

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Basitleştirilmiş Treyler-Çekici Kamyon Geometrisinde Tasarım
Değişikliklerinin Aerodinamik Direnç Katsayısına Etkisi**

Onur Can KIRIT

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs, 2024

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZ ONAYI

**Basitleştirilmiş Treyler-Çekici Kamyon Geometrisinde
Tasarım Değişikliklerinin Aerodinamik Direnç Katsayısına
Etkisi**

Onur Can KIRIT

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu Yüksek Lisans Tezi 31/05/2024 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından
Değerlendirilmiş ve Oy Birliği / Oy Çokluğu ile Kabul Edilmiştir.

Jüri : Prof. Dr. Mustafa Atakan AKAR (Danışman)

: Prof. Dr. Ali KESKİN

: Doç. Dr. İlker SUGÖZÜ

Bu Tez Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalında Hazırlanmıştır.

Tez No:

Prof. Dr. Sadık DİNÇER
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

ÖZ	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR	III
ÇİZELGELER DİZİNİ	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ	V
SİMGELER VE KISALTMALAR	VII
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
3. MATERYAL VE METOT	13
3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği	13
3.2. Aerodinamik Direnç Kuvveti	13
3.3. Aerodinamik Direnç Katsayısı	14
3.4. Aerodinamik Direnç ile Yakıt Tüketimi İlişkisi	16
3.5. Kütleinin Korunumu	16
3.6. Momentumun Korunumu	17
3.7. Türbülans Modelleri	17
3.7.1. Standart k- ϵ Türbülans Modeli	18
3.7.2. Realizable k- ϵ Türbülans Modeli	18
3.7.3. Standart K-Omega ($K-\Omega$) Türbülans Modeli	19
3.7.4. SST K-Omega ($K-\Omega$) Türbülans Modeli	19
3.8. Reynolds Sayısı	20
3.9. y^+ Değeri	21
3.10. Rüzgâr Tüneli	21
3.11. Ön Analiz Çalışmaları	23
3.11.1. Sınır Şartları	23
3.11.2. Ağdan Bağımsızlık (Mesh Independence)	24
3.11.3. Sınır Ağı (Mesh) Oluşturma	25
3.11.4. Türbülans Modeli Belirleme	27
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	29
4.1. Analiz Modeli Oluşturma	29
4.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Analiz Sonuçları	36
4.2.1. Model-A HAD Analizleri Değerlendirmesi	36
4.2.2. Model-B HAD Analiz Sonuçları	41
4.2.3. Analiz Sonuçları Karşılaştırması	46
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	47

KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	51



Basitleştirilmiş Treyler-Çekici Kamyon Geometrisinde Tasarım Değişikliklerinin Aerodinamik Direnç Katsayısına Etkisi

Onur Can KIRIT

Danışman: Prof. Dr. M. Atakan AKAR

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZ

Taşımacılık endüstrisinde enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik, günümüzde giderek artan öneme sahip temel konulardır. Bu bağlamda, taşımacılık araçlarının aerodinamik tasarımı, hem yakıt tüketimini azaltmak hem de karbondioksit emisyonlarını düşürmek için etkili bir strateji olarak kabul edilmektedir. Özellikle, kamyonların aerodinamik performansının iyileştirilmesi, taşımacılık endüstrisinde önemli bir potansiyele sahiptir.

Çalışmada, taşımacılık endüstrisinde önemli bir konu olan basitleştirilmiş treyler-çekici geometrisi tasarımı değişikliklerinin aerodinamik direnç katsayısına etkilerini incelenmiştir. Araştırma, Ansys 2023 R2 yazılımının kullanımıyla gerçekleştirilen kapsamlı bilgisayar destekli tasarım ve analizleri üzerinden ilerlemektedir. Bu Çalışma, çekici deflektör ve treyler yarım gözyaşı modeli kullanımının, aerodinamik performans üzerindeki etkilerini anlamak amacıyla iki farklı model (Model-A ve Model-B) kullanılarak, her biri için 11 farklı Varyant modelin hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerini içermektedir. Model-A çekici üst kenarı keskin köşeli model, Model-B ise çekici üst kenarı yuvarlatılmış model olarak tanımlanmıştır. Ansys Fluent yazılımı kullanılarak her bir varyant için aerodinamik direnç katsayıları hesaplanmıştır. Oluşturulan analiz modelleri için rüzgar tüneli geometrisi kurgulanmış olup Reynolds sayısı 0.51×10^6 olarak hesaplanmıştır ve yapılan 22 farklı analiz çalışmasında aynı sınır şartları uygulanmıştır. Analiz sonuçlarına göre, Model-A Varyant 1 için C_d değeri 0.709 olarak ölçülmüştür, en fazla geometrik düzenlemenin olduğu Varyant 11 için ise bu değer 0.380'dir. Bu durumda direnç katsayısının değişim oranı %46.40 olarak hesaplanmıştır. Model-B Varyant-1 için ise C_d değeri 0.711 olarak belirlenmiştir, en fazla geometrik düzenlemenin olduğu Varyant 11 için ise de bu değer 0.351'dir. Buna göre direnç katsayısının değişim oranı %56.53 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aerodinamik, Akış Kontrol, Semi Treyler, Çekici Kamyon, Aerodinamik Direnç Katsayısı

Effect of Design Changes in Simplified Trailer-Truck Geometry on Aerodynamic Drag Coefficient

Onur Can KIRIT

Advisor: Prof. Dr. M. Atakan AKAR

Department of Automotive Engineering

ABSTRACT

Energy efficiency and environmental sustainability in the transportation industry are increasingly important topics today. In this study, the aerodynamic design of transportation vehicles is considered an effective strategy for reducing fuel consumption and carbon dioxide emissions. Particularly, improving the aerodynamic performance of trucks holds significant potential in the transportation industry.

This study investigates the effects of simplified trailer-tractor geometry design changes on aerodynamic drag coefficient, a crucial aspect in the transportation industry. The research progresses through comprehensive computer-aided design and analysis using Ansys 2023 R2 software. This study encompasses computational fluid dynamics analyses of 11 different variants for each of two different models (Model-A and Model-B) to understand the effects of using tractor deflectors and trailer tear-drop models on aerodynamic performance. Model-A represents a tractor with a sharp-edged upper surface, while Model-B represents a tractor with a rounded upper surface. Aerodynamic drag coefficients are calculated for each variant using Ansys Fluent software. Wind tunnel geometry is constructed for the analysis models, with a Reynolds number of 0.51×10^6 calculated, and the same boundary conditions are applied in 22 different analysis studies. According to the analysis results, for Model-A, the C_d value is measured as 0.709 for Variant 1, and 0.380 for Variant 11, which exhibits the highest geometric modifications. Thus, the percentage change in drag coefficient is calculated as 46.40%. For Model-B, the C_d value is determined as 0.711 for Variant 1 and 0.351 for Variant 11, showing the highest geometric modifications. Hence, the percentage change in drag coefficient is calculated as 56.53%.

Keywords: Aerodynamics, Fluid Control, Semi-Trailer, Truck, Aerodynamic Drag Coefficient

TEŞEKKÜR

Danışmanım Sayın Prof. Dr. Mustafa Atakan AKAR’a, Tez sürecimde sağladığınız bilgi, rehberlik, yönlendirme ve değerli önerileriniz için içtenlikle teşekkür ederim. Sizin rehberliğiniz ve desteğiniz olmadan bu tezi tamamlamak mümkün olmazdı. Bilgi birikiminiz, deneyiminiz ve ilginiz benim için çok değerliydi.

Ayrıca, Amasya Üniversitesi bünyesindeki değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Oğuz BAŞ’a

sağladığı katkılardan dolayı minnettarlığımı ifade etmek isterim. Değerli görüş ve eleştirileriyle tezimi zenginleştirdiler. Değerli destekleri olmasa süreci başarıyla tamamlamak mümkün olmazdı.

Tez çalışmam süresince beni cesaretlendiren, motivasyonumu yüksek tutan değerli eşim Burcu DÜNDAR KIRIT’a teşekkür ederim.

Son olarak, bu tezin gerçekleştirilmesine katkıda bulunan Koluman Otomotiv Endüstri A.Ş. ve değerli yöneticilerine teşekkür ederim. İşyerimin desteği, bu çalışmanın başarılı bir şekilde tamamlanmasını sağladı.

İlginiz, sabrınız ve rehberliğiniz için tekrar teşekkür ederim.

Saygılarımla.

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. 1200 kg ağırlığındaki bir benzin motorlu otomobilin 90 km/s hızında yakıt enerjisinin yüzde olarak kullanımını göstermektedir (Demircioğlu, 2007).	2
Çizelge 2.1. Tahmin Edilen Direnç Katsayıları (C_d) ve Buna Karşılık Gelen Direnç Azalması. Charles ve Yang(2019).....	11
Çizelge 2.2. Çekici Kenar Radius ve Ara Boşluğun Değişiminin Aerodinamik Direnç Katsayısına Etkisi (Krishna ve ark., 2018).....	12
Çizelge 3.1. Çekicinin Sayısal Çözümlemesinde Havanın Özellikleri.....	24
Çizelge 3.2. Çekicinin Sayısal Çözümlemesinde İnterpolasyon Seçenekleri.....	24
Çizelge 3.3. Türbülans Modelleri Ve Hesaplanan C_d Değerleri Karşılaştırması	27
Çizelge 4.1. Model-A ve Model-B için Uygulanan Fazlar ve Varyant İsimlendirmeleri	32
Çizelge 4.2. Model-A C_d katsayısı Değerleri	36
Çizelge 4.3. Model-B C_d katsayısı Değerleri	41

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Çekici-Yarı Römork İçin Aerodinamik Direncin Bölgeleri (Wood, 2006)	7
Şekil 2.2. Aerodinamik Treyler Komponentleri (Khosravi ve ark., 2004)	8
Şekil 2.3. Basitleştirilmiş Çekici-Treyler Modeli (Allan 1981).....	9
Şekil 2.4. Çalışmada Kullanılan Basitleştirilmiş Çekici Treyler Geometrisi (Osth ve Krajnovic, 2012)	9
Şekil 2.5. g/b Oranın Değişiminin Direnç Katsayısına Etkisi (Osth ve Krajnavic, 2012)	10
Şekil 2.6. Temel ve direnç azaltma yöntemlerinin farklı konfigürasyonlarına sahip dört durum: (a) Temel durum; (b) Durum 1; (c) Durum 2; (d) Durum 3; (e) Durum 4 (Charles ve Yang 2019).....	11
Şekil 2.7. Kullanılan basitleştirilmiş model (Krishna ve ark., 2018)	12
Şekil 3.1. Çeşitli Araçların Ön Kesit Alanları.....	15
Şekil 3.2. Çeşitli Araçların Aerodinamik Direnç Katsayıları (Wong, 2001)	15
Şekil 3.3 Bir Ağır Vasıtanın Aerodinamik Direncinin Azaltılmasının Yakıt Tüketimi Üzerindeki Etkisi (Solmaz, H. 2010).....	16
Şekil 3.4. Açık ve Kapalı Devre Bir Rüzgâr Tüneli Modeli (Katz, 1995).....	22
Şekil 3.5. Rüzgâr Tüneli Belirlenen Akış Yönü.....	22
Şekil 3.6. Ağ Bağımsızlığı Grafiği.....	25
Şekil 3.7. Türbülanslı Sınır Tabakasının Ağ Yapısı ve Görünüşü 1	26
Şekil 3.8. Türbülanslı Sınır Tabakasının Ağ Yapısı ve Görünüşü 2	26
Şekil 3.9. Türbülanslı Sınır Tabakasının Ağ Yapısı ve Görünüşü 3	26
Şekil 3.10. Türbülanslı Sınır Tabakasının Ağ Yapısı ve Görünüşü 4	27
Şekil 3.11. Realizable k-ε Non Equilibrium Türbülans Modeli Kullanılarak Model-A Aerodinamik Direnç Katsayısı Grafiği	28
Şekil 3.12. Realizable k-ε Non Equilibrium Türbülans Modeli Kullanılarak Model-A Normalize Edilmiş Artıklar Grafiği.....	28
Şekil 4.1. Model-A Olarak Kullanılan Model Çekici Ön kısmı Yuvarlatılmış Çekici-Treyler Modeli Allan (1981).....	30
Şekil 4.2. Çekici Ön kısmı Yuvarlatılmış Çekici-Treyler Modeli Ön ve Yan Görünüş, Model-A Allan (1981)	30
Şekil 4.3. Üst Tarafı Yuvarlatılmış Çekici-Treyler Modeli, Model-B	31
Şekil 4.4. Model-A ve Model-B Yan Görünüş Karşılaştırması	31
Şekil 4.5. Model-A Ana Model Varyant 1 Yan Görünüş.....	32
Şekil 4.6. Model-B Ana Model Varyant 1 Yan Görünüş.....	32
Şekil 4.7. Model-A ve Model-B $\alpha=5^\circ$ Varyant 2 Yan Görünüş.....	32
Şekil 4.8. Model-A ve Model-B $\alpha=10^\circ$ Varyant 3 Yan Görünüş.....	33

Şekil 4.9. Model-A ve Model-B $\alpha=15^\circ$ Varyant 4 Yan Görünüş.....	33
Şekil 4.10. Model-A ve Model-B $\alpha=20^\circ$ Varyant 5 Yan Görünüş.....	33
Şekil 4.11. Model-A ve Model-B $\alpha=25^\circ$ Varyant 6 Yan Görünüş.....	33
Şekil 4.12. Model-A ve Model-B $\alpha=25^\circ$ ve $\beta=1^\circ$ Varyant 7 Yan Görünüş.....	33
Şekil 4.13. Model-A ve Model-B $\alpha=25^\circ$ ve $\beta=2^\circ$ Varyant 8 Yan Görünüş.....	34
Şekil 4.14. Model-A ve Model-B $\alpha=25^\circ$ ve $\beta=3^\circ$ Varyant 9 Yan Görünüş.....	34
Şekil 4.15. Model-A ve Model-B $\alpha=25^\circ$ ve $\beta=4^\circ$ Varyant 10 Yan Görünüş.....	34
Şekil 4.16. Model-A ve Model-B $\alpha=25^\circ$ ve $\beta=5^\circ$ Varyant 11 Yan Görünüş.....	34
Şekil 4.17. Oluşturulan Rüzgâr Tüneli Modeli, Allan(1981).....	35
Şekil 4.18. Rüzgâr Tüneli içine Yerleştirilen Etki Bölgesi Modeli	35
Şekil 4.19. Model-A Aerodinamik Direnç Katsayıları Değişim Grafiği	36
Şekil 4.20. Model-A Tüm Varyantların Basınç Haritaları	38
Şekil 4.21. Model-A Tüm Varyantların Hız Haritaları	39
Şekil 4.22. Model-A Tüm Varyantların Akış Gradyanları.....	40
Şekil 4.23. Model-B Aerodinamik Direnç Katsayısı Değişim Grafiği	41
Şekil 4.24. Model-B Tüm Varyantların Basınç Haritaları	43
Şekil 4.25. Model-B Tüm Varyantların Hız Haritaları	44
Şekil 4.26. Model-B Tüm Varyantların Akış Gradyanları.....	45
Şekil 4.27. Model-A ve Model-B Direnç Katsayısı Değişim Grafiği.....	46
Şekil 5.1. Bukrev(2023)'in incelediği konvansiyonel ve gözyaşı modelleri	47

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	: Alan
C_d	: Aerodinamik Direnç Katsayısı
d	: Çap
F_D	: Aerodinamik Direnç Kuvveti
ω	: Spesifik dağılım oranı
ε	: Türbülans dağılım oranı
u, v, w	: Yer Değiştirme Vektör Bileşenleri
k	: Türbülans kinetik enerji
p	: Basın
S_{ij}	: Ortalama gerinim oranı tensörü
U	: Hız
ρ	: Yoğunluk
$\sigma_\varepsilon, \sigma_k$	: Türbülanslı Prandtl sayıları
μ	: Dinamik vizkozite
σ	: Yüzey gerilimi
t	: Zaman
L	: Uzunluk
m	: Ağırlık
RANS	: Reynolds-averaged Navier–Stokes equations
SST	: Shear Stress Transport
LES	: Large Eddy Simulation
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
BOI	: Body of Influence

1. GİRİŞ

Aerodinamik, hava ile etkileşimde bulunan cisimlerin hareketini inceleyen bir bilim dalı olarak tanımlanır. Motorlu kara taşıtlarının aerodinamik yapıları, aracın performansını, yakıt tüketimini, ivmelenme özelliklerini, yol tutuşunu, çevresel etkilerini, ses düzeyini ve konforunu önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca, motorun, dişli kutusu ve fren sistemlerinin soğutulması, iç mekânın ısıtılması ve havalandırılması gibi unsurların aerodinamik yapı ile doğrudan ilişkisi vardır. Bu nedenle, taşıt etrafındaki hava akışının özellikleri detaylı bir şekilde anlaşılmalı ve buna paralel olarak uygun tasarımlar gerçekleştirilmelidir.

Hareket halindeki taşıtlara çeşitli kuvvetler etki etmektedir ve bu kuvvetleri genellikle hareketi destekleyen kuvvetler ve harekete direnç gösteren kuvvetler olarak kategorize edebiliriz. Hareketi sağlayan kuvvet genellikle motordan üretilen tekerlek tahrik kuvvetidir. Diğer yandan, taşıta karşı koyan kuvvetler arasında hava direnci, transmisyon direnci, yokuş direnci, yuvarlanma direnci ve ivme direnci bulunmaktadır.

Taşıtların aerodinamik tasarımı, özellikle hava direncini en aza indirerek taşıtın genel enerji verimliliğini optimize etmeyi amaçlar. Bu bağlamda, akademik bir perspektifle, taşıtın aerodinamik performansını artırmak için yapılan tasarım müdahaleleri üzerine yapılan araştırmalar büyük önem taşımaktadır. Aynı zamanda, transmisyon sistemi, tekerlekler ve diğer bileşenlerin aerodinamik etkileşimleri üzerine yapılan çalışmalar, taşıtın genel verimliliği üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır.

Motorlu taşıt üreticileri, taşıt performansını ve motor tarafından üretilen gücü arttırmaya yönelik Ar-Ge faaliyetlerine büyük bir vurgu yaparken, aynı zamanda aracın hava içindeki hareketi sırasında ortaya çıkan aerodinamik yapısından kaynaklanan enerji kayıplarını en aza indirme stratejilerini araştırmışlar ve bu konuda sürekli bir çaba içinde bulunmaktadırlar. Üretici firmalar, bu alandaki Ar-Ge çalışmalarına büyük bir stratejik önem atfetmektedirler. Özellikle otomotiv sektöründe daha geniş bir pazar payı hedefleyen üreticiler, araçlarının ekonomik performansını artırmak için ekonomikliği geliştirmenin önündeki önemli engellerden biri olan aerodinamik direnci azaltmak amacıyla yoğun bir şekilde bu tür araştırmalara önemli kaynaklar ayırmaktadırlar.

Bu bağlamda, taşıtların aerodinamik verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar, sektördeki rekabet avantajını elde etmek ve sürdürmek isteyen üretici firmalar için kritik bir konu haline gelmiştir. Hava akışının taşıt üzerindeki etkilerini anlamak ve optimize etmek, hem yakıt ekonomisini iyileştirmek hem de çevresel etkileri minimize etmek açısından önemlidir. Bu nedenle, üreticiler, aerodinamik tasarımın yanı sıra enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik odaklı Ar-Ge çalışmalarına büyük bir öncelik vermektedirler.

Yüksek hızlarda ilerleyen bir karayolu taşıma aracının veya yük nakliye aracının direnç katsayısı (C_d) %3 azaltıldığında, yakıt tüketiminde yaklaşık %1 oranında bir düşüş gözlenmektedir. Türkiye, yılda 60 milyar doların üzerinde bir enerji harcamaktadır ve bu harcamanın önemli bir bölümü petrol türevi yakıtlara yönelmektedir. Bu durum, taşıt yakıt tüketimini minimize etmenin ve milli gelirin

büyük bir kısmının petrol ihracatına bağlılığını azaltmanın giderek daha fazla vurgulanmasını sağlamaktadır. (C. Bayındırlı, 2015)

Ulaşım maliyetlerinin düşürülmesi, sadece taşımacılık sektörünü değil, aynı zamanda genel ekonomiyi de etkileyen kapsamlı bir konu haline gelmiştir. Bu durum, sadece yakıt tasarrufunu değil, aynı zamanda çeşitli sektörlerde faaliyet gösteren işletmelerin genel maliyetlerini azaltarak rekabet avantajı sağlayabilir.

Motorlu taşıtlarda üretilen güç, hava direnci ve sistem içindeki kayıpları dengelemek amacıyla bir düzen oluşturur. Düşük hızlarda, hava direnci diğer kayıplarla karşılaştırıldığında oldukça düşük seviyededir. Ancak hız 30-40 km/s'ye ulaştığında, hava direnci belirgin bir faktör haline gelir (Çizelge 1.1.). Bu durum, hava direncinin hızın karesiyle doğru orantılı olarak artmasından kaynaklanmaktadır (Demircioğlu, 2007).

Çizelge 1.1. 1200 kg ağırlığındaki bir benzin motorlu otomobilin 90 km/s hızında yakıt enerjisinin yüzde olarak kullanımını göstermektedir (Demircioğlu, 2007).

Kayıplar	Kısmi yük (Sabit hız)	Tam yük (İvme veya yokuş)
Termodinamik kayıplar	% 78	% 72
Yardımcı sistemler	% 5	% 5
Tekerlek yuvarlanma kaybı	% 4.6	% 2
İvme veya yokuş kaybı	% 0	% 14.3
Aerodinamik kayıplar	% 10.6	% 5.9
Transmisyon kaybı	% 1.8	% 0.8
Taşıta verilen toplam enerji	% 100	% 100

Direnç katsayısı C_d 'nin azaltılabilmesi için araç formları, aerodinamikte damla formuna benzetilmeye çalışılmaktadır. En ideal şekil, su damlası şeklinde bilinen, yatay eksene göre simetrik olan yapıya aittir. Damla formu, doğrusal akışta bilinen en az bozuntuya sebep olan yapıyla dikkat çeker.

Bu araştırmanın temel hedefi, yaygın olarak tercih edilen çekici ve treylerlerin aerodinamik yapılarını detaylı bir biçimde incelemek ve pasif akış kontrol yöntemleri aracılığıyla aerodinamik performanslarında gelişme sağlamaktır. Çekici ve treylerler, özellikle şehirlerarası yollarda yüksek hızlarda uzun mesafelerde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu nedenle, araçlardaki aerodinamik iyileştirmeler, geniş bir operasyonel ölçekte toplam araç sayısı düşünüldüğünde daha da önemli bir hal almaktadır.

Bu çalışmanın kapsamında, çekici treylerlerde aerodinamik direnç oluşturan bölgeler, hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak belirlenmiş ve elde edilebilecek aerodinamik iyileşme potansiyeli pasif akış kontrol yöntemiyle açıklanmıştır. Bu araştırmanın özgünlüğü, tasarlanan pasif akış kontrolü elemanlarının özel bir şekilde konumlandırılması ve tasarlanmasıdır. Pasif akış kontrolü

ile elde edilecek iyileşme miktarı, iki farklı model üzerinde ayrıntılı bir şekilde belirlenmiş olup, bu aerodinamik gelişmenin literatüre ve endüstriye önemli katkılarda bulunabileceği düşünülmektedir





2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Araçlara etki eden direnç kuvvetleri arasında en önemli olan, özellikle yüksek hızlarda araç performansını ve yakıt tüketimini önemli ölçüde etkileyen aerodinamik dirençtir. Bir taşıtın ortalama 100 km/h hızında seyir halindeyken, gücünün %50-70'ini aerodinamik direnç kuvvetlerini aşmak için harcadığı bilinmektedir (Modi ve ark., 1995, Çakmak, 2000). Aerodinamik direnç kuvveti, hızın karesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu nedenle, özellikle şehir dışında yüksek hızlarda ve yılda çok sayıda kilometre kat eden ağır vasıtalar için aerodinamik direnç, seyirlerinin önemli bir bölümünü oluşturan bir faktör haline gelmektedir.

