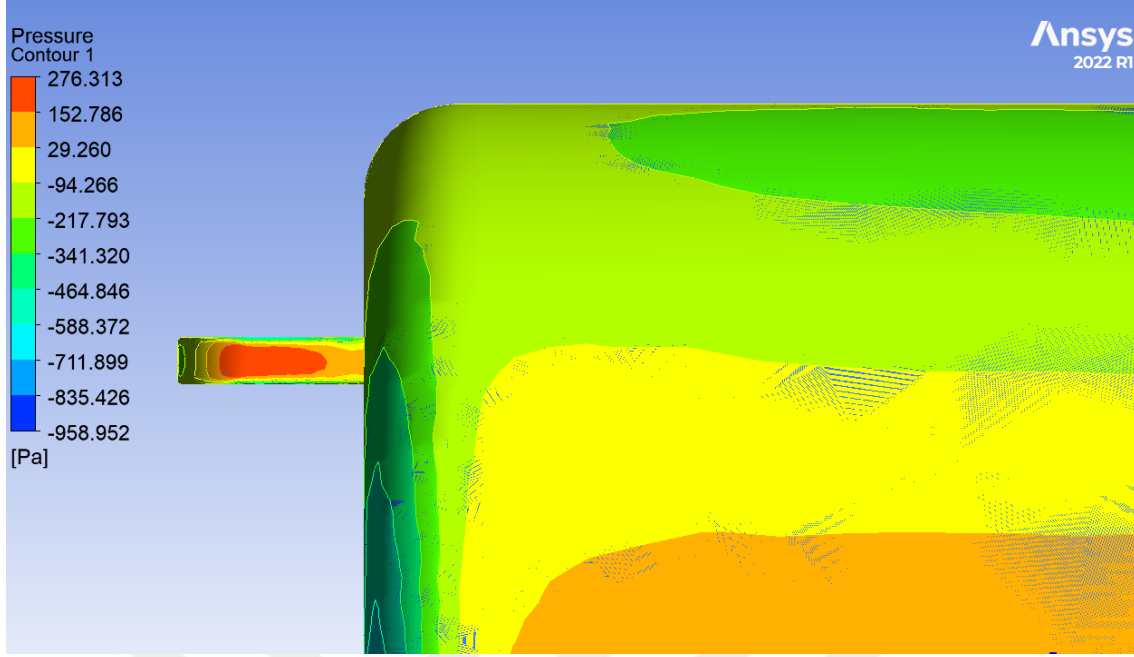
4.2 Model 1 için Çözümleme Sonuçları

Model 1 için 20 m/s hızda yapılan analizde model üzerine etki eden aerodinamik direnç kuvveti ve direnç katsayısı sırasıyla 0,19728 N ve 0,32947 olarak bulunmuştur. Toplam aerodinamik direnç katsayısının %78,85’i basınç kaynaklı, %21,15’i sürtünme kaynaklıdır.



Şekil 4.5 20 m/s hızda model 1'e ait akım çizgileri.

Şekil 4.5'te görüldüğü üzere model 1'de rüzgâr akış hızının ön taraftan arkaya doğru ilerledikçe azaldığı ve arkasında yine bir negatif basınç bölgesi oluştuğu görülmüştür. Şekil 4.6'da ise basıncın model 1'in ön yüzeyindeki düz yapıda maksimum seviyede olduğu ve kavisli kenarlarda çok daha düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 4.6 20 m/s hızda model 1 üzerindeki basınç.

4.3 Pasif Akış Kontrol Yöntemi ile Aerodinamik İyileştirme

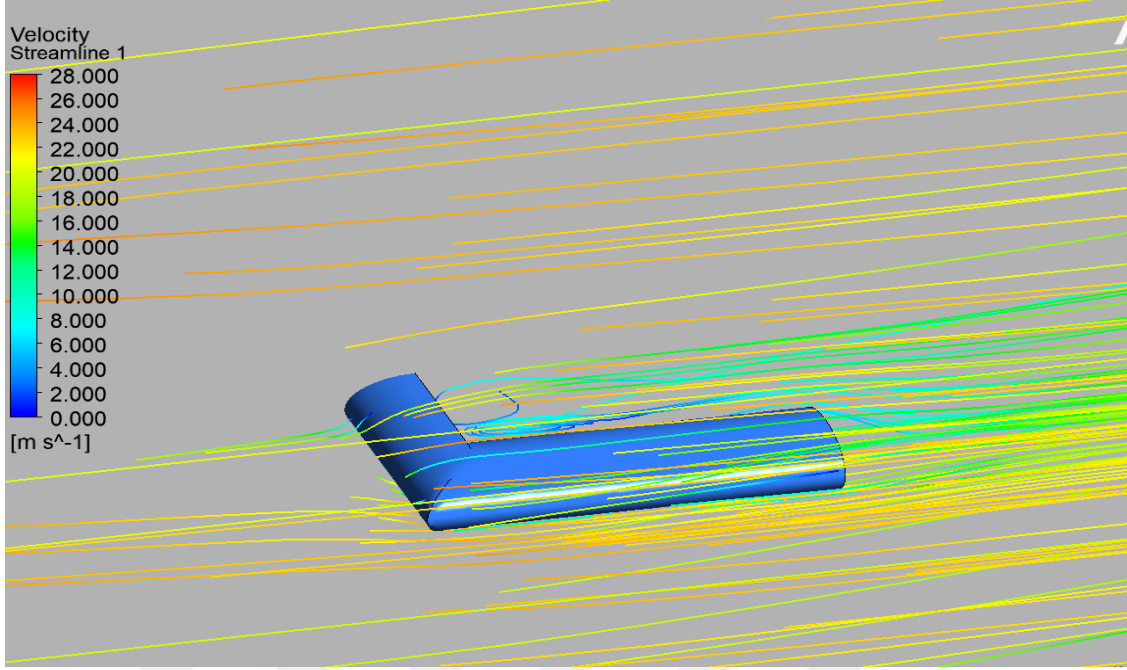
4.3.1 Pasif Akış Kontrolü

Akış kontrol yöntemleri enerji harcanıp harcanmamasına bağlı olarak ikiye ayrılmaktadır. Akışı kontrol etmek için enerji harcanıyorsa aktif akış kontrolü, hiçbir enerji harcanmadan sadece geometrik iyileştirme yapılıyorsa pasif akış kontrolü olarak

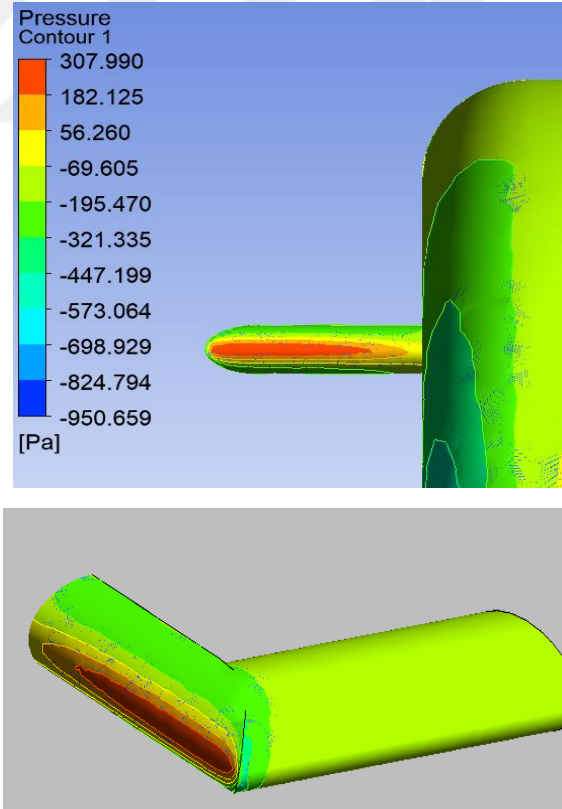
adlandırılır. Bu çalışmada aerodinamik iyileştirme yapmak amacıyla model 1’de geometrik iyileştirmeler yaparak bu iyileştirmelerin aerodinamik yapıya etkileri incelenmiştir. Aerodinamik iyileştirme elde etmek amacıyla model 1’in ön yüzeyinde en yüksek seviyede olan basınç dağılımı ve ayna arkasında oluşan negatif basınç bölgesi dikkate alınmıştır. Model 1’in dikdörtgen bağlantı kolunu aerodinamik yapıya daha uygun olan damla formuna benzetmek amacıyla bağlantı kolu yarıçapı aynı kalacak şekilde yarım elips ve tam elips şekilleriyle modellemeler yapılmıştır. Elips şeklinin kavisli ön yapısından yararlanılarak daha düzgün bir akış ve düşük basınç oluşumu elde edilmesi amaçlanmaktadır. Model 2 yarım elips bağlantı koluna sahip kamera aynalı modeldir. Model 3 ise tam elips bağlantı koluna sahip kamera aynalı modeldir.

4.3.2 Model 2 için Çözümleme Sonuçları

Önceki çözümlemeler incelendiğinde aynanın ön yüzeyinde basıncın yüksek ve büyük bir alanda olduğu görülmüştür. Bu nedenle model 1’in ön yüzeyine elips şekli verilmiştir. Bu işlemle aerodinamik iyileştirme amaçlanmıştır. Yarım elips şeklinde bağlantı koluna sahip olan model 2 için 20 m/s hızda yapılan analizde model üzerine etki eden aerodinamik direnç kuvveti ve direnç katsayısı sırasıyla 0,19920 N ve 0,33268 olarak bulunmuştur. Toplam aerodinamik direnç katsayısının %79,06’sı basınç kaynaklı, %20,94’ü sürtünme kaynaklıdır. Aynanın ön yüzey alanına elips şekli verilerek akış çizgilerinin daha düzgün şekilde ilerlediği ancak arka tarafındaki kesik yapının yine negatif basınç bölgesine sebep olduğu görülmektedir. Basınç dağılımını iyi incelendiğinde basıncın, aynanın ön kısmında havanın etkisiyle en yüksek değere ulaştığı ancak aynanın şeklinden dolayı bu maksimum basınç bölgesinin çok büyük olmadığı gözlemlenmiştir.



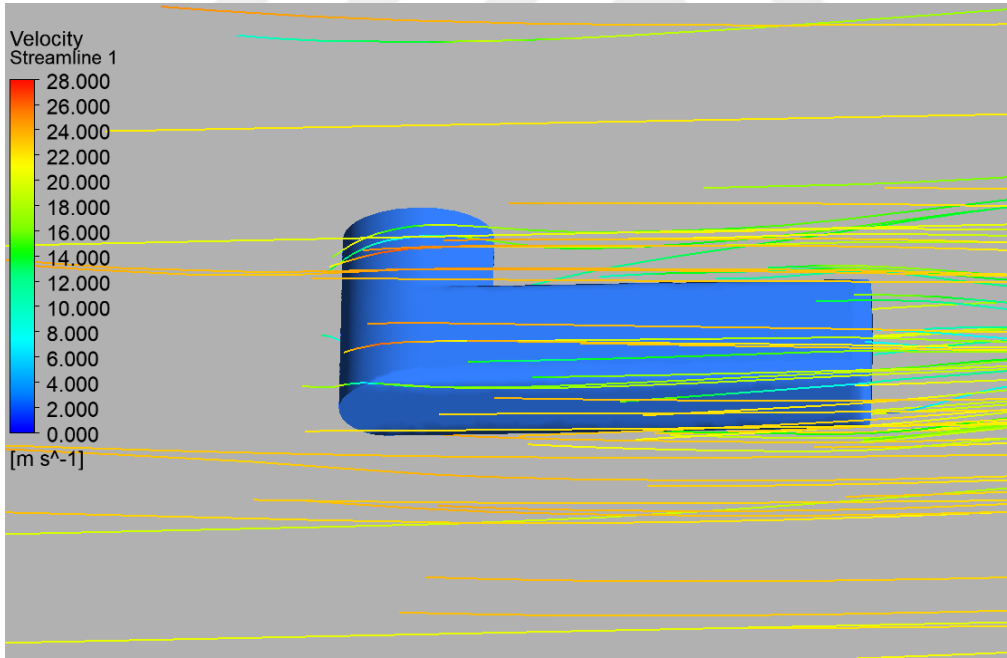
Şekil 4.7 20 m/s hızda model 2'ye ait akım çizgileri.



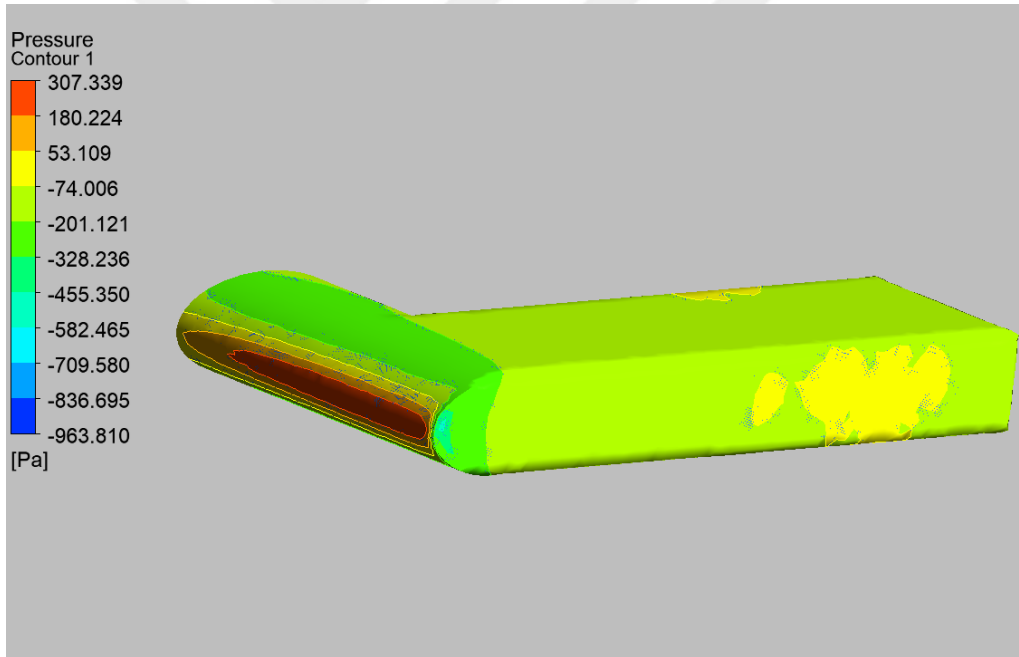
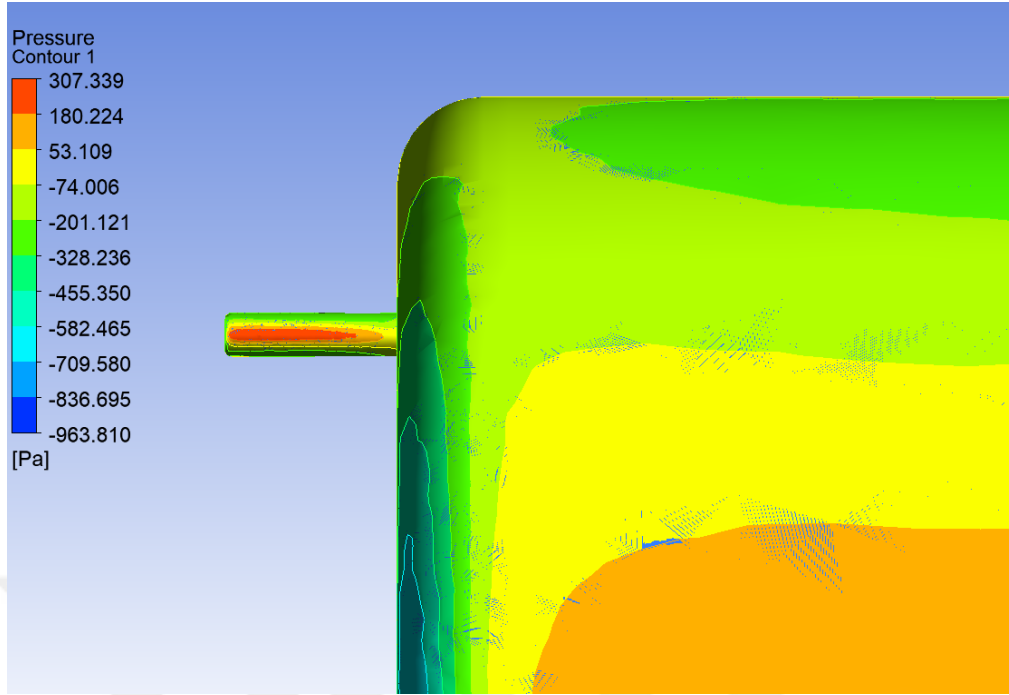
Şekil 4.8 20 m/s hızda model 2 üzerindeki basınç.

