

**ARAÇ AERODİNAMİĞİNDE RÜZGAR TÜNELİ VE YOL TESTİ FARKLARININ  
CFD METODU İLE İNCELENMESİ**

**Canberk İNSEL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Hidrolik Bilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Ahmet Ozan ÇELİK**

**Eskişehir**

**Eskişehir Teknik Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Mayıs 2019**

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Canberk İnel'in "Araç Aerodinamiğinde Rüzgar Tüneli ve Yol Testi Farklarının CFD Metodu ile İncelenmesi" başlıklı tezi 31/05/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### Unvanı Adı Soyadı

### İmza

|                     |   |                             |       |
|---------------------|---|-----------------------------|-------|
| Üye (Tez Danışmanı) | : | Doç. Dr. Ahmet Ozan ÇELİK   | ..... |
| Üye                 | : | Doç. Dr. Erhan AYAS         | ..... |
| Üye                 | : | Dr. Öğr. Üyesi Taylan BAĞCI | ..... |

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

## ÖZET

### ARAÇ AERODİNAMİĞİNDE RÜZGAR TÜNELİ VE YOL TESTİ FARKLARININ CFD METODU İLE İNCELENMESİ

Canberk İNSEL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mayıs 2019

Danışman : Doç Dr. Ahmet Ozan ÇELİK

Özellikle günümüzde üzerinde çok durulan araç aerodinamiği konusunda, aerodinamik performans testlerinin gerçek koşullara uygunsuzluğu büyük problem yaratmaktadır. Yol testlerinde yaşanan performans ölçümleri ve rüzgar tünellerinde yaşanan gerçek koşullara uygunsuzluk problemlerine tam olarak çözüm bulunamamıştır. Bu çalışmada, yaşanan problemler ve bu problemlerin sürüklenme katsayısı ve kaldırma kuvveti gibi başlıca aerodinamik performans parametreleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yaşanan başlıca problemlerden; araç tekerleği hareketi, yol hareketi ve hem yol hem de araç tekerleği hareketi problemleri üzerinde durulmuştur. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizlerde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) metodu kullanılmıştır. Çalışma için, Anadolu Üniversitesi ve Eskişehir Teknik Üniversitesi'ne ait akademik lisanslı ANSYS FLUENT yazılımı ve 48 mantıksal işlemciye sahip iş istasyonu kullanılmıştır.

Bu çalışmadaki tüm analizler Ahmed modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, fiziksel aerodinamik performans testleri yapılmış Ahmed modelinin HAD analizleri yapılmış olup, ağ yapısı bağımsızlığı ve model kurulum geçerliliği çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sonrasında, 4 sehpa bulunan Ahmed modeli üzerinde tekerlek boşlukları ve tekerlekler oluşturulmuştur. Model geçerliliği sağlanan kurulum kullanılarak, tekerlekli Ahmed modeli üzerinde Hareketsiz Model, Tekerlek Hareketi Modeli, Yol Hareketi Modeli ve Tekerlek-Yol Hareketi Modeli hazırlanmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen veriler ile birlikte, farklı durum analizlerinin sonuç verilerindeki farklılıklar ve aerodinamik performans analizlerinde gerçek koşulların sağlanmasının gerekliliği değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** Aerodinamik Performans Analizleri, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), Dinamik Ağ Yapısı, Duvar Hareketi, Ahmed Modeli.

## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATION OF DIFFERENCES BETWEEN WIND TUNNEL AND ROAD TESTS USING CFD METHOD IN AERODYNAMIC OF VEHICLE**

Canberk Insel

Department of Civil Engineering  
Programme in Hydraulics

Eskisehir Technical University, Institute of Graduate Programs, May 2019

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ahmet Ozan Celik

Especially at the present time, inapplicability of aerodynamic performance tests for real conditions is a big problem in vehicle aerodynamics. Performance measurements in road tests and inaccuracy problems in wind tunnel tests have not been fully solved. In this study, problems and effects of these problems on the main aerodynamic performance parameters such as drag coefficient and lift force were investigated. Main problems; vehicle wheel motion, road motion, and both road and wheel motion problems are emphasized. Computational Fluid Dynamics (CFD) method was used in the analyzes performed within the study. Workstation with 48 logical processors and ANSYS FLUENT software which is licensed by Anadolu University and Eskisehir Technical University were used.

In this study, all analyzes were performed using Ahmed model. Firstly, CFD analysis of Ahmed model which has physical aerodynamic performance tests have been done, and then, mesh independence and model setup validation studies have been carried out. After these studies, wheel gaps and wheels were constituted on basic Ahmed model. Fixed Model, Wheel Motion Model, Road Motion Model and Wheel-Road Motion Model was prepared and analyzed using the validated model. The differences in the results data of the different situation analyzes and necessity of providing the real conditions in the aerodynamic performance tests and analyzes were evaluated.

**Keywords :** Aerodynamic Performance Analyzes, Computational Fluid Dynamics (CFD), Dynamic Mesh, Wall Motion, Ahmed Body.

## ÖNSÖZ

Ömrüm boyunca her an benimle, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, dünyanın en fedakar ve mükemmel ebeveynleri olan, annem Yasemin İnel ve babam Nejat İnel'e, gösterdikleri sevgi, saygı, anlayış ve sabırları, onurlu ve gururlu bir hayat yaşadıkları ve yaşattıkları için, tüm kalbim, gururum ve yazıya dökülemeyecek kadar güzel duygularıyla sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

2014 yılından bugüne kadar, hem akademik hem sektörler hem de hayat ile ilgili bana önemli bilgiler katan, danışman hocam Sayın Doç. Dr. Ahmet Ozan Çelik'e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bugüne kadar her zaman bana destek olan, hiçbir zaman bitmeyecek birliktelikler kurduğumuz ve artık ailemden sayılan tüm can dostlarıma, bugüne kadar yaşadığımız her gün ve ömür boyunca hayatımda olacakları için sonsuz teşekkür ederim.

Canberk İNEL

## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı” ile tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....

Canberk İNSEL

## İÇİNDEKİLER

Sayfa

|                                                        |     |
|--------------------------------------------------------|-----|
| JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI .....                            | i   |
| ÖZET .....                                             | ii  |
| ABSTRACT .....                                         | iii |
| ÖNSÖZ .....                                            | iv  |
| ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ .....      | v   |
| TABLO DİZİNİ .....                                     | ix  |
| ŞEKİL DİZİNİ .....                                     | x   |
| SEMBOL VE KISALTMA DİZİNİ .....                        | xv  |
| 1. GİRİŞ .....                                         | 1   |
| 1.1. Aerodinamik Parametreler .....                    | 1   |
| 1.2. Deneysel Aerodinamik Testler .....                | 5   |
| 1.2.1. Yol testleri .....                              | 5   |
| 1.2.2. Rüzgar tüneli testleri .....                    | 6   |
| 1.2.2.1. Geometrik benzeşim .....                      | 8   |
| 1.2.2.2. Dinamik benzeşim .....                        | 9   |
| 1.2.2.3. Kinematik benzeşim .....                      | 9   |
| 1.2.2.4. Blokaj problemi .....                         | 10  |
| 1.2.2.5. Yol ve tekerlek hareketi .....                | 10  |
| 2. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) ANALİZİ ..... | 15  |
| 2.1. Geometri Oluşturulması .....                      | 16  |
| 2.1.1. Ahmed modeli .....                              | 16  |
| 2.2. Sayısal Ağ Yapısı (Mesh) Oluşturulması .....      | 17  |
| 2.2.1. Ahmed modeli ağ yapısı bağımsızlığı .....       | 22  |
| 2.3. Analiz Şartlarının Tanımlanması (Setup) .....     | 25  |