Harun Chowdhury ve arkadaşları (2013), Çekici ve yarı-römork arasındaki boşluğu da doldurmayı ve yanal korumayı içeren farklı tasarımsal geliştirmeler ile aerodinamik sürtünmeyi %26 ya kadar azaltmanın mümkün olduğunu araştırmışlardır.

Stadler Severin ve Hirz Mario (2014), yaptıkları çalışmada iki farklı tasarım olan Kamyon A'da ve Kamyon B'de aerodinamik direnç katsayısında %15- %23 iyileştirme ve yakıt tüketiminde ise %6.5'e ve %10.2'ye varan azalma sağlandığını analiz etmişleridir. Yakıt tüketimindeki düşüşün aksine, geliştirilen yarı-römork tasarımları ile faydalı yük alanında, %3.2 (Kamyon A varyantı) ile %6.1 (Kamyon B varyantı) azalma olduğunu araştırmışlardır.

C. Hakansson ve M.J. Lenngren (2010) "CFD Analysis of Aerodynamic Trailer Devices for Drag Reduction of Heavy Duty Trucks" adlı yüksek lisans tezinde treyler alt takımı ve tabanın en yüksek aerodinamik etkilerin olduğu bölgeler olduğunu tespit etmişlerdir. Yan kapama ve şasi uzantısı ile bu bölgelerdeli akışın iyileştirilebileceğini araştırmışlardır.

C.Bayındırlı (2015) "Çekici ve Çekici Römork Kombinasyonlarında Aerodinamik Dirençlerin İncelenmesi" adlı doktora tezinde yaptığı araştırmada, çekici ve yarı römork kombinasyonu ile en yüksek %23.85'lik bir aerodinamik iyileşme ortaya koyulmuştur. Bu iyileşme yaklaşık %12 oranında yakıt tüketimini azaltmaktadır.

R. Miralbes (2012), yaptığı araştırmada tanker yarı römorkunun aerodinamik olarak akışın pürüssüz olarak ayrılmasını sağlayacak bir tasarım ile %23'e kadar bir aerodinamik iyileştirme elde etmiştir. Bu oran da yakıt tüketiminde %11 oranında azalmaya denk olabildiği araştırılmıştır.

Wood ve Bauer (2003) yaptıkları çalışmada, optimal koşullar altında geliştirilmiş bir çekici ve römorkun aerodinamik direnç katsayılarının 0.6 ile 0.7 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Aerodinamik açıdan optimize edilmemiş bir çekici ve römork kombinasyonunun ise direnç katsayısının 0.7 ile 0.9 arasında olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak, 6 km/h hızındaki bir çekici römork kombinasyonunun aerodinamik direnç katsayısında %2'lik bir iyileşme, yakıt tüketimini %1 azaltmaktadır. Bu araştırmada belirlenen en yüksek iyileşme oranı %23.85'tir ve yüksek hızlarda bu seviyedeki aerodinamik gelişme, yakıt tüketimini yaklaşık %12 azaltabilmektedir.

Krajnovic ve Davidson (2005) tarafından yürütülen çalışma, eğimli arka geometriye sahip basitleştirilmiş bir taşıt üzerinde akışa maruz kalan hareketli bir zeminin etkilerini ele almaktadır. Araştırma sonuçlarına göre, hareketli zeminin C_d katsayısını %8 ve C_l katsayısını %16 oranında azalttığı tespit edilmiştir. LES (Large Eddy Simulation) adlı türbülans modeli bu çalışmada kullanılmıştır.

Aider ve arkadaşları (2009) tarafından yapılan çalışmada, Ahmet modeli kullanılarak aracın arka kısmındaki akış yapıları incelenmiştir. Araçta direnç ve kaldırma kuvvetlerini azaltmak amacıyla özgün olarak tasarlanan yamuğu andıran aparat geliştirilmiş ve çalışmalar rüzgâr tüneli deneylerinde gerçekleştirilmiştir. Bu özgün tasarımların Ahmet modeline eklenmesiyle direnç kuvvetinde %12'lik bir azalma ve kaldırma kuvvetinde ise %60'lık bir azalma iyileşme sağlanmıştır.

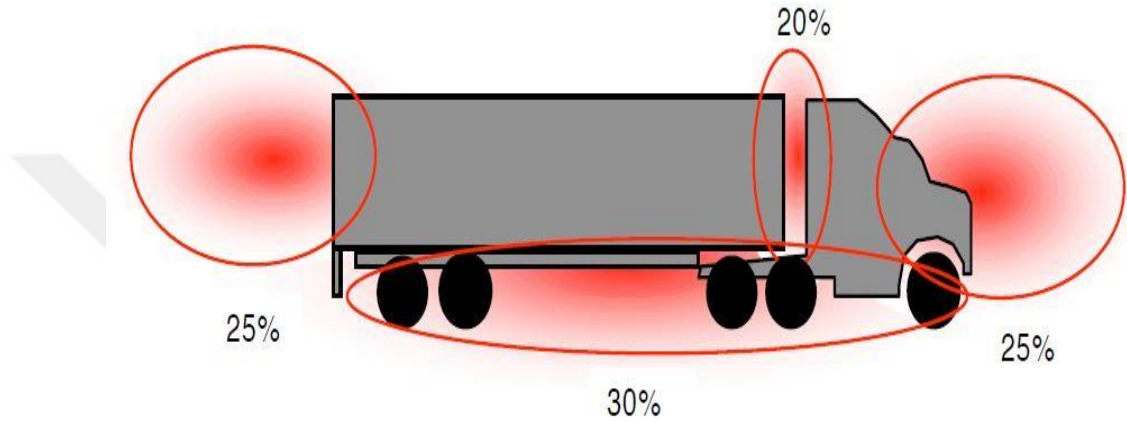
Akansu (2016) tarafından yapılan çalışmada, bir rüzgâr tüneline 1/32 ölçekli bir ağır taşıtın üzerinde üç farklı modelin aerodinamik direnç katsayıları deneysel olarak incelenmiştir, Reynolds sayısı bağımsızlığı kullanılarak. İlk modelde sadece rüzgâr etkisi simüle edilirken, ikinci modelde rüzgâra ek olarak pasif akış kanalı kullanılmış ve üçüncü modelde ise rüzgâr, pasif akış kanalı ve aracın arkasına monte edilen bir yönlendirici kombinasyonu incelenmiştir. Bu modellerin direnç kuvveti katsayıları hesaplanmış ve aerodinamik iyileştirme oranları sırasıyla %15.71, %22.46 ve %25.58 olarak hesaplanmıştır.

Waltzer (2015) çalışmalarında, çekici treyler üzerinde aerodinamik özellikleri iyileştirmek için kabin ile gövde arasına doldurucu parça, şasi eteği ve konik kuyruk gibi iyileştirmeler yapmışlardır. Akışı kontrol etmişler ve tüm parçaların konfigürasyonunda %25.2 oranında bir aerodinamik iyileşme elde etmişlerdir.

Gutierrez ve arkadaşları (1996), Sandia Ulusal Laboratuvarlarında geliştirilen Ground Transportation System (GTS) adlı basitleştirilmiş kamyon geometrisi şekline sahip model üzerinde deneysel ve HAD çalışmaları gerçekleştirdiler. Çalışmalarında 1/8 ölçekli GTS modeli etrafındaki akışı incelediler, rüzgar tüneli deneyleri gerçekleştirdiler ve Navier-Stokes denklemleri temelli HAD çalışmaları yaptılar. Ayrıca, GTS geometrisine ağır vasıtalar için aerodinamik direnci azaltıcı parçalar ekleyerek bu parçaların etkilerini incelediler. Yalpa açısı $\psi = 0$ ve -10 için deney ve HAD sonuçlarını (basınç katsayısı değerleri, hız vektörü dağılımları) karşılaştırdılar ve HAD kodlarının doğruluğunu araştırdılar.

Ogburn ve Ramroth (2007) tarafından yapılan çalışmada, gerçek bir ağır vasıta aracında bazı eklerin kullanılmasıyla %20'ye kadar iyileşme sağlanabileceği belirtilmiştir. Bu iyileştirmenin, 105 km/h hızında seyreden bir araç için yakıt tüketiminde %10'a varan azalma sağlayabileceği ifade edilmiştir. Spoiler ile %2, şasi eteği ile %4, römorkun arka kısmının iyileştirilmesiyle %6 ve çekici ile römork boşluğuna kaporta eki yerleştirilerek %2'lik bir yakıt tüketimi iyileşmesi elde edilmiştir.

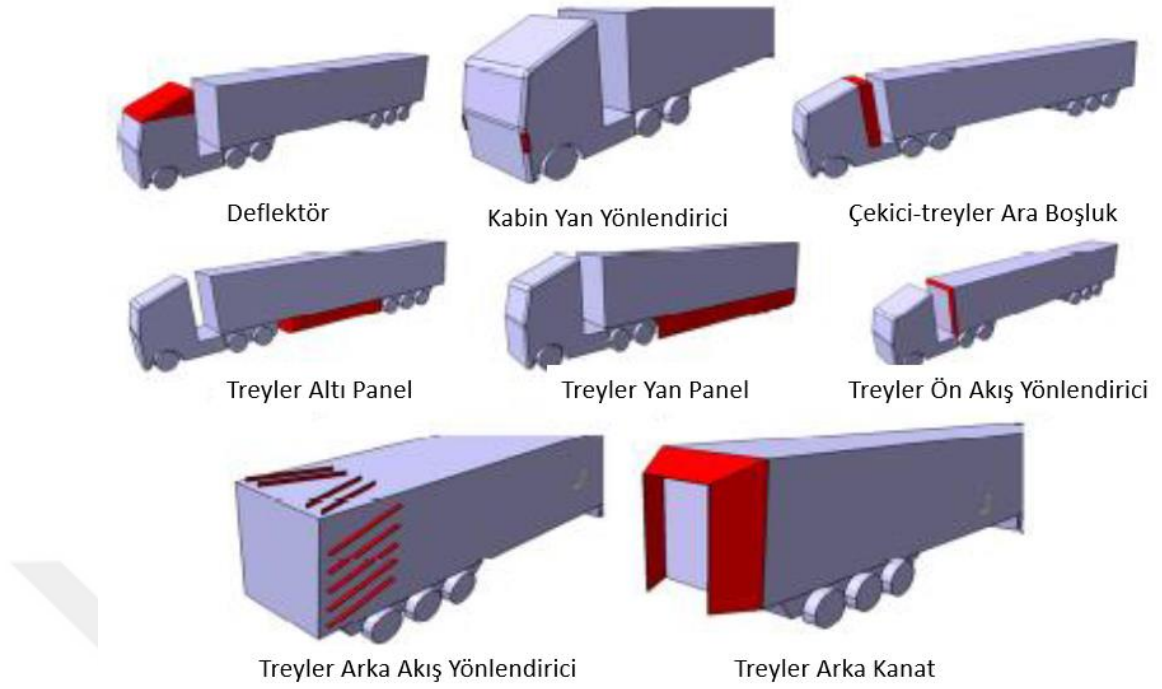
R. C. Wood (2006), ağır vasıtalarda basınca bağlı aerodinamik direnci oluşturan bölgeleri ve özel olarak aerodinamik direnç katsayısına etkilerini tespit etmişlerdir. Şekil 2.1'de ağır vasıtalarda basınç direncinin yüksek olduğu bölgelerin ön yüzey, tekerlekler, çekici ve römork arasındaki boşluk ve taşıtın arkası olduğunu ifade etmiştir. Burada özellikle çekici römork boşluğu, römorkun altı ve römorkun arka kısmındaki dirençler değişik aerodinamik parçalarla azaltılmaya çalışılmışlardır. Şekil 2.1'de bu bölgeler görülmektedir.



Şekil 2.1. Çekici-Yarı Römork İçin Aerodinamik Direncin Bölgeleri (Wood, 2006)

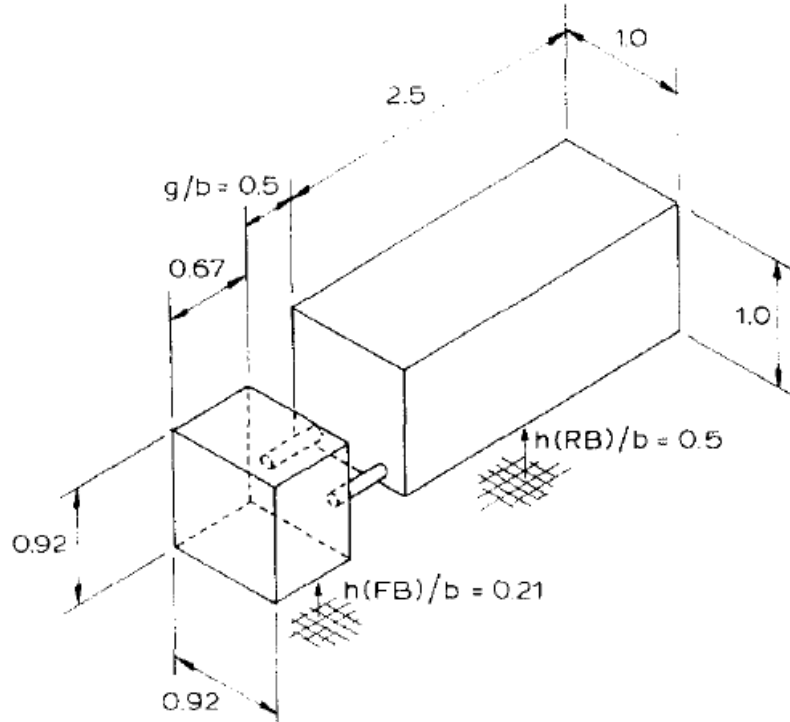
Buresti ve arkadaşları (2007) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ağır vasıtalarda aerodinamik iyileştirmeler için çeşitli tekne kuyruğu modelleri geliştirilmiştir. Tekne kuyrukları kullanarak aerodinamik iyileştirmenin %5 ila %10 arasında olabileceği öne sürülmüştür. Ayrıca, römork üzerine yerleştirilen hareketli silindirlerin ve çekici ile römork arasındaki negatif basıncı azaltmanın ve tekerlekleri kapatmanın aerodinamik direnç katsayısına etkisini sayısal yöntemle hesaplamışlardır.

Treyler-çekici kombinasyonları için geliştirilebilecek çeşitli aerodinamik akış kontrol yöntemleri bulunmaktadır; bu, Şekil 2.2'de gösterilen parçalar arasında arka kanat, çekici ve treyler arasındaki boşluğu kapatmaya yardımcı olan kabin uzatmaları, yan uzatmalar ve kamyonun altındaki hava akışını azaltan bir ön tampon hava damlası bu yöntemler arasındadır. Çalışma, çeşitli ek parçaların direnç katsayısını azaltmadaki etkinliğini vurgulamaktadır. Deflektör kullanımının, belirli bir açıda aerodinamik direnci önemli ölçüde azalttığı gözlenmiştir. Ayrıca, çekicinin ön kenarlarına yuvarlatma eklemek de direnci önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir. Deflektör açısı ve çekici köşe yuvarlatması optimizasyonu, hava akışı ve basınç dağılımı çalışmalarında önemli olduğu iddia edilmiştir. Tüm ek parçalar ile birlikte, aerodinamik direncin dikkate değer bir (%41) azalması elde edildiği belirtilmiştir (Khosravi ve ark., 2004).



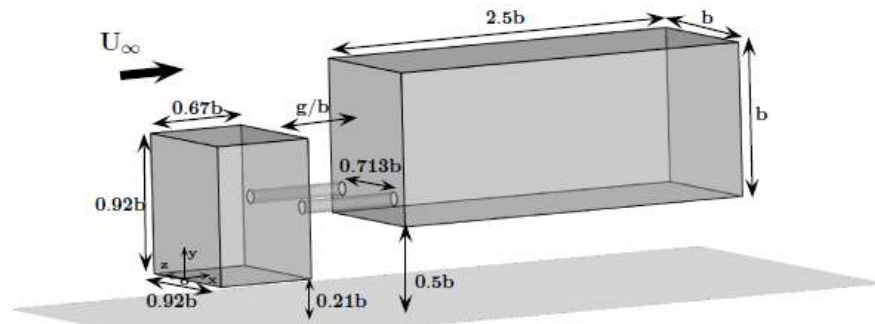
Şekil 2.2. Aerodinamik Treyler Komponentleri (Khosravi ve ark., 2004)

Allan (1981) yaptığı çalışmada, basitleştirilmiş çekici-treyler modelinin aerodinamik özelliklerini detaylı bir şekilde incelemektedir. Rüzgâr tüneli testlerinde, öndeki kabini ve arkadaki yükü temsil eden iki kutu kullanılmıştır. Bulgular, iki kutulu tandem modeldeki aerodinamik direncin, kutuların ayrı ayrı dirençlerinden toplamından daha düşük olduğunu ve yer seviyesine yakınlığın aerodinamik direnci etkilediğini göstermektedir. Ayrıca, öne ve arkaya bakan yüzeylerdeki basınç ölçümleri, her yüzeyin dirence katkısını ve yüksek basınç ile emiş bölgelerini ortaya koymaktadır. Kenarları yuvarlatılmış modellerde, aradaki boşluk genişledikçe aerodinamik direnç daha hızlı artmakta ve eklenen sürükleme azaltıcı yöntemlerin (dikey ve yatay plakalar) yuvarlatılmış modellerde direnci önemli ölçüde azaltmaktadır. Örneğin, yatay plaka, yuvarlatılmış kenarlı modelde direnci %41 oranında azaltmıştır. Çalışma, ticari araçlarda yakıt tüketimini azaltmak için aerodinamik direnç katsayısını nasıl değiştirilebileceğini ve hangi pasif akış kontrol yöntemlerinin etkili olduğunu göstermektedir. Şekil 2.3'te kullanılan model görülmektedir.

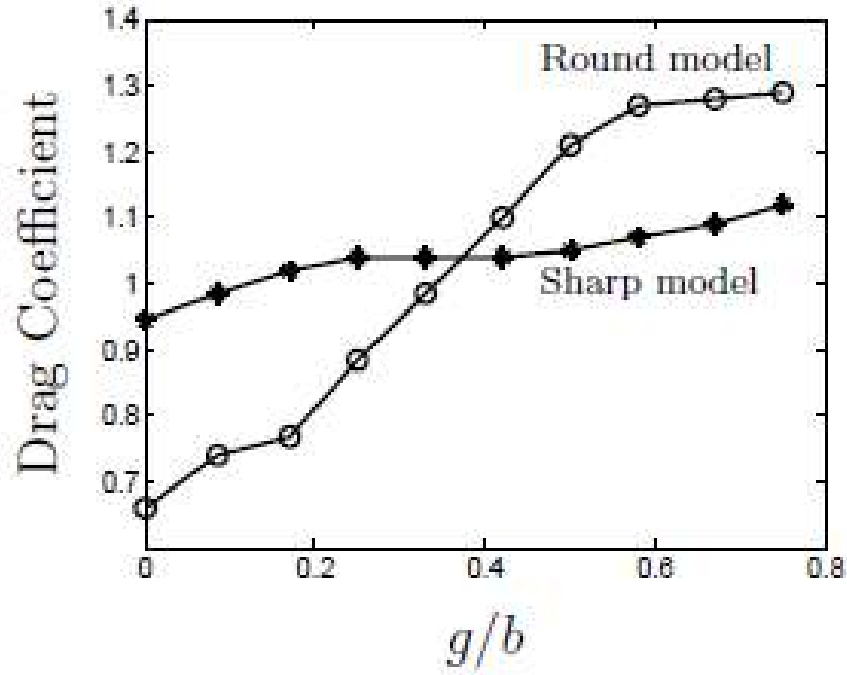


Şekil 2.3. Basitleştirilmiş Çekici-Treyler Modeli (Allan 1981)

Osth ve Krajnavic (2012), Basitleştirilmiş çekici-treyler modelinin aerodinamik performansı incelemişlerdir. Modelin geometrisindeki değişikliklerin, özellikle çekici ile treyler arasındaki boşluğun (g/b oranı) genişliğinin, toplam hava direnci üzerinde önemli etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Keskin kenarlı ve yuvarlatılmış kenarlı çekici ön yüzeyleri arasında karşılaştırmalar yapılırken, farklı boşluk genişlikleri de değerlendirilmiştir. Yuvarlatılmış kenarlar, küçük boşluk genişliklerinde aerodinamik direnci önemli ölçüde azaltırken, boşluk genişledikçe bu etki azalmakta ve hatta belirli bir noktadan sonra aerodinamik direnç artışına yol açmaktadır. Bu bulgular, çekici-dorse araçlarının aerodinamik tasarımında önemli parametreler olarak dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir. Şekil 2.4'te çalışmada kullanılan geometri görülmektedir. Şekil 2.5'te ise hesaplanan aerodinamik direnç katsayıları grafiği yer almaktadır.

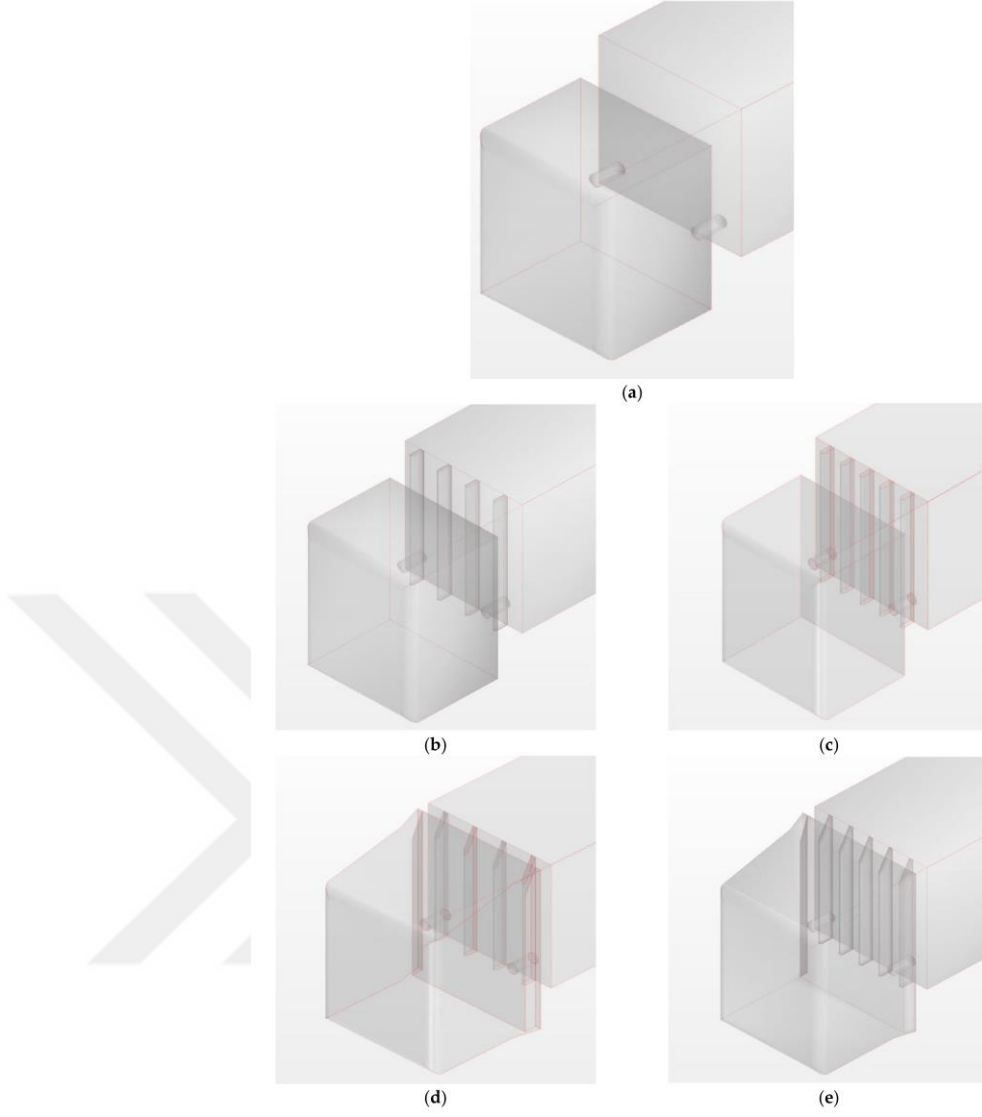


Şekil 2.4. Çalışmada Kullanılan Basitleştirilmiş Çekici Treyler Geometrisi (Osth ve Krajnovic, 2012)



Şekil 2.5. g/b Oranın Değişiminin Direnç Katsayısına Etkisi (Osth ve Krajnavic, 2012)

Charles ve Yang(2019) çalışmalarında, farklı aerodinamik direnç azaltma yöntemlerinin bir çekici treyler modelinin aerodinamik verimliliği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sayısal simülasyonlar kullanan çalışmada, çekici-römork boşluk bölgesine odaklanarak dört adet sürtünme azaltıcı yöntem konfigürasyonunu test etmişlerdir. Sonuçlar, özellikle bir tavan deflektörü, yan uzatıcılar ve beş çapraz akış girdap kapanı yöntemini birleştiren Durum 4'te (%24.2 azalma) önemli sürtünme azalması olduğunu göstermektedir. Çalışma, direncin azaltılmasındaki ana mekanizmanın treylerin ön yüzündeki basıncın azaltılması olduğunu ve traktör-treyler boşluğundaki türbülansın azaltılmasının genel direnç azalmasına daha az katkıda bulunduğunu ifade etmişlerdir. Araştırmalarında, maksimum aerodinamik verimlilik için farklı aerodinamik performansı iyileştiren akış kontrol yöntemlerinin birleştirilmesinin etkinliğini vurgulamışlardır. Şekil 2.6'da kullanılan modelleri görülmektedir. Çizelge 2.1'de ise hesaplanan aerodinamik direnç katsayıları belirtilmiştir.