4.3.3 Model 3 için Çözümleme Sonuçları

Model 2 incelendiğinde, modelin ön yüzeyinde basınç alanının azaldığı görülmektedir. Buna rağmen model 2'nin model 1'de olduğu gibi arkasında negatif basınç bölgesi oluşmuştur. Bunu gidermek için elips şeklinde bir bağlantı kolu tercih edilmiştir. Elips şeklinde bağlantı koluna sahip olan model 3 için 20 m/s hızda yapılan analizde model üzerine etki eden aerodinamik direnç kuvveti ve direnç katsayısı sırasıyla 0,19504 N ve 0,32573 olarak bulunmuştur. Toplam aerodinamik direnç katsayısının %78,66'sı basınç kaynaklı, %21,34'ü sürtünme kaynaklıdır. Basınç kaynaklı aerodinamik direnç katsayısının en düşük olduğu ayna modelidir. Akış çizgilerinin hareketi elips şeklinin damla formuna daha fazla benzemesinden dolayı daha düzgündür ve ayna arkasında bir negatif basınç bölgesi oluşmamıştır.



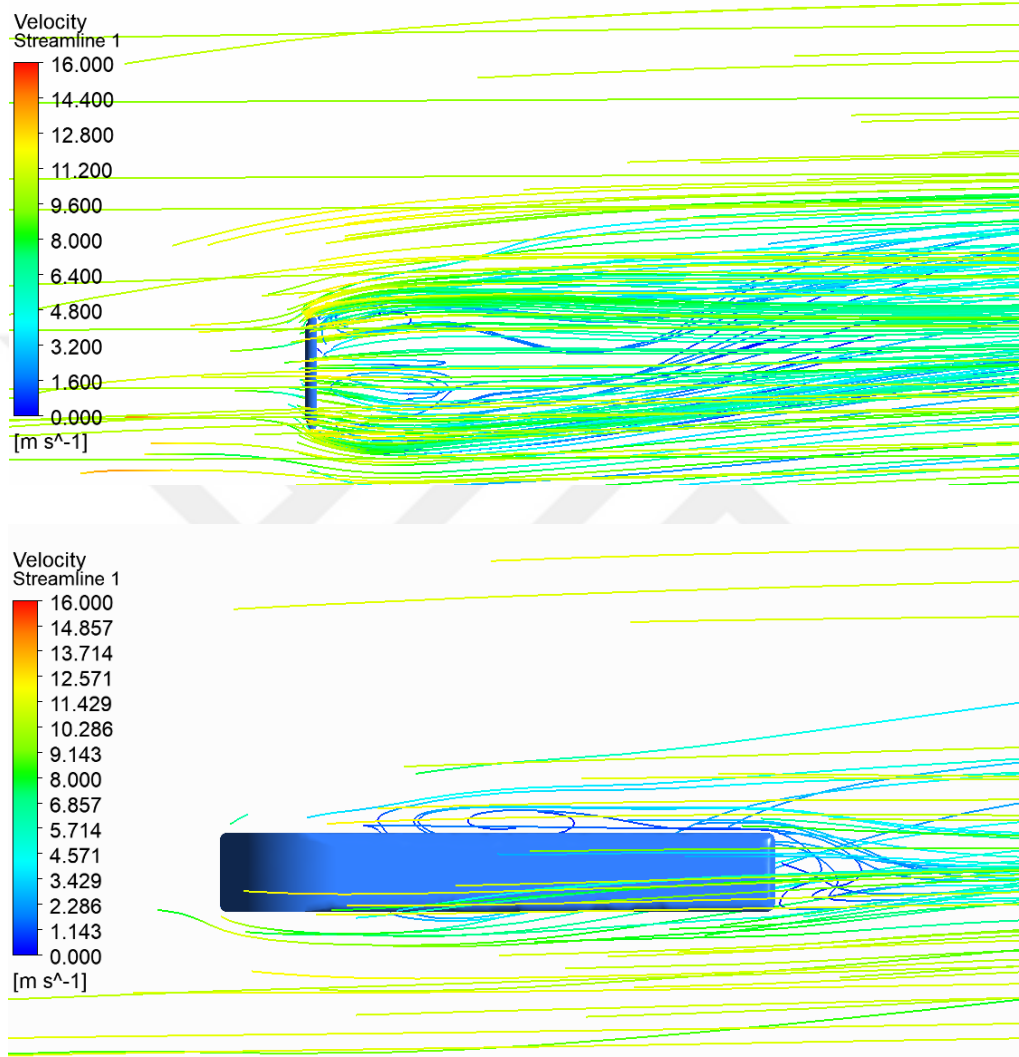
Şekil 4.9 20 m/s hızda model 3'e ait akım çizgileri.



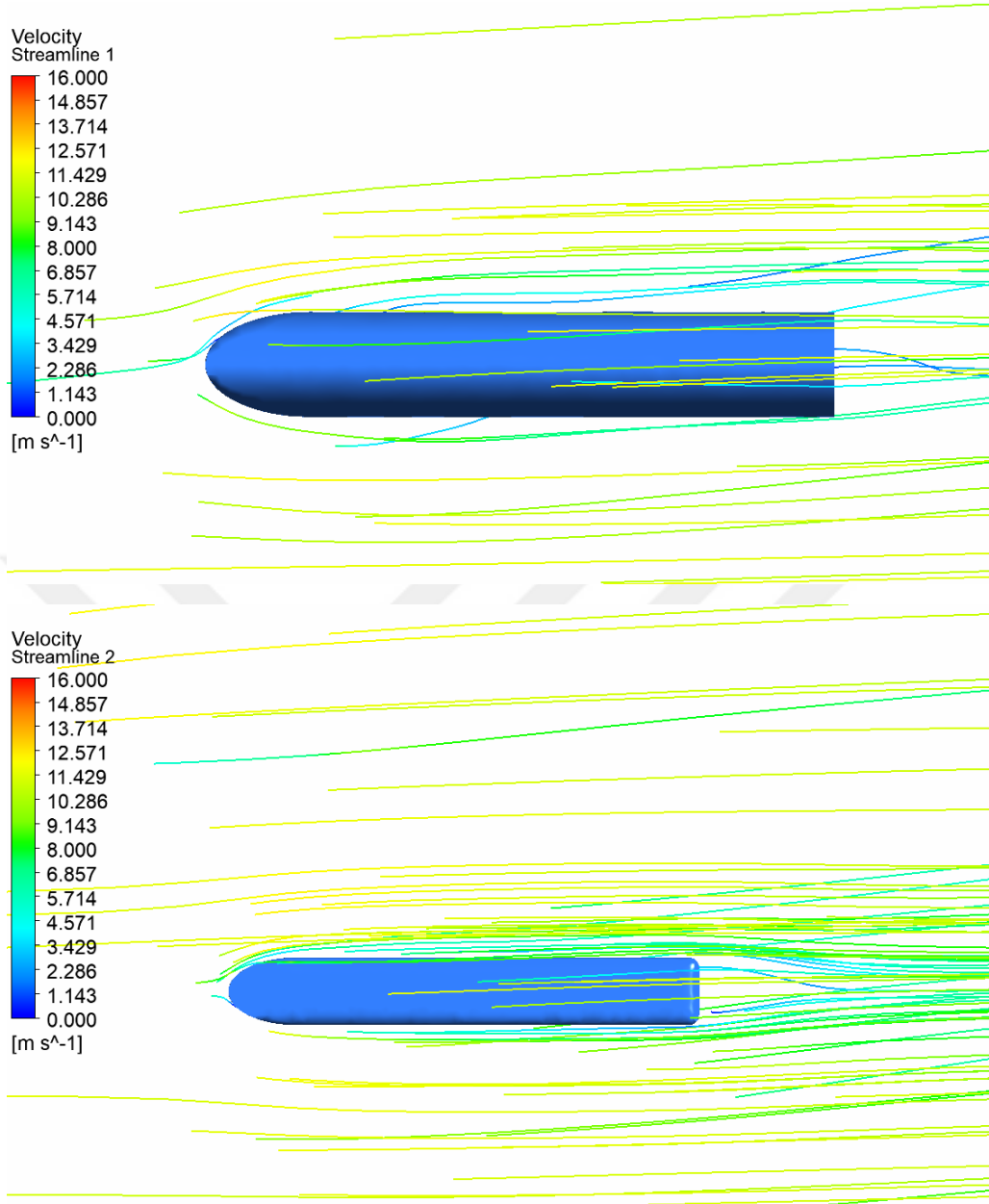
Şekil 4.10 20 m/s hızda model 3 üzerindeki basınç.

4.4 Ayna Modellerinin Farklı Hızlarda Akım çizgisi Olarak Gösterilişi

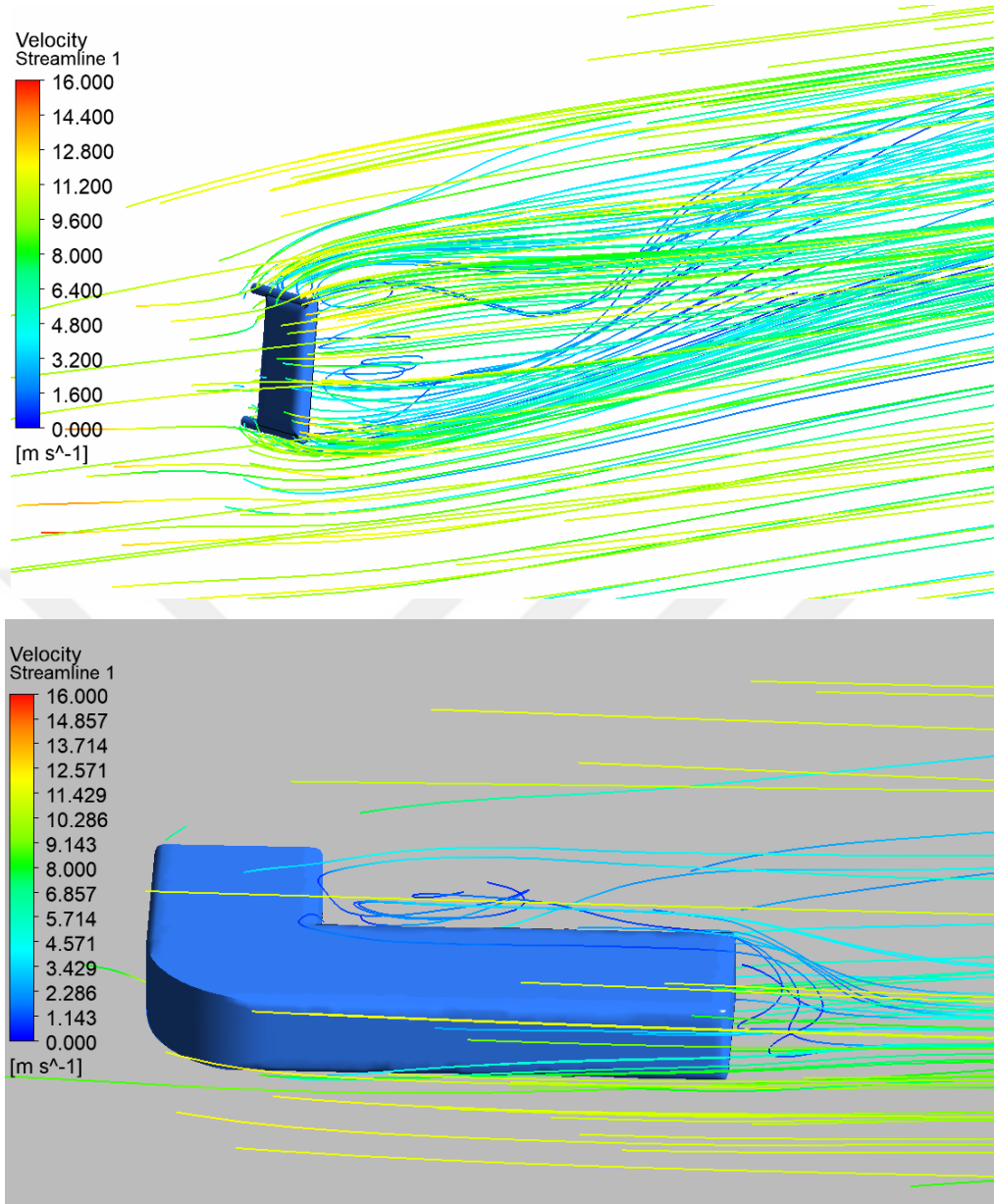
4.4.1 10 m/s Hızındaki Çözümleme Sonuçları



