

**BİNEK ARAÇ ÜZERİNDEKİ AERODİNAMİK  
ANALİZLERİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**Halit KASAP**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİNEK ARAÇ ÜZERİNDEKİ AERODİNAMİK ANALİZLERİN SAYISAL  
OLARAK İNCELENMESİ**

Halit KASAP  
501810078

Doç. Dr. Onur YEMENİCİ  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAYI

Halit KASAP tarafından hazırlanan “Bir Binek Araç Aerodinamiğinin Sayısal Analizi ve İncelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. Onur YEMENİCİ

- |                 |  |      |
|-----------------|--|------|
| <b>Başkan</b> : | Prof. Dr. Habib UMUR<br>0000-0002-8732-5283<br>Uludağ Üniversitesi,<br>Mühendislik Fakültesi,<br>Makine Mühendisliği Anabilim Dalı                   | İmza |
| <b>Üye</b> :    | Doç. Dr. Onur YEMENİCİ<br>0000-0003-0011-8343<br>Uludağ Üniversitesi,<br>Mühendislik Fakültesi,<br>Makine Mühendisliği Anabilim Dalı                 | İmza |
| <b>Üye</b> :    | Dr. Öğr. Üyesi Zeynel Abidin FIRATOĞLU<br>0000-0002-2791-6663<br>Harran Üniversitesi,<br>Mühendislik Fakültesi,<br>Makine Mühendisliği Anabilim Dalı | İmza |

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN**  
**Enstitü Müdürü**  
.././.....

**B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

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

**beyan ederim.**

**6/01/2022**

**Halit KASAP**

**EK 8**  
**TEZ YAYINLANMA**  
**FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI**

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Onur YEMENİCİ  
Tarih

6.01.2022

Halit KASAP  
Tarih

6.01.2022

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum  
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum  
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### BİNEK ARAÇ ÜZERİNDEKİ AERODİNAMİK ANALİZLERİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

**Halit KASAP**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Doç. Dr. Onur YEMENİCİ

Sanayileşmenin ve fosil yakıt kullanımının 20. yüzyıldan sonra çok hızlı bir şekilde artması ile iklim krizi çok ciddi boyutlara ulaşmıştır. İklim değişikliği tam olarak engellenemese bile fosil yakıtların kullanımını azaltmak, yenilenebilir ve daha çevreci enerji kaynaklarının kullanımı yaygınlaştırmak iklim krizinin ilerlemesini yavaşlatabilir.

Otomobillerin, enerji kaynakları ağırlıklı olarak fosil yakıtlar ve elektriktir. Araçların yakıt tüketim değerleri yakıtların yanması sonucu çevreye yayılan zararlı gazlar, ekonomiklik, elektrikli araçların menzilleri, müşteri beklentileri vb. gibi birçok nedenden dolayı oldukça önemlidir. Araçların yakıt tüketimi araç aerodinamiği ile direkt olarak bağlantılıdır.

Bu tez çalışmasında bir binek aracın aerodinamik analizi sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Aracın tasarımı üretici firma tarafından verilmiş ölçüler baz alınarak CATIA V5R21 bilgisayar destekli tasarım programı ile yapılmıştır. Aerodinamik analiz için gerekli olan geometrik düzenlemeler, ağ örme ve sayısal çözüm işlemleri için ANSYS programı kullanılmıştır. Akış alanının çözümü için düzeltilmiş (realizable) k-ε türbülans modeli tercih edilmiştir.

Aracın sürüklenme katsayısı %2,2'nin altındaki hata ile 0,313 olarak bulunmuştur. ANSYS FLUENT ve CFD POST kısmında aracın etrafında gerçekleşen hava akışı ile ilgili çeşitli düzlemlerdeki hız konturleri, basınç konturleri, akım çizgileri ve hız vektörleri incelenmiştir. Aracın yakıt tüketimi ile bağlantılı olan sürüklenme katsayısı değerlerini azaltmak için çeşitli girdap üreteçleri tasarlanmıştır. Girdap üreteçler, tavanın arka kısmındaki akışın ayrılma noktasının 15 mm önüne 100 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Sürüklenme katsayısındaki maksimum iyileştirme 4 numaralı girdap üreticinin kullanılması ile elde edilmiştir ve bu değer %2,87'dir. Kaldırma katsayısındaki maksimum iyileştirme oranı yaklaşık %3,3'tür ve bu değere 1 numaralı girdap üreteç kullanılarak ulaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Aerodinamik, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Aerodinamik Direnç ve Kaldırma Katsayısı, Girdap Üreteçleri

**2022, xvii + 124 sayfa.**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

### **NUMERICAL INVESTIGATION OF AERODYNAMIC ANALYSIS ON PASSENGER VEHICLE**

**Halit KASAP**

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

**Supervisor:** Assoc. Prof. Onur YEMENİCİ

With the rapid increase in industrialization and the consume of fossil fuels after the 20th century, the climate crisis has reached very serious dimensions. Even if climate change cannot be completely prevented, reducing the use of fossil fuels and expanding the consume of renewable and more environmentally friendly energy sources may slow the progress of the climate crisis.

The energy sources of automobiles are mainly fossil fuels and electricity. Fuel consumption values of vehicles, harmful gases emitted to the environment as a result of fuel combustion, economy, range of electric vehicles, customer expectations, etc. It is very important for many reasons. Fuel consumption of vehicles is directly related to vehicle aerodynamics.

In this thesis, the aerodynamic analysis of a passenger car was carried out numerically. The design of the vehicle was made with the CATIA V5R21 computer aided design program based on the dimensions given by the manufacturer. The ANSYS program was used for geometric arrangements, meshing and numerical solution processes required for aerodynamic analysis. Realizable k- $\epsilon$  turbulence model is preferred for the solution of the flow field.

The drag coefficient of the vehicle was found to be 0,313 with an error of less than 2,2%. In ANSYS FLUENT and CFD POST, velocity contours, pressure contours, streamlines and velocity vectors in various planes related to the air flow around the vehicle were examined. Various eddy generators have been designed to reduce the drag coefficient values associated with the fuel consumption of the vehicle. The vortex generators are located at 100 mm intervals 15 mm in front of the flow separation point at the rear of the ceiling. The maximum improvement in the drag coefficient was obtained by using the No. 4 vortex generator, which is 2,87%. The maximum improvement rate in the lift coefficient is approximately 3,6% and this value was reached using the No. 1 vortex generator.

**Key words:** Aerodynamic, Computational Fluid Dynamics, Coefficient of Drag and Lift, Vortex Generators

**2022, xvii + 124 pages.**

## **TEŞEKKÜR**

Yüksek lisans ders dönemi ve tez sürecinde vaktini, bilgilerini ve manevi desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Onur YEMENİCİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen, anlayışlı ve sabırlı tutumlarıyla her zaman yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Halit KASAP  
6/01/2022



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	vvi
ABSTRACT.....	vvii
ÖNSÖZ ve/veya TEŞEKKÜR.....	vviii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xxviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	7
2.1. Akışların Sınıflandırılması ve Özellikleri.....	7
2.1.1. Sıkıştırılabilir ve Sıkıştırılamaz Akışlar.....	7
2.1.2. Yoğunluk.....	8
2.1.3. Viskozite.....	8
2.1.4. Viskoz ve Viskoz Olmayan Akış Bölgeleri.....	10
2.1.5. Laminer ve Türbülanslı Akış.....	10
2.2. Euler ve Navier-Stokes Denklemleri.....	11
2.3. Sınır Tabaka.....	13
2.4. Akış Ayrılması.....	17
2.5. Araç Üzerindeki Akış Yapısı.....	19
2.6. Kaynak Özetleri.....	21
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	35
3.1. Sayısal Analiz.....	35
3.1.1. Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) Türbülans Modelleri.....	38
3.1.2. Ölçekli Çözüm Simülasyon Modelleri (Scale-Resolving Simulation).....	41
3.1.3. Duvar Yakını Yaklaşımı.....	44
3.1.4. Duvar Fonksiyonları.....	48
3.2. Reynolds Sayısı.....	48
3.3. Basınç Katsayısı.....	49
3.4. Aerodinamik Kuvvetler ve Momentler.....	49
3.4.1. Sürüklenme Kuvveti.....	51
3.4.2. Kaldırma Kuvveti.....	54
3.4.3. Yanal Kuvvet.....	55
3.5. Analiz Şartları.....	56
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	65
4.1. Sürüklenme ve Kaldırma Katsayıları.....	65
4.2. Basınç Katsayısı ve Konturleri.....	75
4.3. Hız Konturleri.....	93
4.4. Hız Vektörleri.....	103
4.5. Akım Çizgileri.....	109
5. SONUÇ.....	118
KAYNAKLAR.....	120
EKLER.....	123
ÖZGEÇMİŞ.....	124

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$\rho$	Yoğunluk ( $kg/m^3$ )
$m$	Kütle ( $kg$ )
$V$	Hacim ( $m^3$ )
$\tau$	Kayma gerilmesi ( $N/m^2$ )
$\mu$	Dinamik viskozite ( $Pa \cdot s$ )
$\nu$	Kinematik viskozite ( $m^2/s$ )
$P$	Basınç ( $Pa$ )
$Re_{x,kr}$	Kritik Reynolds sayısı
$\delta$	Sınır tabaka kalınlığı ( $m$ )
$\delta^*$	Yer değiştirme kalınlığı ( $m$ )
$\theta$	Momentum kalınlığı ( $m$ )
$U_\infty$	Serbest akış hızı ( $m/s$ )
$\tau_w$	Çeper kayma gerilmesi ( $N/m^2$ )
$u_*$	Sürtünme hızı
$y^+$	Boyutsuzlaştırılmış mesafe
$u^+$	Boyutsuz hız
$Re$	Reynolds sayısı
$Re_x$	Herhangi bir x konumundaki Reynolds sayısı
$C_d$	Sürüklenme katsayısı
$L_{vK}$	Von Karman uzunluk ölçeği
$\kappa$	Von Karman sabiti
$\Delta_{max}$	Ağ aralığı ( $m$ )
$L_t$	Türbülans uzunluk ölçeği
$k$	Türbülans kinetik uzunluğu
$\varepsilon$	Türbülans kinetik enerji yutulma miktarı
$D$	Karakteristik uzunluk ( $m$ )
$V_s$	Akışkanın hızı ( $m/s$ )
$C_p$	Basınç katsayısı
$p_\infty$	Referans basınç ( $Pa$ )
$p$	İncelenen noktadaki statik basınç ( $Pa$ )
$\rho_\infty$	Serbest akış koşullarındaki yoğunluk ( $kg/m^3$ )
$V$	Aracın rüzgara göre bağıl hızı ( $m/s$ )
$A$	Alan ( $m^2$ )
$C_{d,sürtünme}$	Sürtünme direnci katsayısı
$F_{D,sürtünme}$	Sürtünme kuvveti ( $N$ )
$C_{d,basınç}$	Basınç kuvveti katsayısı
$F_{D,basınç}$	Basınç kuvveti ( $N$ )
$F_L$	Kaldırma kuvveti ( $N$ )
$C_l$	Kaldırma katsayısı
$C_y$	Yalpalama katsayısı
$F_Y$	Yanal kuvveti ( $N$ )
$M_p$	Yunuslama momenti ( $N \cdot m$ )

$M_R$	Yuvarlanma momenti ( $N. m$ )
$M_Y$	Yalpalama momenti ( $N. m$ )
$A_t$	Hava akış doğrultusuna dik yöndeki tünelin kesit alanı ( $m^2$ )
$A_v$	Aracın projeksiyon alanı ( $m^2$ )
$B$	Blokaj oranı
$u, v, w$	x, y ve z doğrultularındaki hız değerleri ( $m/s$ )
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	x, y ve z doğrultularındaki ortalama hız değerleri ( $m/s$ )
$x, y, z$	Kartezyen koordinat takımı
$\bar{p}$	Ortalama basınç ( $Pa$ )

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
NEDC	New European Driving Cycle
NCBS	New Car Buyers Survey
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
LDA	Laser Doppler Anemometry
HWA	Hot Wire Anemometry
WMLES	Wall Modelled Large Eddy Simulation
LES	Large Eddy Simulation
WRLES	Wall Resolved Large Eddy Simulation
PIV	Particle Image Velocimetry
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
GEKO	Generalized k- $\omega$
SST	Shear Stress Transport
RSM	Reynolds Stress Models
SRS	Scale Resolving Simulation
DES	Detached Eddy Simulation
SAS	Scale Adaptive Simulation
ELES	Embed Large Eddy Simulation
CFD	Computational Fluid Dynamics
EWT	Enhanced Wall Treatment
URANS	Unsteady Reynolds Average Navier Stokes
DDES	Delayed Detached Eddy Simulation
GIS	Grid Induced Separation
IDDES	Improved Delayed Detached Eddy Simulation
SDES	Shielded Detached Eddy Simulation
SBES	Stress Blended Eddy Simulation

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Viskozite nedeniyle iki akış tabakası arasındaki hız farkı .....	9
Şekil 2.2. Boru içerisindeki laminer akışta oluşan hız profili .....	9
Şekil 2.3. Bir uçak kanadı üzerindeki viskoz akış ve viskoz olmayan akış .....	10
Şekil 2.4. Bir boru içerisindeki laminer ve türbülanslı akış .....	11
Şekil 2.5. Navier-Stokes denklemi ve terimlerinin açıklaması .....	12
Şekil 2.6. Laminer ve türbülanslı sınır tabaka .....	13
Şekil 2.7. Düz bir levha üzerindeki akışta sınır tabakanın gelişimi .....	14
Şekil 2.8. Momentum ve yer değiştirme kalınlıkları .....	15
Şekil 2.9. $Re_x = 1 \times 10^7$ değerinde düz bir plaka üzerindeki türbülanslı sınır tabakanın çeper değişkenleri yasası ile ifadesi .....	17
Şekil 2.10. Bir yüzey üzerindeki akış ayrılması .....	18
Şekil 2.11. Bir uçak kanadı üzerindeki ayrılmış akışın gösterimi .....	18
Şekil 2.12. Bir hatchback araç üzerindeki akış ayrılma ve birleşme noktaları .....	19
Şekil 2.13. (a) $Re = 15000$ 'de pürüzsüz küre üzerindeki akışta oluşan art izi bölgesi ve (b) $Re = 30000$ 'de engel teli takılmış kürenin art izi .....	20
Şekil 2.14. Arka kısmı eğimli Ahmed modeli .....	22
Şekil 2.15. Modelin tavanı üzerindeki gözenekli tabakanın pozisyonu .....	23
Şekil 2.16. Ahmed modelinin üç boyutlu görünümü, düzlemsel (a), dairesel (b) ve eliptik (c) gövde altı difüzör .....	24
Şekil 2.17. Düzlem, dairesel ve eliptik difüzörler için $C_d$ ve $C_l$ katsayılarının 3-B grafikleri .....	24
Şekil 2.18. Modelin her bir arka kenarına konumlandırılmış olan yedi adet kanatçık ...	25
Şekil 2.19. $25^\circ$ ve $35^\circ$ arka eğim açısına sahip modellerin hız vektörlerinin ve türbülans kinetik enerjilerinin karşılaştırılması .....	26
Şekil 2.20. 11,1 milyon hücreli WRLES, 8,8 milyon hücreye sahip Spalding yasası ile kullanılan WMLES ve 8,3 milyon hücreye sahip Logaritma yasası ile kullanılan WMLES simülasyonlarının ortalama $y^+$ değerleri .....	27
Şekil 2.21. Modelin xz düzlemi üzerine yansıtılan türbülans kinetik enerji kontörleri ..	28
Şekil 2.22. Araçların arka kısmında oluşan basınç katsayısı dağılımları .....	29
Şekil 2.23. Arka arkaya dizilmiş üç aracın $0L$ , $0,5L$ ve $1L$ aralıklı konfigürasyonları için yüzey basınç katsayıları .....	30
Şekil 2.24. Gövde altı difüzör ile donatılmış squareback Ahmed modeli .....	31
Şekil 2.25. Gövde altı difüzör ile donatılmış $25^\circ$ arka eğime sahip Ahmed modeli .....	31
Şekil 2.26. Çalışmada kullanılan iki tip Ahmed modeli için difüzör açısının sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisi .....	32
Şekil 2.27. Çalışmada kullanılan iki tip Ahmed modeli için difüzör açısının kaldırma katsayısı üzerindeki etkisi .....	32
Şekil 2.28. Yumru girdap üreteçlerin kaldırma ve sürüklenme katsayıları üzerindeki etkisi .....	33
Şekil 2.29. Üçgen kanat girdap üreteçlerin kaldırma ve sürüklenme katsayıları üzerindeki etkisi .....	33
Şekil 2.30. Squareback Ahmed modeli aşağı akımına konuşturulan dikey ayırıcı plaka .....	34

Şekil 2.31. Verevlik açısı ve plaka yönelme açısının şematik gösterimi ve tanımı .....	34
Şekil 3.1. Çeper yakını bölgesinin alt bölümleri.....	45
Şekil 3.2. Duvar yakını yaklaşımları.....	46
Şekil 3.3. Basınç katsayısı.....	49
Şekil 3.4. Bir binek araç üzerindeki aerodinamik kuvvetler ve momentler.....	50
Şekil 3.5. Projeksiyon alanı .....	51
Şekil 3.6. Araca seyir esnasında etki eden direnç kuvvetleri.....	51
Şekil 3.7. Yatay ve dik levha etrafındaki akışın görselleştirilmesi.....	52
Şekil 3.8. Bir küre üzerindeki dış akışta oluşan art izi bölgesi ve ayrılmış akış.....	53
Şekil 3.9. Araç arkasında oluşan sürüklenme kuvvetinin rüzgarlık kullanımı ile azalması .....	54
Şekil 3.10. Çalışmada kullanılan aracın üç boyutlu modeli.....	56
Şekil 3.11. Çalışmada kullanılan aracın ölçüleri.....	56
Şekil 3.12. Girdap üreteç çeşitleri ve ölçüleri .....	57
Şekil 3.13. Girdap üreteçlerin konfigürasyonu .....	57
Şekil 3.14. Girdap üreteçlerin konfigürasyonu ve araç arkasındaki ayrılma noktası.....	58
Şekil 3.15. Tekerleğin yer ile temas ettiği bölgenin ağ için uygun hale getirilmesi .....	59
Şekil 3.16. Çözüm alanı ağ yapısı.....	59
Şekil 3.17. Oluşturulan ağın sınır tabaka yapısı.....	60
Şekil 3.18. Blokaj oranı.....	60
Şekil 3.19. Akış alanı sınırlarının çözüme etkisi .....	61
Şekil 3.20. Akış alanı ve art izi bölgesi.....	62
Şekil 3.21. Ağ yapısının çarpıklık oranı ve ortogonal kalitesinin sınıflandırılması.....	63
Şekil 4.1. Sürüklenme katsayısı $C_d$ grafiği .....	67
Şekil 4.2. Kaldırma katsayısı $C_l$ grafiği .....	68
Şekil 4.3. Kalıntılar grafiği .....	68
Şekil 4.4. 1 numaralı girdap üreticinin kullanılması ile elde edilen sürüklenme katsayısı .....	68
Şekil 4.5. 1 numaralı girdap üreticinin kullanılması ile elde edilen kaldırma katsayısı ...	68
Şekil 4.6. 2 numaralı girdap üreticinin kullanılması ile elde edilen sürüklenme katsayısı .....	69
Şekil 4.7. 2 numaralı girdap üreticinin kullanılması ile elde edilen kaldırma katsayısı ...	69
Şekil 4.8. 3 numaralı girdap üreticinin kullanılması ile elde edilen sürüklenme katsayısı .....	70
Şekil 4.9. 3 numaralı girdap üreticinin kullanılması ile elde edilen kaldırma katsayısı ...	70
Şekil 4.10. 4 numaralı girdap üreticinin kullanılması ile elde edilen sürüklenme katsayısı .....	71
Şekil 4.11. 4 numaralı girdap üreticinin kullanılması ile elde edilen kaldırma katsayısı .	71
Şekil 4.12. Girdap üreteçlerin kullanılması ile araç üzerine etkiyen sürüklenme kuvvetleri .....	72
Şekil 4.13. Girdap üreteçlerin kullanılması ile araç üzerine etkiyen kaldırma kuvvetleri .....	73
Şekil 4.14. Girdap üreteçlerin kullanılması ile sürüklenme katsayısında gözlenen değişimler .....	74
Şekil 4.15. Girdap üreteçlerin kullanılması ile kaldırma katsayısında gözlenen değişimler .....	75
Şekil 4.16. Girdap üreteç kullanılmamış modelin gövdesi üzerindeki basınç dağılımının izometrik görünüşü.....	76

Şekil 4.17. Nissan Leaf için CFD ve rüzgar tüneline elde edilen araç üzerindeki basınç dağılımlarının karşılaştırılması .....	77
Şekil 4.18. Girdap üreteç kullanılmamış modelin ön ve arka bölgelerindeki basınç dağılımları.....	77
Şekil 4.19. Girdap üreteç kullanılmamış modelin simetri düzlemindeki basınç katsayısı $C_p$ dağılımı.....	78
Şekil 4.20. 30 m/s serbest akış hızında aracın simetri düzlemindeki basınç katsayısı dağılımı.....	78
Şekil 4.21. 1 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelin simetri düzlemindeki basınç katsayısı $C_p$ dağılımı .....	79
Şekil 4.22. 2 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelin simetri düzlemindeki basınç katsayısı $C_p$ dağılımı .....	80
Şekil 4.23. 3 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelin simetri düzlemindeki basınç katsayısı $C_p$ dağılımı .....	80
Şekil 4.24. 4 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelin simetri düzlemindeki basınç katsayısı $C_p$ dağılımı .....	81
Şekil 4.25. Aracın arka kısmında belirlenen noktalar .....	81
Şekil 4.26. Girdap üreteç kullanılmamış modelin arka bölgesindeki basınç dağılımı.....	84
Şekil 4.27. 1 numaralı girdap üreteç kullanılan modelin arka bölgesindeki basınç dağılımı. ....	85
Şekil 4.28. 2 numaralı girdap üreteç kullanılan modelin arka bölgesindeki basınç dağılımı. ....	85
Şekil 4.29. 3 numaralı girdap üreteç kullanılan modelin arka bölgesindeki basınç dağılımı. ....	86
Şekil 4.30. 4 numaralı girdap üreteç kullanılan modelin arka bölgesindeki basınç dağılımı. ....	86
Şekil 4.31. Girdap üreteç kullanılmamış modelin simetri düzlemindeki basınç konturü. ....	87
Şekil 4.32. 1 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki basınç konturü.....	88
Şekil 4.33. 2 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki basınç konturü.....	88
Şekil 4.34. 3 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki basınç konturü.....	89
Şekil 4.35. 4 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki basınç konturü.....	89
Şekil 4.36. Girdap üreteç kullanılmamış modelin $z=0,5h-xy$ düzlemindeki basınç konturü .....	90
Şekil 4.37. 1 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin $z=0,5h-xy$ düzlemindeki basınç konturü .....	91
Şekil 4.38. 2 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin $z=0,5h-xy$ düzlemindeki basınç konturü .....	91
Şekil 4.39. 3 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin $z=0,5h-xy$ düzlemindeki basınç konturü .....	92
Şekil 4.40. 4 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin $z=0,5h-xy$ düzlemindeki basınç konturü .....	92
Şekil 4.41. Girdap üreteç kullanılmamış modelin simetri düzlemindeki hız konturü ....	93

Şekil 4.42. 1 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki hız konturü.....	94
Şekil 4.43. 2 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki hız konturü.....	95
Şekil 4.44. 3 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki hız konturü.....	95
Şekil 4.45. 4 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki hız konturü.....	96
Şekil 4.46. Girdap üreteç kullanılmamış modelin $z= 0,5h-xy$ düzlemindeki hız konturü .....	97
Şekil 4.47. 1 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin $z= 0,5h-xy$ düzlemindeki hız konturü.....	98
Şekil 4.48. 2 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin $z= 0,5h-xy$ düzlemindeki hız konturü.....	98
Şekil 4.49. 3 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin $z= 0,5h-xy$ düzlemindeki hız konturü.....	99
Şekil 4.50. 4 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin $z= 0,5h-xy$ düzlemindeki hız konturü.....	99
Şekil 4.51. Girdap üreteç kullanılmamış modelin art izinin simetri ve $z= 0,5h-xy$ düzlemindeki hız konturü .....	100
Şekil 4.52. 1 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelin art izinin simetri ve $z= 0,5h-xy$ düzlemindeki hız konturü .....	101
Şekil 4.53. 2 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelin art izinin simetri ve $z= 0,5h-xy$ düzlemindeki hız konturü .....	101
Şekil 4.54. 3 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelin art izinin simetri ve $z= 0,5h-xy$ düzlemindeki hız konturü .....	102
Şekil 4.55. 4 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelin art izinin simetri ve $z= 0,5h-xy$ düzlemindeki hız konturü .....	102
Şekil 4.56. Girdap üreteç kullanılmamış modelin simetri düzlemindeki hız vektörleri. ....	103
Şekil 4.57. 1 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki hız vektörleri.....	104
Şekil 4.58. 2 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki hız vektörleri.....	104
Şekil 4.59. 3 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki hız vektörleri.....	105
Şekil 4.60. 4 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki hız vektörleri.....	105
Şekil 4.61. Girdap üreteç kullanılmamış modelin $z= 0,5h-xy$ düzlemindeki hız vektörleri .....	106
Şekil 4.62. 1 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin $z= 0,5h-xy$ düzlemindeki hız vektörleri.....	107
Şekil 4.63. 2 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin $z= 0,5h-xy$ düzlemindeki hız vektörleri.....	107
Şekil 4.64. 3 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin $z= 0,5h-xy$ düzlemindeki hız vektörleri.....	108
Şekil 4.65. 4 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin $z= 0,5h-xy$ düzlemindeki hız vektörleri.....	108

Şekil 4.66. Girdap üreteç kullanılmamış modelin simetri düzlemindeki akım çizgileri .....	109
Şekil 4.67. 1 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki akım çizgileri .....	110
Şekil 4.68. 2 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki akım çizgileri .....	110
Şekil 4.69. 3 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki akım çizgileri .....	111
Şekil 4.70. 4 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki akım çizgileri .....	111
Şekil 4.71. Girdap üreteç kullanılmamış modelin $z= 0,5h-xy$ düzlemindeki akım çizgileri .....	112
Şekil 4.72. 1 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin $z= 0,5h-xy$ düzlemindeki akım çizgileri .....	113
Şekil 4.73. 2 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin $z= 0,5h-xy$ düzlemindeki akım çizgileri .....	113
Şekil 4.74. 3 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin $z= 0,5h-xy$ düzlemindeki akım çizgileri .....	114
Şekil 4.75. 4 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin $z= 0,5h-xy$ düzlemindeki akım çizgileri .....	114
Şekil 4.76. Girdap üreteç kullanılmamış modelde tavanının ön kısmından başlayan akım çizgileri .....	115
Şekil 4.77. 1 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelde tavanının ön kısmından başlayan akım çizgileri .....	116
Şekil 4.78. 2 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelde tavanının ön kısmından başlayan akım çizgileri .....	116
Şekil 4.79. 3 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelde tavanının ön kısmından başlayan akım çizgileri .....	117
Şekil 4.80. 4 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelde tavanının ön kısmından başlayan akım çizgileri .....	117



## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1. Çalışmada kullanılan simülasyonlar sonucu elde edilen aerodinamik veriler. .....	27
Çizelge 3.1. Ağ yapısının özellikleri.....	62
Çizelge 3.2. Çözüm şartları.....	63
Çizelge 3.3. Sınır şartları.....	64
Çizelge 4.1. Ağ yapısından bağımsızlık için gerçekleştirilmiş analizler .....	65
Çizelge 4.2. Girdap üreteç kullanılan modellerin sürüklenme ve kaldırma katsayıları ..	72
Çizelge 4.3. Gövde üzerine etkiyen sürüklenme kuvvetinin dağılımı .....	72
Çizelge 4.4. Aracın arka kısmında belirlenen noktalardaki basınç değerleri.....	82
Çizelge 4.5. Girdap üreteçlerin kullanılması ile aracın arka kısmındaki noktalarda oluşan basınç farkları .....	82
Çizelge 4.6. Girdap üreteçlerin kullanılması ile aracın arka kısmındaki noktalarda oluşan basınç farklarının oranı .....	83

## 1. GİRİŞ

İnsanoğlu varoluşundan itibaren ulaşım ihtiyacını karşılamak için çeşitli araçlara ihtiyaç duymuştur. 1763'te James Watt'ın buharla çalışan makineyi bulması ile Sanayi Devriminin en önemli gelişmelerinden biri yaşanmıştır ve makine çağının başlangıç noktası olmuştur. 18. ve 19. yüzyıllarda yeni buluşların üretime etkisi ve buhar gücü ile çalışan makinelerin makineleşmiş endüstriyi doğurması ile beraber enerji ihtiyacı artmıştır. Sanayi Devriminin etkileri ulaşım sektöründe de kendine yer bulmuştur. 1800'lü yılların başlarında buhar gücü ile çalışan gemiler, lokomotifler üretilmiştir. Otomobilin tarihi ise 19. yüzyılın sonlarında enerji kaynağı olarak buharın kullanılması ile başlar ve daha sonrasında içten yanmalı motorlarda petrolün kullanılması ile devam etmiştir.

Ulaşım ve petrol arasında yakın bir ilişki mevcuttur; ulaşım amaçlı tüketilen enerjinin %93'ü petrol bazlı ürünlerdir (Ternel et al., 2021). Günümüze kadar gelen bu süreçte otomobillerin yaygınlaşması ve insan nüfusunun artması ile beraber yakıt tüketimi de artmıştır. Araçlarda kullanılan yakıtların yanması sonucu ise çevreye ve insan sağlığına zararlı birçok kimyasal doğaya salınmaktadır. Sera gazı salınımı oranından ulaşım sektörü üst sıralarda yer almaktadır. 2015 yılı içerisinde Avrupa bölgesindeki sera gazı salınımının %23'ü ulaşım kaynaklıdır ve bu %23'lük kısmın %70'i ise kara ulaşımından dolaydır (Ternel et al., 2021). 2000'li yıllardan sonra petrolün azalması, iklim değişikliği ve fosil yakıt kaynaklı kirlenici gazların emisyonları gibi sorunlar küresel çapta gündeme gelmiştir ve günümüzde hava kirliliğinin ve küresel ısınmanın etkileri belirgin şekilde hissedilmeye başlanmıştır. İnsanoğlu, alternatif yakıt arayışları, kısıtlamalar, yakıt tüketimini azaltma gibi yollara yönelmiştir.

İklim ve çevre krizinin giderek artması ile insanoğlu alternatif yakıt arayışları, yakıt tüketimini azaltmak gibi çeşitli arayışlara girmişlerdir. Ülkeler, taşıt kaynaklı emisyonlar ile ilgili daha sert kısıtlamalar uygulamaya başlamıştır. 2009'dan itibaren Avrupa Komitesinin aldığı kararlar ile 2015 yılında otomotiv ana sanayi firmaları için ortalama karbondioksit salınımı 130 gCo<sub>2</sub>/km olarak sınırlandırılmıştır (Fontaras et al., 2017). AB'nin 2021 yılından itibaren ise 95 gCo<sub>2</sub>/km değerlerine kadar düşürülmesi

hedeflenmektedir. Resmi NEDC laboratuvarı test prosedürü temel alınırsa ABD'nin 2025 için binek otomobillere ilişkin 97 g/km hedefi ise en uzun vadeli hedeftir (Arabacı, 2016). Hedeflenen emisyon değerlerine ulaşmak için benzinli ve dizel araçların sırası ile 4,1 lt/100 km ve 3.6 lt/100 km civarlarında yakıt tüketmesi gerekmektedir (Ekman et al., 2020).

Dayı (2019) yaptığı çalışmada ise Türkiye'deki 2002 ve 2017 yılları arasındaki araç sayılarının istatistiklerini göz önüne alarak 2017 yılında araç sayısı 11 358 629 iken, bu sayının 2050 yılında 81 940 043 olacağını öngörmüştür ve buna bağlı olarak emisyon değerinin de 6 ile 8 kat arasında artacağını elde etmiştir (Dayı, 2019).

Ayrıca yakıt tüketimi, yeni araç satın alma sürecinde de önemli bir kriterdir ve günümüzde otomobil firmaları arasındaki rekabetin artması ile daha çok ön plana çıkmıştır. NCBS'e (New Car Buyers Survey) göre yeni araç satın alma nedenleri arasında yakıt tüketimi ilk 5 sebep arasında yer almaktadır. Statista tarafından yapılan ankette yakıt tüketiminin potansiyel otomobil müşterileri için ne derecede önemli olduğu görülebilir. Ankete katılan müşterilerin %66'sı için yakıt tüketimi en önemli kriter olarak ilk sırada yer almaktadır. Bu oran düşük fiyat kriterine göre %12 daha fazladır. Buna benzer olarak tüketiciler için güvenlik de yakıt tüketimi kriteriyle benzer değerleri yakalamıştır. Yaşanılan konuma bağlı olarak yakıt tüketimi sorunu yakın zamanda eskide kalabilir. Çoğu otomobil üreticisi Volkswagen, Tesla, Porsche gibi küresel iklim krizi sebebi ile elektrikli araç çalışmalarına son yıllarda büyük önem vermektedir ve elektrikli otomobil üretim sayıları ciddi oranda artış göstermiştir. Otomobillerin bataryalarının menzili yakın zamanda yakıt tüketimi kriterinin yerini alarak otomobil alıcıları için ilk sırada yer alabilir (Richter, 2021).

Regülasyonların giderek artması ve müşteri beklentileri (yakıt tüketimi, yüksek hızlar, yüksek taşıma kapasitesi) nedeni ile otomobil üreticileri, yanmanın verimini arttırmak ve yakıt sarfiyatını düşürmek için ağırlık azaltma, aerodinamik iyileştirmeler gibi çeşitli yollara yönelmişlerdir ve bu konularla ilgili ciddi yatırımlar yapmaktadırlar.

Aerodinamik; hareket halindeki katı cisimlerin hava ile etkileşimini ya da durağan bir katı cisim etrafında akan havanın söz konusu olduğu durumları inceler. Çalışma alanları, özellikle havacılık sektörü başta olmak üzere otomobillerin, hızlı trenlerin ve gemilerin tasarımları, köprülerin ve çok yüksek yapıların inşa edilmeleridir.

Aerodinamik, antik dönemlerde bile insanlar tarafından tekneler ve rüzgar değirmenleri için konuşulmuştur. Aristoteles ve Arşimed tarafından aerodinamiğin önemli konularından olan sürdürülebilirlik, sürüklenme ve basınç gradyanları ortaya atılmıştır ("Aerodinamik," 2021).

Modern aerodinamiğin başlangıcı ise 18.yüzyıla dayanır. Isaac Newton, 1726'da hava direncini ortaya atan ilk kişi olmuştur ve aerodinamik ile uğraşan ilk bilim insanı olarak anılır. 1738'de Daniel Bernoulli, "mekanik enerjinin korunumu" ilkesi olarak nitelendirilebilecek Bernoulli denklemini türetmiştir. Bu denklem pek çok sınırlayıcı yaklaşımdan türetilmesine rağmen pratikte yaygın kullanılan bir denklem olmuştur. 1757 yılında Leonard Euler, sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akışlar için geçerli olan Euler denklemlerini türetmiştir. Bu denklem (Euler denklemi), viskoz olmayan akış ya da dönümsüz akış bölgelerinde geçerlidir. 1781'de, Francis Herbert Wenham aerodinamik kuvvetleri yüksek doğrulukla ölçmek için ilk rüzgar tüneline inşa etmiştir. Gustav Kirchoff, Jean le Rond d'Alembert ve Lord Rayleigh tarafından sürüklenme teorileri geliştirilmiştir. 19.yy'da Claude-Louis Navier ve George Gabriel Stokes, Euler denklemlerini viskoziteyi de içine dahil edilecek şekilde yeniden düzenlemiş ve Navier-Stokes denklemlerini ortaya atmışlardır. Akışkanlar mekaniğinin yapıtaşlarından biri olan bu denklemlerin çözümü çok zordur. Wright kardeşler, 1903 yılında uçakla ilk başarılı uçuşu gerçekleştiren bilim insanları olarak tarihe geçmişlerdir. 1904 yılında Ludwig Prandtl sınır tabaka yaklaşımını ortaya atarak akışkanlar mekaniği alanında önemli bir gelişmeye imza atmıştır. Sınır tabaka yaklaşımı ile Navier-Stokes denklemlerinin yaklaşık çözümlerinin elde edilmesine önayak olmuştur ("Aerodinamik," 2021).

1900'lü yıllarda uçakların hızlarının artması ile ses hızına yakın ve ses hızından yüksek hızlarda havanın sıkıştırılabilirliği ile ilgili problemlerle karşılaşmış ve daha çok bu

konularla ilgili çalışmalar yapılmıştır. Günümüzde aerodinamik çalışmalar rüzgar tünelleri ve bilgisayar ortamında paket programlar vasıtası ile devam etmektedir.

Otomobilin keşfi ile birlikte otomobil aerodinamiği de zamanla gelişim göstermiştir. 1900'lü yılların başında insanoğlu otomobil aerodinamiği ile ilgili olarak daha çok yüksek hızlarda karşılaşılan sürüklenme ve yan rüzgar problemleri üzerine yoğunlaşmıştır. O dönemdeki araçlar atlı arabalara kıyasla daha az sürtünme katsayısına sahipti. Ancak düşük motor gücü ve kötü yol koşulları nedeni ile verimsizlerdi. İlk 100 km/h değerini aşan araç, Camille Jenatzy tarafından aerodinamik prensiplere dayanılarak torpido şeklinde (yani boy/en oranı yüksek) geliştirilmiştir. İlerleyen yıllarda uçak teknolojisinin gelişmesi ile beraber uçak kanadının formundan esinlenerek akım çizgilerine en uygun formlarda araçlar yapılmaya çalışılmıştır. Gözyaşı damlası formunun aerodinamik açıdan ideal form olması nedeni ile 1950'li yıllarda göz damlası formu baz alınarak motoru arkada olacak şekilde otomobil tasarımları yapılmıştır. Bu dönemlerde daha çok sürtünme direncini düşürmek için çalışmalar yapılırken araçlar üzerine etki eden kaldırma kuvveti göz ardı edilmiştir (Sivaraj et al., 2021).

1955'den 1990'a kadar geçen süreçte, otomotiv mühendisliğinde önemli olan şekillendirme, üretim, lüks ve güvenlik gibi parametreler üzerinde aerodinamik prensipler daha çok uygulama alanı bulmuştur. Metal şekillendirme ile ilgili imalat tekniklerinin iyileşmesi ve tasarıma verilen önemin artması ile otomobillerin ortalama direnç katsayıları 0.40'lara kadar düşmüştür. Janssen, Hucho ve birçok araştırmacı taşıt aerodinamiğini geliştirmek için çalışmalar yapmıştır. Difüzör, rüzgarlık, dış gövdenin eğriselliği ve ön camın eğriliği gibi çeşitli detayları optimize etmeye çalışmışlardır. Araç üzerindeki hava akışını kontrol ederek aracın aerodinamik direncini, yol tutuşunu ve stabilitesini iyileştirmeyi hedeflemişlerdir (Sivaraj et al., 2021).

Günümüzdeki araçlar daha çok akım çizgili hale getirilerek araçların direnç katsayıları minimuma indirilmeye çalışılmaktadır. Özellikle rekabet piyasasında, müşteri beklentilerinin (ekonomiklik, konfor ve yol tutuşu) iyileştirilmesinde önemli engellerden biri olan hava direncinin azaltılması için aerodinamiğin önemi gün geçtikçe artmıştır. Otomobil üreticileri, otomobillerin aerodinamik direncini azaltmak için aynalar, kapı

kolları, çerçeveler gibi çeşitli parçaların tasarımına da ayrı önem vermektedirler. Günümüzde ar-ge çalışmaları gerek sayısal analizler gerek deneysel olarak rüzgar tünellerinde yapılan aerodinamik analizlerle yürütülmektedir.

Bir otomobilde hareket için motorun ürettiği güç; yuvarlanma direncini, yardımcı donanımı çalıştırmak, hareketli parçalar arasındaki sürtünmeyi ve hava direncini yenmek için kullanılır. Hava direncinin büyüklüğü aracın aerodinamik yapısı ile bağlantılıdır dolayısıyla aracın aerodinamik yapısı yakıt tüketimini de doğrudan etkilemektedir. Aerodinamik direnç, düşük hızlı seyir koşullarında ihmal edilebilir seviyelerdeyken yüksek hızlı sürüş koşullarında ise yakıt tüketimini etkileyen en önemli faktörlerden biri haline gelmektedir. Örneğin; 1200 kg'lık benzinli bir motora sahip otomobilin 90 km/h hızda seyri esnasında yakıt tüketiminin %10,6'lık kısmı aerodinamik kayıplardan kaynaklanmaktadır ("Aerodinamik (otomobil)," 2021). Taşıtlarda ortalama aerodinamik sürüklenme katsayısının 0.24 değerlerinde olması ile birlikte otoyol sürüş şartlarında (130 km/h) 1.6 lt/100 km yakıt tasarrufu edilebileceği öngörülmektedir (Fontaras et al., 2017).

Sürüklenme direncinin %65'lik kısmı aracın formu ile ilgilidir (Altınışik, 2013). Binek araçların dış tasarımları genel olarak kabin alanı, standartlar gibi kısıtlamalar nedeni ile eğik ve kutu formundadır. Bu form, aracın arka kısmına doğru gittikçe türbülans oluşumuna sebep olur. Akışın türbülans nedeni ile aracın arka camına yakın bir bölgede ayrılması ile araç arkasında düşük basınç bölgesi oluşur. Aracın ön ve arka kısımları arasında oluşan basınç farkı aerodinamik sürüklenmenin büyük bir kısmını oluşturur. Araç arkasında gözlemlenen düşük basınç bölgesinin yakıt tüketimi üzerinde etkisi büyüktür (Palanivendhan et al., 2021).

Aerodinamik dirence en büyük katkısı olan arka kısım, direnç azaltma potansiyeli yüksek olan bir bölgedir. Sürüklenme katsayısının büyük bir kısmını oluşturan arka taraftaki basınç kuvvetleri, akış ayrılması sonrası oluşan girdaplardan kaynaklanır. Basınç kuvvetinin büyüklüğü iki parametreyle ilişkilendirilir: girdapların yüzeyden uzaklığı ve genlik ya da dolanım. Girdapların yüzeyden uzaklığı veya genliği ya da girdapların dinamiği değiştirilerek sürüklenme katsayısı azaltılabilir. Bu yöntemlerden birinin uygulanması ile basınç kuvvetinin ve dolayısıyla sürüklenme katsayısının azaldığı hem

analitik hem de sayısal simülasyonlarla kanıtlanmıştır. Aracın arka kısmındaki akış kontrolü, aktif ya da pasif yöntemlerle yapılır. Genel olarak aktif yöntemlere darbeli jetler örnek verilebilirken, pasif yöntemlere ise bu bölgedeki detayların optimize edilmesi (difüzör, arka camın eğimi vs.) ya da çeşitli eklentiler (rüzgarlık, girdap üreteçleri gibi) kullanılması verilebilir. Literatürde, aracın arka kısmındaki akışı kontrol etmeye çalışarak direnç azaltma ile ilgili birçok çalışma mevcuttur (Bruneau et al., 2014).

Akış ayrılmasının gerçekleştiği noktanın yukarı akımına girdap üreteçleri yerleştirilmesi, aerodinamik direnç ve kaldırma değerlerinin önemli oranda azalmasında kritik rol oynamaktadır. Bu tez çalışmasında, girdap üreteçleri kullanılarak bir binek aracın aerodinamik direnci iyileştirilmeye çalışılmıştır (Palanivendhan et al., 2021).

## **2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI**

### **2.1. Akışların Sınıflandırılması ve Özellikleri**

Cisimler üzerindeki akışla hemen hemen hayatımızın her alanında karşılaşırız. Akışkanın hareketsiz bir katı üzerinden akması ya da bir cismin bir akışkan içerisinde hareket etmesi fiziksel olarak aynı durumdur ve biz bu durumu dış akış olarak tanımlarız. Bu tür durumlara örnek olarak çiçek polenlerinin rüzgar ile çeşitli yerlere sürüklenmesi, deniz canlılarının su içerisindeki hareketi ve kuşların hava akımlarını kullanarak seyahat etmelerini verebiliriz.

Akışkan-cisim etkileşimi sonucunda birçok fiziksel durum açığa çıkmaktadır. Katı cisimler üzerindeki akış cisim çevresinde basınç dağılımı oluşturmaktadır ve akışkanlar etkileşime girdiği cisme sürüklenme, kaldırma ve direnç kuvveti uygulamaktadır. Bu kuvvetlerin etkisi altındaki cisim üzerinde titreşimler ve gürültüler gözlemlenebilir. Cisim çevresinde akış ayrılmaları, girdaplar ve çeşitli girdap yapıları oluşabilir. Dış akışların iyi anlaşılması tasarlanacak olan uçakların, yapıların, gemilerin, otomobillerin mühendisliğinde önemli bir yer teşkil etmektedir. Örneğin otomobillerin tasarımında yapılan aerodinamik iyileştirmeler ile birlikte yakıt tüketiminde, yol tutuşunda ve gürültü anlamında da büyük gelişmeler olmuştur. Firmalar bu alanda Ar-ge departmanlarına büyük yatırımlar yapmaktadırlar (Engin, 2018).

Akışkanlarla etkileşim içinde olan cisimler, formlarına göre aerodinamik veya küt cisimler olarak nitelendirilir. Cisimlerin akışı engellememesi veya akışkanın direncine daha az maruz kalması için tasarımlar daha çok aerodinamik yani akım çizgili yapılmaya çalışılır. Buna örnek olarak yarış araçları, uçaklar, denizaltılar verilebilir. Ayrıca akım çizgili tasarıma sahip olan araçlar daha zarif ve estetik durmaktadırlar (Engin, 2018).

#### **2.1.1. Sıkıştırılabilir ve Sıkıştırılamaz Akışlar**

Akış süresince yoğunluğun değişme miktarına göre akışları sıkıştırılamaz ve sıkıştırılabilir olarak iki gruba ayırabiliriz. Sıvı akışlarında yoğunluğun sabit olması



nedeni ile genellikle sıkıştırılmazdır. Gaz akışlarında ise boyutsuz Mach sayısının 0.3'den (yaklaşık 100 m/s'nin altındaki hızlar) küçük olması halinde sıkıştırılmaz akış kabulü yapılır (Engin, 2018). Sıkıştırılabilirlik etkilerinin ihmal edilmesi problemin çözümünü kolaylaştırır ve sonuç çok az bir hatayla elde edilebilir. Binek araçların seyir hızları göz önüne alındığında sıkıştırılmaz akış kabulü yapmak uygundur. Araç aerodinamiği ile ilgili yapılan çalışmalarda hava sıkıştırılmaz bir akışkan olarak kabul edilir.

### 2.1.2. Yoğunluk

Bir maddenin belirli bir sıcaklık ve basınç altındaki kütesinin hacmine oranı olarak tanımlanır. Yoğunluk, maddelerin karakteristik özelliğidir.  $\rho$  harfi ile ifade edilir.

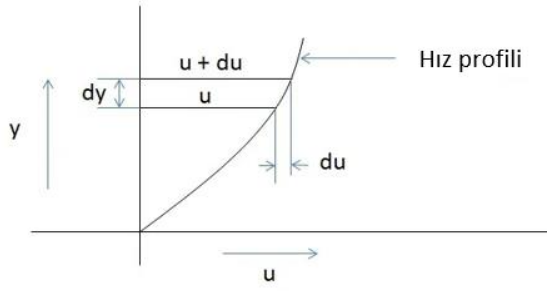
$$\rho = \frac{m}{V} \quad (kg/m^3) \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'de  $m$  kütle,  $V$  hacmi göstermektedir. Gazların yoğunluğunda basınç ve sıcaklığa bağlı olarak ciddi değişiklikler gözlemlenir. Genellikle basıncın artması ile gazların yoğunluğu artarken, sıcaklığın artışı ile yoğunluk düşmektedir.

### 2.1.3. Viskozite

Sıvı ya da gaz haldeki bir akışkanın akmaya karşı iç direncini gösteren özelliktir. Diğer bir deyişle, bir akışkanın harekete zorlanması sonucu deforme olmaya karşı gösterdiği dirençtir.

Viskozite, akış esnasında akışkan tabakalarının birbirinden farklı hızlarda hareket etmesi sonucu oluşan yüzey gerilmelerinden kaynaklanır. Viskozite nedeniyle birbirine komşu iki akış tabakası arasında oluşan hız farkı Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Gaz haldeki akışkanlarda moleküllerin çarpışması sebebiyle ortaya çıkan viskozite, sıvılarda moleküller arası çekim kuvveti ile bağlantılıdır.



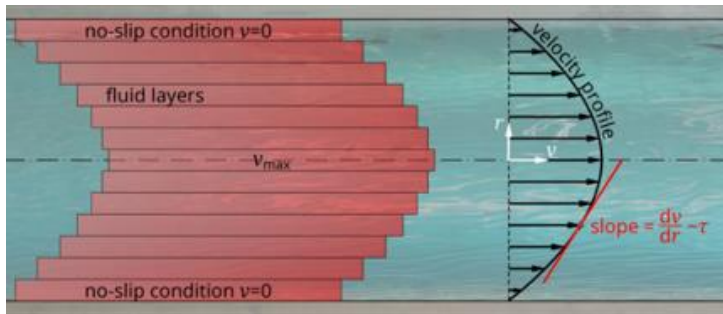
**Şekil 2.1.** Viskozite nedeniyle iki akış tabakası arasındaki hız farkı (Şekil [mechanicalbooster](https://www.mechanicalbooster.com/) (<https://www.mechanicalbooster.com/>) adresinden alınmıştır.)

Laminer akışta deformasyon hızının, kayma gerilmesi ve akışkan tabakalarına dik yöndeki hız gradyanı ( $du/dy$ ) ile orantılı olduğu Isaac Newton tarafından öne sürülmüştür ve bu tarz akışkanlara Newton tipi akışkanlar denir. Bir boru içerisindeki laminer akışta oluşan hız profili Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Tek boyutlu kayma akışında kayma gerilmesi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.2)$$

Bu denklemde  $\mu$  olarak belirtilen dinamik viskozitedir. Dinamik viskozite, Newton tipi bir akışkanın deformasyon hızı ile kayma gerilmesi arasındaki orantı sabitidir. Ancak akışkanlar mekaniği ve ısı transferinde dinamik viskozitenin yoğunluğa oranı ile çokça karşılaştırılması nedeniyle kinematik viskozite adını verilen sabit daha yaygın kullanılmaktadır.  $\nu$  ile ifade edilmektedir ve denklem 2.2’den bulunur (Engin, 2018).

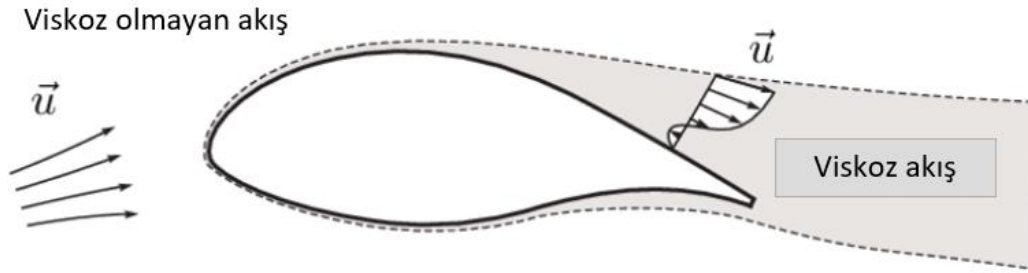
$$\nu = \mu/\rho \quad (2.3)$$



**Şekil 2.2.** Boru içerisindeki laminer akışta oluşan hız profili (Şekil [TECS](https://www.tec-science.com/) (<https://www.tec-science.com/>) adresinden alınmıştır.)

#### 2.1.4. Viskoz ve Viskoz Olmayan Akış Bölgeleri

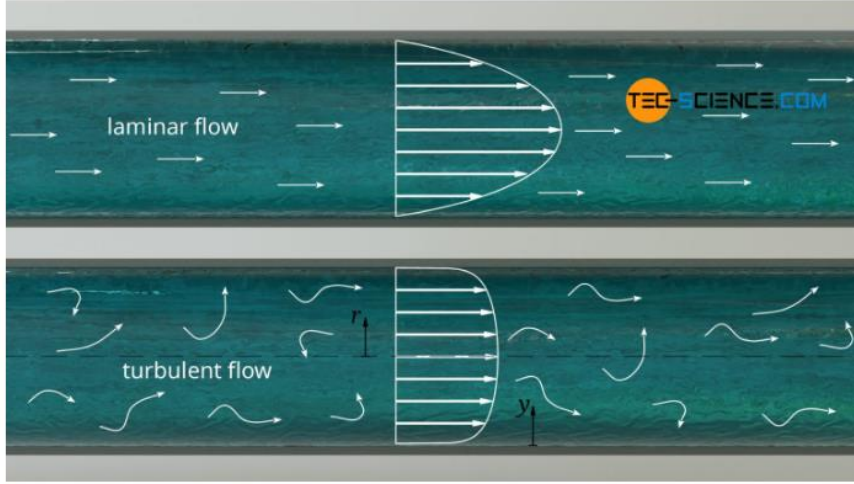
Akışkanların harekete zorlanması sonucunda akışkan tabakaları arasında hız farkları oluşur ve bu hız farkları sürtünme kuvvetlerini meydana getirir. Bu kuvvetlerin etkileri her akışta gözlemlenmekle birlikte önemi şartlara göre değişmektedir. Sürtünme etkilerinin yani viskoz kuvvetlerin ihmal edilebilecek derecede olduğu akışlar viskoz akışlar olarak tanımlanır. Şekil 2.3’de bir uçak kanadı üzerindeki viskoz akış ve viskoz olmayan akış bölgeleri gösterilmiştir. Akış analizlerinde viskoz ve viskoz olmayan akışların önemi büyüktür. Viskoz kuvvetlerin atalet ve basınç kuvvetlerinin büyüklüklerine oranla önemsiz olduğu durumlarda viskoz terimler ihmal edilerek Navies-Stokes denklemi Euler denklemine indirgenir. Euler denklemi kullanılarak, düşük viskoziteli ve çeperden uzak bölgedeki birçok akış probleminin analizi kolayca ve yüksek doğrulukla yapılabilir (Engin, 2018).



**Şekil 2.3.** Bir uçak kanadı üzerindeki viskoz akış ve viskoz olmayan akış bölgeleri (van Garrel et al., n.d.)

#### 2.1.5. Laminer-Türbülanslı Akış

Laminer akış, akışkanın birbirine paralel tabakalar şeklinde aktığı akış rejimidir. Düzenli akım olarak da tabir edilebilir. Akış doğrultusu dışında akımlar ve girdaplar yoktur. Viskozitesi yüksek ve düşük hızlı akışkanların akışları genellikle laminerdir. Türbülanslı akış, laminer akışın aksine düzensiz, girdaplar ve çalkantıların olduğu akış rejimidir. Düşük viskoziteli veya yüksek hızlıdaki akışkanların akış rejimi türbülanslıdır. Pratikte karşılaştığımız akışların çoğu türbülanslıdır. Bir aracın hava içerisindeki hareketi türbülanslı akışa bir örnektir. Bunun yanı sıra türbülanslı ve laminer akış arasında gidip gelen akış rejimi geçiş akışı olarak nitelendirilir.



**Şekil 2.4.** Bir boru içerisindeki laminar ve türbülanslı akış (Şekil TECS (<https://www.tec-science.com/>) adresinden alınmıştır.)

Düzenli veya düzgün akış rejimi olan laminar akışta hız profili analitik yoldan elde edilebilir. Bir boru içerisindeki tam gelişmiş laminar akışta hız profili, ekseninde maksimum; boru yüzeyinde ise sıfır olacak şekilde paraboliktir. Türbülanslı akışın yapısı teorik olarak hala daha tamamen çözülmediğinden dolayı deneylerden ve çeşitli şartlar için geçerli olan ampirik veya yarı ampirik bağıntılardan yararlanılarak analiz edilir. Türbülanslı akış için hız profili laminar akışa göre daha küt veya daha dolu bir biçimdedir. Boru çeperindeki akış hızı kaymamazlık şartı nedeni ile sıfırdır ve çeper yakınılarında keskin bir hız düşüşü gözlenir. Laminar ve türbülanslı tam gelişmiş akışlar için hız profilleri şekil 2.4’de gösterilmiştir (Engin, 2018).

## 2.2. Euler ve Navier-Stokes Denklemleri

Navier-Stokes denklemleri, Louis Marie Henri Navier (1785-1836) ve Sir George Gabriel Stokes (1819-1903) tarafından geliştirilmiş olup akışkanların hareketini tanımlayan denklem setidir. Bu denklemler; akış içerisindeki birim kütleye etki eden momentum değişimlerinin, basınç değişimleri ve sürtünme kayıplarına neden olan viskoz kuvvetlerin toplamına eşit olduğunun doğruluğunu ispatlamaktadır. Başka bir deyişle, Navier-Stokes denklemleri, bir akışkanın herhangi bir bölgesindeki kuvvetler dengesinin dinamiğini ifade etmektedir (Uzel, 2018). Şekil 2.5’de Navier-Stokes denkleminin genel biçimi verilmiştir.

$$\begin{array}{c}
 \text{YOĞUNLUK} \\
 \rho \left( \underbrace{\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t}}_{\text{Hızın zamana bağlı değişimi}} + \underbrace{\mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V}}_{\text{Hız ve akışkanın hareket doğrultusu}} \right) = \underbrace{\nabla P}_{\text{İç Basınç Gradyanı}} + \underbrace{\rho \mathbf{g}}_{\text{Dış kuvvetler}} + \underbrace{\mu \nabla^2 \mathbf{V}}_{\text{Viskoz kuvvetler}} \\
 \text{KUVVET} \\
 \text{Akışkana etkiyen kuvvetlerin toplamı}
 \end{array}$$

**Şekil 2.5.** Navier-Stokes denklemi ve terimlerinin açıklaması (Uzel, 2018)

Navier-Stokes denklemleri, momentum, enerji ve kütle korunumunun temel prensiplerinden elde edilir. Zamana bağlı, lineer olmayan ve ikinci mertebeden olan bu kısmi diferansiyel denklemin analitik çözümü çok basit akış problemleri dışında elde edilememiştir (Engin, 2018). Bu denklemin çözümleri için genellikle basitleştirmeler ve yaklaşımlar kullanılır. Ancak uygulanacak olan yaklaşımın analiz edilecek olan akış bölgesine uygun olması dikkat edilmesi gereken bir konudur.