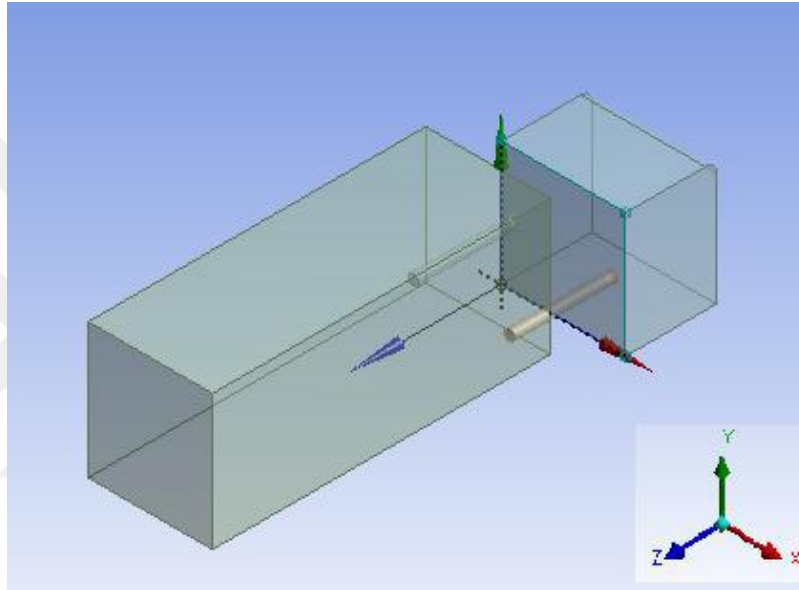
Şekil 2.6. Temel ve direnç azaltma yöntemlerinin farklı konfigürasyonlarına sahip dört durum: (a) Temel durum; (b) Durum 1; (c) Durum 2; (d) Durum 3; (e) Durum 4 (Charles ve Yang 2019)

Çizelge 2.1. Tahmin Edilen Direnç Katsayıları (C_d) ve Buna Karşılık Gelen Direnç Azalması.
Charles ve Yang(2019)

	C_d	Direnç Değişimi
Baz Model	0.537	
Durum 1	0.522	2.8%
Durum 2	0.516	3.9%
Durum 3	0.421	21.6%
Durum 4	0.407	24.2%

Krishna ve ark., 2018. yaptıkları çalışmada, basitleştirilmiş çekici treyler geometrisi için aerodinamik direnç azaltma yöntemlerini incelemişlerdir. Çalışmada, kamyonun çekici ve dorse arasındaki boşluk genişliği ve çekicinin ön yüzeyinin tasarımı gibi faktörlerin direnç kuvvetine etkileri ele alınmıştır. Çeşitli boşluk genişlikleri ve çekici ön yüzey tasarımları ile deneyler yapılarak, bu değişikliklerin kamyonun aerodinamik direnç katsayısına olan etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlar, bu tasarım değişikliklerinin, özellikle boşluk genişliğinin ve çekici ön yüzeyinin yuvarlaklığının, direnç kuvvetini azaltmada etkili olduğunu göstermeyi amaçlamışlardır.

Şekil 2.7’de kullanılan model görülmektedir. Çizelge 2.2’de ise kenar radius ve çekici treyler arasındaki boşluğun aerodinamik direnç katsayısına etkisine ait veriler yer almaktadır.



Şekil 2.7. Kullanılan basitleştirilmiş model (Krishna ve ark., 2018)

Çizelge 2.2. Çekici Kenar Radius ve Ara Boşluğun Değişiminin Aerodinamik Direnç Katsayısına Etkisi (Krishna ve ark., 2018)

S.No	Çekici Kenar Radiusları	Ara Boşluk (mm)	Aerodinamik Direnç Katsayısı
1	0	110	0.945
2	0	200	0.963
3	0	230	0.968
4	24.4	110	1.032
5	24.4	200	1.008
6	24.4	230	0.998
7	48.8	110	0.995
8	48.8	200	0.952
9	48.8	230	0.925

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği), araç aerodinamiğinde direnç katsayısını incelemek ve optimize etmek için değerli bir araçtır. Araçların etrafındaki hava akışını simüle ederek, HAD mühendislerin yüksek direnç bölgelerini belirlemelerine ve tasarım değişiklikleri yaparak aerodinamik direnci azaltmalarına olanak tanır. Araç şekli, gövde tasarımı ve çeşitli bileşenlerin değerlendirilmesini ve optimize edilmesini sağlayarak direnci en aza indirmek ve yakıt verimliliğini artırmak mümkün olur. HAD simülasyonları, akış desenleri, basınç dağılımları ve direnç üreten özellikler hakkında değerli bilgiler sunar, bu da araçların genel performansını artırmaya yönelik akıcı tasarımların geliştirilmesine yardımcı olur.

Aerodinamik HAD çalışmalarının ardındaki fiziksel prensipler, akışkan mekaniği prensiplerini araçların etrafındaki hava akışını simüle etmek ve analiz etmek için uygundur. Araç tasarımındaki aerodinamik HAD çalışmaları, kütle korunumuyla kütlenin akış oranının sabit kalmasını sağlar. Momentumun korunumu, Navier-Stokes denklemleri tarafından yönetilen, kuvvetleri hesaplar ve akışkanın ivme ve hız dağılımını tanımlar. Enerjinin korunumu, akış içindeki termal ve mekanik enerji transferlerini ele alır. Turbulans modelleme, turbülans etkilerini yaklaştırır, uygun sınır koşulları ise alan sınırlarında akışkan davranışını tanımlar. Ağ oluşturma, sayısal çözüm için alanı parçalara böler ve simülasyon doğruluğunu etkiler. Bu prensiplerin uygulanması, akış desenleri, basınç dağılımları ve kuvvetler hakkında içgörüler sunarak araç tasarımlarını artırılmış verimlilik ve performans için optimize etmeye yardımcı olur (Henne P.A., 1990).

3.2. Aerodinamik Direnç Kuvveti

Aerodinamik direnç; biri taşıt gövdesinin dışından akan hava akışı, diğeri ise ısıtma, havalandırma ve soğutma maksadıyla motor soğutma sistemi ve aracın içinden akan akış olarak iki ana faktör tarafından ortaya çıkmaktadır. Yokuş direnci hızdan bağımsızdır ve düz yoldaki bir harekette göz ardı edilir. Aerodinamik direnç kuvveti taşıt hızının artması ile artış göstermektedir. (Levin ve Rigdal, 2011).

Aerodinamik yapılara göre dış aerodinamik direnç, çoğunlukla basınç direnci ve yüzey sürtünmesi olarak bilinen iki etmenden oluşmaktadır. Basınç direnci taşıt gövdesi üzerinde yüzeye normal yönde yani dik bir etki oluştururken, sürtünme direnci ise taşıt yüzeyine bitişik, teğetsel olarak etki etmektedir. Basınç direnci, normal basıncın taşıtın hareketine karşı etki eden bileşenidir. Göreceli bir referansta, taşıtın durduğu ve hava akışının önden arkaya doğru hareket ettiği kabulü yapılabilir. Hareket esnasında karşıdan gelen hava akışı, taşıtın ön kısmına çarpar ve tamamen durarak bir yüksek basınç bölgesi oluşturur. Arka kısımda ise, taşıt yapısındaki ani

değişiklikler sebebiyle akış, taşıtın arka bölgesinden ayrılmaya zorlanır ve taşıtın arkasında, içeride düşük bir basınçla ilişkili bir çevrinti bölgesi oluşur.

Bu ayrılmış akış, art izi olarak adlandırılmaktadır. Taşıtın önde ve arkada oluşan basınç farkı, basınç direnci olarak bilinir ve taşıtın ilerlemesi sırasında önemli bir karşı koyucu kuvvet oluşturur. Ayrıca, taşıtın yüzeylerindeki akış, gövde yüzeyinde teğetsel bir kayma kuvveti üretir. Bu yüzey kuvveti, sürtünme direnci olarak adlandırılır ve akışkanın viskozitesinden kaynaklanır. Yüzey sürtünme direnci, enerji kaybının bir kaynağıdır (Levin ve Rigdal, 2011; Altınışık, 2013). Basınç direnci ve sürtünme direnci arasında, basınç direnci genellikle çok daha büyük bir bileşen olup, standart bir yolcu aracının toplam dış aerodinamik direncinin %90'ından fazlasını oluşturur. Ancak, uzun araçlar gibi otobüs, kamyon veya çekici-römork gibi araçlarda, yüzey sürtünmesi daha belirleyici hale gelmektedir (Wong, 2001). Bir aracın aerodinamik direnci, genellikle taşıtın etrafındaki basınç farklarından (%80), taşıtın yüzeyindeki sürtünmeden (%10) ve hava akışının radyatör, motor bölmesi ve iç kabin gibi alanlardan geçerken oluşturduğu sürtünme kaybından (yaklaşık %10) kaynaklanır. Aerodinamik direnç kuvveti, denklem 3.1 ile N cinsinden hesaplanır.

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot U^2 \quad (3.1)$$

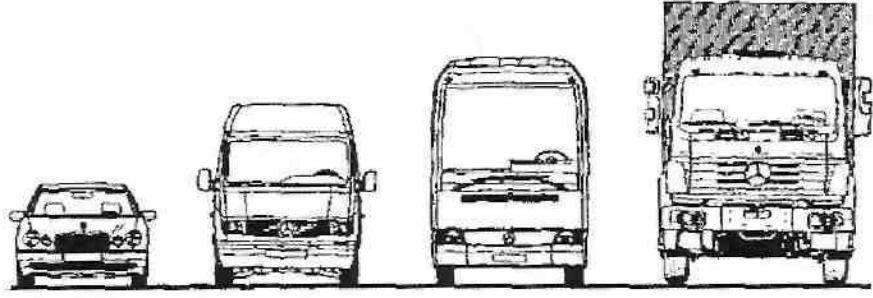
Burada F_D , N cinsinden aerodinamik direnç kuvvetini; ρ , kg/m^3 cinsinden havanın yoğunluğunu; A , m^2 cinsinden hareket yönünde taşıtın ön izdüşüm alanını; U ise m/s cinsinden havanın bağıl akış hızını ifade etmektedir.

3.3. Aerodinamik Direnç Katsayısı

Aerodinamik direnç katsayısı, genellikle C_d olarak belirtilir ve bir nesnenin bir akışkan, genellikle hava, içinden hareket ettiği direnci nitelendiren boyutsuz bir değerdir. Bu, nesnenin aerodinamik verimliliği veya direnç miktarını ne kadar azalttığını ölçer.

Aerodinamik direnç katsayısı, nesnenin şekli, yüzey pürüzlülüğü ve akış yönüne göre olan konum gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Daha düşük bir direnç katsayısı, daha akışa uygun ve aerodinamik olarak daha verimli bir tasarımı gösterir, bu da hava direncinin azaltılmasına yol açar.

Direnç katsayısını belirleme, deneysel testler, hesaplamalı simülasyonlar veya bunların bir kombinasyonunu içerebilir. Rüzgâr tüneli deneyleri ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları, farklı nesneler veya araç şekilleri için direnç katsayısını ölçmek veya tahmin etmek için yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Şekil 3.1'de çeşitli araçların ön kesit alanları belirtilmiştir.

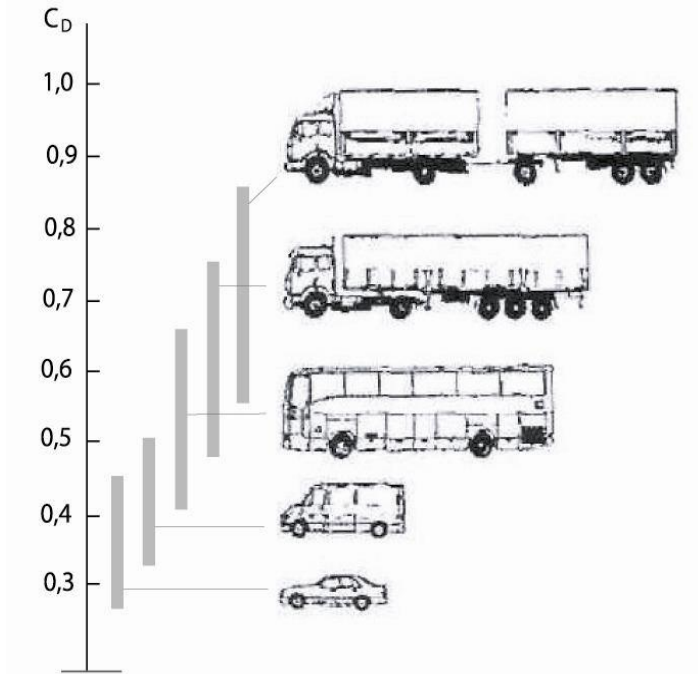


Şekil 3.1. Çeşitli Araçların Ön Kesit Alanları

Direnç katsayısı, araç aerodinamiğinde kritik bir parametre olup doğrudan performansı, yakıt verimliliğini ve kararlılığı etkiler. Tasarımı optimize etmek ve direnç katsayısını azaltmak, artan yakıt ekonomisi, artan hız, daha iyi kontrol ve azalmış emisyonlar gibi avantajlar sağlayabilir. Direnç katsayısı formülü ise şu şekildedir (denklem 3.2);

$$C_d = \frac{2.F_D}{\rho.A.U^2} \quad (3.2)$$

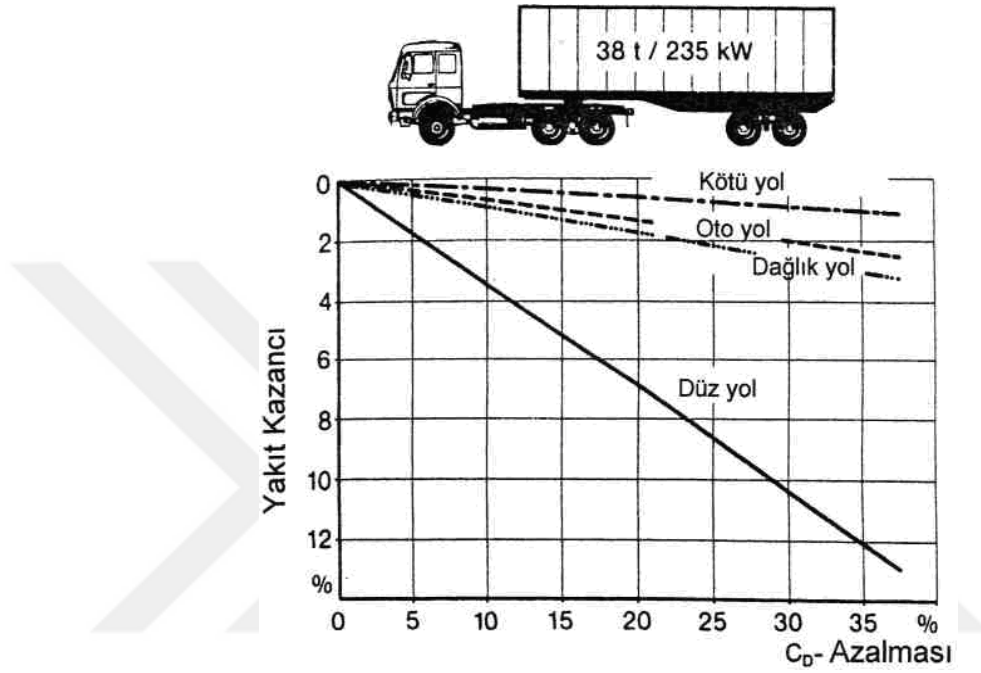
Burada F_D direnç kuvvetini, ρ yoğunluğu, A ön kesiti alanını ve U ise hızı temsil eder. Şekil 3.2’de çeşitli araçların aerodinamik direnç katsayıları belirtilmiştir.



Şekil 3.2. Çeşitli Araçların Aerodinamik Direnç Katsayıları (Wong, 2001)

3.4. Aerodinamik Direnç ile Yakıt Tüketimi İlişkisi

Direnç azalmanın, tipik bir araç üzerinde ve belirli yol şartlarında elde edilebilecek yakıt tasarrufu değerini incelemek önemlidir. Şekil 3.3'te, 40 tonluk bir çekicinin aerodinamik direnç değerindeki iyileştirmenin sonucunda meydana gelecek yakıt tasarrufu miktarı, çeşitli yol koşullarında gösterilmiştir. Şekil 3.3'te bir ağır vasıta aracının yol durumuna göre yakıt kazancı grafiği gösterilmiştir Solmaz, H. (2010).



Şekil 3.3 Bir Ağır Vasıtanın Aerodinamik Direncinin Azaltılmasının Yakıt Tüketimi Üzerindeki Etkisi (Solmaz, H. 2010)

Görüldüğü gibi, düz bir yolda hareket eden bir aracın rüzgâr direnç katsayısının %15 oranında iyileştirilmesi durumunda, taşıtın yakıt tüketiminde yaklaşık %5'lik bir azalma sağlanmaktadır. Aracın toplam direnç katsayısındaki iyileştirmelerin yakıt tüketimi üzerindeki etkisi, taşıtın daha yüksek hızlarda seyrettiği düz yollarda daha belirgin olmaktadır. Bu durum, yüksek hızlarda aerodinamik direncin artmasından kaynaklanmaktadır. Solmaz, H. (2010) Ancak, engebeli yollarda aracın genellikle daha düşük hızlarda seyretmesi, aerodinamik direncin azalmasına neden olur. Bu durum, aracın gövdesinin hava akışına karşı daha az direnç göstermesine yol açar. Sonuç olarak, aerodinamik direnç katsayısındaki düşüş, yakıt tüketimine olan etkisini azaltır. Bu durum, özellikle yüksek hızlarda seyahat etmeyen araçlar için yakıt verimliliğini artırabilir ve dolayısıyla toplam yol maliyetlerini azaltacaktır.

3.5. Kütlenin Korunumu

Kütle Korunumu Prensibi Kütle korunumu prensibi, bir kapalı sistem içinde kütlenin yaratılamayacağını veya yok edilemeyeceğini belirtir. Aerodinamik HAD'da bu prensip, hava

akışının simülasyonu için uygulanır ve hesaplama alanına giren ve çıkan kütle akış hızının sabit kalmasını sağlar (denklem 3.3).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

3.6. Momentumun Korunumu

Momentumun korunumu, Newton'un hareketin ikinci yasasına dayalı olarak akışkanların hareketini yönetir. Aerodinamik HAD'da Navier-Stokes denklemleri, momentumun korunumunun çözümlenmesi için kullanılır; bunlar, akışkan üzerinde etki eden kuvvetleri, basınç, viskozite ve cisim kuvvetleri gibi hesaplar. Bu denklem, akışkanın hareketinin ivmesini ve hız dağılımını tarif eder (3.4).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \frac{\partial P}{\partial x_j} + B_j + V_j \quad (3.4)$$

Burada, μ , P , B ve V , sırasıyla viskozite, basınç, kütle kuvveti ve viskoz terimlerini temsil eder; bunlar denklemin sağ tarafında bulunur.

3.7. Türbülans Modelleri

Bilgisayar destekli akışkanlar dinamiği (HAD) türbülans modelleri, karmalık ve karmaşık akışkan hareketini simüle etmek ve anlamak için hayati araçlardır. Türbülantlık, öngörülemez ve kaotik akışkan hareketiyle karakterize edilen bir durumdur ve havacılık, otomotiv, enerji ve çevre mühendisliği gibi çeşitli alanlarda karşılaşılır. Bu modeller, hız dalgalanmaları, türbülans şiddeti ve enerji tüketimi gibi önemli türbülans özelliklerini açıkça tüm küçük türbülans yapılarını çözümleneksizin öngörmeyi amaçlar. Farklı türbülans modelleri bulunmaktadır; her birinin kendi varsayımları ve hesaplama metodolojileri vardır.

Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) modelleri, verimlilikleri nedeniyle özellikle popülerdir. Bunlar, türbülans kinetik enerji ve türbülans tüketim hızı gibi türbülansla ilişkili büyüklükleri simüle etmek için ek taşıma denklemlerini kullanırlar. Yukarıda açıklanan gibi akış karakteristiklerini ilgili akışın zaman bağımlı süreklilik ve momentum denklemlerine yerine koyarak ve bunların istatistiksel ortalamalarını alarak, istatistiksel olarak ortalama momentum denklemleri elde edilir.

Eddy Viskozite Modeli, Reynolds gerilimleri ile ortalama akış gradyanları arasında bir ilişki kurmak için kullanılır. Türbülans gerilimleri, gerilim büyüklüğüyle orantılı kabul edilir ve bu modeldeki eddy viskozite değerleri türbülans taşıma denklemlerinden elde edilir.

3.7.1. Standart k-ε Türbülans Modeli

İki denklemlili türbülans modelleri arasında ekonomikliğı ve pek çok akış olayında kabul edilebilir doğrulukta sonuç vermesi açısından yaygın olarak kullanılan yarı ampirik bir modeldir. Türbülans kinetik enerjisi (k) ve kayıp oranı (ε) için yazılan iki adet transport denkleminin çözümü ve türbülans viskozitesinin hesabını içerir. Kaldırma kuvvetleri etkisi ihmal edildiğinde, bu transport denklemleri k ve ε için sırası ile (denklem 3.5 ve 3.6);

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.5)$$

ve

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \varepsilon \frac{G_k}{k} + C_2 \varepsilon \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (3.6)$$

Şeklinde yazılır.

