BİNEK ARAÇLARDAKİ ARKA KANATLARIN AERODİNAMİK ETKİSİNİN ANALİZİ VE HESAPLAMALI AKIŞKANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Hüseyin Meriç AYDIN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİNEK ARAÇLARDAKİ ARKA KANATLARIN AERODİNAMİK ETKİSİNİN ANALİZİ VE HESAPLAMALI AKIŞKANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Hüseyin Meriç AYDIN
502110028

Prof. Dr. Nurullah ARSLANOĞLU
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİNEK ARAÇLARDAKİ ARKA KANATLARIN AERODİNAMİK ETKİSİNİN ANALİZİ VE HESAPLAMALI AKIŞKANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Hüseyin Meriç AYDIN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Nurullah ARSLANOĞLU

Hava sürüklenme katsayısı ne kadar düşük olursa aracın yakıt ekonomisi ve performansı da o kadar yüksek olur. Ayrıca kanatçık iyileştirmeleri ile yere basma kuvveti artırılarak aracın sağlayabileceği güç kazancı da artıyor.

CFD analiz yöntemleri bu tez kapsamındaki gelişmeleri ve arka kanat tasarımlarını incelemiştir. Araçtaki olası arka kanat tasarımlarının bastırma kuvveti ve sürükleme katsayıları farklı örnek numunelerle incelenmiştir. Kanat profilleri NACA kanat profillerine eşdeğer olup, bastırma kuvveti ile sürükleme katsayısı arasındaki maksimum oranın elde edilmesi hedeflenerek benzersiz bir örnek oluşturulur. Daha sonra, kanat profillerinin tasarım parametreleri arasında bir korelasyon bulmak için, kanat profillerinin tüm gövde için karakteristik davranışı CFD yazılım araçları kullanılarak araştırılmaktadır. Özel numune için bastırma kuvveti-sürükleme katsayısı oranı, -3° derecelik hücum açısıyla 100 km/saatte -50,18'dir; Öte yandan deney için referans alınan S1223 NACA kanat profili için aynı oran, -1,5° hücum açısı ile 100 km/saat hızda -42,0036'dır. Bu durumda özel numunenin diğer test edilen NACA numunelerine göre düşük sürüklenme katsayısı ile yüksek oranda yere basma kuvveti katsayısı sağladığı gözlemlenmiştir. Bu kanat profilleri binek araç CFD analizinde arka kanat olarak kullanılmakta ve kullanılan binek aracın kaldırma ve sürükleme katsayıları özellikle yüksek hızlarda azalmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Aerodinamik, Numerik Analiz, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Sürüklenme Kuvvet Katsayısı, Kaldırma Kuvvet Katsayısı

2024, xix + 125 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

ANALYSIS OF THE AERODYNAMIC EFFECT OF REAR WINGS ON PASSENGER CARS AND INVESTIGATION WITH COMPUTATIONAL FLUID METHOD

Hüseyin Meriç AYDIN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Nurullah ARSLANOĞLU

The lower the air drag coefficient, the greater the fuel economy and performance of the vehicle. Moreover, by increasing the downforce with the winglet improvements, the power gain that the vehicle can provide also increases.

CFD analysis methods examined the developments and rear wing designs within the scope of this thesis. Downforce and drag coefficients of possible rear wing designs in the vehicle were examined with different sample samples. The airfoils are equivalent to NACA airfoils, and one unique sample is created by aiming to get the maximum ratio between downforce and drag coefficient. Then, the characteristic behavior of airfoils for the whole body is investigated using CFD software tools to find a correlation between the design parameters of airfoils. The ratio of the downforce-drag coefficient for the unique sample is -50.18 at 100 km/h with a -3° degree angle of attack; on the other hand, the same ratio for the S1223 NACA airfoil, which is referenced for the experiment, is -42.0036 at 100 km/h with -1.5° degree angle of attack. In this case, it was observed that the unique sample provided a low drag coefficient and a high downforce coefficient compared to the other tested NACA samples. These airfoils are used as a rear wing in the passenger car CFD analysis, and the lift and drag coefficients of the passenger vehicle used are decreasing, especially for higher velocities.

Key words: Aerodynamics, Numerical Analysis, Computational Fluid Dynamics, Drag Coefficient, Lift Coefficient

2024, xix + 125 pages.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Yüksek lisans sürecim boyunca çok değerli vaktini, deneyimlerini ve manevi desteğini esirgemeyen çok değerli danışman öğretmenim Prof. Dr. Nurullah ARSLANOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte yanımda bana her zaman destek olan, beni bu zamanda her türlü maddi ve manevi destekleyen çok değerli eşim Ayşe SÖNMEZ AYDIN'a ve çok değerli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Hüseyin Meriç AYDIN
24/06/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET....viii
ABSTRACT....ix
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR....x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ....xii
1.GİRİŞ....1
2.KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI....3
2.1.Maddelerin Sınıflandırılması....3
2.2.Reynolds Sayısı....3
2.3.Yoğunluk....4
2.4.Vizkozite....5
2.5.Viskoz Olmayan Akışlar....6
2.6.Viskoz Akışlar....6
2.7.Laminar ve Türbülanslı Akışlar....6
2.8.Spoiler (Rüzgarlık)....7
2.9.Kanat Profili....8
2.10.Sınır Tabaka....10
2.11.Akış Ayrılması....14
2.12.Kaldırma Kuvveti....16
2.13.Bastırma Kuvveti....17
2.14.Bernoulli Prensibi....17
2.15.Newton'un Üçüncü Yasası....18
2.16.Sürüklenme Kuvveti....19
2.17.Bir Araca Etki Eden Aerodinamik Kuvvetler ve Momentler....20
2.18.Kaynak Özetleri....21
3. MATERYAL ve YÖNTEM....30
3.1.Nümerik Analiz....30
3.2.Navier-Stokes Denklemi....32
3.3.Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) Türbülans Modeller....33
3.4.Geniş Eddy Simülasyon (LES) Türbülans Modelleri....34
3.5.Direkt Nümerik Çözüm (DNS) Türbülans Modelleri....35
3.6.Kanat Profili Parametrelerine Göre Tasarımın Yapılması....36
3.6.1.Kamber (Camber)....36
3.6.2.Ön kenar yarıçapı (Leading edge radius)....36
3.6.3.Veter hattı (Chord line)....36
3.6.4.Kanat boy-en oranı....37
3.6.5.Kanat tasarımlarının belirlenmesi....37
3.7.Kanat Profillerin Nümerik Analizi....41
4. BULGULAR (BULGULAR ve TARTIŞMA)....51
4.1.Kanat Profilleri Nümerik Analizin Validasyonu....51
4.2.Kanat Profillerinin Nümerik Analiz Değerleri....60
4.3.Kanat Profillerinin Araç Üzerindeki Nümerik Analizi....90
5. SONUÇ....117
KAYNAKLAR....121
ÖZGEÇMİŞ....125

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
°	Derece
δ	Sınır Tabaka Kalınlığı
δ_d	Sınır Tabaka Yer Değiştirme Kalınlığı
δ_m	Sınır Tabaka Momentum Kalınlığı
δ_e	Sınır Tabaka Enerji Kalınlığı
ϕ	LES Denklemi
A	Alan
C_D	Sürüklenme Kuvveti Katsayısı
C_f	Yüzey Sürtünme Katsayısı
C_L	Kaldırma Kuvveti Katsayısı
C_g	Ağırlık Merkezi
C_P	Basınç Merkezi
D	Çap
e	Birim Kütle Başına Düşen Enerji Miktarı
ε	Kinetik Enerji Dağılım Oranı
f_i	Dış Kuvvetler Matrisi
F_D	Sürüklenme Kuvveti
F_L	Kaldırma Kuvveti
F_Y	Yanal Kuvvet
G	Filtreli Evrişim Çekirdeği
g	Sınır Tabakalar Arası Büyüme Oranı
h	Aşamalı Artış Katsayısı
kg	Kilogram
L	Kaldırma Kuvveti
m	Kütle
M_P	Yunuslanma Momenti
M_R	Yuvarlanma Momenti
M_Y	Yana Kayış Momenti
η	Kolmogorov Ölçeği
μ	Dinamik Vizkozite
p	Basınç
ρ	Yoğunluk
r	Yarıçap
Re	Reynolds Sayısı
$\dot{q}$	Isı Transferi Oranı
s	Saniye
$\bar{S}_{ij}$	Ana Gerilim Tensörü
τ	Kayma Gerilimi
τ_w	Yüzey Sürtünme Katsayısı
t	Zaman
u	X-eksenindeki Vektörel Hız
u^+	Boyutsuz Hız
U	Sürtünme Hız Değeri

U_0	Serbest Akış Hızı
V	Hız
$\forall$	Hacim
v	Y-eksenindeki Vektörel Hız
y^+	Boyutsuz Mesafe
w	Z-eksenindeki Vektörel Hız

Kısaltmalar	**Açıklama**
AR	Boy En Oranı
CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Direkt Nümerik Çözüm Türbülans Modelleri
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
LES	Geniş Eddy Simülasyon Türbülans Modeli
NACA	The National Advisory Committee for Aeronautics
OSAA	Orta Seviyede Araç Alanı
SI	International System
SUV	Sport Utility Vehicle
RANS	Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes Türbülans Modeli
SST	Kesme Gerilimi Taşınımı
STL	Stereolitografi
USAA	Uzak Seviyede Araç Alanı
YSAA	Yakın Seviyede Araç Alanı

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Bir akışın hız profili.....	4
Şekil 2.2.	Vizkozite direncinin fiziksel modellenmesi.....	5
Şekil 2.3.	Akış rejimlerinin örnek görseli.....	7
Şekil 2.4.	Rüzgarlık.....	8
Şekil 2.5.	Kanat profilinin geometrik bölgeleri.....	8
Şekil 2.6.	Kanat en/boy oranının tanımı.....	10
Şekil 2.7.	Sınır tabakası kalınlığının görseli.....	11
Şekil 8.	Y+ tabaka değerleri.....	13
Şekil 2.9.	Akış ayrılması.....	14
Şekil 2.10.	Araç arkasında oluşan sürüklenme kuvvetinin rüzgarlık kullanımı ile azalması.....	15
Şekil 2.11.	Bir aracın arka tarafındaki akış ayrılma örneği.....	16
Şekil 2.12.	Bastırma kuvvetinin oluşumu.....	17
Şekil 2.13.	Kaldırma kuvveti oluşumu.....	18
Şekil 2.14.	Sürüklenme kuvvetinin oluşumu.....	19
Şekil 2.15.	Araç Üzerindeki Aerodinamik Kuvvetler ve Momentler...	20
Şekil 2.16.	Ahmed modeli izometrik görünüm.....	21
Şekil 2.17.	Ahmed modeli yan görünüm.....	22
Şekil 2.18.	Ağ örgüsü- deneysel sonuç kıyası.....	23
Şekil 2.19.	Atak açısına göre bazı kanat profillerinin kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvveti katsayısının değişimi.....	24
Şekil 2.20.	Kullanılan girdap üreticilerinin araç üzerindeki sürüklenme kuvveti katsayısına etkisi.....	25
Şekil 2.21.	Kullanılan girdap üreticilerinin araç üzerindeki kaldırma kuvveti katsayısına etkisi.....	26
Şekil 2.22.	Kullanılan girdap üreticilerinin sürüklenme kuvveti katsayısına etkisi.....	26
Şekil 2.23.	Araca yapışık olmayan kanat biçimi.....	28
Şekil 2.24.	Araca yapışık olan kanat biçimi.....	28
Şekil 3.1.	Özel kanadın oluşturulmasında referans alınan kanat profili doğruları.....	38
Şekil 3.2.	S1223(yeşil) - 4412(kırmızı) üst kanat yapısı kıyası.....	39
Şekil 3.3.	Ön kanattaki S1223(yeşil) - 4412(kırmızı) alt kanat yapısı kıyası.....	40
Şekil 3.4.	Alt kanadın yapılandırılması.....	40
Şekil 3.5.	Özel tasarımın yandan görünüşü.....	41
Şekil 3.6.	Özel tasarımın izometrik görünüşü.....	41
Şekil 3.7.	Numune 1 izometrik görüntü.....	43
Şekil 3.8.	Numune 1 teknik resim ölçüleri.....	43
Şekil 3.9.	Numune 2 izometrik görüntü.....	44
Şekil 3.10.	Numune 2 teknik resim ölçüleri.....	44
Şekil 3.11.	Numune 3 izometrik görüntü.....	45
Şekil 3.12.	Numune 3 teknik resim ölçüleri.....	45
Şekil 3.13.	Numune 4 izometrik görüntü.....	46
Şekil 3.14.	Numune 4 teknik resim ölçüleri.....	46

Şekil 3.15.	Nümerik analiz çözüm metodu.....	47
Şekil 3.16.	İlk durumda incelenen nümerik analiz düzeneği.....	48
Şekil 3.17.	İkinci durumda kanat profillerinin yüksekliğini inceleyen nümerik analiz düzeneğinin yakından görünümü.....	48
Şekil 3.18.	İki adet kanatlı senaryodaki ikinci kanadın yüksekliğini inceleyen nümerik analiz metodu.....	49
Şekil 3.19.	Dikkate alınan hız değeri.....	49
Şekil 4.1.	Deneme yapılacak olan kanat profili uzunluğu görseli.....	51
Şekil 4.2.	Genel ağ yapısı – yüksek detaylı ağ örgüsü (ağ büyüklüğü = 0.1m & kenar parça detayı = 800 adet)….....	53
Şekil 4.3.	Sınır tabaka ağ yapısı – yüksek detaylı ağ örgüsü (ağ büyüklüğü = 0.1m & kenar parça detayı = 800 adet).....	54
Şekil 4.4.	Genel ağ yapısı – orta detaylı ağ örgüsü (ağ büyüklüğü = 0.15m & kenar parça detayı = 600 adet)……..…..	54
Şekil 4.5.	Sınır tabaka ağ yapısı – orta detaylı ağ örgüsü (ağ büyüklüğü = 0.15m & kenar parça detayı = 600 adet)…….....	55
Şekil 4.6.	Genel ağ yapısı – düşük detaylı ağ örgüsü (ağ büyüklüğü = 0.2m & kenar parça detayı = 400 adet).....	55
Şekil 4.7.	Sınır tabaka ağ yapısı – düşük detaylı ağ örgüsü (ağ büyüklüğü = 0.2m & kenar parça detayı = 400 adet).....	56
Şekil 4.8.	Havanın özellikleri.....	56
Şekil 4.9.	Havanın hız değeri.....	57
Şekil 4.10.	Ağ örgüsüne göre kaldırma kuvveti katsayısı değerleri.....	58
Şekil 4.11.	Yüksek detaylı ağ örgüsüne göre sürüklenme katsayısı değerleri.....	59
Şekil 4.12.	Basınç dağılımı.....	60
Şekil 4.13.	Hata-tekrar grafiği.....	61
Şekil 4.14.	Hata değerleri.....	61
Şekil 4.15.	Analizin kaldırma kuvveti katsayısı grafiği.....	62
Şekil 4.16.	Analizin sürüklenme kuvveti katsayısı grafiği.....	62
Şekil 4.17.	NACA 2408 atak açısına göre CL değerleri.....	63
Şekil 4.18.	NACA 2408 atak açısına göre CD değerleri.....	64
Şekil 4.19.	Naca atak açısına göre CL/CD oranı.....	64
Şekil 4.20.	NACA S1223 atak açısına göre CL değerleri.....	65
Şekil 4.21.	NACA S1223 atak açısına göre CD değerleri.....	66
Şekil 4.22.	NACA S1223 atak açısına göre CL/CD oranı.....	66
Şekil 4.23.	NACA 2408 & NACA S1223 atak açısına göre CL değerleri.....	67
Şekil 4.24.	NACA 2408 & NACA S1223 atak açısına göre CD değerleri.....	67
Şekil 4.25.	NACA 2408 & NACA S1223 atak açısına göre CL/CD oranı.....	68
Şekil 4.26.	NACA S1223, Re = 500000 ve -1.5° atak açısındaki basınç dağılımı.....	69

Şekil 4.27. NACA S1223, Re = 500000 ve -1.5° atak açısındaki hız dağılımı..... 69
Şekil 4.28. NACA S1223, Re = 500000 ve -1.5° atak açısındaki akış dağılımı..... 70
Şekil 4.29. NACA S1223, V=27.77 m/s, uzunluk=0.2m, -1.5° atak açısındaki basınç dağılımı..... 71
Şekil 4.30. NACA S1223, V=27.77 m/s, uzunluk=0.2m, -1.5° atak açısındaki hız dağılımı..... 71
Şekil 4.31. NACA S1223, V=27.77 m/s, uzunluk=0.2m, -1.5° atak açısındaki akış dağılımı..... 72
Şekil 4.32. 2. Numunenin tek taraftaki kaldırma kuvveti hesabı için gerekli olan alan ölçüsü görseli..... 73
Şekil 4.33. 2. Numunenin tek taraftaki kaldırma kuvveti hesabı için gerekli olan alan ölçüsü..... 73
Şekil 4.34. Ön yüzey için dikey uzunluk..... 74
Şekil 4.35. Kanat profilinin dikey uzunluğu..... 74
Şekil 4.36. Ön yüzey için yatay uzunluk..... 74
Şekil 4.37. Kanat profilinin yatay uzunluğu..... 75
Şekil 4.38. Özel tasarım CL değerleri..... 76
Şekil 4.39. Özel tasarım CD değerleri..... 76
Şekil 4.40. Özel tasarım CL/CD oranı..... 77
Şekil 4.41. Numune 2 & numune 3 - CL değerleri..... 78
Şekil 4.42. Numune 2 & numune 3 - CD değerleri..... 78
Şekil 4.43. Numune 2 & numune 3 - CL/CD oranı değerleri..... 79
Şekil 4.44. Özel tasarım, Re = 500000 ve -3° atak açısındaki basınç dağılımı..... 80
Şekil 4.45. Özel tasarım, Re = 500000 ve -3° atak açısındaki hız dağılımı..... 80
Şekil 4.46. Özel tasarım, Re = 500000 ve -3° atak açısındaki akış dağılımı..... 81
Şekil 4.47. Özel tasarım, V=27.77 m/s, uzunluk=0.2m, -1.5° atak açısındaki basınç dağılımı..... 82
Şekil 4.48. Özel tasarım, V=27.77 m/s, uzunluk=0.2m, -1.5° atak açısındaki hız dağılımı..... 82
Şekil 4.49. Özel tasarım, V=27.77 m/s, uzunluk=0.2m, -1.5° atak açısındaki akış dağılımı..... 83
Şekil 4.50. 3. Numunenin tek taraftaki kaldırma kuvveti hesabı için gerekli olan alan ölçüsü görseli..... 84
Şekil 4.51. 3. Numunenin tek taraftaki kaldırma kuvveti hesabı için gerekli olan alan ölçüsü..... 84
Şekil 4.52. Ön yüzey için yatay uzunluk..... 85
Şekil 4.53. Kanat profilinin yatay uzunluğu..... 85
Şekil 4.54. Ön yüzey için dikey uzunluk..... 85
Şekil 4.55. Kanat profilinin dikey uzunluğu..... 86
Şekil 4.56. Numune 4 izometrik görüntü..... 88
Şekil 4.57. Numune 4 çift kanat, V=27.77 m/s, uzunluk=0.2m, -1.5° atak açısındaki basınç dağılımı..... 88

Şekil 4.58. Numune 4 çift çanat, V=27.77 m/s, uzunluk=0.2m, -1.5° atak açısındaki hız dağılımı..... 89
Şekil 4.59. Numune 4 çift kanat, V=27.77 m/s, uzunluk=0.2m, -1.5° atak açısındaki akış dağılımı..... 89
Şekil 4.60. Numune 3 montajlı araç katı modeli..... 90
Şekil 4.61. Numune 3 montajlı araç modeli çıkartılmış akış hacmi – YZ düzlemi..... 91
Şekil 4.62. Numune 3 montajlı araç modeli çıkartılmış akış hacmi – XY düzlemi..... 91
Şekil 4.63. Teker etki bölgeleri..... 92
Şekil 4.64. Kanat etki bölgesi..... 92
Şekil 4.65. YSAA etki bölgesi..... 93
Şekil 4.66. OSAA etki bölgesi..... 93
Şekil 4.67. USAA etki bölgesi..... 93
Şekil 4.68. Teker kısmının akış hacmine uyarlanması..... 93
Şekil 4.69. Araç ağ örgüsü örneği..... 94
Şekil 4.70. İlk analizin (numunesiz, 100 km/h) hata değerleri..... 95
Şekil 4.71. İlk analizin (numunesiz, 100 km/h) kaldırma kuvveti katsayısı grafiği..... 95
Şekil 4.72. İlk analizin (numunesiz, 100 km/h) sürüklenme katsayısı grafiği..... 96
Şekil 4.73. Nümerik analizi yapılan araç datasının 100 km/saat hızındaki sürüklenme katsayısı..... 96
Şekil 4.74. 80 km/saat Hızındaki sürüklenme kuvveti katsayısı…..... 97
Şekil 4.75. 100 km/saat Hızındaki sürüklenme kuvveti katsayısı..... 97
Şekil 4.76. 120 km/saat Hızındaki sürüklenme kuvveti katsayısı..... 98
Şekil 4.77. 80 km/saat Hızındaki kaldırma kuvveti katsayısı..... 98
Şekil 4.78. 100 km/saat Hızındaki kaldırma kuvveti katsayısı..... 99
Şekil 4.79. 120 km/saat Hızındaki kaldırma kuvveti katsayısı..... 99
Şekil 4.80. Kaldırma kuvveti katsayısının numunelere göre değişimi..... 100
Şekil 4.81. Sürüklenme kuvveti katsayısının numunelere göre değişimi..... 101
Şekil 4.82. (80 km/saat) Numunesiz araç gövdesi..... 102
Şekil 4.83. (80 km/saat) 1. Numuneli araç gövdesi..... 102
Şekil 4.84. (80 km/saat) 2. Numuneli araç gövdesi..... 103
Şekil 4.85. (80 km/saat) 3. Numuneli araç gövdesi..... 103
Şekil 4.86. (80 km/saat) 4. Numuneli araç gövdesi..... 104
Şekil 4.87. (80 km/saat) Numunesiz araç gövdesi..... 104
Şekil 4.88. (80 km/saat) 1. Numuneli araç gövdesi..... 105
Şekil 4.89. (80 km/saat) 2. Numuneli araç gövdesi..... 105
Şekil 4.90. (80 km/saat) 3. Numuneli araç gövdesi..... 106
Şekil 4.91. (80 km/saat) 4.Numuneli araç gövdesi..... 106
Şekil 4.92. (100 km/saat) Numunesiz araç gövdesi..... 107
Şekil 4.93. (100 km/saat) 1. Numuneli araç gövdesi..... 107
Şekil 4.94. (100 km/saat) 2. Numuneli araç gövdesi..... 108
Şekil 4.95. (100 km/saat) 3. Numuneli araç gövdesi..... 108
Şekil 4.96. (100 km/saat) 4. Numuneli araç gövdesi..... 109

Şekil 4.97. (100 km/saat) Numunesiz araç gövdesi..... 109
Şekil 4.98. (100 km/saat) 1. Numuneli araç gövdesi..... 110
Şekil 4.99. (100 km/saat) 2. Numuneli araç gövdesi..... 110
Şekil 4.100. (100 km/saat) 3. Numuneli araç gövdesi..... 111
Şekil 4.101. (100 km/saat) 4. Numuneli araç gövdesi..... 111
Şekil 4.102. (120 km/saat) Numunesiz araç gövdesi..... 112
Şekil 4.103. (120 km/saat) 1. Numuneli araç gövdesi..... 112
Şekil 4.104. (120 km/saat) 2. Numuneli araç gövdesi..... 113
Şekil 4.105. (120 km/saat) 3. Numuneli araç gövdesi..... 113
Şekil 4.106. (120 km/saat) 4. Numuneli araç gövdesi..... 114
Şekil 4.107. (120 km/saat) Numunesiz araç gövdesi..... 114
Şekil 4.108. (120 km/saat) 1.numuneli araç gövdesi..... 115
Şekil 4.109. (120 km/saat) 2.Numuneli araç gövdesi..... 115
Şekil 4.110. (120 km/saat) 3.Numuneli araç gövdesi..... 116
Şekil 4.111. (120 km/saat) 4.Numuneli araç gövdesi..... 116

ÇİZELGELER DİZİNİ

			Sayfa
Çizelge	4.1.	Ağ yapısına göre kaldırma kuvveti katsayısı değerleri……..….	57
Çizelge	4.2.	Ağ yapısına ve test verilerine göre kaldırma kuvveti katsayısı değerleri……..	58
Çizelge	4.3.	Yüksek detaylı ağ örgüsüne göre sürüklenme kuvveti katsayısı değerleri..……..……...	59
Çizelge	4.4.	Naca 2408 CL-CD değerleri……	63
Çizelge	4.5.	Naca S1223 CL-CD değerleri……..	65
Çizelge	4.6.	Numune 2 - kanatların yerden yüksekliğine göre CL-CD değerleri..…….	72
Çizelge	4.7.	Özel tasarım CL-CD değerleri…….....	77
Çizelge	4.8.	Numune 3 - kanatların yerden yüksekliğine göre CL-CD değerleri….……..	83
Çizelge	4.9.	Numune 2 & numune 3 - kanatların yerden yüksekliğine göre CL-CD değerleri……..	86
Çizelge	4.10.	Numune 4 - kanatların yerden yüksekliğine göre CL-CD değerleri..……..…	87
Çizelge	4.11.	Kaldırma kuvveti katsayısının numunelere göre değişimi…..…	100
Çizelge	4.12.	Sürüklenme kuvveti katsayısının numunelere göre değişimi…..	101

1. GİRİŞ

Ulaşımın yegâne temeli olan bu araçlar günümüzde farklı çeşitleri ile karşımıza çıkmaktadır. Otomotivin amacı bir yükü veya bir insanı bir yerden başka bir yere taşımaktır. Binek araçların varlığı insanlık tarihinde ulaşımın kolaylaştırılması konusunda önemli rol oynamıştır. Binek araçların varlığı 1886 yılının başından beri Carl Benz'in patentli ürünüyle hayatımızda bulunmaktadır (The First Automobile, 2023). Seri üretime ise doğru ve güçlü bir şekilde giren kişi Henry Ford olarak görülür. "Büyük bir kitleye hitap eden bir araba" hayalini gerçekleştirmede daha başarılı olan Ford, önce arabasını tasarladı, sonra onu ucuza üretme sorununu ele aldı ve Model T aracını piyasaya sürdü (Automotive Industry, 2023).

Geçmişten günümüze araçlar tıpkı diğer makineler belli bir enerji harcamasıyla işlevlerini yerine getirmektedir. Bu harcanan enerjilerin kaynakları petrol türevleri ve günümüzün gündemdeki teknolojisi olan elektriktir. Aracın ihtiyacı olduğu itiş gücü, aracın motorundan sağlanmaktadır ve güç enerjisi araçtan araca farklılık göstermektedir.

Günümüzde çevreyi koruma amacı ile petrol yakıt tüketimini azaltmak için ihtiyaç olan gücü daha aza indirgemek için firmalar araştırma ve geliştirme faaliyetleri gösterir. Araçların ihtiyaç duyduğu itiş gücünü düşürmek için başka parametreler devreye girer. Bu parametreler ağırlık, yakıt tipi veya aracın aerodinamik tasarımı olabilir.

Aerodinamik, havanın hareketini ve onun akış alanına engel olarak yerleştirilen katı cisimler üzerindeki etkisini inceleyen bilim dalıdır. (What is Aerodynamics?) Aerodinamik sözcüğü 1800'lerin ortalarından beri ortalıkta dolaşıyor; Yunanca aero-, "hava" ön eki ile Yunanca "güçlü" anlamına gelen dynamikos'tan fiziğin birçok dalına uygulanan bir kelime olan dinamikleri birleştiriyor. (Aerodynamics, 2023)

Aerodinamik bilim dalının başlıca ilgi alanları,

- Hava-Uzay Sektörü
- Kara Ulaşım Sektörü
- Deniz Ulaşım Araçları

- Yapılar
- Enerji Sektörü
- Diğer (İklimlendirme, Havalandırma, vs… (Aerodinamiğin İlgi Alanları, 2006)

Otomotiv dünyasında ise yakıt tüketimini azaltmak, çevreyi koruma ve sıfır emisyon prensibini uygulamak için aracın aerodinamik etkilerini arttıran tasarımlar kullanılır. Üstelik tasarımlarda aerodinamik etkiye dikkat edilmesi araçlardaki yakıt tüketimini azaltılmasında, aracın hareket kabiliyetini arttırılmasında, araçtaki gürültü seviyesinin düşmesinde ve taşıttaki iklimlendirme verimliliğinin arttırılmasında önemli rol oynar (TAŞITLARDA AERODİNAMİK, 2023).

Araçlardaki aerodinamik etkinin arttırılması sınır tabakanın korunumuna bağlıdır. Sınır tabaka teorisi, akışkanlar dinamiğinde, katı bir yüzeye bitişik ince akışkan tabakası olan sınır tabakasının davranışını analiz etmeyi ve anlamayı amaçlayan teorik bir çerçevedir. Sınır tabakası içindeki hız, basınç, sıcaklık ve diğer akış özelliklerini tanımlamak için matematiksel modeller ve ilkeler sağlar.

Aerodinamikte sınır tabakası, bir uçağın kanadının veya herhangi bir başka aerodinamik cismin yüzeyine bitişik olan ince hava tabakasını ifade eder. Sınır katmanının davranışı, nesnenin genel aerodinamik performansını önemli ölçüde etkiler.

Hava, bir aracın arka kanadının yüzeyinden akarken, başlangıçta viskoz kuvvetler nedeniyle yüzeye yapışır. Bu, laminer sınır tabakası adı verilen, yavaşlatılmış havadan oluşan ince bir tabaka oluşturur. Ancak hava akışı devam ettikçe basınç gradyanları ve yüzey düzensizlikleriyle karşılaşır ve bu da laminer sınır katmanının türbülanslı sınır katmanına geçişine yol açar.

Sınır tabakası birçok aerodinamik olayda çok önemli bir rol oynar. Kanat etrafındaki hava basıncının dağılımını etkileyerek kaldırma kuvveti oluşmasına neden olur. Aynı zamanda, hem sınır tabakası içindeki kayma geriliminin neden olduğu yüzey sürtünme direnci hem de kanadın üst ve alt yüzeyleri arasındaki basınç farklarının neden olduğu basınç direnci olmak üzere sürükleme kuvvetinin oluşumunu da etkiler. (Boundary Layer Theory – Definition And Applications, 2023)

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1.Maddelerin Sınıflandırılması

Maddenin tüm formları moleküler arası kuvvetlere göre katılar ve akışkanlar olarak ikiye ayrılır. Bu yüzden bu sınıflandırma deformasyon direncine bağlıdır.

Katılar, maddenin alakalı pozisyonlarındaki moleküller ile çok güçlü moleküler arası kuvvetlere sahip olan halidir. Bu yüzden katılar belirli hacim ve şekillere sahiptir.
İngilizce'si "fluid" olan akış kelimesi Latince'de "fluidus" kökeninden gelmektedir. Akışkanlar, katılar ile kıyaslandığında daha az moleküler arası kuvvete sahiptir. Akışkanlar da kendi arasında sıvılar ve gazlar olmak üzere ikiye ayrılır.

Sıvılar, maddenin komşu pozisyonlardaki moleküller ile orta güçlü moleküler arası çekim kuvvetine sahip olan halidir. Bu yüzden sıvılar belirli bir hacme sahip olsa da belirli bir şekle sahip değildir.
Gazlar maddenin komşu pozisyonlardaki moleküller ile en az güçlü moleküler arası çekim kuvvetine sahip olan halidir. Bundan dolayı gazlar için ne bir hacme ne de bir şekle sahiptir diyemeyiz. (Aksel, 1996)

2.2. Reynolds Sayısı

Nesne atmosferde hareket ettikçe, atmosferdeki nesneye yakın olan gaz molekülleri karışır ve nesnenin etrafında hareket eder. Dolayısıyla bu gaz molekülleri ile nesne arasında aerodinamik kuvvetler oluşur. Kuvvetler bazı parametrelerden etkilenir (Reynolds Number, 2023) Parametreler:

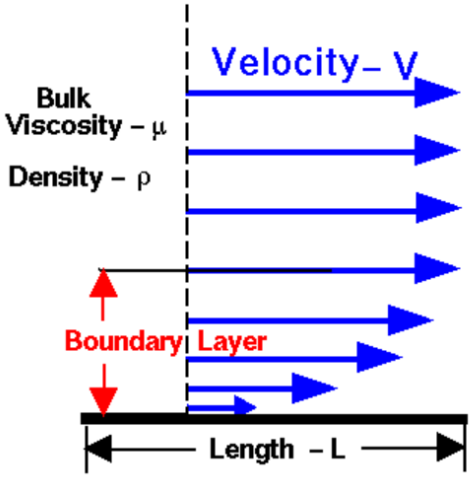
- Akış Hızı
- Akış Kütlesi
- Viskozite

Reynolds sayısı, akışkanları bu parametrelere göre sınıflandırmak için önemli parametrelerden biridir. Reynolds sayısı, akışkanların hızlarını veya akış düzenini kontrol

etmede viskozite etkisinin önemli olduğu akışkan sistemlerini sınıflandırırken gerçekten etkilidir. Boyutsuz bir parametredir ve akışkanın atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlerine oranını temsil eder (Timmer, 2023)

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \tag{2.1}$$

- ρ = Yoğunluk
- V = Akış Hızı
- D = Çap
- μ = Dinamik Viskozite



Şekil 2.1. Bir akışın hız profili (Şekil https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/reynolds.html adresinden alınmıştır)

2.3. Yoğunluk

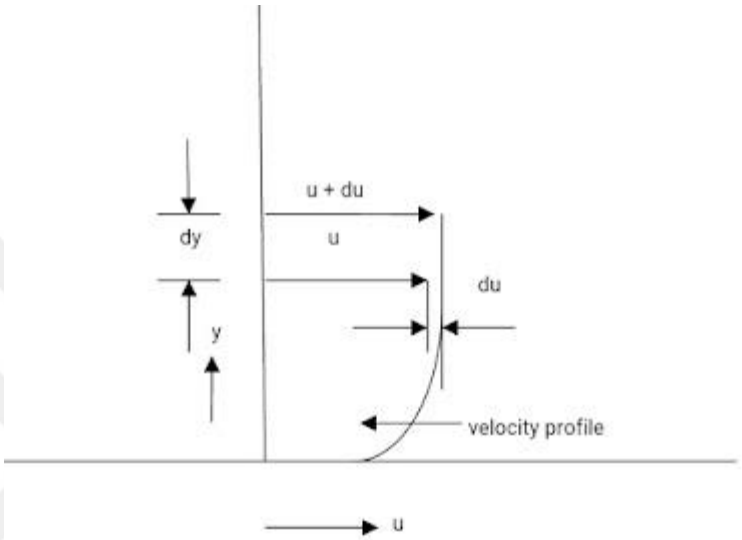
Yoğunluk maddenin birim hacimdeki kütlesinin, birim hacmine oranıdır.

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{2.2}$$

Uluslararası birimi (SI) kg/m^3'tür. Yoğunluk basınç ve sıcaklık altında değişkenlik göstermektedir. Genellikle yoğunluk, sistem basıncı artarken artar, ortam sıcaklığı artarken düşer. Üstelik yoğunluk, maddeden maddeye farklılık gösterir. (General Chemistry A Molecular Approach, 2023)

2.4.Vizkozite

Viskozite, bir akışkanın akış davranışını belirleyen bir özelliğidir. Viskozite ne kadar yüksek olursa akışın akması o kadar zor olur. Vizkozite akışın hareketine gösterilen dirençtir. Hava, suya göre düşük viskoziteye sahiptir ve su, zeytinyağına kıyasla düşük viskoziteye sahiptir.



Şekil 2.2. Vizkozite direncinin fiziksel modellenmesi (Şekil fluidmechanics-dbatu.blogspot.com adresinden alınmıştır)

Akışkan, kayma gerilimin büyüklüğüne bakılmaksızın, bu gerilimin altında sürekli deforme olan bir maddedir. Yani, bir akışkan maddesi hareketsizken kayma gerilmesine karşı koyamaz.

Newton tipi akışkanlar olarak adlandırılan belirli akışkanlar için, akış yönüne teğet bir yüzey üzerindeki kayma gerilimi, kayma gerilimin hızıyla veya hız gradyanı (hızın yüzeye normal yönde değişmesi) ile doğru orantılıdır. Bu duruma Newton'un vizkozite yasası olarak bilinir ve yukarıdaki şekildeki u eksenine göre formülü aşağıdaki gibidir. (Aksel, 1996)

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \tag{2.3}$$

Dinamik vizkozite (μ) dış bir kuvvet etkisindeki akışkanın akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Akış tipleri de kendi içinde sınıflandırılır.

2.5.Viskoz Olmayan Akışlar

Aynı zamanda ideal akışkanlar olarak isimlendirilen bu akışkanlarda dinamik vizkozite değeri sıfırdır. İdeal akışkanların asıl kavramı hayalidir ve akış olgusunu analitik analizlerinde kullanılır. Akışların matematiksel modellendirilmesi, kullanılan akışkanları ideal akış olarak değerledirilerek basitleştirilebilir. (Aksel, 1996)

2.6. Viskoz Akışlar

Bu akışkanlar gerçek akışkanlar olarak adlandırılır ve Newton tipi akış ve Newton tipi olmayan akış olmak üzere iki kısımda incelenir.

Newton tipi akışkanlar kayma geriliminin hız gradyanı ile direkt doğru orantılıdır. Günlük hayatta sürekli karşımıza çıkan Newton tipi akışkanlara örnek olarak hava, su, zeytinyağı ve benzini gösterebiliriz. Bu akışkanların viskozitesi zamandan bağımsızdır.

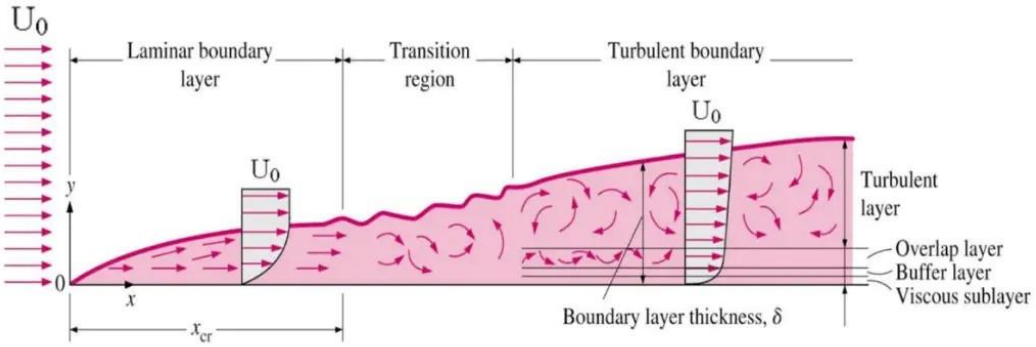
Newton tipi olmayan akışkanların viskozitesi ise zamandan bağımlı veya zamandan bağımsız olabilir. Bu tip akışkanlara örnek olarak tereyağ, kalem mürekkebi, diş macunu gösterebiliriz. (Aksel, 1996)

2.7. Laminar ve Türbülanslı Akışlar

Laminer akış, akışkanın paralel katmanlar halinde aktığı akış rejimidir ve aynı zamanda düzenli akış olarak da adlandırılmıştır. Akış yönünün dışında hiçbir akıntı veya girdap yoktur. Laminer bir akışın genel özellikleri yüksek viskoziteli ve düşük hızlı akışkanlar olmasıdır.

Türbülanslı akış, laminer akışın aksine girdaplar ve türbülans içeren, düzensiz bir akış rejimidir. Laminer akışın tam tersi olarak türbülanslı akışların genel özelliği düşük

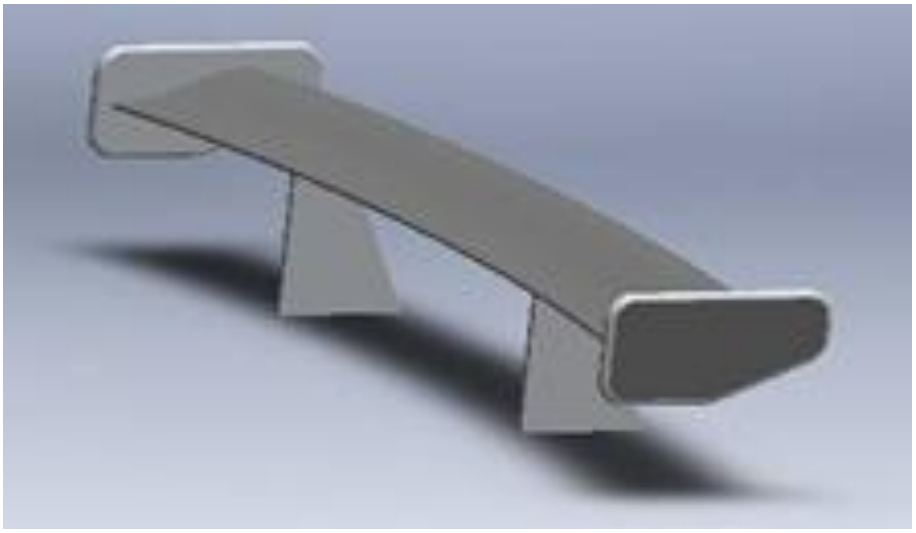
viskoziteli veya yüksek hızlı akışkanlardır. Gerçek hayatta karşılaştığımız akışların çoğu türbülanslıdır. Ayrıca türbülanslı ve laminer akış arasında geçiş yapan akış rejimi de geçiş akışı olarak tanımlanmaktadır. (Aksel, 1996)



Şekil 2.3. Akış rejimlerinin örnek görseli (Şekil nuclear-power.com adresinden alınmıştır)

2.8.Spoiler (Rüzgarlık)

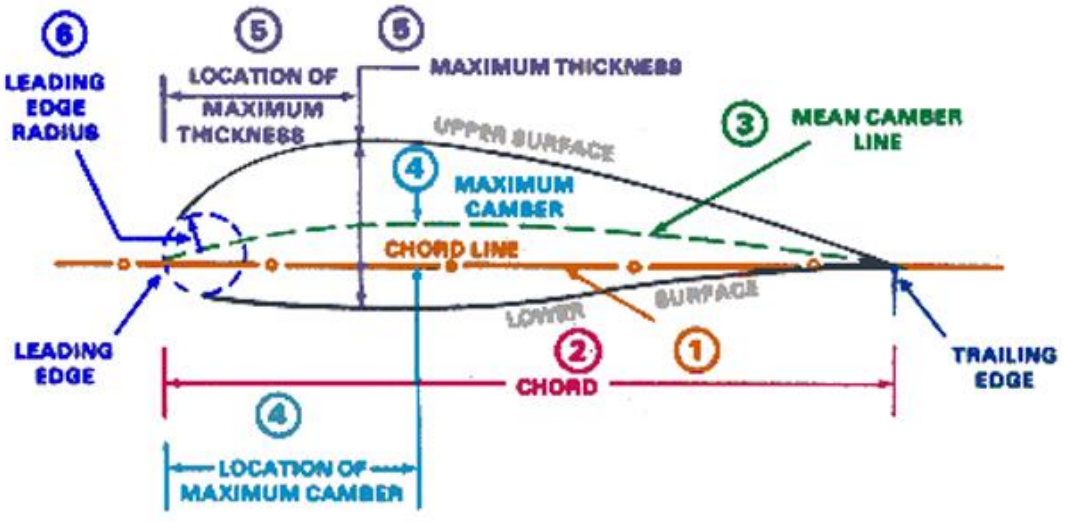
Sürtünme kuvveti, hava ile araç arasındaki bağıl hareketle ve arka uçtaki toplam sürüklemenin yaklaşık %60'ı ile üretilir. Rüzgarlık, aerodinamik performansı artırmak için sedan tabanlı araba modellerinde arka uçta kullanılan bir cihazdır. Rüzgarlık, "hareket halindeki bir arabanın gövdesi boyunca olumsuz hava hareketinin bozulması" anlamına gelir ve her zaman aerodinamik performansı etkiler. Rüzgarlık arabanın ön tarafına ve arabanın arka tarafına monte edilir, ön yan rüzgarlığa hava barajı denir ve rüzgarlığın arka tarafına da arka kanat denir. Ön yan rüzgarlık (Hava barajları) hava akışını yönlendirir, aynı zamanda aracın altından akan hava miktarını da azaltır, bu da genellikle aerodinamik kaldırma ve sürüklemeyi azaltır. Araba yarışlarında performansı artırmak için spor arabaların arka ucuna spoiler takılır, spoiler yardımıyla daha iyi araç kullanımı mümkündür. Rüzgarlıklar ayrıca akış ayrılmasını geciktirmeye de yardımcı olur ve rüzgarlık önündeki daha yüksek basınç, yere basma kuvveti oluşturarak araçtaki kaldırma kuvvetini azaltmaya yardımcı olabilir. Bu, bazı durumlarda sürtünmeyi azaltabilir ve arka kaldırma kuvvetinin azalması nedeniyle genellikle yüksek hız stabilitesini artırır. Binek araçlarda kullanılan birçok spoylerin amacı sürtünmeyi azaltmak ve yakıt verimliliğini arttırmaktır. (Enhancement of Aerodynamic Drag Reduction of Passenger Vehicle using CFD analysis Review, 2017)



Şekil 2.4. Rüzgarlık (Şekil "Enhancement of Aerodynamic Drag Reduction of Passenger Vehicle using CFD analysis Review "makalesinden alınmıştır)

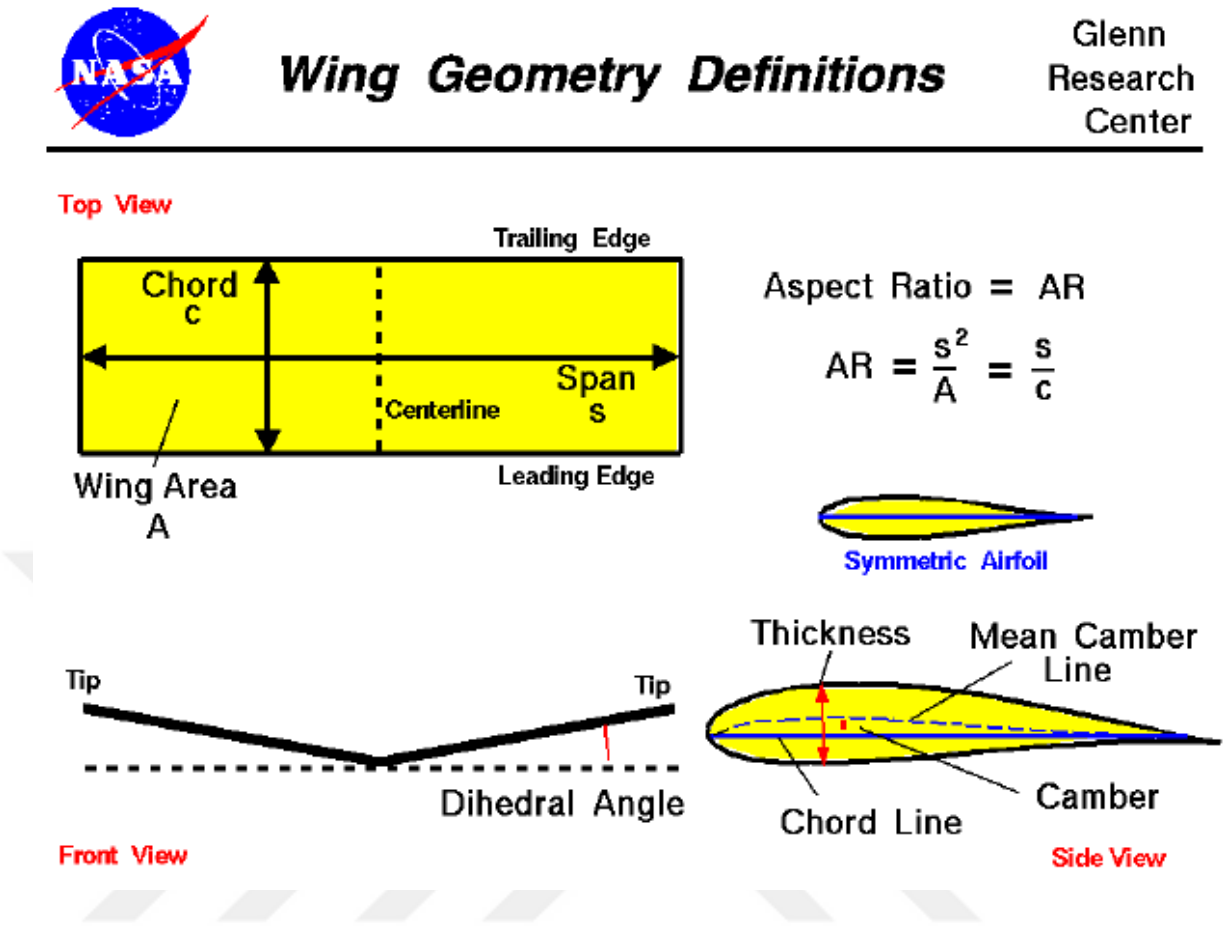
2.9.Kanat Profili

Akış hareketini temsil eden kuvvetler sıkça kullanılan kanat profilleri ile modellenir. Kanat profili terimi akışın boylu boyunca hareket edebildiği kesit alanlarını tanımlamak için kullanılır. Kesit alanı aşağıdaki gibi tanımlanır:



Şekil 2.5. Kanat profilinin geometrik bölgeleri (Şekil http://aviationknowledge.wikidot.com/aviation:aerofoil adresinden alınmıştır)

- Leading Edge: Kanat profilinin ön kenarıdır.
- Trailing Edge: Kanat profilinin son noktası veya kenarıdır.
- Chord Line: “Leading Edge” ile “Trailing Edge” arasına çizilen çizgidir. “Chord Line” kanat profilinin üst ve alt yüzeylerini ayırdığı yerdir.
- Mean Camber Line: “Chord Line” gibi “Leading Edge” ile “Trailing Edge” arasına çizilen çizgidir. Aradaki fark ise “Mean Camber Line” çizgisi çizilirken, çizgi doğrultusundaki tüm noktaların hem üst hem de alt yüzeye eşit uzaklıkta olacak şekilde belirlenmesidir.
- Point of Maximum Thickness: Alt ve üst yüzey arasındaki en geniş mesafenin ölçüldüğü ve “Chord Line” yüzdesine göre konumlandırıldığı noktadır. (Investigating the aerodynamic design of a rear wing aerofoil, 2023)
- Kanat Boy-En Oranı (Aspect Ratio): Boy en oranı, bir kanadın uçtan uca ne kadar uzun ve ince olduğunun bir ölçüsüdür. Bir kanadın boy-en oranı, açıklığın karesinin kanat alanına bölümü olarak tanımlanır ve İngilizcesi “Aspect Ratio” olan bu terim AR sembolüyle gösterilir. (Wing Geometry Definitions)



Şekil 2.6. Kanat en/boy oranının tanımı (Şekil https://www.grc.nasa.gov/www/k12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/geom.html adresinden alınmıştır.)

2.10. Sınır Tabaka

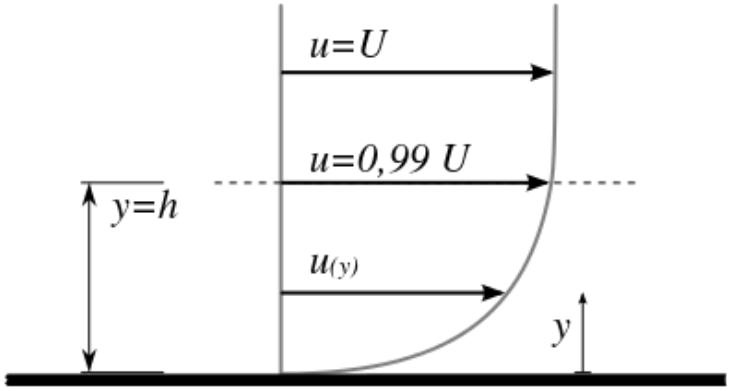
Bir obje akış içinde hareket ederken veya bir akış bir objenin üstünden geçerken, objeye yakın olan akış molekülleri objenin etrafına dağılır ve hareket eder. Aerodinamik kuvvetler bu obje ile akış arasında oluşur. Bu kuvvetlerin büyüklükleri,

- Objenin şekline
- Objenin veya akışın hızına
- Objenin etrafında olan akışın kütlesine
- Akışın viskozitesi ve sıkıştırılmasına bağlı değişir.

Aerodinamik kuvvetler karmaşık bir şekilde sıvının viskozitesine bağlıdır. Sıvı nesnenin yanından geçerken, yüzeyin hemen yanındaki molekülleri yapışır. Yüzeyin hemen üzerindeki moleküller, yüzeye yapışan moleküllerle çarpışmalarında yavaşlar. Bu moleküller de hemen üstlerindeki akışı yavaşlatır. Yüzeyden ne kadar uzaklaşılırsa nesnenin yüzeyinden etkilenen çarpışmalar da o kadar az olur. Bu, yüzeyin yakınında hızın yüzeyde sıfırdan yüzeyden uzakta serbest akış değerine değiştiği ince bir sıvı tabakası oluşturur. Bu akışın sınırında olan davranışlar sınır tabaka olarak adlandırılır. (Boundary Layer, 2021)

Sınır katmanlarının tanımlanması için çeşitli parametreler tanımlanmıştır. Bunlar sınır tabakası kalınlığı, sınır tabakası yer değiştirme kalınlığı, sınır tabakası momentum kalınlığı ve sınır tabakası enerji kalınlığıdır.

Sınır tabakası kalınlığının tanımı biraz keyfidir çünkü sabit katı sınırındaki sıfır hızdan sınır tabakası dışındaki serbest akış hızına geçiş düzgün ve asimptotik olarak gerçekleşir. Sınır tabakası kalınlığı (δ) genellikle, alttaki şekilde gösterildiği gibi x yönündeki hızın ana akış hızından yüzde 1 farklı olduğu katı sınırdan olan mesafe olarak tanımlanır.