Navier-Stokes denklemindeki viskoz terimlerin ihmal edilmesi ile matematiksel işlemler oldukça kolaylaşır. Viskoz terimlerin ihmal edilmesi ile elde edilen denklem Euler denklemi olarak adlandırılır. Euler denklemi, viskoz olmayan ve yüksek Reynolds sayısına (net viskoz kuvvetlerin atalet kuvvetlerine göre ihmal edilebilir seviyede olduğu akışlar) sahip akış bölgeleri ve dönümsüz akış bölgelerinde (vortisitenin ihmal edilebilecek derecede küçük olduğu akış) geçerlidir. Euler denkleminin önemli eksiklerinden biri katı yüzeylerde kaymamazlık şartını içermemesidir (Engin, 2018).

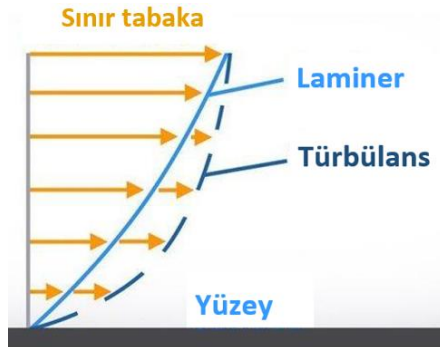
Euler denklemi: 
$$\rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = -\nabla P + \rho \mathbf{g} \quad (2.4)$$

1904 yılında Ludwig Prandtl'in sınır tabaka yaklaşımını öne sürmesi ile Euler denkleminin bazı önemli eksiklikleri giderilmiştir. Sınır tabaka yaklaşım ile akış alanı iki bölgeye ayrılır: viskoz olmayan veya dönümsüz akış bölgesi ve viskoz kuvvetler ile dönümlülüğün ihmal edilemeyeceği çepere yakın çok ince akış bölgesi. İlk olarak dış akış olarak tanımlanan viskoz olmayan veya dönümsüz akış bölgesi çözülür ve daha sonra

sınır tabaka olarak adlandırılan viskoz kuvvetlerin ve dönümlülüğün önemli olduğu bölgelerle birleştirilir. Sınır tabaka içerisinde ise sınır tabaka denklemleri çözülerek sonuç elde edilir. Sınır tabaka çözümlerinin, Navier-Stokes denkleminin bir yaklaşımı olduğu unutulmamalıdır. Günümüzde bilgisayarların gelişmesi ile tüm akış alanının analizi, Süreklilik ve Navier-Stokes denklemlerinin genellikle HAD (Hesaplama Akışkanlar Dinamiği) ortamında çözülmesiyle yapılmaktadır (Engin, 2018).

### 2.3. Sınır Tabaka

Bir akışkanın katı bir yüzey üzerinden akışı esnasında, akışkanın viskozitesi akışkanın yüzeye yapışmasına ve kaymamasına sebep olur. Viskoz etkiler nedeni ile yüzeye yapışan akış tabakası, kendisine komşu olan akışkan tabakasını yavaşlatır. Bu durum yüzeye yakın, yüksek hız gradyanlı ve sürtünme kuvvetlerinin baskın olduğu sınır tabaka olarak adlandırılan akış bölgesinin oluşmasına yol açar.

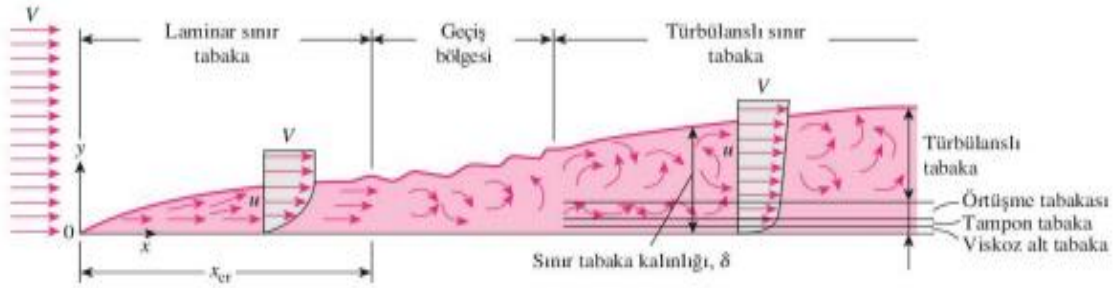


**Şekil 2.6.** Laminer ve türbülanslı sınır tabaka (Şekil Physics Forums (<https://www.physicsforums.com/>) adresinden alınmıştır.)

Sınır tabaka içerisindeki akış rejimi tıpkı diğer akış bölgelerindeki gibi Reynolds sayısına bağlı olarak değişir. Levha giriş kenarından akış yönü boyunca ilerledikçe Reynolds sayısı mesafe ile doğrusal olarak artar. İlk olarak laminer başlayan akış, belirli bir noktadan sonra çalkantıların büyümesi ile geçiş sürecine girer ve daha sonrasında türbülanslı sınır tabakaya geçer. Bir levha üzerindeki akışta oluşan laminer ve türbülanslı sınır tabaka hız profilleri Şekil 2.6’da verilmiştir. Mühendislikte sınır tabakanın hangi rejimde olduğunu belirlemek için genellikle kritik Reynolds sayısı ( $Re_{x,kr}$ ) kullanılır. Ayrıca Reynolds sayısının artması ile belirli bir konumdaki sınır tabaka kalınlığı azalır.

Düz bir levha üzerindeki akışta sınır tabakanın gelişimi ve türbülanslı sınır tabakanın katmanları Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Türbülanslı sınır tabaka, dört ayrı akış bölgesi olarak kategorize edilebilir ve bunlar katı yüzeyden uzaklığa göre sırasıyla (Engin, 2018):

- Viskoz alt tabaka: Viskoz etkilerin baskın olduğu çok ince bir tabakadır. Bu bölgede katı çeperin türbülans etkilerini baskılaması nedeni ile akış hemen hemen laminardır.
- Tampon tabaka: Viskoz etkilerin hala baskın olduğu ancak türbülans etkilerinin de güçlenmeye başladığı tabakadır.
- Örtüşme tabakası: Ana türbülanslı akışının neredeyse başladığı tampon tabakanın üzerindeki akış bölgesidir.
- Türbülanslı tabaka: Türbülans etkilerinin viskoz etkilere baskın olduğu çeperden en uzak olan sınır tabakadır.



**Şekil 2.7.** Düz bir levha üzerindeki akışta sınır tabakanın gelişimi (Engin, 2018)

Sınır tabaka özellikleri, çeşitli şekillerde tanımlanan sınır tabaka kalınlıkları ile ifade edilebilir:

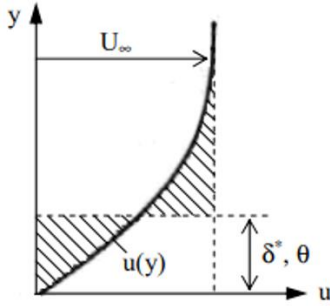
- Sınır tabaka kalınlığı ( $\delta$ ),
- Yer değiştirme kalınlığı ( $\delta^*$ )
- Momentum kalınlığı ( $\theta$ )

Akış doğrultusuna paralel hız bileşeninin, serbest akış hızının %99’una ulaştığı noktanın yüzeye mesafesi pratikte sınır tabaka kalınlığı olarak tanımlanır. ‘‘Akış ile yüzey arasındaki viskoz kuvvetlerden dolayı oluşan debi kaybı yer değiştirme kalınlığı ile ifade

edilirken, aynı sebepten dolayı momentumda oluşan kayıp momentum kalınlığı ile ifade edilmektedir’’ (Yemenici, 2010). Yer değiştirme ve momentum kalınlıkları, Şekil 2.8’de gösterildiği gibi yzey sınırının bu kalınlıklar oranınca hayali olarak yukarı kaydırılması sonucu viskoz olmayan ideal akış bölgesi oluşturulmasıyla elde edilir. Laminer sınır tabaka için yer değiştirme ve momentum kalınlıkları aşağıda ifade edilmiştir.

Yer değiştirme kalınlığı: 
$$\delta^* = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u}{U_{\infty}}\right) dy \quad (2.5)$$

Momentum kalınlığı: 
$$\theta = \int_0^{\infty} \frac{u}{U_{\infty}} \left(1 - \frac{u}{U_{\infty}}\right) dy \quad (2.6)$$



**Şekil 2.8.** Momentum ve yer değiştirme kalınlıkları (Yemenici, 2010)

Türbülanslı akışa ait sınır tabaka denklemleri ve hız profilleri ampirik ya da yarı ampirik olarak elde edilir. 1/7’nci kuvvet yasası, logaritma yasası ve Spalding eper yasası bunlardan bazılarıdır. Düz plakada türbülanslı sınır tabakanın hız profilini elde etmek için 1/7’nci kuvvet yasası yaygın kullanılan ampirik ifadelerden biridir. Logaritma yasası, yzeye çevrili hemen hemen bütün türbülanslı sınır tabakalar için geçerlidir ve genellikle sürtünme hızı  $u_*$  adı verilen bir boyutsuz değişken cinsinden ifade edilir. Ancak katı yzeyine çok yakın yerlerde logaritma yasası kullanıma uygun değildir. Ayrıca sınır tabaka kenarında deney verileri ile tutarsızlık göstermektedir. Spalding eper yasası, çepere yakın bölgede diğer yasalara göre daha doğru sonuçlar vermektedir ve tüm çeper boyunca geçerlidir (Engin, 2018).

1/7’nci kuvvet yasası: 
$$y \leq \delta \text{ için } \frac{u}{U_{\infty}} \cong \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7} \quad (2.7)$$



Logaritma yasası:  $\frac{u}{u_*} = 2,5 \ln \frac{yu_*}{\nu} + 5$  veya  $u^+ = 2,5 \ln y^+ + 5$  (2.8)

Sürtünme hızı:  $u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$  (2.9)

Spalding çeper yasası: (2.10)

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

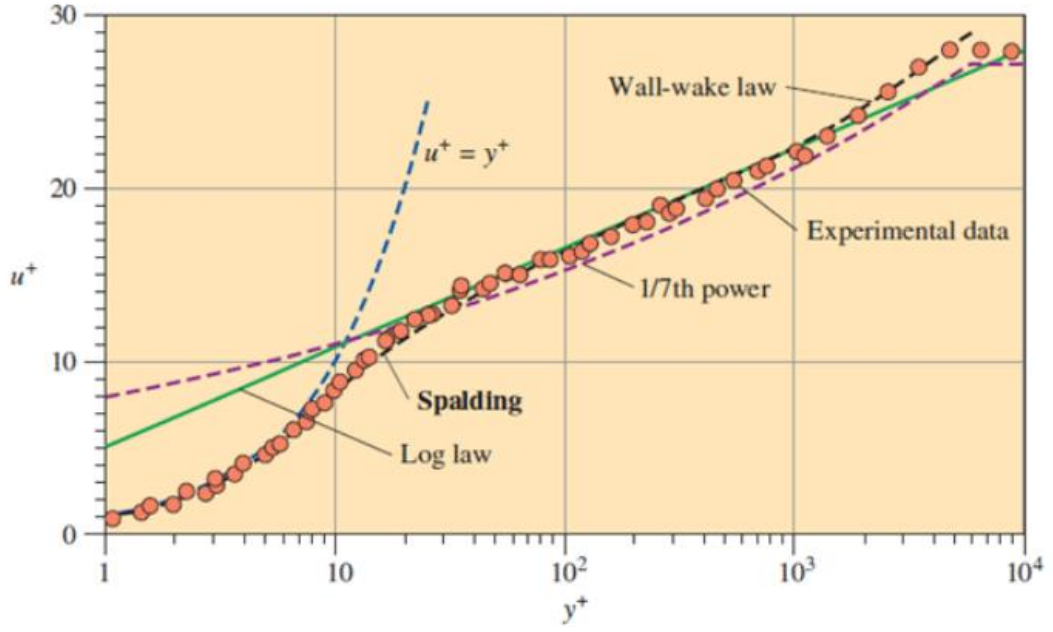
Sınır tabaka analizlerinde kullanılan yaygın boyutsuz değişkenler  $y^+$  ve  $u^+$ 'dir ve çeper değişkenleri yasası şeklinde adlandırılır:

$$y^+ = \frac{yu_*}{\nu} \quad \text{ve} \quad u^+ = \frac{u}{u_*} \quad (2.11)$$

Burada  $y^+$  boyutsuzlaştırılmış mesafe,  $u^+$  boyutsuzlaştırılmış hız ve  $y$  çeperden uzaklığı göstermektedir.

Şekil 2.9'da düz bir levha üzerindeki türbülanslı sınır tabaka  $Re_x = 1 \times 10^7$  değerinde çeper değişkenleri yasası kullanılarak çizilmiştir. Bu grafikte deneysel verilere yer verilmekle beraber sınır tabaka yaklaşımı da karşılaştırılmıştır. Şekil 2.9'da görüldüğü üzere Spalding'in çeper yasası genel itibarı ile en yakın sonuçları vermektedir ve çeper yakınında deneysel verilerle örtüşen tek yaklaşımdır. Çepere yakın bölgede kuvvet ve logaritma yasası geçerli değildir (Engin, 2018).

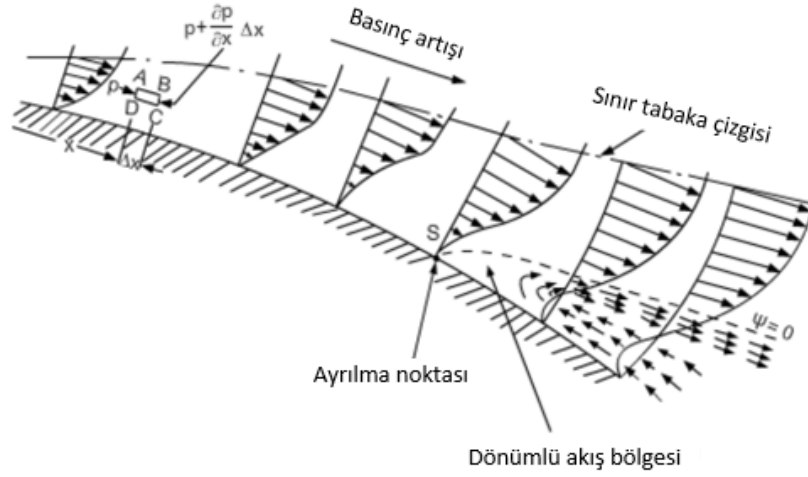
$y^+ < 5$  aralığı viskoz alt tabaka bölgesi olarak nitelendirilir. Bu bölgede  $u^+ = y^+$  lineer denklemi deneysel verilerle örtüşmektedir.  $5 < y^+ < 30$  aralığındaki bölge ise tampon tabaka olarak adlandırılır. Tampon tabakada,  $u^+ = y^+$  denklemi ve logaritma yasası geçerliliklerini yitirmektedir.  $y^+ > 30$  değerleri için ise logaritmik yasa hız profili yüksek oranda doğruluk göstermektedir (Engin, 2018; "Law of the Wall," 2021)



**Şekil 2.9.**  $Re_x = 1 \times 10^7$  değerinde düz bir plaka üzerindeki türbülanslı sınır tabakanın çeper değişkenleri yasası ile ifadesi (Leticia dos Santos, 2019)

#### 2.4. Akış Ayrılması

Akış boyunca gerçekleşen basınç değişimleri laminar ve türbülanslı sınır tabakalar üzerinde etkilidir. Basıncın akış doğrultusunda azaldığı (olumlu basınç gradyanı) akışlarda sınır tabaka genellikle incedir ve çepere sıkıca tutunmuş bir şekildedir. Akış doğrultusundaki basıncın arttığı (ters basınç gradyanı) durumlarda ise sınır tabaka içerisindeki bazı bölgelerde hız gradyanında gerilemeler görülebilir. Ters basınç gradyanının etkili olduğu bölgelerde sınır tabaka daha kalındır ve çepere sıkı tutunamamış olması sebebiyle yüzeyden ayrılmaya daha müsaittir. Sınır tabakanın, yüzey boyunca akışını devam ettiremediği ve yüzeyden uzaklaştığı durum sınır tabaka ayrılması olarak adlandırılır. Ters basınç gradyanının etkili olduğu akış bölgelerinde, yüzeye yakın kısımlarda kinetik enerji azalır ve ters akışlar gözlemlenir. Şekil 2.10'da sınır tabakada gerçekleşen akış ayrılmasının öncesi ve sonrası gösterilmiştir. Hız gradyanının sıfır ( $du/dy = 0 = \tau$ ) olduğu nokta ayrılma noktası (S) olarak tanımlanır (Umur, 2009).



**Şekil 2.10.** Bir yüzey üzerindeki akış ayrılması (Görsel <https://nptel.ac.in/content/storage2/courses/101106041/Chapter%203%20Lecture%208%202020-12-2011.pdf> adresinden alınmıştır.)

Akış ayrılması aynı zamanda cismin şekline de bağlıdır. Keskin köşeli ya da ani değişimlere sahip küt cisimlerde akış ayrılması daha kolay gerçekleşir. Akışkanın cismin yüzeyinden ayrılması ile sürekli dolanımlı ve girdapların olduğu düşük basınçlı ayrılmış bir bölge oluşur. Şekil 2.11’de bir uçak kanadı üzerindeki akışta gerçekleşen akış ayrılması gösterilmiştir. Aerodinamikte ise akış ayrılması sürüklenme kuvvetinin ve katsayısının artmasına sebep olur. Akış ayrılmasını geciktirmek ve akışın mümkün mertebe yüzeye yapışık olması sürüklenme katsayısını düşürmek için kritik öneme sahiptir. Bu durum ile ilgili günlük hayatta birçok mühendislik uygulaması mevcuttur. Örneğin; golf topu üzerindeki çukurlar, erken türbülansa geçişi sağlayan planör üzerindeki türbülötörler, uçaklarda kullanılan girdap üreteçleri ("Flow separation," 2021).

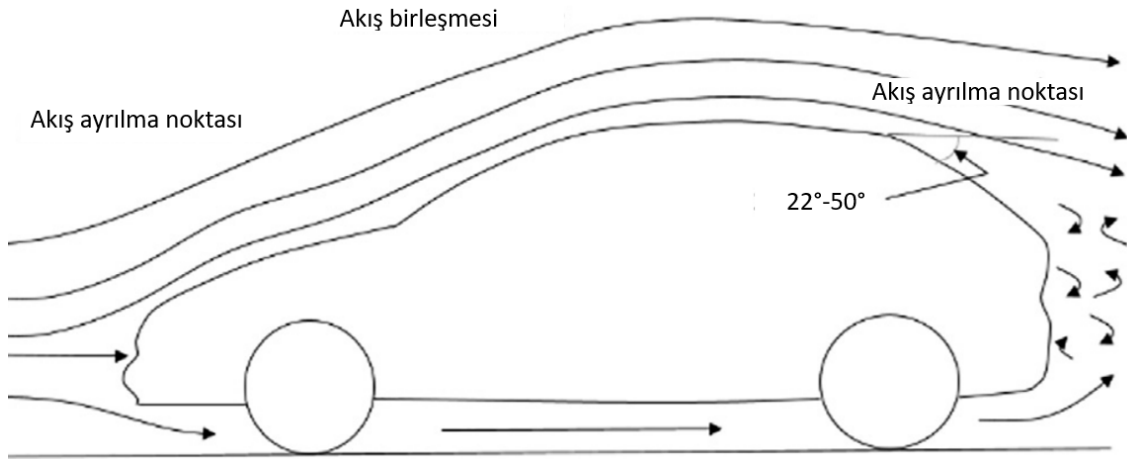


**Şekil 2.11.** Bir uçak kanadı üzerindeki ayrılmış akışın gösterimi (Görsel <https://nptel.ac.in/content/storage2/courses/101106041/Chapter%203%20Lecture%208%202020-12-2011.pdf> adresinden alınmıştır.)

## 2.5. Araç Üzerindeki Akış Yapısı

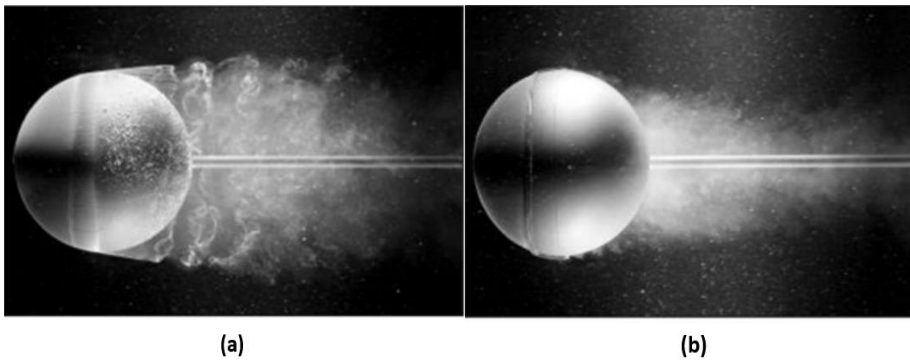
Temel akışkanlar dinamiği ve birçok mühendislik uygulamasında kullanılan akış ayrılması kontrolü oldukça ilgi gören ve önemli bir konudur. Araç üzerinde hareket eden havanın aracın arka kısmında ayrılması ile sürekli dolanımlı ve geriye doğru akışların ortaya çıktığı düşük basınçlı bir bölge oluşur. Bu bölge art izi bölgesi olarak adlandırılır ve basınç direncinin oluşumuna katkıda bulunur. Akışın ayrılma noktası art izinin boyutunu etkiler ve izin büyüklüğü ile doğru orantılı olarak sürüklenme kuvveti artar. Akış ayrılmasını engellemek ya da etkilerini azaltmak için çeşitli yöntemler mevcuttur (Nath et al., 2021).

Arka tarafın (arka cam) eğimi  $22^\circ$  ile  $50^\circ$  arasında olan araçlar genel olarak hatchback sınıfı araçlardır. Hatchback araçlar, günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu tip araçların arka kısmında oluşan düşük basınçlı art izi bölgesi fastback ve sedan araçlara oranla daha fazladır. Şekil 2.12’de bir hatchback araç üzerindeki hava akışı gösterilmiştir. Kaputun ön kısmı civarlarında ayrılan akış eğim boyunca devam eder ve aracın ön camının veya tavanın ön kısmında tekrardan birleşir. Arka kısma kadar devam eden akış yine arka camın orta kısımlarında ayrılarak arka bölgede düşük basınçlı bir akış bölgesi oluşturur (Selvi Rajan et al., 2013).



**Şekil 2.12.** Bir hatchback araç üzerindeki akış ayrılma ve birleşme noktaları (Sivaraj et al., 2021)

İki form arasındaki geçişin 12 dereceden fazla olduğu durumlarda girdap üreteçleri, difüzörler, rüzgarlıklar veya başka bir yöntemle araç üzerindeki hava akışına etki edilebilir. Sıradan bir aracı ele alırsak aracın ön cam ile tavan arasındaki bölgede veya tavan ile arka cam arasındaki bölgede seyir esnasında büyük girdapların oluştuğu gözlemlenir. Büyük girdaplar aracın aerodinamiğine olumsuz yönde etki eder. Araç üzerindeki akış ayrılması geciktirilerek büyük girdap oluşumlarının önüne geçilebilir. Girdap üreteçleri kullanılması ile beraber kritik Reynolds sayısında değişiklik gözlenir ve laminar akıştan türbülanslı akışa geçiş hızlandırılır. Akış ayrılmasını kontrol ederek sürüklenme katsayısını düşürmek burada temel amaçtır. Girdap üreteçler ilk olarak uçaklarda akış ayrılmasını geciktirmek amacıyla kullanılmıştır ve otomobillerde kullanılma sebebi de çok benzerlik göstermektedir (Selvi Rajan et al., 2013). Örneğin; pürüzsüz küre üzerindeki akışta  $10^5 \leq Re \leq 10^6$  aralığında bir noktada direnç katsayısında ani düşüş gözlemlenir. Direnç katsayısındaki bu ani düşüşün sebebi sınır tabakadaki akışın türbülanslı hale geçiyor olmasından kaynaklıdır. Küre üzerindeki akış ayrılmasının olduğu nokta daha da ileriye hareket eder ve kürenin arka bölgesinde oluşan art izinin boyutu azalır. Arka kısımda oluşan düşük basınç bölgesinin azalması ile basınç direncinin büyüklüğünde de azalma gözlemlenir. Sınır tabakanın yüzeyden ayrılması laminar akışta  $\theta \cong 80^\circ$  civarında gerçekleşirken, türbülanslı akışta  $\theta \cong 140^\circ$  civarlarında gerçekleşir. Bu durum akışkan içerisindeki enine yönde oluşan şiddetli çalkantılardan kaynaklıdır ve türbülanslı sınır tabakanın ayrılmadan önce yüzey boyunca daha ileri gitmesine olanak sağlar. Ayrılmanın gecikmesi ile daha küçük boyutlarda art izi oluşur ve daha küçük basınç direnci elde edilir (Selvi Rajan et al., 2013; Engin, 2018).



**Şekil 2.13.** (a)  $Re = 15000$ 'de pürüzsüz küre üzerindeki akışta oluşan art izi bölgesi ve (b)  $Re = 30000$ 'de engel teli takılmış kürenin art izi (Engin, 2018)

Şekil 2.13’de  $Re = 15\ 000$ ’de pürüzsüz küre ve (b)  $Re = 30\ 000$ ’de engel teli takılı küre üzerindeki akış görüntüleri karşılaştırıldığında sınır tabaka ayrılmasındaki gecikme açıkça görülmektedir (Engin, 2018).

## 2.6. Kaynak Özetleri

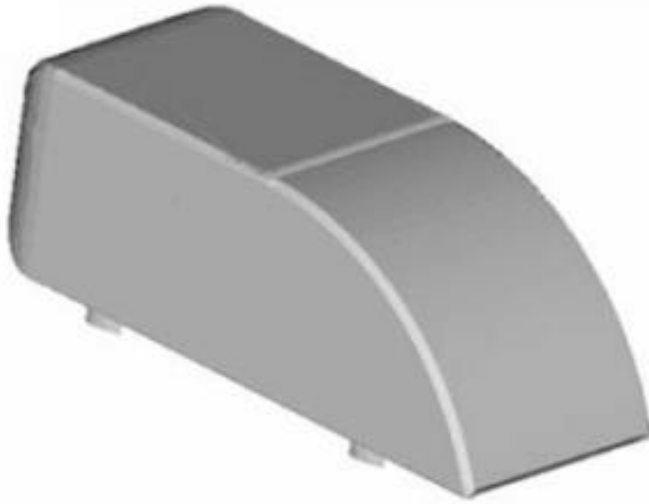
Literatürde binek araçların aerodinamik analizi ile ilgili çalışmalar oldukça çoktur. Araştırmacılar genel olarak, araç üzerindeki akış yapısına, aerodinamik katsayılara (sürüklenme, kaldırma ve basınç) ve sürüklenme direncini düşürmek veya negatif kaldırma kuvvetini arttırmak üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalar gerek sayısal analizlerle gerek rüzgar tünellerinde gerçekleştirilen deneysel yöntemlerle desteklenmiştir. Aerodinamik çalışmalar daha çok araçların  $C_d$  değerlerini iyileştirerek yakıt tüketimini düşürmek, aracın stabilitesini arttırmak ve aerodinamik gürültü seviyesini iyileştirmek amacıyla yapılmaktadır. Sürüklenme direncini azaltmak için genel olarak araç geometrisi üzerinde değişiklikler ya da modifikasyonlar yapılmıştır. Literatürde kullanılan standart referans modeller arasında en fazla karşılaşılan Ahmed modelidir. Ahmed modeli üzerinde değişiklik yapılmış modeller de sıklıkla karşımıza çıkmaktadır.

Palanivendhan et al., (2021), bir sedan araç üzerine eşit aralıklarla girdap üreteçleri yerleştirmiş, üreteçlerin sayısını ve hücum açılarını değiştirerek aracın aerodinamik direncini azaltmayı hedeflemiştir. Yapılan sayısal analizler sonucunda sürüklenme değerlerinde %12 ile %15 arasında iyileştirme elde etmiştir.

Beaudoin & Aider, (2008), aerodinamik çalışmalarda sıkça kullanılan Ahmed modeli üzerinde girdap üreteçleri kullanarak pasif akış kontrolü ile ilgili deneyler yapmıştır (Şekil 2.14). Akış ayrılmasının konumunun geometri zorlanmaması için arka kısmı eğimli Ahmed modelini kavisli olacak şekilde revize etmiştir. Üreteçlerin yüzey ile yaptığı açı, aralarındaki uzaklık, kavisli yüzey üzerindeki konumu, diziliş şekilleri ve serbest akış hızı gibi birçok parametrenin etkisini incelemiştir. Sürüklenme direncinde azalmayı maksimum %12 olarak elde ederken, kaldırma katsayısında serbest akış hızına yüksek oranda bağlı olarak %60’ların üzerine varan bir azalma elde edilebileceğini söylemiştir.

Ayrıca üreteçlerin akışın ayrılma noktasının ardına konumlandırılmasında da verimli olduğunu gözlemlemiştir.

Beaudoin & Aider, (2008), son olarak dinamik parametre seçip motorlu girdap üreteçler kullanarak yeni bir test düzeneği kurmuştur. Yeni test düzeneği ile sürüklenme katsayısında %14'e kadar azalma elde etmiştir. Bulunan sonuçları, cismin art izi bölgesinin yakınlardaki basınç ve hız ölçümleri göz önüne alınarak girdap üreteçlerinin etkisini analiz etmiştir. Sürüklenme ve kaldırma kuvvetindeki maksimum azalmanın arka eğim üzerindeki dolanımlı girdabın boyutunun yüksek oranda artması ile ilgili olduğunu tespit etmiştir.



**Şekil 2.14.** Arka kısmı eğimli ahmed modeli (Beaudoin & Aider, 2008)

Selvi Rajan et al., (2013), çalışmasında 1:10 ölçekli ahşap malzemeden üretilen bir araç modeli kullanmıştır. Ölçümleri, türbülansın göreceli olarak düşük olduğu cepheden gelen rüzgar koşullarında yürütmüştür. Çalışmada, iki tip girdap üretici kullanmış ve bunların çeşitli konumlarda olması durumunu incelemiştir. Aracın tavanın ön kısmına girdap üreteç yerleştirdiği durumda direnç katsayısında önemli bir azalma gözlemlemiştir. Çeşitli konfigürasyonlar sonrası sürüklenme katsayısında %22 civarında düşüş elde etmiştir.

Subbiah et al., (2020), hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanarak çeşitli biçimlerdeki girdap üreteçlerin bir binek otomobilin sürtünme direnci üzerindeki etkisini incelemiştir. Ayrıca bu çalışmada spoiler ve girdap üreteç birlikte kullanılarak aracın aerodinamik karakteristikleri irdelenmiştir. Girdap üreteçlerin sürüklenme kuvvetlerini azalttığını ve girdap üreteçlerin tasarımlarının bu kuvvetler üzerinde etkili olduğunu tespit etmiştir. Deneysel verilerle hesaplamalı akışkanlar dinamiği sonuçlarını kıyaslamış ve yaklaşık olarak aynı sonuçları gözlemlemiştir.

Bruneau et al., (2014), çalışmasında arka kısmı kare biçiminde olan Ahmed modelini kullanarak doğrudan sayısal simülasyonlar gerçekleştirmiştir. İlk olarak çeperden uzaklaşan girdapların sürüklenme üzerindeki etkisini analitik olarak incelemiştir. Yüzeyle etkileyen basınç kuvvetlerinin büyüklüğünün, girdapların yüzeyden ayrılma hızına ve bunların sirkülasyonuna bağlı olduğunu tespit etmiştir. Gelişigüzel bir girdap kullanarak sayısal simülasyonla bunu doğrulamıştır.

Daha sonra sürüklenme katsayısını azaltmak için aktif ve pasif akış kontrol yöntemlerini kullanmıştır. Aktif akış kontrolü için kapalı-döngü yöntemini kullanırken, pasif akış kontrolü için tavan kısmında gözenekli bir katman kullanmıştır (Şekil 2.15). Son olarak bu iki kontrol tekniğini birleştirerek sürüklenme katsayısında %31'lik bir azalma kaydetmiştir.

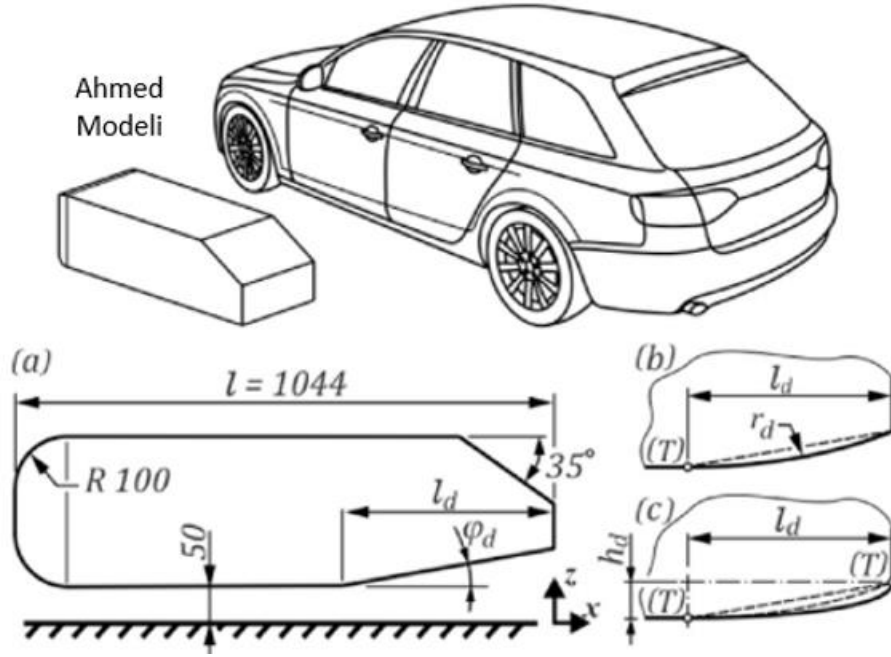


**Şekil 2.15.** Modelin tavanı üzerindeki gözenekli tabakanın pozisyonu (Bruneau et al., 2014)

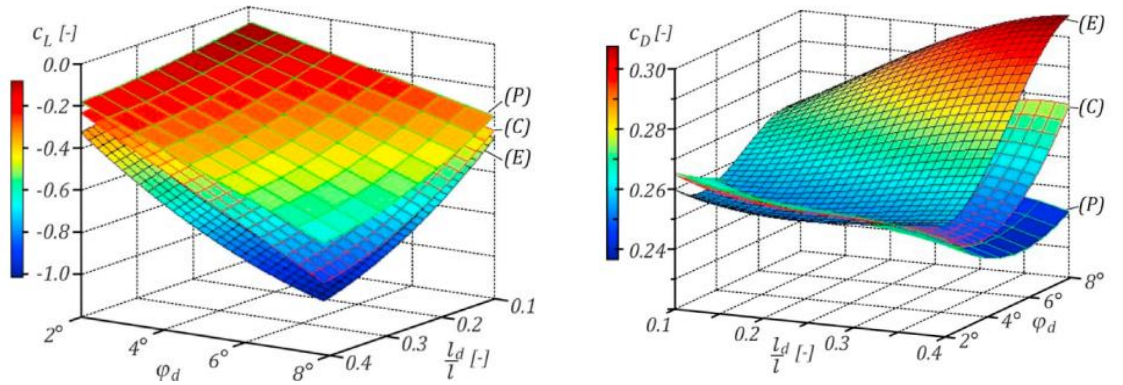
Huminic & Huminic, (2020), çalışmasında dairesel ve eliptik gövde altı difüzörlerle donatılmış bir küt cismin aerodinamik analizini yapmıştır (şekil 2.16). Analizinde difüzörlerin açısını ve uzunluğunu, hatchback araçlar için geçerli olan aralıklarda



sistematik olarak değiştirmiştir. Elde ettiği sonuçları ise düz gözde altı difüzörü için elde edilenlerle karşılaştırmıştır. Şekil 2.17’de çalışmada kullanılan difüzörler ile ilgili üç boyutlu sürüklenme ve kaldırma katsayısı grafikleri mevcuttur. Kavisli difüzörlerin kullanılması ile kaldırma kuvveti ile ilgili olan yere basma kuvvetinde %20 den fazla artış gözlenmiştir. Ayrıca kk, orta açılı ve kısa difüzörler için kavisli difüzörlerin düzlem difüzörlere oranla daha kk sürüklenme değerlerine yol açtığını gözlemlemiştir. Kavisli kısa difüzörlerin aerodinamik açıdan daha uygun olduğunu ileri srmştir.

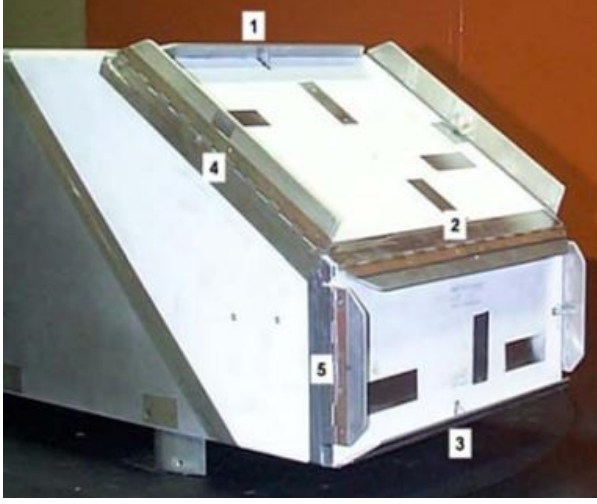


**Şekil 2.16.** Ahmed modelinin üç boyutlu görünümü, düzlemsel (a), dairesel (b) ve eliptik (c) gövde altı difüzör (Huminic & Huminic, 2020)



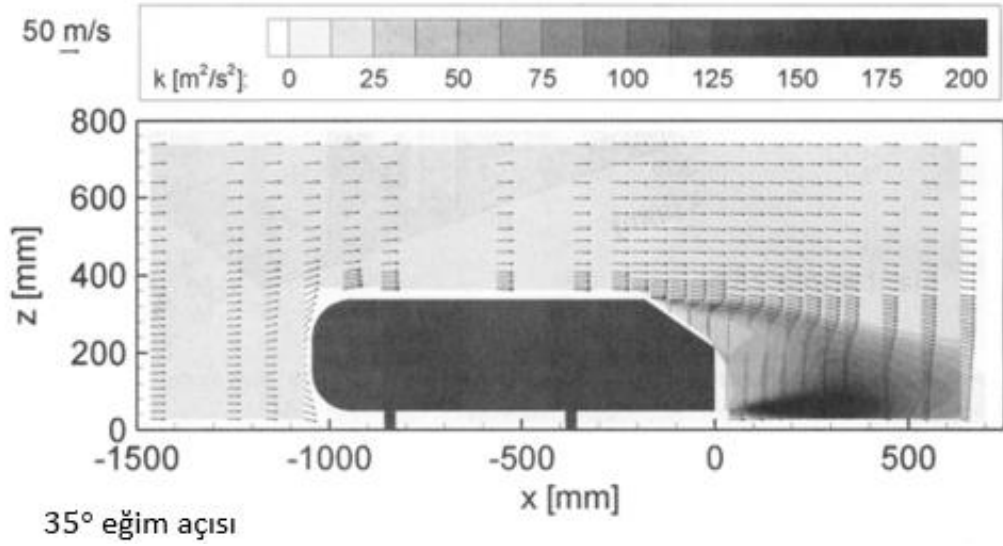
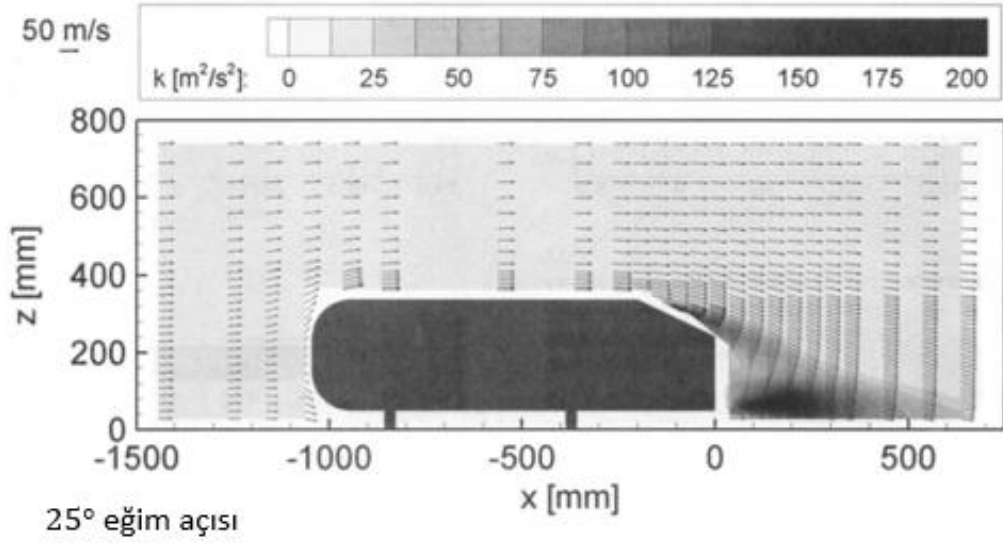
**Şekil 2.17.** Düzlem, dairesel ve eliptik difüzörler için  $C_d$  ve  $C_l$  katsayılarının 3-B grafikleri (Huminic & Huminic, 2020)

Aider et al., (2010), klasik bir Ahmed modelinin arka kısmına yerleştirilmiş çeşitli konumlardaki kanatçıkların etkisini 20, 30 ve 40 m/s hızındaki serbest akış şartları için değerlendirmiştir (Şekil 2.18). Sürüklenme kuvvetinde düşüşün en çok görüldüğü durum kanatçıkların arka eğimin yan kenarlarına (%17,6) ve arka eğimin üst kısmına (%15) konumlandırılması ile elde edilmiştir. PIV ölçümleri, sürüklenme kuvvetinde düşüşün maksimum olduğu durumda akışın arka eğim üzerinden tamamen ayrıldığını açık bir şekilde göstermiştir. Modelin ilk halinde mevcut olan uzunlamasına girdaplar kanatçıkların kullanımı ile ortadan kalkmıştır. Yazar, başka konfigürasyonlarla sürüklenme ve kaldırma katsayılarında sırası ile %25 ve %107 oranında azalma elde edilebileceğini iddia etmiştir.



**Şekil 2.18.** Modelin her bir arka kenarına konumlandırılmış olan yedi adet kanatçık (Sayılar her bir kanatçık konfigürasyonu için kullanılmıştır) (Aider et al., 2010)

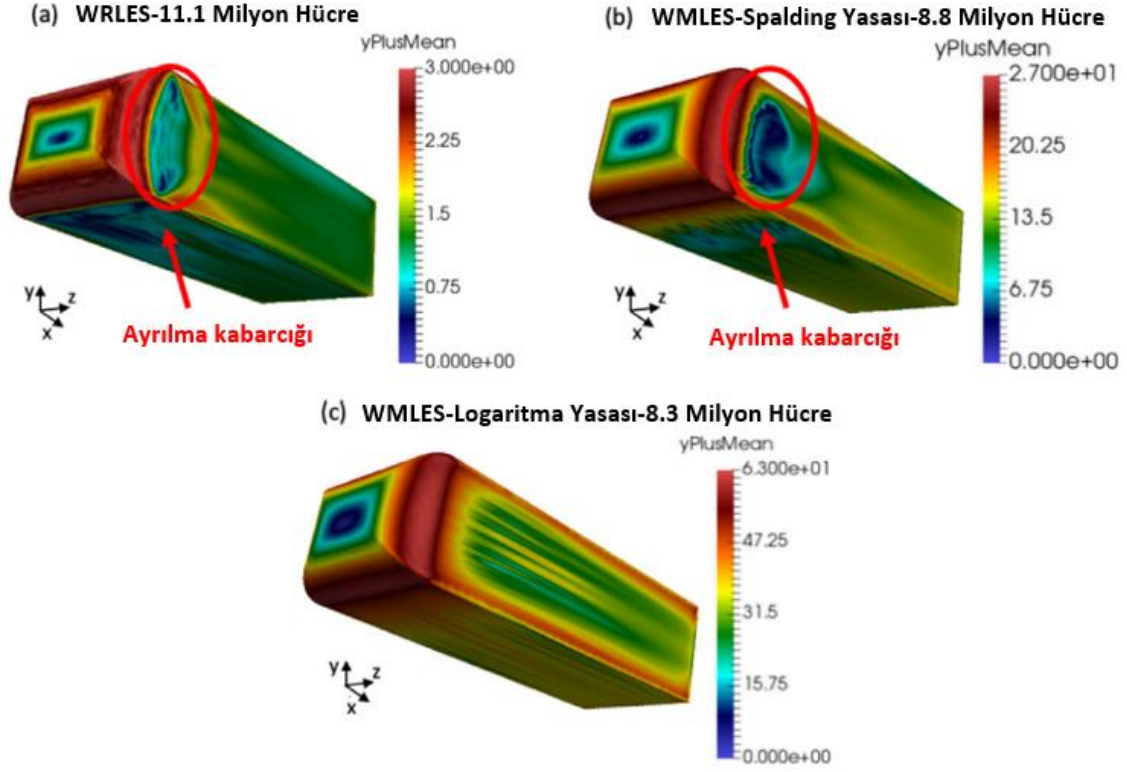
Lienhart & Becker, (2003), basitleştirilmiş araba modeli olarak bilinen Ahmed modeli çevresindeki akış ve türbülans özelliklerini detaylı olarak incelemiştir. 25° ve 35° arka eğime sahip iki model üzerinde LDA (Lazer Doppler Anemometri), HWA (Sıcak Tel Anemometri) ve statik basınç ölçümleri gerçekleştirmiştir. Lienhart & Becker, (2003) bu çalışmada, aracın sürüklenme katsayısı üzerinde büyük etkisi olan art izi bölgesinin düzgün bir şekilde elde edilmesinde belirleyici olan türbülans modelleri hakkında deneysel veriler sağlamak istemiştir. Şekil 2.19’da çalışma süresince elde edilen türbülans kinetik enerji ve hız dağılımları ile ilgili veriler mevcuttur.



**Şekil 2.19.** 25° ve 35° arka eğim açısına sahip modellerin hız vektörlerinin ve türbülans kinetik enerjilerinin karşılaştırılması (Lienhart & Becker, 2003)

Hesse & Morgans, (2021), arka kısmı küt olan 1:4 ölçekli Ahmed modeli çevresindeki hava akışını incelemiştir. Çalışma,  $Re_H = 33,333$  değerinde ve büyük girdap simülasyonları (LES) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hem duvar çözümlü (WMLES) hem de duvar modelli (WMLES) girdap simülasyonları tercih edilmiştir. Duvar modelleri olarak Spalding'in çeper yasası ve Logaritmik çeper yasası kullanılmıştır. Model üzerindeki  $y^+$  ve xz düzlemi üzerindeki türbülans kinetik enerji dağılımları tercih edilen analiz konfigürasyonları için sırası ile Şekil 2.20 ve Şekil 2.21'de gösterilmiştir.

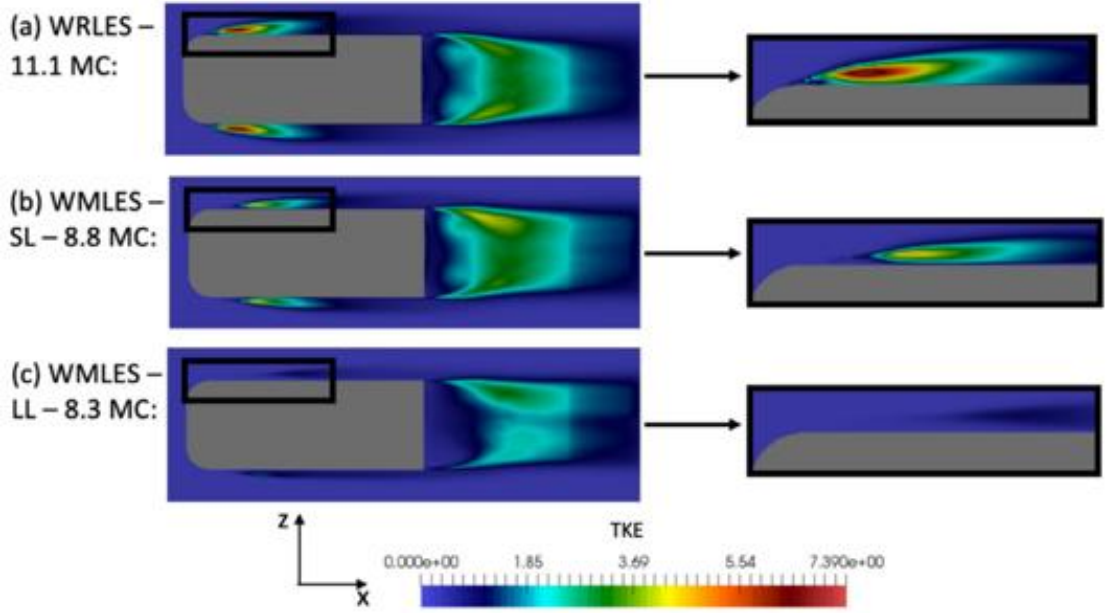
Bu çalışmanın amacı, modelin arka kısmında oluşan art izinin farklı yatay pozisyonlar arasındaki çift modlu geçişini araştırmaktır.



**Şekil 2.20.** 11,1 milyon hücreli WRLES, 8,8 milyon hücreye sahip Spalding yasası ile kullanılan WMLES ve 8,3 milyon hücreye sahip Logaritma yasası ile kullanılan WMLES simülasyonlarının ortalama  $y^+$  değerleri (Hesse & Morgans, 2021)

**Çizelge 2.1.** Çalışmada kullanılan simülasyonlar sonucu elde edilen aerodinamik veriler (Hesse & Morgans, 2021)

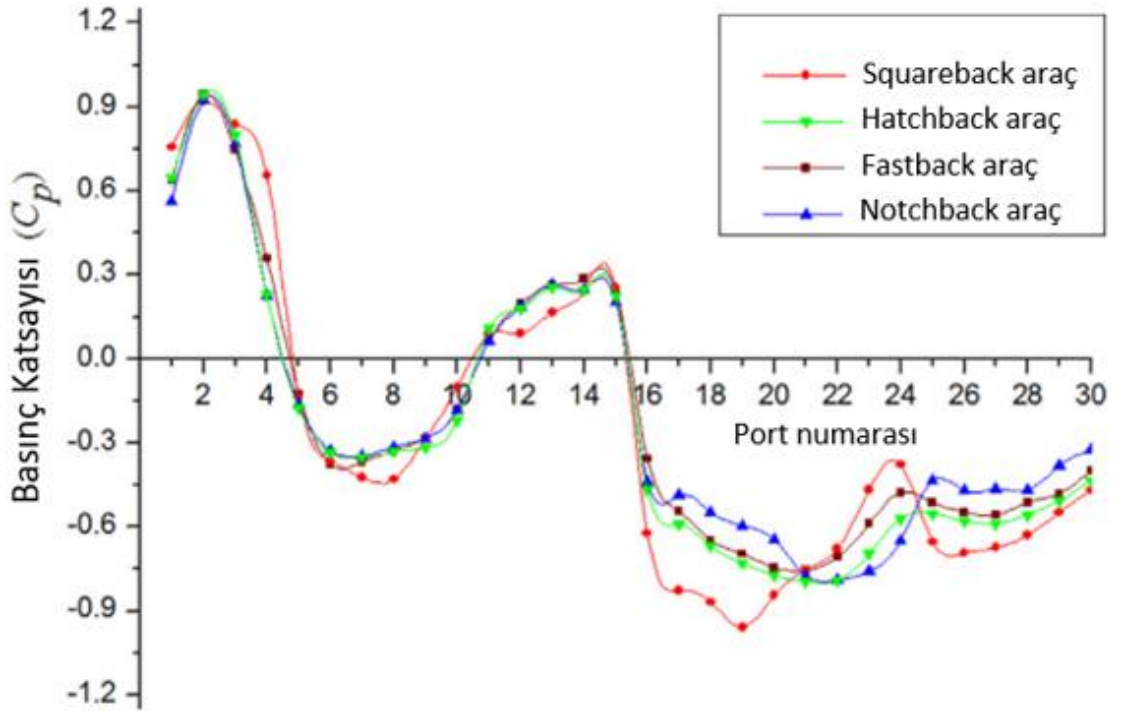
Simülasyon	$\Delta L_{art\ izi}$	$\bar{C}_D$	$\bar{C}_L$	$\bar{C}_{PB}$	$\bar{L}_B$
WRLES - 11.1 MC	$0.413\lambda_T$	0.364	-0.0548	-0.201	1.417H
WMLES - SL - 8.8 MC	$0.413\lambda_T$	0.365	-0.0506	-0.204	1.403H
WMLES - LL - 8.8 MC	$0.413\lambda_T$	0.346	-0.0526	-0.203	1.444H
WMLES - LL - 8.3 MC	$0.413\lambda_T$	0.369	-0.0405	-0.157	1.500H
WMLES - SP - 8.3 MC	$0.413\lambda_T$	0.375	-0.0383	-0.158	1.472H
Grandemange et al. [31]	-	-	-	-0.190	1.418H



**Şekil 2.21.** Modelin xz düzlemi üzerine yansıtılan türbülans kinetik enerji kontörleri (Hesse & Morgans, 2021)

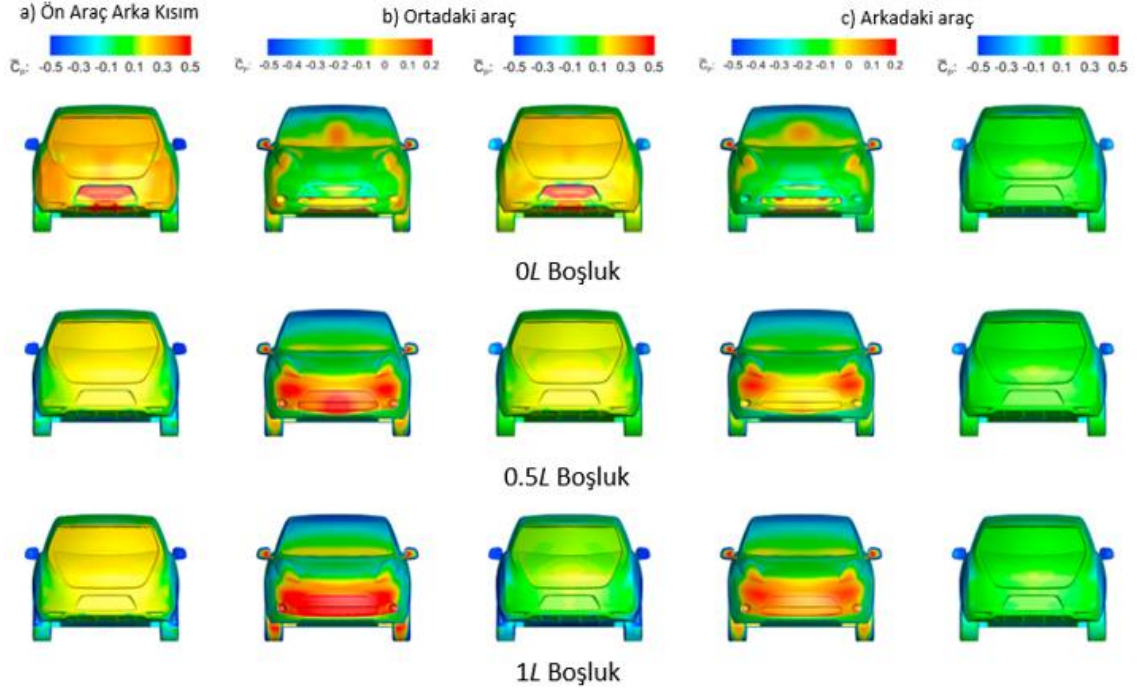
Verma et al., (2021), bir binek aracın arka kısmına yerleştirilen belirli yükseklikteki ve dudak biçimindeki rüzgarlığın açısının kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerine etkisini araştırmıştır. Rüzgarlığın açısının artması ile sürüklenme kuvvetinin azaldığı sonucuna varmıştır. Hem sürüklenme kuvveti hem de aşağı doğru kaldırma kuvveti açısından en uygun durumun  $6^\circ$  ve  $10^\circ$  arasındaki açılarda olduğunu elde etmiştir.

Sivaraj et al., (2021), araç etrafındaki akış yapısını incelemek için çalışmada, 1:10 ölçekli hatchback, fastback, sedan ve arka kısmı kare biçiminde olan binek araç modellerini tercih etmiştir. Deneysel çalışma açık devre ses altı rüzgar tüneline ve çeşitli hızlarda gerçekleştirilmiştir. Yazar çalışmada akış ile ilgili bilgi sahibi olmak için araçların sürüklenme, kaldırma ve basınç katsayı değerlerini incelemiştir. Araştırma sonucunda sedan ve fastback tipindeki araç modellerinin aerodinamik açıdan daha başarılı olduğunu elde etmiştir. Hatchback ve squareback modellerinin ise aerodinamik iyileştirme çalışmaları için iyi bir potansiyele sahip olduğunu ve özellikle bu tip araçların arka kısmı ile ilgili modifikasyonların yapılabileceğini öne sürmüştür. Şekil 2.22'de çalışmada kullanılan araç modellerinin üzerindeki basınç dağılımı gösterilmiştir.