3.7.2. Realizable k-ε Türbülans Modeli

Realizable k-ε modeli, standart k-ε modelinin gelişmiş bir versiyonudur ve kaba vortisite dalgalanması temeline dayanan türbülans viskozitesi için yeni bir formülasyon ile türbülans hızı taşıma denklemlerini içeren ε'nin taşınım denklemini tanıtmıştır. Bu model "gerçeklenebilir" olup, türbülans akışlarının fiziksel özelliklerine uygun Reynolds gerilimleri üzerinde matematiksel kısıtlamalara bağlı kalır. Standart ve RNG k-ε modellerine göre jet yayılma hızlarını tahmin etmede ve dönme, olumsuz basınç gradyanları, ayrılma ve geri dönüş gibi çeşitli akış senaryolarında daha iyi performans göstermesi beklenir. Gerçeklenebilir k-ε modelinde k ve ε için model taşıma denklemleri şunlardır (denklem 3.7, 3.8 ve 3.9):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.7)$$

ve

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 \varepsilon k + \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\theta \varepsilon}} + C_1 \varepsilon \frac{G_k}{k} + C_3 \varepsilon G_b + S_\varepsilon \quad (3.8)$$

ise

$$C_1 = \max[0.4^3 \alpha_{n+5}^n, n = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}] \quad (3.9)$$

Bu denklemlerde G_k ortalama hız gradyanlarından dolayı türbülans kinetik enerjisinin oluşumunu temsil eder, G_b kaldırma kuvvetinden kaynaklanır, Y_M sıkıştırılabilir türbülansla dalgalanan genişlemenin genel dağılıma oranına katkısıdır. σ_ε ve σ_k türbülanslı Prandtl sayılarıdır.

Bu tez çalışmasında farklı türbülans modelleri ile analiz çalışmaları gerçekleştirilmiş olup, Allan(1981)'in deneysel verilerine en yakın sonucu veren Realizable k-ε modeli, analiz çalışmalarında kullanılmıştır.

3.7.3. Standart K-Omega (K-Ω) Türbülans Modeli

Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) ailesinin popüler bir üyesidir ve türbülans akış etkilerini etkin bir şekilde yakalar. Bu model, türbülans kinetik enerji ve spesifik türbülans dağılım hızı için taşıma denklemleri aracılığıyla düşük Reynolds sayılı akışlarda iyi performans gösterir, özellikle olumsuz basınç gradyanları ve ayrılmalarla karmaşık sınır tabaka akışlarında. Bununla birlikte, belirli senaryolarda aşırı ve erken ayrılmaların öngörülme eğilimi olduğundan, sonuç yorumlamasında dikkatli olunması gerekmektedir. Türbülans kinetik enerjisi k ve spesifik dağılım hızı ω, aşağıdaki taşıma denklemlerinden elde edilir (denklem 3.10 ve 3.11):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (3.10)$$

ve

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (3.11)$$

Burada, G_k ortalama hız gradyanlarından kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimini, G_ω ω'nin üretimini, Γ_k ve Γ_ω , k ve ω'nin etkili difüzyonunu temsil eder. Y_k ve Y_ω türbülans nedeniyle k ve ω'nin dağılımını temsil eder.

3.7.4. SST K-Omega (K-Ω) Türbülans Modeli

SST (Shear Stress Transport) türbülans modeli, giriş serbest akış türbülans özelliklerine duyarlılığı artırarak, k-ω modelinde serbest akış bölgesinde k-ε davranışına geçerek bu hassasiyeti artırır. Akış ayrışmasını tahmin etmede üstün performans gösterir ve olumsuz basınç gradyanlarında iyi bir performans sergiler, sınır tabakalarında başlıca kesme gerilimi taşımalarını hesaba katar. Yüksek doğruluk-maliyet oranı nedeniyle SST modeli endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Önemli normal gerilmeye sahip bölgelerde, örneğin durgun bölgelerde ve güçlü ivmelenmeye sahip bölgelerde yüksek türbülans seviyelerine neden olabilir, ancak bu etki standart bir k-epsilon modelinden önemli ölçüde daha az belirgindir. Standart k-ω modeline benzer denklemlere sahiptir (denklem 3.12, 3.13 ve 3.14):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (3.12)$$

ve

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + D_\omega \quad (3.13)$$

D_ω burada çapraz difüzyon terimidir;

$$\tilde{G}_k = \min(G_k, 10\rho\beta^*k\omega) \quad (3.14)$$

3.8. Reynolds Sayısı

Akışkanlar mekaniğinde Reynolds Sayısı (Re) bir akışkanın, atalet kuvvetlerinin, viskozite kuvvetlerine olan oranıdır ve sonuç olarak bu değer bu iki tip kuvvetin belli bir akış şartı altında birbirine olan göreceli önemini verir. Bundan ötürü, Reynolds sayısı, laminar akış ve türbülanslı akış gibi değişik akış rejimlerini nitelemek için kullanılır.

Laminar akış, akışkanın çalkantılı olmayan daha düzenli şekilde aktığı akış türüdür. Türbülanslı akış ise çalkantılı ve akış çizgilerinin gelişigüzel olduğu akış türüdür. Akış türlerine bakıldığında tam olarak tespit edilemeyen laminar akıştan türbülanslı akışa geçişteki bölge de vardır. Bu bölgede akışkan türü için ne laminar ne de türbülanslıdır denemez. Bu bölgeye geçiş evresi denir. Reynolds sayısı aşağıdaki denklem ile tespit edilir (denklem 3.15):

$$Re = \frac{\rho \times V \times D}{\mu} \quad (3.15)$$

Bu denklemde;

ρ =yoğunluk(kg/m³)

V =akışkanın hızı (m/s²)

D = akışkanın geçtiği borunun çapı (m)

μ = akışkanın dinamik viskozitesi (Pa.s) ‘dir.

Laminerden türbülanslı akışa geçiş; yüzeyin şekline, yüzey pürüzlülüğüne, yukarı akım hızına, yüzey sıcaklığına ve akışkanın türüne ve daha birçok parametreye bağlıdır ve en iyi şekilde Reynolds sayısı ile karakterize edilebilir.

Pürüzsüz düz levha üzerindeki akışta laminlerden türbülansa geçiş $Re \approx 1 \times 10^5$ civarında başlar, ancak akış Reynolds sayısı çok daha yüksek değerlere (tipik olarak 3×10^6) ulaşmadan tam türbülanslı hale gelmez (Çengel, 2008).

3.9. y^+ Değeri

y^+ değeri, duvar dibinden uzaklığın boyutsuz olanıdır. Bir nevi Reynolds sayısıdır. Türbülanslı akışlarda türbülansın başlıca kaynağı duvara yakın bölgelerdir. Bu bölgelerdeki akış hız dağılımının doğru bir şekilde elde edilmesi, kayma gerilmeleri vb. doğru hesaplanabilmesi için iyi modellenmesi gerekmektedir. Bu noktada Reynolds sayısı veya akış hızına bağlı olarak analiz programında akış denklemlerinin çözümünde kullanılan türbülans modeli seçimi ve bunun ile ilgili olarak duvar dibi yaklaşımlar için kullanılan duvar fonksiyonlarının doğru seçilmesi gerekmektedir. HAD analizleri yapan araştırmacıların duvar dibi akış modellemelerine hâkim olması gerekmektedir. Her türlü akışta duvar dibi akış, üç katmandan oluşur. Bunlar;

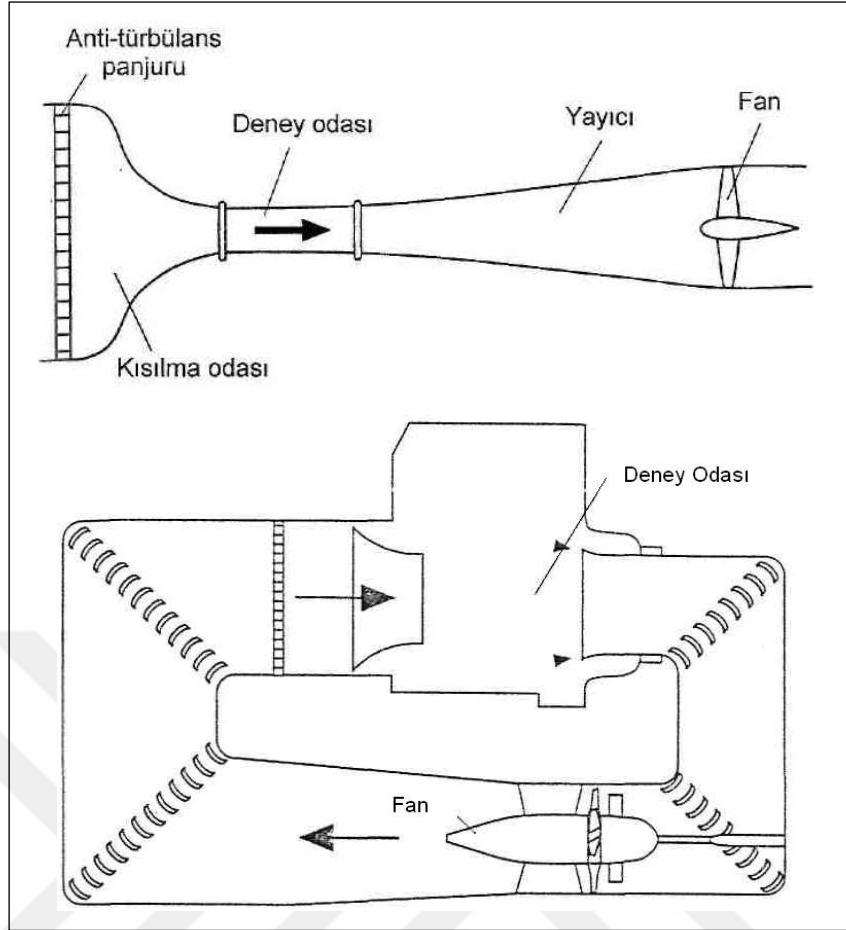
- Viskoz alt tabaka (geçiş tabakası ile birlikte),
- Logaritmik tabaka
- Ve bunların dışında olan dış tabakadır.

Sınır tabakayı içine alacak enflasyon tabakalarını belirlemede boyutsuz akış hızı u^+ ve buna bağlı y^+ değerinin dikkate alınması önemlidir. Düşük Reynolds sayılarında sınır iç tabakadaki akış hızı profillerinin doğru yakalanması için y^+ değerine karşılık kullanılacak türbülans modeli ve duvar fonksiyonu sınırlarına dikkat edilmesi gerekmektedir. (Korkmaz, 2021)

Yapılan ön analizlerde y^+ değeri 30 olduğu zaman analiz sonuçlarının daha yüksek doğrulukta olduğu saptanmıştır. Bunun bir değer nedeni türbülans modeli olan Realizable $k-\epsilon$ modelinin $y^+ = 30$ değerinde doğruluk oranının yüksek olmasındandır. Model sınır ağları bu değer etrafında kurgulanmıştır.

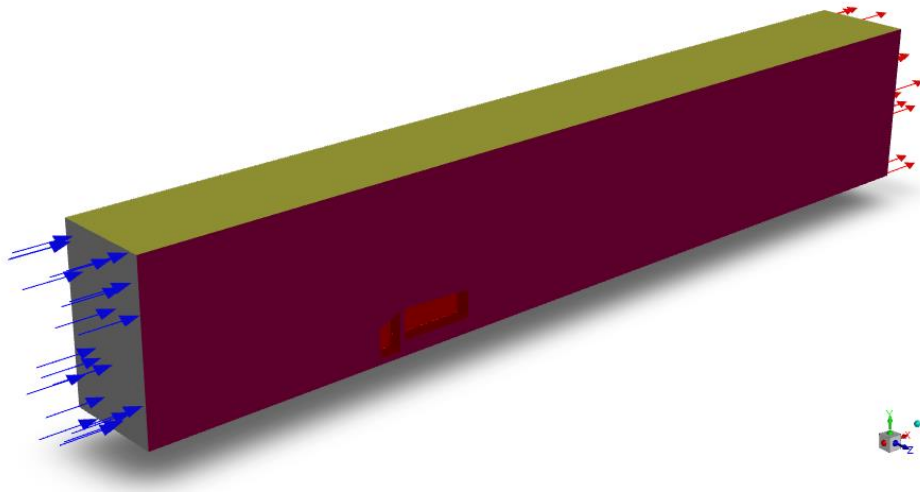
3.10. Rüzgâr Tüneli

Rüzgâr tünelinin basit bir şeması açık ve kapalı devre olarak aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3.4). Fan, hava akışını oluşturur. Havanın yoğunluğu neredeyse sabit olduğundan, denenen modelin yerleştirildiği en dar kesitte (test odası), hava en yüksek hıza ulaşır. Test odası dikdörtgen, daire, oval veya benzer şekillerde olabilir. Giriş bölgesinde, hava akışını düzenlemek için bir daralma bölgesi bulunur ve akış düzgün bir şekilde test odasına yönlendirilir, böylece test odasında homojen bir hız elde edilir.



Şekil 3.4. Açık ve Kapalı Devre Bir Rüzgâr Tüneli Modeli (Katz, 1995)

Yapılan analiz çalışmalarında, rüzgar tüneli modelinde giriş alanı **inlet**, çıkış alanı **outlet**, simetri eksen alanı **symmetry**, alt yüzey **ground**, yan ve üst alan **walls** ve araç yüzeyleri **body** olarak isimlendirme yapılmıştır. Bunun nedeni analiz sınır koşullarının iyi belirlenmesini sağlamaktır. Şekil 3.5'te tünel modeli akış yönü belirtilmiştir.



Şekil 3.5. Rüzgâr Tüneli Belirlenen Akış Yönü

3.11. Ön Analiz Çalışmaları

3.11.1. Sınır Şartları

Geometri ve Rüzgar Tüneli Boyutu:

- Hesaplama alanının kesit boyutu, Allan'ın (1981) deneylerinde kullanılan rüzgâr tüneli ile uyumludur.

Giriş Koşulları:

- Girişte düzgün bir serbest akış hızı $U_{\infty}=24.4$ m/s ve Reynolds $Re = 0.51 \times 10^6$ olarak belirlenmiştir; bu değer, Allan'ın (1981) rüzgâr tüneli deneylerinde kullanılan koşullarla uyumludur.
- Rüzgar tünelinde serbest akış hızının türbülans yoğunluğu değeri bildirilmemiştir, bu nedenle bu çalışmada girişte düzgün hız profili kullanılmıştır.

Zemin Simülasyonu:

- Deneylerde kullanılan hareketli zemin, zeminde akış yönündeki hız bileşenini U_{∞} ile eşitleyerek ve sıfır kayma sınır koşuluyla simüle edilmiştir.
- Hareketli zeminin hızı, serbest akış hızına eşit olduğundan zeminde sınır tabakası bulunmamakta ve çözülmeye ihtiyaç duyulmamaktadır.

Duvar Koşulları:

- Yan duvarlarda ve tavanında sıfır kayma koşulları uygulanmıştır.
- Çekici-treyler modelinde sıfır kayma koşulu kullanılmıştır.

Çıkış Sınırı:

- Çıkışta basınç çıkış sınır koşulu uygulanmıştır.

Sınır Tabaka Çözünürlüğü:

- Simülasyonda zemin ve yan duvarlardaki sınır tabakaları çözülmemiştir.

Bu düzenleme, model çekici-treyle yapısının aerodinamiklerini simüle etmek için kullanılmış olup ve hareketli zemini simüle ederek yer etkisini dikkate almaktadır. Seçilen sınır koşulları, rüzgâr tüneli deneylerinin fiziksel koşullarını doğru bir şekilde temsil etmek için önemlidir.

Bu çalışmada kullanılan Fluent programı, süreklilik, momentum, enerji ve türbülans için genel integral denklemleri çözmek amacıyla sonlu hacimler yöntemini temel almaktadır. Fluent programı, bu denklemlerin çözüm alanındaki her noktada dengeye ulaşıldığında gerçekleşen bir yakınsama sağlar. Her akışkan değişkeni için artıklar, çözümdeki hata düzeyini belirlemektedir. Artıklar normalize edilerek denklemler hesaplanır. Bu çalışmada, süreklilik, x-hızı, y-hızı ve z-hızı için yakınsama kriterleri, 1×10^{-4} olarak belirlenmiştir. Ön yüzey alanı 0.06000112 m^2 olarak alınmıştır.

Geometrinin sayısal çözümlemesinde tanımlanan diğer sınır şartları Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de verilmiştir. Çizelge 3.2 değerler Ansys Fluent programındaki havanın varsayılan özellikleridir. Çizelge 3.3’de ise yakınsama arttırılması amacı ile İnterpolasyon seçenekleri ikinci derece ayrıklaştırma olarak ayarlanmıştır.

Çizelge 3.1. Çekicinin Sayısal Çözümlemesinde Havanın Özellikleri

Özellik	Tanım	Sayısal Değer
ρ	Yoğunluk	1 kg/m ³
μ	Dinamik viskozite	1.560×10 ⁻⁵ kg/m.s

Çizelge 3.2. Çekicinin Sayısal Çözümlemesinde İnterpolasyon Seçenekleri

Özellik	Sayısal Değer
Basınç	İkinci Derece Ayrıklaştırma (Second-Order)
Momentum	İkinci Derece Ayrıklaştırma (Second-Order)
Türbülans kinetik enerjisi	İkinci Derece Ayrıklaştırma (Second-Order)
Türbülans yayılım oranı	İkinci Derece Ayrıklaştırma (Second-Order)

3.11.2. Ağdan Bağımsızlık (Mesh Independence)

Ağdan bağımsızlık, bir sayısal simülasyon veya hesaplamalı modellemenin (CFD, FEA gibi) sonuçlarının, kullanılan mesh (ağ) yapısına göre ne kadar etkilendiğini anlamak amacıyla gerçekleştirilen bir analiz konseptidir.

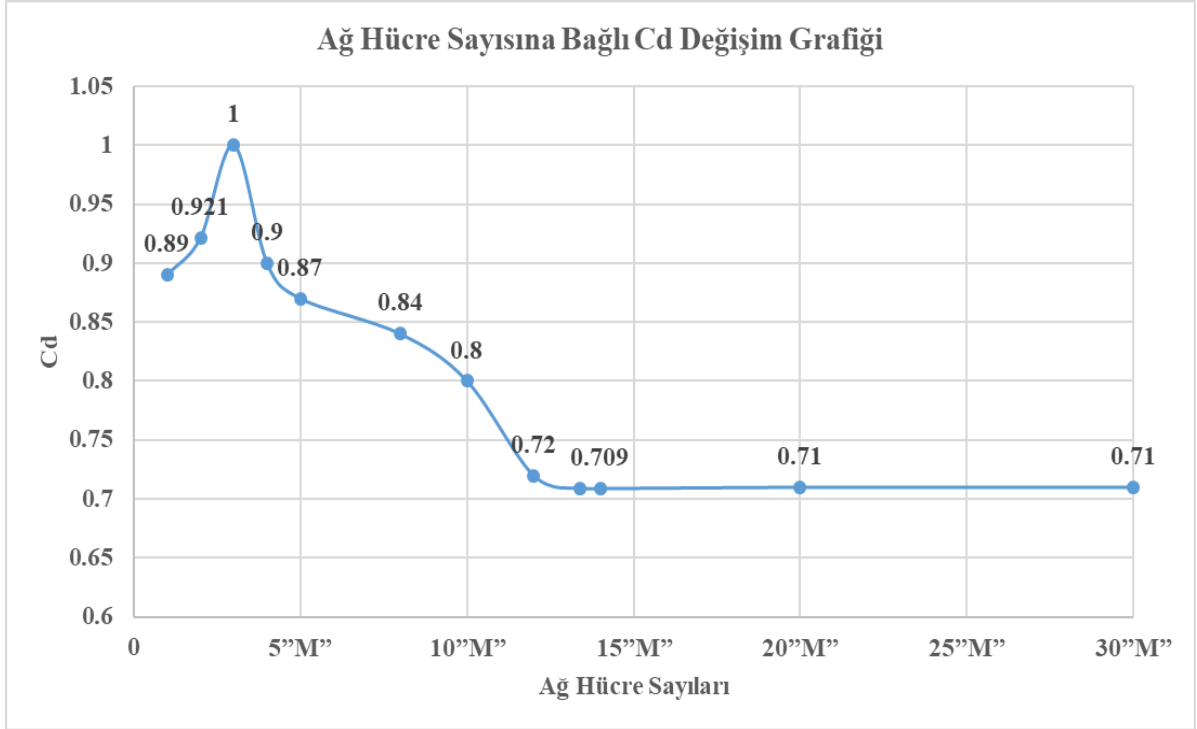
Bir simülasyonun sonuçları, kullanılan mesh yapısına bağlı olabilir. Daha fazla mesh ögesi (nokta, üçgen, hücre vb.) kullanıldığında, model daha ayrıntılı bir şekilde temsil edilir, ancak aynı zamanda daha fazla hesaplama gücü gerektirir. Bu nedenle, meshin uygun bir seviyeye getirilmesi, yeterli ayrıntıyı sağlamak ve aynı zamanda hesaplama maliyetini kontrol altında tutmak açısından önemlidir.

Mesh bağımsızlık çalışmaları, belirli bir mesh yapısı kullanılarak yapılan simülasyon sonuçlarının, mesh yapılarını değiştirdiğinizde ne kadar değiştiğini anlamak için yapılır. İdeal durumda, sonuçlar belirli bir mesh çözümüne ulaştığında, bu sonuçlar daha fazla mesh ayrıntısını eklemek veya çıkarmak sonuçları anlamlı bir şekilde etkilemez. Bu durumda, model "mesh bağımsız" olarak kabul edilir.

Mesh bağımsızlığı analizi, modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak, aynı zamanda hesaplama kaynaklarını etkin bir şekilde kullanmak için önemlidir.

Yapılan mesh bağımsızlığı analizlerde toplamda 12 farklı mesh değeri için en optimum ağ hücre değerinin 13,400,000 aralığındaki analiz sonucu olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu değerden sonra ağ hücre sayısı yükseldikçe bulunan C_d değerinde kayda değer bir artış yaşanmamıştır. Bundan sonraki tüm çalışmalarda 13,400,000 ağ hücre değeri ile analizler gerçekleştirilmiştir.

Tüm analizlerde aynı sınır ağ koşulları uygulanmıştır. Şekil 3.6’da yapılan ağ bağımsızlığı çalışmalarına ait direnç katsayısı değişim grafiği görülmektedir.



Şekil 3.6. Ağ Bağımsızlığı Grafiği

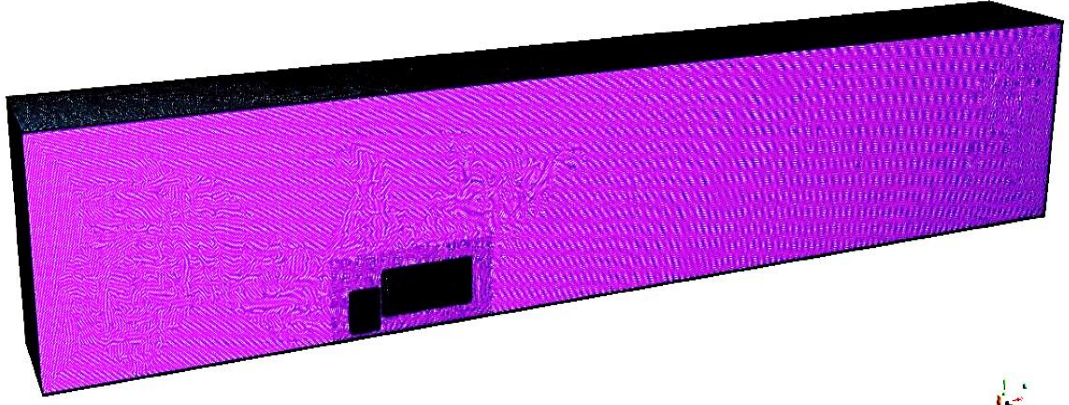
Yapılan ön analizler sonucunda en uygun ağ yapısının polyhexcore ağ yapısı olduğu tespit edilmiştir.