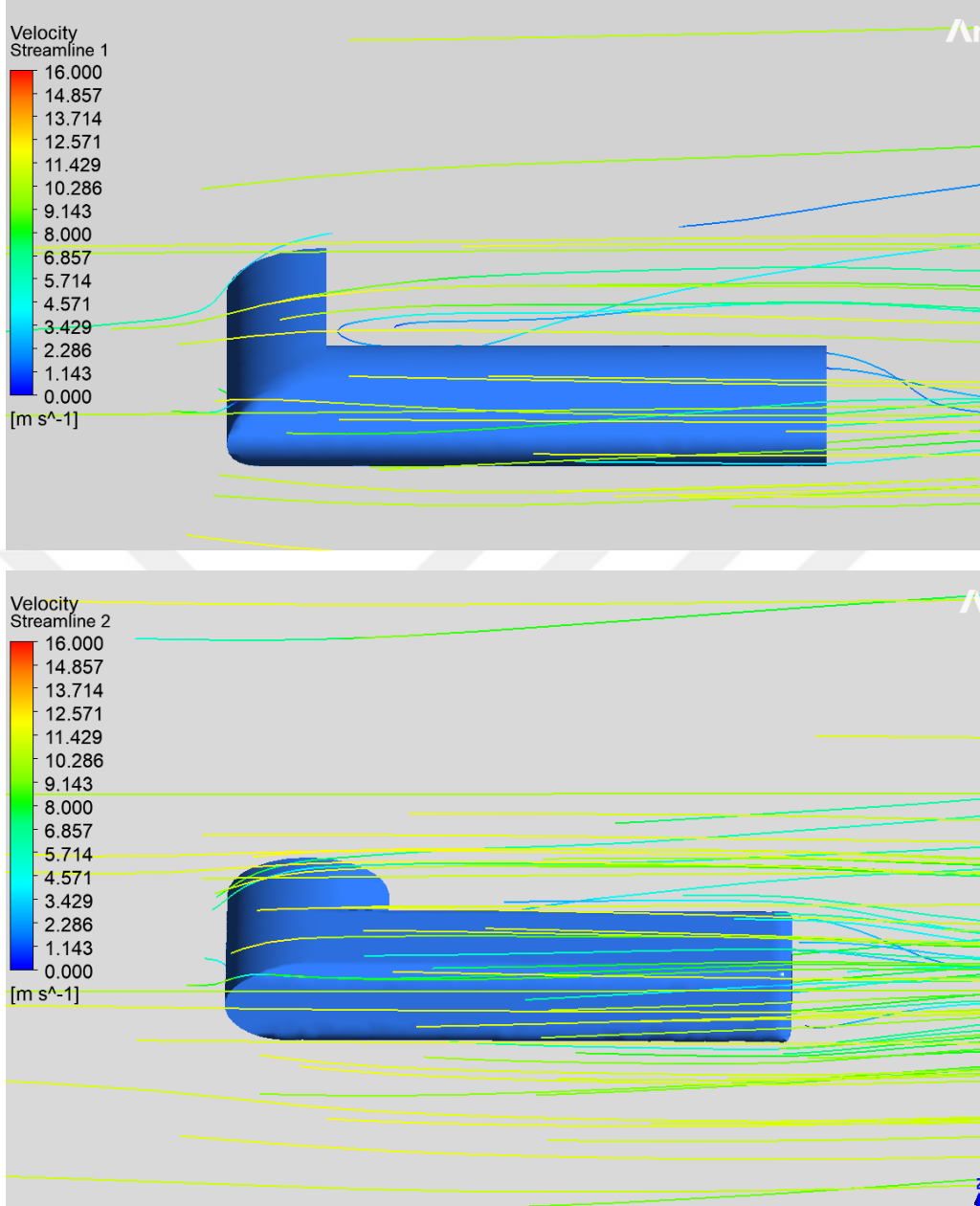
Şekil 4.11 10 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri geleneksel ayna ve model 1.



Şekil 4.12 10 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri model 2 ve model 3.

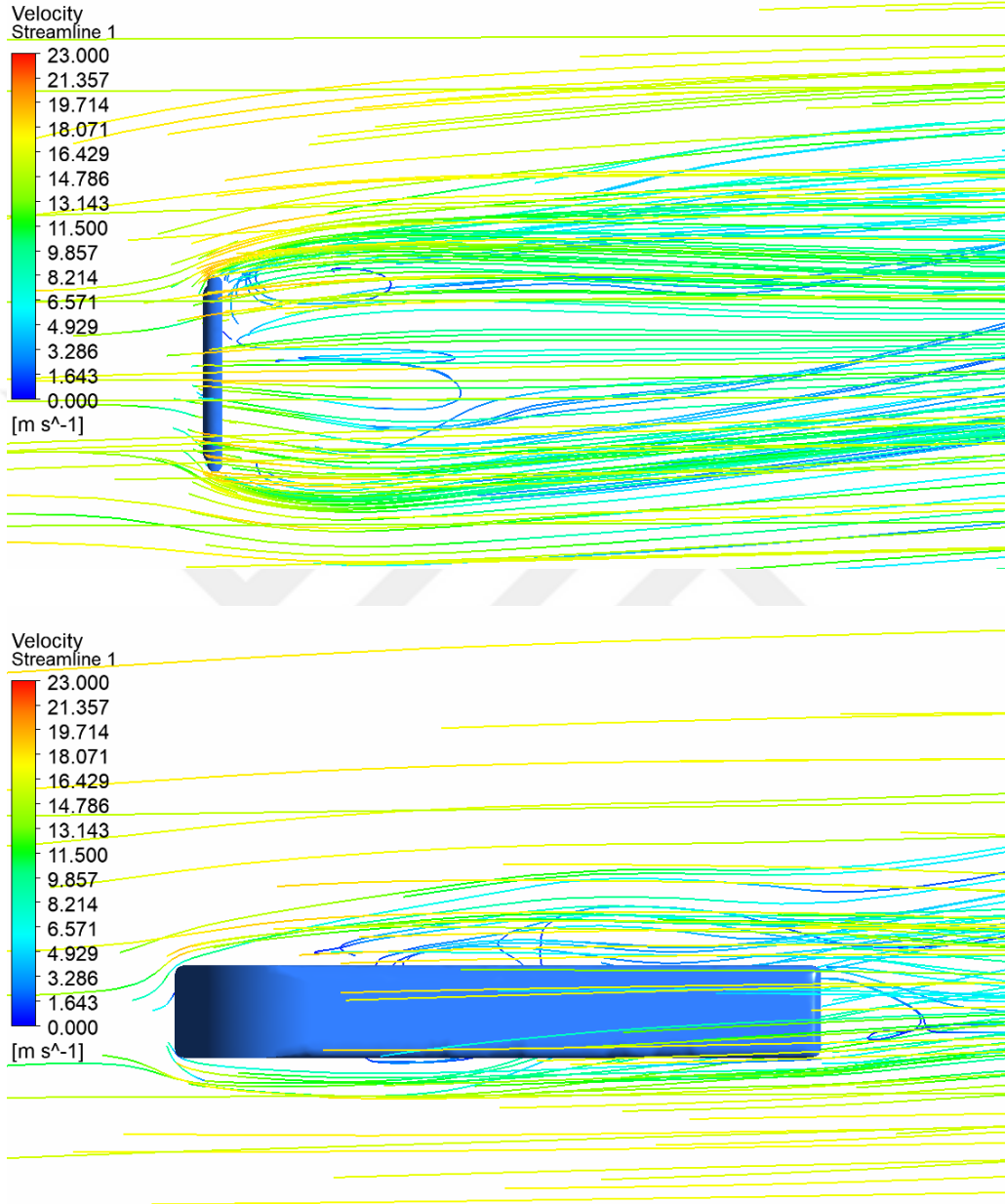


Şekil 4.13 10 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri geleneksel ayna ve model 1.

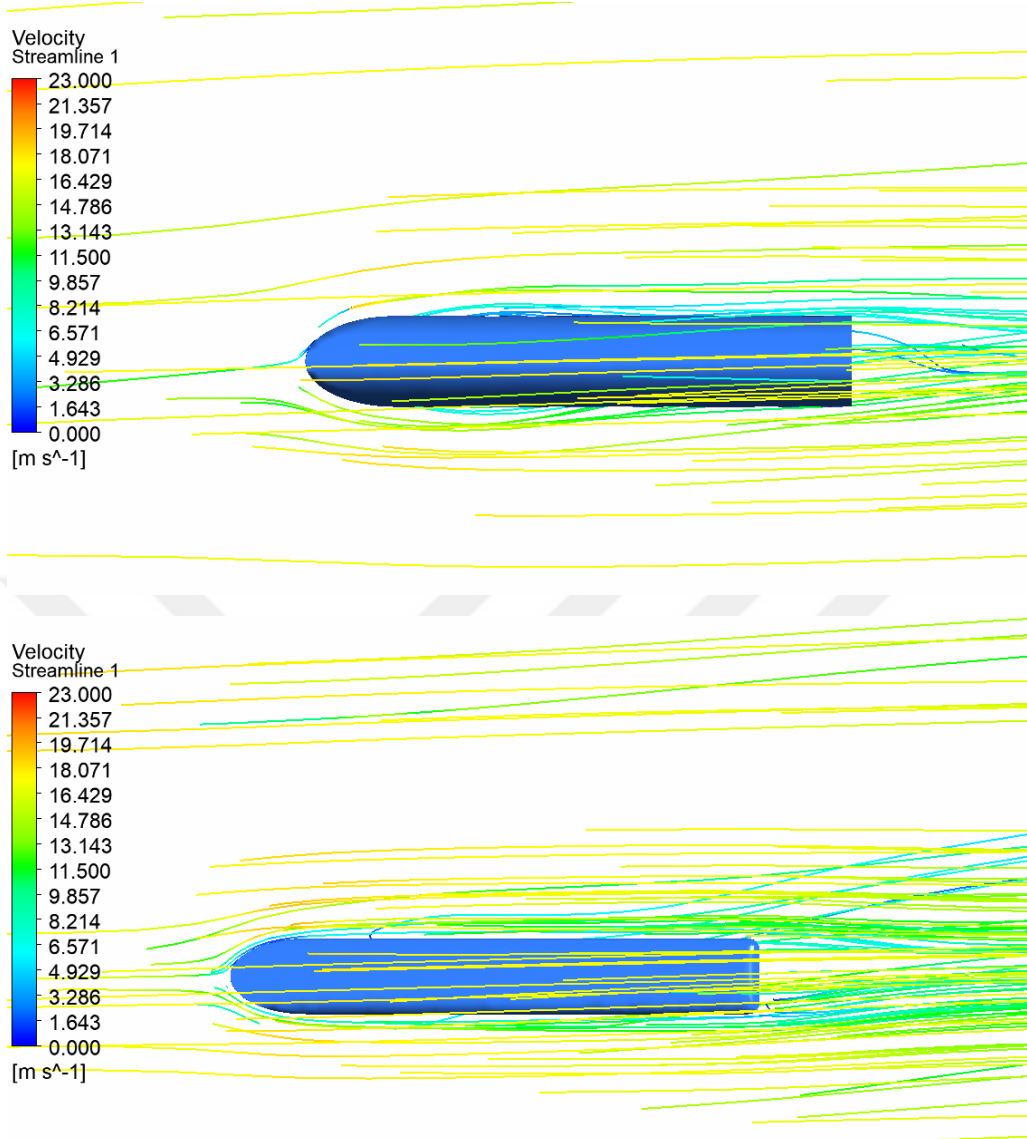


Şekil 4.14 10 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri model 2 ve model 3.

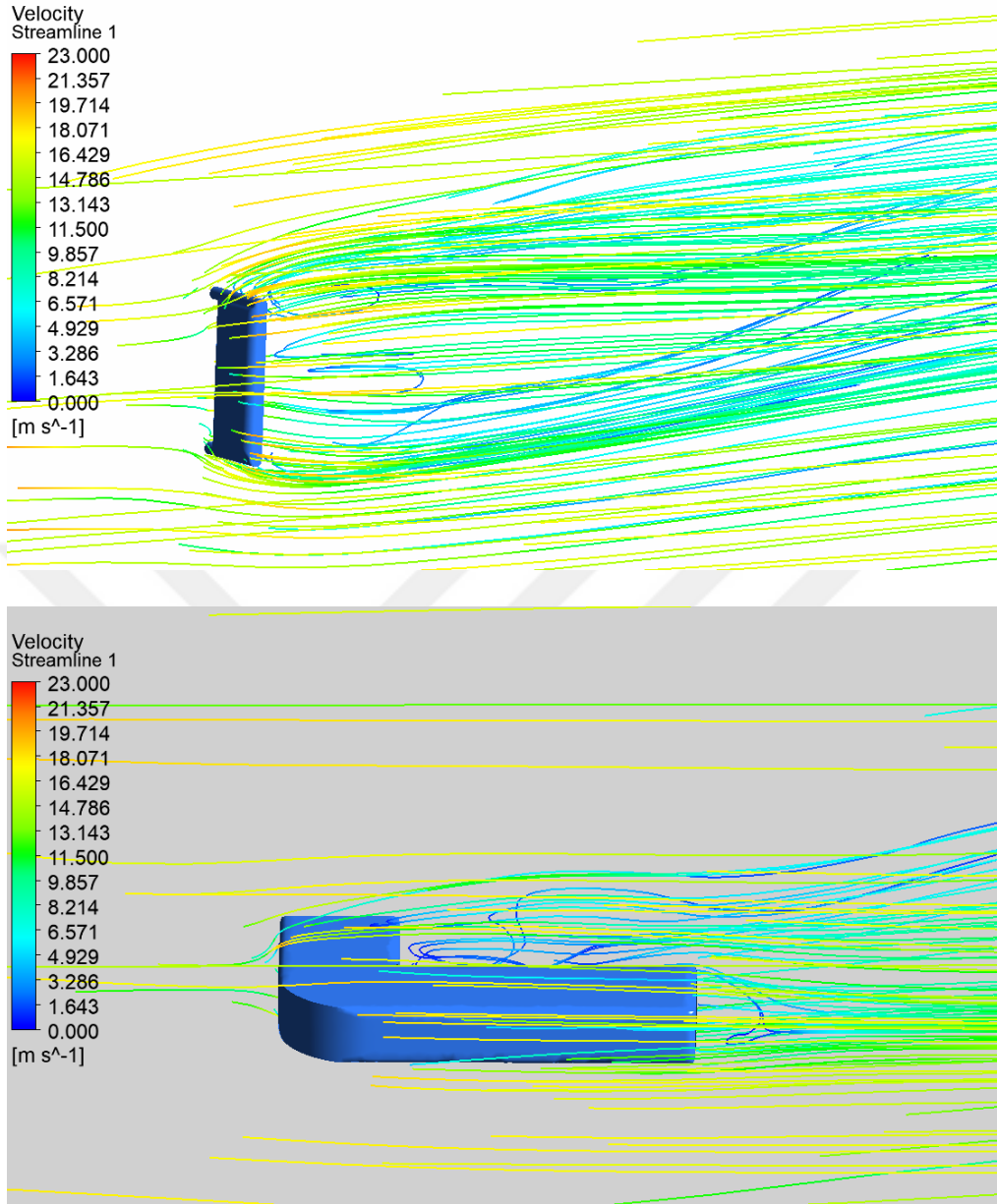
4.4.2 15 m/s Hızındaki Çözümleme Sonuçları