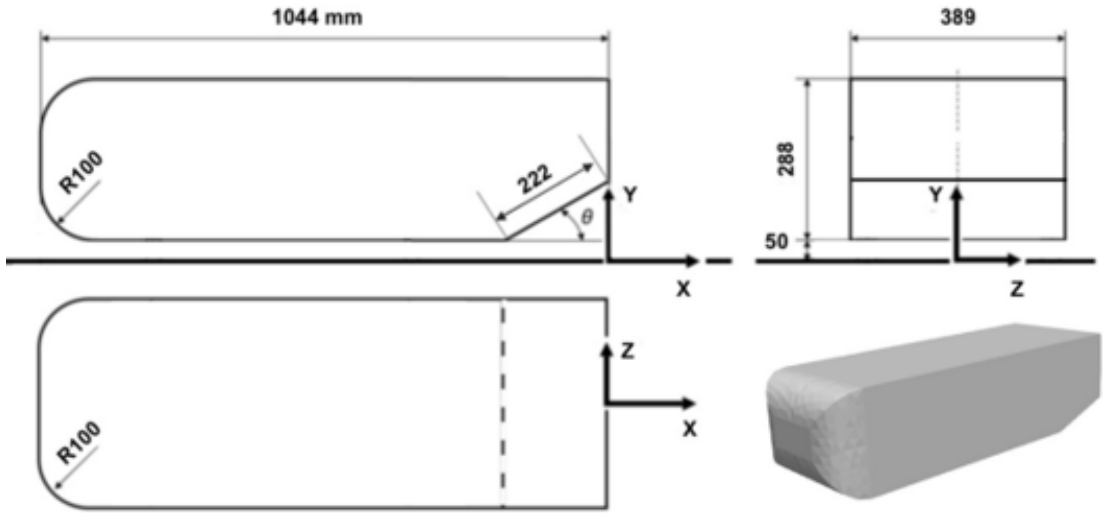
**Şekil 2.22.** Araçların arka kısmında oluşan basınç katsayısı dağılımları (Sivaraj et al., 2021)

Ebrahim & Dominy, (2020), bir binek araç modelinin tek, arka arkaya ikili ya da üçlü olarak sıralanması durumları için hem sayısal hem rüzgar tüneline aerodinamik analizler gerçekleştirmiştir. Araçlar arasındaki mesafe parametrik olarak değiştirilmiş ve üç çeşitli değer (0 L, 0,5 L ve 1 L) kullanılmıştır. Aerodinamik kuvvetlerin ölçümü, yüzeyler üzerindeki basınçlar ve araçların arka kısmında oluşan art izi bölgeleri incelenmiştir. 0 L, 0,5 L ve 1 L aralıklarla arka arkaya sıralanan araçların yüzeylerindeki basınç katsayısı dağılımları Şekil 2.23’de gösterilmiştir. İki araçtan oluşan bir takım arkadaki aracın sürüklenme kuvvetinin yakın mesafeler (0-0,5 L) için izole haldeki duruma göre daha yüksek olduğunu bulmuştur. Öndeki aracın sürüklenme direncinde düşüş gözlemlemiştir ve bunun arka kısımda oluşan art izinin enine ve boyuna genişlemesinden kaynaklandığını açıklamıştır. Üç araçtan oluşan bir takım konfigürasyonunda, ön ve ortadaki aracın art izi bölgesinin 2 araçlı takıma benzer olduğunu söylemiştir. Bu konfigürasyonda tüm araçlar üzerine etkiyen sürüklenme kuvvetinin azaldığını ve bunun akışın çarpma enerjisinin düşmesi ile ilgili olduğunu tespit etmiştir.

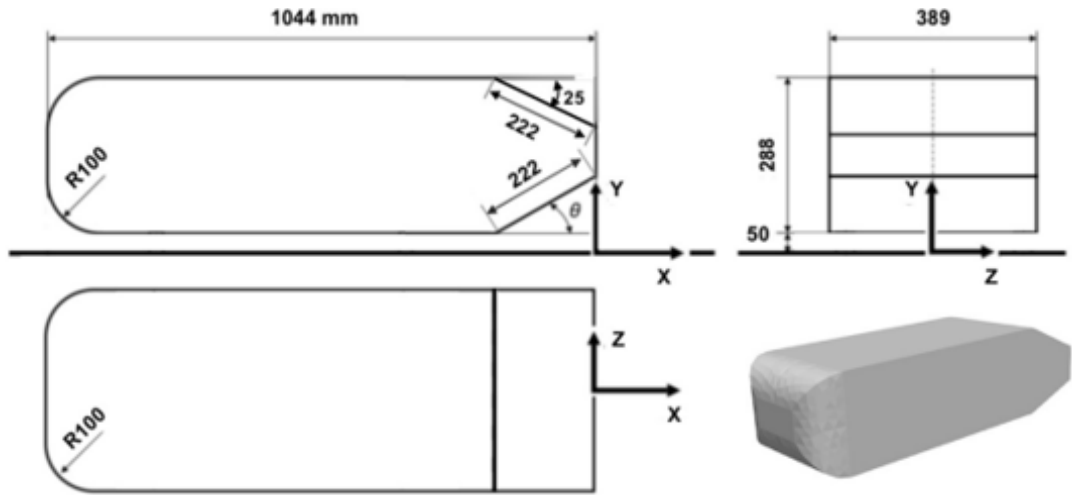


**Şekil 2.23.** Arka arkaya dizilmiş üç aracın  $0L$ ,  $0,5L$  ve  $1L$  aralıklı konfigürasyonları için yüzey basınç katsayıları (Ebrahim & Dominy, 2020)

Buscariolo et al., (2021), genellikle yüksek performans ve yarış arabalarında yere basma kuvvetini arttırmak için kullanılan gövde altı difüzörlerini Ahmed modeli üzerinde incelemiştir. Arka üst kısmının  $0^\circ$  ve  $25^\circ$  eğime sahip olduğu iki tip konfigürasyon kullanmıştır. Şekil 2.24’de ve Şekil 2.25’de çalışmada kullanılan konfigürasyonlar mevcuttur. Bu iki tip konfigürasyon için difüzör açısını  $0^\circ$ - $50^\circ$  arasında  $10^\circ$  aralıklarla değiştirerek sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerini incelemiştir. Çalışmasında difüzör uzunluğunu arka kısmın eğimi ile aynı tutmuştur. Sonuçları  $Re = 1.7 \times 10^6$  değeri ve hareketli zemin koşulları için değerlendirmiştir. Doğruluk oranını yükseltmek hem de geometrik iyileştirme için klasik ağ geliştirmesini polinom genişletmeleriyle birleştiren spektral/hp eleman ayrıklaştırma simülasyonunu kullanarak daha kaliteli bir HAD analizi gerçekleştirmek istemiştir.



**Şekil 2.24.** Gövde altı difüzör ile donatılmış squareback Ahmed modeli (Buscariolo et al., 2021)

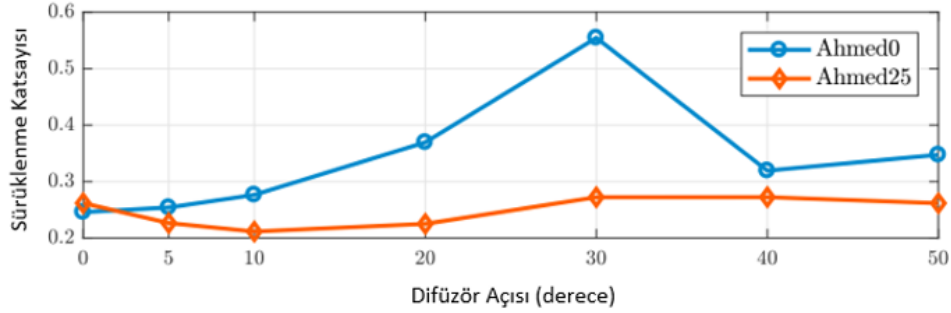


**Şekil 2.25.** Gövde altı difüzör ile donatılmış  $25^\circ$  arka eğime sahip Ahmed modeli (Buscariolo et al., 2021)

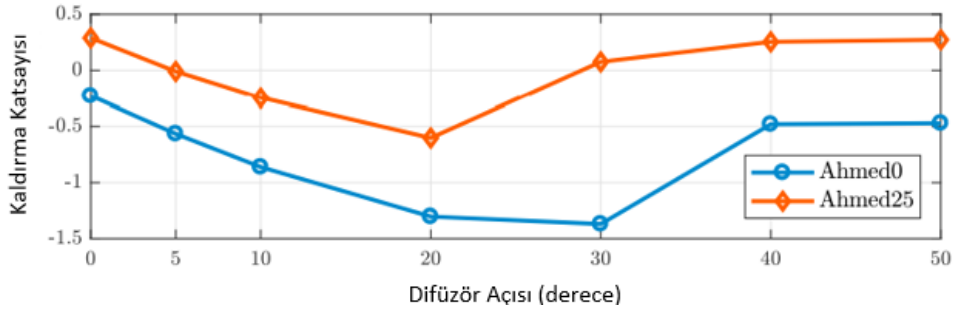
Çalışmada kullanılan iki tip Ahmed modeli için difüzör açılarının modelin sürüklenme ve kaldırma katsayılarına etkisi Şekil 2.26 ve Şekil 2.27’de gösterilmiştir. Yazar, modelin arka üst eğiminin  $0^\circ$  olduğu konfigürasyon için difüzör açısının  $30^\circ$  olduğu durumda en yüksek sürüklenme ve negatif kaldırma kuvvetlerini elde etmiştir.  $30^\circ$  üzerindeki difüzör açılarında akışın tamamen difüzörden ayrıldığını gözlemlemiştir. Arka üst eğimin  $25^\circ$  olduğu konfigürasyonda maksimum negatif kaldırma kuvvetini difüzör açısının  $20^\circ$



olduğu durum için elde etmiştir. Sürüklenme kuvveti ile ilgili olarak maksimum değer 30°lik difüzör açısı için elde edilmiştir.



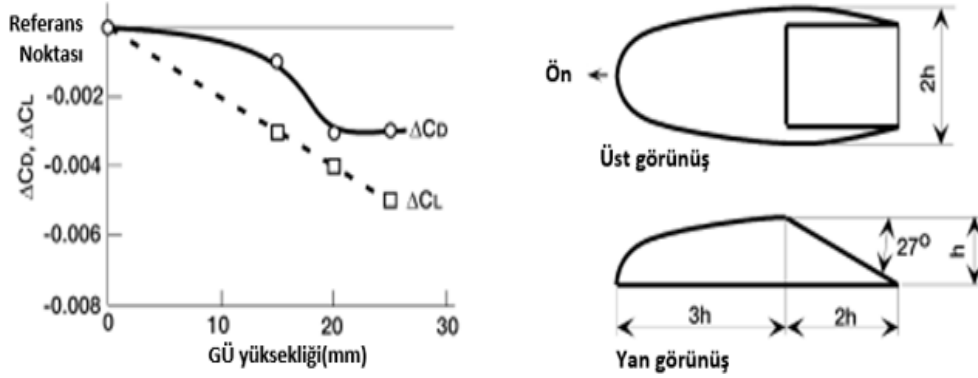
**Şekil 2.26.** Çalışmada kullanılan iki tip Ahmed modeli için difüzör açısının sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisi (Buscariolo et al., 2021)



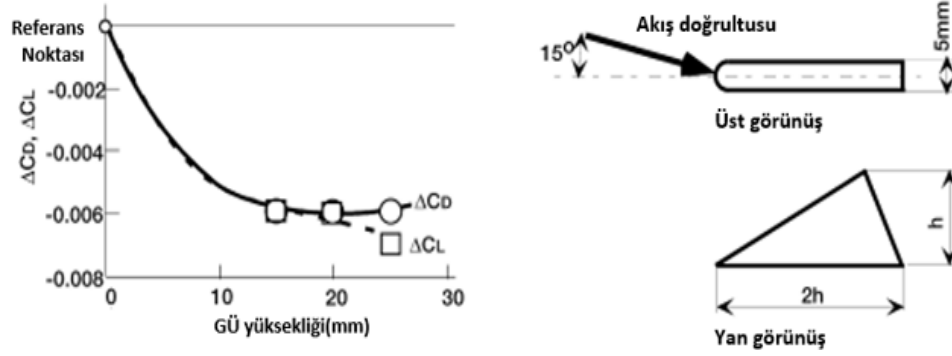
**Şekil 2.27.** Çalışmada kullanılan iki tip Ahmed modeli için difüzör açısının kaldırma katsayısı üzerindeki etkisi (Buscariolo et al., 2021)

Koike ve ark., (2004), araçlarda aerodinamik sürüklenmenin temel nedenlerinden biri olan arka kısımdaki akış ayrılmasını kontrol etmeyi amaçlamıştır. Aerodinamik özellikleri iyileştirmek için akış ayrılma noktasının hemen yukarı akışına girdap üreticileri ekleyerek testler gerçekleştirmiştir. Çalışmasında üçgen kanat ve yumru şekillerinde olmak üzere iki tip girdap üretici kullanmıştır. Girdap üreticilerin kalınlıklarının neredeyse sınır tabaka kalınlığı ile eşdeğer ve üreticiler arasındaki mesafenin 100 mm olmasının optimum konfigürasyon olduğu sonucuna varmıştır. Girdap üreticilerin bu parametrelere karşı çok hassas olmadığını ve optimum değer aralıklarının geniş olduğunu ifade etmiştir. Üçgen kanat şeklindeki girdap üreticilerin yumru şeklindekilerden daha verimli olduğunu tespit etmiştir. PIV ölçümleri ve HAD vasıtası ile toplam basınç ve hız dağılımlarını incelemiştir. Girdap üreticilerin akış yönünde girdaplar oluşturduğunu, alt ve üst sınır tabakaların karışmasını sağladığını tespit etmiştir. Bu karışımın akış ayrılma

noktası daha ileri kaydırıldığını dolayısıyla ayrılma bölgesinin daraldığını gözlemlemiştir. Yumru ve üçgen kanat girdap üreteçlerin görünüşleri sırası ile Şekil 2.28 ve Şekil 2.29'da verilmiştir. Ayrıca kullanılan girdap üreteç modellerinin yüksekliğinin aracın kaldırma ve sürüklenme katsayısındaki değişimleri ile bağıntısı Şekil 2.28 ve Şekil 2.29'da gösterilmiştir. Yapılan çalışma ile kaldırma ve sürüklenme katsayısında maksimum 0.006'lık bir düşüş elde etmiştir.



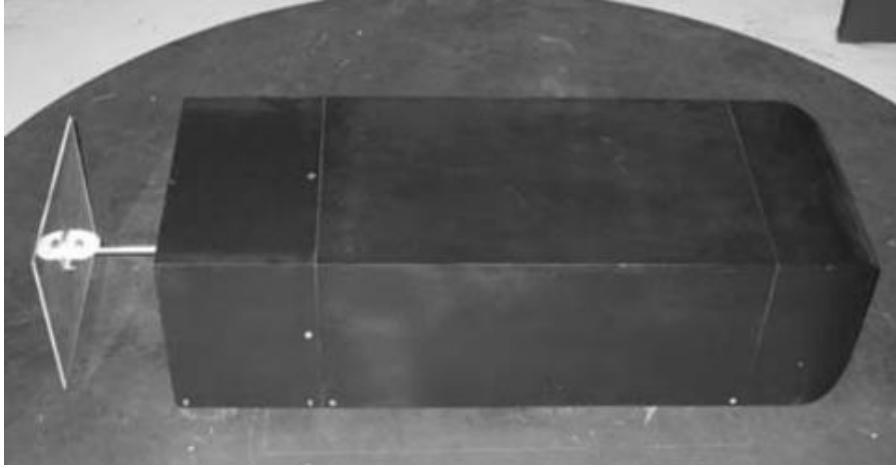
**Şekil 2.28.** Yumru girdap üreteçlerin kaldırma ve sürüklenme katsayıları üzerindeki etkisi (Koike ve ark., 2004)



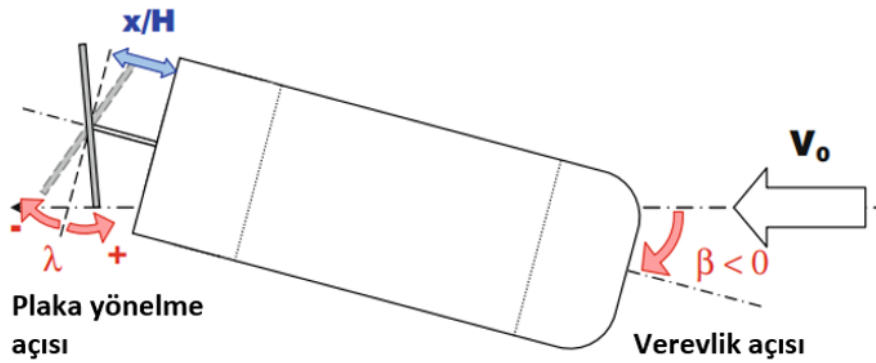
**Şekil 2.29.** Üçgen kanat girdap üreteçlerin kaldırma ve sürüklenme katsayıları üzerindeki etkisi (Koike ve ark., 2004)

Gilliéron & Kourta, (2010), sürüklenme kuvvetini azaltmak için basitleştirilmiş araç modelinin ön ve arka kısmına dikey ayırıcılar konumlandırmıştır (Şekil 2.30).  $Re = 1 \times 10^6$  ve  $Re = 1,6 \times 10^6$  değerleri arasındadır ve dikey ayırıcı plaka çeşitli açılarda yerleştirilerek sonuçlar gözlemlenmiştir. Plaka yönelme ve verevlilik açısının şematik gösterimi Şekil 2.31'de gösterilmiştir. Dikey ayırıcı plakanın aracın ön kısmına konumlandırıldığı ve sıfır eğrilik açısı durumunda yaklaşık olarak %28'lik bir azalma

elde etmiştir. Dikey ayırıcıların modelin arka kısmına konumlandırıldığı durumlarda Reynolds sayısının etkisinin düşük olduğunu ancak Reynolds sayısının artması ile direnç azalmasının arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca ayırıcı plakanın aracın ön kısmına konumlandırıldığı durumlarda Reynolds sayısının önemi, arka kısma konumlandırılmış konfigürasyona göre daha azdır.



**Şekil 2.30.** Squareback Ahmed modeli aşağı akımına konuşturulan dikey ayırıcı plaka (Gilliéron & Kourta, 2010)



**Şekil 2.31.** Verevlik açısı ve plaka yönelme açısının şematik gösterimi ve tanımı (Gilliéron & Kourta, 2010)

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Otomobil tasarımı görsel olarak göze hitap etmesinin yanı sıra aerodinamik açıdan da ayrıca önemlidir. Bu sebeple bu konuda tasarımcıların üzerine düşen yük oldukça fazladır ve yapılan tasarımlar sadece bilgisayar ortamında kalmamakla beraber birçok testten geçerek denenmesi gereklidir. Akışla ilgili testlerde genellikle iki tip yaklaşım metodu vardır. Bunlardan ilki, rüzgar tüneline veya başka bir tesiste test edilmesi için modelin yapılmasına ihtiyaç duyarken diğer yaklaşımda akışla ilgili denklemlerin sayısal olarak çözülmesini gereklidir. Sayısal çözümün düzgün bir şekilde yapılması gerekli deney sayısını azaltır ve böylece tasarım için gerekli olan süre kısalmıştır. Günümüzde mühendisler genellikle sayısal ve deneysel analizleri beraber uygulayarak çalışmalarını yürütürler. Sayısal yöntemle elde edilen sonuçlar deneysel verilerle kıyaslanarak, sayısal analizin doğruluğu değerlendirilir. Ayrıca sayısal analiz ile akış görselleştirme, hız konturları, basınç konturları ve kayma gerilmeleri gibi deneysel yollarla elde edilemeyen akışla ilgili genel özelliklerin incelenmesinde rahatlık sağlar.

#### 3.1. Sayısal Analiz

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), akışkan akışlarını ihtiva eden problemleri incelemek ve çözmek için nümerik analiz ve veri havuzunu kullanan akışkanlar mekaniğinin bir koludur. HAD, başta aerodinamik analiz, havacılık sektörü ve ısı transferi olmak üzere endüstri ve mühendislik problemlerinde çok geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Karmaşık geometrili akışların klasik akışkanlar mekaniği denklemlerine uygulanması ile çözümü çok zor olan ifadeler elde edilir, hatta genellikle bu ifadelerin çözümü imkansızdır. Klasik akışkanlar mekaniğinde ancak birkaç basit geometri ve akış problemi için çözüm elde edilebilir. Karşılaşılan problemlerin çoğunun çözümü için hesaplamalı akışkanlar dinamiğine başvurmak gereklidir. Neredeyse bütün HAD problemlerinin temeli, tek fazlı akışları (gaz veya sıvı) tarif eden Navier-Stokes denklemleridir ("Computational fluid Dynamics," 2022).

Sınır şartları belirtilen yüzeylerin akışkan ile etkileşimini simüle etmek için bilgisayarlardan faydalanılır. ANSYS FLUENT, aerodinamik, türbülans, ısı transferi gibi konuları barındıran çok çeşitli akış problemlerinin HAD uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir akış simülasyon yazılımıdır. Bu çalışmada aerodinamik analizler için ANSYS FLUENT paket programı kullanılmıştır.

ANSYS FLUENT, denklem 3.1 ve denklem 3.2’de belirtilen süreklilik ve momentum denklemlerini çözmeye çalışır ve çözüm için sonlu elemanlar yöntemini kullanmaktadır. Sonlu elemanlar metodu, ısı transferi, akışkanlar mekaniği ve kütle transferi gibi mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir sayısal analiz metodudur. Bu yöntem, temel olarak sistemi sonlu eleman adı verilen daha küçük kontrol hacimlerine ayırmaktadır. Akış denklemleri, her bir kontrol hacmi için ayrıştırılır ve tekrar tekrar çözülür. Her bir kontrol hacmindeki değişkenlerin tüm sistem için elde edilmesi ile genel çözüme ulaşırlar. Sayısal HAD analizlerinde kullanılan kütle ve momentum korunum denklemleri en genel halleri ile aşağıda verilmiştir.

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

$$\rho \left( \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} - \rho \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \quad (3.2a)$$

$$\rho \left( \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} - \rho \left( \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) \quad (3.2b)$$

$$\rho \left( \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} - \rho \left( \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \quad (3.2c)$$

HAD yazılımlarından elde edilen sonuçların sağlanması genellikle deneysel ekipmanlarla (rüzgar tünelleri gibi) yapılmaya çalışılır. Ayrıca, sonuçların doğrulanması için belli bir problemin önceden yapılmış olan analitik veya ampirik analizleri referans olarak alınabilir. Tam ölçekli testlerin yapılması ile HAD sonuçlarının gerçek anlamda sağlanması yapılabilir ("Computational fluid Dynamics," 2022).

Günümüzde laminar akışların sayısal çözümü rahat bir şekilde yapılabilirken, türbülanslı akışlarla ilgili mühendislik problemlerinde türbülans modelleri kullanmadan

çözüm elde etmek neredeyse imkansızdır. Türbülanslı akışlara ait Reynolds gerilmelerinden kaynaklanan altı adet bilinmeyen, zaman ortalamalı skalar taşınım denklemlerinden üç bilinmeyen ve basınç bilinmeyeni oluşmaktadır. Türbülans modellerinin ortaya çıkışının temel amacı bu bilinmeyenleri çözmektir. Akışla ilgili mühendislik problemlerinin tümü için geçerli olabilecek evrensel bir türbülans modeli maalesef ki mevcut değildir. Analiz esnasında seçilecek olan türbülans modeli, akışın fiziğine, mevcut hesaplama kaynaklarına, istenen doğruluk oranı ve hesaplama için mevcut olan zaman miktarına göre bağlı olarak seçilmelidir. En uygun türbülans modeli seçimi için problem iyi analiz edilmeli ve türbülans modellerinin sınırları ve yetenekleri iyi anlaşılmalıdır. Mühendislik uygulamalarında sıkça karşılaşılan ve paket programdaki mevcut türbülans modelleri aşağıda verilmiştir:

#### Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) Türbülans Modelleri

-Spalart-Allmaras (Tek Denklem)

-k- $\epsilon$  Modelleri (İki Denklem)

Standart

RNG

Düzeltilmiş (Realizable)

-k- $\omega$  Modelleri (İki Denklem)

Standart

GEKO

BSL

SST

-Reynolds Gerilme Modelleri (Reynolds Stress Models)

-Laminer-Türbülanslı Geçiş Modelleri (Laminar-Turbulent Transition Models)

#### Ölçekli Çözüm Simülasyon Modelleri (Scale-Resolving Simulation)(SRS)

-Büyük Girdap Simülasyonu (LES)

-Hibrit RANS-LES Modelleri

-Ölçek Uyarlamalı Simülasyon (SAS)

-Bağımsız Girdap Simülasyonu (DES)

-SDES ve SBES (Shielded Detached and Stress-Blended Eddy Simulation)

-Bölgesel Modelleme ve Gömülü LES (ELES)

Bu tez çalışmasında türbülans modelleri, duvar yakını yaklaşımı ve duvar fonksiyonlarına değinilirken Ansys Help (<https://ansyshelp.ansys.com/>) adresinden faydalanılmıştır.

### 3.1.1. Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) Türbülans Modelleri

RANS modelleri, karmaşık türbülanslara sahip endüstriyel akışların hesaplanması için uygun ve en ekonomik yaklaşımdır. Bu yaklaşımın tipik örnekleri farklı formlarda olan  $k-\varepsilon$  ve  $k-\omega$  modelleridir. Bu modeller, çözümü basitleştirmek için problemi iki ilave taşıma denklemine dönüştürür ve girdap viskozitesini (türbülans viskozitesi) kullanarak Reynolds gerilmelerini hesaplar. Altı bağımsız Reynolds gerilmesinin her birini doğrudan elde etmek için her bağımsıza ait denklemi ve ölçek denklemini ( $\varepsilon$ -denklem ve  $\omega$ -denklem) çözen daha karmaşık RANS modelleri de mevcuttur. RANS modelleri birçok mühendislik problemi için uygundur ve istenen doğruluk düzeyini karşılar.

Spalart-Allmaras modeli, kinematik (girdap) viskozitesinin çözümü için modellenmiş taşıma denklemini çözen nispeten basit bir modeldir. Özellikle havacılık ve uzay uygulamaları için tasarlanmış olan bu modelin ters basınç gradyanlarına maruz kalan sınır tabakalarda iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda turbo makineler ile ilgili uygulamalarda rağbet görmeye de başlamıştır. Serbest kayma akışları için kalibre edilmeyen bu modelin genel amaçlar için kullanımı tavsiye edilmez (örneğin jet akışları).

$k-\varepsilon$  türbülans modelleri, endüstriyel CFD’de en yaygın kullanılan türbülans modelleri iki denklemlidir. Girdap viskozitesi yaklaşımı ile Reynolds gerilmelerini biçimlendirirler ve iki taşıma denklemini çözüme ulaştırırlar. Launder ve Spalding tarafından önerilmiş olan standart  $k-\varepsilon$  modeli bugüne kadar gelen süreçte birçok mühendislik problemine çözüm getirmiştir ve bu alanda lokomotif olmuştur. Çok sayıda türbülanslı akış için ekonomik ve makul oranda doğruluk sağlaması endüstriyel akış ve ısı transferi uygulamalarındaki popülerliğini açıklamaktadır.

Bazı  $k-\varepsilon$  modellerinin dezavantajı elverişsiz basınç gradyanları ve sınır tabaka ayrılmalarına karşı duyarsız olmasıdır. Genellikle, akış ayrılmalarını gözlemlere oranla daha gecikmeli ve azalmış bir şekilde öngörürler.

k- $\varepsilon$  ailesi standart, RNG ve düzeltilmiş (realizable) olmak üzere üç adet modelden oluşmaktadır. Her üç modelde k ve  $\varepsilon$  için benzer taşınım denklemlerine sahiptir. Aralarındaki temel farklar: türbülans viskozitesinin hesaplama yöntemi, k ve  $\varepsilon$ 'nın türbülans difüzyonunu belirleyen türbülanslı Prandtl sayıları ve  $\varepsilon$  denklemi içerisindeki oluşum ve yıkım terimleridir.

ANSYS FLUENT'te, diğer k- $\varepsilon$  türlerine göre düzeltilmiş (realizable) k- $\varepsilon$  modelinin kullanılması tavsiye edilmektedir. Düzeltilmiş k- $\varepsilon$  modeli, kayma akışları, serbest akışlar (jet ve karışım tabakaları dahil), kanal ve sınır tabaka akışları ve ayrılmış akışlar olmak üzere çok sayıda akışlar için kapsamlı şekilde doğrulanmıştır. Ayrıca k- $\varepsilon$  türbülans modelinin Geliştirilmiş Duvar Yaklaşımı (Enhanced Wall Treatment) veya Menter-Lechner Duvar Yakını Yaklaşımı ile kullanılması önerilir.

$\omega$ -denklemi,  $\varepsilon$ -denklemine göreceli olarak çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bunlar arasında en dikkat çeken, denklemin iki katmanlı bir yaklaşıma ihtiyaç duymadan viskoz alt tabaka aracılığı ile entegre edilebilmesidir. Bu durum, sağlam bir  $y^+$ 'a duyarsız duvar yakını yaklaşımının formülleştirilmesini nispeten daha basit hale getirir. Ayrıca, k- $\omega$  modelleri, elverişsiz basınç gradyanlarını, sınır tabaka akışlarını ve ayrılmalarını öngörmekte daha başarılıdır. Çözümün, kayma tabakası dışındaki serbest akışa ait k ve  $\omega$  değerlerine nispeten yüksek oranda duyarlı olması standart  $\omega$ -denklemi'nin olumsuz yönlerindedir. ANSYS FLUENT'te standart k- $\omega$  denkleminin tercih edilmesi bu sebepten dolayı önerilmez.

BSL ve SST k- $\omega$  modelleri,  $\varepsilon$ -denklemi ve  $\omega$ -denklemi'nin elemanlarını birleştirerek standart k- $\omega$  modelinin serbest akışa karşı olan hassasiyetini engellemek için tasarlanmıştır. Bununla beraber, SST modeli, düz yüzeyler üzerinde gerçekleşen akış ayrılmasını hassas bir şekilde hesaplamak için düzeltilmiştir. k- $\omega$  ailesinden BSL veya SST modelinin kullanılması önerilir. Belirtilen modeller aerodinamik analizler için kullanılan en yaygın türbülans modellerindedir. Duvar sınır tabakası karakteristiklerinin detaylarını daha doğru öngörme konusunda Spalart-Allmaras modelinden biraz daha başarılıdır. BSL ve SST k- $\omega$  modelleri, diğer  $\omega$ -denklemi tabanlı modeller gibi  $y^+$ 'a duyarsız duvar yakını yaklaşımını temelinde içerir.



Genelleştirilmiş  $k-\omega$  (GEKO) modelinin amacı, çok sayıda uygulamada kullanılacak esnekliğe sahip tek bir model sunmaktır. Çoğu uygulama için varsayılan ayarları yeterli olan GEKO modeli, modelin esas kalibrasyonu üzerinde negatif bir etki bırakmayacak şekilde belirli tipteki problemler için düzenlenebilen dört adet parametreye de sahiptir. Modelin optimizasyonu için etkili olan bu yöntemin, parametrelerin yanlış ayarlanması ile nasıl etkilere yol açacağını bilmek de ayrıca önemlidir.

Reynolds Gerilim Modelleri (RSM), girdap viskozite modelleri ile kolaylıkla elde edilemeyen çeşitli etkilere sahiptir. Güçlü rotasyon ve akım çizgisi eğriliğinin etkisiyle türbülansın stabil olması bunlardan en önemlisidir. Bunun yanı sıra kısmen ilave edilen denklemler ancak genellikle yakınsamanın azaltılması nedeni ile hesaplama sürelerinde önemli artış görülür. Hesaplamaya ayrılan zamanın artması her zaman doğruluğun artacağı anlamına gelmez. Bu nedenle bu modellerin üstünlüklerinin sağlandığı, özellikle güçlü girdapların ve dönüşlerin baskın olduğu akışlarda kullanılması tavsiye edilir. Sınır tabakaların önemli olduğu durumlarda, RSM'nin  $\omega$ - ya da BSL-denklemleri ile kombinasyonu  $\varepsilon$ -denklemleri ile kombinasyonundan daha sağlıklıdır. RSM'nin BSL ile kombinasyonu,  $\omega$ -denklemine veya iki denkleme sahip türbülans modellerinde karşılaşılan serbest akış hızına duyarlılığı ortadan kaldırır.

ANSYS FLUENT paket programında geçiş akışının tahmini için üç tip model mevcuttur ve bunlar Ölçek Uyarlamalı Simülasyon (SRS) modelleri ile birleştirilerek kullanılabilir.

- Geçiş SST modeli ( $\gamma - Re_\theta$  modeli olarak da bilinir),
- Aralıklı geçiş modeli ( $\gamma$  modeli olarak da bilinir),
- Geçiş  $k-k\ell-\omega$  modeli

Birçok uygulama için, üst kısımda belirtilen bu üç model benzer sonuçları verir. Geçiş SST modeli (Transition SST) ve Aralıklı geçiş modeli (the Intermittency Transition), SST modeliyle kombinasyonları nedeni ile Geçiş  $k-k\ell-\omega$  modeline göre tercih edilmesi daha uygundur.

### 3.1.2. Ölçekli Çözüm Simülasyon Modelleri (Scale-Resolving Simulation)

RANS modellerine alternatif olan Ölçekli Çözüm Simülasyonu (SRS), akış alanının bir kısmına ait türbülansların bir bölümünün çözümünü yapan modellerdir. Bu çalışmada yaygın kullanılan SRS modellerinden bazılarına değinilmiştir.

Büyük Girdap Simülasyonu (SRS), en çok bilinen SRS modellerinden biridir. Büyük türbülans yapılarının uzayda, zamanda ve akışın her bölgesinde ağ limitine kadar çözülmesi yaklaşımını temel alır. Akademik camiada yaygın kullanılmasına rağmen, endüstriyel uygulamalar üzerindeki etkisi sınırlı kalmıştır. Çeper sınır tabakaları için aşırı derecede çözünürlük ihtiyacının olması bunun başlıca sebeplerindedir. Duvarın yakın çevresindeki türbülanslı spektrumdaki en geniş ölçekler bile geometrik açıdan çok küçük kalır ve çözüm için çok iyi ağ yapısı ile küçük zaman adımlarına ihtiyaç duyulur. Ayrıca RANS modellerinden farklı olarak, ağ yapısı sadece duvara dik yönde iyileştirilemez, aynı zamanda duvara paralel yöndeki türbülansı da çözmelidir. Bu durum, sadece çok düşük Reynolds sayılı ve çok küçük ölçekteki akışlar için erişilebilirdir (LES'in nüfuz alanı duvara paralel sınır tabaka kalınlığının 10 ya da 100 katını geçmemelidir). Bundan dolayı, çeper sınır tabakaların çözülmesinin gerekli olmadığı veya düşük Reynolds sayısı nedeni ile sınır tabakanın laminer olduğu akışlarda kullanılması tavsiye edilir. Bu tarz problemlerde, WALE modeli en dengeli olanıdır. Modelin kompleksliği ve yaygınlığı arasında iyi bir uyuma sağlar. Aynı zamanda, herhangi bir modelden etkilenmeden laminer kayma (çeper) tabakalarının hesaplanmasına engel olmaz.

Duvar Modelli LES, LES'in bir alt modelidir. Duvarla sınırlandırılmış ve yüksek Reynolds sayılarına sahip akışlarda, klasik LES modeli için gerekli olan ağ çözünürlüğünün çok arttırılmasına ihtiyaç duyulmadan çözüm imkanı sunar. WMLES modelinde, ağ çözünürlüğü, her bir sınır tabaka hacmine karşılık gelen hücrelerin Reynolds sayısına büyük oranda bağımsızdır.

LES modellerinin yüksek çözünürlük ihtiyaçları nedeni ile son yıllarda bu modellere alternatif olarak birçok hibrit model geliştirilmiştir. Bu modeller, RANS ve LES yaklaşımlarının belirli öğelerini kombine ederek yüksek Reynolds sayılı akışlar için

çözüm imkanı sağlamaktadır. Hibrit modellerde, duvara yapışık sınır tabakalar genellikle RANS yaklaşımı ile ele alınırken, büyük ayrılmış bölgeler LES yaklaşımı ile ele alınır. Diğer bir deyişle geniş ayrılmış bölgeler için türbülans spektrumunun uzay ve zamanda kısmi çözünürlüğü gerçekleştirilir. Hibrit modellerin temeli, ayrılmış bölgede yeterli seviyede bir akış istikrarsızlığı oluşturarak türbülans yapıları oluşturmaktır. Bu durum, genellikle, URANS modellerinin küt cisimler arkasında gerçekleşen tek modlu periyodik girdap kopmalarını öngördüğü akışlarla alakalı bir hadisedir. Bahsedilen bu girdapların mevcut ağ sınırına kadar küçük girdaplar oluşturmaya hibrit türbülans modelleri müsaade etmektedirler.

“Ölçek Uyarlamalı Simülasyon (SAS) yaklaşımı, Menter ve diğerleri tarafından önerildiği gibi von Karman uzunluk ölçeğinin,  $L_{vK}$ , türbülans denklemlerine dahil edilmesine dayanmaktadır (BSL ve SST modelleri için  $\omega$ -denkleme dahil olur).” Von Karman uzunluk ölçeği,  $L_{vK}$ , hız vektörünün birinci türevinin ikinci türevine oranının von Karman sabiti ( $\kappa = 0.41$ ) ile çarpımı olarak ifade edilir.

$$L_{vK} = \kappa \left| \frac{U'}{U''} \right| \quad U'' = \sqrt{\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_k^2} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2}} \quad (3.3)$$

$$U' = S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

Von Karman uzunluk ölçeğinin eklenmesi ile, modelin uzunluk ölçeği akış içerisinde çözülmüş olan ölçeklere göre düzenlenerek yeterince düşük bir girdap viskozitesi elde edilir ve bu sayede LES modelini kullanmanın önü açılır.

Modelin RANS ile ilgili bölümünün ağ aralıklarından etkilenmemesi SAS yaklaşımının avantajlarından. Dolayısıyla DES’de gözlemlendiği gibi iyileştirilmiş ağ yapılı fakat yetersiz akış istikrarsızlığı nedeni ile model doğruluğunun bozulduğu problemlerle karşılaşılmasına SAS modeli müsaade etmez. Fakat akış istikrarsızlığının zayıf olduğu şartlarda SAS, RANS modunda kalır ve istikrarsız yapılar oluşturmaz.

Ayrılmış Girdap Simülasyonu (DES), türbülans uzunluk ölçeği  $L_t$ 'yi ağ aralığı  $\Delta_{max}$  ile mukayese ederek RANS ve LES arasında başarılı bir şekilde geçişi sağlar. RANS ve LES modeli arasındaki geçiş, her iki değişkenin minimum değerlerinin seçilmesi ile gerçekleştirilir. Türbülans uzunluk ölçeği ve ağ aralığının minimum değerlerinin seçilmesi ile  $k$ -denklemindeki  $\varepsilon$  denklem 3.4'de görüldüğü gibi revize edilir:

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{L_t} \rightarrow \varepsilon = \frac{k^{3/2}}{\min(L_t, c_{DES} \Delta_{max})} \quad (3.4)$$

Modelin ağ aralığını en küçük miktarda seçmesi ile çözüm LES modunda gerçekleşir. Ağ mesafesi açıkça bir şekilde DES modeline girmektedir. Bu durum, ağ çözünürlüğünün RANS ve LES arasında olduğu (DES modelinde gri bölge olarak bilinen) ve/veya akış istikrarsızlığının zayıf olduğu yani LES yapıların üretilmediği bölgelerde RANS çözümüne tesir edebilir. DES ile alakalı göz önünde bulundurulması gereken diğer bir konu da “ağ kaynaklı ayrılma” problemidir. Duvara bitişik haldeki sınır tabaka akışına ait ağın oluşması için ağ, DES kısıtlayıcının aktif olduğu ve RANS çözümüne etki ettiği bir noktaya tasfiye edilmelidir. Bununla beraber, çözülen türbülans yapıları RANS içeriğini azaltır. Akış istikrarsızlığı bu tarz durumlarda, RANS içeriğini dengeleme açısından yeteri kadar kuvvetli değildir. Bu durum, genellikle ağ yapısının iyileştirildiği bölgelerde suni akış ayrılmalarına yol açar (sıklıkla  $\Delta_{max} < \delta$  şartlarında gerçekleşir). Menter ve arkadaşları tarafından sınır tabakaları DES kısıtlayıcıdan korumak için SST-DES modellerinin F1 harmanlama fonksiyonlarının kullanılması önerilmiştir. Daha sonrasında, bu duruma çözüm için Spalart ve diğerleri tarafından gecikmeli DES terminolojisi olarak literatüre geçen alternatif harmanlama fonksiyonları ileri sürülmüştür. İlk başta Spalart-Allmaras modeli için tasarlanan DDES modeli, iki denklemlilik BSL, SST ve  $k$ - $\varepsilon$  modelleri gibi ağ kaynaklı ayrılmaya (GIS) karşı kısıtlı koruma sağlamıştır. DDES fonksiyonları bu sebeple tekrardan düzenlenmiş olup BSL, SST ve  $k$ - $\varepsilon$  modellerinin tercih edildiği durumlarda, DDES fonksiyonlarının standart olarak seçilmesi tavsiye edilmektedir.

İlerleyen süreçte, Strelets ve diğerleri tarafından DDES fonksiyonlarına ek olarak Geliştirilmiş DDES (IDDES) formülasyonu sunulmuştur. IDDES, modelin LES bölgesini

çeper sınır tabakaların dış tarafına kadar büyütme metoduyla çalışır. Bu metot, çeper sınır tabakalarının Duvar-Modelli LES (WMLES) modunda simüle edilmesine müsaade eder. WMLES modelinde, değişken giriş şartlarının tanımlanmasıyla IDDES tıpkı LES modeli gibi uygulanır ve bu modelde ağ çözünürlüğü gereksinimleri LES modele oranla çok daha düşüktür. WMLES modundaki IDDES'in kullanımı, sadece asıl literatüre ve modelin gerektirdiği ağ çözünürlüğüne iyi bir şekilde hakim olunması durumunda tavsiye edilir.

Sonuç olarak, LES'in duvar sınır tabakalar için çok yüksek ağ çözünürlüğü ihtiyacı hibrit modellerin türetilmesi ve kullanılmasını beraberinde getirmiştir. Uygulama esnasında karşılaşılan olası zorluklara rağmen hibrit modeller, Ölçekli Çözüm Simülasyon (SRS) modellerinin kullanım alanını büyük oranda arttırma potansiyeline sahiptirler.

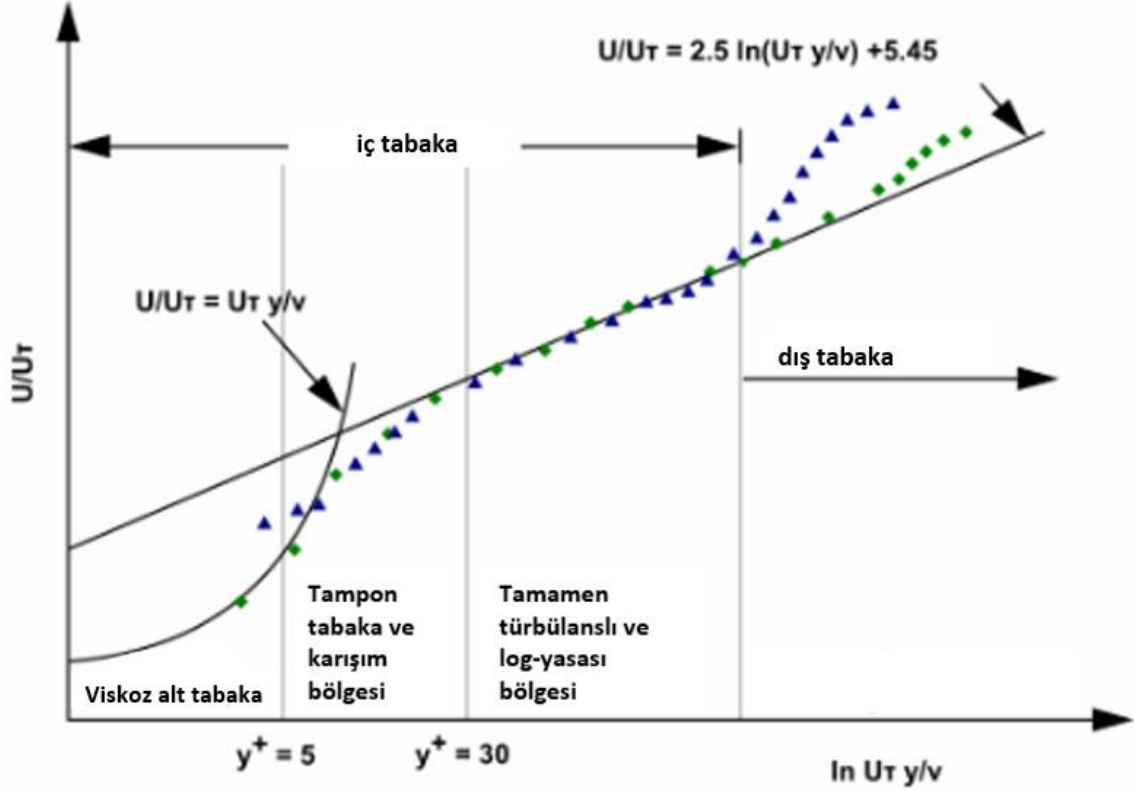
ANSYS FLUENT paket programında, DES ve DDES modellerinin yerini Korumalı Bağımsız Girdap Simülasyonu (SDES) ve Gerilim-Harmanlanmış Girdap Simülasyonu (SBES) almıştır.

### **3.1.3. Duvar Yakını Yaklaşımı**

Akış alanı içerisindeki duvarların, türbülanslı akışlar üzerinde etkisi büyüktür. Bu durum, ortalama hız alanının duvardaki kaymamazlık şartından etkilenmesi ile açıklanmaktadır. Ayrıca türbülans, çeperlerin varlığı nedeni ile çözülmesi zor türbülans yapıları oluşur. Çepere yakın bölgelerde, viskoz sönümlenme teğetsel hız değişimlerini azaltırken kinematik engelleme normal değişimleri azaltır. Duvara yakın bölgeden uzaklaşıldıkça, ortalama hızdaki büyük değişimler sebebiyle türbülans kinetik enerjisi üretilir ve hızla türbülans artışı gözlenir.

Çeperlerin ortalama türbülans ve girdap üzerindeki etkisi ne derecede önemli ise sayısal çözümün doğruluğunda da duvar yakını modellemesi o oranda önemlidir. Sonuç olarak, duvara yakın akış bölgesinde çözüm değişkenlerinde yüksek gradyanlar gözlemlenir, momentum ve diğer skaler olan taşınımalar en güçlü biçimde cereyan eder. Dolayısıyla bu bölgedeki akışın doğru tanımlanması, katı yüzeylerle sınırlandırılmış türbülanslı akışların başarılı bir şekilde öngörülmesi açısından kritiktir.

Çepere yakın akış bölgesinin sırası ile viskoz alt tabaka, ara tabaka ve türbülanslı tabaka olarak üçe ayrılabilceği yapılan çok sayıdaki deneyle doğrulanmıştır. Şekil 3.1’de duvara yakın bölgenin altbölümleri yarı logaritmik koordinatlarda çizilmiştir.

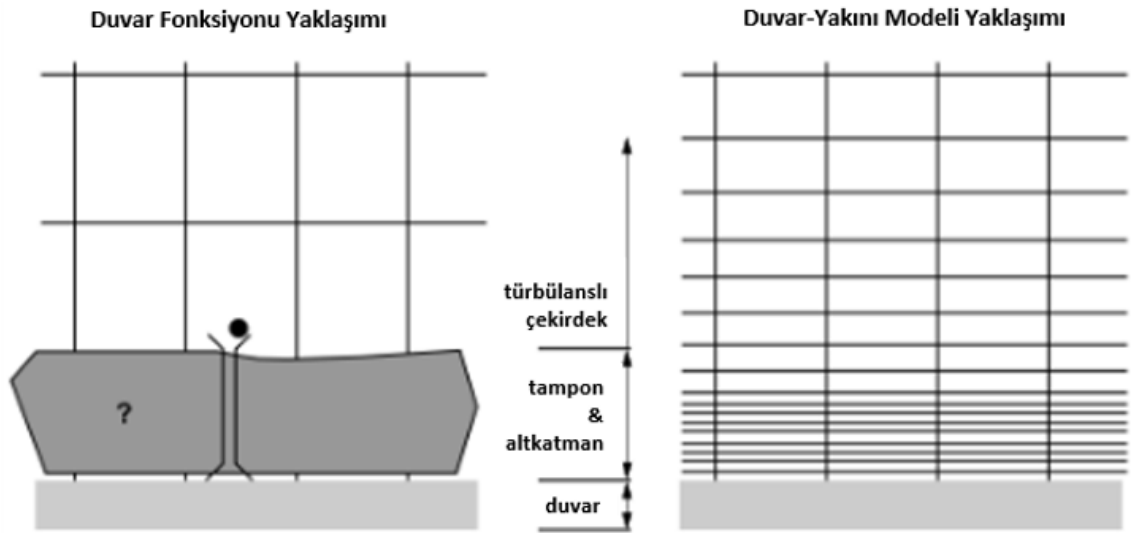


**Şekil 3.1** Çeper yakını bölgesinin alt bölümleri

Çepere yakın akış bölgesinin modellenmesi için klasikleşmiş iki adet yaklaşım vardır. Şekil 3.2’de bu iki yaklaşım türü ve bu yaklaşımların karşılaştırılması gösterilmiştir. Viskoz etkilerin baskın olduğu (viskoz alt tabaka ve tampon tabaka) tabakaların çözümünün yapılmadığı yaklaşım bunlardan biridir. “Duvar fonksiyonları” olarak adlandırılan yarı ampirik formüller vasıtası ile türbülanslı bölge ile çeper arasındaki bölge (viskoziteden etkilenen tabakalar) köprü olarak kabul edilir ve bu bölgenin çözümü yapılmaz. Duvar fonksiyonları ile akış alanındaki yüzeylerin etkisini hesaba katmak için türbülans modellerini değiştirme ihtiyacına gerek kalmaz.

İkinci yaklaşım türü, viskoz etkilerin baskın olduğu tabakaların çözülmesi için türbülans modellerinin değiştirilmesi usulüne dayanır. Türbülanslı bölge ile çeper arasındaki kısmın boydan boya tek bir ağ ile çözülmesi için türbülans modelleri değiştirilir. İkinci yaklaşım, bu çalışma içerisinde “duvar yakını modellemesi” olarak isimlendirilecektir. Duvarın yakını için kullanılan fonksiyonlar ve denklemler:

- Standart duvar fonksiyonları,
- Ölçeklenebilir duvar fonksiyonları,
- Denge dışı duvar fonksiyonları,
- Geliştirilmiş duvar yaklaşımı ( $\varepsilon$ - denklemi),
- Menter-Lechner yaklaşımı ( $\varepsilon$ - denklemi).



Şekil 3.2 Duvar yakını yaklaşımları

Ölçeklenebilir duvar fonksiyonu hariç bütün duvar fonksiyonlarının en önemli eksiği, çepere dik yöndeki ağ yapısının iyileştirilmesi sonrası elde edilen sayısal sonuçlarda bozulmaların meydana gelmesidir.  $y^+$  değerinin 15'ten küçük olması, duvar kayma gerilmesi ve duvar ısı transferi hesaplamalarında kademeli olarak hataların artmasına sebep olacaktır. ANSYS FLUENT paket programında, bu tarzdaki problemleri engellemek için geliştirilmiş duvar fonksiyonları mevcuttur.  $\omega$ - denklemi temelli bütün türbülans modelleri için  $y^+$ -duyarsız formülasyonlar standart olarak sunulmaktadır.  $\varepsilon$ -

denklemleri temelli modeller için geliştirilmiş duvar yaklaşımı ve Menter-Lechner yaklaşımının kullanılması tavsiye edilmektedir. Ayrıca,  $y^+$ -duyarsız duvar yaklaşımı formülasyonları Spalart-Allmaras modeli için de standart olarak sunulur.

Duvar sınır tabakası ile ilgili yüksek doğrulukta sayısal sonuçlar elde etmek ancak tüm sınır tabaka çözünürlüğünün belirli bir seviyede olması ile mümkündür. Bu koşul, belirli  $y^+$  değerlerini elde etmekten daha önemlidir. Bir sınır tabakasını düzgün bir şekilde kapsayacak en küçük katman sayısı yaklaşık olarak 10 civarındayken bu sayının 20'li değerlere ulaşması daha istenilen bir durumdur. Ayrıca sınır tabaka çözünürlüğünü iyileştirmek için yalnızca duvara dik yöndeki ağ yapısında düzeltmeye ihtiyaç duyulur. Bu durum sayısal çabada çok bir artış gerektirmez ve çözümün doğruluğundaki artış ile harcanan eforun karşılığı alınır. Yapılandırılmamış ağlarda, duvar sınır tabakalarının daha hassas bir şekilde öngörülebilmesi için çeperin etrafına 10-20 arası veya daha fazla prizma tabakası oluşturulması tavsiye edilir. Prizma tabakasının kalınlığı (yaklaşık 15 veya daha fazla düğüm), sınır tabakasını tamamen kapsayacak şekilde oluşturulmalıdır. Türbülans viskozitesine bakılarak yapılmış bir çözümün incelenmesi ile bu koşulun sağlanma durumuna bakılabilir. Türbülans viskozitesi, sınır tabakanın orta noktasında maksimum değerine ulaşır ve bu konumun duvardan mesafesinin iki katı sınır tabaka çizgisini bize verir. Prizma katmanının, sınır tabakadan daha kalın olması şarttır, aksi takdirde sınır tabakanın büyümesinin prizma tabakası tarafından sınırlandırılması riski mevcuttur. Sonuç olarak:

- $\epsilon$ - denklemi tabanlı modeller için, Menter-Lechner ya da İyileştirilmiş Duvar Yaklaşımı (Enhanced Wall Treatment)
- Duvar fonksiyonları  $\epsilon$ - denklemi ile tercih edilebiliyorsa, ölçeklenebilir duvar fonksiyonları
- $\omega$ - denklemi tabanlı türbülans modelleri ( $y^+$ -duyarsız duvar yaklaşımı standart olarak mevcuttur.)
- Spalart-Allmaras modeli ( $y^+$ -duyarsız duvar yaklaşımı standart olarak mevcuttur.)

yukarıda belirtilen maddelere uygun tercih yapılması önerilir.



### 3.1.4. Duvar Fonksiyonları

“Duvar fonksiyonları, duvara yakın hücrelerdeki çözüm değişkenlerini ve duvardaki karşılık gelen miktarları "köprüleyen" veya "bağlayan" bir dizi yarı deneysel formül ve fonksiyondur.” Bu fonksiyonlar, ortalama hız ve sıcaklık (veya diğer skalerler) için çeper yasasını ve yüzeye yakın türbülans miktarları için formülleri içermektedir. Kullanıcı tarafından seçilen türbülansın modeline bağlı olarak duvar fonksiyonu yaklaşımları mevcuttur ve bunlar aşağıda verilmiştir:

- Standart Duvar Fonksiyonları
- Ölçeklenebilir Duvar Fonksiyonları
- Denge Dışı Duvar Fonksiyonları
- Kullanıcı Tanımlı Duvar Fonksiyonları

### 3.2. Reynolds Sayısı

Akışkanlar mekaniğinde yaygın olarak kullanılan ve oldukça önemli bir boyutsuz sayı olan Reynolds sayısı ile akışın hangi rejimde aktığı bulunabilir. Reynolds sayısı, atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı şeklinde ifade edilir ve aşağıdaki denklemden elde edilebilir:

$$Re = \frac{\text{Atalet kuvvetleri}}{\text{Viskoz kuvvetler}} = \frac{V_s D}{\nu} = \frac{\rho V_s D}{\mu} \quad (3.5)$$

Burada  $V_s$  = akışkanın hızı ( $m/s$ ),  $D$  = karakteristik uzunluk ve  $\nu = \mu/\rho$  akışkanın kinematik viskozitesidir. Bu denklem bize, Reynolds sayısının 1’den büyük olduğu durumlarda atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere nispeten oranla daha önemli olduğunu ifade etmektedir. Aksi durumda ( $Re < 1$ ) ise akış alanının çoğu bölgesinde viskoz kuvvetlerin hakim olduğu sonucuna ulaşılır. Viskoz kuvvetlerin ihmal edilebilir olduğu koşullarda, Reynolds sayısı 1’den çok daha büyüktür. Bu durumda çeperden uzak ve atalet kuvvetlerinin yüksek olduğu akışlarda viskoz olmayan akış yaklaşımı uygulanabilir.

### 3.3. Basınç Katsayısı

Aerodinamik ile ilgili çalışmalarda sıklıkla kullanılan basınç katsayısı, bir akış alanı boyunca bağıl basınçları tanımlamak için kullanılan bir boyutsuz sayıdır (Şekil 3.3). İncelemelerde basıncın mutlak değerini vermek yerine basıncı bir katsayı ile ifade etmek daha çok tercih edilmektedir.

Basınç katsayısı:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2} \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $p$  incelenen noktadaki statik basınç,  $\rho_\infty$  serbest akış koşullarındaki yoğunluk ve  $V_\infty$  serbest akışın hızıdır.