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.1. Kütle korunumu (süreklilik) .....                                    | 26 |
| 2.3.2. Momentum korunumu.....                                               | 27 |
| 2.3.3. Enerji korunumu.....                                                 | 28 |
| 2.3.4. Türbülans modelleri.....                                             | 30 |
| 2.3.4.1. DNS modeli.....                                                    | 30 |
| 2.3.4.2. RANS - URANS modelleri.....                                        | 30 |
| 2.3.4.2.1. Reynold stress modeli (RSM) .....                                | 31 |
| 2.3.4.2.2. Spalart-allmaras türbülans modeli .....                          | 31 |
| 2.3.4.2.3. Standart $k - \varepsilon$ türbülans modeli.....                 | 32 |
| 2.3.4.2.4. RNG $k - \varepsilon$ türbülans modeli.....                      | 32 |
| 2.3.4.2.5. Realizable $k - \varepsilon$ türbülans modeli .....              | 32 |
| 2.3.4.2.6. Standart $k - \omega$ türbülans modeli.....                      | 33 |
| 2.3.4.2.7. Shear stress transport (SST) $k - \omega$ türbülans modeli ..... | 33 |
| 2.3.4.3. Large-eddy simulation (LES) modeli.....                            | 33 |
| 2.3.4.4. Detached eddy simulation (DES) modeli .....                        | 34 |
| 2.3.4.5. Duvar fonksiyonları ve yakın cidar uygulaması.....                 | 34 |
| 2.3.5. Sonlu hacimler yöntemi ile ayrıklaştırma .....                       | 35 |
| 2.3.6. Hesaplama algoritmaları .....                                        | 38 |
| 2.3.6.1. SIMPLE-SIMPLEC algoritmaları.....                                  | 39 |
| 2.3.6.2. PISO algoritması .....                                             | 39 |
| 2.3.6.2.1. Momentum ve çarpıklık doğrulaması.....                           | 39 |
| 2.3.6.3. COUPLED algoritması .....                                          | 40 |
| 2.3.7. Ahmed modeli analiz şartları .....                                   | 40 |
| 2.3.8. Model geçerliliğinin sağlanması.....                                 | 41 |
| 3. HAD ANALİZLERİNDE DUVAR HAREKETİ .....                                   | 43 |
| 3.1. Tekerlek Hareketi.....                                                 | 44 |
| 3.2. Yol Hareketi .....                                                     | 47 |



|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 3.2. Tekerlek ve Yol Hareketi..... | 48 |
| 4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....     | 50 |
| KAYNAKÇA.....                      | 71 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                     | 73 |



## TABLO DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                     |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tablo 2.1. Çarpıklık değerlerine göre ağ hücre kalitesi. ....</b>                                | <b>19</b> |
| <b>Tablo 2.2. Ağ yapısı bağımsızlığı çalışmasında kullanılan ağ yapılarına ait özellikler. ....</b> | <b>25</b> |
| <b>Tablo 4.1. Kıyaslama analizleri sonuç verilerindeki değişim. ....</b>                            | <b>69</b> |



## ŞEKİL DİZİNİ

Sayfa

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. Araç yüzeyindeki başlıca ayrılma ve durgunluk bölgeleri (Hucho ve Sovran, 1993). .....                                                                                                                                                                                                | 2  |
| Şekil 1.2. Ahmed modeline ait hız parametrelili akım çizgileri ile arka girdap bölgesi. ....                                                                                                                                                                                                     | 3  |
| Şekil 1.3. Yüzey yakınındaki akım hız dağılımı (Katz, 1995). ....                                                                                                                                                                                                                                | 3  |
| Şekil 1.4. Hareket halindeki araç üzerindeki basınç katsayısı grafiği (Katz, 1995). ....                                                                                                                                                                                                         | 4  |
| Şekil 1.5. Nissan p-35 prototip aracının aerodinamik yol testi için ön bölge hız ölçüm donanımı (Katz, 1995). ....                                                                                                                                                                               | 6  |
| Şekil 1.6. Rüzgar tüneli testinde duman yöntemi ile akım görselleştirme. ....                                                                                                                                                                                                                    | 7  |
| Şekil 1.7. BMW Group rüzgar yatay rüzgar tüneli enerji kırıcı ve türbülans yoğunluğu düzenleyici bölgeler (Duell ve diğerleri, 2010). ....                                                                                                                                                       | 7  |
| Şekil 1.8. Rüzgar tüneli çeşitleri. ....                                                                                                                                                                                                                                                         | 8  |
| Şekil 1.9. (A) Yol koşullarında hareket eden araç ile (B) rüzgar tüneli içerisindeki aracın alt bölge sınır tabaka farkı (Katz, 1995). ....                                                                                                                                                      | 11 |
| Şekil 1.10. Rüzgar tüneli testlerinde yol simülasyonunun uygulanması için geliştirilmiş (A) yükseltilmiş yer yüzeyi, (B) model öncesi hava emme, (C) model zemin hava emme, (D) model zemin teğetsel üfleme, (E) simetri ve (F) geliştirilmiş emme ve üfleli kayış sistemleri (Katz, 1995). .... | 12 |
| Şekil 1.11. Rüzgar tüneli testlerinde yol simülasyonunun uygulanması için geliştirilmiş bant sisteminde model aracın sabitlenmesi ( <a href="https://www.motorsport.com">https://www.motorsport.com</a> , 17.05.2019). ....                                                                      | 13 |
| Şekil 1.12. Rüzgar tüneli testlerinde yol simülasyonunun uygulanması için geliştirilmiş dar bant sistemi ( <a href="https://www.bmw-sg.com">https://www.bmw-sg.com</a> , 17.05.2019). ....                                                                                                       | 14 |
| Şekil 2.1. Ahmed modeli geometri detayı (Meile ve diğerleri, 2011). ....                                                                                                                                                                                                                         | 17 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.2. <i>Ahmed modeli uzunluğu <math>L</math>, genişliği <math>B</math> ve yüksekliği <math>H</math> olduğu yerde rüzgar tünel boyutları.</i> .....                                                                                                                                                         | 17 |
| Şekil 2.3. <i>İdeal ve çarpık üçgen ve dörtgenler.</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                     | 19 |
| Şekil 2.4. <i>Ağ hücreleri için ortogonalite hesabında kullanılan vektörler.</i> .....                                                                                                                                                                                                                           | 20 |
| Şekil 2.5. <i>Ağ hücresi yüzeyi için ortogonalite hesabında kullanılan vektörler.</i> .....                                                                                                                                                                                                                      | 21 |
| Şekil 2.6. <i>Büyük boyutlu ağ yapı elemanı (sol üst), hacimsel sıklaştırmalı büyük boyutlu ağ yapı elemanı (sol alt), küçük boyutlu ağ yapı elemanı (sağ üst) ve hacimsel sıklaştırmalı küçük boyutlu ağ yapı elemanı (sağ alt) sayısal ağ yapıları sıklaştırma çalışması (Ahmad ve diğerleri, 2010).</i> ..... | 21 |
| Şekil 2.7. <i>Ahmed modeli için hazırlanan rüzgar tüneli ve ağ yapısı sıklaştırma kutusu geometrisi.</i> .....                                                                                                                                                                                                   | 23 |
| Şekil 2.8. <i>Ahmed modeli için seçilen ve M4 olarak isimlendirilen ağ yapısı.</i> .....                                                                                                                                                                                                                         | 23 |
| Şekil 2.9. <i>Tetrahedral yapıdaki ağ elemanlarının polyhedral yapıya dönüştürülmesi (ANSYS 17.0 Users Manual Guide).</i> .....                                                                                                                                                                                  | 24 |
| Şekil 2.10. <i>Boşluktaki sabit sonlu kontrol hacmi (Tu ve diğerleri, 2018).</i> .....                                                                                                                                                                                                                           | 26 |
| Şekil 2.11. <i>Cidar yakını bölgeleri (ANSYS Inc., 2006).</i> .....                                                                                                                                                                                                                                              | 35 |
| Şekil 2.12. <i>Sonlu hacimler yöntemi için kontrol hacmi hesaplama merkezi, eleman köşe birleşim noktaları ve birleşme yüzeyleri (Tu ve diğerleri, 2018).</i> .....                                                                                                                                              | 36 |
| Şekil 2.13. <i>1 boyutlu akım hacminde sonlu hacimler metodunda dikkate alınan düğüm noktaları ve aralarındaki bağlantı.</i> .....                                                                                                                                                                               | 37 |
| Şekil 2.14. <i>Sürüklenme Katsayısı-Ağ Sayısı grafiği.</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                 | 41 |
| Şekil 2.15. <i>(a) M4 olarak adlandırılan tetrahedral yapıdaki ağ yapısının (b) M6 olarak adlandırılan polyhedral ağ yapısına dönüştürülmesi.</i> .....                                                                                                                                                          | 42 |
| Şekil 3.1. <i>Tekerlekli Ahmed modeli geometri detayı.</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                 | 44 |

|                                                                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.2. <i>Tekerlekli Ahmed modeli hareketsiz model analiz sonucu, XY düzlemi <math>Z=0</math> [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.</i>                                   | 44 |
| Şekil 3.3. <i>Tekerlekli Ahmed modeli hareketsiz model analiz sonucu, XY düzlemi <math>Z=169.5</math> [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.</i>                               | 44 |
| Şekil 3.4. <i>Tekerlekli Ahmed modelinin tekerlek ve hava hareketi.</i>                                                                                                                                              | 46 |
| Şekil 3.5. <i>Tekerlekli Ahmed modeli tekerlek hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi <math>Z=0</math> [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.</i>             | 46 |
| Şekil 3.6. <i>Tekerlekli Ahmed modeli tekerlek hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi <math>Z=169.5</math> [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.</i>         | 46 |
| Şekil 3.7. <i>Tekerlekli Ahmed modelinin yol ve hava hareketi.</i>                                                                                                                                                   | 47 |
| Şekil 3.8. <i>Tekerlekli Ahmed modeli yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi <math>Z=0</math> [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.</i>                  | 48 |
| Şekil 3.9. <i>Tekerlekli Ahmed modeli yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi <math>Z=169.5</math> [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.</i>              | 48 |
| Şekil 3.10. <i>Tekerlekli Ahmed modelinin yol, tekerlek ve hava hareketi.</i>                                                                                                                                        | 49 |
| Şekil 3.11. <i>Tekerlekli Ahmed modeli tekerlek ve yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi <math>Z=0</math> [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.</i>     | 50 |
| Şekil 3.12. <i>Tekerlekli Ahmed modeli tekerlek ve yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi <math>Z=169.5</math> [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.</i> | 50 |