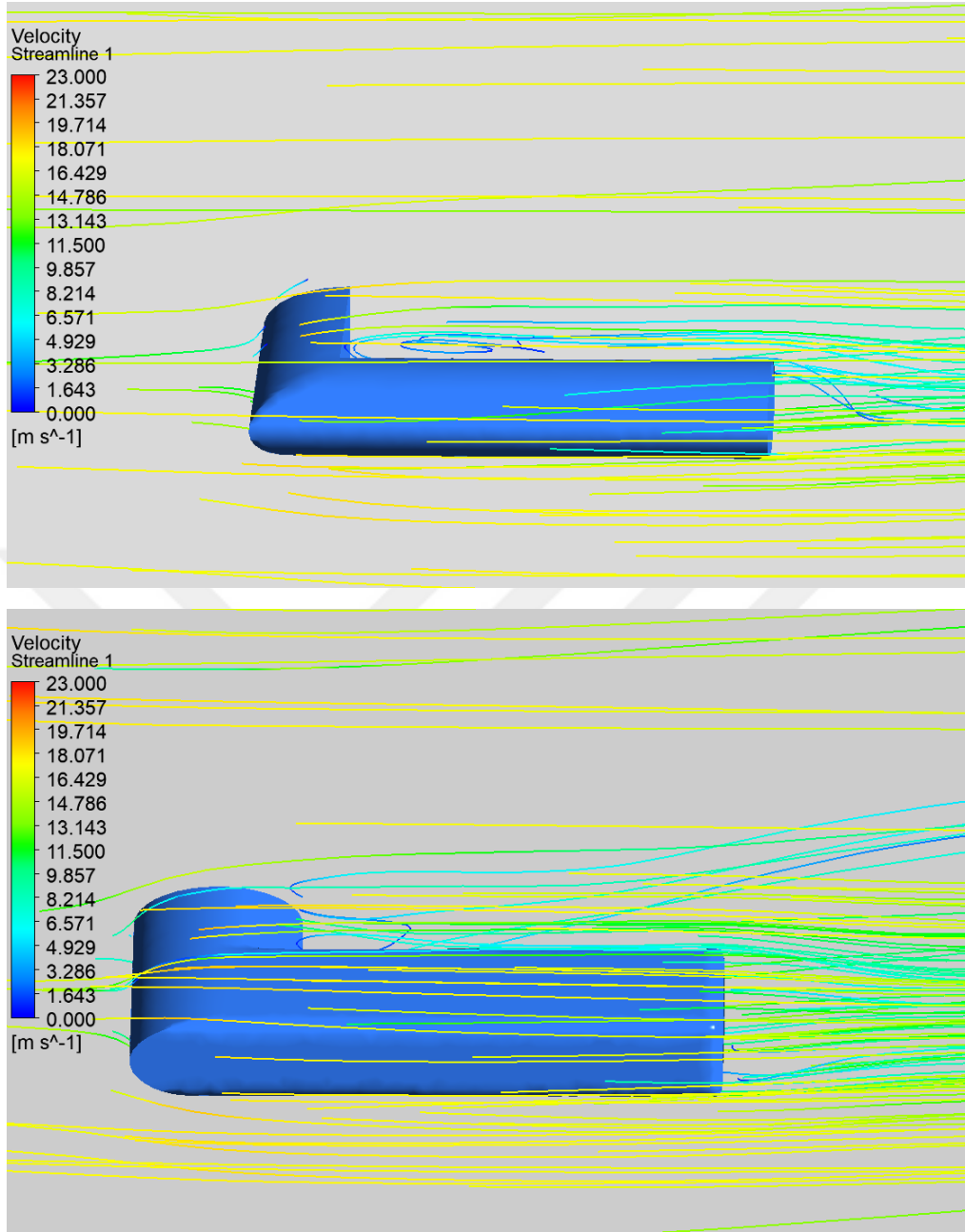
Şekil 4.15 15 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri geleneksel ayna ve model 1.



Şekil 4.16 15 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri model 2 ve model 3.

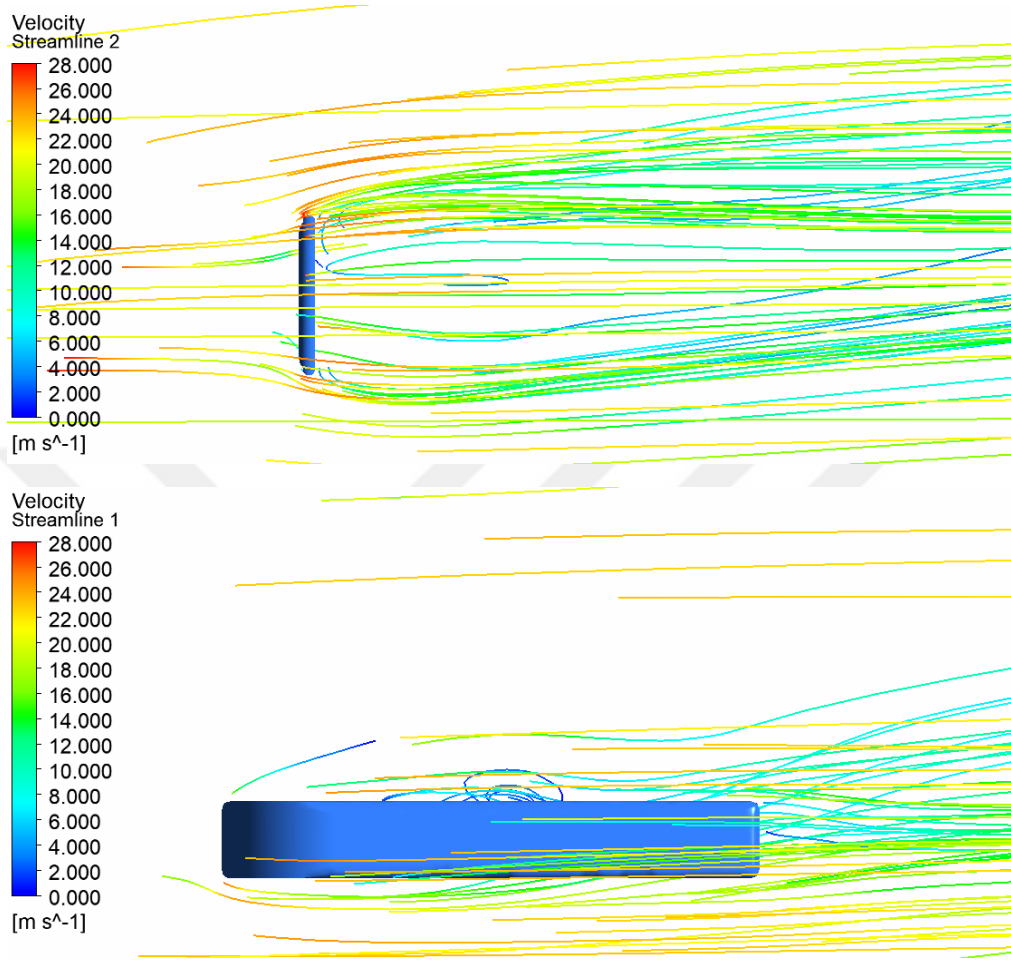


Şekil 4.17 15 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri geleneksel ayna ve model 1.

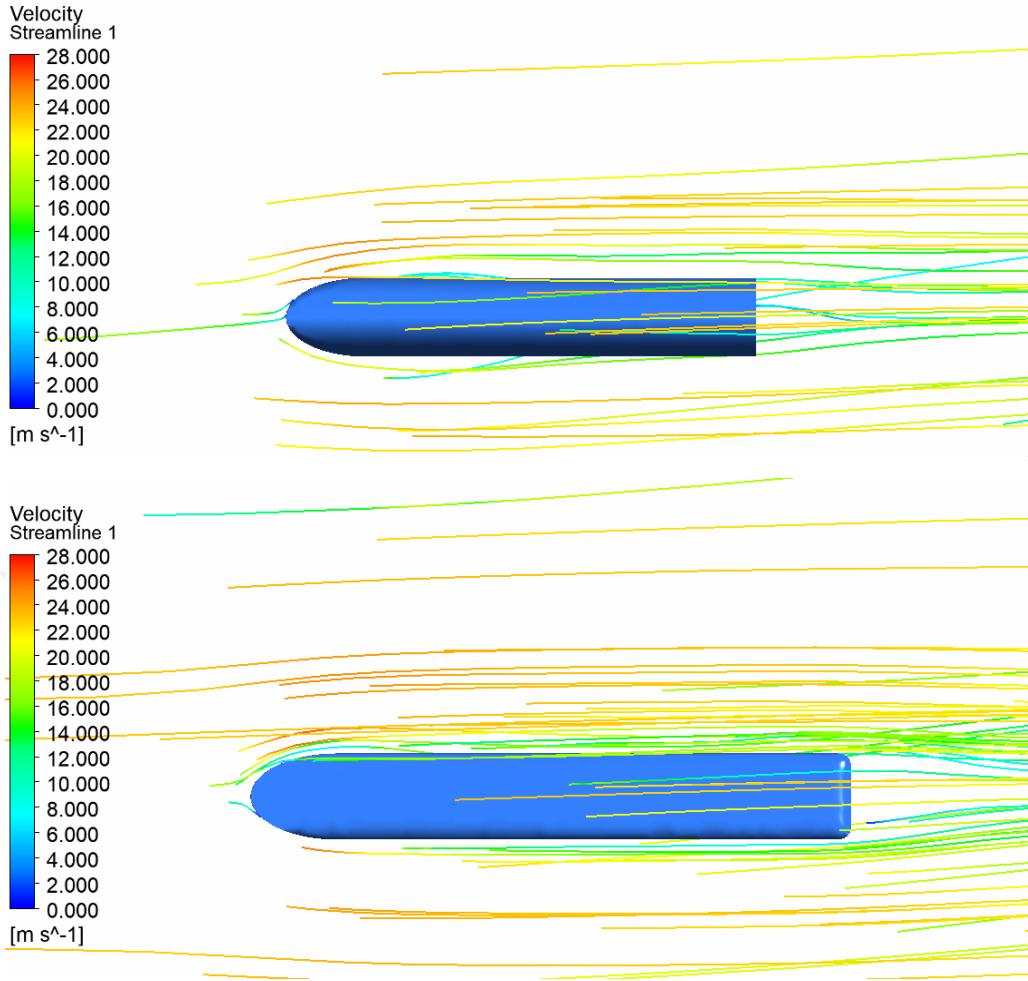


Şekil 4.18 15 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri model 2 ve model 3.

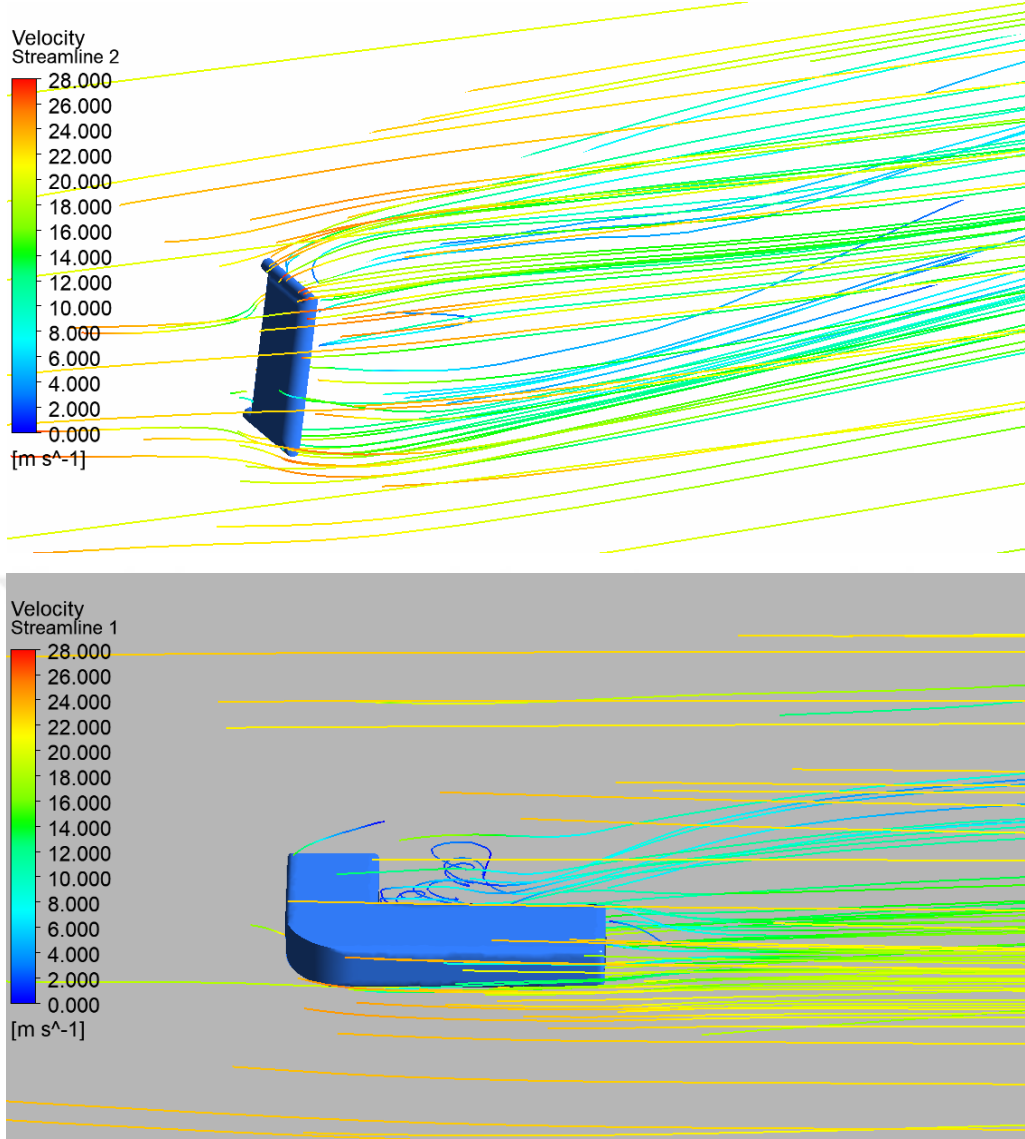
4.4.3 20 m/s Hızındaki Çözümleme Sonuçları