Şekil 3.3. Basınç katsayısı (Yükselen, 2012)

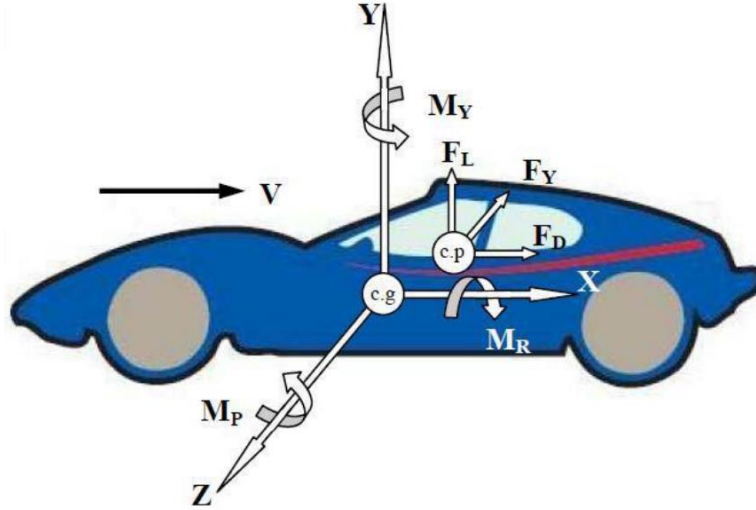
### 3.4. Aerodinamik Kuvvetler ve Momentler

Akışkanın cisim ile etkileşim halinde olduğu durumlarda akışkan cisme çeşitli yönlerde kuvvet ve moment uygulayabilir. Bir katı cismin özellikle bir sıvı akışkan içerisinde ki hareketi incelendiğinde cismin akışkan tarafından bir dirence maruz kaldığı gözlemlenir.

Hava akışının araç üzerine uyguladığı direnç kuvvetini, sürtünme(kayma) ve basınç kuvveti olarak ikiye ayırabiliriz. Basınç kuvveti, etkileşimde olduğu cisme yüzeye dik yönde etkirken sürtünme kuvveti yüzeye teğet olarak etkimektedir. Aerodinamik kuvvet ve moment bileşenleri serbest akış doğrultusuna göre tanımlanmış bir koordinat sisteminde (Yükselen, 2012):

Kuvvet Bileşenleri	D: Sürüklenme Kuvveti
	L: Kaldırma Kuvveti
	Y: Yanal Kuvvet
Moment Bileşenleri	$M_P$ : Yunuslama Momenti
	$M_R$ : Yuvarlanma Momenti
	$M_Y$ : Yalpalama Momenti

şeklinde ifade edilebilir. Koordinat sisteminin orijini aracın ağırlık merkezi (c.g.) olarak tanımlanmıştır.

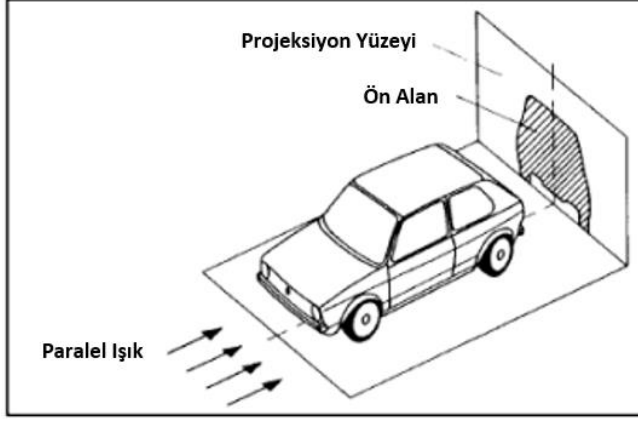


**Şekil 3.4.** Bir binek araç üzerindeki aerodinamik kuvvetler ve momentler (Demircioğlu, 2007)

Seyir halindeki bir araç üzerine etkiyen aerodinamik kuvvet ve moment bileşenleri Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Basınç kuvvetlerinin taşıt üzerinde belirlenen bir nokta üzerine etki ettiği kabulü yapılabilir ve bu nokta şekil 3.4'de görüldüğü gibi basınç merkezi (c.p.) olarak adlandırılır. Ağırlık merkezi (c.g.) olarak bahsedilen nokta ile aynı değildir, ancak basınç merkezinin konumu hava akışına bağlıdır. Bu iki noktanın bir olması ise aerodinamik açıdan istenen bir durumdur (Demircioğlu, 2007).

Araçların aerodinamik karakteristikleri karşılaştırılırken aerodinamik kuvvet ve momentler yerine aerodinamik katsayıları kullanarak mukayese etmek elverişlidir.

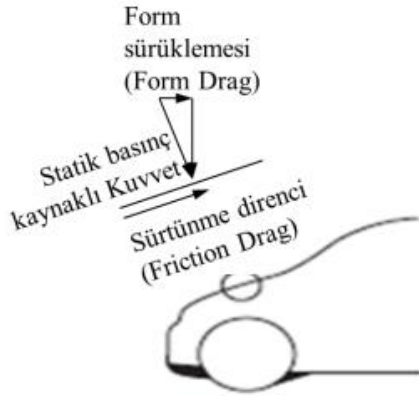
Direnç ve kaldırma katsayıları; aracın havaya göre bağıl hızına  $V$ , havanın yoğunluğuna  $\rho$  ve aracın projeksiyon alanına  $A_p$  bağlıdır (Yükselen, 2012). Şekil 3.5’de bir aracın projeksiyon alanı gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Projeksiyon alanı (Keleş, 2015)

### 3.4.1. Sürüklenme Kuvveti

Aracın seyir esnasında hareketine zıt yönde etki eden ve özellikle yüksek hızlarda önemli hale gelen kuvvet aerodinamik direnç kuvvetidir. Direnç kuvveti, kayma ve basınç kuvvetlerinin akış yönündeki bileşenlerin bileşkesinden meydana gelmektedir (Şekil 3.6). Basınç kaynaklı olan direnç, basınç direnci ya da form (şekil) direnci, kayma gerilmelerinden kaynaklanan direnç ise sürtünme direnci olarak adlandırılmaktadır (Yükselen, 2012).



Şekil 3.6. Araca seyir esnasında etki eden direnç kuvvetleri (Altınışik, 2013).

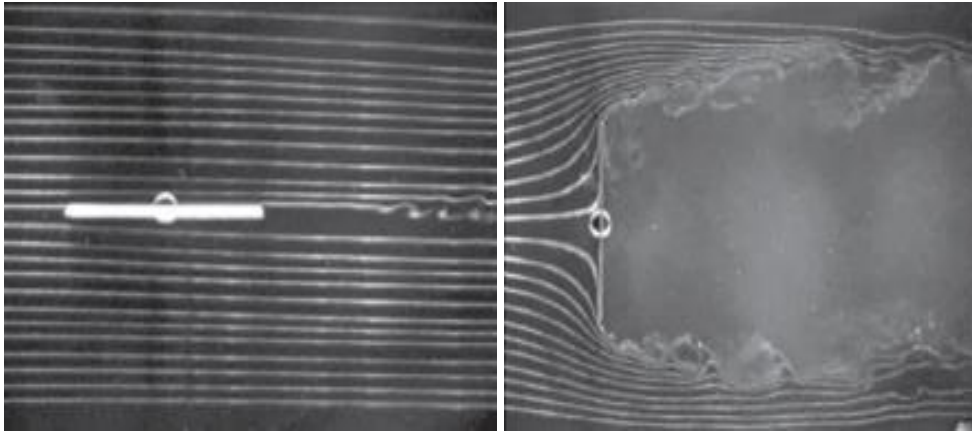
Sürtünme ve direnç katsayıları aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$C_{D,sürtünme} = \frac{F_{D,sürtünme}}{\frac{1}{2}A\rho V^2} \quad \text{ve} \quad C_{D,basınç} = \frac{F_{D,basınç}}{\frac{1}{2}A\rho V^2} \quad (3.7)$$

Toplam direnç kuvveti, sürtünme ve basınç dirençleri toplanarak bulunabilir:

$$C_D = C_{D,sürtünme} + C_{D,basınç} \quad (3.8)$$

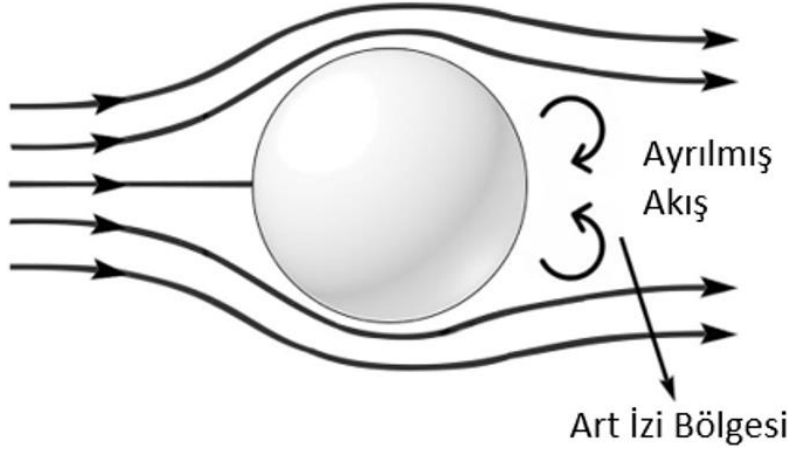
Sürtünme ve basınç direncinin büyüklükleri cismin akış içerisindeki yerleşim şeklinden etkilenmektedir. Şekil 3.7’de akışa dik olarak konumlandırılmış düz levhada direnç tamamen basınç kaynaklıyken akışa paralel olan levhada ise direnç tamamen sürtünme direncinden kaynaklanmaktadır. Genel olarak akım çizgili cisimler üzerinde ki aerodinamik direnç kuvvete, sürtünme direnci etkiliyken, küt gövdeli cisimlerde basınç direnci daha etkilidir (Engin, 2018; Gökçegöz, 2013).



**Şekil 3.7.** Yatay ve dik levha etrafındaki akışın görselleştirilmesi (Engin, 2018)

Sürtünme direnci viskoziteye ve yüzey kayma gerilmesine çok bağlıdır. Akışkanın viskozitesi ile ters orantılı olan Reynolds sayısının yüksek değerlerinde sürtünme direncinin aerodinamik dirence katkısı ihmal edilebilir derecededir. Bu durumlarda direnç yüksek oranda basınç direnci kaynaklıdır. Reynolds sayısının düşük olduğu yani viskoz kuvvetlerin baskın olduğu durumlarda ise direnç yüksek oranda sürtünme direncinden kaynaklanmaktadır (Engin, 2018).

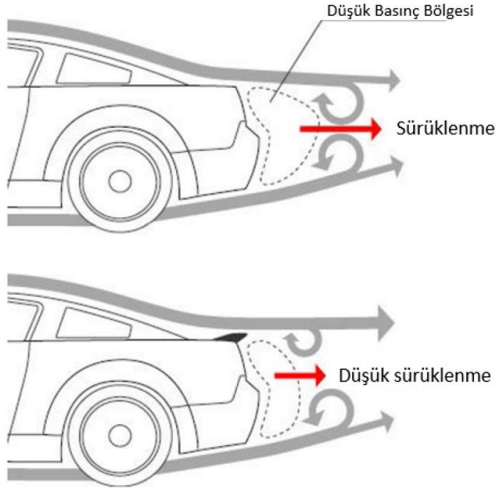
Basınç direnci, akışa maruz kalan cismin ön ve arka bölge arasındaki basınç farkı ile doğru orantılıdır. Akış ayrılmalarının olduğu durumlarda, basınç direnci çok önemli hale gelir ve cismin arka kısmında düşük basınçlı bir ayrılmış bölge oluşur. Bir küre üzerindeki dış akışta oluşan art izi ve ayrılmış akış bölgesi Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Bu durum ön ve arka bölge arasında basınç farkının oluşmasına yol açar (Engin, 2018).



**Şekil 3.8.** Bir küre üzerindeki dış akışta oluşan art izi bölgesi ve ayrılmış akış (Nath et al., 2021)

Taşıtlar üzerinde en etkili olan aerodinamik kuvvet bileşeni genellikle sürüklenme kuvvetidir. Sürüklenme kuvvetinin büyük bir kısmı, otomobillerin ön ve arka kısmındaki basınç farkından oluşmaktadır. Aracın arka kısmının formu basınç farkının artmasında kritik rol oynamaktadır. Basınç farkının artması aerodinamik direnci olumsuz yönde etkilemektedir (Sivaraj et al., 2021). Şekil 3.9’da bir araç arkasında rüzgarlık kullanımı ile beraber düşük basınç bölgesi ve sürüklenmenin azaldığı gösterilmiştir.

Otomobillerde yakıt tüketimi, yol tutuşu ve konfor gibi kriterler açısından direncin önemi büyüktür. Direnç, genellikle istenilmeyen bir durumdur ve minimuma indirmek için çalışmalar yapılır. Direnci azaltmak için ilk akla gelen cismi akım çizgili hale getirmek ve akış ayrılmalarını azaltmaktır. Akım çizgili tasarım, sınır tabaka ayrılmasını geciktirerek basınç direncinin azalmasını sağlar. Ancak sürtünme yüzey alanının artması ile de sürtünme direncinde artış gözlemlenir. Sonuç olarak yapılacak direnç azaltma çalışmasında hangi etkinin daha baskın olduğuna bakılmalıdır ve bu değerlerin toplamının minimum olduğu durum elde edilmeye çalışılmalıdır (Engin, 2018).



**Şekil 3.9.** Araç arkasında oluşan sürüklenme kuvvetinin rüzgarlık kullanımı ile azalması (Nath et al., 2021)

### 3.4.2. Kaldırma Kuvveti

Aracın yol tutuşuna doğrudan etki eden kaldırma kuvveti, cisim üzerinde etkili olan basınç ve sürtünme kuvvetlerinin akışa dik yöndeki bileşenlerinin bileşkesi olan kuvettir. Kaldırma kuvveti denklem 3.9'dan hesaplanır:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_L \quad (3.9)$$

şeklinde ifade edilir. Bu denklemde,  $\rho$  akışkanın yoğunluğu,  $V$  aracın rüzgara göre bağlı hızı,  $C_L$  kaldırma katsayısı ve  $A$  üst bakış alanıdır. Bu alan cisme dik yönde yukarıdan bakan bir kişinin gördüğü alan olarak tanımlanır.

Uçak, helikopter, drone gibi çeşitli hava araçları kaldırma prensibine dayanarak uçmaktadırlar. Kanatlar gibi kaldırma oluşturması istenen parçalar tasarlanırken amaç, parçanın en yüksek kaldırmayı oluştururken en düşük direnç değerlerine sahip olmasıdır. Otomobil aerodinamiğinde ise kaldırma kuvvetinin daha küçük olması istenir. Bazı durumlarda araçların yol tutuşunu ve manevra kabiliyetini iyileştirmek için yere baskı kuvvetini arttıracak şekilde negatif kaldırma kuvvetinden de yararlanılır. Ancak negatif kaldırma kuvveti zemin ve tekerlek arasındaki sürtünme kuvvetinin artmasına sebep olur. Sürtünme kuvvetinin artması yakıt tüketimini artırır ve aracın hızlanma kabiliyeti

üzerinde olumsuz etki oluşturur. Bu nedenle otomobil üreticileri kaldırma katsayısını belirli bir seviyenin altında tutmaya çalışırlar (Demircioğlu, 2007).

### 3.4.3. Yanal Kuvvet

Viskoz ve basınç kuvvetlerinin bileşenlerinden biri olan bu kuvvet, araç etrafındaki hava akışının simetri eksenine göre eşit olmadığı durumlarda oluşur. Yanal kuvvet, sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerine göre dik doğrultuda etki eder ve denklem 2.17'den hesaplanabilir (Demircioğlu, 2007):

$$F_Y = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_Y \quad (3.10)$$

Hava içerisinde hareket eden herhangi bir cisim ile hava arasında hız farkı oluşur. Hava, bu cisme bir kuvvet uygular ve bu kuvvet seçilen bir referans noktaya göre bir moment oluşturur. Havanın cisme uyguladığı kuvvet tek nokta üzerinde değildir. Cisim ile havanın temas yüzeyinin her noktasında etkiyen kuvvetin bir dağılımı ve her noktadaki kuvvetin de belirlenen bir referans noktaya göre oluşturduğu moment mevcuttur. Yüzey boyunca kuvvetlerin nasıl yayıldığından daha çok kuvvetlerin yüzey boyunca integre edilmesi ile bulunan bileşke kuvvetle ve bunun oluşturduğu momentle ilgilenilir (Yükselen, 2012).

Aerodinamik kuvvetlerin taşıt dinamiğine etkisi hesaplanmak istenildiğinde aerodinamik momentleri de hesaba katmak gereklidir. Aerodinamik momentleri üç başlık altında inceleyebiliriz:

**Yunuslama Momenti (M<sub>P</sub>):** Aracın ön ve arka kısmına etki eden kaldırma kuvvetlerinin eşit olmamasından kaynaklı oluşan momenttir. Moment sonrası oluşan hareketin biçimi nedeni ile bu şekilde adlandırılmıştır (Demircioğlu, 2007; Gökçeğöz, 2013).

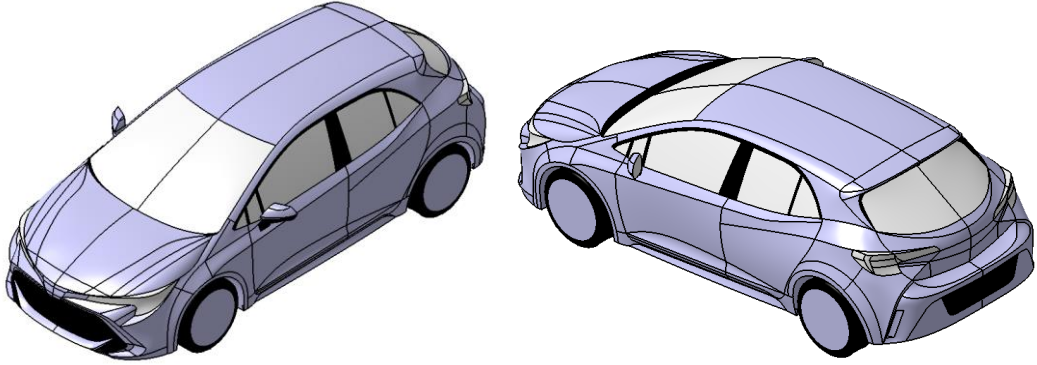
**Yuvarlanma Momenti (M<sub>R</sub>):** Akış doğrultusundaki eksen etrafında aracı döndürmeye zorlayan momenttir. Sağ ve sol tarafa etki eden yanal kuvvetlerin farklı olması durumunda oluşur (Demircioğlu, 2007; Yükselen, 2012).



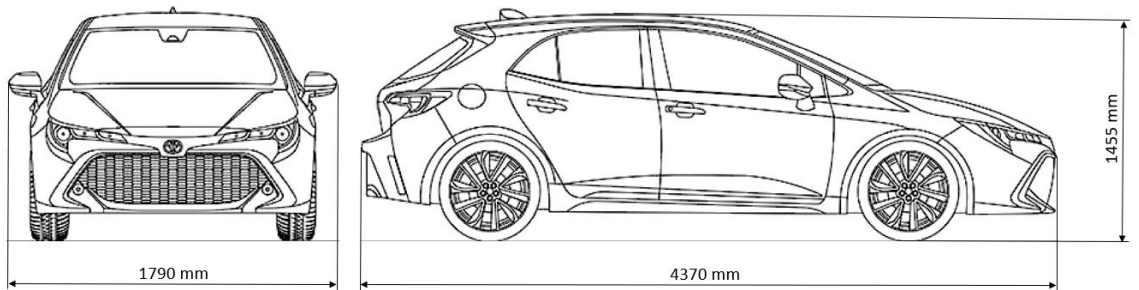
**Yalpalama Momenti ( $M_Y$ ):** Kaldırma kuvveti doğrultusu etrafında aracı çevirmeye çalışan momenttir. Taşıtın ön ve arka kısmına etki eden yanal kuvvetlerin farklı olmasından kaynaklanır (Demircioğlu, 2007; Yükselen, 2012).

### 3.5. Analiz Şartları

Tez çalışması kapsamında ticari bir binek aracın orijinal ölçüleri referans alınarak, CATIA V5R21 bilgisayar destekli tasarım programında katı modeli oluşturulmuştur. İlk olarak aracın genel hatları tel çerçeve modülü içerisinde eğrilerle oluşturulmuştur. Daha sonra yüzey komutları ile aracın dış formları verilerek katı modele geçiş yapılmıştır. Bilgisayar ortamında oluşturulan aracın izometrik görünüşü Şekil 3.10'da ve aracın genel ölçüleri Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Aracın alt kısmı, çözümleme için gerekli bilgisayar kapasitesi ve tasarım zorluğu hesaba katılarak düz bir biçimde tasarlanmıştır.

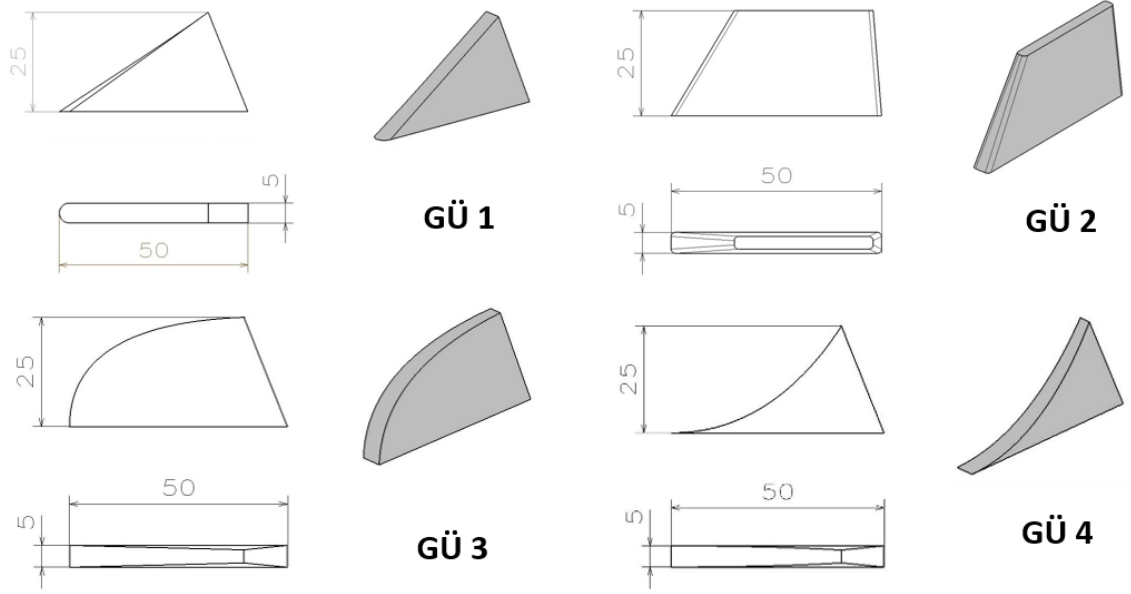


**Şekil 3.10** Çalışmada kullanılan aracın üç boyutlu modeli

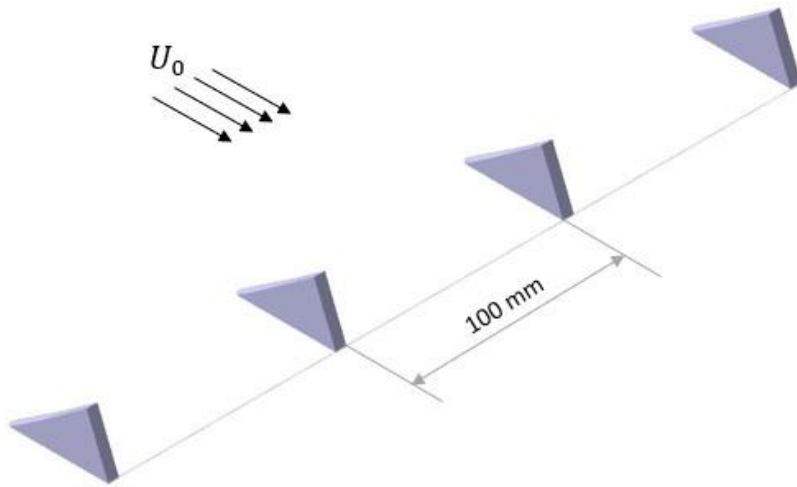


**Şekil 3.11** Çalışmada kullanılan aracın ölçüleri

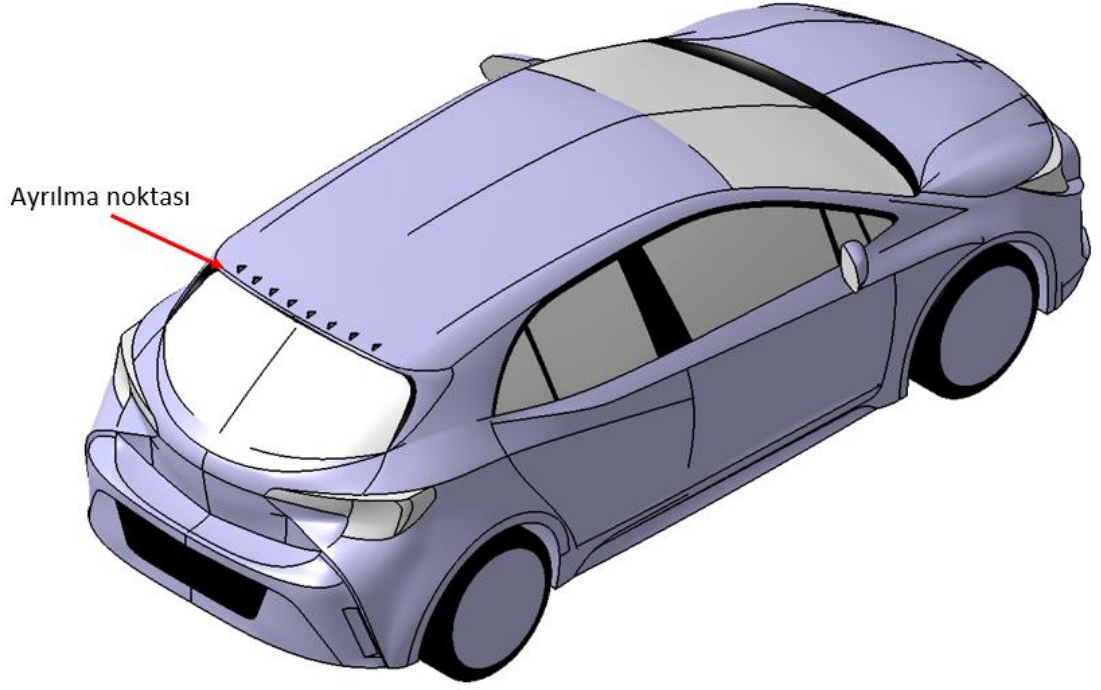
Ayrıca aracın aerodinamik sürüklenme direncini iyileştirmek için 4 adet girdap üreteç tasarlanmıştır. Girdap üreteçler, aracın arka kısmındaki akış ayrılma noktasının 15 mm uzaklıktaki yukarı akımına 8 adet olacak şekilde 100 mm aralıklarla konumlandırılmıştır (Şekil 3.14). Bu çalışmada kullanılan girdap üreteçlerin ölçüleri Şekil 3.12 ve yerleştirme düzeneği Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.12** Girdap üreteç çeşitleri ve ölçüleri



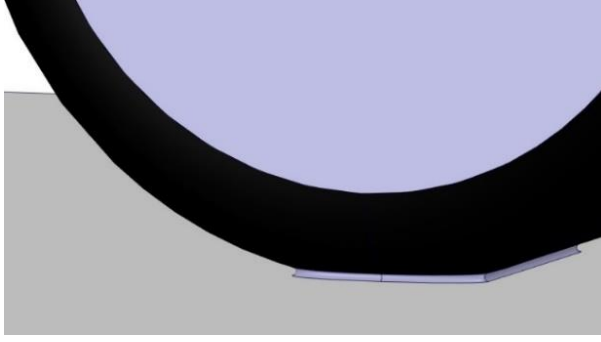
**Şekil 3.13** Girdap üreteçlerin konfigürasyonu



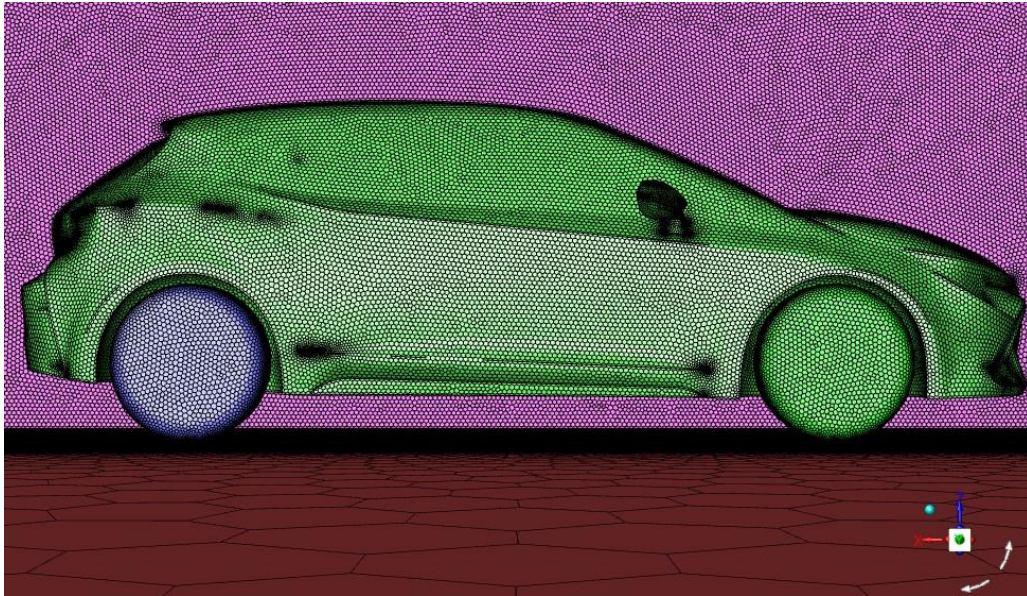
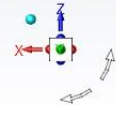
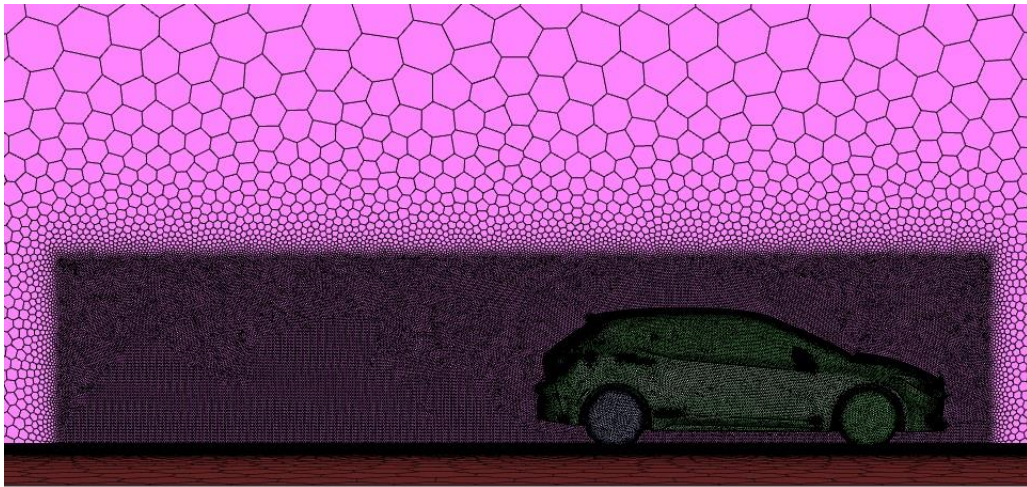
**Şekil 3.14** Girdap üreteçlerin konfigürasyonu ve araç arkasındaki ayrılma noktası

Oluşturulan modellerin aerodinamik analizleri sonlu hacimler yöntemi ile ANSYS FLUENT programı ortamında gerçekleştirilmiştir. Akış alanında ağ (mesh) oluşturmak için su sızdırmaz model (watertight geometry) tercih edilmiştir. Analiz sürelerini kısaltmak ve donanımları verimli kullanmak için simetrik olan aracın yarısı analiz edilmiştir.

Ağ oluşturulurken katı yüzey yakınındaki bölgelerin ve art izi bölgesinin doğru modellenmesi son derece önemli konulardan biridir. Çözüm alanında ağ oluşturulurken art izi bölgesi (wake) ve araç yakınındaki bölge için bir adet hacim kaynağı kullanılarak bu bölgedeki hücre yoğunluğu artırılmıştır. Araç gövdesi, tekerlekler ve tekerleğin yer ile temas halindeki olduğu bölgelerde yüzey sayıları artırılmış ve bu bölgelerdeki yüzeyler yoğunlaştırılmıştır. Ayrıca tekerleklerin yer ile temas ettiği bölgedeki ağ kalitesini arttırmak amacı ile bu bölge revize edilmiştir (Şekil 3.15).

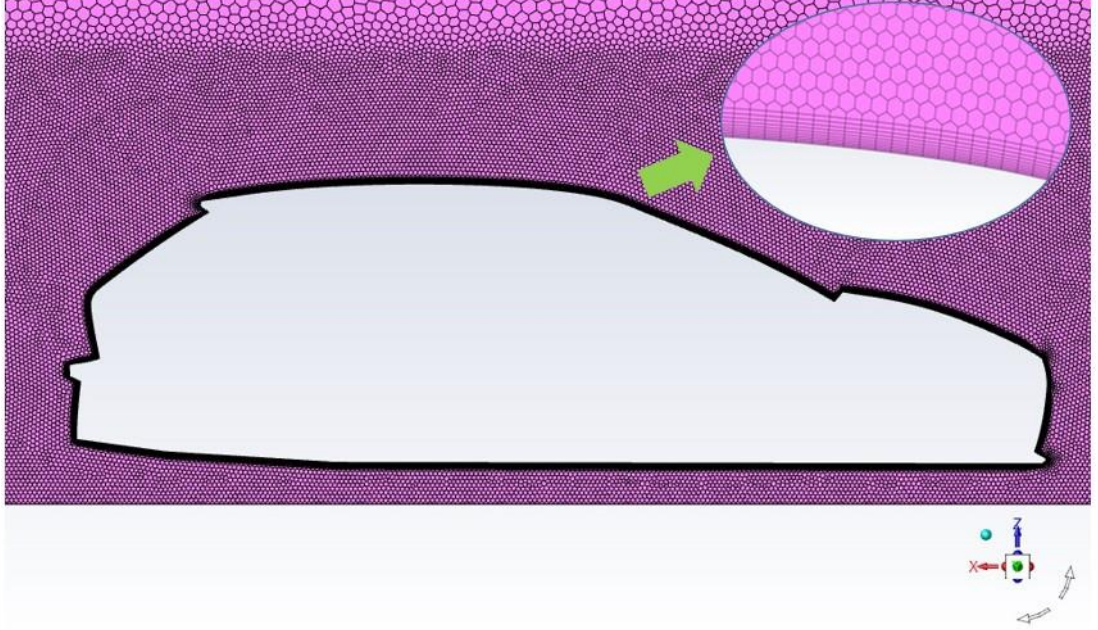


Şekil 3.15 Tekerleğin yer ile temas ettiği bölgenin ağ için uygun hale getirilmesi



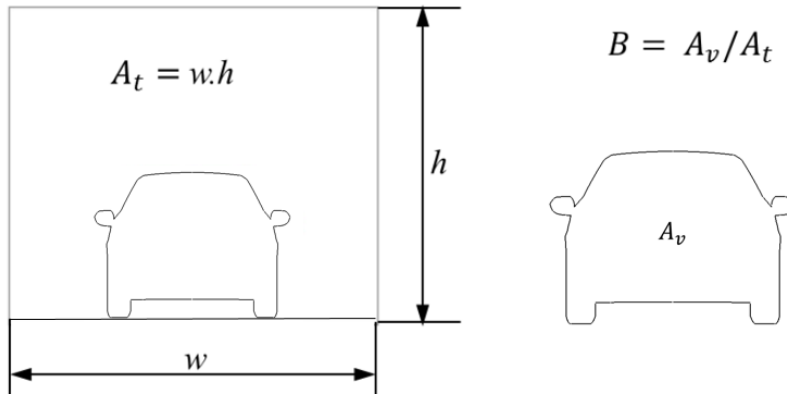
Şekil 3.16 Çözüm alanı ağ yapısı

Sayısal analizlerin doğruluğunun yüksek olması için çeper yakınındaki bölgenin iyi modellenmesi ayrıca önemlidir. Bir sınır tabakasının düzgün bir şekilde öngörülebilmesi için Bölüm 3.1.3’de bahsedildiği gibi 10-20 arasında sınır tabaka katmanı oluşturulması tavsiye edilmektedir. Şekil 3.17’de görüldüğü üzere akış alanı ağı, araç yüzeyi üzerinde 10 adet sınır tabaka katmanı olacak şekilde oluşturulmuştur.



**Şekil 3.17** Oluşturulan ağın sınır tabaka yapısı

Sayısal analizlerin gerçekleştirildiği akış alanının boyutları blokaj etkileri göz önüne alınarak belirlenmelidir. Blokaj oranı, aerodinamik analizlerde önemli olan ve modelin projeksiyon alanı ile test ortamı arasındaki bağlantıyı belirten orandır.

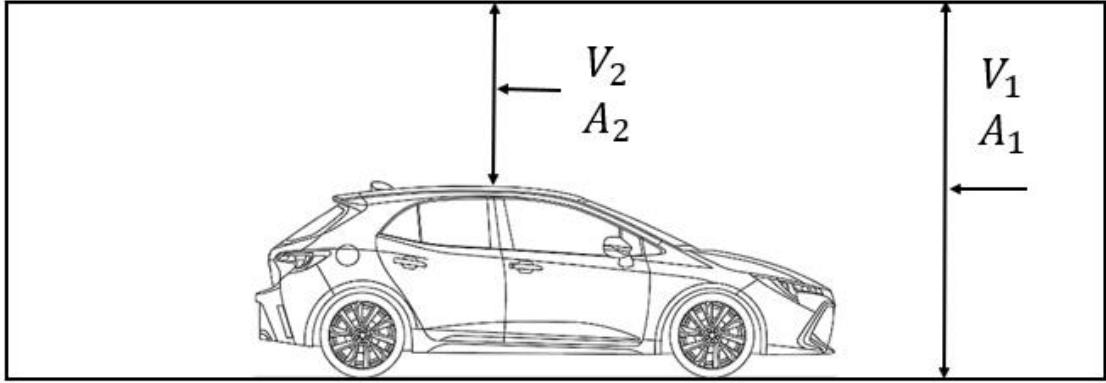


**Şekil 3.18** Blokaj oranı

Blokaj oranı şekil 3.18’de gösterilmiştir ve aşağıdaki denklemle ifade edilir:

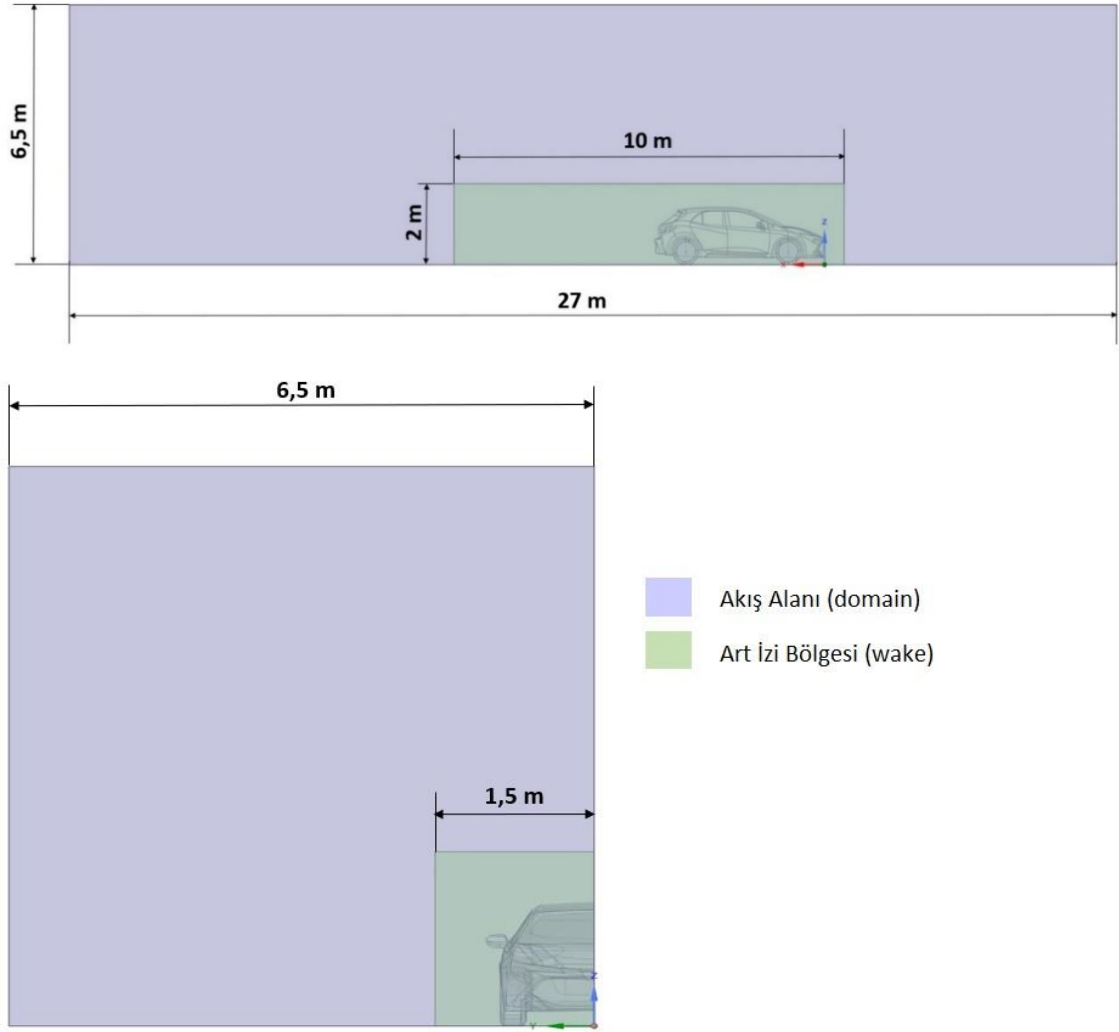
$$B = \frac{A_v}{A_t} \quad (3.11)$$

Denklem 3.11’de, blokaj oranı  $B$ , aracın projeksiyon alanı  $A_v$  ve hava akış doğrultusuna dik yöndeki tünelin kesit alanı  $A_t$  olarak ifade edilmektedir. Yapılan çalışmalarda genel olarak blokaj oranı düşük tutulmaya çalışılır. Bu oranın %7,5’ten az olması istenir (Arabacı, 2016). Blokaj oranının düşük tutulması ile gerçek sürüş şartları daha iyi simüle edilmeye çalışılırken aynı zamanda tünel sınırlarının akışa etkisi minimumda tutulmaya çalışılır (Şekil 3.19).



**Şekil 3.19** Akış alanı sınırlarının çözüme etkisi

Akış alanının boyu, yüksekliği ve genişliği sırası ile 27 m, 6,5 m ve 6,5 m’dir. Art izi bölgesinin ise 10 m, 2 m ve 1,5 m’dir. Çözüm alanı ve art izi bölgesinin ebatları ve görseli Şekil 3.20’de görülmektedir. Bu çalışmada belirlenen akış alanı boyutlarına göre blokaj değeri %2,6’dır ve istenen değerin aşağısında tutularak analiz doğruluğu artırılmıştır.

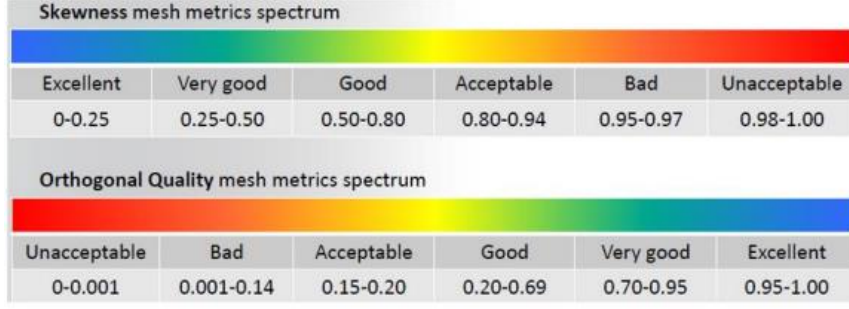


**Şekil 3.20** Akış alanı ve art izi bölgesi

Nihai analizlerde kullanılan ağ yapısı, 3 464 701 karışık hücreden ve 12 442 656 yüzeyden oluşmaktadır. Oluşturulan ağ, daha çok poligonal hücrelerden meydana gelmektedir. Ağ yapısı ile detaylı bilgi Çizelge 3.1’de mevcuttur. Elde edilen ağ yapısının çarpıklık oranı (skewness) ve minimum ortogonal kalitesi Şekil 3.21’e göre iyi seviyededir.

**Çizelge 3.1** Ağ yapısının özellikleri

Minimum Hacimli Hücre	Minimum Yüzey Alanı	Minimum Ortogonal Kalite	Çarpıklık
1,2e-11 m <sup>3</sup>	1,31e-9 m <sup>2</sup>	0,31	0,71



**Şekil 3.21** Ağ yapısının çarpıklık oranı ve ortogonal kalitesinin sınıflandırılması (Arabacı, 2016)

Bu çalışmada akış alanının çözümü için endüstriyel CFD’de yaygın olarak kullanılan türbülans modellerinden düzeltilmiş k-ε türbülans modeli tercih edilmiştir. ANSYS FLUENT’te düzeltilmiş (realizable) k-ε türbülans modelinin diğer modellere göre kullanılması ve bu modelin Menter-Lechner ya da geliştirilmiş duvar yaklaşımı (enhanced wall treatment) ile birlikte kullanılması ayrıca tavsiye edilmektedir.

Geliştirilmiş duvar yaklaşımı (EWT), tüm ε- denklemi tabanlı modeller için  $y^+$ -duyarsız bir formülasyon sunan duvar yaklaşımıdır. Bu yaklaşımın temelini FLUENT’te, iki katmanlı model (two layer model) oluşturmaktadır. İki katmanlı model yaklaşımında, akış alanı viskoz etkilerin baskın olduğu ve tamamen türbülanslı bölge olarak ikiye ayrılır. İki bölgenin karışımı, türbülanslı Reynolds sayısı  $Re_y$  ile belirlenir. Bölüm 3.1.3’te bahsedildiği üzere, duvara dik yöndeki ağ yapısının iyileştirilmesi ile sonuçlarda bozulmaların meydana gelmesini engellemek için  $y^+$ -duyarsız formülasyonların kullanılması tavsiye edilmektedir. Bu çalışmada bunların önüne geçmek için (realizable) k-ε türbülans modeli geliştirilmiş duvar yaklaşımı (EWT) ile birlikte kullanılmıştır. Çizelge 3.2’de sayısal çözüm için kullanılan şartlar belirtilmiştir.

**Çizelge 3.2** Çözüm şartları

<b>Türbülans Modeli</b>	: Düzeltilmiş (Realizable) k-ε
<b>Duvar Yakını Yaklaşımı</b>	: Geliştirilmiş Duvar Yaklaşımı (Enhanced Wall Treatment)
<b>Çözüm Şeması</b>	: Bağlaşık (Coupled)
<b>Ayrıklaştırma Yöntemi</b>	: İkinci Derecen Ayrıklaştırma (Second-Order Upwind)



Modelin giriş bölgesi inlet, çıkış bölgesi outlet, simetri yüzeyi symmetry, zemin ground, ön teker fwh, arka teker bwh, teker radyüsü wheelradius ve akış alanının üstündeki bölge ile simetri yüzeyinin karşısındaki yüzey sky olarak adlandırılmıştır. Çalışmada kullanılan sınır şartları Çizelge 3.3’de belirtilmiştir.

**Çizelge 3.3** Sınır şartları

Sınır Şartları		
Hız Girişi	Büyükük ve doğrultu	27.78 m/s (100 km/h)
	Türbülans belirleme metodu	yoğunluk ve viskozite oranı
	Türbülans yoğunluğu	5%
	Türbülans viskozite oranı	10
Basınç Çıkışı	Gösterge basınç büyüklüğü	0 Pascal
	Gösterge basınç doğrultusu	Sınır normali
	Türbülans belirleme metodu	yoğunluk ve viskozite oranı
	Ters akış türbülans yoğunluğu	5%
	Ters akış türbülans viskozitesi oranı	10
Duvar Türü	body (gövde) - hareketsiz	-
	fwh (ön teker) - dönöl hareketli	87.5 rad/s
	bwh (arka teker) - dönöl hareketli	87.5 rad/s
	wheelradius (teker radyüsü) - ötelenme hareketli	27.78 m/s
	ground (zemin) - ötelenme hareketli	27.78 m/s
	sky (gökyüzü) - ötelenme hareketli	27.78 m/s

Akış alanının çok büyük olması ( $1.140,75 \text{ m}^3$ ) ve bilgisayar kapasitesinin sınırlı olması nedeniyle Reynolds sayısı benzerliği kullanılarak model 1:5 ölçekli olarak ele alınmıştır.

Reynolds sayısı benzerliği: 
$$Re = \frac{c_1 U_1}{\vartheta} = \frac{c_2 U_2}{\vartheta} \quad (3.12)$$

Burada  $c_1, c_2$  modellerin karakteristik uzunlukları,  $U_1, U_2$  akış alanı girişindeki serbest akış hızları,  $\vartheta$  ise kinematik viskoziteyi ifade etmektedir. Aracın uzunluğu, modelin karakteristik uzunluğu olarak alınmıştır. Modelin 1:5 ölçekli olarak alınması ile hava hızının da 5 kat artması gerekli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum Eşitlik 3.12 uygulanarak görülebilir. Çalışmada yapılan analizler  $Re = 8,3 \times 10^6$  değeri için gerçekleştirilmiştir.

#### 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde ANSYS FLUENT ve CFD POST ortamında elde edilen bulgular incelenmiştir ve yorumlanmıştır. Aerodinamik analizi yapılan akış alanı ile ilgili:

- hız konturleri,
- basınç konturleri,
- akım çizgileri,
- vektörler ve
- aerodinamik katsayılar ( $C_d$ ,  $C_l$  ve  $C_p$ )

bu bölümde alt başlıklar halinde verilmiştir. Araç çevresindeki akışın doğasını iyi bir şekilde anlamak için modelin simetri ve  $z=0,5h-xy$  düzlemindeki akışla ilgili görseller ve veriler elde edilmiştir. Sürüklenme katsayısına büyük etkisi olan araç arkasındaki art izi bölgesi hız konturleri, basınç konturleri, akım çizgileri ve vektörler yardımı ile görselleştirilmiştir. İlk olarak, gerçekleştirilen sayısal çözümün yüksek oranda doğruluğu için çözümün ağ yapısından bağımsızlığı sağlanmıştır. Çizelge 4.1’de elde edilen sonucun ağ yapısından bağımsızlığı için yapılmış gerekli analizler mevcuttur. Akış alanının daha iyi analiz edilebilmesi, daha doğru grafikler almak ve çözüm için gerekli donanım göz önüne alınarak, 3 464 701 hücre sayısına sahip model tercih edilmiştir. Bunun yanı sıra yüksek hücre sayısına sahip modelin seçilmesi ile art izi bölgesindeki akış yapısının daha iyi elde edilebileceği düşünülmüştür.

**Çizelge 4.1** Ağ yapısından bağımsızlık için gerçekleştirilmiş analizler

	Hücre Sayısı	Sınır Tabaka Katman Sayısı	Sürüklenme Katsayısı
1	872 007	10	0.355
2	1 975 128	10	0.315
3	3 464 701	10	0.313

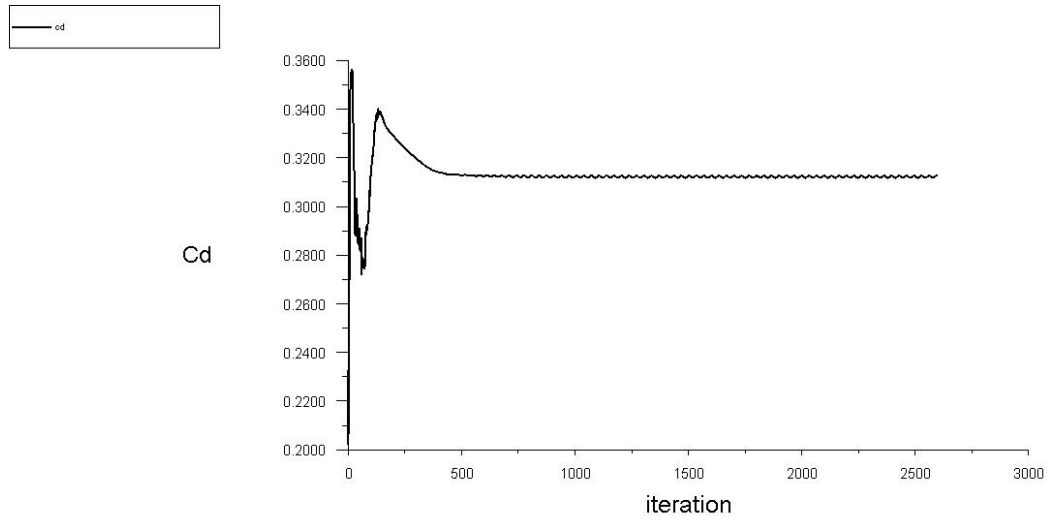
##### 4.1. Sürüklenme ve Kaldırma Katsayıları

Çalışmada tercih edilen binek aracın girdap üreteç kullanılmamış ve çeşitli girdap üreteçleri eklenmiş modellerinin sürüklenme ve kaldırma katsayıları bu bölümde

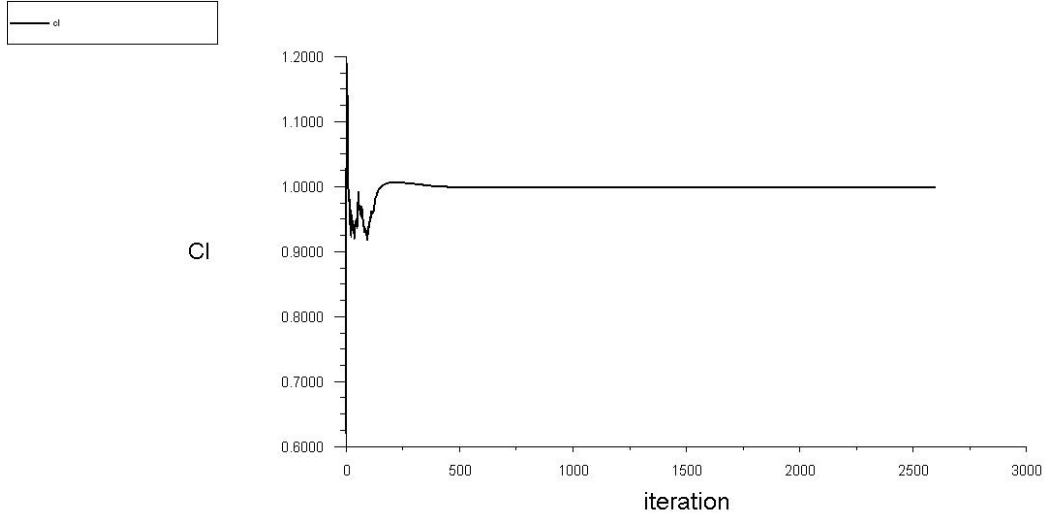
tartışılacaktır. Bununla beraber girdap üreteçlerin sürüklenme ve kaldırma katsayıları üzerindeki etkileri bu bölümde verilmiştir.

Aracın orijinal ölçüleri referans alınarak tasarlanan modelin sürüklenme katsayısı üretici firma tarafından verilen değer ile karşılaştırılmıştır. Üretici firma tarafından verilen sürüklenme katsayısı  $C_d$  değeri 0,32'dir. Yapılan sayısal analiz sonucu sürüklenme katsayısı  $C_d$ , %2,2'nin altında bir hata ile 0,313 olarak bulunmuştur. Ayrıca girdap üreteç kullanılmamış modelin kaldırma katsayısı da  $C_l$ , 0,999 olarak elde edilmiştir.

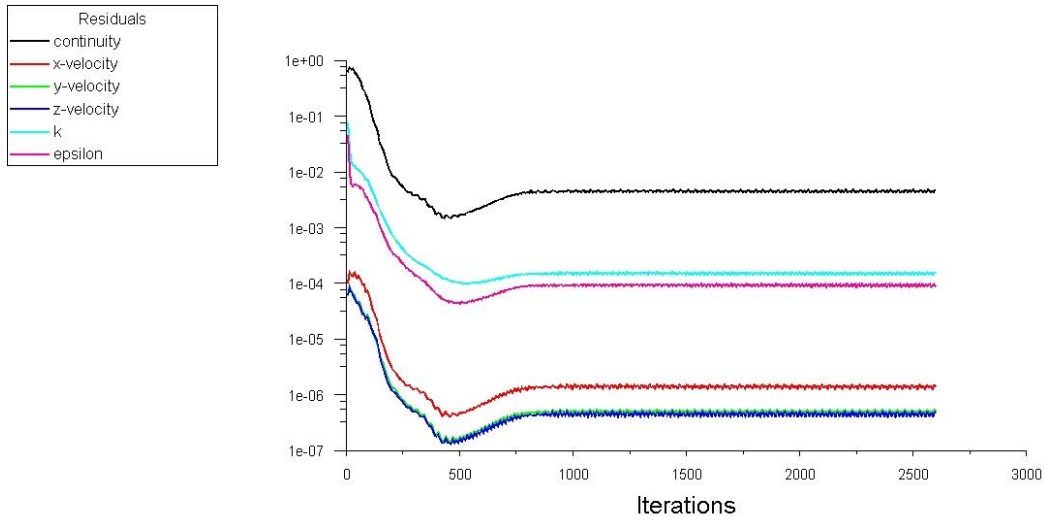
Girdap üreteç kullanılmayan model için sürüklenme ve kaldırma katsayılarının iterasyon sayısı ile değişimi sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de görülmektedir. Kaldırma ve sürüklenme katsayısı grafiklerinde yaklaşık olarak 500 iterasyondan sonra yakınsama gözlenmiştir. Toplamda 2 600 adet iterasyon gerçekleştirilmiştir. Süreklilik,  $k$ ,  $\varepsilon$ ,  $x$ ,  $y$  ve  $z$  ile ilgili kalıntı (residual) grafiği Şekil 4.3'de verilmiştir. Bu değerlerin yaklaşık olarak 800 iterasyondan sonra yakınsadığı gözlenmiştir.