Şekil 2.7. Sınır tabakası kalınlığının görseli (Şekil https://commons.wikimedia.org adresinden alınmıştır)

Sınır tabaka yer değiştirme kalınlığı (δ_d), hayali sürtünmesiz bir akışta aynı kütle akış hızını korumak için katı sınırın yer değiştirmesi gereken mesafe olarak tanımlanabilir. Düz plaka üzerindeki viskoz etkilerin neden olduğu akım çizgilerinin dışa doğru yer

değiştirmesini temsil eder. Bu şekilde, sınır tabakasının sınır tabakası dışındaki akış üzerindeki etkisi, gerçek duvara bir yer değiştirme kalınlığı eklenerek ve akışın kalınlaştırılmış gövde üzerinde viskoz olarak ele alınmasıyla simüle edilebilir. Sınır tabaka yer değiştirme kalınlığının formülü ise,

$$\delta_d = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \tag{2.4}$$

Sınır tabaka momentum kalınlığı (δ_m), hayali bir sürtünmesiz akışta gerçek kütle akışında aynı momentum aktarım hızını korumak için katı sınırın yer değiştirmesi gereken mesafe olarak tanımlanabilir. Sınır tabaka momentum kalınlığı formülü ise,

$$\delta_m = \int_0^{\delta} \frac{u}{U}\left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \tag{2.5}$$

Sınır tabaka enerji kalınlığı, hayali bir akışta gerçek kütle akış hızında aynı enerji aktarım hızını korumak için katı sınırın yer değiştirmesi gereken mesafe olarak tanımlanabilir. Sınır tabaka enerji kalınlığı formülü ise, (Aksel, 1996)

$$\delta_e = \int_0^{\delta} \frac{u}{U}\left(1 - \frac{u^2}{U^2}\right) dy \tag{2.6}$$

Türbülanslı akış için sınır tabaka formülleri ampirik yöntemler ile bulunmaktadır. Bu denklemlerden bazıları,

- Düz plakalardaki sınır tabakadaki hız profilleri için 1/7'nci kuvvet yasası

$$y \leq \delta \; için \frac{u}{U} \approx \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{7}} \tag{2.7}$$

- Yüzeyle çevrili ve akışın olduğu hemen hemen tüm türbülanslı akışlarda kullanılan logaritma yasası

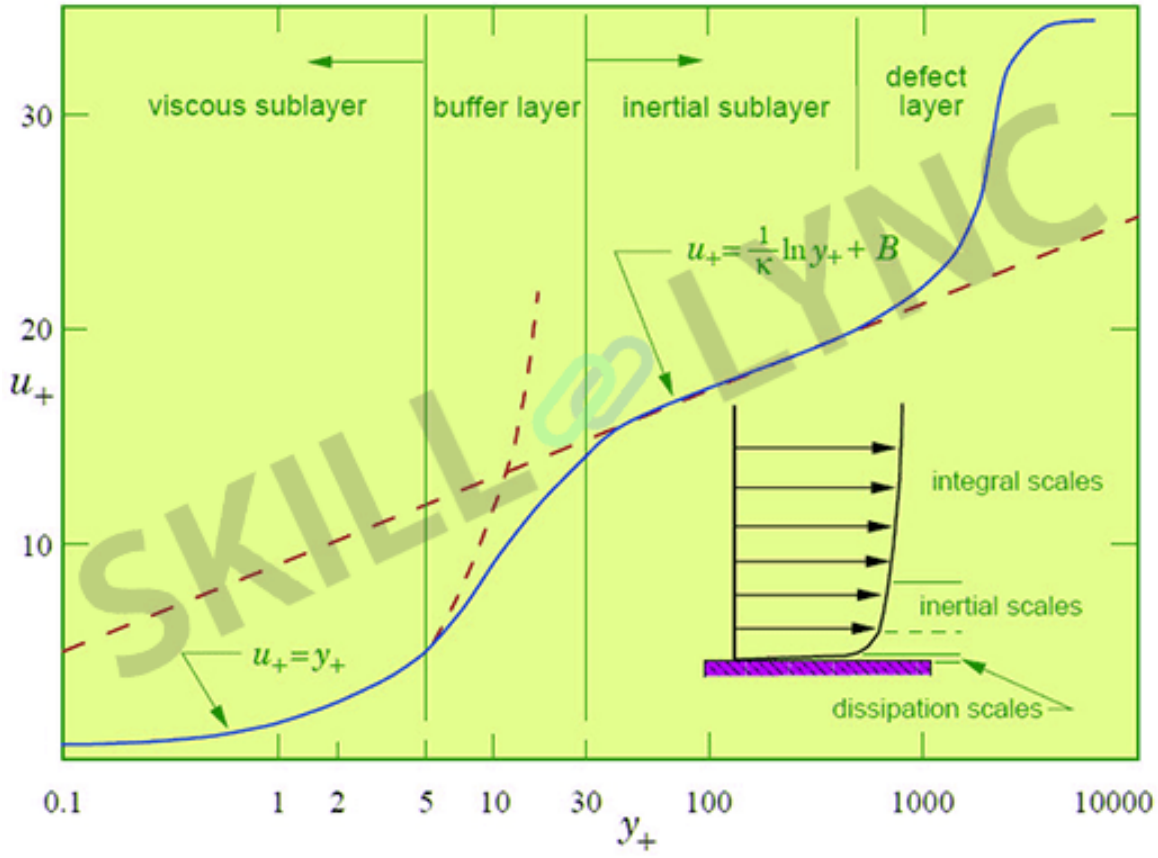
$$\frac{u}{u_*} = 2.5 \ln \frac{y u_*}{\nu} + 5 \; veya \; u^+ = 2.5 \ln y^+ + 5 \rightarrow u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \qquad (2.8)$$

- Diğer yasalara daha doğru sonuç veren spalding çeper yasasıdır.

$$\frac{yu}{u_*} = \frac{u}{u_*} + 0.1353 \left[e^{0.4\left(\frac{u}{u_*}\right)} - 1 - 0.4\left(\frac{u}{u_*}\right) - \frac{0.4\left(\frac{u}{u_*}\right)^2}{2} - \frac{0.4\left(\frac{u}{u_*}\right)^3}{6} \right] \qquad (2.9)$$

$$y^+ = \frac{y u_*}{\nu} \; ve \; u^+ = \frac{u}{u_*} \qquad (2.10)$$

Burada $y+$ boyutsuzlaştırılmış mesafe, $u+$ boyutsuzlaştırılmış hız ve y çeperden uzaklığı göstermektedir. (Engin, 2018; "Law of the Wall," 2021)

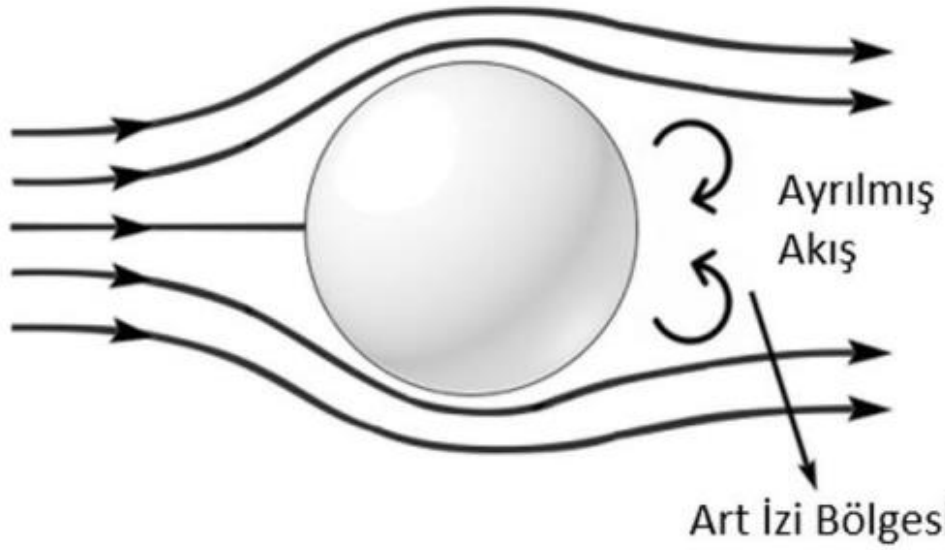


Şekil 2.8. Y+ tabaka değerleri (Şekil https://skill-lync.com/blogs/technical-blogs/cfd-near-wall-treatment-and-y-estimation adresinden alınmıştır)

- $0 \leq y^+ \leq 5$ viskoz alt tabaka
- $5 \leq y^+ \leq 30$ tampon tabaka
- $30 \leq y^+$ eylemsiz tabaka

2.11. Akış Ayrılması

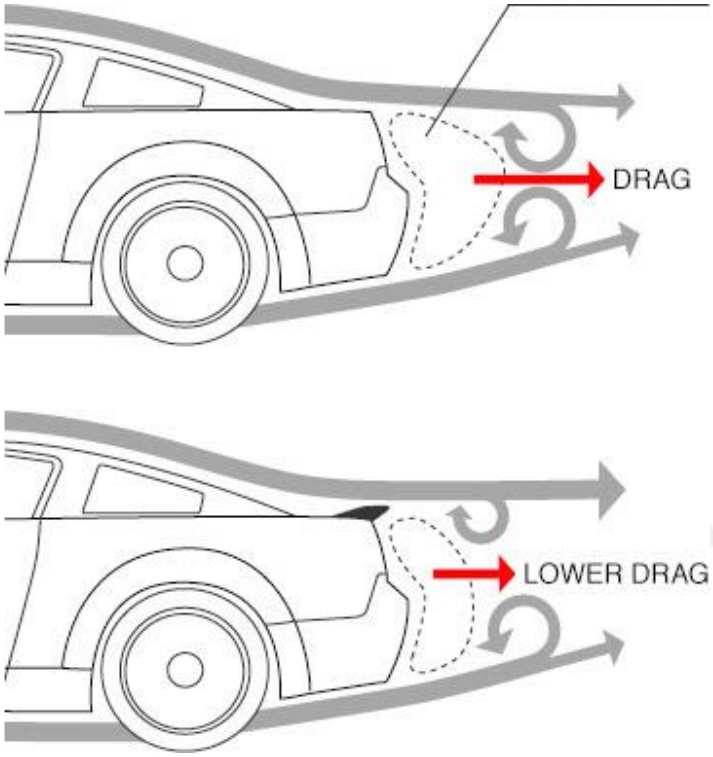
Akış ayrılması üzerine yapılan çalışmalar temel akışkanlar dinamiği ve çeşitli mühendislik uygulamalarında da büyük ilgi görmektedir. Akış ayırma konumu iz alanının boyutunu belirler ve aerodinamik sürükleme miktarı buna göre belirlenir. Araç üzerinde hareket eden hava arka uçta ayrıldığında, aracın arkasında iz olarak bilinen büyük, düşük basınçlı bir türbülanslı bölge bırakır. Bu iz basınç direncinin oluşumuna katkıda bulunur. (Çakır, 2012)



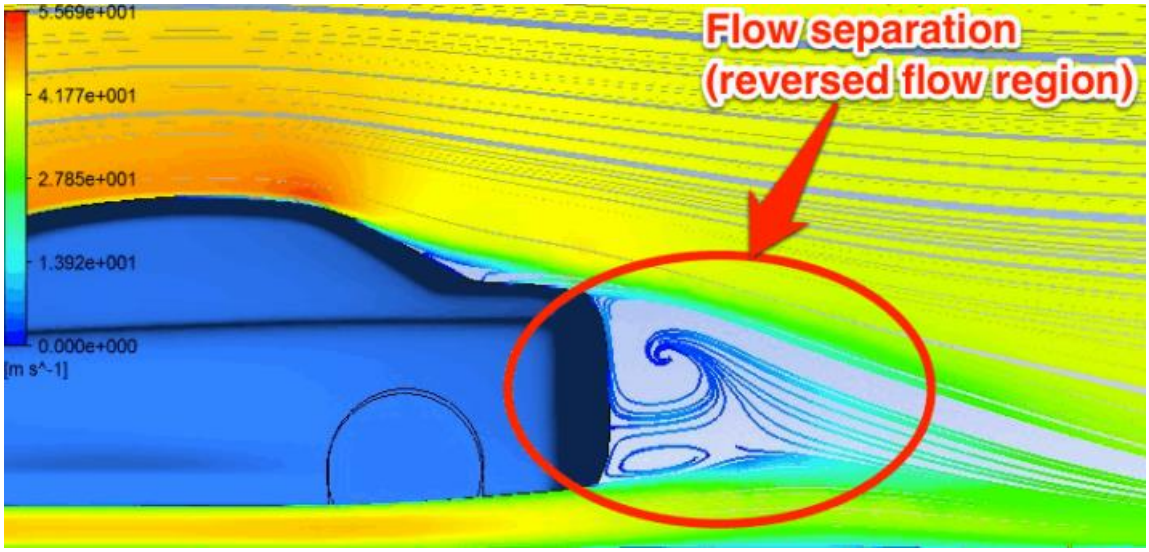
Şekil 2.9. Akış ayrılması (Drag Reduction by Application of Aerodynamic Devices in a Race Car, 2021)

Araç yüzeyinden akış sırasında hız değişiminin durduğu ve akışkanın ters yönde akmaya başladığı bazı noktalar vardır. Bu olaya sıvı akışının ayrılması denir. Bu genellikle aracın arka kısmında meydana gelir. Bu ayrılma çoğunlukla akışın dış katmanı tarafından uygulanan basınç dağılımına bağlıdır.

Bu ayrılma, akışın aracın arkasındaki davranışını değiştirmesine neden olur ve böylece aracın etrafındaki akış alanını etkiler. Akış ayrımı kötüdür çünkü arka yüzeyde daha büyük bir iz oluşumuna ve daha az basınca yol açar, bu da basınç geri kazanımını azaltır. Kötü akış ayrımını önlemek için hava akışlarının tavandan arka cama geçişinin yumuşatılması gerekir. (Drag Reduction by Flow Seperation Control on a Car After Body, 2008)



Şekil 2.10. Araç arkasında oluşan sürüklenme kuvvetinin rüzgarlık kullanımı ile azalması (Drag Reduction by Application of Aerodynamic Devices in a Race Car, 2021)



Şekil 2.11. Bir aracın arka tarafındaki akış ayrılma örneği (Bu şekil "CFD study on aerodynamic effects of a rear wing/ spoiler on a passenger vehicle" isimli makaleden alınmıştır.)

2.12. Kaldırma Kuvveti

Kaldırma kuvveti vektörel bir kuvvettir ve yönü yerçekimi kuvvetinin aksi yönündedir. Kaldırma kuvveti cismin total hacmine uygulanır, fakat bu kuvvet basınç merkezinde ve akış yönüne dik olacak şekilde modellenir.

Kaldırma kuvveti katıların ve akışların etkileşimi sayesinde oluşur. Yani eğer akış yoksa kaldırma kuvveti de yoktur. Kaldırma kuvveti katı bir cismin akış içindeki hareketine bağlıdır. Bu kuvvet iki etki ile oluşur:

- Newton'un Üçüncü Yasası
- Bernoulli Prensibi

Kaldırma kuvveti Denklemi:

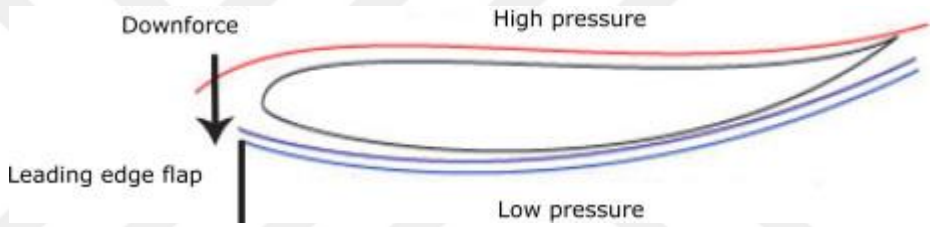
$$L = \frac{1}{2} C_L \rho V^2 A \tag{2.11}$$

- C_L: Kaldırma Kuvveti Katsayısı

- ρ: Yoğunluk
- V: Hız
- A: Alan (Investigating the aerodynamic design of a rear wing aerofoil, 2023)

2.13. Bastırma Kuvveti

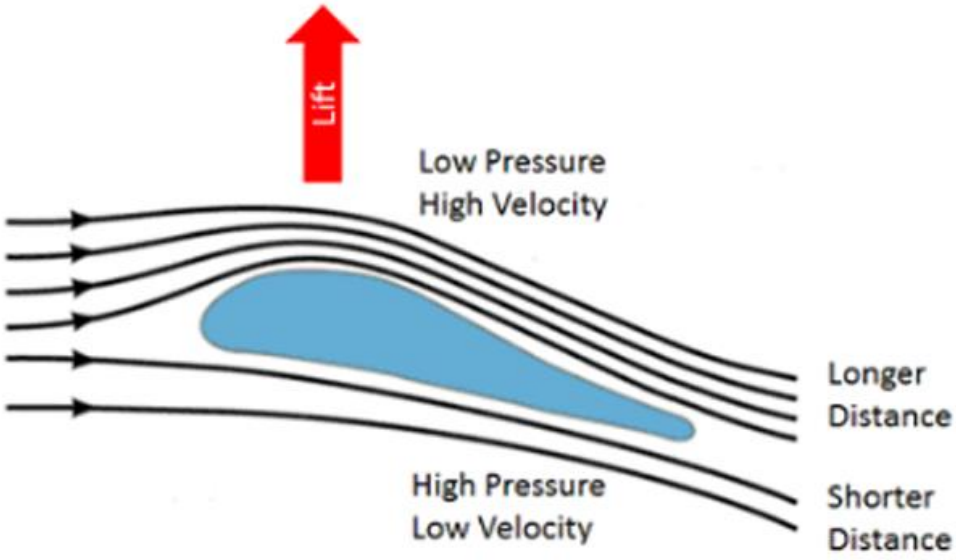
Bastırma kuvveti araca dik yönde uygulanan aerodinamik kuvvettir. Araç akış içinde hareket ettikçe, bastırma kuvveti aracı yere doğru iter. Bastırma kuvveti önemli araç faktörleri içinde yer alır. Aracı ne kadar yere itersen araçtaki performans yere basma oranına göre artacaktır. Üstelik araca daha iyi bir yol tutuşu sağlayacaktır. (What is downforce, 2023)



Şekil 2.12. Bastırma kuvvetinin oluşumu (Şekil "On the applicability of trapped vortices to ground vehicles" makalesinden alınmıştır.)

2.14. Bernoulli Prensibi

Bernoulli prensibi kaldırma kuvvetini açıklayan faktörlerden birisidir. Kanat profilinin şeklinden dolayı akışın yolunu tamamlayabilmesi için görselde de belli olduğu gibi üst yüzeyde alt yüzeye göre daha fazla bir hız gözlemlenir. Bunun sonucunda da üst yüzeyde alt yüzeye göre daha az bir basınç oluşur. Tüm bunların sonucunda kaldırma kuvveti ortaya çıkar. (Investigating the aerodynamic design of a rear wing aerofoil, 2023)



Şekil 2.13. Kaldırma kuvveti oluşumu (Şekil "Investigating the aerodynamic design of a rear wing aerofoil" makalesinden alınmştır)

2.15. Newton'un Üçüncü Yasası

Üçüncü hareket yasası, her etki için eşit ve zıt bir tepkinin olduğunu belirtir. Bu, bir nesne diğerine bir kuvvet uyguladığında, ikinci nesnenin de birinci nesneye eşit ve zıt bir kuvvet uyguladığı anlamına gelir.

Havacılıkta bu yasa, uçuş sırasında uçağa etki eden aerodinamik kuvvetlerin anlaşılması açısından çok önemlidir. Örneğin, bir uçak havada hareket ederken altındaki hava molekülleri üzerinde aşağı doğru bir kuvvet oluşturur ve bu da uçağı yukarıya kaldıran eşit ve zıt bir kuvvet oluşturur. Buna kaldırma kuvveti denir ve uçağın uçmasını sağlayan kuvvettir. (Newton's Laws of Motion and Aviation, 2023)

2.16. Atak Açısı

Atak açısı kanat profilinin veter çizgisi ile akış yönü arasında kalan açıdır. Akış yönü hareket doğrusunda kalan yön olarak kabul edilmektedir. Atak açısının değeri ile kanadın yük kaldırma kapasitesi ile alakalı bir ilişki vardır, fakat atak açısı belli bir seviyenin üstüne çıkarsa tutunma kaybı dediğimiz ve kaldırma kapasitesini negatif yönde etkileyen bir durum oluşturur.

2.17. Sürüklenme Kuvveti

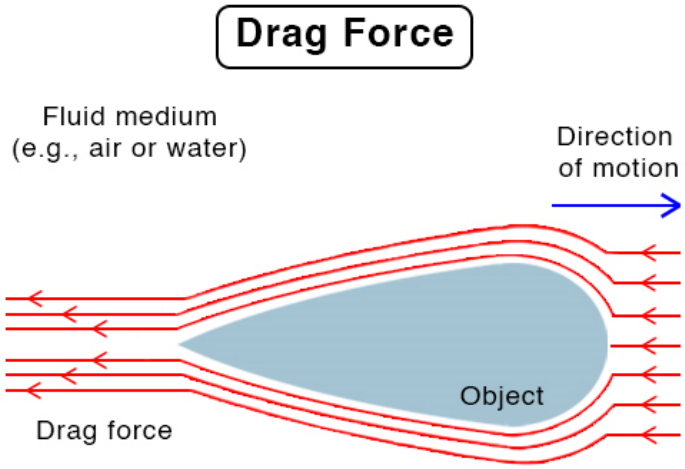
Sürüklenme kuvveti akış üzerindeki bir engel veya akışa doğru hareket eden bir obje üzerinden oluşur. Kuvvetin büyüklüğü ve kuvvetin nasıl azaltacağı araç, gemi, köprü ve benzeri diğer yapıların tasarlanmasında önemli bir faktördür (Drag, 2023)

Tepki sürtünme kuvveti gibi, sürüklenme kuvveti de hareketinin tersi yönünde davranış gösterir. Fakat sürtünme kuvvetinden farklı olarak, sürüklenme kuvveti hıza göre de değişkenlik gösterir. Ayrıca sürüklenme kuvveti akışın yoğunluğuna da bağlıdır. Yukarıda bahsedilen örneği hava yerine daha yoğun bir madde olan suda yapılması, sürüklenme kuvvetinin değerini arttıracaktır. (Drag Forces, 2016)

Sürüklenme kuvveti teorik olarak,

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho A v^2 \tag{2.12}$$

- D = Sürüklenme kuvveti
- C_D = Sürüklenme kuvveti katsayısı
- ρ = Yoğunluk
- A = Alan
- v = Hız



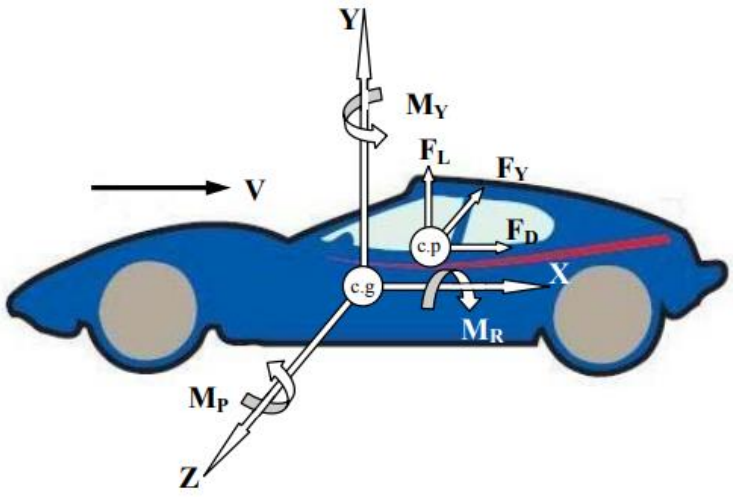
Şekil 2.14. Sürüklenme kuvvetinin oluşumu (Şekil https://www.sciencefacts.net/drag-force.html adresinden alınmıştır.)

2.18. Bir Araca Etki Eden Aerodinamik Kuvvetler ve Momentler

Akışkanın karşısına çıkan cisimlere belli başlı kuvvetler ve o kuvvetler sonucunda ortaya çıkan momentler oluşturur. Katı bir cisim bir akışa maruz kaldığında ise o akışa karşı dirençler uygular. Bu durum araçlarda hava ile etkileşime girdiğinde oluşan aerodinamik etkiler için de geçerlidir. Araca uygulanan kuvvetlerin merkezi basınç merkezine (Cp), bu kuvvetler sonucu oluşan momentler ise aracın ağırlık merkezinde (Cg) oluşur. Oluşan bu kuvvet ve momentler şu şekildedir.

- Kuvvetler
  - Sürüklenme Kuvveti (F_D)
  - Kaldırma Kuvveti (F_L)
  - Yanal Kuvvet (F_Y)

- Momentler
  - Yuvarlanma Momenti (M_R)
  - Yana Kayış Momenti (M_Y)
  - Yunuslanma Momenti (M_P)

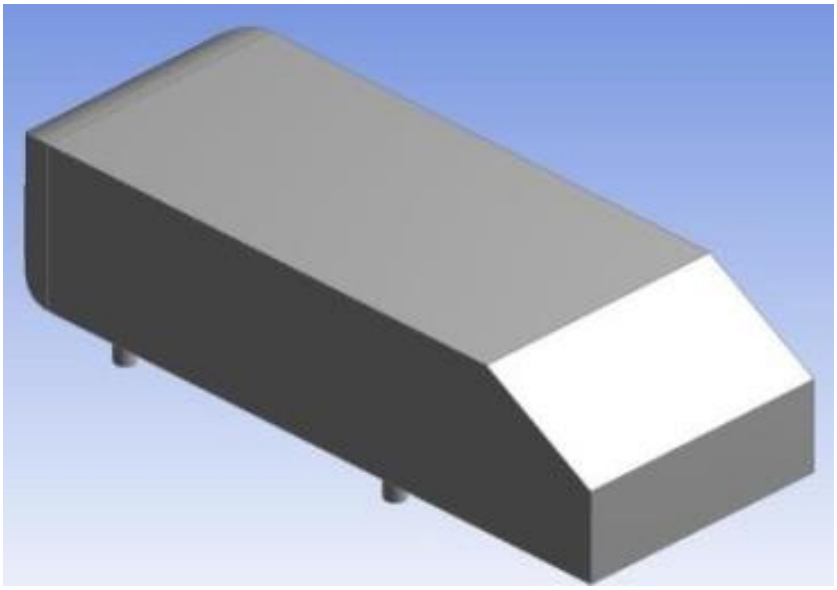


Şekil 2.15. Araç üzerindeki aerodinamik kuvvetler ve momentler (Demircioğlu, 2007)

2.19. Kaynak Özetleri

Araştırmalara göre, binek araçların aerodinamik analizi oldukça yoğun bir alandır. Bu çalışmalar, aracın üzerindeki hava akışı, aerodinamik özellikler ve sürüklenme direnci gibi konuları ele alır ve genellikle sürüklenme direncini azaltma veya negatif kaldırma kuvvetini artırma amacını taşır. Hem sayısal modellerle yapılan analizler hem de rüzgar tünellerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar bu araştırmalara destek olur. Aerodinamik çalışmaların başlıca hedefleri arasında, aracın yakıt tüketimini azaltma, sürüş stabilitesini artırma ve aerodinamik gürültü seviyesini düşürme bulunur. Sürüklenme direncini azaltmak için genellikle araç geometrisinde değişiklikler veya modifikasyonlar yapılır.

Şumnu, A, (2021) Ahmed body üzerinde üst yüzeyinde iyileştirmeler yaparak araç modeli üzerinde sürüklenme katsayısını azaltmayı hedeflemiştir. Bu çalışma sonucunda aracın üst yüzeyi ile arka yüzeyi arasında 50 milimetre ölçüsünde pah oluşturup sürüklenme kuvvetinde yüzde 6 oranında iyileştirme sağlamıştır.



Şekil 2.16. Ahmed modeli izometrik görünüm (Şekil "Shape modification of Ahmed body to reduce drag coefficient and determination of turbulence model" makalesinden alınmıştır)

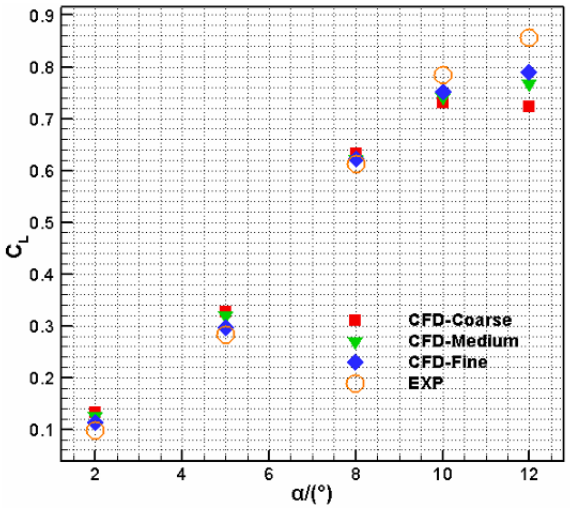


Şekil 2.17. Ahmed modeli yan görünüm (Şekil "Shape modification of Ahmed body to reduce drag coefficient and determination of turbulence model" makalesinden alınmıştır)

Aider, L (2010) yaptığı bir çalışmada Ahmed modelinin arka kısmına yerleştirilmiş çeşitli konumlardaki kanatçıkların etkisini üç serbest akış hızı (Uo = 20, 30 ve 40 ms) için araştırmış ve en verimli iki konfigürasyon, arka eğimin yan kenarlarındaki iki kanadı (sürüklemenin %-17,6'sı) ve arka eğimin üst kısmındaki kanadı (sürtünmenin %-15'i) olduğunu gözlemlemiştir. Ölçümler, sürükleme veya kaldırmanın azaltılması için farklı kenarların göreceli potansiyelinin sınıflandırılmasına olanak tanır.

Sayısal modellerin ağ örgüsü bakımından net ve değişkenlik göstermeyen bir yapıda olması analizlerin güvenirliği açısından yüksek önem arz etmektedir. Binek araçlarda aerodinamik açısından ağ orgüsünün optimizasyonu Ahmad, NE, Abo-Serie, E & Gaylard, A (2010) tarafından incelenmiş ve ağ örgüsünün boyutunun sürüklenme katsayısına etkisi incelendiğinde, ağ örügüsü boyutu 100 milimetreden 50 milimetreye düşürüldüğünde hata oranının %5.5'ten %0.9'a gerilediği görülmüştür.

Ağ örgüsünün detaylı olmasının deneysel sonuçlara daha yakın olmasının bir çalışmasını da Zhang, Y (2020) incelemiş ve yüksek detaylı ağ örgüsünde ise deneysel verilere daha yakın değerler elde etmiştir.



Şekil 2.18. Ağ örgüsü - deneysel sonuç kıyası (Şekil "Aerodynamic Characteristics of Different Airfoils under Varied Turbulence Intensities at Low Reybolds Numbers" makalesinden alınmıştır)

Kanat profillerinin tasarım parametrelerine göre de araç üzerindeki akış ayrılmasını azaltmak veya negatif yönde kaldırma kuvveti sağlayarak aracın gerek yakıt tüketimini azaltmak gerekse sürüş kalitesini arttırmak amacıyla tasarımlar yapılmıştır. Fakat her kanat profili farklı Reynolds sayılarında farklı özellikler gösterir. Biber, K (2004) ürettiği kanat profillerinde akış ayrılmasını incelemiş ve tasarımlarda kanat profillerinin tasarımı kalınlığına, kalınlığının konumuna, maksimum kamber konumuna göre incelenmiştir.

Wang, S (2022) çalışmasında kanat profillerinin tasarımında kamberin aerodinamik etkiye olan çalışmasını incelemiştir. Her bir kanat profilinin maksimum kalınlığı belirlenirken ve maksimum kalınlık konumu aynı olduğunda, aynı kamber pozisyonuna ve farklı kamber boyutuna sahip bir kanat profili seçilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda kanat profili kamberinin kanat profilinin aerodinamik performansı üzerinde büyük etkisi olduğu belirlenmiştir ve kamber açısı arttıkça kaldırma kuvveti katsayısının da arttığı sonucuna varılmıştır.

Araç yapısındaki aerodinamik incelemelerde düşük Reynolds sayılarında yüksek oranda kaldırma kuvveti katsayısı / sürüklenme katsayısı değerini yakalayan kanat profilleri tez çalışmasında incelenecektir. Özel bir tasarımında yapılacağı bu çalışmada referans olacak bu kapsamdaki yüksek C_L/C_D oranındaki kanat profilleri incelenmiştir. Ma,R ve Liu,P

(2009) yaptığı çalışmalarda bu kapsamdaki kanat profillerini incelemiş ve 200000 Reynolds sayısında 2.23 değerinde maksimum kaldırma kuvveti katsayısı elde etmiştir ve incelenen kanatlar arasında en yakın olandan %11.5 oranında daha iyi bir sonuç yakalamıştır.

Aktaş, F (2022) yaptığı çalışmada ise atak açısına göre sürüklenme kuvveti katsayısı, kaldırma kuvveti kaldırma katsayısı oranını incelemiş her iki değer atak açısı arttıkça artsa da aynı zamanla C_D/C_L oranının da arttığını gözlemlemiştir.

Airfoil	Angel of Attack(°)	C_D	C_L	C_D/C_L
BE153-055	10	0,1301	1,1186	0,116306
BE153-055	20	0,3101	1,7495	0,177251
BE153-175	10	0,3382	1,8106	0,186789
BE153-175	20	0,5931	2,4471	0,242369

Şekil 2.19. Atak açısına göre bazı kanat profillerinin kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvveti katsayısının değişimi (Şekil "Aerodynamic analysis of car rear spoiler with computational fluid dynamics for different angles and profiles" makalesinden alınmıştır)

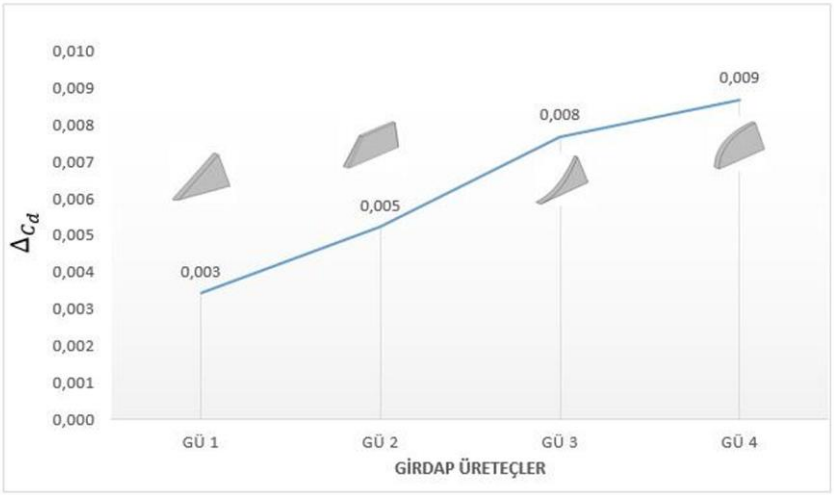
Özel tasarımın belirlenmesinde yüksek hızlardaki etkisini araştırmak için ise referans olarak Vadgama, T'nin (2015) NACA 2408 kanat profilindeki çalışması alınmıştır. Belirlenen aracın arka kanadının profilini NACA 2408 tasarımına göre yapılmıştır ve 100 km/saat hızında -15 atak açısında 55.496 N değerinde yere basma kuvveti elde edilmiştir. Kanatçık tasarımlarının karakteristik özellikleri farklı olduğu için araç tipine göre de bu tasarımlar incelenmelidir. Smith, J (2022) yaptığı çalışmalarda 3 farklı hız tipinde kanat tiplerinin yere basma kuvveti bakımından incelendiğinde efektiflikleri değişkenlik göstermiştir. Redbull ile Mercedes kanadı arasında 93.47 metre/saniye hızında Redbull kanadı %22.45 daha fazla yere basma kuvveti sağlarken, 49.17 metre/saniye hızında ise her ne kadar Redbull kanadı yine fazla yere basma kuvveti sağlasa da aradaki fark %2.83 düşerek %19.62 olarak elde edilmiştir.

Yapılacak olan kanatçık numunesinin tasarımlarının araç bölgesine entegresinde, araca yani yere yakınlığı da bu tasarımların da belirlenmesinde etkin rol oynamaktadır.

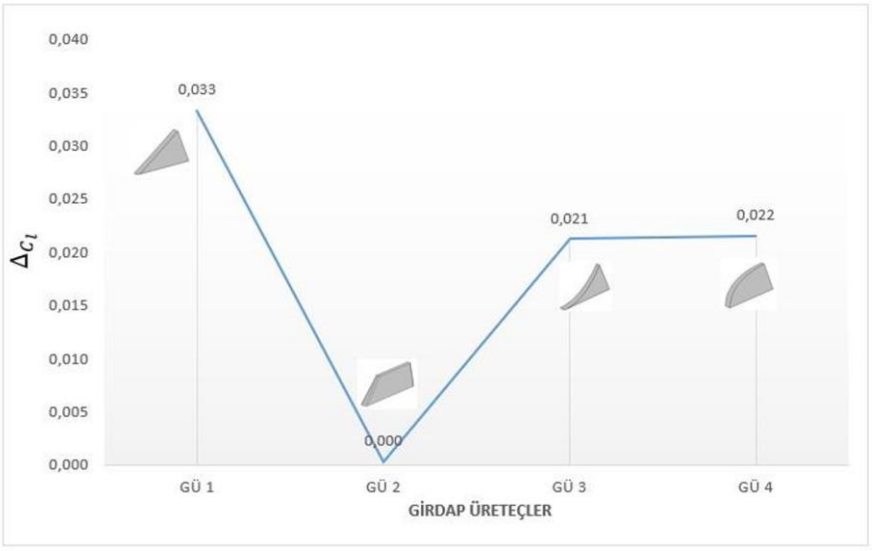
Kachare, S (2017) yaptığı çalışmada bu farklı atak açılarında yer etkisini incelemiş ve sürüklenme kuvveti katsayısı atak açısı arttıkça artarken, kaldırma kuvveti katsayısı düşük ve yüksek atak açılarında yüksek değer gösterirken, 2-10 derece arasında azalma göstermiştir.

Roberts, S (2015) yaptığı çalışmada binek aracının ön kanadının atak açısına göre savrulma momenti ve yer etkisini incelemiştir. En büyük yere basma kuvvetindeki kayıp, en düşük yerden yüksekliklerde, yani kuvvet azaltma rejiminde görüldü; ancak bir kanadın tipik olarak çalışacağı yerkerde daha yüksek açıklıklarda bile yere basma kuvveti kaybı 20 puandan fazlaydı.

Kanatçıkların bir arka kanat rüzgarlığına 3 boyutlu implementasyonu yaparken rüzgarlıkların aynı zamanda girdap üretici şekillerinde olup akış ayrılmasını önlenmesinde etki rol oynaması bu tez çalışmasında hedeflenmiştir. Kasap H, (2022) binek araçların aerodinamik etkisini incelerken girdap üreticileri kullanarak araç üzerindeki sürüklenme kuvveti katsayısı ve kaldırma kuvveti katsayısındaki değişimleri incelemiştir. Kanat profili kullanılmadan yapılan bu çalışmada kullanılan numunelerde araç üzerinde maksimum %0.96 oranında sürüklenme katsayısında ve %3.3 oranında kaldırma kuvveti katsayısında bir iyileşme gözlemlenmiştir.

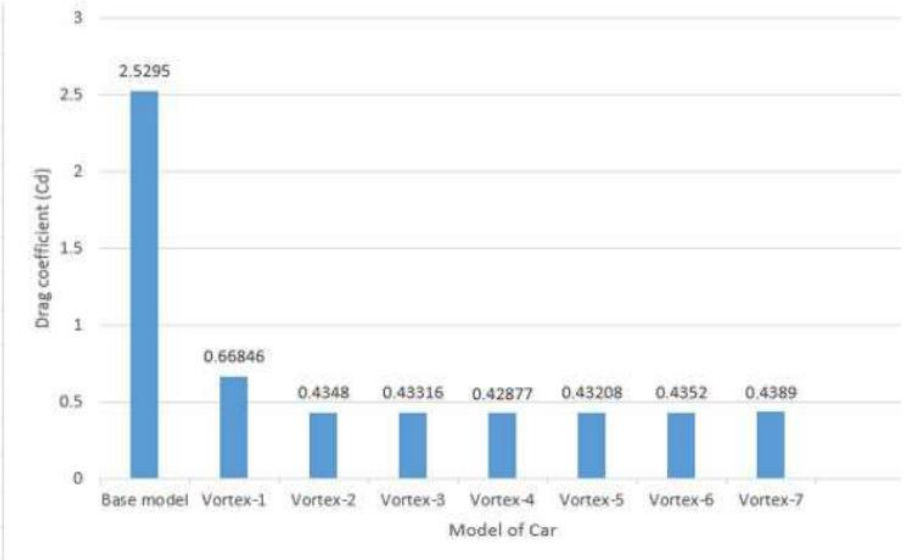


Şekil 2.20. Kullanılan girdap üreticilerinin araç üzerindeki sürüklenme kuvveti Katsayısına Etkisi (Şekil "BİNEK ARAÇ ÜZERİNDEKİ AERODİNAMİK ANALİZLERİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ" makalesinden alınmıştır)



Şekil 2.21. Kullanılan girdap üreticilerinin araç üzerindeki kaldırma kuvveti katsayısına etkisi (Şekil "BİNEK ARAÇ ÜZERİNDEKİ AERODİNAMİK ANALİZLERİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ" makalesinden alınmıştır)

Khan, S (2022) çalışmasında ise tıpkı bir önceki çalışmadaki gibi girdap üreticileri kullanarak sürüklenme kuvveti katsayısını azaltma yönünde çalışmalar yapmıştır. Araç bazında 2.5295 değerinde sürüklenme katsayısı elde edilirken, girdap üreticileri kullanıldığında ise neredeyse bu değer 1/6 katına düşmüştür.



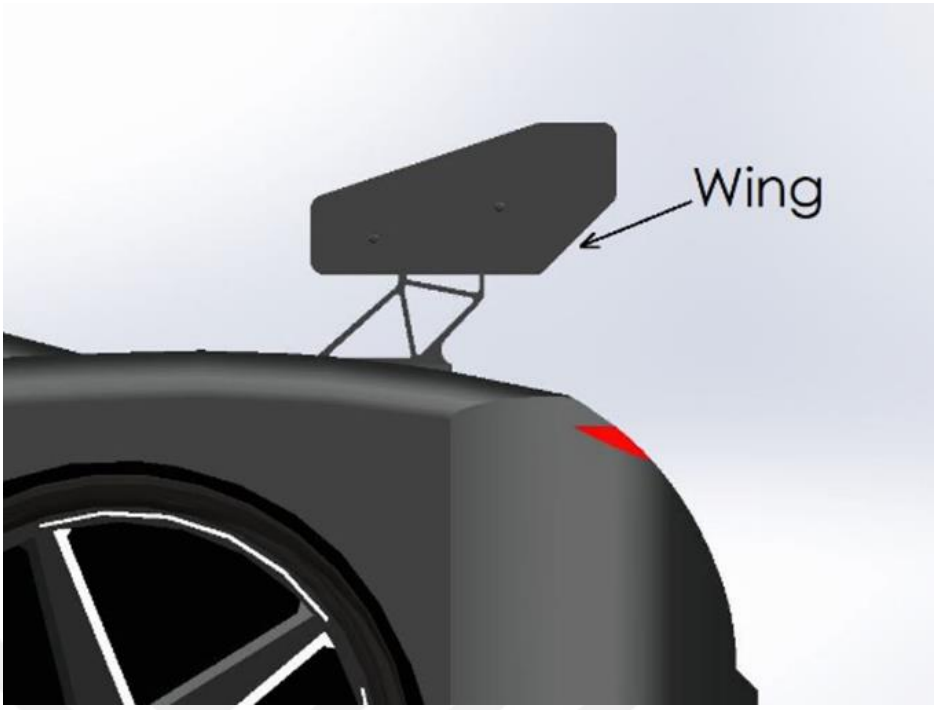
Şekil 2.22. Kullanılan girdap üreticilerinin sürüklenme kuvveti katsayısına etkisi (Şekil "SIMULATING THE DRAG REDUCTION MODEL FOR AVEHICLE BY USING VORTEX GENERATOR" makalesinden alınmıştır)

Selvakumar, K (2013) çalışmasında hatchback araç tipi kullanarak tıpkı bir önceki çalışmadaki gibi girdap üreticileri kullanarak hem nümerik analizde hem de gerçek zamanlı testlerde değerlendirmiştir.
Fabian, M ve Hunady, R (2022) çalışmasında ise rüzgarlıklı araç modeli ile rüzgarlıksız araç modelinin 140 km/saat hızında sürüklenme kuvveti incelenmesinde ise rüzgarlıklı araç modelinin %2.5 oranında daha iyi değer elde edilmiştir.

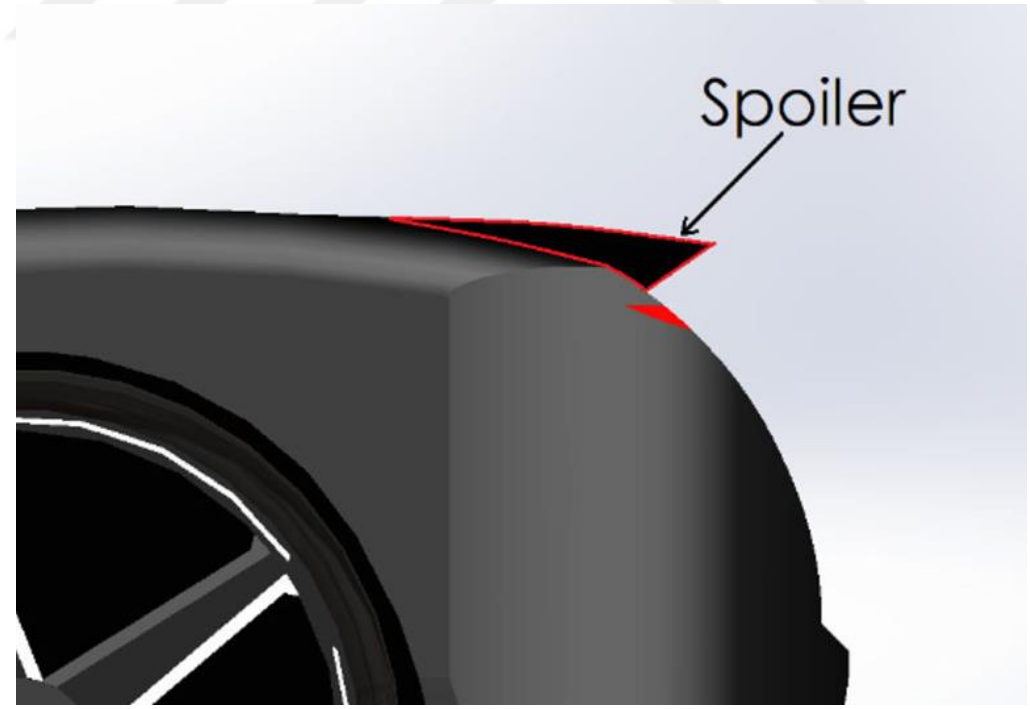
Kumar, M (2013) yaptığı çalışmada ise girdap üreticilerin araca etkisini incelemiştir. Girdap üreticilerini hem sedan hem de hatchback araç tipinde incelemiş ve yaptığı nümerik analizlerde toplam sürüklenme katsayısında hem de kaldırma kuvveti katsayısında düşüş gözlemlemiştir.

Rüzgarlık tiplerinin farklı olması araçlardaki kaldırma kuvveti katsayısı ve sürüklenme kuvveti katsayısı etkisine de farklı olacaktır. Nath, S (2021) yaptığı çalışmada farklı türde yapılar ile araca monte ederek bu katsayıların etkisini incelemiştir. Araca yapışık olmayan rüzgarlık yapısında, araca yapışık olan rüzgarlık yapısına göre daha fazla sürüklenme katsayısı elde etse de (0.4765/0.2918) yere basma kuvvetinde ise yapışık olan kanada göre çok daha fazla etki göstermiştir (-0.0502/0.3177).

Aerodinamik etkilerin sayısal analizlerinde günümüzde farklı çözüm metotları kullanılmaktadır. Aytaç, Z (2020) yaptığı aerodinamik çalışmasında en etkin numerik çözüm metotlarını sıralamıştır. Bu sıraya göre çözüm metotlarını en etkin olandan, en az etkin olana göre sıralarsak, k-w SST, k-ε RNG, k-ε, BSL Reynolds ve k-w olarak kabul edebiliriz.



Şekil 2.23. Araca yapışık olmayan kanat biçimi (Şekil "Drag reduction by application of aerodynamic devices in a race car" makalesinden alınmıştır)



Şekil 2.24: Araca yapışık olan kanat biçimi (Şekil "Drag reduction by application of aerodynamic devices in a race car" makalesinden alınmıştır)

Ramya, P (2015) yaptığı çalışmada sedan ve SUV tiplerinin farklı hızlarda rüzgarlık kullanımın etkisini incelemiş ve bu çalışmanın sonunda rüzgarlıksız bir SUV modelinin ortalama sürükleme kuvveti katsayısı 0,3 ve rüzgarlıklı olarak 0,25 olup, rüzgarlıksız bir sedan'ın ortalama sürüklenme kuvveti katsayısı 0,14 ve rüzgarlıklı olarak 0,12 olarak bulmuştur.

Abid, M (2017) çalışmasında ise sadece kanatçık bazında değil kaldırma kuvveti katsayısını azaltacak genel araç parçaları üzerinde bir çalışma yapmış ve hem parça bazında hem de toplam araç bazında bu etkiyi gözlemlemiştir. Değerlendirmesinde rüzgarlığın yanında difüzör ürünlerininde araca entegrasyonunu sağlamış ve hem araca etki eden sürüklenme kuvvetini hem de yere basma kuvvetini incelemiştir. Düz araç modelinde yere basma kuvvetini 11.2 N, sürüklenme kuvvetini 109 N olarak bulurken, rüzgarlık entegrasyonu ile bu sayılar sırasıyla 580.1 N ve 305.7 N olarak bulunmuştur.
Bu tez çalışmasında ise kanat profili tasarım parametrelerine göre yapılacak olan kanat tasarımının bir girdap üreticisi ile rüzgarlık modeli oluşturulup araç üzerindeki kaldırma kuvveti ve sürüklenme katsayısı incelenecektir. Çalışma içinde referans alınacak NACA kanat profilleri ile oluşturulacak özel kanat profili tasarımının referans alınan kanat profillerinden daha etkili sürüklenme kuvveti ve negatif yönde kaldırma kuvveti katsayısı değerleri alınması hedeflenmiştir.

Bu çalışma ile beraber kanat belirlenecek numunede kanat profillerinin sayısının artması sonucu bu katsayıların etkisi belirlenirken, aynı zamanda numunelerde araçlarda oluşacak olan yer etkisi de incelenecektir. Ayrıca kanat bazındaki değerlendirme bulunacak bu katsayılar araç bazında da incelenecektir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Otomotive sektöründe ürünlerin veya yapılan geliştirmelerin valide edilmesinde bazı test yöntemleri kullanılır. Aerodinamik etki hem nümerik analizlerde hem de gerçek zamanlı fiziksel testlerde incelenebilir. Yapılan iyileştirmeler önce nümerik olarak ardından gerçek zamanlı ortamda test edilir.

Test önceliğinin bilgisayar ortamında olması ve uygulanan nümerik metotlarının doğruluğu fiziksel testler önceli güçlü bir öngörü ve bu öngörüye dayalı olarak da maliyet ve zaman açısından ürün geliştiricilerine büyük kolaylık sağlar. Bu kolaylığın sağlanabilmesi için fiziksel testi yapacak ekip ile nümerik analizi yapacak ekip birbiri ile koordineli çalışır. Nümerik analiz ekibinin sağlayabileceği görseller, fiziksel testlerdeki bulgular ile karşılaştırılır. Böylelikle hem nümerik analiz metodunun doğruluğu hem de gelecekteki testlerin bu doğrulamaya göre yapılan işgücü, maliyet ve veri toplama tutarlılığı kesinleştirilir. Üstelik bu doğrulamadan sonra, fiziksel testi yapan ekibin sağlamayacağı bazı görselleri nümerik analiz ekibi sağlayarak, geliştirme yapan ekibin sonuçları daha büyük bir perspektif ile incelemesine yardımcı olur.

3.1.Nümerik Analiz

Nümerik analiz sürekliliği olan problemleri sayısal yaklaşımlar ile çözen bir bilim dalıdır. Yaklaşık ancak doğruya yakın çözümler veren yöntemlerin tasarlanmasını içerir. Kesin çözümün neredeyse imkânsız olmasından dolayı, nümerik analizlerde kurulan sistemin yakınsaması, doğruluğu, kararlılığını ve hesaplama karmaşıklığını karakterize edilmesini sağlayan yöntemler de içerir. (What Is Numerical Analysis, 2023) Bu nümerik analiz metotlarında aerodinamik etkinin incelenmesi için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemleri kullanılmıştır.

Akış dinamiği disiplinleri 17.yüzyılda İngiltere ve Fransa'da geliştirilmeye başlandı. Ardından 18.yüzyılda genel Avrupa'ya yayıldı. Dijitalleşme ile bilgisayarın hayatımıza girmesinden dolayı 1960'tan itibaren ise bu yöntemler bugün güncel adı ile bilinen hesaplamalı akışkanlar dinamiği adı altında devam etmektedir. Günümüzde ise HAD

yöntemleri neredeyse saf, duru sonuçlara erişmemizde büyük kolaylık sağlar. (Aksel, 1996)

Akış dinamiğinin fiziksel prensipleri üç ana alana dayanır: Kütlenin korunumu, Newton'un 2.hareket yasasına göre momentumun korunumu ve enerjinin korunumu kanunları. Bu prensiplerin matematiksel karşılıkları sırasıyla şunlardır: Süreklilik denklemi, momentum denklemi ve enerji denklemidir. Bu temel fiziksel prensipler sonsuz küçük bir akışkanlar elemanına uygulandığında, akışkanlar dinamiğinin geçerli kısmi denklemleri doğrudan elde edilir. (Aksel, 1996)

Bu denklemleri sıralarsak,

- Süreklilik Denklemi

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

- Momentum Denklemi

$$\rho \frac{Du}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \tag{3.2}$$

$$\rho \frac{Dv}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \tag{3.3}$$

$$\rho \frac{Dw}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \tag{3.4}$$

- Enerji Denklemi

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\rho\left(e+\frac{V^2}{2}\right)\right]+\nabla.\left[\rho\left(e+\frac{V^2}{2}\right)V\right]=p\dot{q}-\frac{\partial(up)}{\partial x}-\frac{\partial(vp)}{\partial y}-\frac{\partial(wp)}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+$$
$$\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x}+\frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y}+\frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z}+\frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x}+\frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y}+\frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial x}+$$
$$\frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x}+\frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial z}+\frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \quad (3.5)$$

Aerodinamikte, çalışma akışkanının termal hal denklemine sahip mükemmel bir gaz olduğunu varsaymak oldukça mantıklıdır ($P=\rho RT$). Üstelik mükemmel gazlar için kalorik durum denklemi şöyle verilir ($e=c_vT$). (Aksel, 1996)

Aerodinamik etkileri incelemek ve modelleri simüle etmek için bilgisayardaki yazılım programları kullanılır. Bunlardan biri ANSYS programının FLUENT uzantısıdır. ANSYS FLUENT, yukarıda belirtilen denklemler ile beraber kendi içindeki değişken çözüm yöntemlerini kullanarak, akış modellerini HAD metoduna uygun bir biçimde çözüm sağlayabilen bir yazılım programıdır. Bu kapsamda en çok kullanılan mevcut türbülans modelleri ise şu şekildedir:

- Navier-Stokes Denklemi
- Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes Türbülans Modelleri (RANS)
  - Spalart Allmaras Türbülans Modeli
  - k-ε Türbülans Modeli
  - k-ω Türbülans Modeli
- Geniş Eddy Simülasyon Türbülans Modelleri (LES)
- Direkt Nümerik Çözüm Türbülans Modelleri (DNS)

3.2.Navier-Stokes Denklemi

Sıkıştırılamaz bir Newtoniyen akışkan için Navier-Stokes hareket denklemleri,

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0,\ \frac{\partial u_i}{\partial t}+u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}=f_i-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial x_i}+\nu\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i\partial x_j} \quad (3.6)$$

- f_i=Dış kuvvetler matrisi

Nümerik simülasyonlarda Navier-Stokes denkleminin doğrudan uygulanması hesaplama açısından çok pahalı olabilir. Bu durum, farklı senaryo ve ihtiyaçları karşılamak için daha yüksek performans oranlarına ve çeşitliliğe sahip türbülans modellerinin genelleştirilmesinde çok sayıda başarılı yöntemin geliştirilmesini teşvik etmektedir. (Hybrid RANS/LES/DNS of turbulence flow along a flat plate, 2022)

3.3.Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) Türbülans Modeller

RANS modelleri sanayide en çok kullanılan modellerdir. Bu modeller karışık türbülans modellerin hesaplanmasında gerek maliyet gerek iş yükü açısından en uygun olanak sağlayan yaklaşımdır. Anlık Navier-Stokes denklemleri, akış ayırma değişkeni, ortalama ve dalgalanan vektör operatörüne atıfta bulunan Reynold ayrıştırmasına dayalı RANS denklemini türetmek için kullanıldı. Vektör operatörünün ortalaması bir Reynolds vektör operatörü olduğundan dalgalanan bileşenler sıfıra eşittir. $\overline{u'} = 0$. Bu vektör operatörünün özelliği kullanılarak, her anlık miktar ortalama ve dalgalanan bileşenlere bölünebilir ve elde edilen denklemin zaman ortalaması alınır ve şunu verir:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \bar{x}_j} + \overline{u_j' \frac{\partial w_\iota}{\partial x_j}} = \bar{f}_i - \frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial xj} \tag{3.7}$$

Denklemin tensör formu,

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j}[-\bar{p}\delta_{ij} + 2\mu \bar{S}_{ij} - \rho \overline{u_i' u_j'}] \tag{3.8}$$

- $\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2}(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i})$ ana gerilim tensörüdür.