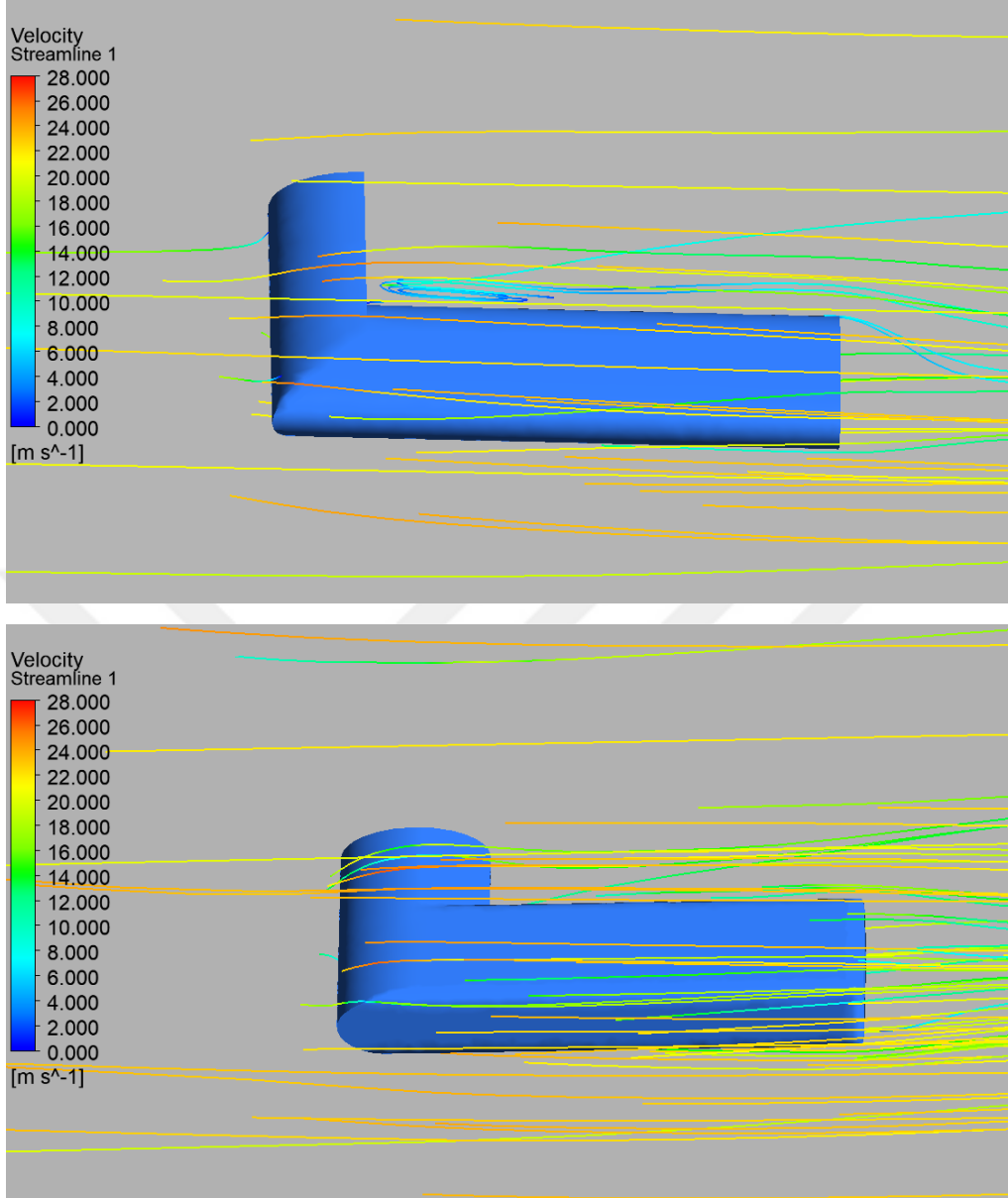
Şekil 4.19 20 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri geleneksel ayna ve model 1.



Şekil 4.20 20 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri model 2 ve model 3.

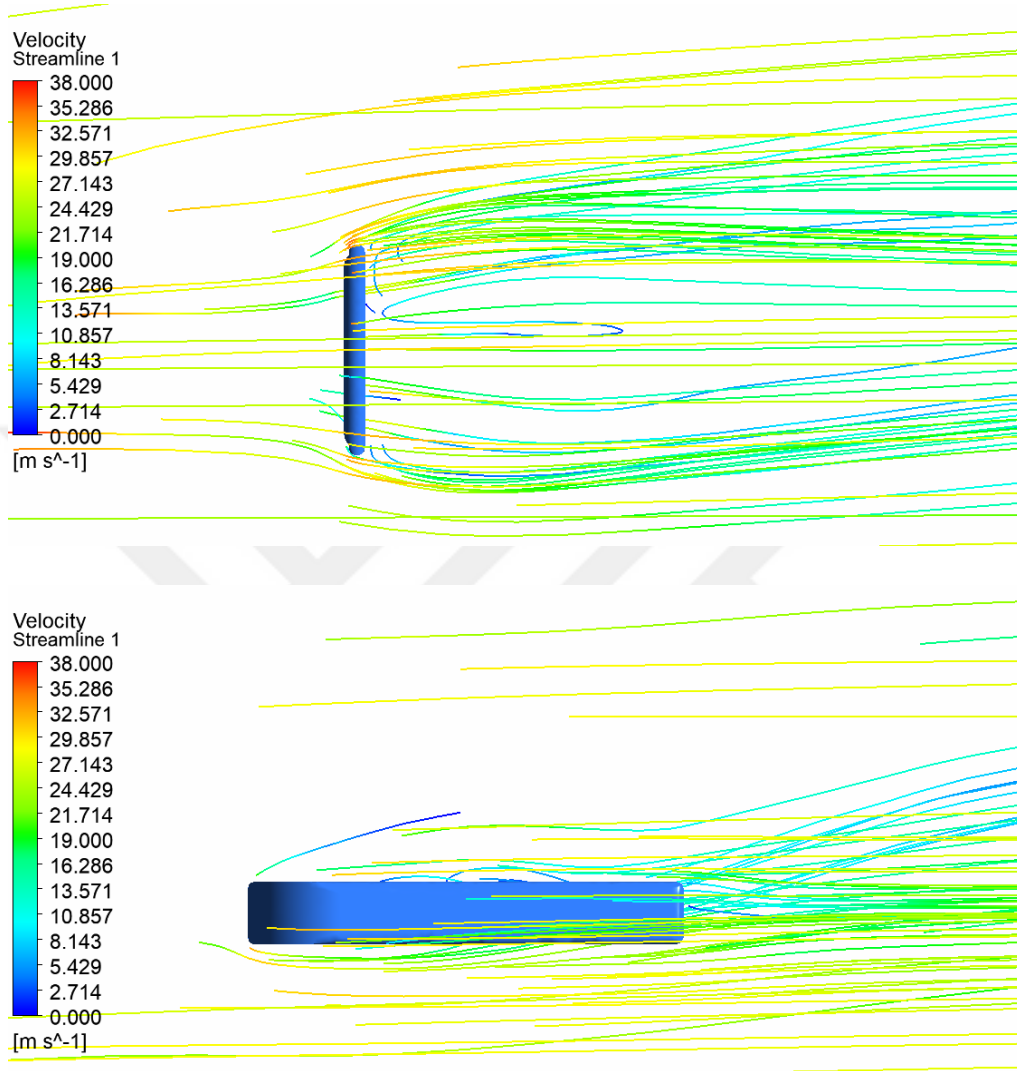


Şekil 4.21 20 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri geleneksel ayna ve model 1.

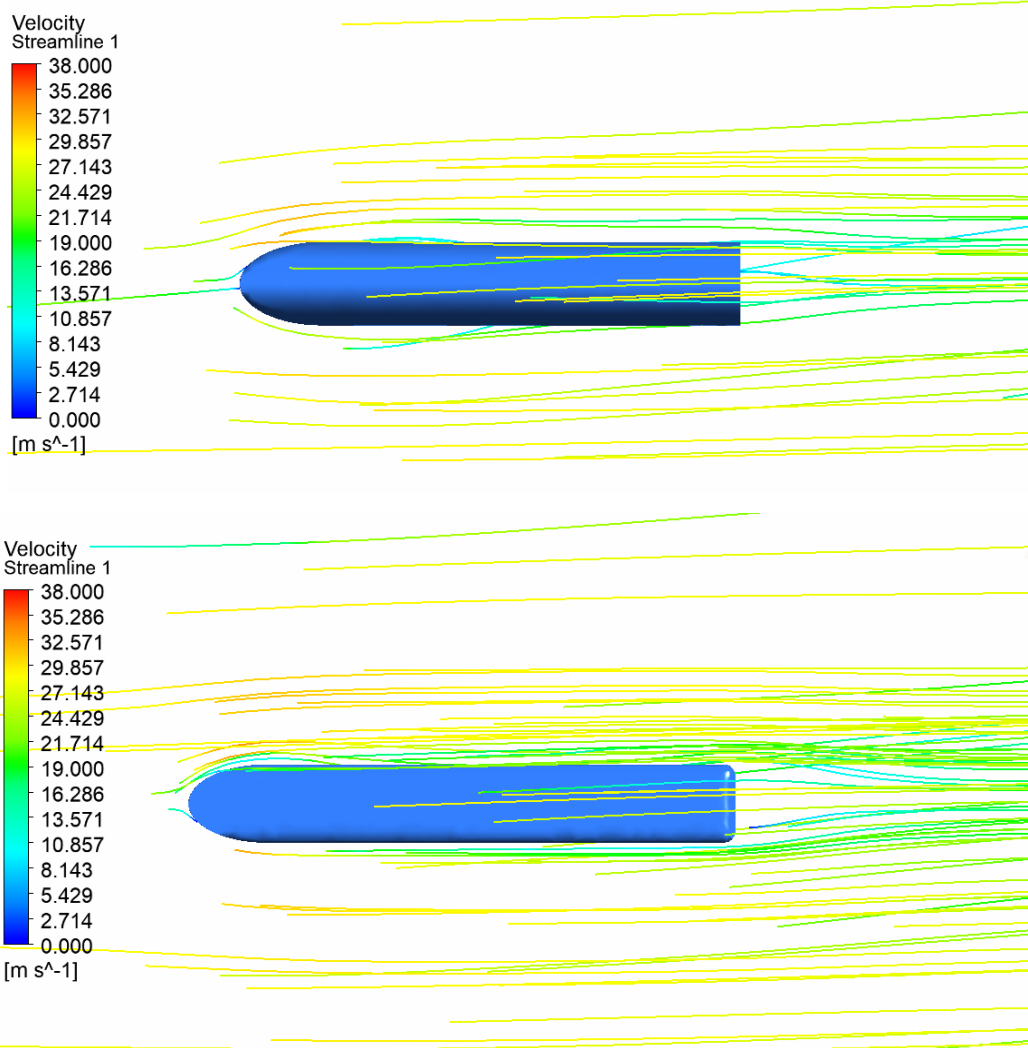


Şekil 4.22 20 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri model 2 ve model 3.

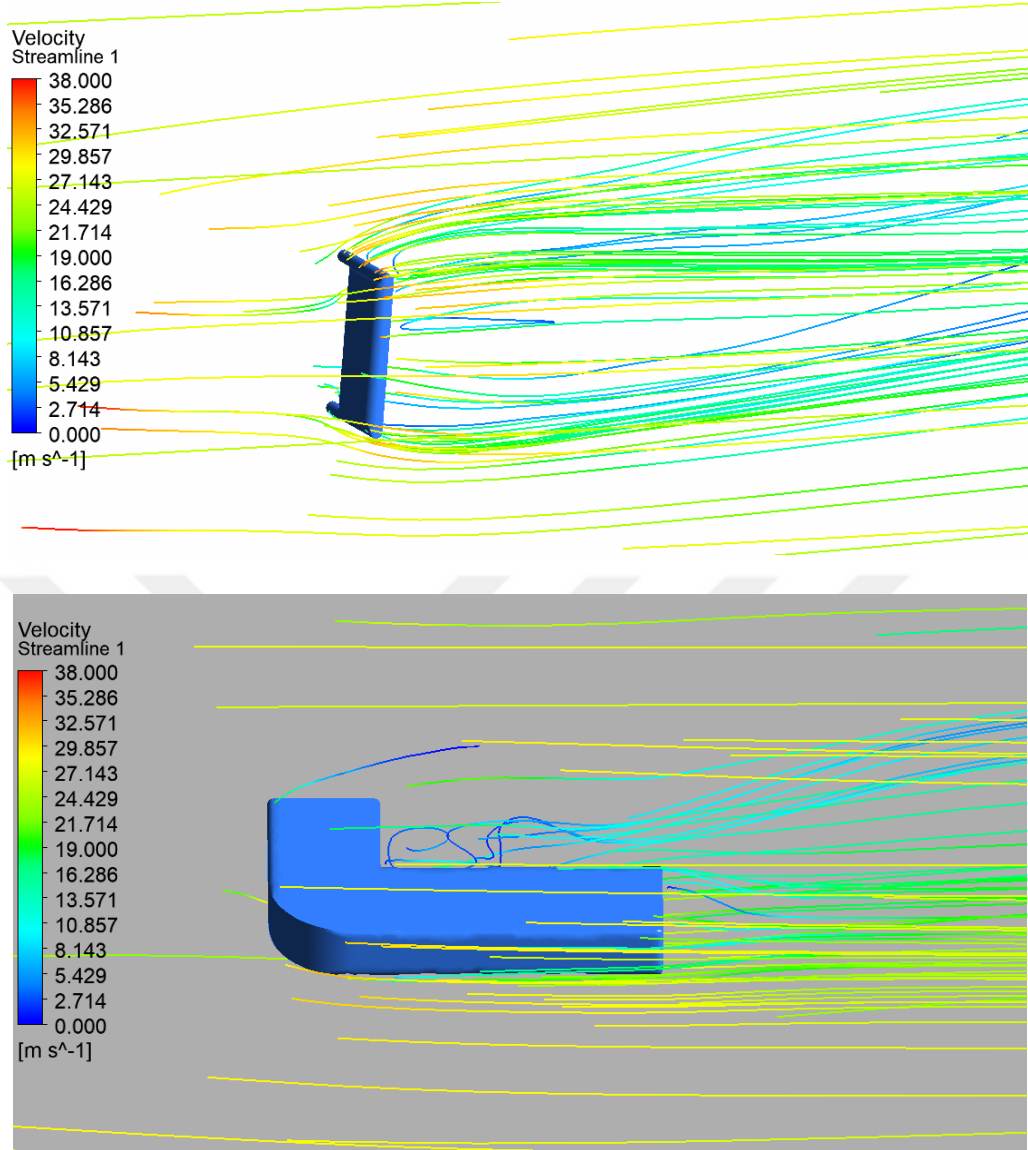
4.4.4 25 m/s Hızındaki Çözümleme Sonuçları