Şekil 4.1 Sürüklenme katsayısı  $C_d$  grafiği

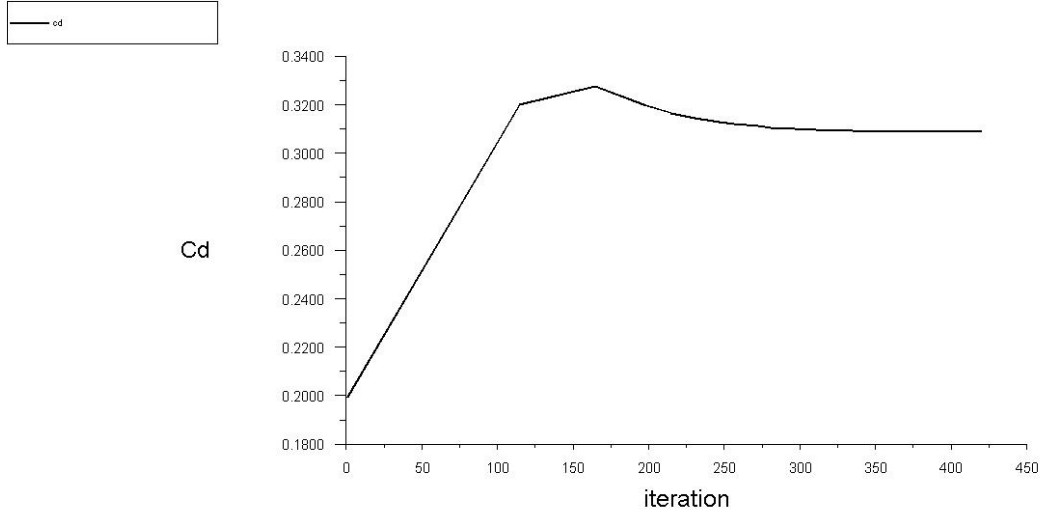


**Şekil 4.2** Kaldırma katsayısı  $C_l$  grafiği

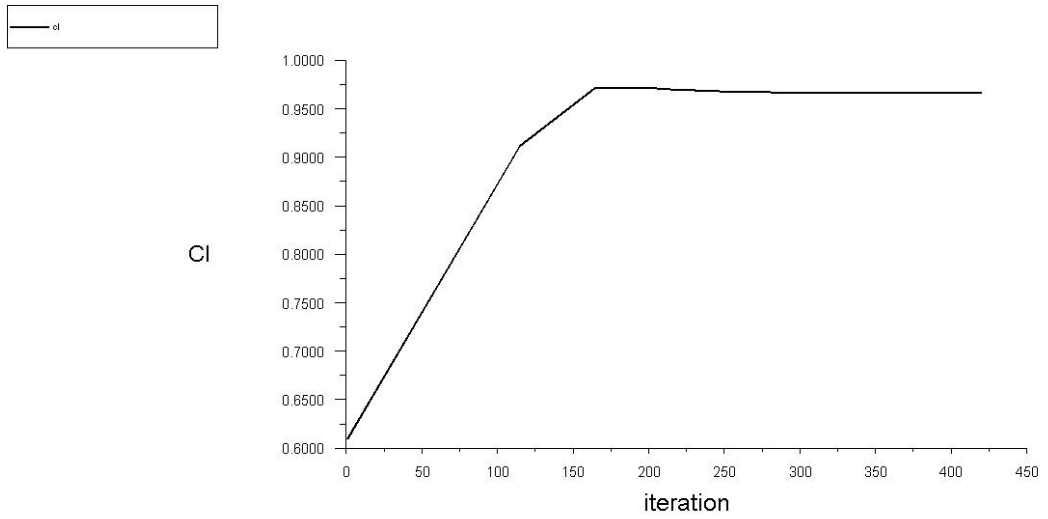


**Şekil 4.3** Kalıntılar grafiği

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de 1 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin sürüklenme ve kaldırma katsayılarının iterasyon sayısı ile değişimi verilmiştir. Sürüklenme katsayısı değeri yaklaşık olarak 350 iterasyon sonrasında yakınsama sağlarken, kaldırma katsayısı grafiği yaklaşık olarak 300 iterasyon sonrasında yakınsamıştır. Sürüklenme ve kaldırma katsayıları sırası ile 0,309 ve 0,967'dir.

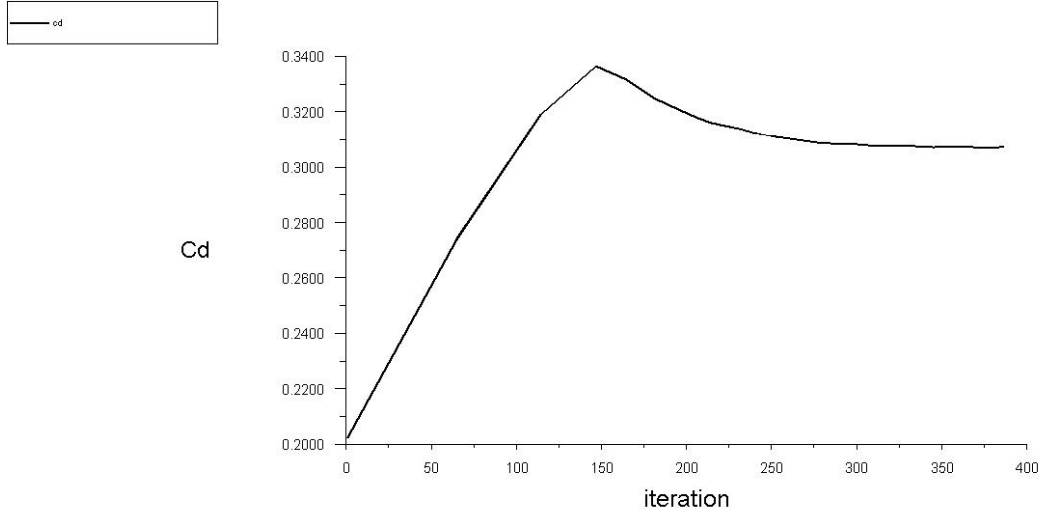


**Şekil 4.4** 1 numaralı girdap üreticinin kullanılması ile elde edilen sürüklenme katsayısı

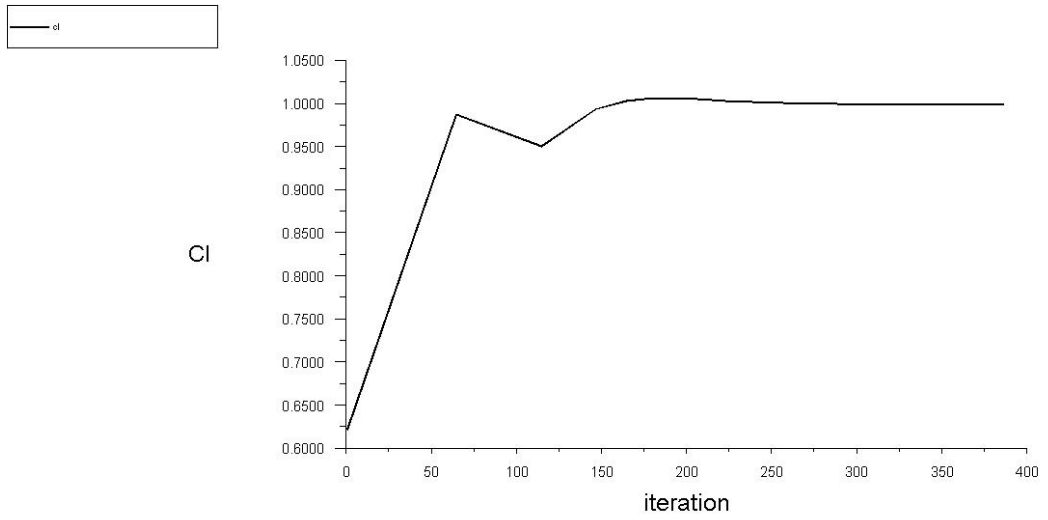


**Şekil 4.5** 1 numaralı girdap üreticinin kullanılması ile elde edilen kaldırma katsayısı

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de 2 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin sürüklenme ve kaldırma katsayılarının iterasyon sayısı ile değişimi verilmiştir. Sürüklenme katsayısı değeri yaklaşık olarak 350 iterasyon sonrasında yakınsama sağlarken kaldırma katsayısı grafiği yaklaşık olarak 300 iterasyon sonrasında yakınsamıştır. Sürüklenme ve kaldırma katsayıları sırası ile 0,307 ve 1,000'dir.

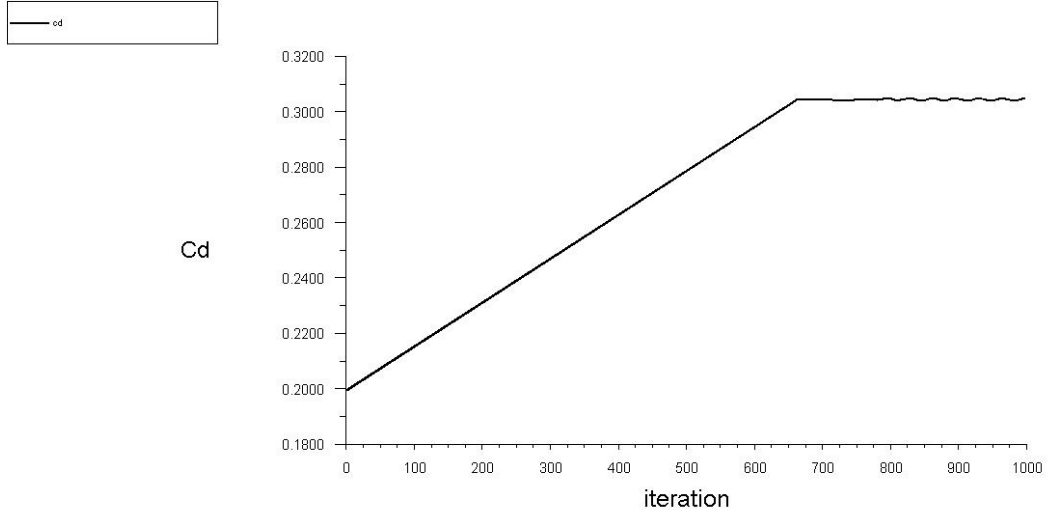


**Şekil 4.6** 2 numaralı girdap üreticinin kullanılması ile elde edilen sürüklenme katsayısı

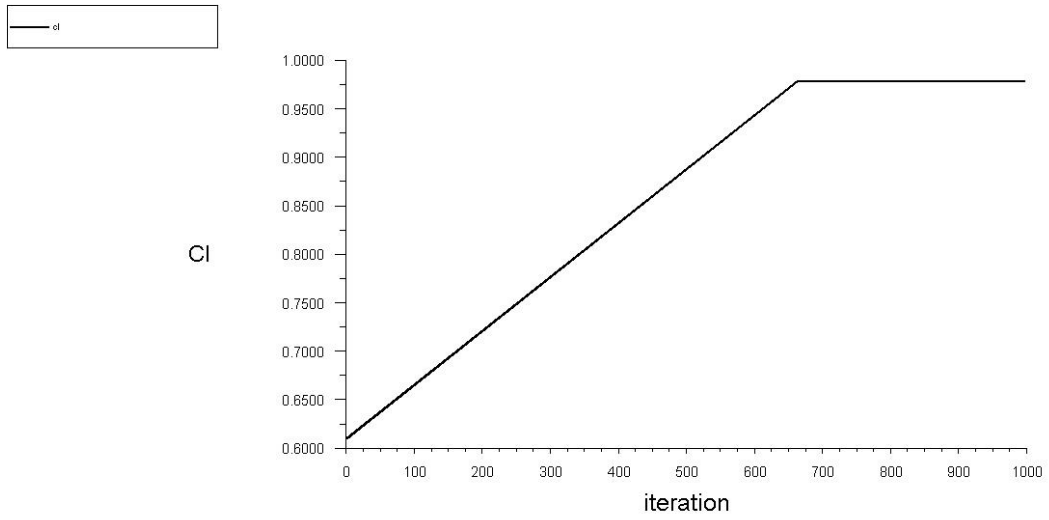


**Şekil 4.7** 2 numaralı girdap üreticinin kullanılması ile elde edilen kaldırma katsayısı

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da 3 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin sürüklenme ve kaldırma katsayılarının iterasyon sayısı ile değişimi verilmiştir. Sürüklenme ve kaldırma katsayısı değeri yaklaşık olarak 650 iterasyon sonrasında yakınsamıştır. Sürüklenme ve kaldırma katsayıları sırası ile 0,305 ve 0,979'dur.

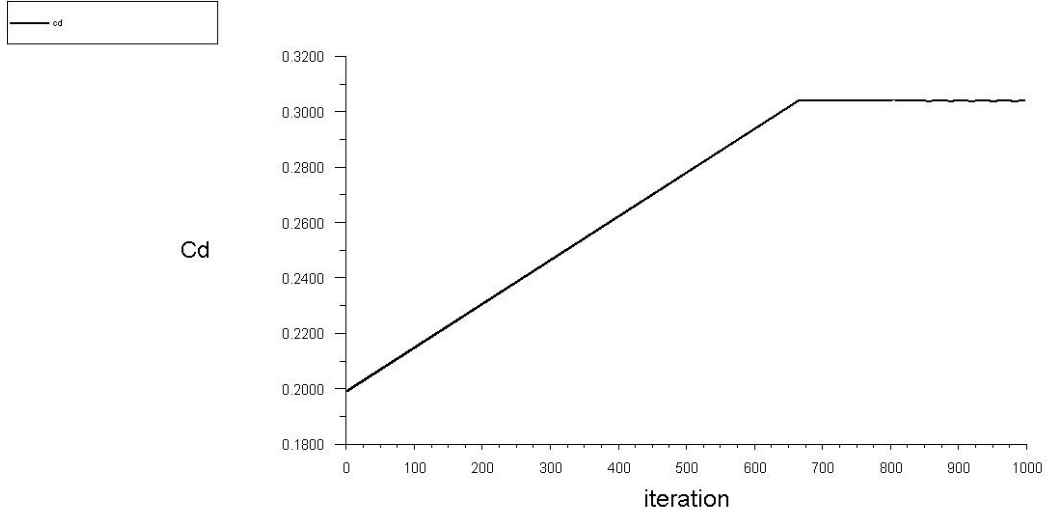


**Şekil 4.8** 3 numaralı girdap üreticinin kullanılması ile elde edilen sürüklenme katsayısı

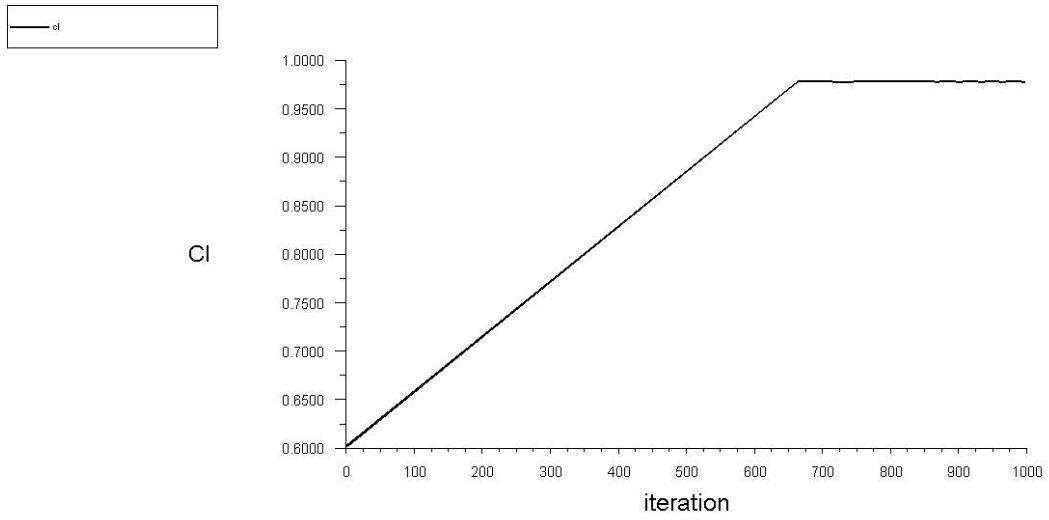


**Şekil 4.9** 3 numaralı girdap üreticinin kullanılması ile elde edilen kaldırma katsayısı

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de 4 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin sürüklenme ve kaldırma katsayılarının iterasyon sayısı ile değişimi verilmiştir. Sürüklenme ve kaldırma katsayısı değeri yaklaşık olarak 650 iterasyon sonrasında yakınsamıştır. Sürüklenme ve kaldırma katsayıları sırası ile 0,304 ve 0,978'dir.



**Şekil 4.10** 4 numaralı girdap üreticinin kullanılması ile elde edilen sürüklenme katsayısı



**Şekil 4.11** 4 numaralı girdap üreticinin kullanılması ile elde edilen kaldırma katsayısı

Çizelge 4.2’de girdap üreticilerin kullanıldığı modellerin sürüklenme ve kaldırma katsayıları ile ilgili değerler verilmiştir. En düşük sürüklenme katsayısı değeri 4 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelde elde edilirken kaldırma katsayısı için bu durum 1 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modeldir. En yüksek kaldırma katsayısı değeri 2 numaralı girdap üreticinin kullanılması sonucu elde edilirken en yüksek sürüklenme katsayısı değeri 1 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelde elde edilmiştir.



**Çizelge 4.2** Girdap üreteç kullanılan modellerin sürüklenme ve kaldırma katsayıları

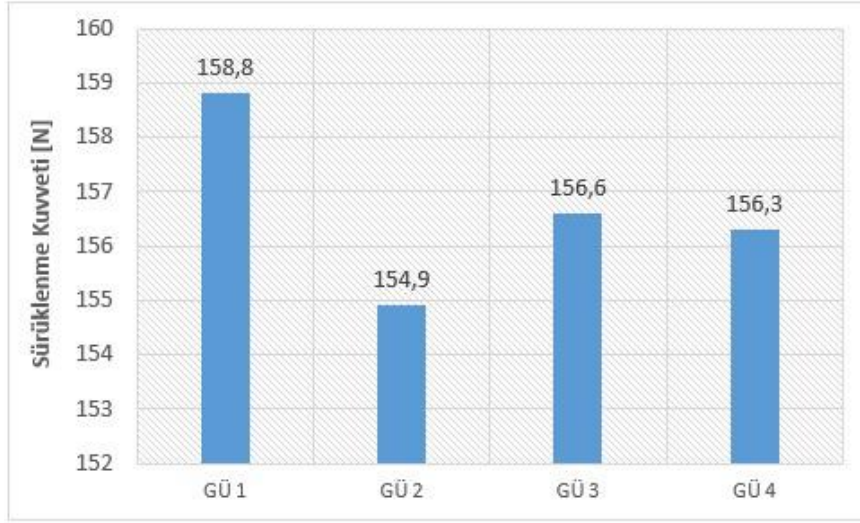
<b>Girdap Üreteç Tipi</b>	<b>Sürüklenme Katsayısı</b>	<b>Kaldırma Katsayısı</b>
GÜ 1	0,309	0,967
GÜ 2	0,307	1,000
GÜ 3	0,305	0,979
GÜ 4	0,304	0,978

Çizelge 4.3’de girdap üreteç kullanılmamış model üzerine etki eden sürüklenme kuvveti değerleri verilmiştir. Araç üzerine etkiyen sürüklenme kuvveti toplamda 157,49 N olmakla beraber bunun 141,33 N’luk kısmını basınç kaynaklı kuvvetler oluşturmaktadır. Daha önceki bölümlerde bahsedildiği üzere araç üzerine etkiyen direncin büyük bölümünü basınç kaynaklı kuvvetler oluşturur. Bu çalışmada da sürüklenme kuvvetinin yaklaşık %89,9’luk kısmını basınç kaynaklı kuvvetler oluşturmuştur.

**Çizelge 4.3** Gövde üzerine etkiyen sürüklenme kuvvetinin dağılımı

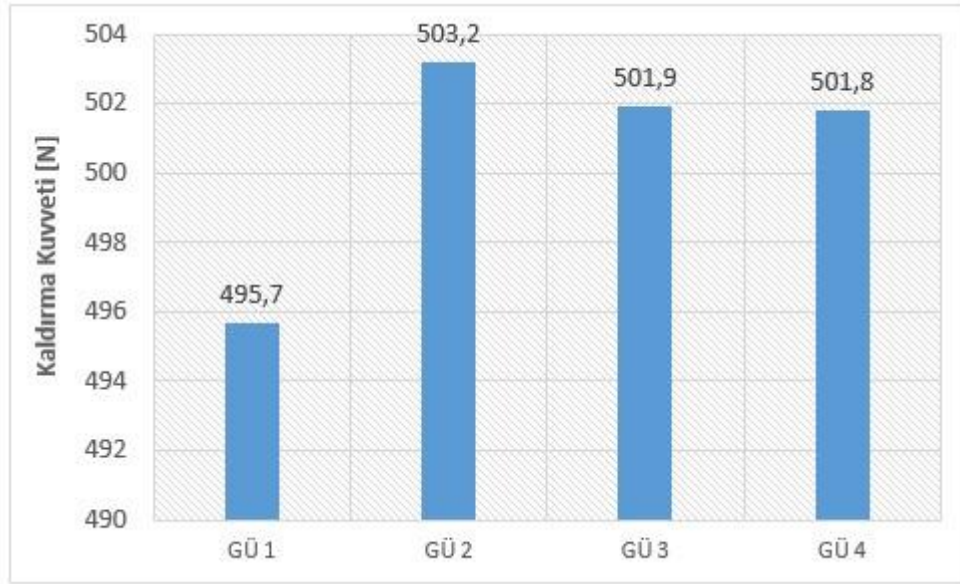
<b>Bölge</b>	<b>Kuvvetler (N)</b>		
	<b>Basınç</b>	<b>Viskoz</b>	<b>Toplam</b>
body (gövde)	125,24	14,36	139,6
bwh (arka tekerlek)	5,33	0,66	5,97
fwh (ön tekerlek)	10,76	1,14	11,9
<b>Net</b>	<b>141,33</b>	<b>16,16</b>	<b>157,49</b>

Girdap üreteçlerin araç üzerinde konumlandırılmasıyla araç üzerine etkiyen toplam sürüklenme kuvveti değerleri Şekil 4.12’de verilmiştir. Sürüklenme kuvvetinin en düşük değeri 154,9 N olarak gözlenmiştir ve bu değer 2 numaralı girdap üreteç kullanılması ile elde edilmiştir. En yüksek değer ise 1 numaralı girdap üreteci kullanılması sonucu gözlenmiştir ve bu değer 158,8 N’dur.



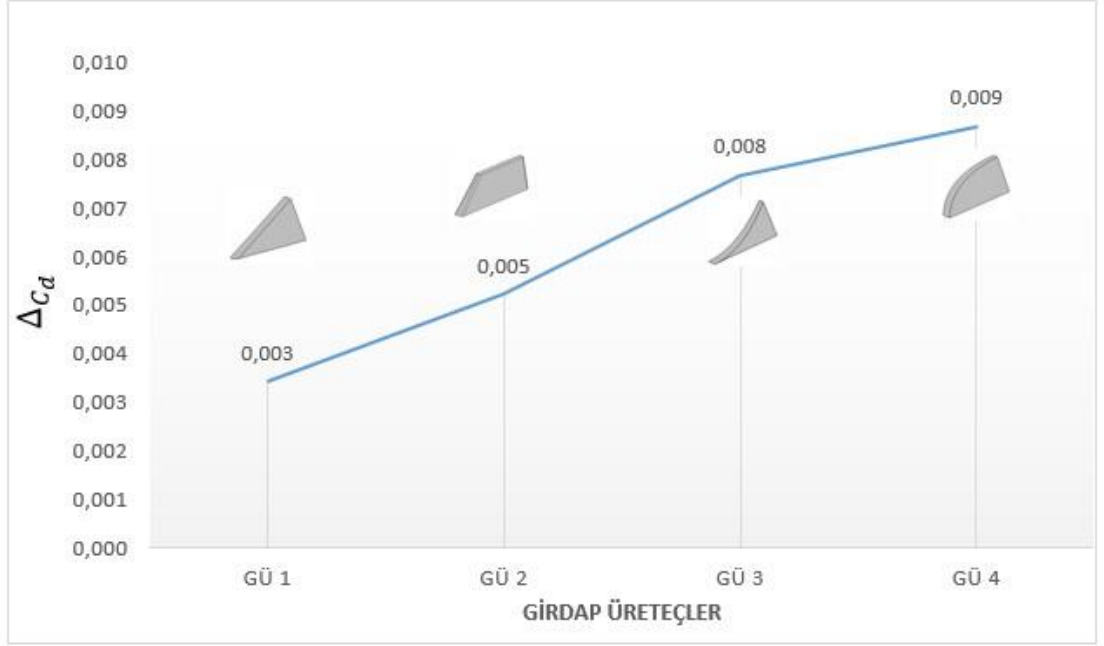
**Şekil 4.12** Girdap üreteçlerin kullanılması ile araç üzerine etkiyen sürüklenme kuvvetleri

Girdap üreteçlerin kullanılmadığı model üzerine etkiyen toplam kaldırma kuvveti 503,3 N'dur. Girdap üreteçlerin kullanılması ile araç üzerine etkiyen kaldırma kuvvetlerinin büyüklükleri Şekil 4.13'de verilmiştir. En düşük değer 1 numaralı girdap üretcin bulunduğu konfigürasyonda elde edilmiştir ve bu değer 495,7 N'dur. Kaldırma kuvvetinin en yüksek değeri 503,2 N'dur ve bu değer 2 numaralı girdap üretcin kullanılması ile elde edilmiştir.



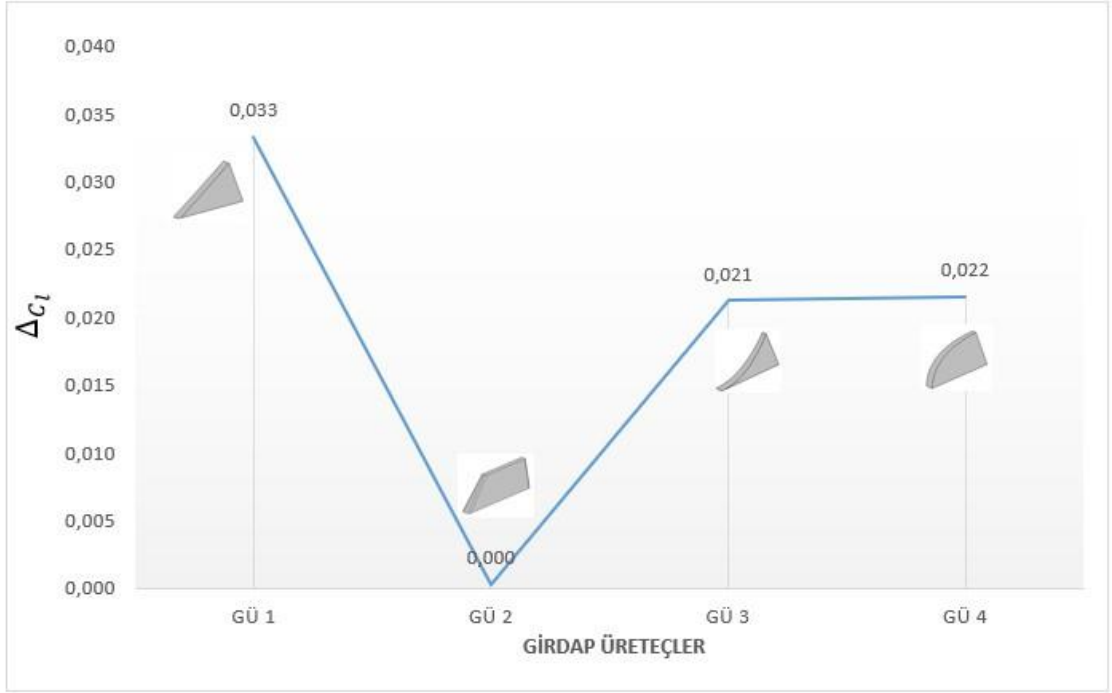
**Şekil 4.13** Girdap üreteçlerin kullanılması ile araç üzerine etkiyen kaldırma kuvvetleri

Şekil 4.14’de girdap üreteçlerin aracın sürüklenme katsayısına etkisi gösterilmiştir. Sürüklenme katsayısındaki iyileştirmenin en fazla olduğu girdap üreteç tipi 4 numaralı olmaktadır ve bu %2,87’lik bir değere tekabül etmektedir. Minimum azalmanın elde edildiği girdap üreteç ise 1 numaralıdır. 1 numaralı girdap üreticinin tercih edilmesi ile aracın sürüklenme katsayısında %0,96’lık bir iyileştirme söz konusu olmuştur.



**Şekil 4.14** Girdap üreteçlerin kullanılması ile sürüklenme katsayısında gözlenen değişimler

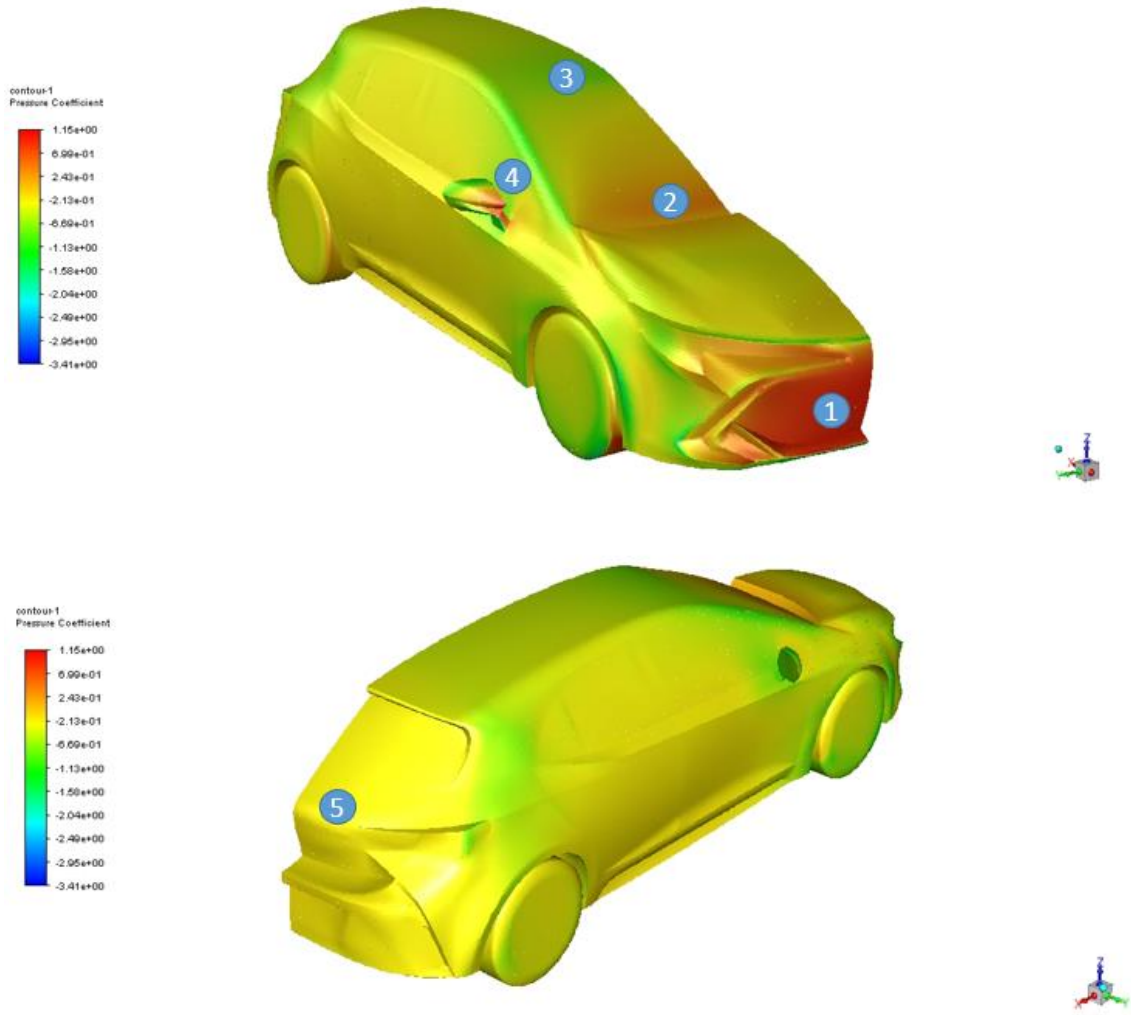
Şekil 4.15’de girdap üreteçlerin aracın kaldırma katsayısı üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Kaldırma katsayısındaki azalmanın en çok gözlemlendiği girdap üreteç tipi 1 numaralı olmaktadır ve kaldırma katsayısında 0,033’lük bir azalma elde edilmiştir. Bu değer yaklaşık olarak %3,3’lük bir iyileştirmeye tekabül etmektedir. 2 numaralı girdap üreticinin kullanılması ile kaldırma katsayısında kayda değer bir değişim gözlenmemiştir. Diğer 2 girdap üreteç tipi için elde edilen değerler birbirine yakındır ve bu değerler sırası ile 0,021 ve 0,022’dir. 2 ve 3 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelde %2,15 oranında iyileştirme gözlenmiştir.



**Şekil 4.15** Girdap üreteçlerin kullanılması ile kaldırma katsayısında gözlenen değişimler

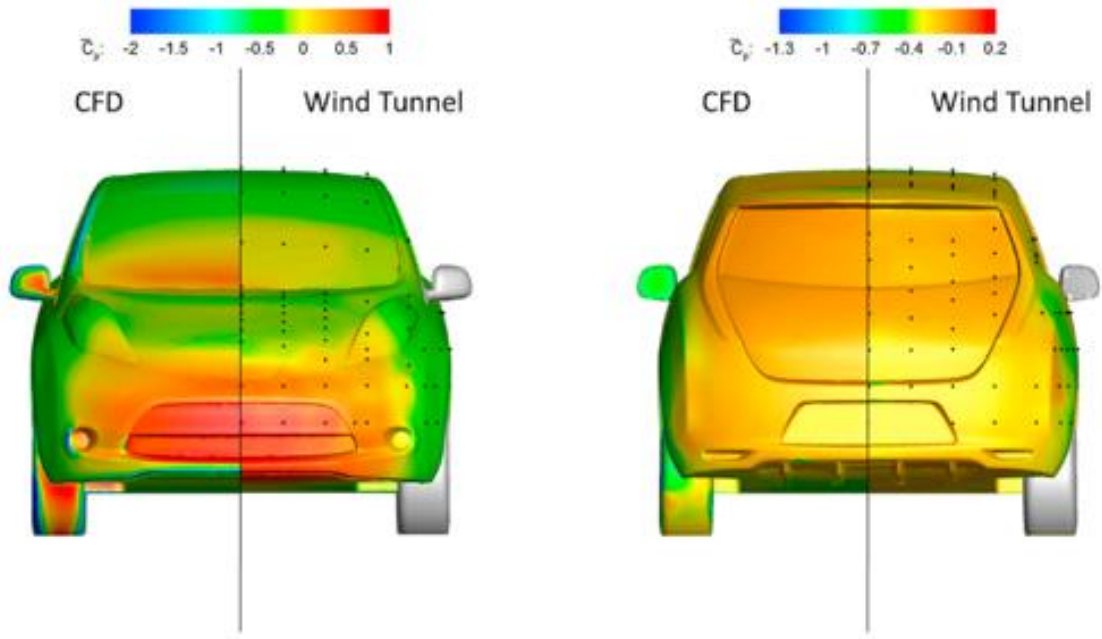
#### 4.2. Basınç Katsayısı ve Konturleri

Araç üzerindeki basınç dağılımları, konturleri ve basınç katsayıları ile ilgili veriler bu bölümde paylaşılmıştır. Şekil 4.16'da araç üzerindeki basınç dağılımı izometrik görünüş olarak verilmiştir. Koyu kırmızı renkli bölgeler pozitif basıncın en yüksek olduğu noktalar olarak göze çarpmaktadır. Yaklaşık olarak sarı ve koyu mavi renkleri arasındaki bölgeler ise negatif basınç bölgeleridir. Aracın ön kısmı (1) ve dikiz aynasının önü (4) durma noktası (stagnation point) olup maksimum pozitif basınç değerleri bu bölgelerdedir. Kaputun ön kısmından sileceklere kadar olan bölgede (2) hava akışı hızlanmış ve (2) nolu bölgede tekrar bir basınç artımı gözlenmiştir. Tavanın ön kısmında (3), basıncın negatif değerlere düştüğü ve tavanın arkasına doğru tekrar basıncın arttığı görülmektedir. Aracın arka kısmına (5) doğru hareket edilmesi ile bir miktar basınç artışı gözlenmiştir.

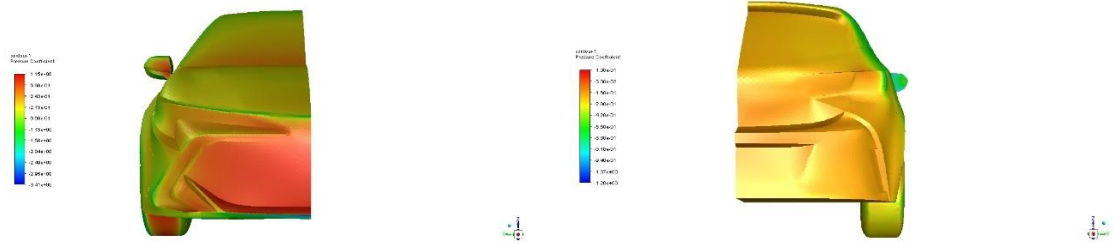


**Şekil 4.16** Girdap üreteç kullanılmamış modelin gövdesi üzerindeki basınç dağılımının izometrik görünüşü

Girdap üreteç kullanılmamış modelin gövdesi üzerindeki basınç katsayı dağılımı, Ebrahim & Dominy, (2020)'nin çalışmasında kullanılan Nissan Leaf aracının sayısal analiz ve rüzgar tüneli testleri sonrası elde edilen basınç grafikleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.17). Şekil 4.18'de görüldüğü üzere aracın ön ve arka kısımlarındaki basınç dağılımları Ebrahim & Dominy, (2020)'nin çalışmasında bulunan sonuçlar ile benzerdir.



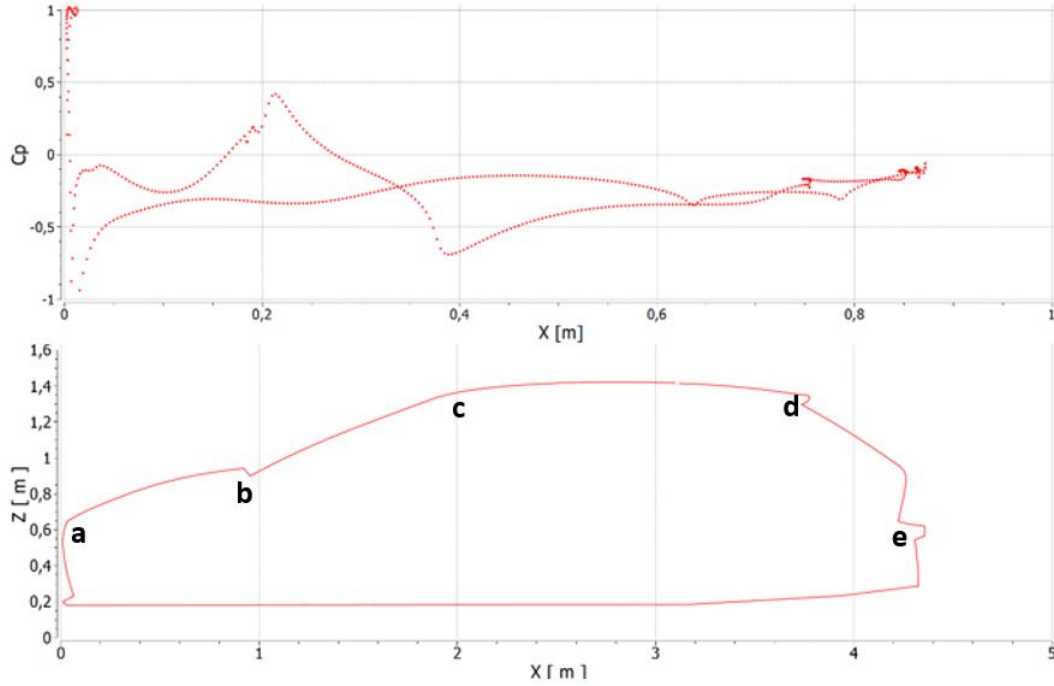
**Şekil 4.17** Nissan Leaf için CFD ve rüzgar tüneline elde edilen araç üzerindeki basınç dağılımlarının karşılaştırılması (Ebrahim & Dominy, 2020)



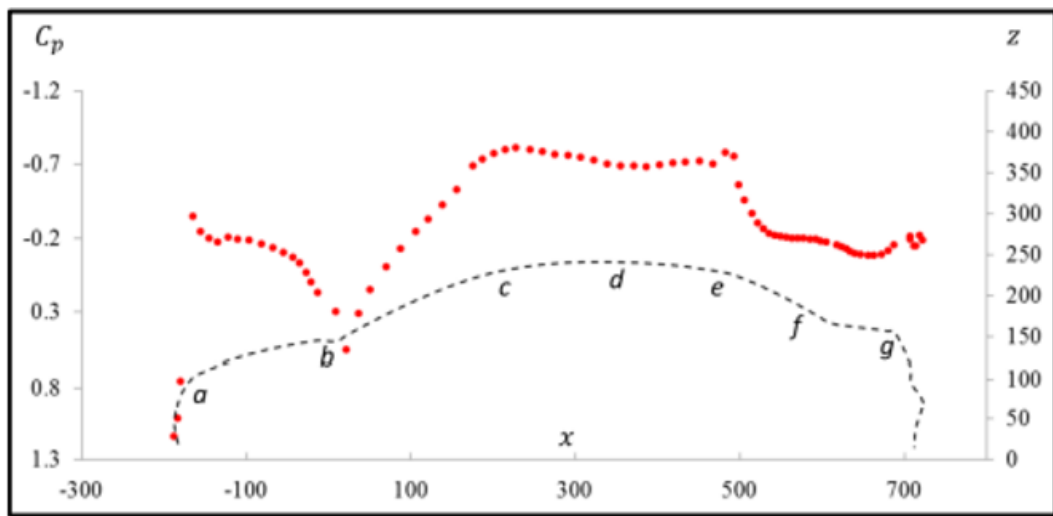
**Şekil 4.18** Girdap üretici kullanılmamış modelin ön ve arka bölgelerindeki basınç dağılımları

Şekil 4.19’da girdap üretici kullanılmamış modelin simetri düzlemindeki basınç katsayısı  $C_p$  dağılımı verilmiştir. Basınç katsayısı  $C_p$  grafiği, üst kısımda verilen araç gövdesi üzerindeki basınç dağılımları ile paraleldir. Maksimum pozitif basınç katsayısı aracın ön kısmında gözlemlenmiştir. Ön kaputun başladığı kısımlarda (a) grafik lokal negatif pik basınç değerine ulaşmıştır. (a) noktasından sileceklere kadar olan bölümde basınç katsayısı değerleri artmıştır ve (b) noktasında pozitif basınç katsayısı pik yapmıştır. Sileceklerden tavanın ön kısmına doğru olan bölgede yani (b) ve (c) noktaları arasında havanın akış hızı artması ile basınç katsayısı negatif değerler almıştır. Tavanın ön kısmında (c) basınç katsayısı minimum değerine ulaşmıştır. Basınç katsayısı, tavanın ön

kısmı (c) ve aracın arka kısmı arasındaki bölgede (e) artarak sıfır değerine yaklaşmıştır. Tavan ortası ile (d) noktası ve (d) noktası ile (e) noktası arasında basınç katsayısı neredeyse sabit olarak devam etmiştir. (d) ve (e) noktası arasındaki bölgede basıncın sabit devam etmesi bu bölgedeki akış ayrılmalarından ve akışın kararsızlığından kaynaklıdır.



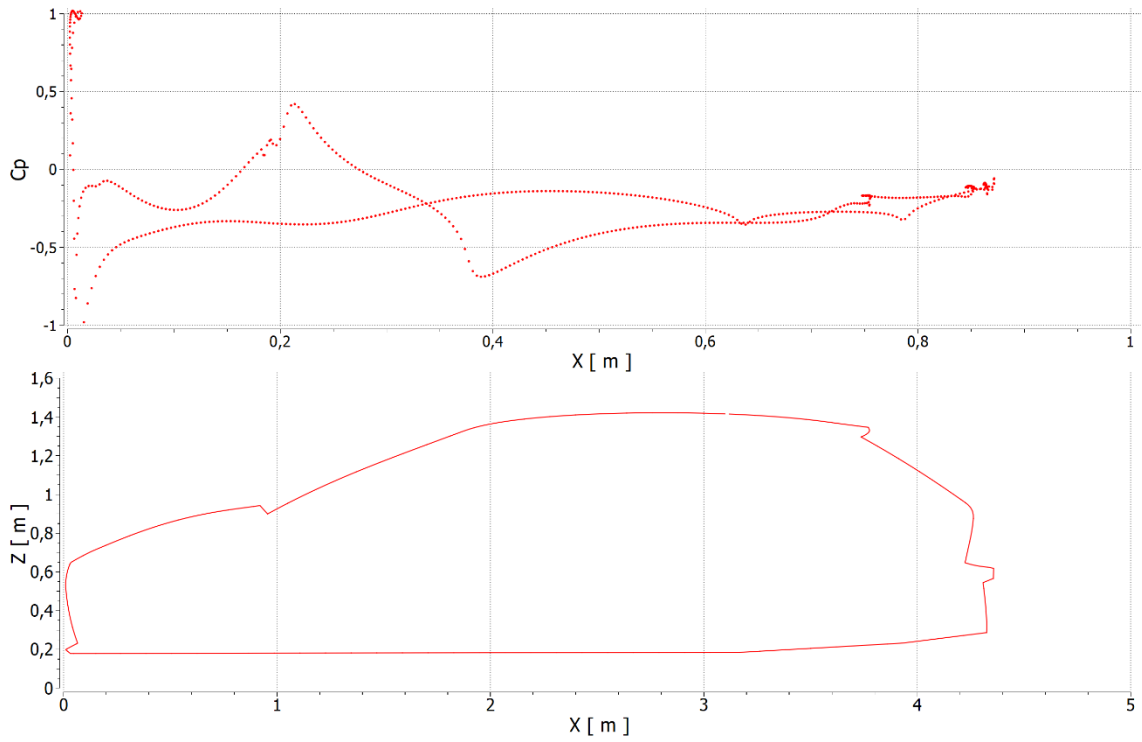
**Şekil 4.19** Girdap üreteç kullanılmamış modelin simetri düzlemindeki basınç katsayısı  $C_p$  dağılımı



**Şekil 4.20** 30 m/s serbest akış hızında aracın simetri düzlemindeki basınç katsayısı dağılımı (Altınışık, 2013)

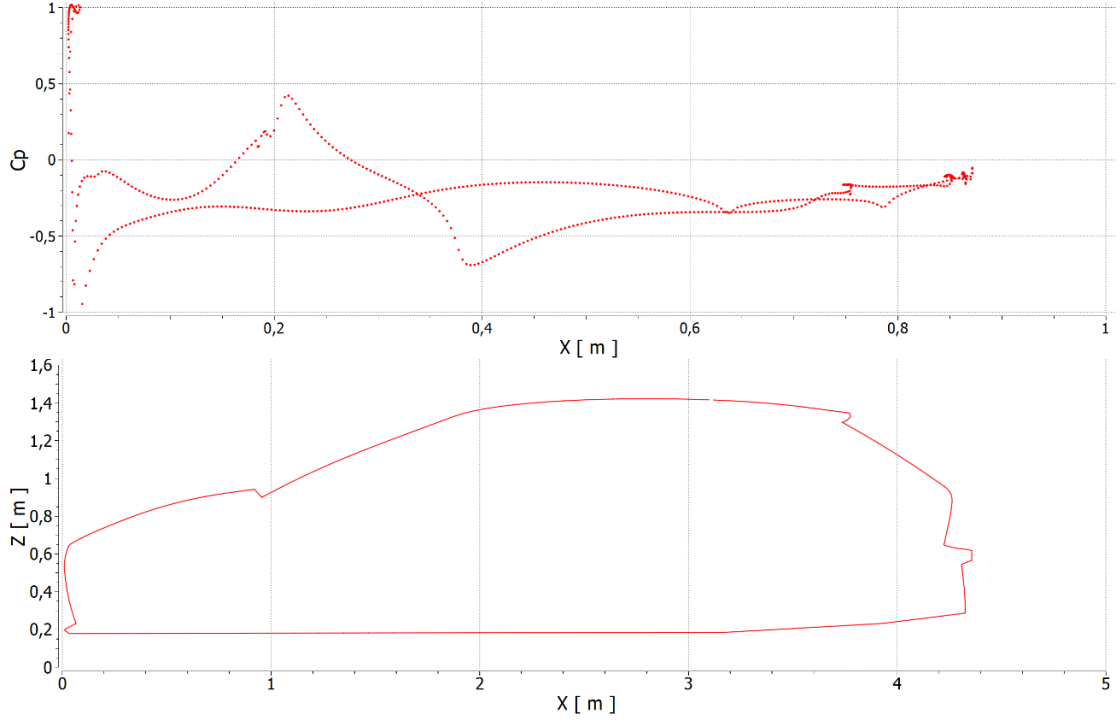
Şekil 4.20’de Altınışik, (2013)’in çalışmasında kullandığı modelin simetri düzlemindeki basınç dağılımı  $C_p$  mevcuttur. Arka kısım dışındaki veriler ile bu çalışmada elde edilen veriler birbirine benzerdir. Araçların arka kısımlarında gözlemlenen farklılığın sebebi bu çalışmada kullanılan araç tipinin hatchback, Altınışik, (2013)’in çalışmasında kullandığı araç tipinin ise sedan olmasından kaynaklıdır.

Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’de sırasıyla 1 numaralı, 2 numaralı, 3 numaralı ve 4 numaralı girdap üreticini kullandığı modellerin simetri düzlemindeki basınç katsayısı  $C_p$  dağılımı verilmiştir. Girdap üreticini kullanılan modellerin basınç katsayısı dağılımlarının kullanılmayan model ile benzerlik gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

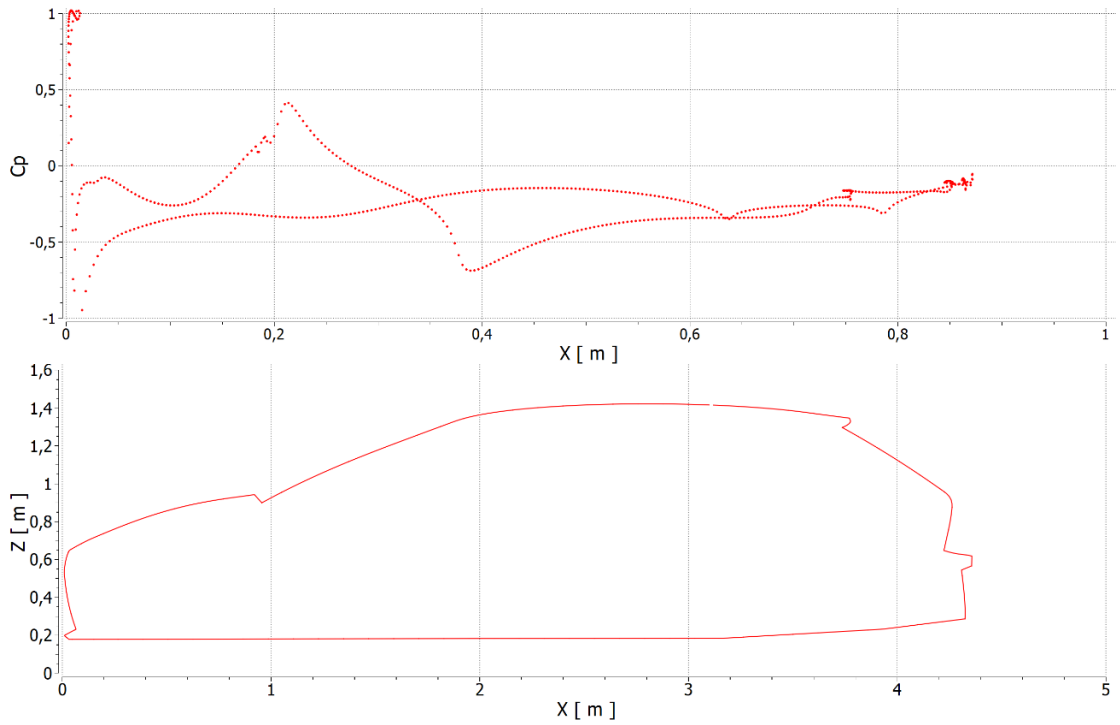


**Şekil 4.21** 1 numaralı girdap üreticini kullanılmış modelin simetri düzlemindeki basınç katsayısı  $C_p$  dağılımı

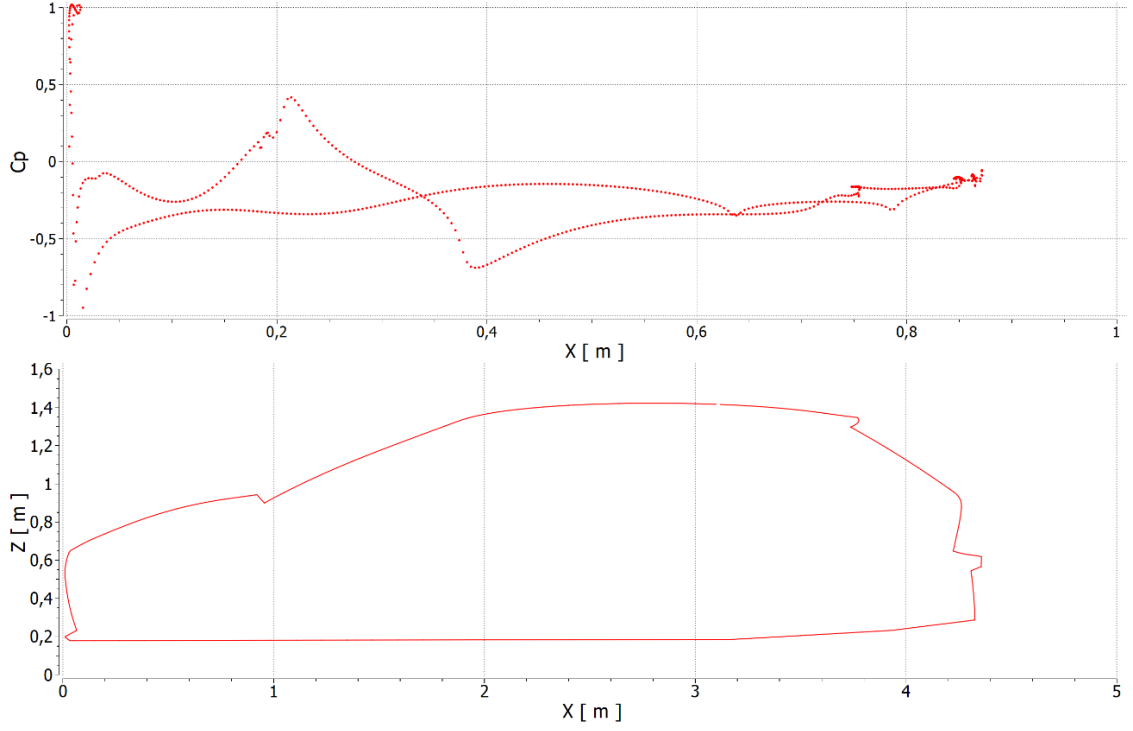




**Şekil 4.22** 2 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelin simetri düzlemindeki basınç katsayısı  $C_p$  dağılımı

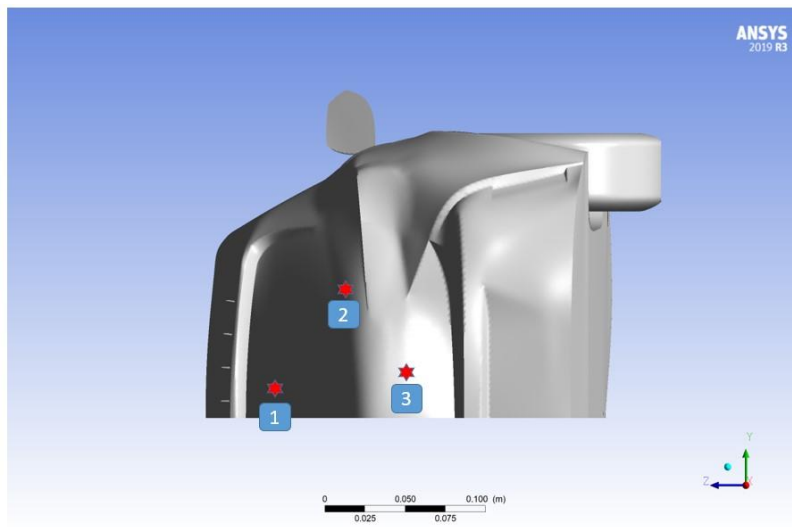


**Şekil 4.23** 3 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelin simetri düzlemindeki basınç katsayısı  $C_p$  dağılımı



**Şekil 4.24** 4 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelin simetri düzlemindeki basınç katsayısı  $C_p$  dağılımı

Şekil 4.25’de çalışmada kullanılan araç modelinin arka kısmında belirlenen 3 adet noktanın konumları verilmiştir. Bu noktalar, girdap üreteç kullanılmamış model ve kullanılmış modellerin arka kısmındaki basınç değerlerini mukayese etmek için oluşturulmuştur.



