

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BELİRLİ BİR OTOMOBİLİN ÖN BÖLÜMÜNDEKİ AERODİNAMİK
ETKİLERİN VE ENERJİ KAYBININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet YILDIZ

(152134106)

Anabilim Dalı: Mekatronik Mühendisliği
Programı: Elektronik Sistemleri

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Beşir DANDIL

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 18 Haziran 2018

HAZİRAN-2018

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BELİRLİ BİR OTOMOBİLİN ÖN BÖLÜMÜNDEKİ AERODİNAMİK
ETKİLERİN VE ENERJİ KAYBININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet YILDIZ

(152134106)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 18 Haziran 2018

Tezin Savunulduğu Tarih: 06 Temmuz 2018

Tez Danışmanı :
Diğer Jüri Üyeleri :

Prof. Dr. Beşir DANDIL (F.Ü)

Doç. Dr. Cumali İLKILIÇ (F.Ü)

Dr. Öğr. Üyesi Fikret ATA (B.Ü)

HAZİRAN-2018

ÖNSÖZ

Yapmış olduğum bu çalışmada maddi ve manevi olarak yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Beşir DANDIL’ a yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın gerçekleşmesinde önemli katkıları olan Fırat Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı öğretim elemanlarına teşekkür ederim.

Ayrıca özverili bir şekilde sürekli yanımda olan, maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Saygılarımla.

Ahmet YILDIZ
ELAZIĞ – 2018

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	IV
ABSTRACT	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	X
SEMBOLLER LİSTESİ	XI
KISALTMALAR.....	XIII
1. GİRİŞ	2
1.1. Araçlarda Aerodinamik Etki ve Aerodinamik Kayıplar	3
1.2. Literatür Araştırması.....	5
1.3. Tezin Amacı ve Yapısı	12
2. TAŞITLARIN AERODİNAMİĞİ	13
2.1. Taşıtlarda Temel Şekillerin Tarihsel Gelişimi.....	13
2.2. Otomobile Etkiyen Dirençler ve Taşıt Aerodinamiği	18
2.2.1. Aerodinamik Sürüklenme Direnci.....	19
2.2.2. Aerodinamik Direncin Performansa Etkisi.....	26
2.2.3. Aerodinamik Direncin Yakıt Tüketimine Etkisi	28
3. MATEMATİKSEL DENKLEMLER VE HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ.....	34
3.1. Matematiksel Denklemler	34
3.1.1. Süreklilik Denklemi.....	34
3.1.2. Momentum (Navier-Stokes) Denklemi	35
3.1.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi	36
3.1.4. Sonlu Hacimler Yöntemi	39
3.1.5. Sonlu Farklar Yöntemi	41
3.1.6. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinde Türbülans Modelleri.....	43
3.1.6.1. Standart k-Epsilon Türbülans Modeli.....	44
3.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği.....	45
3.2.1. HAD Yöntemi ile İşlem Basamaklarının Temel Adımları.....	47
3.2.2. Ön İşlem	48

3.2.3. Çözüm.....	48
3.2.3.1. Doğrusal HAD Yöntemi.....	49
3.2.3.2. Doğrusal Olmayan HAD Yöntemi	49
3.2.4. Son İşlem	50
4. MATERYAL VE YÖNTEM	51
4.1. Kapalı Model Taşıt Modelleme.....	52
4.1.1. Çözüm Geometrisi.....	54
4.1.2. Ağ Yapısı.....	56
4.1.3. Çözüm.....	58
4.2. Ana Model Taşıt Modelleme.....	63
4.2.1. Ana Model Taşıtın Çözüm Geometrisi.....	64
4.2.2. Ana Model Taşıtın Ağ Yapısı.....	65
4.3. Delikli Model Taşıt Modelleme	66
4.3.1. Delikli Model Taşıtın Çözüm Geometrisi	66
4.4. Rüzgar Türbinli Model Taşıt Modelleme.....	69
4.3.2. Rüzgar Türbinli Taşıtın Çözüm Geometrisi	69
5. BULGULAR	72
5.1. Kapalı Model Taşıtın Ön Yüzey Formları.....	72
5.2. Ana Model Taşıtın Ön Yüzey Formları.....	77
5.3. Delikli Model Taşıtın Ön Yüzey Formları	81
5.4. Rüzgar Türbinli Model Taşıtın Ön Yüzey Formları.....	85
5.5. Aerodinamik Direncin Enerji Tüketimi Üzerine Etkisi.....	90
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	98
KAYNAKLAR.....	100
ÖZGEÇMİŞ	106

ÖZET

Bu tez çalışmasında, belirli bir otomobilin ön bölümündeki aerodinamik etkilerin ve enerji kaybının sayısal incelemesi yapılmıştır. Bu amaçla araç ön bölümüne etkiyen sürüklenme direnci ve bunun enerji tüketimine etkisi incelenmiştir. Öncelikle, ölçüleri belirlenmiş araç modellenmiştir. Solidworks programında tasarlanan temsili otomobil modeli üzerinde Ansys Fluent yazılımında k- ϵ türbülans modeli kullanılarak üç boyutlu hava akış benzetimi uygulanmıştır. Taşıtın ağ yapısı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Çözüm için Ansys’de sınır şartları olarak serbest akış hızı 27 m/s alınmıştır ve hava akış özellikleri belirlenmiştir. Ön bölümü kapalı olan otomobil modeli için sürüklenme ve kaldırma katsayıları gibi aerodinamik karakteristikler hesaplanmıştır. Böylece, akış Fluent programında analiz edilerek, otomobilin ön formuna etkiyen sürüklenme direnç katsayısı (Cd) bulunmuştur. Ayrıca elde edilen bu verilerin enerji tüketimine olan etkileri araştırılmıştır.

Daha sonra aracın ön bölümüne delik açılarak ve ızgara yerleştirilerek analizler ayrı ayrı tekrar yapılmıştır. Ayrıca, aracın ön bölümündeki deliğin arkasına rüzgar türbini ilave edilmesiyle aerodinamik sürüklenme direnç katsayısının ve enerji tüketiminin değişimi incelenmiştir.

Sonuç olarak ön bölümünde delik, ızgara, türbin bulunan araçlarda enerji tüketiminin kapalı form otomobile göre daha fazla olduğu görülmüştür. Ancak otomobile ilave edilen rüzgar türbini yardımıyla üretilen enerjinin ana model otomobile göre oluşan kayıp enerjiden daha fazla olduğu görülmüştür. Böylece otomobile etkiyen aerodinamik kayıp enerjinin bir kısmının rüzgar türbini yardımıyla geri kazanımının mümkün olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Aerodinamik, Aerodinamik sürüklenme direnç katsayısı, otomobil, Ansys Fluent, yakıt tüketimi.

ABSTRACT

Numerical Investigation of Aerodynamic Effects And Energy Loss In The Front Part of A Particular Vehicle

In this thesis, a numerical study investigating the aerodynamic effects and loss of energy in the front part of a particular car has been made. For this purpose, the air resistance affecting the front part of the vehicle and its effect on energy consumption has been analyzed. Firstly, the vehicle with certain dimensions has been modeled. Three dimensional air flow simulation has been applied to the representative car model which has been designed in the Solidworks program, by using k- ϵ turbulence model through Ansys Fluent software. The meshing structure of the vehicle has been generated by using finite elements method. For the solution part in Ansys, the free flow velocity of 27 m/s is taken as the boundary conditions and the air flow properties have been determined. The aerodynamic characteristics such as drag and lift coefficients are calculated for the car model with closed front panel. Thus, by analyzing the flow Fluent program, the drag coefficient (C_d), which affects the preform of the car, is found. Also, the effects of these results on energy consumption has been investigated.

After that, the analyzes have been separately carried out again by drilling a hole and placing the grid in the front part of the vehicle. In addition, the variation of the aerodynamic drag coefficient and energy consumption resulting from adding a wind turbine behind the hole in the front section of the vehicle has been investigated.

As a result, it has been observed that the energy consumption in vehicles with hole, grille or turbine in their front part is more than the energy consumption of closed form vehicle. However, with the help of the wind turbine, which is added to the vehicle, it is seen that the energy generated is much more than the loss of energy generated by the main model vehicle. Thus, it has been shown that some of the aerodynamic energy losses, which affects the vehicle, can be recovered with the aid of wind turbine.

Keywords: Aerodynamics, drag coefficient, vehicle, Ansys Fluent, fuel consumption

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Otomobil aerodinamiğinin dört ana döneminin tarihsel gelişimi.....	13
Şekil 2.2. Camille Jenatzy tarafından 1899 yılında yapılan araç.....	14
Şekil 2.3. Boat-Tailed “Audi Alpengier”	14
Şekil 2.4. Hareket halindeki arabanın arkasındaki toz akımının Rumpler arabasıyla karşılaştırılması.....	15
Şekil 2.5. Bugatti yarış otomobili.....	15
Şekil 2.6. Jaray tipi otomobillerde sürüklenme direnç katsayısının değişimi	16
Şekil 2.7. Kleyer tarafından tasarlanan Adler Trumf taşıtı	16
Şekil 2.8. Otomobil sürüklenme katsayısının taşıt gövde yapısıyla değişimi	17
Şekil 2.9. Yıllara göre otomobillerdeki sürüklenme direnç katsayısının değişimi.....	17
Şekil 2.10. Yıllara göre sürüklenme direnç katsayısının değişimi	18
Şekil 2.11. Taşıt hızına bağlı olarak sürüklenme direnç katsayılarının değişimi.....	19
Şekil 2.12. Rüzgar tüneline araç üzerindeki akış şeklinin görüntülenmesi	20
Şekil 2.13. Taşıt izdüşüm alanı.....	21
Şekil 2.14. Temel bir araca ilave edilen spoilerlerin aerodinamik sürüklenme katsayısına etkisi.	22
Şekil 2.15. Otomobildeki aerodinamik kuvvetler, momentler, basınç ve ağırlık merkezleri.....	24
Şekil 2.16. Opel marka bir aracın toplam direnç dağılım yüzdeleri.....	29
Şekil 2.17. Minibüs tipi bir taşıtta yol durumu, sürüklenme ve yakıt tüketimi ilişkisi..	29
Şekil 2.18. Yakıt tüketimine araç ağırlığının ve sürüklenme direncinin etkisi	30
Şekil 2.19. Bir minibüsteki aerodinamik sürüklenme katsayısının yakıt tüketimine etkisi	31
Şekil 3.1. Düzensiz geometri bir levhanın üçgen sonlu elemanla idealleştirilmesi ...	37
Şekil 3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile modelleme örnekleri	37
Şekil 3.3. Sonlu eleman ağları	38
Şekil 3.4. Düğüm noktalarının gösterimi	43
Şekil 3.5. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği işlem süreci	47
Şekil 3.6. Otomobil yüzeyi için oluşturulan ağ yapısı.....	48
Şekil 4.1. Sayısal analiz işlem adımları.....	51

Şekil 4.2. Kapalı model otomobilin genel görünümüleri	52
Şekil 4.3. Kapalı model otomobilin yan görünüşü ve boyutları.....	53
Şekil 4.4. Kapalı model otomobilin ön görünüşü ve boyutları.....	53
Şekil 4.5. Kapalı model otomobilin Fluent programında izometrik görünüşü.....	54
Şekil 4.6. Kapalı model otomobilin Fluent programında yandan görünüşü.....	54
Şekil 4.7. Rüzgar tüneli ve kapalı model otomobilin görüntüsü	55
Şekil 4.8. Rüzgar tüneli inlet ve outlet yüzeyi.....	56
Şekil 4.9. Rüzgar tüneli wall yüzeyleri	56
Şekil 4.10. Rüzgar tüneli ve kapalı model otomobilin genel ağ görünümü	57
Şekil 4.11. Kapalı model otomobilin izometrik ağ görünümü	57
Şekil 4.12. Fluent programı başlatma seçenekleri.....	58
Şekil 4.13. Problemin genel özellikleri	58
Şekil 4.14. Akış türünün belirlenmesi	59
Şekil 4.15. Havanın özellikleri	60
Şekil 4.16. Giriş (inlet) sınır şartının özellikleri.....	60
Şekil 4.17. Çıkış (outlet) sınır şartının özellikleri	61
Şekil 4.18. Duvar (wall) sınır şartının özellikleri	61
Şekil 4.19. Referans değerlerin özellikleri	62
Şekil 4.20. Çözüm yöntemi özellikleri	62
Şekil 4.21. Ana model otomobilin ön görünüşü.....	63
Şekil 4.22. Ana model otomobilin yandan görünüşü ve hava tahliye kanalı	63
Şekil 4.23. Fluent programında ana modelin izometrik görünüşü	64
Şekil 4.24. Fluent programında ana modelin yandan görünüşü	64
Şekil 4.25. Rüzgar tüneli ve ana taşıt modelinin genel ağ görünümü	65
Şekil 4.26. Ana taşıt modelinin önden ağ görünümü	65
Şekil 4.27. Delikli model otomobilin ön görünüşü	66
Şekil 4.28. Fluent programında delikli modelin izometrik görünüşü.....	67
Şekil 4.29. Fluent programında delikli modelin yandan görünüşü	67
Şekil 4.30. Rüzgar tüneli ve delikli taşıt modelinin genel ağ görünümü	68
Şekil 4.31. Delikli taşıt modelinin önden ağ görünümü.....	68
Şekil 4.32. Rüzgar türbinli model otomobilin ön görünüşü	69
Şekil 4.33. Fluent programında rüzgar türbinli modelin izometrik görünüşü.....	69
Şekil 4.34. Fluent programında rüzgar türbinli modelin yandan görünüşü.....	70

Şekil 4.35. Rüzgar tüneli ve türbinli modelin genel ağ görünümü.....	70
Şekil 4.36. Türbinli modelin önden ağ görünümü.....	71
Şekil 5.1. Kapalı modelin statik basınç konturunun izometrik görünüşü	72
Şekil 5.2. Kapalı modelin statik basınç konturunun yandan görünüşü	73
Şekil 5.3 Kapalı modelin statik basınç konturunun önden görünüşü	73
Şekil 5.4. Kapalı modelin hız vektörlerinin izometrik görünüşü	74
Şekil 5.5. Kapalı modelin hız vektörlerinin yandan görünüşü	74
Şekil 5.6. Kapalı modelin hız vektörlerinin önden görünüşü	74
Şekil 5.7. Kapalı modelin akım çizgileri önden görünüşü	75
Şekil 5.8. Kapalı modelin akım çizgileri yandan görünüşü.....	75
Şekil 5.9. Kapalı modelin akım çizgileri izometrik görünüşü.....	75
Şekil 5.10. Kapalı modelin z eksenı boyunca alınan kesitten hız konturunun yandan görünüşü	76
Şekil 5.11. Kapalı modelin z eksenı boyunca alınan kesitten basınç konturunun yandan görünüşü	76
Şekil 5.12. Ana modelin statik basınç konturunun izometrik görünüşü.....	77
Şekil 5.13. Ana modelin statik basınç konturunun yandan görünüşü	77
Şekil 5.14. Ana modelin statik basınç konturunun önden görünüşü	78
Şekil 5.15. Ana modelin hız vektörlerinin yandan görünüşü	78
Şekil 5.16. Ana modelin hız vektörlerinin önden görünüşü	78
Şekil 5.17. Ana modelin akım çizgilerinin izometrik görünüşleri.....	79
Şekil 5.18. Ana modelin akım çizgilerinin yandan görünüşleri.....	79
Şekil 5.19. Ana modelin z eksenı boyunca alınan kesitten hız konturunun yandan görünüşü	80
Şekil 5.20. Ana modelin z eksenı boyunca alınan kesitten basınç konturunun yandan görünüşü	80
Şekil 5.21. Delikli modelin statik basınç konturunun izometrik görünüşü	81
Şekil 5.22. Delikli modelin statik basınç konturunun yandan görünüşü.....	81
Şekil 5.23. Delikli modelin basınç konturun önden görünüşü	82
Şekil 5.24. Delikli modelin hız vektörlerinin izometrik görünüşü	82
Şekil 5.25. Delikli modelin hız vektörlerinin yandan görünüşü.....	82
Şekil 5.26. Delikli modelin akım çizgilerinin yandan görünüşü	83
Şekil 5.27. Delikli modelin akım çizgilerinin önden görünüşü.....	83

Şekil 5.28. Delikli modelin z ekseni boyunca alınan kesitten hız konturu.....	84
Şekil 5.29. Delikli modelin z ekseni boyunca alınan kesitten basınç konturu	84
Şekil 5.30. Rüzgar türbinli modelin statik basınç konturunun izometrik görünüşü.....	85
Şekil 5.31. Rüzgar türbinli modelin statik basınç konturunun yandan görünüşü.....	85
Şekil 5.32. Rüzgar türbinli modelin statik basınç konturunun önden görünüşü	85
Şekil 5.33 Rüzgar türbinli modelin hız vektörlerinin izometrik görünüşü.....	86
Şekil 5.34. Rüzgar türbinli modelin hız vektörlerinin önden görünüşü	86
Şekil 5.35. Rüzgar türbinli modelin hız vektörlerinin türbin etrafındaki görünüşü	86
Şekil 5.36. Rüzgar türbinli modelin akım çizgilerinin izometrik görünüşü	87
Şekil 5.37. Rüzgar türbinli modelin akım çizgilerinin yandan görünüşü.....	87
Şekil 5.38. Rüzgar türbinli modelin akım çizgilerinin önden görünüşü.....	88
Şekil 5.39. Rüzgar türbinli modelin türbin bölümü akım çizgilerinin izometrik görünüşü	88
Şekil 5.40. Rüzgar türbinli modelin hız konturu yandan görünüşleri.....	89
Şekil 5.41. Rüzgar türbinli modelin basınç konturu yandan görünüşleri	89
Şekil 5.42. 27 m/s hız ile 100 km mesafe için harcanan aerodinamik enerji miktarları	91
Şekil 5.43. Türbinli modelde ana modele göre aerodinamik enerji kaybı ile türbinde elde edilen aerodinamik enerji miktarındaki kazanç miktarları.	93
Şekil 5.44. Türbinli modeldeki aerodinamik enerji kayıp yüzdesi ile türbinde elde edilen aerodinamik enerji miktarındaki kazanç yüzdesi.	93
Şekil 5.45. 7 m/s hız ile 100 km mesafe için harcanan toplam enerji miktarları	95
Şekil 5.46. Türbinli modelde ana modele göre enerji kaybı ile türbinde elde edilen enerji miktarındaki kazanç miktarları.....	96
Şekil 5.47. Türbinli modeldeki enerji kayıp yüzdesi ile türbinde elde edilen enerji miktarındaki kazanç yüzdesi.	97

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1. 90 km/h hızda bir benzinli taşıtın yakıt enerjisinin kullanımı..... 23



SEMBOLLER LİSTESİ

A	: Taşıt izdüşüm alanı
B	: Yakıt tüketimi
C_d	: Aerodinamik sürüklenme direnç katsayısı
C_l	: Aerodinamik kaldırma direnç katsayısı
C_m	: Aerodinamik moment direnç katsayısı
C_y	: Aerodinamik yan bileşen katsayısı
D_t	: Zaman adımı
E_{Ana Model}	: Ana model taşıttaki toplam enerji kaybı
E_{1Ana Model}	: Ana model taşıttaki aerodinamik enerji kaybı
E_{Türbinli model}	: Rüzgar türbinli model taşıttaki toplam enerji kaybı
E_{1Türbinli model}	: Rüzgar türbinli model taşıttaki aerodinamik enerji kaybı
E_{Türbin Kayıp}	: Ana model ile rüzgar türbinli model arasındaki toplam enerji kaybı
E_{1Türbin Kayıp}	: Ana model ile rüzgar türbinli model arasındaki aerodinamik enerji kaybı
E_{Kazanç}	: Rüzgar türbinli modelin ana modele göre enerji kazancı
E_{1Kazanç}	: Rüzgar türbinli modelin ana modele göre aerodinamik enerji kazancı
E_{Türbin}	: Türbinden kazanılan enerji miktarı
f	: Yuvarlanma direnç katsayısı
F_d	: Aerodinamik sürüklenme kuvveti
F_l	: Aerodinamik kaldırma kuvveti
F_y	: Aerodinamik kuvvetin yan bileşeni
F_t	: Motor çeki kuvveti
G_k	: Ortalama hız gradyanlarından kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimi
H	: Toplam basınç
k	: Türbülans kinetik enerjisi
L	: Teker ağırlığı
L_{Taşıt}	: Taşıtın uzunluğu
M_p	: Yunuslanma momenti
M_R	: Yuvarlanma momenti

M_Y	: Yana kayış momenti
M_P	: Yunuslanma momenti
P	: Basınç
P_E	: Taşıt motor gücü
$P_{Türbin}$	: Türbinin ürettiği güç
P_{∞}	: Atmosfer basıncı
R	: Geri çevirim oranı
Re	: Reynolds sayısı
R_Y	: Yuvarlanma direnci
u	: Anlık hız vektörünün x bileşeni
v	: Anlık hız vektörünün y bileşeni
V	: Akış hızı
V_{hava}	: Havanın hızı
V_t	: Taşıt hızı
w	: Anlık hız vektörünün z bileşeni
W	: Taşıt ağırlığı
ρ	: Havanın yoğunluğu
μ	: Dinamik viskozite
ε	: Yayılma hızı oranı
Γ_k	: Türbülans kinetik enerjisi diffüzivite terimi
Γ_ε	: Türbülans yayılma oranı diffüzivite terimi
σ_ε	: Türbülans yayılma oranı Prandtl sayısı
σ_k	: Türbülans yayılma oranı Prandtl sayısı
μ_t	: Türbülans viskozitesi
ΔC_d	: Sürüklenme direnç katsayısındaki iyileşme
ΔB	: Yakıt tüketimindeki iyileşme
H	: Verim

KISALTMALAR

CFD	: Computational Fluid Dynamics
CAD	: Computer Aided Design
FEM	: Finite Element Method
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
IB	: Immersed Boundary
LES	: Large Eddy Simulation
PIV	: Particle Image Velocimetry
SST	: Shear Stress Transport

1. GİRİŞ

Günümüzde insanlığın yakalamış olduğu teknolojik ve ekonomik gelişmişliğin en önemli nedenlerinden birisi, gereksinim duyulan enerjinin çok daha kolay elde edilebilmesidir. Ancak enerjiye kolay erişim enerjiye olan ihtiyacın ve bunun sonucunda da tüketimin artmasına neden olmaktadır. Enerji ihtiyacının karşılanmasındaki en önemli sorunlardan birisi, kullanılan enerjinin önemli kısmının fosil kaynaklardan sağlanmasıdır. Fosil enerji kaynaklarından enerji sağlanması bütün dünya için geri dönülemez çevre sorunlarına neden olmakta ve bu sorunlar doğal hayatı ciddi şekilde tehdit etmektedir. Fosil yakıtların özellikle yirminci yüzyılda yoğun şekilde kullanılmasıyla birlikte asit yağmurları, küresel ısınma, ozon tabakasının delinmesi gibi etkileri dünyayı geriye dönüşü zor bir çevre kirliliği ile karşı karşıya bırakmıştır.

Fosil yakıtların neden olduğu çevresel ve ekonomik sorunların üstesinden gelebilmenin yolu fosil kaynaklara bağımlılığın azaltılmasıdır [1]. Bunu sağlamanın yolu ise, enerjinin yenilenebilir temiz kaynaklardan sağlanması ve enerjinin verimli bir şekilde kullanılmasıdır. Her iki konuda da bütün dünyada yoğun bir araştırma ve yatırım faaliyeti devam etmektedir. Özellikle enerjinin üretilmesinin yanında, verimli bir şekilde tüketimi için de çok yoğun araştırmalar devam etmekte ve gelişmiş devletler bu konuda önemli teşvik uygulamaları gerçekleştirmektedir.

Günümüzde fosil enerji kaynaklarının önemli bir miktarı ulaşım araçlarında tüketilmektedir. Özellikle günümüzde insan yaşamını kolaylaştırmasından dolayı modern yaşamın bir parçası haline gelen kara taşıtları bu tüketimin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Kara taşıtlarının yaşamımızı kolaylaştırmasının yanında, kullandığı enerjinin tamamına yakını fosil yakıtlardan sağlanmasından dolayı ekonomik ve çevresel alanlarda ülkelere önemli ölçüde yükler getirmektedir. Fosil kaynaklardan enerji elde edilmesinin neden olduğu çevresel sorunların yanında, ortaya çıkardığı önemli bir sıkıntı da, özellikle Türkiye gibi dışarıdan enerji ithal eden ülkeler için meydana gelen, ekonomik sorunlardır. Bu sorun ülkeler arasında çıkan savaşların birçoğunun nedeni olmakta ve bu konuda ülkeler enerji ihtiyaçlarını karşılamak için savaştan dahi çekinmemektedirler.

Ülkeler için bu kadar önemli bir konuda enerji tasarrufu, öncelikli konuların başındadır. Her ülke tükettiği enerjiyi mümkün olduğunca verimli kullanmak için gerekli tedbirleri almaktadır. Ayrıca gerekli enerjiyi yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarından temin etmeye çalışmaktadır. Çünkü petrol fiyatlarındaki artış ülke ekonomisini doğrudan olumsuz olarak etkilemektedir.

Türkiye’de petrol tüketiminin büyük bir kısmı karasal taşıtlardan (otomobil, kamyon, otobüs, vb.) kaynaklanmaktadır. Her yıl ülkelerin ekonomik büyümelerine paralel olarak dünyadaki araç sayısının artmasıyla orantılı olarak ülke içindeki yakıt tüketimi de artmaktadır. Bu tüketimi ya da tüketim hızını azaltmanın yolu ise gereksiz araç kullanımının azaltılarak daha çok toplu taşıma yöntemlerinin kullanılması, taşıtların gerek motor gerekse gövde olarak yakıt tüketimini azaltacak şekilde tasarlanması gibi yöntemler mevcuttur.

Taşıtlarda yakıt enerjisinin % 60’ ı içten yanmalı motorlarda ısı enerjisi olarak dışarı atılmakta, % 10’ u aktarma organlarında, % 5’ i pistonların ataletinde ve % 5’ de sürtünmeden dolayı olmak üzere yaklaşık %80’ i harcanmaktadır. İçten yanmalı motorlar çok düşük verimle çalışmaktadır. Bu soruna çare olarak yakıt tüketiminin azaltılması amacıyla motorlardaki yanmanın iyileştirilmesi ve verim artırması çalışmaları yapılmaktadır. Bununla birlikte diğer kayıpların azaltılması da önem taşımaktadır. Bu amaçla taşıtlarda istenilen performans artırımları ve yakıt tüketimini minimize etmenin başka bir yolu da taşıt üzerine gelen dirençlerin azaltılması ve bu sayede kayıpların azaltılmasıdır. Bu dirençleri azaltmanın yolu da dirençlerin taşıt performansı üzerindeki etkilerinin iyi bilinmesidir.

1.1. Araçlarda Aerodinamik Etki ve Aerodinamik Kayıplar

Hareket halindeki bir araç; hareketi sırasında çeşitli direnç kuvvetlerinin etkisinde kalır. Bu direnç kuvvetleri, kütle kuvvetleri ve dış kuvvetler şeklinde incelenir. Araçlardaki aerodinamik etki taşıta etkiyen dış kuvvet içerisinde ele alınır ve bu taşıtın hareketini sağlayan güce ve yakıt tüketimine etki eder.

Araçlarda aerodinamik etki taşıtın hava içindeki hareketi sonucu oluşur. Taşıt aerodinamiği; akışkan hareketi, yol ve taşıt geometrisi arasındaki etkileşimleri içermektedir. Bu etkileşimler sonucu, taşıt etrafında üç boyutlu, karmaşık türbülanslı bir akış yapısı meydana gelir. Yakıt ekonomisi, taşıtın dengesi, gürültü, toz ve su birikiminin oluşumu açısından taşıtın aerodinamiği önem taşımaktadır.

Taşıt etrafındaki akış, taşıtın üst, taban ve yan yüzeylerden ayrılan kayma tabakaları ile karakterize edilmektedir. Bu kayma tabakaları birbirleri ile veya tekrar taşıt ile etkileşerek oldukça karmaşık üç boyutlu girdap bölgeleri meydana getirmektedirler. Taşıt arkasındaki girdap bölgesinin kararsız yapısı, taşıta etkiyen aerodinamik kuvvetler üzerinde önemli etkilere sahiptir [2].

Taşıt üzerine etkiyen direnç kuvvetinin oluşumunda birincil etken, taşıt ön ve arka yüzeylerine etkiyen basınç dağılımının farklılığıdır. Arka bölgede meydana gelen akış ayrılması ve ters akış bölgesi düşük basınç bölgesine neden olmaktadır. Taşıtın ön ve arka yüzeyleri arasındaki basınç farklılığı direnç kuvvetinin büyük bölümünün oluşmasını sağlamaktadır [3].

Taşıtın hareketi sırasında, taşıt ve hava arasında meydana gelen bağıl hız nedeniyle aerodinamik kuvvetler oluşur. Genel olarak sürüklenme katsayısı (C_d), kaldırma katsayısı (C_l) ve moment katsayısı (C_m) otomobiller için aerodinamik karakteristikleri ifade eder. Bu katsayılar küçüldükçe aracın manevra, hızlanma, yol tutuş yeteneği gibi özelliklerinde de iyileşme görülür. Sürüklenme katsayısı değeri bir cismin dış formu sebebiyle düzgün doğrusal akım içinde oluşturduğu süreksizlik ve türbülans gibi akım bozulmaları sonucu ortaya çıkar. Dış form itibarıyla cisim ne derece az bozulmaya sebep olursa sürüklenme katsayısı ve buna bağlı olarak sürüklenme kuvveti de o derece küçük olur. Hızı ve geometrik boyutları belli olan bir aracın hava direnç kaybını azaltmanın tek yolu aracın dış formuna bağlı olan sürüklenme katsayısını azaltmaktır. Taşıtlarda motorda üretilen güç, hava direnci ve sistem içindeki kayıpları karşılar. Düşük hızlarda hava direnci diğer kayıplar yanında oldukça düşük mertebelerdedir. Ancak hız 30-40 km/h değerine ulaşıncaya hava direnci önem kazanır. Bunun sebebi hava direncinin hızın karesiyle doğru orantılı olarak artmasıdır [3].

1.2. Literatür Araştırması

Aerodinamik ve taşıt teknolojisi, tarihsel süreç içerisinde birçok denemelerden sonra günümüzdeki seviyesine ulaşmıştır. Akışkanlar mekaniği belli bir süreye kadar genellikle gemi ve uçak tasarımcılarının alanı olarak bilinmekteydi. Aerodinamik doğrudan bu alanlarla ilgili olduğu için, uçak ve gemi tasarımcıları kendileri için en iyi model olabilecek kuş ve balık şekillerini tasarımlarında kullanabiliyorlardı. Doğadan elde edilen bu veriler kullanılarak, aerodinamik açıdan önemli olabilen birçok özellik çıkarılabilmektedir. Benzer şekilde otomobil tasarımcıları da, yaptıkları tasarımlarında uçak ve gemi şekillerini kullanmaya başlamışlardır. Fakat kısa bir süre sonra yaklaşımlarının yanlış olduğunun farkına varmışlar ve bu yaklaşımlardan uzaklaşmalarıyla otomobil aerodinamiği ileri doğru bir ivme kazanmıştır [3].

Otomobil tasarımcılarının yeni yaklaşımı kutu gibi tasarımlar yerine daha yuvarlak hatlı ve hava akışını daha az bozan narin tasarımlar ile daha düşük sürüklenme katsayısına ulaşılabilme yönünde olmuştur. Böylece taşıt aerodinamiği ile ilgili deneysel ve sayısal çalışmalar artmış olup, yapılan çalışmalara ait kaynak taraması aşağıda sunulmuştur.

Gutierrez vd. (1996), yaptıkları çalışmada, basitleştirilmiş kamyon geometrisi şekline sahip model üzerinde deneysel ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada 1/8 ölçekli taşıt modeli etrafındaki akışı inceleyerek rüzgâr tüneli deneyleri gerçekleştirmişler ve Navier-Stokes denklemleri temelli HAD çalışmaları gerçekleştirmişlerdir [4].

McCallen vd. (1999)' da, 1/8 oranındaki kamyon tipi taşıt modeliyle NASA Ames rüzgâr tüneline HAD çalışmalarına kaynak olması amacıyla deneyler gerçekleştirmiş ve taşıt etrafındaki akışın görüntülenmesini iyileştiren yeni teknolojiler denemişlerdir [5].

Salari vd. (2004) yılında yaptıkları çalışmada traktör römork tipi taşıt etrafındaki akışın sayısal yöntemlerle incelenebilirliğini ve yöntemlerin doğruluğunu araştırmışlardır. Değişik türbülans modellerini ve birinci derece ayrıklaştırma ile ikinci derece ayrıklaştırma yöntemlerinin etkilerini araştırmışlardır [6].

McCallen vd. (2004) ağır vasıtalarla ilgili yapılan aerodinamik çalışmaları derleyerek bir kitapta toplamışlardır [7].

Lienhart vd. (2000) türbülans modellerinin taşıt aerodinamiği konusunda doğruluğunun araştırılmasına temel olacak deneyler yapmışlardır. Çalışmada iki eğim açısı için akış yapısındaki farklılıkları ortaya koymuşlardır [8].

Okada vd. (2005) parçacık izlemeli hız ölçüm yöntemi kullanarak 25° arka eğim açılı araçta akış modelinin genişlik yükseklik oranının değişiminin etkilerini incelemişlerdir. Taşıt arkasındaki enlemesine kesitlerdeki çift vortekslerin dar ve orijinal genişlik için belirgin olmasına karşılık en geniş durumda vorteks kesitinin belirgin bir şekilde azaldığını görmüşlerdir. Taşıt tasarımları açısından arka eğim açısı ile birlikte genişlik ve yükseklik oranının önemli bir geometrik parametre olduğunu belirtmişlerdir [9].

Watkins vd. (2003), aracın ön cam ve yan kenarları yakınlarında oluşan akış ayrılmasının yan cam üzerinde meydana getirdiği basınç dalgalanmalarının ve ortalama basınç değerlerini incelemişlerdir. Maksimum hidrodinamik basınç dalgalanmasının ayrılma ve yeniden birleşme bölgeleri arasında gerçekleştiğini ifade etmişlerdir [10].

Noger vd. (2005), arka eğim açısı 0° olan iki Ahmed modelinden birisi hareketli yatak üzerine, diğeri ise aerodinamik kuvvet dengeleme birimine sabitlenerek rüzgar tüneline geçiş durumları için dinamik deneyler gerçekleştirmişlerdir. Geçilen taşıt açısından çok yüksek bağıl hız değerlerinde küçük farklılıklar olmasına rağmen, aerodinamik kuvvetlerin hızından bağımsız olduğunu belirtmişlerdir. Yan rüzgârın geçen ve geçilen taşıt üzerinde herhangi bir yeni kararsız etkide bulunmadığını bildirmişlerdir [11].

Brunn ve Nitsche (2006), Ahmed modeli arkasındaki akış için aktif ayrılma kontrol yöntemini kullanarak akış ayrılmasını azaltmayı ve dolayısıyla toplam sürüklenme katsayısını azaltmayı amaçlamışlardır [12].

Watkins ve Vito (2004) art arda hareket eden taşıtlar için, taşıt aralığının sürüklenme ve kaldırma katsayılarına olan etkilerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Farklı aralıklar için

akış görüntülenmesi duman yöntemiyle yapılmış, aralık arttıkça akış yapısında belirgin bir fark olduğu gözlemlenmiştir [13].

Huang vd. (2009), art arda sıra halindeki model taşıtların (tekli, ikili, üçlü) üç boyutlu akış yapısını, kapalı devre rüzgar tüneli kullanılarak parçacık izlemeli hız ölçüm yöntemi ile 10, 30 ve 50 km/h taşıt hızları için ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Zıt yönlü boylamasına dönen vortekslerin serbest akım hızına göre daha yavaş bir biçimde aşağı doğru hareket ettiklerini belirlemişlerdir [14].

Hinterberger ve Garcia (2004), arka yüzey açısı 25° olan Ahmed modeli için seyrek ağ ve sık ağ olarak iki farklı ağ yapısı için sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir. Genel olarak sık ağ yapısı için elde edilen sonuçların, seyrek ağ durumuna göre deneysel verilere daha uyumlu olduğunu, sadece eğimli yüzeyin alt bölümünde deneysel verilerden sapmaların olduğunu belirlemişlerdir [15].

Kapadia ve Roy (2004), 25° ve 35° arka eğim açılı referans Ahmed taşıt modeli için yapısal olmayan ağ yapısı ve çözücüsü kullanarak Eddy simülasyon analizi gerçekleştirmişlerdir [16].

Guilmineau (2008), 25° ve 35° arka eğim açılı Ahmed modeli etrafındaki akışı birkaç farklı türbülans modeli ile sayısal olarak incelemiştir. Rüzgar oluşum bölgesindeki akış yapısının 30° eğimli arka yüzey durumunda üç boyutlu, bunun altındaki ve üstündeki eğim açılarında iki boyutlu olarak çözümün uygun olduğunu bildirmiştir [17].

Minguez vd. (2008), 25° eğim açısı için Eddy simülasyon hesaplamalarını yüksek dereceden spektral yöntem kullanılarak elde etmişlerdir. Düşük Reynolds sayılı durum için ters akış bölgelerinin daha büyük olduğunu ve taşıt arkasında izleyen ilave vorteksler olduğunu belirtmişlerdir [18].

Krajnovic ve Davidson (2005) çalışmalarında, akış alanındaki yön değişim bölgelerinin pozisyonlarının viskozite ve girişteki türbülans ve sınır tabaka kalınlıkları tarafından değil, geometri tarafından belirlendiği kabulünü yapmışlardır. Bu kabul Reynolds sayısının ve grid yoğunluğunun azalmasını sağlamıştır [19].

Corin vd. (2008), iki boyutlu basitleştirilmiş taşıtların birbirini geçmesi durumunda oluşan geçici aerodinamik kuvvetlerin değişimini bağıl hız ve yanal rüzgar etkisi için sayısal olarak incelemişlerdir. Bağıl hızın taşıt hızına oranının 0,2'den daha büyük olması durumunda dinamik etkilerin önemli olduğu sonucuna varmışlardır [20].

Clarke ve Filippone (2007), bir taşıtın diğerini geçmesi durumu karayolları koşullarındaki 30 m/s hız için iki boyutlu modeller kullanılarak dinamik ağ yöntemiyle sayısal olarak incelemişlerdir. Özellikle, geçen taşıtın önünün, geçilen taşıtın arkası ile hizalandığı pozisyonda, hızlı akışkan sıkışması ve ivmelenmesinden dolayı geçilen taşıtın sürüklenme katsayısında ani bir artış meydana geldiğini belirtmişlerdir [21].

Guilmineau ve Chometon (2009), yan rüzgar etkilerini incelemek için tasarlanan Willy kare kesitli model kullanarak deneysel ve sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir [22].

Gohlke vd. (2007), üç boyutlu kare kesitli model üzerinde yan rüzgar etkilerini sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. Deneysel ve sayısal veriler kullanılarak aerodinamik kuvvet spektrumlarını elde etmişler ve model dinamik kuvvetleriyle bağlantılı bir frekans değeri belirlemişlerdir [23].

İpci vd. (2015), bir kara taşıt modeli etrafındaki akış sayısal akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılarak incelemiştir. Seçilen Ahmed Modelinde sayısal çözümleme su tüneli benzetmesi yapılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçların mevcut referans deneysel çalışma ile uyum içinde olduğu görülmüştür [24].

Helgason ve Hafsteinsson (2009), bir aracın aerodinamik özelliklerini geliştirmek için otomatik şekil optimizasyonunu kullanmışlardır. Çözüm ağı ve HAD hesaplamaları için farklı iki yazılım kullanarak karşılaştırma yapmışlardır [25].

Pujals vd. (2010), aerodinamik sürüklenme direnci katsayısını azaltmak amacıyla Ahmed Modeli üzerinde çalışmışlardır. Bu amaçla, tavan kısmına girdap oluşturan eleman yerleştirmişlerdir. Girdap üreticilerini tavan boyunca enine birden çok silindirik ve pürüzsüz olacak şekilde belirlemişlerdir. Sonuçta, sürüklenme direnç katsayısında % 10 azalma sağlamışlardır [26].

Pinarbaşı vd. (2010), Eddy Benzetimi türbülans tekniğinin doğruluğu, 25° arka eğim açılı Ahmed modeli etrafındaki akış yapısı elde edilerek gösterilmiştir. Bu amaçla üç farklı ağ yapısı için taşıt boyunca hesaplanan ortalama hız ve türbülans profilleri deneysel profillerle karşılaştırılmıştır. Çalışmada elde edilen profillerin deneysel profillerle uyum içinde olduğu görülmüştür [27].

Temel vd. (2011), bir model kara taşıtı etrafındaki akış yapısı parçacık görüntülemeli hız ölçme yöntemi (PIV) kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. Hız ölçme yöntemiyle hız vektörleri, akım çizgileri ve girdap dağılımlarını belirlemişlerdir [28].

Baker ve Humphreys (1996), değişik rüzgar tünel benzetimleri (simülasyon) ile elde edilen, yüksek hızlı rüzgarlarda kamyonlardaki ve demiryolu konteynirlerindeki aerodinamik kuvvetler ve momentler için elde edilen sonuçları vermişlerdir. Farklı türde rüzgar tünel benzetimlerinin özellikle hareketli model taşıt sistemlerine uygulanabilirliğini belirtmişlerdir. Elde ettikleri sonuçları, yüksek hızlı rüzgarlarda kara taşıtları üzerindeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır [29].

Beccaria vd. (1999), aerodinamik özelliklerine göre spor otomobillerinin şeklini yarı otomatik olarak optimize edebilen bir yazılım sistemi geliştirmişlerdir. Geliştirilen sistem, otomobil tasarımının ilk evrelerinde aerodinamik optimizasyonun yapılmasını sağlamaktadır. Sistem bir Ferrari otomobil modelinde test edilmiş ve hesaplanan ve ölçülen aerodinamik özellikler arasında tam bir uyum olduğu görülmüştür [30].

Kaya ve Özcan (2013), basitleştirilmiş bir taşıt modelinde aerodinamik karakteristikleri tayin için üç boyutlu türbülanslı hava akışta sayısal bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olan ANSYS Fluent' i kullanmışlardır. Sonuçta taşıtlardaki aerodinamik karakteristikler belirlenerek yorumlanmıştır [31].