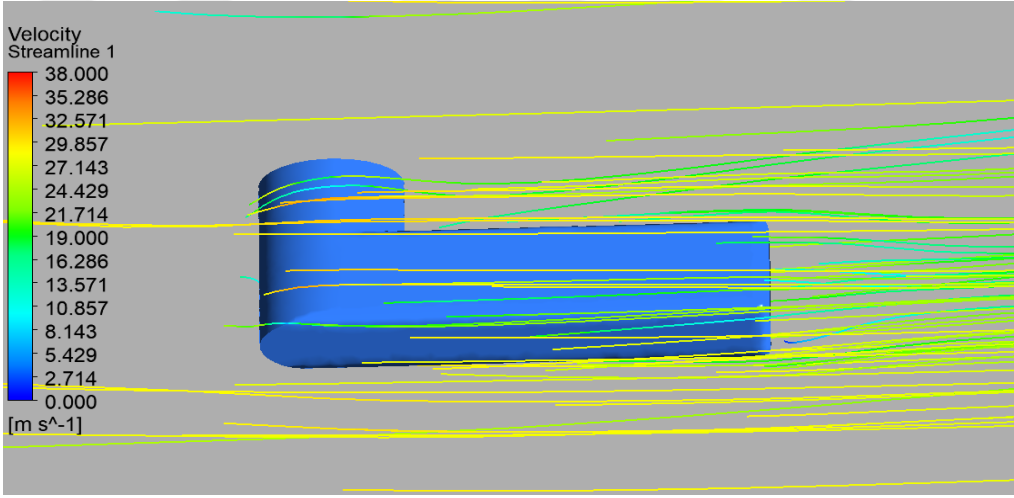
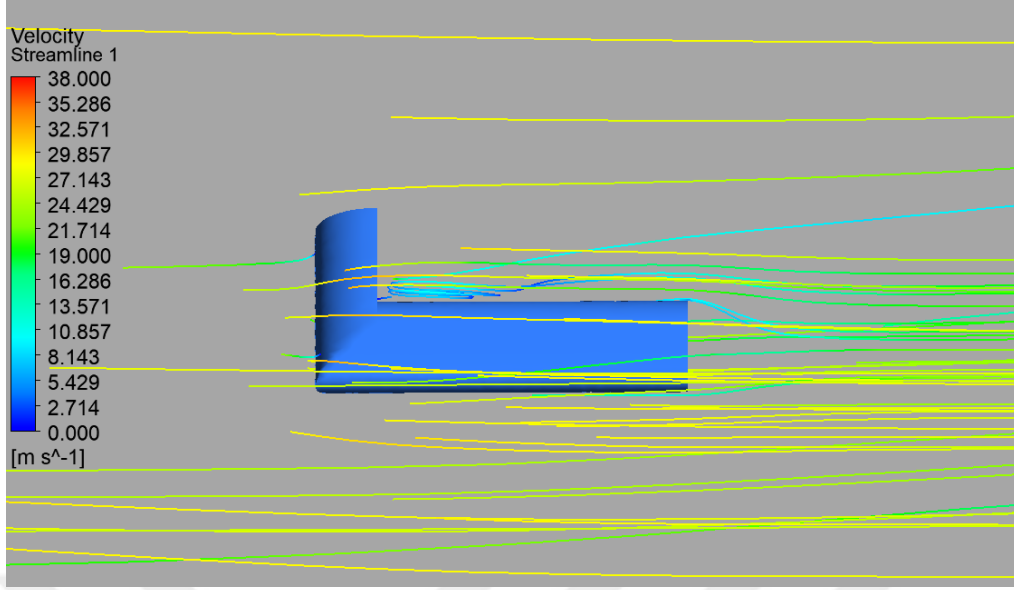
Şekil 4.23 25 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri geleneksel ayna ve model 1.



Şekil 4.24 25 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri model 2 ve model 3.



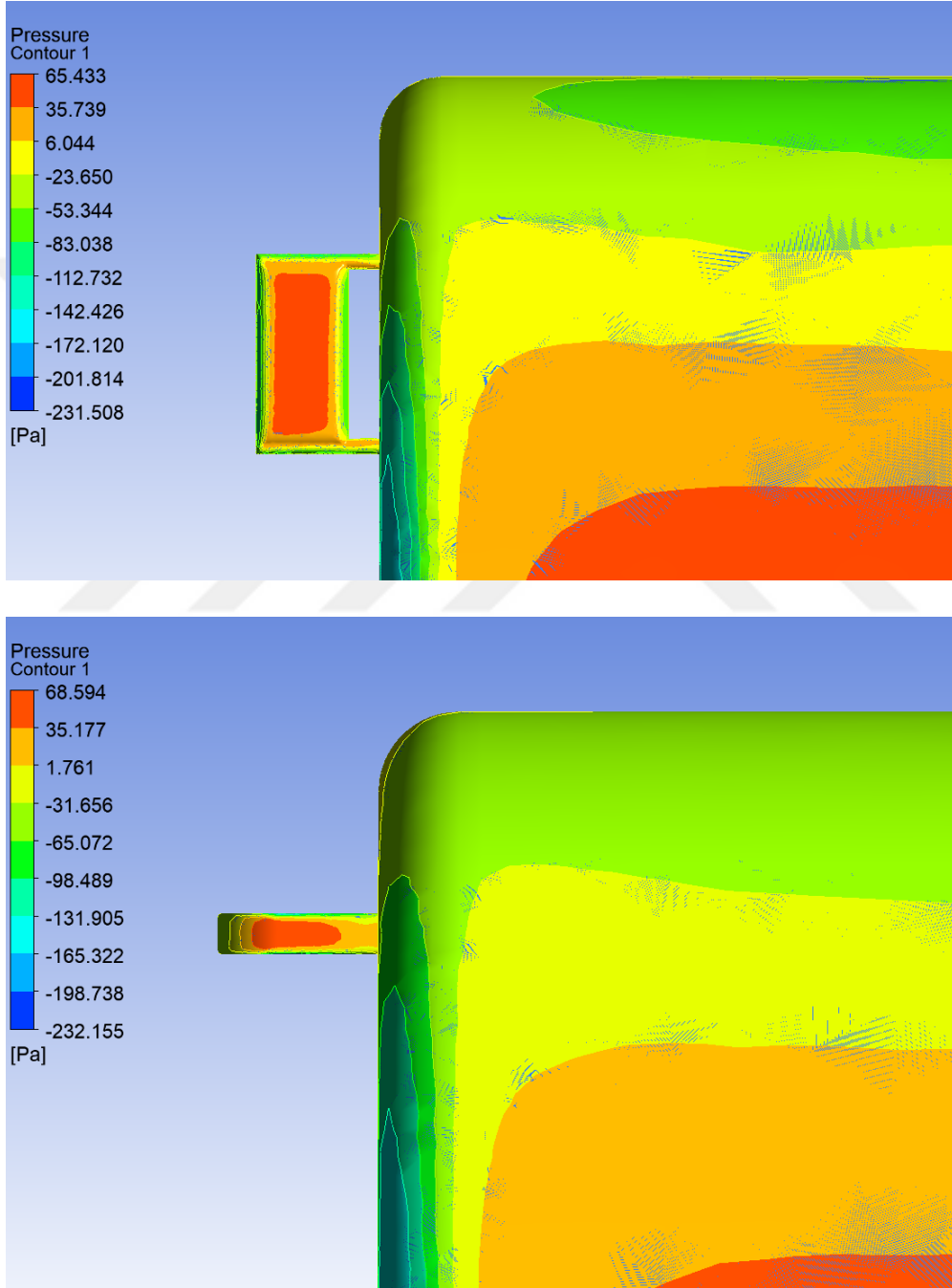
Şekil 4.25 25 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri geleneksel ayna ve model 1.



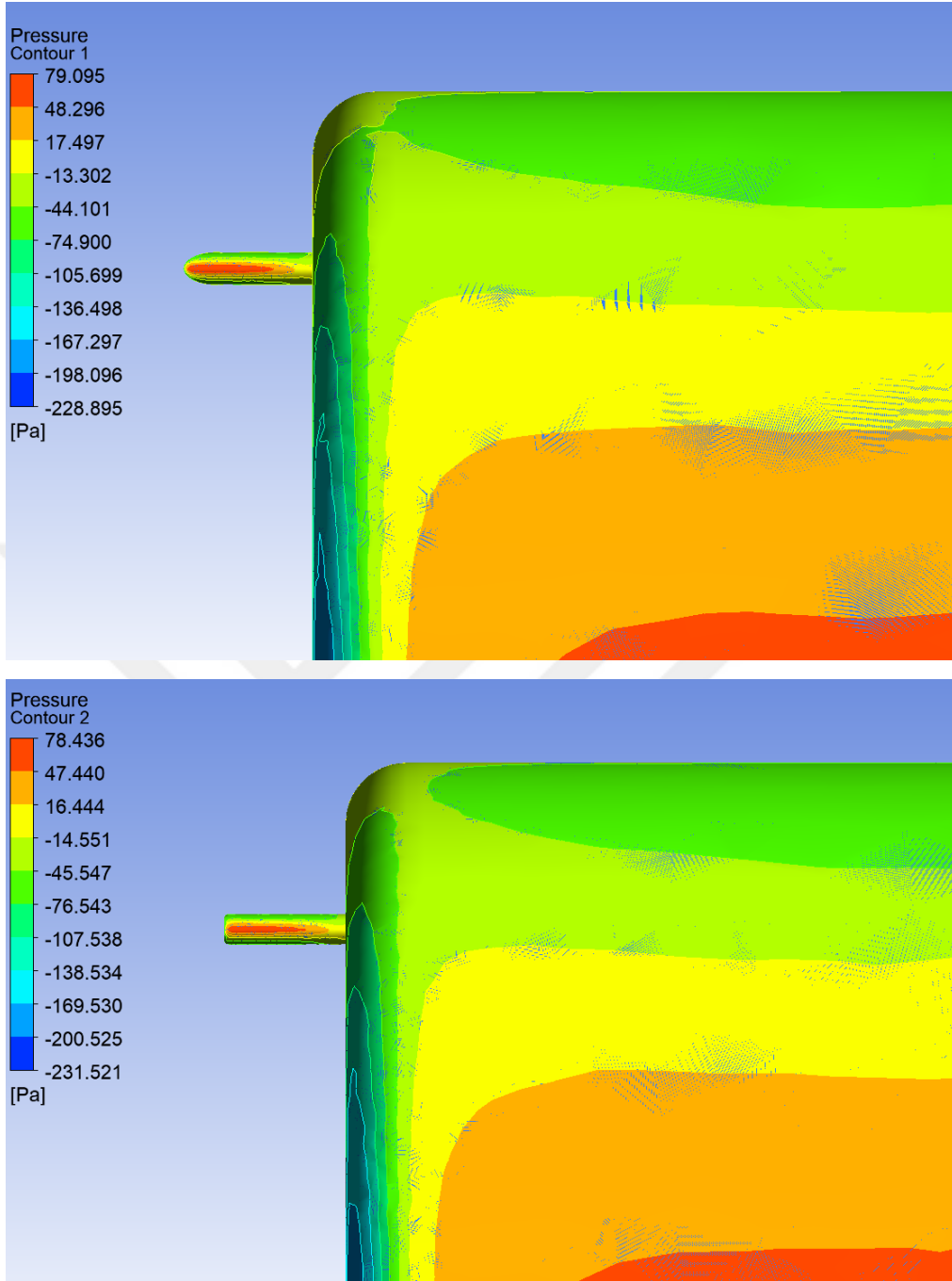
Şekil 4.26 25 m/s hızda farklı ayna modellerinin akım çizgileri model 2 ve model 3.

4.5 Ayna Modellerinin Farklı Hızlarda Basınç Dağılımlarının Gösterilişi

4.5.1 10 m/s Hızda Çözümleme Sonuçları

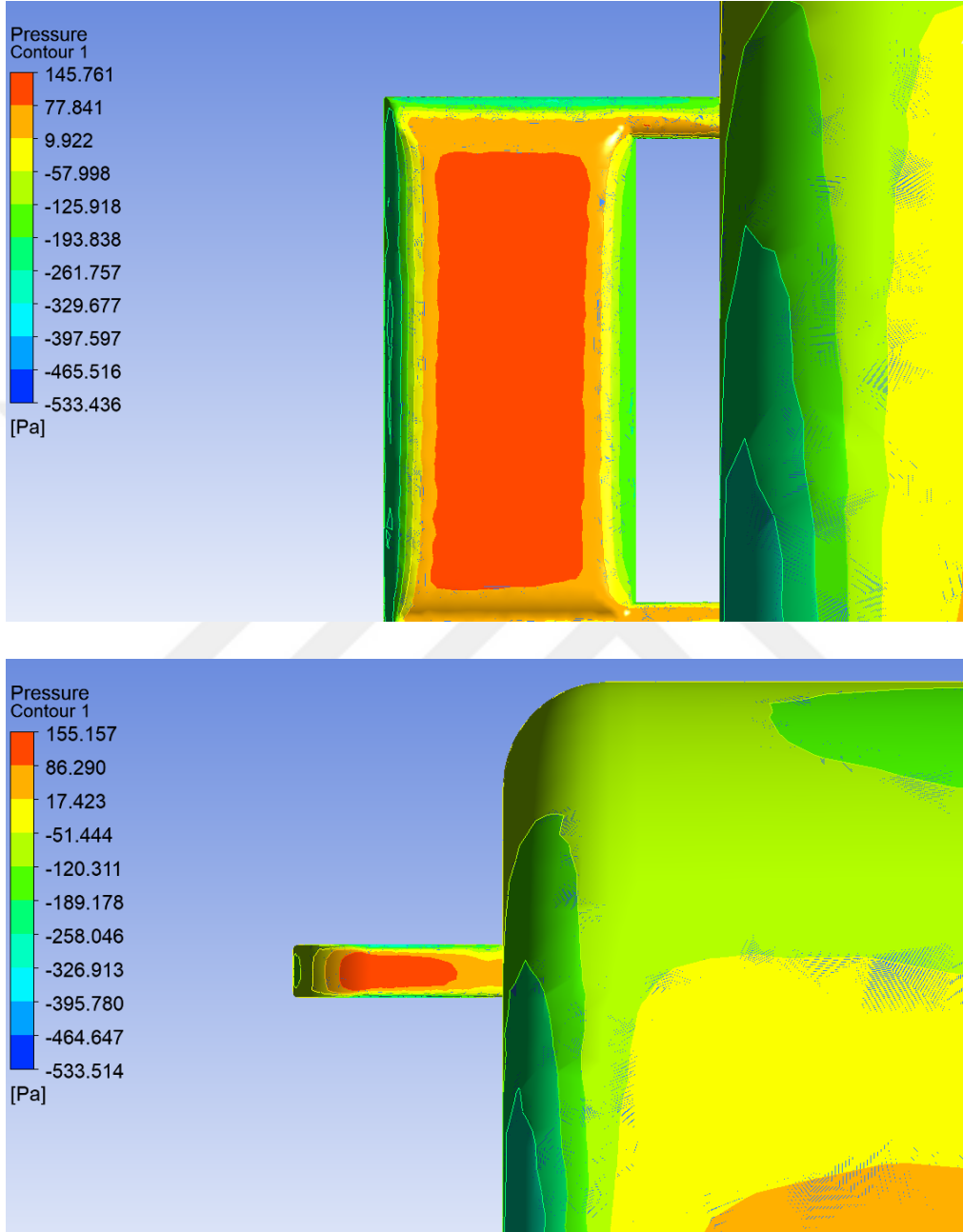


Şekil 4.27 10 m/s hızda farklı ayna modellerinin basınç dağılımları geleneksel ayna ve model 1.