**Şekil 4.25** Aracın arka kısmında belirlenen noktalar

Çizelge 4.4’de modellere ve noktalara göre basınç değerleri verilmiştir. En düşük basınç değeri -2470,19 Pa olarak 2. noktada ve girdap üreteçsiz model için elde edilmiştir. En yüksek basınç değeri 2 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin 3. Noktasında -1381,08 Pa olarak ölçülmüştür.

**Çizelge 4.4** Aracın arka kısmında belirlenen noktalardaki basınç değerleri [Pa]

	<b>Nokta 1</b>	<b>Nokta 2</b>	<b>Nokta 3</b>
<b>GİRDAP ÜRETEÇSİZ MODEL</b>	-2206,97	-2470,19	-1458,23
<b>GÜ 1</b>	-2173,23	-2433,05	-1467
<b>GÜ 2</b>	-2092,98	-2364,6	-1381,08
<b>GÜ 3</b>	-2084,13	-2354,17	-1389,33
<b>GÜ 4</b>	-2103,04	-2373,26	-1400,93

Çizelge 4.5’te girdap üreteçlerin kullanılması ile belirlenen noktalarda elde edilen basınç farkları verilmiştir. 122,84 Pa artış ile maksimum basınç değişimi 3 numaralı girdap üreticinin 1. noktasında tespit edilmiştir. 1 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin 3. noktası hariç bütün verilerde pozitif basınç değişimi gözlemlenmiştir.

**Çizelge 4.5** Girdap üreteçlerin kullanılması ile aracın arka kısmındaki noktalarda oluşan basınç farkları [Pa]

	<b>Nokta 1</b>	<b>Nokta 2</b>	<b>Nokta 3</b>
<b>GÜ 1</b>	33,74	37,14	-8,77
<b>GÜ 2</b>	113,99	105,59	77,15
<b>GÜ 3</b>	122,84	116,02	68,9
<b>GÜ 4</b>	103,93	96,93	57,3

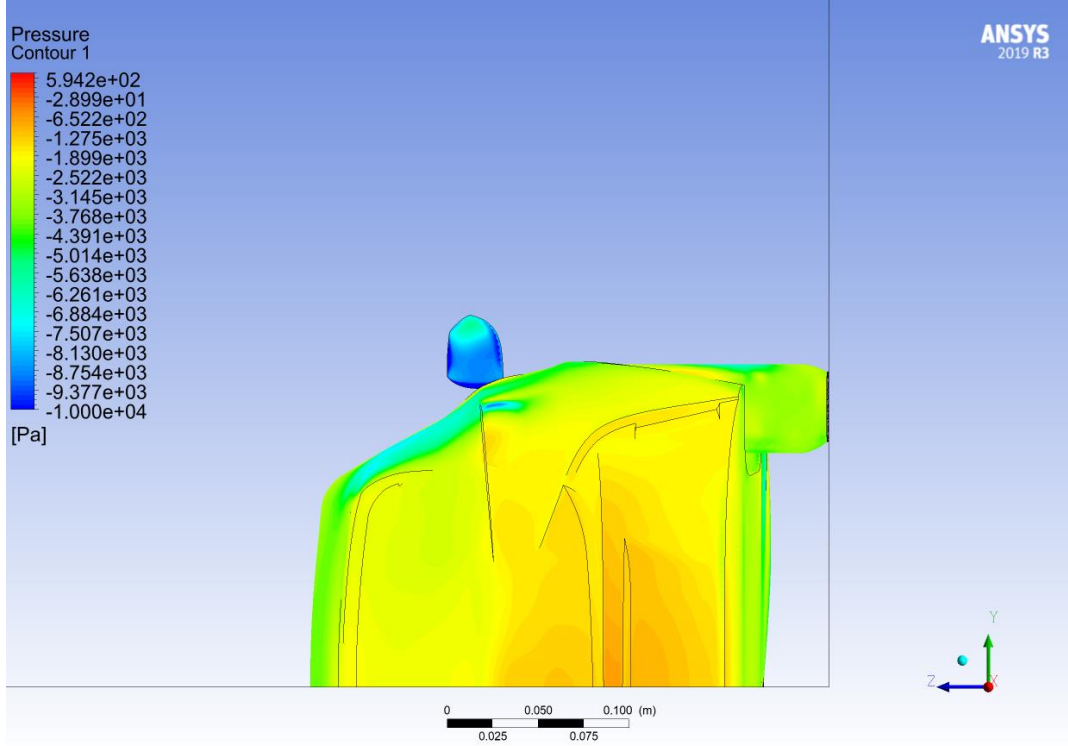
Çizelge 4.6’da ise girdap üreteçlerin kullanılması ile belirlenen noktalardaki basınç farklılıklarının oranı verilmiştir. %5,57’lik oranla en yüksek basınç artışı 3 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin 1. noktasında tespit edilmiştir. Negatif basınç değişimi gözlemlenen 1 numaralı girdap üreteç kullanılan modelin 3.noktasındaki basınç değişim oranı ise %0,6’dır.

**Çizelge 4.6** Girdap üreteçlerin kullanılması ile aracın arka kısmındaki noktalarda oluşan basınç farklarının oranı [Pa]

	<b>Nokta 1</b>	<b>Nokta 2</b>	<b>Nokta 3</b>
<b>GÜ 1</b>	1,53%	1,50%	-0,60%
<b>GÜ 2</b>	5,16%	4,27%	5,29%
<b>GÜ 3</b>	5,57%	4,70%	4,72%
<b>GÜ 4</b>	4,71%	3,92%	3,93%

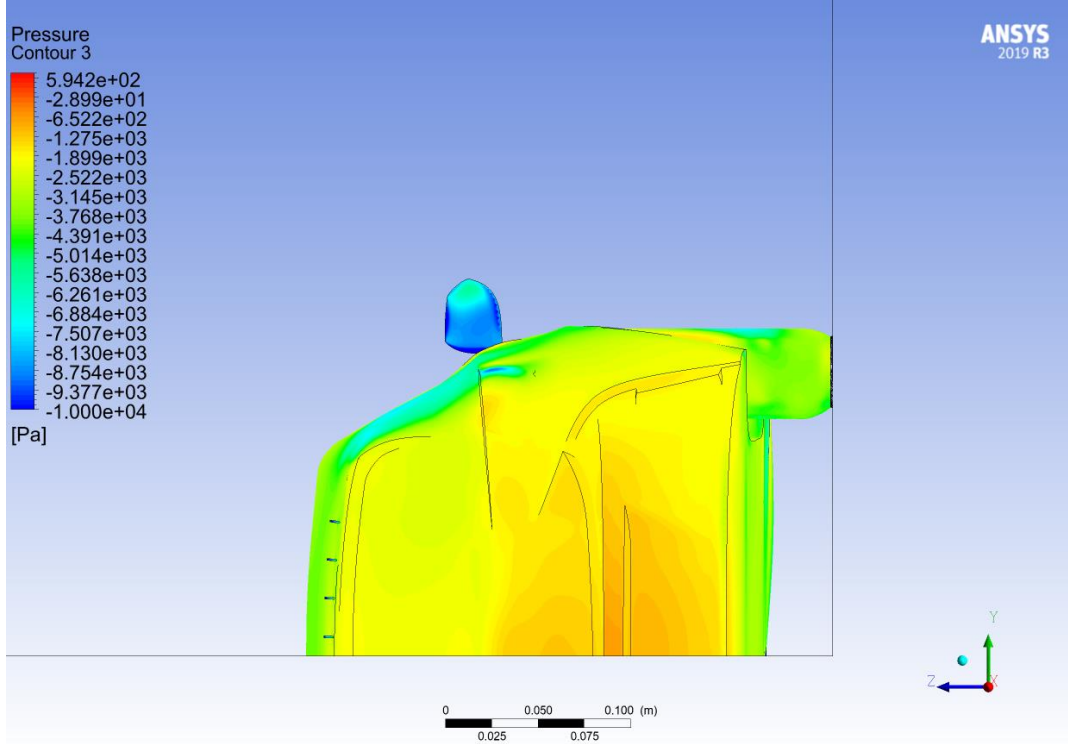
Girdap üreteçlerin kullanılması ile aracın arka kısmındaki basınç değerlerinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Arka kısımdaki basıncın artması ile aracın ön ve arka kısmında oluşan basınç farkı azalmış dolayısıyla aracın sürüklenme katsayısı değerlerinde iyileştirmeler elde edilmiştir.

Şekil 4.26'da girdap üreteç kullanılmamış modelin arka bölgesindeki basınç dağılımı verilmiştir. Aracın arka kısmındaki basınç dağılımı negatif değerlerden oluşmaktadır. Tavanın arka kısmından aracın arka kısmına doğru basıncın arttığı gözlemlenmektedir. Tavanın arka kısmında (akış ayrılma bölgesi) elde edilen basınç değerleri aracın arka kısmına göre daha düşüktür. Bu durum, tavanın ön kısmından tavanın arka kısmındaki ayrılma bölgesine kadar olan bölümde havanın hız değerlerinin serbest akış hızından yüksek olması ile açıklanır.

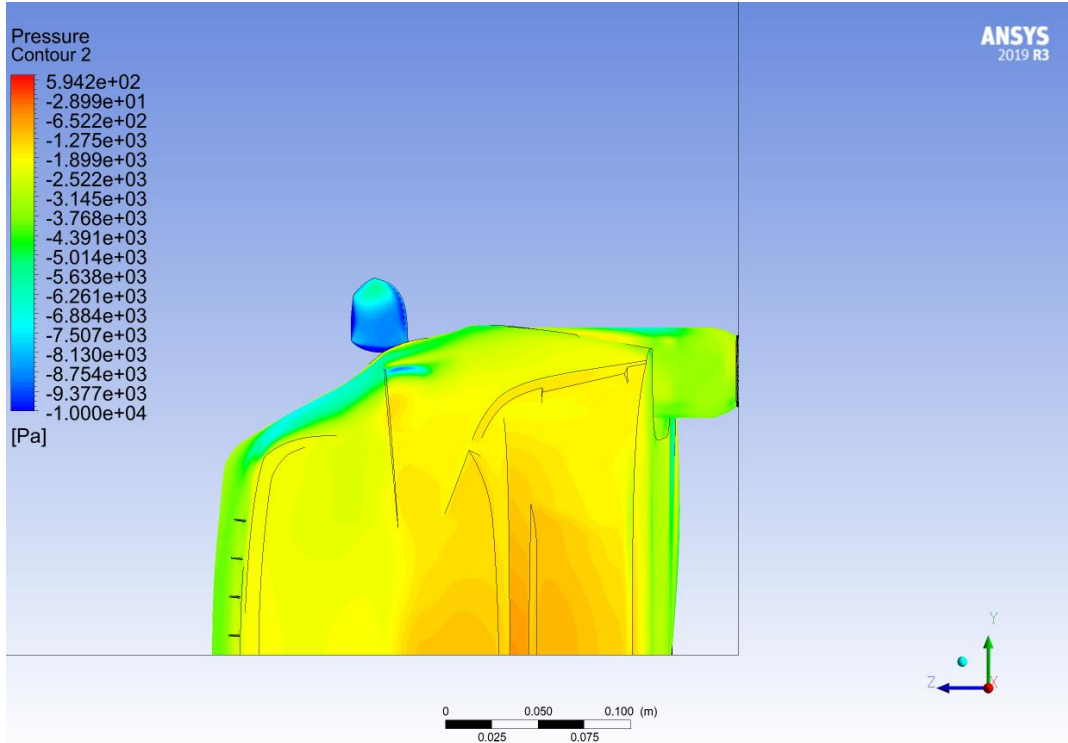


**Şekil 4.26** Girdap üreteç kullanılmamış modelin arka bölgesindeki basınç dağılımı

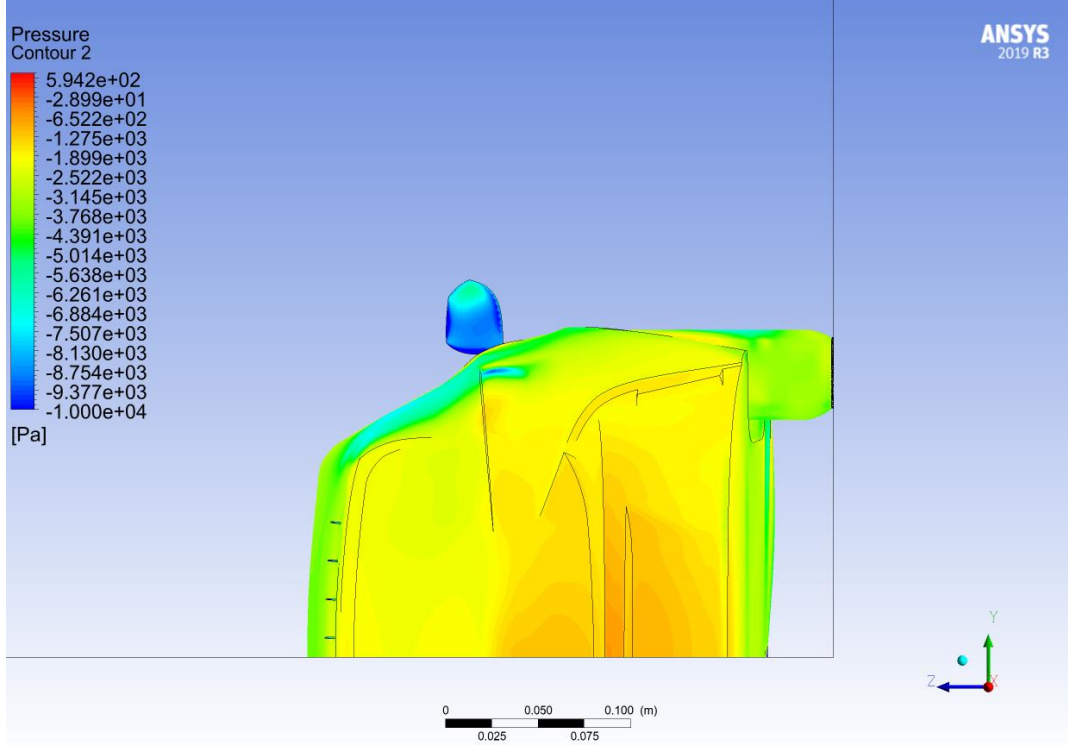
Şekil 4.27, Şekil 4.28, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da sırasıyla 1 numaralı, 2 numaralı, 3 numaralı ve 4 numaralı girdap üretecin kullanıldığı modellerin arka kısmındaki basınç dağılımları verilmiştir. Girdap üreteçlerin kullanıldığı modellerde aracın arka kısmı üzerindeki basınç dağılımı ele alındığında girdap üreteç kullanılmamış modele göre artışlar gözlemlenmiştir. Bu bölge üzerindeki basınç dağılımları genel olarak benzer olmasına rağmen bazı bölgelerde basınç farklılıklarından dolayı görsel farklılarda oluşmuştur.



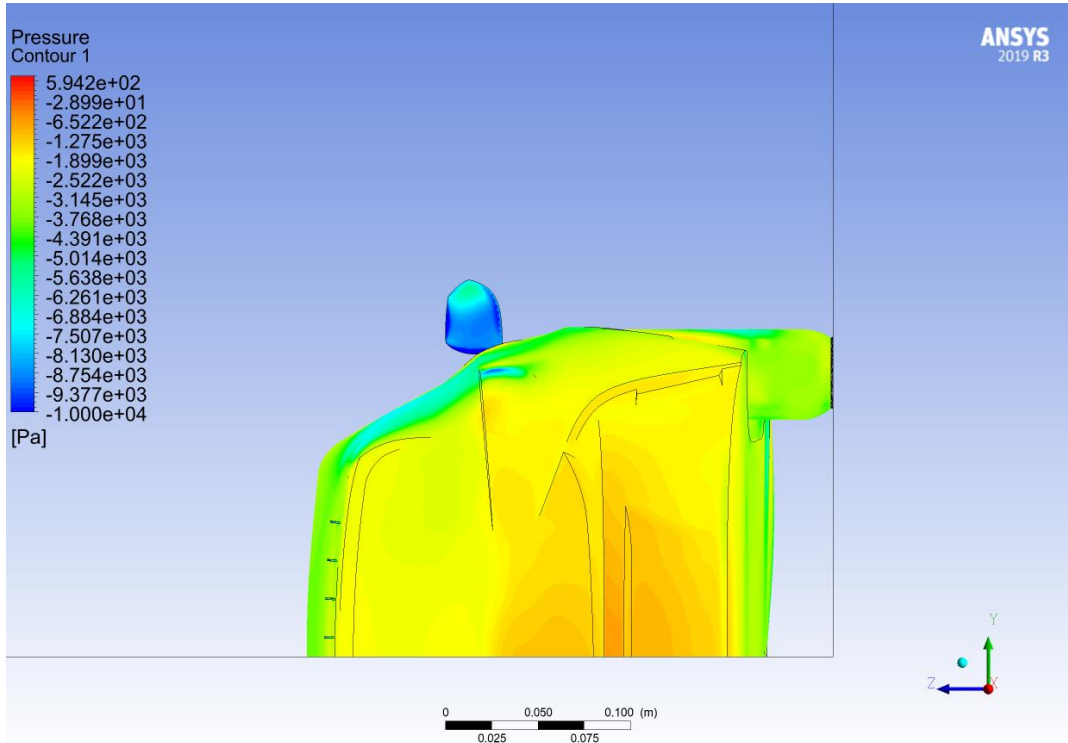
Şekil 4.27 1 numaralı girdap üreteç kullanılan modelin arka bölgesindeki basınç dağılımı



Şekil 4.28 2 numaralı girdap üreteç kullanılan modelin arka bölgesindeki basınç dağılımı

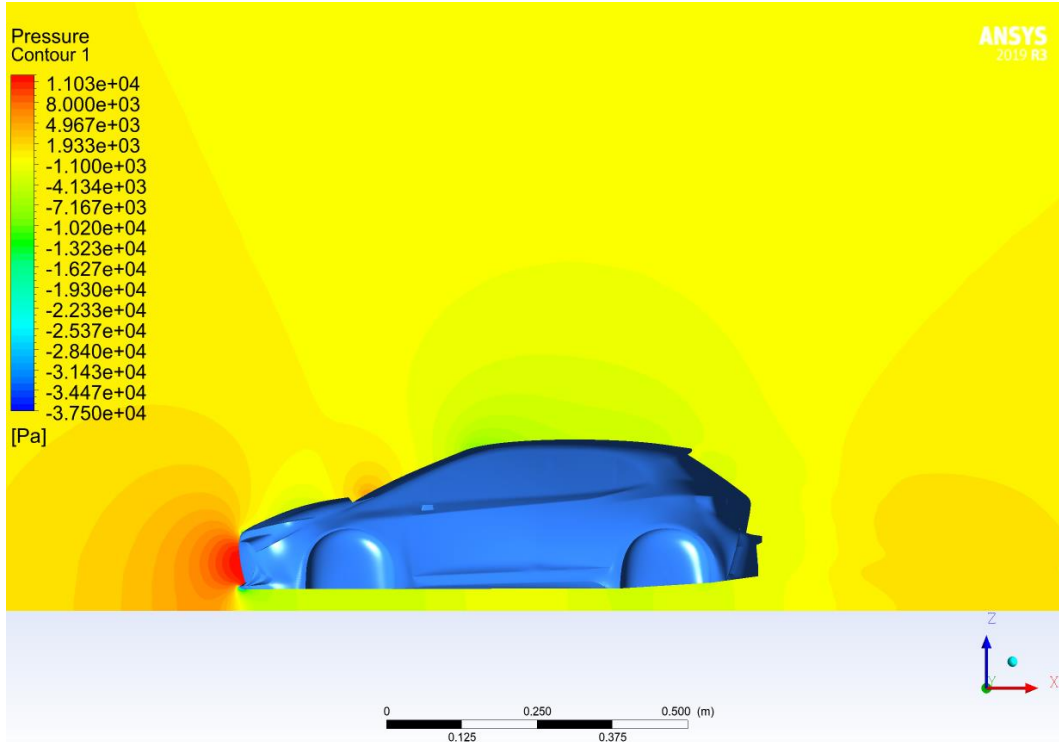


Şekil 4.29 3 numaralı girdap üreteç kullanılan modelin arka bölgesindeki basınç dağılımı



Şekil 4.30 4 numaralı girdap üreteç kullanılan modelin arka bölgesindeki basınç dağılımı

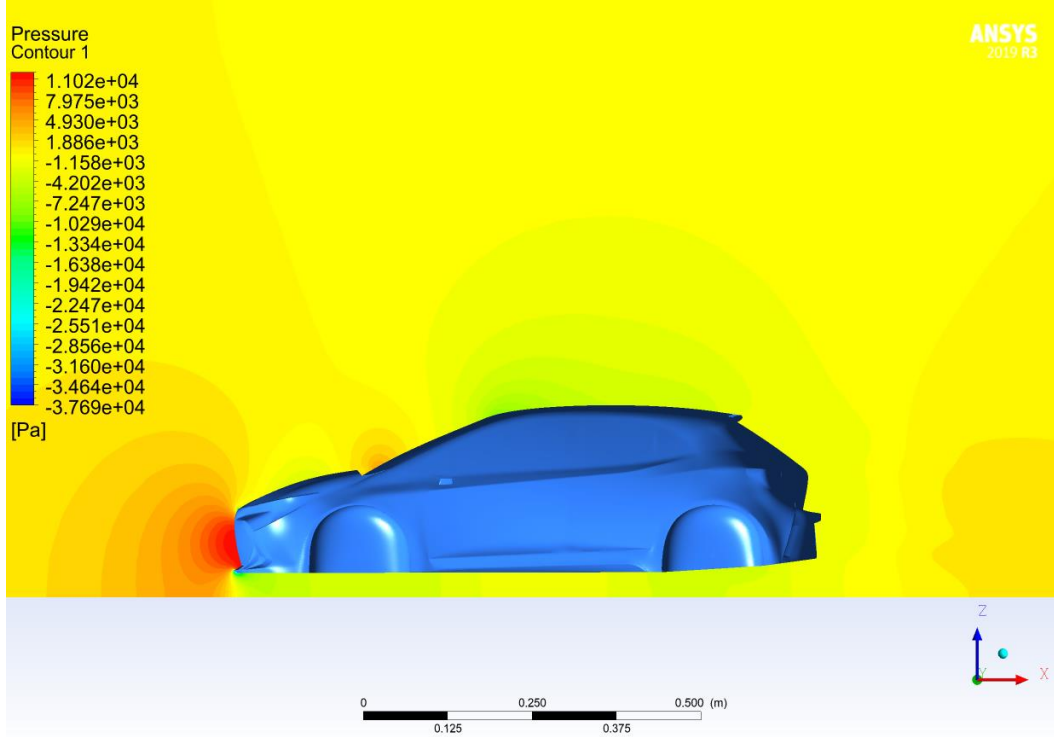
Şekil 4.31'de girdap üretici kullanılmamış modelin simetri düzlemindeki basınç konturü verilmiştir. Aracın ön kısmında (ızgaralıkların olduğu bölüm) yüksek basınçlı bir bölge oluştuğu gözlemlenirken aracın arka kısmında düşük basınçlı bir akış bölgesi oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca sileceklerin bulunduğu bölgede küçük çaplı bir yüksek basınç bölgesi ve tavanın ön kısmında da hava akışının hızlanması nedeniyle düşük basınçlı bir bölge gözlemlenmiştir. Bu düzlemlerdeki basınç konturleri araç üzerindeki basınç katsayısı dağılımı ile paralellik göstermektedir.



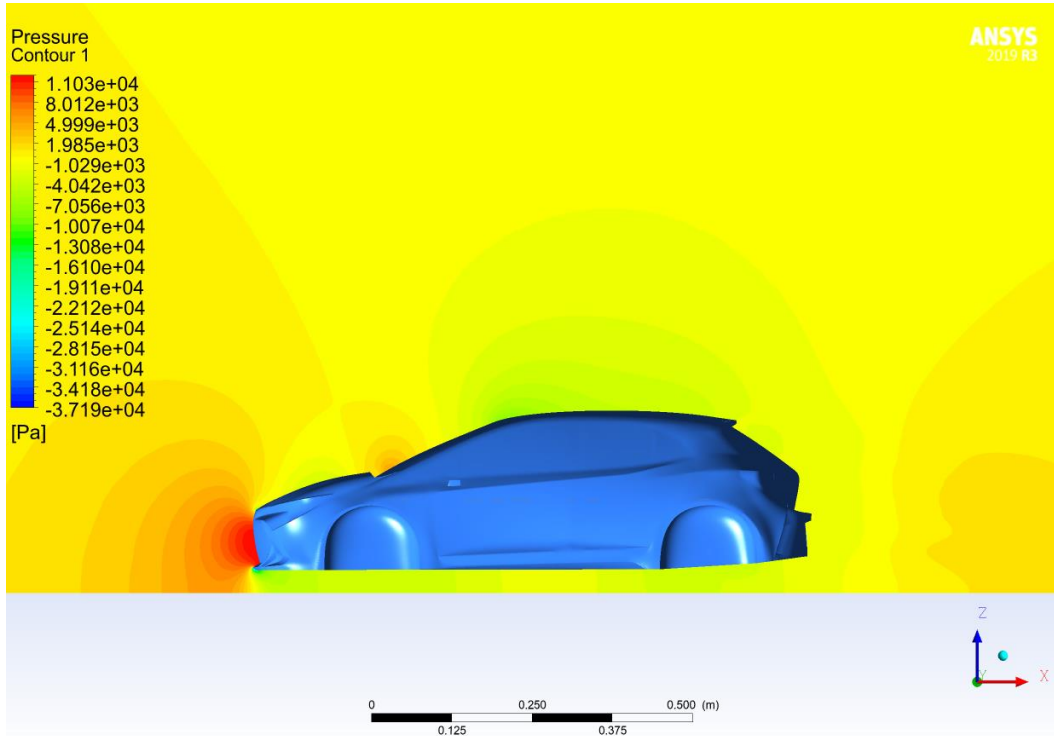
Şekil 4.31 Girdap üretici kullanılmamış modelin simetri düzlemindeki basınç konturü

Şekil 4.32, Şekil 4.33, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'de sırasıyla 1 numaralı, 2 numaralı, 3 numaralı ve 4 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modellerin simetri düzlemindeki basınç konturleri verilmiştir. Girdap üretici kullanılan modellerin arka kısımlarındaki basınç dağılımlarının genel hatları girdap üretici kullanılmayan modelinkiyle benzerlik göstermektedir. Girdap üreticiler, aracın arka bölgesinde basınç değerlerinde artış elde edilmesini sağlamıştır.

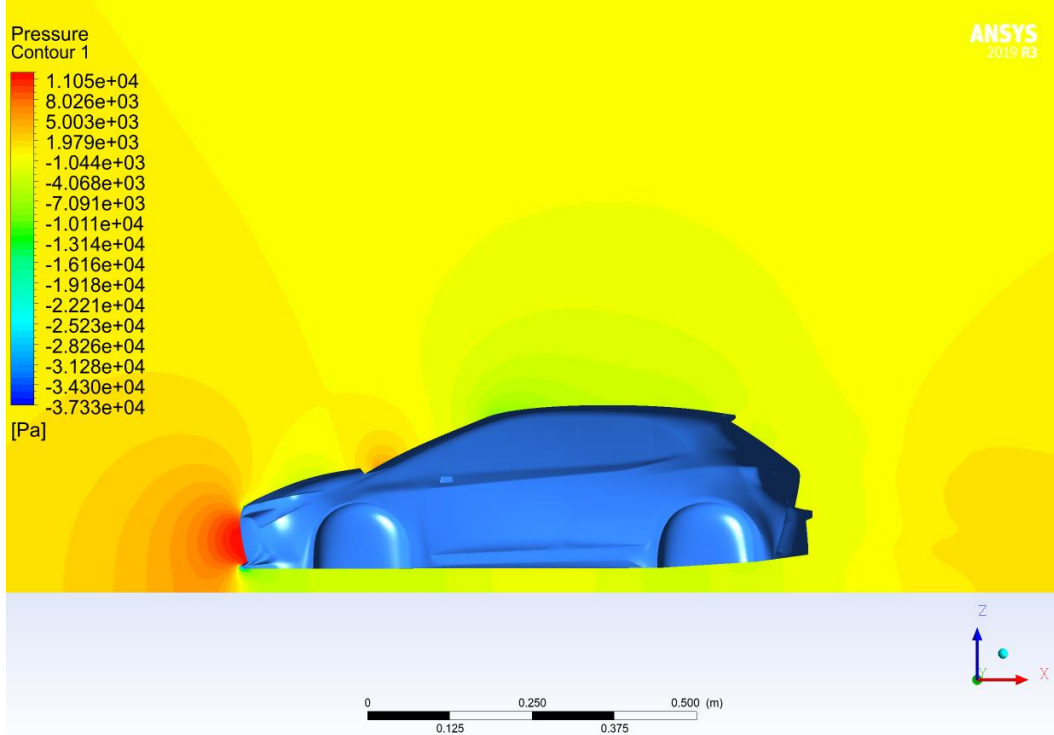




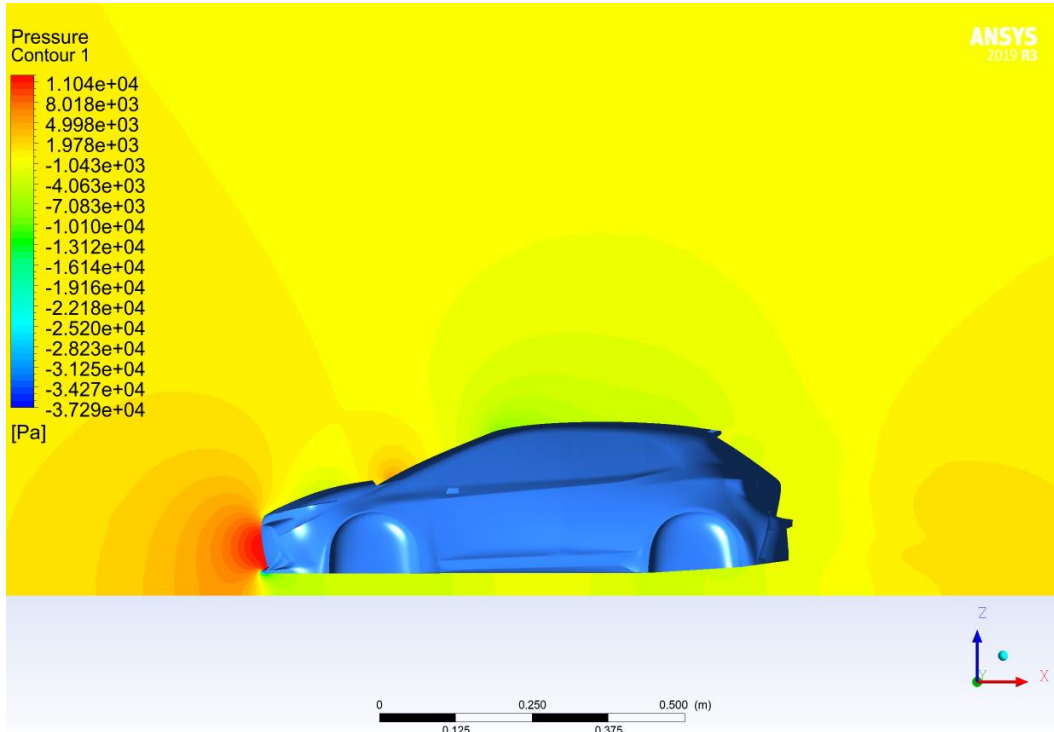
**Şekil 4.32** 1 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki basınç kontürü



**Şekil 4.33** 2 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki basınç kontürü

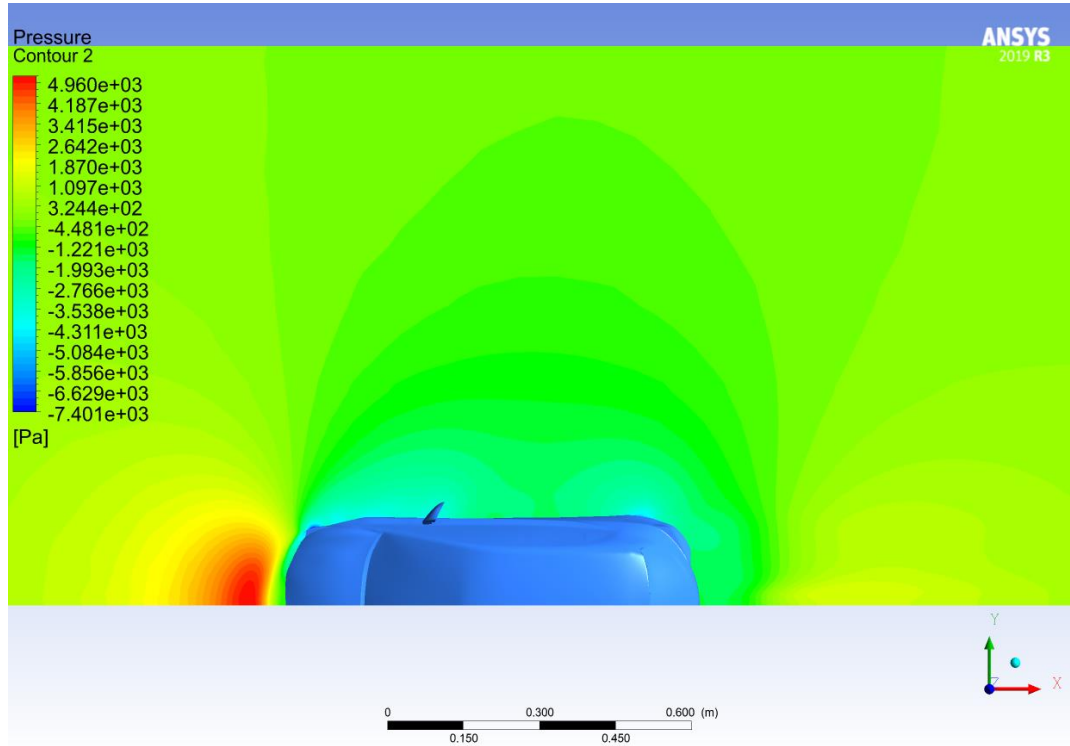


**Şekil 4.34** 3 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki basınç kontürü



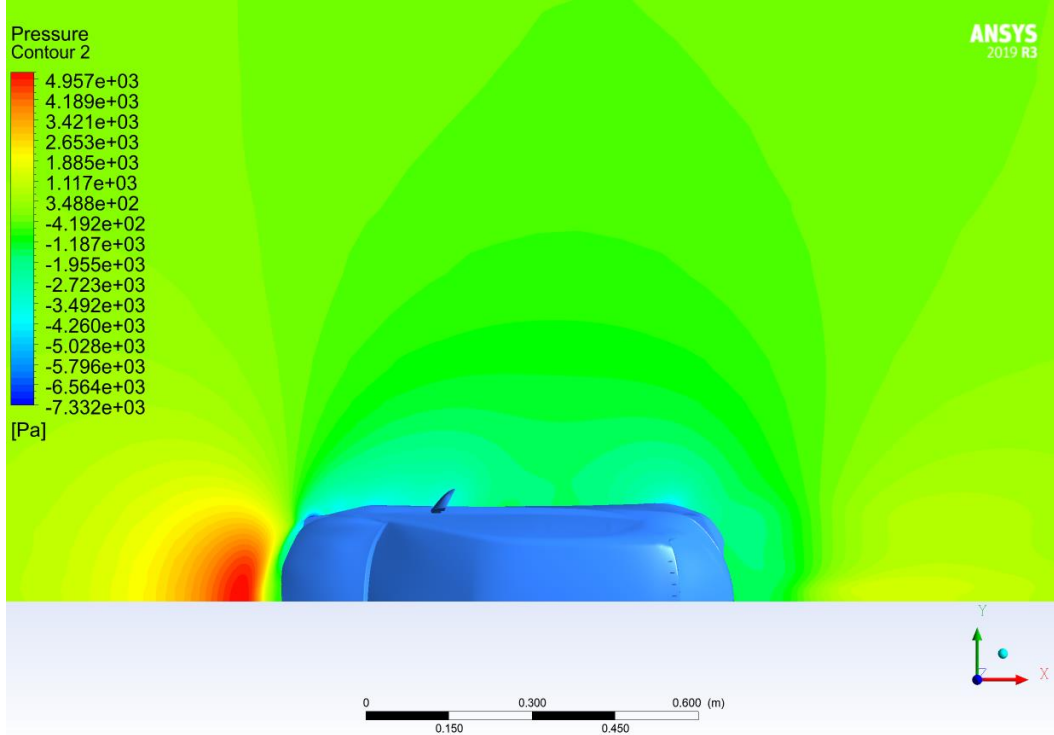
**Şekil 4.35** 4 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki basınç kontürü

Şekil 4.36’da girdap üreteç kullanılmamış modelin  $z= 0,5h-xy$  düzlemindeki basınç konturü verilmiştir. Aracın ön kısmında yüksek basınca sahip bir akış alanı görülürken aracın yan ve arka kısımlarında negatif basınç değerleri gözlemlenmiştir. Yan kısımlarda oluşan negatif basınç değerleri bu bölgedeki hız değerlerinin serbest akış hızından yüksek olması ile açıklanmaktadır. Aracın arka kısmındaki negatif basınç değerleri ise art izi bölgesindeki oluşan ters akışlardan ve akış ayrılmasından kaynaklıdır.

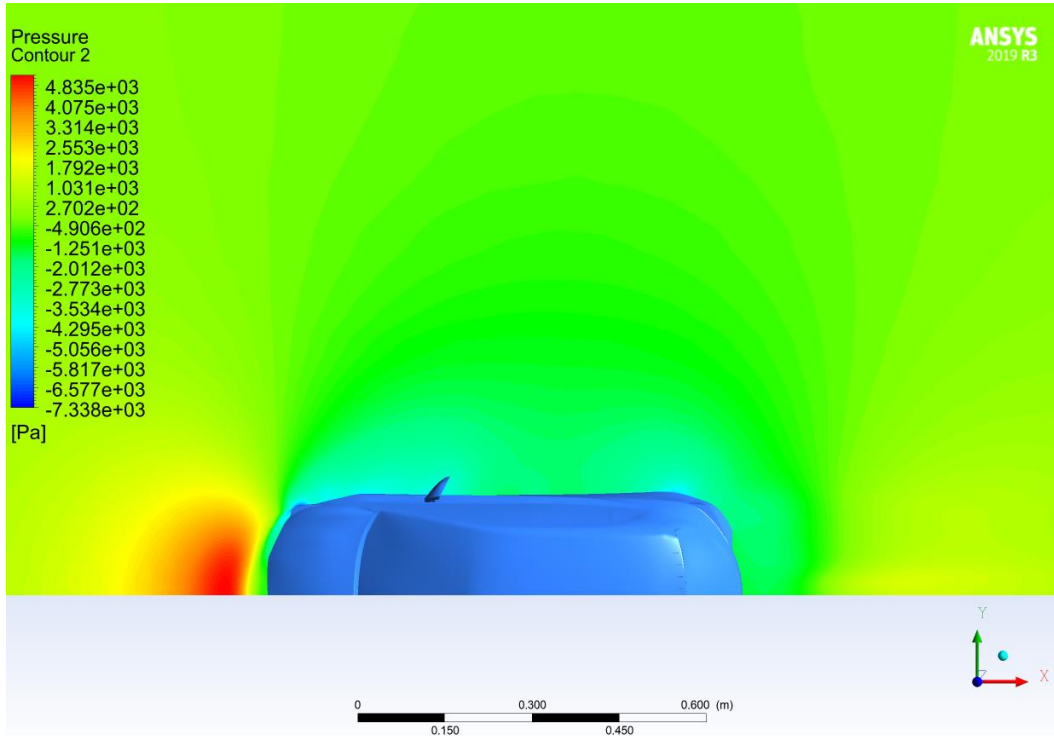


**Şekil 4.36** Girdap üreteç kullanılmamış modelin  $z= 0,5h-xy$  düzlemindeki basınç konturü

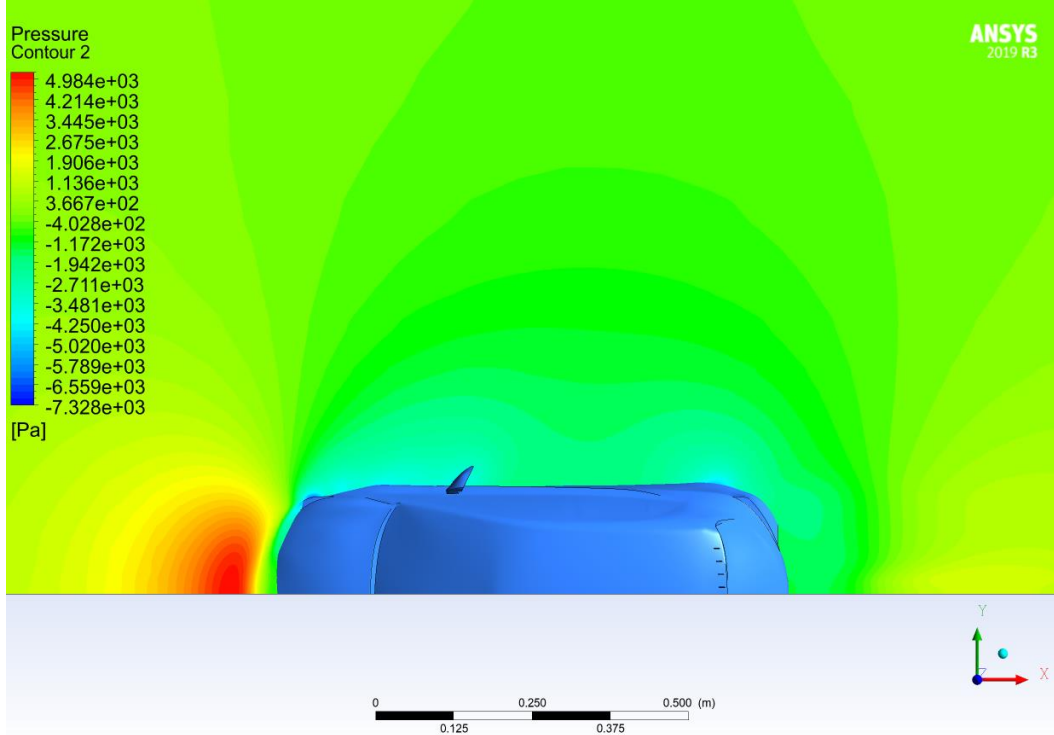
Şekil 4.37, Şekil 4.38, Şekil 4.39 ve Şekil 4.40’da sırasıyla 1 numaralı, 2 numaralı, 3 numaralı ve 4 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modellerin  $z= 0,5h-xy$  düzlemindeki basınç konturleri mevcuttur. Elde edilen konturlerin genel yapısı girdap üreteç kullanılmamış modelin  $z= 0,5h-xy$  düzlemindeki basınç konturüyle benzer eğilimleri göstermektedir. Girdap üreteçlerin kullanılması ile aracın arka kısmındaki basınç değerlerinde artış olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



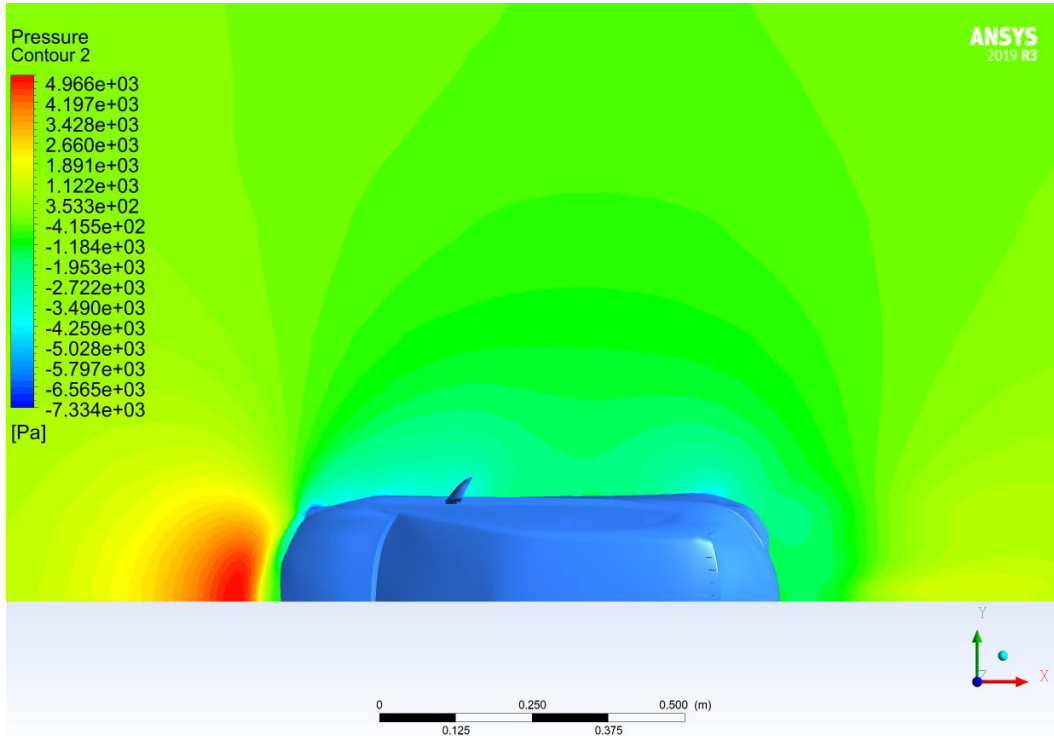
**Şekil 4.37** 1 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin  $z= 0,5h$ -xy düzlemindeki basınç konturü



**Şekil 4.38** 2 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin  $z= 0,5h$ -xy düzlemindeki basınç konturü



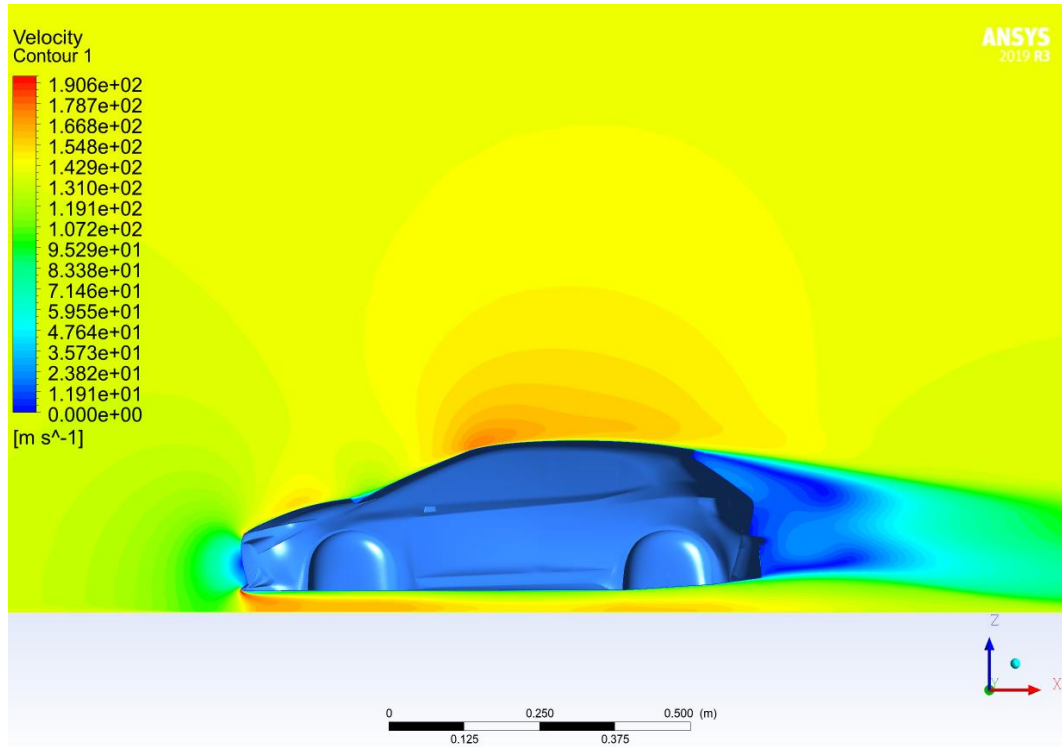
**Şekil 4.39** 3 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin  $z=0,5h$ -xy düzlemindeki basınç konturü



**Şekil 4.40** 4 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin  $z=0,5h$ -xy düzlemindeki basınç konturü

### 4.3. Hız Konturleri

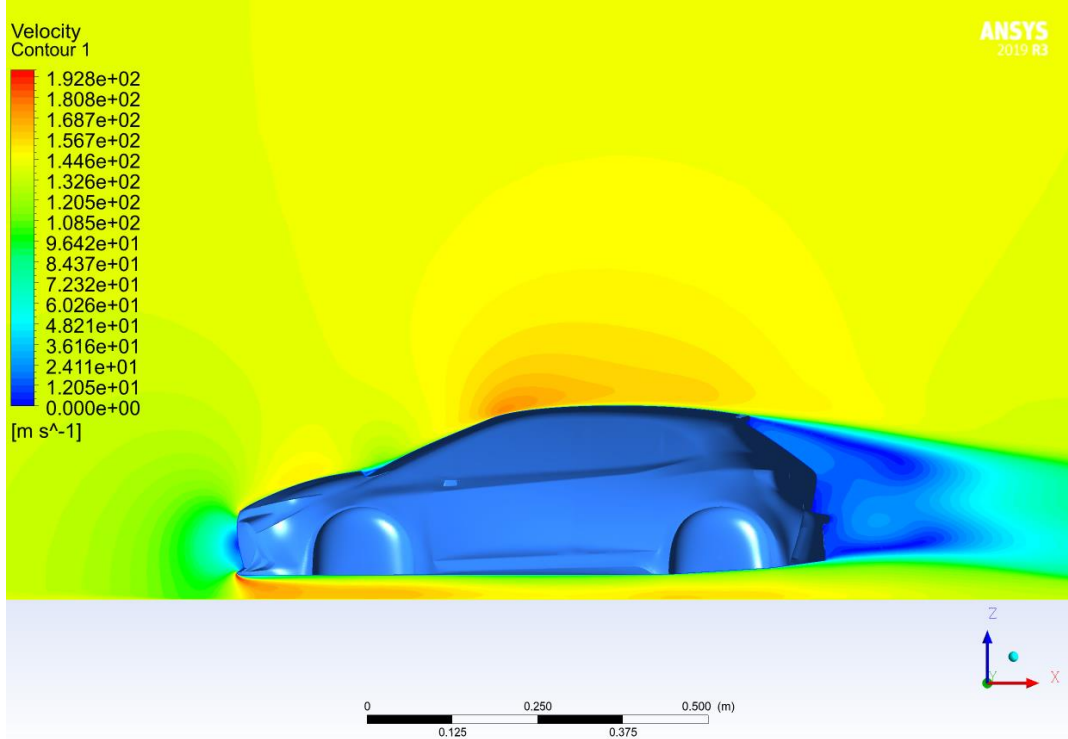
Bu bölümde aracın simetri ve  $z = 0,5h$  xy düzlemindeki hız konturleri verilmiştir. Şekil 4.41’de aracın simetri düzlemindeki hız konturü ve aracın arka kısmındaki ayrılmış bölge oluşumu verilmiştir. Araç gövdesi etrafındaki ters akışların ve girdapların olduğu bu bölgenin detayları şekilde görülmektedir. Aracın arka kısmında gerçekleşen akış ayrılması art izi bölgesinin kaynağıdır. Ayrıca aracın ön kısmında ve sileceklerin bulunduğu bölgelerde ters akışlar mevcuttur ve bu bölgedeki hız değerleri serbest akış hızının altındadır. Ön kısımdaki (ızgaralıkların bulunduğu kısım) ters akışların sebebi bu bölgenin durma noktası (stagnation point) olmasıdır. Tavan ve ön kaputun ortalarında ise hava akışının hızlandığı görülmektedir. Hava akışı tavanın ön kısımlarında maksimum değerine ulaşmıştır. Aynı düzlemlerdeki basınç ve hız konturlerinden elde edilen veriler göz önüne alındığında çıkarılan sonuçların birbirini desteklediği saptanmıştır.



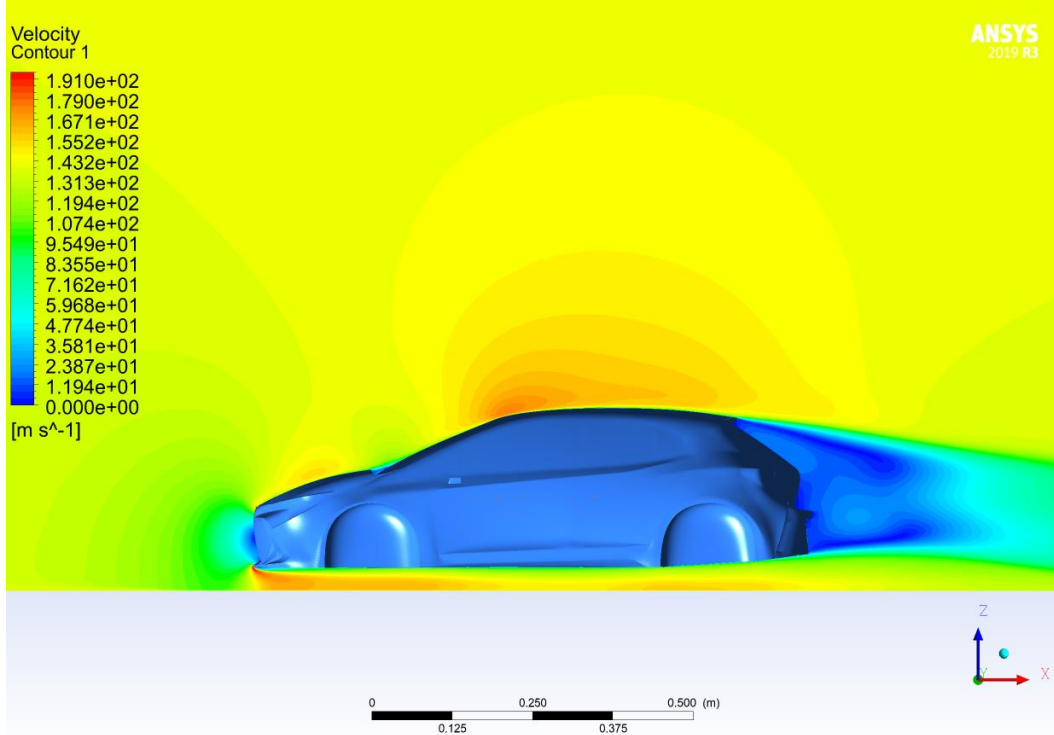
Şekil 4.41 Girdap üretic kullanılmamış modelin simetri düzlemindeki hız konturü

Şekil 4.42, Şekil 4.43, Şekil 4.44 ve Şekil 4.55’de sırasıyla 1 numaralı, 2 numaralı, 3 numaralı ve 4 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modellerin simetri düzlemlerindeki

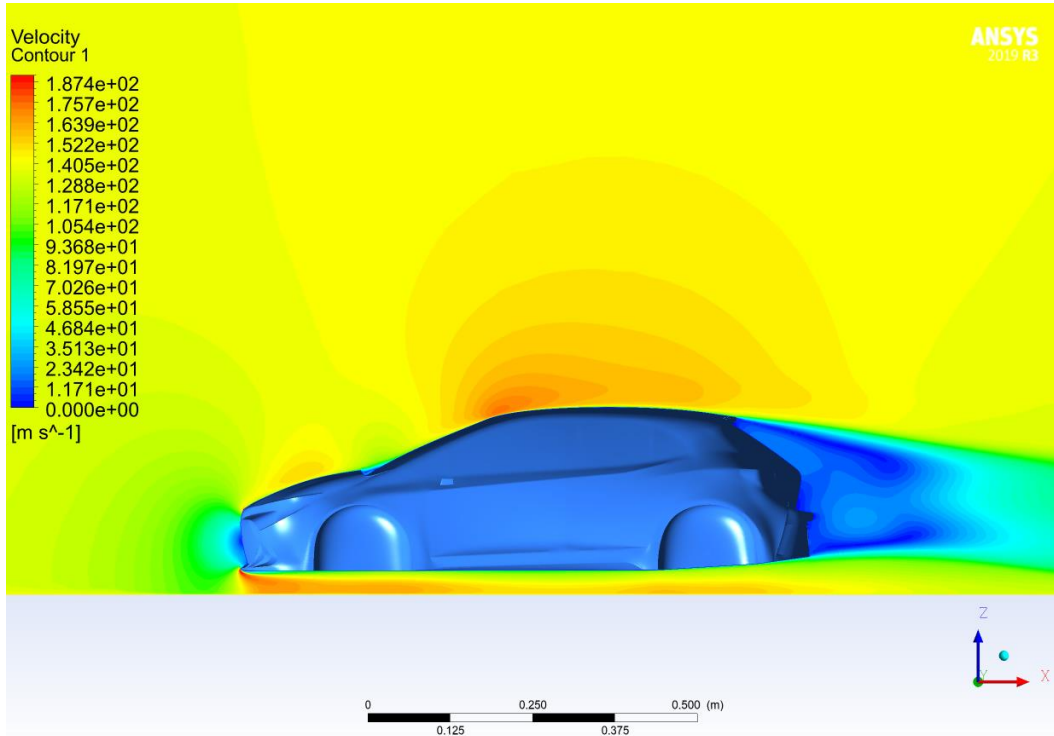
hız konturleri verilmiştir. Araç çevresinde oluşan hız değerleri ve bunların konumları girdap üretç kullanılmamış modelde elde edilen verilerle benzerlik göstermektedir. Art izi bölgesindeki hız değerlerinde farklılıklar gözlemlenmiştir. Hız farklarının, girdap üretçlerin aracın arka bölgesindeki art izinde oluşan girdapların yapısını etkilemesi sonucunda meydana geldiği düşünülmektedir.