|                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.1. <i>Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi <math>Z=0</math> [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.</i>                       | 53 |
| Şekil 4.2. <i>Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi <math>Z=169.5</math> [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.</i>                   | 53 |
| Şekil 4.3. <i>Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi <math>X=0</math> [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.</i>                       | 54 |
| Şekil 4.4. <i>Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi <math>X=470</math> [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.</i>                     | 55 |
| Şekil 4.5. <i>Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi <math>X=940</math> [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.</i>                     | 56 |
| Şekil 4.6. <i>Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi <math>X=940</math> [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri (araç arka görünüm).</i> | 57 |
| Şekil 4.7. <i>Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi <math>Z=0</math> [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.</i>                            | 58 |
| Şekil 4.8. <i>Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi <math>Z=169.5</math> [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.</i>                        | 58 |
| Şekil 4.9. <i>Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi <math>X=0</math> [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.</i>                            | 59 |

- Şekil 4.10. *Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi  $X=470$  [mm] konumunda  $0$  [m/s]- $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri. .... 60*
- Şekil 4.11. *Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi  $X=940$  [mm] konumunda  $0$  [m/s]- $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri. .... 61*
- Şekil 4.12. *Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi  $X=940$  [mm] konumunda  $0$  [m/s]- $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri (araç arka görünüm). .... 62*
- Şekil 4.13. *Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek ve yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi  $Z=0$  [mm] konumunda  $0$  [m/s]- $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri. .... 63*
- Şekil 4.14. *Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek ve yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi  $Z=169.5$  [mm] konumunda  $0$  [m/s]- $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri. .... 64*
- Şekil 4.15. *Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek ve yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi  $X=0$  [mm] konumunda  $0$  [m/s]- $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri. .... 65*
- Şekil 4.16. *Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek ve yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi  $X=470$  [mm] konumunda  $0$  [m/s]- $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri. .... 66*
- Şekil 4.17. *Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek ve yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi  $X=940$  [mm] konumunda  $0$  [m/s]- $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri. .... 67*
- Şekil 4.18. *Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi  $X=940$  [mm] konumunda  $0$  [m/s]- $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri (araç arka görünüm). .... 68*

## SEMBOL VE KISALTMA DİZİNİ

|                         |                                                                          |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| <b>CFD</b>              | <b>: Computational Fluid Dynamics</b>                                    |
| <b>HAD</b>              | <b>: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği</b>                                 |
| <b>N-S</b>              | <b>: Navier-Stokes</b>                                                   |
| <b>RANS</b>             | <b>: Reynolds Averaged Navier-Stokes</b>                                 |
| <b>URANS</b>            | <b>: Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes</b>                        |
| <b>RSM</b>              | <b>: Reynold Stress Model</b>                                            |
| <b>RNG</b>              | <b>: Renormalization Group</b>                                           |
| <b>SST</b>              | <b>: Shear Stress Transport</b>                                          |
| <b>LES</b>              | <b>: Large-Eddy Simulation</b>                                           |
| <b>DES</b>              | <b>: Detached Eddy Simulation</b>                                        |
| <b>SIMPLE</b>           | <b>: Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations</b>              |
| <b>SIMPLEC</b>          | <b>: Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations – Consistent</b> |
| <b>PISO</b>             | <b>: The Pressure-Implicit with Splitting of Operators</b>               |
| $\alpha$                | <b>: Basınç farkı sebebi ile oluşan sürüklenme katsayısı</b>             |
| $\beta \log(Re)^\gamma$ | <b>: Yüzeysel sürüklenme katsayısı</b>                                   |
| $Re$                    | <b>: Reynold Sayısı</b>                                                  |
| $F_d$                   | <b>: Sürüklenme kuvveti</b>                                              |
| $F_l$                   | <b>: Kaldırma kuvveti</b>                                                |
| $\rho$                  | <b>: Akışkanın özkütlesi</b>                                             |
| $v$                     | <b>: Aracın akışkana göre hızı</b>                                       |
| $A$                     | <b>: Araç izdüşümü alanı</b>                                             |
| $V_\infty$              | <b>: Serbest akım hızı</b>                                               |
| $\nu$                   | <b>: Kinematik viskozite</b>                                             |



|                |                                                                                                                       |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\mu$          | : Dinamik viskozite                                                                                                   |
| $L$            | : Aracın karakteristik uzunluğu                                                                                       |
| $L_g$          | : Gerçek aracın karakteristik uzunluğu                                                                                |
| $L_m$          | : Model aracın karakteristik uzunluğu                                                                                 |
| $H_g$          | : Gerçek aracın karakteristik yüksekliği                                                                              |
| $H_m$          | : Model aracın karakteristik yüksekliği                                                                               |
| $\theta_{max}$ | : Ağ elemanı yüzeyi veya hücresi içindeki en büyük açı                                                                |
| $\theta_{min}$ | : Ağ elemanı yüzeyi veya hücresi içindeki en küçük açı                                                                |
| $\theta_e$     | : Eşkenarlı yüzey veya hücrenin iç açısı (üçgen için 60, kare için 90, vb.)                                           |
| $\vec{A}_i$    | : Ağ hücresi için yüzey normal vektörü, ağ hücresi yüzeyi için kenar normal vektörü                                   |
| $\vec{f}_i$    | : Ağ hücresi için hücre ağırlık merkezinden hücre yüzey ağırlık merkezine giden vektör                                |
| $\vec{c}_i$    | : Komşu ağ hücreleri için hücre ağırlık merkezinden komşu hücre ile paylaştığı yüzeyin ağırlık merkezine giden vektör |
| $\vec{e}_i$    | : Ağ hücresi yüzeyi için yüzey ağırlık merkezinden yüzeyin kenar ağırlık merkezine giden vektör                       |
| $V$            | : Kontrol hacmi                                                                                                       |
| $S$            | : Kontrol hacmi yüzeyi                                                                                                |
| $n$            | : Birim normal vektör                                                                                                 |
| $F_x$          | : Koordinat sisteminin x bileşeninde akışkana uygulanan kuvvet                                                        |
| $F_y$          | : Koordinat sisteminin y bileşeninde akışkana uygulanan kuvvet                                                        |
| $F_z$          | : Koordinat sisteminin z bileşeninde akışkana uygulanan kuvvet                                                        |
| $a_x$          | : Koordinat sisteminin x bileşeninde akışkanın ivmesi                                                                 |
| $a_y$          | : Koordinat sisteminin y bileşeninde akışkanın ivmesi                                                                 |

|               |                                                                     |
|---------------|---------------------------------------------------------------------|
| $a_z$         | : Koordinat sisteminin z bileşeninde akışkanın ivmesi               |
| $u$           | : Koordinat sisteminin x bileşenindeki hız                          |
| $v$           | : Koordinat sisteminin y bileşenindeki hız                          |
| $w$           | : Koordinat sisteminin z bileşenindeki hız                          |
| $t$           | : Zaman                                                             |
| $\sigma_{xx}$ | : Akışkana uygulanan x bileşenindeki normal yüzey gerilimi          |
| $\sigma_{yy}$ | : Akışkana uygulanan y bileşenindeki normal yüzey gerilimi          |
| $\sigma_{zz}$ | : Akışkana uygulanan z bileşenindeki normal yüzey gerilimi          |
| $\tau_{yx}$   | : Akışkana uygulanan yx bileşenindeki teğetsel yüzey gerilimi       |
| $\tau_{zx}$   | : Akışkana uygulanan zx bileşenindeki teğetsel yüzey gerilimi       |
| $\tau_{yz}$   | : Akışkana uygulanan yz bileşenindeki teğetsel yüzey gerilimi       |
| $\tau_{xy}$   | : Akışkana uygulanan xy bileşenindeki teğetsel yüzey gerilimi       |
| $\tau_{xz}$   | : Akışkana uygulanan xz bileşenindeki teğetsel yüzey gerilimi       |
| $\tau_{zy}$   | : Akışkana uygulanan zy bileşenindeki teğetsel yüzey gerilimi       |
| $\vec{v}$     | : Akım hızı                                                         |
| $E$           | : Enerji değişiminin zamansal oranı                                 |
| $Q$           | : Net ısı değişimi oranı                                            |
| $W$           | : Net yapılan iş oranı                                              |
| $\dot{q}$     | : Birim kütlede hacimsel ısı değişim oranı                          |
| $T$           | : Isı gradyanı                                                      |
| $k$           | : Isı iletkenliği                                                   |
| $e$           | : Akışkanın birim kütledeki iç enerjisi                             |
| $u^+$         | : Boyutsuz hız parametresi                                          |
| $y^+$         | : Cidar ile ağ yapısı elemanının merkezi arasındaki boyutsuz mesafe |