Bettle vd. (2003), karşı rüzgar etkisi altında bir köprüden geçen standart bir nakliye kamyonunda aerodinamik kuvvetlere kamyon hızının etkisini incelenmiştir. Kamyonun yüzeyinde hesaplanan basınç dağılımlarını kullanarak rüzgar hızlarına bağlı olarak aerodinamik kaldırma, sürüklenme ve moment katsayıları belirlenerek yorumlanmıştır [32].

Corno vd. (2014), spor araçlardaki sürüş konforunu arttırmak için aktif aerodinamik yüzeylerin kullanımını araştırmışlardır. Gerekli bant genişliği, kanat boyutu ve güç gereksinimleri benzetimde analiz edilmiş ve geliştirilen sistemin sürüş konforunda iyileşme sağladığını ifade etmişlerdir [33].

Corin vd. (2008), bir yol aracı diğerini geçtiğinde ortaya çıkan geçici aerodinamik kuvvetleri iki boyutlu (2D) hesaplamalı akışkan dinamikleri kullanılarak araştırılmışlardır. Meydana gelen dinamik etkilerin, araçların dengesi üzerinde büyük bir etki yaptığını göstermişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar ile dinamik etkilerin önemini belirterek, konu üzerinde daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğunu vurgulamışlardır [34].

Khaled vd. (2012), aerodinamik kuvvetlerdeki eğilimlerin parametrik analizi üzerinde durmuşlardır. Bu amaçla basitleştirilmiş bir taşıt modelinde gerçekleştirilen aerodinamik kuvvet ölçümlerini sunmuşlardır. Testler, rüzgar tüneline farklı hava akışı yapılandırmaları için gerçekleştirilmiştir. Sonuçta incelenen farklı parametrelerin etkilerine dayalı olarak aerodinamik sürüklemeyi azaltacak yeni tasarımlar önermişlerdir [35].

Khalighi vd. (2012), spor araç etrafındaki akışı deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal inceleme için geliştirdikleri Immersed Boundary (IB) yaklaşımını kullanmışlar ve bu yöntem ile dilimleme sürecinin hızlandırıldığını belirtmişlerdir. Sayısal verileri aynı araç geometrileri için deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Deneysel verilerde parçacık görüntüsü hızı (PIV) yüzey basıncı ve sürtünme katsayısı ölçümleri yapılmıştır. Sonuçta, spor araçta HAD benzetimleri ile akışı izlemişlerdir. Aynı geometri için HAD benzetimleri ile IB benzetimleri karşılaştırmışlar ve her iki benzetimin akış sonuçlarının benzer olduğu belirtilmiştir [36].

Cheng vd. (2013), sedan tipi taşıtlarda aerodinamik denge kabiliyetini sayısal olarak araştırmışlardır. Sayısal çözüm Geniş Eddy Simülasyonu (LES) yöntemine dayanmaktadır. Sonuçta aerodinamik sönümleme şartlarını akış görüntüleme sonuçlarına dayanarak yorumlamışlardır [37].

Zhu vd. (2012), bir köprü güvertesinde yol araçlarının türlerine göre aerodinamik katsayıların belirlenmesi için gerçekleştirilen rüzgar tüneli testleri yapmışlardır. Kara

taşıtlarının aerodinamik katsayıları tespit edilmiş ve bu aerodinamik katsayılara köprü güvertesinin etkilerini araştırmışlardır. Rüzgar yönü ile aerodinamik katsayıların değişimlerini gözlemlemek için farklı rüzgar yönlerini dikkate almışlardır. Test sonuçlarına göre köprü güvertesinin yan kuvvetleri önemli ölçüde azalttığını, ancak yuvarlanma momentlerini ise belli bir orana kadar arttırdığını belirtmişlerdir [38].

Sun vd. (2006), aerodinamik analiz temelli rüzgar tüneli ve su tüneli testlerine dayalı elektrikle çalışan küçük bir hava aracı prototipini geliştirmişlerdir. Hem rüzgar tüneli hem de su tünel testlerinde, gövde modelleri, elemanları ve metodolojisi tartışılmıştır. Test sonuçları, üçgen kanat şeklinin maksimum kaldırma katsayısına sahip olduğunu ve daha az girdap ve türbülanslara yol açtığını göstermiştir. Sonuçta, geliştirilen hava aracı prototipi gerçek uçuşta başarıyla test edilmiştir [39].

Vitale vd. (2009), ses altı ve süs üstü hızlarda bir aracın aerodinamik modelinin tahmin edilmesi için bir yöntem sunulmuştur. Yöntem, doğrusal olmayan bir filtreleme problemi olarak formüle edilmiş ve çok aşamalı bir yaklaşımla çözülmüştür [40].

Alama vd. (2012), taşıtların yapımında kilit alanlardan biri aerodinamik tasarımın önemi ve genel aerodinamiğin iyileştirilmesinin önemini vurgulamışlardır. Geliştirdikleri araçları rüzgar tüneline yerleştirerek deneyler gerçekleştirmişler ve farklı bileşenler için analiz etmişlerdir. Rüzgar tüneli testi sırasında meydana gelen farklılıkları karşılaştırılmıştır [41].

Hassan vd. (2014), yarış arabalarının aerodinamik sürüklenmesinin analizi ve araçta bazı modifikasyonlar ile sürüklemeyi azaltma yöntemlerini araştırmışlardır. k-epsilon türbülans modeli ile desteklenen Navier-Stokes denklemlerinin sayısal olarak çözerek, aracın sürüklenme katsayısının farklı gövde modifikasyonları ile azaltılabileceğini ifade etmişlerdir [42].

Hetawala vd. (2014), bir Formula yarış arabasının tasarımını gerçekleştirerek, aerodinamik özelliklerini sayısal olarak HAD analizi ile yapmışlardır. Çalışmanın odak noktası ön spoyler ile ön spoyler olmaksızın yarış otomobilinin aerodinamik özelliklerini araştırmak şeklinde olmuştur. Burada yarış otomobilinin aerodinamik özellikleri

iyileştirilerek, sürüklenme kuvvetini azaltmaya çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar sürtünme katsayısı, hız konturu ile grafiksel olarak gösterilmiştir [43].

1.3. Tezin Amacı ve Yapısı

Yapılan bu tez çalışmasında, araçlarda rüzgar sürtünmelerinden dolayı oluşan kayıpların hesaplanması ve bu kayıp enerjinin bir bölümünün geri kazanılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, belirli bir otomobilin ön bölümündeki aerodinamik etkilerin ve enerji kaybının sayısal incelemesi yapılmıştır. Bu amaçla araç ön bölümüne etkileyen hava direnci ve bunun yakıt tüketimine etkisi incelenmiştir. Daha sonra otomobilin ön bölümüne etkileyen rüzgardan yararlanmak amacıyla rüzgar türbini yerleştirilerek sayısal analizler yapılmış ve rüzgar türbininin enerji kazancına etkisi incelenmiştir.

Tez altı bölümden oluşmaktadır;

- Bölüm 1’ de taşıtlarda aerodinamik etki ve aerodinamik kayıpların önemi, literatür çalışmaları ve çalışmanın amacı özetlenmiştir.
- Bölüm 2’ de araçların aerodinamiği, direnç kuvvetleri, aerodinamik direncin performansa ve yakıt tüketimine etkisi açıklanmıştır.
- Bölüm 3’ te Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği açıklanmış ve aerodinamik çalışmalarda yararlanılan matematiksel bağıntılar verilmiştir.
- Bölüm 4’ te çalışmada kullanılan materyal ve yöntem verilmiş, modeller tanıtılmış, ve çözüm yöntemi sunulmuştur.
- Bölüm 5’ te ele alınan taşıt modelleri etrafındaki akış yapısına ait sayısal veriler verilmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır.
- Bölüm 6’ da elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve yorumlar yapılmıştır.

2. TAŞITLARIN AERODİNAMİĞİ

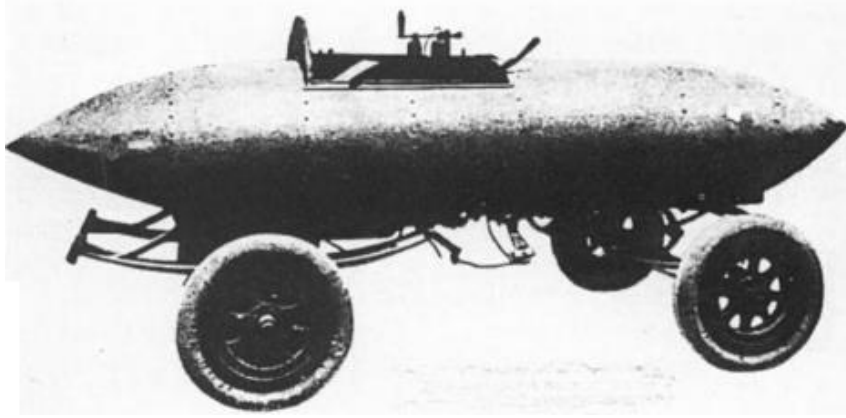
2.1. Taşıtlarda Temel Şekillerin Tarihsel Gelişimi

Taşıtların aerodinamiğinin tarihsel gelişimi, Şekil 2.1’ de özetlenmiştir. Şekilde dört dönem olarak verilen periyotlardaki otomobil modelleri görülmektedir. Bu periyotlarda, taşıtlar için akışkanlar mekaniğinin önemi anlaşılmıştır ve akışkanlar mekaniği taşıtların aerodinamiğinde kullanılmıştır. Taşıtlarda ilk modellerin tasarımında deniz ve hava taşıtlarına benzetilerek modellerde hava direncinin önüne geçileceği düşünülmüştür [3].

Temel şekiller	1900 to 1930	 Torpedo	 Boat tail	 Air ship
Akış modellenli otomobiller	1921 to 1923	 Rumpler	 Bugatti	
	1922 to 1939	 Jaray		
	1934 to 1939	 Kamm	 Schlör	
	Since 1955	 Citroen	 NSU-Ro 80	
	Detay optimizasyonu	Since 1974	 VW-Scirocco I	 VW-Golf I
Şekil optimizasyonu	Since 1983	 Audi 100 III	 Ford Sierra	

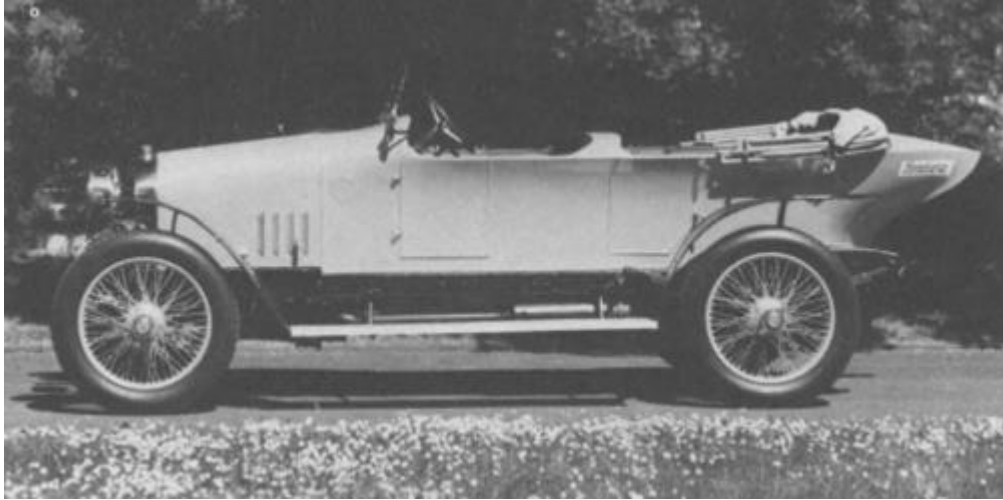
Şekil 2.1. Otomobil aerodinamiğinin dört ana döneminin tarihsel gelişimi [3].

Şekil 2.2’ de temel şeklin dikkate alındığı Camille Jenatzy, tarafından 1899 yılında yapılan 100 km/h hızla rekor kıran taşıtın görünümü verilmiştir.



Şekil 2.2. Camille Jenatzy tarafından 1899 yılında yapılan araç [3].

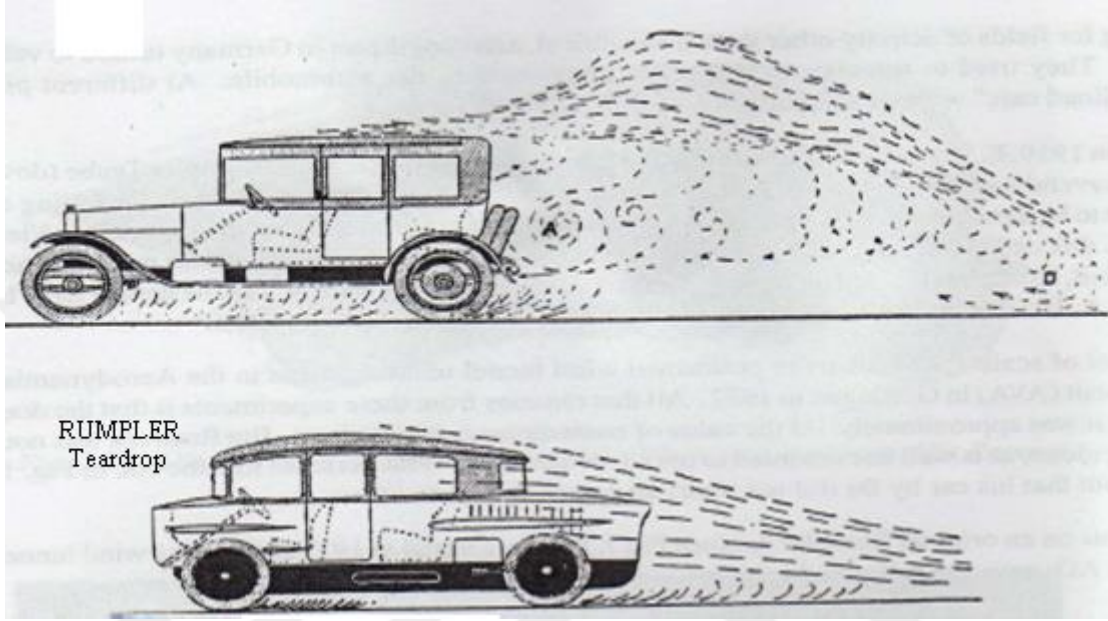
Şekil 2.3’ de benzer olarak tekne kuyruklu olarak isimlendirilen Audi tarafından 1913 yılında geliştirilen araç görülmektedir.



Şekil 2.3. Boat-Tailed “Audi Alpengewinnwagen” [3].

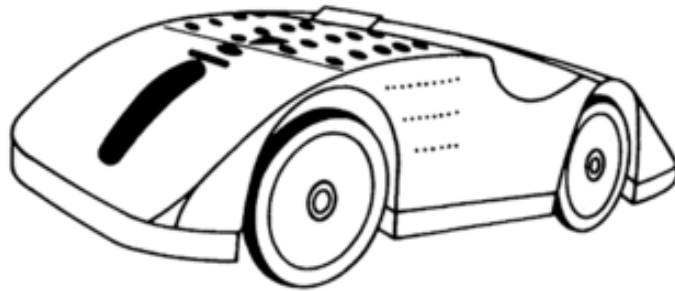
Bu modellerden sonra aerodinamik şekil dönemi başlamıştır. Buna göre sezgisel yaklaşımla özellikle 1.Dünya savaşıdan sonra geliştirilen taşıtlar aerodinamik taşıtların başlangıç dönemini oluşturmuştur. Bu dönemde taşıtlara etkiyen dirençlerden aerodinamik direncin önemi anlaşılmış ve aerodinamik direnci yenebilecek tasarımlar yapılmıştır.

Bunlardan bir tanesi Şekil 2.4’ de gösterilen kanat formunda olan Rumpler’ ın “Teardrop” arabasıdır. Böylece aerodinamik sürüklenme direnç katsayısı azaltılmaya çalışılmış ve 1979 yılında rüzgar tüneline yapılan çalışmada izdüşüm alanı $A=2,57 \text{ m}^2$ olan Rumpler arabasının sürüklenme direnç katsayısı $C_d=0,28$ olarak bulunmuştur [3].



Şekil 2.4. Hareket halindeki arabanın arkasındaki toz akımının Rumpler arabasıyla karşılaştırılması [3].

İki boyutlu tasarım şartlarına göre tasarlanan Şekil 2.5’ te tasarımı gösterilen 2 litre Bugatti otomobili 1923 yılında Strazburg’ da düzenlenen yarışlara katılmıştır. Otomobil yandan uçağı andırmakta ve önemli ölçüde düşük hava direnci oluşturmaktaydı. Geliştirilen bu otomobil yarış arabalarında olduğu gibi aracın altındaki hava akışı, gövde aşağı doğru uzatılarak mümkün olduğunca kontrol edilmiştir. Böylece bu model araçlar görünüm ve model itibarıyla günümüz yarış arabalarına öncülük etmiştir [3].



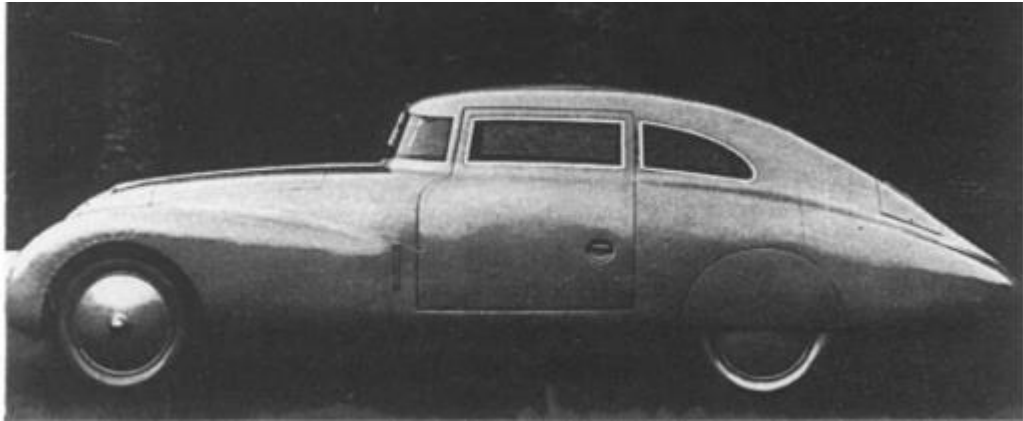
Şekil 2.5 Bugatti yarış otomobili [3].

Bugatti'nin bu arabası düzgün akışlı (streamline) otomobiller olarak adlandırılan arabalar üzerinde çalışmaları hızlandırmış ve yeni yaklaşımlara yol açmıştır. Bu konuda yere yakın araçlardaki akışlar analiz edilmiş, konu ile ilgili olarak P. Jaray düzgün akışlı otomobiller terimini ilk kez kullanmıştır. Jaray' ın çalışmalarından sonra Klemperer sürüklenme durumunu incelemiş ve direnci arttıran elemanları yeniden tasarlamıştır. Bu konuyla ilgili kanat formunu temel alarak aerodinamik direncin hesaplanabileceği modeller oluşturmuştur. Buna göre Klemperer tarafından yapılan deneylerde Jaray tipi otomobillerde elde edilen aerodinamik dirençler Şekil 2.6' da görülmektedir [3].

	A (m ²)	C _d
	2.99	0.64
 Büyük Jaray Arabası	2.86	0.30
 Küçük Jaray Arabası	1.87	0.29

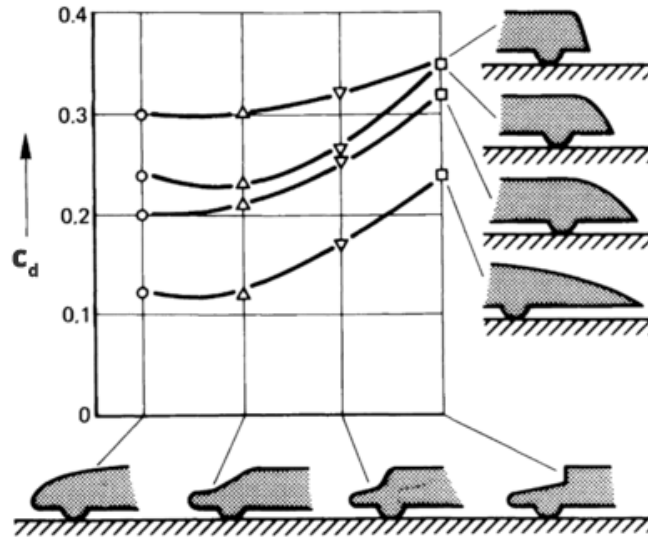
Şekil 2.6. Jaray tipi otomobillerde sürüklenme direnç katsayısının değişimi [3].

Şekil 2.7' de Jaray tipi uzunluk yükseklik oranının 2.1 olan ilk model verilmiş olup, imalatçı firmalar bu model taşıtı üretmişlerdir.



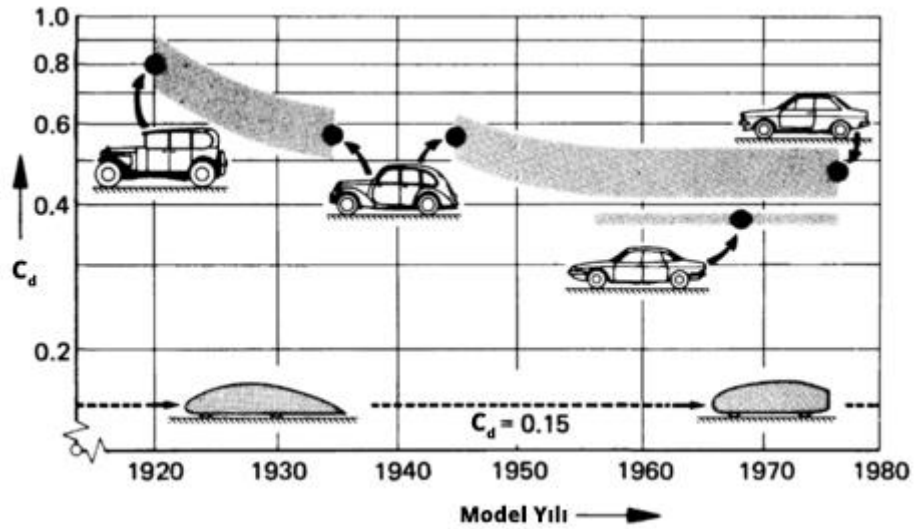
Şekil 2.7. Kleyer tarafından tasarlanan Adler Trumpf taşıtı [3] .

Daha sonra taşıtlardaki direnç katsayısının değişimleri üzerine çalışmalar yapılmış ve Lay tarafından taşıtların ön ve arka bölümünün modifikasyonlarından elde edilen değişimler Şekil 2.8’ de gösterilmiştir. Buna göre aracın ön ve arka ucu arasında akış alanlarında kuvvetli bir aerodinamik etkileşim olduğu görülmüştür.



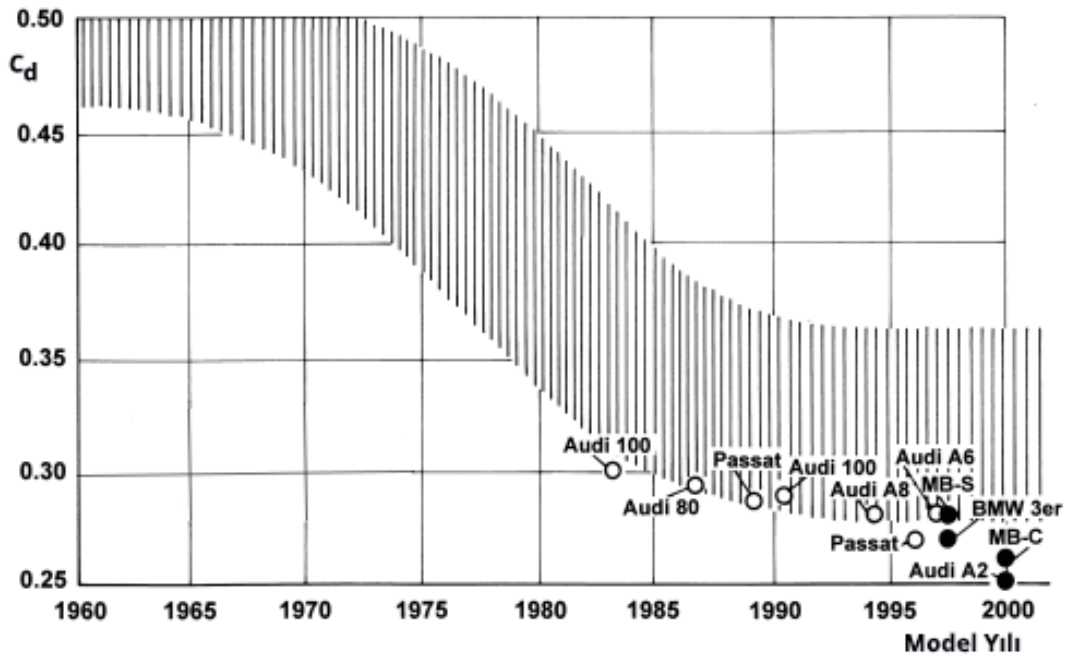
Şekil 2.8. Otomobil sürüklenme katsayısının taşıt gövde yapısıyla değişimi [3].

Otomobil aerodinamiğinin değişiminin yıllara göre değişim profili Şekil 2.9’ da özetlenmiştir. Buna göre 1920’ li yıllarda sürüklenme direnç katsayısı 0,8 iken 1960-1970’ lerde ortalama olarak 0,45’ lere düşmüştür. Şekil 2.10’ da ise Volkswagen marka taşıtlardaki sürüklenme direnç katsayısının yıllara göre değişimi verilmiştir.



Şekil 2.9. Yıllara göre otomobillerdeki sürüklenme direnç katsayısının değişimi [3].

Taşıt üreticilerinin birçoğu yakıt tüketimine etki eden aerodinamik sürüklenme direnç katsayısını azaltmak için taşıt şeklini değiştirmişlerdir. Ancak, tüm taşıt üreticileri üretimde aerodinamik duruma aynı önceliği vermemişlerdir. Aerodinamiğin esas önemi 1973-74 yıllarındaki petrol krizinde oluşmuş ve bu yıldan itibaren yolcu araçlarında C_d katsayısında doğrusal olmayan bir azalma olmuş, yapılan önemli projelerle yıllara bağlı olarak 0,25' e kadar düşmüştür [5].



Şekil 2.10. Yıllara göre sürüklenme direnç katsayısının değişimi [5].

2.2. Otomobile Etkiyen Dirençler ve Taşıt Aerodinamiği

Günümüzde taşıt teknolojisindeki araştırmalar daha çok; araçta güvenlik, performans, rahatlık ve verim artışını sağlanmasına yönelmiştir. Taşıtta performans artışı için taşıtın güç kaynağı olan içten yanmalı motordan elde edilen gücün en iyi şekilde kullanılarak verimin artırılması gerekir. Böylece taşıtta istenen maksimum hız, ivmelenme, yokuş kapasitesi gibi parametreler ve en önemli etkenlerinden biri olan ekonomiklik sağlanabilir. Özellikle artan petrol fiyatları nedeniyle otomotiv endüstrisinin çalışmaları yakıt tüketimini minimize edecek araçlar üzerinde odaklanmışlardır [44].

İstenilen bu performans artırımlarını yapmanın yolu taşıt üzerine gelen dirençleri azaltmaktır.

Bir taşıta etkiyen dirençler aşağıdaki gibi altı ana başlık altında toplanabilir [45].

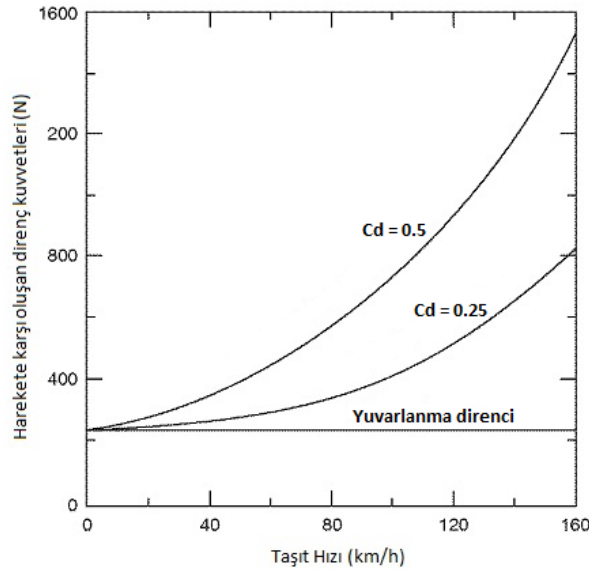
- Tekerlek yuvarlanma direnci
- Aerodinamik sürüklenme direnci
- Römork Direnci
- Aktarma organları direnci
- Atalet direnci
- Yokuş direnci

Bu çalışmanın odak noktası, aerodinamik sürüklenme direncinin etkisi olduğundan tez kapsamında aerodinamik etkiler incelenmiştir.

2.2.1. Aerodinamik Sürüklenme Direnci

Otomobile etkiyen dirençlerden en önemlisi aerodinamik sürüklenme direncidir. Ortalama 100 km/h hızla yol alan bir araçta harekete karşı oluşan dirençlerin yaklaşık %75'lik kısmı aerodinamik sürüklenme direncinden oluşur [46].

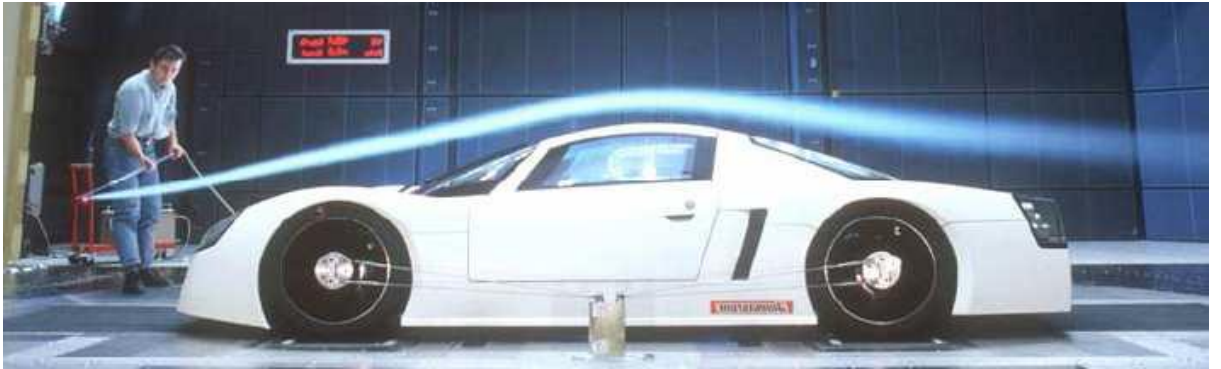
Aerodinamik sürüklenme direnci düşük taşıt hızlarında genellikle fazla etkili olmamakla birlikte artan hızlarda hava direncinin büyüklüğü önemli seviyelere ulaşmaktadır. Belli hız aralıklarında sabit yuvarlanma direncine karşı farklı aerodinamik sürüklenme dirençlerinin oluşturduğu kuvvetlerin değişimi Şekil 2.11' de görülmektedir [44].



Şekil 2.11. Taşıt hızına bağlı olarak sürüklenme direnç katsayılarının değişimi [44].

Bir taşıt hareket halindeyken yere göre bir bağıl hızı bulunmaktadır. Havanın hareketsiz olması ve rüzgarın olmaması durumunda taşıt yere ve aynı zamanda havaya göre eşit bağıl hıza sahip olacaktır. Ancak rüzgar olduğunda, yani havanın yere göre bir bağıl hıza sahip olması durumunda taşıtın yere göre bağıl hızı havaya göre olandan farklı bir değer alacaktır. Taşıtın aerodinamiği incelenirken genellikle çözüm için havanın hareketsiz olduğu ve taşıtın yere göre sabit bir bağıl hızla hareket ettiği kabul edilir. Ayrıca, havanın sıkıştırılmaz özellikte incelenebilmesi için taşıt hızının düşük olması ve taşıtın düz bir yolda ilerlediği kabulleri yapılır. Aerodinamik analiz yapılırken taşıtın sabit hava içinde hareket etmesi ile rüzgar tünellerinde olduğu gibi havanın sabit taşıt üzerinden hareket etmesi durumlarında analiz açısından bir fark olmadığı dikkate alınarak çözüm yapılabilir. Çünkü aerodinamik çözümde taşıt ile havanın birbirine göre göreceli hareket yapması bu durumu sağlamaktadır [47].

Aerodinamik analiz için herhangi bir anda taşıtın, belirli bir noktasından geçen havaya ait bir parçacık dikkate alınır. Bu parçacık hareket eden taşıta göre yerleştirilmiş bir koordinat eksenine göre bağıl bir hareket yapmakta ve belirli bir yol izlemektedir. Parçacığın izlediği bu yol akış yolu olarak adlandırılır. Daha sonra taşıt üzerinde belirlenen bu noktaya gelen diğer tüm parçacıkların bir önceki parçacığın izlediği yolu izlediği kabul edilmektedir. Bunun gibi diğer bütün akış yollarının oluşturduğu küme taşıt çevresindeki hava akış şeklini belirtir. Bu akış şekli taşıtın şekline ve hızına bağlı olarak değişecektir. Taşıt üzerindeki bu hava akış şekli görüntüsü, rüzgar tünelleri yardımıyla veya tüm taşıt yüzeyine ince ve esnek iplikler yerleştirilerek elde edilebilir. Şekil 2.12’ de normal boyutlardaki bir otomobilin üzerindeki hava akış şeklinin rüzgar tüneline duman kullanılarak görüntülenmesi görülmektedir [47].



Şekil 2.12 Rüzgar tüneline araç üzerindeki akış şeklinin görüntülenmesi [47].

Taşıtın hareket alanına girmemiş bölgede hava akımları paralel ve durgun akış şeklindedir. Taşıt hareket alanı içindeki akışta ise düzgün olmayan hareket durumu söz konusudur. Taşıta girişteki hava akımı içerisindeki hava parçacığının hareketi incelendiğinde bu bölgedeki parçacık, taşıt ile eşit bağıl hıza sahiptir. Ancak hava akımının bozulmaya uğradığı taşıt çevresindeki parçacığın bağıl hızı, bazen taşıt hızından yavaş bazen de hızlı olacak şekilde değişmektedir.

Aerodinamik sürüklenme kuvveti, araç hızının karesiyle orantılı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir [48].

$$F_d = C_d \times A \times \frac{\rho}{2} \times V_t^2 \quad (2.1)$$

Burada; C_d sürüklenme direnç katsayısı, V_t taşıt hızı ve A taşıt izdüşümü alanıdır. Ön kesit alanı olarak da adlandırılan taşıt izdüşüm alanı lastiklerin hava akımına karşı olan alanlarını da kapsar. İzdüşüm alanı Şekil 2.13’ te görüldüğü gibi, bir otomobilin önünden gönderilen paralel ışınların aracın arkasına konulan yüzeyde oluşturduğu gölge bu alanı tanımlamaktadır.



Şekil 2.13. Taşıt izdüşüm alanı [49].

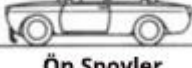
Denklem (2.1)’ de verilen sürüklenme kuvveti (F_d), araç üzerine etki eden aerodinamik kuvvetin serbest akış hızına ve yere paralel, taşıtın ileri hareket yönüne zıt yöndeki direnç kuvvetini ifade etmektedir. Taşıtlara etki eden en büyük aerodinamik kuvvet bileşeni aerodinamik sürüklenme kuvvetidir. Bir taşıtta oluşan aerodinamik sürüklenme kuvvetinin % 90’dan fazlası taşıtın dış formunun oluşturduğu direnç yani şekil direnci nedeniyle oluşmaktadır. Aerodinamik sürüklenme kuvveti motordan elde edilen çeki kuvveti ile

karşılanmaktadır. Bu nedenle sürüklenme kuvveti, gerekli motor gücünde ve dolayısıyla da yakıt tüketiminde etkili olmaktadır. Belli bir hızdaki yakıt tüketimi güç ile orantılı olarak değişmektedir.

Değişik şartlarda iki araca etki eden kuvvetler farklı olacağından kuvvet cinsinden araçları karşılaştırmak olanaksızdır. Bu nedenle araçlardaki karşılaştırma işlemini boyutsuz olarak aerodinamik sürüklenme direnç katsayısı ile ifade etmek gerekir. Buna göre yukarıda verilen denklemden aerodinamik sürüklenme direnç katsayısı aşağıdaki şekilde düzenlenebilir [50].

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \times \rho \times A \times V_t^2} \quad (2.2)$$

Şekil 2.14’ te bir araç ve aynı araç üzerine ilave edilen spoylerlerin etkileri ile aerodinamik direnç katsayısının değişim durumu verilmiştir [3].

	C_d	C_L
(A)  Temel Model	0.34	0.38
(B)  Arka Spoyler	0.33	0.18
(C)  Yan Spoyler	0.38	0.48
(D)  Ön Spoyler	0.38	0.29

Şekil 2.14. Temel bir araca ilave edilen spoylerlerin aerodinamik sürüklenme katsayısına etkisi[3].

Taşıtlardaki direncin % 90’ dan fazlası dış akıştan kaynaklanmaktadır. Genel olarak sürüklenme direnç katsayısı (C_d) küçüldükçe aracın hava sürtünmesini yenmek için harcayacağı enerji miktarı da azalacağından yakıt tüketiminde azalma olacaktır. Hızı ve geometrik boyutları belli olan bir aracın sürüklenme direnç kaybını azaltmanın yolu aracın dış formunu uygun şekilde tasarlayarak sürüklenme direnç katsayısını azaltmaktır. Bu

nedenle taşıtların aerodinamik tasarımında, yüzey hatları belirlenirken, sürüklenme direnç katsayısının (C_d) minimum yapılması amaçlanır. Son yıllarda otomobillerin sürüklenme direnç katsayısı 0,3 değerinin de altına indirilmiştir.

Taşıtlarda motordan elde edilen güç, hava direnci ve sistem içindeki kayıpları dengeler. Tablo 1.1.' de 1200 kg ağırlığında benzinli bir taşıtın 90 km/h hızında yakıt enerjisinin kullanımı ve kayıplar verilmiştir [51].

Tablo 1.1 90 km/h hızda bir benzinli taşıtın yakıt enerjisinin kullanımı [51].

Kayıplar	Kısmi yük (Sabit hız)	Tam yük (İvme veya yokuş)
Termodinamik kayıplar	%78	%72
Aerodinamik kayıplar	%10,6	%5,9
Yardımcı sistemler	%5	%5
Krank milindeki faydalı enerji	%22	%28
İvme veya yokuş kaybı	%0	%14,3
Yuvarlanma kaybı	%4,6	%2
Transmisyon kaybı	%1,8	%0,8
Taşıta verilen toplam enerji	%100	%100

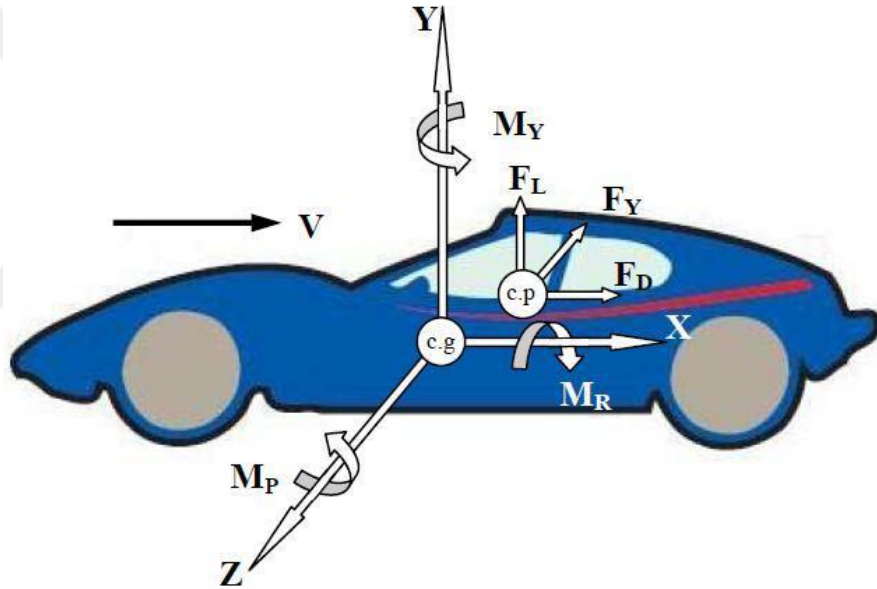
Taşıttaki aerodinamik kuvvetler belirlenirken Bernoulli teoreminden yararlanılır. Bernoulli teoremine göre aynı akış yolunun her noktasındaki atmosferik ve dinamik basınçların toplamı sabit yani enerjinin korunumu söz konusudur. Buna göre toplam basınç (H) aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$P + \frac{\rho \times V^2}{2} = H_{(sabit)} \quad (2.3)$$

Denklem (2.3)'ün sol tarafındaki ilk terim olan P atmosferik basıncı (statik basınç), ikinci terim ($\rho.V^2/2$) dinamik basıncı ve H toplam basıncı ifade etmektedir. Buradaki toplam basınç, henüz taşıtın hareket alanına girmemiş yani bozulmaya uğramamış hava ortamından hesaplanabilir. Denklem (2.3) ile havanın hızının değiştiği yerlerde, dinamik basıncın da değişeceği görülmektedir.

Bernoulli teoremine göre hareket halindeki bir taşıtın çevresinde her taşıta özgün bir basınç dağılımı oluşması söz konusudur. Buna göre araç üzerindeki basınç dağılımının tüm taşıt yüzey alanına göre integre edilmesiyle, taşıt üzerinde bağıl hızdan dolayı oluşan aerodinamik bileşke kuvvet (F) bulunur.

Aerodinamik bileşke kuvvet taşıt yüzeyindeki bir yayılı kuvvet olmakla birlikte hesaplamalarda kolaylık sağlaması açısından bu basınç kuvvetlerinin taşıt üzerindeki belirli bir noktadan etki ettiği kabulüyle bir idealleştirme yapılır. Bu nokta basınç merkezi olarak adlandırılır. Bu nokta ağırlık merkezi ile aynı nokta olmamakla birlikte hesaplamalar açısından bu iki noktanın çakıştırılması kolaylıklar sağlar. Şekil 2.15’ te basınç ve ağırlık merkezleri gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Otomobildeki aerodinamik kuvvetler, momentler, basınç ve ağırlık merkezleri [52].