Şekil 4.42 1 numaralı girdap üretçin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki hız kontürü

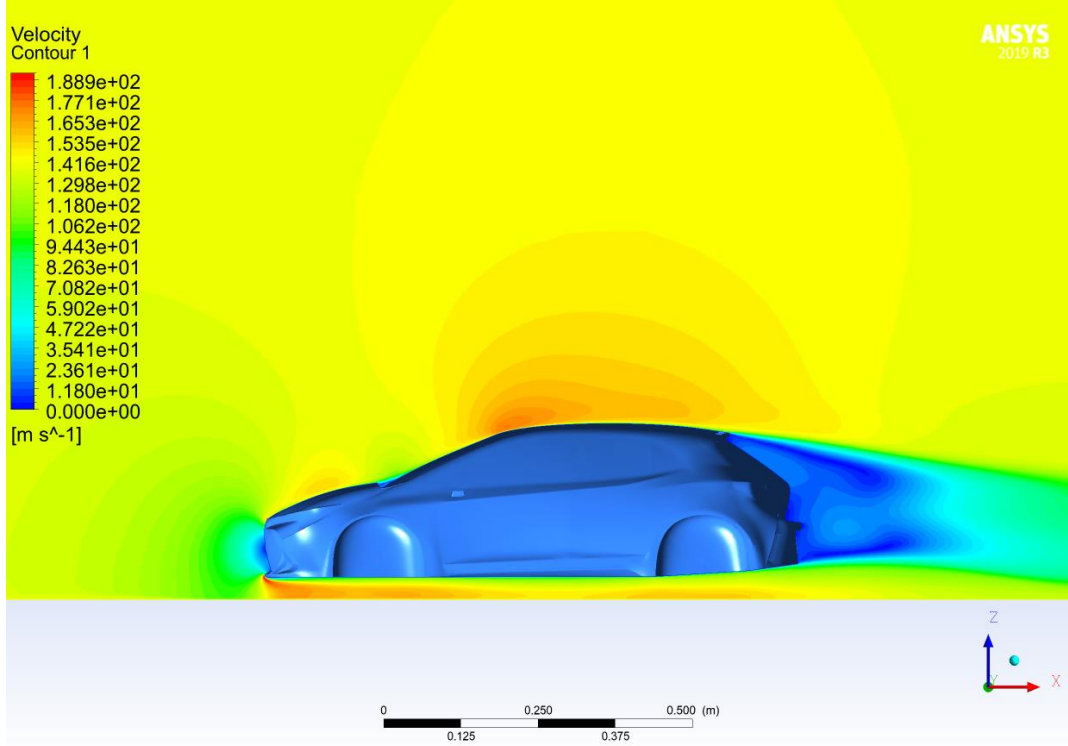


**Şekil 4.43** 2 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki hız kontürü



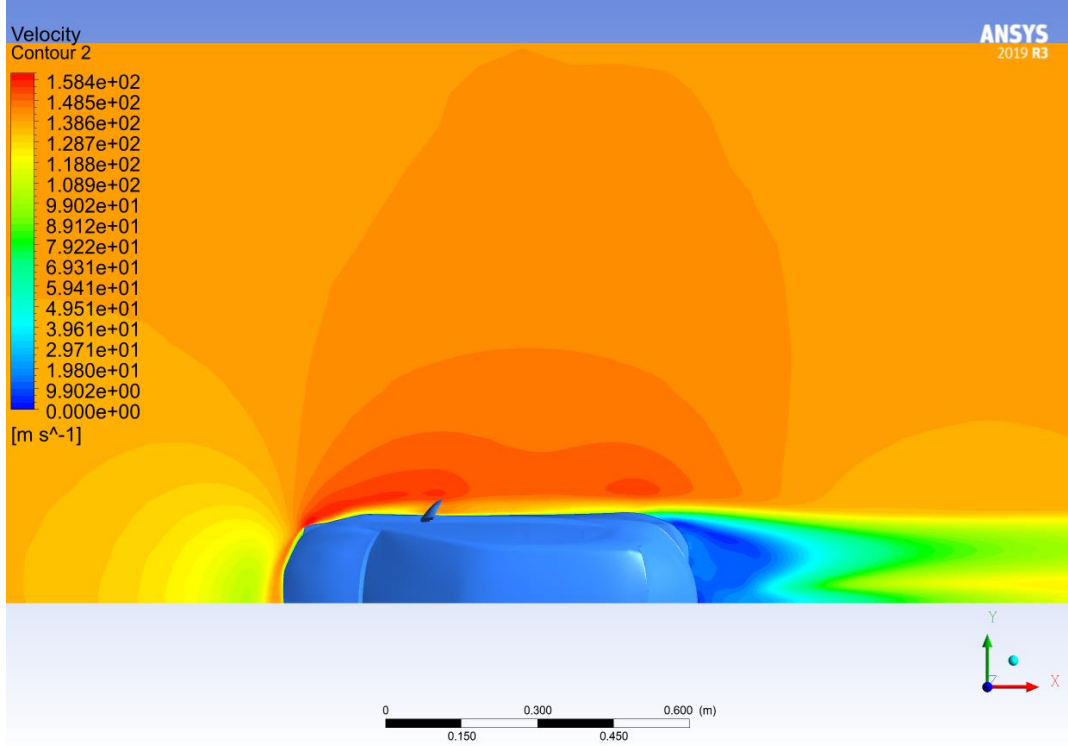
**Şekil 4.44** 3 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki hız kontürü





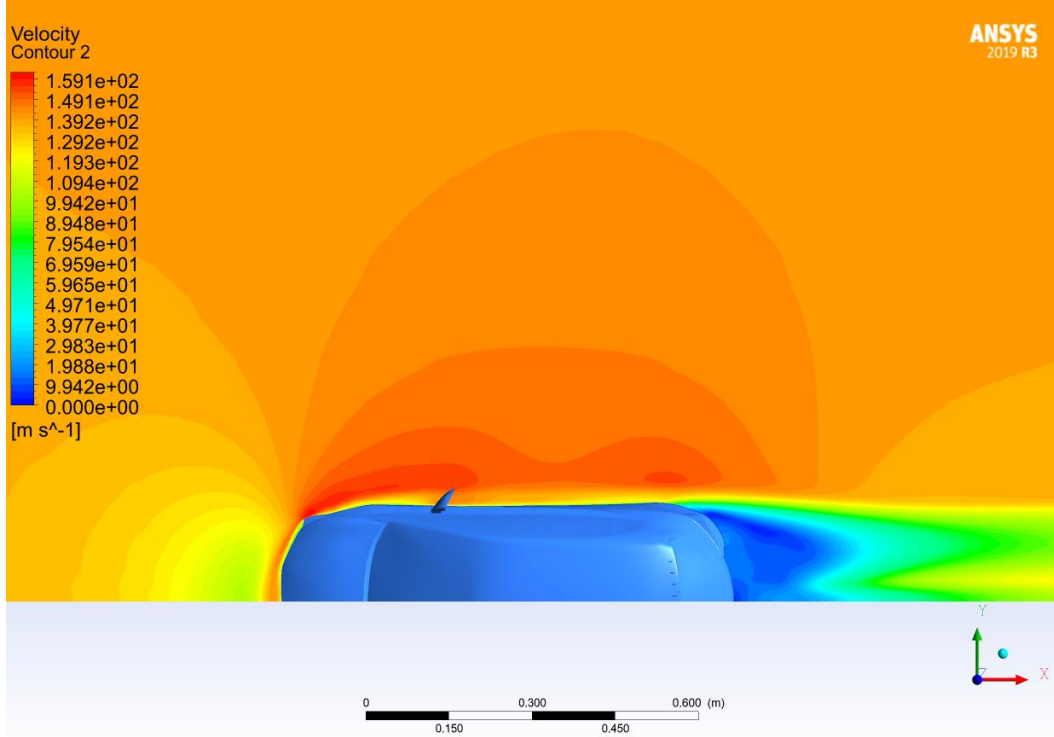
**Şekil 4.45** 4 numaralı girdap üreticini kullandığı modelin simetri düzlemindeki hız konturü

Şekil 4.46’da girdap üreticini kullanılmamış modelin  $z=0,5h-xy$  düzlemindeki hız konturü verilmiştir. Aracın yan kısımlarında havanın serbest akış hız değerlerinin üstünde olduğu gözlemlenmiştir. Aracın arka kısmında ise serbest akış hızına oranla daha düşük hızların olduğu bir akış bölgesi oluştuğu görülmektedir.

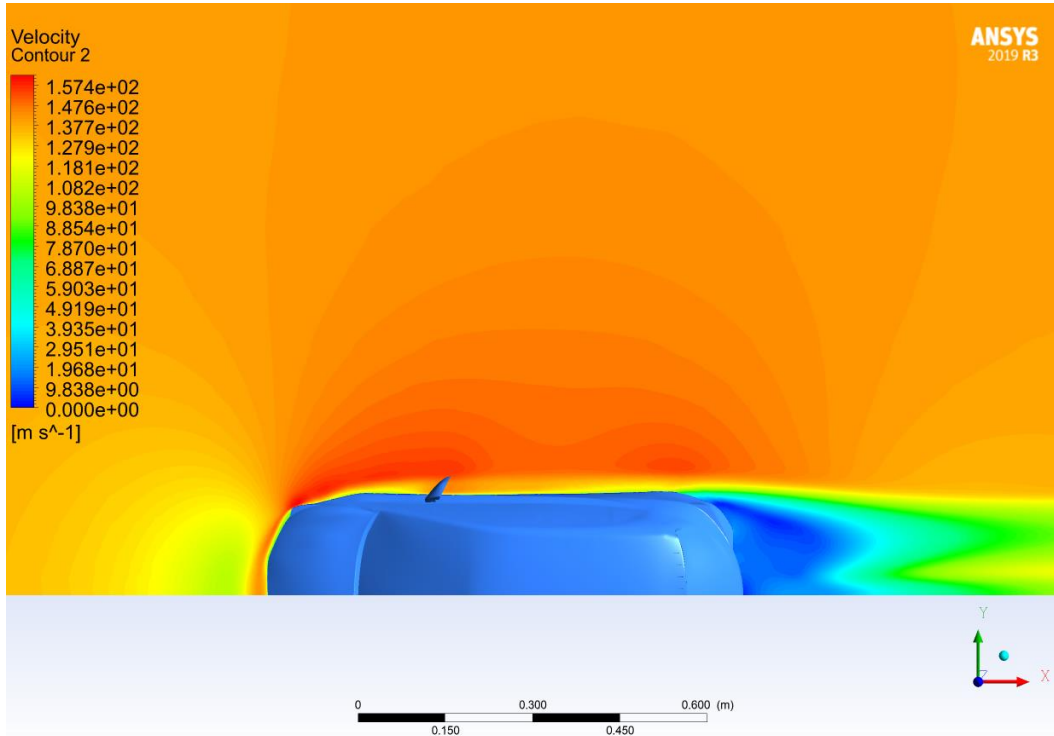


**Şekil 4.46** Girdap üreteç kullanılmamış modelin  $z=0,5h$ -xy düzlemindeki hız konturü

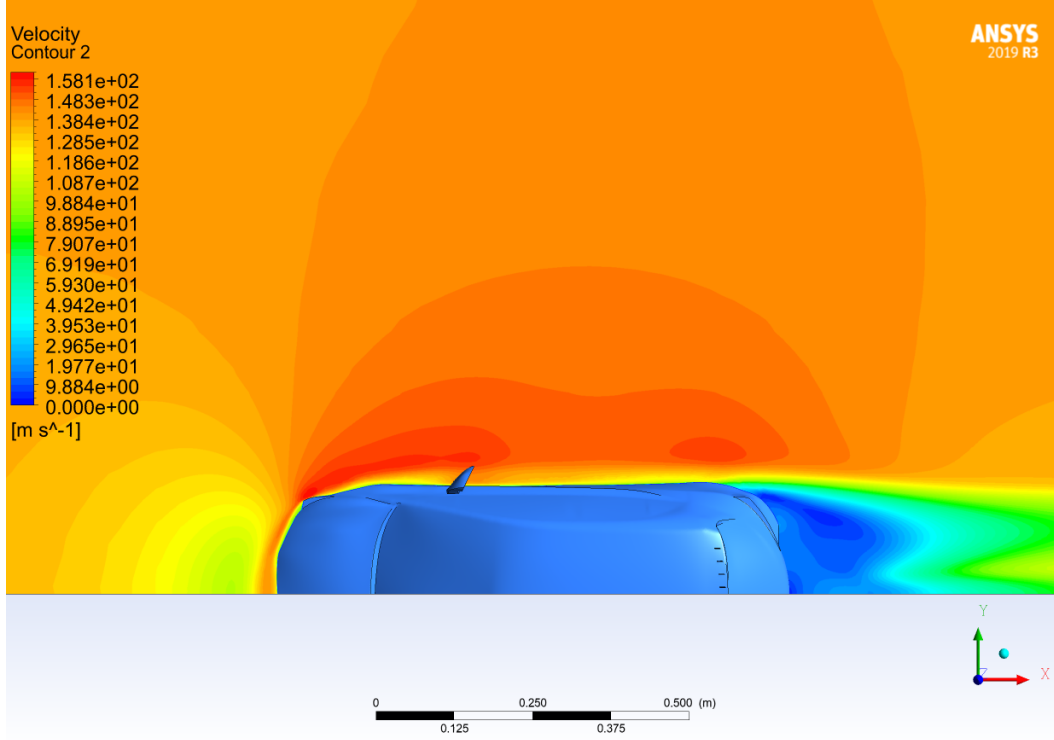
Şekil 4.47, Şekil 4.48, Şekil 4.49 ve Şekil 4.50'de sırasıyla 1 numaralı, 2 numaralı, 3 numaralı ve 4 numaralı girdap üretecin kullanıldığı modelin  $z=0,5h$ -xy düzlemindeki hız konturleri verilmiştir. Araç çevresinde oluşan hız değerleri ve bunların konumları girdap üreteç kullanılmamış modelde elde edilen verilerle benzerlik göstermektedir. Art izi bölgesindeki hız değerlerinde değişimler gözlemlenmiştir bu değişimlerin girdap üreteçlerin kullanılması ile oluştuğu düşünülmektedir.



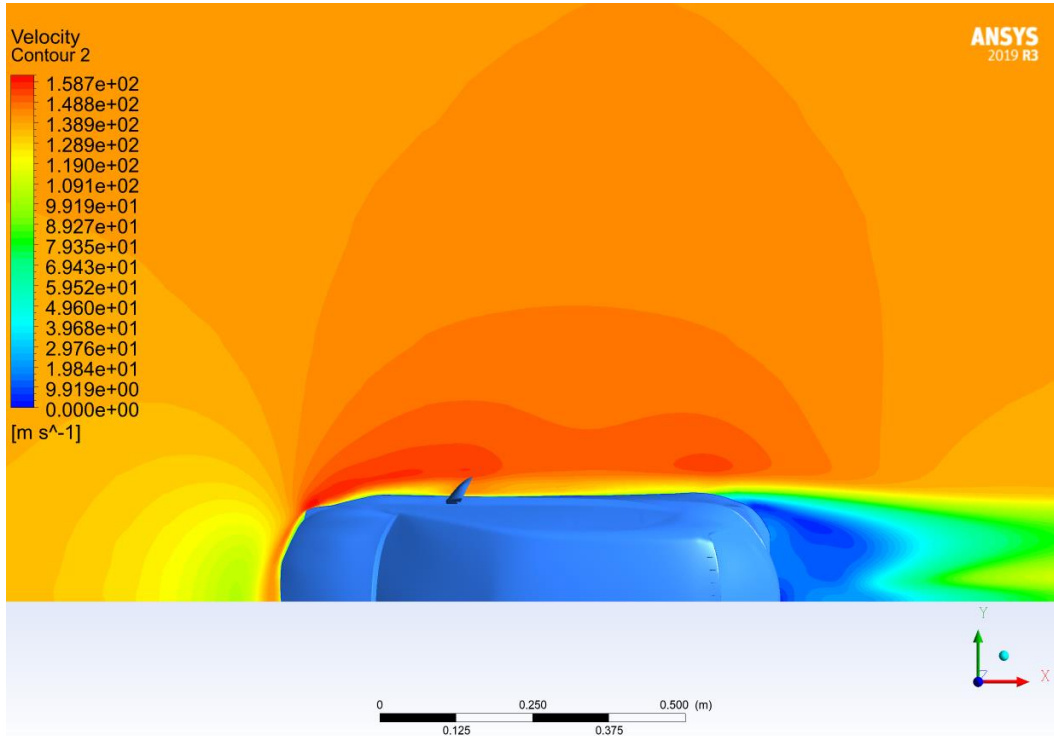
**Şekil 4.47** 1 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin  $z=0,5h$ -xy düzlemindeki hız kontürü



**Şekil 4.48** 2 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin  $z=0,5h$ -xy düzlemindeki hız kontürü

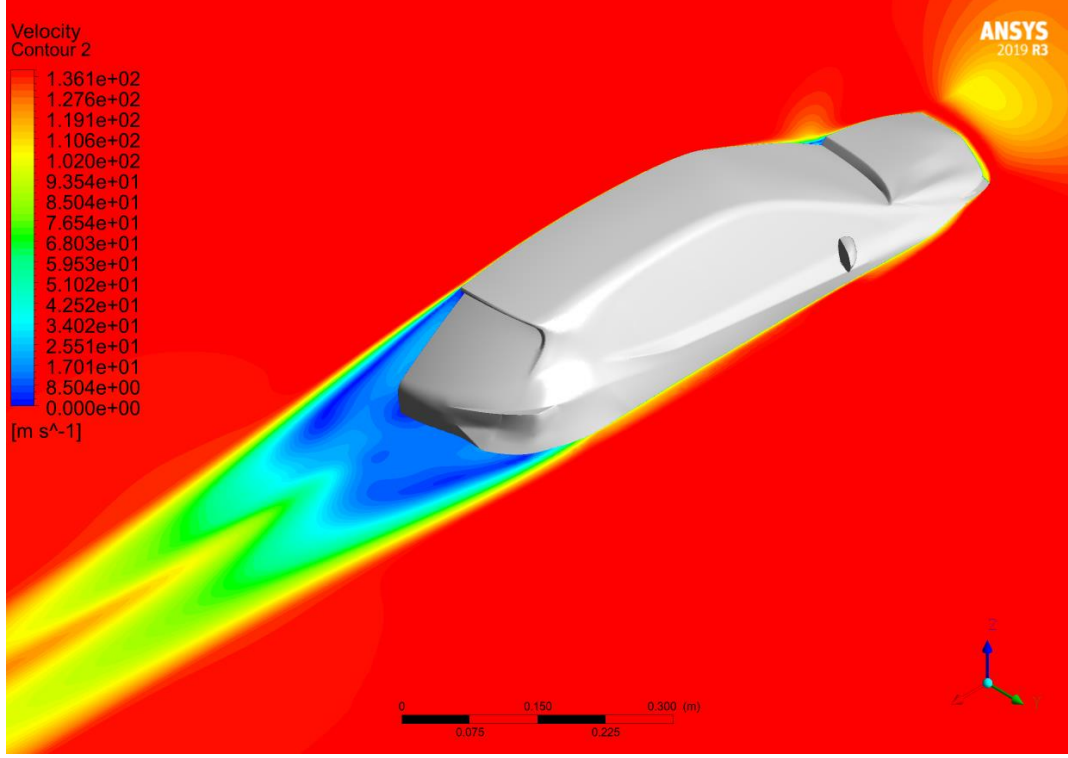


**Şekil 4.49** 3 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin  $z=0,5h$ -xy düzlemindeki hız kontürü



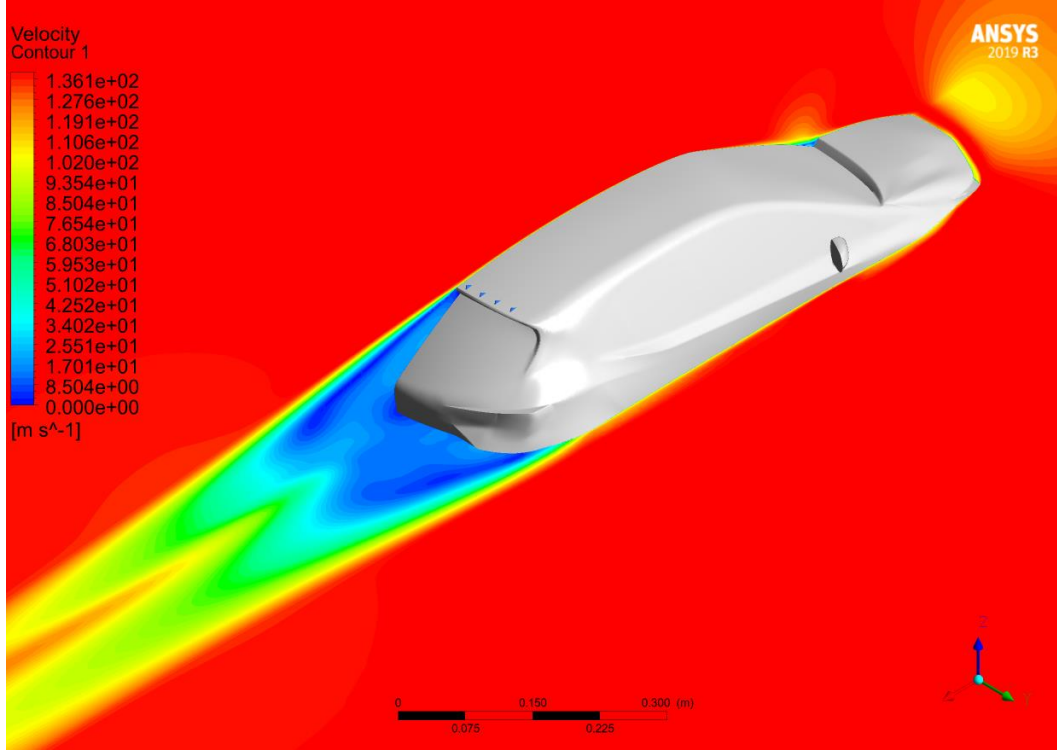
**Şekil 4.50** 4 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin  $z=0,5h$ -xy düzlemindeki hız kontürü

Şekil 4.51’de girdap üreteç kullanılmamış modelin simetri ve  $z= 0,5h-xy$  düzlemlerinin keşiştirilmesi sonucu elde edilen art izi bölgesinin görseli verilmiştir.

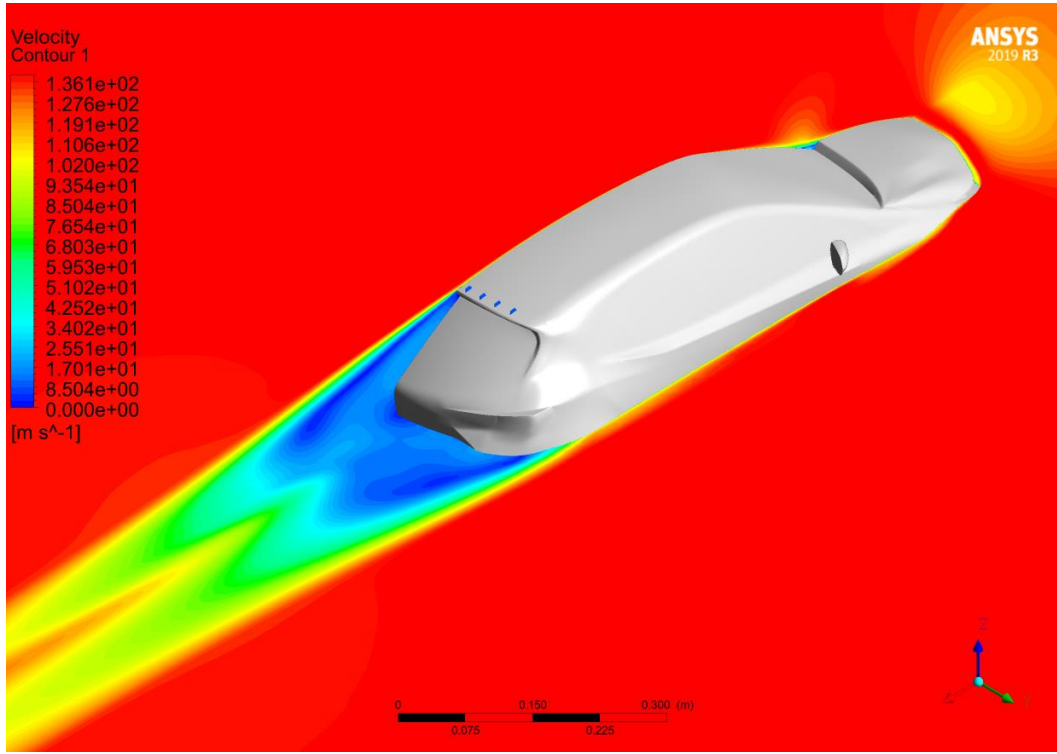


**Şekil 4.51** Girdap üreteç kullanılmamış modelin art izinin simetri ve  $z= 0,5h-xy$  düzlemindeki hız konturü

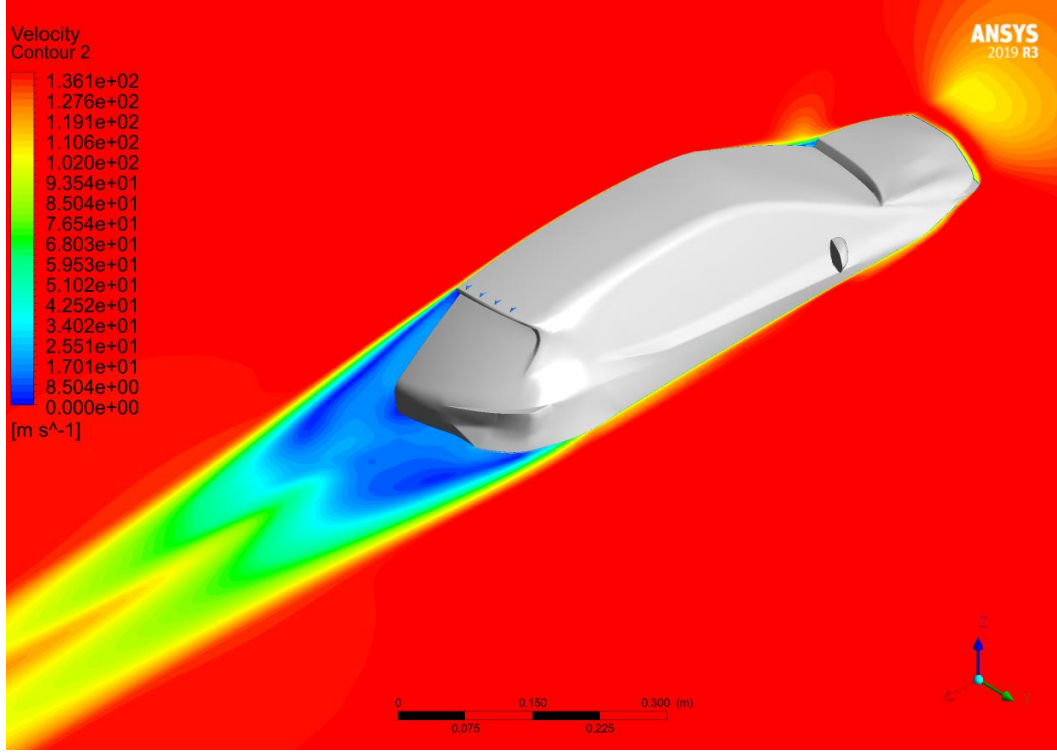
Şekil 4.52, Şekil 4.53, Şekil 4.54 ve Şekil 4.55’de sırasıyla 1 numaralı, 2 numaralı, 3 numaralı ve 4 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modellerin simetri ve  $z= 0,5h-xy$  düzlemindeki hız konturleri verilmiştir. Girdap üreteç kullanılmamış model ve girdap üreteç kullanılmış modellerin art izi bölgesi incelendiğinde, girdap üreteçlerin kullanılması ile bazı bölgelerdeki hız değerlerinde farklılıklar tespit edilmiştir. Art izi boyutlarının ise benzerlik gösterdiği söylenebilir.



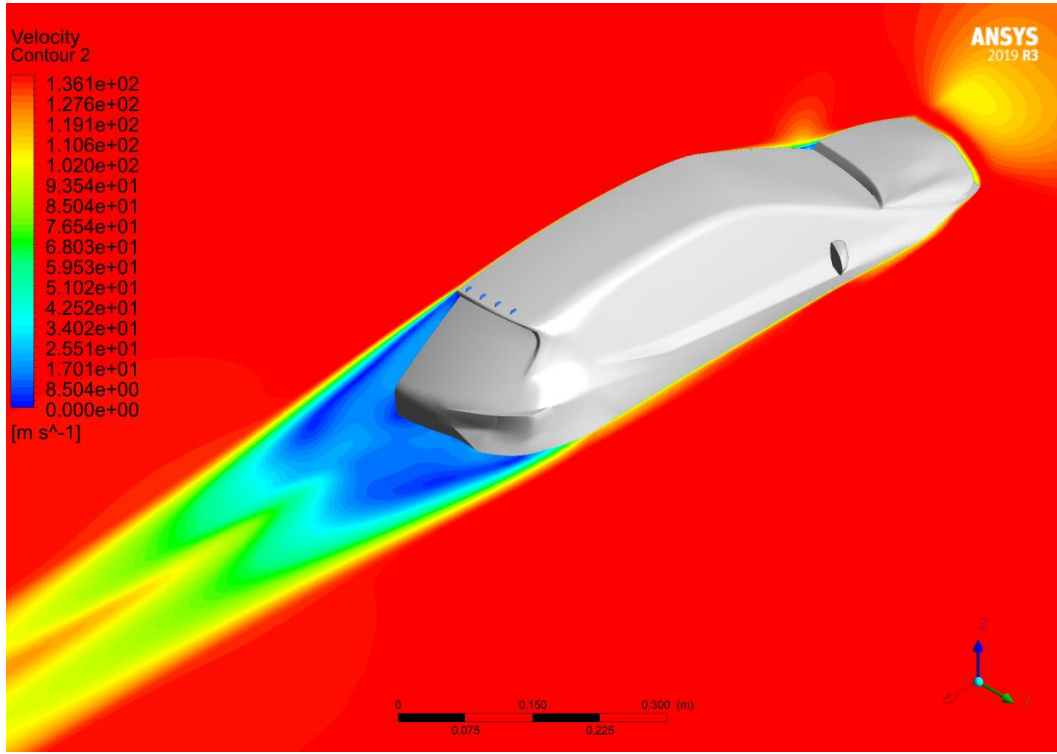
**Şekil 4.52** 1 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelin art izinin simetri ve  $z=0,5h$ -xy düzlemindeki hız kontürü



**Şekil 4.53** 2 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelin art izinin simetri ve  $z=0,5h$ -xy düzlemindeki hız kontürü



**Şekil 4.54** 3 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelin art izinin simetri ve  $z=0,5h$ -xy düzlemindeki hız kontürü

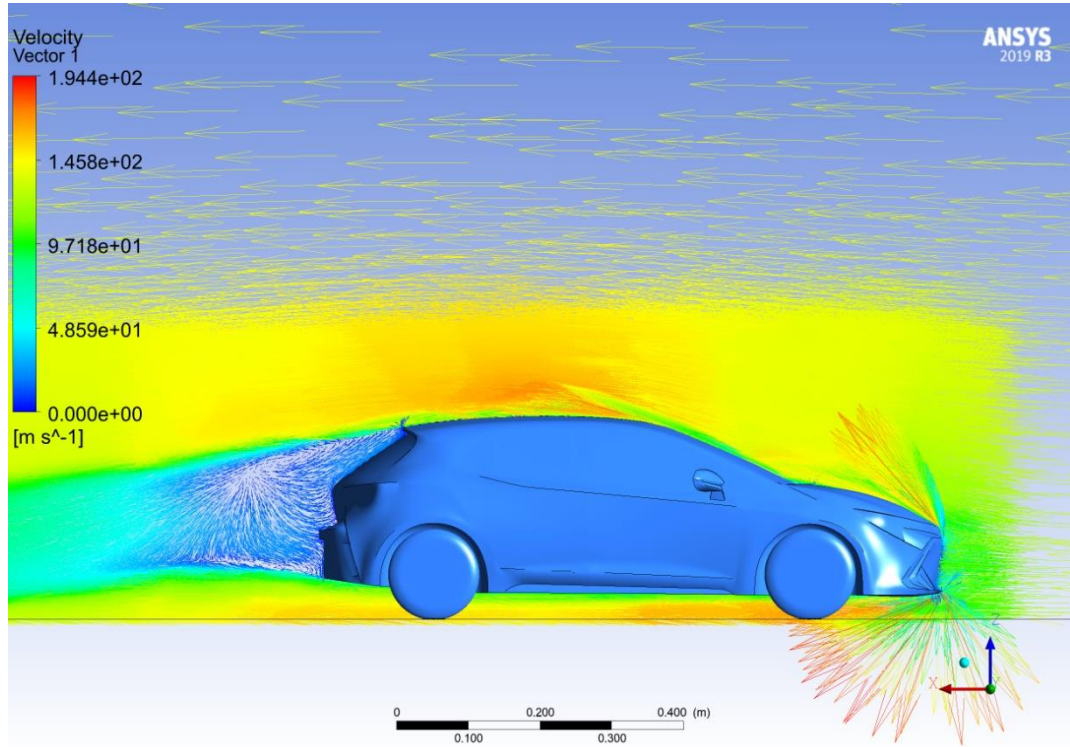


**Şekil 4.55** 4 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelin art izinin simetri ve  $z=0,5h$ -xy düzlemindeki hız kontürü

#### 4.4. Hız Vektörleri

Bu bölümde simetri ve  $z=0,5h-xy$  düzlemindeki hız vektörleri ile ilgili görseller paylaşılmıştır. Hız vektörleri ile araç çevresindeki ters akışlar, ayrılmış akış bölgeleri ve girdaplar görselleştirilmiştir. Hız vektörlerinde elde edilen hız değerleri, hız konturleri ve akım çizgilerinden elde edilen hız değerleriyle aynıdır.

Şekil 4.56'da girdap üreteç kullanılmayan modelin simetri düzlemindeki hız vektörleri mevcuttur. Aracın ön ve tavan kısmındaki hız değerleri serbest akış değerlerinin üstündedir. Aracın arka kısmında oluşan hız vektörlerinin değerleri genel olarak serbest akış hızı değerlerine oranla daha düşüktür.

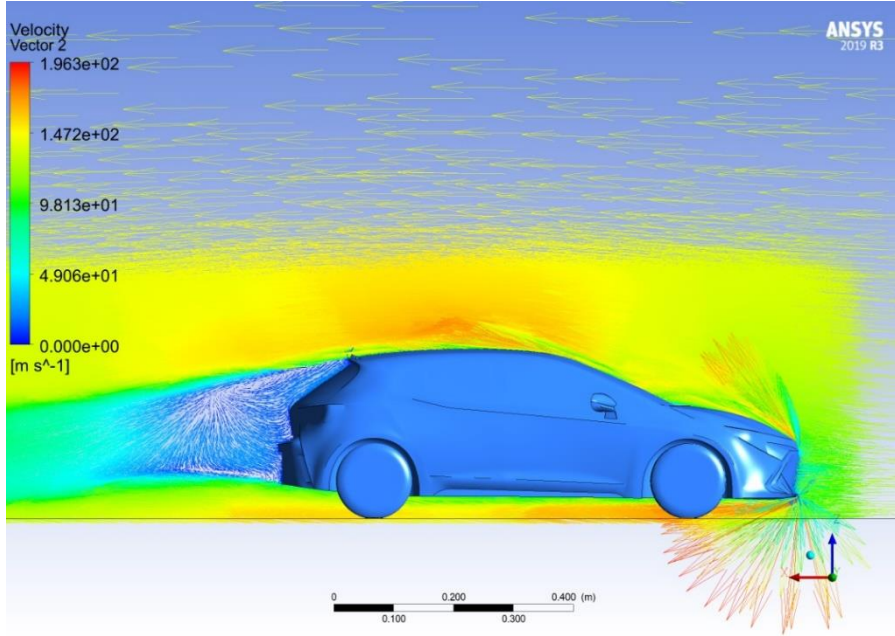


**Şekil 4.56** Girdap üreteç kullanılmamış modelin simetri düzlemindeki hız vektörleri

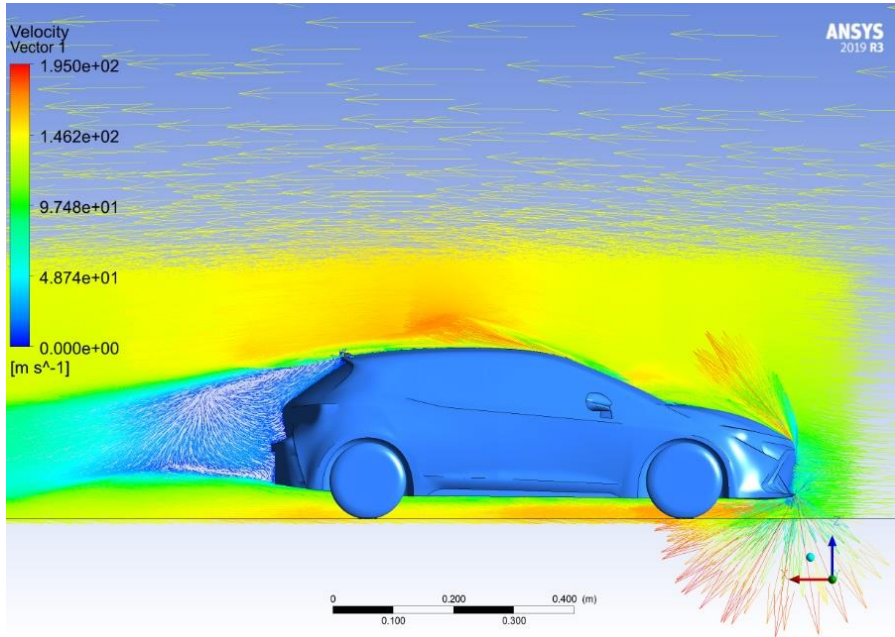
Şekil 4.57, Şekil 4.58, Şekil 4.59 ve Şekil 4.60'da sırasıyla 1 numaralı, 2 numaralı, 3 numaralı ve 4 numaralı girdap üretecin kullanıldığı modellerin simetri düzlemindeki hız vektörleri verilmiştir. Araç çevresindeki hız vektörlerinin genel yapısı girdap üreteç kullanılmayan modeldeki verilerle benzerdir. Araç arka camının orta kısımlarındaki



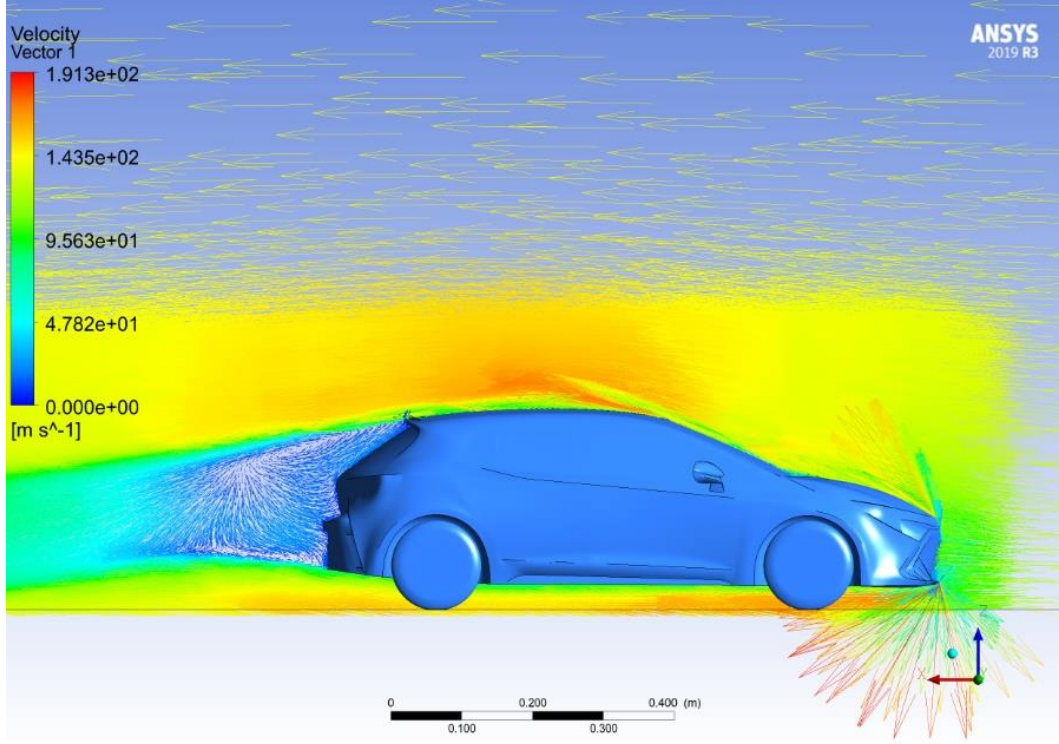
bölgede oluşan girdabın incelendiğinde akışa ters ve düşük hızlı vektörler görsellerde görülmektedir. Girdap üreticilerin aracın arka kısmında oluşan girdap yapılarını etkilediği hız vektörleri kullanılarak görülebilmektedir.



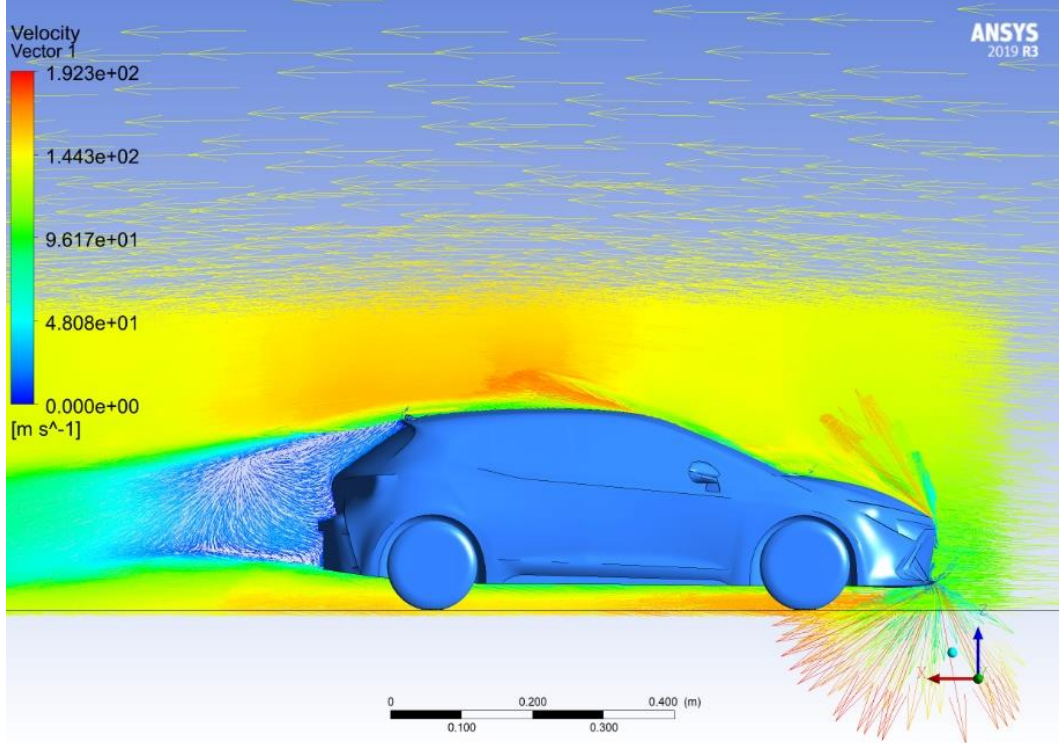
**Şekil 4.57** 1 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki hız vektörleri



**Şekil 4.58** 2 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki hız vektörleri

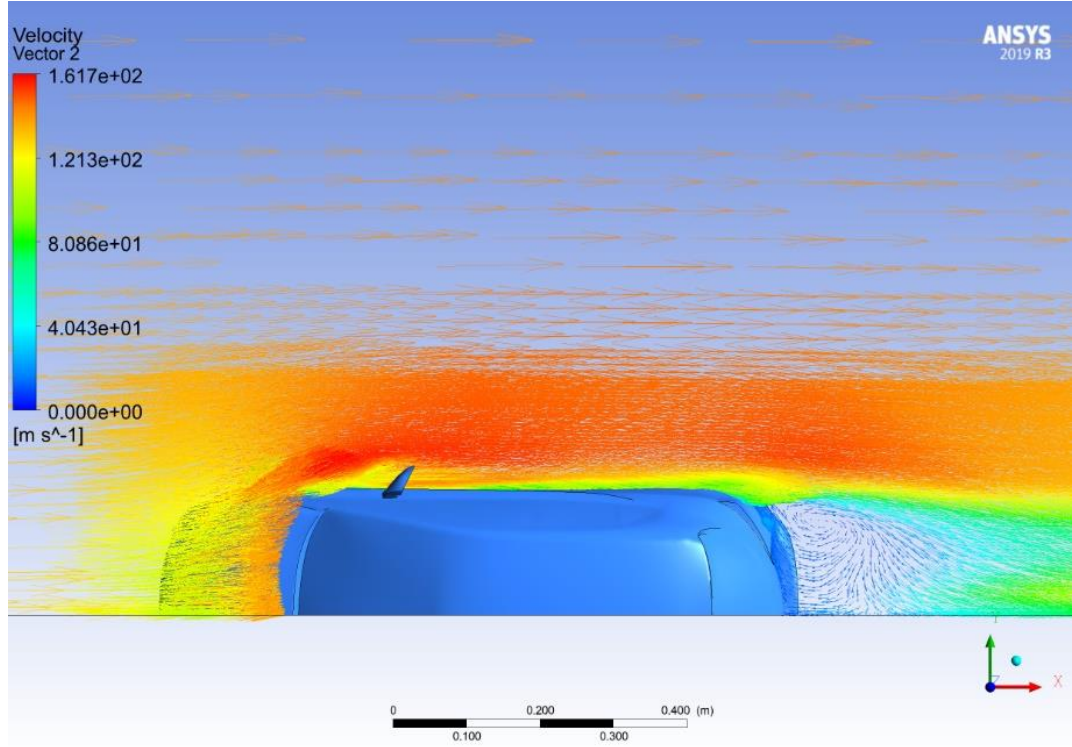


**Şekil 4.59** 3 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki hız vektörleri



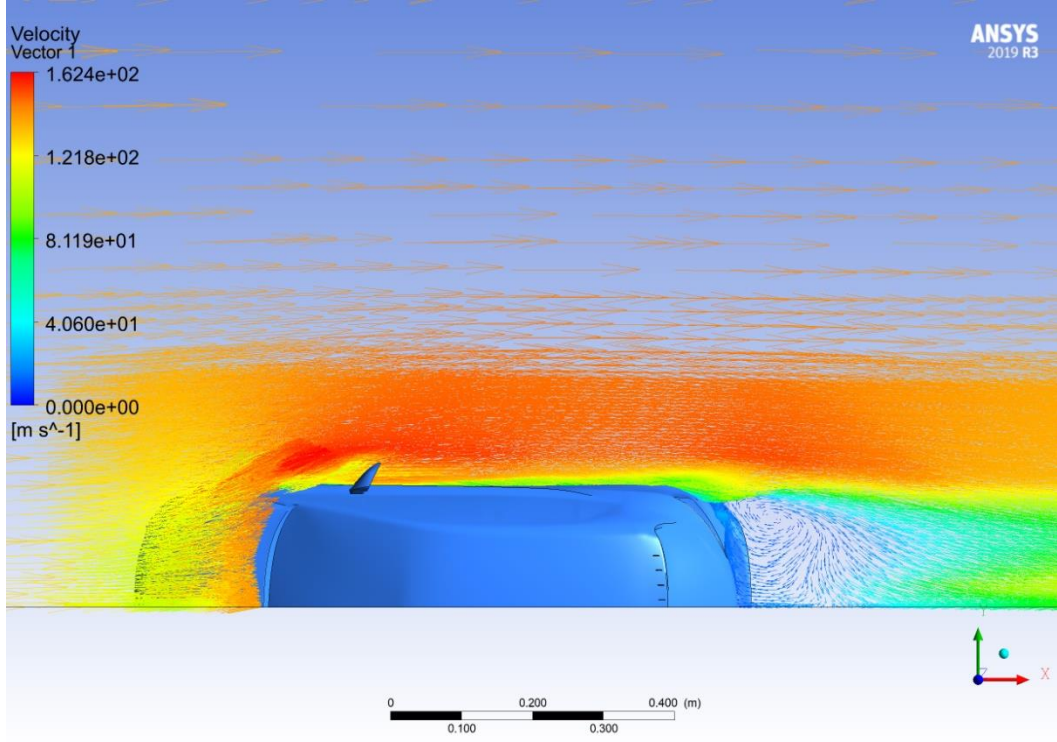
**Şekil 4.60** 4 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki hız vektörleri

Şekil 4.61’de girdap üreteç kullanılmamış modelin  $z= 0,5h-xy$  düzlemindeki hız vektörleri görülmektedir. Hız vektörü değerleri, aynı düzlemdeki hız konturu ile paralellik göstermektedir. Aracın yan kısmında yüksek hızlı vektörler gözlemlenirken aracın arka kısmında düşük hızlı ve akış yönüne ters hız vektörleri mevcuttur. Ayrıca aracın sağ arka farının olduğu bölgede oluşan girdabın yapısı hız vektörleri ile açık bir şekilde görülmektedir.

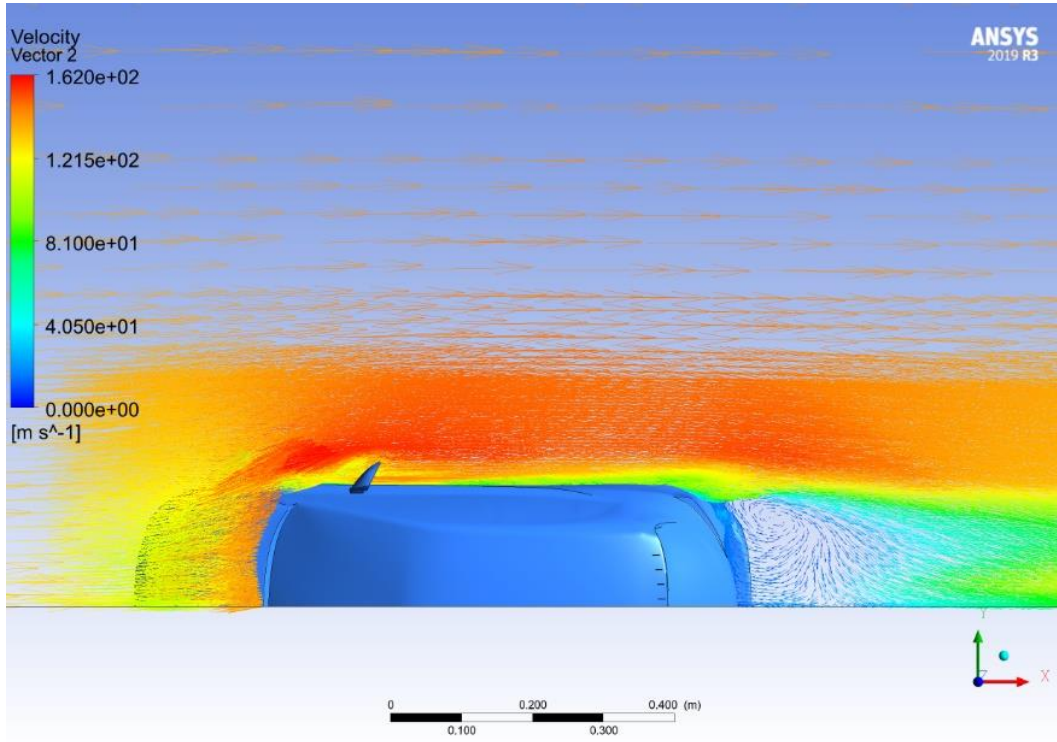


**Şekil 4.61** Girdap üreteç kullanılmamış modelin  $z= 0,5h-xy$  düzlemindeki hız vektörleri

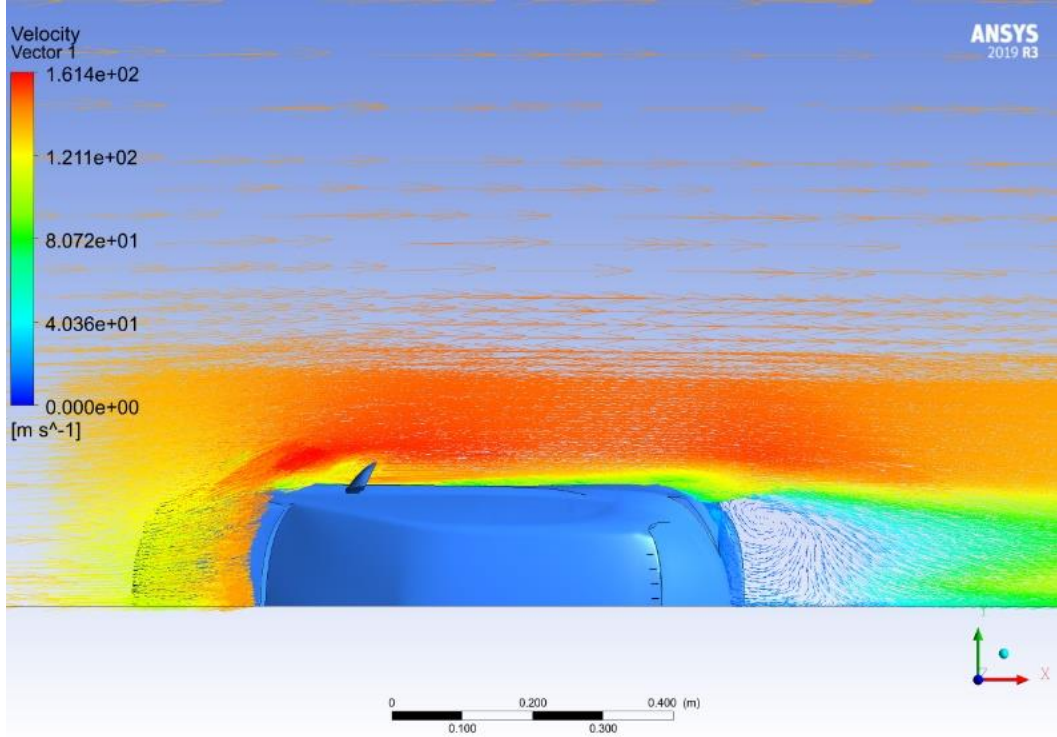
Şekil 4.62, Şekil 4.63, Şekil 4.64 ve Şekil 4.65’de sırasıyla 1 numaralı, 2 numaralı, 3 numaralı ve 4 numaralı girdap üretecin kullanıldığı modellerin  $z= 0,5h-xy$  düzlemindeki hız vektörleri mevcuttur. Hız vektörü değerleri ve yapıları, girdap üreteç kullanılmış modellerin aynı düzlemindeki hız konturleri ile paraleldir. Art izi bölgesinde oluşan akış yapısının girdap üreteçler nedeniyle etkilenmesiyle bu bölgedeki hız vektörleri yapısında da farklılıklar gözlemlenmektedir. Bu düzlem üzerindeki hız vektörleri grafikleri girdap üreteç kullanılmamış modelde elde edilen sonuçlarla benzerdir.