|                |                                                                                            |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| $u_\tau$       | : Akımın cidarda ürtünme hızı [m/s]                                                        |
| $\tau_{duvar}$ | : Duvar kesme gerilimi                                                                     |
| $y$            | : Cidar ile ağ yapısı elemanı arasındaki mesafe [m]                                        |
| $\vec{n}$      | : Kontrol hacminin yüzey normal doğrultusu                                                 |
| $A_i^x$        | : Kontrol hacminin x doğrultusundaki "i" yüzeyi alanı                                      |
| $\emptyset$    | : Kontrol hacmi içerisindeki akış değişkeni                                                |
| $N$            | : Kontrol hacminin bağlantı yüzey sayısı                                                   |
| $\delta x_W$   | : Kontrol hacmi düğüm noktası ile batı yönündeki düğüm noktası arasındaki mesafe gösterimi |
| $\delta x_E$   | : Kontrol hacmi düğüm noktası ile doğu yönündeki düğüm noktası arasındaki mesafe gösterimi |
| $\Gamma$       | : Difüzyon katsayısı                                                                       |
| $S_\emptyset$  | : Kaynak terimi                                                                            |

## 1. GİRİŞ

1900'lü yılların başında, yer araçlarının hızlarının artırılması için üzerinde durulmaya başlanan aerodinamik performans çalışmaları, günümüze kadar gelişerek devam etmiştir. Günümüzde, araç hızlarının artırılmasının yanı sıra, araç hareketini sağlamak için çalışan araç motorunun tükettiği enerjiyi azaltmak, fosil yakıt kullanan motorlarda karbon emisyonunu azaltmak, yolcu konforunu artırmak ve araç güvenliğini sağlamak adına aerodinamik çalışmalar sürdürülmektedir. Otoban hızlarında sabit hız ile hareket halinde olan bir araca ait motorun enerjisinin %60'ı hava direncini aşmak için harcanır (Hucho ve Sovran, 1993). Bu durum, özellikle enerji tüketimi ve fosil yakıtı kullanılan motorlarda karbon emisyonunu azaltmak için aerodinamik çalışmaların gerekliliğini kanıtlar niteliktedir.

### 1.1. Aerodinamik Parametreler

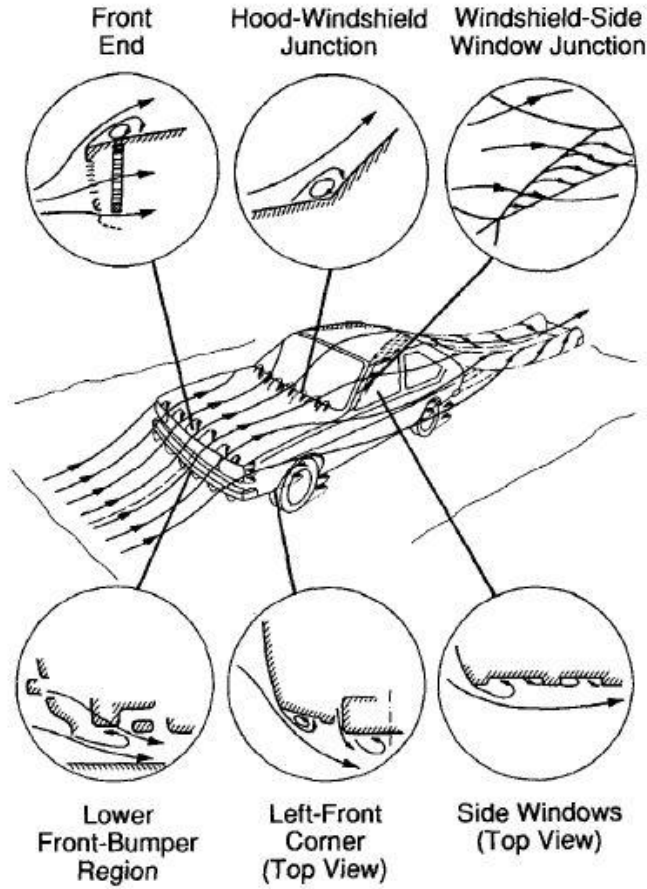
Aerodinamik çalışmalarda, hava (akım hacmi) içerisinde hareket halinde olan bir katı gövde ile havanın etkileşimi incelenmektedir. Hava, hareket halindeki katı gövdenin yüzeylerine basınç ve kayma gerilmesi uygulamaktadır. En genel bakış ile; bu gerilmelerden doğan aerodinamik kuvvetlerden en önemlileri, sürüklenme kuvveti (drag force) ve kaldırma kuvveti (lift force) (Denklem 1.1) oluşturmaktadır. Bunların yanı sıra, yunuslama (pitching) momenti, yuvarlanma (rolling) momenti, yanal (yawing) moment gibi parametreler de bulunmaktadır. Yer araçlarının aerodinamik çalışmalarında, yunuslama ve yuvarlanma momentlerindense yanal moment (yawing) önem kazanmaktadır. Belirli bir alandaki havanın içerisinde hareket eden araç sebebi ile, araç alt ve üst bölgelerinde hava ventüri etkisine maruz kalır. Daralan akım bölgelerinde hız artarken, basınç azalır. Daralma sonrasında genişleyen akım bölgelerinde hız yavaşlar ve basınç artar. Araç alt ve üst bölgelerinde oluşan basınç farkları ile araç hareket yönüne dik olarak kaldırma kuvveti ( $F_L$ ) oluşur. Araç hareket yönüne paralel olan sürüklenme kuvveti ( $F_d$ ) ise, büyük oranda araç gövdesinin ön ve arka izdüşümü yüzeylerindeki basınç farklarından oluşan basınç sürüklenme kuvveti (pressure drag ya da form drag) (Denklem 1.2) ve yüzey sürtünmesinden oluşan yüzeysel sürüklenme kuvveti (skin friction drag) olmak üzere 2'ye ayrılır (Denklem 1.3). Sürüklenme kuvvetinin oluşmasında, araç ön ve arka izdüşümü yüzeylerinde oluşan basınç farklılıklarının yanı sıra, akış ayrılma ve durağanlık bölgeleri de etkilidir (Şekil 1.1). Araç yüzeyindeki akımın yüzeyden ayrılması ile ters akım oluşmakta ve bundan dolayı araç ön ve arka bölgesinde girdaplar oluşmaktadır. Araç ön yüzeyindeki ve girdapların etkili olduğu araç arka yüzeyindeki basınç farkları da

sürüklenme kuvvetini oluşturan etkenlerdendir (Şekil 1.2). Hava akımı bir yüzey ile etkileşim halinde olduğu sürece, yüzeye yaklaşan hava hızı düşmektedir. Viskoz kayma olarak adlandırılan bu hava akımının parabolik hız hareketinin ana sebebi, yüzey ile etkileşim sağlayan akımın bağıl hızının sıfır olmasıdır (Şekil 1.3). Yüzeysel sürüklenme kuvveti, bağıl hızı sıfır olan hava akımının araç yüzeyine uyguladığı kuvvettir.