Yukarıdaki denklemin türetilmesi ile zamana ilişkin parametrelerin entegrasyonu, zamana bağlı sonuç terimlerini ortadan kaldırır. Türbülanslı akışların özelliklerine yaklaşmak için RANS denklemleri, yukarıdaki denklemlerin uygulanmasıyla Navier-Stokes denklemlerine zaman ortalamalı çözümler vermek için kullanılır.

3.4.Geniş Eddy Simülasyon (LES) Türbülans Modelleri

Türbülanslı akışı modellemenin bir başka yöntemi de büyük girdap simülasyonudur. RANS'a benzer şekilde Navier-Stokes denklemlerinin çözülmesine dayanır, ancak uygulanan alçak geçiren filtreleme nedeniyle daha geniş zaman ve uzunluk ölçeklerine sahiptir. LES denklemi,

$$\overline{\phi(x,t)} = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \phi(r,\tau)G(x-r,t-\tau)d\tau dr \tag{3.9}$$

- G filtreli evrişim çekirdeğidir.

$$\bar{\phi} = G \times \phi \tag{3.10}$$

Navier-Stokes denklemi de,

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\overline{u_i}\overline{u_j}\right) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + 2\nu\frac{\partial}{\partial x_j}\bar{S}_{ij} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{3.11}$$

Ve artık gerilim tensörü tüm kapatılmamış terimleri toplar,

$$\tau_{ij} = L_{ij} + C_{ij} + R_{ij} \tag{3.12}$$

Momentum denklemi de,

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\overline{\partial u_\iota u_J}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu\frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial xj} \tag{3.13}$$

Filtrelenmemiş değişkenler u_i bilinmediği için $\frac{\overline{\partial u_\iota u_J}}{\partial x_j}$ teriminin hesaplanması imkânsızdır, ancak $\frac{\overline{\partial u_\iota u_J}}{\partial x_j}$ bilindiği için yerine koyma yoluyla,

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_\iota u_j}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u}_i}{\partial x_j \partial xj} - \left(\frac{\overline{\partial u_\iota u_j}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_\iota u_j}}{\partial x_j}\right) \quad (3.14)$$

- $\tau_{ij} = \overline{u_\iota u_j} - \overline{u_\iota}\,\overline{u_j}$ ve LES denklemi de,

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u}_i}{\partial x_j \partial xj} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3.15)$$

3.5.Direkt Nümerik Çözüm (DNS) Türbülans Modelleri

Navier-Stokes denklemleri, türbülansın tüm uzaysal ve zamansal ölçeklerini temsil eden DNS için herhangi bir türbülans modeli olmadan nümerik olarak çözülür. Enerji tüketen ölçekler veya Kolmogorov mikro ölçekleri ve integral ölçekler aralığında, türbülansın uzaysal ölçeklerinin çözümünde hesaplamalı bir ağ kullanılır.

$$\eta = \sqrt[4]{\frac{\nu^3}{\varepsilon}} \quad (3.16)$$

- η = Kolmogorov ölçeği
- ν = Kinematik vizkozite
- ε = Kinetik enerji dağılımı oranı

Genellikle, sınır koşullarının uzaysal ölçeği, integral ölçeğini Nh>L ilişkisi ile etkiler.

- N = Belirlenen ağ boyunca verilen noktaların sayısıdır.
- h = Aşamalı artış katsayısı

Hesaplamalı alanda integral ölçeği şu şekilde bulunur ve Kolmogorov ölçeği şu şekilde çözülebilir:

$$h \leq \eta \quad (3.17)$$

DNS modelinin geri kalanı, geçerli Navier-stokes denkleminin doğrudan uygulanmasıyla etki alanında simüle etmektir.

3.6.Kanat Profili Parametrelerine Göre Tasarımın Yapılması

Kanat profili tasarımı yapılırken tezin amacına uygun bir biçimde kanat profilinin tasarım parametreleri güncellenir. Bu parametrelere göre kanat profili tasarımı yere basma kuvveti katsayısının sürüklenme kuvvetine oranını en uygun olacak şekilde yapılacaktır.

3.6.1. Kamber (Camber)

Eğer kanat profilinde kamber artarsa, sürüklenme kuvveti artar (c_D), fakat bununla beraber üst ve alt yüzey arasında basınç farkı oluşacağı için kaldırma kuvveti katsayısı (c_L) da artar(Influence of camber on aerodynamic performance of airfoil based on CFD technology, 2022 - Analysis of the Influence of Camber on Hydrodynamic Characteristics of Airfoil Based on FLUENT, 2020). Bu yüzden asıl dikkate alacağımız c_L/ c_D oranını etkiler. Bu tasarımda da sürüklenme kuvvetini minimum seviyede tutulacağı için kamber açısı -5° ile +5° arasında olacaktır. Araştırmalar sonucunda da bu açılarda daha yüksek c_L/ c_D oranı tespit edilmiştir. (Influence of camber on aerodynamic performance of airfoil based on CFD technology, 2022)

3.6.2. Ön kenar yarıçapı (Leading edge radius)

Eğer kanat profilinde ön kenar yarıçapı artarsa hem sürüklenme kuvveti hem de kaldırma kuvveti artar. Yapılan çalışmalarda yüksek yarıçaplı ön kenarlarda cL/ cD oranında yükselmeler gözlemlenmiştir. (Study on aerodynamics characteristics of the effect of leading-edge radius of FDM printed (ABSi material) supersonic aerofoil, 2023)

3.6.3. Veter hattı (Chord line)

Eğer kanat profilinde veter hattı kısalırsa hem sürüklenme kuvveti katsayısı hem de kaldırma kuvveti katsayısı artar. Uçak kanadı tasarımında etkili bir kaldırma kuvveti katsayısı için kısa veter hattı kullanılır. (The Impact of the Chord Length of an Airfoil, 2020)

3.6.4. Kanat boy-en oranı

Eğer kanat profilinde boy-en oranı azalırsa kaldırma kuvveti katsayısı artar. (The impact of aspect ratio on aerodynamic performance and flow separation behavior of a model wing composed from different profiles, 2018) Veter hattı kısaldıkça kaldırma kuvveti katsayısının azalmasından da yola çıkarak bu durumu yorumlayabiliriz. Fakat boy-en oranı azaldıkça kanat ucunun alanı daha az olduğu için girdap kaynaklı aşağı akım daha az olur, bu da çok daha az sürüklenme anlamına gelir. (How Does Aspect Ratio Affect Your Wing?, 2022)

3.6.5. Kanat tasarımlarının belirlenmesi

Yapılacak kanat profil tasarımlarındaki amaç yere basma katsayısını en yüksek seviyede sürüklenme kuvvetini de minimuma indirmektir. Üstelik kanat profillerini sabitleyecek parçanın da sınır tabakadaki devamlılığını da sağlaması gerekmektedir.

İlk olarak yere basma katsayısı değerinin yüksek olabileceği bir NACA kanat profili seçilmiştir. S1223 kanat profili gerek kamber açısı gerek ön kenar yarıçapı kıstaslarından dolayı yüksek bir kaldırma kuvveti katsayısına sahiptir. Keza aynı şekilde S1223 kanadına göre her ne kadar daha simetrik olsa da yüksek yere basma katsayısına sahip olan 4412 kanat profili de kullanılmıştır. Üstelik bu kanat profilleri araçların hızlarından dolayı oluşan ve nispeten uçaklara göre daha düşük bir hızda hareket ettiği için, aynı zamanda takılacak arka kanat profili büyüklüğü de uçaklardaki kadar büyük olamayacağı için düşük Reynolds sayılarında daha etkili kaldırma kuvveti katsayısı değeri vermektedir. İki kanadı da inceledikten sonra en yüksek kaldırma kuvveti katsayısı ve sürüklenme katsayısı oranına sahip olan kanat seçilecektir.

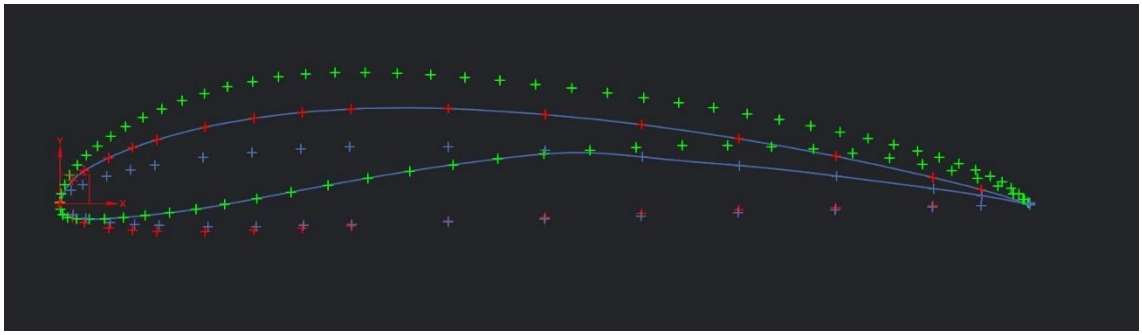
İkinci olarak ise asıl kıyaslanacak olan S1223 ve 2408 kanat profillerinden daha yüksek kaldırma kuvveti katsayısı ve daha düşük sürüklenme kuvveti katsayısını elde etmek amacıyla geliştirilen özel tasarım kanadı düzenlenmiştir. Özel kanat tasarımında 3 adet kanat profili göz önünde bulundurulmuştur.

İlk kanat profili olarak ilk numunenin kanat profili olan S1223 kanat profili kullanılmıştır. Bu kanattaki eğimli kamberli bir tasarıma sahip olması ve bu durumdan dolayı oluşan kaldırma kuvveti katsayısı tasarımın alt ana iskeletine referans olmuştur.

İkinci kanat profili olarak simetrik olan NACA 4412 numunesi seçilmiştir. Bu kanat profilinin düzlemsel yapısı ve araştırmalarda yapılan diğer simetrik kanat profilleri üzerinde daha yüksek kaldırma kuvveti katsayısı – sürüklenme kuvveti katsayısı oranına sahip olması bu kanat profilinin seçilmesinde etkili olmuştur. (COMPARISON OF HINT WIND TINES OF AIRFOIL TYPE NACA 4412, NACA 23012, and NACA 16-212 USING QBLADE SOFTWARE, 2019)

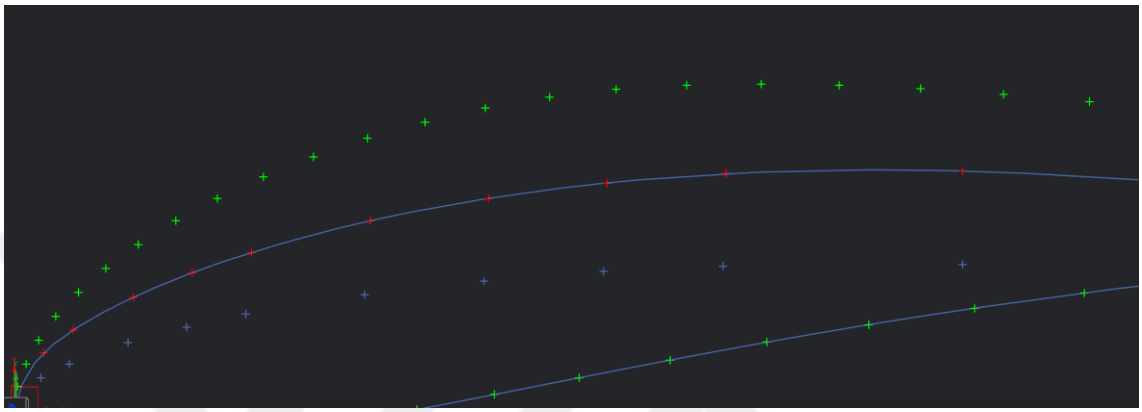
Son olarak otomotiv dünyasında kullanılan ve yere basma kuvvetini fazla bir şekilde elde edilebilecek bir kanat profili kullanılmıştır. NACA'nın 2408 kanat profili gerek daha dar kanat yapısı ve da akışın herhangi bir ayrım olmadan yüzeyde devam etmesi etkisiden dolayı bu seçimde etkili olmuştur. Üstelik yüksek değerdeki kaldırma kuvveti katsayısı – sürüklenme kuvveti katsayısı oranına sahip olması bu kanat profilinin seçilmesinde etkili olmuştur. (Structural Analysis of Formula One Racing Car, 2015)

Tüm profillerin noktasal 2 boyutlu versiyonu aşağıda belirtilmiştir. Yeşil renk S1223 kanat profilini, kırmızı renk 4412 kanat profilini, mavi renk olanlar ise 2408 kanat profilini temsil etmektedir. Oluşturulan kanat profili koyu mavi ile gösterilmiştir.



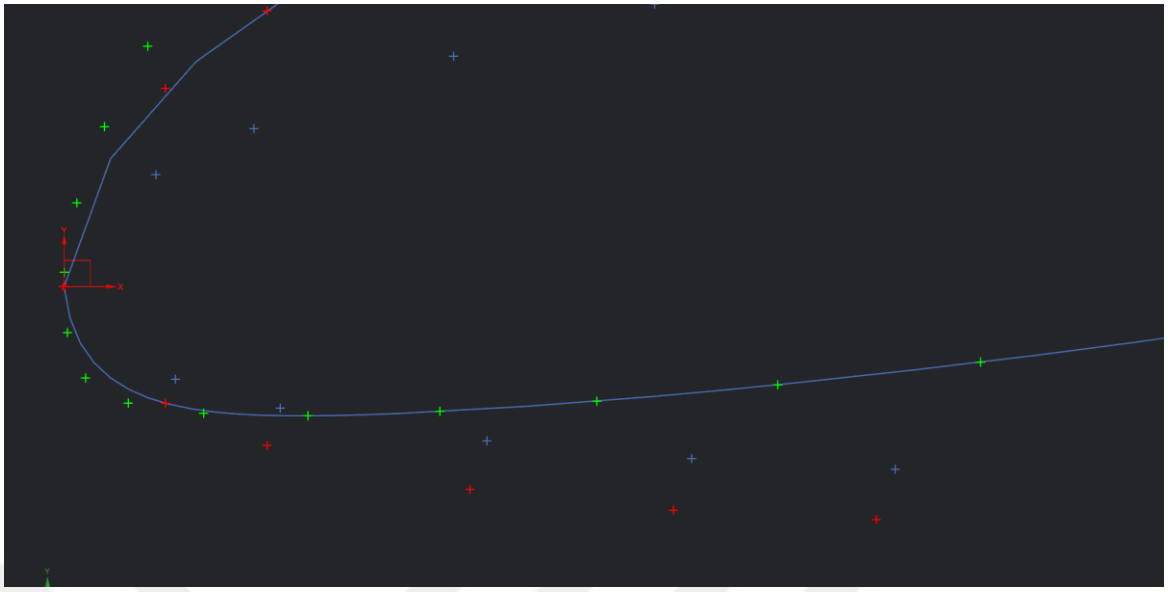
Şekil 3.1. Özel kanadın oluşturulmasında referans alınan kanat profili doğruları

Ön kanattaki kalınlıgı azaltıp kamber açısını arttırarak hem daha kısa bir airfoil hem de daha açılı bir airfoil elde etme hedeflenmiştir. Kanat profilindeki kalınlığın azaltılması ile sürüklenme kuvveti katsayısını düşürme amacı oluşturulmuş, üst kanat profili için ise ilk profilde kullanılan S1223 kanat profilinden daha dar bir yapıya sahip olan 4412 kanat profili tercih edilmiştir.



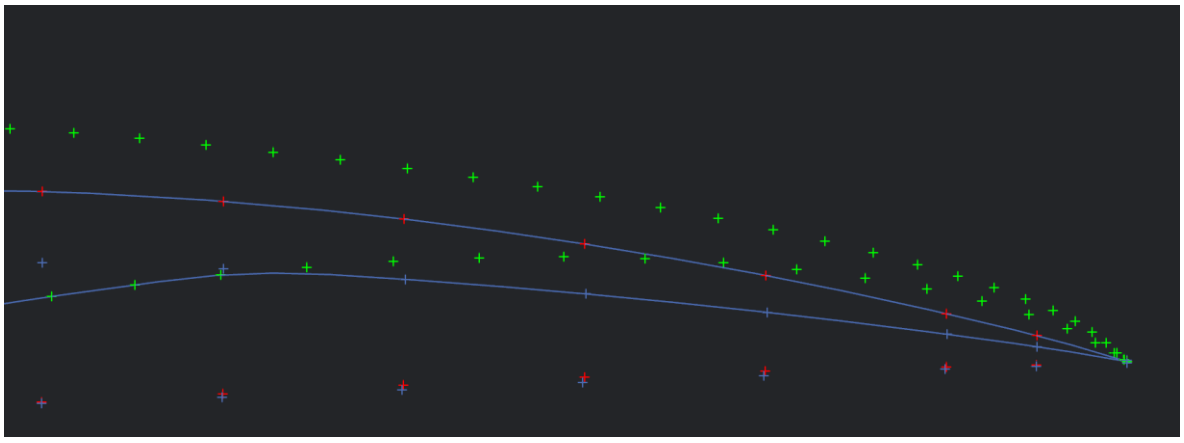
Şekil 3.2. S1223(yeşil) - 4412(kırmızı) üst kanat yapısı kıyası

Ön kanattaki alt kanat yapısı için ise sürüklenme katsayısının azaltılması hedeflenmiş ve ilk olarak daha ön taraftaki bombeyi azaltma hedeflenmiştir. Bu yüzden ilk doğrusallığı S1223 kanat profili yerine 4412 yapısı seçilmiştir, fakat ardından gerekli kamberi sağlamak için ise S1223 kanat yapısı ile devam edilmiştir. Ön taraf için tasarımın devamında olası bir çakışma yaşanacağından ve üretiminden verim alınamayacağı için 2408 numuneli kanat profili denemeler sonrasında tercih edilmemiştir.



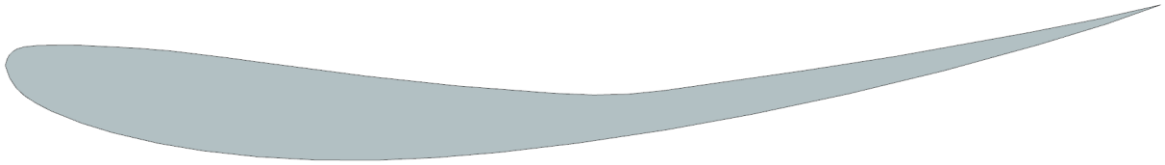
Şekil 3.3. Ön kanattaki S1223(yeşil) - 4412(kırmızı) alt kanat yapısı kıyası

Kanat profilinin devamı için kamberi yüksek ve eğimli bir kanat yapısı hedeflenmiştir. Belli bir uzunluğa kadar eğimi olabildiğince yakalamak için kamberi en yüksek olan S1223 numunesi tercih edilmiştir, fakat belli bir yerden sonra üst kanattaki çakışmadan kaçınmak için ise 2408 kanat profilinin tasarımı ile özel numune kanat profilinin alt yüzeyi tamamlanmıştır. Burada 4412 kanat numunesinin kullanılmama sebebi ise alt yüzeyinin son derece kalın olmasıdır.

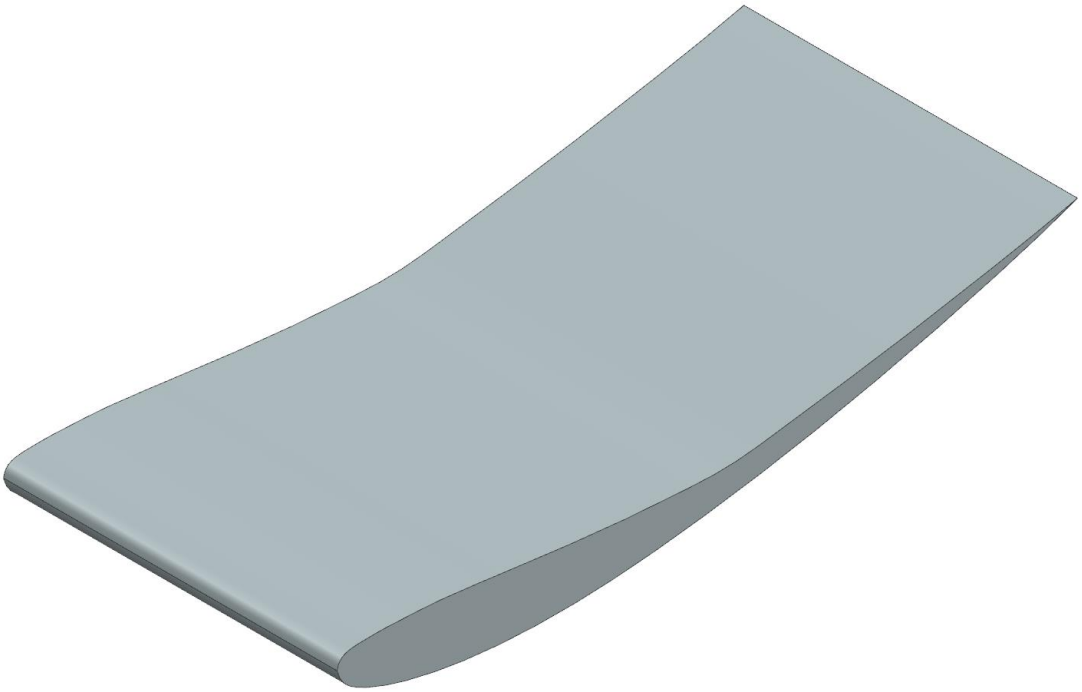


Şekil 3.4. Alt kanadın yapılandırılması

Yapılan tasarım kaldırma kuvveti yerine, yere basma kuvvetine etki etmesi açısından 180 derece çevrilmiştir. Üstelik negatif atak açısı değerlerine göre yere basma kuvvet katsayısı artacaktır ve tasarım bu duruma göre güncellenecektir.



Şekil 3.5. Özel tasarımın yandan görünüşü



Şekil 3.6. Özel tasarımın izometrik görünüşü

3.7.Kanat Profillerin Nümerik Analizi

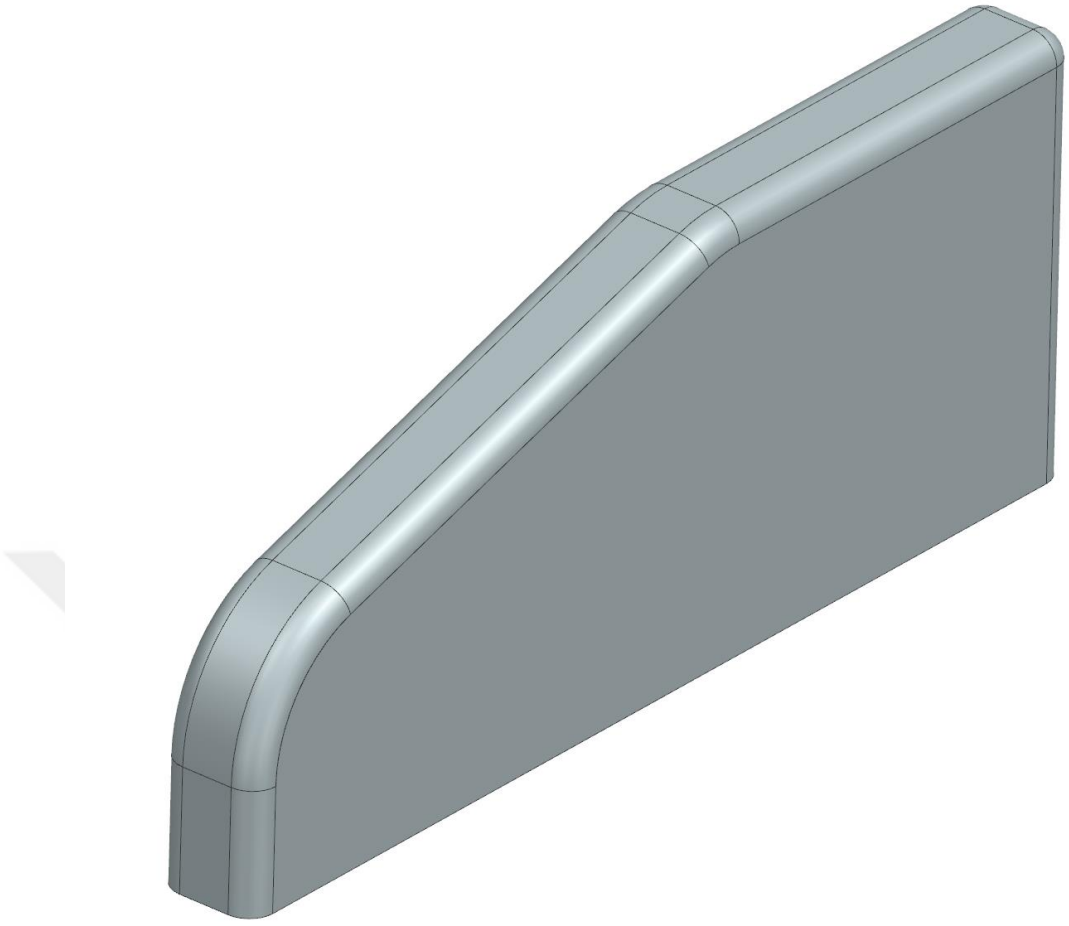
Tez çalışması sırasında nümerik analizler iki kısımda incelenmiştir. İlk kısımda kanat profili bazında, kanat profillerinin atak açısına bağlı olarak en uygun C_L/C_D oranını yakalayarak en fazla yere basma kuvvetini elde etmek için yapılmıştır.

Kanat profilleri iki yönden incelenmiştir. İlk olarak kanat profillerini negatif atak açısına göre kanatlardaki en yüksek C_L/C_D oranını yakalamak, ikinci madde ise bu kanatların araç yüzeyindeki arasındaki mesafeye göre yine aynı amaçta en yüksek C_L/C_D oranını yakalamak olacaktır.

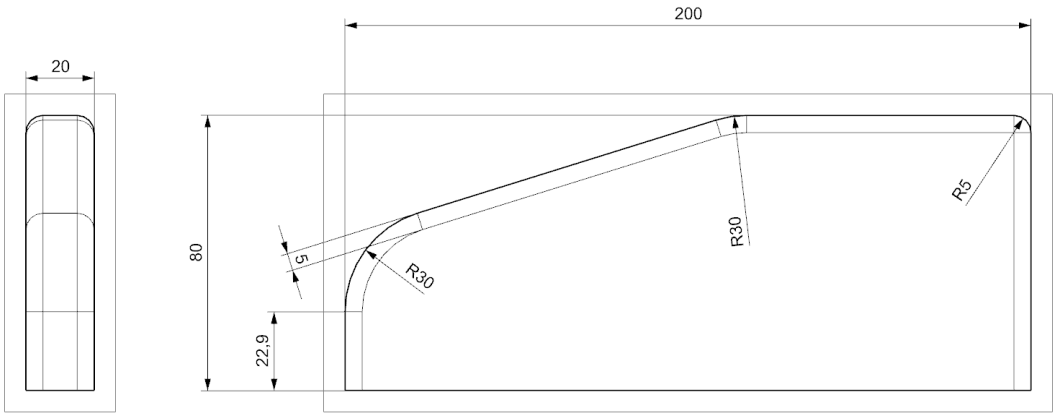
En uygun kanat profillerini bulduktan sonra kanatçıklara takılmak üzere tasarım sonlanacaktır. Bu kanatçıklar da aracın üstüne takılarak araca etki edecek yere basma kuvveti, sürüklenme kuvveti ve sınır tabaka ayrımı belli hızlar eşliğinde incelenecek ve olası arka kanat tasarımı hakkında tasarım bilgilendirilmesi yapılacaktır.

Bu kanatçıklar levha ve kanat profilleri olmak üzere 2 kısımdan oluşmaktadır. Sadece levha ve kanatçığa sahip levhalı girdap üreticileri kullanılmıştır. Kanatlı girdap üreticilerinde levhaların normalde şartlarda her yüzeyinde birer adet kanatçık olacaktır. Kanatçık numune örnekleri,

- Numune 1: Sadece levha içeren numune. Burada amaç nümerik analizlerde kanat profili olan ile olmayan kanatçık numunleri arasındaki sınır tabaka, sürüklenme ve negatif kaldırma katsayılarını karşılaştırmak olacaktır.



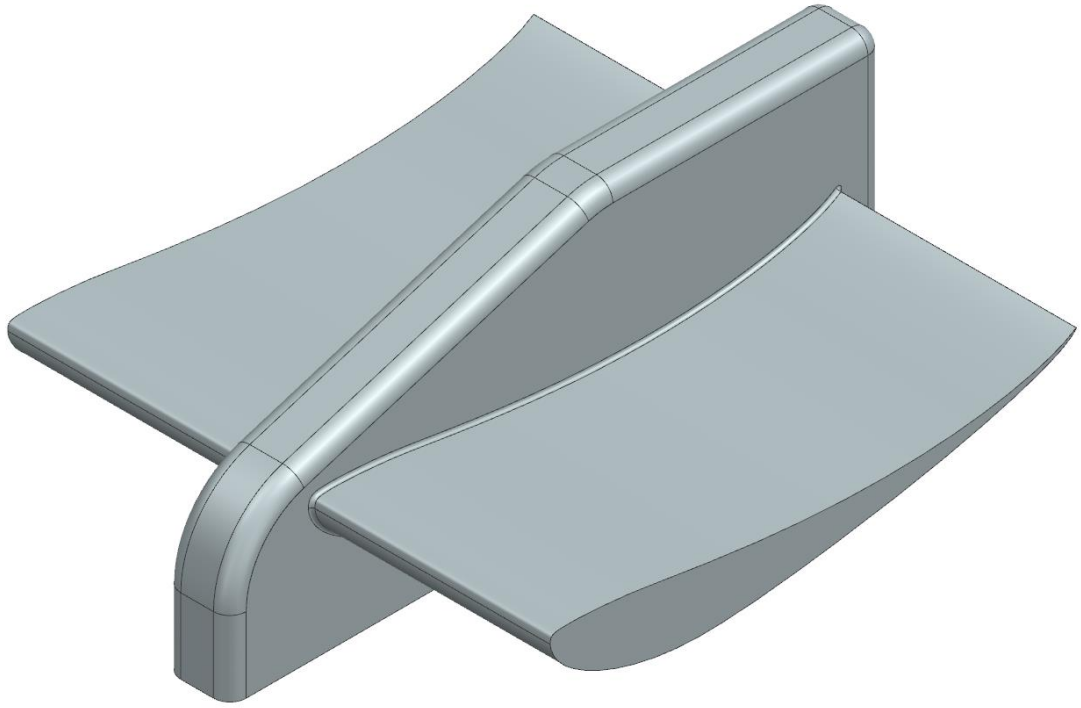
Şekil 3.7. Numune 1 izometrik görüntü



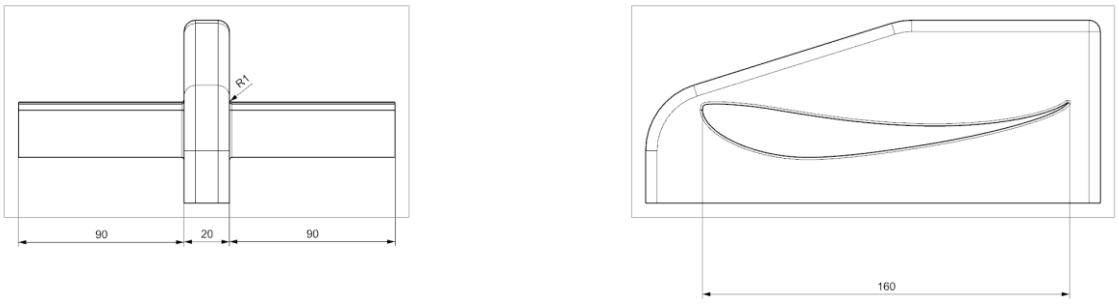
Şekil 3.8. Numune 1 teknik resim ölçüleri

- Numune 2: Bu numune de ise kanat profili olarak daha NACA tiplerinden seçilmiştir. İncelenen S1223 – 2408 kanat profillerinden atak açılarına göre en

yüksek C_L/C_D oranına sahip olan NACA profili kanatçık olarak seçilmiştir. Bu numunede -1.5° atak açılı S1223 kanadı seçilmiştir. Üstelik kanat yüksekliği yerden yüksekliği 25 mm olarak belirlenmiştir.



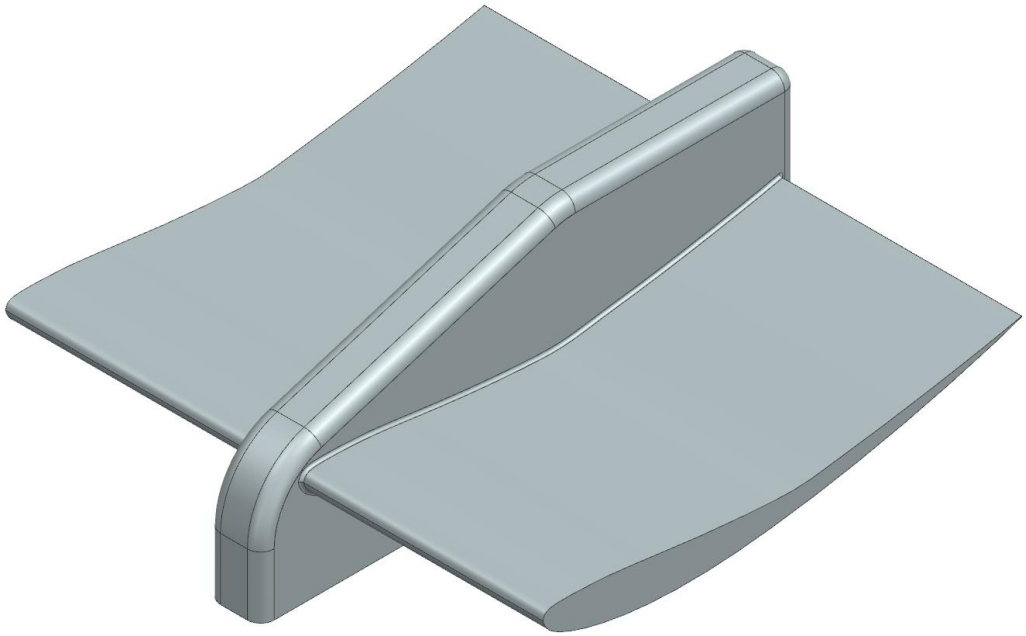
Şekil 3.9. Numune 2 izometrik görüntü



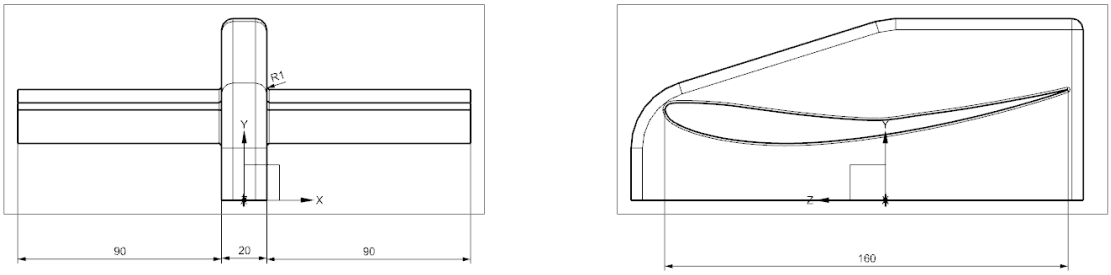
Şekil 3.10. Numune 2 teknik resim ölçüleri

- Numune 3: Özel tasarım kanat profiline sahip olan numune. Buradaki amaç teorik bilgiler ile bu çalışmada yapılmış özel tasarımına ait kanatçığın, tasarımı önceden

yapılmış kanat profiline (Numune 2) ait numuneler arasındaki sınır tabaka, sürüklenme ve negatif kaldırma katsayılarını karşılaştırmak olacaktır. Özel tasarımın atak açısı -3°'dir. Üstelik kanat yüksekliği yerden yüksekliği 25 mm olarak belirlenmiştir.



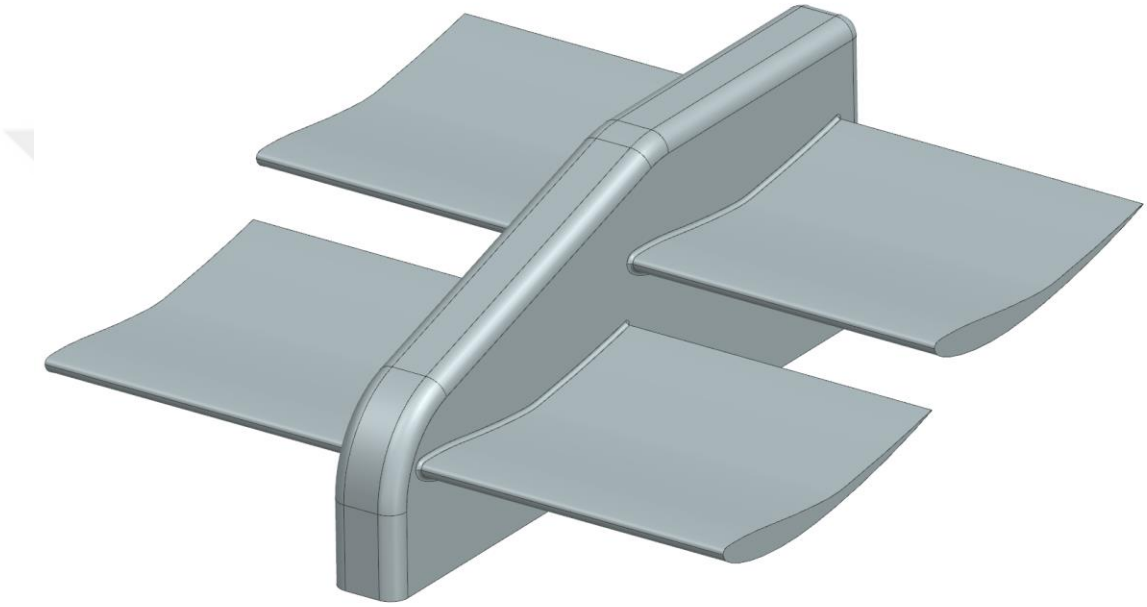
Şekil 3.11. Numune 3 izometrik görüntü



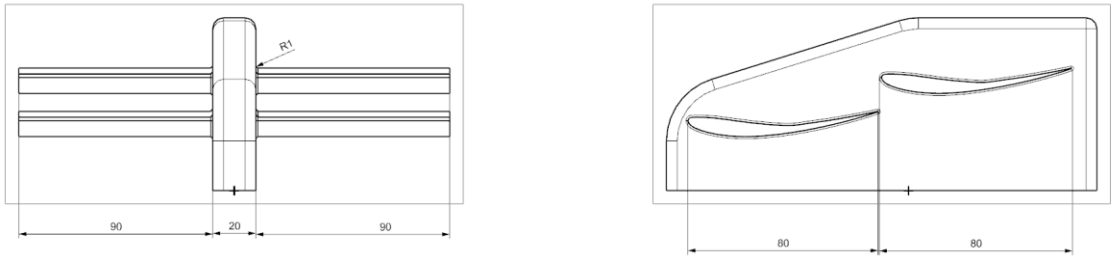
Şekil 3.12. Numune 3 teknik resim ölçüleri

- Numune 4: Dizaynı yapılmış numune 2 ve numune 3'ün analizlerinden çıkan sonuçlar sonrasında en yüksek C_L/C_D oranına sahip numunenin kanat ölçekleri yarıya indirilip kanat sayısı 2 katına çıkarılmıştır. Buradaki amaç ise önceki

tasarımlardaki kenar başına 1 adet bulunan kanat sayılarını 2 adete çevirerek aralarındaki sınır tabaka, sürüklenme ve negatif kaldırma katsayılarını karşılaştırmak olacaktır. Üstelik 2 kanat arasındaki yükseklik mesafesi de analizlerde incelenmiş ve "Bulgular ve Tartışma" bölümünde açıklanmıştır. Kanatçık olarak özel tasarım kullanılmış ve ilk kanadın yerden yüksekliği 25mm, ikinci kanadın yerden yüksekliği ise 45mm olarak seçilmiştir.



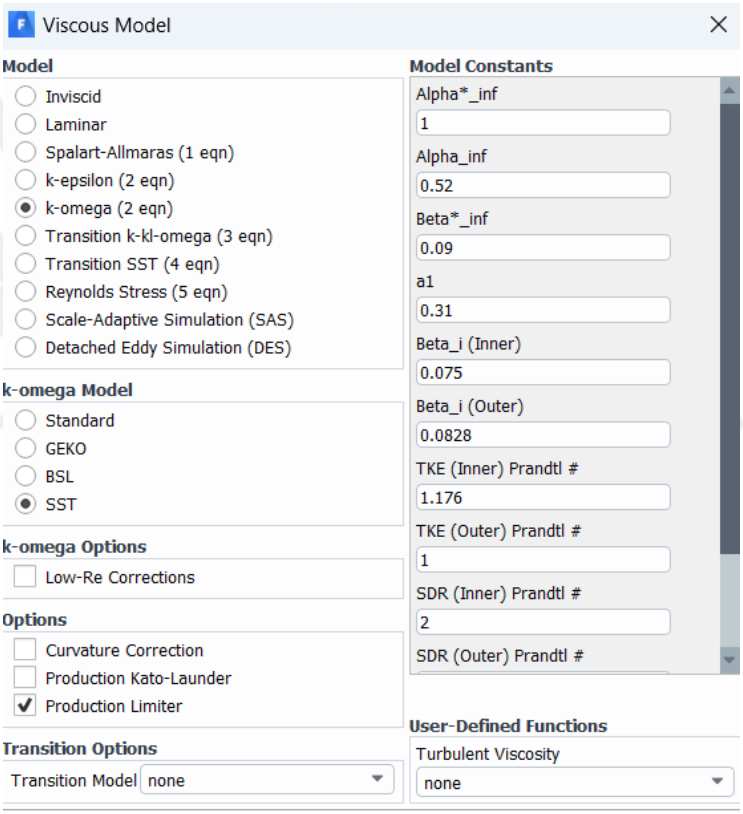
Şekil 3.13. Numune 4 izometrik görüntü



Şekil 3.14. Numune 4 teknik resim ölçüleri

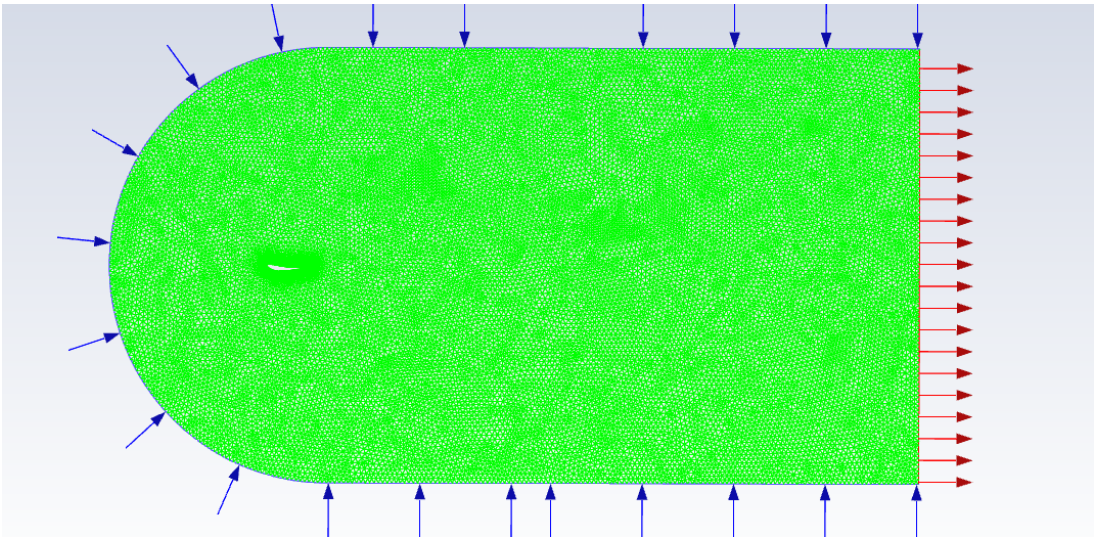
ANSYS Fluent programında analizler gerçekleştirilirken modelin çözüm yöntemi k-w SST olarak belirlenmiştir. Bu metodun seçilmesindeki faktörler,

- Bir analiz programı olan Simscale açıklamalarına göre binek araçlardaki aerodinamik analizler yapılırken, y^+ değeri genellikle 1 olarak kabul edilir. Yapılan araştırmalar sonucunda ise k-w modelinin bu tarz analizlerde daha uygun sonuçlar verildiğine kanaat getirilmiştir. (What is y+ (yplus)?, 2018)
- Üstelik kanat profili kullanılması bu metodun k-w metodunun içindeki SST seçeneği kullanılmalıdır. Bu seçenek ANSYS programının kullanım dokümantasyonunda açıklanmıştır. (Shear-Stress Transport (SST) k-w Model, 2009)

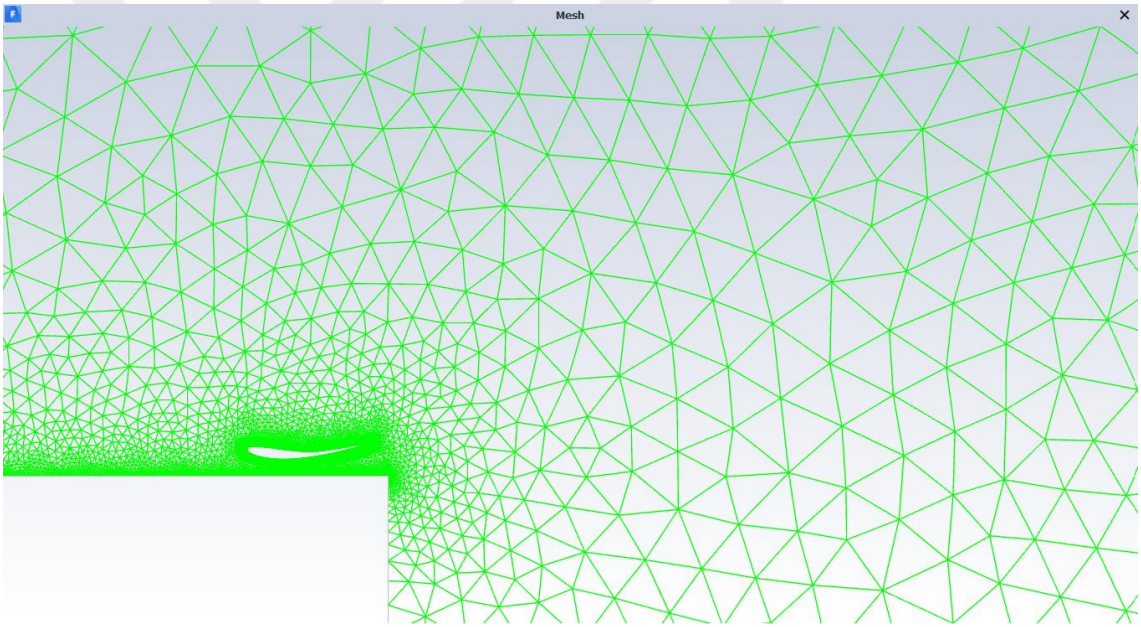


Şekil 3.15. Nümerik analiz çözüm metodu

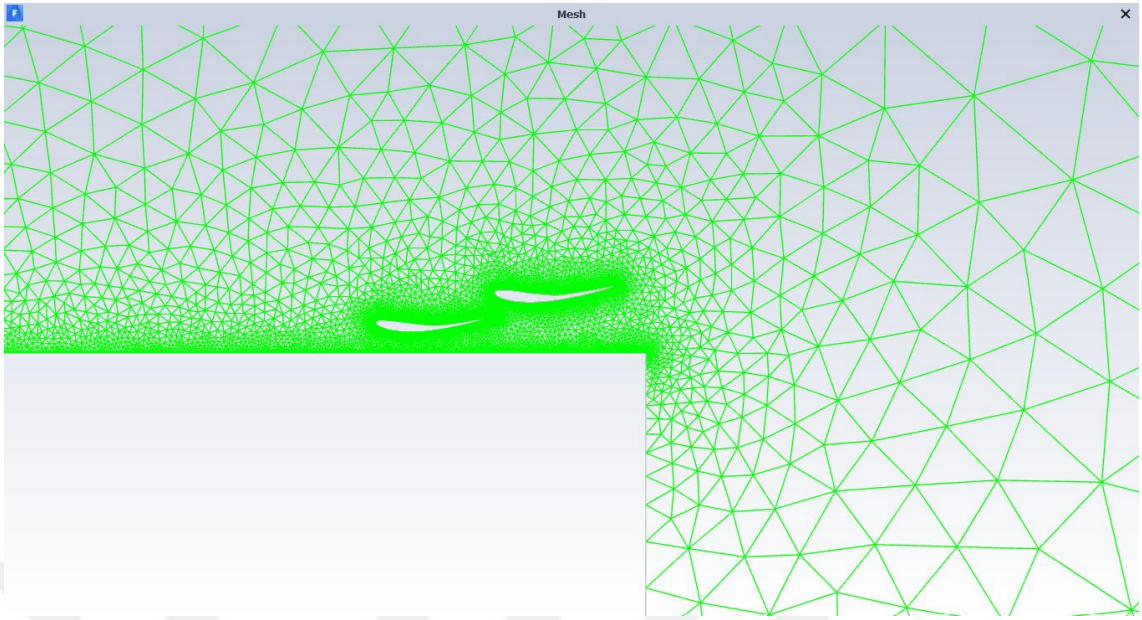
Kanatçıkların C_L/C_D oranını atak açısına göre incelenmesi yapıldığı için, giriş hızı sabit ve 100 km/h (27.77 m/s) kullanılmıştır. Giriş ve çıkış sınır kondisyonları aşağıdaki gibidir.



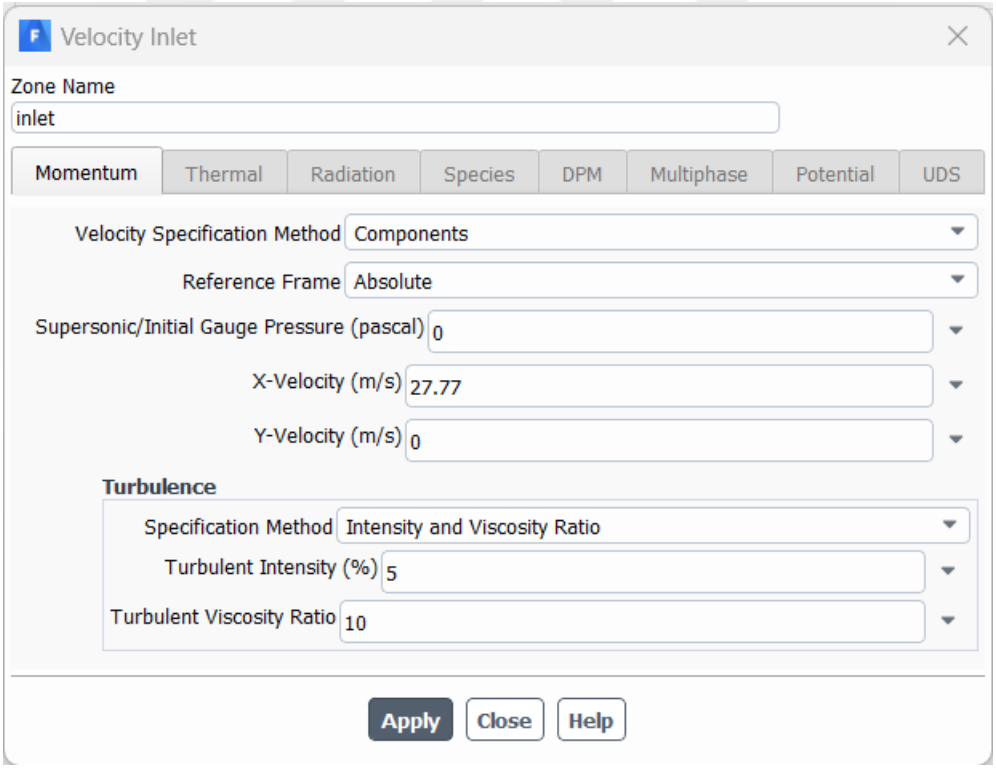
Şekil 3.16. İlk durumda incelenen nümerik analiz düzeneği



Şekil 3.17. İkinci durumda kanat profillerinin yüksekliğini inceleyen nümerik analiz düzeneğinin yakından görünümü



Şekil 3.18. İki adet kanatlı senaryodaki ikinci kanadın yüksekliğini inceleyen nümerik analiz metodu



Şekil 3.19. Dikkate alınan hız değeri

Çözüm sonuçlarında ise girdap üreticilerinin sürüklenme kuvveti ve negatif kaldırma kuvveti katsayıları toplanır. Kontür görüntüsü olarak da kanatçıklardaki basınç ve hız profili, toplam girdap üreticisindeki basınç profili ve levhadaki hız profili alınır.

Analizler atak açısı bakımından 1.5 derece arttırılarak 0 dereceden 13.5 dereceye kadar yapılmıştır. Bu süreç içinde bulunan değerlerden Kaldırma Katsayısı/Sürüklenme Katsayısı oranının en büyük olduğu kanatçık tipi seçilmiştir.