Buna göre, araç üzerindeki basınç dağılımının tüm taşıt yüzey alanına göre integre edilerek, taşıt üzerinde bağıl hızdan dolayı oluşan aerodinamik bileşke kuvvet tespit edilir. Böylece, taşıt üzerindeki yayılı kuvvet yani bileşke kuvveti (F) değeri; ortam basıncı (P) ve P_∞ atmosfer basıncını, dA_y taşıt üzerinde akışa dik doğrultudaki alanı göstermek üzere aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$F = \int (P - P_\infty) \times dA_y \quad (2.4)$$

Bileşke aerodinamik kuvvet analizlerinde üç bileşen dikkate alınır. Buna göre aerodinamik kuvvetin bu bileşenleri aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

Yere paralel ve taşıtın ileri hareket yönüne zıt, aerodinamik sürüklenme kuvveti (F_d),

$$F_d = \frac{\rho \times V^2}{2} \times A \times C_d \quad (2.5)$$

Taşıt hareket doğrultusuna ve yere dik aerodinamik kaldırma kuvveti (F_l),

$$F_l = \frac{\rho \times V^2}{2} \times A \times C_l \quad (2.6)$$

şeklinde hesaplanabilir. Ayrıca hesaplanan bu iki bileşen ile de dik açı yapan aerodinamik kuvvetin yan bileşeni bulunmaktadır. Buna göre, havanın hareketi taşıt şekline göre simetrik olmadığı zamanlarda oluşan aerodinamik kuvvetin yan bileşeni aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$F_y = \frac{\rho \times V^2}{2} \times S \times C_y \quad (2.7)$$

Bu aerodinamik kuvvetlerin taşıt dinamiğine etkisi hesaplanmak için bu kuvvetlerin de ağırlık merkezine taşınması gereklidir. Bu durumda aerodinamik momentler dinamik analizin içine girmektedir. Aerodinamik momentler aerodinamik kuvvetler ile bu kuvvetlerin ağırlık merkezine olan uzaklıklarının çarpımı ile elde edilebilir.

Üç bileşen olarak verilen aerodinamik kuvvetlerin ağırlık merkezine taşınması durumunda üç aerodinamik moment oluşur. Bunlar, Yunuslama (Pitch) Momenti (M_P), Yuvarlanma (Roll) Momenti (M_R), Yana Kayış (Yaw) Momenti (M_Y) şeklindedir.

2.2.2. Aerodinamik Direncin Performansa Etkisi

Taşıtların üzerindeki aerodinamik kuvvetlerin etkileri analiz edilirken taşıtın sabit bir hız ile düzgün bir yolda ilerlediği ve atmosferde rüzgar olmadığı kabul edilir. Bu durumda taşıt üzerine etkiyen bütün kuvvetler dengede olup, taşıt üzerinde yan kuvvet etkisi yoktur. Bu şartlarda taşıtın hareketi sırasında aerodinamik kuvvetlerin yanı sıra tekerleklerdeki yuvarlanma direnç kuvvetinin de dikkate alınması gereklidir.

Aerodinamik kuvvet ile yuvarlanma direnci birbiriyle bağıntılıdır. Aerodinamik kaldırma kuvvetinin yukarı doğru olması durumunda, taşıtın zemine uyguladığı kuvveti azaltarak yuvarlanma direncini düşürecektir. Benzer şekilde aerodinamik kaldırma kuvvetinin aşağı doğru olması durumunda ise yuvarlanma direnci artacaktır. Buna göre yuvarlanma direnci aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$R_{Y_{\text{ön,arka}}} = (W_{\text{ön,arka}} - L_{\text{ön,arka}})f_{\text{ön,arka}} \quad (2.8)$$

Burada $W_{\text{ön,arka}}$ taşıtın ön ve arka bölümünün ağırlığı, $L_{\text{ön,arka}}$ taşıtın ön ve arka bölümünde bulunan lastiklerin ağırlığını ve $f_{\text{ön,arka}}$ taşıtın yuvarlanma direnç katsayısını ifade etmektedir.

Taşıtın yukarıda ifade edilen yol durumuna göre toplam direnci R , aerodinamik sürüklenme kuvveti ve yuvarlanma direnç kuvveti toplanarak aşağıdaki şekilde belirlenebilir.

$$R = \frac{\rho \times V^2}{2} \times A \times C_d + (W_{\text{ön}} - L_{\text{ön}})f_{\text{ön}} + (W_{\text{arka}} - L_{\text{arka}})f_{\text{arka}} \quad (2.9)$$

Taşıtın sabit hızla hareket etmesi nedeniyle taşıt üzerindeki bütün kuvvetler dengededir. Bu durumda toplam direnç kuvveti, aktarma organları ve çeki tekerleri aracılığıyla motordan sağlanan çeki kuvvetine (F_T) eşittir. Aktarma organları ve vites kutusu ile ilgili olayların dikkate alınmaması durumunda çeki kuvveti verilen hızdaki motor gücü ile doğrudan bağlantılıdır. Bu durumda sağlanan güç:

$$\eta P_E[W] = F_T[N]V[m/s] \quad (2.10)$$

$$\eta P_E[kW] = \frac{F_T [N]V[km/h]}{3.6} \quad (2.11)$$

$$\eta P_E[HP] = \frac{F_T [N]V[km/h]}{3.6 \times 745.7} = \frac{F_T [N]V[km/h]}{2684.52} \quad (2.12)$$

olur. Burada η ; aktarma organlarındaki kayıplardan dolayı gelen verim ifadesidir.

Denklem 2.12 motor tarafından sağlanan güç ile dirençler tarafından harcanan gücün eşitliğini göstermektedir. Bu durumda aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$\eta P_E = P_D + P_R \quad (2.13)$$

Burada aerodinamik kuvvet ile ilgili güç terimi;

$$P_D[HP] = \frac{\rho \times V^3}{2 \times (3.6)^3 \times 745.7} \times A \times \{C_d - (C_{l_{\text{ön}}} \times f_{\text{ön}} + C_{l_{\text{arka}}} \times f_{\text{arka}})\} \quad (2.14)$$

Yuvarlanma direnci ile ilgili güç terimi;

$$P_R[HP] = R_R \times V_v = \frac{\rho \times V}{3.6 \times 745.7} [W_{\text{ön}} \times f_{\text{ön}} + W_{\text{arka}} \times f_{\text{arka}}] \quad (2.15)$$

Maksimum motor gücünün maksimum taşıt hızında gerçekleşmesi durumunda sağlanan maksimum güç aracın ihtiyacı olan güce eşittir. Bu durumda denklem (2.12, 2.14 ve 2.15)' den;

$$(7457)\eta P_{E\max}[HP] = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V_{\max}^3 \frac{1}{(3.6)^3} \{C_d - (C_{l_{\text{ön}}} \times f_{\text{ön}} + C_{l_{\text{arka}}} \times f_{\text{arka}})\} + V_{\max}(W_{\text{ön}} \times f_{\text{ön}} + W_{\text{arka}} \times f_{\text{arka}}) \quad (2.16)$$

ifadesi yazılarak, taşıtın ön ve arka lastikleri için yuvarlanma direnç katsayıları eşit ($f_{\text{ön}}=f_{\text{arka}}=f$) kabul edilirse denklem,

$$(7457)\eta P_{E_{\max}}[HP] = \frac{1}{2} \times \frac{1}{(3.6)^3} \times V_{\max}^3 (C_d - C_l \times f) + V_{\max} \times W \times f \quad (2.17)$$

olarak ifade edilir. Bu denklemden maksimum taşıt hızı çekilirse ifade aşağıdaki gibi olur.

$$V_{\text{maksimum}} \cong 36 \left\{ \frac{P_E[HP]}{\rho \times A \times (C_d - C_l \times f)} \right\}^{1/3} \quad (2.18)$$

Ayrıca, denklem (2.9) yardımıyla taşıt maksimum hızı maksimum motor gücündeki çeki kuvveti, aerodinamik direnç kuvveti ve yuvarlanma direnç kuvveti cinsinden de belirlenebilir.

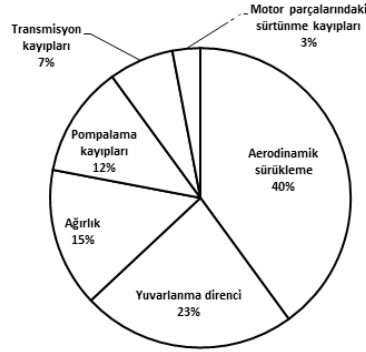
$$V_{\text{maksimum}} \cong 36 \left\{ \frac{F_T - W \times f}{\rho \times \frac{A}{2} \times (C_d - C_l \times f)} \right\}^{1/2} \quad (2.19)$$

Denklem (2.18 ve 2.19)' da görüldüğü gibi aerodinamik sürüklenme direncinin taşıt hızına olan etkisi söz konusudur. Taşıt hızının sadece yuvarlanma direnç katsayısına değil, aerodinamik sürüklenme direnç katsayısı ve aerodinamik kaldırma katsayısına da bağlı olduğu görülmektedir. Buna göre, taşıtın aerodinamik sürüklenme direnç katsayısı veya kesit alanı azaltılarak, maksimum taşıt hızının artırılması sağlanabilir.

2.2.3. Aerodinamik Direncin Yakıt Tüketimine Etkisi

Taşıtlarda aerodinamik sürüklenme direnç kuvveti motordan elde edilen çeki kuvveti ile karşılanmaktadır. Bu nedenle oluşan aerodinamik sürüklenme direnç kuvveti gerekli motor gücüne ve dolayısıyla da yakıt tüketimine etki etmektedir. Belli bir hızdaki yakıt tüketimi gerekli olan güç ile orantılı olarak değişmektedir. Motor gücünün büyük bir kısmı aerodinamik sürüklenme direncini yenmek için kullanılmaktadır. Şekil 2.16' da Opel marka

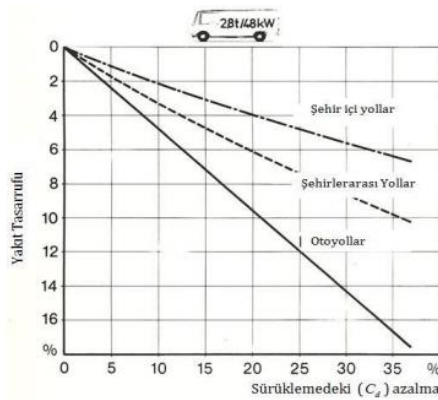
bir araca etki eden toplam direncin dağılımı görülmektedir. Taşıta etki eden toplam direncin % 40' ını aerodinamik sürüklenme direnci oluşturmaktadır.



Şekil 2.16. Opel marka bir aracın toplam direnç dağılım yüzdeleri [50].

Bu nedenle taşıtlarda aerodinamik sürüklenme direncinin düşürülmesi yakıt ekonomisi açısından önem taşımaktadır. Aerodinamik sürüklenme kuvveti taşıt hızı ile artmakta ve 100 km/h 'in üzerinde oldukça etkili olmaktadır. Bu nedenle sürüklenme direnç katsayısındaki küçük bir azalma yakıt tüketimini önemli oranda azaltabilir [51].

Taşıt tasarımında yapılan iyileştirmelerle aerodinamik direnç katsayısının ortalama % 2 düşürülmesi motor gücü ihtiyacını % 0.5 olarak azaltmaktadır. Bu durum ise yakıt tüketiminde önemli miktarda azalma sağlayarak, mali olarak kazanç sağlaması anlamına gelmektedir. Şekil 2.17' de farklı yol durumlarındaki sürüklenme direnç katsayısındaki azalmaya bağlı olarak elde edilebilecek yakıt tasarrufu minibüs tipi araç için verilmiştir. Buna göre C_d değerinde % 30'luk bir azalma, otoyolda % 14 yakıt tasarrufu sağlarken, şehirlerarası yolda % 8 ve şehir içi yollarda ise % 6 yakıt tasarrufu sağlamaktadır [53].

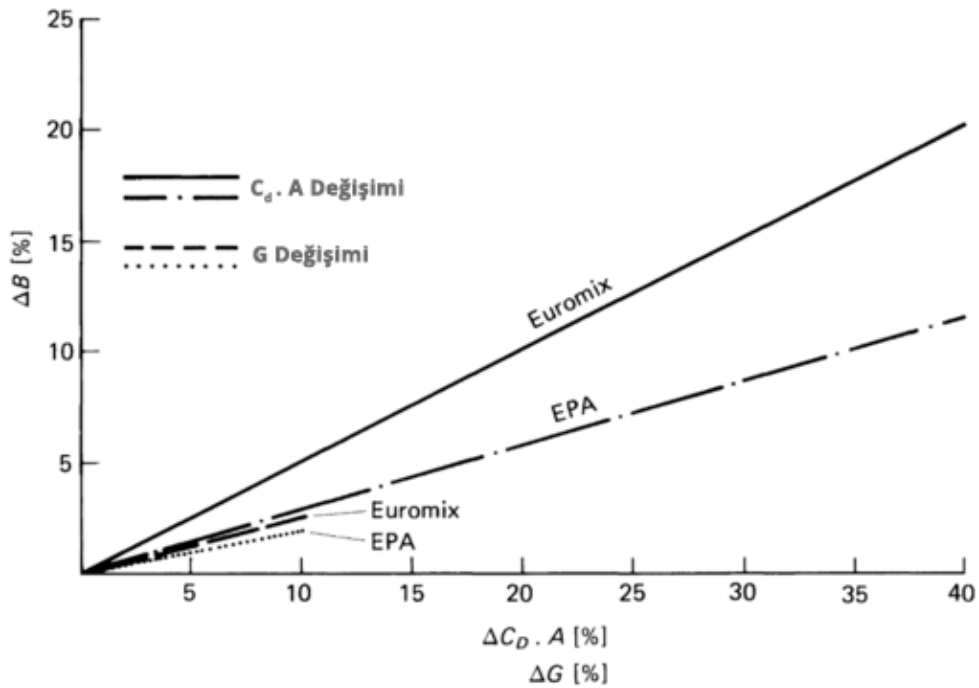


Şekil 2.17. Minibüs tipi bir taşıtta yol durumu, sürüklenme ve yakıt tüketimi ilişkisi [53].

Taşıtlardaki karakteristik yakıt tüketimi, genellikle deneysel yollarla bulunur ve 1 beygir gücü (HP) için gerekli değer miktar C (lt/HP.h) olarak ifade edilir. Bu katsayının gerçek motor gücü ile çarpımıyla motorun toplam karakteristik yakıt tüketimi elde edilir. Uygulamalarda yakıt tüketimi lt/km veya km/lt şeklinde verilir.

$$B = P_E \times C \text{ (lt/h)} \quad (2.20)$$

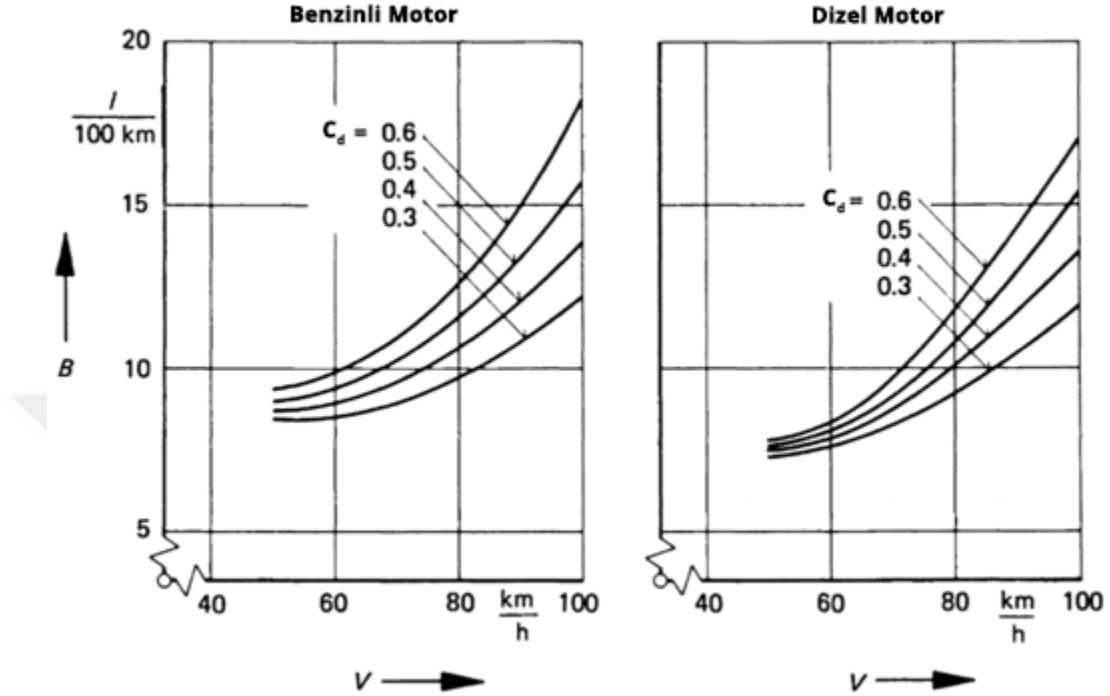
Şekil 2.18 bir otomobilde araç ağırlığının ve aerodinamik sürüklenme direncinin yakıt tüketimine etkisini gösterilmiştir. Euromix ve EPA standartları belli sabit bir hızda araçlardaki yakıt tüketimini belirlemek üzere uygulanan test tekniklerdir. Her iki test durumları için doğrusal bir değişim olduğu gözlenmektedir. Sürüklenme direnç katsayısındaki artışın ağırlıktaki artışa göre yakıt tüketimine etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 2.18. Yakıt tüketimine araç ağırlığının ve aerodinamik sürüklenme direncinin etkisi [53]

Farklı hızlarda benzinli ve dizel minibüste yakıt tüketiminin aerodinamik sürüklenme katsayısı ile değişimi Şekil 2.19' da verilmiştir. C_d katsayısının artmasıyla yakıt tüketiminin hem benzinli hem dizel motorlu araçta arttığı görülmektedir. Burada görüldüğü gibi aerodinamik sürüklenme katsayısı yakıt tüketiminde önemli bir etkiye sahiptir. Ancak

benzinli motorlarda aerodinamik sürüklenme katsayısının yakıt tüketimine etkisi dizel motorlarına göre daha belirgindir.



Şekil 2.19. Bir minibüsteki aerodinamik sürüklenme katsayısının yakıt tüketimine etkisi [53].

Yakıt tüketimine (B) sürüklenme katsayısının etkisi benzinli ve dizel motorları için aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\text{Benzinli Motor } \frac{\Delta B}{B} = 0.40 \frac{\Delta C_d}{C_d} \quad (2.21)$$

$$\text{Dizel Motor } \frac{\Delta B}{B} = 0.50 \frac{\Delta C_d}{C_d} \quad (2.22)$$

Burada ΔB yakıt tüketimindeki iyileşme ve ΔC_d sürüklenme katsayısındaki iyileşmedir. Sürüklenme katsayısındaki azalmanın yakıt tüketimine etkisi dizel motorlu bir minibüste benzinli motora kıyasla daha fazladır. Bunun nedeni, taşıtın verilen sürüş çerçevesinde benzinli motorlardaki özgül yakıt tüketiminin dizel motorlarına göre daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Örnek olarak sürüklenme katsayısı 0,46 dan 0,30' a azaltılırsa benzinli

motorlu araçta yakıt tüketimi % 14 azalmaktadır. Dizel motorundaki yakıt tüketimindeki azalma oranı ise % 17 olmaktadır.

Aerodinamik sürüklenme direnç katsayısının yakıt tüketimine etkisini incelemek amacıyla taşıt tavanın bagajsız ve bagajlı olma durumu dikkate alınarak durum incelenebilir. Taşıtın tavanında bagaj olma durumunda aerodinamik direnç katsayısında ΔC_d kadarlık bir artış olur ve toplam sürüklenme direnç katsayısı $C_d + \Delta C_d$ olarak yazılır.

Aerodinamik direnç katsayısındaki artış nedeniyle tavanında bagaj olan taşıt aynı hızda normalden daha fazla motor gücüne ihtiyaç duyar. Denklem (2.14)' ü dikkate alarak taşıtın bagajlı ve bagajsız durumları için gerekli olan güçler birbirine oranlanırsa; aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\frac{P_{bagajlı}}{P_{bagajsız}} = \frac{(C_d + \Delta C_d) - C_{l2} \times f}{C_d - C_{l1} \times f} \quad (2.23)$$

Buradaki C_{l1} bagajsız ve C_{l2} bagajlı durumdaki aerodinamik kaldırma katsayılarını ifade etmektedir. Karakteristik yakıt tüketiminin gaz kelebeği açıklığına göre değişmediği kabul edilirse;

$$\frac{B_{bagajlı}}{B_{bagajsız}} = \frac{\frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^2 (C_d + \Delta C_d - C_{l2}) + W \times f}{\frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^2 (C_d - C_{l1}) + W \times f} \quad (2.24)$$

olarak yazılabilir. Bu denklemde belirli bir mesafe için taşıtın şeklinin iyileştirilerek aerodinamik direnç katsayısında oluşturulacak azalmanın yakıt tüketimini araç hızının karesiyle orantılı olarak azaltacağı görülmektedir. Ayrıca bu denklemde taşıtın ağırlığının azaltılması veya lastiklerin yuvarlanma direnç katsayılarının azaltılmasının da yakıt tüketimini azaltacağı görülmektedir.

Genellikle kataloglarda karakteristik yakıt tüketimi 90 km/h sabit hızda, 120 km/h sabit hızda ve şehir içi trafiğinde değişken hızda verilmektedir. Taşıt üzerindeki dirençlerin her birinin yakıt tüketimine olan etkileri harcadıkları güçlerle orantılıdır. Örnek olarak şehir

içinde ortalama 30 km/h hızla seyahat eden bir taşıtta, en çok aracı ivmelendirmek için iş yapılır ve bu iş daha sonra frenlerden ısı olarak atılır. Bu sırada yuvarlanma direncine ve aerodinamik dirence karşı da iş yapılır. M kütlesindeki bir taşıtın durgun halden V hızına çıkartılması sırasında yapılan iş;

$$E_1 = \frac{1}{2} \times M \times V^2 \quad (2.25)$$

olarak yazılır. Bu sırada s kadar yol alınmışsa yuvarlanma direncine karşı yapılan iş (aerodinamik kaldırma kuvveti=0 için);

$$E_2 = P \times s = W \times f \times s \quad (2.26)$$

şeklinde ifade edilir. Aynı mesafe için aerodinamik sürükleme direnç kuvvetine karşı yapılan iş ise aşağıdaki şekilde yazılır.

$$E_3 = F_d \times s = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^2 \times C_d \times s \quad (2.27)$$

Bu hareket şartları dikkate alınarak 750 kg ağırlığındaki bir taşıtın seyahat sırasında maksimum 50 km/sa hızla 25 km gittiği ve bu arada 30 defa durduğu bir durumda yuvarlanma direnç katsayısının 0.02 ve referans alanının 1.8 olması durumunda;

$E_1: E_2: E_3 = 1.2: 2.0: 1.0$ oranı elde edilir.

Bu orandan şehir içi gibi yollardaki düşük hızlarda motorun kullanılabilir iş kapasitesinin 1/4'ü aerodinamik dirence ve 3/4'ünün mekanik direnci yenmek için harcandığı görülür.

Aynı yolun 90 km/h' lik maksimum hız ile iki defa durarak alınması durumunda bu oran, $E_1: E_2: E_3 = 0.3: 2.0: 3.9$ şeklinde olur. Buradan otoyol gibi hız sınırının yüksek olduğu durumlarda motorun kullanılabilir iş kapasitesinin yaklaşık 2/3'ü aerodinamik sürükleme direnç kuvvetine karşı harcandığı görülmektedir.

3. MATEMATİKSEL DENKLEMLER VE HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

3.1. Matematiksel Denklemler

Aerodinamik özelliklerin belirlenmesinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile akışkan davranışlarını yöneten denklemlerden yararlanılmaktadır. Akışkan akışı, türbülans, ısı transferi, kütle transferi ile ilgili olaylar; kütle, enerji momentum ve kimyasal türlerin korunumu prensipleri ile açıklanır.

Bu yöntemde temel olarak süreklilik, momentum ve enerji denklemleri olmak üzere üç ana denklem esas alınır ve bu denklemler sayısal olarak çözülerek akış içindeki basınç, hız ve sıcaklık dağılımları belirlenir [54].

Hesaplamalı akışkanlar mekaniği yöntemi genel olarak Navier-Stokes denklemlerinin çözümlenmesine dayanmaktadır. Sayısal çözümlemede kullanılan yazılımların büyük çoğunluğunda Sonlu Hacim Yöntemi ve daha özel çözümlerde ise Sonlu Eleman Yöntemi kullanılmaktadır. Çözümlerde kullanılan denklemler ve yöntemler aşağıda verilmiştir.

3.1.1. Süreklilik Denklemi

Bir akışkan elemanında kütle dengesi süreklilik denklemi ile ifade edilir. Buna göre, uzayda sabitlenmiş bir hacim elamanına akışkan hareketi boyunca kütle dengesi uygulanırsa denklem aşağıdaki şekilde yazılır [55].

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

veya hız vektörü $\vec{u} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$ olarak kabul edilirse,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem (3.2)' de ilk ifade zamana bağlı olarak yoğunluğun değişimini, ikinci ifade ise net akışı verir.

Sıkıştırılamayan akışkanlarda yoğunluk (ρ) sabit olduğundan $div\vec{u} = 0$ olacaktır. Böylece, süreklilik denklemi bu tür akışlar için,

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

şeklinde ifade edilir.

3.1.2. Momentum (Navier-Stokes) Denklemi

Viskoz gerilmeler birçok akışta bölgesel deformasyon hızının fonksiyonu şeklinde ifade edilir. Buna göre aşağıda verilen denklemler Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği ile çözülmesi gereken dört hareket denklemidir ve dört bilinmeyeni vardır [55].

Navier-Stokes denklemi en genel olarak,

$$V \cdot \nabla V = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 V + F \quad (3.4)$$

şeklinde yazılır. Kartezyen koordinat sisteminde ise aşağıdaki şekilde ifade edilir. Buna göre;

Navier – Stokes Denkleminin x-bileşeni;

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.5)$$

Navier – Stokes Denkleminin y-bileşeni;

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3.6)$$

Navier – Stokes Denkleminin z-bileşeni;

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edilir.

3.1.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi

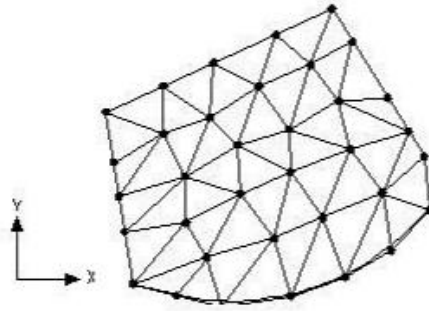
Sonlu elemanlar yöntemi, birçok mühendislik tasarımlarına, analizlerine ve problem çözümlerine uygulanabilecek sayısal bir işlemdir [56].

Sonlu elemanlar yöntemi sürekli katı cisimler ve bunlara uygun, sürekli matematik denklemler gerektiren geleneksel yöntemlerin tersine, incelenecek elemanı ya da sistemi, birbirine bağlı çok sayıda sonlu küçük elemandan oluşuyormuş gibi ele almaktadır [57].

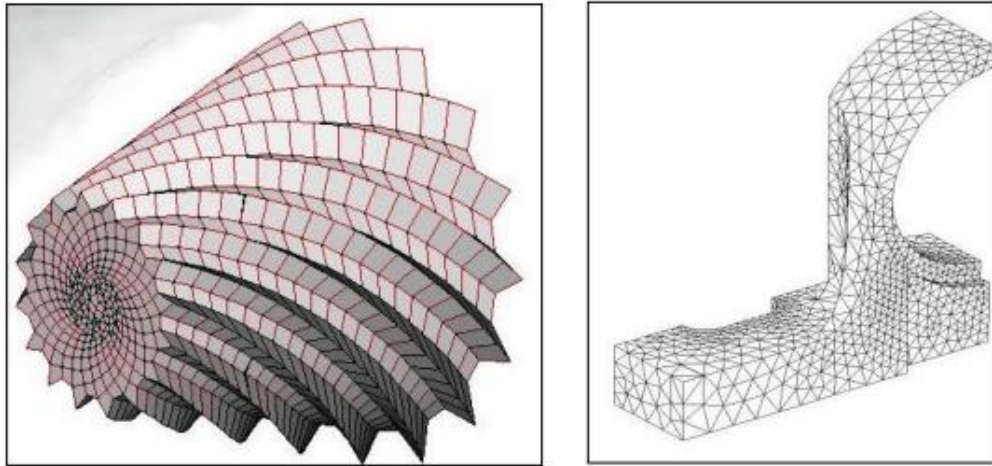
Kararlı durumlu, geçici durumlu, doğrusal ve doğrusal olmayan şartlardaki gerilim analizi, ısı transferi ve akışkanlar mekaniği gibi problemlerinin analizleri sonlu elemanlar yöntemi ile yapılabilir [58].

Bu yöntem karmaşık problemlerde çözümün zor olduğu durumlarda, ana problemi alt problemlere ayırarak çözüm elde etmede kullanılan bir yöntemdir. Problemin çözümünde, iyi tanımlanmış sonlu sayıda eleman kullanarak yeterli bir model elde edilebilir. Sonlu elemanlar yöntemiyle bu sonsuz sayıdaki bağlantı sonlu bir sayıya indirgenir. Sonlu sayıda bu bağlantı noktaları ne kadar çoğaltılırsa bu yöntemle yapılan çözümdeki hata oranı o kadar küçülür. Diğer taraftan bu sayının çok fazla artması da sayısal çözümlemede büyük zorluk getirir. Sonlu elemanlar yönteminin önemli bir özelliği, tüm problemi temsil etmek üzere elemanları bir araya koymadan önce, her bir elemanın ayrı formüle edilebilmesidir [59].

Sonlu elemanlar yönteminin esaslı çözüm aranan yapıyı, bölgeyi veya cismi çok sayıda küçük sonlu elemanlara, kısaca elemanlara, bölmektir. Bir, iki veya üç boyutlu olabilen bu elemanlar düğüm ya da düğüm noktası adı verilen noktalarda birbirlerine bağlanmaktadır. Elemanların şekli çözüm alanının boyutuna, şekline, sınır koşulların özelliğine, problemi tanımlayan ana denklemlerin karakteristikleri dikkate alınarak seçilir. Şekil 3.1’ de düzensiz bir geometrili bir levhanın üçgen sonlu elemanlarla ayrıklaştırılması veya idealleştirilmesi görülmektedir. Şekil 3.2’ de ise Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ile modelleme örnekleri verilmiştir.



Şekil 3.1 Düzensiz geometrili bir levhanın üçgen sonlu elemanla idealleştirilmesi [60].

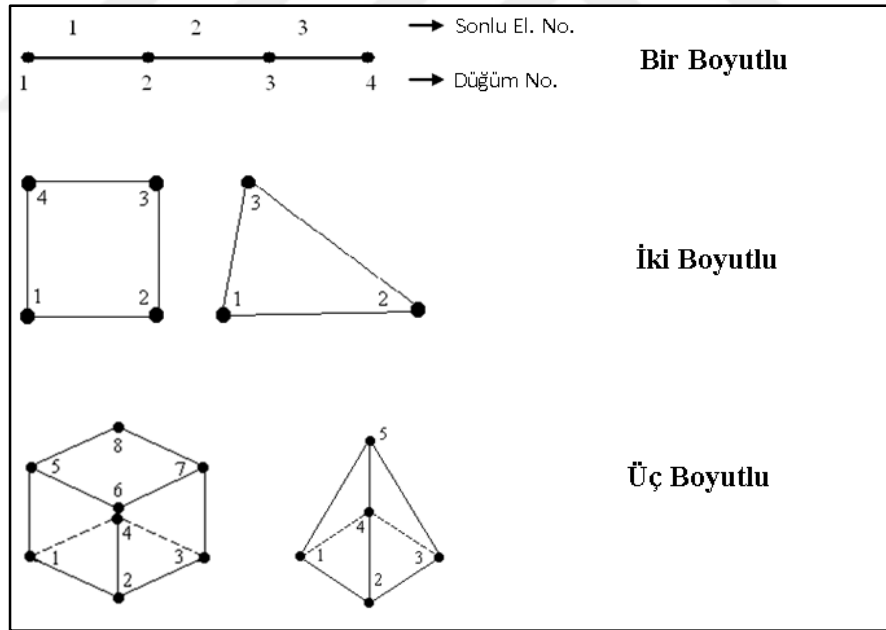


Şekil 3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile modelleme örnekleri [60].

Kullanılan yaklaşım fonksiyonları interpolasyon teorisinin genel kavramları kullanılarak polinomlardan seçilir. Seçilen polinomların derecesi ise çözülecek problemin tanım denkleminin derecesine ve çözüm yapılacak elemandaki düğüm sayısına bağlıdır.

Sürekli bir ortamda gerilme, yer değiştirme, basınç, sıcaklık vs gibi alan değişkenleri sonsuz sayıda farklı değere sahiptir. Eğer sürekli bir ortamın belirli bir bölgesinin de aynı şekilde sürekli ortam özelliği gösterdiği biliniyorsa, bu alt bölgede alan değişkenlerinin değişimi sonlu sayıda bilinmeyen olan bir fonksiyon ile tanımlanabilir. Sürekli ortamın alt bölgeleri de aynı karakteristik özellikleri gösteren bölgeler olduğundan, bu bölgelere ait alan denklem takımları birleştirildiğinde bütün sistemi ifade eden denklem takımı elde edilir. Denklem takımının çözümü ile sürekli ortamdaki alan değişkenleri sayısal olarak elde edilir. Sonlu elemanlar yönteminin işlem adımları aşağıdaki şekilde özetlenebilir [60].

- Adım 1: Fiziksel problemin matematiksel modeli kurulur veya hazır alınır.
- Adım 2: Ele alınan probleme ait varyasyonel ifade (formülasyon) kurulur.
- Adım 3: Çözüm bölgesi sonlu eleman adı verilen alt bölgelere ayrıştırılır. Bu işleme ayrıklaştırma veya sonlu eleman ağı (mesh) adı verilir. Şekil 3.3’ te gösterildiği gibi sonlu elemanlar problemin durumuna bağlı olarak bir, iki ve üç boyutlu tip olarak ayrıklaştırılabilir.



Şekil 3.3 Sonlu eleman ağları [60]

- Adım 4: Her sonlu elemanda aranan fonksiyonun ifadesi polinom olarak kabul edilir. Bu fonksiyonlar Adım 2’de verilen varyasyonel ifadede yerine yazılarak, her sonlu eleman için verilen temel denklemler cebirsel denklemlere dönüştürülür.

- Adım 5: Her sonlu eleman için ayrı ayrı bulunan denklemler uygun şekilde birleştirilerek bütün sisteme ait cebrik denklem takımı elde edilir. Bu sisteme sınır koşulları uygun satır/sütun işlemleriyle dahil edilerek, indirgenmiş sistem bulunur.
- Adım 6: Adım 5' te elde edilen indirgenmiş sistemin çözülmesiyle her bir düğüm noktasında aranan büyüklükler bulunur.
- Adım 7: Son olarak elde edilen çözüm, grafik, tablo veya fotoğraf şeklinde kullanıcıya sunulur.

3.1.4. Sonlu Hacimler Yöntemi

Sonlu hacim bir ağ üzerindeki düğüm noktasını çevreleyen hacimler olarak ifade edilir. Sonlu Hacimler Yöntemi, cebirsel denklem formunda kısmi diferansiyel denklemleri temsil eden bir yöntem olup, akışkanlar mekaniği, ısı ve kütle transferi alanında yaygın bir biçimde kullanılmaktadır [61]. Sonlu Hacim Yönteminde yapılandırılmış veya yapılandırılmamış ağlar kullanılarak rastgele geometrilere kullanılabilmektedir [62]. Sonlu hacimler yönteminde temel korunum denklemlerinin doğrudan ayrıklaştırılması prensibine dayandığından modellemenin iyi olmadığı durumlarda da iyi sonuçlar alınmaktadır. Bu yöntem çok sık kullanılan bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ayrıklaştırma yöntemidir.

Sonlu hacimler yöntemi, korunum denklemlerini sayısal olarak çözümlenebilen cebirsel denklem sistemlerine dönüştürmek için kontrol hacim esaslı bir teknik kullanır. Bu teknik her bir kontrol hacmi için korunum denklemlerinin integrasyonunun alınması sonucunda, değişkenler için kontrol hacmini sağlayan ayrık eşitliklerin elde edilmesini içerir. Ayrık eşitliklerin doğrusallaştırılması ile elde edilen, doğrusal denklem sistemlerinin zamana bağlı çözümü ile hız, basınç ve sıcaklık gibi değişkenler verilen yakınsaklık ölçüsünü sağlayıncaya kadar güncellenir.

Sonlu hacimler yöntemi ile problem çözme işleminde genellikle şu adımlar kullanılır [63].

- Çalışılacak bölgenin ağ programları sayesinde oluşturulacak sayısal analize uygun ağ ile kontrol hacimlere bölünmesi.

- Sırasıyla momentum denkleminin, süreklilik denklemlerinin ve daha sonra enerji veya türbülans gibi diğer aranan denklemlerin çözümü.
- Sonuçlandırılan denklem takımlarının iteratif çözüm sayesinde daha doğru değerlere yükseltilmesi.
- Yakınsaklığın kontrolü.
- Çözümün elde edilmesi.

Sonlu Hacimler Yönteminde, kısmi diferansiyel denklem içerisinde bir ıraksama terimi içeren hacim integraller, yüzey integrallere dönüştürülür. Sonlu Hacimler Yöntemi, bir denge yaklaşımına dayanmakta olup, lokal olarak korunumludur. Ayrıklık formülü, akışın kontrol hacmi sınırı üzerindeki integral formülüyle oluşturulur. Sonlu Hacimler Yöntemi, birçok Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği paketinde kullanılmaktadır [63].

Sonlu Hacimler Yöntemi, korunum kanunlarının ayrıklaştırılmasında kullanılır. Genel korunum kanunu olarak adlandırılan ve kısmi diferansiyel denklemlerle temsil edilen bu denklemler aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot f(u) = 0 \quad (3.8)$$

Burada u , bir vektörün durumunu temsil etmekte, f ise akış tansörüyle ilgili bir ifadedir. Sonlu hacim veya hücreler içerisindeki boyutsal bölgeler bir kez daha bölünebilir. Bir parçacık hücre i için toplam hücre hacmi v_i aracılığıyla integral hacmi alınabilir.

$$\int_{v_i} \frac{\partial u}{\partial t} dv + \int_{v_i} \nabla \cdot f(u) dv = 0 \quad (3.9)$$

İntegrali alınan birinci terimden hacim ortalaması elde edilir ve ikincisine ise ıraksama teoremi uygulandığında ifade,

$$v_i + \frac{d\bar{u}_i}{dt} + \oint_{s_i} f(u) \cdot n dS = 0 \quad (3.10)$$

şeklini alır. Burada S_i , hücrenin toplam yüzey alanı ve n , yüzeye normal bir birim vektördür. Böylece genel sonuç denklemi aşağıdaki gibi temsil edilir.

$$\frac{d\bar{u}_i}{dt} + \frac{1}{v_i} \oint_{S_i} f(u).ndS = 0 \quad (3.11)$$

Tekrarlanan kenar akışları için değerler, hücre ortalamalarının interpolasyonu veya ekstrapolasyonu ile yeniden oluşturulabilir [64].

3.1.5. Sonlu Farklar Yöntemi

Diferansiyel denklemlerin çözümü için kullanılan ilk sayısal yöntemlerden biri olup, diferansiyel denklemlerin elle hesaplanmasında sayısal çözümler elde etmek için kullanılmıştır. Modelin içinde barındırdığı sonsuz sayıdaki nokta, sonlu sayıdaki nokta ile tanımlanarak temel korunum denklemlerinin diferansiyel formları noktalar üzerine uygulanabilir. Her noktanın yapısal olarak birbiriyle uygun şekilde bağlı olması gerekir. Hız, basınç gibi özellikleri taşıyan noktalar komşu noktaya bu özellikleri aktarmaktadır. Modelin sonlu sayıda noktaya ayrılarak çözüm aranmasından dolayı hassasiyet doğrudan çözüm alanının ayrıklaştırılmasıyla ilgilidir.

Sonlu farklar yöntemi basit ve hassas bir yöntemdir. Ancak yapısal bir çözüm ağına ihtiyaç duyduğu için karmaşık geometrilere uygulanması zordur. Akışkan alanını tanımlayan ağ yapısının her düğüm noktasında, RANS denklemleri türevlerine sonlu fark yaklaşımı oluşturmak için Taylor serisi açılımları kullanılmıştır [65]. Sonlu farklar yöntemi uygulaması kolay bir yöntem olmasına rağmen düzenli bir ağ yapısına ihtiyaç duymaktadır.

Kısmi diferansiyel denklemlerde yer alan türevlerin bilgisayarda sayısal hesabı için yaklaşık formda yazılması gerekir. Bu tip ayrıklaştırma işlemlerine genel olarak sonlu fark formülasyonu adı verilir. Sonlu fark formülasyonları çoğu zaman Taylor seri açılımına dayanılarak yapılır. Bunun yanında polinomlar yardımıyla da ayrıklaştırma yapılabilir.

Diferansiyel denklemlerin çözümünde sonlu farklar yönteminin uygulanması için ilk adım bilinmeyen büyüklüğü temsil eden fonksiyonun ayrıklaştırılmasıdır. Buna göre bir boyutlu $f(x)$ fonksiyonun eşit Δx aralıklarla i ayrık parçalara bölünmesi sonucunda, diferansiyel denklem ayrık hale getirilebilir. $f(x)$ fonksiyonu $x = x_i$ civarında Taylor serisine açılırsa

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^n(x_i)}{n!} (x - x_i)^n = f(x)|_{x=x_i} + f'(x)|_{x=x_i}(x - x_i) + \dots \quad (3.12)$$

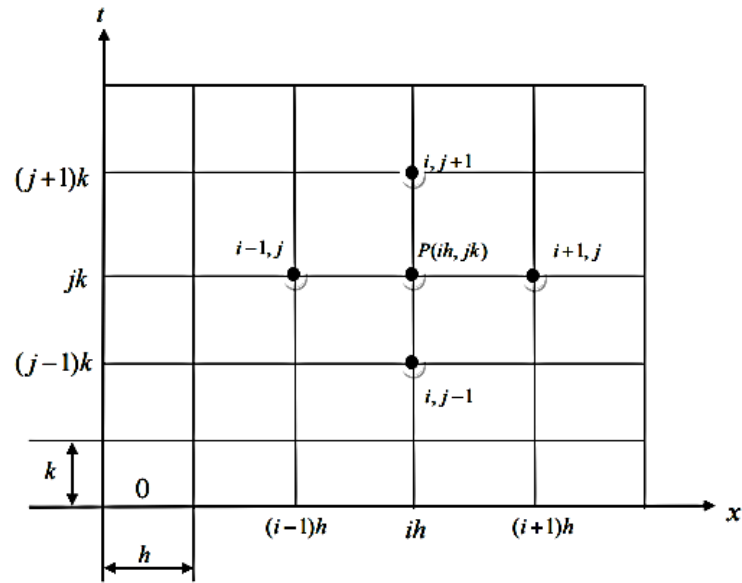
iken $x - x_i = a$ seçilmek üzere $x = x_i + a$ olarak

$$f(x_i + a) = f(x) + f'(x_i)a + \frac{a^2}{2!}f''(x_i) + \dots \quad (3.13)$$

biçiminde ifade edilebilir.