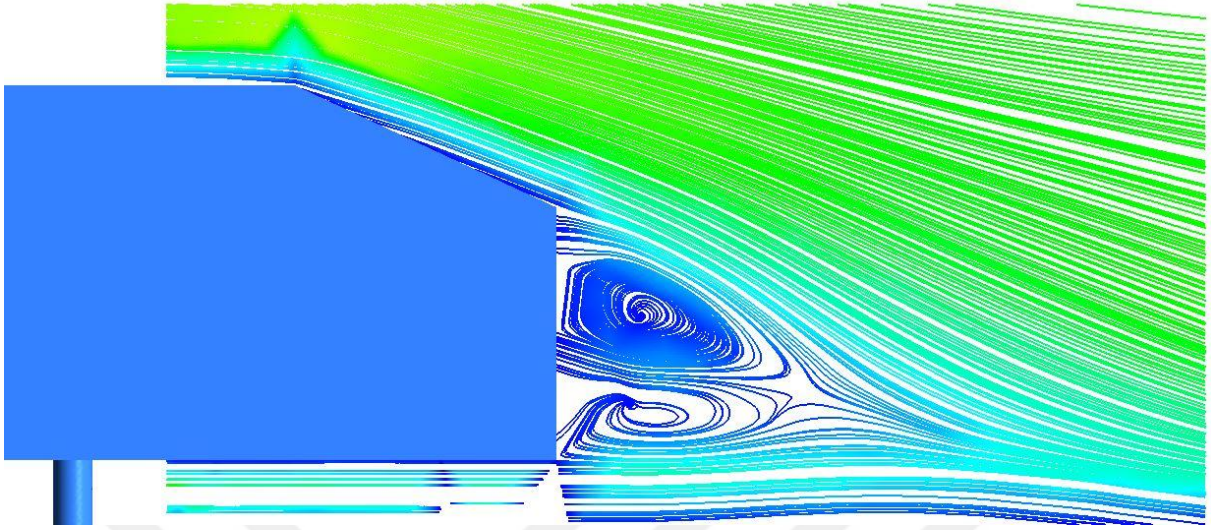
$$C_l = \frac{F_l}{0.5 \times \rho \times A \times v^2} \quad (1.1)$$

$$C_d = \frac{F_d}{0.5 \times \rho \times A \times v^2} \quad (1.2)$$

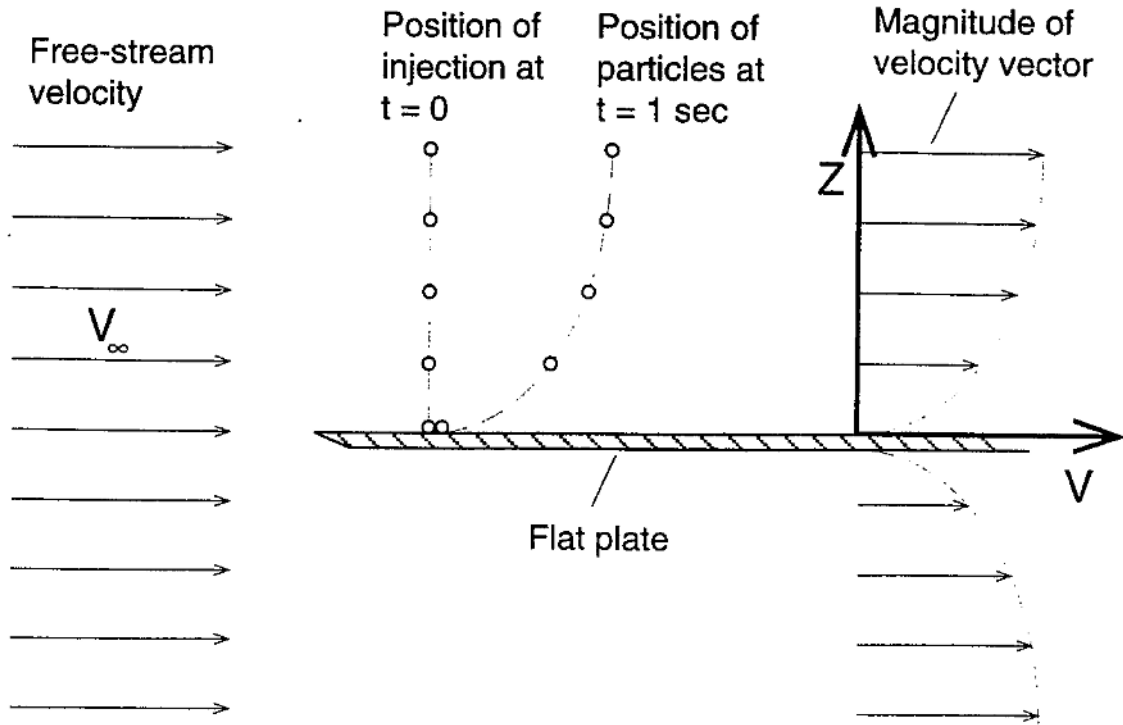
$$\beta \log(Re)^\gamma = C_d - \alpha \quad (1.3)$$



Şekil 1.1. Araç yüzeyindeki başlıca ayrılma ve durgunluk bölgeleri (Hucho ve Sovran, 1993).



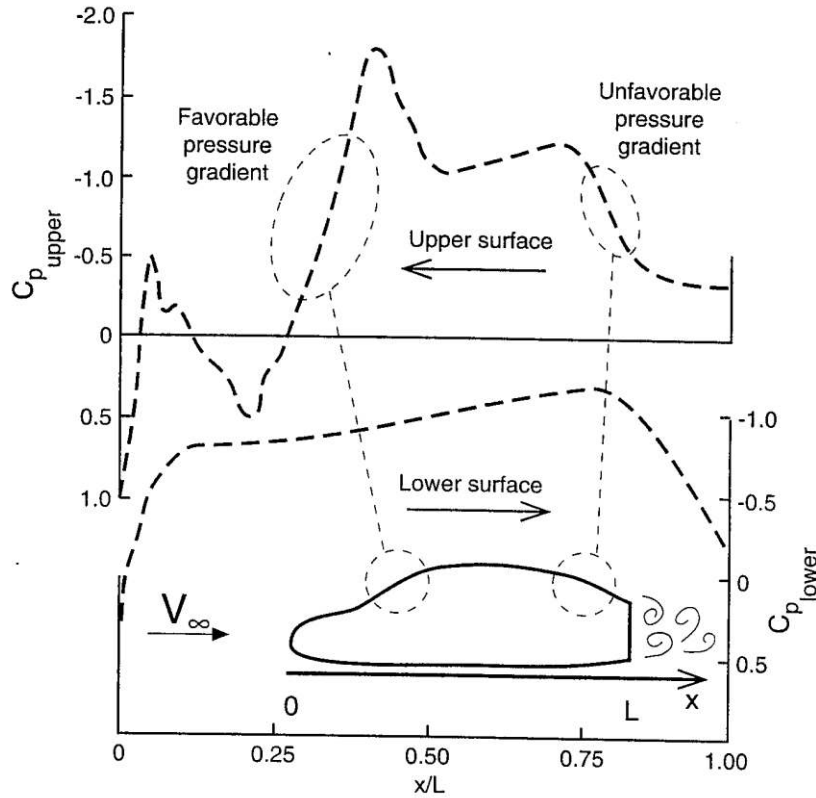
Şekil 1.2. Ahmed modeline ait hız parametrelili akım çizgileri ile arka girdap bölgesi.



Şekil 1.3. Yüzey yakınındaki akım hız dağılımı (Katz, 1995).

Bunların yanı sıra, basınç katsayısı da aerodinamik performans için önem arz eden parametredir. Basınç katsayısı aracın havaya göre bağıl hızı ve serbest akım hızı karelerine bağlıdır (Denklem 1.4). Durağanlık noktasında (stagnation point) hız 0 (sıfır) olduğu için basınç katsayısı da 1'e eşittir. Aracın havaya göre bağıl hızının serbest akım hızından küçük olduğu bölgelerde basınç katsayısı 0'dan büyük 1'den küçüktür. Bağıl hız serbest akım hızından büyük olduğu bölgelerde ise basınç katsayısı 0'dan küçüktür (Şekil 1.4).

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{0.5 \times \rho \times v_\infty^2} = 1 - \frac{v^2}{v_\infty^2} \quad (1.4)$$



Şekil 1.4. Hareket halindeki araç üzerindeki basınç katsayısı grafiği (Katz, 1995).

Araçların aerodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi için gerçekleştirilecek olan testlerde yere paralel ve dik toplam kuvvet değerlerinin veya yüzeylerdeki basınç değerlerinin ölçülebilir olması gerekmektedir. Performanslarının belirlenmesi için farklı ölçeklerde rüzgar tünelleri ve yol testleri yapılmaktadır.