4. BULGULAR (BULGULAR ve TARTIŞMA)

4.1.Kanat Profilleri Nümerik Analizin Validasyonu

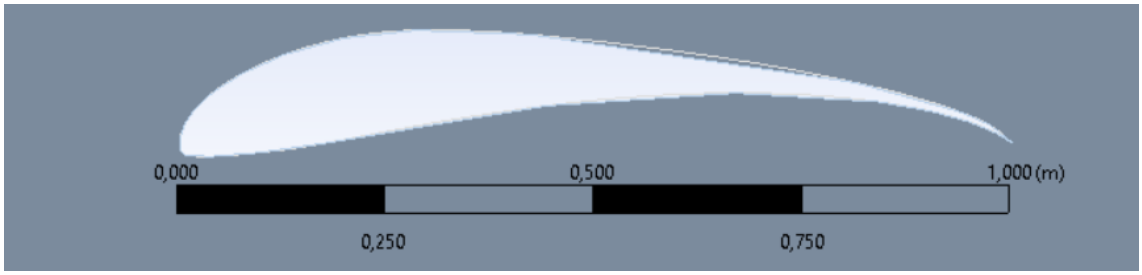
Nümerik analizlerin sonuçlarından emin olmak için bu sonuçların Reynolds sayılarına eş olacak NACA değerleri ile uyuşması gerekmektedir. Bu yüzden nümerik analiz sonuçlarının doğruluğunu sağlamak için NACA kanat profili grubundan S1223 kanat profilinin Reynolds sayısı türbülanslı bir akışı kabul edebilmek için 500000 olduğu kaldırma kuvveti katsayısı sonuçları baz alınmıştır.

Analiz için gereken parametreleri bulmak için hava sıcaklığı 25 derece olarak kabul edilmiş ve açık hava basıncı 1 atm olarak alınmıştır. Buradan yola çıkarak havanın termodinamik değerleri,

- Dinamik Vizkozite = 1.8444×10^{-5} kg/ms
- Yoğunluk = 1.1845 kg/m^3 olarak alınmıştır.

Bir analiz programı olan Simscale açıklamalarına binek araçlardaki aerodinamik analizler yapılırken, y^+ değeri genellikle 1 olarak kabul edilir. Yapılan araştırmalar sonucunda ise bu tarz analizlerde bu değerin daha uygun sonuçlar verildiğine kanaat getirilmiştir. (What is y+ (yplus)?, 2018)

Kanat analizlerindeki kanat uzunluğu 1m olarak alınmıştır.



Şekil 4.1. Deneme yapılacak olan kanat profili uzunluğu görseli

Buradan yola çıkarak 500000 olarak hedeflenen Reynolds sayısına ulaşmak için hız değerimiz,

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \rightarrow 500000 = \frac{1.1845 \times V \times 1}{1.8444 \times 10^{-5}} \rightarrow V = 7.785563529\ m/s$$

Analizdeki doğruluğu arttırmak için eklememiz gereken optimum sınır tabaka sayısını da bulunması gerekmektedir. Bu yüzden ilk olarak yüzey sürtünme katsayısı (C_f) bulunmalıdır.

$$C_f = [2\log(Re) - 0.65]^{-2.3} = 0.004245726$$

Ardından duvar kayma gerilimi değeri bulunur.

$$\tau_w = \frac{1}{2}\rho U^2 C_f = 0.152418308$$

Sürtünme hız değeri ise aşağıdaki gibi bulunur.

$$U_T = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = 0.358716238$$

Bu değerlerin sonucunda ilk sınır tabaka yüksekliğimiz ise belli olmuştur.

$$y_1 = \frac{y^+ \mu}{U_T \rho} = 4.34079 \times 10^{-5}\ m$$

Sınır tabakanın kalınlığı ise şu şekilde bulunmuştur. Denklemdeki G değeri 1.5 olarak alınmıştır. (Gonzales, 2023)

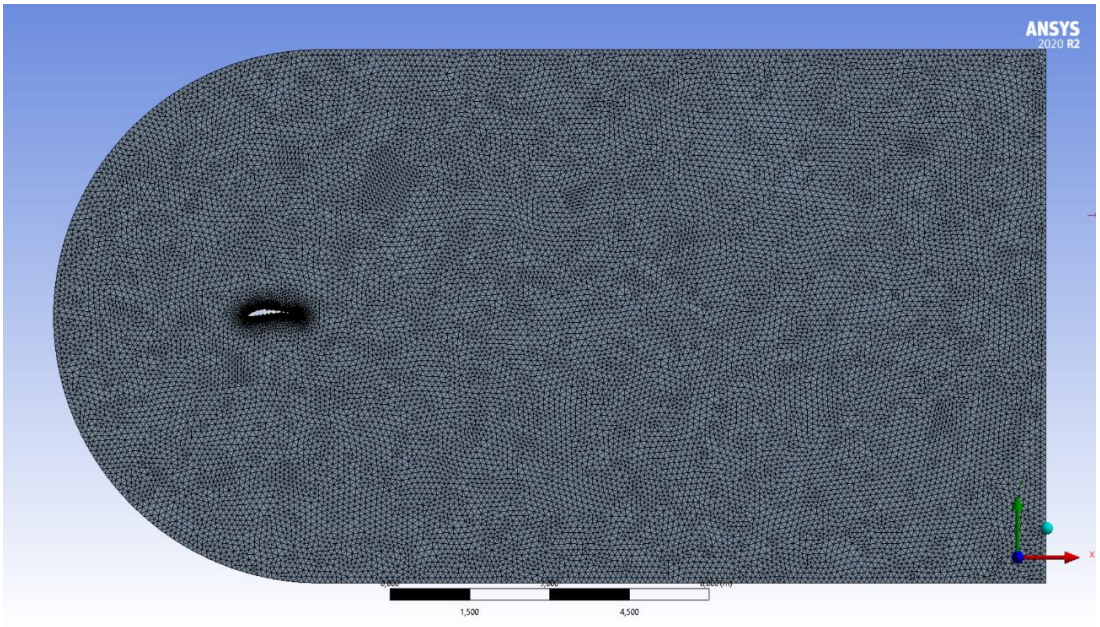
$$\delta = 0.14 \frac{\nu}{U} \frac{Re}{\ln(Re)} G(\ln(Re)) \approx 0.21\ m$$

Toplam sınır tabaka sayısı ise sınır tabakalar arasında büyüme oranını 1.1 kat (g=1.1) olarak baz aldığımızda ise aşağıdaki adet sayısı kadar belirlenmiştir.

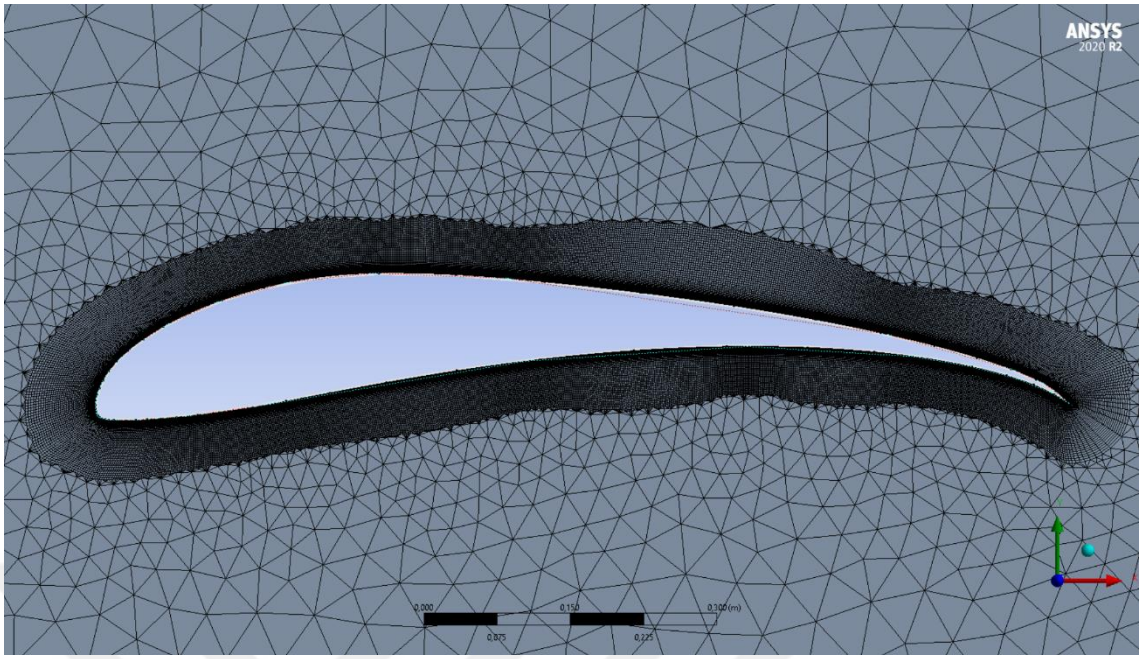
$$\delta = y_1 \frac{1 - g^{N+1}}{1 - g} \rightarrow N = 63.87966449 \approx 64$$

Bu sonuçlara göre ağ yapısının validasyonu için oluşturulan alternatifler aşağıdaki gibidir.

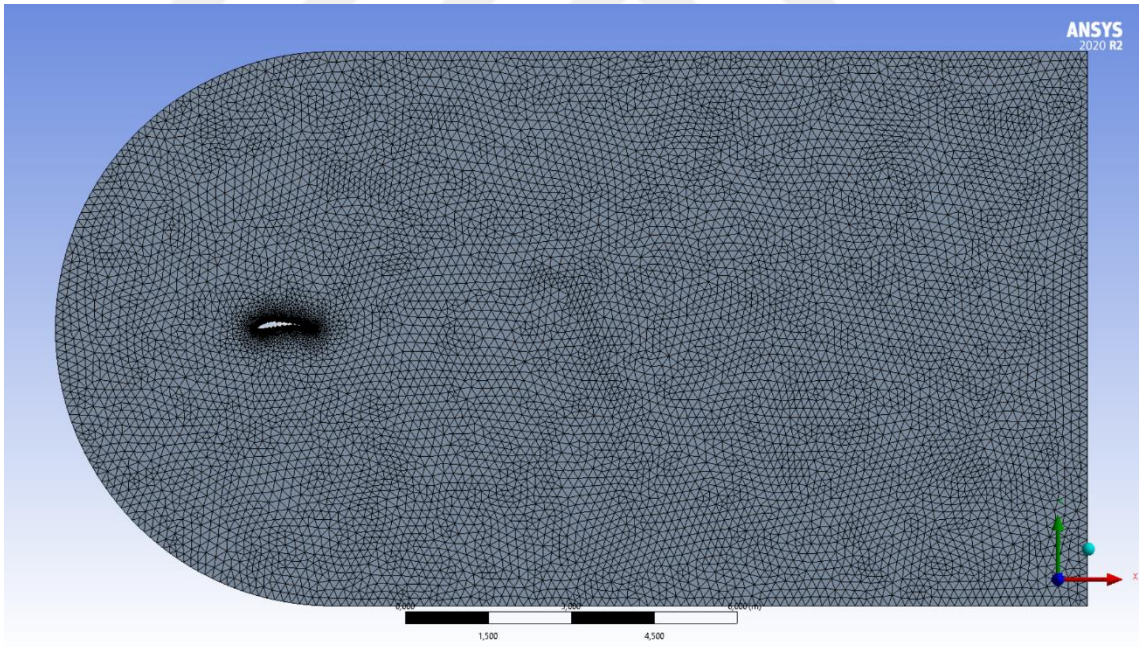
- Ağ büyüklüğü sırasıyla 0.1-0.15-0.2 m olarak belirlenmiştir. Bu büyüklüklere göre ağ örgüsü isimleri sırasıyla yüksek, orta, düşük detaylı olarak sınıflandırılmıştır. Buradaki amaç analiz sonuçlarının ağ örgüsünden dolayı oluşacak hata paylarını minimuma indirgemek ve bu yapıya göre uygun ağ modeli ile analizlere başlamaktır.
- Kenar ölçülendirmesinde ise kenarlar sırasıyla 800-600-400 parçaya bölünmüştür.
- Sınır tabaka değerleri değiştirilmemiştir.
- Hata payları da $\frac{|Eski\ değer - Yeni\ Değer|}{Eski\ Değer} \times 100$ olarak belirlenmiştir.



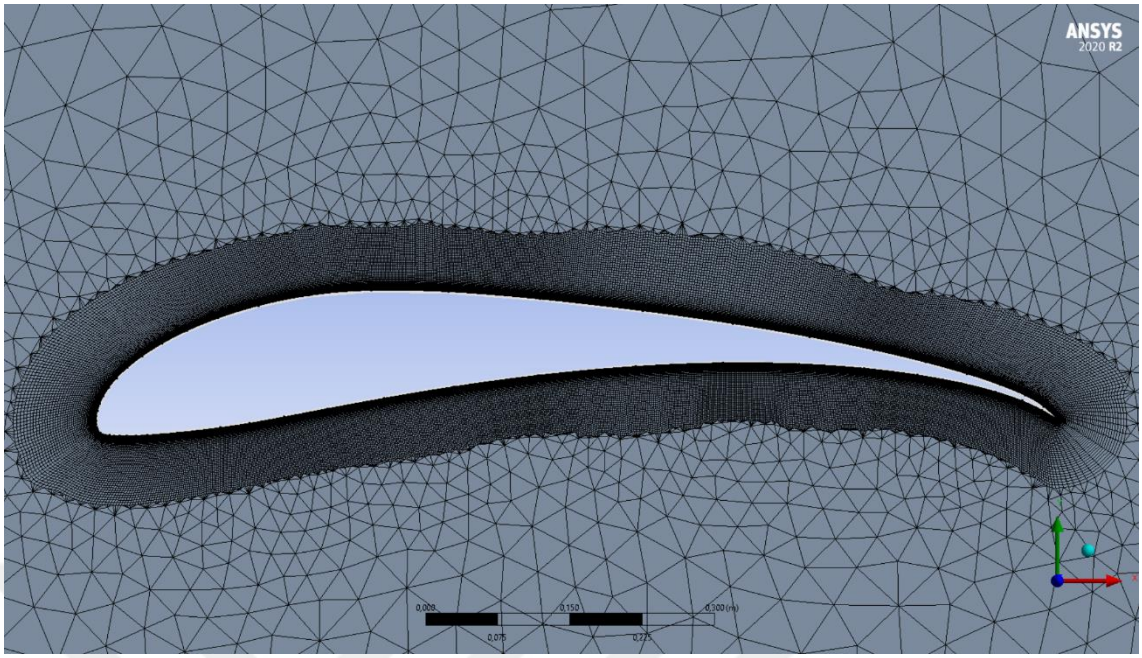
Şekil 4.2. Genel ağ yapısı – yüksek detaylı ağ örgüsü (Ağ büyüklüğü = 0.1m & kenar parça detayı = 800 adet)



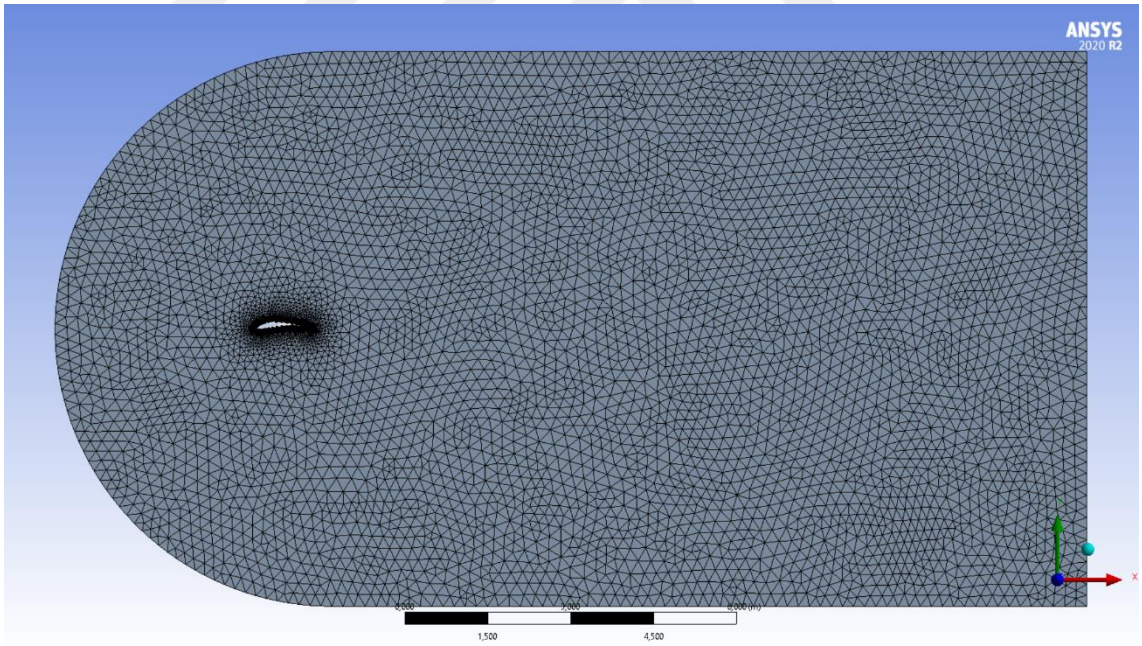
Şekil 4.3. Sınır tabaka ağ yapısı – yüksek detaylı ağ örgüsü (Ağ büyüklüğü = 0.1m & kenar parça detayı = 800 adet)



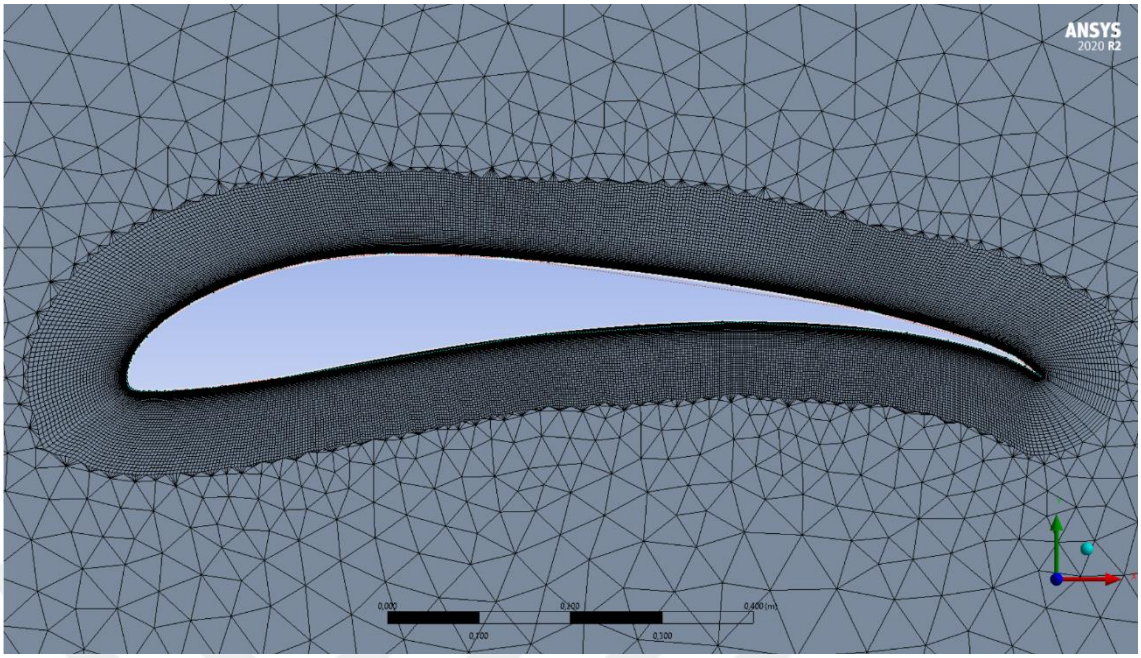
Şekil 4.4. Genel ağ yapısı – orta detaylı ağ örgüsü (Ağ büyüklüğü = 0.15m & kenar parça detayı = 600 adet)



Şekil 4.5. Sınır tabaka ağ yapısı – orta detaylı ağ örgüsü (Ağ büyüklüğü = 0.15m & kenar parça detayı = 600 adet)

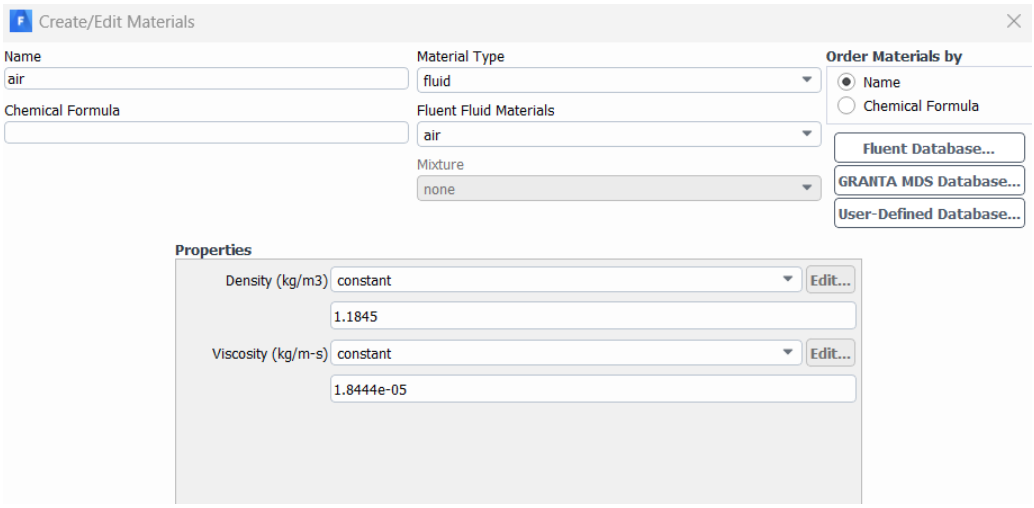


Şekil 4.6. Genel ağ yapısı – düşük detaylı ağ örgüsü (Ağ büyüklüğü = 0.2m & kenar parça detayı = 400 adet)

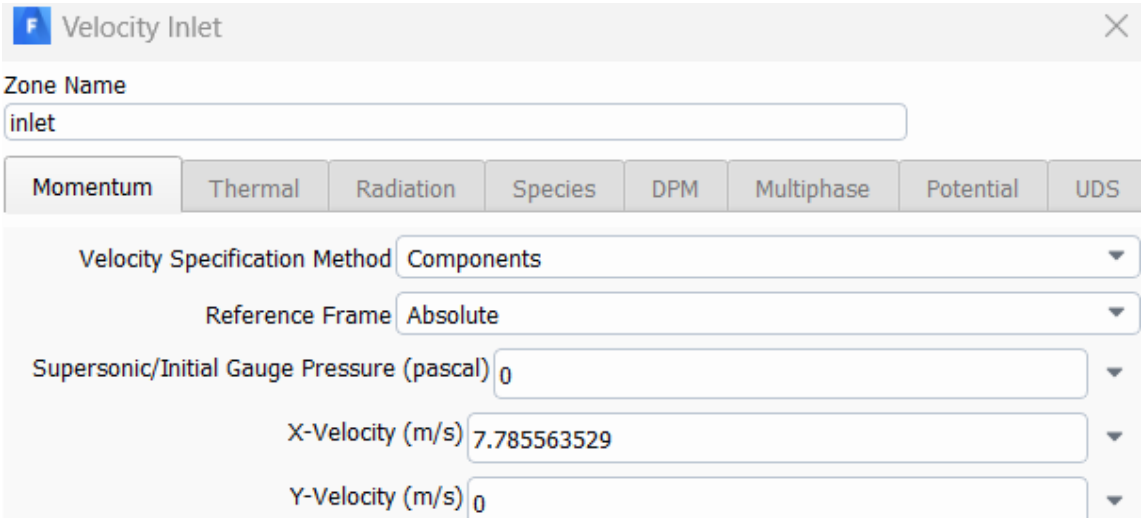


Şekil 4.7. Sınır tabaka ağ yapısı – düşük detaylı ağ örgüsü (Ağ büyüklüğü = 0.2m & kenar parça detayı = 400 adet)

Yukarıda hava ile belirtilen değerler nümerik analiz sistemine işlenmiştir. Ayrıca çözüm metodu olarak sadece k-w çözüm metodu kullanıldı. Diğer k-e metodunda ise çözüm aralıkları dalgalanmalar gösterdiği için analiz sonuçları yakınsamadı. Bu sonuçlara göre bulunan kaldırma kuvveti katsayısı değerleri ise,



Şekil 4.8. Havanın özellikleri



Şekil 4.9. Havanın hız değeri

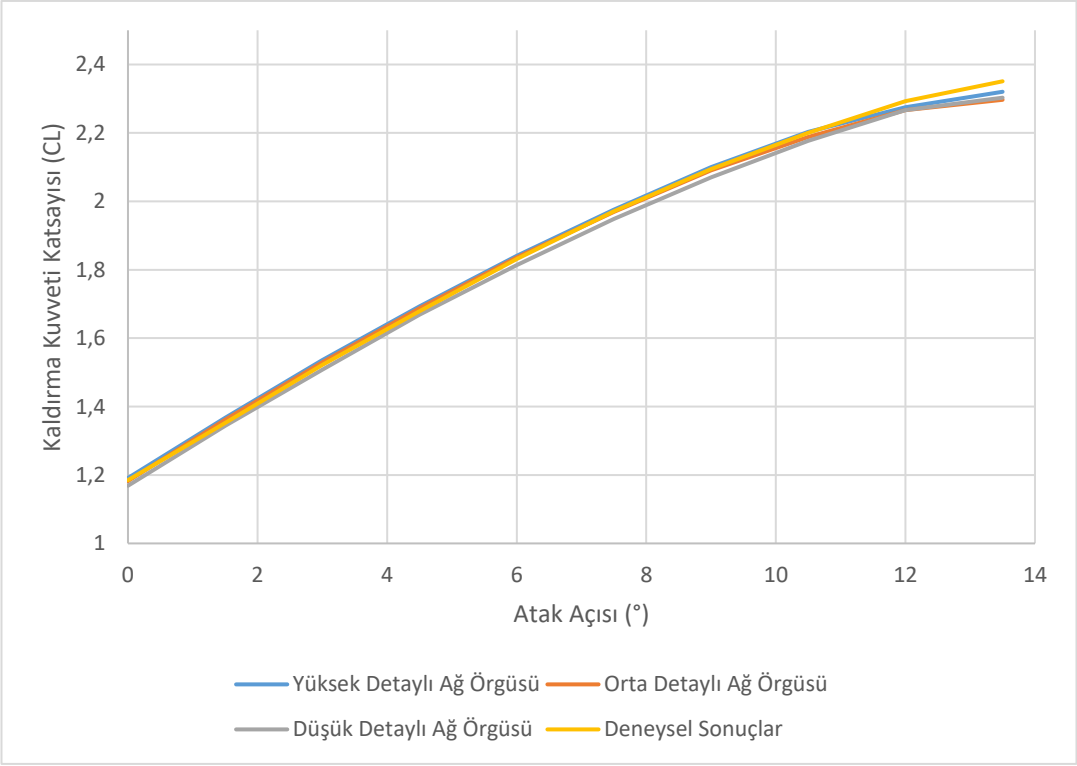
Çizelge 4.1. Ağ yapısına göre kaldırma kuvveti katsayısı değerleri

Kaldırma Kuvveti Katsayısı				
Atak Açısı	Yüksek Detaylı Ağ Örgüsü	Orta Detaylı Ağ Örgüsü	Düşük Detaylı Ağ Örgüsü	NACA Sonuçları
0	1,1913	1,1822	1,1686	1,185
1,5	1,3677	1,3618	1,344	1,3524
3	1,536	1,5288	1,5077	1,5218
4,5	1,6934	1,6877	1,6684	1,6794
6	1,8406	1,8358	1,8137	1,8316
7,5	1,9758	1,9693	1,9481	1,9706
9	2,0996	2,0903	2,0701	2,0941
10,5	2,2027	2,1883	2,1772	2,2002
12	2,2752	2,267	2,2662	2,2927
13,5	2,3203	2,2968	2,303	2,3509

Hata payı yüzdesi olarak bakıldığında ise,

Çizelge 4.2. Ağ yapısına ve test verilerine göre kaldırma kuvveti katsayısı hata yüzdeleri

Hata Yüzdeleri (%)			
Atak Açısı	Yüksek Detaylı Ağ Örgüsü	Orta Detaylı Ağ Örgüsü	Düşük Detaylı Ağ Örgüsü
0	0,53	0,24	1,38
1,5	1,13	0,70	0,62
3	0,93	0,46	0,93
4,5	0,83	0,49	0,65
6	0,49	0,23	0,98
7,5	0,26	0,07	1,14
9	0,26	0,18	1,15
10,5	0,11	0,54	1,05
12	0,76	1,12	1,16
13,5	1,30	2,30	2,04



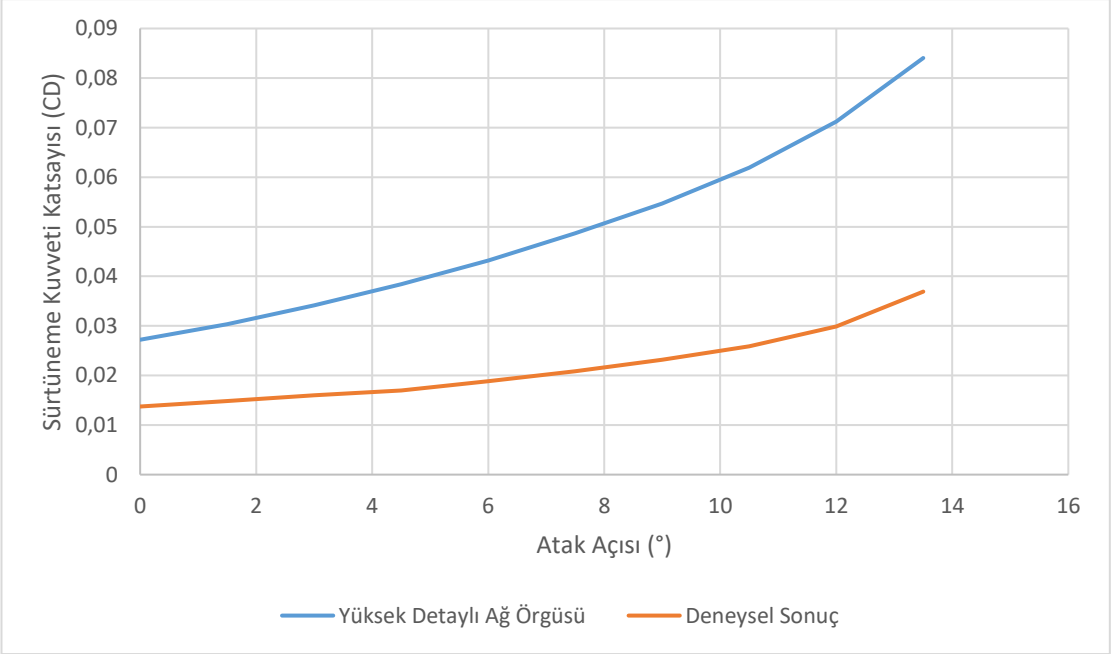
Şekil 4.10. Ağ örgüsüne göre kaldırma kuvveti katsayısı değerleri

Sonuçlar çok yakın olduğu için 3 alternatifi de kabul edebiliriz, fakat kaldırma kuvveti katsayısını fazla olduğu senaryolar inceleneceği için yüksek açı değerlerinde (10° ve sonrası) "Yüksek Detaylı Ağ Örgüsü" yapısı tercih edilmiştir. Bu sonuçlara göre alınan

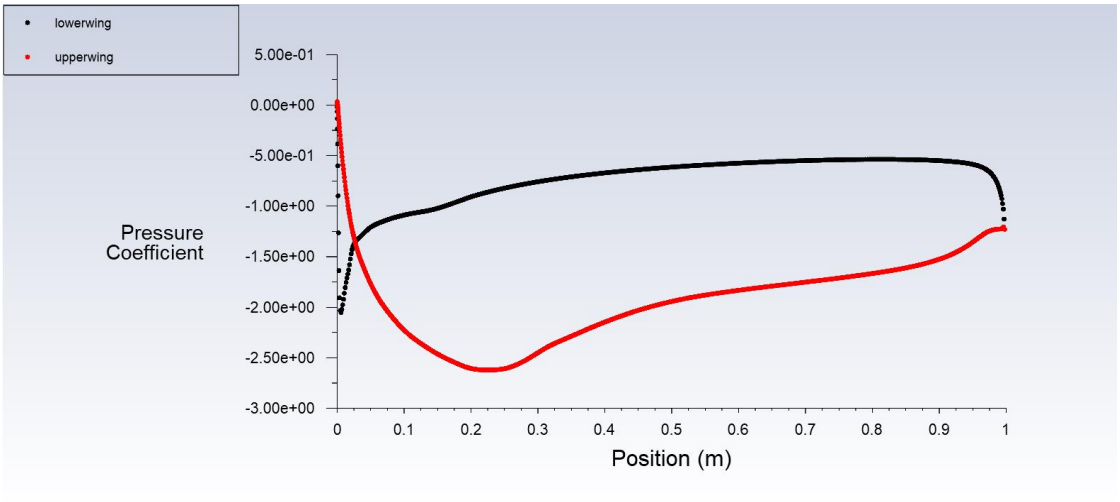
sürüklenme katsayısı değerleri ve basınç katsayısı görseli (Sadece atak açısı 0 derece olan senaryonun çizilmiştir.) değerleri şu şekildedir.

Çizelge 4.3. Yüksek detaylı ağ örgüsüne göre sürüklenme kuvveti katsayısı değerleri

Sürüklenme Kuvveti Katsayısı		
Atak Açısı	Yüksek Detaylı Ağ Örgüsü	NACA Sonuçları
0	0,027207545	0,01374
1,5	0,030331699	0,01484
3	0,034158696	0,01599
4,5	0,038391827	0,01699
6	0,043197797	0,01885
7,5	0,048680902	0,02087
9	0,054693481	0,02317
10,5	0,061896155	0,0259
12	0,071205898	0,02986
13,5	0,084052239	0,03692



Şekil 4.11. Yüksek detaylı ağ örgüsüne göre sürüklenme katsayısı değerleri



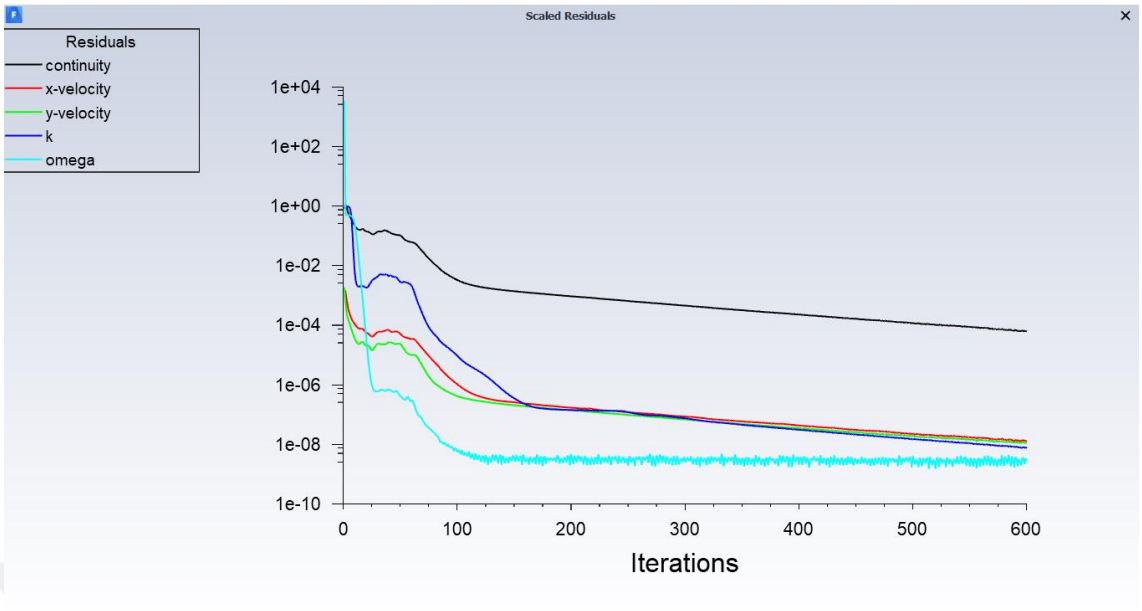
Şekil 4.12. Basınç dağılımı

4.2.Kanat Profillerinin Nümerik Analiz Değerleri

Bu bölümde "Materyal ve Yöntem" sekmesindeki "Nümerik Analiz" kısmında belirtilen kriterlere göre uygun kanatçık seçimleri yapılmıştır. Nümerik analizde incelenen veriler şunlardır:

- Sürüklenme katsayısı değeri (C_D)
- Kaldırma katsayısı (C_L)
- Atak açısı
- Numune hız profili

Analizler 600 nümerik adım aşamasından sonra hemen hemen sabit düzeylere ulaşmış ve değerlerin son hali netleşmiştir.

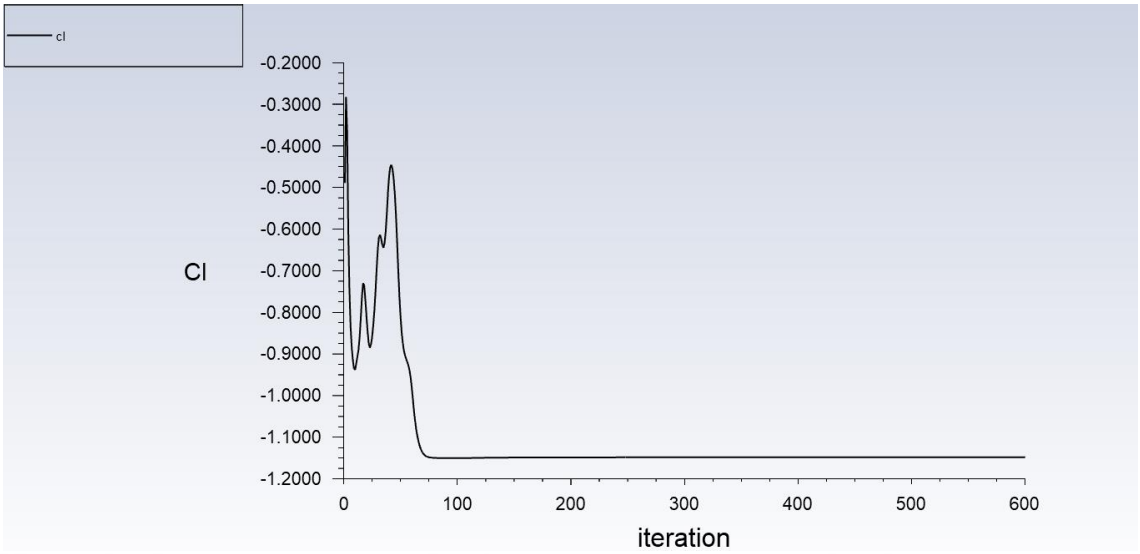


Şekil 4.13. Hata-tekrar grafiği

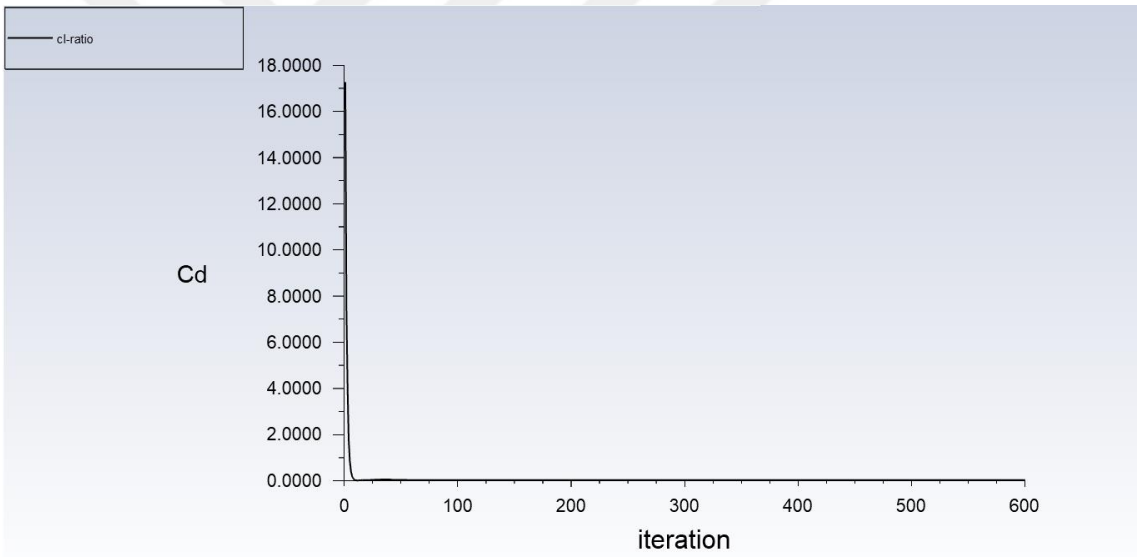
Üstelik her kanat açısı için analiz sonunda kaldırma kuvveti katsayısı ve sürüklenme kuvveti katsayısı grafikleri de incelenmiştir. Görüldüğü üzere bu katsayılarda da dalgalanmalar minimuma indirgenmiş ve değerlerin kararlı bir yapıda olması sağlanmıştır.

iter	continuity	x-velocity	y-velocity	k	omega
595	6.3084e-05	1.2829e-08	1.0890e-08	7.6473e-09	1.9998e-09
596	6.7272e-05	1.4262e-08	1.2065e-08	7.5958e-09	3.5351e-09
597	6.3957e-05	1.3820e-08	1.1792e-08	8.2466e-09	3.5209e-09
598	6.3217e-05	1.3200e-08	1.1171e-08	7.8587e-09	2.1957e-09
599	6.5732e-05	1.3509e-08	1.1434e-08	7.6454e-09	3.4455e-09
600	6.1066e-05	1.2722e-08	1.1062e-08	8.0274e-09	2.8682e-09

Şekil 4.14. Hata değerleri



Şekil 4.15. Analizin kaldırma kuvveti katsayısı grafiği

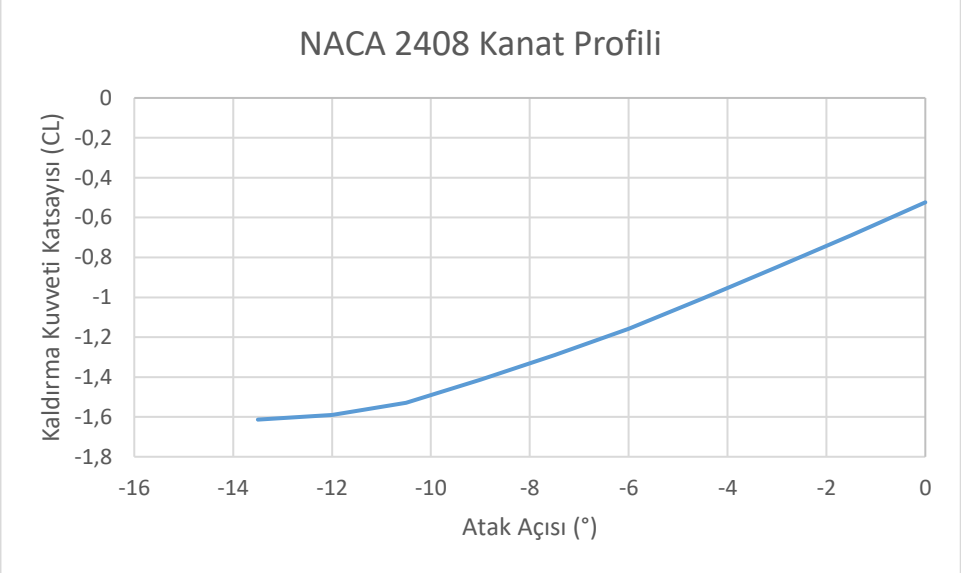


Şekil 4.16. Analizin sürüklenme kuvveti katsayısı grafiği

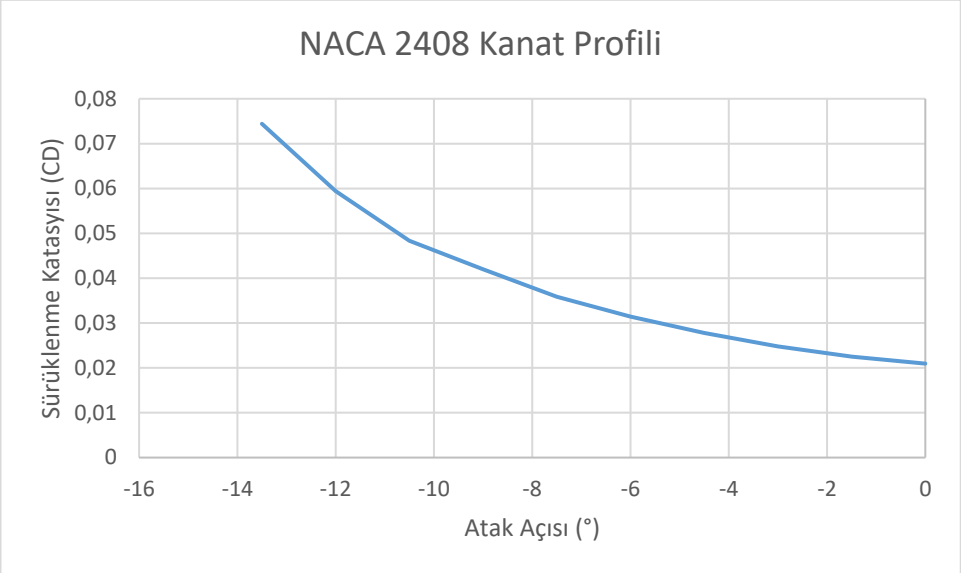
Bu şartlara göre yapılan analizlerde önce 2.numunenin yere basma kuvveti katsayısı ve sürüklenme kuvveti katsayıları değerlerine göre 2408 ve S1223 numaralı NACA kanat profilleri incelenmiş ve en yüksek C_L/C_D oranına göre 2.numunenin kanat profili belirlenmiştir. Değerlerin de yine validasyonu sağlanması için Reynolds sayısı 500000 olarak seçilmiştir. Kanat açısı değerleri 1.5 derece farklar ile 0 dereceden -13.5 dereceye kadar alınmıştır.

Çizelge 4.4. NACA 2408 CL-CD değerleri

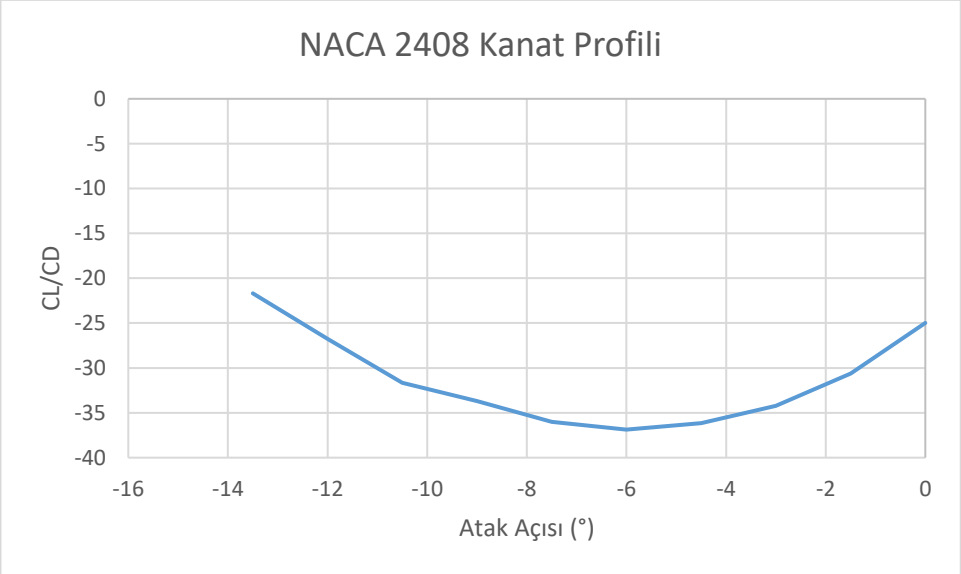
NACA 2408			
Angle	CL	CD	Ratio
0	-0,52355	0,020949	-24,9914
-1,5	-0,68898	0,022496	-30,6264
-3	-0,84815	0,024785	-34,2207
-4,5	-1,006	0,027819	-36,1622
-6	-1,1579	0,031401	-36,8748
-7,5	-1,2902	0,035824	-36,0152
-9	-1,4141	0,041976	-33,6883
-10,5	-1,5292	0,048328	-31,6419
-12	-1,5901	0,059438	-26,7523
-13,5	-1,6136	0,07441	-21,6853



Şekil 4.17. NACA 2408 atak açısına göre CL değerleri



Şekil 4.18. NACA 2408 atak açısına göre CD değerleri



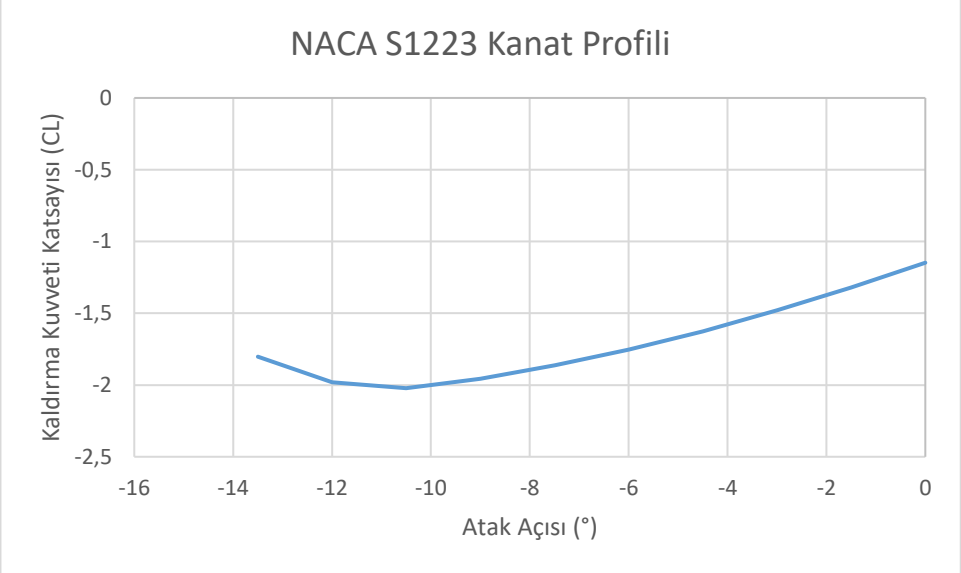
Şekil 4.19. NACA atak açısına göre CL/CD oranı

NACA 2408 kanat profili için hesaplanan değerler göz önüne alındığında en yüksek yere basma kuvveti katsayısı -13.5 derece atak açısında -1.6136, sürüklenme kuvveti katsayısı da en düşük beklenildiği gibi 0 derecede 0.020949 olarak bulunuştur. Fakat asıl incelenmek istenen bu katsayıların oranlarından en yüksek olanını incelemek oldugu için bu oran mutlak değerde en yüksek -6 derecede 36.8748 olarak belirlenmiştir.

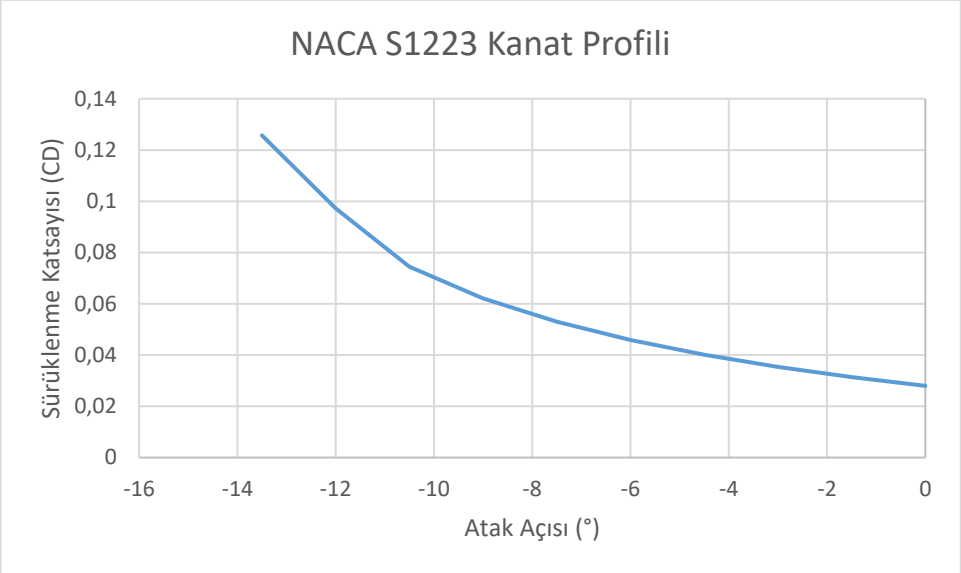
Çizelge 4.5. NACA S1223 CL-CD değerleri

,

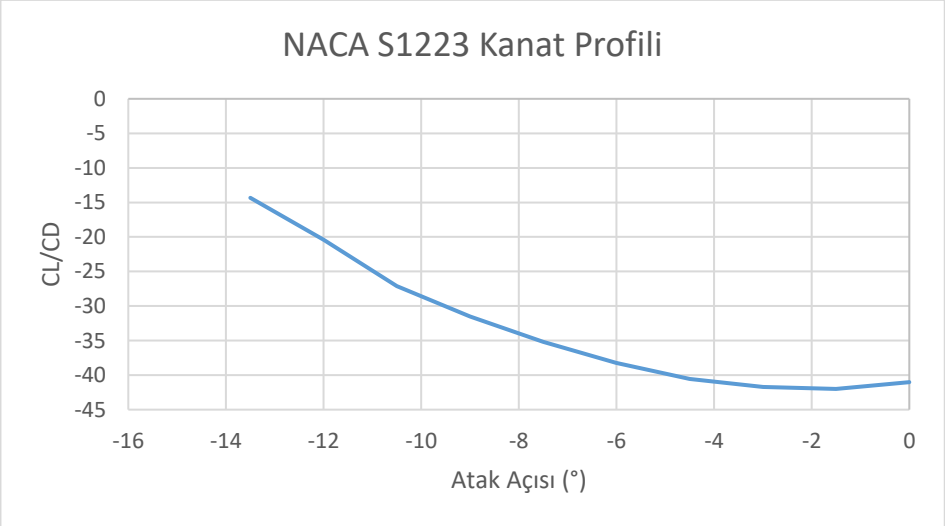
NACA S1223			
Angle	CL	CD	Ratio
0	-1,148	0,027989	-41,0161
-1,5	-1,3202	0,031431	-42,0036
-3	-1,4789	0,035447	-41,7211
-4,5	-1,627	0,040124	-40,5491
-6	-1,7546	0,045878	-38,2453
-7,5	-1,8637	0,052979	-35,1782
-9	-1,9557	0,062071	-31,5077
-10,5	-2,0222	0,074517	-27,1373
-12	-1,9814	0,0972	-20,3848
-13,5	-1,802	0,125711	-14,3345



Şekil 4.20. NACA S1223 atak açısına göre CL değerleri



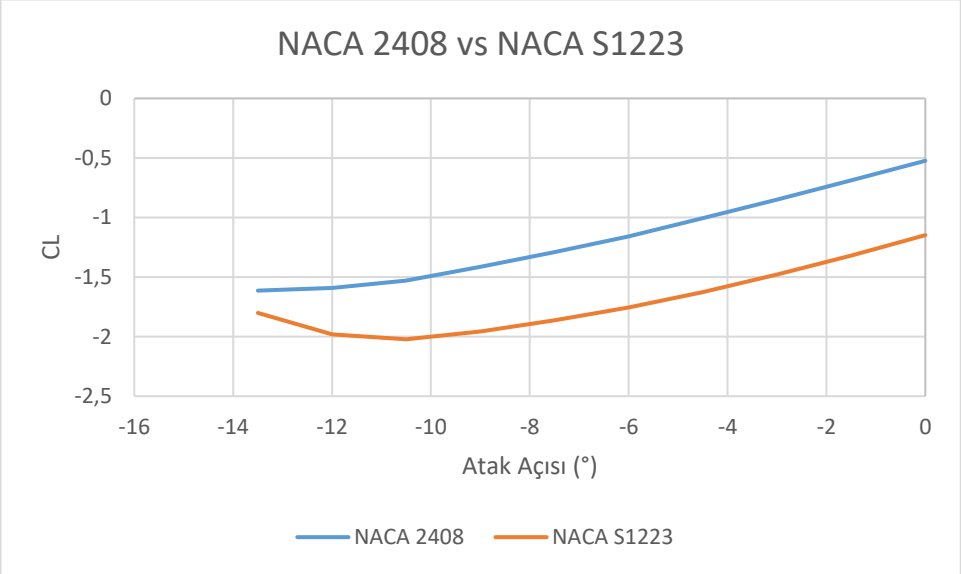
Şekil 4.21. NACA S1223 atak açısına göre CD değerleri



Şekil 4.22. NACA S1223 atak açısına göre CL/CD oranı

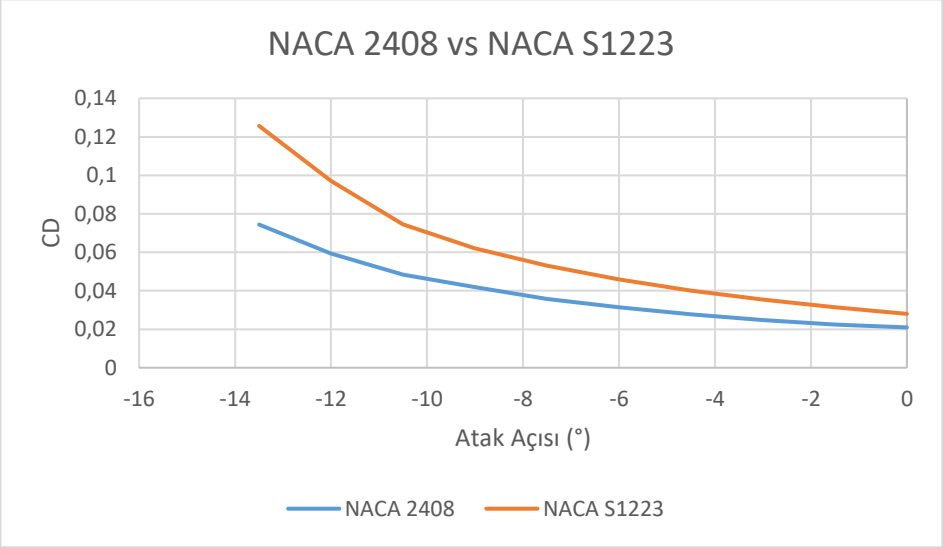
NACA S1223 kanat profili için ise hesaplanan değerler göz önüne alındığında en yüksek yere basma kuvveti katsayısı -10.5 derece atak açısında -2.0222, sürüklenme kuvveti katsayısı da en düşük beklenildiği gibi 0 derecede 0.027989 olarak bulunuştur. Fakat asıl incelenmek istenen bu katsayıların oranlarından en yüksek olanını incelemek oldugu için bu oran mutlak değerde en yüksek -1.5 derecede 42.0036 olarak belirlenmiştir.