Sonlu farklar yöntemi iteratif çözüm yöntemidir. Buna göre sonlu farklar yönteminin temel dayanağı bilinmeyen büyüklüklerin Taylor serisine açılarak, çeşitli mertebelerden analitik türevlerin, sayısal eşdeğerlerinin kullanılması üzerine kuruludur [66].

Sonlu farklar yöntemi, problemde bulunan bağımlı değişken ve türevlerinin sonlu ve ayrık noktalarda yaklaşık olarak ifade edilmesidir. Bunu yapabilmek için x yönünde h uzunluğunda, t yönünde k uzunluğunda hücrelerden oluşan dikdörtgensel alanlara bölünür. Böylece çözüm bölgesi ızgara biçiminde bir kafese bölünmüş olur. Yaklaşık çözüm, bu düğüm noktalarındaki çözüm fonksiyonun değerleriyle hesaplanacağından h ve k 'nin seçimi önemlidir. Şekil 3.4' te düğüm noktaları gösterilmiştir. Kısmi diferansiyel denklemde bulunan türevlerin yerine Taylor serisi ile elde edilen sonlu fark yaklaşımları yazılır. Böylece kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü problemi sonlu fark denklemlerinden oluşan, cebirsel denklem sisteminin çözüm problemine indirgenir. Sonlu fark yöntemi problemin çözüm bölgesinin düzgün geometrik şekil olması durumunda iyi sonuç verir [67].



Şekil 3.4. Düğüm noktalarının gösterimi [67]

Sonlu farklar ile interpolasyon yöntemini kullanarak yaklaşık değerini bulmak istediğimiz noktanın bilinen x değerlerine yakınlığına göre ileri yönlü, geri yönlü veya merkezi farklar interpolasyon polinomları kullanılır.

3.1.6. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinde Türbülans Modelleri

Türbülans bir akışkanın hareket halindeki düzensizliği olup, bir akışkan hareketi içerisinde hız, basınç ve diğer akış miktarlarının zaman ve uzay içerisinde dalgalanmasıdır. Türbülanslı akış ise bir akışkanın hızının, zamana göre değişiklik gösterdiği düzensiz akış biçimi olarak tanımlanmaktadır.

Türbülanslı akış yüksek Reynolds sayılarında oluşur ve bir akış özelliği olup çalışmalarda genellikle türbülanslı akış ile karşılaşılr. Bu nedenle türbülanslı akışlar için hesaplama yöntemleri önem taşımaktadır. Pratikte türbülanslı akışın sadece zaman ortalamalı özellikleri ile çözüm yapılmaktadır.

Akışı ortalama özellikleri ile ifade etmek için etkili türbülans modellerine ihtiyaç duyulmaktadır [68].

Mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan ve zaman-ortalamalı akış denklemlerini temel alan klasik türbülans modelleri aşağıdaki şekildedir.

- k-epsilon modeli
- k-omega modeli
- Karışma uzunluğu modeli
- Spalart – Allmaras modeli
- SST (Shear stress transport)
- Reynold gerilim denklemi modeli
- Cebirsel gerilim modeli

Bu modellerin hepsi kullanılmakla beraber k-ε modeli pratikte en çok kullanılan ve deneysel verilerle karşılaştırılarak güvenilir sonuçlar verdiği belirlenen modeldir.

3.1.6.1. Standart k-Epsilon Türbülans Modeli

Standart k-epsilon Türbülans Modeli (k-ε), türbülans modelleri arasında ekonomikliği ve pek çok akış olayında kabul edilebilir doğrulukta sonuç vermesi açısından yaygın olarak kullanılan yarı deneysel bir modeldir. Türbülans kinetik enerjisi k ve yayılma (dissipasyon) hızı oranı ε için yazılan iki adet taşınım denkleminin çözümünü ve türbülans viskozitesinin hesabını içerir [69].

Standart k- ε modeli Türbülans denklemi;

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.14)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (3.15)$$

şeklinde yazılabilir.

Bu modelde difüzivite terimleri,

$$\Gamma_k = \frac{\mu + \mu_t}{\sigma_k} \quad (3.16)$$

$$\Gamma_\varepsilon = \frac{\mu + \mu_t}{\sigma_\varepsilon} \quad (3.17)$$

olmaktadır. Hız gradyanından kaynaklanan türbülans kinetik enerjisi üretimini ifade eden terim,

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3.18)$$

olup burada türbülans viskozitesi, türbülans kinetik enerjisi ve dissipasyon oranı cinsinden,

$$\mu_t = \rho C_\mu + \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.19)$$

yazılabilir.

3.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), her türlü akışkan ve akışın değişik koşullardaki analizini yapmaya yarayan bir yöntemdir. HAD bilgisayar ortamında yapılan bir benzetim (simülasyon) ve tasarım programıdır. HAD ile akışkanlar, ısı iletimi ve bunlara bağlı olarak kimyasal tepkiler, bilgisayar ortamında analiz edilir. HAD yöntemi, akışkan kaynaklı problemlerin sayısal algoritmalar ile çözüm yöntemi olarak ifade edilmektedir. Temel olarak bu yöntemde üç ana denklem (süreklilik, momentum ve enerji denklemleri) esas alınır ve bu denklemler sayısal olarak çözülerek akış içindeki basınç, hız ve sıcaklık dağılımları belirlenir [70].

Endüstride otomobilin aerodinamik yapısının geliştirilmesinde genel olarak kullanılan yöntemler, rüzgar tünelleri ve yol testleridir. Rekabet içerisinde olan taşıt üreticileri daha ekonomik, daha güvenli ve daha konforlu araçlar geliştirmek için büyük çaba göstermektedir. Rüzgar tüneli ve yol testi teknikleri ürün geliştirmede zaman kaybına yol açmaktadır. Bu nedenle son yıllarda ürün geliştirmede bilgisayarlar ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanımına ağırlık verilmiştir. Bu yöntemle rüzgar tüneli testlerinin benzetimi yapılmakta ve HAD aerodinamik tasarımın temel aracı olmaktadır. Böylece, kullanılan sayısal yöntemler ile aracın etrafındaki akışın modellenmesi yapılarak ürün geliştirmesine zaman kazanılmaktadır. HAD ile çözüm rüzgar tünellerine göre oldukça ekonomik olmaktadır.

HAD ile incelenecek olan taşıt modelinin geometrisi bilgisayar ortamında oluşturulmalıdır. Taşıt modelinin bilgisayar ortamında oluşturulması, prototip üretimine göre daha az zaman alır ve ekonomiktir. Ayrıca, taşıt üzerinde yapılacak kısmi değişiklikler, rüzgâr tüneline yapılacak incelemelere göre daha kolay ve hızlıdır. Bu şekilde yapılan analiz ile değişikliklerin oluşturacağı etkiler hakkında hızlı bir biçimde bilgi sahibi olunur.

Bu amaçla, sisteme dışarıdan dahil edilen bir bilgisayar destekli tasarım (Computer aided design-CAD) paketinde bulunan veya yeni tasarlanan bir geometri geliştirilir. 3 boyutlu CAD çalışılacak çerçeveyi oluşturur ve bu çerçeve içine bir ağ tasarlanır. Hesaplamalar için oluşturulan model sonlu elemanlara bölünerek bir ağ yapısı (mesh) elde edilir. Bir araç tasarımında küçük hücrelerden milyonlarca ağ bulunabilir [71]. Gerekli sınır şartları tanımlanarak çözüm yapılır. Taşıtlardaki aerodinamik incelemede akışkan olarak hava ele alınır. Burada akışkanın sıkıştırılamaz akış kabulü yapılarak yoğunluk ve viskozite gibi akışkan özellikleri sabit olarak tanımlanır.

Daha sonra süreklilik denklemi, momentum korunumu ve $k-\epsilon$ türbülans modelinin kullanılmasıyla taşıt yüzeyi ve üzerindeki havanın hız ve basınç dağılımı elde edilir. HAD kodu akışkanın belirleyici Navier-Stokes denklemleri ağı içindeki tüm hücrelere uygulanır. Bu denklemler aşağıdaki gibidir.

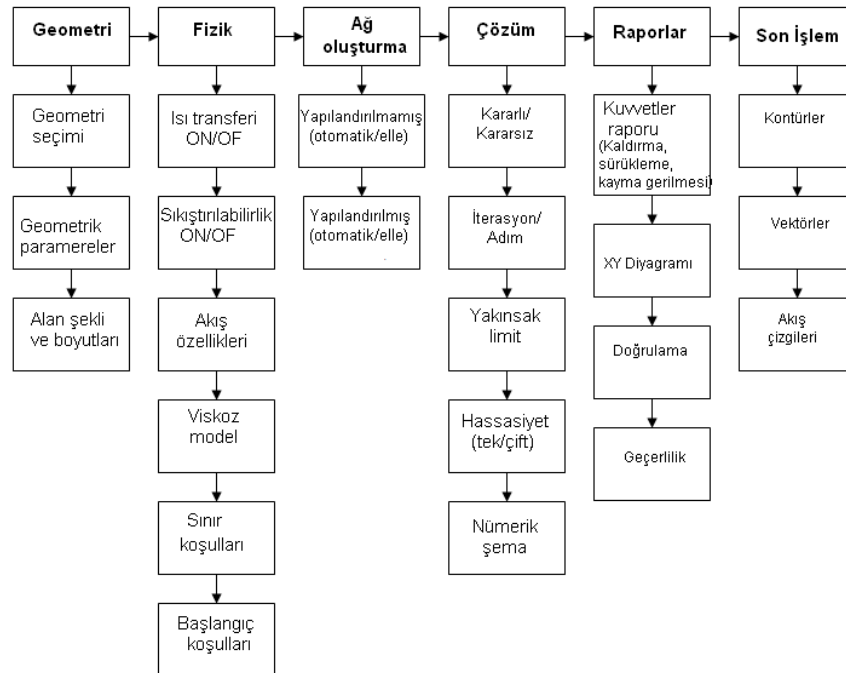
- Doğrusal (Lineer) yöntemler (vortex kafes ve panel yöntemleri)
- Doğrusal olmayan (Nonlinear) yöntemler (1.Euler yöntemi, kararlı akış ve kararsız akış yöntemleri)

Bilgisayar işlemcisi, tüm hücreler arasında çaprazlama haberleşerek bilgi iletir ve sorunları çözüme kadar bunu tekrarlayarak yapar. Bu işlemlerden sonra tüm akışkan etki alanının ve her bir hücre yapısının içindeki enerji ve kütle akışı dengelenir. Hesaplama tamamlandığında, incelenen elemanın yüzeyinde ve yüzeye yakın alanlarda milyonlarca sayıdan oluşan basınçlar ve hızlar belirlenir [70]. Bu şekilde aerodinamik verimlilik tespiti çalışmalarında, HAD ile hızlı tasarım analizi yapılarak hava akımları belirlenmekte buradan performans artışı ve verimi yüksek ürünlerin oluşması sağlanmaktadır.

3.2.1. HAD Yöntemi ile İşlem Basamaklarının Temel Adımları

HAD kodlarının amaçları farklı uygulamalar için farklı olacaktır. Problemin özel amacı ve akış koşullarına bağlı olarak havacılık, denizcilik, yanma, çok fazlı akışlar gibi farklı uygulamalar için farklı HAD kodları seçilir. Amaçlar belirlenerek HAD kodları seçildikten sonra, "HAD süreci" problemin çözülmesi için gerekli adımlar Şekil 3.1’ de verildiği gibi belli sıralama ile gerçekleştirilir. Buna göre HAD yöntemi ile işlem sürecinin temel adımlarını üç ana grup altında toplamak mümkündür.

- Hesaplanacak alan, hacim vb. (ön işlem)
- Aerodinamik hesaplama (çözümleme)
- Sayısal sonuçların grafiksel gösterimi (son işlem)

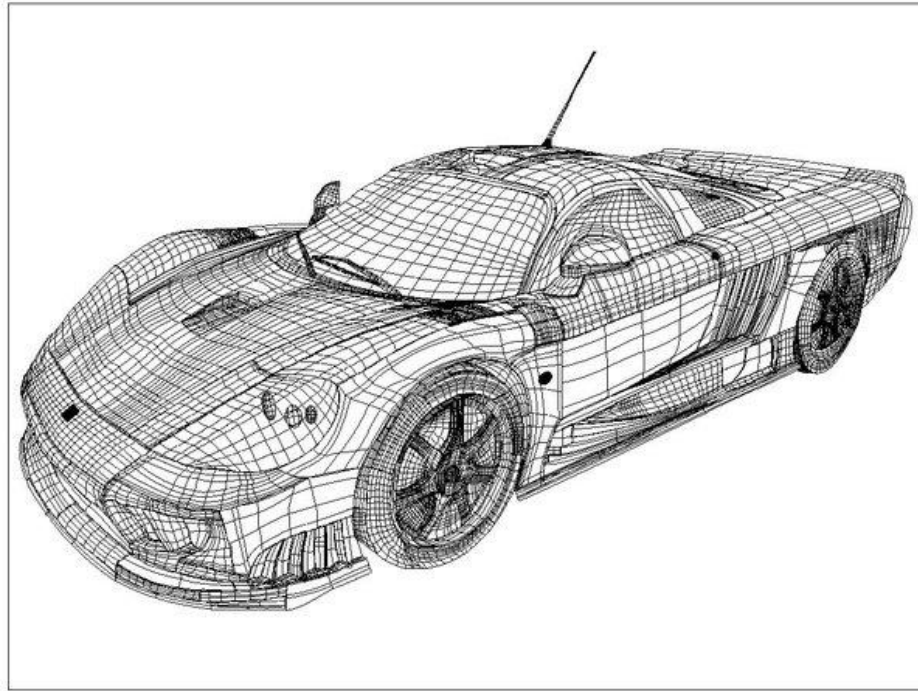


Şekil 3.5. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği işlem süreci [60].

3.2.2. Ön İşlem

HAD yönteminde ön işlemde öncelikle geometri ve çözüm çeşidine bağlı olarak bir akışkan hacmi oluşturulur. Bu hacim elemanlara ayrılarak ızgaralar (grid) sağlanır. Sonra katı ve akışkan hacimleri bölgeler olarak ayrılır ve sınır koşulları atanır. Bu işlem sonunda, akışkanının özellikleri ve çalışma şartları girilerek çözüm işlemine geçilir.

HAD yöntemi ile işlem sürecinde öncelikle kullanılabilir uygun bir ağ yapısı hazırlanır. Bu ağ veya ızgara, küçük parçacıklardan meydana gelen bir yapıdır ve bu yapı akışkanın içinden geçeceği boşluğu doldurur. Ağ yapısının oluşturulması aerodinamikle ilişkili olmayıp, akış çözümlemesi sırasında kullanılacak olan geometrik bilgileri içerir. Şekil 3.6' da bir otomobil yüzeyi için CAD modeli ile oluşturulan ağ tabakası örnek olarak verilmiştir.



Şekil 3.6. Otomobil yüzeyi için oluşturulan ağ yapısı[72].

3.2.3. Çözüm

Çözüm sürecinde bir dizi iterasyon ve yakınsama kriterleri yerine getirilmektedir. Düğüm noktasına bağlı çözümlerde yakınsama kriteri, düğüm noktalarında oluşan maksimum ve minimum değerlerinin farkıdır. Bu fark, belirlenen sınıra geldiğinde çözüm otomatik olarak

sonlandırılacaktır. Çözümlerde doğrusal ve doğrusal olmayan HAD yöntemlerinden yararlanılmaktadır.

3.2.3.1. Doğrusal HAD Yöntemi

Vorteks kafes yapısı ve panel yöntemleri sayısal çözümleri Laplace denklemleri ile yapılır ve bu yöntem endüstride oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir.

3.2.3.2. Doğrusal Olmayan HAD Yöntemi

Sayısal tasarımlar Euler ve Navier Stokes denklemlerinin temelini oluşturan üç tip yaklaşımla çözülür. Bunlar sonlu farklar yöntemi, sonlu hacimler yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi olarak üç kısımda incelenir.

Sonlu farklar yönteminde karmaşık şekillerin hesaplanabilmesi için, ağ tabakası üzerinde bazı sınırlamalara ihtiyaç duyulmaktadır. Sonlu farklar yöntemi ağların boğum noktalarındaki cebirsel diferansiyel denklemlerle ve kısmi türevlerle diferansiyel denklemlerin türetilmesi olarak ifade edebilir. Benzer birçok zorluklardan dolayı sonlu farklar yöntemi otomobilin hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile çözümünde nadiren kullanılır.

Sonlu hacimler yöntemi kısmi diferansiyel denklemlerin türetilmesinde oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Sonlu hacimler yönteminin önemli avantajı bağımsız ağ yapısı ile çözüm işleminin gerçekleştirilmesidir. Ayrıca sonlu farklar yöntemi için gerekli olacak hücreleri oluşturan noktalardaki denklem dönüşümlerine gerek bulunmamaktadır. Günümüzde sonlu hacimler yöntemi HAD kodlarının birçoğunda ve otomobil aerodinamiği uygulamalarında kullanılmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle tam çözümün bulunduğu bir yöntemdir. Kullanılan yaklaşım fonksiyonları interpolasyon teorisinin genel kavramları kullanılarak polinomlardan seçilir. Sürekli ortamın alt bölgeleri de aynı karakteristik özellikleri gösteren bölgeler olduğundan, bu bölgelere ait denklem takımları birleştirildiğinde bütün sistemi ifade eden

denklem takımı elde edilir. Denklem takımının çözümü ile sürekli ortamdaki değişkenler sayısal olarak elde edilir [60].

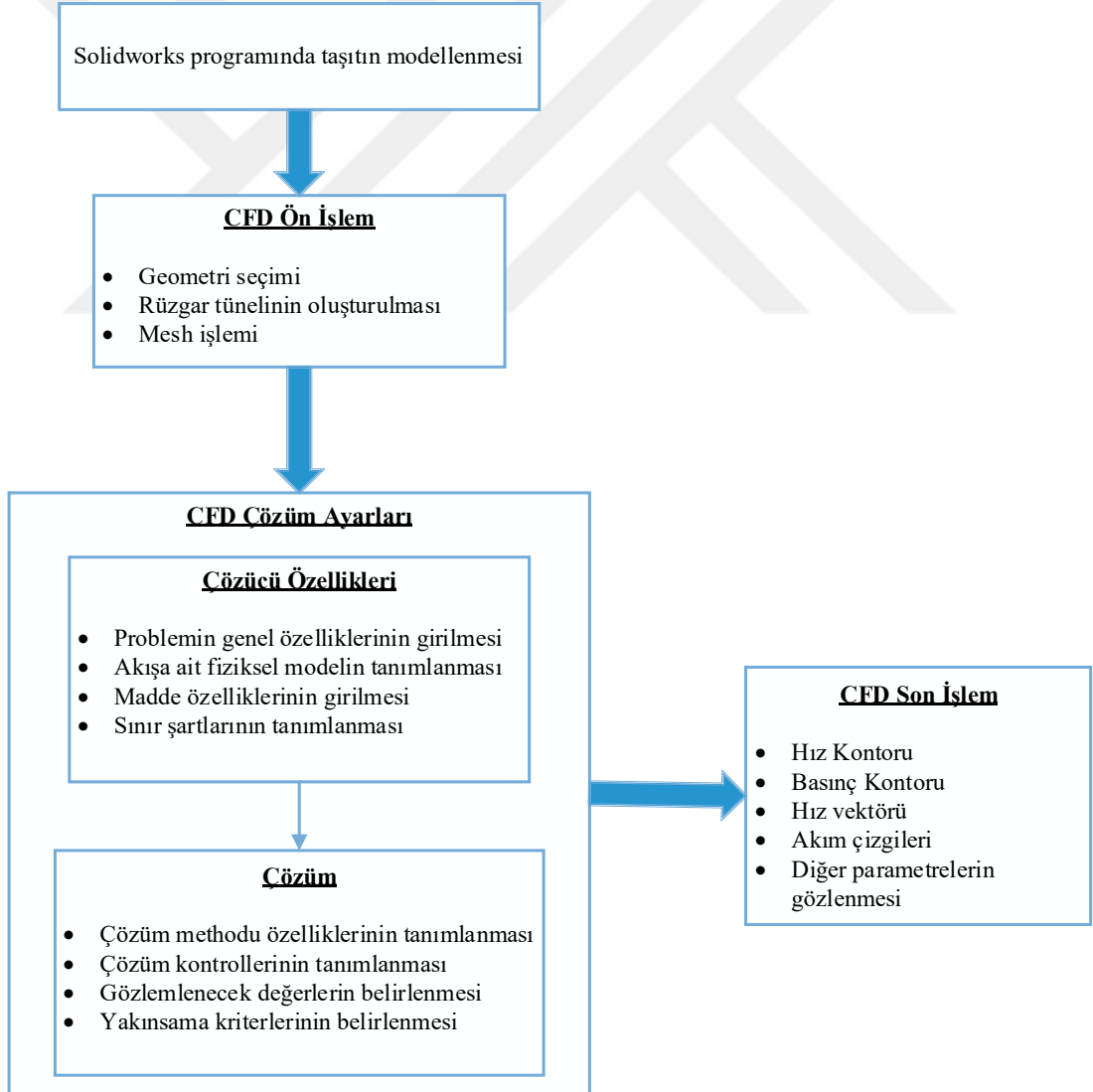
3.2.4. Son İşlem

Son işlem bölümünde sonuçların görselleştirmesi ve elde edilen değerlerin grafiklere ve görüntülere aktarması yapılmaktadır. Böylece analiz çeşidine göre bir görüntü oluşturularak sonuçların daha anlaşılır bir şekilde değerlendirilmesi sağlanır.



4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, belirli bir otomobildeki aerodinamik etkilerin ve enerji kaybının sayısal incelenmesinin yapılması ve kayıp enerjinin bir kısmının otomobile ilave edilen rüzgar türbini yardımıyla geri kazanımı hedeflenmiştir. Bu amaçla ölçüleri belirli bir araç tasarlanarak Solidworks programında modellenmiştir. Buna göre tasarlanan aracın ön bölümünün kapalı, ızgaralı, delikli ve rüzgar türbinli olma durumlarına göre sayısal analizleri Ansys Fluent programında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra her bir otomobil modelinin aerodinamik sürüklenme direnç katsayısı, hız ve basınç dağılımları incelenmiştir. Her bir otomobil modelinin kayıp enerji miktarı ve rüzgar türbini yardımıyla üretilen enerji miktarı hesaplanmıştır. Şekil 4.1’ de sayısal analiz işlem adımları gösterilmiştir.



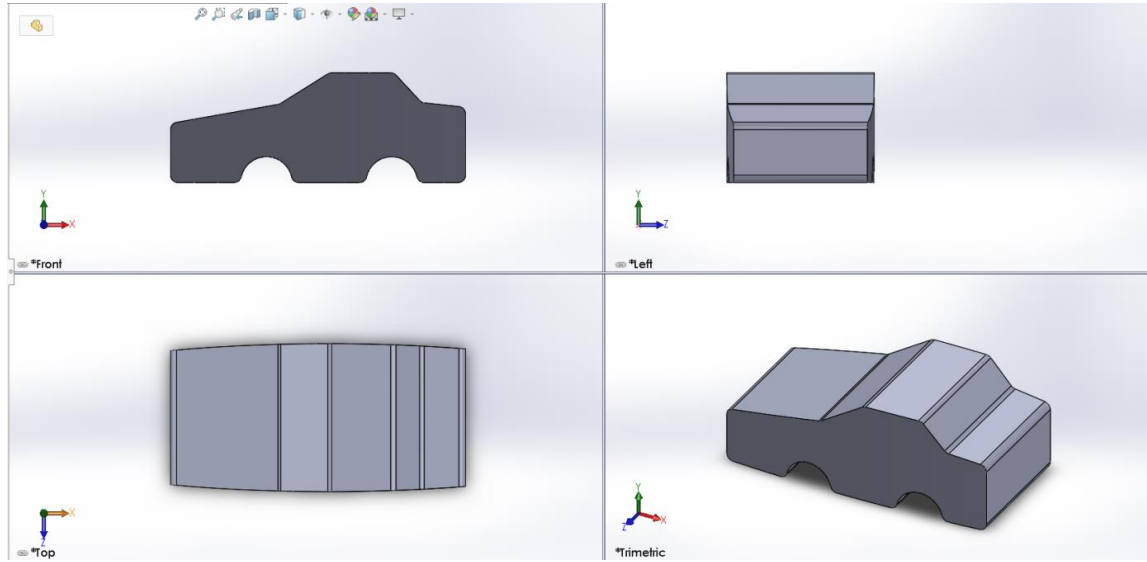
Şekil 4.1 Sayısal analiz işlem adımları

4.1. Kapalı Model Taşıt Modelleme

Tez çalışması kapsamında aşağıda ölçekli şekli verilen kapalı taşıt modeli kullanılmıştır. Buna göre, kapalı model otomobilin şekli ve geometrik boyutları Şekil 4.2-4.4' te gösterildiği gibi belirlenmiştir. Bu çalışmada otomobil etrafındaki akışı incelemek için başlangıçta ön bölümünün tamamı kapalı kabul edilmiştir.

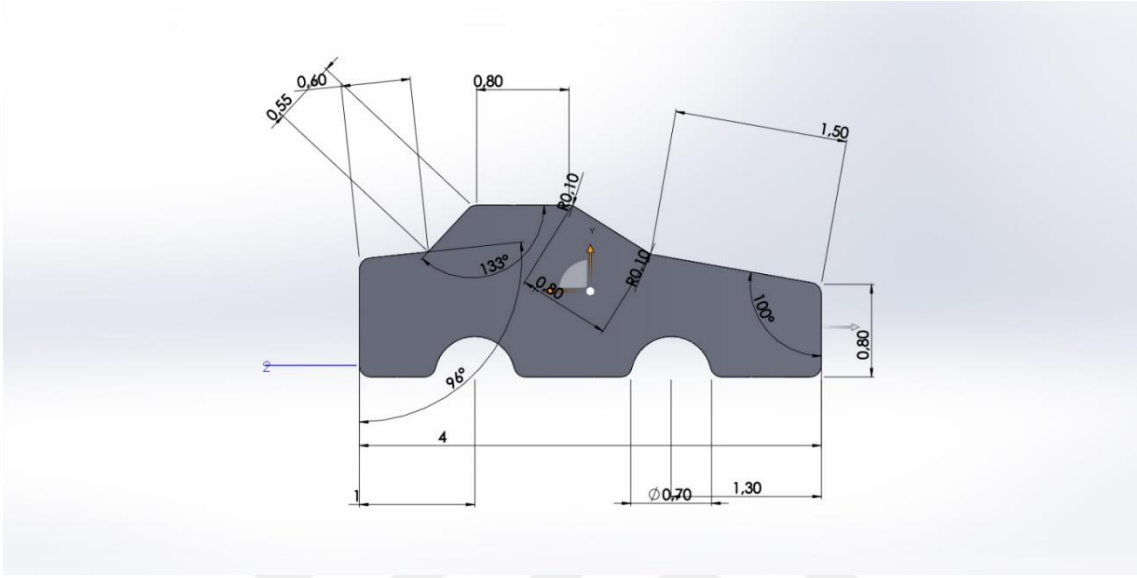
Yapılan çalışmada, akış analizleri için modellenecek olan otomobil modelleri Solidworks 2016 programı yardımıyla yüzey modelleme gerçekleştirilerek tasarlanmış, mesh ve analizler Ansys Fluent 15.0 programında yapılmıştır.

Ansys Fluent programında ilk adım katı modellemedir. Fluent programı Solidworks, CATIA gibi CAD programları ile özdeşik çalışmaktadır. Solidworks programında tasarlanan taşıtın, Fluent programında mesh ve analiz işlemlerinin yapılması için Parasolid formatında kaydedilmiştir. Daha sonra model Fluent programında çağrılmıştır (import). Akış analizlerinin yapılacağı kapalı taşıt modelinin Solidworks programındaki genel görünümü Şekil 4.2' de gösterilmiştir.

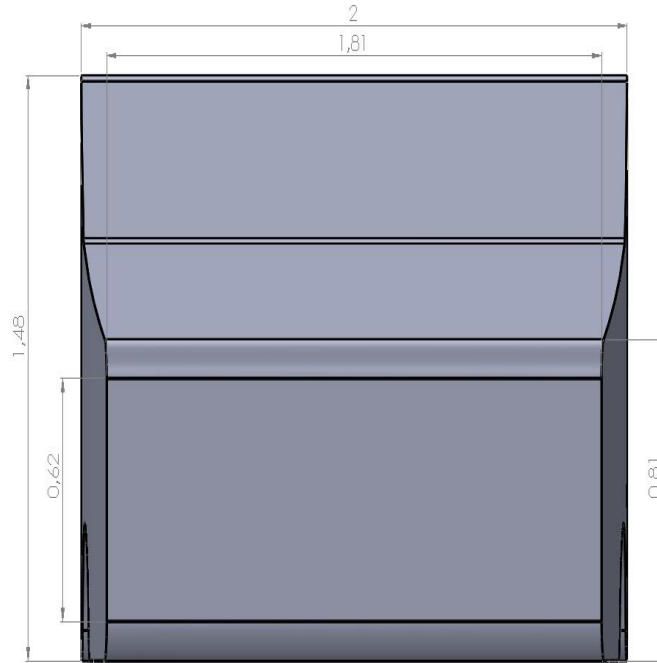


Şekil 4.2. Kapalı model otomobilin genel görünümü

Şekil 4.3’ te taşıt modelinin yan görünüşü ve boyutları ve Şekil 4.4’ te ön görünüşü ve boyutları gösterilmiştir.



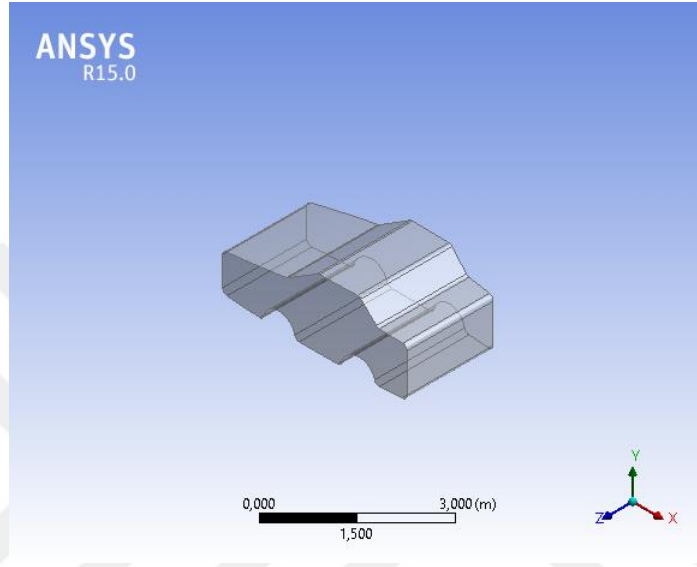
Şekil 4.3. Kapalı model otomobilin yan görünüşü ve boyutları



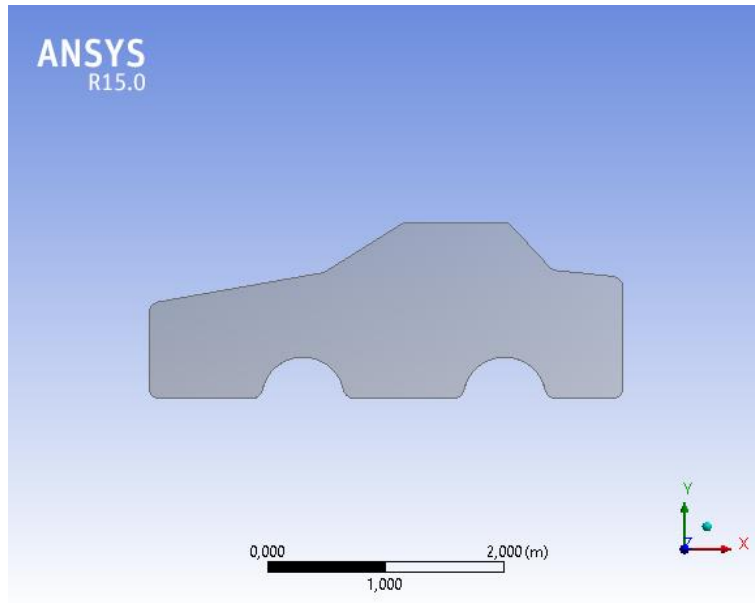
Şekil 4.4. Kapalı model otomobilin ön görünüşü ve boyutları

4.1.1. Çözüm Geometrisi

Çözüm geometrisi oluşturmak için Solidworks 2016 programıyla modellenen taşıt geometrisi Ansys 15.0 programında Fluent yazılımının geometri modülüne çağırılır. Fluent programında çözüm geometrileri amacıyla oluşturulan taşıtın görünüşleri Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’ da verilmiştir.

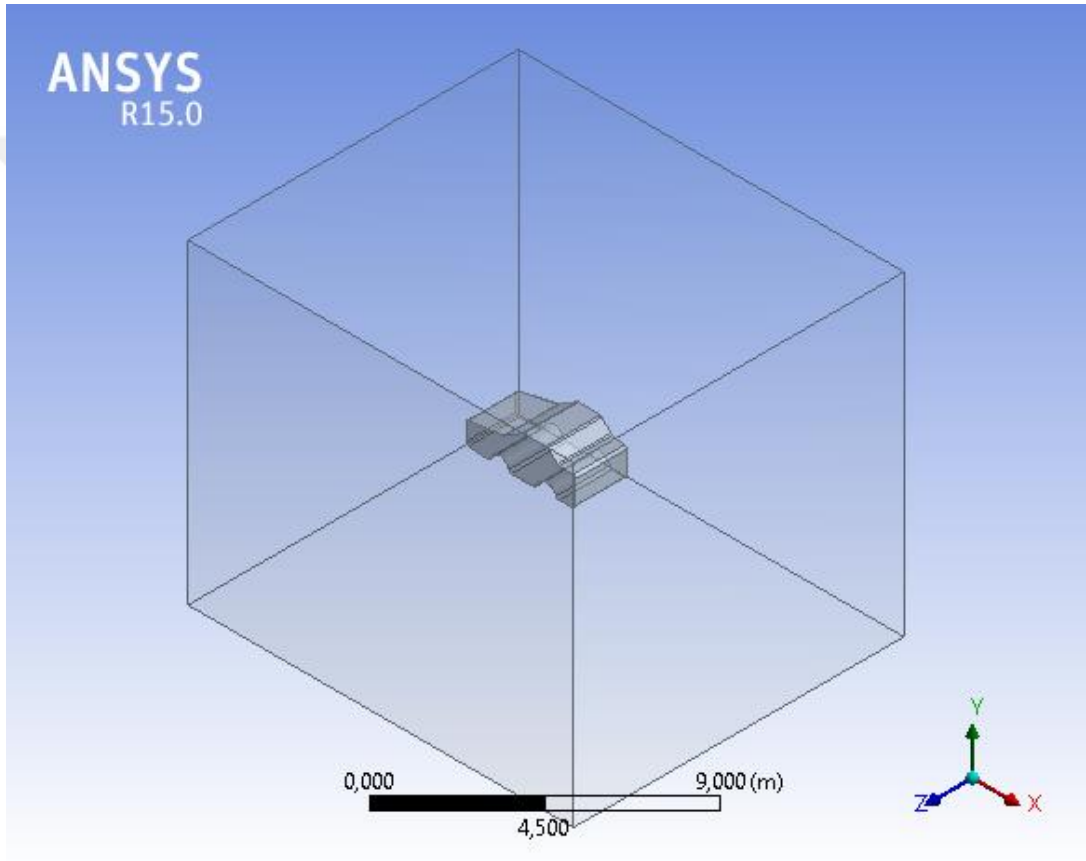


Şekil 4.5. Kapalı model otomobilin Fluent programında izometrik görünüşü



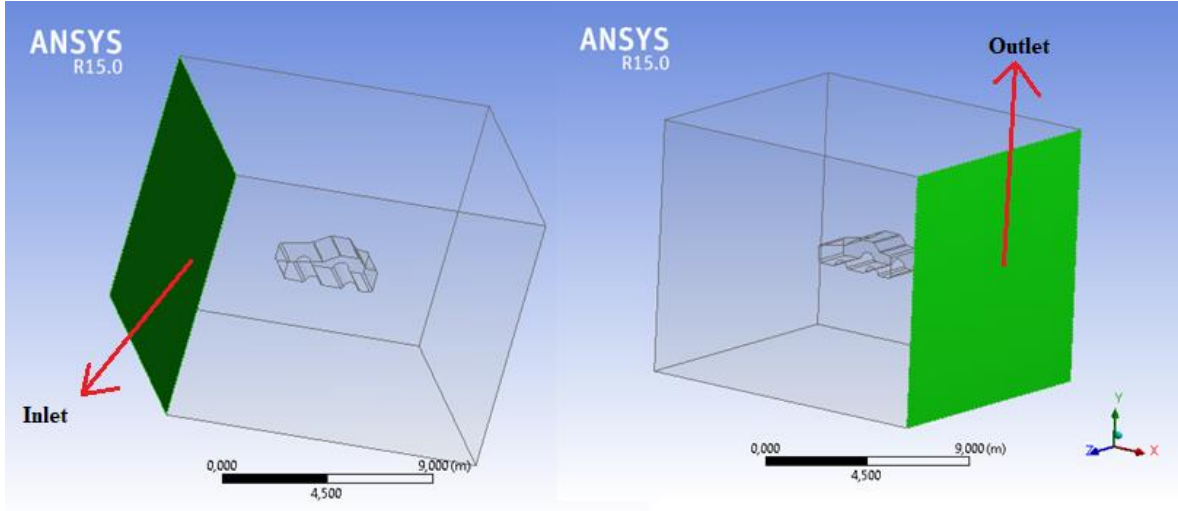
Şekil 4.6. Kapalı model otomobilin Fluent programında yandan görünüşü

Şekil 4.7’ de gösterildiği gibi model oluşturulduktan sonra analiz edilecek ortamı (hava) oluşturmak için programın araçlar (Tools) bölümünden çerçeve (Enclosure) komutuyla 10mx10mx10m boyutunda bir rüzgar tüneli modellenmiştir. Taşıt geometrisini oluşturan hacim tünel hacminden çıkartma (Subtract) komutuyla çıkartılarak sayısal hesaplamaların yapılacağı çözüm alanı elde edilmiştir. Yüzey isimlendirmeleri de bu bölümde yapılmış olup yüzey isimleri hava girişi için “inlet” , hava çıkışı için “outlet”, duvarlar için “wall” olarak adlandırılmıştır.

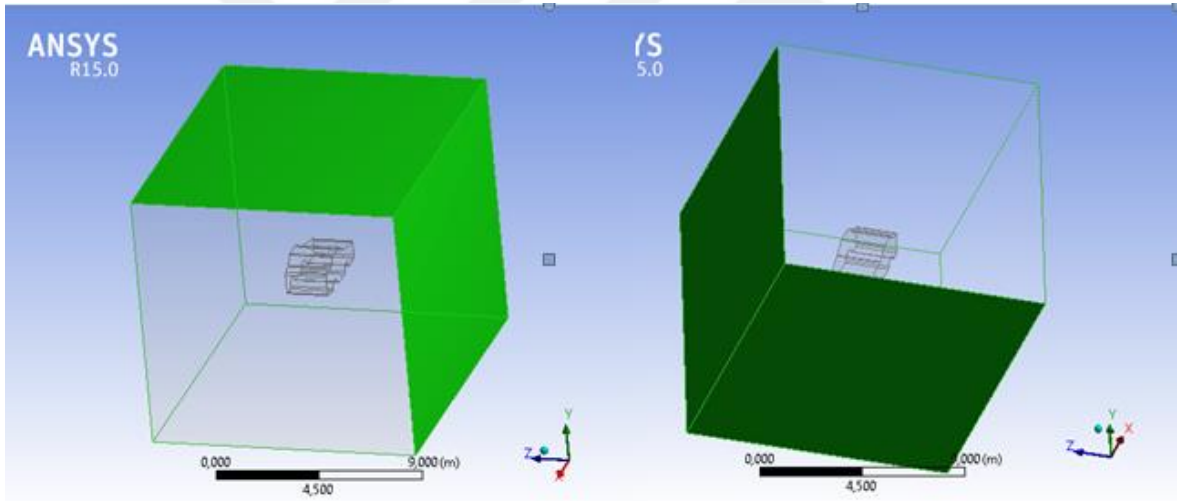


Şekil 4.7. Rüzgar tüneli ve kapalı model otomobilin görüntüsü

Şekil 4.8’ de rüzgar tünelinin inlet ve outlet yüzeyleri, Şekil 4.9’ da ise wall yüzeyleri gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Rüzgar tüneli inlet ve outlet yüzeyi

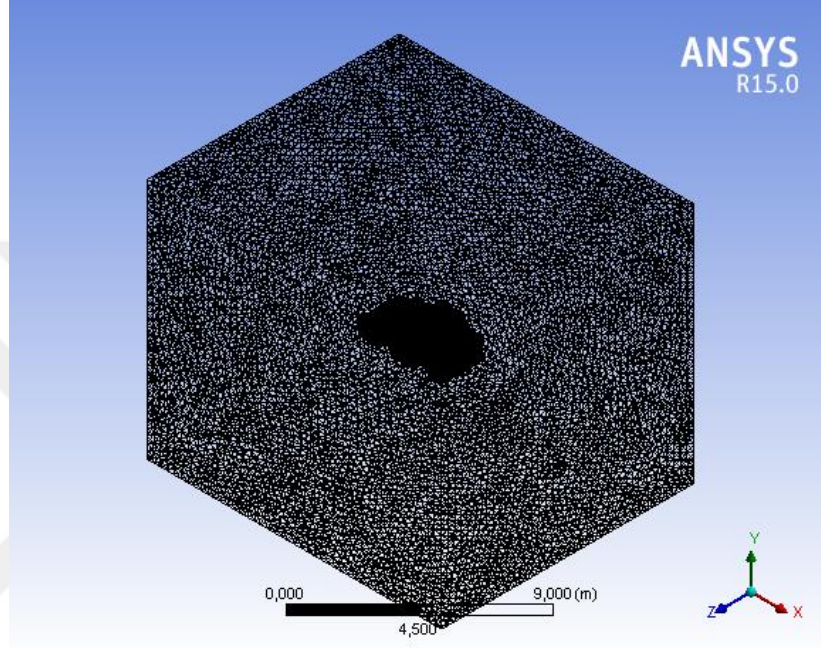


Şekil 4.9. Rüzgar tüneli wall yüzeyleri

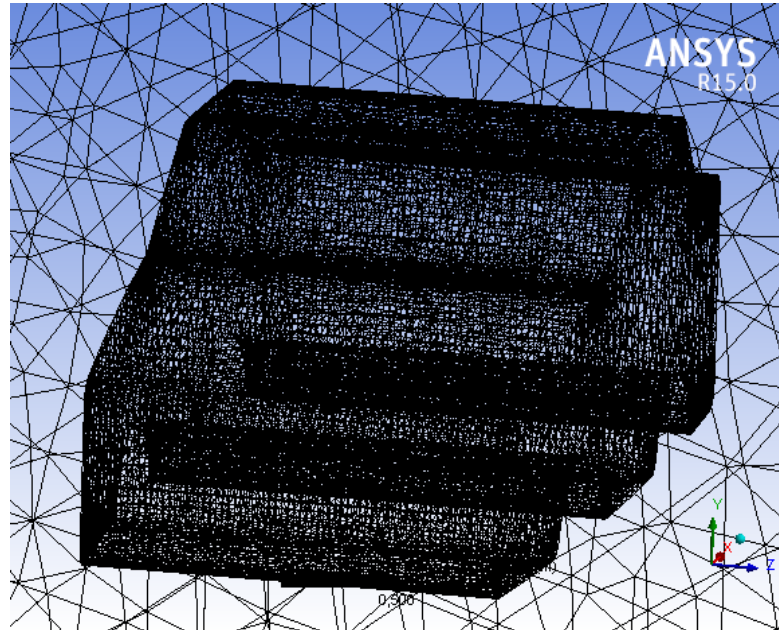
4.1.2. Ağ Yapısı

Akış hacmini temsil eden geometri tamamlandıktan sonra ağ (mesh) yapısının oluşturulması için geometri Ansys mesh bölümüne aktarılmıştır. Yapılacak analizlerin iyi bir sonuç verebilmesi için mesh işlemi önem taşımaktadır. Kaba ağ yapısının çözüm için kullanılması halinde verimli sonuçlar alınamamaktadır. Bunun yanında mesh işleminde eleman boyutları küçüldükçe analiz çözüm süresi artmaktadır. Bu nedenle yapılan çalışmada Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’ de gösterildiği gibi, sürüklenme direnç katsayısının etkisinin

inceleneceği taşıt bölgesi için daha küçük eleman boyutları, diğerk bölgelerde ise daha büyük eleman boyutları kullanılmıştır. Böylece analiz sonuçlarında daha doğru bir yaklaşım yapılmış olup programın çözüm süresi azaltılmıştır. Tam lekli otomobilin yüzeyi gen “Triangular” elemanlara ayrılmıştır. Çalışmada 197108 nodes ve 741792 element yapısı kullanılmıştır.