3.11.3. Sınır Ağı (Mesh) Oluşturma

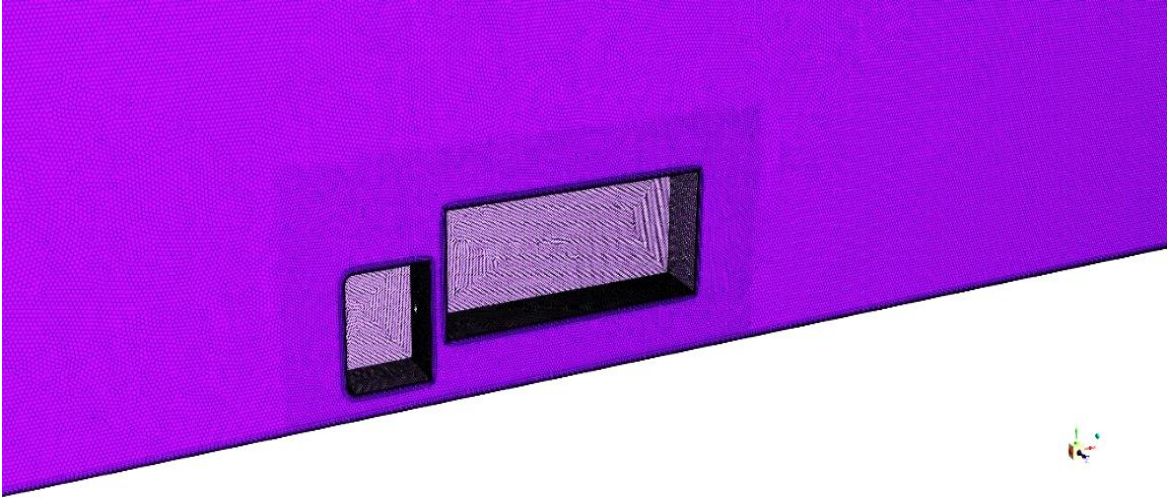
Polyhexcore mesh genellikle altıgen hücrelerin birleşiminden oluşan bir yapıyı ifade eder. Bu altıgen hücreler, düzlemsel geometrilere iyi performans gösteren bir mesh türüdür. Polyhexcore mesh, özellikle aerodinamik simülasyonlarda, ısı transferi analizlerinde veya karmaşık akışkan dinamiği problemlerinde kullanılır. Şekil 3.7, 3.8, 3.9 ve 3.10’da ağ yapısı ve görünüşleri belirtilmiştir.

Yapılan Mesh çalışması sonucu;

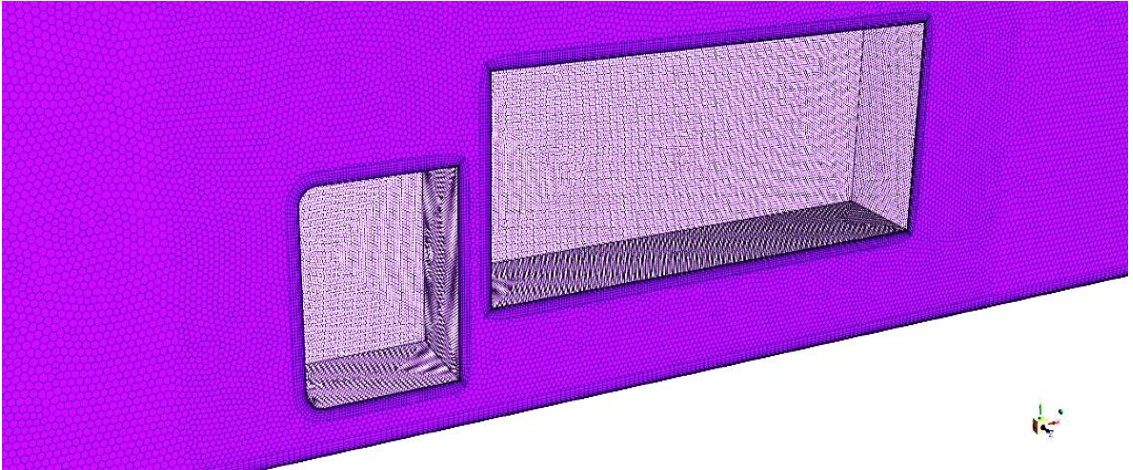
- Maksimum Skewness 0.40
- Ortalama Skewness 0.002
- First Layer Thickness 1 mm
- Ağ hücre sayısı 13,400,000 olarak hesaplanmıştır.



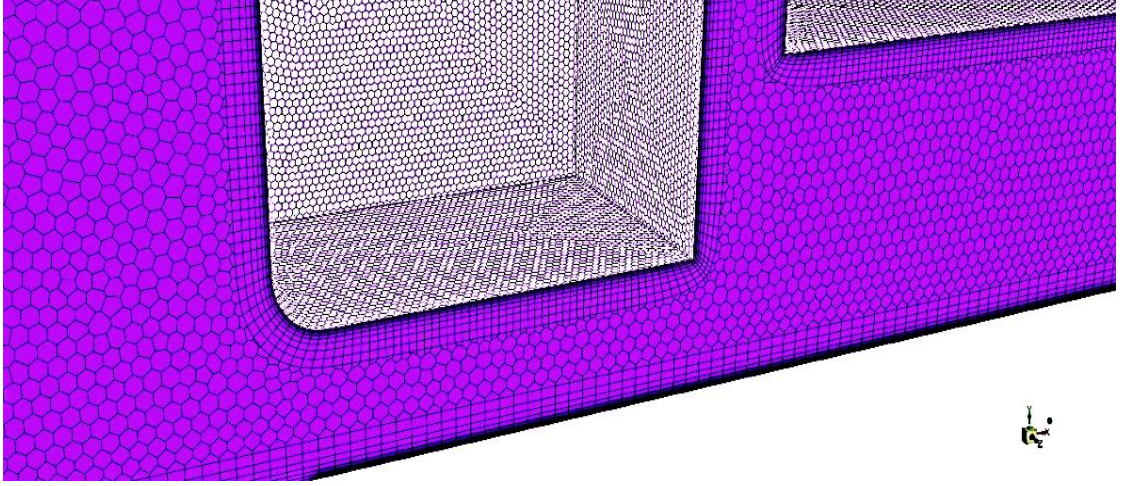
Şekil 3.7. Türbülanslı Sınır Tabakasının Ağ Yapısı ve Görünüşü 1



Şekil 3.8. Türbülanslı Sınır Tabakasının Ağ Yapısı ve Görünüşü 2



Şekil 3.9. Türbülanslı Sınır Tabakasının Ağ Yapısı ve Görünüşü 3



Şekil 3.10. Türbülanslı Sınır Tabakasının Ağ Yapısı ve Görünüşü 4

3.11.4. Türbülans Modeli Belirleme

Uygun bir türbülans modelini seçmek her zaman zordur, çünkü performansları akış koşullarına bağlı olarak değişir ve evrensel olarak kabul edilmiş en iyi bir türbülans modeli bulunmamaktadır. Bu çalışmada Model-A üzerinden, iyi bilinen ve yaygın olarak kullanılan türbülans modelleri değerlendirildi. Çizelge 4.3'te, bu türbülans modellerinden elde edilen direnç katsayılarını ve deneysel verileri göstermektedir.

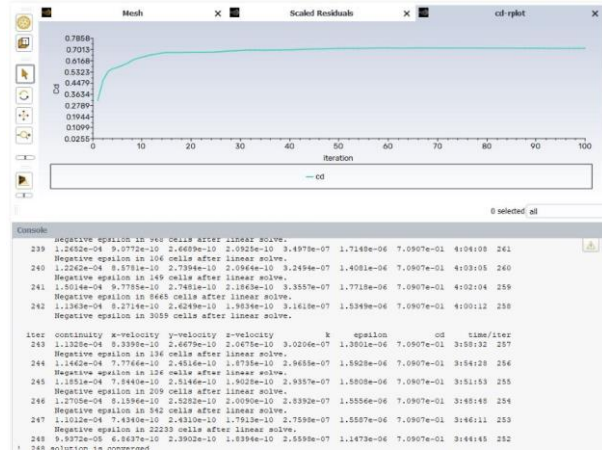
Yapılan Ön Analizlerde sırasıyla kullanılan türbülans modelleri;

- Spalarat Almaras
- SST $k-\omega$
- Realizable $k-\epsilon$ Enhanced Wall Treatment
- Realizable $k-\epsilon$ Standart Wall Functions
- Realizable $k-\epsilon$ Non Equilibrium modelleri kullanılmıştır.

Çizelge 3.3. Türbülans Modelleri Ve Hesaplanan C_d Değerleri Karşılaştırması

Türbülans Modeli	C_d	ΔC_d
Deneysel	0.77 (Allan,1981)	
Spalarat Almaras	0.632	17.92%
SST $k-\omega$	0.671	12.86%
Realizable $k-\epsilon$ Enhanced Wall Treatment	0.657	14.68%
Realizable $k-\epsilon$ Standart Wall Functions	0.707	8.18%
Realizable $k-\epsilon$ Non Equilibrium	0.709	7.92%

Realizable $k-\epsilon$ Non Equilibrium türbülans modeli yapılan çalışmada deneysel veriye en yakın olan türbülans modeli olarak bulunmuştur. Bundan sonra yapılan tüm analizlerde bu türbülans modeli kullanılmıştır. Şekil 4.24'te realizable $k-\epsilon$ non equilibrium türbülans modeli kullanılarak model-A aerodinamik direnç katsayısı grafiği ve Şekil 4.25'te realizable $k-\epsilon$ non equilibrium türbülans modeli kullanılarak model-A normalize edilmiş artıklar grafiği görülmektedir.



Şekil 3.11. Realizable $k-\epsilon$ Non Equilibrium Türbülans Modeli Kullanılarak Model-A Aerodinamik Direnç Katsayısı Grafiği



Şekil 3.12. Realizable $k-\epsilon$ Non Equilibrium Türbülans Modeli Kullanılarak Model-A Normalize Edilmiş Artıklar Grafiği

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada basitleştirilmiş çekici-römork araç üzerine etki eden direnç kuvveti; çekici deflektör ve treyler üstü yumuşak geçişli tasarımları olmak üzere iki farklı pasif akış kontrol aparatının kullanılması ile iyileştirilmeye çalışılmıştır. Çalışma boyunca Model-A ile Model-B tüm kombinasyonları için direnç katsayıları hesap edilmiş ve grafiklerde sunulmuştur. Kuvvet ölçüm analizleri, Reynolds sayısı hesaplanarak; Reynolds formülündeki (3.14) karakteristik uzunluk modelin b değeri olarak 305 mm alınmıştır ve $Re = 0.51 \times 10^6$ değerinde hesaplanmıştır.

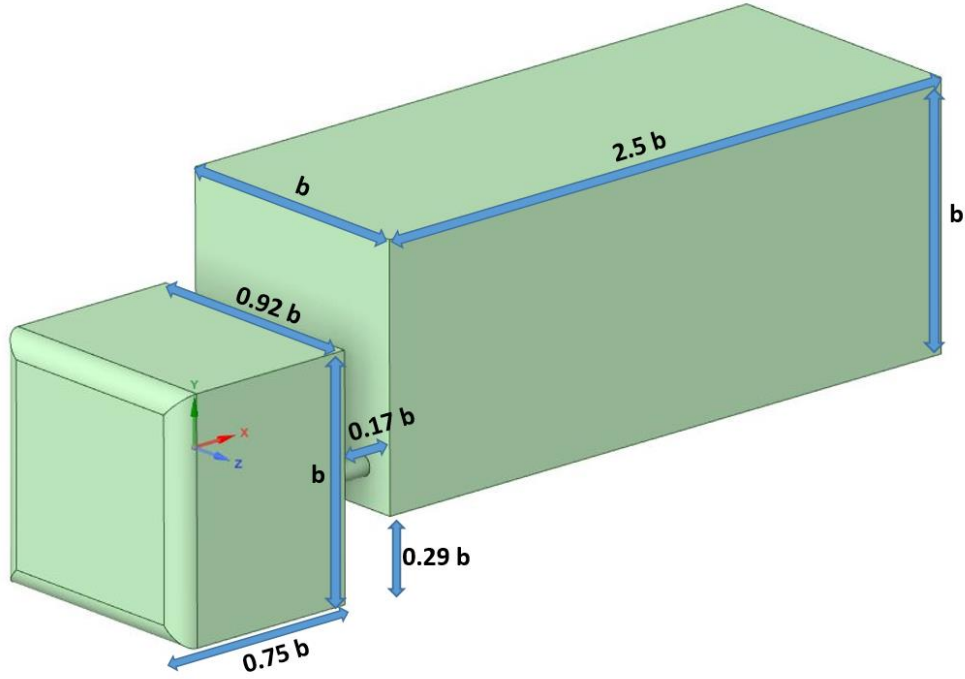
Yapılan deneylerde elde edilen direnç katsayıları sonuçları alt başlıklarda verilmiştir. Bulunan direnç katsayıları kıyaslanmış ve aerodinamik iyileştirme yüzdeleri hesap edilmiştir. Çalışmada kullanılan model, Allan (1981) tarafından kullanılan modeldir. Bu modelin kullanılma sebebi, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri ile elde edilen bulguların literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılarak doğrulanabilmesidir. Böylelikle çalışmadaki sonlu eleman modelinin gerçek koşulları yansıtabilme imkânı bulunmuş olacaktır.

4.1. Analiz Modeli Oluşturma

Çalışmada basitleştirilmiş bir çekici-treyler modeli incelenmiştir. Bu modelde **Allan (1981)**, Southampton Üniversitesi rüzgâr tüneline, treyler yüksekliğine göre(b) hesaplanan Reynolds sayısını $Re = 0.51 \times 10^6$ olarak basitleştirilmiş bir çekici-treyler modelinde aerodinamik ölçümler yapmışlardır. Kullandığı model, aynı zamanda bu sayısal çalışmada kullanılan modeldir. (bkz. Şekil 4.1) Model, çekici kabini temsil eden bir ön kutu ve treyleri temsil eden bir arka kutudan oluşur. Bu modelde b bir karakteristik sayı olarak 305 mm'dir. Ön kutunun yüksekliği, genişliği ve derinliği sırasıyla 0.92 b, 0.92 b ve 0.67 b'dir. Arka kutunun yüksekliği, genişliği ve derinliği sırasıyla b, b ve 2.5 b'dir. Ön ve arka kutunun yerden yüksekliği sırasıyla 0.21 b ve 0.5 b'dir. Çekici ve treyler arasındaki boşluk bölge genişliği 0.17 b'dir.

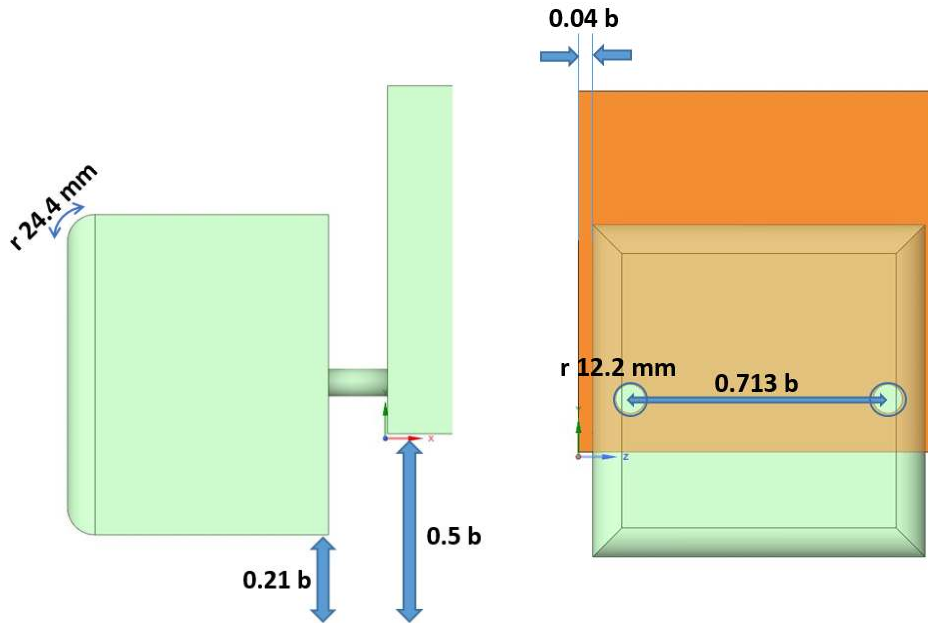
Bu kurulum, çekici-treyler kamyonlarının o dönemdeki standart şekline göre treylerin gerçekçi bir yerleşimini sağlamıştır. Kullanılan yuvarlatılmış modelde çekici kısmı radiusu 24.4 mm alınmıştır. Bunun sebebi yapılan çalışmada $r/b=0.08$ karakteristik sayısıdır. Bundan sonra kullanılacak tüm tasarımlarda da bu 24.4 mm radius değeri kullanılacaktır. **Allan (1981)** kullandığı çekici-treyler modeli, bundan sonra Model-A olarak anılacaktır. Model-B, Model-A'nın çekici üst yan kısmın kenarları r:24.4 alınarak yuvarlatılmış halidir. (Şekil 4.3).

Bütün tasarım çalışmaları ANSYS Paket yazılımında bulunan SpaceClaim 3 boyutlu tasarım yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır.



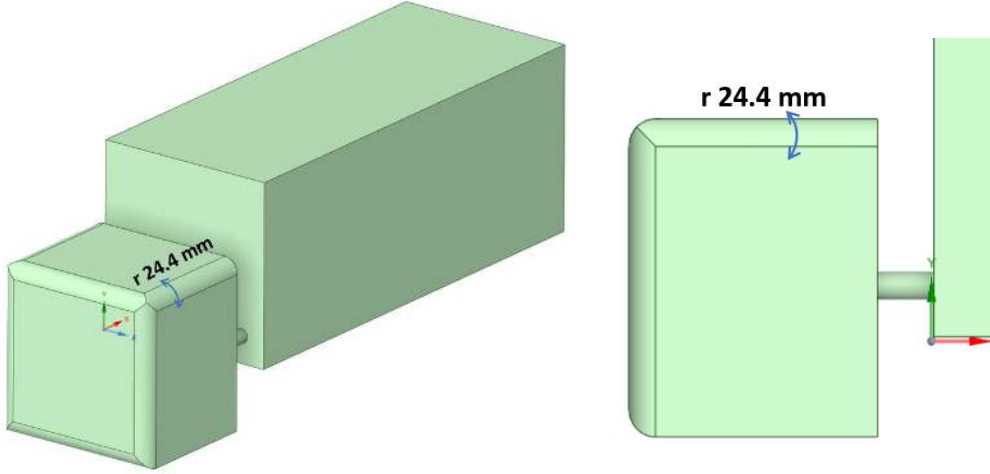
Şekil 4.1. Model-A Olarak Kullanılan Model Çekici Ön kısmı Yuvarlatılmış Çekici-Treyler Modeli Allan (1981)

Şekil 4.2’de Model-A olarak da tanımlanan Allan (1981)’in kullanmış olduğu basitleştirilmiş çekici-treyler geometrisi görülmektedir. Buradaki ölçüler Model-B için de aynı olacak şekilde kurgulanmıştır.

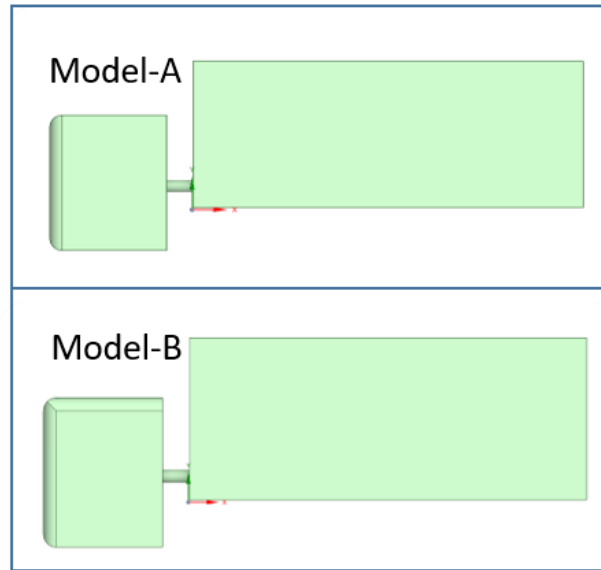


Şekil 4.2. Çekici Ön kısmı Yuvarlatılmış Çekici-Treyler Modeli Ön ve Yan Görünüş, Model-A Allan (1981)

Model-B ile Model-A model ölçüleri olarak aynı modeldir. Aralarındaki fark Model-B’de kullanılan çekici üst yuvarlatılmasıdır. Şekil 4.3’te Model-B nin izmoterik ve yan görünüşü görülmektedir. Şekil 4.4’te ise Model-A ve Model B’nin yan görünüş karşılaştırması görülmektedir.



Şekil 4.3. Üst Tarafı Yuvarlatılmış Çekici-Treyler Modeli, Model-B



Şekil 4.4. Model-A ve Model-B Yan Görünüş Karşılaştırması

Model-A ve Model-B baz alınarak 11 farklı geometri oluşturulmuştur. Oluşturulan geometriler iki farklı pasif akış kontrol yöntemi belirlenmiştir. İlk pasif akış kontrol yöntemi, çekici üst deflektörün açığa bağlı olarak değişimidir. İkinci pasif akış kontrol yöntemi ise treyler üst yapısının yumuşak geçişli olarak açığa bağlı değişim varyantıdır.

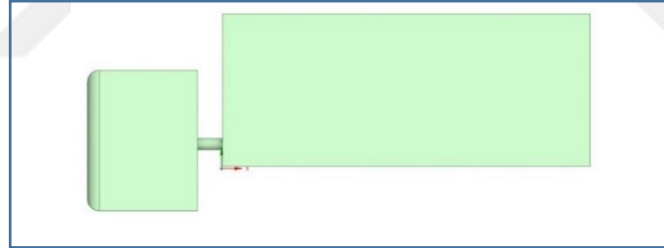
Her iki varyant için 5 farklı koşul belirlenmiştir. İlk pasif akış kontrol sistemi olan üst deflektör için toplamda 5 farklı 5 varyant olarak, açı değerleri α açısı 5° , 10° , 15° , 20° , 25° ’dir. İkinci pasif akış kontrol sistemi üst deflektörün yani α açısının 25° olduğu açıdan itibaren

alınmıştır. İkinci pasif akış kontrol sistemi için ise toplamda 5 farklı varyant olarak β açısı 1° , 2° , 3° , 4° , 5° açı belirlenmiştir.

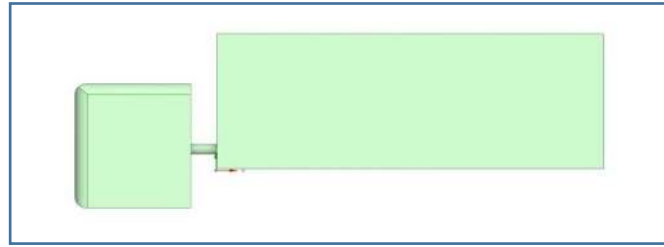
Analizler 3 faz olarak ayrılacaktır. İlk faz modellerin ana hali olacaktır. Faz-1 olarak isimlendirilecektir. Üst Deflektör açısı değişimi Faz-2 olarak isimlendirilecektir. Treyler üst yapısının açısına bağlı değişimi Faz-3 olarak isimlendirilecektir. Her bir fazın içindeki açı değişimleri varyant olarak isimlendirilecektir. Toplamda her bir model için 11 adet varyant bulunmaktadır. Çizelge 4.1’de uygulanacak fazlar ve varyant isimleri yer almaktadır. Şekil 4.5 – Şekil 4.16 arasındaki şekillerde ise bu varyantlara ait yan görünüşler yer almaktadır.