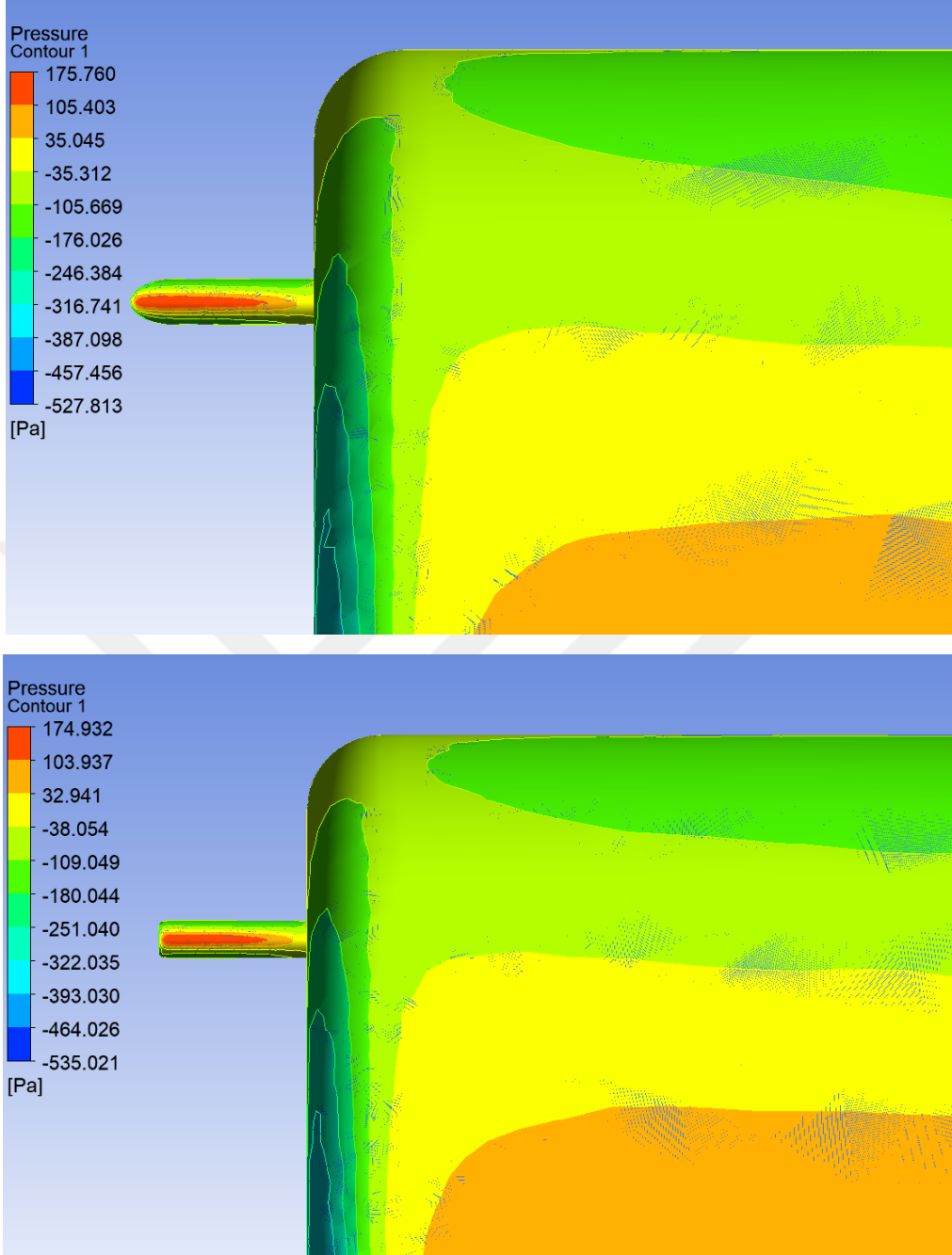


Şekil 4.28 10 m/s hızda farklı ayna modellerinin basınç dağılımları model 2 ve model 3.

4.5.2 15 m/s Hızda Çözümleme Sonuçları

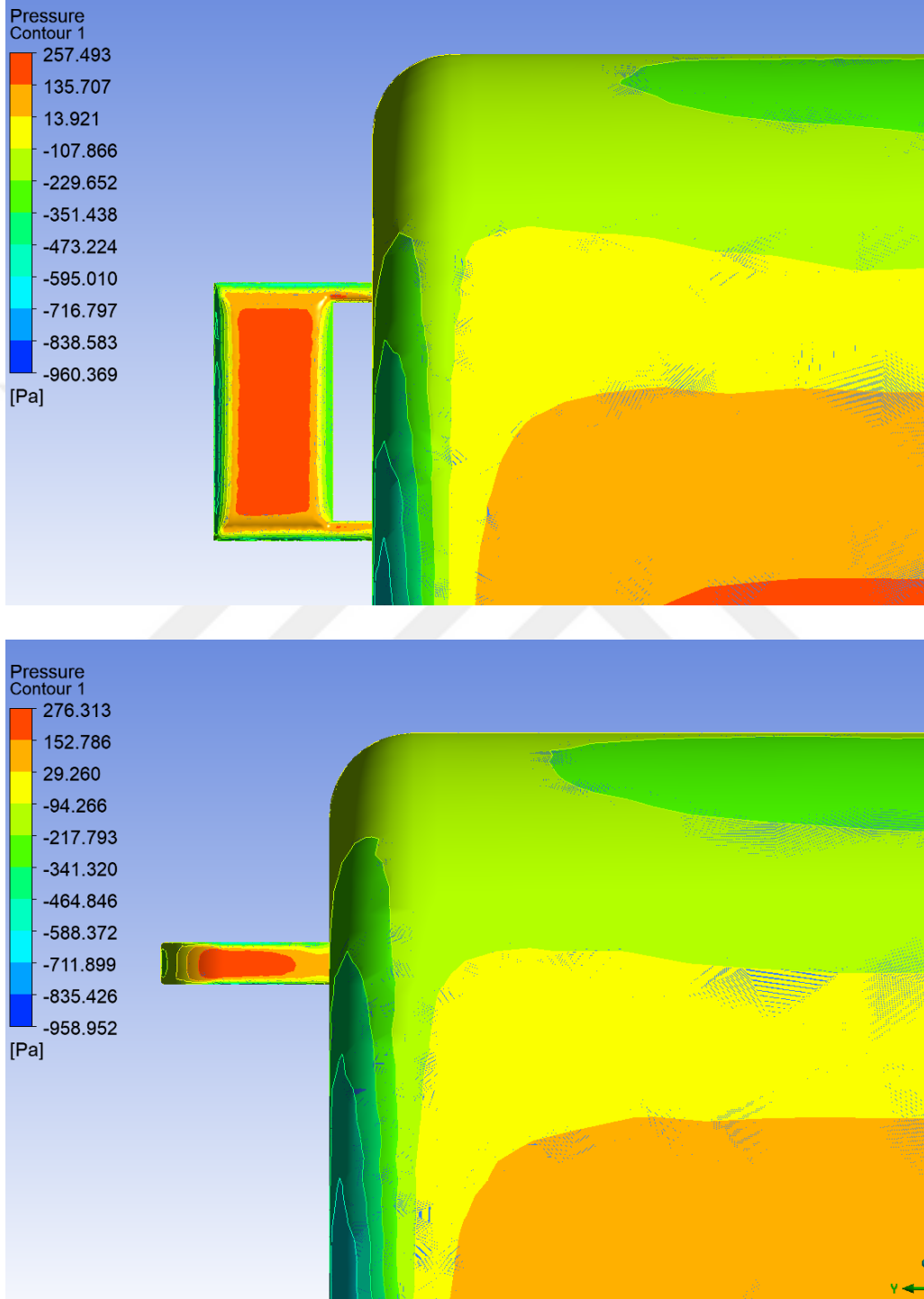


Şekil 4.29 15 m/s hızda farklı ayna modellerinin basınç dağılımları geleneksel ayna ve model 1.

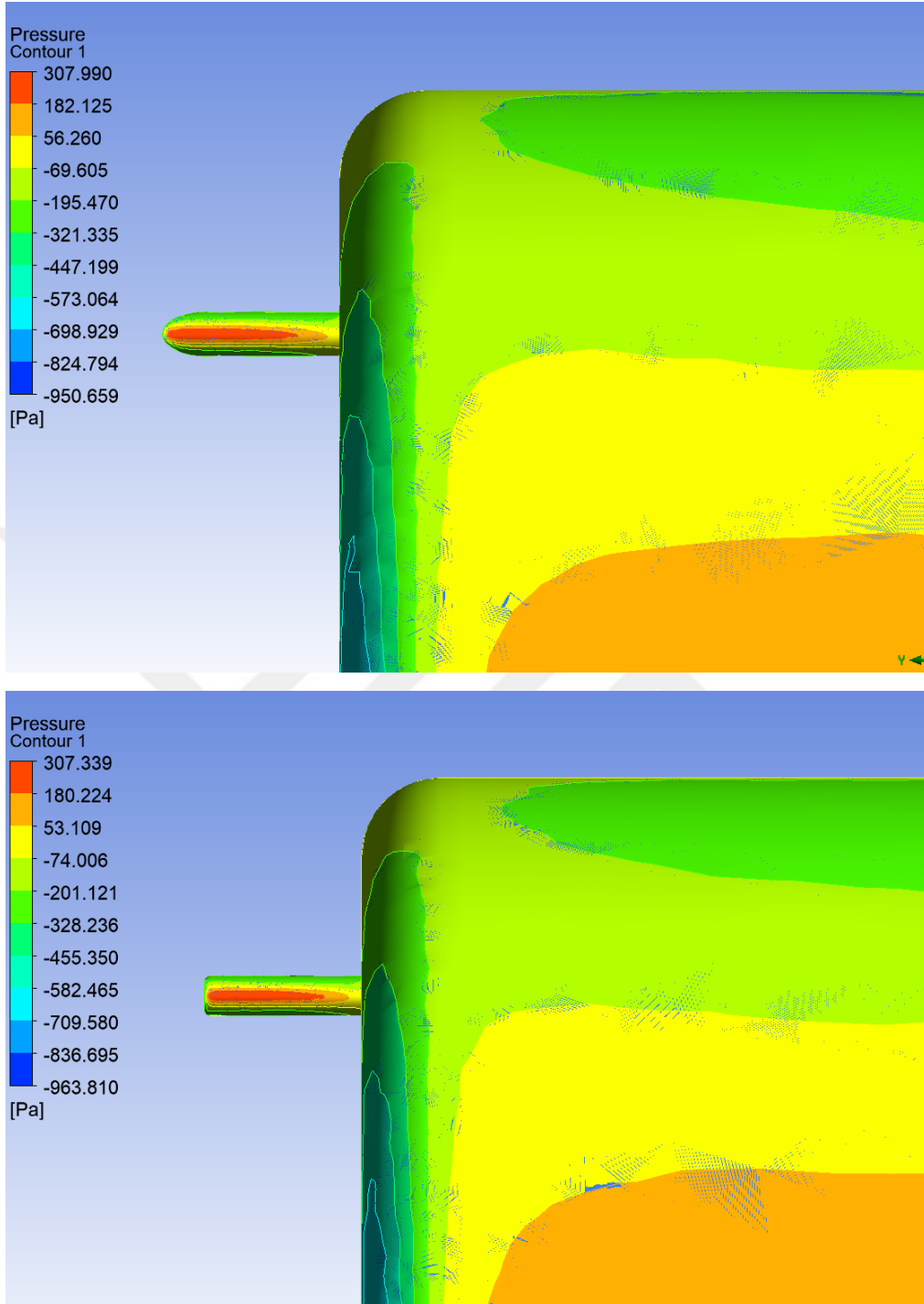


Şekil 4.30 15 m/s hızda farklı ayna modellerinin basınç dağılımları model 2 ve model 3.

4.5.3 20 m/s Hızda Çözümleme Sonuçları

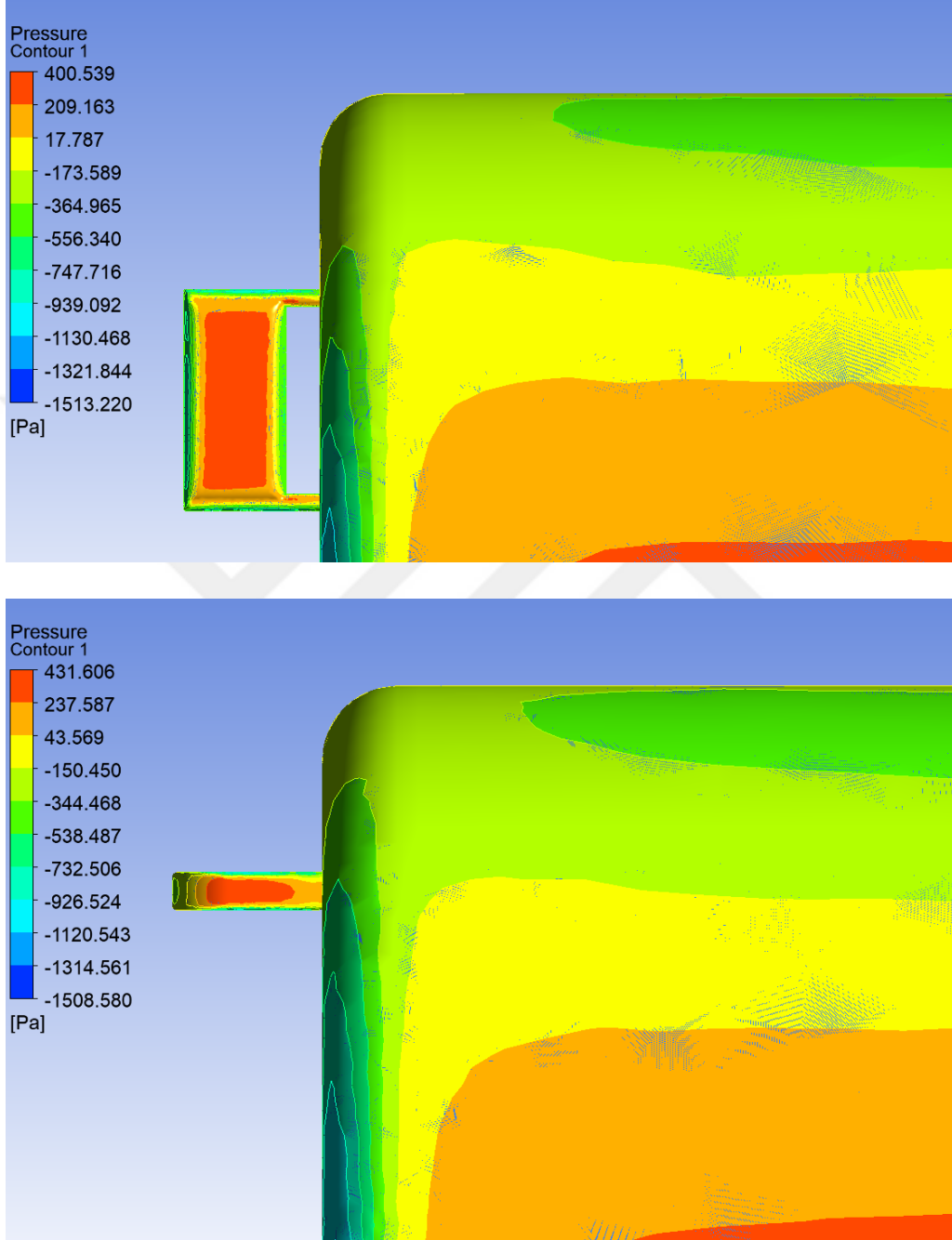


Şekil 4.31 20 m/s hızda farklı ayna modellerinin basınç dağılımları geleneksel ayna ve model 1.