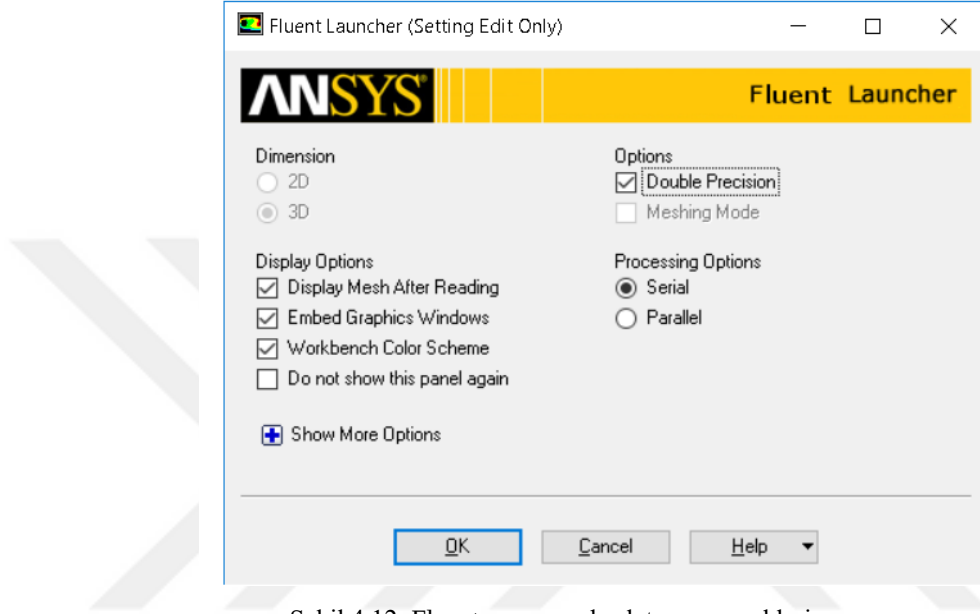
şekil 4.10. Rüzgar tüneli ve kapalı model otomobilin genel ağ görünümü



şekil 4.11. Kapalı model otomobilin izometrik ağ görünümü

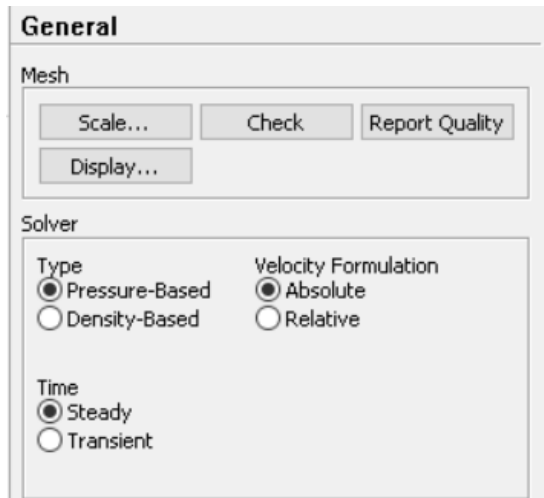
4.1.3. Çözüm

Bu çalışmada modellerin çözüm analizi Ansys Fluent 15.0 ile yapılmıştır. Programın ilk açılışında Şekil 4.12’ deki paneldeki parametreler seçilmiştir. Çalışmada çözüm 3 boyutlu olarak ele alınmış ve çözümün doğruluğunu arttırmak amacıyla çift hassasiyet (Double Precision) aktif hale getirilmiştir.



Şekil 4.12. Fluent programı başlatma seçenekleri

Programa girdikten sonra ilk önce problemin özellikleri belirlenmiştir. Bu çalışmada Şekil 4.13’ te gösterildiği gibi basınca dayalı, zamanla değişmeyen sabit hız parametreleri seçilmiştir.

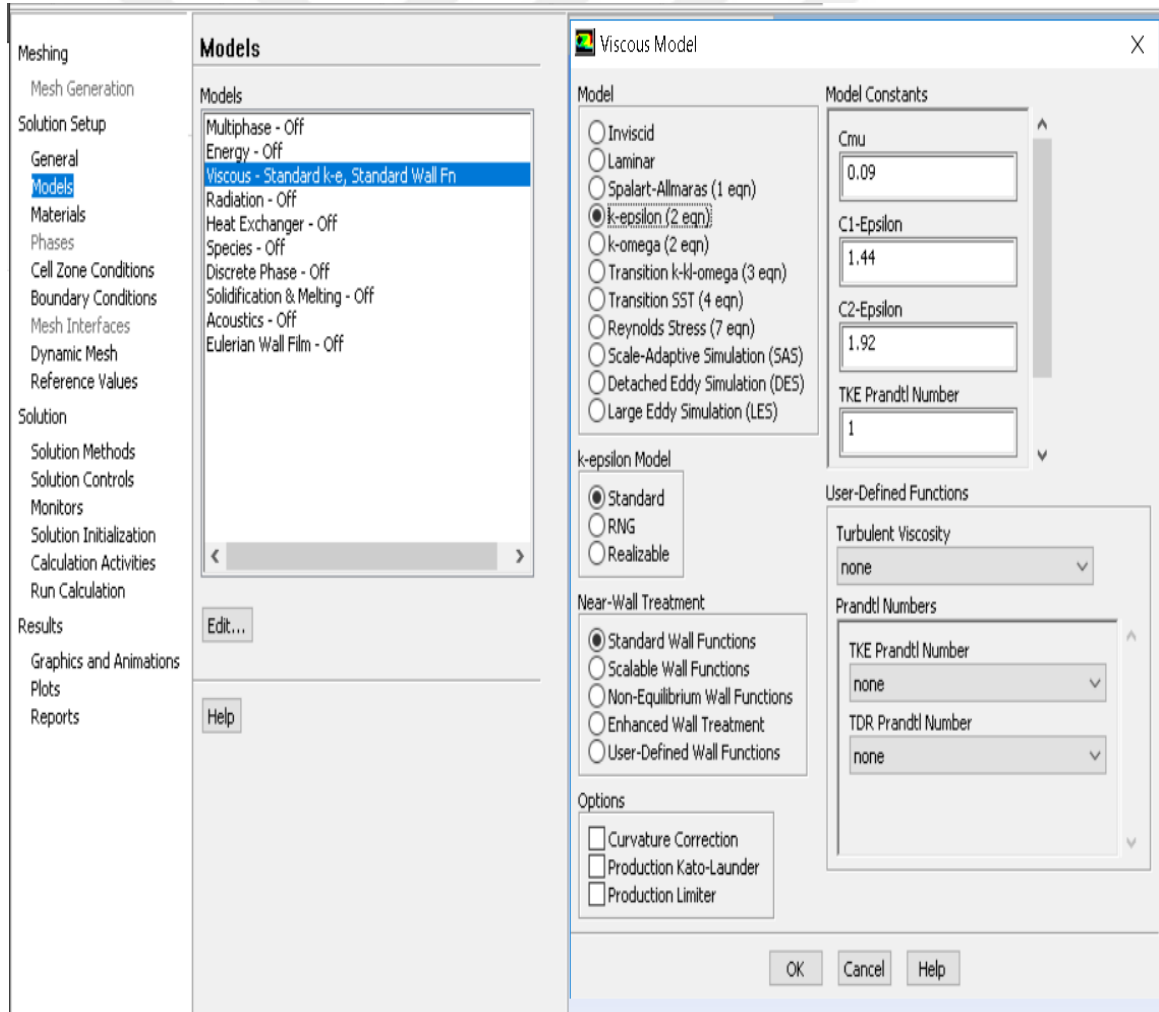


Şekil 4.13. Problemin genel özellikleri

Daha sonra Reynolds sayısına göre akış türü belirlenmiştir. Reynolds sayısı 5×10^5 ' den küçükse laminar akış modeli, büyükse türbülans akış modelleri seçilmektedir. Buna göre Reynolds sayısı ;

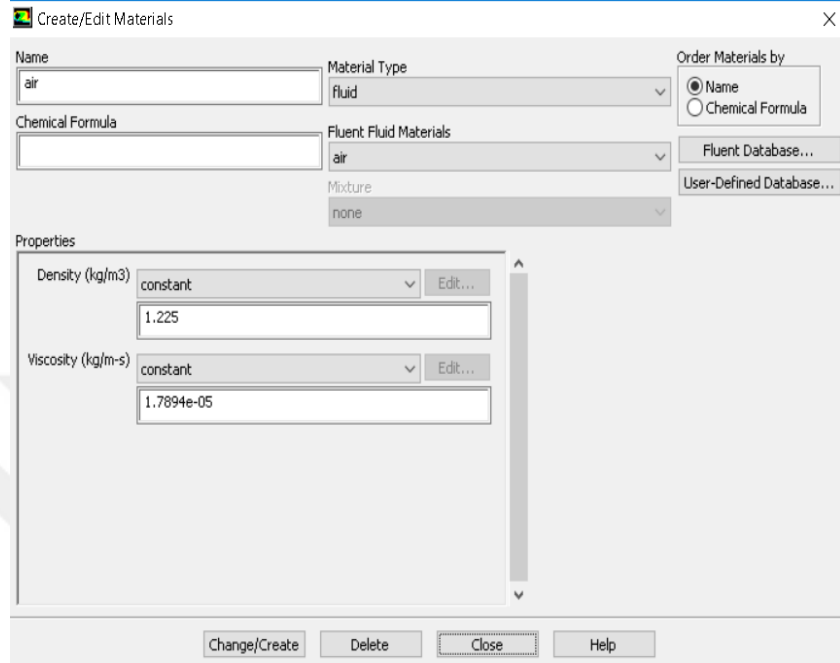
$$Re = \frac{V_{hava} \times L_{taşıt}}{\nu} = \frac{\rho \times V_{hava} \times L_{taşıt}}{\mu} \quad (4.1)$$

olarak yazılır. Burada hava hızı $V_{hava} = 27$ m/s , taşıt boyu $L_{taşıt} = 4$ m ve ν (kinematik vizkozite) olup, dinamik vizkozite $\mu_{hava} = 1.789 \cdot 10^{-5}$ kg/m.s alınarak Reynold sayısı 7395193 bulunmuştur. Buna göre Reynolds sayısı 5×10^5 ' den büyük olduğu için türbülanslı akış modeli seçilmiştir. Isı transferi ihmal edilmiştir. Çözüm için çalışmada Standart k-epsilon modeli seçilmiştir ve Şekil 4.14' te gösterilmiştir.



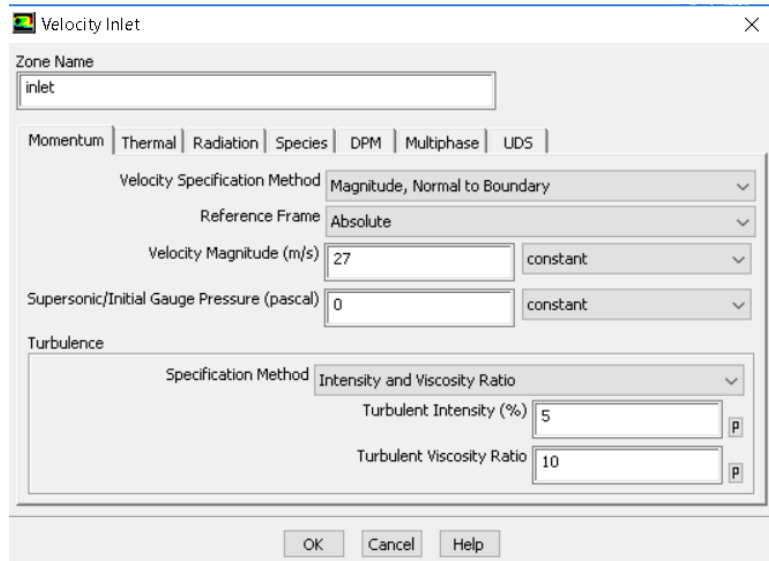
Şekil 4.14. Akış türünün belirlenmesi

Akış türü belirlendikten sonra akışkan özelliğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada akışkan olarak hava kullanılmış olup havanın yoğunluğu 1.225 kg/m^3 ve viskozitesi $1.789 \cdot 10^{-5}$ 'dir. Şekil 4.15' havanın özellikleri gösterilmiştir.



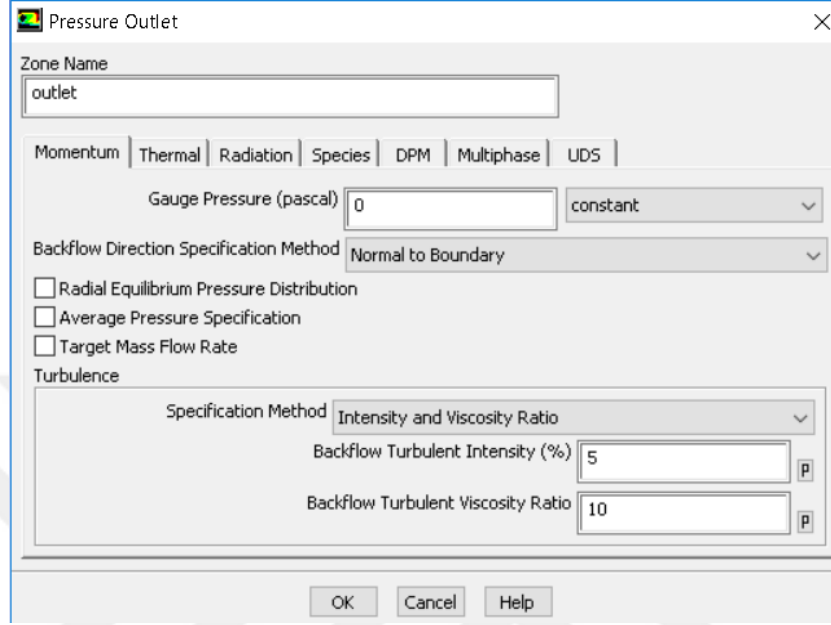
Şekil 4.15. Havanın özellikleri

Bir sonraki adımda çözüm için sınır şartları belirlenmiştir. Rüzgar tüneli hız girişi (inlet) “velocity-inlet” olarak belirlenmiş olup giriş hızı Şekil 2.16’da gösterildiği gibi 27 m/s olarak alınmıştır.

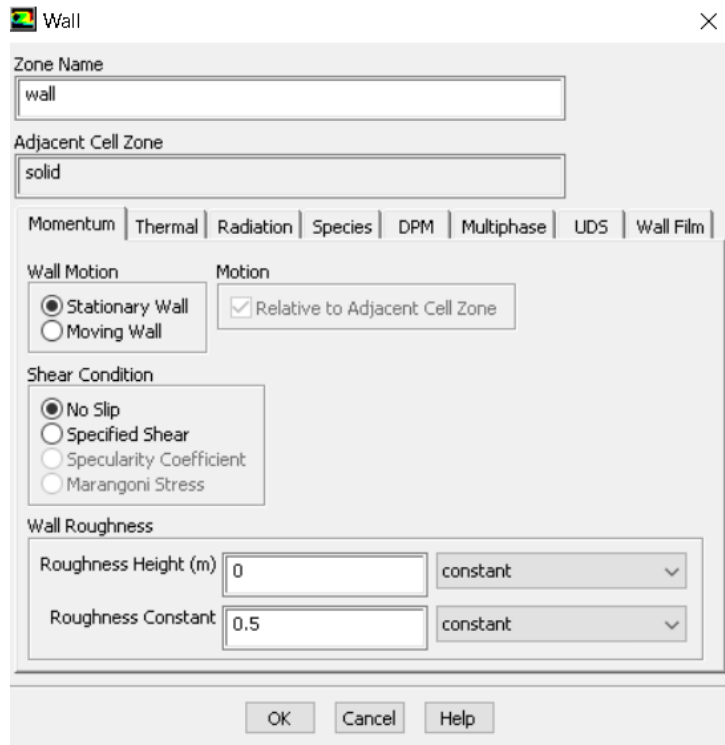


Şekil 4.16. Giriş (inlet) sınır şartının özellikleri

Rüzgar tüneli çıkışı (outlet) tip olarak “pressure-outlet” olarak belirlenmiştir ve Şekil 4.17’ de gösterilmiştir. Rüzgar tünelinin duvarları tip olarak programda kaymaz zemin “wall” olarak seçilmiştir ve seçilen parametreler Şekil 4.18’ de gösterilmiştir.

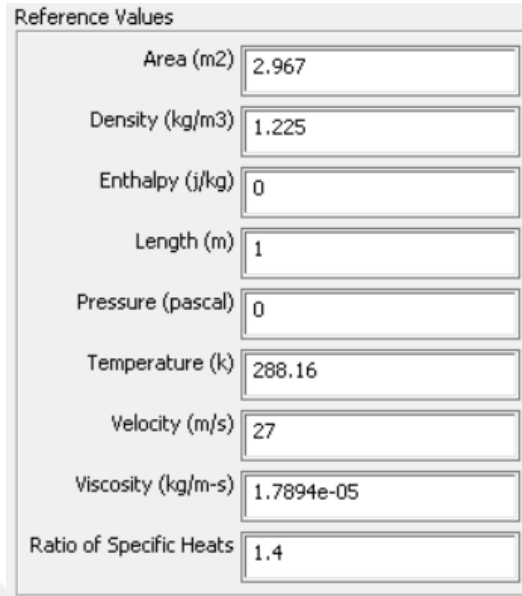


Şekil 4.17. Çıkış (outlet) sınır şartının özellikleri



Şekil 4.18. Duvar (wall) sınır şartının özellikleri

Şekil 4.19’ da gösterildiği gibi bir sonraki adımda referans değerler belirlenmiştir.

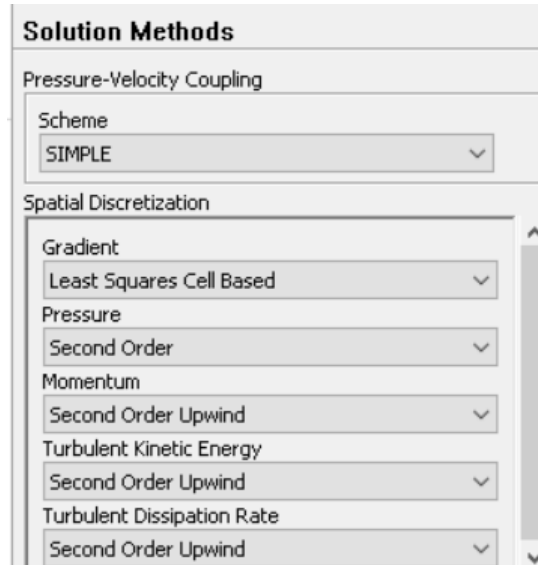


Reference Values

Area (m ²)	2.967
Density (kg/m ³)	1.225
Enthalpy (J/kg)	0
Length (m)	1
Pressure (pascal)	0
Temperature (K)	288.16
Velocity (m/s)	27
Viscosity (kg/m-s)	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4

Şekil 4.19. Referans değerlerin özellikleri

Referans değerler belirlendikten sonra çözüm yöntemi belirlenir. Bu çalışmada bütün analizlerde ikinci dereceden ayrıklaştırma düzeni kullanılmıştır. Çözüm yöntemi özellikleri Şekil 4.20’ de gösterilmiştir.



Solution Methods

Pressure-Velocity Coupling

Scheme
SIMPLE

Spatial Discretization

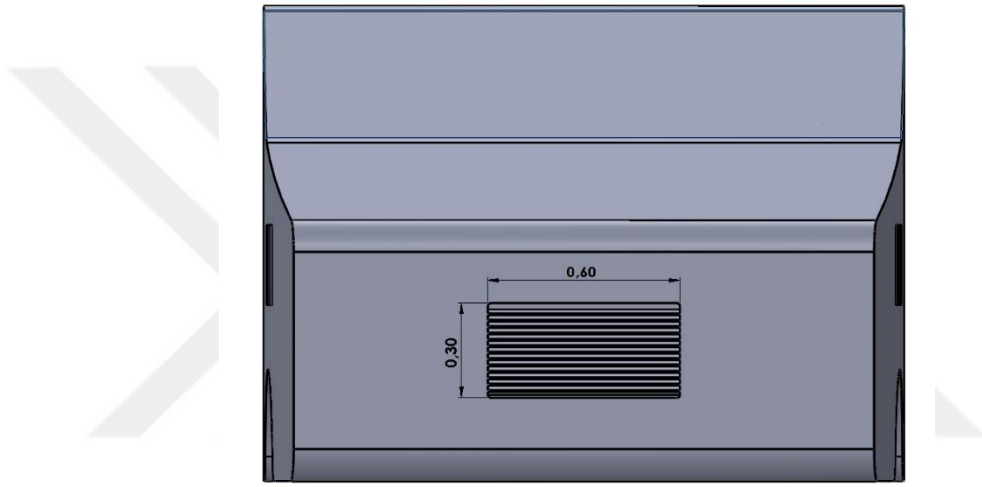
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	Second Order
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate	Second Order Upwind

Şekil 4.20. Çözüm yöntemi özellikleri

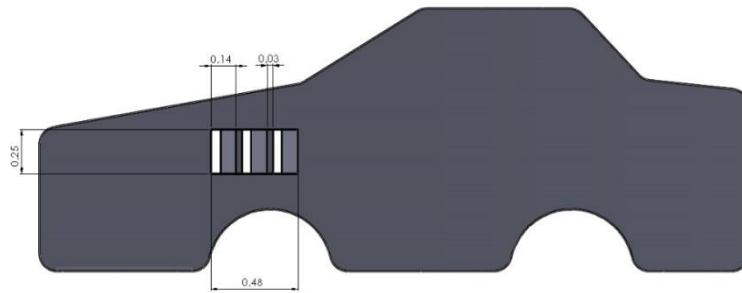
Çözüm için iterasyon sayısı belirlenmiştir ve problemi çözme işlemi başlatılmıştır. Bu çalışmada her bir model için 1000 iterasyon kullanılmıştır.

4.2. Ana Model Taşıt Modelleme

Akış analizinin yapılacağı ana taşıt modeli Solidworks programı yardımıyla tasarlanmıştır. Ana model tasarlanırken kapalı modelin ölçüleri kullanılmış olup Şekil 4.21’ de gösterildiği gibi kapalı modelin ön yüzeyinde orta eksen üzerinde toplam 30x60 cm alanına ızgaralar yerleştirilmiştir. Kaputun içindeki havayı tahliye etmek için Şekil 4.22’ de gösterildiği gibi aracın yan yüzeylerinde 14x25 cm boyutlarında üçer tane hava tahliye kanalları oluşturulmuştur.



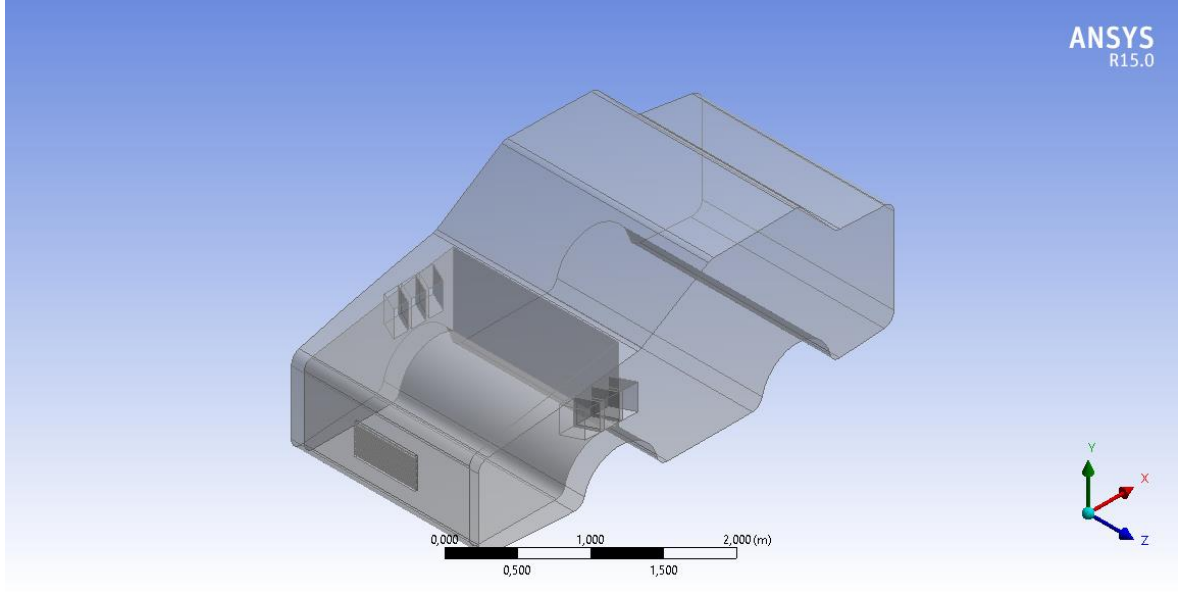
Şekil 4.21. Ana model otomobilin ön görünüşü



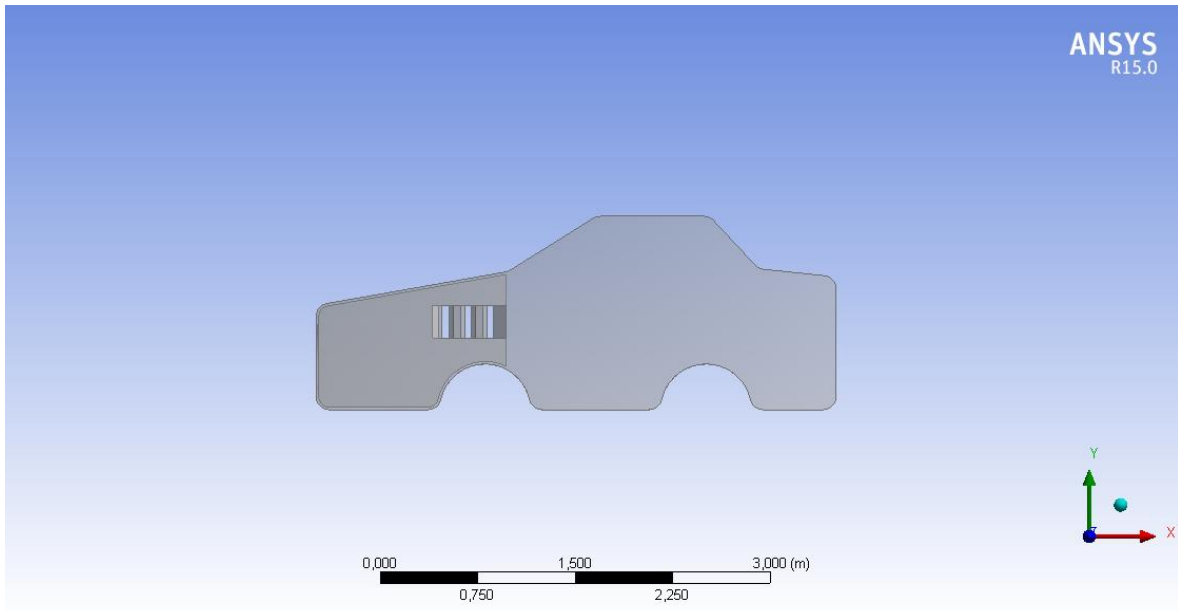
Şekil 4.22. Ana model otomobilin yandan görünüşü ve hava tahliye kanalı

4.2.1. Ana Model Taşıtın Çözüm Geometrisi

Çözüm geometrisi oluşturmak için Solidworks 2016 programıyla modellenen ana taşıt geometrisi Ansys 15.0 programının Fluent yazılımının geometri modülüne çağırılır. Fluent programında taşıt görüntüleri Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’ te verilmiştir.



Şekil 4.23. Fluent programında ana modelin izometrik görünüşü

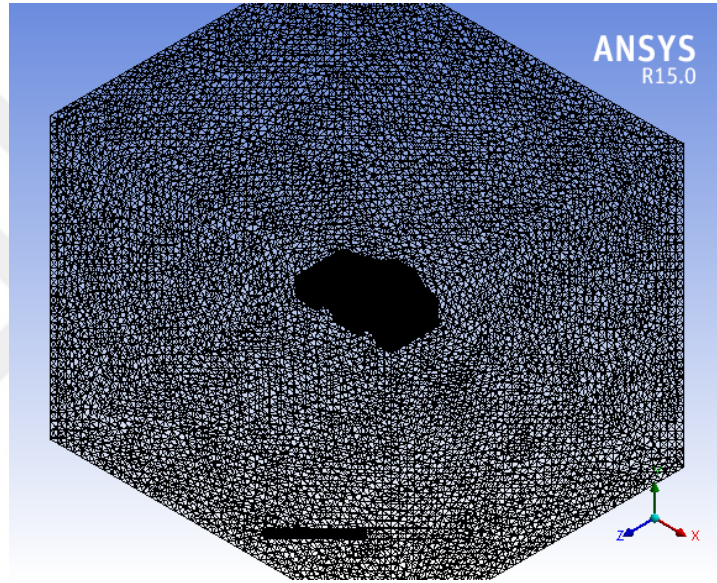


Şekil 4.24 Fluent programında ana modelin yandan görünüşü

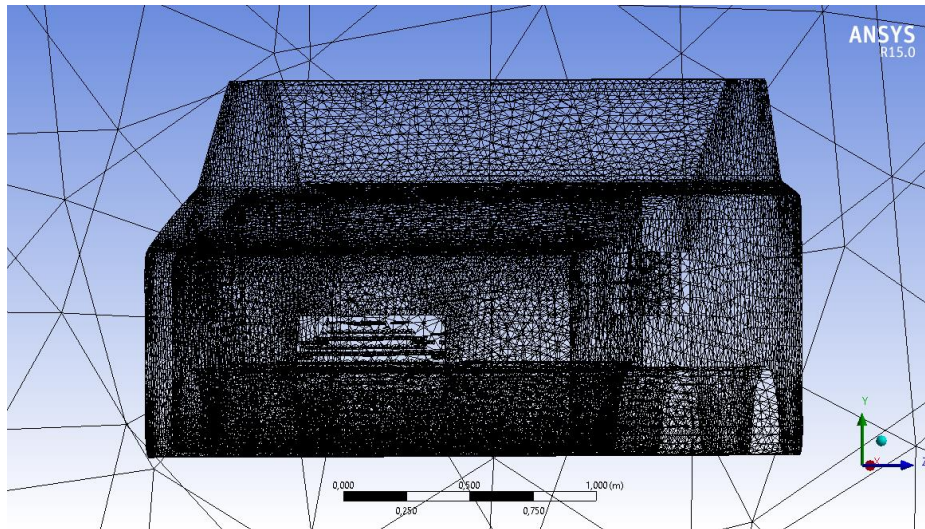
Analiz edilecek ortamı oluşturmak için rüzgar tünelinin boyutları kapalı modelin analizi için modellenen rüzgar tüneli ile aynı boyutlarda modellenmiştir. Yüzey isimlendirmeleri de kapalı modelle aynı olacak şekilde yapılmıştır.

4.2.2. Ana Model Taşıtın Ağ Yapısı

Analiz işlemlerine geçmeden önce ana model için ağ yapısı oluşturulmuştur ve Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’ da gösterilmiştir. Çalışmada 392105 nodes ve 1298412 element yapısı kullanılmıştır.



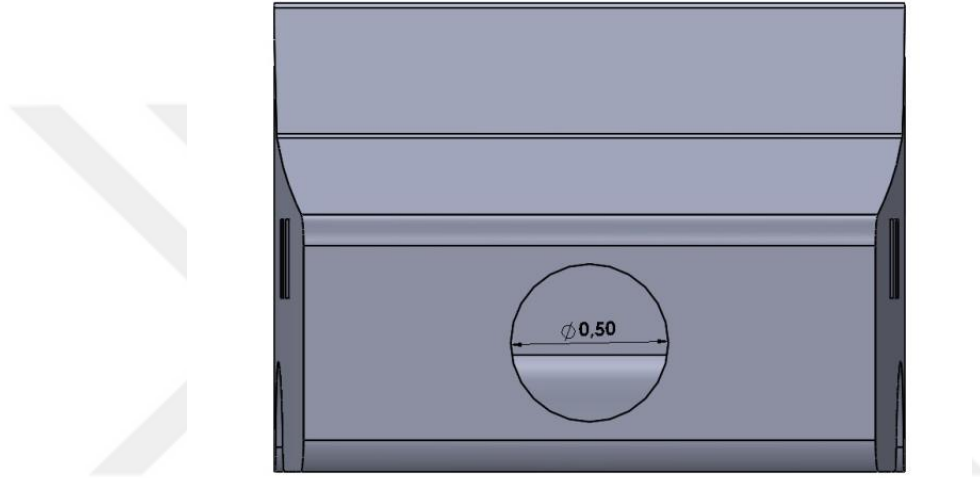
Şekil 4.25. Rüzgar tüneli ve ana taşıt modelinin genel ağ görünümü



Şekil 4.26. Ana taşıt modelinin önden ağ görünümü

4.3. Delikli Model Taşıt Modelleme

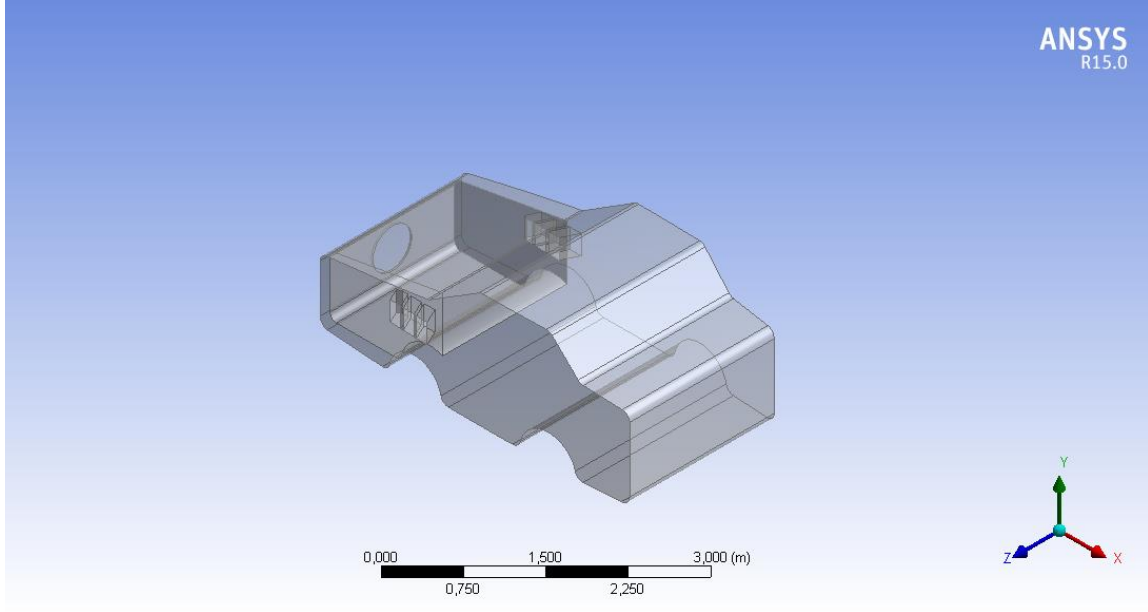
Akış analizinin yapılacağı delikli taşıt modeli Solidworks programı yardımıyla tasarlanmıştır. Delikli model tasarlanırken ana modelin ölçüleri kullanılmış olup Şekil 4.27’ de gösterildiği gibi ana modelin ön yüzeyinde orta eksen üzerinde 50 cm çapında hava deliği açılmıştır. Kaputun içindeki havayı tahliye etmek için aracın yan yüzeylerinde 14x25 cm boyutlarında üçer tane hava tahliye kanalları oluşturulmuştur.



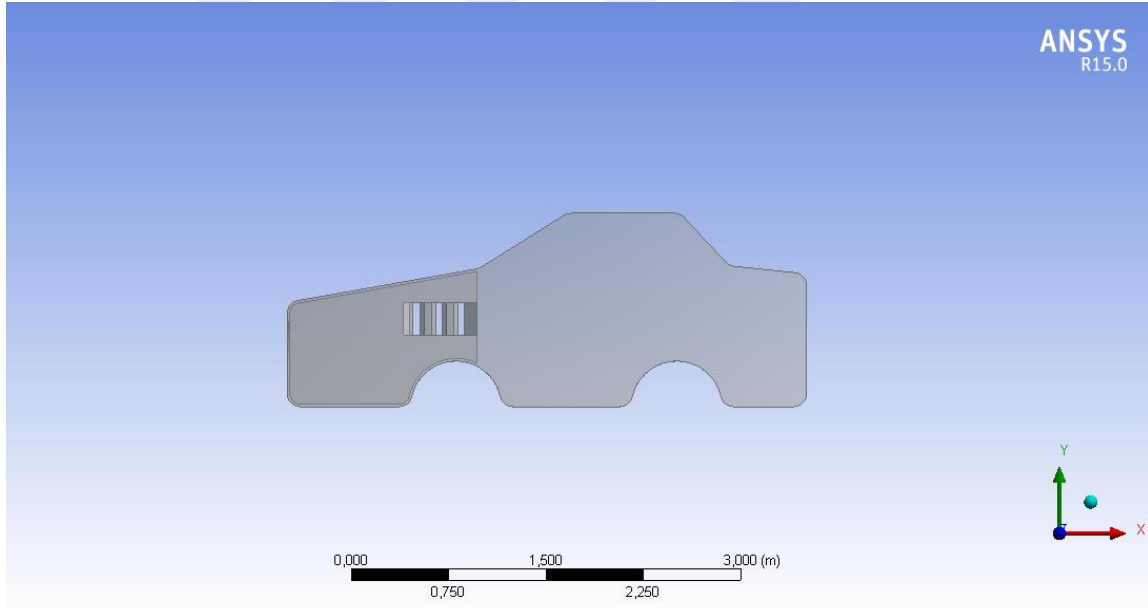
Şekil 4.27. Delikli model otomobilin ön görünüşü

4.3.1. Delikli Model Taşıtın Çözüm Geometrisi

Çözüm geometrisi oluşturmak için Solidworks 2016 programıyla modellenen delikli taşıt geometrisi Ansys 15.0 programının Fluent yazılımının geometri modülüne çağırılır. Fluent programına çağrılan delikli taşıt modelinin izometrik görünümü Şekil 4.28 ve yandan görünümü Şekil 4.29’ da verilmiştir.