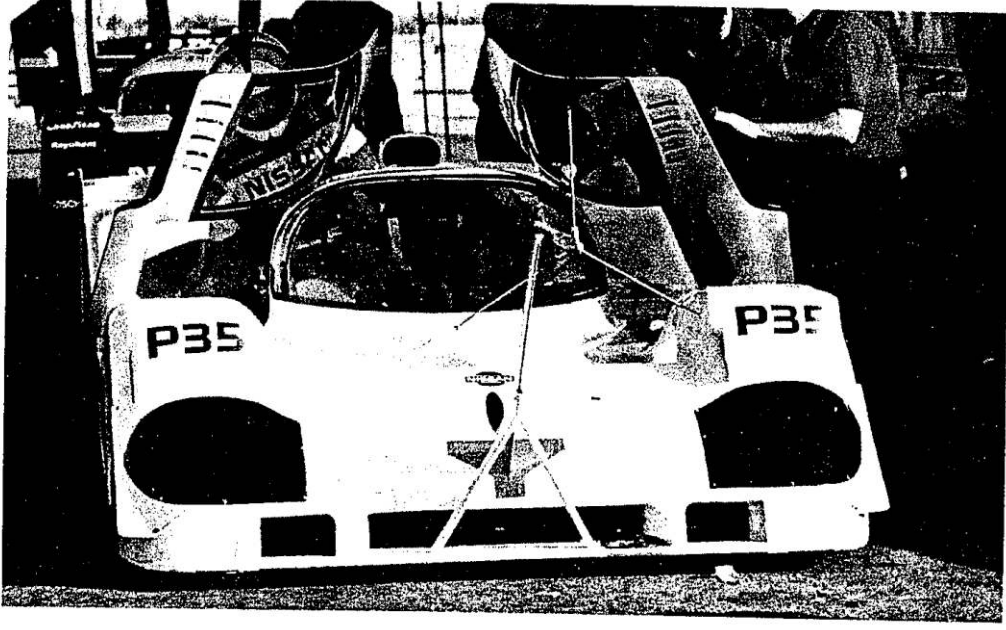
## 1.2. Deneysel Aerodinamik Testler

### 1.2.1. Yol testleri

Araç aerodinamik performansının belirlenmesi için kullanılan yöntemlerden yol testi, gerçek yol koşulları ile gerçekleştirilen yöntemdir. Fakat, aerodinamik parametrelerin elde edilmesi için araç yüzeyinde oluşabilecek basınç gradyenlerine uygun donanımların sağlanması ve bu donanımların akım hareketini değiştirmeyecek bölgelere uygulanması gerekmektedir. Yol testi öncesinde ölçüm noktalarının belirlenmesi ve donanımların hazırlanması gerekmektedir. Doğru sonuçlar elde edebilmek adına yüksek maliyetli donanımların edinilmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra, gerçek yol koşulları kontrol altında tutulamamaktadır. Yanal rüzgarlar, yol titreşimi, tekerlek yuvarlanma direnci, mekanik sürtünme direnci, test aracının yanından geçen araçların etkisi (testler özel test arazilerinde gerçekleştirilmiyorsa), test aracının dönüşleri, hava sıcaklığı ve hava durumu gibi etkiler de test sürecine dahil olmaktadır. Bu sebeplerden, gerçek koşullardaki yol testleri tekrarlanabilir testler değildir.

Yol testlerinde aerodinamik sürüklenme kuvveti değerine ulaşmak için gerekli olan ve ters ivmeye sebep olan hızın ölçülmesi adına, havanın araç etrafındaki hareketini değiştirmeyecek uzaklıklara hız ölçüm donanımları yerleştirilir (Katz, 1995) (Şekil 1.5). Fakat, hız ölçümü için kullanılan donanım araçtan ne kadar uzakta olursa olsun araca bağlı olmak zorundadır ve bu durum araç etrafındaki hava hareketini değiştirme riskini taşır. Bununla birlikte, araç yüzeyinde basınç ölçümleri gerçekleştirilmelidir. Noktasal basınç ölçümleri yardımı ile araç yüzeyinde basınç gradyenleri görselleştirilebilir ve araç üzerine etki ettiği kuvvete geçilebilir. Bunun yanı sıra, aerodinamik kaldırma kuvvetinin ölçülebilmesi için araç tekerleklerinin süspansiyonlarına uygulanan donanımlar kullanılır. Araç hareket yönüne dik olan kaldırma kuvvetinin araç süspansiyonlarına veya tekerlek poyrasına yerleştirilen kuvvet sensörlerine uyguladığı kuvvet verileri ölçülerek veri hareketleri içerisindeki trend belirlenir (Le Good ve McArthur, 1996). Yol testinin gerçekleştirildiği yol yapısının değişikliği gibi kaldırma kuvvetinin ölçülmesinde yaşanabilecek sorunlar da mevcuttur.





*Şekil 1.5. Nissan P-35 prototip aracının aerodinamik yol testi için ön bölge hız ölçüm donanımı (Katz, 1995).*

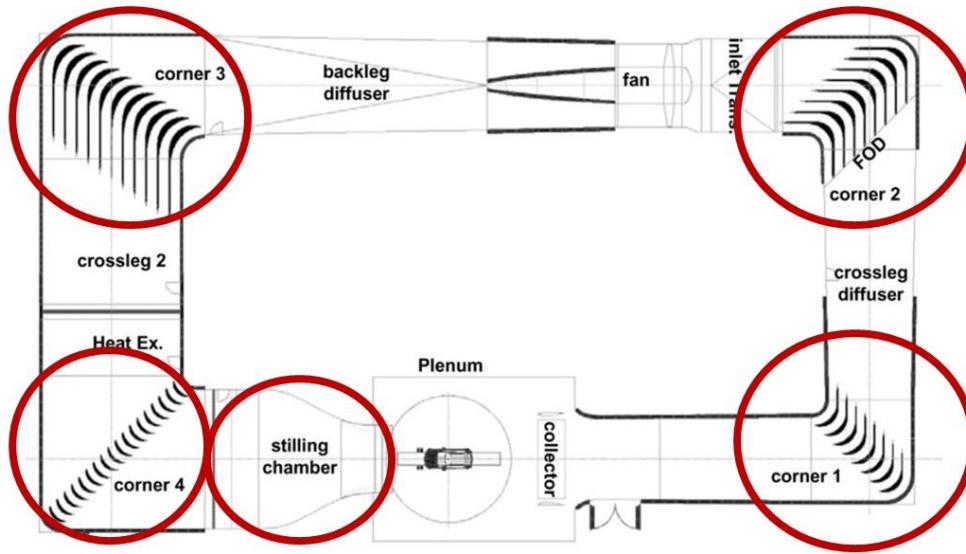
### **1.2.2. Rüzgar tüneli testleri**

Rüzgar tüneli testlerinde test edilecek araç ve aerodinamik parametreleri belirleyecek olan ölçüm donanımları sabit tutulmaktadır. İstenilen hızda hava akımı oluşturularak hava, değişik ölçeklerde hazırlanan araç modeli üzerinde hareket ettirilmektedir. Performans analizini etkileyebilecek olan tüm dış etkenlerden kaçınılmış olup, test koşullar tamamen kontrol altında tutulmaktadır. Sabit konumda duran ölçüm donanımları ile veri alınmasının yanı sıra, akımın görselleştirilmesi için duman yöntemleri de izlenebilmektedir (Şekil 1.6). Rüzgar tünellerinde hava akımını istenilen koşullara getirmek için farklı sistemler kullanılmaktadır. Fan yardımı ile hava akımı oluşturulduktan sonra, türbülans kırıcı sistemler yardımı ile akımın türbülans yoğunluğu istenilen seviyelere düşürülür ve ventüri etkisi kullanılarak akım hızı istenilen seviyeye getirilir (Şekil 1.7). Normal yol koşullarında türbülans yoğunluğu göz ardı edilebilecek kadar düşüktür. Fakat, tipik bir homojen rüzgar tünelineki türbülans değeri olan %0.5 değerinin çok üstündedir (Watkins ve diğerleri, 1995).

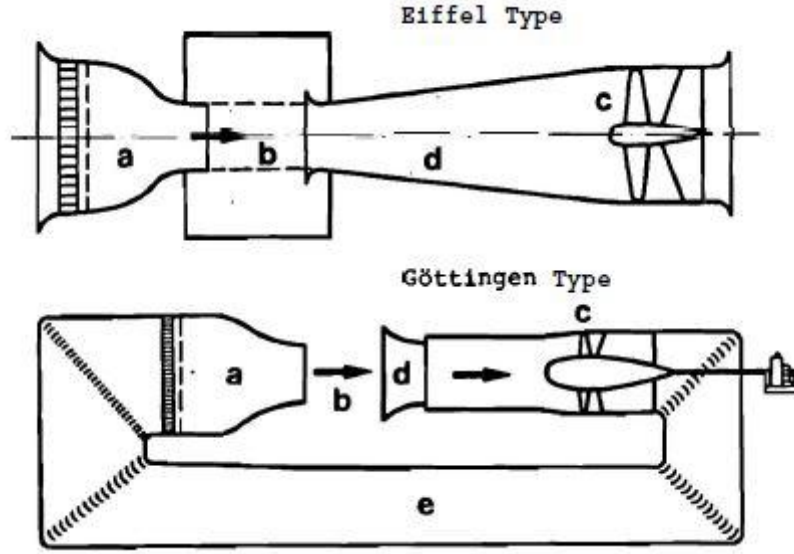
Rüzgar tünellerini, hava akımının dışarıdan alınan hava ile oluşturulup analiz bölgesinden çıkarak dışarı atıldığı açık sistemli rüzgar tünelleri ve hava akımının belirli bir düzenek içerisinde tutularak sistem içerisinde çevrildiği kapalı sistemli rüzgar tünelleri (Şekil 1.8) olarak 2'ye ayırmak mümkündür (Ahmed ve diğerleri, 1985).