İki profil kanadının değerleri karşılaştırıldığında sonuçlar aşağıdaki gibi çıkmıştır ve bu sonuçlara göre ikinci numunedeki kanat profilinin tipi belirlenmiştir.



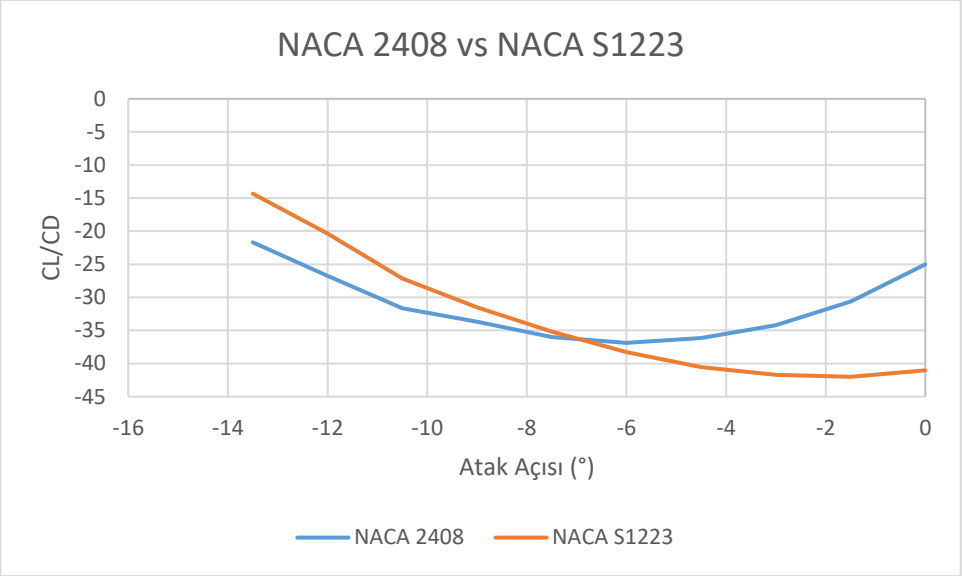
Şekil 4.23. NACA 2408 & NACA S1223 atak açısına göre CL değerleri

İlk olarak kaldırma kuvveti katsayısı karşılaştırıldığında S1223 kanat profilinin açık bir şekilde daha yüksek değerde olduğu grafikte ortaya çıkmıştır. Bu değerlerin S1223 kanat profilinin numune 2'ye uygunluk ihtimalini arttırmıştır.



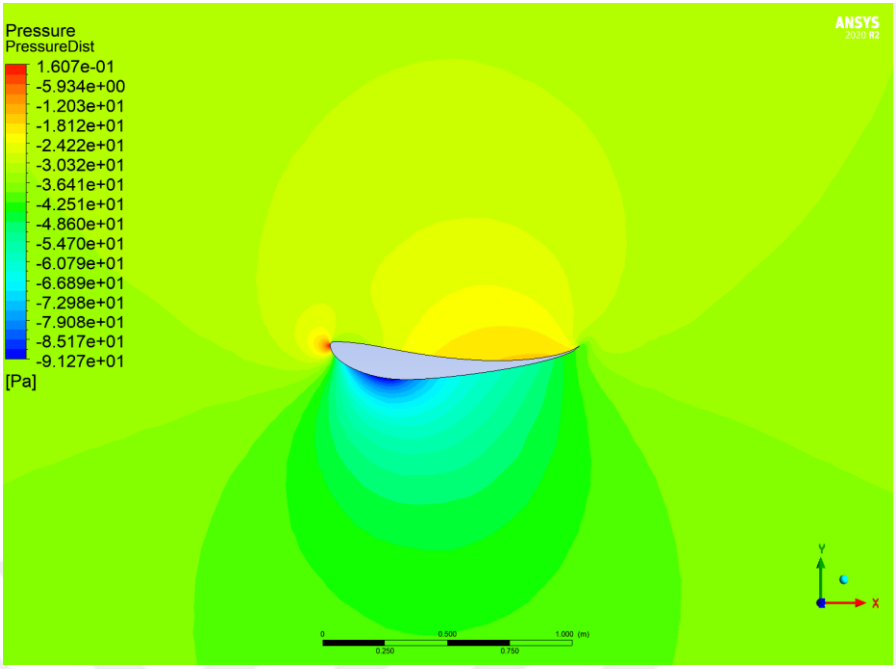
Şekil 4.24. NACA 2408 & NACA S1223 atak açısına göre CD değerleri

İkinci olarak ise sürüklenme katsayısı incelenmiştir. Her ne kadar kaldırma kuvveti önemli olsa da asıl olarak tasarımdaki amaç araca etki edecek karşı kuvvetleri de en aza indirmektedir. Burada NACA 2408 kanat profili NACA S1223 kanat profiline göre daha avantajlıdır.

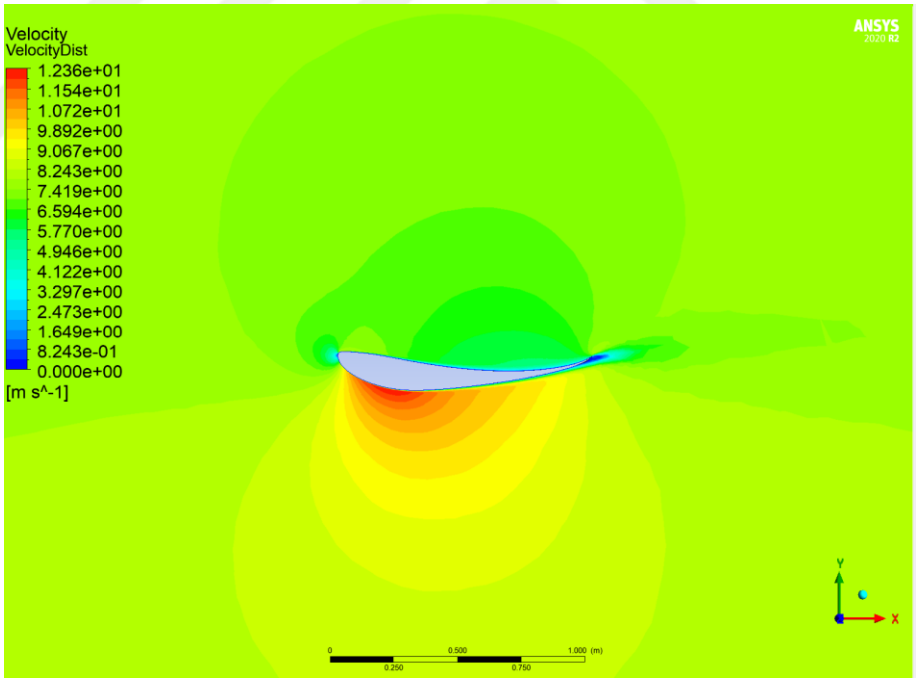


Şekil 4.25. NACA 2408 & NACA S1223 atak açısına göre CL/CD oranı

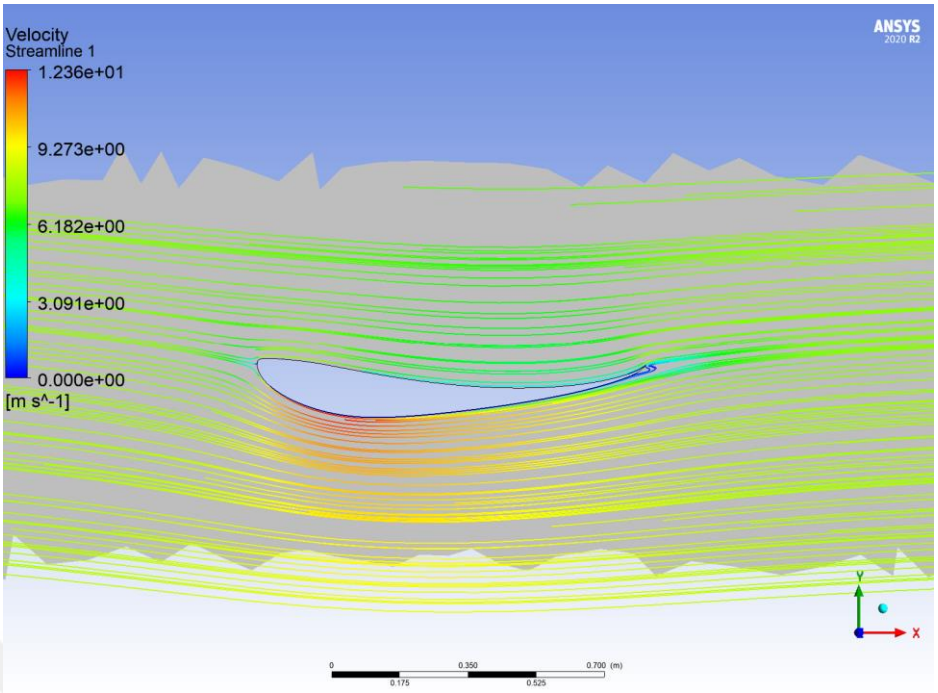
Asıl beklenen atak açısına göre kaldırma kuvveti katsayısı ve sürüklenme katsayısı değerlerine göre yapılan incelemede NACA S1223 kanat profilinde mutlak olarak daha yüksek değerlere ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Bu durumda 2.numunenin kanat profili S1223 kanat profili seçilmiştir.



Şekil 4.26. NACA S1223, Re = 500000 ve -1.5° atak açısındaki basınç dağılımı

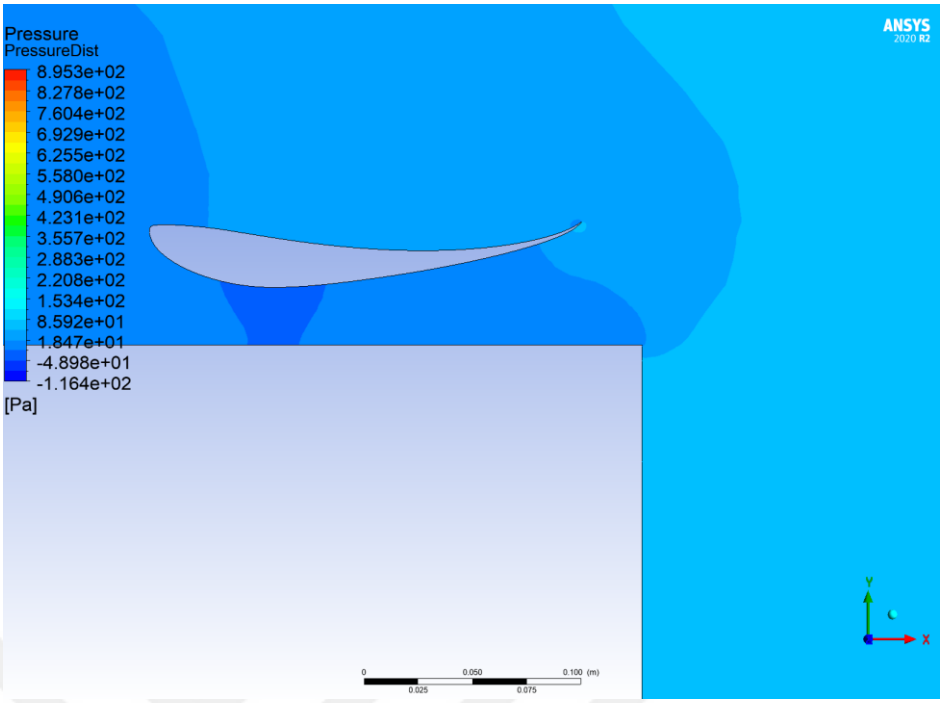


Şekil 4.27. NACA S1223, Re = 500000 ve -1.5° atak açısındaki hız dağılımı

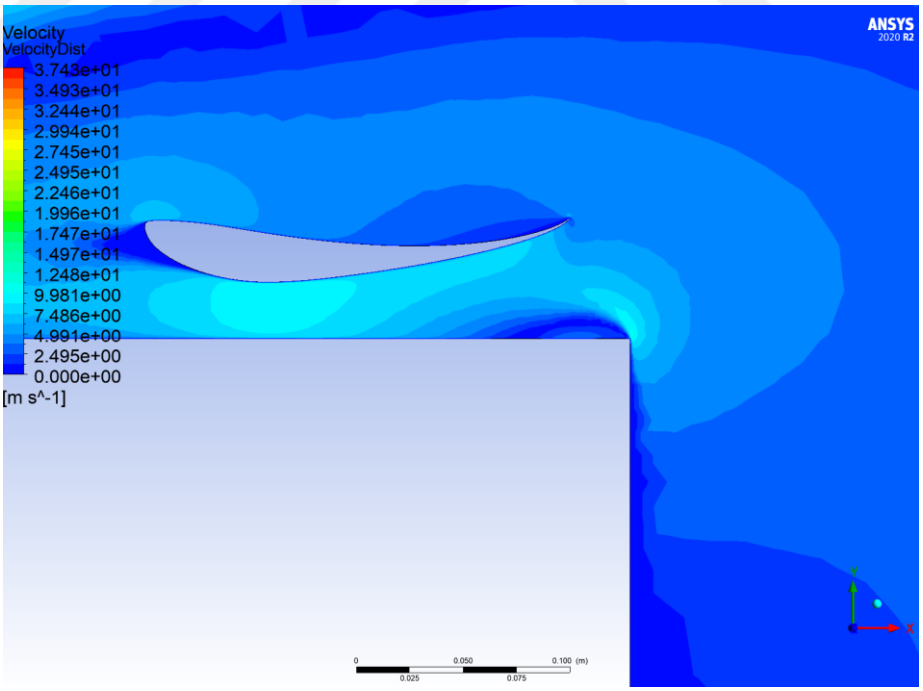


Şekil 4.28. NACA S1223, Re = 500000 ve -1.5° atak açısındaki akış dağılımı

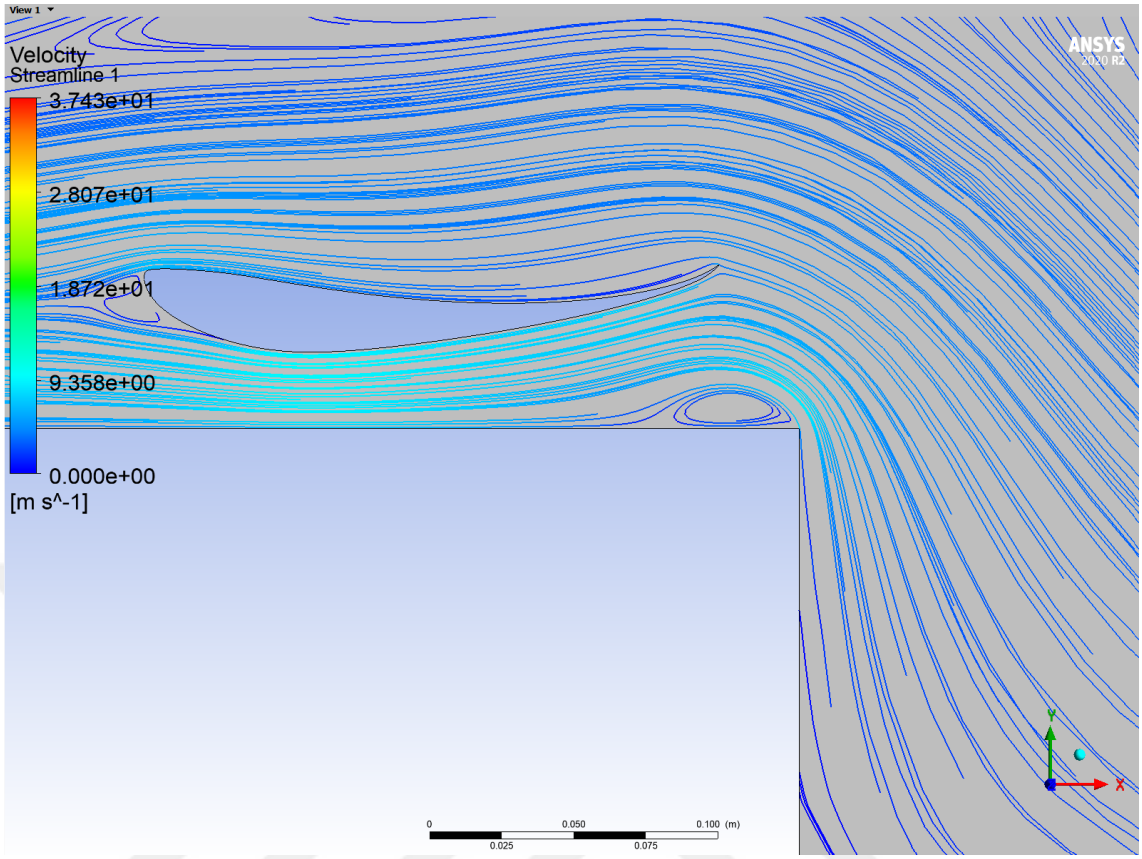
Kanat profili belirlendikten sonra araç bağlantısı için kanadın profil yüksekliği belirlenmiştir. Bu sonuçlar belirlenirken kanat profilinin yüksekliği 3 adet parametrede belirlenmiştir. Yerden yüksekliği 5, 15 ve 25 mm olarak belirlenmiş ve kanat uzunlugu da numuneye uygun olması için ise 0.2 metre olarak belirlenmiştir ve hız olarak da 100 km/h = 27.77 m/s tercih edilmiştir.



Şekil 4.29. NACA S1223, V=27.77 m/s, uzunluk=0.2m, -1.5° atak açısındaki basınç dağılımı



Şekil 4.30. NACA S1223, V=27.77 m/s, uzunluk=0.2m, -1.5° atak açısındaki hız dağılımı

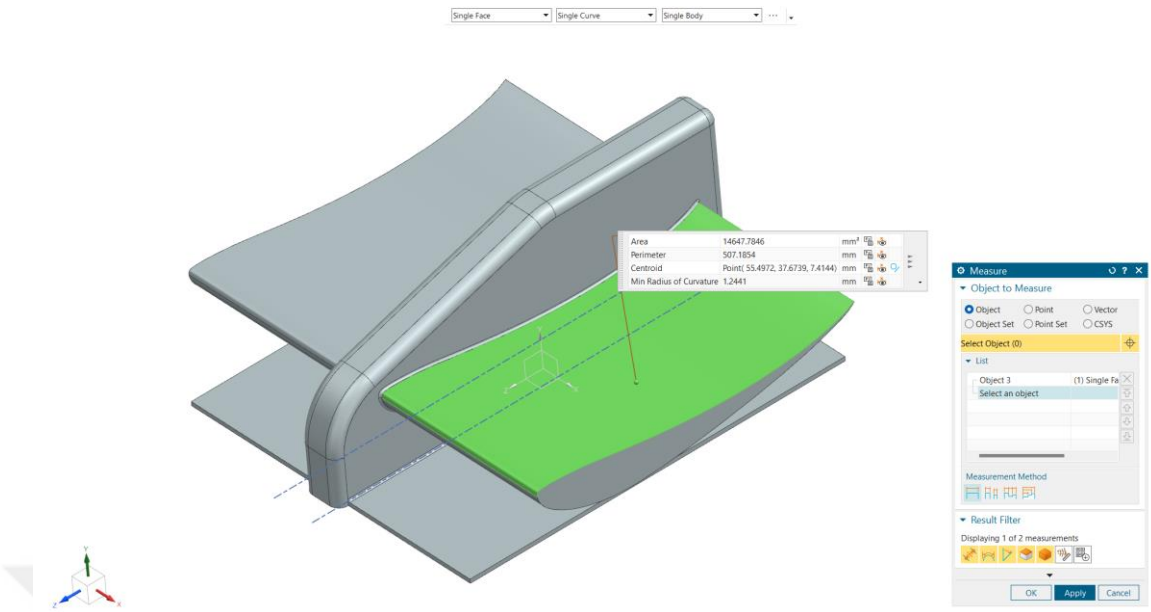


Şekil 4.31. NACA S1223, V=27.77 m/s, uzunluk=0.2m, -1.5° atak açısındaki akış dağılımı

Çizelge 4.6. Numune 2 - kanatların yerden yüksekliğine göre CL-CD değerleri

Height (cm)	Position	CL	CD	Ratio
5	Low	-0,24701	0,09279	-2,661887
15	Mid	-0,28807	0,05633	-5,114061
25	High	-0,29998	0,04171	-7,191402

Yüksek C_L/C_D oranını yakalamak için z=0 zemininden yüksekliği 25 cm olarak belirlenmiştir. Buna göre 2.numuneye etki eden yere basma kuvveti ve sürüklenme kuvveti aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.32. 2.Numunenin tek taraftaki kaldırma kuvveti hesabı için gerekli olan alan ölçüsü görseli

Area	14647.7846	mm^2	
Perimeter	507.1854	mm	
Centroid	Point(55.4972, 37.6739, 7.4144)	mm	
Min Radius of Curvature	1.2441	mm	

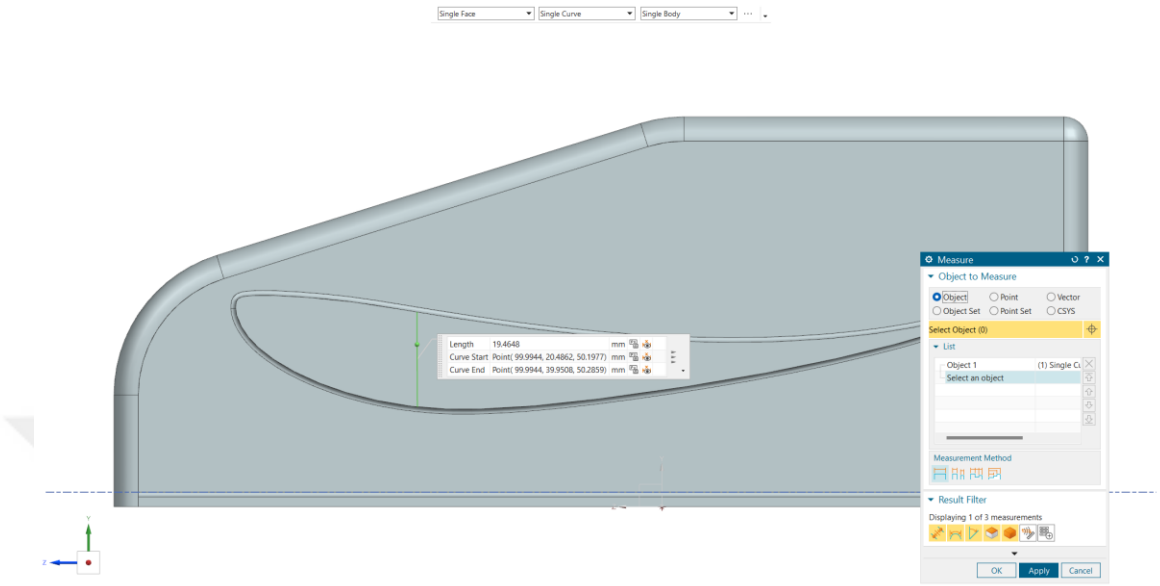
Şekil 4.33. 2.Numunenin tek taraftaki kaldırma kuvveti hesabı için gerekli olan alan ölçüsü

Yere basma kuvveti,

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho V^2 A$$

- C_L: Kaldırma Kuvveti Katsayısı
- ρ: Yoğunluk
- V: Hız
- A: Alan

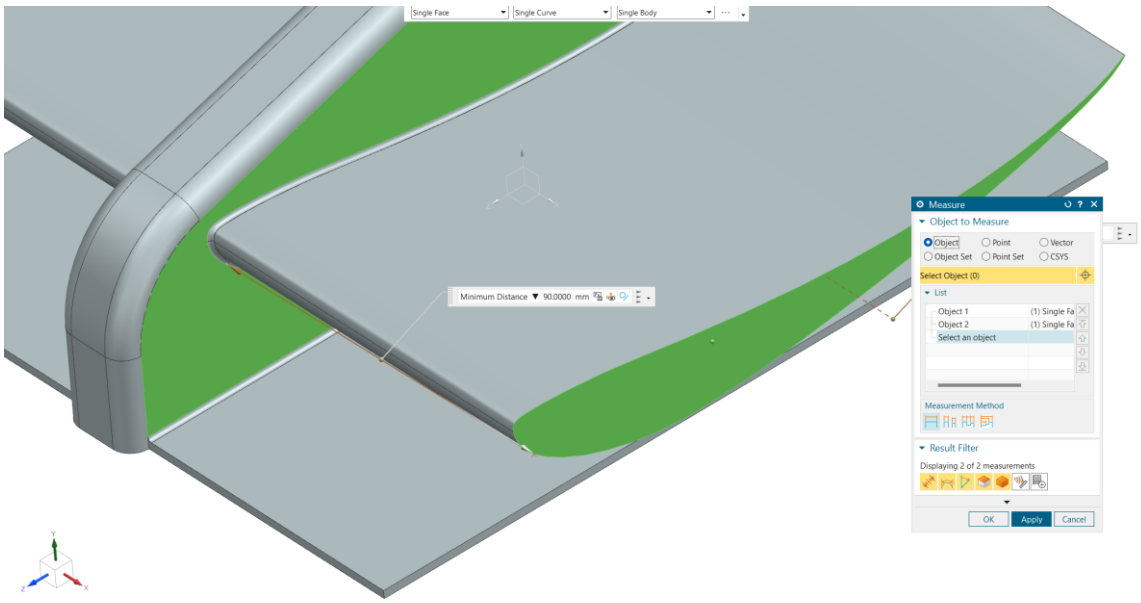
$$L = \frac{1}{2}(-0.29998)(1.1845)(27.77)^2(0.14648) \approx 16{,}9431\ N$$



Şekil 4.34. Ön yüzey için dikey uzunluk



Şekil 4.35. Kanat profilinin dikey uzunluğu



Şekil 4.36. Ön yüzey için yatay uzunluk



Şekil 4.37. Kanat profilinin yatay uzunluğu

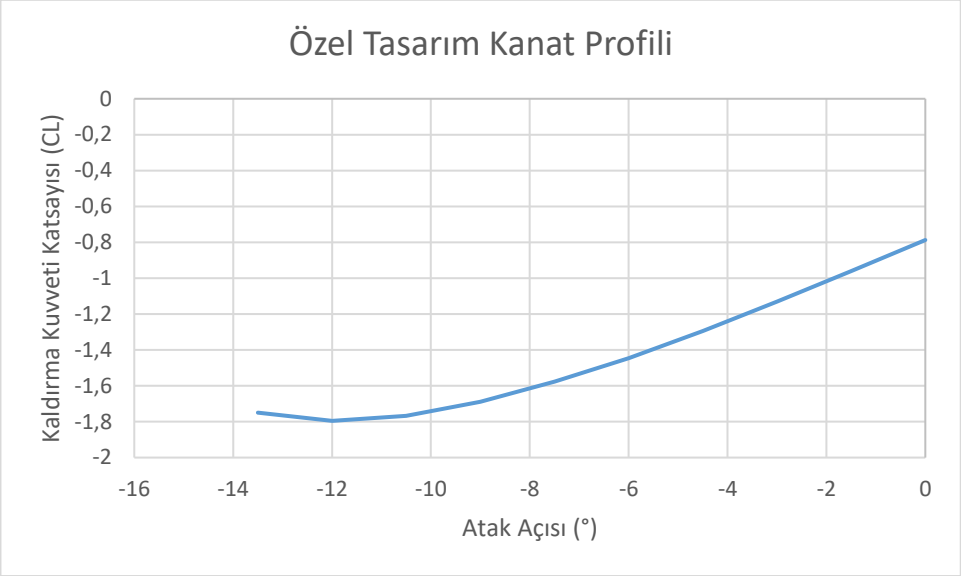
Sürüklenme kuvveti,

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho A v^2$$

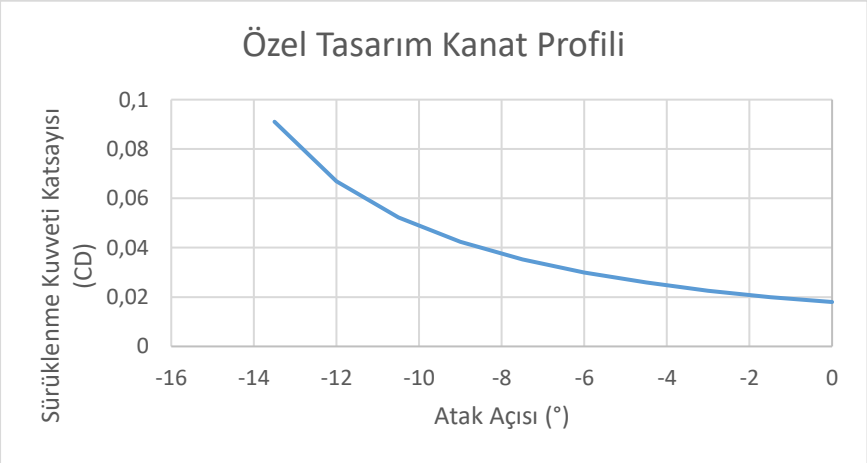
- D = Sürüklenme kuvveti
- C_D = Sürüklenme kuvveti katsayısı
- ρ = Yoğunluk
- A = Alan
- v = Hız

$$D = \frac{1}{2}(0.04171)(1.1845)(0.02 * 0.09)(27.77)^2 \approx 0{,}0353\ N$$

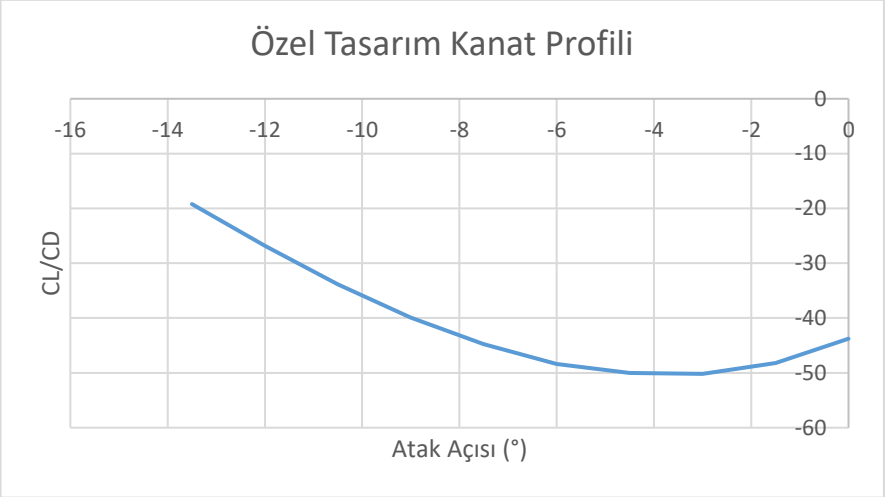
3.numune değerlendirmesi için 2.numuneden gelen en efektif NACA S1223 ile özel tasarımdan gelen sonuçlar kıyaslandı. Özel tasarımın detayları Materyal ve Yöntem kısmında belirtilmiştir. Yapılan tasarım NACA 2408, 4412 ve S1223 kanat tasarımın detaylarını kullanarak düzenlenmiştir. Yine ilk olarak aracın tabanına bakılmaksızın kanat değerlerinin yere basma katsayısı ve sürüklenme kuvveti katsayısı değerleri bulunmuştur.



Şekil 4.38. Özel tasarım CL değerleri



Şekil 4.39. Özel tasarım CD değerleri



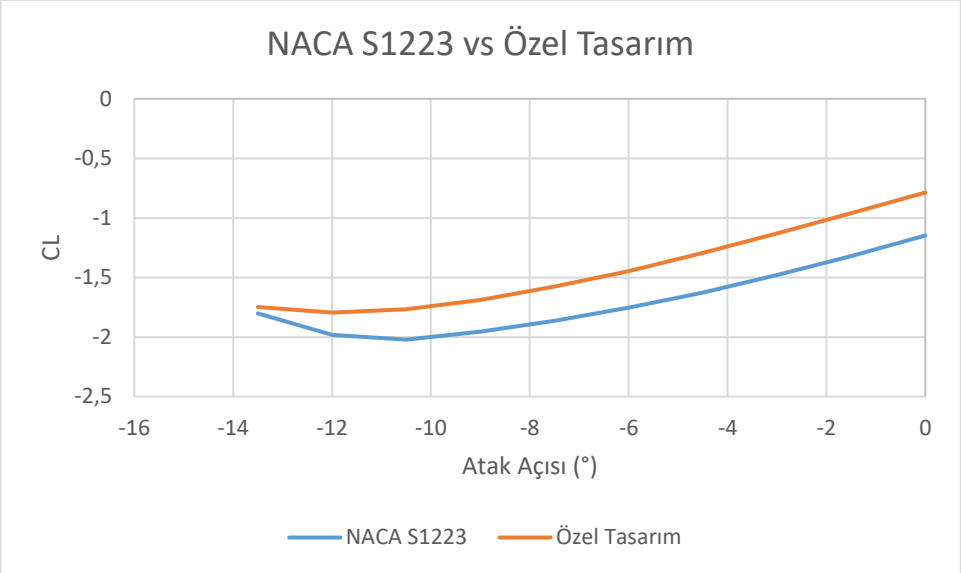
Şekil 4.40. Özel tasarım CL/CD oranı

Çizelge 4.7. Özel tasarım CL-CD değerleri

Özel Tasarım			
Angle	CL	CD	Ratio
0	-0,78733	0,017994	-43,7556
-1,5	-0,9613	0,019939	-48,2131
-3	-1,1309	0,022537	-50,1805
-4,5	-1,2938	0,025871	-50,0093
-6	-1,446	0,029891	-48,3766
-7,5	-1,5765	0,035223	-44,7573
-9	-1,6892	0,042334	-39,9021
-10,5	-1,7676	0,052263	-33,8215
-12	-1,7954	0,066959	-26,8133
-13,5	-1,7493	0,09104	-19,2147

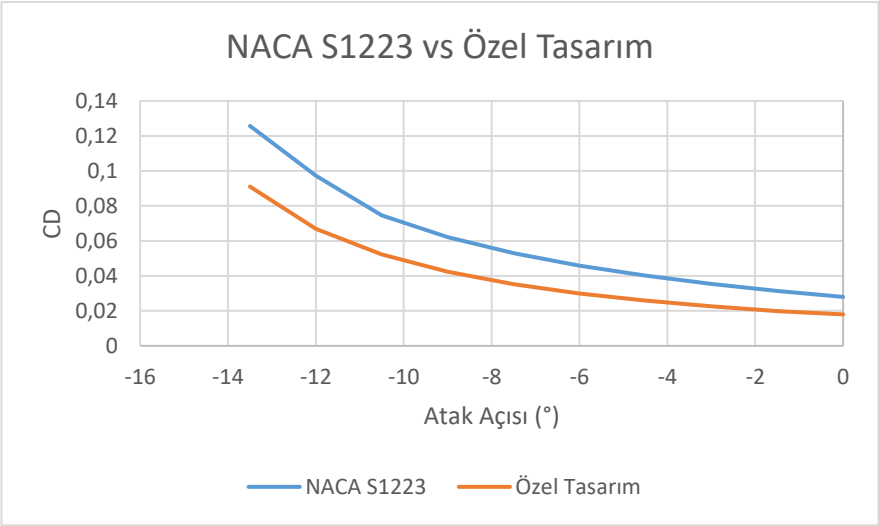
Özel tasarım kanat profili için ise hesaplanan değerler göz önüne alındığında en yüksek yere basma kuvveti katsayısı -12 derece atak açısında -1.7954, sürüklenme kuvveti katsayısı da en düşük beklenildiği gibi 0 derecede 0.017994 olarak bulunuştur. Fakat asıl incelenmek istenen bu katsayıların oranlarından en yüksek olanını incelemek oldugu için bu oran mutlak değerde en yüksek -3 derecede 50.1805 olarak belirlenmiştir.

Bu iki profil kanadının değerleri karşılaştırıldığında sonuçlar aşağıdaki gibi çıkmıştır ve bu sonuçlara göre ikinci numunedeki kanat profilinin tipi belirlenmiştir.



Şekil 4.41. Numune 2 & numune 3 - CL değerleri

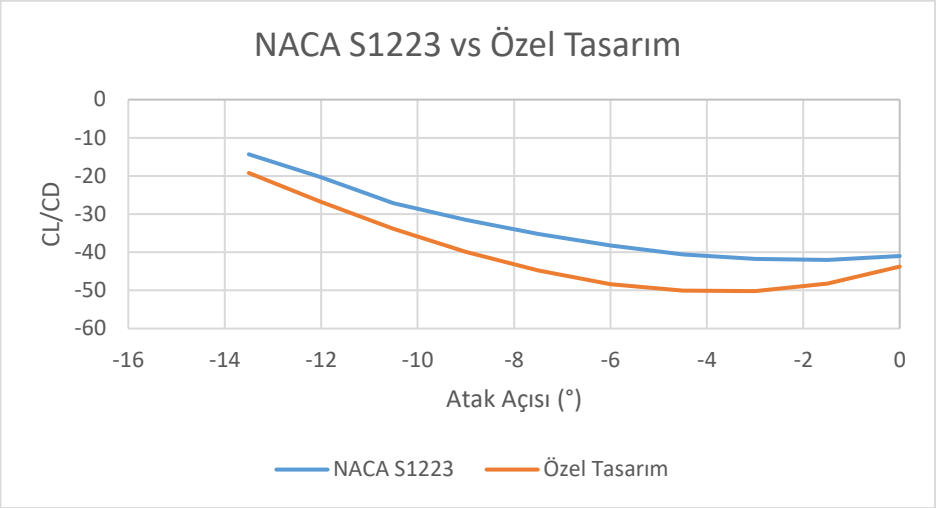
S1223 daha eğimli bir yapıya sahip oldugu için kaldırma kuvveti katsayısına sahip olması beklenirdi. İlk olarak kaldırma kuvveti katsayısı karşılaştırıldığında S1223 kanat profilinin açık bir şekilde daha yüksek değerde olduğu grafikte ortaya çıkmıştır. Bu değerlerin S1223 kanat profilinin numune 3'e uygunluk ihtimalini arttırmıştır.



Şekil 4.42. Numune 2 & numune 3 - CD değerleri

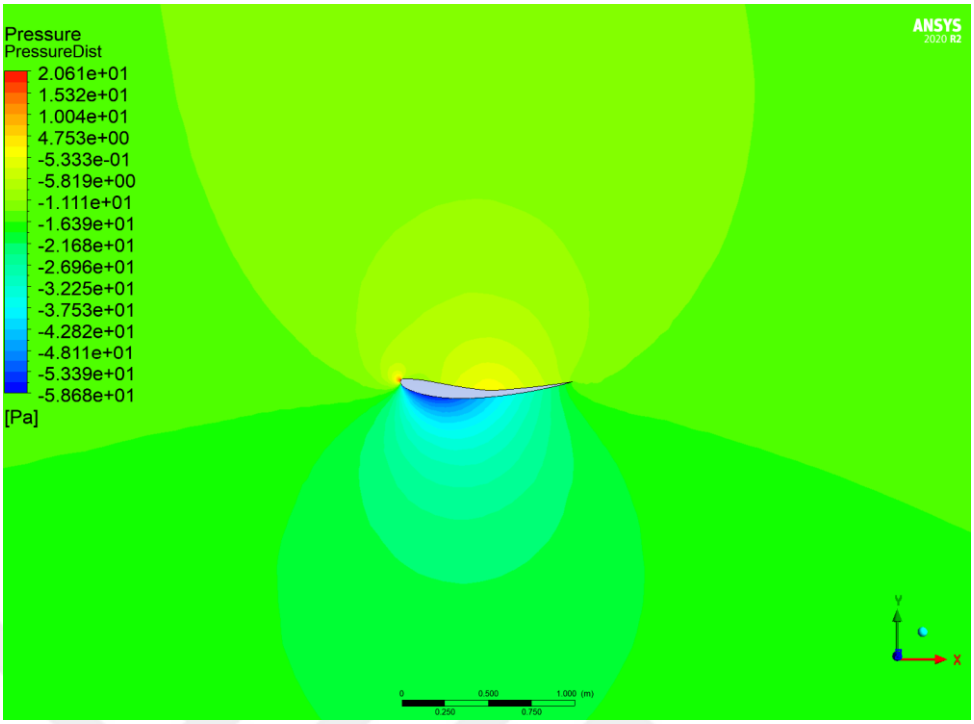
Fakat daha ince ve daha az eğimli bir yapıya sahip olan özel tasarım kanat profilinde beklenildiği gibi daha düşük sürüklenme katsayısı değerlerine ulaşılmıştır. Her ne kadar

kaldırma kuvveti önemli olsa da asıl olarak tasarımdaki amaç araca etki edecek karşı kuvvetleri de en aza indirmektedir. Burada özel tasarım kanat profili NACA S1223 kanat profiline göre daha avantajlıdır.

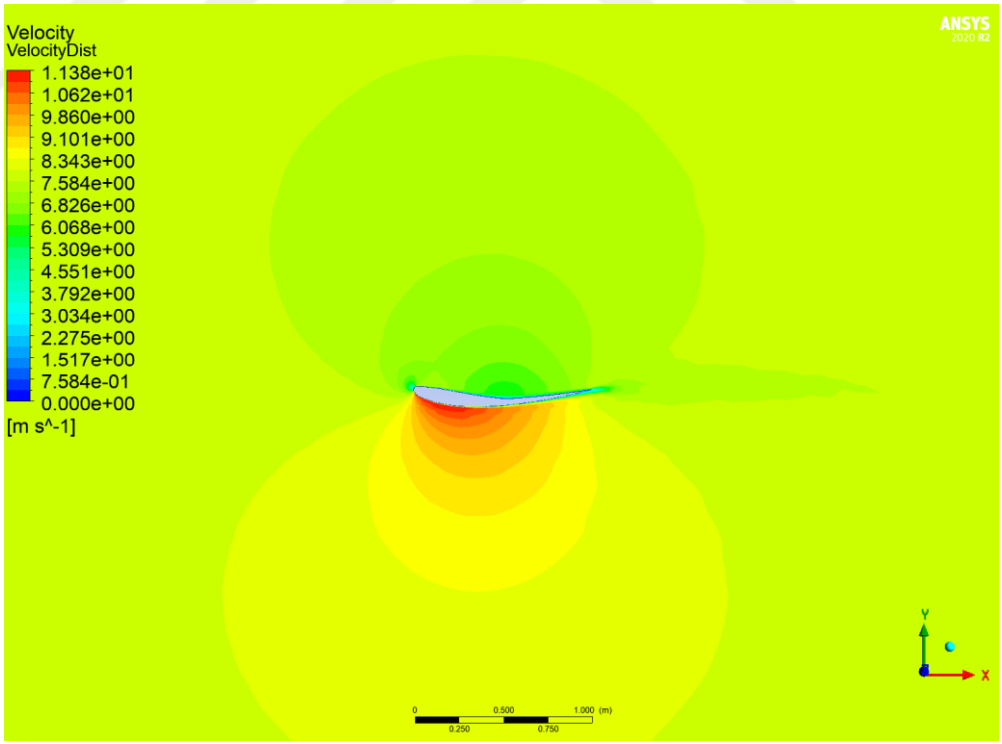


Şekil 4.43. Numune 2 & numune 3 - CL/CD oranı değerleri

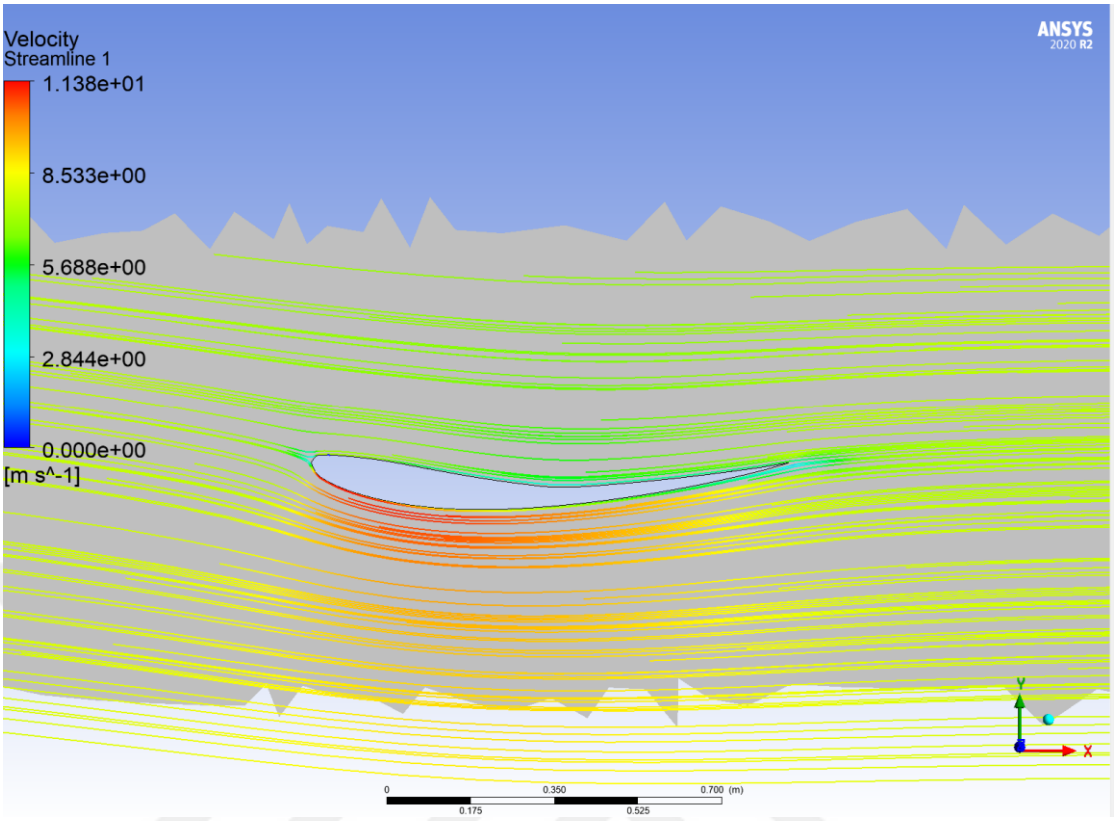
Asıl beklenen atak açısına göre kaldırma kuvveti katsayısı ve sürüklenme katsayısı oranına göre yapılan incelemede özel tasarım kanat profilinde mutlak olarak daha yüksek değerlere ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Bu durumda 3.numunenin kanat profili özel tasarım kanat profili seçilmiştir.



Şekil 4.44. Özel tasarım, Re = 500000 ve -3° atak açısındaki basınç dağılımı

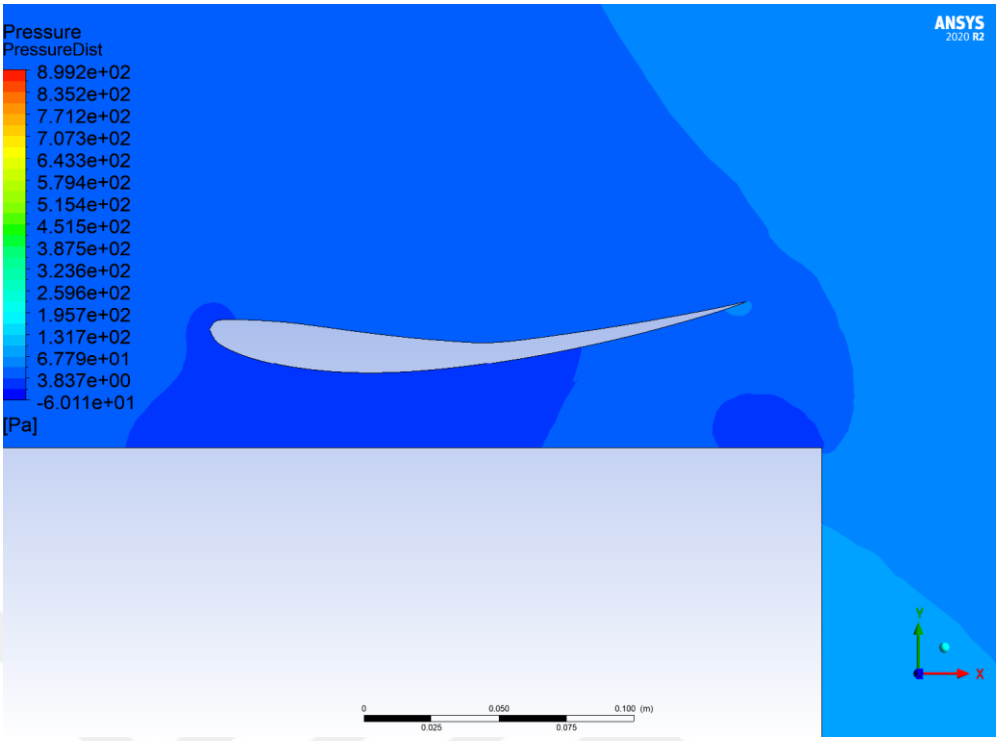


Şekil 4.45. Özel tasarım, Re = 500000 ve -3° atak açısındaki hız dağılımı

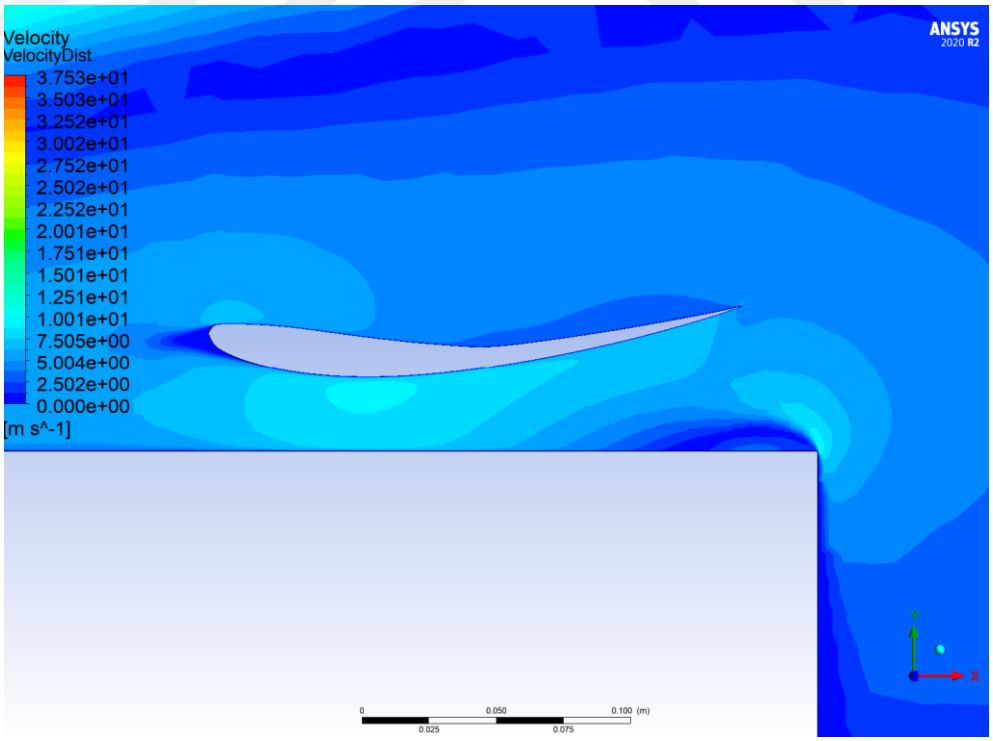


Şekil 4.46. Özel tasarım, Re = 500000 ve -3° atak açısındaki akış dağılımı

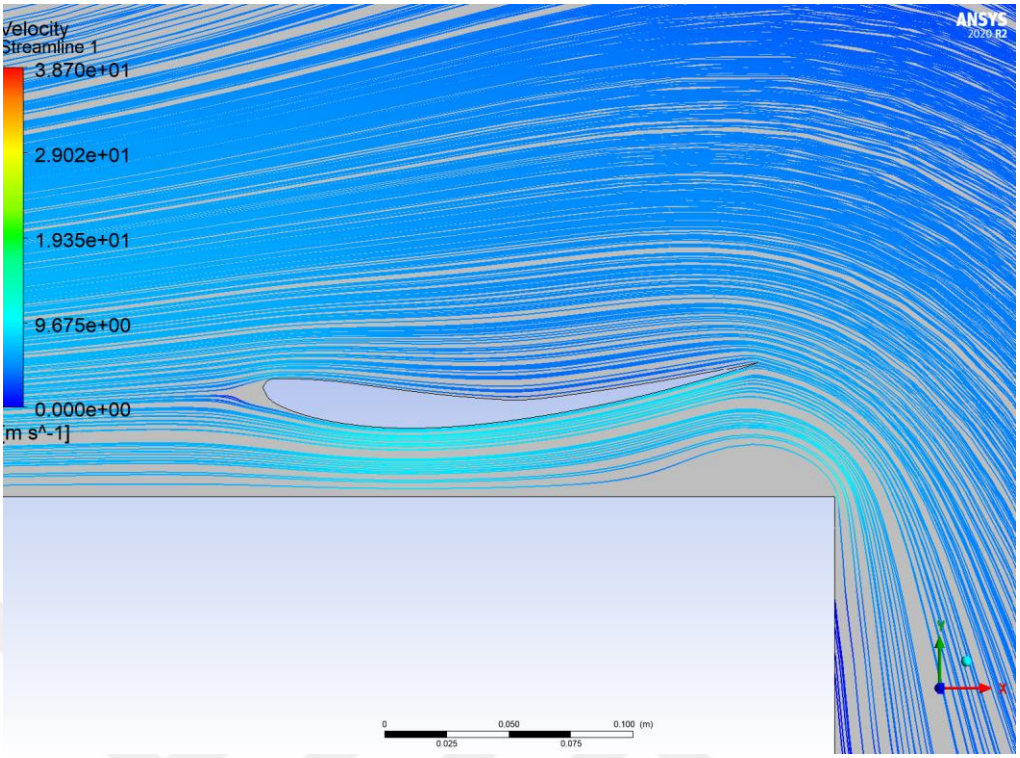
Kanat profili belirlendikten sonra araç bağlantısı için kanadın profil yüksekliği belirlenmiştir. Bu sonuçlar belirlenirken kanat profilinin yüksekliği 3 adet parametrede belirlenmiştir. Yerden yüksekliği 5, 15 ve 25 mm olarak belirlenmiş ve kanat uzunlugu da numuneye uygun olması için ise 0.2 metre olarak belirlenmiştir ve hız olarak da 100 km/h = 27.77 m/s tercih edilmiştir.