Şekil 4.28. Fluent programında delikli modelin izometrik görünüşü

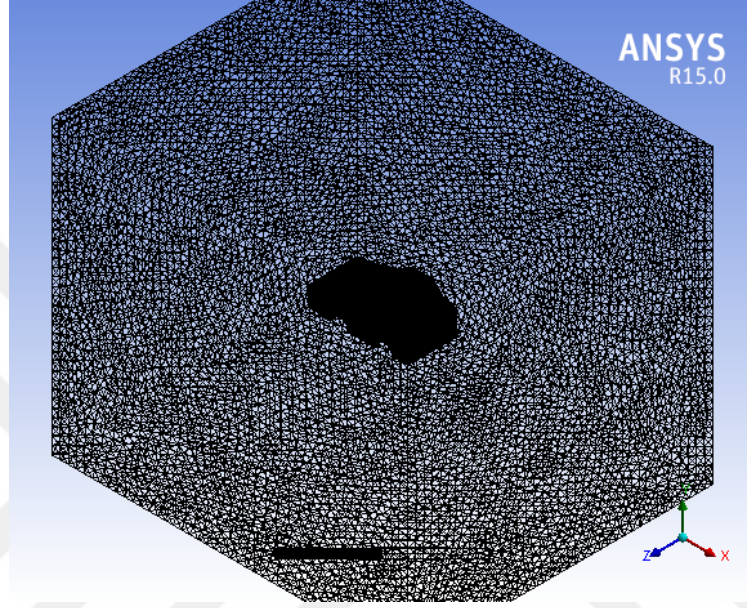


Şekil 4.29 Fluent programında delikli modelin yandan görünüşü

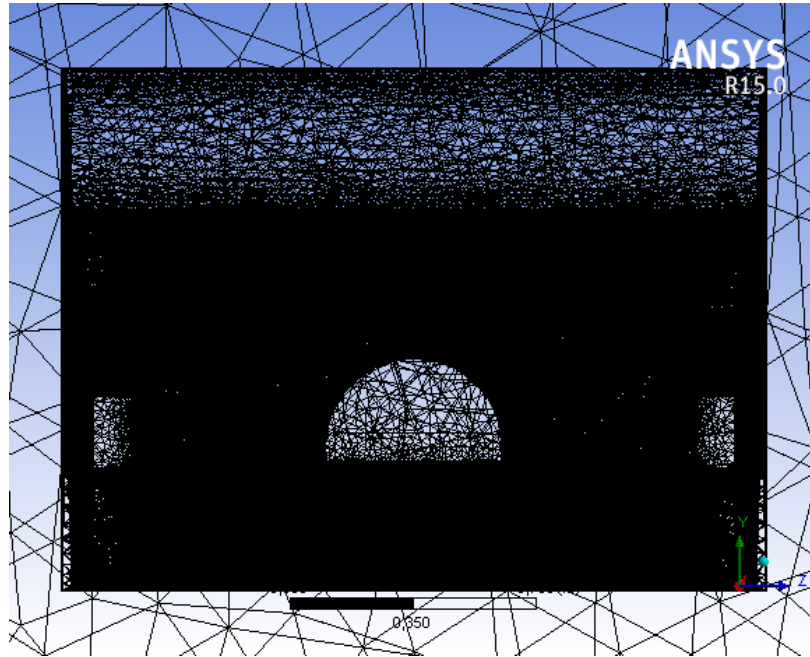
Analiz edilecek ortamı oluşturmak için rüzgar tünelinin boyutları ana modelin analizi için modellenen rüzgar tüneli ile aynı boyutlarda modellenmiştir. Yüzey isimlendirmeleri de ana modelle aynı olacak şekilde yapılmıştır.

2.2.2 Delikli Model Ağ Yapısı

Analiz işlemlerine geçmeden önce delikli model için ağ yapısı oluşturulmuştur. Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’ de ağ yapıları gösterilmiştir. Çalışmada 372216 nodes ve 1246818 element yapısı kullanılmıştır.



Şekil 4.30. Rüzgar tüneli ve delikli taşıt modelinin genel ağ görünümü



Şekil 4.31. Delikli taşıt modelinin önden ağ görünümü

4.4. Rüzgar Türbinli Model Taşıt Modelleme

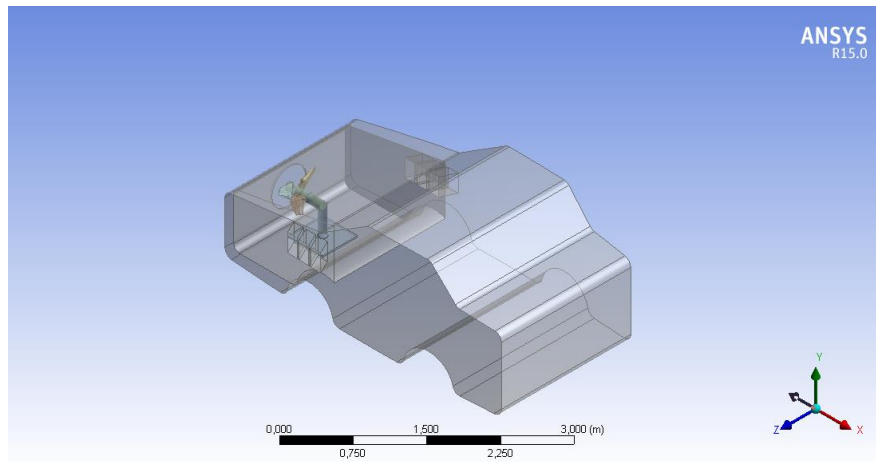
Akış analizinin yapılacağı rüzgar türbinli taşıt modeli Solidworks programı yardımıyla tasarlanmıştır. Rüzgar türbinli model tasarlanırken ana modelin ölçüleri kullanılmış olup Şekil 4.32’ de gösterildiği gibi ana modelde açılan deliğe 3 kanatlı rüzgar türbini yerleştirilmiştir.



Şekil 4.32. Rüzgar türbinli model otomobilin ön görünüşü

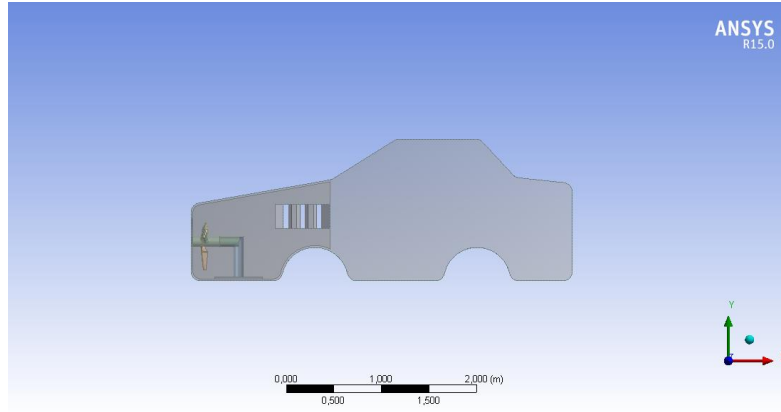
4.3.2. Rüzgar Türbinli Taşıtın Çözüm Geometrisi

Solidworks 2016 programıyla modellenen rüzgar türbinli taşıt geometrisi Ansys 15.0 programının Fluent yazılımının geometri modülüne çağırılır. Şekil 4.33’ te modellenen taşıtın Fluent programındaki izometrik görünümü verilmiştir.



Şekil 4.33. Fluent programında rüzgar türbinli modelin izometrik görünüşü

Şekil 4.34’ te modellenen taşıtın Fluent programındaki izometrik görünümü verilmiştir.

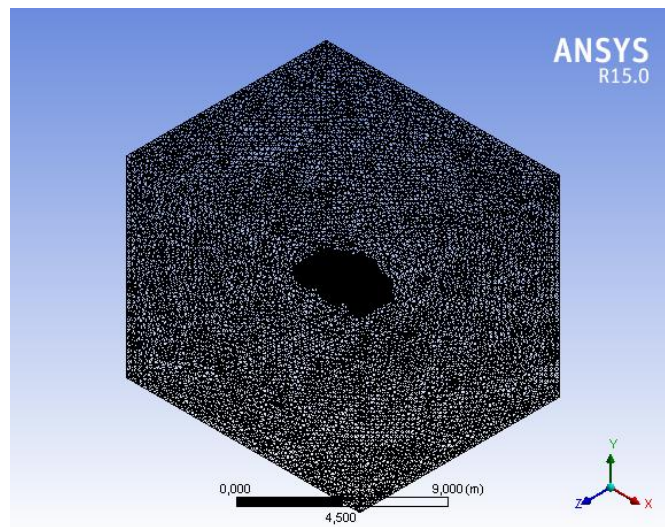


Şekil 4.34. Fluent programında rüzgar türbinli modelin yandan görünüşü

Diğer modellere benzer şekilde analiz edilecek ortamı oluşturmak için rüzgar tünelinin boyutları ana modelin analizi için modellenen rüzgar tüneli ile aynı boyutlarda modellenmiştir. Yüzey isimlendirmeleri de ana modelle aynı olacak şekilde yapılmıştır.

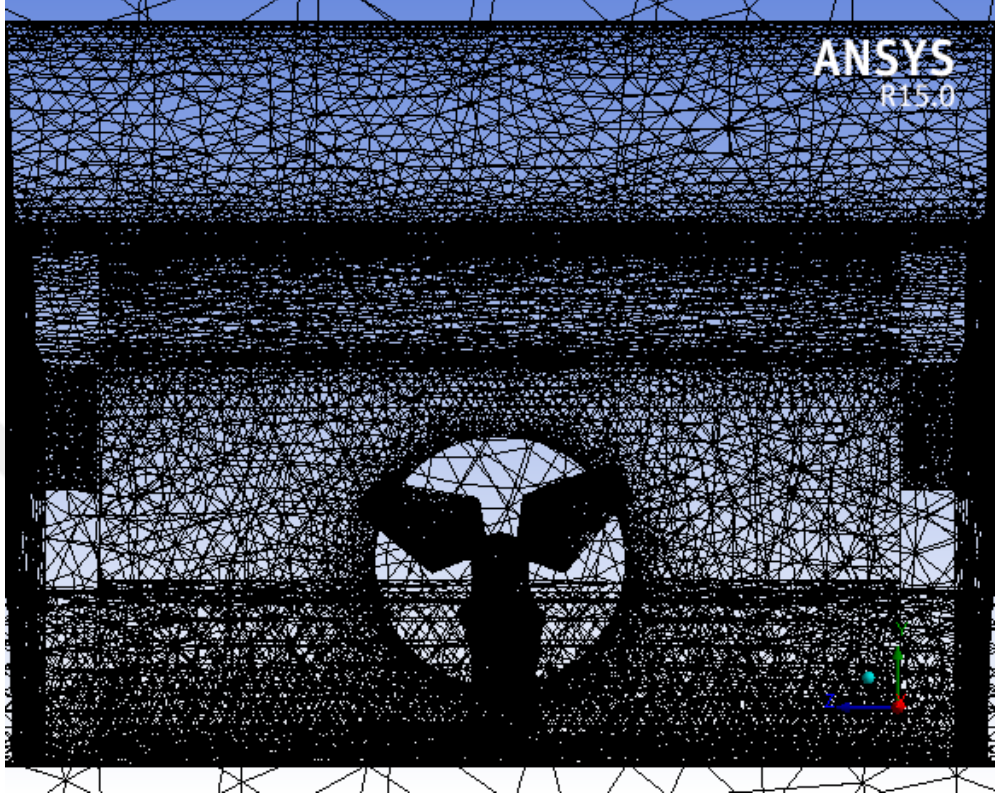
2.3.2 Ağ Yapısı

Analiz işlemlerinden önce rüzgar türbinli model için ağ yapısı oluşturulmuştur ve Şekil 4.35’ te rüzgar türbini ve taşıtın ağ yapısı gösterilmiştir. Çalışmada 462328 nodes ve 1672528 element yapısı kullanılmıştır.



Şekil 4.35. Rüzgar tüneli ve türbinli modelin genel ağ görünümü

Şekil 4.36’ da rüzgar türbinli taşıt modelinin ağ yapısı gösterilmiştir. Akış analizinin yapılacağı taşıt yüzeyi daha küçük elemanlara bölünmüştür.



Şekil 4.36. Türbinli modelin önden ağ görünümü

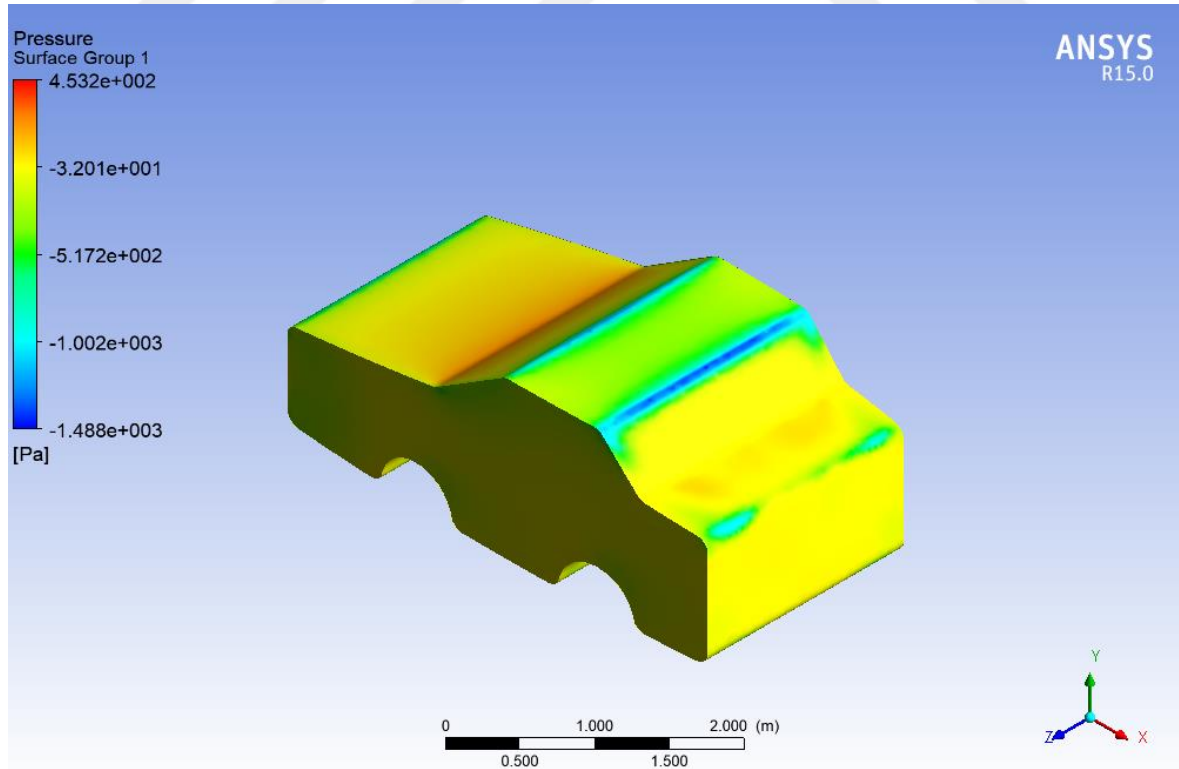
5. BULGULAR

Yapılan çalışmada taşıt ön bölümünün kapalı, ızgaralı, delikli ve türbin kanatlı durumları dikkate alınarak farklı tasarım modelleri için ayrı ayrı analizler yapılmıştır. Analizlerde, seçilen otomobil modeli ana boyutları sabit alınarak modellenmiş ve sanal ortamda 27 m/s 'lik hızda, rüzgarsız bir ortamda olduğu kabul edilerek çözüm gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

5.1. Kapalı Model Taşıtın Ön Yüzey Formları

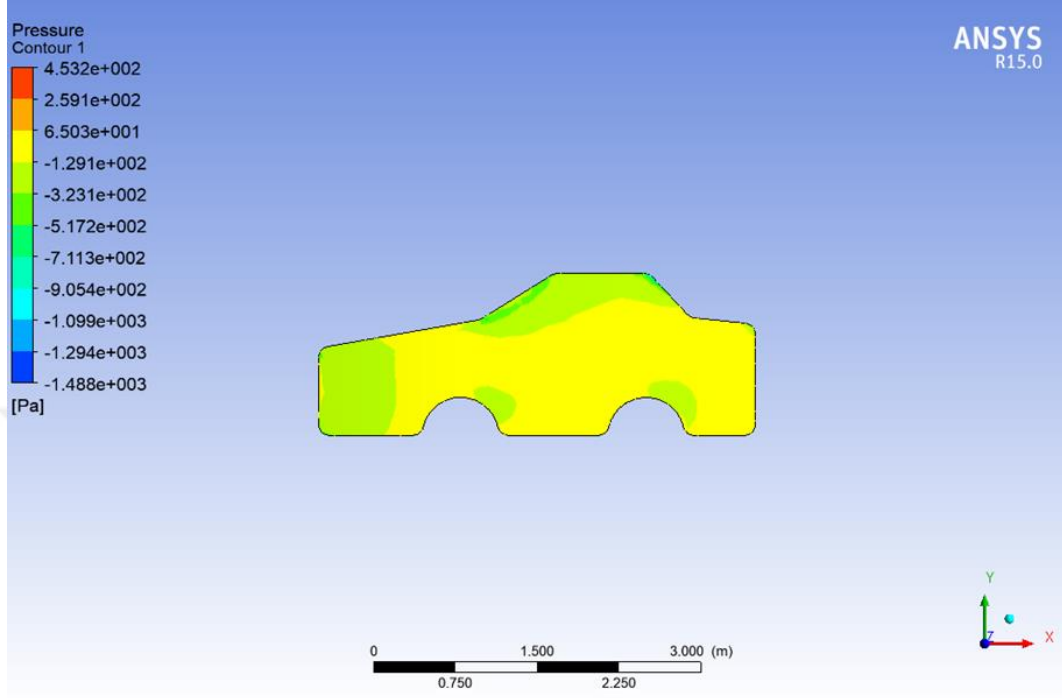
Ana otomobilin ön bölümü kapalı olarak alınmış ve Fluent programı ile taşıt üzerine etkiyen hız konturları, statik basınç konturları ve aerodinamik direnç katsayıları tespit edilmiş ve elde edilen değerler aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

Şekil 5.1' de kapalı taşıt modelinin statik basınç dağılımının izometrik görünümü verilmiştir.

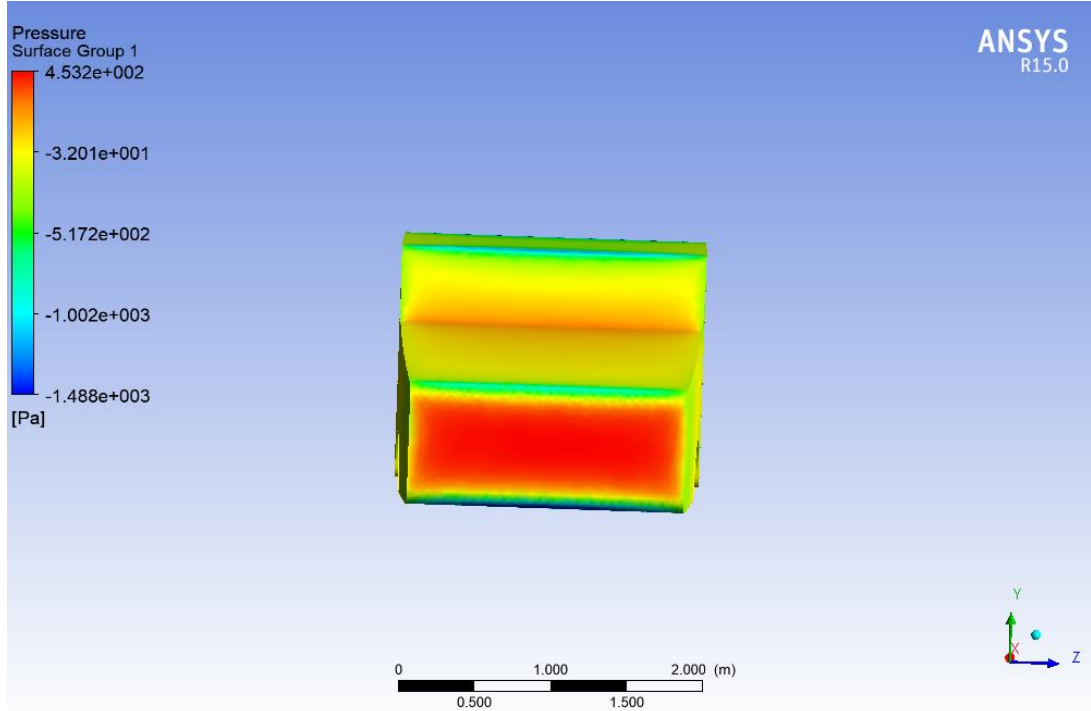


Şekil 5.1. Kapalı modelin statik basınç konturunun izometrik görünüşü

Kapalı model taşıtın yandan ve önden statik basınç konturları sırasıyla Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’ te gösterilmiştir.

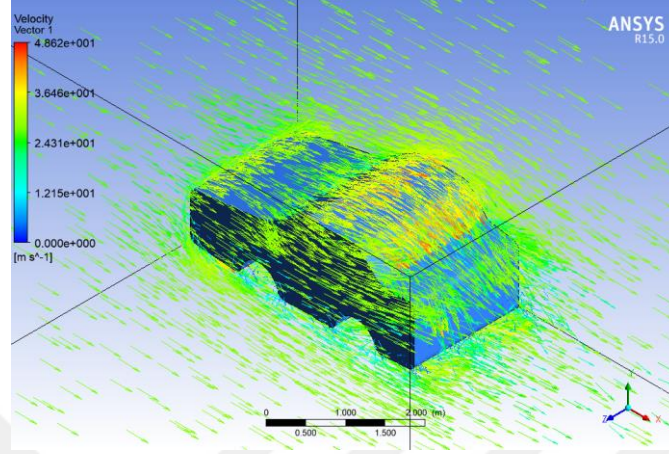


Şekil 5.2. Kapalı modelin statik basınç konturunun yandan görünüşü

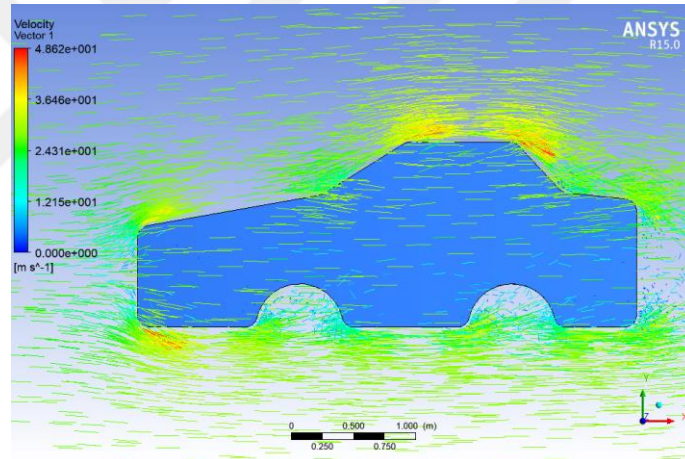


Şekil 5.3 Kapalı modelin statik basınç konturunun önden görünüşü

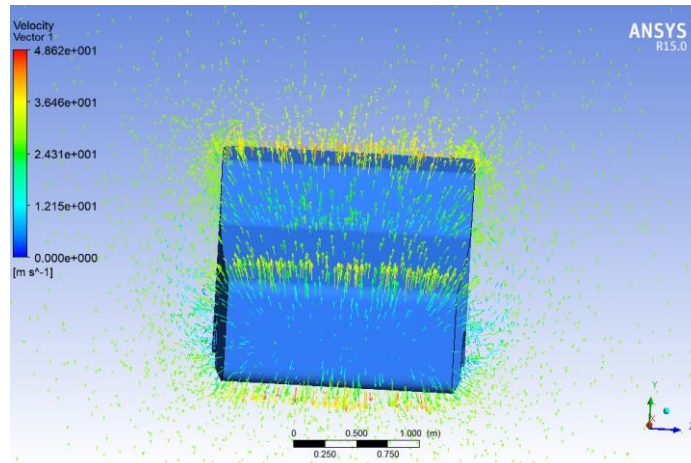
Kapalı modelin hız vektörlerinin izometrik, yandan ve önden görüşleri sırasıyla Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’ da verilmiştir.



Şekil 5.4. Kapalı modelin hız vektörlerinin izometrik görüşü

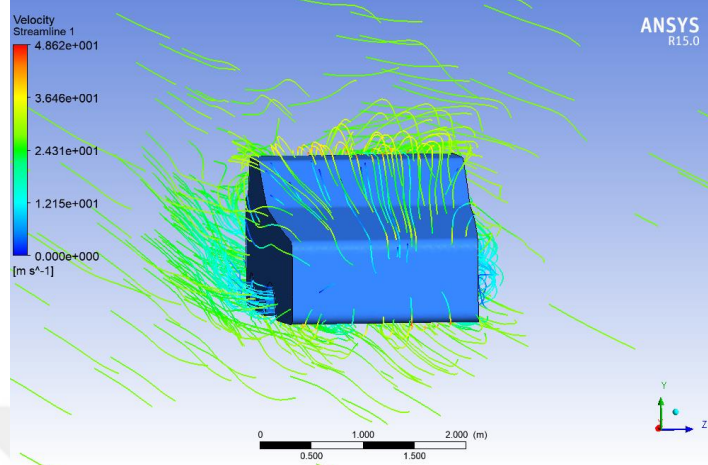


Şekil 5.5. Kapalı modelin hız vektörlerinin yandan görüşü

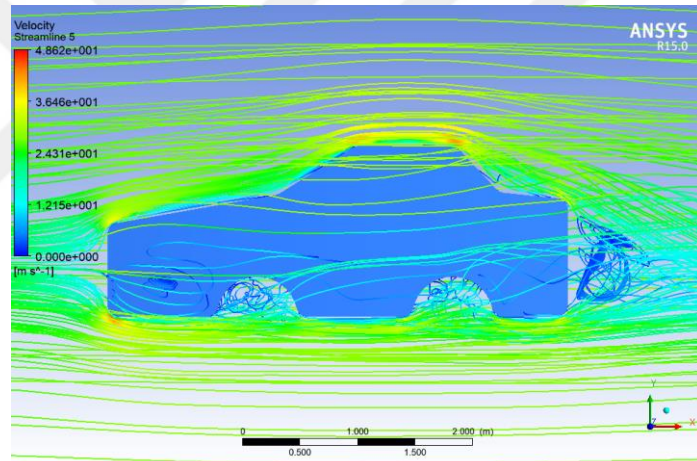


Şekil 5.6 Kapalı modelin hız vektörlerinin önden görüşü

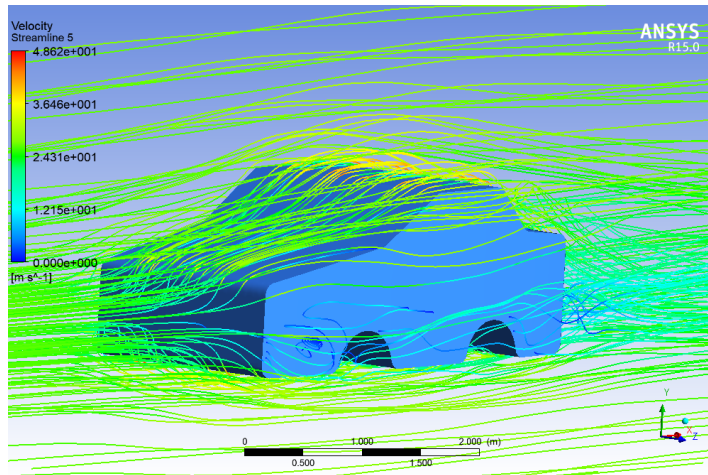
Kapalı model taşıtın hız akım çizgileri (velocity streamline) görünüşleri Şekil 5.7-Şekil 5.9’ da verilmiştir.



Şekil 5.7. Kapalı modelin akım çizgilerinin önden görünüşü

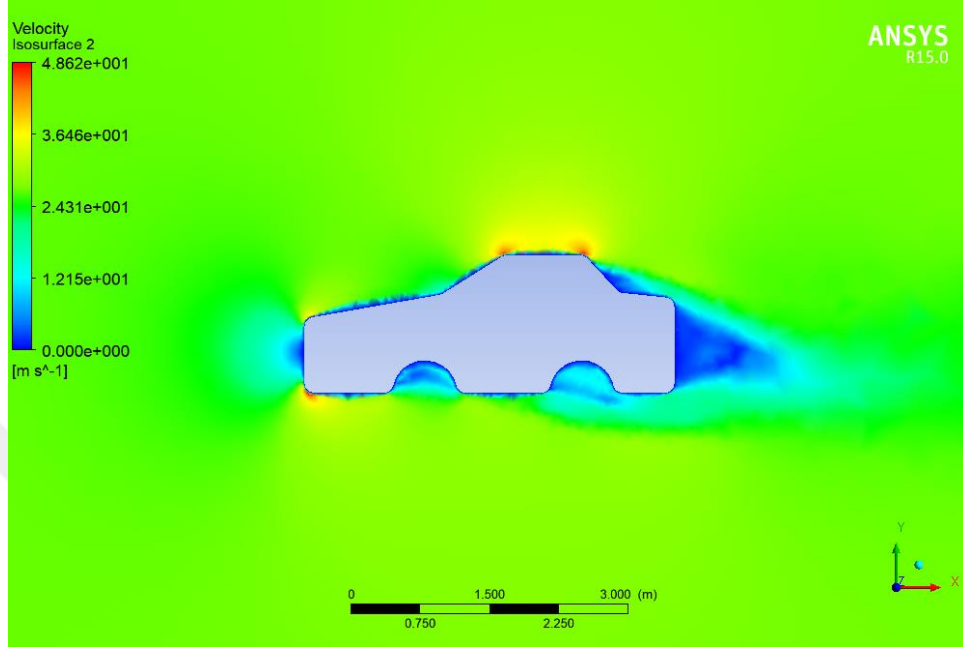


Şekil 5.8. Kapalı modelin akım çizgilerinin yandan görünüşü

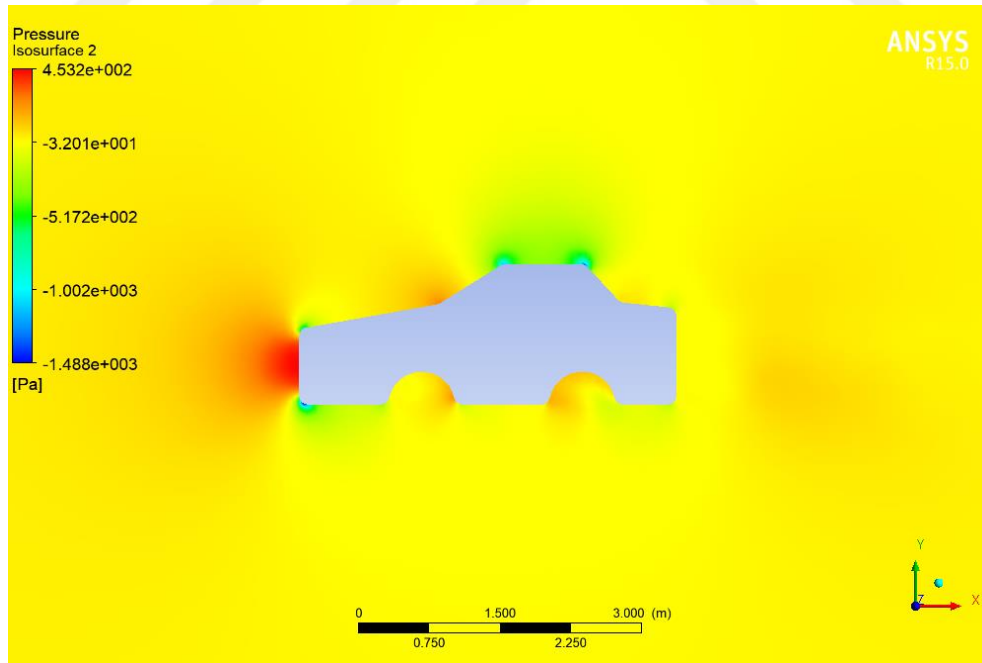


Şekil 5.9. Kapalı modelin akım çizgilerinin izometrik görünüşü

Kapalı taşıt modelinin tam orta noktasından z ekseni boyunca alınan kesitten hız konturu Şekil 5.10’ da ve basınç konturu Şekil 5.11’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Kapalı modelin z ekseni boyunca alınan kesitten hız konturunun yandan görünüşü

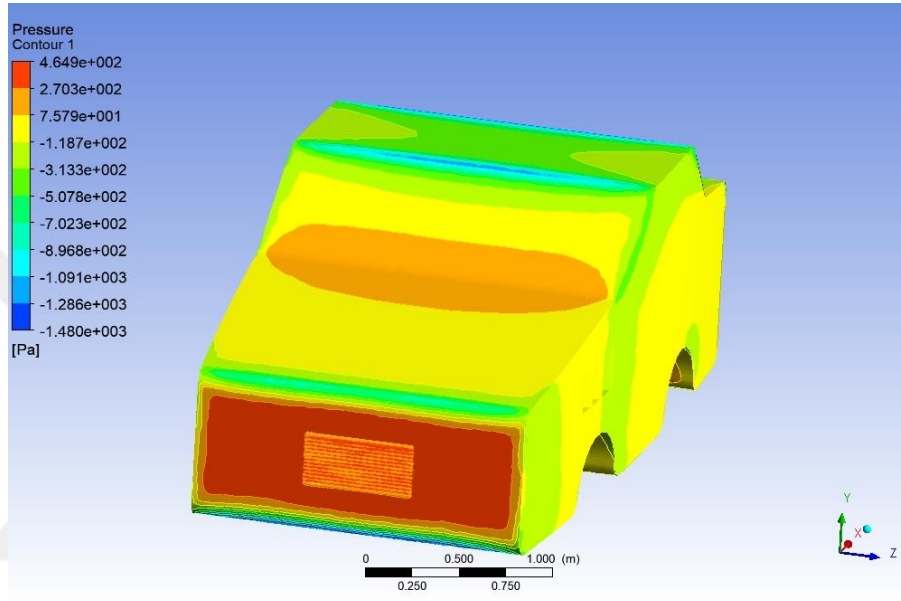


Şekil 5.11. Kapalı modelin z ekseni boyunca alınan kesitten basınç konturunun yandan görünüşü

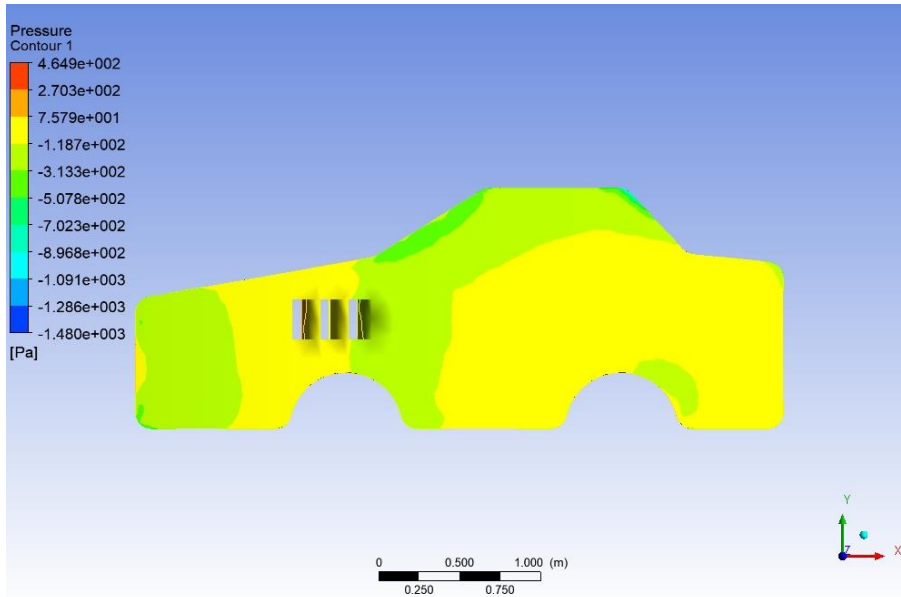
Çözüm işlemi sonucunda kapalı modelin aerodinamik sürükleme direnç katsayısı (C_d) 0,5489 bulunmuştur. Aerodinamik kaldırma katsayısı (C_l) 0,2909 bulunmuştur.

5.2. Ana Model Taşıtın Ön Yüzey Formları

Çözüm adımındaki bütün değer ve özellikler kapalı modelin çözümünde kullanılan değer ve özelliklerle aynı alınmıştır. Çözüm işlemi tamamlandıktan sonra “CFD-Post Results” bölümünden sonuçlar alınmıştır. Ana modelin izometrik, yandan statik basınç konturları Şekil 5.12 ve Şekil 5.13’ te gösterilmiştir.

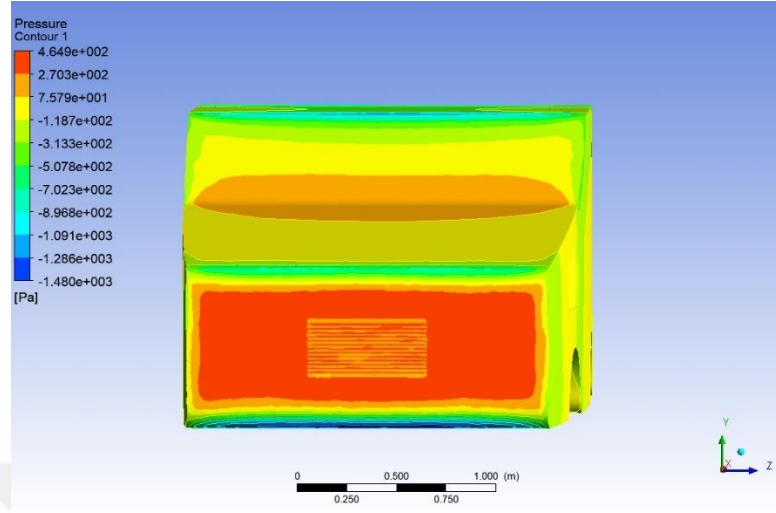


Şekil 5.12 Ana modelin statik basınç konturunun izometrik görünüşü

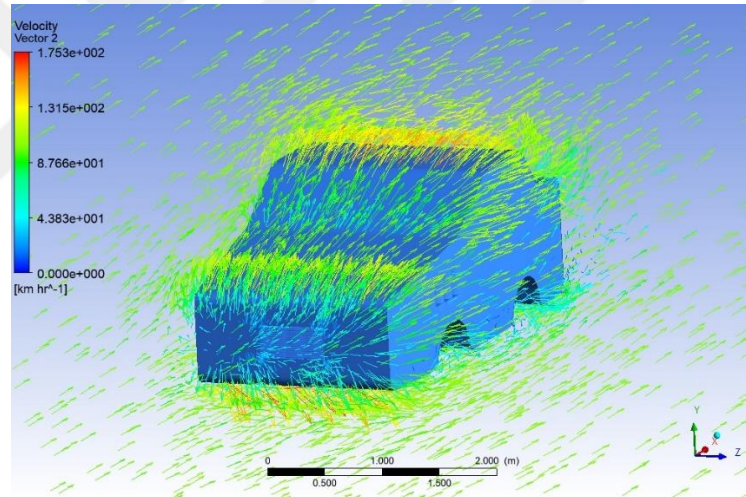


Şekil 5.13 Ana modelin statik basınç konturunun yandan görünüşü

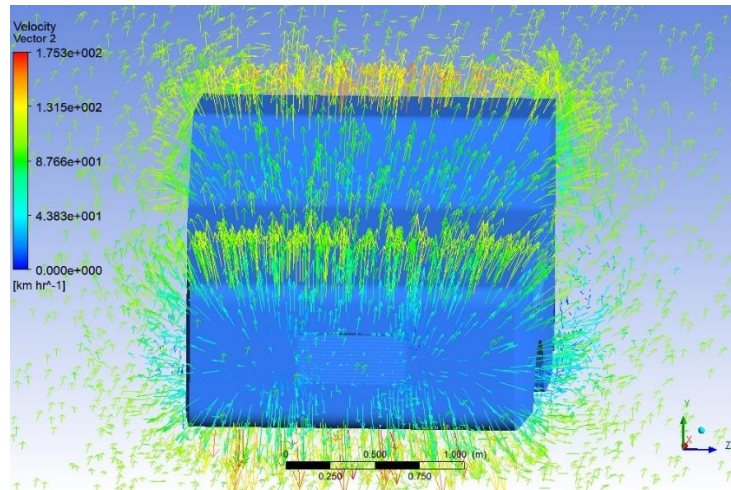
Ana model taşıtın basınç dağılımının önden görünüşü Şekil 5.14 ve hız vektörleri sırasıyla Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’ da gösterilmiştir.



Şekil 5.14 Ana modelin statik basınç konturunun önden görünüşü

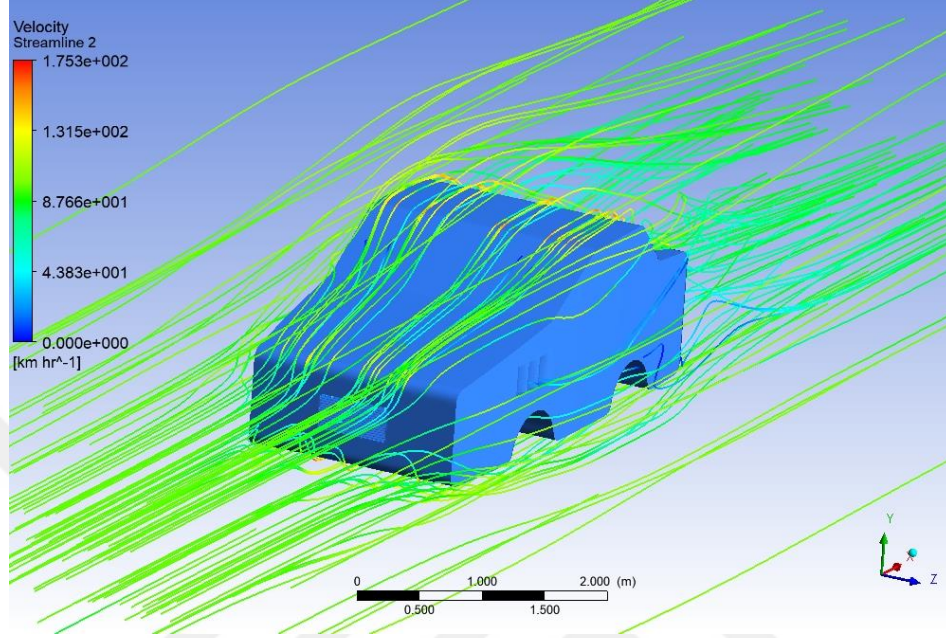


Şekil 5.15 Ana modelin hız vektörlerinin yandan görünüşü

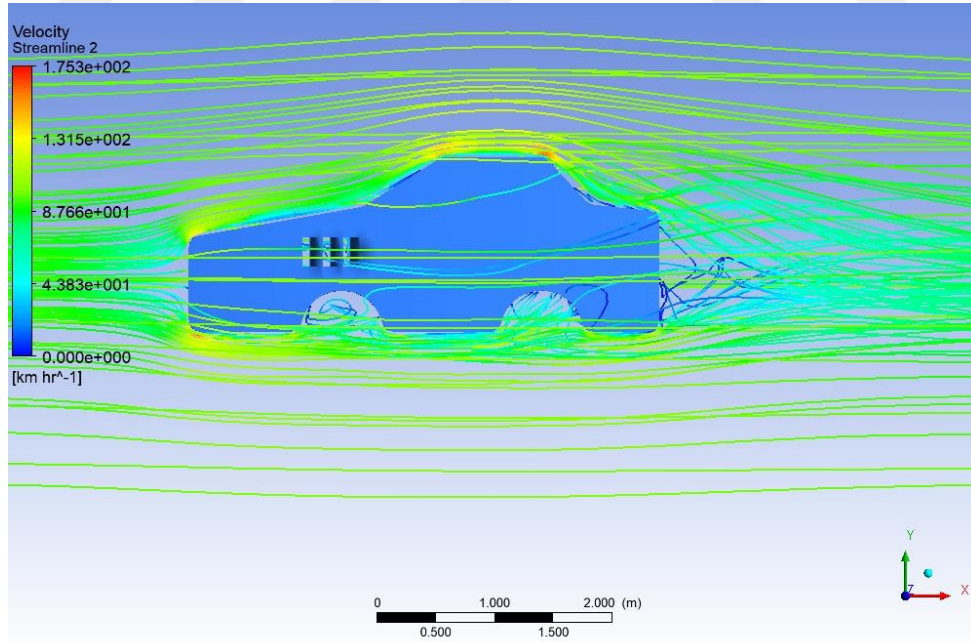


Şekil 5.16 Ana modelin hız vektörlerinin önden görünüşü

Ana model taşıtın hız akım çizgileri vektörleri Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’ de gösterilmiştir.