Şekil 1.6. Rüzgar tüneli testinde duman yöntemi ile akım görselleştirme (<https://www.bmwblog.com>, 17.05.2019).



Şekil 1.7. BMW Group rüzgar yatay rüzgar tüneli enerji kınıcı ve türbülans yoğunluğu düzenleyici bölgeler (Duell ve diğerleri, 2010).



Şekil 1.8. Rüzgar tüneli çeşitleri.

#### 1.2.2.1. Geometrik benzeşim

Rüzgar tünellerinde aerodinamik performans testleri gerçekleştirilecek olan araçların modelleri genellikle ölçekli olmaktadır. Bu durumun en büyük sebebi, rüzgar tüneli boyutlarının küçük olmasıdır. Maliyeti düşürmek adına yapılan ölçekli testlerde belirli problemler ortaya çıkmaktadır. Bu problemlerden birincisi, geometrik benzeşimdir. Basit bir geometriye sahip aracın model testleri için fiziksel benzerlik sağlanabilmektedir. Fiziksel benzerliğin sağlanabilmesi için, gerçek aracın fiziksel büyüklükleri oranının ölçekli model aracın fiziksel büyüklükler oranı ile aynı noktalar üzerinde aynı olması gerekmektedir (Denklem 1.5). Araç yüzeyindeki en küçük değişiklik bile aracın aerodinamik performansını etkilediği göz önünde bulundurulduğu zaman, geometrik benzeşimin sağlanmasının zor olduğu görülmektedir. Bu sebepten, detayları eksik bir ölçekli model aracında gerçek geometrik benzeşim yakalanamayabilir.

$$\frac{L_g}{H_g} = \frac{L_m}{H_m} \quad (1.5)$$

### 1.2.2.2. Dinamik benzeşim

Geometrik ve kinematik benzeşimin yanı sıra, dinamik benzeşimin sağlanması gerekmektedir. Ölçekli model koşulları ve gerçek koşulların atalet ve viskoz kuvvetlerin oranının aynı olması gerekmektedir. Bu oran boyutsuz Reynold Sayısı olarak geçmektedir (Denklem 1.6).

$$Re = \frac{\rho \times v \times L}{\mu} = \frac{v \times L}{\nu} \quad (1.6)$$

Ölçekli rüzgar tünellerinde benzeşimlerin sağlanması yapılan aerodinamik test koşullarına göre zorlaşmaktadır. Test koşullarında havanın viskozite değerlerinde kayda değer değişimler sağlanmayacağı için, dinamik benzeşimin sağlanması için ölçekli rüzgar tüneli testinde akım hızının değiştirilmesi (artırılması) gerekmektedir. Fakat, bu değişim sağlanırken akımın türbülans yoğunluğu da kontrol altında tutulabilir olmalıdır. Farklı geometrilerdeki araçlar için yapılan ölçekli ve düşük hızlı rüzgar tüneli testlerinde dinamik benzeşimin sağlanmasının zor olduğu, özellikle de daha yuvarlak hatlara sahip araçlarda Reynold Sayısı bağımsızlığının sağlanamadığı görülmüştür (İçingür ve Solmaz, 2011). Bu süreçte kinematik benzeşim de önem arz etmektedir. Ancak belirtilmelidir ki, dinamik benzeşim sağlanmazsa sürüklenme katsayısı gibi önem arz eden değerlere prototip için ulaşılması mümkün değildir.

### 1.2.2.3. Kinematik benzeşim

Gerçek boyutlu ve ölçekli model için kinematik benzeşimin de sağlanması gerekmektedir. Kinematik benzeşimin sağlanması için, gerçek boyuttaki model ve ölçekli model üzerindeki hız vektörlerinin aynı doğrultuda ve oranlarının aynı olması gerekmektedir (Denklem 1.7).

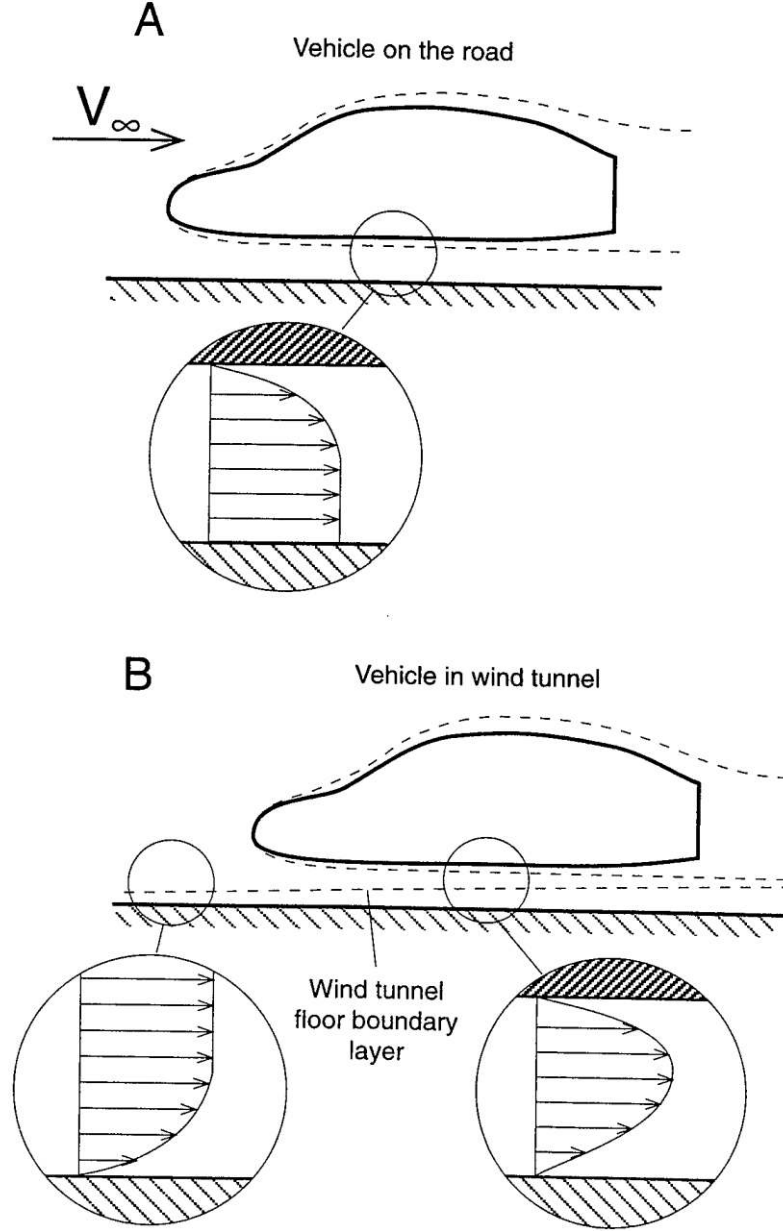
$$\frac{v_{X1}}{U_{X1}} = \frac{v_{X2}}{U_{X2}} \quad (1.7)$$

#### **1.2.2.4. Blokaj problemi**

Rüzgar tünellerinde bu benzeşimlerin sağlanmasının yanı sıra, blokaj problemi de mevcuttur. Blokaj oranı, test edilecek aracın akımı karşılayan kesit alanının tünel test bölümünün kesit alanına oranı olarak ifade edilir. Bir yer aracı aerodinamik testi için blokaj oranının %10 değerinin altında olması gerekliliği bulunmaktadır (Katz, 1995). Blokaj oranı %10 değerinin üzerinde olması durumunda, rüzgar tüneli test bölgesine ait duvarların etkileri artar ve araç yüzeyindeki sınır tabakanın üzerindeki akım düzeni bozulur. Blokaj problemi sağlanması gereken benzeşimlere engel olarak hatalı test sonuçlarına neden olur. Aerodinamik performans için kullanılacak olan araç modelinin rüzgar tüneli içerisindeki boylamsal konumlandırılması da büyük önem arz etmektedir. Model aracın hava yayıcı sistemin yarattığı basınç alanı sebebi ile alt bölge etkisinin araç yakını girdapların düzenini bozabilir. Bu durum, test sonuçlarında aerodinamik sürüklenme katsayısı değerinin %10 ile %20 aralığındaki oranla hatalı ölçülmesine neden olur (Garry ve diğerleri, 1994).