Çizelge 4.1. Model-A ve Model-B için Uygulanan Fazlar ve Varyant İsimlendirmeleri

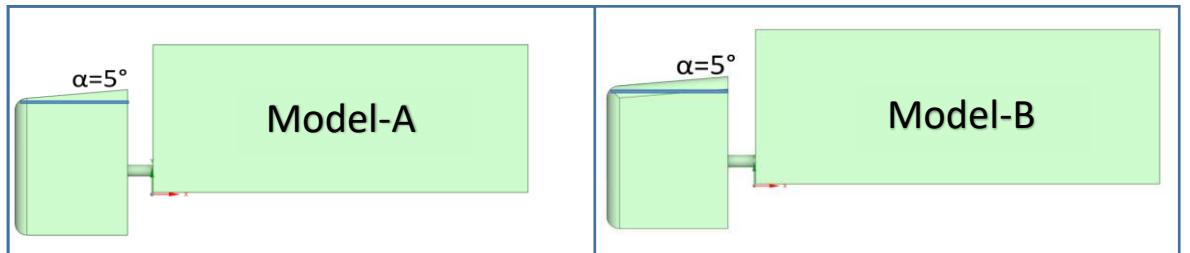
Faz-1 Ana Model	Faz-2 Deflektör Değişimi	Faz-3 Treyler Üst Yapı Değişimi
Ana Model- Varyant 1	$\alpha=5^\circ$ açısı- Varyant 2	$\alpha=25^\circ$ ve $\beta=1^\circ$ açısı- Varyant 7
	$\alpha=10^\circ$ açısı- Varyant 3	$\alpha=25^\circ$ ve $\beta=2^\circ$ açısı- Varyant 8
	$\alpha=15^\circ$ açısı- Varyant 4	$\alpha=25^\circ$ ve $\beta=3^\circ$ açısı- Varyant 9
	$\alpha=20^\circ$ açısı- Varyant 5	$\alpha=25^\circ$ ve $\beta=4^\circ$ açısı- Varyant 10
	$\alpha=25^\circ$ açısı- Varyant 6	$\alpha=25^\circ$ ve $\beta=5^\circ$ açısı- Varyant 11



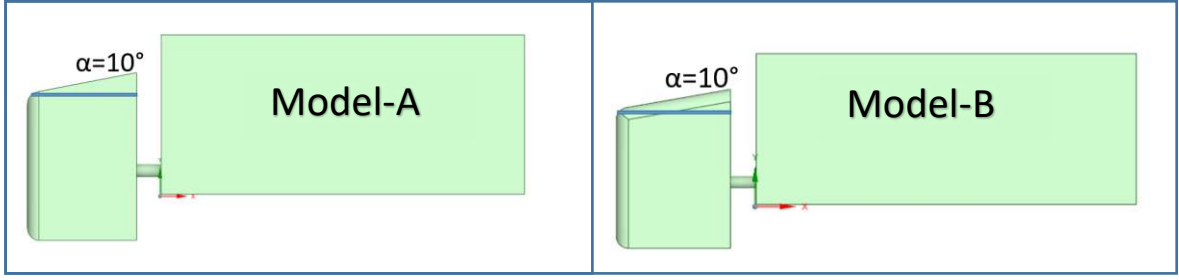
Şekil 4.5. Model-A Ana Model Varyant 1 Yan Görünüş



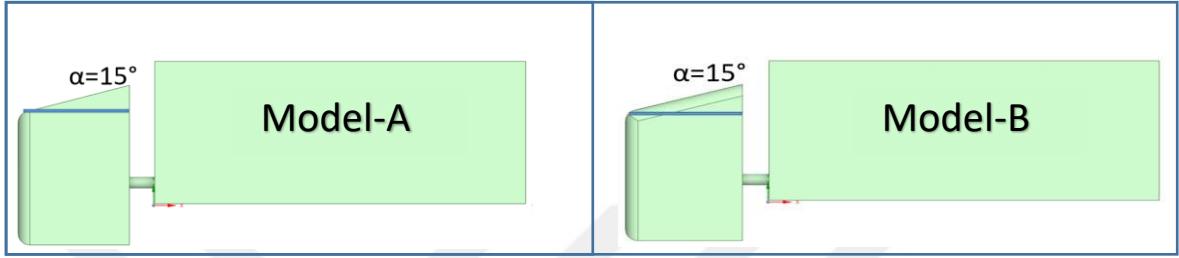
Şekil 4.6. Model-B Ana Model Varyant 1 Yan Görünüş



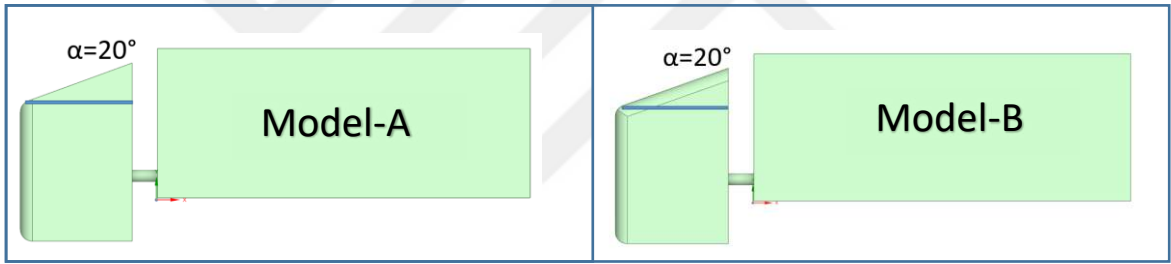
Şekil 4.7. Model-A ve Model-B $\alpha=5^\circ$ Varyant 2 Yan Görünüş



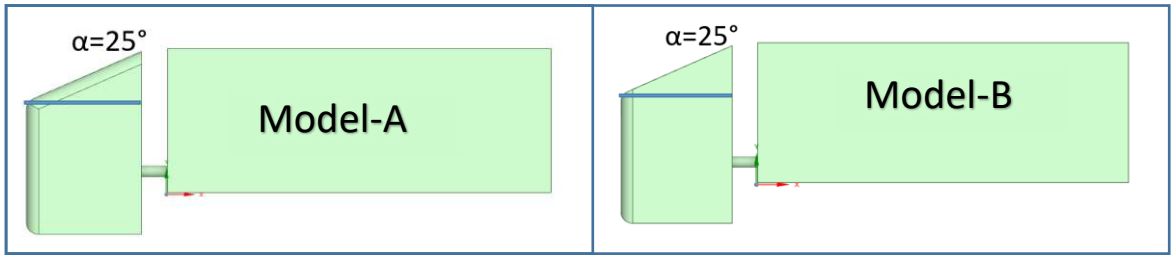
Şekil 4.8. Model-A ve Model-B $\alpha=10^\circ$ Varyant 3 Yan Görünüş



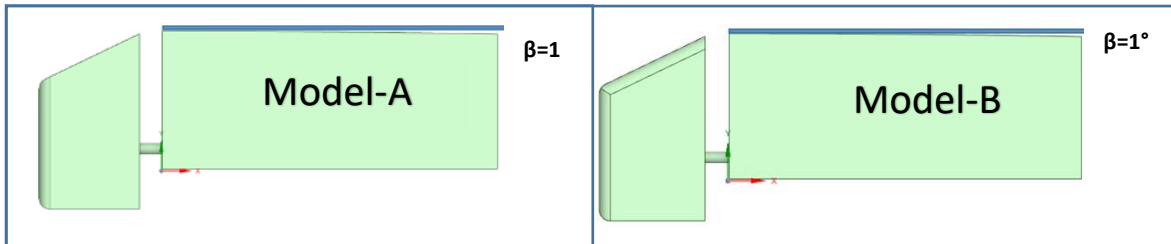
Şekil 4.9. Model-A ve Model-B $\alpha=15^\circ$ Varyant 4 Yan Görünüş



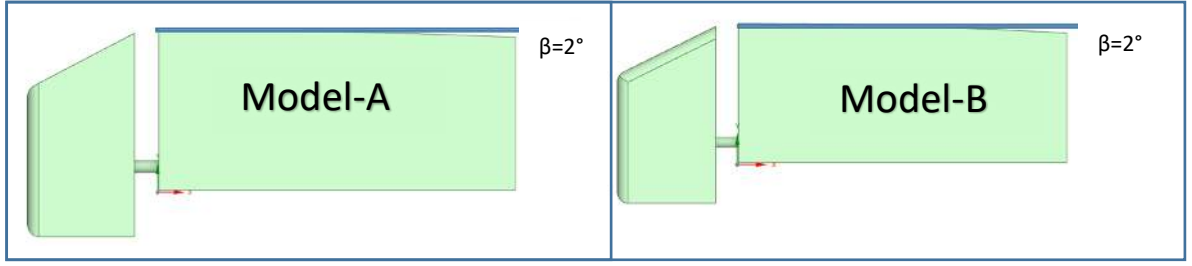
Şekil 4.10. Model-A ve Model-B $\alpha=20^\circ$ Varyant 5 Yan Görünüş



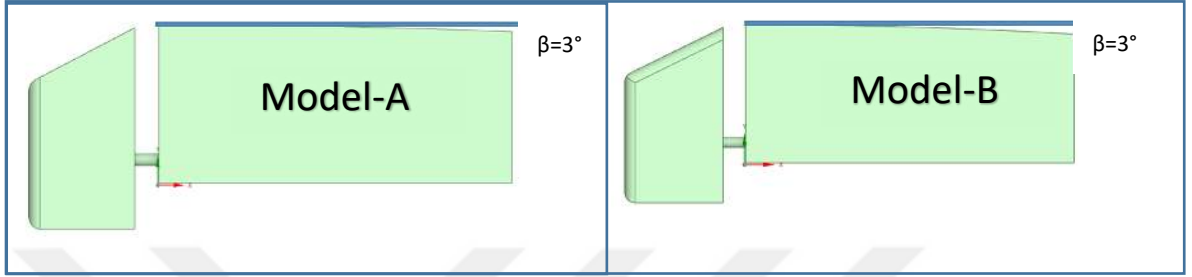
Şekil 4.11. Model-A ve Model-B $\alpha=25^\circ$ Varyant 6 Yan Görünüş



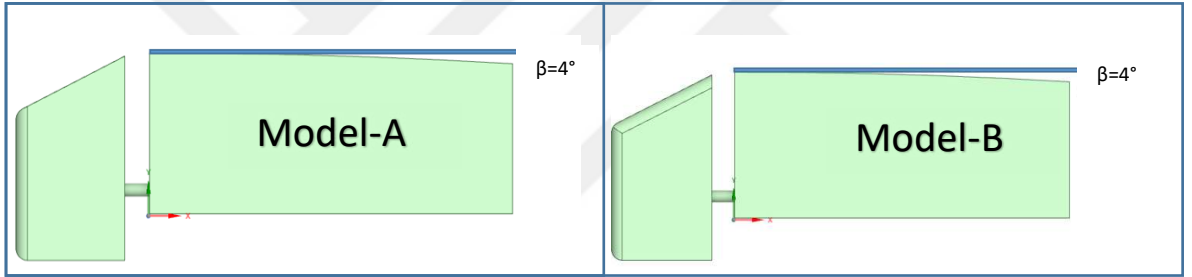
Şekil 4.12. Model-A ve Model-B $\alpha=25^\circ$ ve $\beta=1^\circ$ Varyant 7 Yan Görünüş



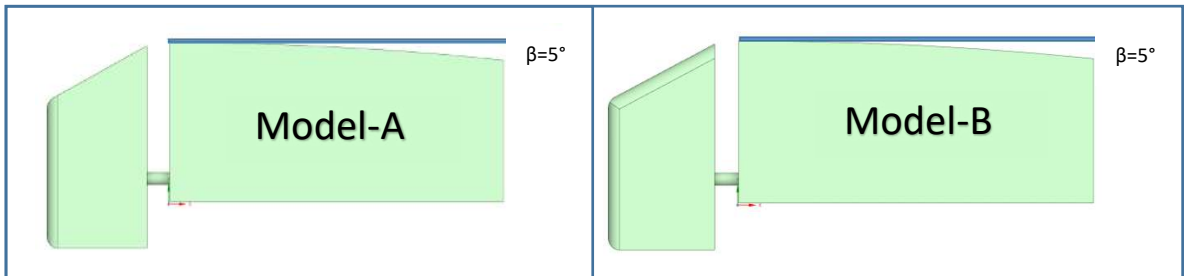
Şekil 4.13. Model-A ve Model-B $\alpha=25^\circ$ ve $\beta=2^\circ$ Varyant 8 Yan Görünüş



Şekil 4.14. Model-A ve Model-B $\alpha=25^\circ$ ve $\beta=3^\circ$ Varyant 9 Yan Görünüş



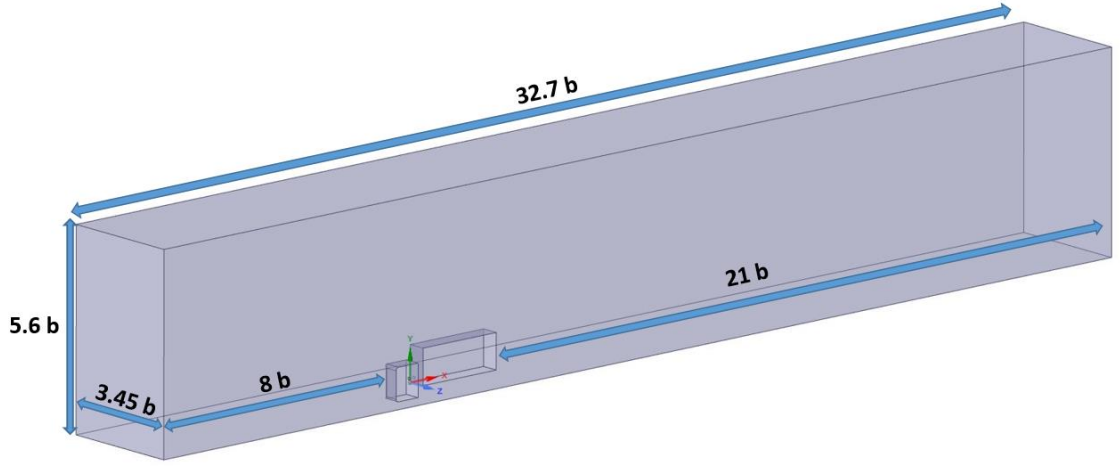
Şekil 4.15. Model-A ve Model-B $\alpha=25^\circ$ ve $\beta=4^\circ$ Varyant 10 Yan Görünüş



Şekil 4.16. Model-A ve Model-B $\alpha=25^\circ$ ve $\beta=5^\circ$ Varyant 11 Yan Görünüş

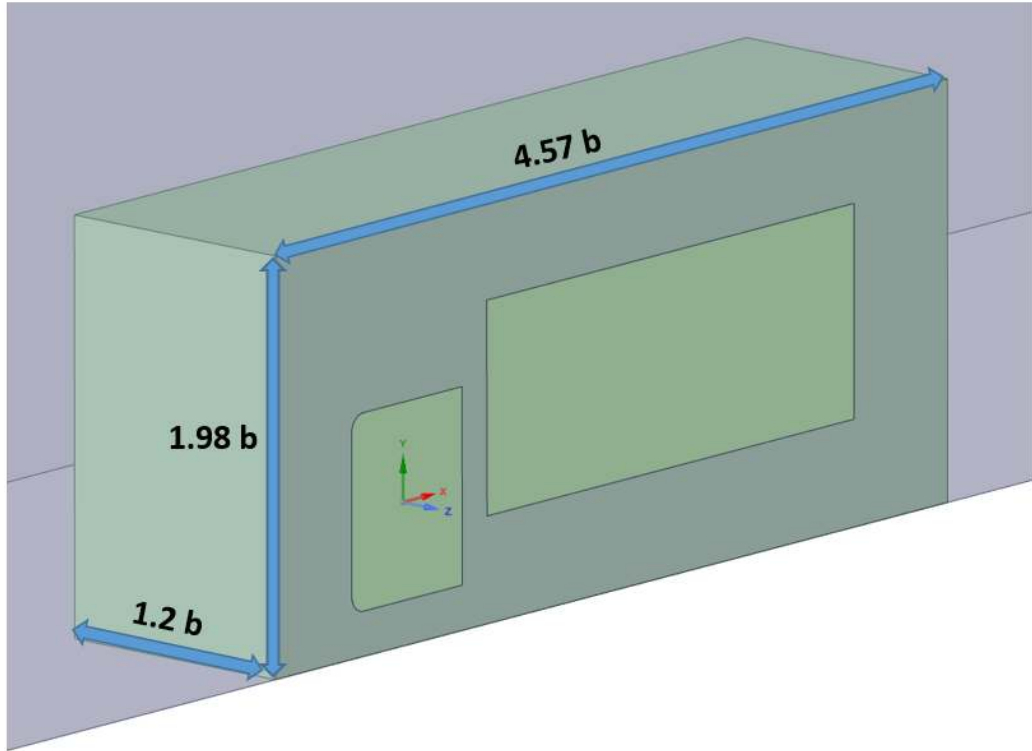
Rüzgar Tüneli modeli, Allan(1981)'in yaptığı çalışmadaki şekilde oluşturulmuştur. Oluşturulan rüzgar tüneli modeli, araç önünde 8b, araç arkasında 21b olacak şekildedir. Toplam uzunluk 32.7 b'dir. Modelin genişliği 6.9 b'dir. Yükseklik ise 5.6 b olarak alınmıştır. Şekil 4.17'de oluşturulan rüzgar tüneli modelinin ölçüleri belirtilmiştir.

Yapılan tüm analizler, simetri ekseninden kesilerek yarım model olarak çalışılmıştır. Bunun amacı çözüm süresini kısaltmaktır. Yarım model çalışmalar analiz sonuçlarına etki etmeyip, hızlı çözüm imkanı sağlamaktadır.



Şekil 4.17. Oluşturulan Rüzgâr Tüneli Modeli, Allan(1981)

Rüzgâr tüneli modelinde araç modeli çevresine etki bölgesi yani Body of Influence (BOI) tanımlanmıştır. Bunun amacı belirlenen etki bölgesinde daha yüksek bir ağ yapısı kalitesine sahip olarak analiz sonucunun doğruluğunu arttırmaktır. BOI uzunluğu $4.57b$, yüksekliği $1.98b$ ve genişliği $1.2b$ 'dir. Şekil 4.18'de etki bölgesi modeli görülmektedir.



Şekil 4.18. Rüzgâr Tüneli içine Yerleştirilen Etki Bölgesi Modeli

4.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Analiz Sonuçları

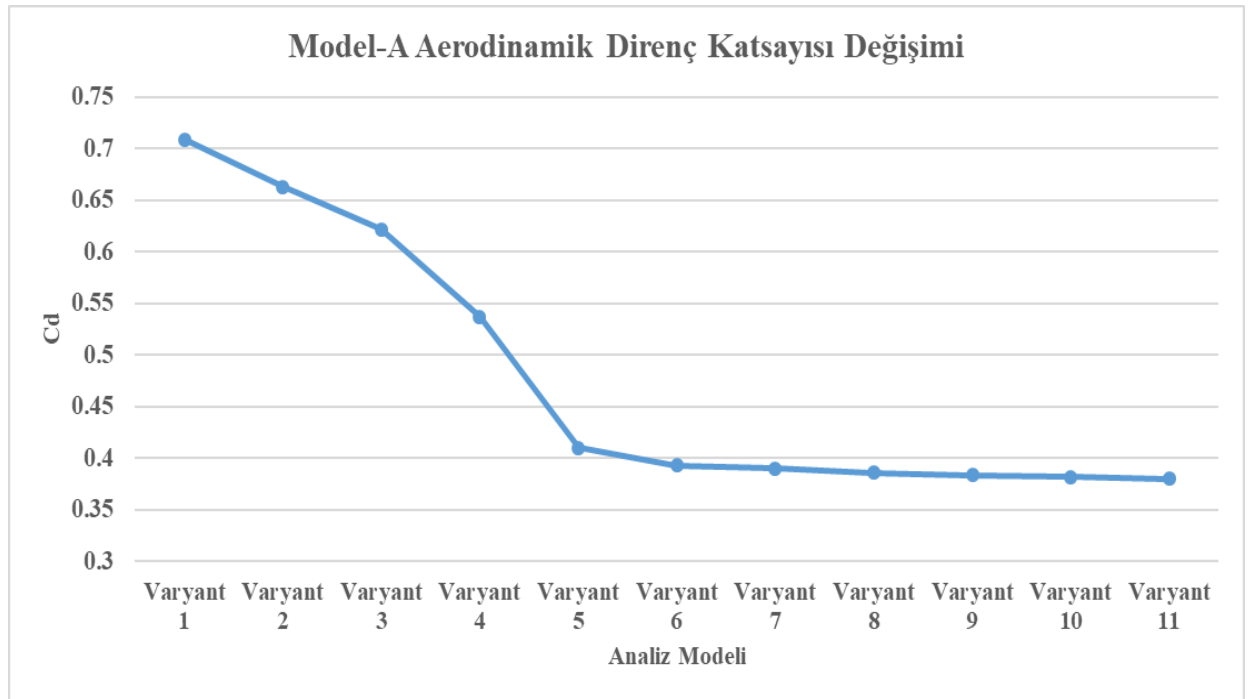
4.2.1. Model-A HAD Analizleri Değerlendirmesi

Akışkanlar dinamiği analizleri, Model-A için farklı varyantlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin sonuçlarına göre, Varyant 1 için aerodinamik direnç katsayısı 0.709 olarak hesaplanmıştır. En fazla geliştirmenin uygulandığı Varyant 11 için ise C_d katsayısı 0.380 olarak belirlenmiştir. Bu değerler arasında %46.40'lık bir C_d katsayısı değişimi gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.2, aerodinamik direnç katsayılarını ve Varyant 1'e göre değişim oranlarını detaylı bir şekilde sunmaktadır. Şekil 4.19, bu değişimleri grafiksel olarak göstermektedir, bu grafikten Varyantlar arasındaki katsayı farkının net bir şekilde anlaşılacağı görülmektedir.

Çizelge 4.2. Model-A C_d katsayısı Değerleri

Analiz Modeli	C_d	Değişim
Varyant 1	0.709	
Varyant 2	0.663	%6.49
Varyant 3	0.622	%12.27
Varyant 4	0.537	%24.26
Varyant 5	0.41	%42.17
Varyant 6	0.393	%44.57
Varyant 7	0.39	%44.99
Varyant 8	0.386	%45.56
Varyant 9	0.384	%45.84
Varyant 10	0.382	%46.12
Varyant 11	0.38	%46.40



Şekil 4.19. Model-A Aerodinamik Direnç Katsayıları Değişim Grafiği

Şekil 4.20'de, tüm varyantların basınç haritaları incelenmektedir. Bu haritalar sayesinde, varyantlar etrafında oluşan düşük ve yüksek basınç bölgeleri belirlenebilmektedir. Düşük basınç bölgeleri genellikle hava akışının hızlandığı alanlarda oluşurken, yüksek basınç bölgeleri ise hava akışının yavaşladığı veya durduğu bölgelerde meydana gelmektedir. Varyant 1 ile Varyant 5 arasındaki modellerde α açısı 25° 'den düşük olduğu için akış direkt olarak treyler ön yüzeyine çarpmaktadır ve çarptığı bölgede yüksek basınç oluşturmaktadır. Bu yüksek basınç bölgesi Varyant 1 için en yüksek, Varyant 5 için en düşüktür. Varyant 6 itibarı ile α açısı 25° olduğu için treyler ön yüzeyinde bu yüksek basınç bölgeleri gözlenmemiştir. α açısının 25° olarak sabit kaldığı sonraki varyantlarda β açısı arttıkça treyler arka bölgesinde oluşan basınç azalmaktadır. Yüksek basınç aerodinamik direncin artmasına ve performansın azalmasına sebep olurken; düşük basınç ise, aerodinamik direncin azalmasına ve performansın artmasına yol açmaktadır.