Şekil 4.47. Özel tasarım, V=27.77 m/s, uzunluk=0.2m, -1.5° atak açısındaki basınç dağılımı



Şekil 4.48. Özel tasarım, V=27.77 m/s, uzunluk=0.2m, -1.5° atak açısındaki hız dağılımı

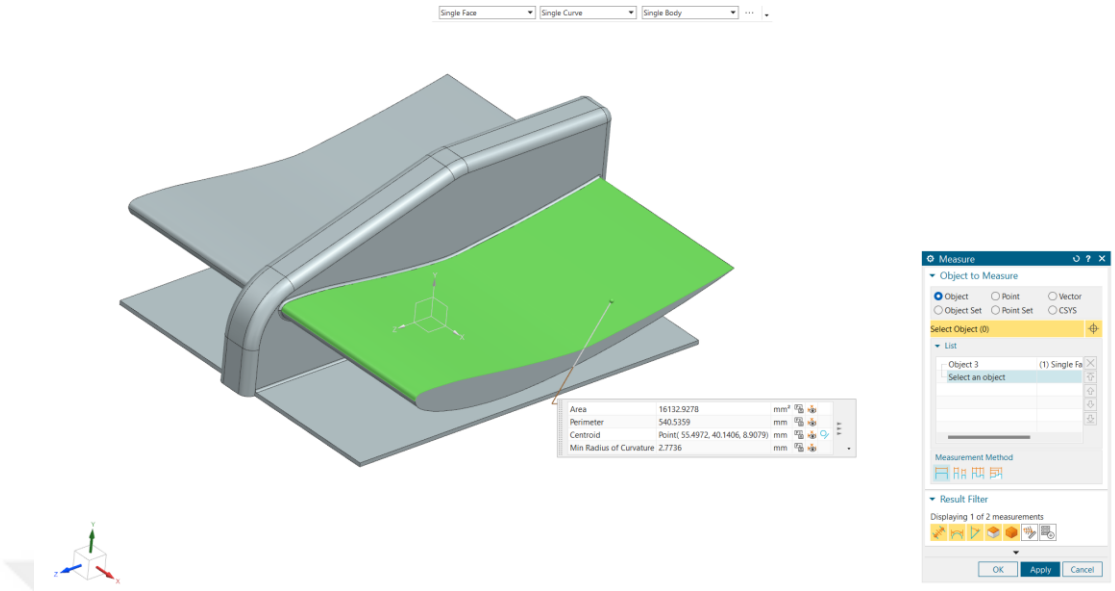


Şekil 4.49. Özel tasarım, V=27.77 m/s, uzunluk=0.2m, -1.5° atak açısındaki akış dağılımı

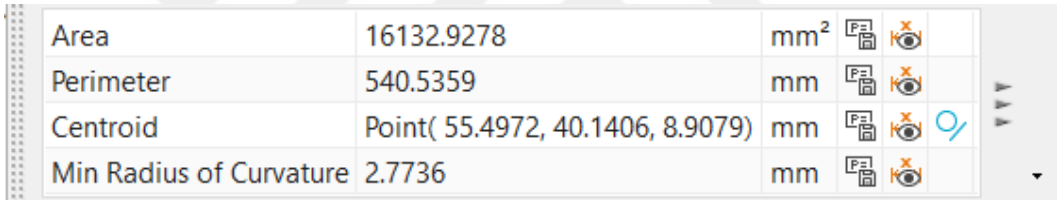
Çizelge 4.8. Numune 3 - kanatların yerden yüksekliğine göre CL-CD değerleri

Height	Pos	CL	CD	Ratio
5	Low	-0,18616	0,04572	-4,071441
15	Mid	-0,25921	0,02802	-9,24981
25	High	-0,26118	0,02616	-9,984803

Yüksek C_L/C_D oranını yakalamak için z=0 zemininden yüksekliği 25 cm olarak belirlenmiştir. Buna göre 3.numuneye etki eden yere basma kuvveti ve sürüklenme kuvveti aşağıdaki gibidir.

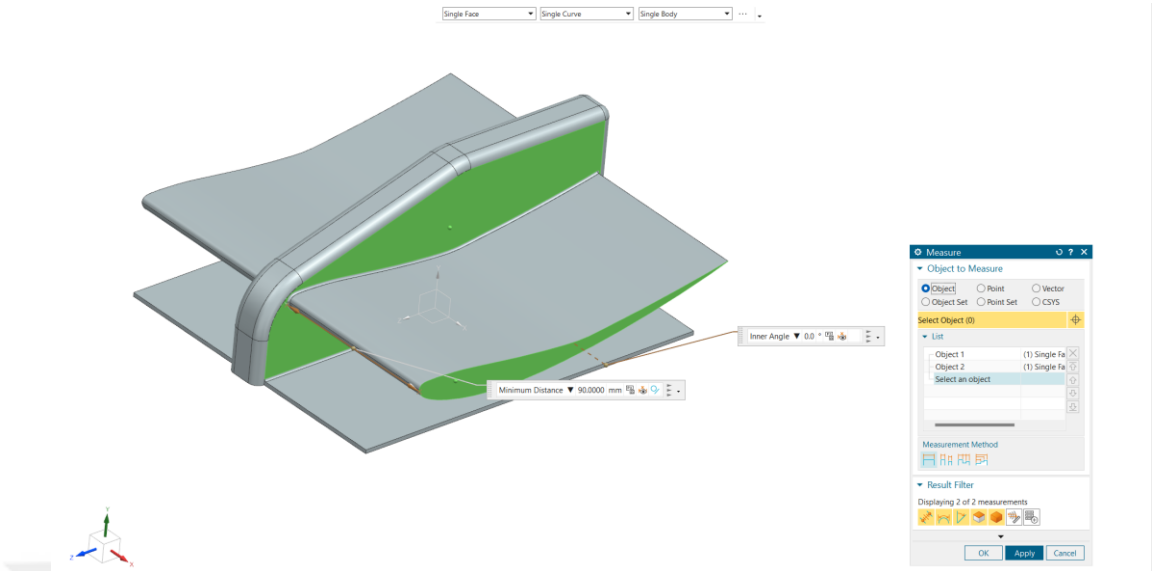


Şekil 4.50. 3.Numunenin Tek Taraftaki Kaldırma Kuvveti Hesabı İçin Gerekli Olan Alan Ölçüsü Görseli



Şekil 4.51. 3.Numunenin tek taraftaki kaldırma kuvveti hesabı için gerekli olan alan ölçüsü

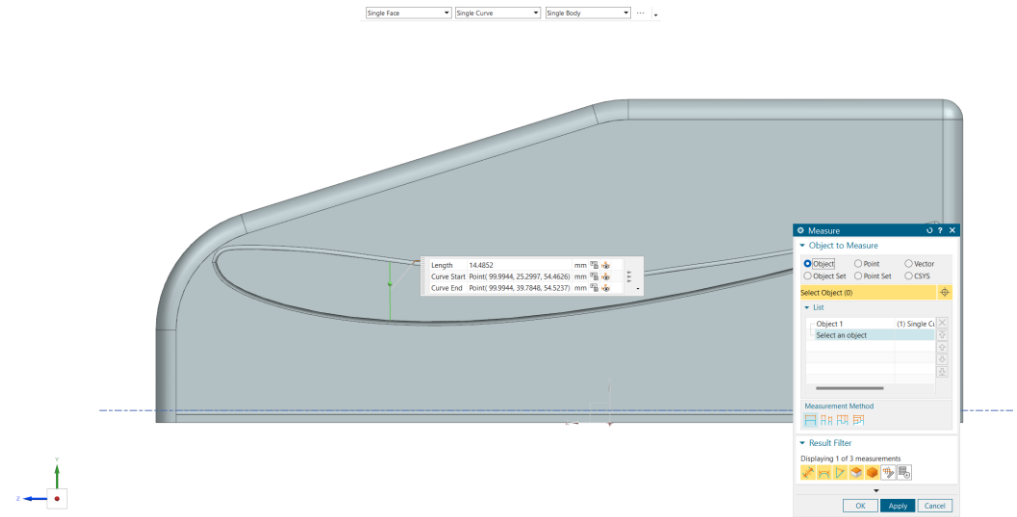
$$L = \frac{1}{2}(-0.26118)(1.1845)(27.77)^2(0.16133) \approx 16{,}2413\ N$$



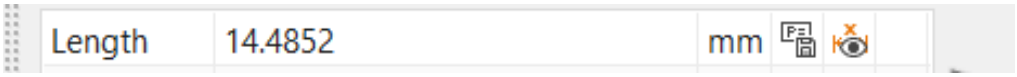
Şekil 4.52. Ön yüzey için yatay uzunluk



Şekil 4.53. Kanat profilinin yatay uzunluğu



Şekil 4.54. Ön yüzey için dikey uzunluk



Şekil 4.55. Kanat profilinin dikey uzunluğu

$$D = \frac{1}{2}(0.02616)(1.1845)(0.0145 * 0.09)(27.77)^2 \approx 0{,}0156\ N$$

4.numunenin kanat tipini belirlerken 2.ve 3.numunedeki kanat profilleri karşılaştırılmıştır. Bu kıyas yapılırken asıl kıstas olarak kaldırma kuvveti katsayısının sürüklenme kuvveti katsayısı değerlerine oranı baz alınmıştır.

Çizelge 4.9. Numune 2 & numune 3 - kanatların yerden yüksekliğine göre CL-CD değerleri

NACA S1223					Özel Tasarım				
Height	Position	CL	CD	Ratio	Height	Position	CL	CD	Ratio
5	Low	-0,24701	0,09279	-2,661887	5	Low	-0,18616	0,04572	-4,071441
15	Mid	-0,28807	0,05633	-5,114061	15	Mid	-0,25921	0,02802	-9,24981
25	High	-0,29998	0,04171	-7,191402	25	High	-0,26118	0,02616	-9,984803

Her ne kadar S1223 kanat profili daha yüksek yere basma katsayısına sahip olsa da aynı zamanda daha yüksek sürüklenme kuvveti katsayısı değerine sahiptir. Bu yüzden deneylerde esas olarak alınan yüksek C_L/C_D oranından dolayı son numunede Özel Tasarım kanat profili seçilmiştir.

Yeni tasarımda kanat sayısı 2'den 4'e çıkmıştır ve bu kanatları sığdırabilmek için yeni kanatların ölçekleri eskisine göre ½ oranda azaltılmıştır. Tasarımda da tam ilk kanat profilinin bitim noktasının dikey eksende belli bir mesafede ikinci ve aynı tip kanat profili ölçüleri konumlandırılmıştır. Bu değerlendirmede dikkat edilecek kıstas bu iki kanat profili arasındaki C_L/C_D oranı en yüksek olacak şekilde tasarımın finalize edilmesidir.

Normalde tasarımlarda kanat profilinin yerden yüksekliği 5, 15 ve 25 cm olan tasarımlara ikinci kanat eklendiğinde, ikinci kanat için yerden yükseklik ölçüleri 40, 45, 50 ve 55 cm

olarak değerlendirilmiştir. Hız değeri yine sabit tutularak 100 km/h yani 27.77 m/s şeklinde analizlere eklenmiştir.

Çizelge 4.10. Numune 4 - kanatların yerden yüksekliğine göre CL-CD değerleri

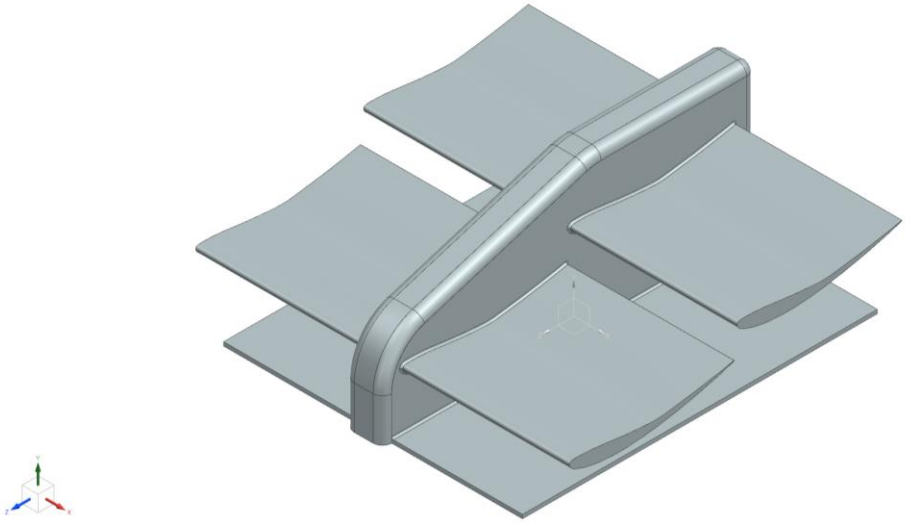
Özel Tasarım Çift Kanat			
Height	CL	CD	Ratio
40	-0,20457	0,04019	-5,089815
45	-0,26479	0,04592	-5,766854
50	-0,23585	0,04592	-5,136457
55	-0,23307	0,05203	-4,479765

Yüksek C_L/C_D oranını yakalamak için ikinci kanadın z=0 zemininden yüksekliği 50 cm olarak belirlenmiştir. Buna göre 4.numuneye etki eden yere basma kuvveti ve sürüklenme kuvveti aşağıdaki gibidir.

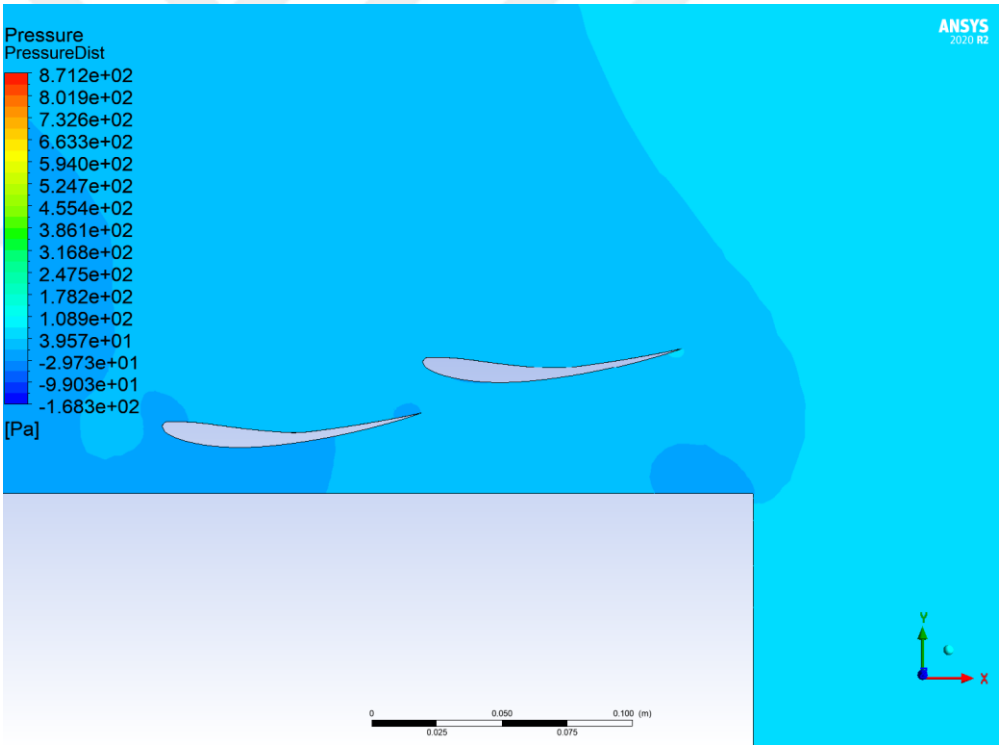
Her ne kadar kanat profilleri ½ oranında ölçeklendirilmiş olsa da yatay uzunlukları 3.numune ile aynı (90 mm) olarak sabit tutulmuştur. Bu yüzden kaldırma kuvvetine ve sürüklenme kuvvetine etki eden alan kanat başına yarıya düşecektir, fakat kanat sayısı da 2 katına çıkacağı için 3.numune için kullanılan alan miktarını bu değerlendirmede de aynı şekilde kullanabiliriz.

$$L = \frac{1}{2}(-0.23585)(1.1845)(27.77)^2(0.16133) \approx 14{,}6714\ N$$

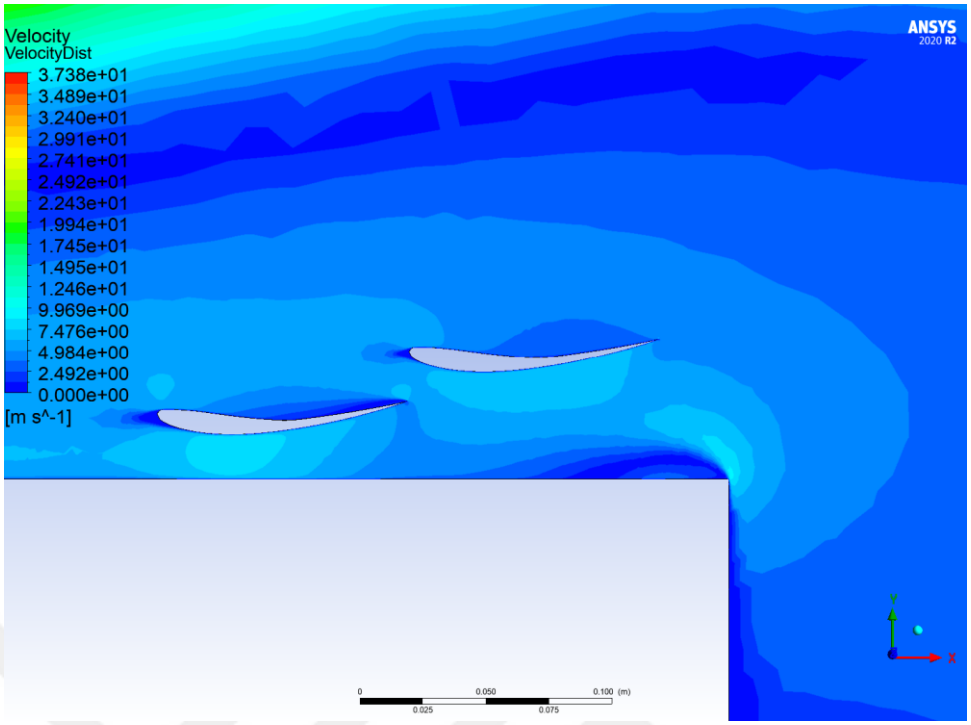
$$D = \frac{1}{2}(0.04592)(1.1845)(0.0145 * 0.09)(27.77)^2 \approx 0{,}0274\ N$$



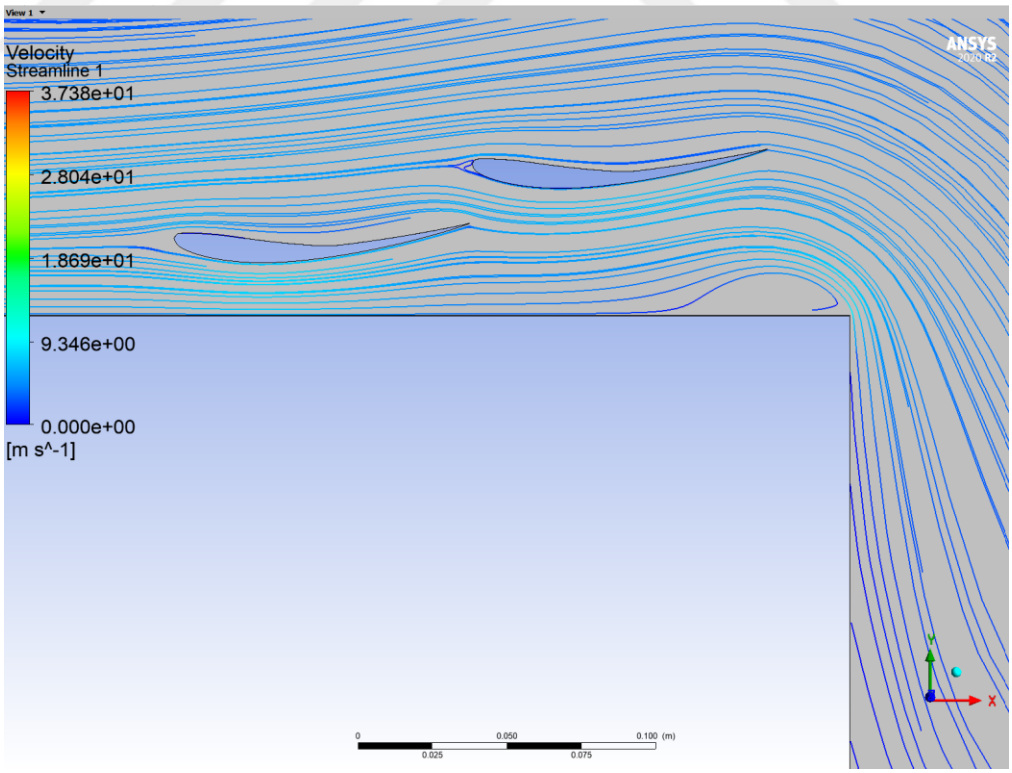
Şekil 4.56. Numune 4 izometrik görüntü



Şekil 4.57. Numune 4 çift kanat, V=27.77 m/s, uzunluk=0.2m, -1.5° atak açısındaki basınç dağılımı



Şekil 4.58. Numune 4 çift kanat, V=27.77 m/s, uzunluk=0.2m, -1.5° atak açısındaki hız dağılımı

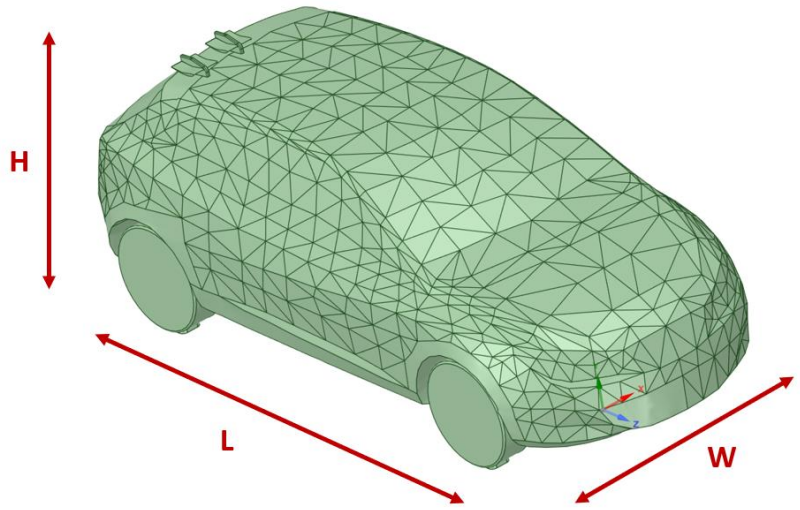


Şekil 4.59. Numune 4 çift kanat, V=27.77 m/s, uzunluk=0.2m, -1.5° atak açısındaki akış dağılımı

4.3. Kanat Profillerinin Araç Üzerindeki Nümerik Analizi

Belirlenen numunelerin araç üzerinde etkisini incelemek için belirli hızlarda nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Buradaki amaç akış ayrılmasını incelemek ve aracın üstündeki kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvveti katsayılarını değerlendirmektir.

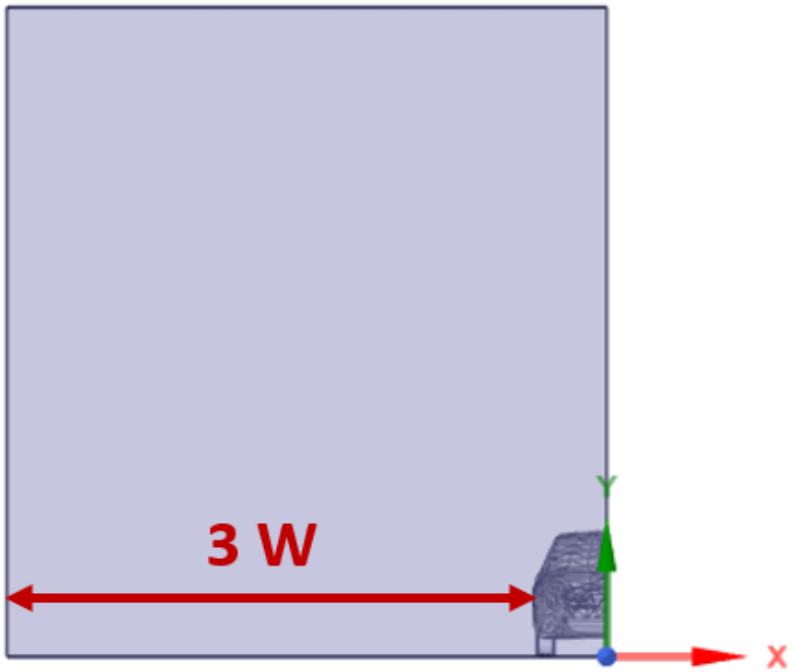
Araç modeli olarak düşük kaliteli Seat Ibiza 2016 serisi kullanılmıştır. Mesh sayısını azaltmak için arac ölçüsü ikiye bölünmüş ve modelin yan duvarı simetrik olarak belirlenmiştir. Simetrik modelde kanat sayısı 2 olarak belirlenmiştir. Analizin validasyonu için ANSYS programının kendi eğitim videoları olan "Aerodynamic Analysis of an FSAE CAR using ANSYS Fluent" serisindeki metotlar kabul edilmiştir. Kanatların efekrifliğini kıyaslamak için 5 adet araç senaryosu (Numunesiz, Numune 1, Numune 2, Numune 3 ve Numune 4 montajlı araç senaryosu) ve 3 adet hız senaryosu (80 kmh, 100 kmh, 120kmh) olmak üzere toplamda 15 adet analiz yapılmıştır. Ayrıca aracın arka tarafındaki eğiminden dolayı atak açıları belli olan kanatların kanat yapısı bozulmaması için kanatları araca monte ederken kanat atak açıları bozulmamıştır çünkü eğimli bir şekilde yapılan her montajda kanat atak açıları değişeceğinden sonuçlar da farklı olacaktır.



Şekil 4.60. Numune 3 montajlı araç katı modeli



Şekil 4.61. Numune 3 montajlı araç modeli çıkartılmış akış hacmi – YZ düzlemi



Şekil 4.62. Numune 3 montajlı araç modeli çıkartılmış akış hacmi – XY düzlemi

Akış hacmi belirlenirken de araç ölçülerine göre ölçeklendirilmiştir. Bu ölçeklendirme belirtildiği gibi ANSYS programının resmi kanalında "Aerodynamic Analysis of an FSAE CAR using ANSYS Fluent" analizindeki değerler kullanılarak yapılmıştır. Araç uzunluğuna "L", yüksekliğine "H", genişliğine "W" olarak belirlenmiş ve akış hacmi belirlenirken,

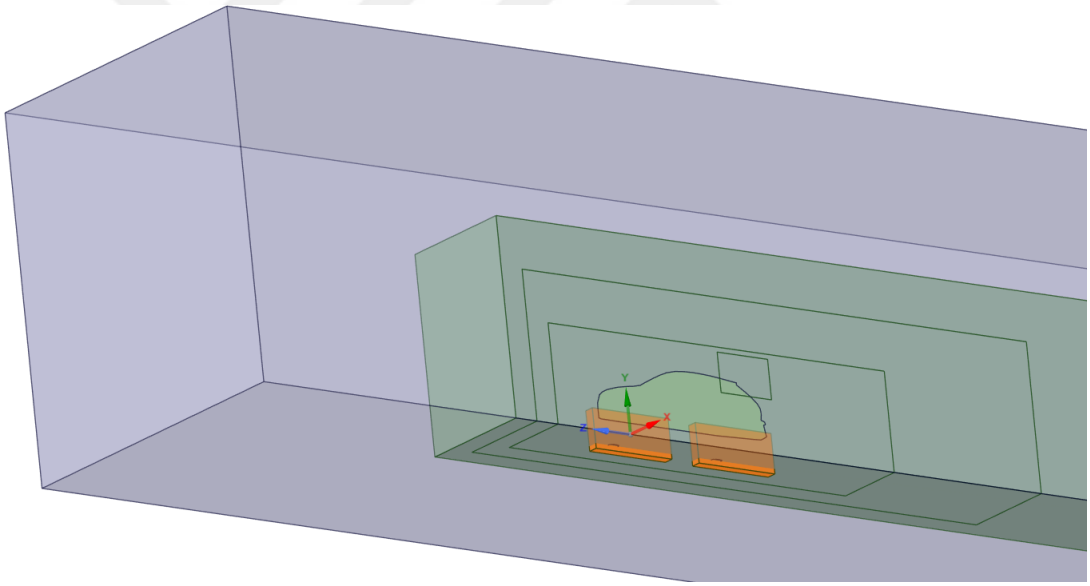
- Araç arkası akış uzunluğu 10L
- Araç önü akış uzunluğu 3L
- Araç üstü uzunluğu 3H
- Araç genişliği uzunluğu da 3W olarak seçilmiştir.

Çözümlemenin etkili olması ve yeteri kadar ağ örgüsü sayısı kullanmak için belli başlı yöntemler izlenmiştir. Öncelikle bölge bölge “Body of Influence” diye adlandırılan etki alanları oluşturulmuştur. Bu etki alanları sırasıyla,

- Ön ve Arka Teker Bölgelerinde
- Yakın Seviyede Araç Alanında (YSAA)
- Orta Seviyede Araç Alanında (OSAA)
- Uzak Seviyede Araç Alanında (USAA)
- Kanat Bölgesinde olarak belirlenmiştir.

Ağ örgüsü büyüklükleri ise,

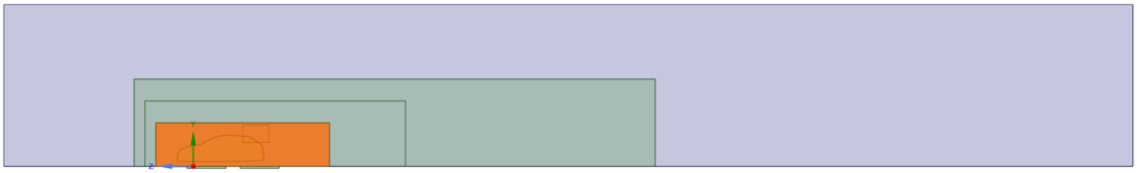
- Kanat Bölgesi = Teker Bölgesi < YSAA < OSAA < USAA olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.63. Teker etki bölgeleri



Şekil 4.64. Kanat etki bölgesi



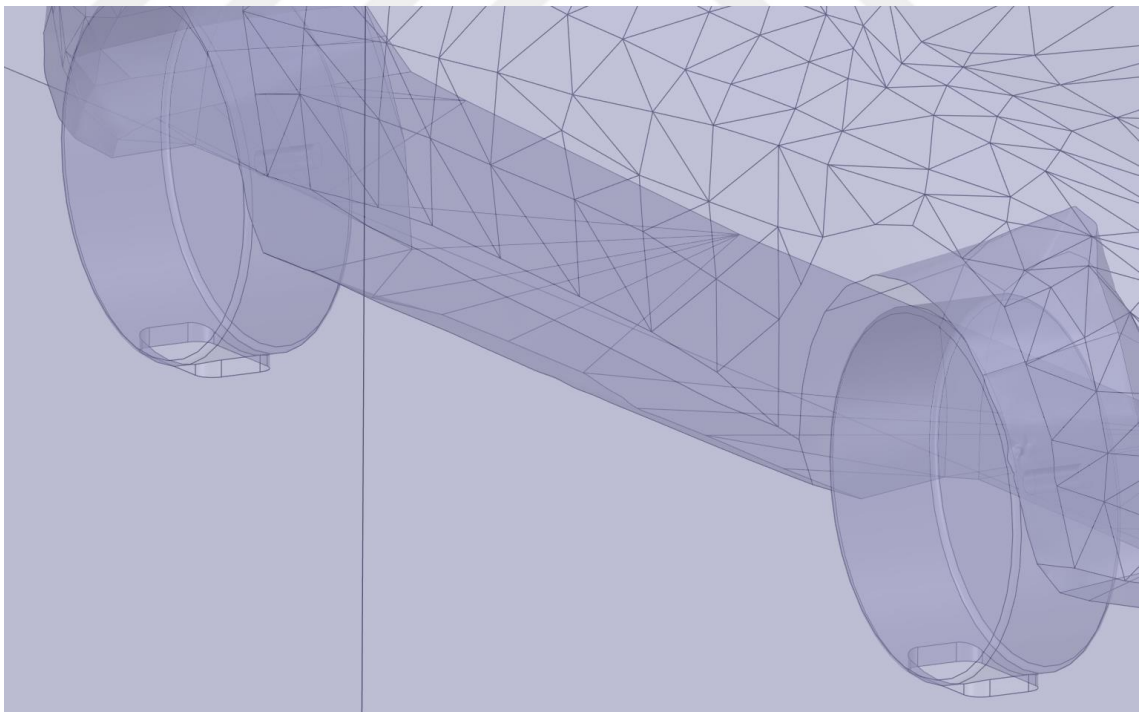
Şekil 4.65. YSAA etki bölgesi



Şekil 4.66. OSAA etki bölgesi

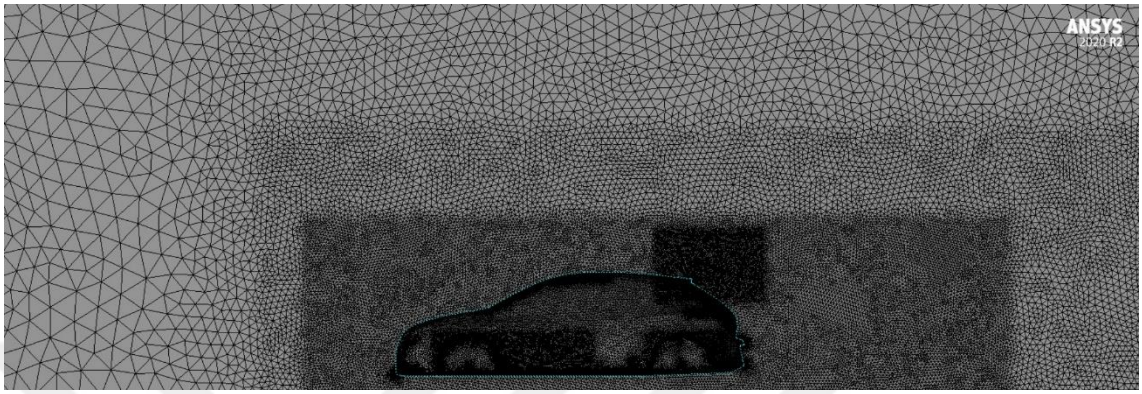


Şekil 4.67. USAA etki bölgesi



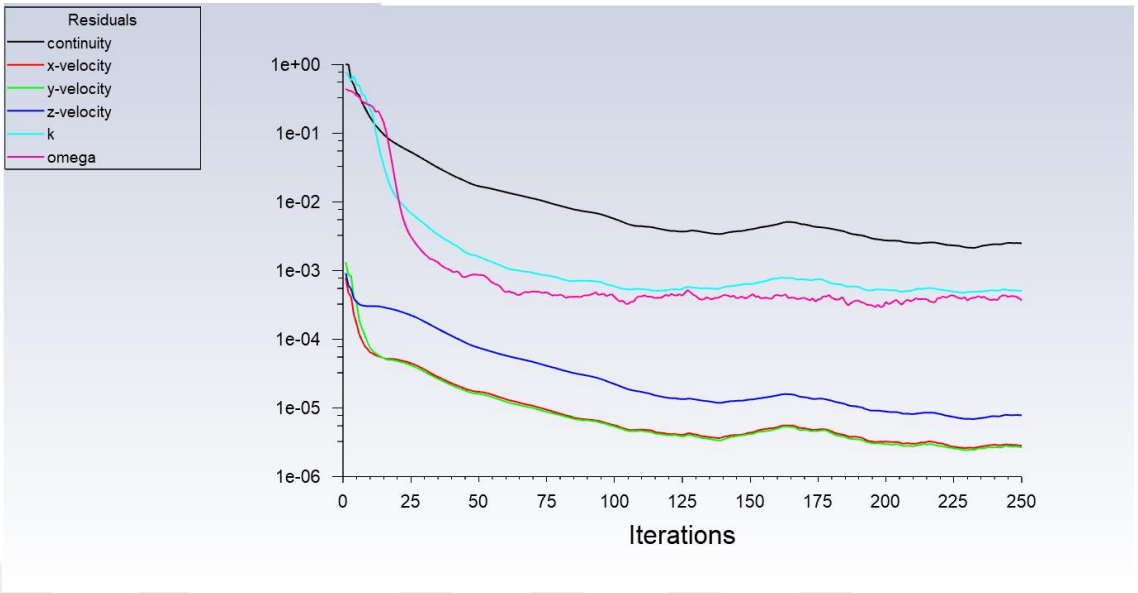
Şekil 4.68. Teker kısmının akış hacmine uyarlanması

Ardından tekerlerin akış hacmine uyarlanması için küçük boyutlarda tekeri akış hacmine bağlayan bölgeler oluşturulmuştur. Üstelik yine ağ sayısını azaltmak için ise araç tam ortadan ikiye bölünmüş ve bölünen alan simetrik alan olarak belirlenmiştir.

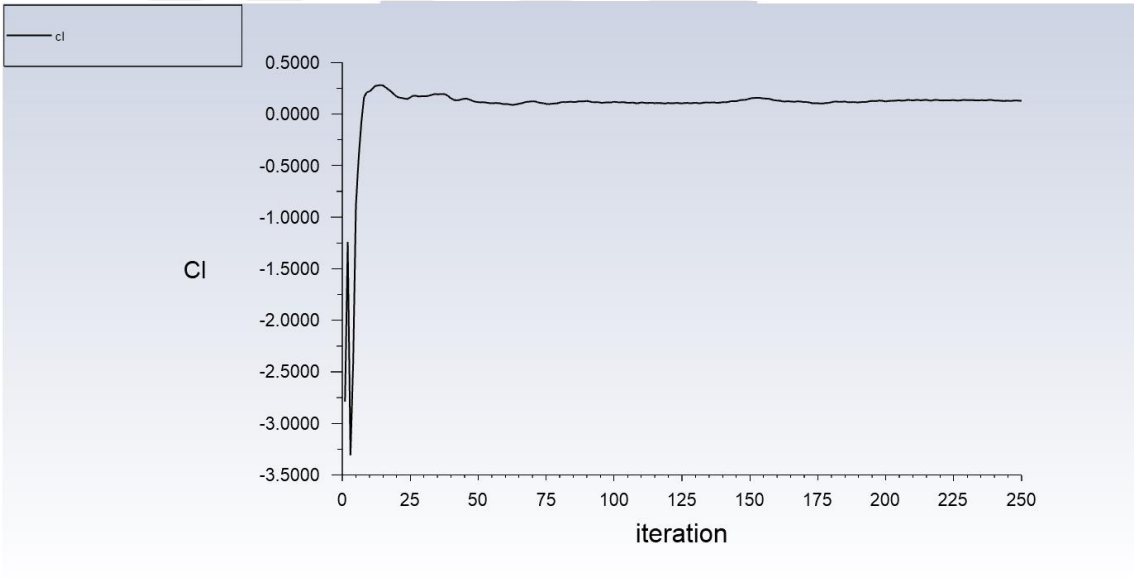


Şekil 4.69. Araç ağ örgüsü örneği

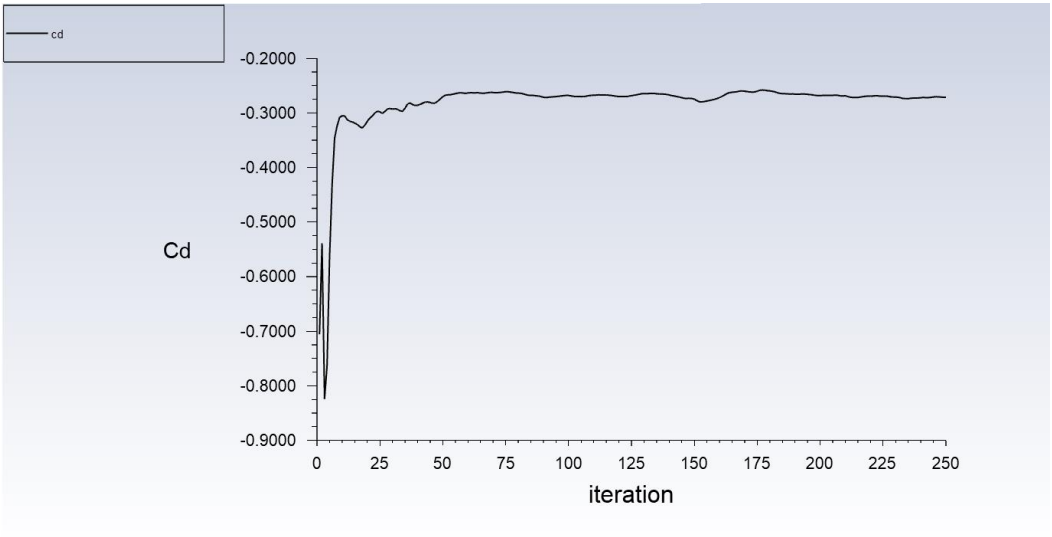
Ağ örgüsü biçimi belirlenirken akış bölgelerinin kritik olduğu yerlere daha küçük ve sık ağlar atılmıştır. Özellikle aracın kanatçık taraflarına en küçük ağlar atılmıştır. Kanat ve araç etrafına da sınır tabakaları daha iyi gözlemlemek için "Inflation Layer" ağ örgüsü atılmıştır. Üstelik modelin düşük kalitede olmasından dolayı kötü kalitede oluşan ağları önlemek için ise belli bölgelere "Edge Sizing" yöntemi uygulanmıştır ve yaklaşık 43 noktaya ağ kalitesinin arttırılmasında bu komut kullanılmıştır. Yaklaşık 15 milyon ağ örgüsü atıldıktan sonra çözümleme süreci yine k-w metodu kullanılarak başlamıştır. Her analizde araç bazında kaldırma kuvveti katsayısı ve sürüklenme katsayısı değerleri bulunmuştur.



Şekil 4.70. Ilk analizin (Numunesiz, 100 kmh) hata değerleri



Şekil 4.71. İlk analizin (Numunesiz, 100 kmh) kaldırma kuvveti katsayısı grafiği



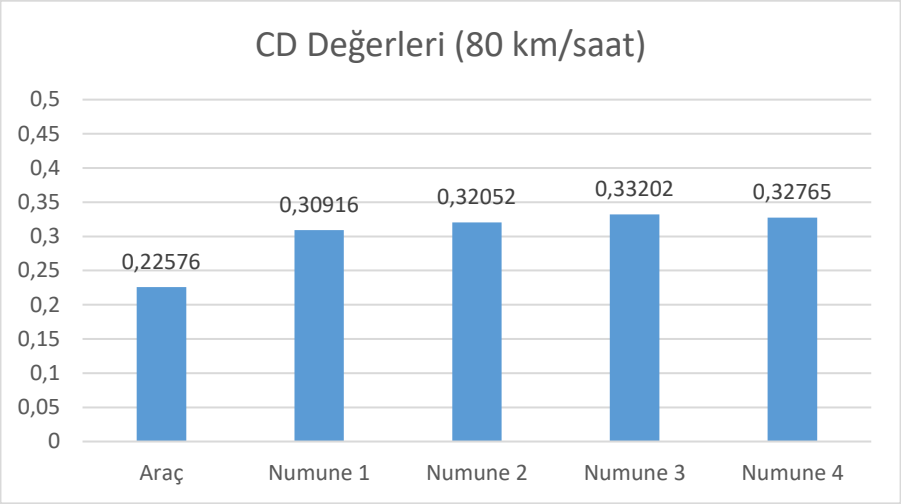
Şekil 4.72. İlk analizin (Numunesiz, 100 kmh) sürüklenme katsayısı grafiği

Analiz için kullanılan ANSYS programının resmi kanalında önerdiği modelin yapılandırılmasından sonra analiz verilerinin doğruluğunu karşılaştırmak için ise araç modelinin 100 km/saat hızındaki sürüklenme katsayısı incelenmiştir. Analiz verisindeki sürüklenme katsayısı 0.31006 iken, daha önce ölçülmüş verideki sürüklenme katsayısı 0.31 olarak belirlenmiştir.

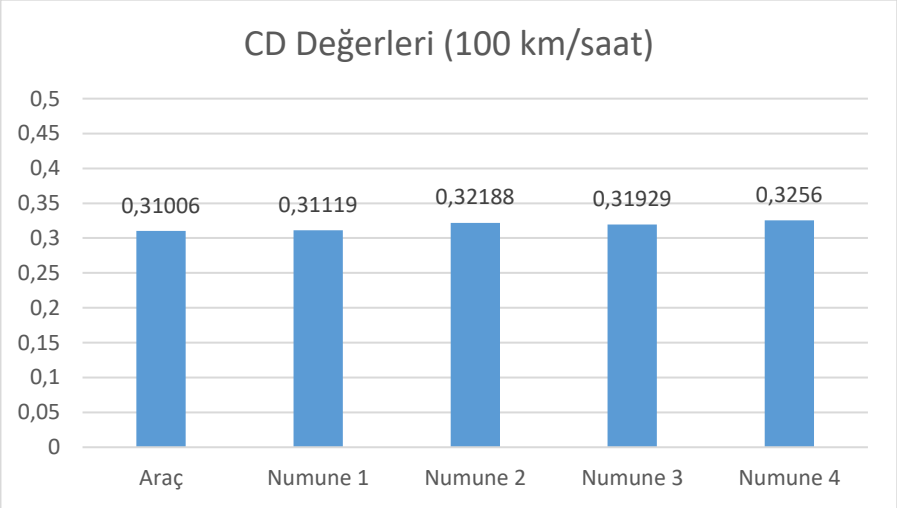
Basic dimensions	
Length:	**4061 mm / 159.9 in**
Width:	**1693 mm / 66.7 in**
Width with mirrors:	
Width folded back mirrors:	
Height:	**1445 mm / 56.9 in**
Height with roof rails or antenna:	
Wheelbase:	**2469 mm / 97.2 in**
Claimed EPA passenger volume:	
Calculated EPA passenger volume:	
Fuel capacity:	**45 liter / 11.9 U.S. gal / 9.9 imp. gal**
Drag coefficient (Cw-Wert):	
Cd claimed:	
Cd estimated by a-c:	**0.31**

Şekil 4.73. Nümerik analizi yapılan araç datasının 100 km/saat hızındaki sürüklenme katsayısı (Şekil https://www.automobile-catalog.com/car/2016/3095855/seat_ibiza_1_0_ecotsi_110_dsg.html#gsc.tab= 0 adresinden alınmıştır)

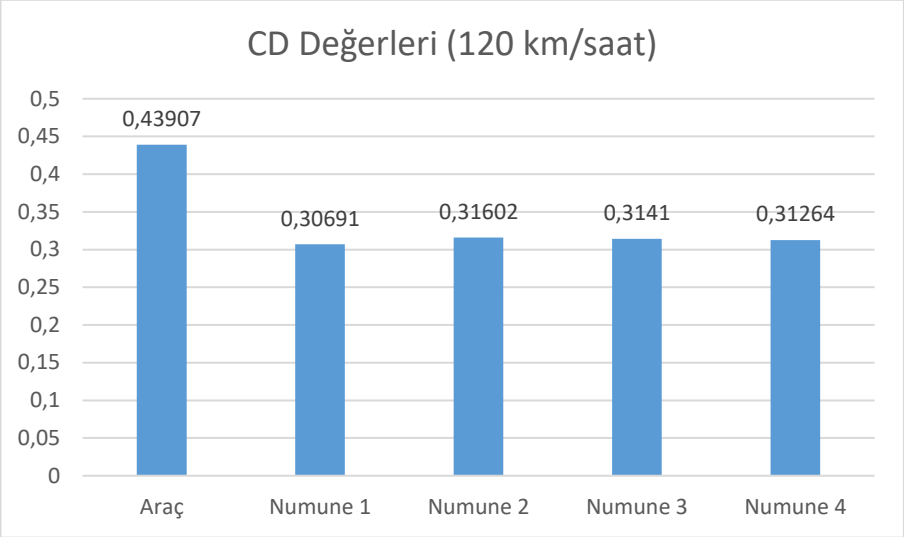
Bu değerleri kabul ederek analizler önce aracın kendi, çıplak yüzeyinde, ardından belirlenen 4 numunede, 3 farklı hızda dikkate alınacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçların ardından elde edilen sürüklenme ve kaldırma kuvveti katsayıları aşağıdaki gibidir.



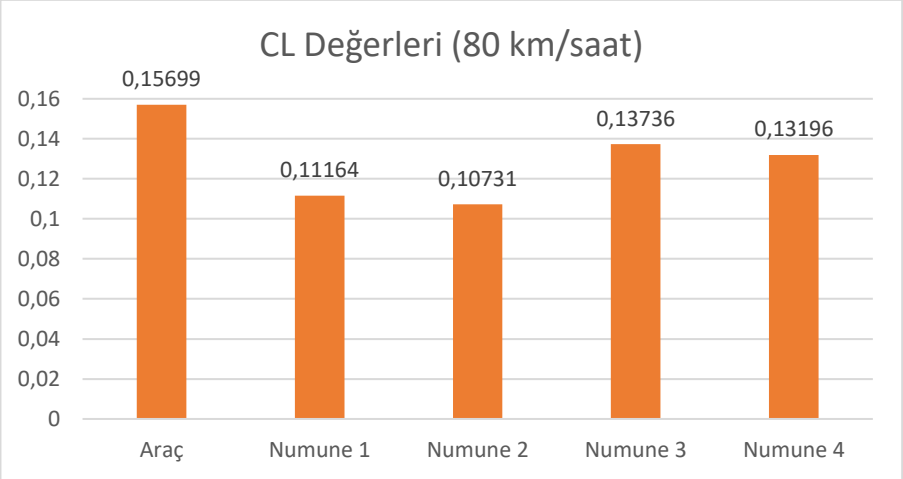
Şekil 4.74. 80 km/saat Hızındaki sürüklenme kuvveti katsayısı



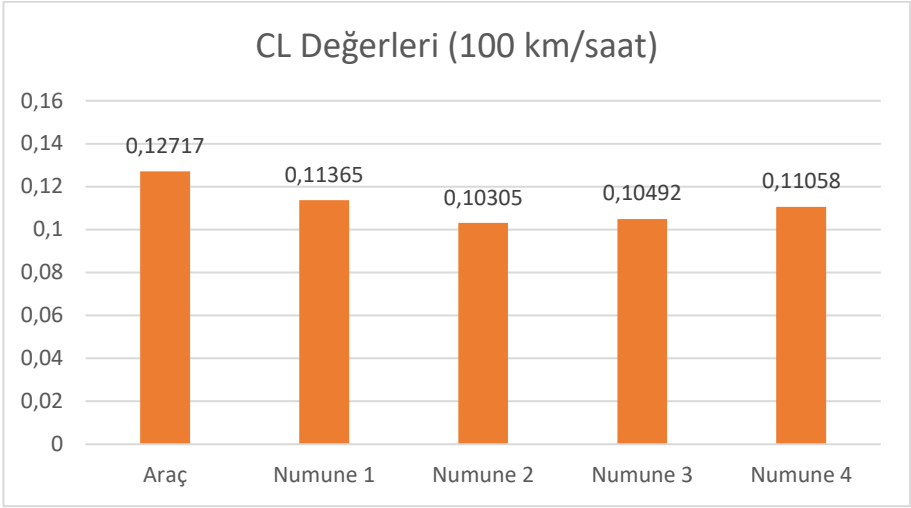
Şekil 4.75. 100 km/saat Hızındaki sürüklenme kuvveti katsayısı



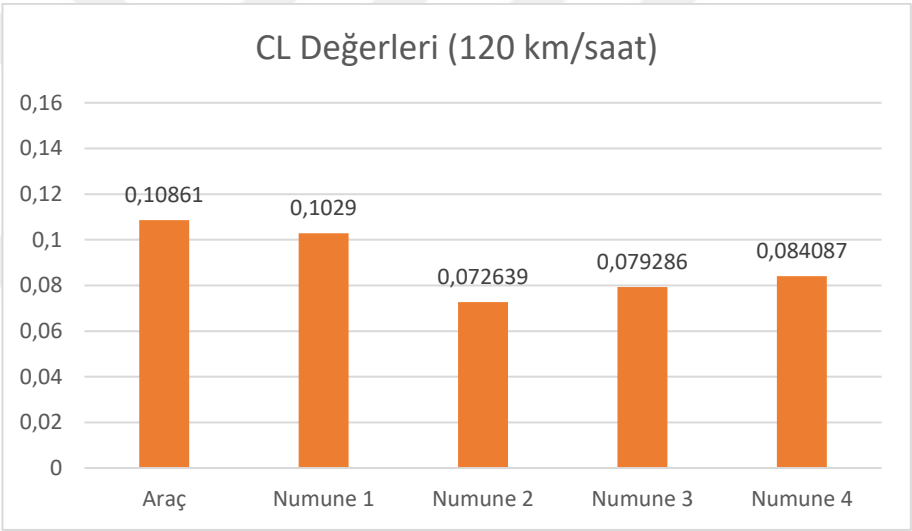
Şekil 4.76. 120 km/saat Hızındaki sürüklenme kuvveti katsayısı



Şekil 4.77. 80 km/saat Hızındaki kaldırma kuvveti katsayısı



Şekil 4.78. 100 km/saat Hızındaki kaldırma kuvveti katsayısı

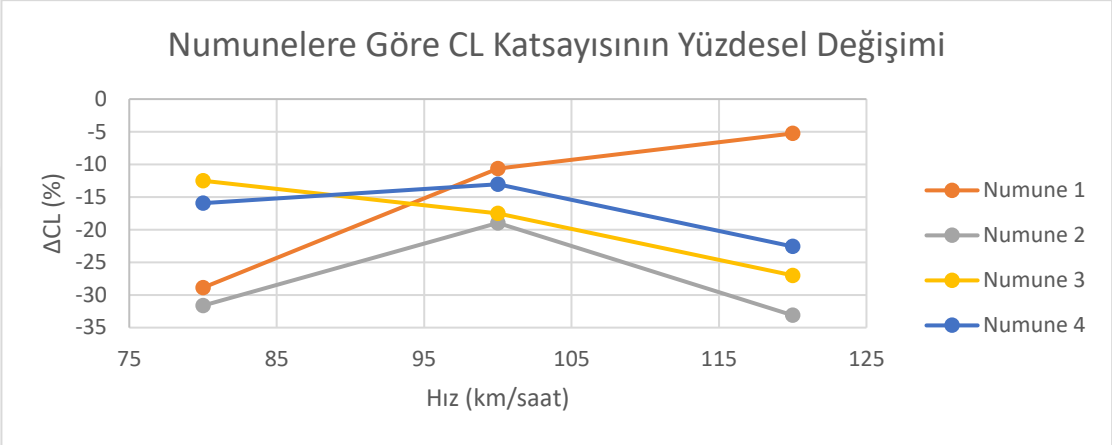


Şekil 4.79. 120 km/saat Hızındaki kaldırma kuvveti katsayısı

Takılan kanatçık numunelerin etkisi düşük hızlarda çok fazla gözükmezken, yüksek hızlarda oldukça keskin ve etkili değişimlere sebep olmuştur. Burada yapılan 100 km/saat hızındaki araç testi sonucu çıkan veriler aynı zamanda kanat analizlerindeki değerleri de valide etmektedir. Numune 2, numune 3'e göre sürüklenme katsayısında daha fazla etkiye sahipken, numune 3, numune 2'ye göre daha fazla sürüklenme katsayısının azalmasında katkıda bulunmuştur. Bu numunelerin farklı hızlarda araçlara yaptığı etki yüzdesel olarak alttaki grafik ve tabloda verilmiştir.