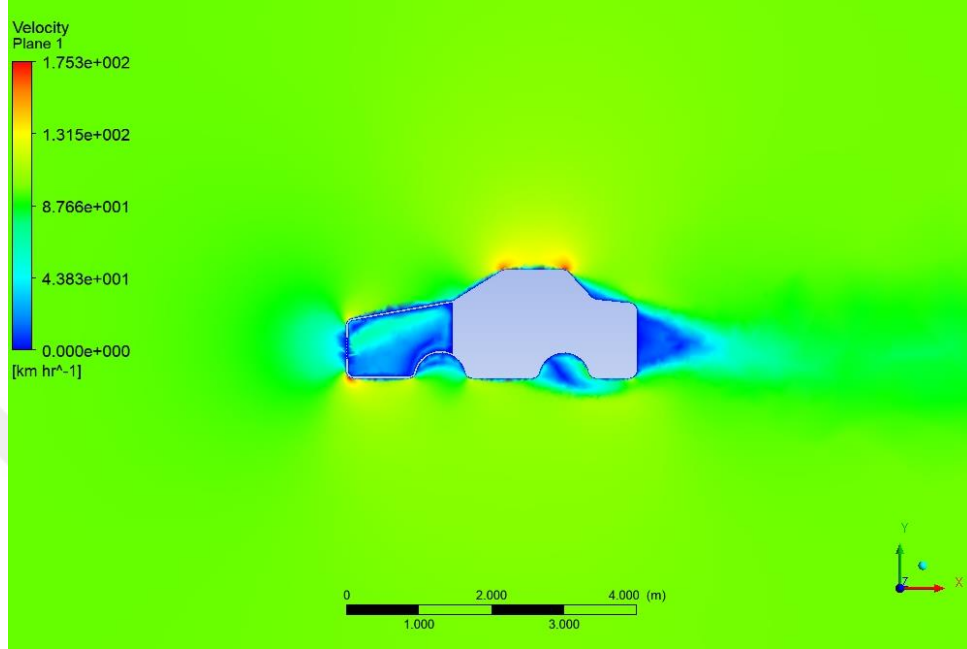


Şekil 5.17. Ana modelin akım çizgilerinin izometrik görünümü

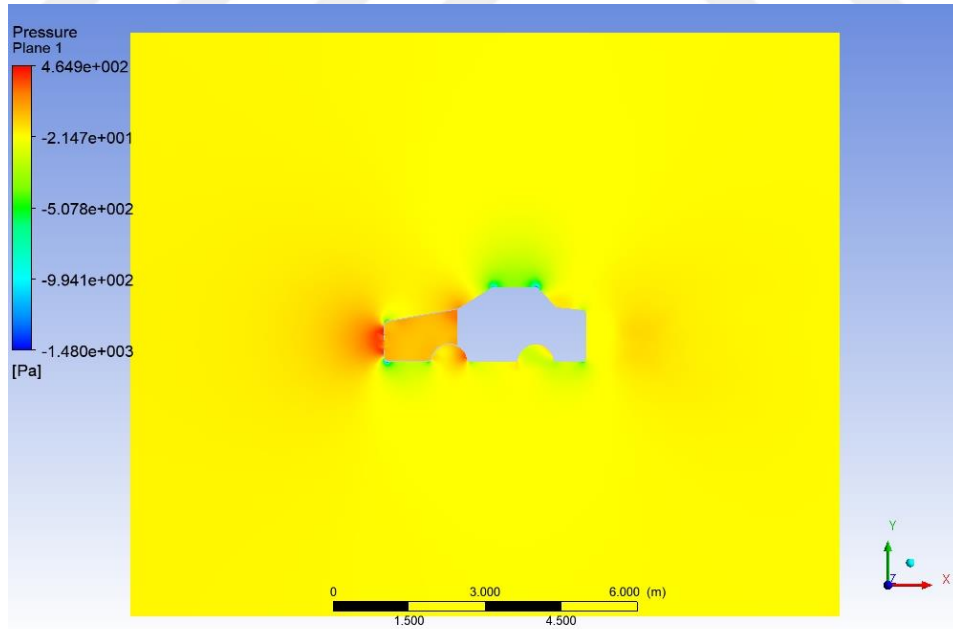


Şekil 5.18. Ana modelin akım çizgilerinin yandan görünümü

Ana model taşıtın tam orta noktasından z eksenı boyunca alınan kesıttın hız konturı Şekıl 5.19’ da ve basınç konturı Şekıl 5.20’ de gösterılmıştır.



Şekıl 5.19. Ana modelin z eksenı boyunca alınan kesıttın hız konturunun yandan görünüşü

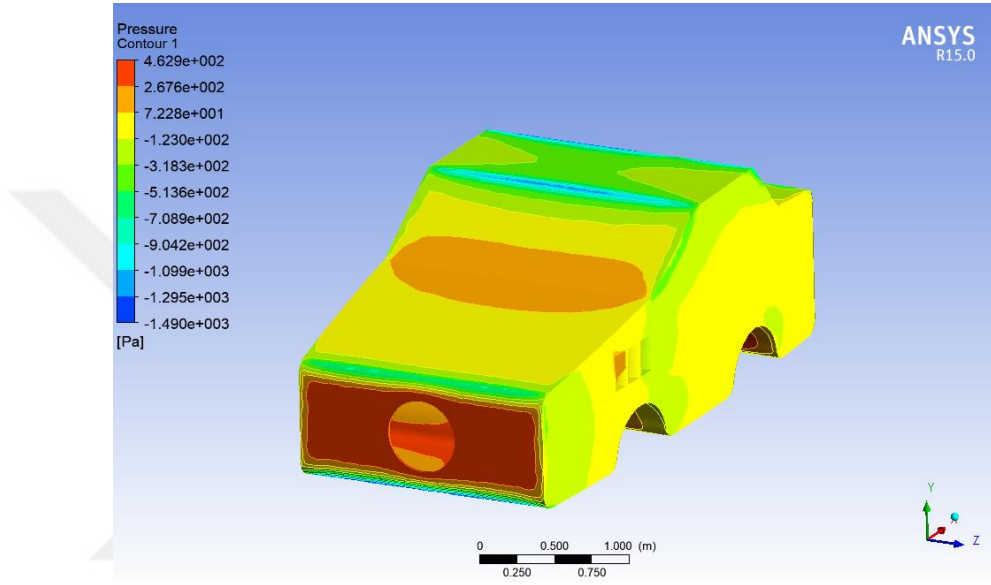


Şekıl 5.20. Ana modelin z eksenı boyunca alınan kesıttın basınç konturunun yandan görünüşü

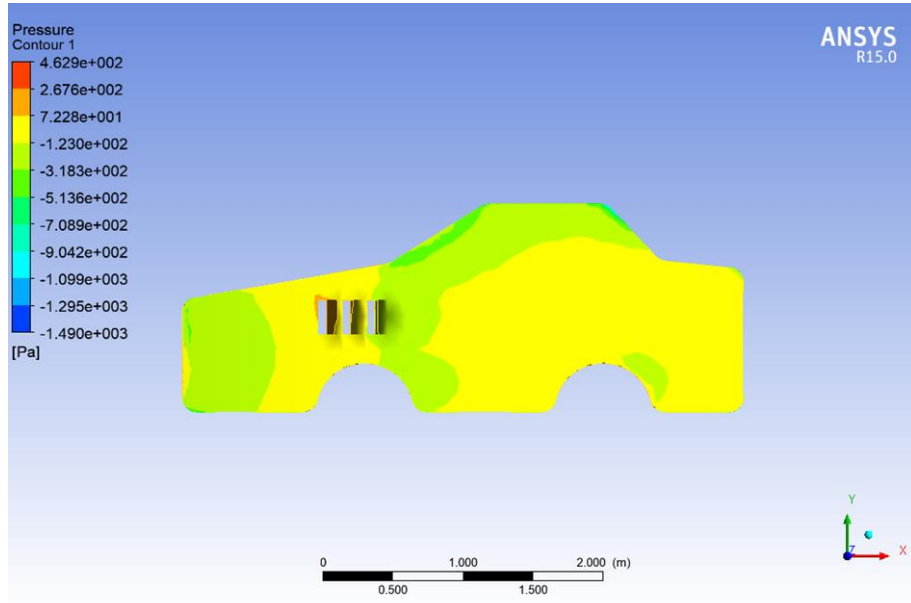
Ana modelin taşıtın çözüm işlemi sonucunda aerodinamik direnç katsayısı (C_d) 0.5693 bulunmuştır. Aerodinamik kaldırma katsayısı (C_l) 0.2987 bulunmuştır.

5.3. Delikli Model Taşıtın Ön Yüzey Formları

Çözüm adımıdaki bütün değer ve özellikler ana modelin çözümünde kullanılan değer ve özelliklerle aynı alınmıştır. Çözüm işlemi tamamlandıktan sonra “CFD-Post Results” bölümünden sonuçlar alınmıştır. Delikli model taşıtın izometrik ve yandan statik basınç konturları sırasıyla Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’ de gösterilmiştir.

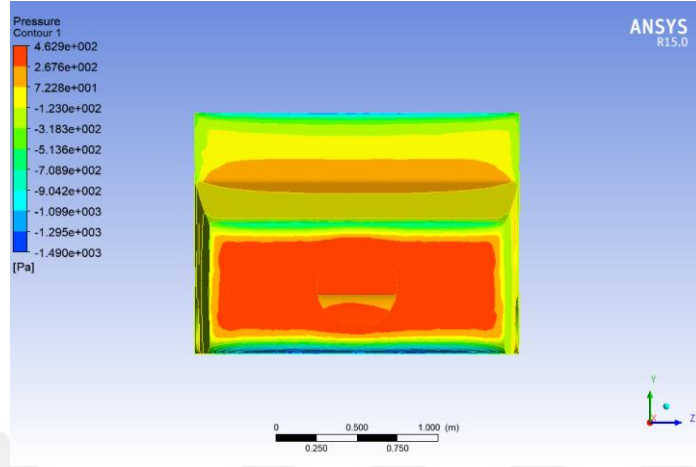


Şekil 5.21 Delikli modelin statik basınç konturunun izometrik görünüşü

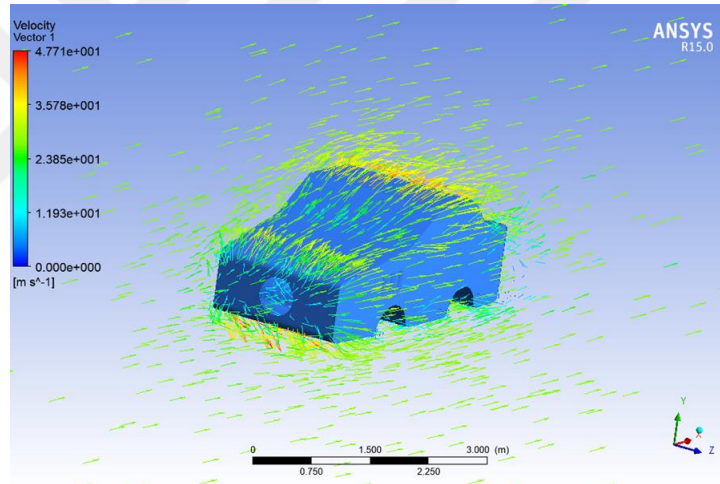


Şekil 5.22 Delikli modelin statik basınç konturunun yandan görünüşü

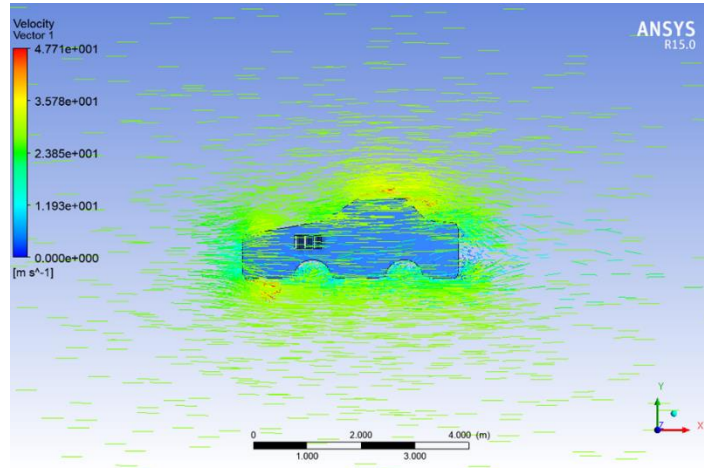
Delikli model taşıtın basınç dağılımının önden görünüşü Şekil 5.23 ve hız vektörleri sırasıyla Şekil 5.24 ve Şekil 5.25’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.23. Delikli modelin basınç konturunu önden görünüşü

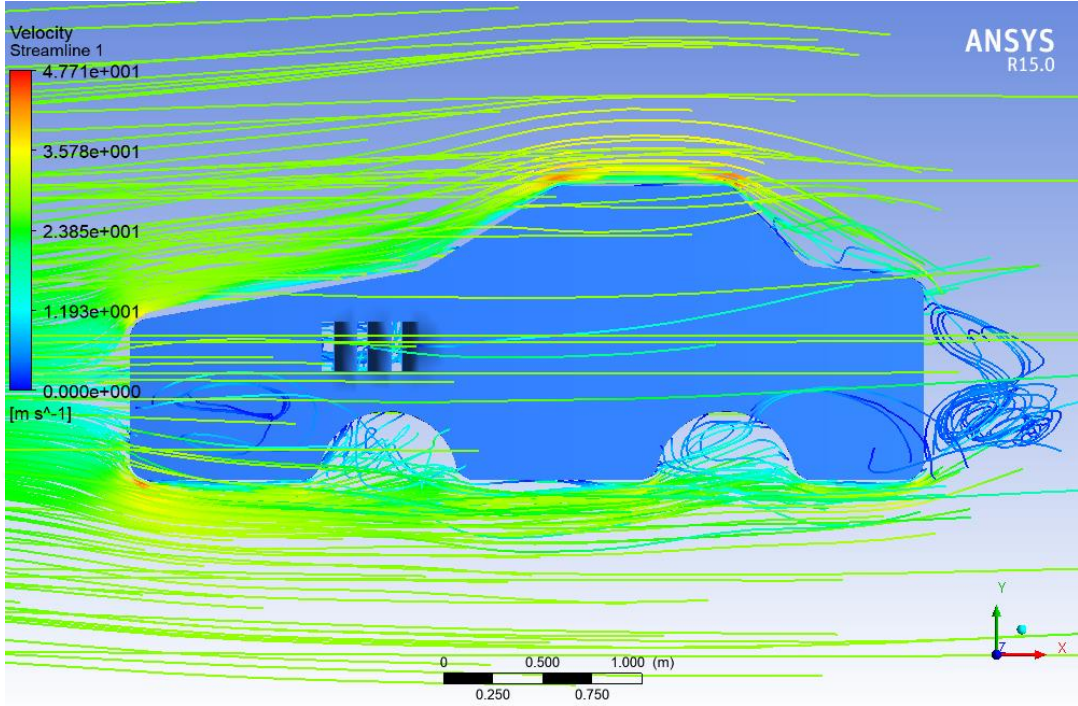


Şekil 5.24 Delikli modelin hız vektörlerinin izometrik görünüşü

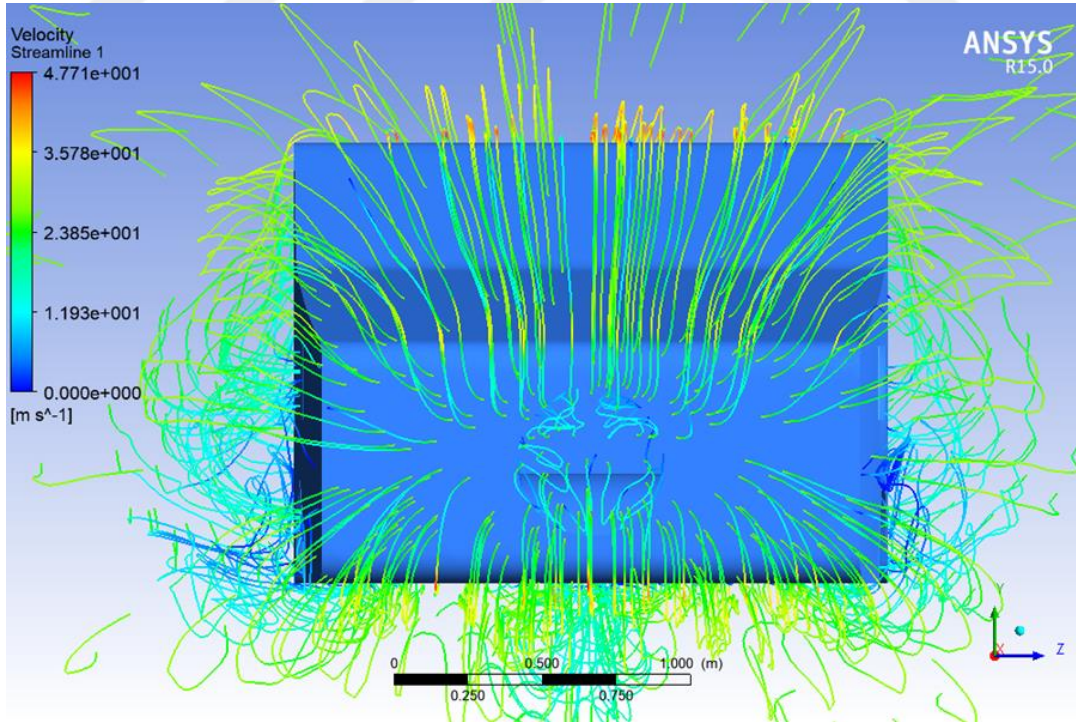


Şekil 5.25. Delikli modelin hız vektörlerinin yandan görünüşü

Delikli model taşıtın hız akım çizgileri Şekil 5.26 ve Şekil 5.27’ de gösterilmiştir.

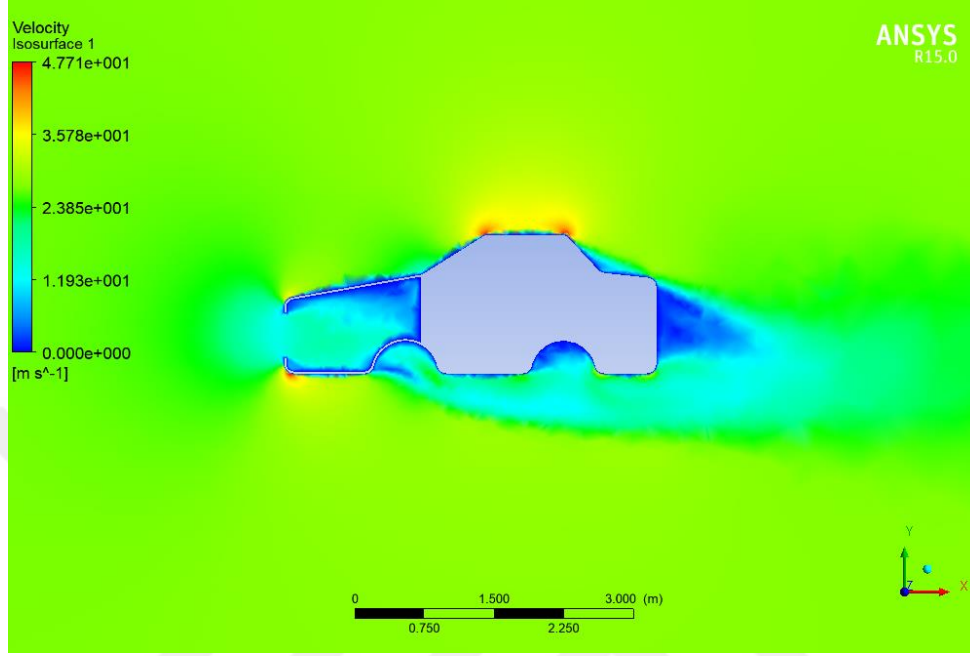


Şekil 5.26. Delikli modelin akım çizgilerinin yandan görünüşü

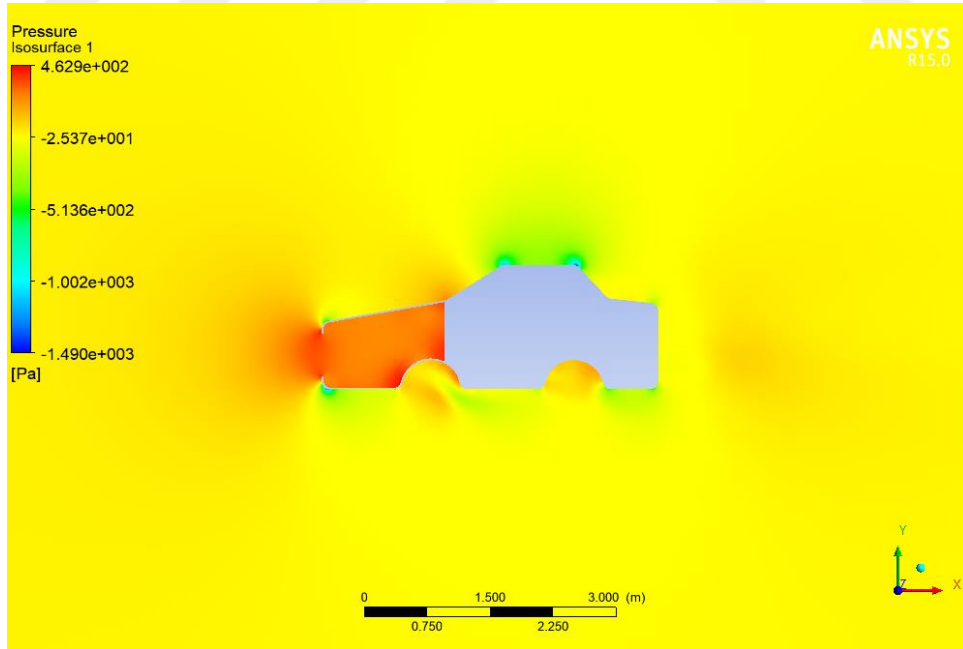


Şekil 5.27. Delikli modelin akım çizgilerinin önden görünüşü

Delikli taşıt modelinin tam orta noktasından z eksenini boyunca alınan kesitten hız konturu ve basınç konturu sırasıyla şekil 5.28 ve 5.29’ da verilmiştir.



şekil 5.28. Delikli modelin z eksenini boyunca alınan kesitten hız konturu

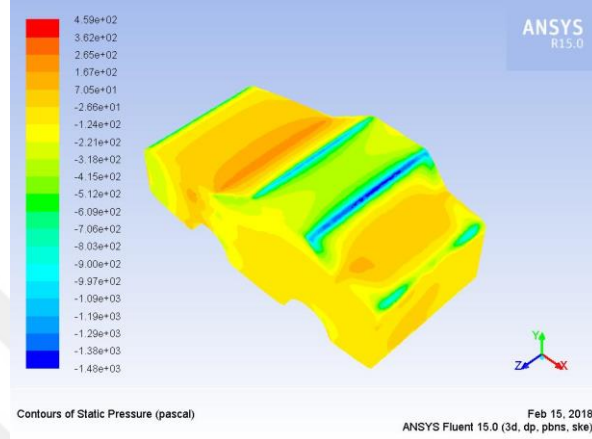


şekil 5.29. Delikli modelin z eksenini boyunca alınan kesitten basınç konturu

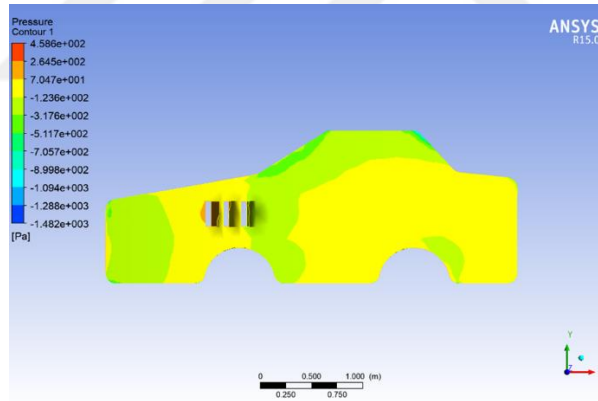
Çözüm işlemi sonucunda delikli modelin aerodinamik direnç katsayısı (C_d) 0,6105 bulunmuştur. Aerodinamik kaldırma katsayısı (C_l) 0,2757 bulunmuştur.

5.4. Rüzgar Türbinli Model Taşıtın Ön Yüzey Formları

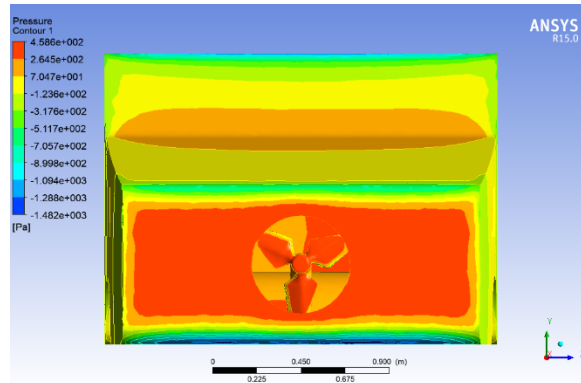
Rüzgar türbinli modelde de çözüm adımıdaki bütün değer ve özellikler ana modelin çözümünde kullanılan değer ve özelliklerle aynı alınmıştır. Rüzgar türbinli modelin izometrik, yandan ve önden statik basınç konturları sırasıyla Şekil 5.30 - Şekil 5.32’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.30. Rüzgar türbinli modelin statik basınç konturunun izometrik görünüşü

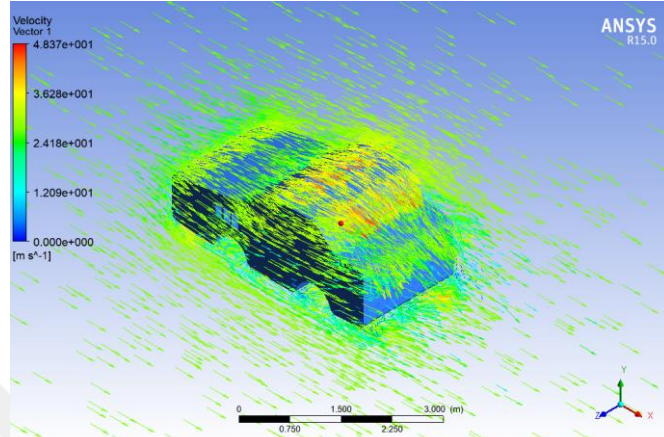


Şekil 5.31. Rüzgar türbinli modelin statik basınç konturunun yandan görünüşü

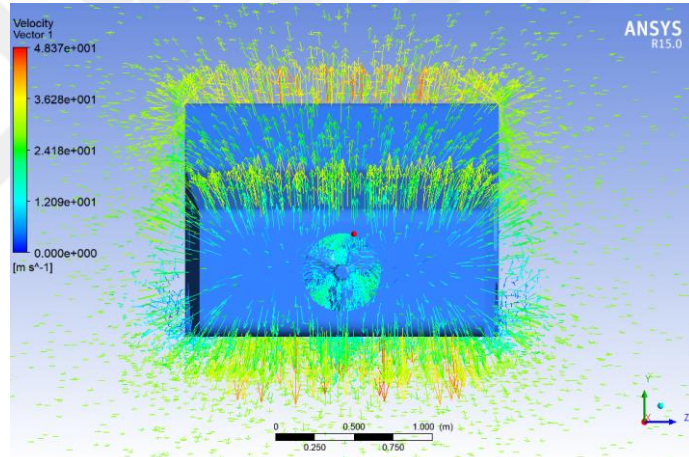


Şekil 5.32. Rüzgar türbinli modelin statik basınç konturunun önden görünüşü

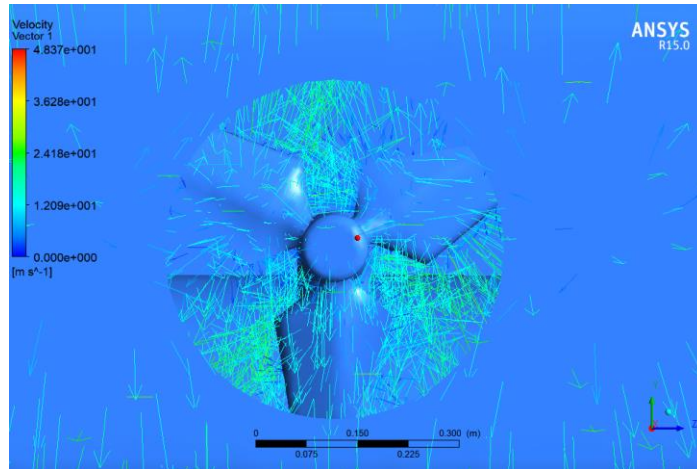
Rüzgar türbinli model taşıtın hız vektörlerinin izometrik ve önden görünüşü sırasıyla Şekil 5.33 ve Şekil 5.34’ de gösterilmiştir. Türbin etrafındaki hız vektörleri Şekil 5.35’ de verilmiştir.



Şekil 5.33 Rüzgar türbinli modelin hız vektörlerinin izometrik görünüşü

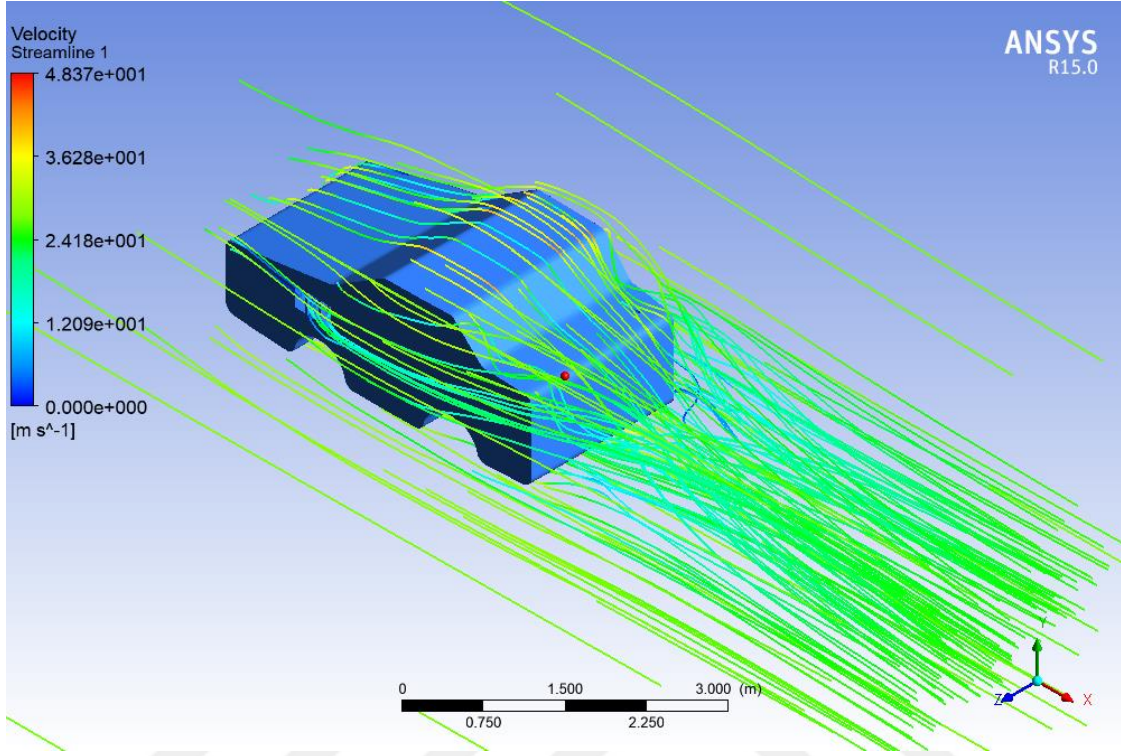


Şekil 5.34. Rüzgar türbinli modelin hız vektörlerinin önden görünüşü

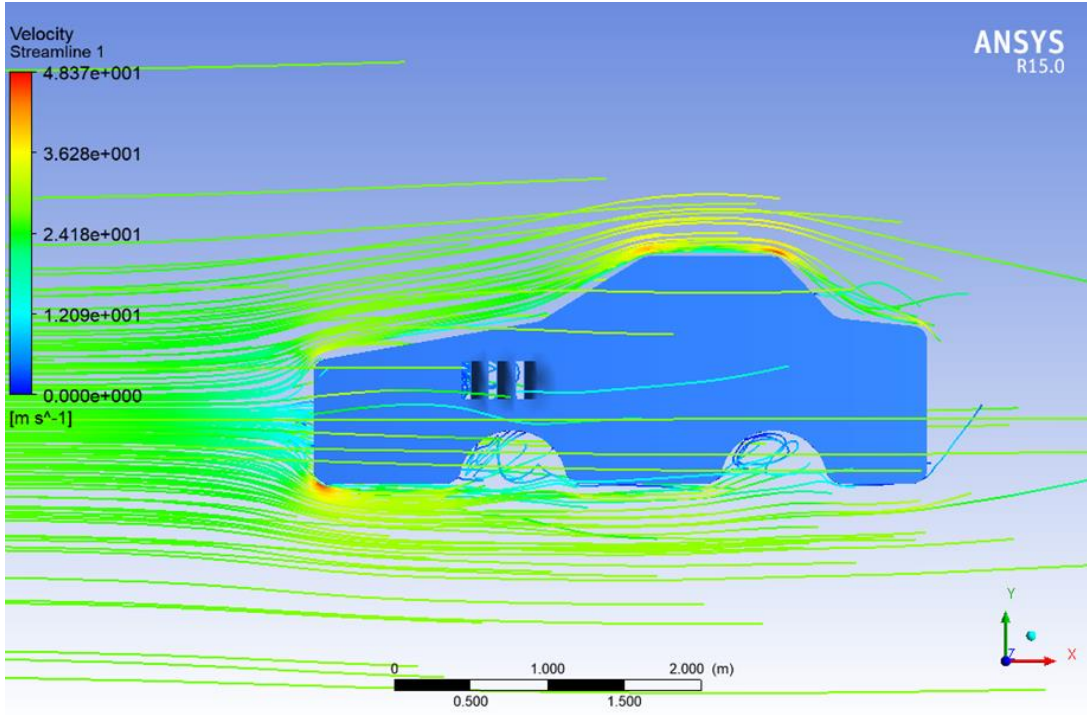


Şekil 5.35. Rüzgar türbinli modelin hız vektörlerinin türbin etrafındaki görünüşü

Rüzgar türbinli taşıt modelinin, taşıtın arka bölümündeki hız akım çizgileri Şekil 5.36’ da taşıtın ön bölümündeki hız akım çizgileri ise Şekil 5.37’ de gösterilmiştir.

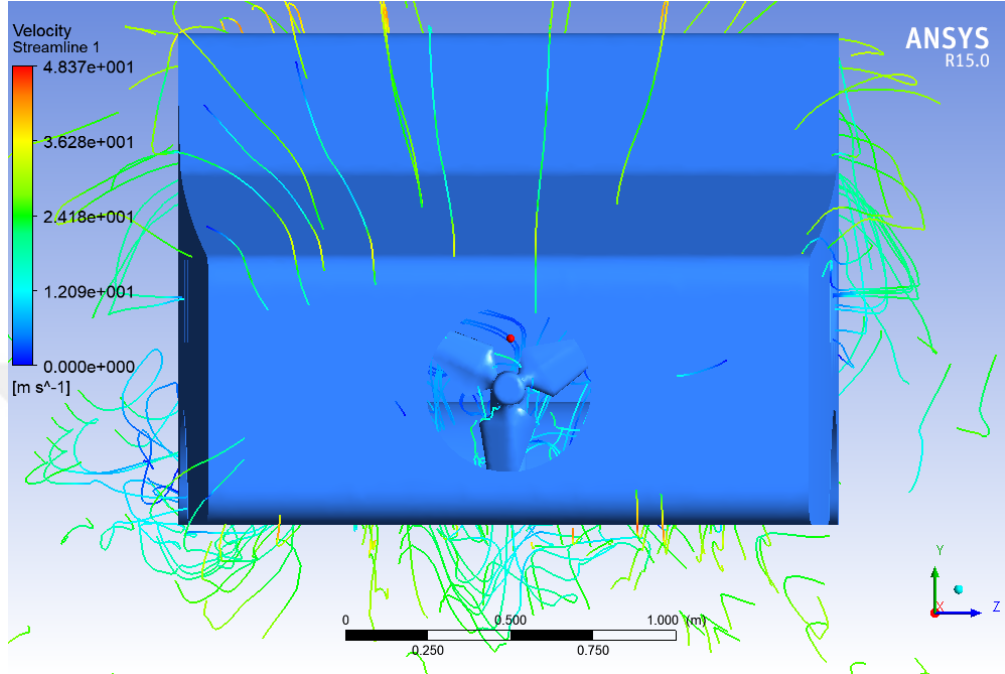


Şekil 5.36. Rüzgar türbinli modelin akım çizgilerinin izometrik görünüşü

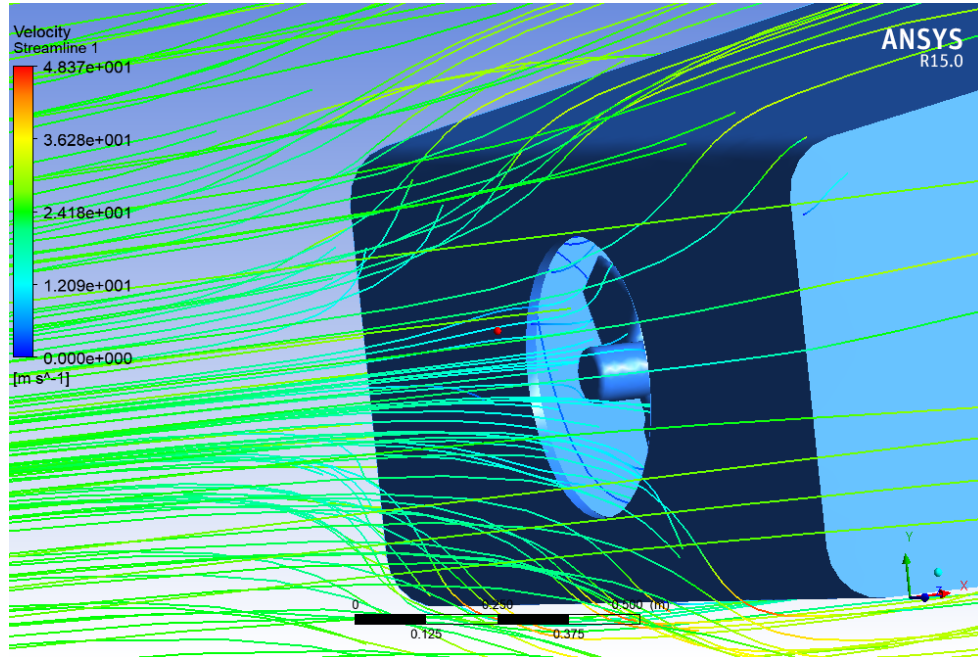


Şekil 5.37. Rüzgar türbinli modelin akım çizgileri yandan görünüşü

Rüzgar türbinli taşıt modelin hız akım çizgilerinin önden görünüşü Şekil 5.38’ de, taşıtın ön bölümündeki ve rüzgar türbin bölümündeki hız akım çizgilerinin izometrik görünüşü Şekil 5.39’ da gösterilmiştir.

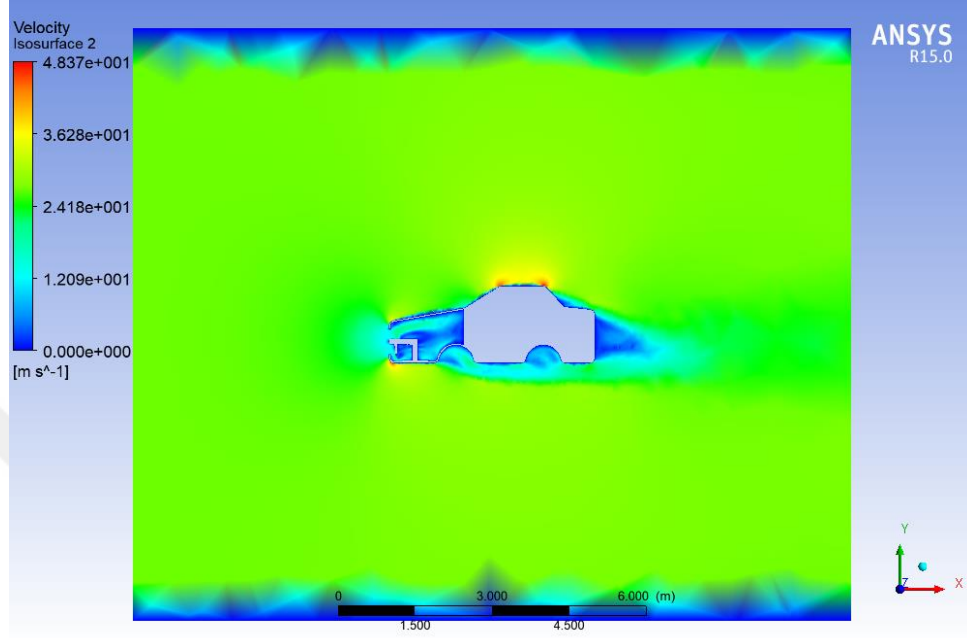


Şekil 5.38. Rüzgar türbinli modelin akım çizgileri önden görünüşü

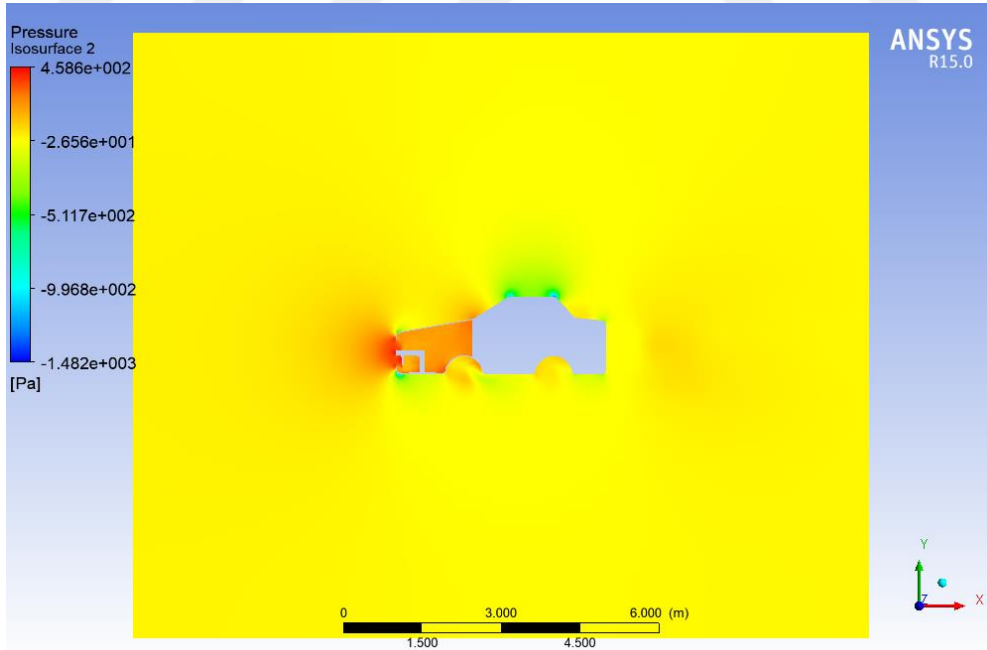


Şekil 5.39 Rüzgar türbinli modelin türbin bölümü akım çizgilerinin izometrik görünüşü

Rüzgar türbinli modelin tam orta noktasından z eksenı boyunca alınan kesitten hız konturu ve basınç konturu sırasıyla Şekil 5.40 ve Şekil 5.41’ de verilmiştir.