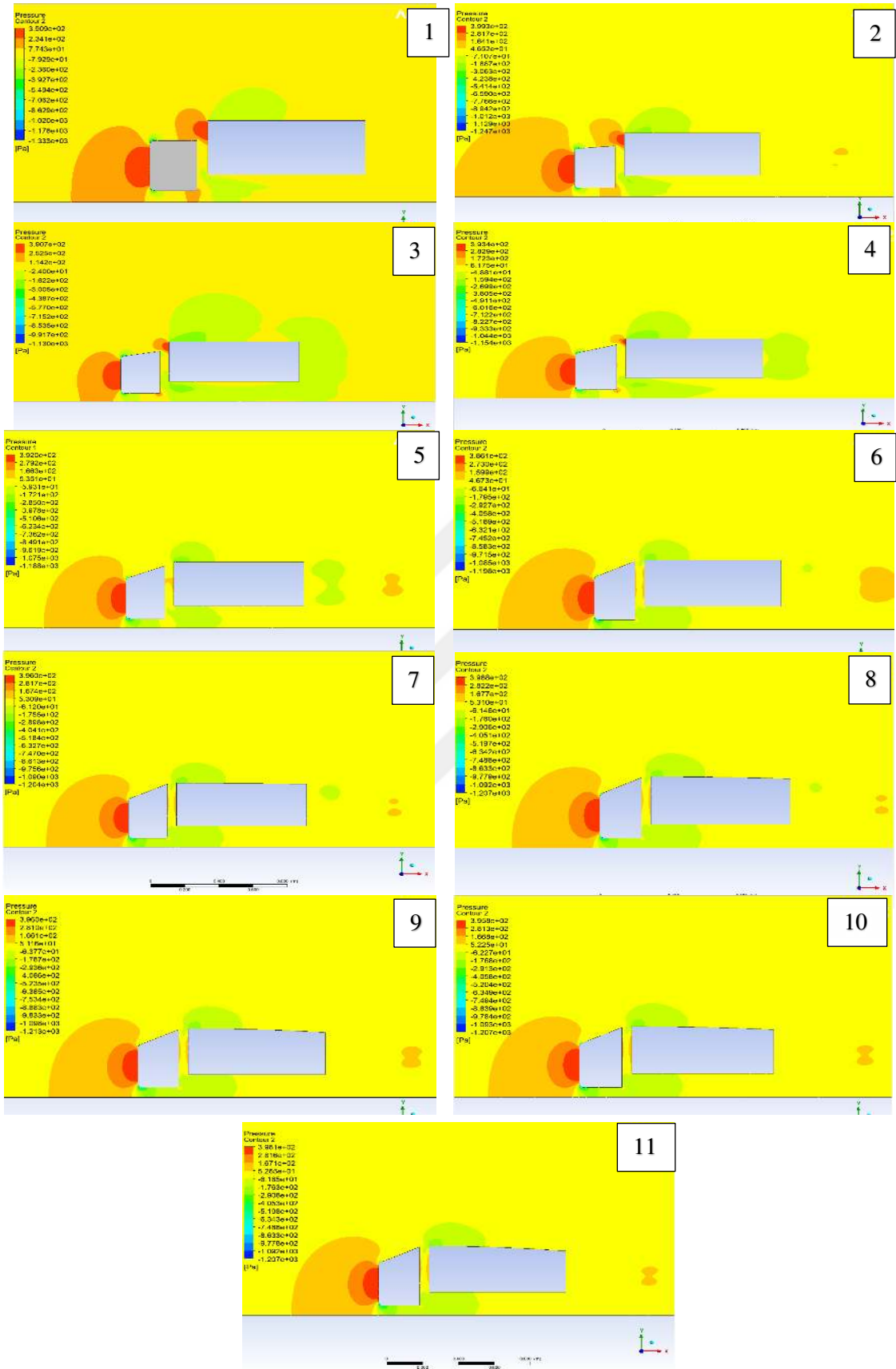
Şekil 4.21, tüm varyantlara ait hız haritalarını içermektedir. Bu haritalar, treylerin arkasında oluşan türbülans bölgelerini ve düşük hız karakterlerini göstermektedir. Varyant 1 ile Varyant 5 arasındaki modellerde α açısı 25° 'den düşük olduğu için çekici üstüne gelen akış pürüzsüz akmadığı için treyler üst bölgesinde akış ayrılması yaşanmaktadır. Akış ayrılmasının oranı ise α açısı büyüdükçe azalmaktadır. Ayrıca Varyant 1 ile Varyant 5 arasındaki durumlarda treyler ön yüzeyine çarpan hava, treyler ile çekici arasındaki boşluktan alta doğru akarak akışın aşağı yönlü de ayrılmasına sebep olur bu da treyler alt bölgesinde akışın olmasına sebep olur. Varyant 6 ile Varyant 11 arasındaki durumlarda ise bu durum daha az gözlenir. Sonucu olarak treyler alt bölgesinde düşük hız bölgesi gözlenir.

α açısı 25 derece sabit olduktan sonraki varyantlarda β açısı arttıkça treyler arkasında oluşan art izi bölgesi azalmaktadır. Bu durum da türbülans oluşumunu azaltmaktadır. Türbülanslar, hava akışının kararsızlaşmasına ve enerji kaybına yol açabilir. Bu da aerodinamik performansın düşmesine ve direncin artmasına neden olabilir.

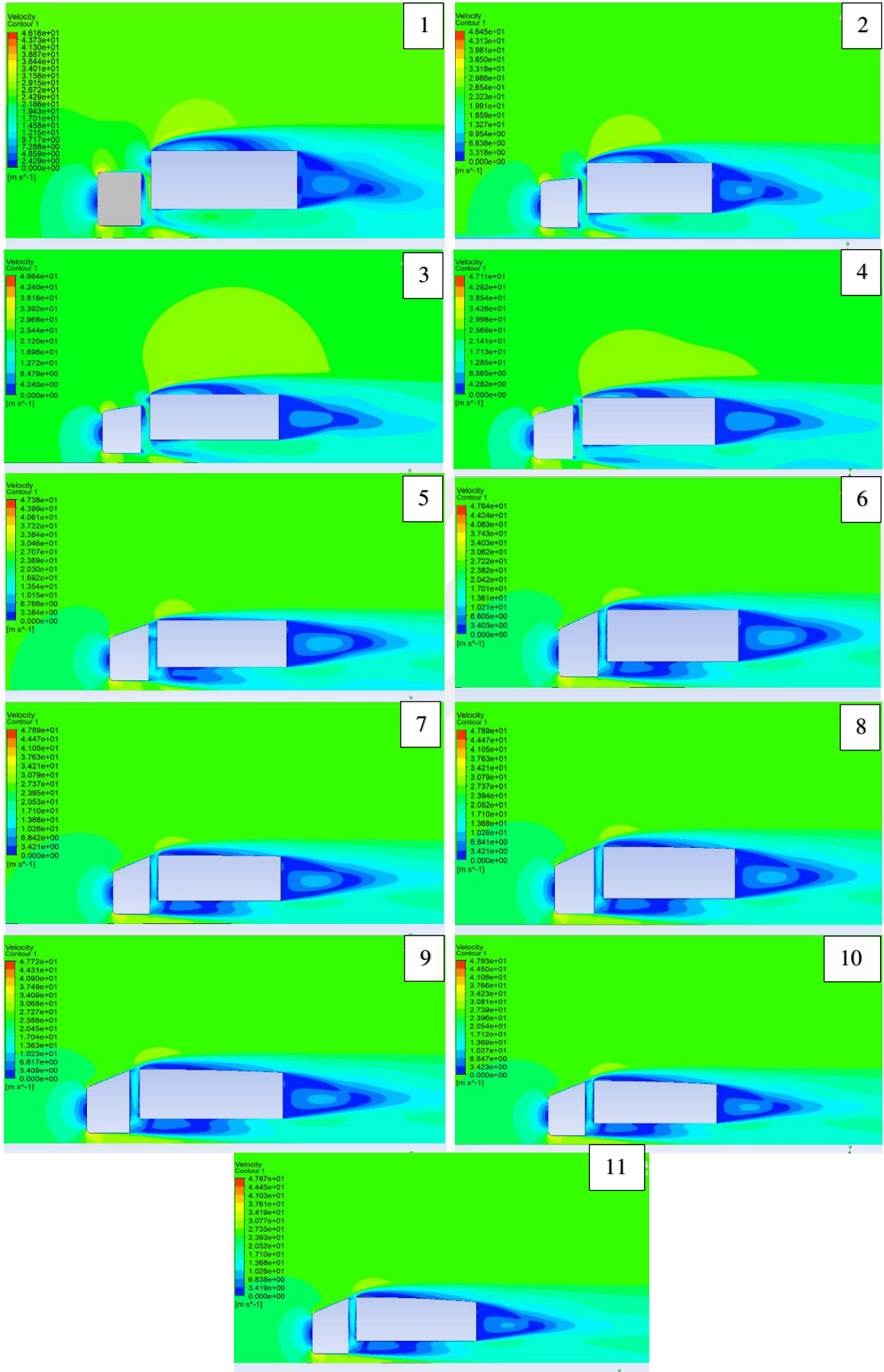
Düşük hız bölgelerinde artan basınç, aerodinamik direncin artmasına ve performansın azalmasına neden olur. Yüksek hız bölgelerinde ise düşen basınç, aerodinamik direncin azalmasına ve performansın artmasına yol açmaktadır.

Son olarak, Şekil 4.22, Model-A'nın ayrıca akış gradyanlarını göstermektedir. Akış gradyanları hız haritası ile benzer performans sergilemektedir. Bu grafik, akış hareketlerinin nasıl değiştiğini, varyantların aerodinamik performansına nasıl etki ettiğini ve hava akışının aerodinamik performansla olan etkisini anlamak için kullanılır.

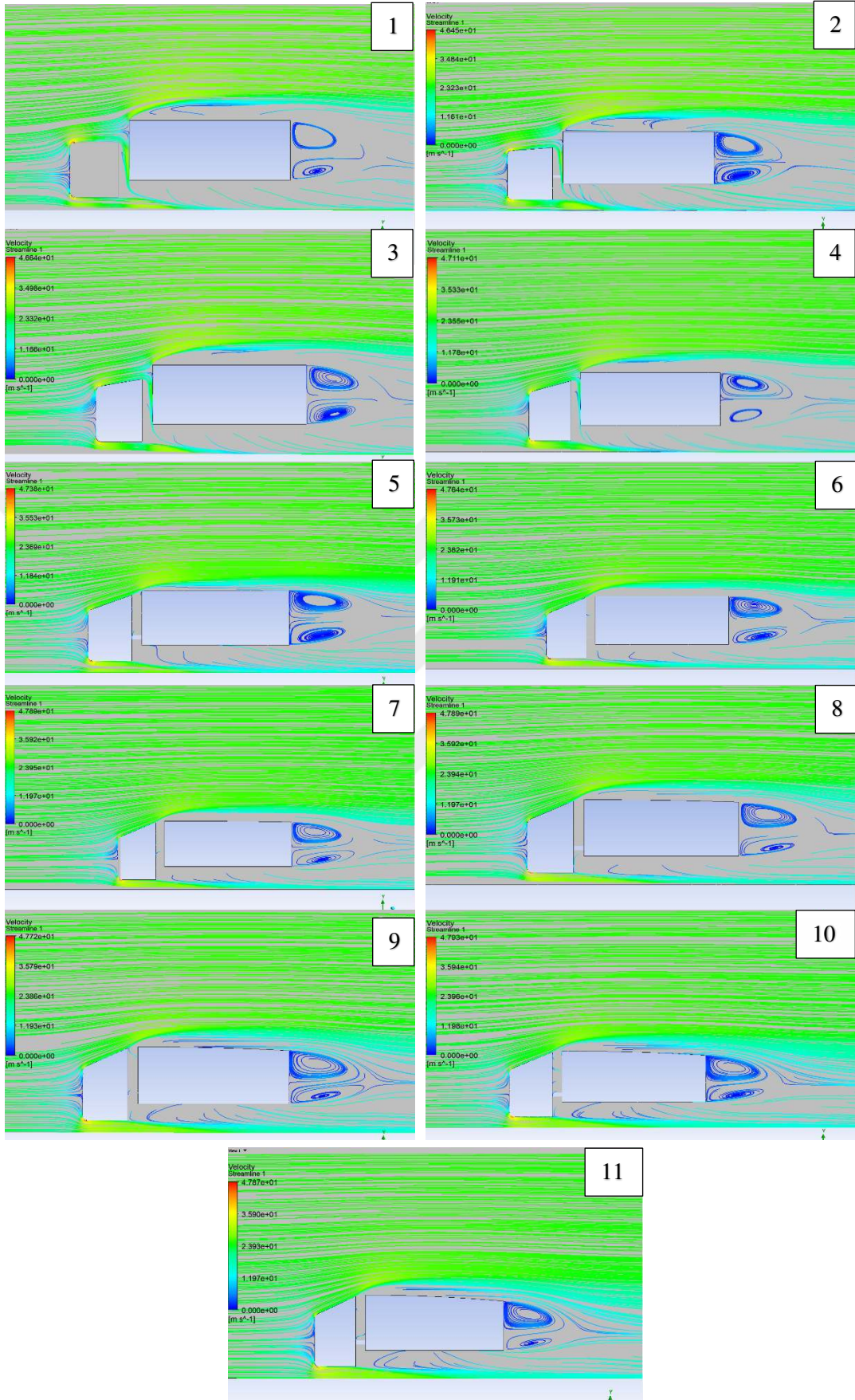
Bu analizler, Model-A'nın aerodinamik performansının derinlemesine anlaşılması için önemli bir temel oluşturmaktadır. Elde edilen bulgular, gelecekteki geliştirmeler, optimizasyonlar ve tasarım değişiklikleri için değerli bir rehberlik sağlamaktadır. Bu sayede, daha verimli ve etkili tasarımların oluşturulması ve aerodinamik performansın maksimum seviyeye çıkarılması hedeflenmektedir.



Şekil 4.20. Model-A Tüm Varyantların Basınç Haritaları



Şekil 4.21. Model-A Tüm Varyantların Hız Haritaları



Şekil 4.22. Model-A Tüm Varyantların Akış Gradyanları

4.2.2. Model-B HAD Analiz Sonuçları

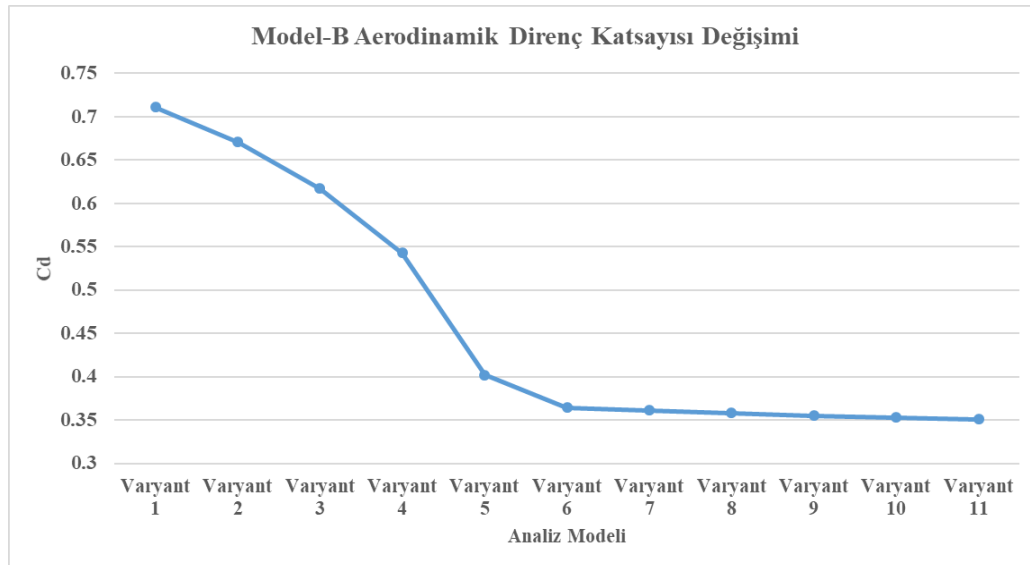
Model-B için gerçekleştirilen akışkanlar dinamiği analizleri, Model-A analizlerine benzer bir şekilde yapılmıştır, ancak Model-B'nin özgün özellikleri dikkate alınarak farklı sonuçlar elde edilmiştir.

Model-B için yapılan 11 hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri sonucunda, Varyant 1 için aerodinamik direnç katsayısı C_d 0.711 olarak hesaplanmıştır. En fazla geliştirmenin olduğu Varyant 11 için ise C_d katsayısı 0.351 olarak belirlenmiştir. Bu değerler arasında %50.63'lük bir C_d katsayısı farkı bulunmaktadır.

Çizelge 4.3, aerodinamik direnç katsayıları ve Varyant 1'e göre değişim oranlarını Model-B için detaylı olarak sunmaktadır. Şekil 4.23, bu değişimleri grafiksel olarak göstererek, Model-B varyantları arasındaki aerodinamik performans farkının net bir şekilde anlaşılabilceğini göstermektedir.

Çizelge 4.3. Model-B C_d katsayısı Değerleri

Analiz Modeli	C_d	Değişim
Varyant 1	0.711	
Varyant 2	0.671	%5.63
Varyant 3	0.617	%13.22
Varyant 4	0.543	%23.63
Varyant 5	0.402	%43.46
Varyant 6	0.364	%48.80
Varyant 7	0.361	%49.23
Varyant 8	0.358	%49.65
Varyant 9	0.355	%50.07
Varyant 10	0.353	%50.35
Varyant 11	0.351	%50.63



Şekil 4.23. Model-B Aerodinamik Direnç Katsayısı Değişim Grafiği

Şekil 4.24'te, tüm Model-B varyantlarının basınç haritaları incelenmektedir. Bu haritalar sayesinde, varyantlar etrafında oluşan düşük ve yüksek basınç bölgeleri belirlenebilmektedir. Model-B'nin farklı tasarım özellikleri, bu basınç dağılımlarının Model-A'dan farklı olabileceğini göstermektedir. Model-B ve Model-A ile benzer bir performans sergilemiştir. Varyant 1 ile Varyant 6 arasındaki α açısının 25° 'den düşük olduğu durumlarda art izi bölgesinde oluşa büyük türbülans bölgelerinde yüksek basınç alanları görülmektedir. Bu da aerodinamik direnç katsayısını artırma yönünde eğilim göstermesine sebep olur.

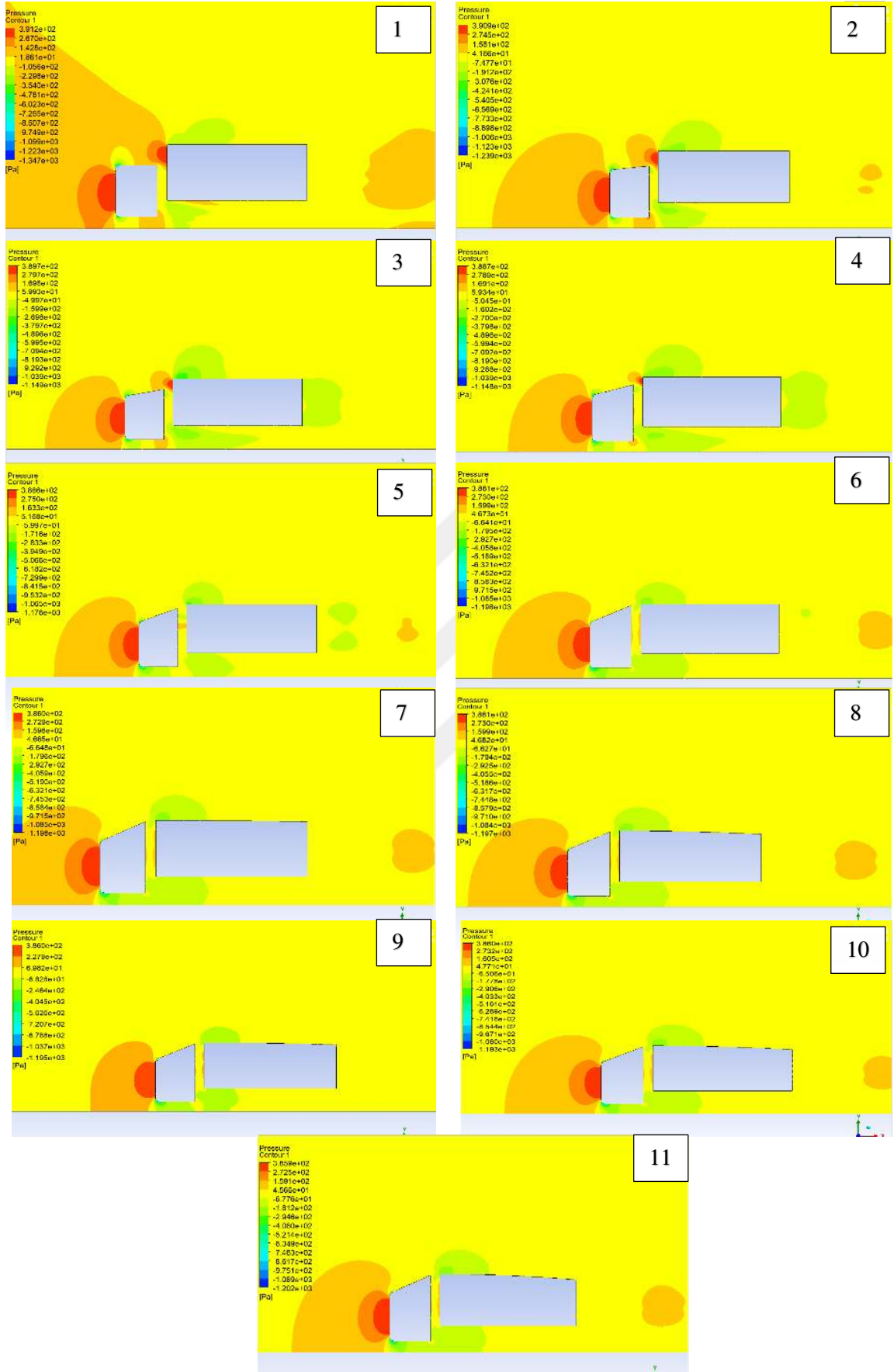
Şekil 4.25'te, tüm Model-B varyantlarına ait hız haritaları incelenmektedir. Bu haritalar, treylerin arkasında oluşan türbülans bölgelerini ve düşük hız karakterlerini göstermektedir. Düşük hız bölgelerinde, hava akışının yavaşladığı ve bu nedenle basınç değerlerinin arttığı gözlemlenir. Yüksek hız bölgelerinde ise, hava akışının hızlandığı ve basınç değerlerinin düştüğü görülmektedir. Model A gibi Model B de benzer davranışlar göstermiştir.

Düşük hız bölgelerinde artan basınç, aerodinamik direncin artmasına ve performansın azalmasına neden olmaktadır. Yüksek hız bölgelerinde ise düşen basınç, aerodinamik direncin azalmasına ve performansın artmasına yol açar.