Çizelge 4.11. Kaldırma kuvveti katsayısının numunelere göre değişimi

ARAÇ CL Değişimi (%)				
	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4
80	-28,88719	-31,64533	-12,50398	-15,94369
100	-10,63144	-18,96674	-17,49626	-13,04553
120	-5,25734	-33,11942	-26,99936	-22,57895

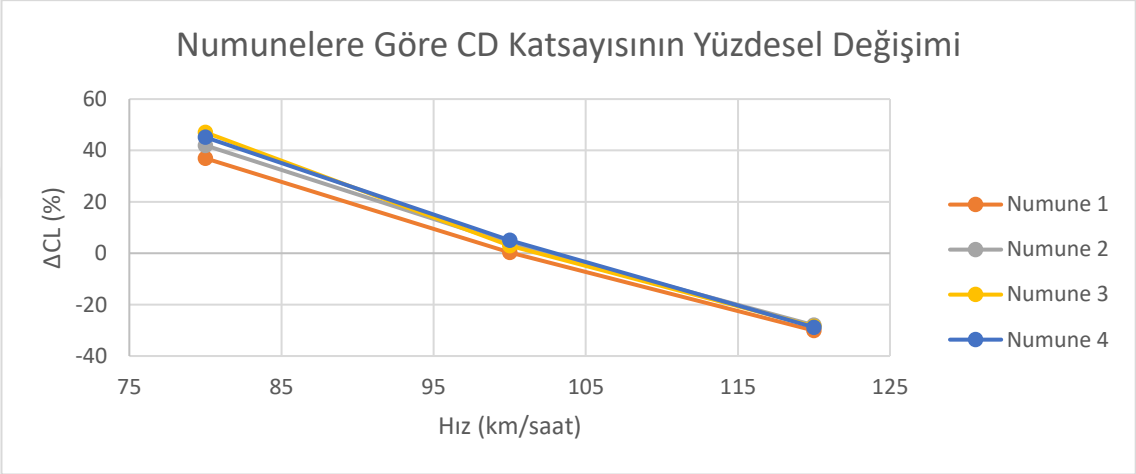


Şekil 4.80. Kaldırma kuvveti katsayısının numunelere göre değişimi

Numunelerdeki kanatların yüksek hızlarda etkisinin çok fazla olduğu analizler sonucunda tespit edilmiştir. Kanadı olmayan numune 1'in ise kanadı olan numunelere göre düşük hızlarda daha etkili olmuştur. Numune 2'nin her hız değerinde kaldırma kuvveti değişiminde en büyük etkiye sahip olmuştur. Numune 3 ve numune 4 kıyasında ise çift kanatlı numunenin düşük hızlarda tek kanatlı numuneye göre daha yere basma kuvvetinde daha yüksek etkiye sahip olmuştur. Aynı numunelerin sürüklenme katsayısındaki yüzdesel olarak araca farklı hızlarda yaptığı etki ise alttaki grafik ve tablolarda belirtilmiştir.

Çizelge 4.12. Sürüklenme kuvveti katsayısının numunelere göre değişimi

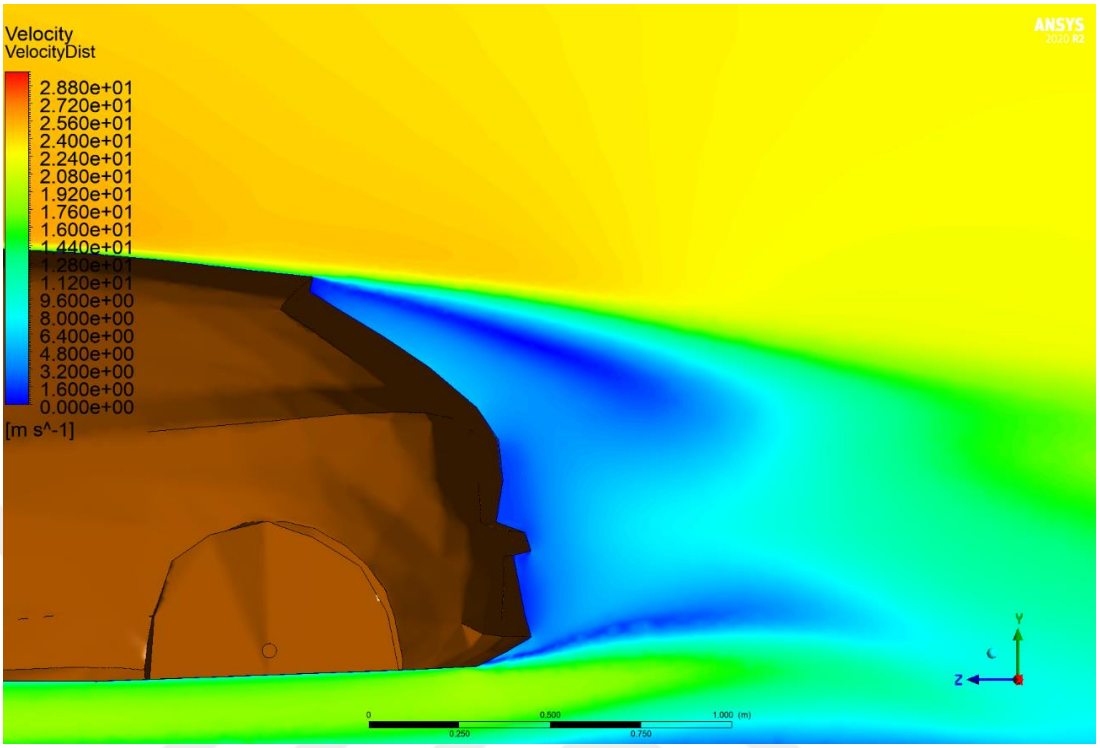
ARAÇ CD Değişimi (%)				
	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4
80	36,94189	41,97378	47,06768	45,13200
100	0,36445	3,81217	2,97684	5,01193
120	-30,09998	-28,02514	-28,46243	-28,79495



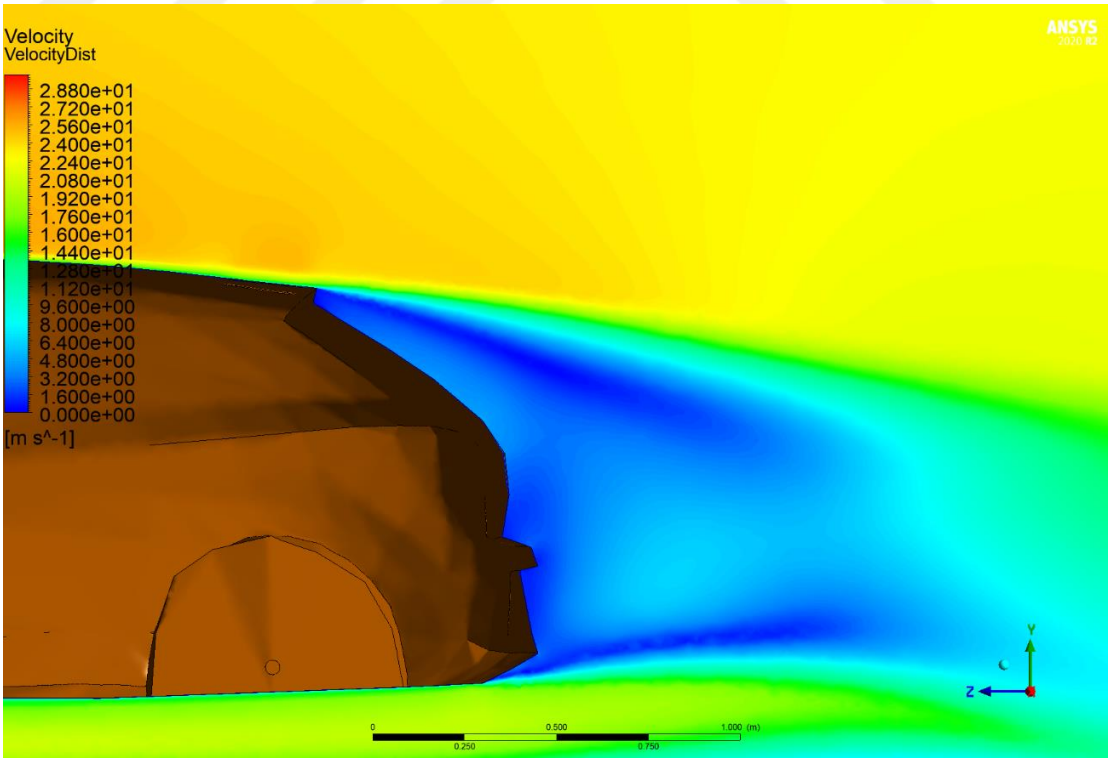
Şekil 4.81. Sürüklenme kuvveti katsayısının numunelere göre değişimi

Numunelerin düşük hızda araca sürüklenme kuvveti katsayısı bazında olumsuz anlamda etki etmiştir. 100 km/saat hızında ise hemen hemen etkisi sıfıra kadar indirgenmiş ve 120 km/saat hızında ise etkisini pozitif yönde göstermiştir. En fazla etkiyi kanatçığı olmayan 1.numune yapmıştır. Bu kanatlarının etkisini, akış ayrılmasını ve art izi bölgesini gözlemlemek adına hız kontürleri ve hız vektörleri çıkarılmıştır.

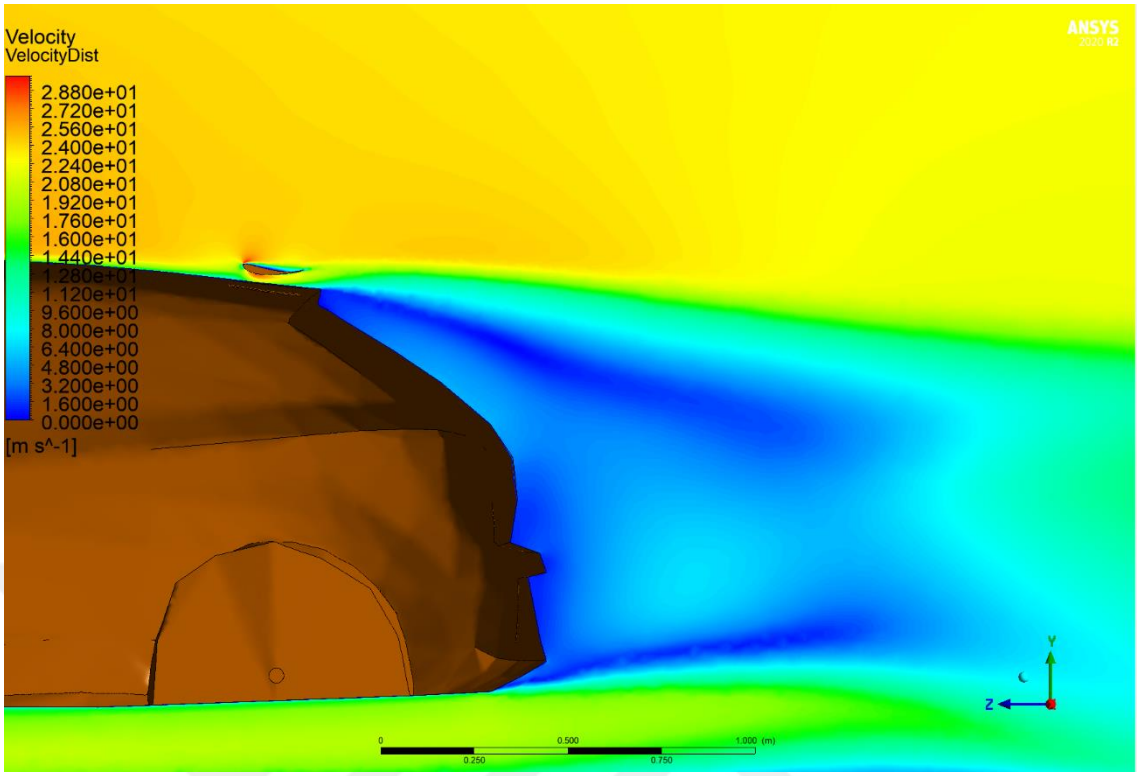
- 80 km/saat hızı için hız kontürleri



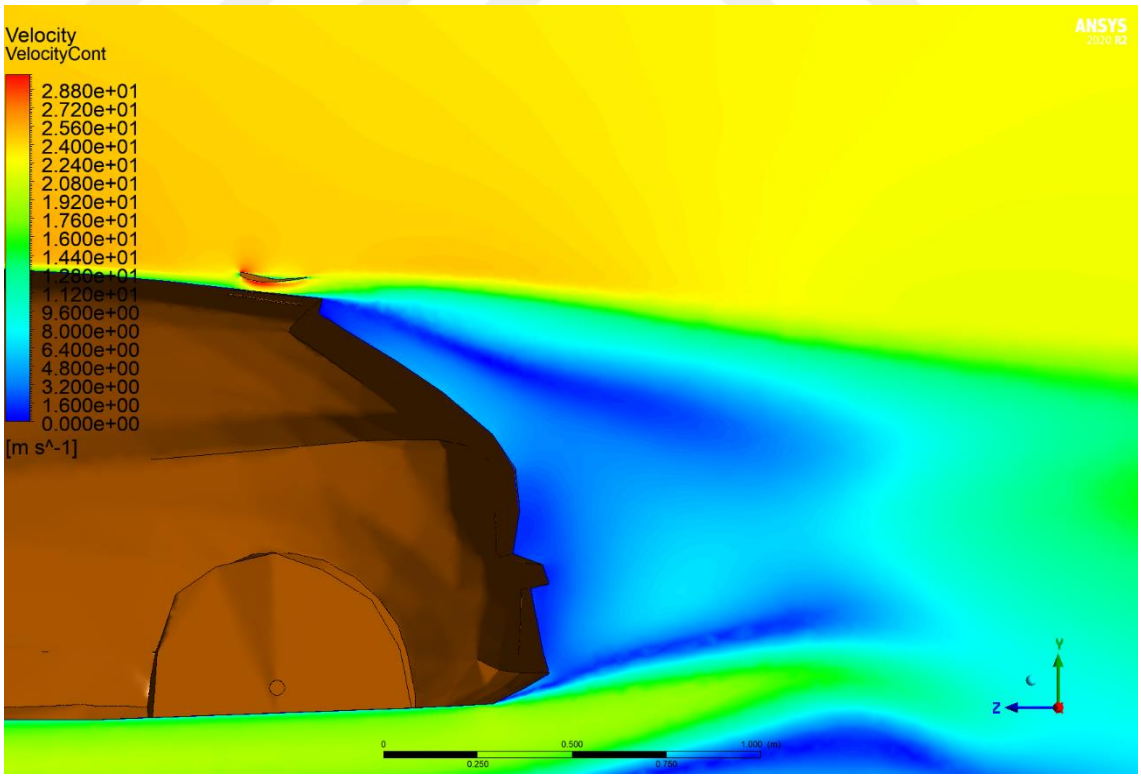
Şekil 4.82. (80 km/saat) Numunesiz araç gövdesi



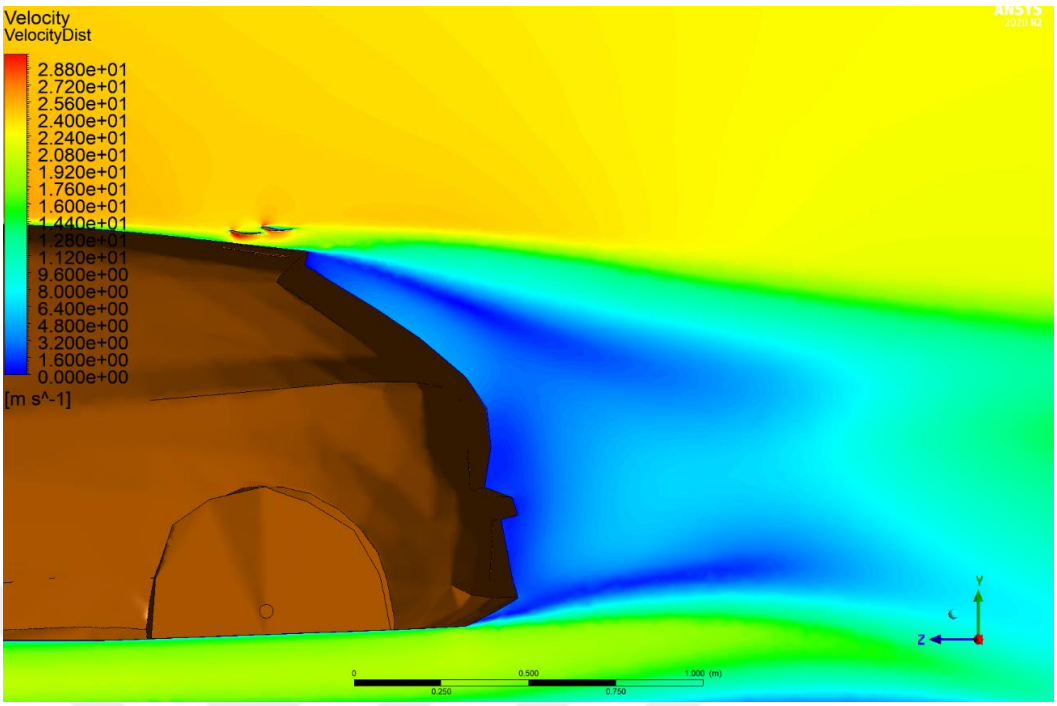
Şekil 4.83. (80 km/saat) 1.Numuneli araç gövdesi



Şekil 4.84. (80 km/saat) 2.Numuneli araç gövdesi

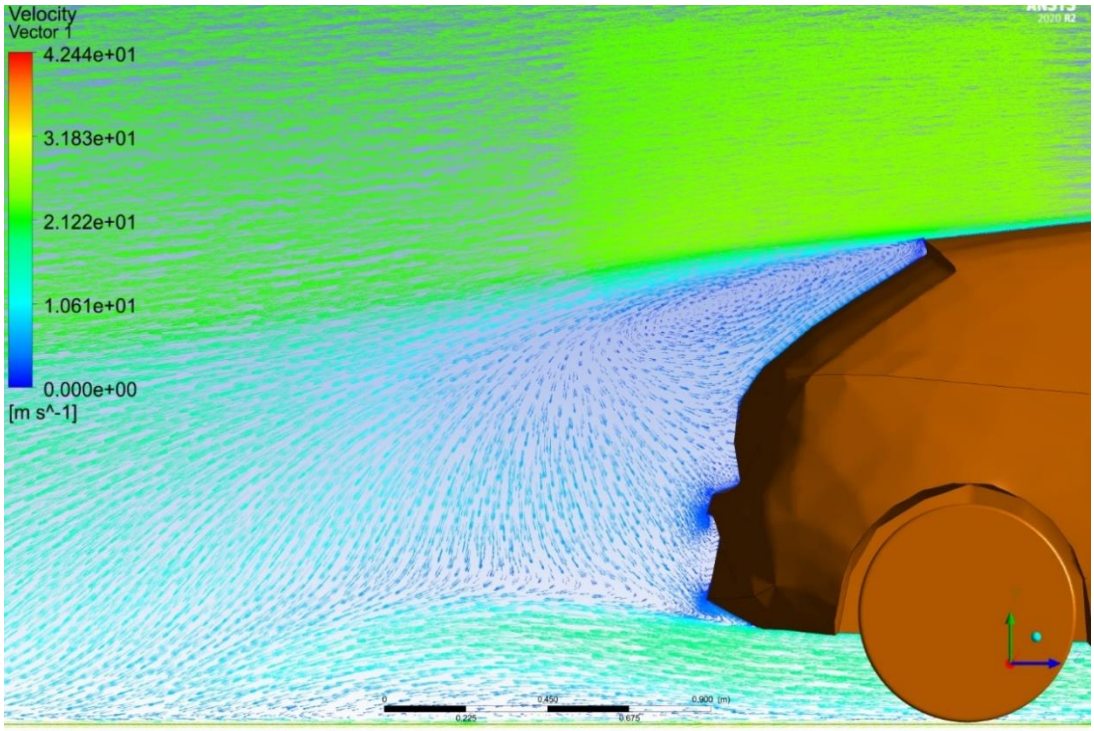


Şekil 4.85. (80 km/saat) 3.Numuneli araç gövdesi

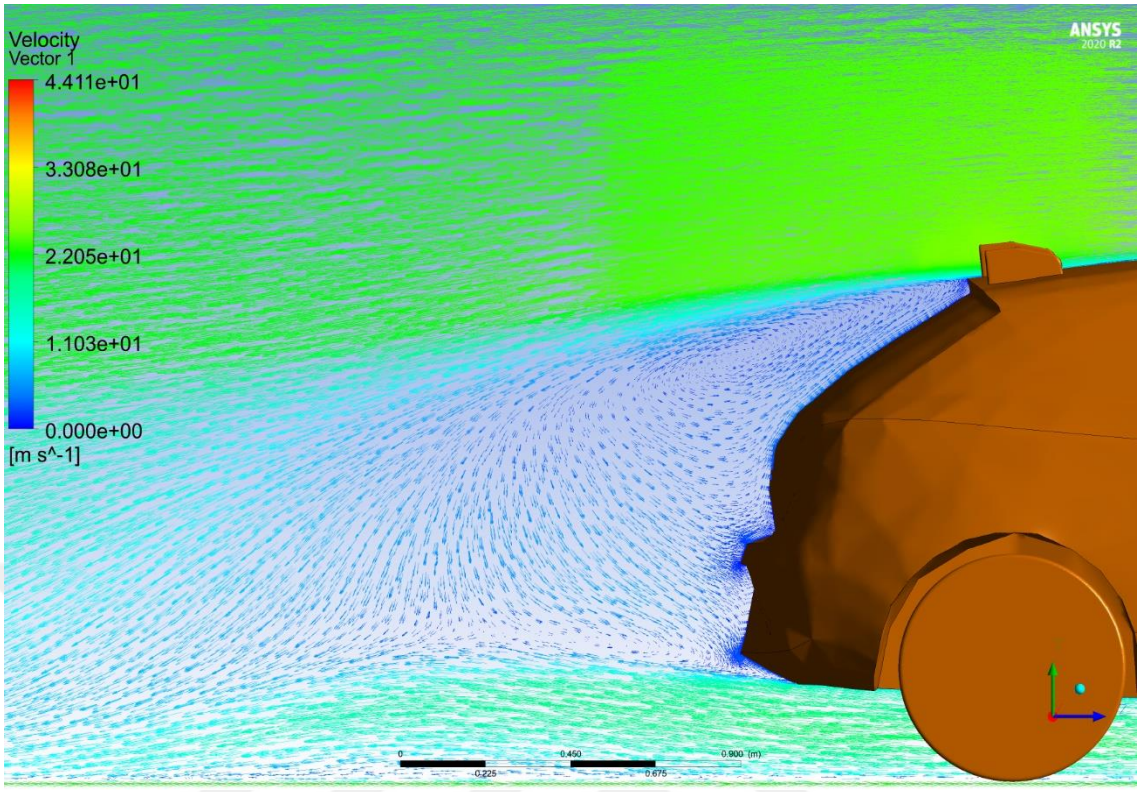


Şekil 4.86. (80 km/saat) 4.Numuneli araç gövdesi

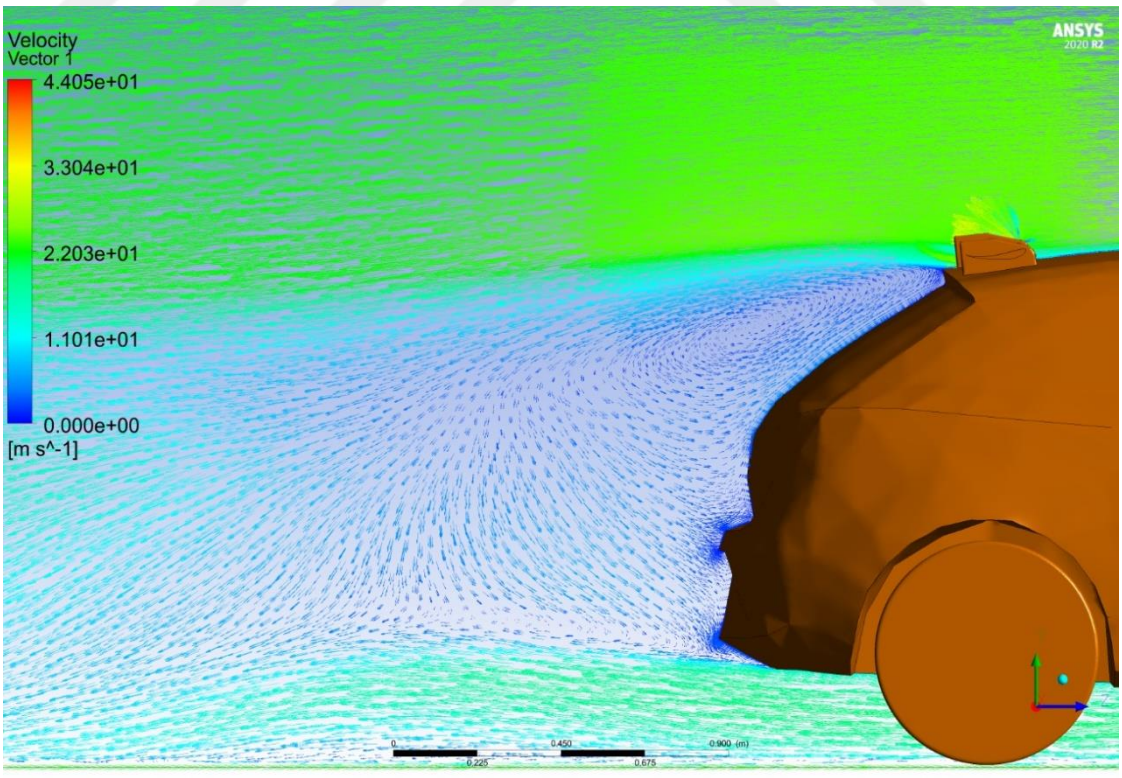
- 80 km/saat hızı için hız vektörleri



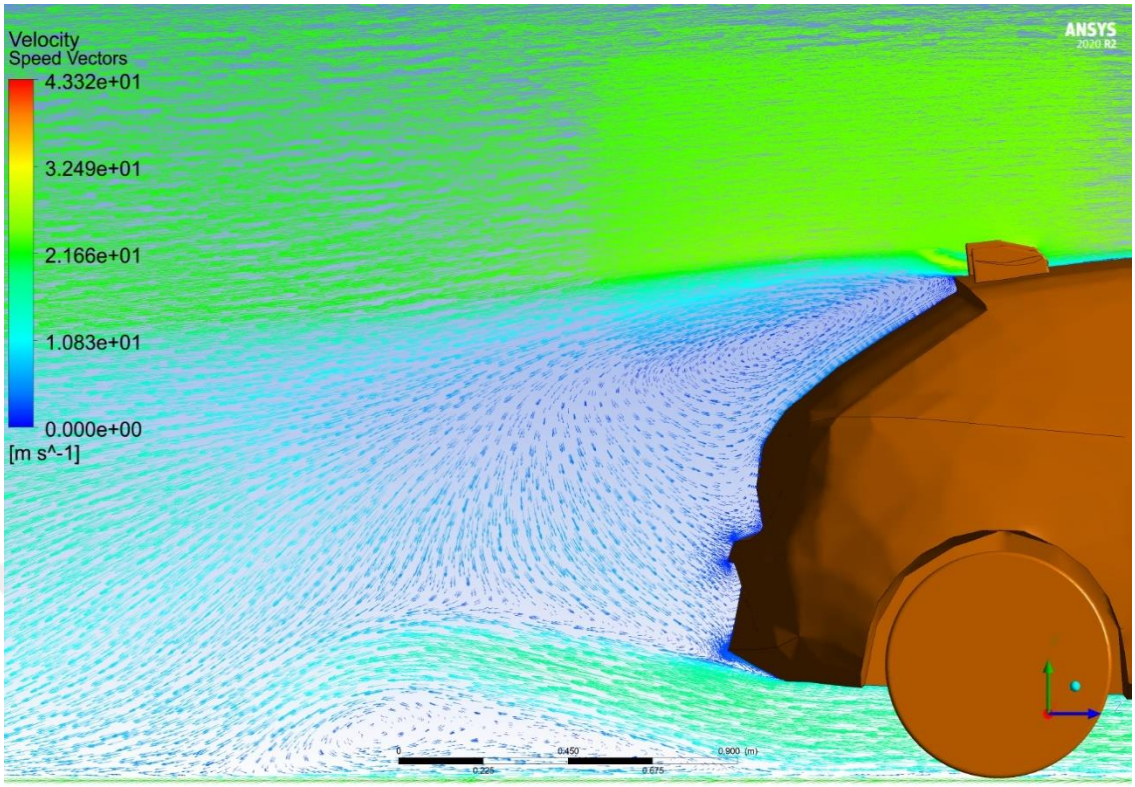
Şekil 4.87. (80 km/saat) Numunesiz araç gövdesi



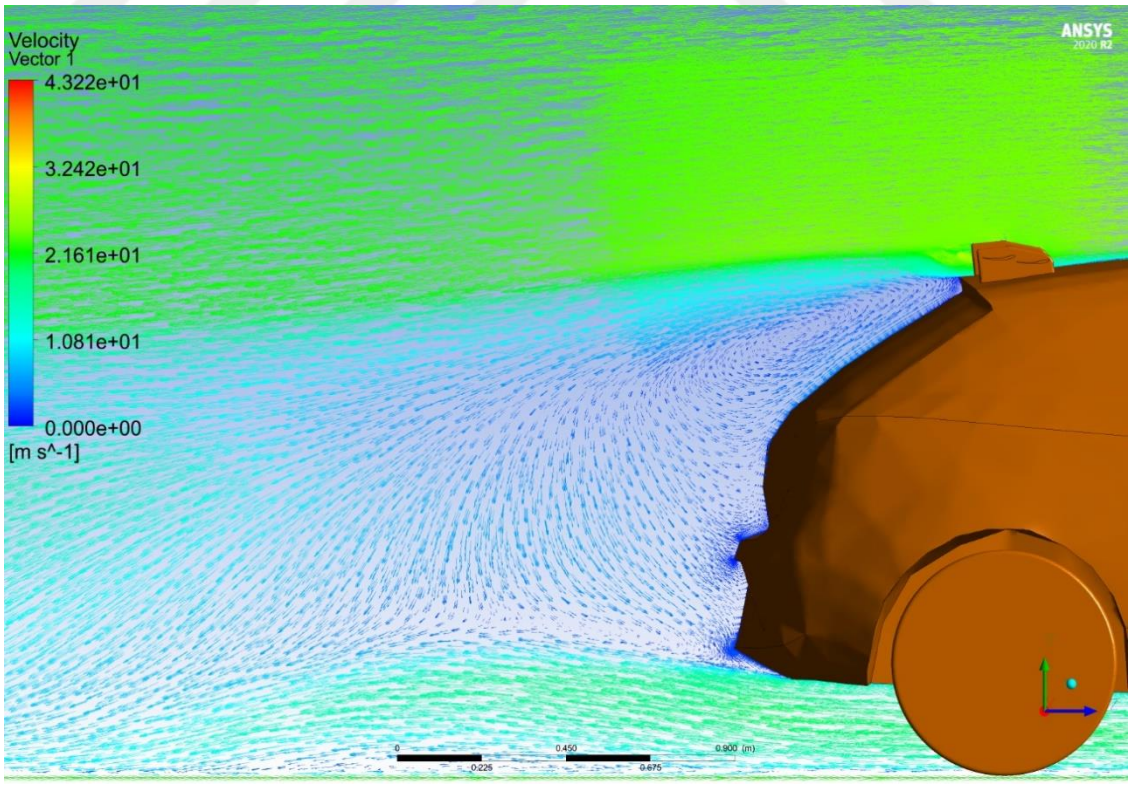
Şekil 4.88. (80 km/saat) 1.Numuneli araç gövdesi



Şekil 4.89. (80 km/saat) 2.Numuneli araç gövdesi

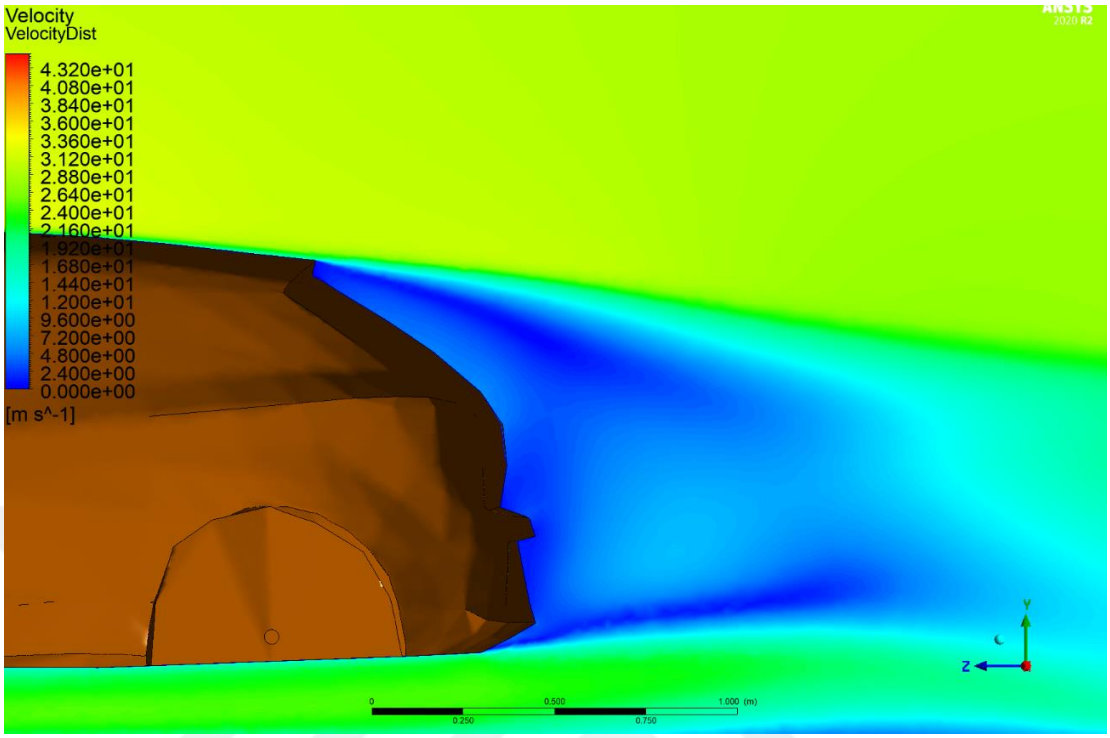


Şekil 4.90. (80 km/saat) 3.Numuneli araç gövdesi

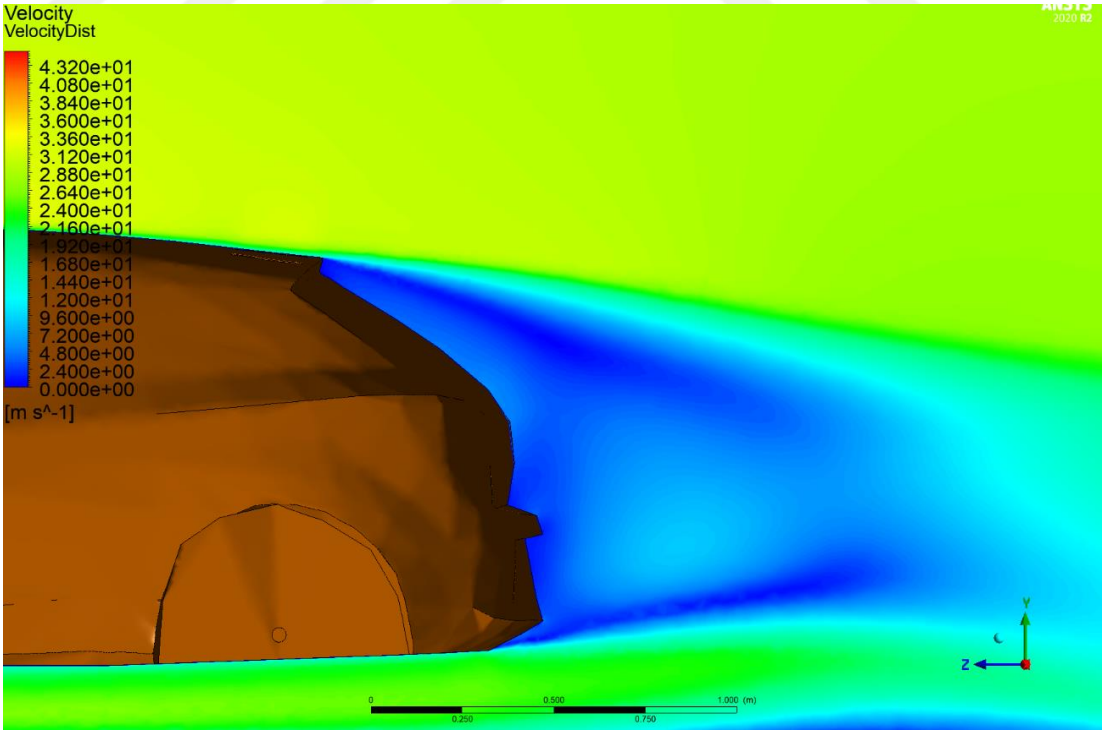


Şekil 4.91. (80 km/saat) 4.Numuneli araç gövdesi

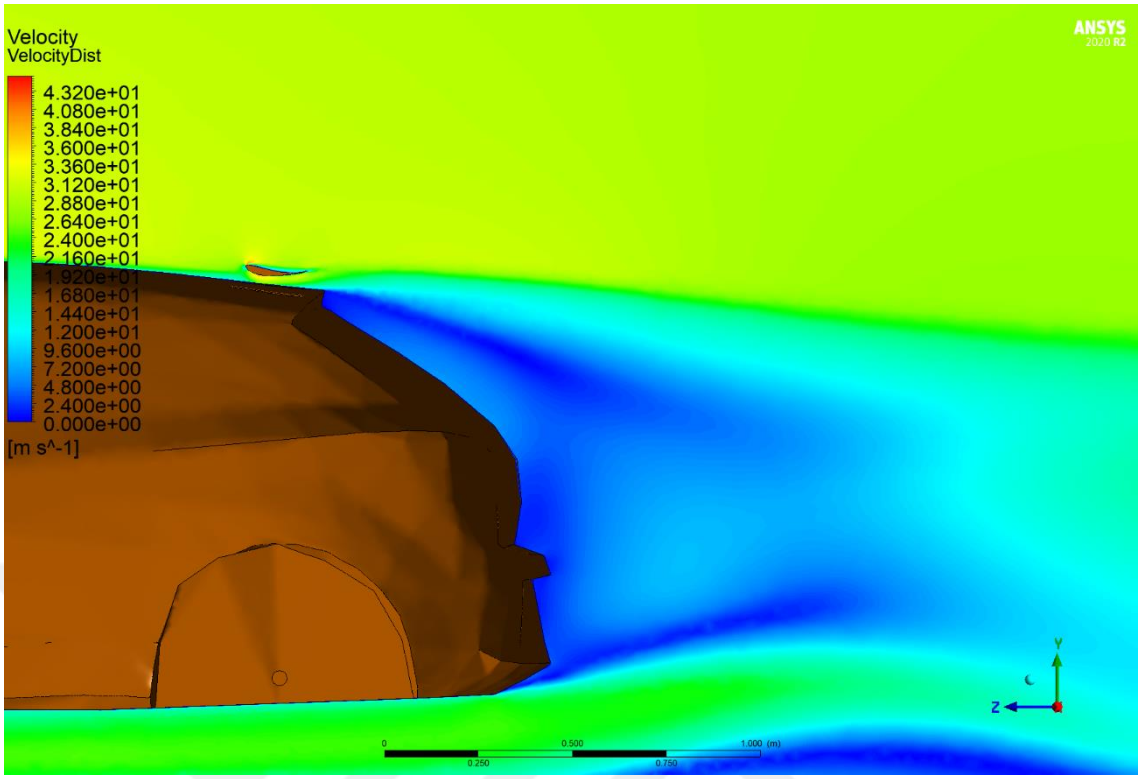
- 100 km/saat hızı için hız kontürleri



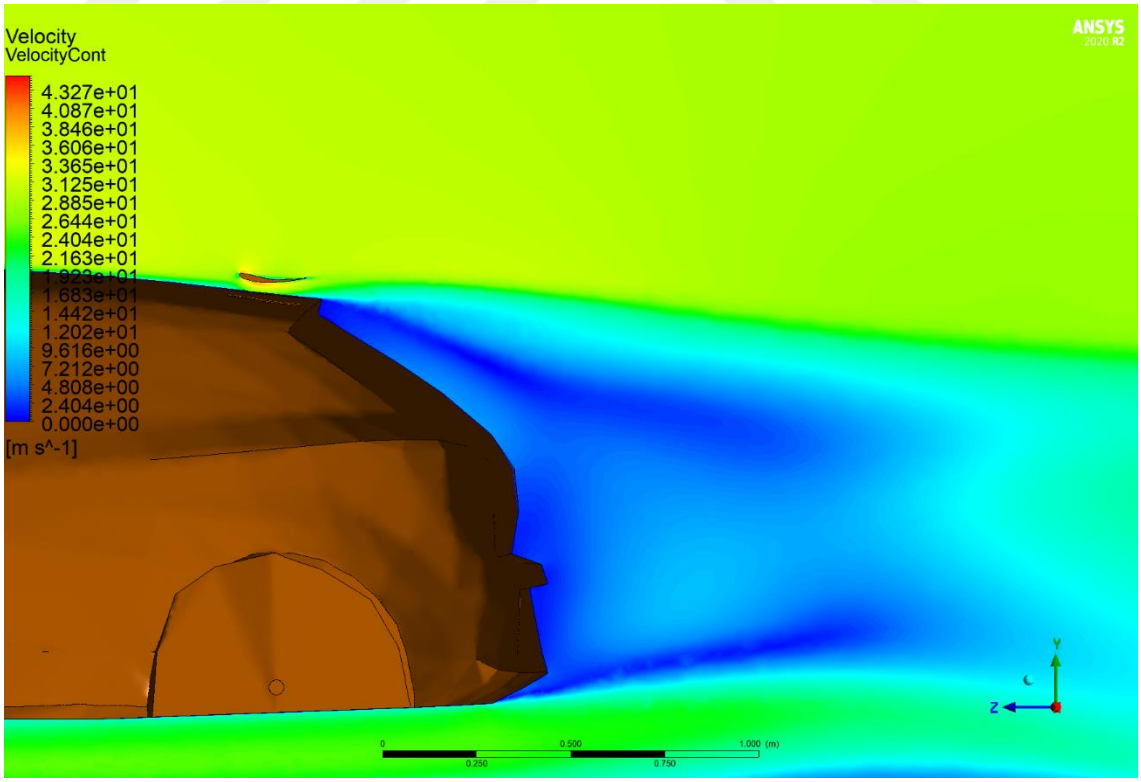
Şekil 4.92. (100 km/saat) Numunesiz araç gövdesi



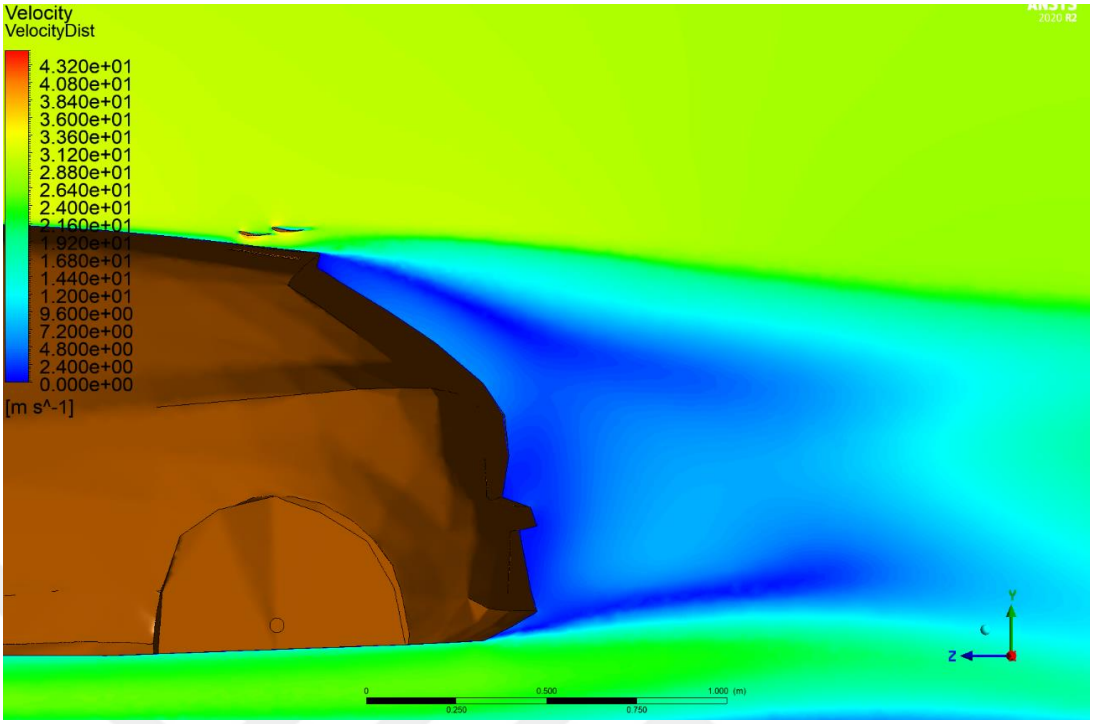
Şekil 4.93. (100 km/saat) 1.Numuneli araç gövdesi



Şekil 4.94. (100 km/saat) 2.Numuneli araç gövdesi

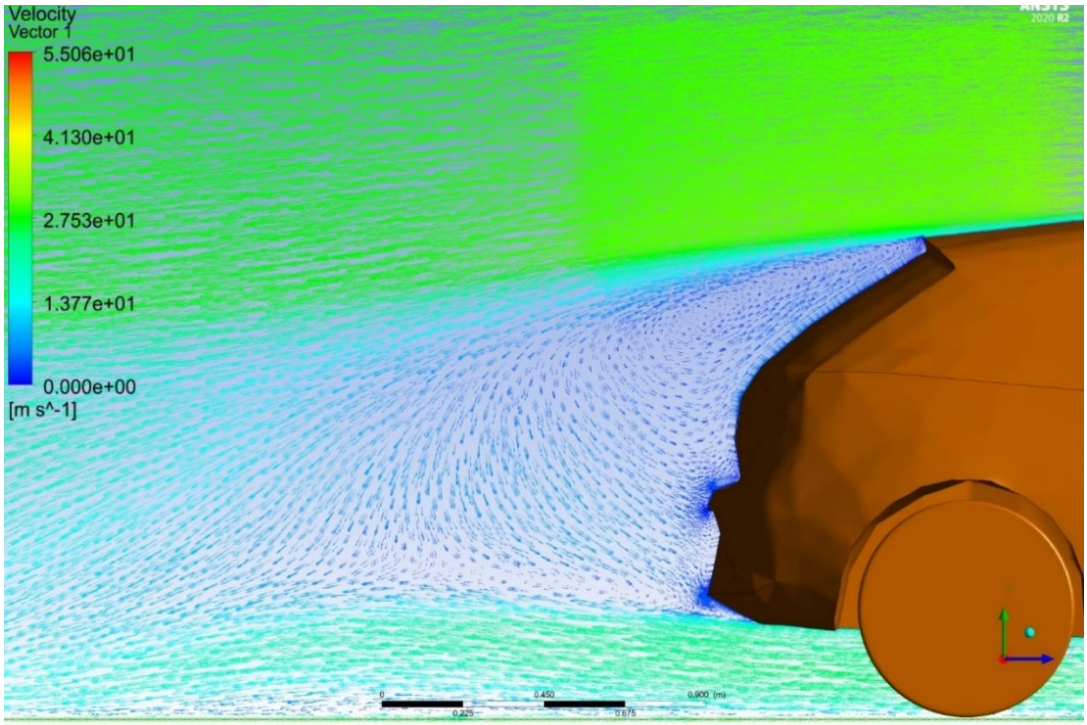


Şekil 4.95. (100 km/saat) 3.Numuneli araç gövdesi

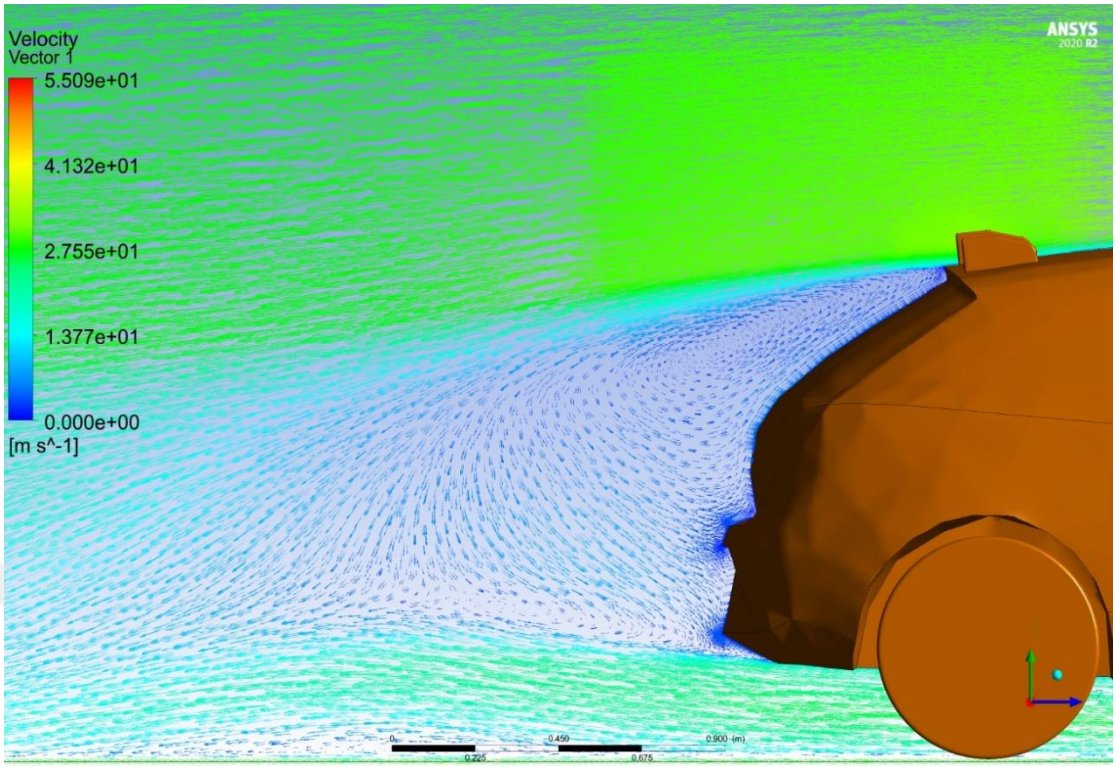


Şekil 4.96. (100 km/saat) 4.Numuneli araç gövdesi

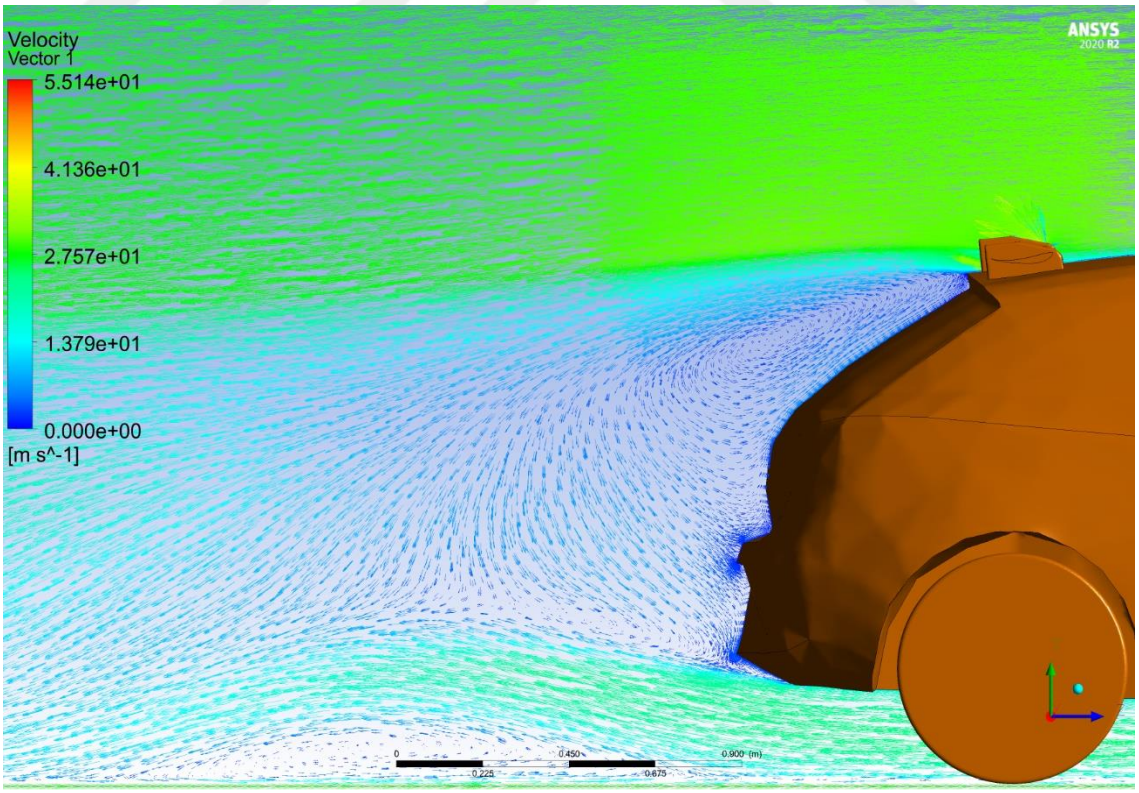
- 100 km/saat hızı için hız vektörleri



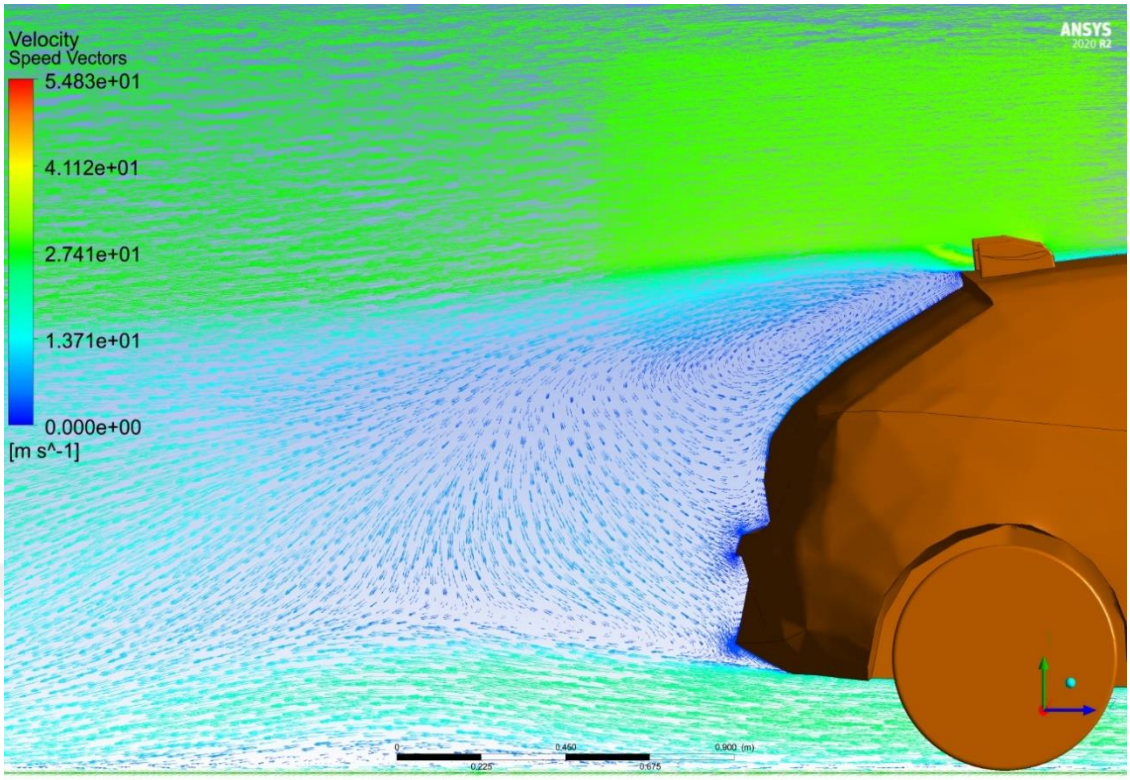
Şekil 4.97. (100 km/saat) Numunesiz araç gövdesi