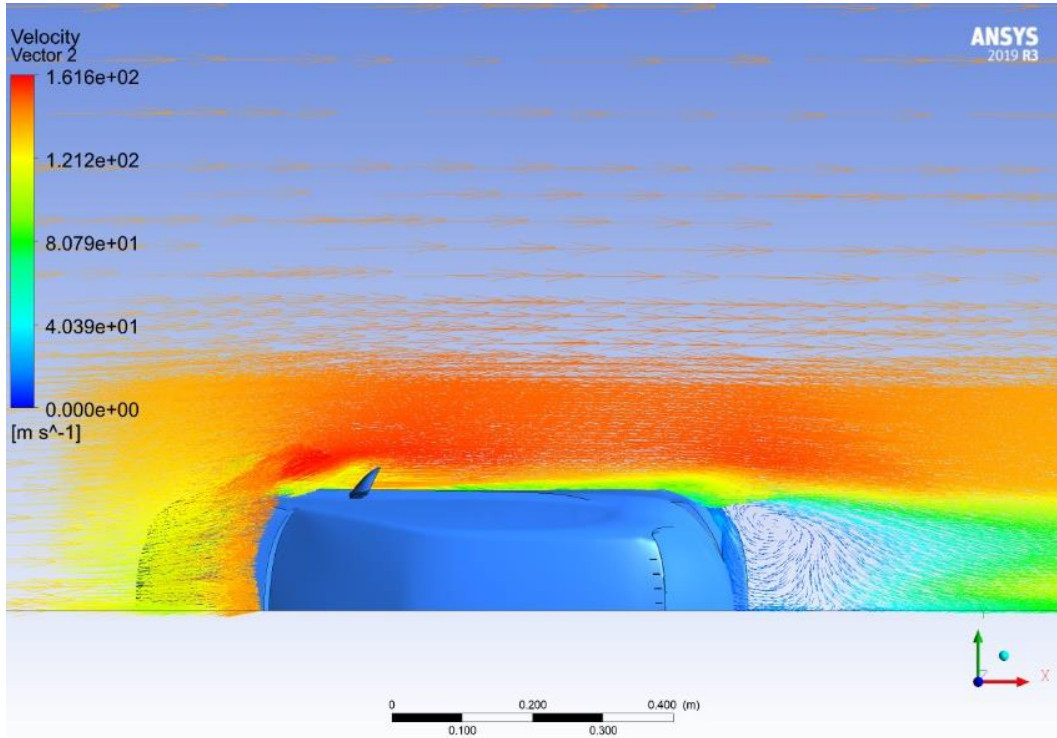
**Şekil 4.62** 1 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin  $z=0,5h$ -xy düzlemindeki hız vektörleri



**Şekil 4.63** 2 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin  $z=0,5h$ -xy düzlemindeki hız vektörleri



**Şekil 4.64** 3 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin  $z=0,5h-xy$  düzlemindeki hız vektörleri

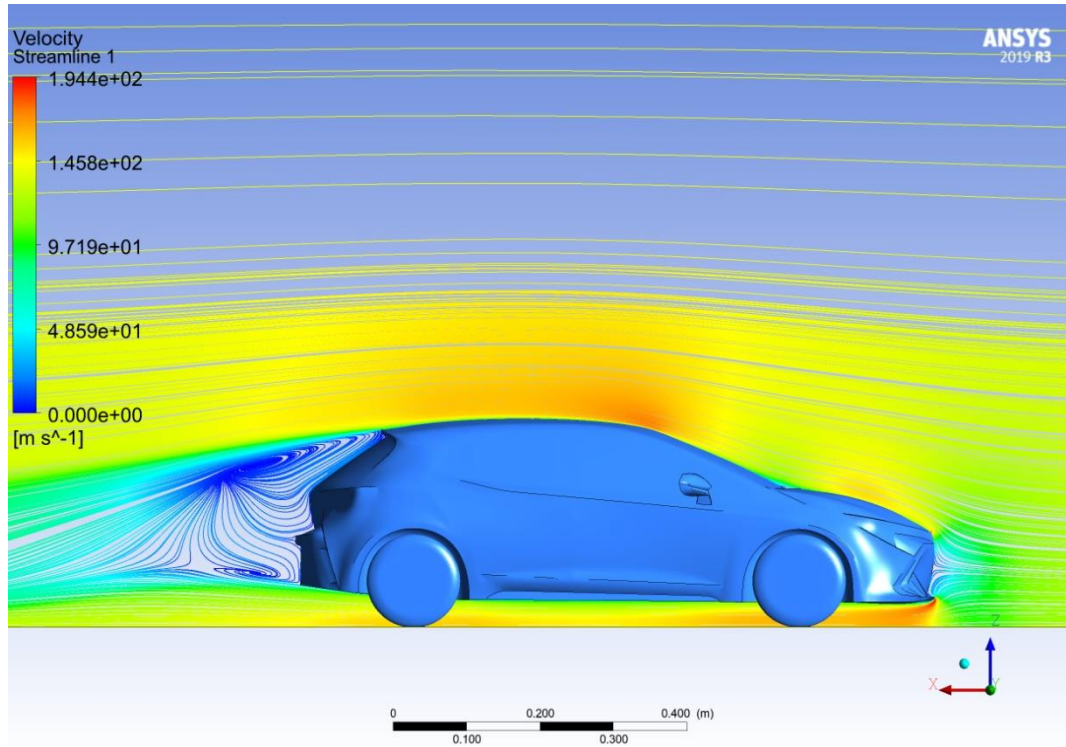


**Şekil 4.65** 4 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin  $z=0,5h-xy$  düzlemindeki hız vektörleri

#### 4.5. Akım Çizgileri

Akım çizgileri, bir akışkan taneciğinin hız vektörüne teğet olan eğrilerdir. Art izi bölgesinde oluşan girdaplar akım çizgileri yardımı ile görülebilmektedir.

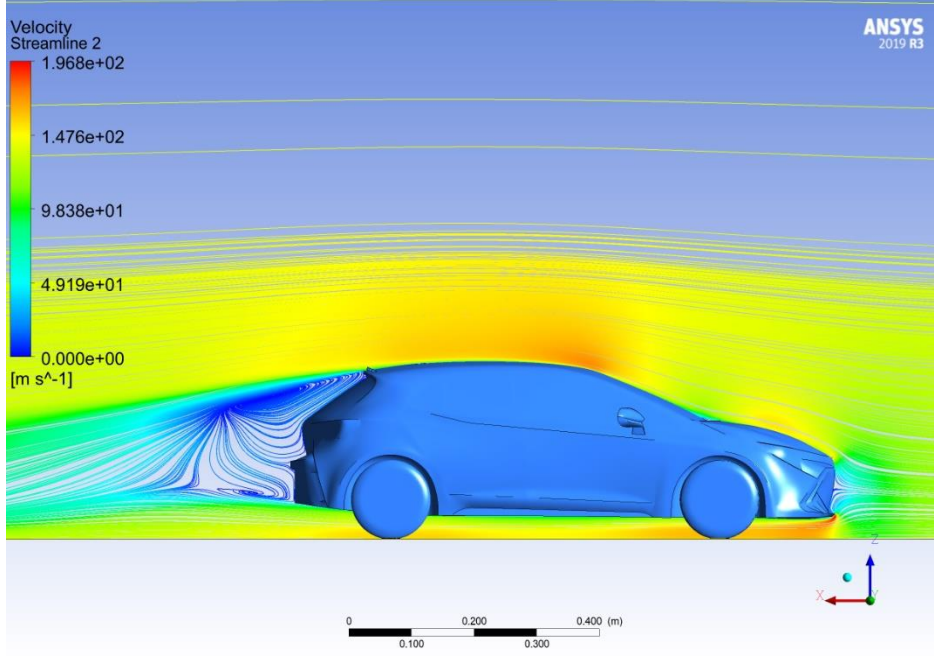
Girdap üreteç kullanılmamış modelin simetri düzlemindeki akım çizgileri ile ilgili grafik Şekil 4.66'da verilmiştir. Akışın hızlı olduğu tavan ve aracın alt kısımlarında akım çizgileri daha sıkıdır. Ters akışların ve hızların düşük olduğu bölgelerde ise akım çizgilerinin daha seyrek olduğu tespit edilmiştir. Aracın arka (art izi) ve ön noktasındaki (durma noktası) akım çizgileri daha seyrek.



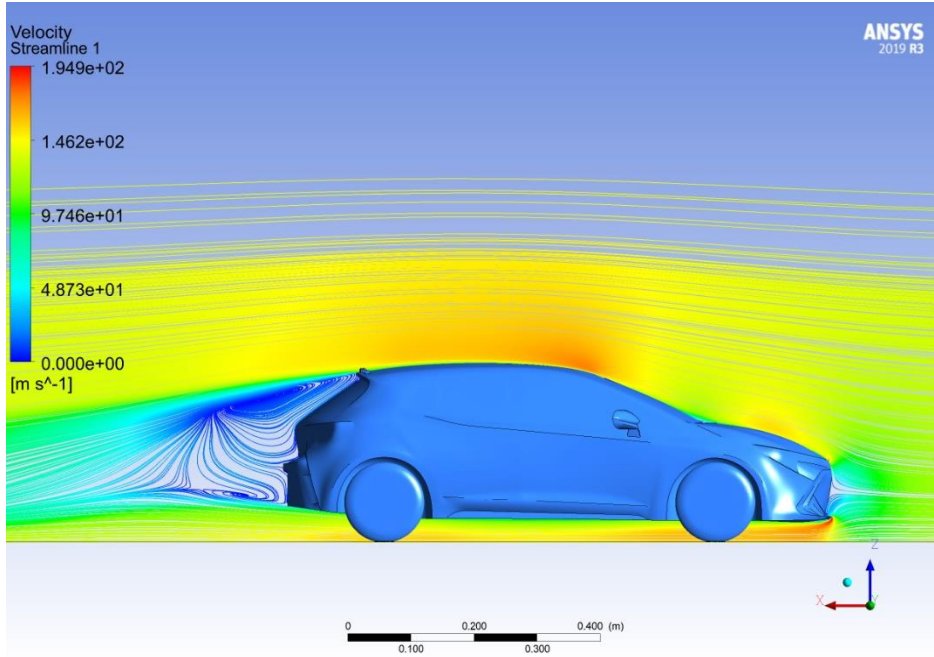
Şekil 4.66 Girdap üreteç kullanılmamış modelin simetri düzlemindeki akım çizgileri

Şekil 4.67, Şekil 4.68, Şekil 4.69 ve Şekil 4.70'de sırasıyla 1 numaralı, 2 numaralı, 3 numaralı ve 4 numaralı girdap üretecin kullanıldığı modellerin simetri düzlemindeki akım çizgileri verilmiştir. Oluşan yapılar genel olarak girdap üreteç kullanılmamış modeldeki yapılarla benzerdir. Girdap üreteçler art izi bölgesindeki oluşan türbülanslı yapıyı

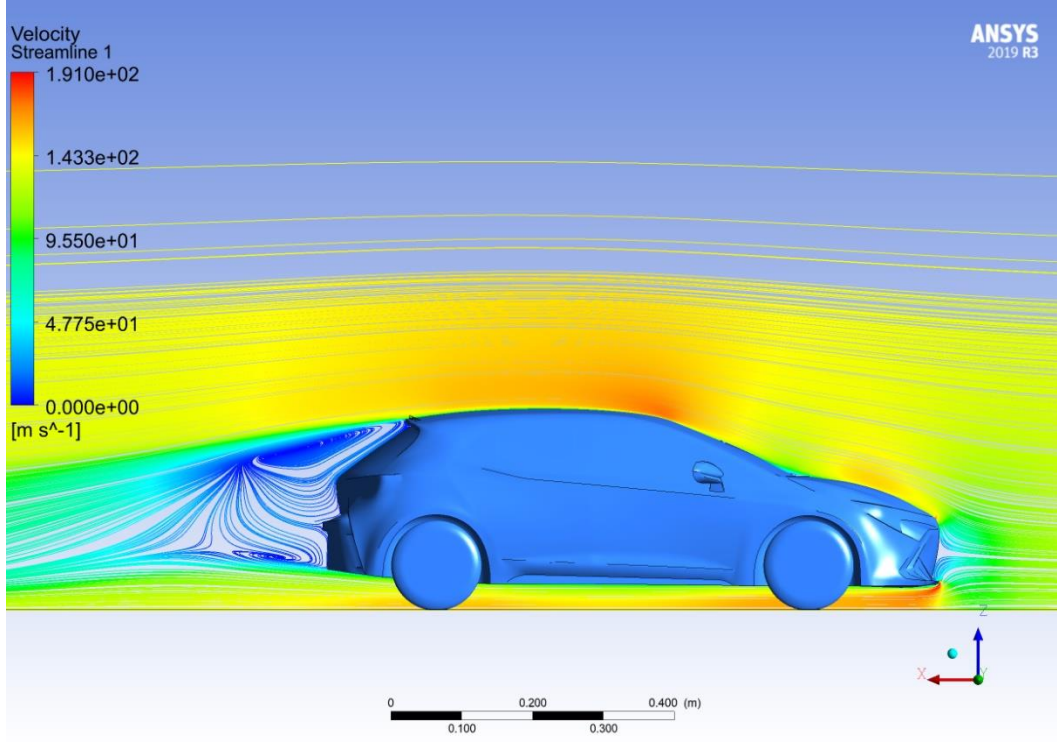
etkilemesi ile bu bölgedeki akım çizgilerinde de bir miktar değişim gözlenmiştir. Aracın arka tampon bölgesindeki akım çizgilerinde seyrelmelere rastlanmıştır.



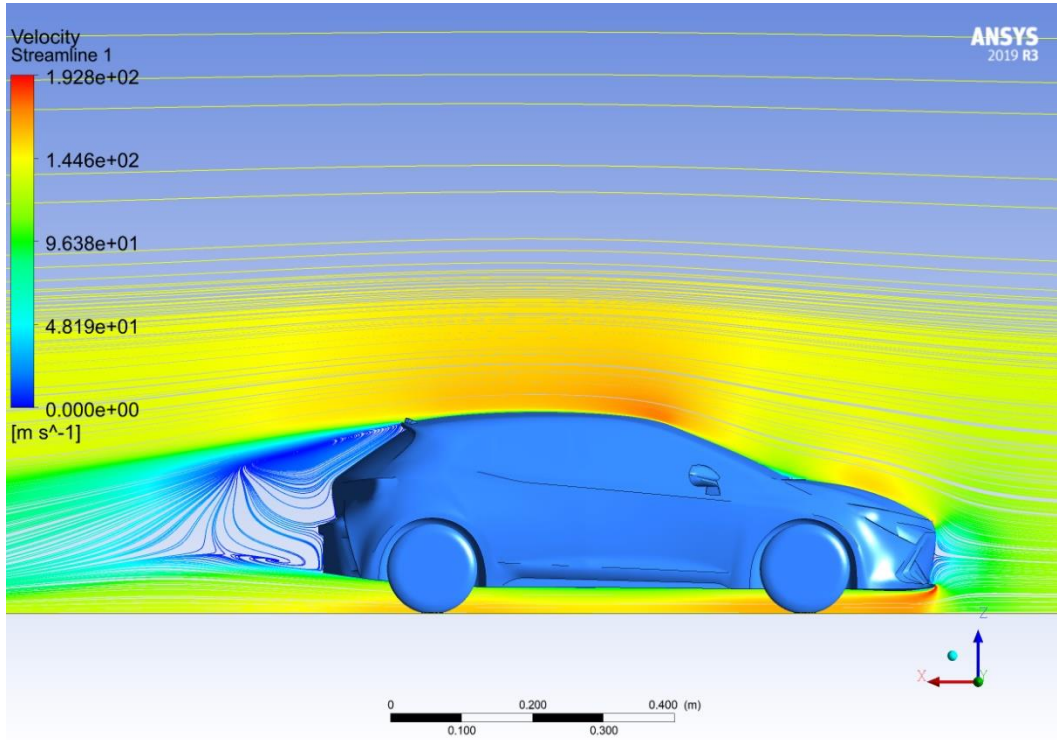
Şekil 4.67 1 numaralı girdap üreticin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki akım çizgileri



Şekil 4.68 2 numaralı girdap üreticin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki akım çizgileri



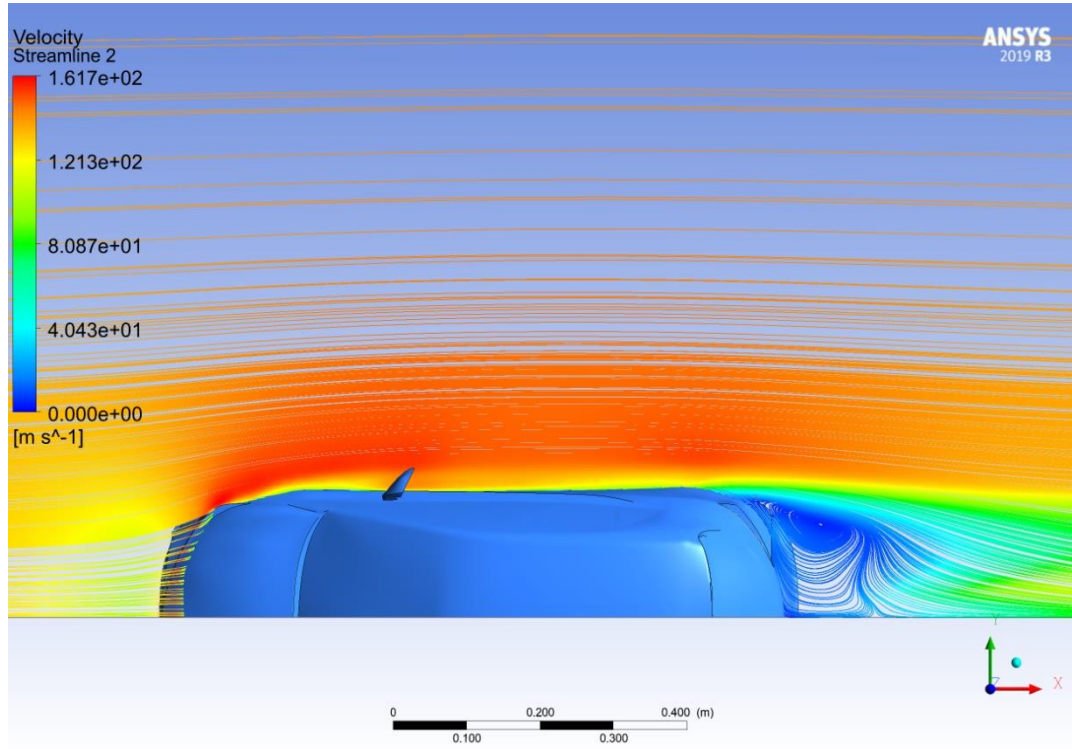
**Şekil 4.69** 3 numaralı girdap üreticin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki akım çizgileri



**Şekil 4.70** 4 numaralı girdap üreticin kullanıldığı modelin simetri düzlemindeki akım çizgileri

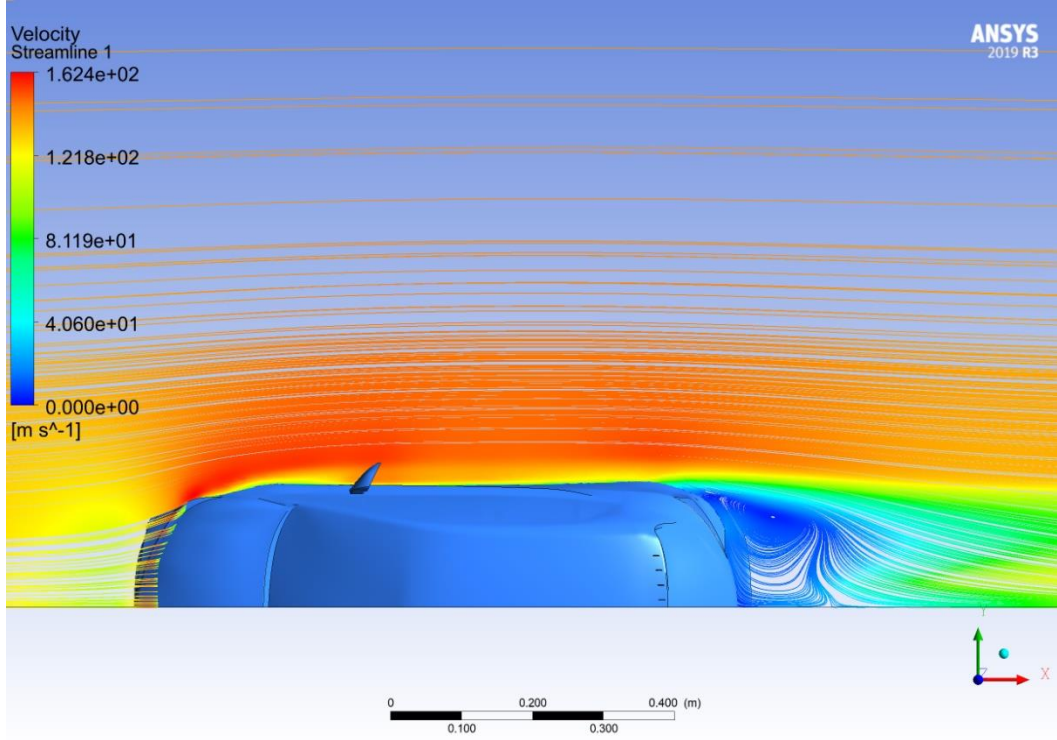


Şekil 4.71’de girdap üreteç kullanılmamış modelin  $z= 0,5h-xy$  düzlemindeki akım çizgileri verilmiştir. Aracın yan kısımlarında hava akışının hızlandığı ve akım iplikçiklerinin sıkılaştığı görülmektedir. Art izi bölgesinde düşük hızlarda ve akışın hızlı olduğu bölgelere oranla daha seyrek akım çizgileri mevcuttur. Aracın sağ arka far bölgesinde ise oluşan girdap yapısının akım çizgileri ile görselleştirilmiş hali gözükmemektedir.

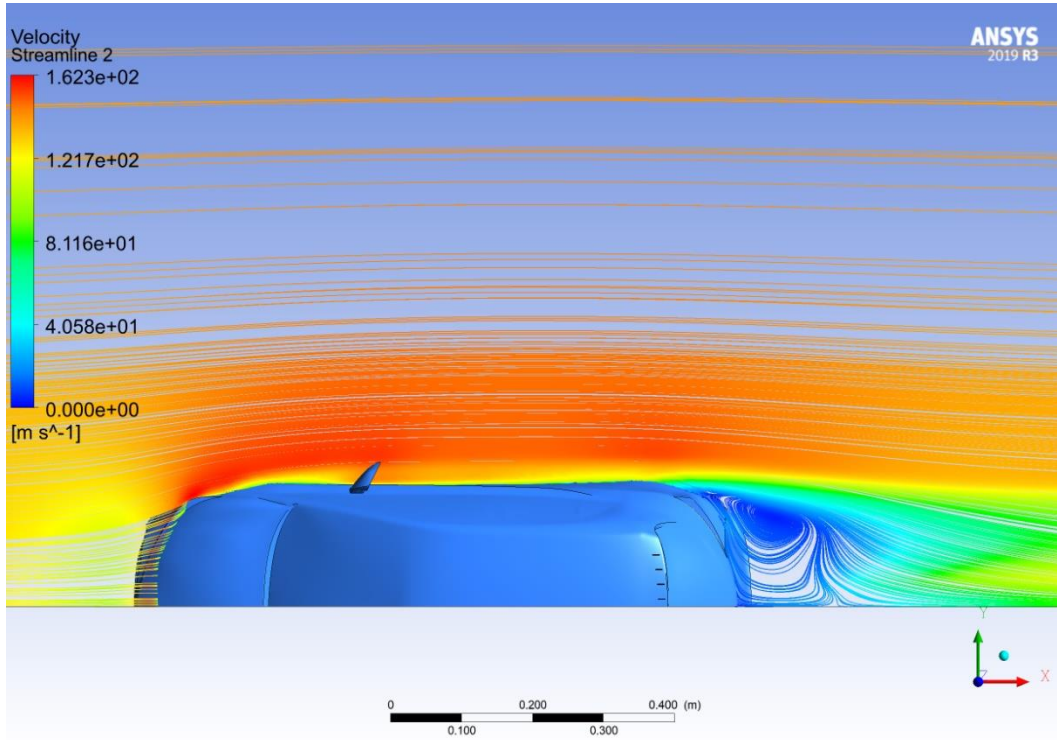


**Şekil 4.71** Girdap üreteç kullanılmamış modelin  $z= 0,5h-xy$  düzlemindeki akım çizgileri

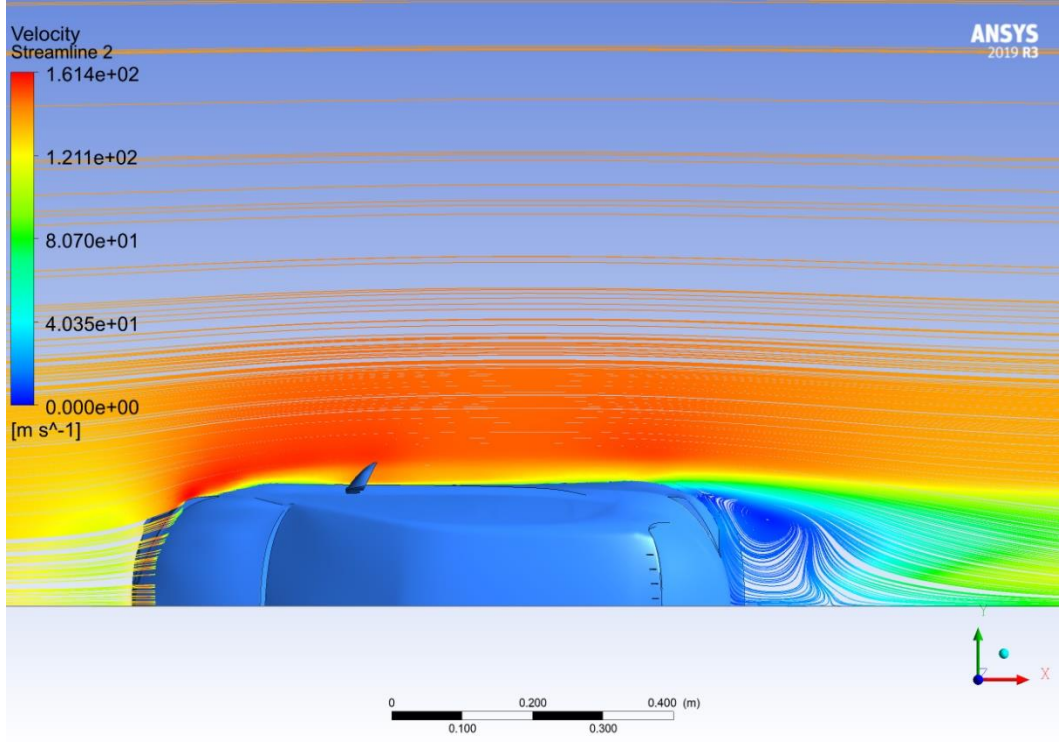
Şekil 4.72, Şekil 4.73, Şekil 4.74 ve Şekil 4.75’de sırasıyla 1 numaralı, 2 numaralı, 3 numaralı ve 4 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modellerin  $z= 0,5h-xy$  düzlemindeki akım çizgileri verilmiştir. Oluşan yapılar genel olarak girdap üreteç kullanılmamış modeldeki yapılarla benzerdir. Girdap üreteçler art izi bölgesindeki oluşan türbülanslı yapıyı etkilemesi ile bu bölgedeki akım çizgilerinde de bir miktar değişim gözlenmiştir. Art izi bölgesinde oluşan akım çizgilerinde seyrelmeler mevcuttur.



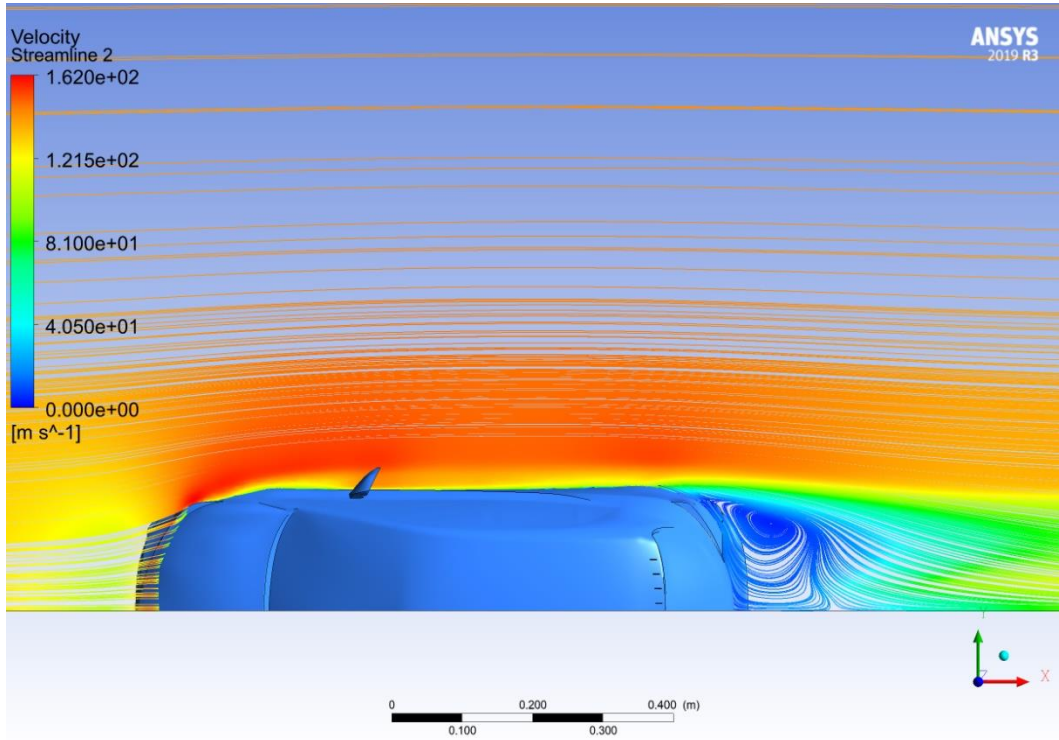
Şekil 4.72 1 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin  $z=0,5h$ -xy düzlemindeki akım çizgileri



Şekil 4.73 2 numaralı girdap üreticinin kullanıldığı modelin  $z=0,5h$ -xy düzlemindeki akım çizgileri

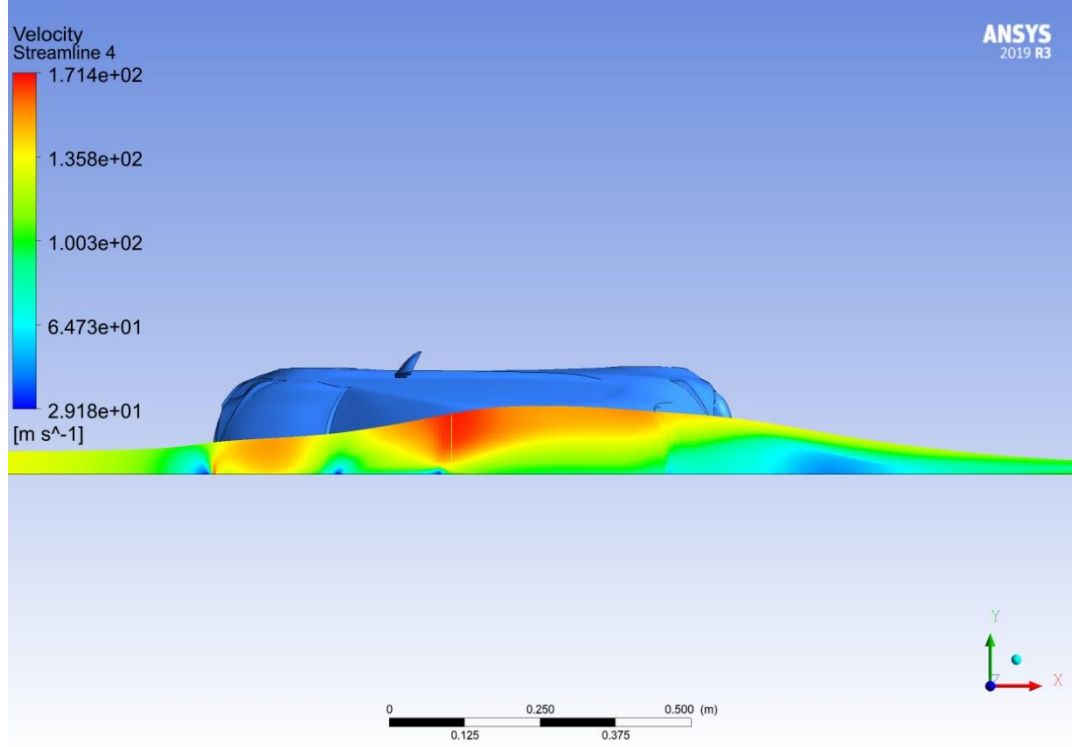


Şekil 4.74 3 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin  $z=0,5h$ -xy düzlemindeki akım çizgileri



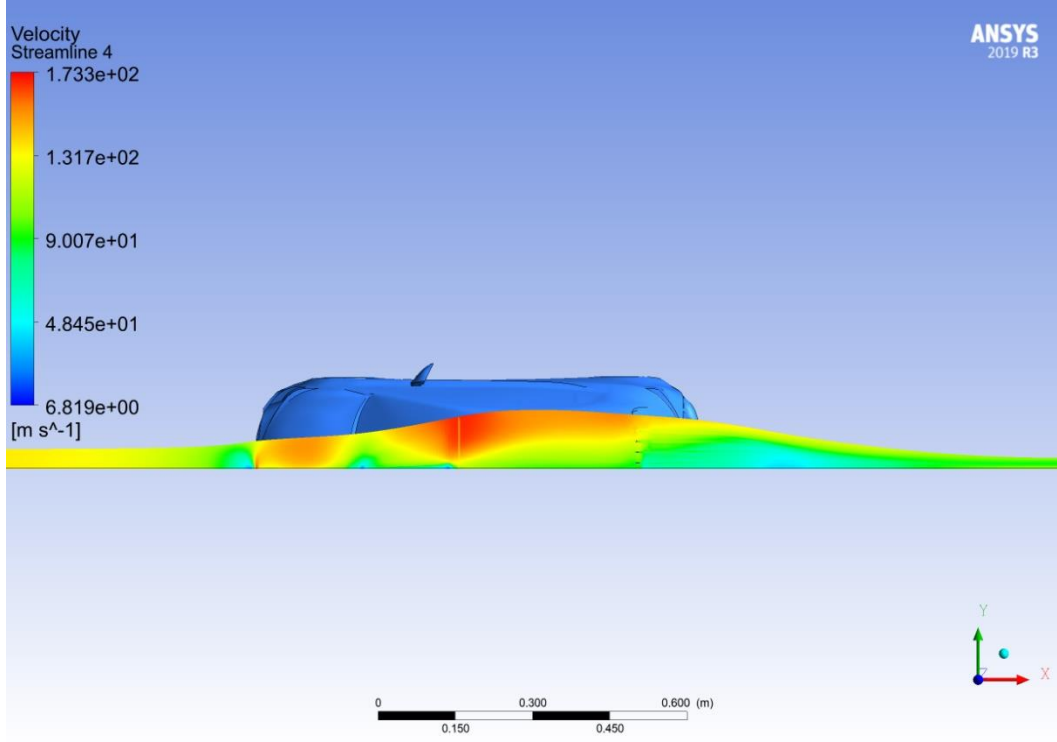
Şekil 4.75 4 numaralı girdap üretcin kullanıldığı modelin  $z=0,5h$ -xy düzlemindeki akım çizgileri

Şekil 4.76’da girdap üreteç kullanılmamış modelde tavanın ön kısmında ve y- eksenine paralel çizgiden başlayan akım çizgilerinin aşağı ve yukarı akımlarındaki görüntüleri verilmiştir. Ön kaput ve tavan bölgesinde genel olarak serbest akış hızının üstünde değerler elde edilirken aracın arka kısmında serbest akış hızı değerlerinin altında olan bir akış bölgesi görülmektedir.

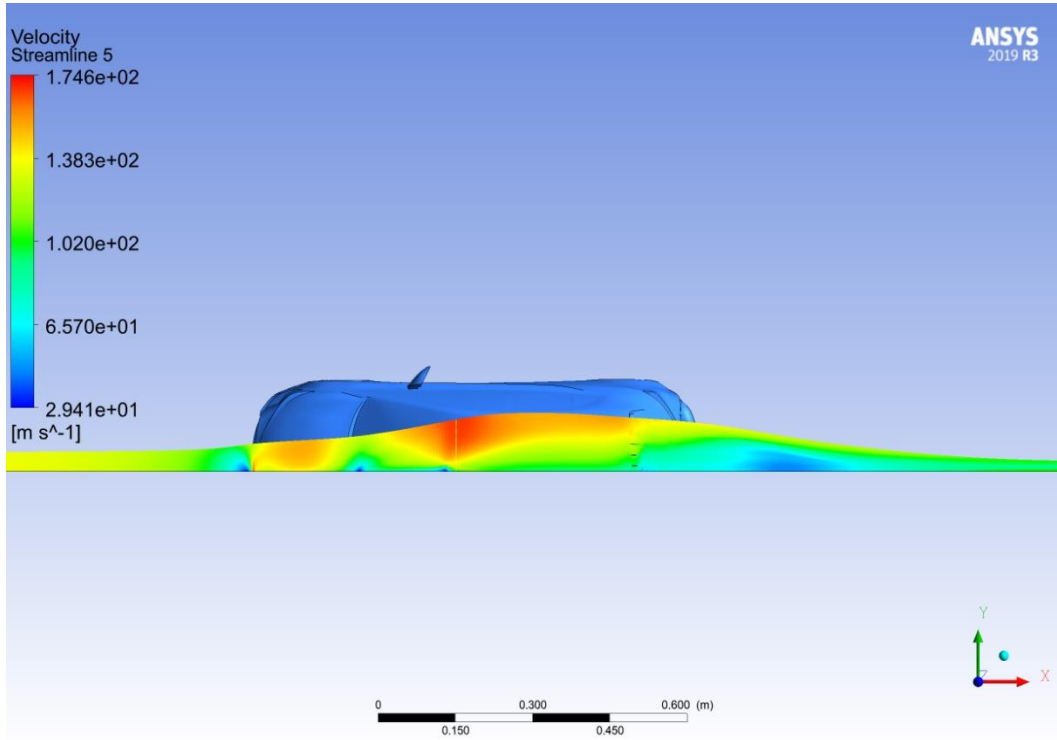


**Şekil 4.76** Girdap üreteç kullanılmamış modelde tavanının ön kısmından başlayan akım çizgileri

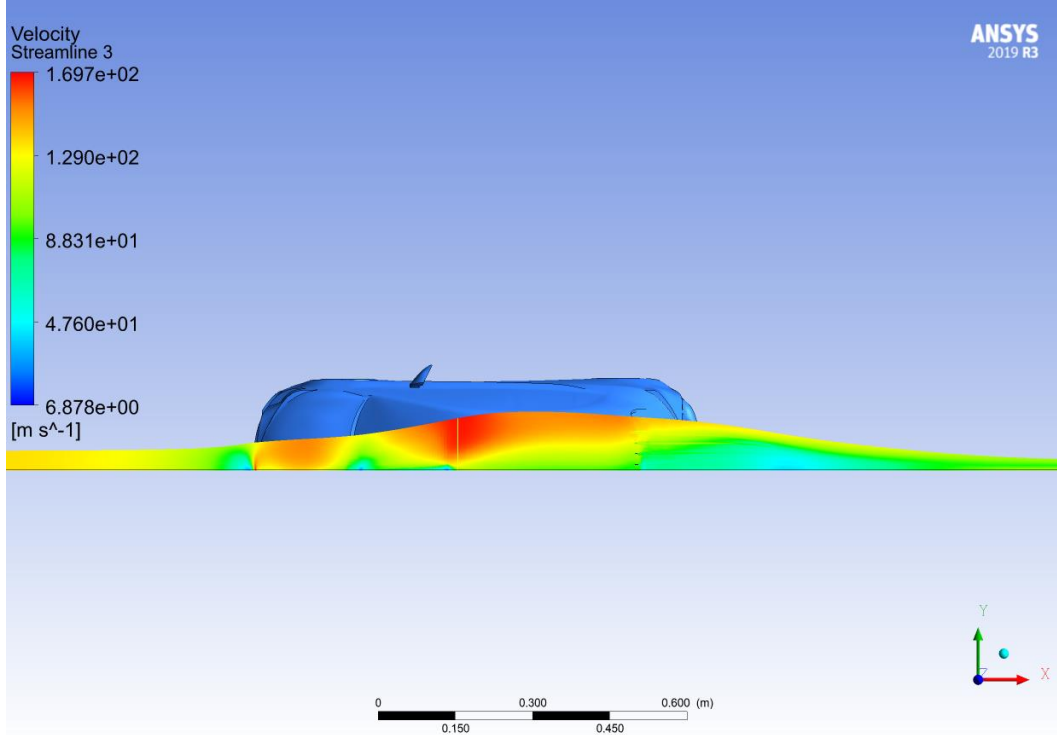
Şekil 4.77, Şekil 4.78, Şekil 4.79 ve Şekil 4.80’de sırasıyla 1 numaralı, 2 numaralı, 3 numaralı ve 4 numaralı girdap üreteç kullanılan modellerde tavanın ön kısmına konumlandırılmış y- eksenine paralel çizgiden başlayan akım çizgilerinin aşağı ve yukarı akımlarındaki görüntüleri verilmiştir. Girdap üreteçlerin yerleştirildiği konumların yukarı akımındaki bölgelerde hız değerleri girdap üreteç kullanılmamış modeldeki değerler ile neredeyse aynı olarak gözlemlenmiştir. Girdap üreteçlerin aşağı akımındaki düşük hızlı akış bölgesinin boyutunda azalmalar ve bu bölgedeki hız değerlerinde artışlar tespit edilmiştir. 2 numaralı girdap üretecin kullanıldığı modelde art izi bölgesindeki düşük hızlı akış alanının azalma miktarının diğer modellere göre daha az olduğu kaydedilmiştir.



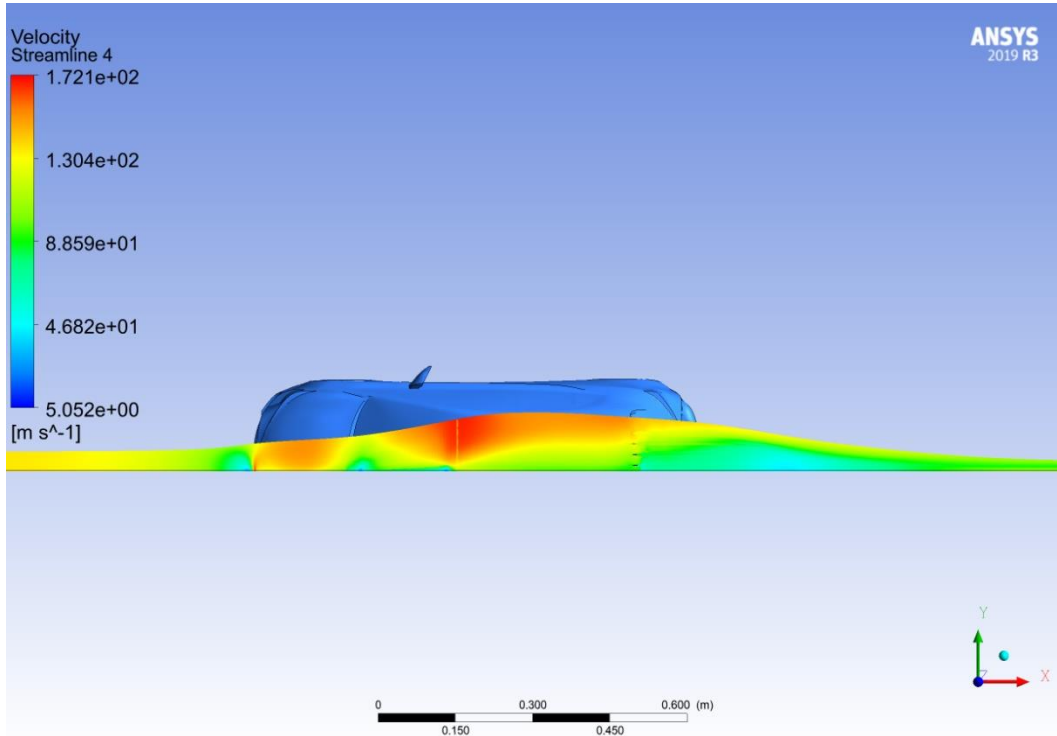
**Şekil 4.77** 1 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelde tavanının ön kısmından başlayan akım çizgileri



**Şekil 4.78** 2 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelde tavanının ön kısmından başlayan akım çizgileri



**Şekil 4.79** 3 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelde tavanının ön kısmından başlayan akım çizgileri



**Şekil 4.80** 4 numaralı girdap üreteç kullanılmış modelde tavanının ön kısmından başlayan akım çizgileri

## 5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında bir binek aracın aerodinamik analizi sayısal olarak yapılmıştır. İlk olarak CATIA V5R21 bilgisayar destekli tasarım programı ile aracın tasarımı yapılmıştır. Aracın genel hatları tel çerçeve yöntemi kullanılarak oluşturulduktan sonra yüzey komutları ile aracın kaportası ve dış yüzeyleri oluşturulmuştur. Yüzey modellemesi yapılan araç daha sonra katı modele dönüştürülerek sayısal çözüm için ANSYS programına aktarılmıştır. Aerodinamik analizde sonucun blokaj oranlarından etkilenmemesi için model belirli bir akış alanı içerisine SPACECLAIM programında yerleştirilmiştir. Ayrıca geometride ağ (mesh) örme kısmı için gerekli geometri iyileştirmeleri de SPACECLAIM programı ile yapılmıştır. Modelin ağ yapısını oluşturmak için FLUENT su sızdırmaz iş akışı modeli tercih edilmiştir. Akış alanı ve modellenen simülasyon ANSYS FLUENT ortamında çözdürülmüştür. Çözüm için düzeltilmiş  $k-\epsilon$  türbülans modeli geliştirilmiş duvar yaklaşımı ile beraber kullanılmıştır.

Yakıt tüketimi ile doğru orantılı olan sürüklenme katsayısı değerini azaltmak için bu tez kapsamında direnç iyileştirme çalışması yapılmıştır. Özellikle uçak kanatlarında akış ayrılmasını geciktirmek için kullanılan girdap üreteçleri tasarlanan araç üzerinde kullanılmıştır. Tavanın arka kısmında gerçekleşen akış ayrılma bölgesinin 15 mm yukarı akımına 100 mm aralıklarla 8 adet girdap üreteç yerleştirilmiştir. Ölçüleri detaylı olarak Bölüm 3’de verilen 4 farklı geometride girdap üreteç tasarlanmıştır.

Araç çevresi etrafında oluşan akış alanı incelenmiş ve araç arkasında oluşan büyük art izi bölgesinin sürüklenme katsayısına büyük oranda etki ettiği gözlemlenmiştir. Girdap üreteçlerinin varlığı sürüklenme ve kaldırma katsayılarında iyileşmelere neden olmuştur. Girdap üreteci kullanılmayan modelde sürüklenme katsayısı 0,313 elde edilmiştir. Sürüklenme katsayısının bu değeri benzer araç modeli için verilen değerden %2,2 daha düşüktür. Girdap üreteçlerin kullanıldığı modellerde sürüklenme katsayısında maksimum 0,009’luk bir azalma elde edilmiştir ve bu değer yaklaşık %2,87’lik bir iyileştirme demektir. Kaldırma katsayısında ise maksimum %3,3 oranında bir kazanım sağlanmıştır.

Girdap üreteçlerin kullanılmadığı araç üzerinde maksimum pozitif basınç katsayısı değerleri aracın ön kısmında gözlemlenirken, negatif basıncın lokal pik değerine ön kaputun başladığı bölgede ulaşılmıştır. Kaputun ön kısmından sileceklere kadar olan bölümde basınç katsayısı değerleri artmış ve pozitif basınç katsayısının pik değerleri ön camın alt kısımlarında elde edilmiştir. Sileceklerden tavanın ön kısmına doğru olan bölgede akış hızının artması ile basınç katsayısı negatif değerler almıştır. Tavanın ön kısmında ise basınç katsayısı minimum değerine ulaşmıştır. Basınç katsayısı, tavanın ön kısmı ve aracın arka kısmı arasındaki bölgede artarak sıfır değerine yaklaşmıştır. Tavanın orta kısımları ile sonu arasındaki bölgede ise basınç katsayısının biraz arttığı görülmüştür. Aracın arka kısmında basınç katsayısı değerleri neredeyse sabit kalmıştır. Girdap üreteçlerin kullanıldığı tasarımlarda da benzer basınç dağılımları elde edilmiştir.

Girdap üreteçlerin kullanılmadığı aracın arka, ön ve sileceklerin bulunduğu bölgelerde ters akışlar görülmüş ve bu bölgedeki hız değerleri serbest akış hızının altında kalmıştır. Ön kısımdaki bu ters akışlar bu bölgenin durma noktası olması ile açıklanabilir. Tavan ve ön kaputun ortalarında ise akış hızı artmış ve tavanın ön kısımlarında maksimum değerine ulaşmıştır. Girdap üreteçlerin kullanıldığı tasarımlarda da benzer akış yapıları elde edilmiştir.

İleride yapılacak çalışmalarda, farklı çeşitlerde ve ölçülerde girdap üreteçler tasarlanarak sürüklenme ve kaldırma katsayılarında daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Girdap üreteçlerin ve aracın gerçek modeli yapılarak rüzgar tüneline testleri gerçekleştirilebilir. Tasarlanan araca farklı pasif ya da aktif akış kontrolü yöntemleri uygulanarak sürüklenme katsayısında azalma sağlanabilir. Bununla birlikte çalışmada kullanılan modelin tasarımında iyileştirmeler yapılarak gerçek sürüş şartları daha iyi simüle edilebilir.



## KAYNAKLAR

- Aerodinamik. (2021, Aralık 22). İçinde *Wikipedia*.  
<https://tr.wikipedia.org/wiki/Aerodinamik>
- Aerodinamik (otomobil). (2021, Haziran 1). İçinde *Wikipedia*.  
[https://tr.wikipedia.org/wiki/Aerodinamik\\_\(otomobil\)](https://tr.wikipedia.org/wiki/Aerodinamik_(otomobil))
- Aider, J.-L., Beaudoin, J.-F., Eduardo Wesfreid, J., & Eduardo, J. (2010). Drag and lift reduction of a 3D bluff-body using active vortex generators. *Experiments in Fluids*, 5, 771–789. <https://doi.org/10.1007/s00348-009-0770-yi>
- Altınışik, A. (2013). *Binek Araç Modeli Üzerindeki Aerodinamik Analizlerin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi* (Tez No. 343180) [Doktora tezi, Uludağ Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp>
- Ansys How To Videos. (2019, Kasım 19). *Geometry Preparation in ANSYS SpaceClaim for the Aerodynamic Analysis of a Solar Car - Part 1* [Video]. YouTube.  
<https://www.youtube.com/watch?v=0bPJMk5who8>
- Ansys How To Videos. (2019, Aralık 13). *Meshing Using the Fluent Mesher for the Aerodynamic Analysis of a Solar Car - Part 2* [Video]. YouTube.  
<https://www.youtube.com/watch?v=73xU78YwHv4>
- Ansys How To Videos. (2019, Aralık 13). *Post Processing for the Aerodynamic Analysis of a Solar Car in ANSYS Fluent - Part 4* [Video]. YouTube.  
<https://www.youtube.com/watch?v=pHzSfvkCy5U>
- Ansys How To Videos. (2019, Aralık 13). *Solver Setup in ANSYS Fluent for the Aerodynamic Analysis of a Solar Car - Part 3* [Video]. YouTube.  
<https://www.youtube.com/watch?v=qFs8DhsXb4>
- Arabacı, S. (2016). *Canlılardan Esinlenerek Kara Taşıtlarının Aerodinamik Tasarımlarının İyileştirilmesi* (Tez No. 430963) [Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp>
- Beaudoin, J. F., & Aider, J. L. (2008). Drag and lift reduction of a 3D bluff body using flaps. *Experiments in Fluids*, 44(4), 491–501. <https://doi.org/10.1007/s00348-007-0392-1>
- Bruneau, C. H., Creusé, E., Gilliéron, P., & Mortazavi, I. (2014). Effect of the vortex dynamics on the drag coefficient of a square back Ahmed body: Application to the flow control. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 45, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2013.11.003>
- Buscariolo, F. F., Assi, G. R. S., & Sherwin, S. J. (2021). Computational study on an Ahmed Body equipped with simplified underbody diffuser. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104411>
- Computational fluid dynamics. (2022, Ocak 5). İçinde *Wikipedia*.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Computational\\_fluid\\_dynamics](https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics)
- Dayı, R. (2019). *2050 Yılına Kadar Türkiye'deki Otomobil Sayılarının ve Emisyon Miktarının Tahmini* (Tez No. 599122) [Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp>
- Demircioğlu, T. K. (2007). *Bir Araç Modelinin Aerodinamik Analizi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Simülasyonu* (Tez No. 177988) [Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp>
- Ebrahim, H., & Dominy, R. (2020). Wake and surface pressure analysis of vehicles in platoon. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104144>

Engin, T. (Ed.) (2018). *Akışkanlar mekaniği temelleri ve uygulamaları* (3.baskı). Palme Yayınevi.

Ekman, P., Wieser, D., Virdung, T., & Karlsson, M. (2020). Assessment of hybrid RANS-LES methods for accurate automotive aerodynamic simulations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104301>

Flow separation. (2021, Aralık 4). İçinde *Wikipedia*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Flow\\_separation](https://en.wikipedia.org/wiki/Flow_separation)

Fontaras, G., Zacharof, N. G., & Ciuffo, B. (2017). Fuel consumption and CO2 emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions. In *Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 60, pp. 97–131). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.12.004>.

Gilliéron, P., & Kourta, A. (2010). Aerodynamic drag reduction by vertical splitter plates. *Experiments in Fluids*, 48(1), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00348-009-0705-7>

Gökçeğöz, G. (2013). *Model Bir Otomobile Etkiyen Aerodinamik Kuvvetlerin Analizi* (Tez No. 323076) [Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp>

Hesse, F., & Morgans, A. S. (2021). Simulation of wake bimodality behind squareback bluff-bodies using LES. *Computers and Fluids*, 223. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2021.104901>

He, K., Minelli, G., Wang, J., Gao, G., & Krajnović, S. (2021). Assessment of LES, IDDES and RANS approaches for prediction of wakes behind notchback road vehicles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 217. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104737>.

Humnic, A., & Humnic, G. (2020). Aerodynamics of curved underbody diffusers using CFD. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 205. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104300>

<https://nptel.ac.in/content/storage2/courses/101106041/Chapter%203%20Lecture%208%2020-12-2011.pdf>

<https://www.mechanicalbooster.com/2016/10/what-is-viscosity.html>

<https://www.physicsforums.com/threads/boundary-layer-separation-in-laminar-and-turbulent-flows.886658/>

<https://www.tec-science.com/mechanics/gases-and-liquids/hagen-poiseuille-equation-for-pipe-flows-with-friction/>

<https://www.toyota.com.tr/>

Keleş, U. (2015). *Yan Rüzgar Etkisi Altındaki Ağır Ticari Bir Araçta Aerodinamik Direnç Katsayısının Had ile Analizi* (Tez No. 409782) [Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp>

Koike, M., Nagayoshi, T., Hamamoto, N., 2004, Research on Aerodynamic Drag Reduction by Vortex Generators, Mitsubishi Motors Technical Review No. 16

Leticia dos Santos, F. (2019). *Influence of Tripping Devices in Hastening Transition in a Flat Plate Submitted to Zero and Favorable Pressure Gradients*. [Master's Thesis, University of Twente]. (PDF) <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34114.73922>

Law of the wall. (2021, Haziran 29). İçinde *Wikipedia*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Law\\_of\\_the\\_wall](https://en.wikipedia.org/wiki/Law_of_the_wall)

Lienhart, H., & Becker, S. (2003). Flow and Turbulence Structure In the Wake of a Simplified Car Model. In *JOURNAL OF PASSENGER CAR: MECHANICAL SYSTEMS JOURNAL* (Vol. 112). <https://about.jstor.org/terms>

Nath, D. S., Pujari, P. C., Jain, A., & Rastogi, V. (2021). Drag reduction by application of aerodynamic devices in a race car. *Advances in Aerodynamics*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/s42774-020-00054-7>

Navier-Stokes denklemleri. (2021, Kasım 1). İçinde *Wikipedia*. [https://tr.wikipedia.org/wiki/Navier-Stokes\\_denklemleri](https://tr.wikipedia.org/wiki/Navier-Stokes_denklemleri)

Palanivendhan, M., Chandradass, J., Bannaravuri, P. K., Philip, J., & Shubham, K. (2021). Aerodynamic simulation of optimized vortex generators and rear spoiler for performance vehicles. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7228–7238. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.537>

Richter, F. (2021, Mart 3). *Fuel efficiency top priority for new car owners*. Statista. <https://www.statista.com/chart/24331/what-car-buyers-want-in-a-new-car/>

Selvi Rajan, S., Harikrishna, P., Senthilkumar, S., Parammasivam, K. M., 2013. *Aerodynamic Drag Reduction on a Sedan Car by Provision of Vortex Generators through Wind Tunnel Studies*. <https://doi.org/10.13140/2.1.1680.0967>

Sivaraj, G., Parammasivam, K., Prasath, M., Vadivelu, P., & Lakshmanan, D. (2021). Flow analysis of rear end body shape of the vehicle for better aerodynamic performance. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.521>

Subbiah, G., Allaudeen, A. S., Janarthanam, H., Mani, P., Gnanamani, S., Raja, K. S. S., & Raja, T. A. (2020). Computational investigation and design optimization of vortex generator for a sport utility vehicle using CFD. *AIP Conference Proceedings*, 2311. <https://doi.org/10.1063/5.0034023>

Ternel, C., Bouter, A., & Melgar, J. (2021). Life cycle assessment of mid-range passenger cars powered by liquid and gaseous biofuels: Comparison with greenhouse gas emissions of electric vehicles and forecast to 2030. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102897>

Tulapurkara, E. G. (2011, Aralık 20). *Flight dynamics*. Indian Institute of Technology. Erişim tarihi: Aralık 20, 2021,

Umur, H., (2009). *Akışkanlar Mekaniği* (4. Baskı). Dora Yayınları.

Uzel, S. (2018, Şubat 26). Navier-Stokes denklemlerini zorlaştıran nedir? *Bilimfili*. <https://bilimfili.com/fizikteki-en-zor-denklemleri-zorlastiran-nedir>

Van Garrel, A., Venner, C. H., & Hoeijmakers, H. W. M. (n.d.). *Fast Multilevel Panel Method for Wind Turbine Rotor Flow Simulations*.

Verma, R. P., Kumar Chaudhary, N., & Avikal, S. (2021). Effect of direction of lip spoiler on the aerodynamic performance of a small passenger vehicle. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.448>

Yemenici, O. (2010). *Bloklu Yüzeylerde Akış ve Isı Transferi Karakteristiklerinin İncelenmesi* (Tez No. 283015) [Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp>

Yükselen, M. A. (2012, Ekim 15). *Aerodinamik kuvvet ve momentler*. İstanbul Teknik Üniversitesi. Erişim tarihi: Mayıs 1, 2021, [https://web.itu.edu.tr/yukselen/Uck351/2%20Aerodinamik%20kuvvet%20ve%20Momentler\\_PPT2.pdf](https://web.itu.edu.tr/yukselen/Uck351/2%20Aerodinamik%20kuvvet%20ve%20Momentler_PPT2.pdf)

**EKLER**

**EK 1**      Aaaaaaaaaaaaaaaaaa    aa  
aa

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Halit KASAP  
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa-17.10.1995  
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu  
Lise : Nuri Nihat Aslanoba Anadolu Lisesi  
Lisans : Uludağ Üniversitesi-Makine Mühendisliği  
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi-Makine Mühendisliği-Termodinamik  
A.B.D.

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Üç-El Kauçuk ve Metal Uzmanı

İletişim (e-posta) : halitkasap95@gmail.com

Yayımları :