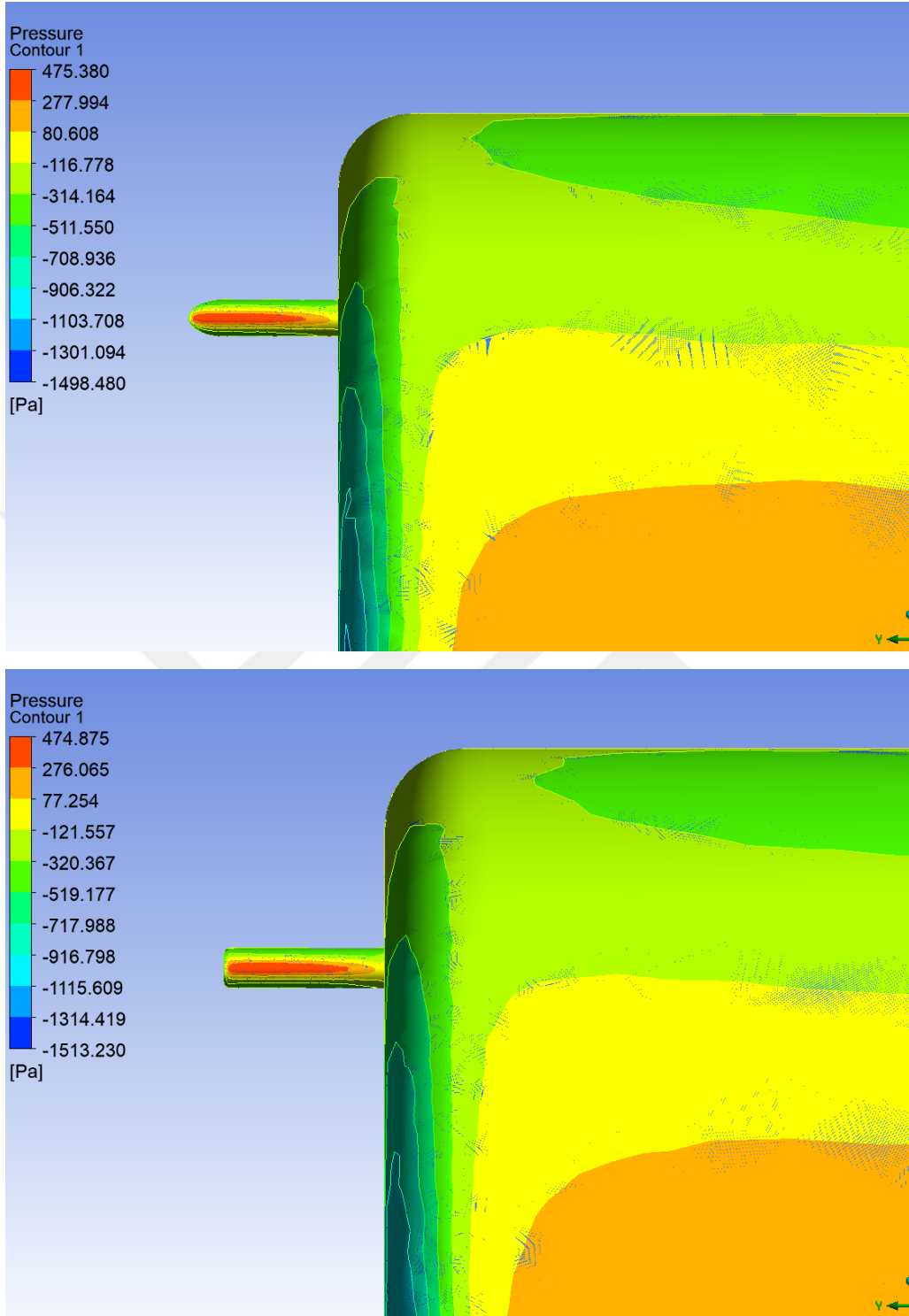


Şekil 4.32 20 m/s hızda farklı ayna modellerinin basınç dağılımları model 2 ve model 3.

4.5.4 25 m/s Hızda Çözümleme Sonuçları



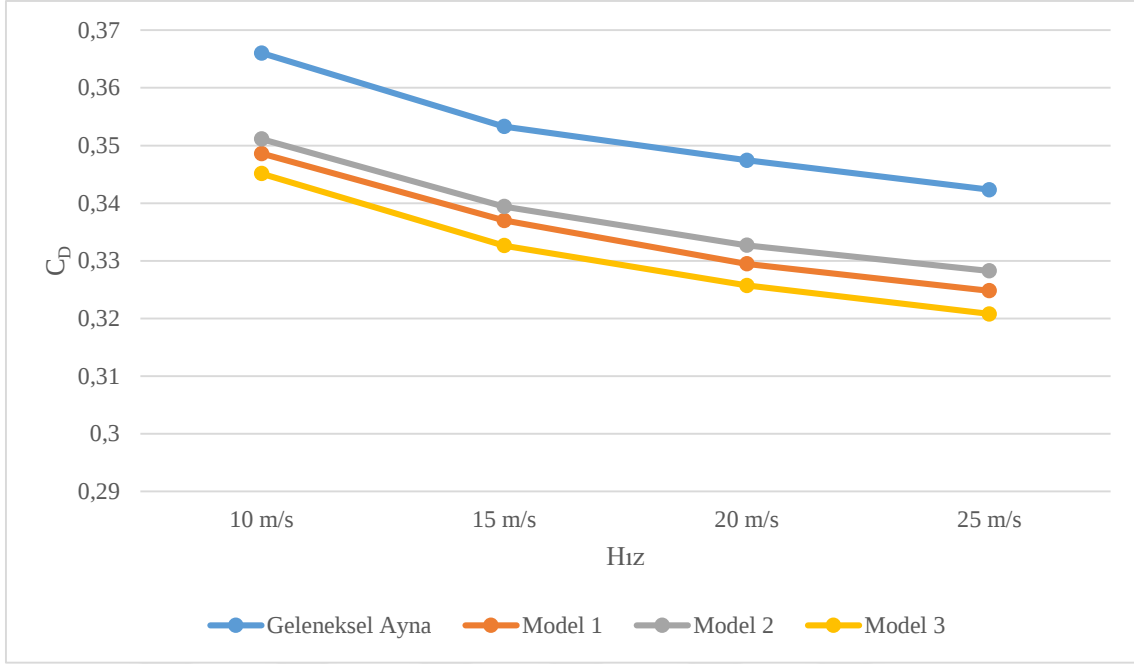
Şekil 4.33 25 m/s hızda farklı ayna modellerinin basınç dağılımları geleneksel ayna ve model 1.



Şekil 4.34 25 m/s hızda farklı ayna modellerinin basınç dağılımları model 2 ve model 3.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada ağır ticari bir araçta dört farklı ayna modelinin üzerindeki akış yapılarıyla birlikte aerodinamik yapıya etkileri hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle nümerik olarak incelenmiştir. Öncelikle ağır ticari bir aracın basitleştirilmiş modeli olan GTS modelinde geleneksel ayna ve model 1'in analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra model 1 üzerinde aerodinamik iyileştirmeler yapmak amacıyla, pasif akış kontrol yöntemiyle model 1 üzerinde geometrik değişiklikler gerçekleştirilmiştir. Bu değişikliklerden ilki model 2'de kamera ayna bağlantı kolunun yapısını, yarım elips şeklinde tasarlayarak incelemek olmuştur. Bu tasarım sonucunda yapılan analizde yarım elips şeklindeki bağlantı kolunun her ne kadar ön alanı aerodinamik olarak avantajlı olsa da kolun arka tarafındaki keskin yüzeyler sebebiyle vorteks oluşmuştur ve %0,97 C_D katsayısını arttırmıştır. Bu analiz neticesinde bağlantı kolunun sadece önünü değil, daha iyi bir akış sağlanması için kolun arkasına da elips şekli verilmesi gerektiği görülmüştür. Daha sonra model 3 olarak kamera ayna bağlantı kolu çapı aynı olacak şekilde tam elips şeklinde bir tasarım yapılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda model 1'e göre %1,13 oranında C_D katsayısında bir iyileştirme olduğu görülmüştür.



Şekil 5.1 Farklı ayna modelleri için C_D katsayısı grafiği.

Yapılan çalışma neticesinde, ağır ticari bir aracın treyler ile basitleştirilmiş modelinin farklı ayna modelleri arasından yaygın olarak kullanılan geleneksel ayna yerine, pasif akış kontrol yöntemi ile aerodinamik iyileştirme gerçekleştirilen model 3'ün kullanılması sonucunda %6,24 oranında C_D katsayısında iyileştirme olduğu bulunmuştur. Ağır ticari araçlarda %2 oranında aerodinamik direnç katsayısındaki iyileştirme %1 oranında yakıt tasarrufuna yansımaktadır (Wood ve Bauer 2003). Verilen değerler ışığında, ağır ticari bir araçta %3,12'lik bir yakıt tasarrufu olabileceği hesaplanmıştır.

Örnek bir hesaplama için günümüzdeki ağır ticari bir aracın yılda 50 000 km yük taşımacılığı yapmak amacıyla kat ettiğini ve her 100 kilometrede 23 litre dizel yakıt tükettiği düşünüldüğünde bu ağır ticari aracın yıllık yakıt tüketimi 11 500 litre olmaktadır. Bu çalışmadaki iyileştirme oranı ile yakıt tüketimi %3,12 azaldığında, yılda 360 litre civarında bir yakıt miktarı tasarruf edilmektedir. 2022 Aralık ayı TÜİK verilerine göre, ülkemizde 919 125 tane ağır ticari araç mevcuttur (İnt. Kyn. 1). Bu çalışmanın tüm bu araçlarda uygulandığı düşünülürse, bir yılda yaklaşık 331 milyon litre yakıt harcamalarından tasarruf elde edilebileceği ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmada ağır ticari bir aracın sadece aynalarının aerodinamiğe etkileri incelenmiştir. Ağır ticari araçlarda aynalar gibi aerodinamik yapıya etki eden birçok bölüm mevcuttur. Bu bölümlerde yapılabilecek aerodinamik iyileştirmelerde doğrudan yakıt tasarrufu olarak değerlendirilebilir. Buna göre gelecekteki çalışmalarda;

- Daha küçük ön izdüşümü alanına sahip bir kamera ayna tasarlanıp aerodinamiğe etkileri incelenebilir.
- GTS modelinin arka kısmındaki keskin köşelere oval bir şekil verilerek aerodinamik yapıya etkileri incelenebilir.
- Kamera ayna modelinin tüm binek araçlarda aerodinamik yapıya olan etkileri ve getirebileceği maddi kazançlar incelenebilir.
- Gerçeğe en yakın verileri elde etmek için küçük ölçekli gerçek modelin oluşturulan rüzgâr tüneline deneyini gerçekleştirdikten sonra Fluent programında farklı türbülans modellerinde analizini gerçekleştirerek bir deney gerçekleştirilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Abinesh J, Arunkumar J 2014, CFD Analysis of Aerodynamic Drag Reduction and Improve Fuel Economy, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 3, 430–440.
- Aktaş C D, 2022, Ağır ticari bir araçta kabin yapısının aerodinamik direnç üzerindeki etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 53s, İstanbul.
- Al-Obaidi A S M, Otten W A, 2018, Aerodynamic analysis of personal vehicle side mirror, Journal of Engineering Science and Technology, 13, 52–64.
- Al-Obaidi A S M, Shen Ai S L, Hong L C, 2018, Effect of size and shape of side mirrors on the drag of a personal vehicle, Journal of Engineering Science and Technology, 13, 13–26.
- Arıkan, M. 2020, Otomobillerdeki yan aynaların Dış yüzeyinde oluşan hava direnci etkisinin nümerik olarak incelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 67s, Afyonkarahisar.
- Çengel Y A, Cimbala J M, 2006, Fluid Mechanics Fundamentals and Applications, McGraw-Hill, 2036p, New York.
- Çetinkaya S, 2017, Taşıt Mekaniği, Nobel Akademik Yayıncılık, 418s, Ankara.
- Chauhan B V S, Vedrtnam A, Pratap V, 2020, Designing Rear View Mirror of Car Using CFD and Reverse Engineering, Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, 41, 373–380.
- Crolla D A, 2009, Automotive Engineering: Powertrain, Chasis System and Vehicle Body, Elsevier, 834p, the USA.
- Demircioğlu T K, 2007, Bir Araç Modelinin Aerodinamik Analizi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Simülasyonu, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 61s, Balıkesir.
- Hucho W H, 2013, Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle

- engineering, Elsevier, 565, Cambridge.
- İpçi D, 2020, A Comparative CFD Study of Side-view Mirror and Side-view Camera Usages on a City Bus, International Journal of Automotive Science And Technology, 4, 138–143.
- Kamacı C, 2022, Ahmed Gövdesinin Farklı Arka Yüzey Geometrik Konfigürasyonları için Aerodinamik Özelliklerinin Sayısal İncelenmesi, İstanbul Aydın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 54s, İstanbul.
- Katz J, 2016, Automotive Aerodynamics, John Wiley & Sons, 591p, United Kingdom.
- Kaykisizli H, 2006, Rüzgâr Tüneli ve Akış Görüntüleme Teknikleri, Tubitak UME.
- Murukesavan P, Mu'Tasim M A N, Sahat I M, 2013, Computational Analysis of an Effect of Aerodynamic Pressure on the Side View Mirror Geometry, 2nd International Conference on Mechanical Engineering Research, 1–4 July 2013, Kuantan, Pahang, Malaysia.
- Olosson M, 2011, Designing and Optimizing Side-View Mirrors, Chalmers University of Technology, Department of Applied Mechanics, Master Thesis, 97p, Göteborg, Sweden.
- Oran A H, 2020, Numerical Investigations of Curved Slanted Surface and Lower Deflector on the Ahmed Body, Çukurova University, Institute of Natural and Applied Sciences, Master Thesis, 77p, Adana.
- Salari K, Ortega J M, Castellucci P J, 2004, Computational Prediction of Aerodynamic Forces for a Simplified Integrated Tractor-Trailer Geometry, AIAA Fluid Dynamics Meeting, 28 June- 1 July, Portland, OR, United States.
- Şelenbaş B, 2011, Ağır Kamyon Geometrisinin ve Aksesuarlarının Aerodinamik Tasarım ve Optimizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 102s, İstanbul.
- Tu J, Yeoh G H, Liu C, 2018, Computational Fluid Dynamics, Çev.: Engin A, Güneş H, Çadırcı S, Kibar A, Kemerli M, Palme Yayıncılık, 477s, Ankara.
- Wood R M, Bauer S X S, 2003, Simple and Low-Cost Aerodynamic Drag Reduction

Devices for Tractor-Trailer Trucks, SAE Technical Papers, 112, 143–160.

Zhang J, Wang F, Guo Z, Han S, 2022, Investigation of the Wake Flow of a Simplified Heavy Vehicle with Different Aspect Ratios, Physics of Fluids, 34, Changsha, China.

İNTERNET KAYNAKLARI

- 1- <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Aralik-2022-49436>,
13.02.2023