Şekil 5.40. Rüzgar türbinli modelin hız konturunun yandan görünüşü



Şekil 5.41. Rüzgar türbinli modelin basınç konturunun yandan görünüşü

Rüzgar türbinli modelin çözüm işlemi sonucunda aerodinamik direnç katsayısı (C_d) 0.5715 bulunmuştur. Aerodinamik kaldırma katsayısı (C_l) 0.2996 bulunmuştur.

5.5. Aerodinamik Direncin Enerji Tüketimi Üzerine Etkisi

Taşıtlarda aerodinamik sürüklenme direnç katsayısının enerji tüketimine dolayısıyla yakıt tüketimine olan etkisi önem taşımaktadır. Bu kapsamda, yapılan tasarım değişikliklerinin enerji kazancı ve kaybı üzerine etkisi aşağıda sunulmuştur.

Üzerinde tasarım değişikliği yapılan taşıt modelinin teknik özellikleri aşağıdaki şekilde seçilmiştir.

- Taşıtın kütlesi: 1200 kg
- Taşıtın izdüşüm alanı: 2.96 m²
- Yuvarlanma direnci katsayısı: 0.02
- Taşıt hızı: 27 m/s
- Taşıtın aldığı mesafe: 100 km

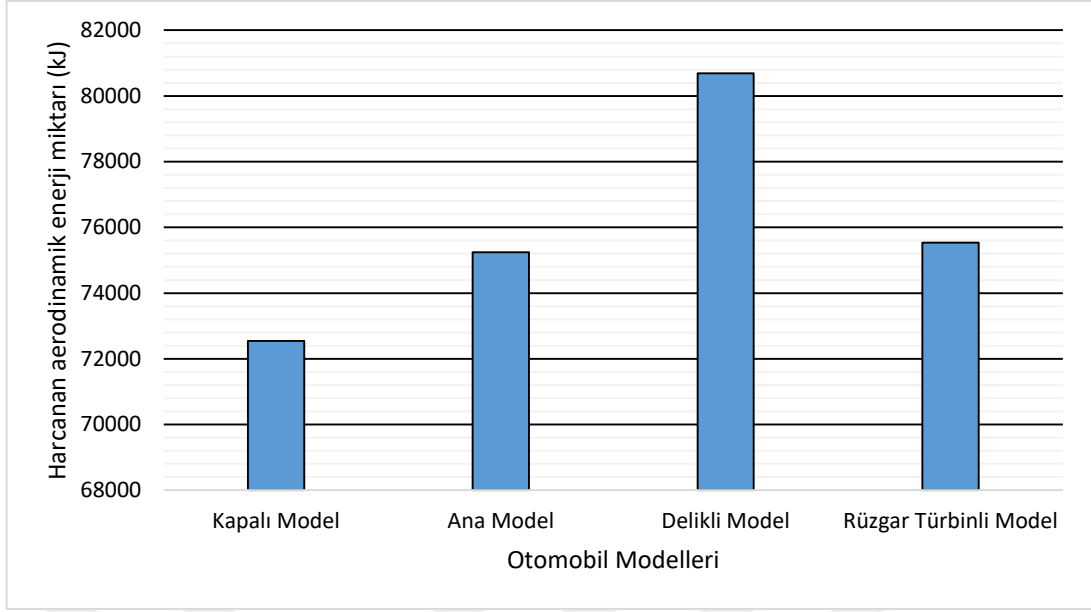
Bu şartlarda aerodinamik sürüklenme kuvvetine karşı yapılan iş,

$$E_1 = F_d \times s = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^2 \times C_d \times s \quad (5.1)$$

olarak ifade edilir. Bu durumda denklem (5.1) yardımıyla

$$E_1 = \frac{1}{2} \times 1.225 \times 2.96 \times 27^2 \times C_d \times 100000 \quad (5.2)$$

şeklinde bulunur. Analizleri yapılan taşıt modelleri için C_d değerleri denklem (5.2)' de yerine yazıldığında her model için harcanan aerodinamik enerji değerleri Şekil 5.42' de verilmiştir.



Şekil 5.42. 27 m/s hız ile 100 km mesafe için harcanan aerodinamik enerji miktarları

Şekil 5.42’ de görüldüğü gibi ön tampon üzerine hava ızgaralarının açılması, delik açılması ve deliğin arkasına türbin yerleştirilmesi sonucunda harcanan aerodinamik enerji miktarı dolayısıyla yakıt tüketiminde kapalı modele göre artış olmuştur. Rüzgar türbinli modelin ana modele göre aerodinamik enerji kaybında % 0.38’ lik bir artış olmuştur.

Türbin sistemi takılan otomobilde türbinden elde edilen güç aşağıdaki ifade ile belirlenir.

$$P_{Türbin} = \frac{1}{2} \times \rho \times V^3 \times A \times C_p \quad (5.3)$$

Bu durumda,

- Akışkan hızı $V=27$ m/s
- Türbin kanat akış alanı $A=0.196$ m²
- Güç katsayısı $C_p=0.5926$

alınarak denklem (5.3) yardımıyla aşağıdaki şekilde elde edilmiştir. Buna göre;

$$P_{Türbin} = \frac{1}{2} \times 1.225 \times 27^3 \times 0.196 \times 0.5926 = 1402 \text{ Watt} \quad (5.4)$$

olarak bulunur. Aracın çalışma süresi dikkate alınarak;

$$E(J) = P(W) \times t(s) \quad (5.5)$$

ifadesi yazılarak türbinden kazanılan enerji miktarı (kJ) olarak belirlenir. Böylece

$$E_{\text{Türbin}} = 1402 \times 3703 = 5192 \text{ kJ}$$

olur.

Ana model ile rüzgar türbinli model arasında oluşan kayıp aerodinamik enerji miktarı,

$$E_{1\text{Türbin Kayıp}} = E_{1\text{Türbinli Model}} - E_{1\text{Ana Model}} \quad (5.6)$$

şeklinde ifade edilirse bu bağıntıdan;

$$E_{1\text{Türbin Kayıp}} = 75553 \text{ kJ} - 75233 \text{ kJ} = 290 \text{ kJ}$$

olur. Rüzgar türbinli sistemin ana modele göre aerodinamik enerji kazancı,

$$E_{1\text{Türbin Kazanç}} = E_{\text{Türbin}} - E_{1\text{Türbin Kayıp}} \quad (5.7)$$

şeklindedir. Bu durumda denklem (5.7) yardımıyla rüzgar türbinli modelin ana modele göre aerodinamik enerji kazancı,

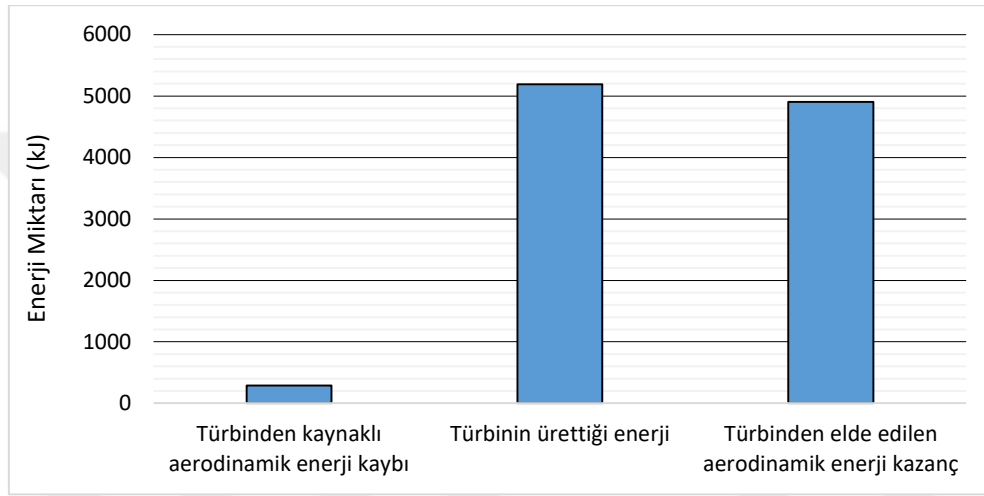
$$E_{1\text{Kazanç}} = 5192 \text{ kJ} - 290 \text{ kJ} = 4902 \text{ kJ} \text{ olarak tespit edilmiştir.}$$

Bu durumda ana modele göre türbinli modeldeki aerodinamik enerji kaybı, türbinden elde edilen enerji ve türbinde elde edilen aerodinamik enerji miktarındaki kazanç ise Şekil 5.43' te gösterilmiştir.

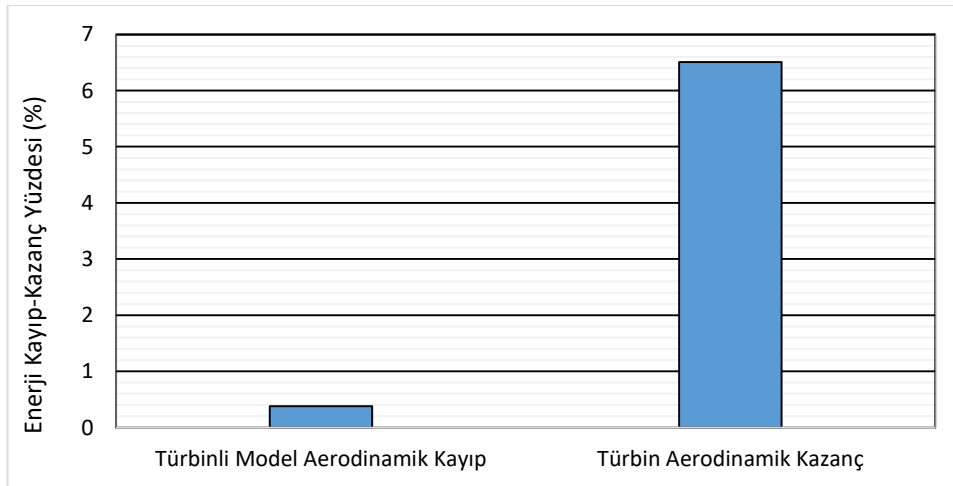
Ayrıca ana modele göre türbinli modeldeki enerji kayıp yüzdesi ile türbinde elde edilen enerji miktarındaki kazanç yüzdesi ise,

- (%) Kayıp = $E_{1\text{Türbin kayıp}} / E_{1\text{Ana Model}}$
- (%) Kazanç = $E_{1\text{Türbin kazanç}} / E_{1\text{Ana Model}}$

şeklinde hesaplanmış ve Şekil 5.44’ te gösterilmiştir. Buna göre kayıp enerji miktarı %0.38 iken türbinden elde edilen enerji kazanç yüzdesi % 6.51 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.43. Türbinli modelde ana modele göre aerodinamik enerji kaybı ile türbinde elde edilen aerodinamik enerji miktarındaki kazanç miktarları.



Şekil 5.44. Türbinli modeldeki aerodinamik enerji kayıp yüzdesi ile türbinde elde edilen aerodinamik enerji miktarındaki kazanç yüzdesi.

Taşıt modellerinin teknik özelliklerine göre bir hibrit veya elektrikli araç kullanılması durumunda bu aracın elektrikle çalışması halinde sağlanan enerjinin %90' unun tekerleklerde faydalı işe dönüştüğü ($\eta : \%90$) göz önüne alındığında taşıtın durgun halden 27 m/s hıza ulaşması için yapılan iş,

$$E_2 = \frac{1}{2} \times M \times V^2 \quad (5.8)$$

yardımıyla belirlenebilir. Denklem (5.8)' den,

$$E_2 = \frac{1}{2} \times 1200 \times 27^2 = 437 \text{ kJ}$$

olur. Bu sırada s kadar yol katledildiğinde yuvarlanma direncine karşı yapılan (kaldırma direnci = 0 kabulüyle) iş,

$$E_3 = P \times s = W \times f \times s \quad (5.9)$$

olarak ifade edilir. Denklem (5.9)' dan

$$E_3 = 1200 \times 9.81 \times 0.02 \times 100000 = 23544 \text{ kJ}$$

olarak bulunur.

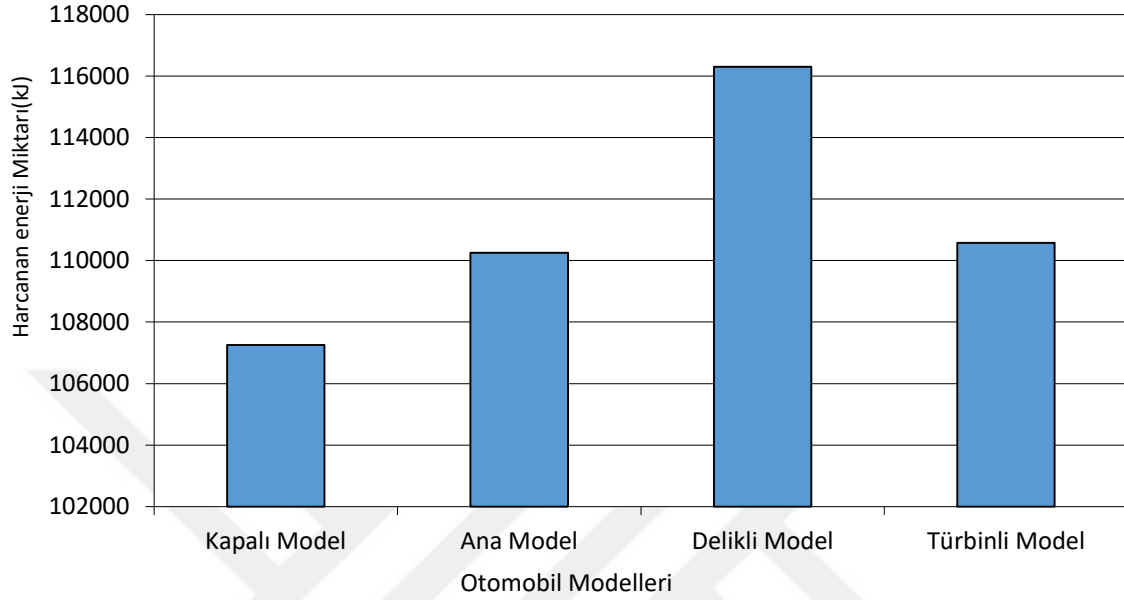
Aynı mesafe için aerodinamik direnç kuvvetine karşı yapılan iş denklem (5.1)' deki gibi ifade edilir. Buna göre toplam kayıp enerji,

$$E_{top} = \frac{(E_1 + E_2 + E_3)}{\eta} \quad (5.10)$$

olarak ifade edilir. Denklem (5.10)' da, hesaplanan E_2 ve E_3 enerji ifadeleri yerine yazılırsa,

$$E_{top} = \frac{(E_1 + 437 + 23544)}{0.9} \quad (5.11)$$

olarak bulunur. Analizleri yapılan taşıt modelleri için C_d değerleri E_1 denkleminde yerine yazıldığında her model için harcanan toplam enerji miktarları Şekil 5.45’ te verilmiştir.



Şekil 5.45. 27 m/s hız ile 100 km mesafe için harcanan toplam enerji miktarları

Şekil 5.45’ te görüldüğü gibi ön tampon üzerinde hava ızgaralarının açılması, delik açılması ve deliğin arkasına türbin yerleştirilmesi sonucunda harcanan toplam enerji miktarı dolayısıyla yakıt tüketiminde kapalı modele göre artış olmuştur. Rüzgar türbinli sistemde ana modele göre toplam enerji kaybında %0.293 ’lük bir artış olmuştur. Ana model üzerinde yapılan bu şekilsel değişikliklerinin aerodinamik direnç katsayısını arttırdığı ve bu durumun taşıtın genel yakıt tüketimini de arttırıcı yönde bir etki yaptığı belirlenmiştir.

Türbin sistemi takılan otomobilde türbinden elde edilen güç denklem (5.3-5.4) yardımıyla 1402 Watt olarak ve türbinden kazanılan enerji miktarı denklem (5.5-5.6) yardımıyla 5192 kJ olarak bulunmuştur. Bu durumda, ana model ile rüzgar türbinli model arasında oluşan kayıp toplam enerji miktarı,

$$E_{\text{Türbin Kayıp}} = E_{\text{Türbinli Model}} - E_{\text{Ana Model}} \quad (5.12)$$

şeklinde ifade edilirse bu bağıntıdan;

$$E_{\text{Türbin Kayıp}} = 110249 - 110572 = 323 \text{ kJ}$$

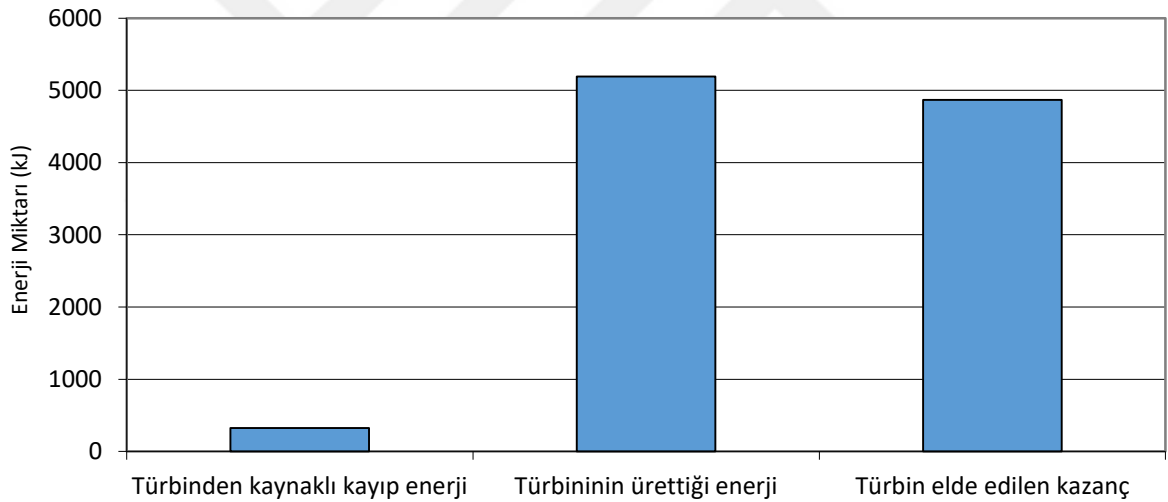
olur. Rüzgar türbinli sistemin ana modele göre enerji kazancı,

$$E_{\text{Türbin Kazanç}} = E_{\text{Türbin}} - E_{\text{Türbin Kayıp}} \quad (5.13)$$

şeklindedir. Bu durumda denklem (5.11) yardımıyla rüzgar türbinli modelin ana modele göre enerji kazancı,

$$E_{\text{Kazanç}} = 5192 - 323 = 4869 \text{ kJ olarak tespit edilmiştir.}$$

Böylece ana modele göre türbinli modeldeki enerji kaybı, türbinden elde edilen enerji ve türbinde elde edilen enerji miktarındaki kazanç ise Şekil 5.46’ da gösterilmiştir.

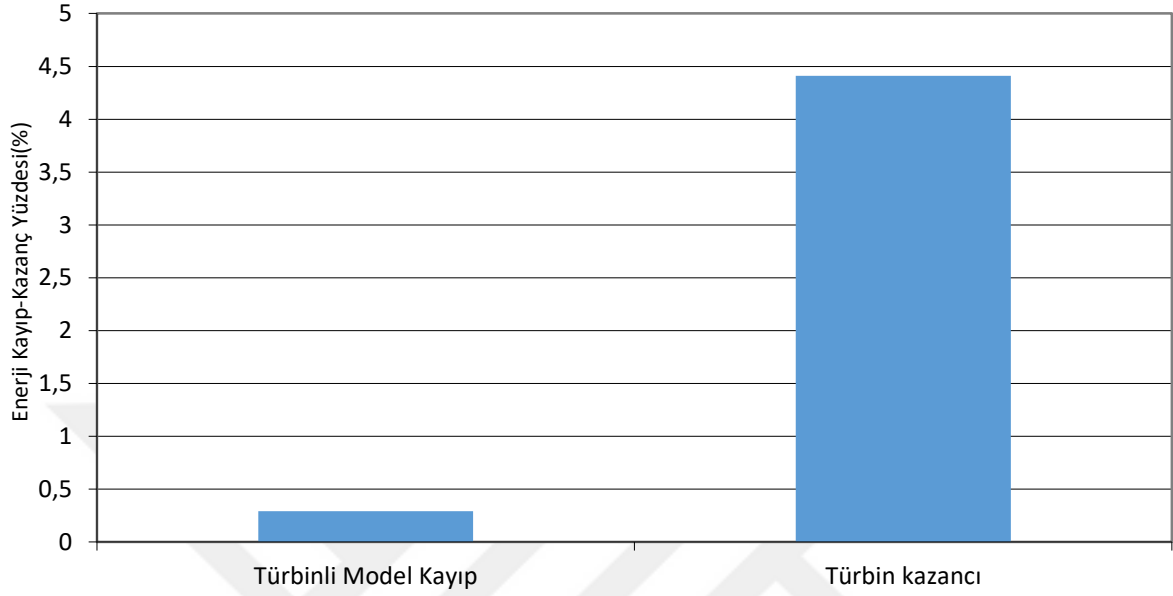


Şekil 5.46. Türbinli modelde ana modele göre enerji kaybı ile türbinde elde edilen enerji miktarındaki kazanç miktarları.

Ayrıca ana modele göre türbinli modeldeki enerji kayıp yüzdesi ile türbinde elde edilen enerji miktarındaki kazanç yüzdesi ise,

- $(\%) \text{Kayıp} = E_{\text{Türbin kayıp}} / E_{\text{Ana Model}}$
- $(\%) \text{Kazanç} = E_{\text{Türbin kazanç}} / E_{\text{Ana Model}}$

şeklinde hesaplanmış ve Şekil 5.47’ de gösterilmiştir. Buna göre kayıp enerji miktarı %0.29 iken türbinden elde edilen enerji kazanç yüzdesi % 4.41 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.47. Türbinli modeldeki enerji kayıp yüzdesi ile türbinde elde edilen enerji miktarındaki kazanç yüzdesi.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada seçilen bir ana model otomobil üzerine farklı tasarımlar yapılmış ve Fluent programı yardımıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde otomobil hızı sabit 27 m/s alınmıştır ve aracın 100 km yol gittiği kabul edilmiştir. Tasarlanan modeller için hava direnç katsayılarının değişimi, taşıta etkiyen dirençler ve enerji tüketimine etkisi incelenerek elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Basınç dağılımları incelendiğinde taşıtın hareketi sırasında direkt olarak rüzgarla temasta bulunduğu ön yüzeylerde basıncın daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Akım çizgilerinin taşıt şeklini kapsayacak şekilde oluştuğu görülmüştür.

- Ana otomobil modelinde aerodinamik direnç katsayısı değerinde Fluent verilerine göre ön formu kapalı olan modele göre % 3.71 artış gözlemlenmiştir.

- Ana modelin ön tampon bölümünde delik açılması durumunda da direnç katsayısında artış görülmüştür. Bu durumda direnç katsayısındaki artış ana modele göre Fluent verilerine göre % 7.23 olmuştur. Otomobilin ön tampon bölümüne açılan delik dolayısıyla direnç katsayısında oluşan artış ön yüzeye uygulanan basıncın ve dolayısıyla akış doğrultusunda araca uygulanan kuvvetin artması ile olmuştur.

- Otomobilin ön bölümüne açılan deliğe rüzgar türbininin yerleştirilmesi durumunda ana modele göre direnç katsayısında Fluent verilerine göre % 0.38 artış meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen direnç katsayısındaki artış ana modele göre fazla olmakla birlikte delikli modele göre % 6.82 daha düşük olmuştur. Deliklere yerleştirilen pervanelerin hava akışını içeriye doğru hızlandırdığını ve ayrışma noktasını aşağı doğru kaydırma eğiliminde olduğu görülmüştür.

- Rüzgar türbinli modelin ana modele göre aerodinamik enerji kaybında %0.38' lik bir artış olmuştur. Ancak otomobile ilave edilen rüzgar türbini yardımıyla üretilen net enerji kazancı ana model taşıtın aerodinamik enerji kaybının yaklaşık olarak % 6.51' si olarak gözlemlenmiştir.

-Delikli model otomobildeki toplam enerji kaybı, ana model otomobile göre % 5.48 artış göstermiştir. Rüzgar türbinli model otomobilde ise ana model otomobile göre % 0.29 oranında artış olmuştur. Ancak otomobile ilave edilen rüzgar türbini yardımıyla üretilen net enerji kazancı ana model taşıtın toplam kayıp enerjisinin yaklaşık olarak % 4.41' i olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca rüzgar türbinli model otomobilde oluşan toplam kayıp enerjinin yaklaşık % 4.7' sinin rüzgar türbini yardımıyla üretilebileceği belirlenmiştir.

Taşıtlara pervane tipi enerji üreten sistemlerin montajı ile belirli bir miktar elektriksel enerji üretilmekte ve bu da taşıtlarda harcanan enerji tüketimine katkıda bulunabilmektedir. Ülkemizde ve dünyada mevcut milyonlarca araç bulunmaktadır. Ülkelerin ekonomisi ve çevresel faktörler göz önüne alındığında bu araçlarda türbin tipi sistemlerin kullanılması önem taşımaktadır. Bu tür sistemlerin kullanılmasıyla enerji tüketimine verim artışı sağlanarak yakıt tüketimi ve çevresel kirlilik azaltılarak ekonomiye önemli ölçüde katkıda bulunulabilecektir.

Aerodinamik direncin taşıtın enerji kaybını dolayısıyla yakıt tüketimini arttırması açısından dikkate alınması gereken önemli parametre olduğu görülmüş olup, bu nedenle yapılacak çalışmalarda yeni taşıt geometrisi tasarımı taşıt projeksiyon alanını önemli derecede arttırmayacak şekilde olmalıdır.

Akış çözümlemelerinde hassas sonuçlar için özellikle aşırı küçük bölgelerdeki akış daha küçük elemanlar ile incelenmelidir. Böylelikle sınır tabaka ile türbülanslı bölgelerdeki hız ve basınç değerleri daha hassas olarak çözümlenebilir ve hesaplanan aerodinamik direnç katsayısı değeri daha çok doğru değere yaklaşır.

Yapılan bu çalışmada rüzgar türbinin hareketi sağlanamamıştır. Analizlerin rüzgar türbininin de dönmesi durumunda yapılması ile gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilecektir.

İlerleyen zamanlarda önerilen bu sistemin hayata geçirilmesiyle elektrikli otomobillerde gerekli enerjinin bir kısmının sağlanması mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Keçebaş, A., Engin Gedik E., Kayfeci, M.,** 2010, Fosil Yakıtların Kullanımından Kaynaklanan Hava Kirliliği Üzerine Jeotermal Enerji ve Doğalgaz Kullanımının Etkisi, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 7, No: 3, 23-30.
- [2] **Al-Garni, Abdullah M.,** 2003, Fundamental investigation of road vehicle aerodynamics.
- [3] **Hucho, W.H.,** 1998. Aerodinamics of Road Vehicles, Fourth Edition, SAE Inc., Harbound, 896 p
- [4] **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.
- [5] **McCallen, R., Couch, R., Hsu, J., Browand, F., Hammache, M., Leonard, A., Storms, B.,** 1999. Progress in reducing aerodynamic drag for higher efficiency of heavy duty trucks (class 7-8) (No. 1999-01-2238). SAE Technical Paper.
- [6] **Salari K., J.M. Ortega., P.J. Castellucci.,** 2004. Computational Prediction of Aerodynamic Forces for a Simplified Integrated Tractor-Trailer Geometry, AIAA Fluid Dynamics Meeting, Portland, June 28-July 1, 2004
- [7] **McCallen, R., Browand, F., Ross, J.,** 2013. The aerodynamics of heavy vehicles: trucks, buses, and trains (Vol. 19). Springer Science & Business Media.
- [8] **Lienhart, H., Stoots, C., Becker., S.** 2002. Flow and turbulence structures in the wake of a simplified car model (Ahmed model). In New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics III (pp. 323-330). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [9] **Okada, M., Sheridan, J. ve Thompson, M.,** 2005. Effect of Width-to-Height Ratio on Wake Structures of Simplified Vehicle Geometry.
- [10] **Watkins, F., Zimmer, S., Alam, G.,** 2003. Mean and time – varying flow measurements on the surface of a family of idealesed road vehicles. Experimental Thermal and Fluid Science 27 639 – 654.
- [11] **Noger C., Regardin C., Szechenyş E.,** 2005. Investigation of the transient aerodynamic phenomena associated with passing manoeuvres. Journal of Fluids And Structures, Volume: 21 Issue: 3 Pages: 231 – 241

- [12] **Brunn A., Nitsche W.,** 2006. Drag reduction of an Ahmed car model by means of active separation control at the rear vehicle slant. *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics V Book* . Volume: 92 Pages: 249 – 256.
- [13] **Watkins S., Vio G.,** 2004. The effect of vehicle spacing on the aerodynamics car shape.
- [14] **Huang J.F., Chan T.L., Zhou Y.,** 2009, Three dimensional flow structure measurements behind a queue of studied model vehicles.
- [15] **Hinterberger, C., Garcia-Villalba, M., ve Rodi, W.,** 2004. Large eddy simulation of flow around the Ahmed body. In *The aerodynamics of heavy vehicles: trucks, buses, and trains* (pp. 77-87). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [16] **Kapadia, S., Roy, S., Vallerio, M., Wurtzler, K., ve Forsythe, J.,** 2004. Detached-eddy simulation over a reference Ahmed car model. In *Direct and large-eddy simulation V* (pp. 481-488). Springer, Dordrecht.
- [17] **Guilmineau, E.,** 2008. Computational study of flow around a simplified car body. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 96(6-7), 1207-1217.
- [18] **Minguez, M., Pasquetti, R., ve Serre, E.,** 2008. High-order large-eddy simulation of flow over the “Ahmed body” car model. *Physics of fluids*, 20(9), 095101.
- [19] **Krajnović, S., Davidson, L.,** 2005. Influence of floor motions in wind tunnels on the aerodynamics of road vehicles. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 93(9), 677-696.
- [20] **Corin, R. J., He, L., Dominy, R. G.,** 2008. A CFD investigation into the transient aerodynamic forces on overtaking road vehicle models. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(8-9), 1390-1411.
- [21] **Clarke, J., ve Filippone, A.,** 2007. Unsteady computational analysis of vehicle passing. *Journal of Fluids Engineering*, 129(3), 359-367.
- [22] **Guilmineau, E., Chometon, F.,** 2009. Effect of side wind on a simplified car model: Experimental and numerical analysis. *Journal of Fluids Engineering*, 131(2), 021104.
- [23] **Gohlke, M., Beaudoin, J. F., Amielh, M., ve Anselmet, F.,** 2009. Effect of unsteady separation on an automotive bluff-body in cross-wind. In *IUTAM Symposium on Unsteady Separated Flows and their Control* (pp. 35-46). Springer, Dordrecht.
- [24] **İpci, D., Yılmaz, E., Aysal, F.E., Solmaz, H.,** 2015. Bir Kara Taşıt Modeli Etrafındaki Akış Yapısının Sayısal Olarak İncelenmesi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Cilt: 12, No: 2, 51-64

- [25] **Helgason, E., Hafsteinsson, H.,** 2009. Automatic Shape Optimization of Aerodynamic Properties of Cars.
- [26] **Pujals, G., Depardon, S., Cossu, C.,** 2010. Drag reduction of a 3D bluff body using coherent streamwise streaks. *Experiments in fluids*, 49(5), 1085-1094.
- [27] **Pinarbaşı, A., Gülerenk. M., Temel , Ü. M., Ağır, A., Gürlek, C.,** 2010. Ahmed Modeli Üzerindeki Akiş Yapısının İncelenmesi. III. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı 16-18 Eylül 2010 , Anadolu Üniv, Eskişehir, 1-8.
- [28] **Temel, Ü., N., Ağır, A., Gürlek, C., Güleren, K., M., Pinarbaşı, A.,** 2011. Bir Model Kara Taşıtı Etrafındaki Akiş Yapısının Deneysel Olarak İncelenmesi. X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi – 13/16 Nisan 2011/İzmir Bilimsel/Teknolojik Çalışmalar 435-443
- [29] **Baker, C. J., Humphreys, N. D.,**1996. Assessment of the adequacy of various wind tunnel techniques to obtain aerodynamic data for ground vehicles in cross winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 60, 49-68.
- [30] **Beccaria, M., Buresti, G., Ciampa, A., Lombardi, G., Gentzsch, W., Paap, H. G., Viceré, A.,** 1999. High-performance road-vehicle optimised aerodynamic design: Application of parallel computing to car design. *Future Generation Computer Systems*, 15(3), 323-332.
- [31] **Kaya, K., Özcan, O.,** 2013. A numerical investigation on aerodynamic characteristics of an air-cushion vehicle. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 120, 70-80.
- [32] **Bettle, J., Holloway, A. G. L., Venart, J. E. S.,** 2003. A computational study of the aerodynamic forces acting on a tractor-trailer vehicle on a bridge in cross-wind. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91(5), 573-592.
- [33] **Corno, M., Bottelli, S., Tanelli, M., Spelta, C., Savaresi, S. M.,** 2014. Active control of aerodynamic surfaces for ride control in sport vehicles. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 7553-7558.
- [34] **Corin, R. J., He, L., Dominy, R. G.,** 2008. A CFD investigation into the transient aerodynamic forces on overtaking road vehicle models. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(8-9), 1390-1411.
- [35] **Khaled, M., El Hage, H., Harambat, F., Peerhossaini, H.,** 2012. Some innovative concepts for car drag reduction: A parametric analysis of aerodynamic forces on a simplified body. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 107, 36-47.

- [36] **Khalighi, B., Jindal, S., Iaccarino, G.,** 2012. Aerodynamic flow around a sport utility vehicle—Computational and experimental investigation. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 107, 140-148.
- [37] **Cheng, S. Y., Tsubokura, M., Okada, Y., Nouzawa, T., Nakashima, T., Doh, D. H.,** 2013. Aerodynamic stability of road vehicles in dynamic pitching motion. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 122, 146-156.
- [38] **Zhu, L. D., Li, L., Xu, Y. L., Zhu, Q.,** 2012. Wind tunnel investigations of aerodynamic coefficients of road vehicles on bridge deck. *Journal of fluids and structures*, 30, 35-50.
- [39] **Sun, D., Wu, H., Lam, C. M., Zhu, R.,** 2006. Development of a small air vehicle based on aerodynamic model analysis in the tunnel tests. *Mechatronics*, 16(1), 41-49.
- [40] **Vitale, A., Corraro, F., Bernard, M., & De Matteis, G.** (2009). Identification of the transonic aerodynamic model for a re-entry vehicle. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(10), 1211-1216.
- [41] **Alam, F., Silva, P., Zimmer, G.,** 2012. Aerodynamic study of human powered vehicles. *Procedia Engineering*, 34, 9-14.
- [42] **Hassan, S. R., Islam, T., Ali, M., Islam, M. Q.,** 2014. Numerical study on aerodynamic drag reduction of racing cars. *Procedia Engineering*, 90, 308-313.
- [43] **Hetawal, S., Gophane, M., Ajay, B. K., Mukkamala, Y.,** 2014. Aerodynamic study of formula SAE car. *Procedia Engineering*, 97, 1198-1207.
- [44] **Heisler, H.,** 2002, *Advanced Vehicle Tecnology*, Second Edition, Reed Educational and Professional Publishing Ltd., Oxford, 663 p
- [45] **Demirer, A., & Aydoğan, Ö.,** 2005. *Huzurlarınızda spor Anadol: seri olarak ilk ve tek Türk tasarımı otomobilin öyküsü ve Anadol, Böcek, Çağdaş. Güncel Yayıncılık.*
- [46] **Akgül, V., Özkan, M.,** 2015., *Bir Taşıt Modeli için Hava Direnç Katsayısına Etki Eden Boyutların ve Akış Kontrol Uygulamalarının Nümerik Yöntemle İncelenmesi, ISITES2015 Valencia –Spain,1465-1474*
- [47] **Kleber, A.,** 2003. Cfd as an İntegrated Part of The Aerodynamic Development of the Opel ECO-Speedster, 1st European Automotive Cfd Conference, 27-36
- [48] **Wu, J. D., Liu, J., C.,** 2011. Development of a predictive system for car fuel consumption using an artificial neural network. *Expert Systems with Applications*, 38(5), 4967-4971.

- [49] **İçingür, Y., Solmaz, H.**, 2011. Düşük Hızlı Bir Rüzgar Tünelinde Değişik Otomobil Modellerinin Aerodinamik Direnç Katsayılarının Belirlenmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 26, No 2, 455-460.
- [50] **Hucho, W. H.**, 1978. The Aerodynamic Drag of Cars Current Understanding, Unresolved Problems, and Future Prospects. In Aerodynamic drag mechanisms of bluff bodies and road vehicles (pp. 7-44). Springer, Boston, MA.
- [51] [https://tr.wikipedia.org/wiki/Aerodinamik_\(otomobil\)](https://tr.wikipedia.org/wiki/Aerodinamik_(otomobil))
- [52] **Demircioğlu, T.**, 2007. Bir Araç Modelinin Aerodinamik Analizi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Simülasyonu. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir.
- [53] **Hucho, W. H.**, 1987. Aerodynamics Of Road Vehicles. Butterworths, London, 298-410
- [54] MMO Tesisat Mühendisliği Dergisi, Sayı 91, 2006.
- [55] **İpci, D., Yılmaz, E., Aysal, F. E., Solmaz, H.**, 2015. Bir Kara Taşıt Modeli Etrafındaki Akış Yapısının Sayısal Olarak İncelenmesi. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 12(2), 51-64.
- [56] **Eppstein, D.**, 2001. Global Optimization of Mesh Quality. Dept. Of Information and Computer Science, Meshing Roundtable, 71.
- [57] **Kurtay, T.**, 1980. Sonlu Elemanlar Yöntemine Giriş, Ders Notları, İ.T.Ü. Makina Fakültesi, Ofset Atölyesi, İstanbul.
- [58] **Pelosi, G.**, 2007. The finite-element method, part i: R1 courant [historical corner]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 49(2), 180-182.
- [59] **Patankar, S. V.**, 1980. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow (Hemisphere, New York, 1980). Google Scholar, 41-135.
- [60] http://www.yildiz.edu.tr/~cdemir/sonlu_elemanlar.pdf
- [61] **Versteeg, H. K., Malalasekera, W.**, 2007. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. Pearson Education.
- [62] **Sonmez, N.**, 2007. Buz depolamalı sistemlerde ısı transfer yapılarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, C. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas
- [63] **Eymard, R., Gallouet, T., Herbin, R.**, 2000. Finite volume methods. Handbook of numerical analysis, 7, 713-1018.
- [64] **Toro, E. F.**, 2013. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics: a practical introduction. Springer Science & Business Media.

- [65] **Lloyd, G., & Espanoles, A.**, 2002. Best practice guidelines for marine applications of computational fluid dynamics. WS Atkins Consultants and Members of the NSC, MARNET-CFD Thematic Network: London, UK, 84.
- [66] **Harrison, P.**, 1999. Quantum Wells, Wires and Dots: Theoretical and Computational Physics. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [67] **Bayram, M.**, 2009. Nümerik Analiz (Birinci Baskı). Türkiye: Birsen Yayınevi, 429-473.
- [68] **Versteeg, H. K.**, Malalasekera, W., 1995. An introduction to computational fluid dynamics- The finite volume method, Longman Scientific & Technical, London, 42-82.
- [69] **Fuat, K., İrfan K.**, 2007. Girdaplı Akışlarda Türbülans Modellerinin Uygunluğunun İncelenmesi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 12, Sayı 1, 2007
- [70] **Karamanoglu, Y., Mobedi, M., Ertöz, A.**, 2006. Pompa Tasarımının Geliştirilmesinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin Kullanılması. Tesisat Mühendisliği Dergisi, Sayı 91, 46-62,
- [71] **X, Tao., S, Fred.**, 2007. Introduction to Computational Fluid Dynamics (CFD), IIHR-Hydroscience & Engineering, C. Maxwell Stanley Hydraulics Laboratory, The University of Iowa,
- [72] <https://www.wikiname.us/vehicle-3d-model/0196>

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet YILDIZ, 1993 yılında Elâzığ’ da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Elâzığ’ da tamamladı. 2011 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü’ nü kazandı. 2012 yılında aynı fakültenin Mekatronik Mühendisliği Bölümün’ de çift anadal programına başladı. Her iki bölümde öğrenimini 2015 yılında tamamladı. 2016 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Bölümü Elektronik Sistemler Bilim Dalı’ nda Yüksek Lisans programına başladı. Ocak 2018 tarihinde Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği bölümüne araştırma görevlisi olarak atandı. Halen aynı bölümde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.