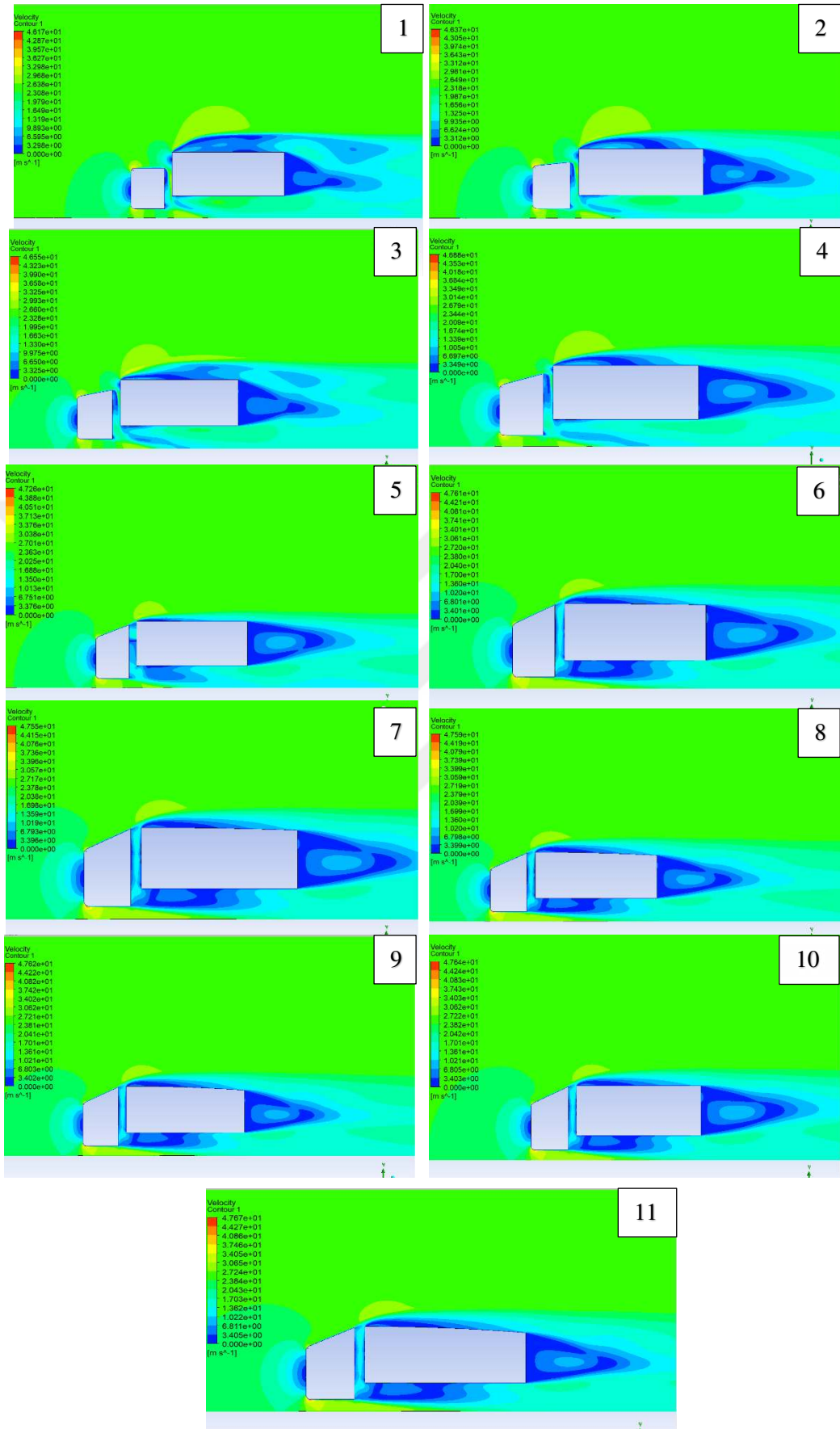
Son olarak, Şekil 4.26, Model-B'nin tüm varyantlarına ait akış gradyanlarını göstermektedir. Bu grafik, akış hareketlerinin nasıl değiştiğini, akışın aerodinamik performansına nasıl etki ettiğini ve Model-B'nin özgün tasarımının aerodinamik performansa olan etkisini anlamak için kullanılmaktadır. Varyant 1 de de görüleceği üzere treyler üzerinden akış ile treyler art izi bölgesinde akan akış birleşerek aerodinamik direnci arttırıcı bir etken oluşturmaktadır.

Model-B'nin özgün aerodinamik tasarımı, bu türbülans bölgelerinin ve hız değişimlerinin Model-A'dan farklı olabileceğini göstermektedir. Model-B çekici geometrisinde kullanılan yuvarlatma işlemi aerodinamik direnç katsayısına özellikle Varyant 6'dan sonra azaltma yönünde etki etmiştir.

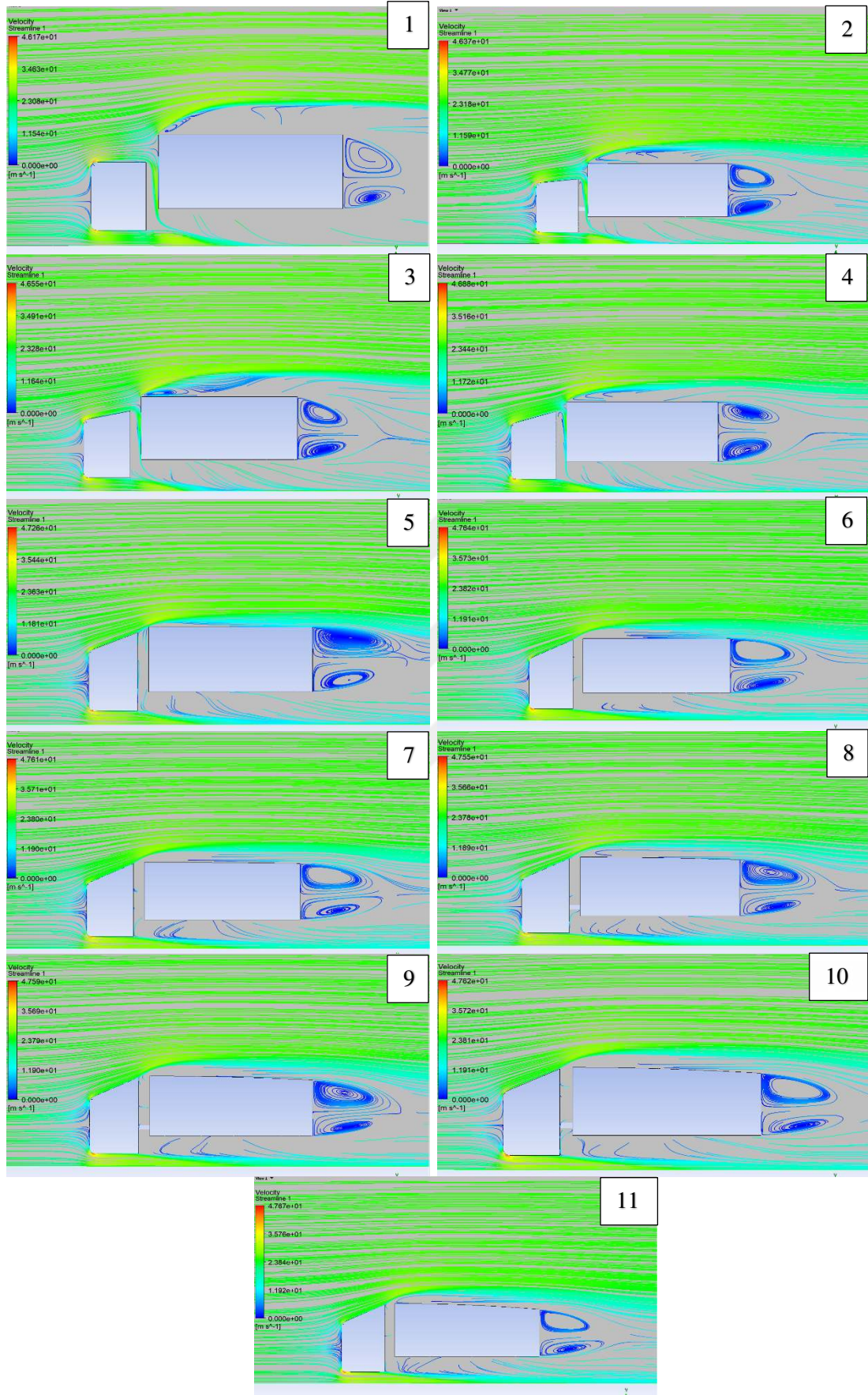
Hızın ve basıncın aerodinamikteki ilişkisi, akışkanların davranışıyla doğrudan ilgilidir. Yavaşlayan hava akışı, basınç artışına neden olurken, hızlanan hava akışı basınç düşüşüne yol açar. Bu durum, aerodinamik direncin ve performansın nasıl etkilendiğini anlamak için önemlidir. Akışkanın hızı arttıkça, aerodinamik direnç genellikle azalır, bu da performansın artmasına katkıda bulunur. Ancak, türbülans bölgeleri gibi spesifik durumlar, bu ilişkiyi karmaşıktırabilir ve performans üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır.



Şekil 4.24. Model-B Tüm Varyantların Basınç Haritaları



Şekil 4.25. Model-B Tüm Varyantların Hız Haritaları



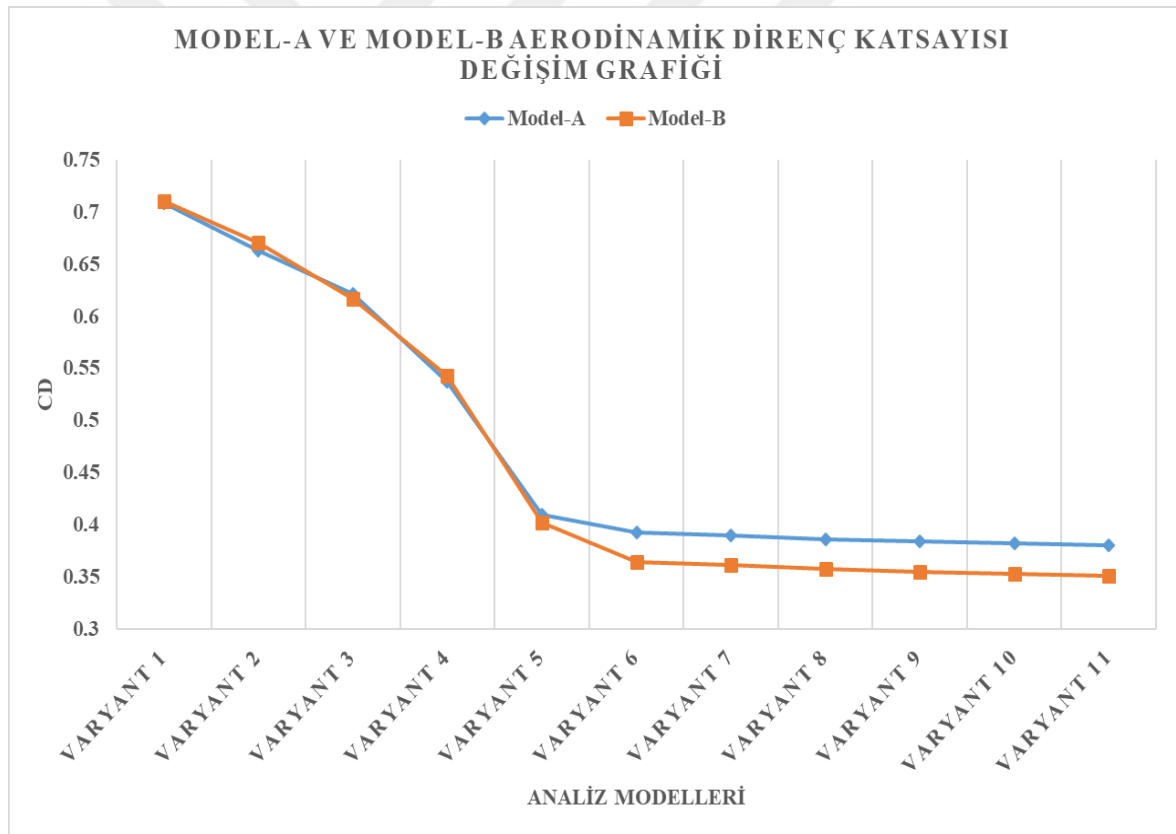
Şekil 4.26. Model-B Tüm Varyantların Akış Gradyanları

4.2.3. Analiz Sonuçları Karşılaştırması

Mevcut çalışmada, Varyant 1 ve Varyant 5 arasındaki analizlerde iki model de benzer davranış sergilemiştir. Bu varyantlar da her iki modelde deflektör kullanımının tam olmadığı, 5°,10°,15°,20° olduğu durumlardır. Bu varyantlarda deflektör kullanımı eksik olduğu için treyler ön bölgesinde yüksek basınç değerleri gözlenmekte ve akış bu yüzeylere yöneldiği için direnç katsayısının olumsuz etkilendiği gözlenmektedir.

Ayrıca Varyant-6 ile Varyant-11 arasındaki değişimler görece düşük kalmıştır. Anlamlı bir aerodinamik direnç katsayısında azalma meydana gelmemiştir.

Varyant-6 ile Varyant-11 arasında yapılan analizlerde Model-B ortalama %8 oranında daha iyi bir direnç katsayısı değerleri vermiştir. Bunun temel sebebi Model-B’de kullanılan çekicideki üst yuvarlamanın etkilerinin tam deflektör kullanımı ile akış yönlendirme özelliklerinin pozitif etkilemesinden dolayıdır. Şekil 4.27’te Model-A ve Model-B’nin aerodinamik direnç katsayıları grafiği görülmektedir.



Şekil 4.27. Model-A ve Model-B Direnç Katsayısı Değişim Grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çekici-treyler geometrisinde treylerin yüksekliği çekicinin yüksekliğinden daha fazla olduğundan dolayı seyir halinde gelen rüzgâr, treylere dik açı ile çarpar ve bu durumda bu bölgede yüksek basınç meydana gelmesi, ters yönde de direnç meydana gelmesine sebep olur. Ters yönde direnç meydana gelmesi de aracın yakıt tüketimini önemli ölçüde etkiler. Yalnızca çekici üzerine eklenen deflektör tasarımı, bu olumsuz etkiyi ciddi ölçüde düşürmektedir.

Charles ve ark.(2021) yaptıkları çalışmada, basitleştirilmiş çekici-treyler geometrisinde deflektör kullanımında aerodinamik direnç katsayısının %34 oranında azaldığını hesaplamışlardır. Mevcut çalışmada, Model-A için yalnızca Varyant 6 ile ifade edilen tüm deflektör kullanımında değişim oranı %44.57, Model-B Varyant 6 için ise %48.80 olarak hesaplanmıştır. Aradaki farkın temel sebepleri, deflektör açısı ve yapısından kaynaklıdır.

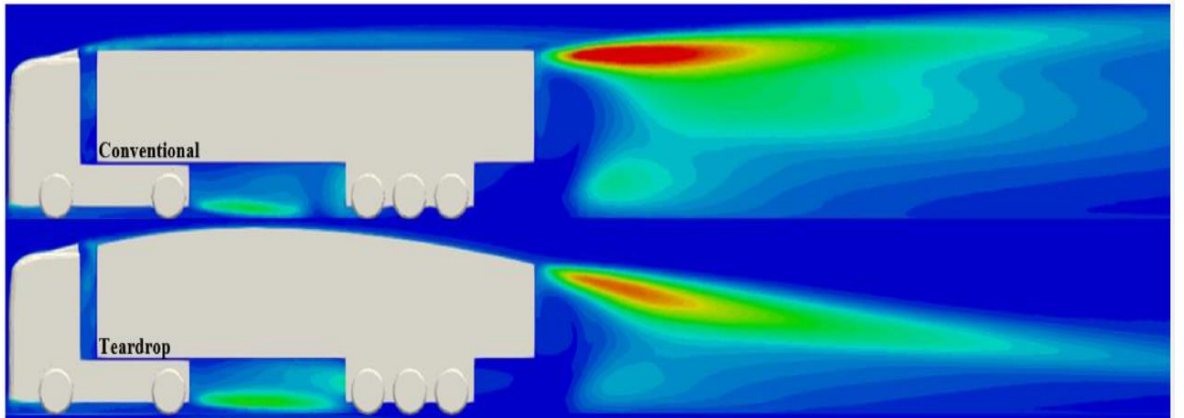
Model-A için yapılan ilk analizler olan Varyant-1 analizlerinde direnç katsayısı değeri 0.709 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, **Allan (1981)** yaptığı rüzgâr tüneli deneyinde bulduğu direnç katsayısı değeri olan 0.77'den %8.6 oranında farklıdır. DeneySEL ve analiz çalışmalarında %8.6 farklılık, kabul edilebilir bir değerdir.

Bukrev (2023) yaptığı çalışmada, Treyler üst yapısındaki değişimi incelemiştir. Şekil 5.1'de incelediği iki model görülmektedir. Konvansiyonel olarak tanımlanan standart model ile gözyaşı modeli arasındaki aerodinamik direnç katsayısı değişimini hesaplamıştır. İki model arasında %8.58 oranında bir direnç katsayısı değişimi hesaplamıştır.

Mevcut çalışmada, Varyant-6 ile Varyant-11 arasında;

- Model-A için %3.31
- Model-B için ise %3.51 fark bulunmaktadır.

Mevcut çalışmada kullanılan varyantların yarım gözyaşı modeli ve gözyaşı açısının maksimum 5° olduğu düşünüldüğünde bulunan sonuçların tutarlılığı görülmektedir.



Şekil 5.1. Bukrev(2023)'in incelediği konvansiyonel ve gözyaşı modelleri

Bu çalışma, treyler-çekici kamyon geometrisi tasarımının aerodinamik direnç katsayısına etkisini incelemek amacıyla yapılmıştır. Yapılan analizler, çekicide kullanılan deflektör ve treyler gözyaşı modelinin aerodinamik direnç katsayısını önemli ölçüde düşürdüğünü göstermektedir.

Sonuç olarak;

- Deflektör ve treyler gözyaşı modelinin aerodinamik performansı üzerindeki olumlu etkileri vurgulanmalıdır. Bu değişiklikler, yakıt verimliliği açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Çünkü düşük aerodinamik direnç, kamyonların daha az yakıt tüketmesine ve çevresel etkilerini azaltmasına olanak tanır.
- Tasarım sürecinde aerodinamik faktörlerin daha fazla dikkate alınması önemlidir. Treyler ve kamyon üreticileri ve tasarımcıları, deflektör ve treyler gözyaşı modeli gibi aerodinamik optimizasyon tekniklerini daha yaygın bir şekilde benimsemelidir. Bu, sadece yakıt tasarrufu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda taşıma maliyetlerini azaltır ve sürdürülebilirliği artırır.
- Gelecekteki çalışmaların, daha kapsamlı aerodinamik optimizasyon tekniklerini ve çeşitli çekici-treyler geometrisi tasarımı seçeneklerini değerlendirmesi önerilmektedir. Bu, endüstrinin daha verimli ve çevre dostu kamyonlar üretmesine olanak tanır.
- Bu tezde incelenen deflektör ve treyler gözyaşı modeli gibi aerodinamik optimizasyon teknikleri, treyler-çekici kamyonlarının aerodinamik performansını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Gelecekteki çalışmalar, bu alandaki araştırmaları daha da ileriye taşıyarak, taşımacılık endüstrisinde çevre dostu ve ekonomik treyler tasarımlarının geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- Aider, J. L., Beaudoin, J. F., ve Wesfreid, J. E. (2010). Drag and lift reduction of a 3D bluffbody using active vortex generators, Springer, 48, 5, 771-789.
- Akansu, Y. E., Bayındırlı, C. ve Seyhan M. (2016). Bir Çekici Römork Aracında Sürüklenme Kuvvetinin Pasif Akış Kontrol Yöntemleri İle İyileştirilmesi, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 36, 1, 133-141.
- Allan, J., (1981). Aerodynamic drag and pressure measurements on a simplified tractor-trailer model. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 9, 125–136.
- Altınışik, A., 2013, Binek Araç Üzerindeki Aerodinamik Analizlerin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 1-180.
- Bukrev (2023). Shape optimisation of teardrop trailers to minimise aerodynamic drag in articulated lorries, 1-15 s.
- Buresti, G., Lungu, G.V., and Lombardi, G. (2007). Methods for the drag reduction of bluff bodies and their application to heavy road vehicles. First Interim Report CRF and DIA, 2-29.
- C.Korkmaz (2021). Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Simülasyonları İçin Optimum Ağ Elemanı Yapısının Belirlenmesi.
- Charles T., Yang Z., Lu Y. (2021). Assessment of Drag Reduction Devices Mounted on a Simplified Tractor-Trailer Model, J. Appl. Comput. Mech., 7(1), 45–53.
- Charles, T.; Yang, Z. (2022). Comparison of the Effectiveness of Drag Reduction Devices on a Simplified Truck Model through Numerical Simulation. Modelling, 3, 300–313.
- Christoffer Hakansson, Malin J. Lenngren (2010). CFD Analysis of Aerodynamic Trailer Devices for Drag Reduction of Heavy Duty Trucks.
- C. Bayındırlı (2015). Çekici Ve Çekici Römork Kombinasyonlarında Aerodinamik Dirençlerin İncelenmesi, 1-12 s.
- Çakmak, M.A. (2000). Kara taşıtlarının aerodinamik bakımdan incelenmesi. Mühendis ve Makina, Cilt 1, Sayı 489, 35-41.
- Çengel, Y.A., Cimbala J. M. Çev.Engin T., 2008. Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamalar, Güven Kitap Evi.
- Demircioğlu, T.K. (2007). Bir araç modelinin Aerodinamik Analizi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 54-98.
- Gutierrez, W.T., Basil, H., Croll, R.H. and Rutlege, W.H. (1996). Aerodynamics overview of the Ground Transportation Systems (GTS) Project for Heavy Vehicle Drag Reduction, SAE Technical Paper, 960906.
- Harun Chowdhury, Hazim Moria, Abdulkadir Ali (2013). A Study On Aerodynamic Drag of a Semi-Trailer Truck.

- Henne P.A., 1990, Applied Computational Aerodynamics, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington.
- Khosravi, M., Mosaddeghi, F., Oveisi, M., & khodayari-b, A. (2015). Aerodynamic drag reduction of heavy vehicles using append devices by CFD analysis. Journal of Central South University, 22, 4645-4652.
- Krajnovic, S., and Davidson, L. (2005). Influence of floor motions in wind tunnels on the aerodynamics of road vehicles. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 93, 677-696.
- Levin, J. ve Rigdal, R., 2011, Aerodynamic analysis of drag reduction devices on the underbody for SAAB 9-3 by using CFD, Master's Thesis Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 4-12.
- Modi, V.J., Hill, S.St. and Yokomizo, T. (1995). Drag reduction of trucks through boundary-layer control. Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics 54/55, 583-594.
- Ogburn, M.J., and Ramroth L.A. (2007). A truck efficiency and GHG reduction opportunities in the Canadian Truck Fleet (2004-2007). Rocky Mountain Institute Report, Canadian, Canadian, 1-13.
- Öst, J., Krajnovic, S. (2012). The flow around a simplified tractor-trailer model studied by large eddy simulation. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 102 pp. 36-47.
- R. Miralles (2012). Analysis of Some Aerodynamic Improvements for Semi-Trailer Tankers, 23-25 s.
- Solmaz, H. (2010). Değişik Araç Modellerinin Rüzgâr Direnç Katsayılarının Bir Rüzgâr Tünelinde Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 43-47.
- Stadler Severin, Hirz Mario (2014). A Novel Approach of Aerodynamic Optimization On Long-Distance Transportation Truck.
- Vishwa Krishna, Suwathy, Pragadeesh., and Venkatesan, (2018). Drag reduction in a class 8 truck - scaled down model. MATEC Web of Conferences 172, 01003.
- Wong, J. Y., 2001, Theory of ground vehicles, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA., p. 203-260.
- Wood, R. M. (2004). Impact of advanced aerodynamic technology on transportation energy consumption. SAE transactions, 854-874.
- Wood, R.M. and Bauer, S.X.S. (2003). Simple and low cost aerodynamic drag reduction devices for tractor-trailer Trucks. SAE Technical Paper, 01-3377, 1-18.
- Katz, J., 1995. Race Car Aerodynamics, Robert Bentley Inc., Cambridge.

ÖZGEÇMİŞ

Onur Can KIRIT,2020 yılında Bursa Uludağ Üniversitesi'nden Otomotiv Mühendisliği lisans derecesi aldı ve ardından 2021 yılında Çukurova Üniversitesi'nde aynı alanda yüksek lisans eğitimine başladı. 2020 yılından beri Koluman Otomotiv Endüstri'de Ar-Ge Uzmanı olarak görev almaktadır. Bu süre zarfında tasarım, analiz, proje yönetimi ve ürün konseptlerinin test edilmesi konularında önemli deneyimler kazanmıştır. CATIA V5, Solidworks, ANSYS Fluent, Static Structural, Motion, Modal modülleri ve SAP gibi yazılımlarda yetkindir. Yarı römork projeleri için aerodinamik ve yorgunluk analizleri yapma, 2D mühendislik çizimleri oluşturma ve yol testleri gerçekleştirme konularında deneyim sahibidir.