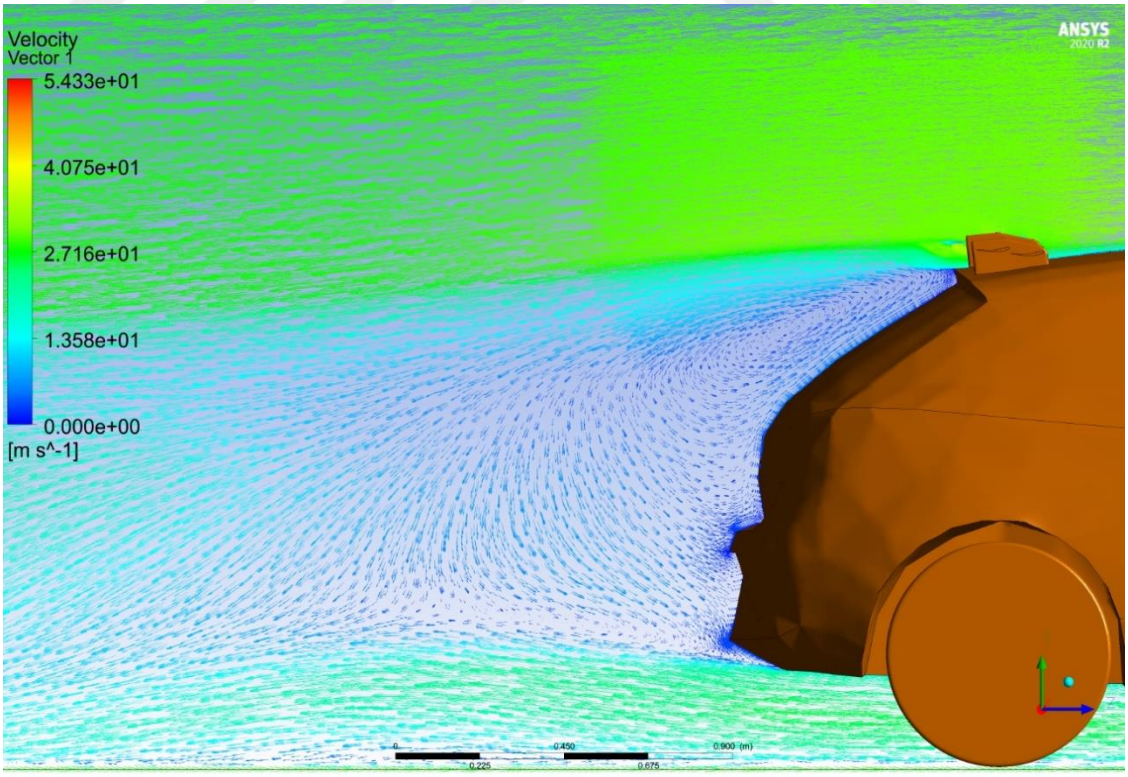
Şekil 4.98. (100 km/saat) 1.Numuneli araç gövdesi



Şekil 4.99. (100 km/saat) 2.Numuneli araç gövdesi

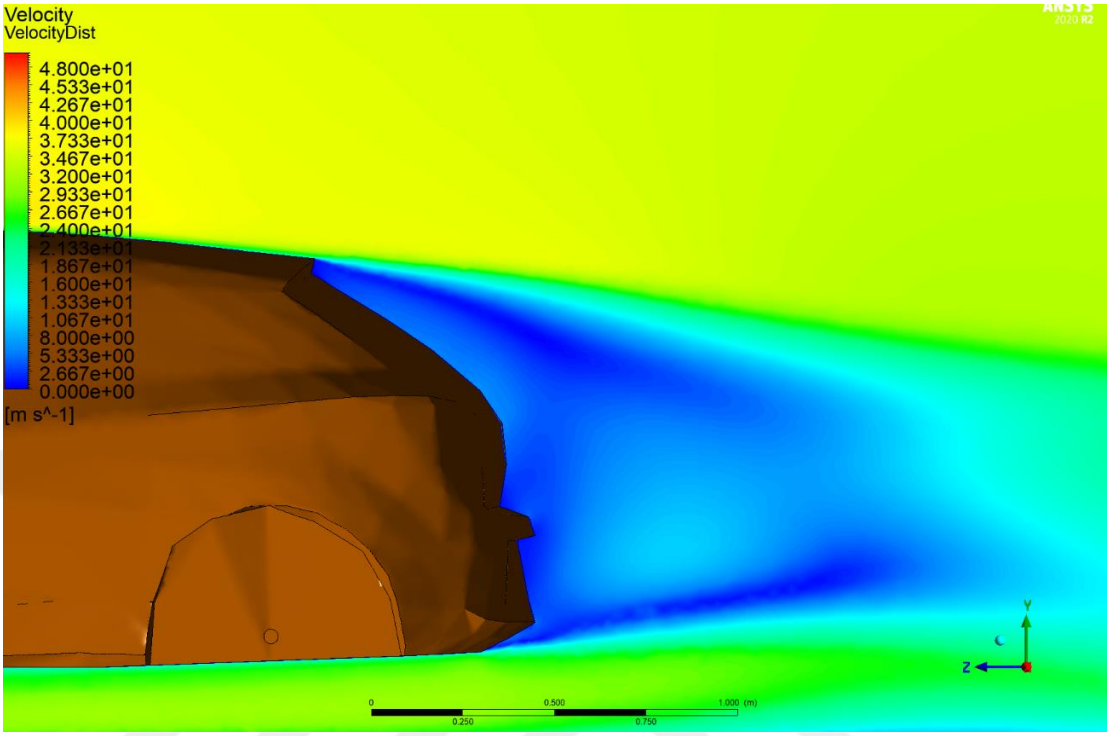


Şekil 4.100. (100 km/saat) 3.Numuneli araç gövdesi

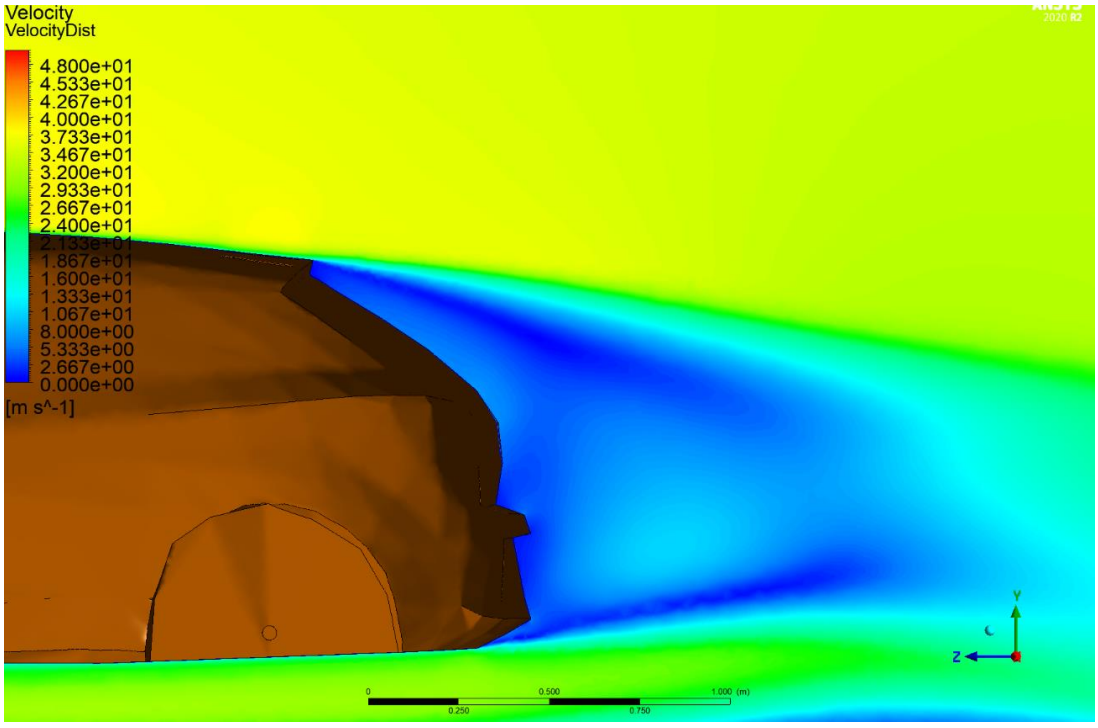


Şekil 4.101. (100 km/saat) 4.Numuneli araç gövdesi

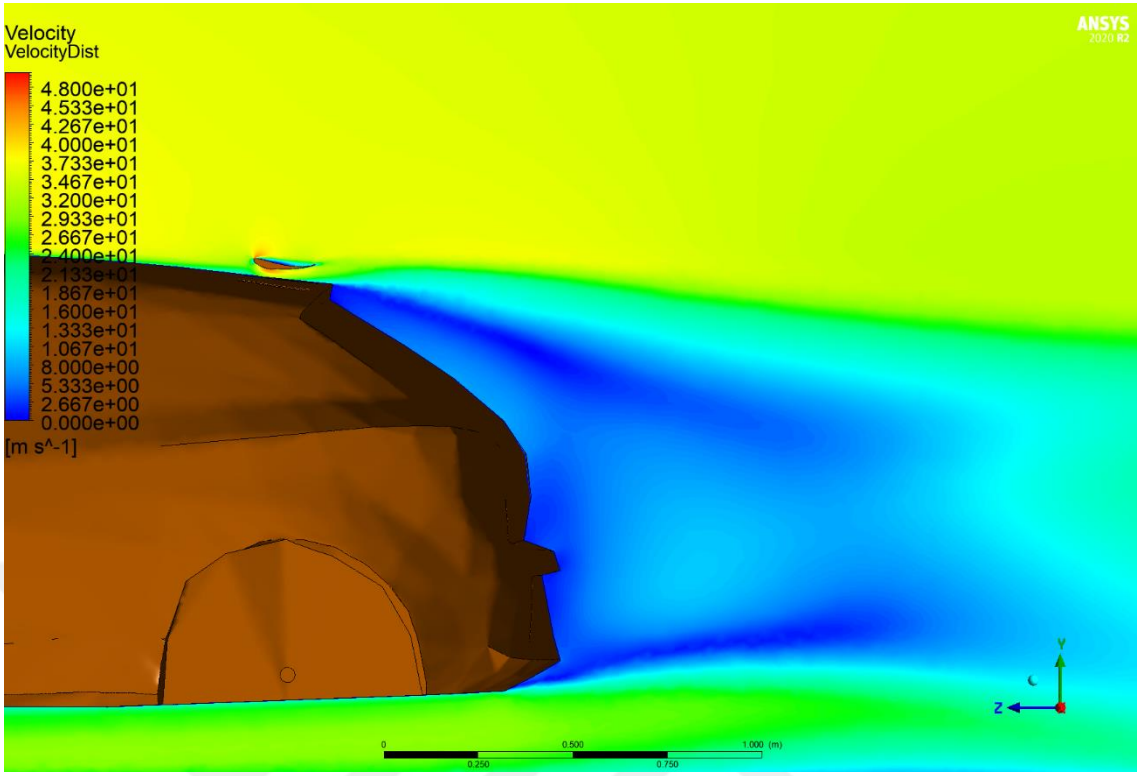
- 120 km/saat hızı için hız kontürleri



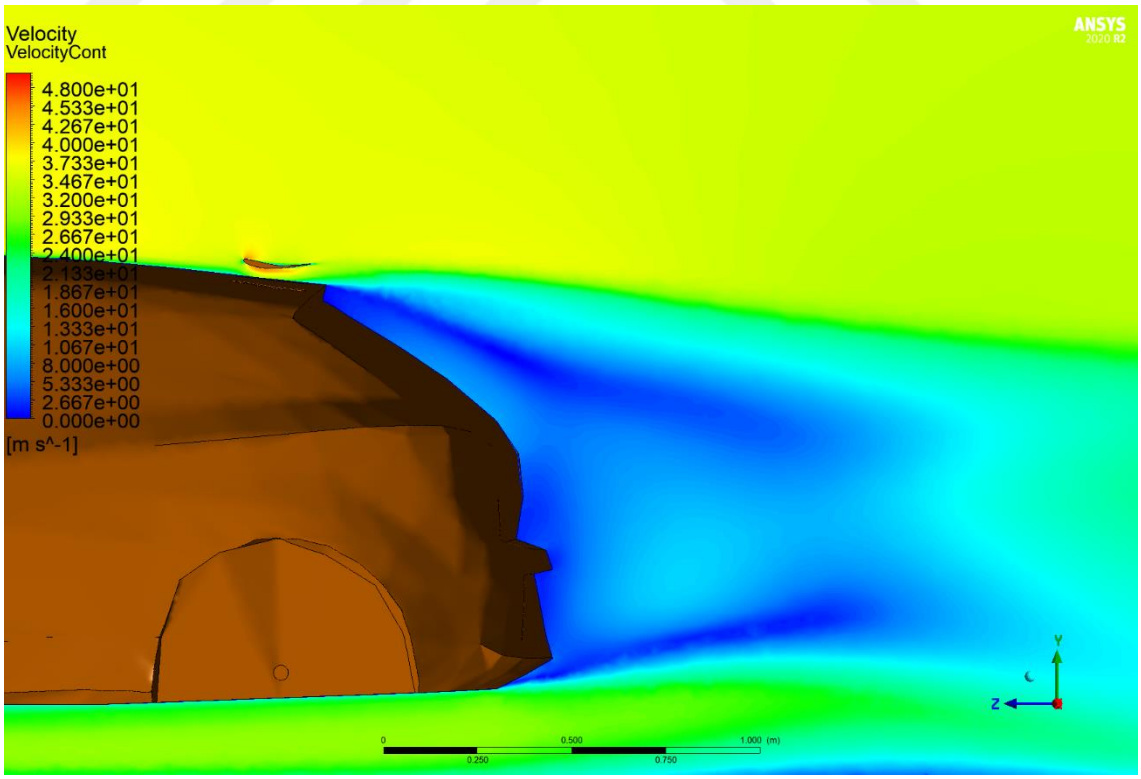
Şekil 4.102. (120 km/saat) Numunesiz araç gövdesi



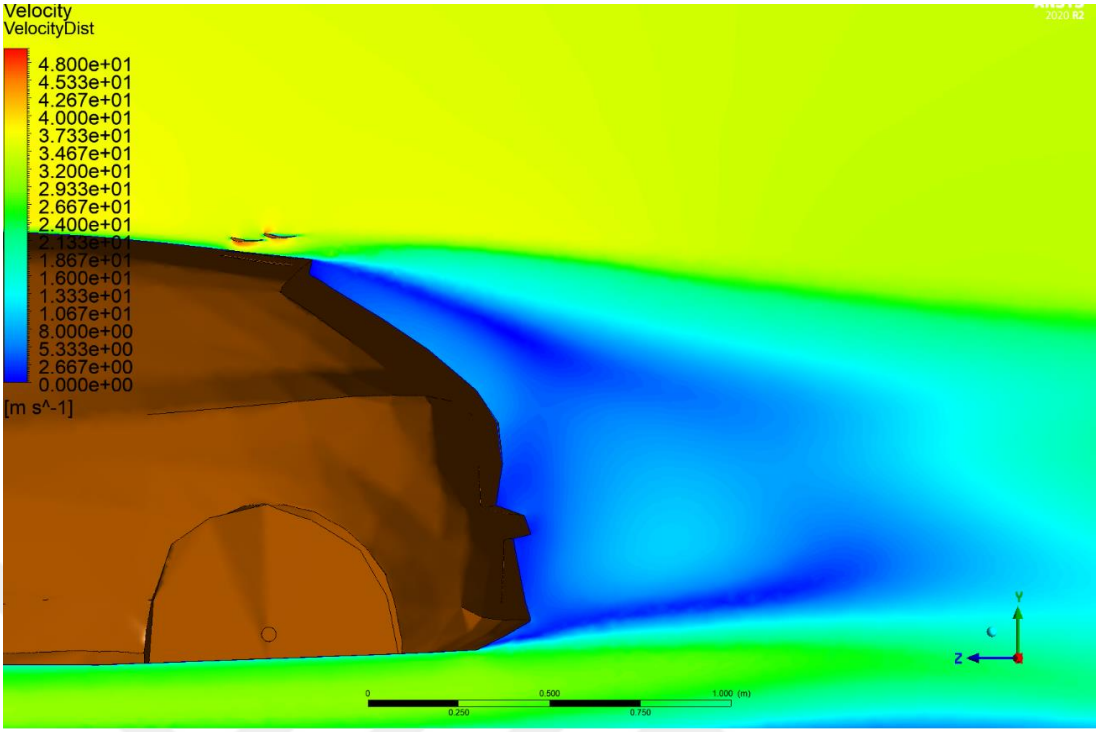
Şekil 4.103. (120 km/saat) 1.Numuneli araç gövdesi



Şekil 4.104. (120 km/saat) 2.Numuneli araç gövdesi

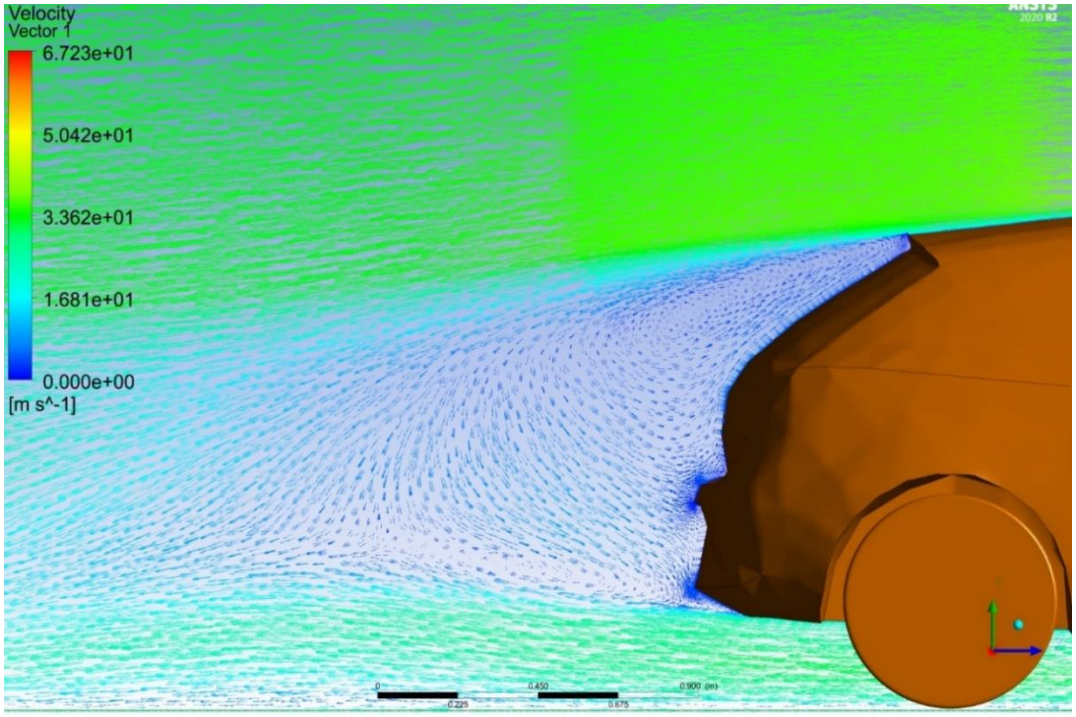


Şekil 4.105. (120 km/saat) 3.Numuneli araç gövdesi

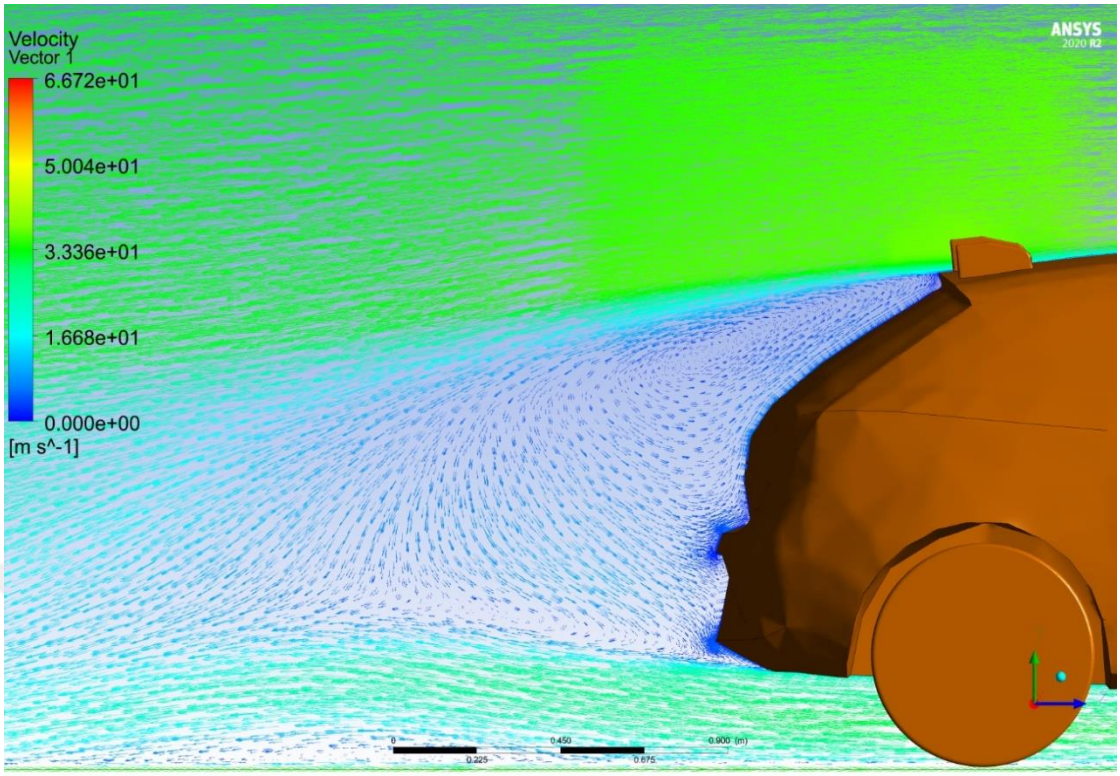


Şekil 4.106. (120 km/saat) 4.Numuneli araç gövdesi

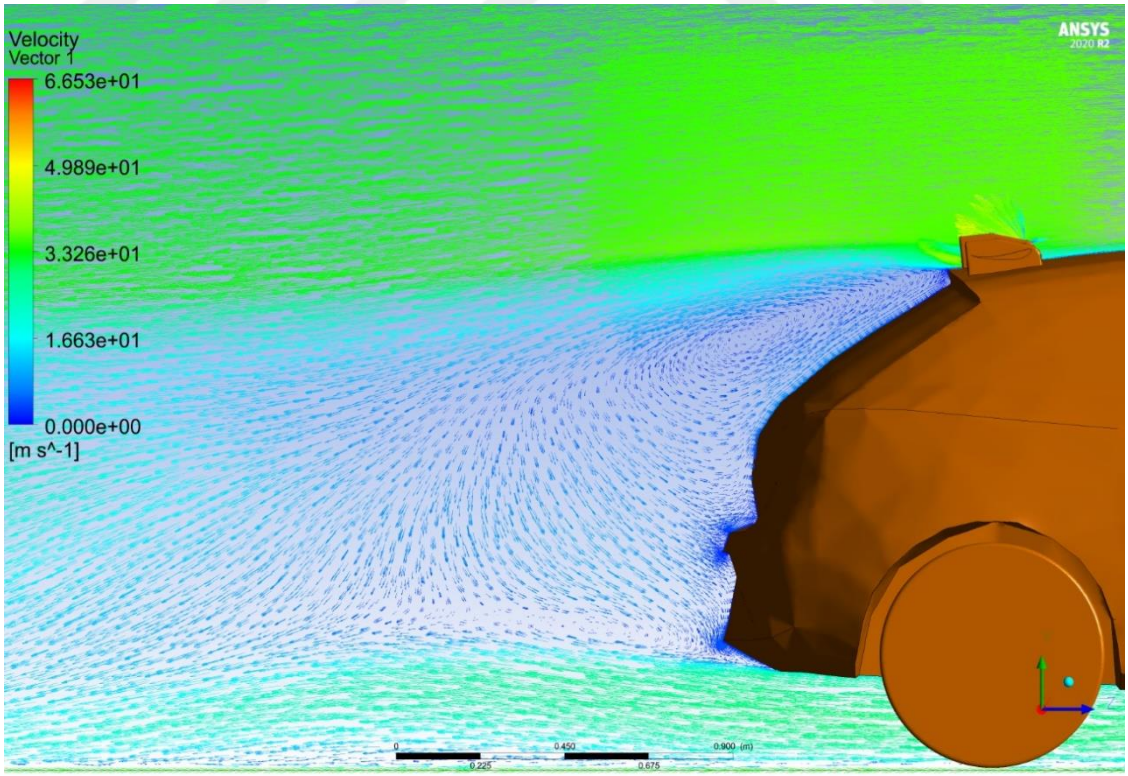
- 120 km/saat hızı için hız vektörleri



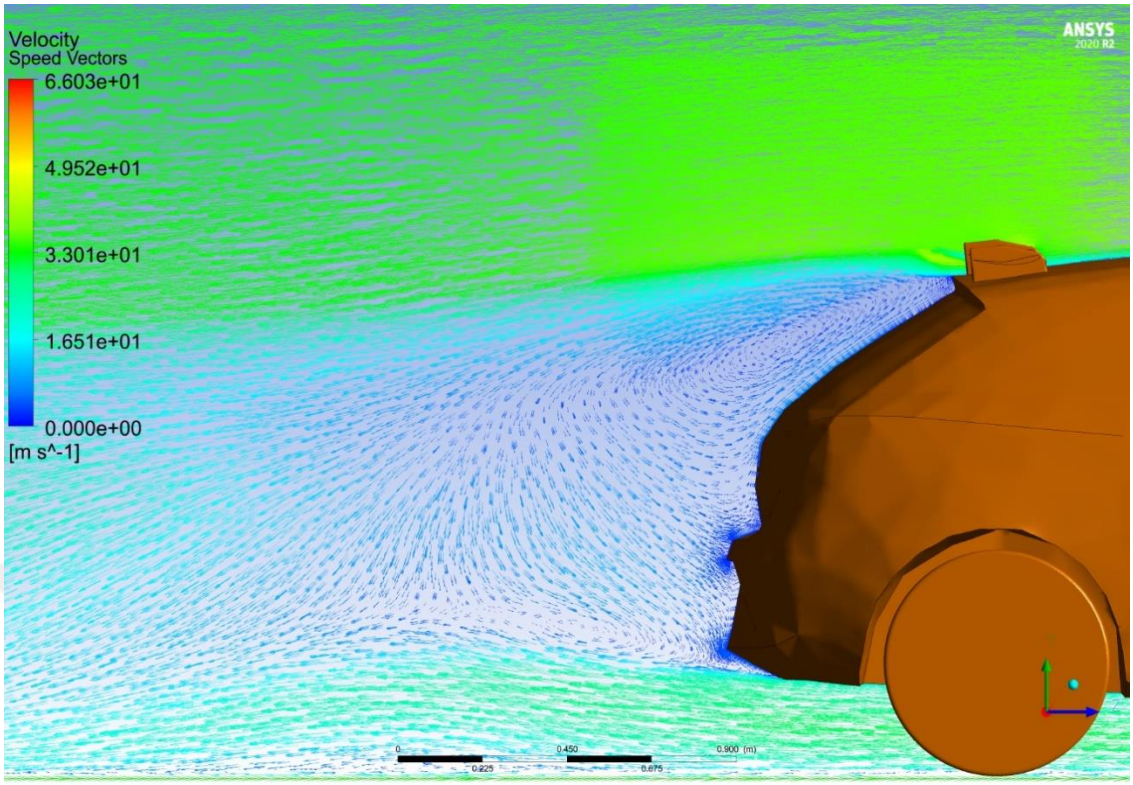
Şekil 4.107. (120 km/saat) Numunesiz araç gövdesi



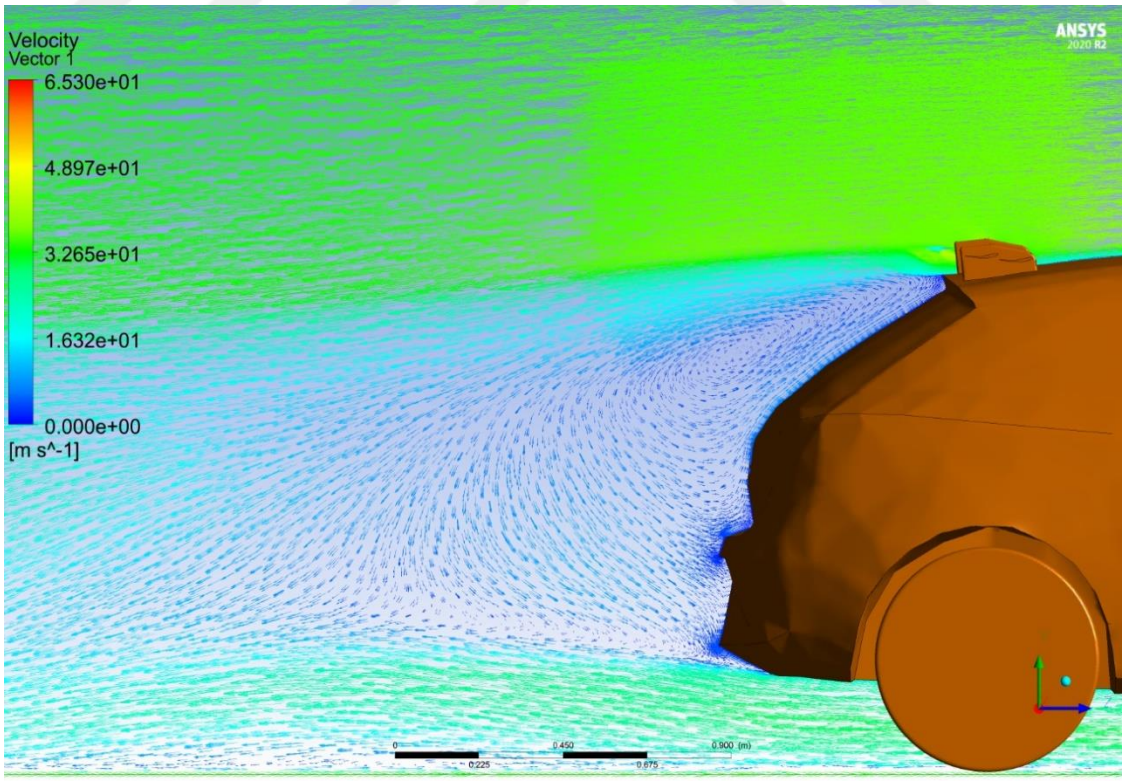
Şekil 4.108. (120 km/saat) 1.Numuneli araç gövdesi



Şekil 4.109. (120 km/saat) 2.Numuneli araç gövdesi



Şekil 4.110. (120 km/saat) 3.Numuneli araç gövdesi



Şekil 4.111. (120 km/saat) 4.Numuneli araç gövdesi

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında otomotiv sektöründe arka kanat olarak belirtilen Spoiler (Rüzgarlık) ekipmanın araç üzerindeki etkisi ve bu rüzgarlıkların kanat profilinin tasarımsal değişkenlerin araç üzerindeki etkisi nümerik olarak incelenmiştir. Tasarım programı olarak Unigraphics NX programı kullanılmıştır. Hazır olarak alınan araç verisi üzerine, incelenen ve referans alınan NACA kanat profillerinin yanına ek olarak tasarımsal ve teorik bilgilerin eşliğinde yeni kanat profili uygulanmıştır. Buradaki koordinatlar belli olduktan sonra katı modelleme yapılmış ve rüzgarlık (kanatçık) numuneleri oluşturulmuştur.

Nümerik analiz kısmını gerçekleştirmek için ANSYS programı kullanılmıştır. Unigraphics NX'te çizilen ilk kanat profilleri, STL formatında hazır olarak alınan araç verisi üzerinde ANSYS programının sağladığı SPACECLAIM programı üzerinde optimize edilmiş ve STL formatında gelen düzensiz kısımları da bu program aracılığı ile düzeltilmiştir. Düzenlenen katı model bir akış modelinin içine yerleştirilmiştir. Araç akış modeli belirlenirken akış ayrılmasından dolayı oluşabilecek geri akışların analizi etkilememesi için, akış hacmi uzunluğu araç boyunun 14 katı (3 kat ilk hacim uzunluğundan araç ön uç yüzeyine, 1 kat araç gövdesi uzunluğu, 10 kat araç uç arka yüzeyinden akış hacminin son uzunluğuna), yüksekliği araç yüksekliğinin 4 katı (1 kat araç gövde yüksekliği, 3 kat aracın uç yüksekliğinden akış hacminin son yüksekliğine kadar), genişlik olarak da araç genişliğinin 3.5 katı (0.5 kat araç gövdesinin yarısı, 3 kat aracın uç genişliğinden akış hacminin son genişliğine kadar) olarak belirlenmiştir. Çözümün süresinin de optimizasyonunu sağlamak için çözüm öncesi oluşturulacak olan ağ örgüsü sayısını azaltmak amacıyla modeli simetrik model olarak belirlemiş ve muhtemel olarak oluşturulacak ağ örgüsü sayısında yarı yarıya azalma gerçekleştirilmiştir. Ağ örgüsü kısmında ise aerodinamik kısımda analiz sonucunu etkileyebilecek gerekli yerlerde iyileştirilmeler yapılmış ve özellikle sınır tabakadaki analiz sonuçlarının doğruluğunu sağlamak amacıyla, teorideki formüller kullanılmış ve detaylı bir ağ örgüsü yapısı düzenlenmiştir. Çözüm metodunda ise analiz programının önerdiği aynı zamanda diğer makale veya tez örneklerinin kullanmış olduğu $k-\omega$ SST modeli kullanılmış ve asıl analiz öncesi çözüm değerleri gerçek test verileri ile valide

edilmiştir. Kanat tarafında 55, araç tarafında ise 15 adet olmak üzere toplamda 70 adet nümerik analiz yapılmıştır.

Öncelikli olarak rüzgarlıklar üzerinde belirlenecek olan tasarım teorik bilgiler ve hazır kullanılan NACA kanat profilleri üzerinde incelenmiştir. Asıl amaç fazla miktarda yere basma kuvveti katsayısı elde etmek ve aynı zamanda da bu katsayısı minimum sürüklenme kuvveti katsayısında sağlamaktır. Bu yüzden yere basma katsayısının (C_L), sürüklenme katsayısına (C_D) olan oranının maksimum seviyede olacak şekilde kanat tasarımı yapılmıştır. Yapılan özel tasarımda dikkat edilen noktalar özellikle yüksek kamberde ve minimum dik düzlemsel alanına sahip olmasıdır. Analizler sonrası tasarımın C_L/C_D oranı, 2.numunedeki hazır olarak alınan S1223 NACA kanat profilinden %19.47 oranında daha fazla çıkmıştır ve beklenilen amaca ulaşılmıştır. Ayrıca kanat profillerindeki toplam uzunluğu sabit tutarak kanat sayısını artırma ve bu kanatların araç yüzeyinden yüksekliğinin C_L/C_D oranına etkisi incelenmiştir. Kanatlar artık yüzeye yakın olduğu için ilk başta bulanan oranlarda dramatik bir düşüş olmuştur. Toplam uzunluğu sabit tutularak yapılan kanat artışı sayısında ise beklenen iyileşme gözlemlenememiştir.3.numune ile 4.numune aynı kanat yapısına sahip olmasına ve hemen hemen yakın yere basma kuvveti katsayısına sahip olmasına rağmen, sürüklenme kuvveti katsayısının fazlalığından dolayı C_L/C_D %42.24 oranında daha düşük seviyede gözlemlenmiştir. Bu çalışmadaki amaç yol tutuşunu arttırmak için yere basma kuvveti katsayısını yüksek seviyede tutmak yerine, aynı zamanda bu yol tutuşunu arttırırken sürtünmenin etkisi ile minimum yakıt tüketimini sağlamaktır.

Kanat numuneleri belirlendikten sonra araçtaki etkisini gözlemlemek amacıyla düşük (80 km/saat), orta (100 km/saat), yüksek (120 km/saat) hızlarda ve 5 farklı araç tipinde analizler yapılmıştır. Burada yine aynı katsayılar incelenmiş olup aynı zamanda oluşan akış ayrılması, art izi bölgeleri de gözlemlenmiştir. Araç bölgesine toplamda 4, ama analizler simetrik modelde değerlendirildiği için her analiz başına 2 şer numune yerleştirilmiştir. Numuneler arasındaki mesafe, her numunenin ortasında bulunan düzlemsel gövdeden referans alınmış ve bu aralık 350 mm olarak belirlenmiştir. Kanatlar her hızda C_L oranında araca fayda sağlamıştır ve özellikle beklenildiği gibi en yüksek C_L değerine sahip olan numune 2'de en fazla iyileşme gözlemlenmiştir. Yine beklenildiği

gibi kanatçığa sahip olmayan numune 1 özellikle yüksek hızlarda gerekli katkıyı sağlayamamıştır.

Sürüklenme katsayısı tarafına bakıldığında ise numuneler, düşük hızda aracı negatif yönde etkilerken (Numune sırasıyla yüzdeler %36.94, %41.97, %47.07, %45.13'tür), yüksek hızlarda pozitif yönde katkıda bulunmuştur (Numune sırasıyla yüzdeler %-30.10, %-28.03, %-28.46, %-28.79'dur). Yine beklenildiği üzere akış yönüne dik yüzey alanı daha düşük olan numune 1 diğer numunelere göre sürüklenme katsayısı katkısı açısından diğer numunelere üstünlük sağlamıştır. Üstelik incelenen hız vektörlerinde aracın arka kısımlarında akış yönünün ters yönünde doğru hareket etmiştir ve serbest akış hızının da altında kalmıştır. Burada gözlemlenen art izleri de sürüklenme kuvveti katsayısının efektifliği hakkında yorum yapmaya da sağlayabilir. Özellikle düşük veya yüksek hızlarda alınan numuneli ve numunesiz hız kontürlerinde art izi bölge büyüklükleri arasındaki farklar gözlemlenmiştir.

Yapılan nümerik analizler de her zaman gerçek zamanlı test metotları ile desteklenmelidir. Bu testlerin yapılmasında rüzgâr türbinleri bir örnektir. Test esnasında araç üzerine konulacak ve akış hız yönlerini gösterecek küçük ipçikler bu test esnasında araçtaki laminer akışı, türbülanslı akışı, akış ayrılmalarını gösterir. Yapılan gerçek zamanlı testler ile nümerik analiz verileri arasında uyum sağlanıp nümerik analizin validasyonu gerçekleştirdikten sonra araç üzerindeki geliştirmeler belli bir yere kadar sadece nümerik analize bağlı kalabilir, bu imkân da gerek zaman gerekse maliyet açısından şirketlere katkı sağlayabilir.

Yapılan çalışmanın 100 km/saat'ten daha düşük bir hızda beklenilen etkiyi veremezken, 100 km/saat ve daha yüksek hızlarda kullanılan kanatların aracın aerodinamik performansına olumlu yönde etki ettiği gözlemlenmiştir. Özellikle otobanlarda veya ortalama hızın daha yüksek olduğu yerlerde binek araçlarda bu tarz arka kanatların kullanımı aracın performansına pozitif bir şekilde etki edecektir.

Gelecekteki çalışmalarda farklı boyutlarda veya farklı çeşitlerde kanat profilleri hazırlanarak gerek otomotiv gerekse profesyonel otomotiv yarışlarında sürüklenme

kuvveti katsayısını negatif yönde ve yere basma kuvveti katsayısını da pozitif yönde etkileyen çalışmalar yapılabilir. Her kanat profilinin her hızda farklı tepkiler gösterdiği için kullanılacak aracın yapısına ve kullanılan ortam şartlarına uygun bir şekilde kanat tasarımları gerçekleştirilmelidir. Üstelik bu kanat tasarımları tez çalışmasında dikkate alındığı gibi sadece rüzgarlıklar ile olmak zorunda değildir. Günümüzde gerek efektiflik gerekse estetik açıdan farklı farklı girdap üreticileri mevcuttur. Bunlar araç altına monte edilen difüzörler, köpek balığı modeli denen kanatçıklar veya kanat yüzeyi araca yapışık bir biçimde olan rüzgarlıklar olabilir. Bu geliştirmeler ile araçlarda düşük yakıt tüketimi ve daha iyi bir sürüş imkânı sağlanabilir.

KAYNAKLAR

Abid, M., Wajid, H. A., Iqbal, M. Z., Najam, S., Arshad, A., & Ahmad, A. (2017). Design and analysis of an aerodynamic downforce package for a formula student race car. *IIUM Engineering Journal, 18*(2), 212–224. https://doi.org/10.31436/iiumej.v18i2.679

Ahmad, N. E., Abo-Serie, E., & Gaylard, A. (2021). Mesh Optimization for Ground Vehicle Aerodynamics. *CFD Letters, 2*(1), 54–65. https://www.akademiabaru.com/submit/index.php/cfdl/article/view/3317 adresinden alındı

Aksel, M. H. (1996). *Notes on Fluid Mechanics*. ODTÜ.

Aşkan, A., & Tangöz, S. (2018). The impact of aspect ratio on aerodynamic performance and flow separation behavior of a model wing composed from different profiles. *Journal of Energy Systems.*

Aytaç, Z., & Aktaş, F. (2020). Utilization of CFD for the Aerodynamic Analysis of a Subsonic Rocket. *Politeknik Dergisi, 23(3),* 879-887. https://doi.org/10.2339/politeknik.711003

Benson, T. (n.d.). *Wing Geometry Definitions*. Glenn Research Center: https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/geom.html adresinden alındı

Biber, K., Ol, M., & Tilmann, C. (2004). Some examples of airfoil design for future unmanned air vehicle concepts. https://doi.org/10.2514/6.2004-1050

Boldmethod. (2022, Ocak 12). *How does aspect ratio affect your wing?* Retrieved from https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/aircraft-systems/how-does-aspect-ratio-affect-aircraft-wings/

Boundary Layer. (2023, Mayıs 13). (NASA Glenn Research Center) https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/BGP/boundlay.html adresinden alındı

Boundary Layer Theory - Definition and Applications. (2023, Temmuz 26). https://testbook.com/civil-engineering/boundary-layer-theory adresinden alındı

Britannica, T. E. (Dü.). (2023, Kasım 28). drag. https://www.britannica.com/science/drag adresinden alındı

Çakir, M. (2012). CFD study on aerodynamic effects of a rear wing/spoiler on a passenger vehicle.

Demircioğlu, T.K. (2007). Bir araç modelinin aerodinamik analizi ve sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonu.

Devang S. Nath, Prashant Chandra Pujari, Amit Jain and Vikas Rastogi. (2021). Drag reduction by application of aerodynamic devices in a race car. In *Advances in Aerodynamics*. doi:10.1186/s42774-020-00054-7

Drag Forces. (tarih yok). https://courses.lumenlearning.com/suny-physics/chapter/5-2-drag-forces/ adresinden alındı

Fabian, M., Huňady, R., Kupec, F., Mlaka, T. (2022). Effect of the aerodynamic elements of the hatchback tailgate on the aerodynamic drag of the vehicle. *Advances in Science and Technology Research Journal, 16*(6), 73-87. https://doi.org/10.12913/22998624/155308

Feature: Downforce in Formula One, Explained. (tarih yok). (AMG Petronas Formula One Team) https://www.mercedesamgf1.com/news/feature-downforce-in-formula-one-explained adresinden alındı

Gonzales, J. (2023, Nisan 10). *How to use Inflation Layers for Boundary Layer Mesh.* Retrieved from https://www.jeffgonzales.co.uk/how-to-setup-boundary-layer-mesh/

Handoyono, N.A., & Wardhana, A.G. (2019). Comparison of hint wind tines of airfoil type NACA 4412, NACA 23012, and NACA 16-212 using qblade software. *Journal of Mechanical Engineering Education.*

Inlet Values for the Turbulence Length Scale and Turbulent Intensity. (2019, Haziran 1). https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.cfd/cfd_ug_fluidflow_single.06.095.html adresinden alındı

Investigating the aerodynamic design of a rear wing aerofoil. (2023, Eylül 1). https://exetermathematicsschool.ac.uk/wp-content/uploads/Rear_Wings.pdf adresinden alındı

Jean-Franc¸ois Beaudoin, Jean-Luc Aider. (2008). Drag and lift reduction of a 3D bluff body using flaps. *Exp Fluids*, 491–501. doi:10.1007/s00348-007-0392-1

Jiayan Zhang, Runhua Cai, Lidan Shi,. (2022). Hybrid RANS/LES/DNS of turbulence flow along a flat plate. *Journal of Physics: Conference*. doi:10.1088/1742-6596/2248/1/012015

John Bell Rae, A. K. (2023, Ekim 9). *Automotive Industry*. https://www.britannica.com/technology/automotive-industry adresinden alındı

Kachare, S.C. (2017). A CFD Study of a Multi-Element Front Wing for a Formula One Racing Car.

Kasap, H. (2022). Binek araç üzerindeki aerodinamik analizlerin sayısal olarak incelenmesi. Yayınlanmamış yüksek lisans tezi. Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Khan , M. S. A. ., Rayhan , M. S. ., & Muhib , M. I. . (2022). Simulating the drag reduction model for a vehicle by using vortex generator. *American International Journal of Sciences and Engineering Research*, *5*(1), 31–45. https://doi.org/10.46545/aijser.v5i1.292

Mathieu Roumeas, Patrick Gilliéron, Azeddine Kourta. (2009). Drag reduction by flow separation control on a car after body. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, *6*0(11), 1222 - 1240. doi:10.1002/fld.1930

Mohan Jagadeesh Kumar M, Anoop Dubey, Shashank Chheniya, Amar Jadhav. (2023). Effect of vortex generators on aerodynamics of a car: CFD Analysis. *International Journal of Innovations in Engineering and Technology*, 137-144.

Nath, D.S., Pujari, P.C., Jain, A., & Rastogi, V. (2020). Drag reduction by application of aerodynamic devices in a race car. *Advances in Aerodynamics*, 3, 1-20.

Newton's Laws of Motion and Aviation. (2023, Mart 10). https://www.aviationfile.com/newtons-laws-of-motion-and-aviation/#google_vignette adresinden alındı

Öztemel, M. A., Aktaş, F., & Yücel, N. (2023). Aerodynamic analysis of car rear spoiler with computational fluid dynamics for different angles and profiles. *International Journal of Energy Studies*, *8*(4), 649-665. https://doi.org/10.58559/ijes.1362690

Ramya, P., Kumar, A.H., Moturi, J., & Ramanaiah, N. (2015). Analysis of Flow over Passenger Cars using Computational Fluid Dynamics. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 29, 170-176.

Reynolds Number. (2022, Ekim 16). (NASA) https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/reynolds.html adresinden alındı

Selvakumar, K., & M, P.K. (2013). Experimental Investigations on Optimisation of Aerodynmaic Charactericstics in a Hatchback Model Car 3 Using Vortex Generators. https://doi.org/10.3850/978-981-07-8012-8_134

Shear-Stress Transport (SST) k-w Model. (2009, Ocak 23). https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node67.htm adresinden alındı

Shivaji S. Shinde, M.D. Shende. (2017). Enhancement of aerodynamic drag reduction. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 437-448.

Smith, J. T. (2021). Formula One Car Downforce Analysis. *AIAA Southeastern Regional Student Conference.* Starkville: Mississippi State University.

Şumnu, A. (2021). Shape modification of Ahmed body to reduce drag coefficient and determination of turbulence model. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10*(2), 824-832. https://doi.org/10.28948/ngumuh.879584

Roberts, L.S., Correia, J., Finnis, M.V., & Knowles, K. (2015). Aerodynamic characteristics of a wing-and-flap configuration in ground effect and yaw. *Journal of Automobile Engineering, 230*(6) https://doi.org/10.1177/0954407015596274

Taşıtlarda Aerodinamik. (2023, Ekim 11). https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/ozcanh/71141/B%C3%B6l%C3%BCm%208.%20Ta%C5%9F%C4%B1t%20Aerodinami%C4%9Fi.pdf adresinden alındı

The First Automobile. (2023, Eylül 23). https://group.mercedes-benz.com/company/tradition/company-history/1885-1886.html adresinden alındı

The Impact of the Chord Length of an Airfoil. (2020, Ekim 1). Retrieved from https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2022-the-impact-of-the-chord-length-of-an-airfoil

Triya Nanalal Vadgama, Mr. Arpit Patel, Dr. Dipali Thakkar, Mr. Jignesh Vala. (2015). Structural analysis of formula one racing car. *International Journal of Advance Research in Engineering, Science & Technology, 2*(5), 2394-2444.

Turbulence intensity. (2022, Temmuz 23). https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity adresinden alındı

Vadgama, T.N., Patel, A.N., Thakkar, D., & Vallabhbhai, S. (2015). Structural Analysis of Formula One Racing Car.

V. Madhanraj, P. Saravanan, L. Shankaralingam, G. Balaji, Anand Sai Babu, Rayala Sateesh, S. Seralathan. (2023). Study on aerodynamics characteristics of the effect of leading-edge radius of FDM printed (ABSi material) supersonic aerofoil. *Materials Today: Proceedings.*

Vocabulary.com. (n.d.). Aerodynamics. *In Vocabulary.com Dictionary*. (2024, Haziran 4). https://www.vocabulary.com/dictionary/aerodynamics adresinden alındı

Wang, S., Qiao, Y., & Zhang, Z. (2022). Influence of camber on aerodynamic performance of airfoil based on CFD technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 2276.

Wang, Y. F., Tao, G. Q., Wang, Z. H., & Wu, Z. (2013). Numerical Simulation of a Low Reynolds Number Airfoil. In Applied Mechanics and Materials, 390, 141–146.

Trans Tech Publications, Ltd. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.390.141

W.A. Timmer, C. B. (2023). *Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials*. Woodhead Publishing Series in Energy.

What is Aerodynamics? (2023, Ağustos 11). https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-aerodynamics/ adresinden alındı

What is Numerical Analysis. (2023, Ekim 11). https://www.mathworks.com/discovery/numerical-analysis.html adresinden alındı

Law of the wall. (2021, Haziran 29). https://en.wikipedia.org/wiki/Law_of_the_wall adresinden alındı

LibreTexts (Dü.). (tarih yok). *General Chemistry A Molecular Approach.* https://commons.libretexts.org/book/chem-37651 adresinden alındı

Yining, Y. (2020). Analysis of the influence of camber on hydrodynamic characteristics of airfoil based on FLUENT. *Journal of Physics: Conference Series.* doi:10.1088/1742-6596/1519/1/012020

Yunus A. Çengel, , John M. Cimbala. (2018). *Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları*. Palme Yayınevi.

Yükselen, M. (2006). *Aerodinamiğin İlgi Alanları*. https://web.itu.edu.tr/yukselen/Uck351/01-%20Giri%FE.pdf adresinden alındı

Zhang, Y., Zhou, Z., Wang, K., & Li, X. (2020). Aerodynamic Characteristics of Different Airfoils under Varied Turbulence Intensities at Low Reynolds Numbers. *Applied Sciences.*