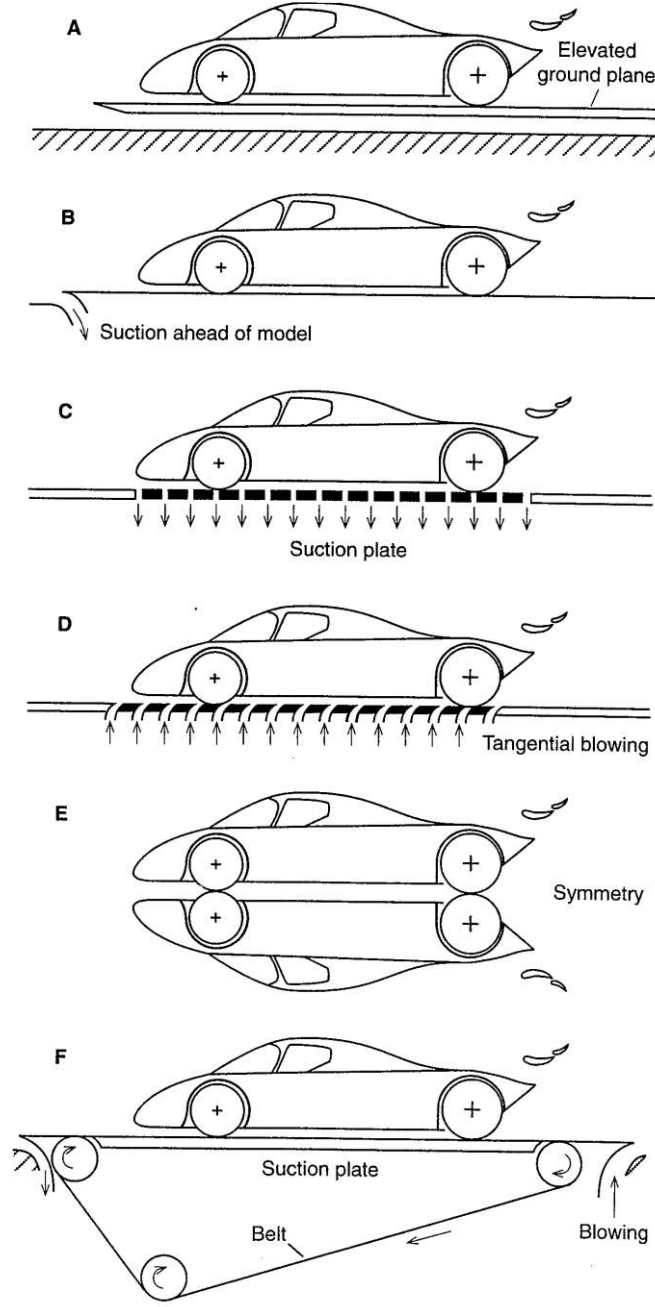
#### **1.2.2.5. Yol ve tekerlek hareketi**

Rüzgar tüneli testlerinde sağlanması gerekli olabilecek bir diğer özellik ise test bölgesine yerleştirilen model aracın tekerleklerinin hareketli olmasıdır. Bu durumun tamamen doğru bir şekilde sağlanması oldukça zor ve maliyetlidir. Normal yol koşullarında hareket eden bir araç ile rüzgar tüneli içerisindeki bir aracın alt bölgesindeki sınır tabaka şekli ve akım hız diyagramı farklılık göstermektedir (Şekil 1.9).



**Şekil 1.9.** (A) Yol koşullarında hareket eden araç ile (B) rüzgar tüneli içerisindeki aracın alt bölge sınır tabaka farkı (Katz, 1995).

Yol koşullarında hareket eden aracın alt bölgesinde tek bir sınır tabaka bulunurken, rüzgar tüneli içerisine yerleştirilen aracın alt bölgesinde araç alt yüzey sınır tabakası ve yer yüzeyi sınır tabakası olmak üzere 2 farklı sınır tabaka bulunmaktadır. Bu sınır tabaka probleminin giderilmesi için, yükseltilmiş yer yüzeyi, model öncesi hava emme, model zemin hava emme, model zemin teğetsel üfleme, simetri ve geliştirilmiş emme ve üfleme kayış sistemi gibi farklı sistemler geliştirilmiştir (Şekil 1.10).



**Şekil 1.10.** Rüzgar tüneli testlerinde yol simülasyonunun uygulanması için geliştirilmiş (A) yükseltilmiş yer yüzeyi, (B) model öncesi hava emme, (C) model zemin hava emme, (D) model zemin teğetsel üfleme, (E) simetri ve (F) geliştirilmiş emme ve üfleme kayış sistemleri (Katz, 1995).

Rüzgar tünellerinde sınır tabakası problemi için geliştirilmiş yöntemlerin probleme etkisi ve maliyetleri büyük oranda değişiklik göstermektedir. Bu yöntemler arasında en yaygın olan (özellikle yarış araçları için) hareketli bant üzerine yerleştirilen model ön bölgesinden emme ve arka bölgesinden üfleme sistemi (Şekil 1.10F) en iyi sonuç veren ve en büyük maliyete sahip yöntemlerdendir. Tüm yöntemlerde problemlerin bulunduğu gibi, bu yöntemde de bir

takım problemler mevcuttur. Bu problemlerden en önemlisi; test edilecek model aracın sabitlenmesidir. Genellikle, model araç arka veya üst bölgesinden sabitlenmektedir (Şekil 1.11). Sabitleme yapıları ise akım hareketini simetrik bir şekilde de olsa bozmaktadır. Farklı geometrilere sahip birden fazla araç aynı tünel içerisinde aynı koşullarda test edilerek orantısal karşılaştırma yapılabilmesine rağmen, elde edilecek aerodinamik performans parametrelerinin değerleri beklenenden farklı hata oranlarına sahip olabilmektedir. Bunun yanı sıra, hareketli bant ile elde edilmek istenen verilere net olarak ulaşmak zordur. Bu problem için, sadece model aracın tekerleklerini kapsayan dar bant sistemleri geliştirilmiştir (Şekil 1.12).



**Şekil 1.11.** Rüzgar tüneli testlerinde yol simülasyonunun uygulanması için geliştirilmiş bant sisteminde model aracın sabitlenmesi (<https://www.motorsport.com>, 17.05.2019).





**Şekil 1.12.** Rüzgar tüneli testlerinde yol simülasyonunun uygulanması için geliştirilmiş dar bant sistemi (<https://www.bmw-sg.com>, 17.05.2019).

Rüzgar tüneli aerodinamik performans testlerinde yolun simülasyonunun sağlanması durumu sabit zemin ile kıyaslandığı zaman, aerodinamik sürüklenme katsayısında %8, aerodinamik kaldırma katsayısında ise %16 oranında değişim görülmektedir (Krajnović ve Davidson, 2005). Bu durum, rüzgar tünellerinde yolun simülasyonunun önemini göstermektedir. Fakat, rüzgar tünellerinde özellikle 1:1 ölçek için yolun simülasyonu yüksek maliyetli olmasından dolayı çok kolay gerçekleştirilememektedir. Ayrıca, rüzgar tünellerinde yüksek maliyetli çok sayıda kuvvet ve basınç sensörlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sensörlerden elde edilen verilerle de dinamik benzeşim tam olarak gerçekleştirilemeyebilir. Tüm bu durumlar göz önüne alındığında, bir aracın aerodinamik performansının belirlenmesi için kullanılan rüzgar tünelleri henüz tam olarak normal yol koşullarını sağlayamamaktadır.

Bu çalışmada, aerodinamik performansın belirlenmesi adına gerçekleştirilen yol ve rüzgar tüneli testlerinin gerçek koşullara uygunluğu ve zorlukları üzerinde durulmuştur. Bu fiziksel testlerin hem kendi aralarında hem de gerçek koşullar ile arasında oluşabilecek farkların incelenmesi adına HAD metodu kullanılmıştır.

## 2. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) ANALİZİ

Günümüzde, bir aracın aerodinamik performansının belirlenmesi veya taslak geometriye sahip bir aracın aerodinamik yapısının geliştirilmesi veya aerodinamik eklentiler ile performansının güçlendirilmesi için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemleri oldukça yaygın kullanılmaktadır. Sayısal ortamda rüzgar tünel testlerinin analizlerinin yapılabilmesi ve yapılan analizlerin fiziksel rüzgar tünel testlerinin sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanması sayesinde sayısal ortamda gerçekleştirilen HAD analizlerine olan güven artmıştır. Araç aerodinamiği çalışmalarında, hem rüzgar tünel testlerinin kalibrasyonunun sağlanması hem de sayısal ortamdaki HAD analizlerin doğrulanması için referans araç geometrileri geliştirilmiştir (Le Good ve Garry, 2004). Geliştirilen basit araç geometrileri de HAD analizlerine olan güveni artırmış ve yaygınlaşmasına destek olmuştur.

HAD analizleri, rüzgar tüneli ve yol testlerine göre düşük maliyetli, tekrarlanabilir ve tüm koşullar kontrol altında tutulabilir olma özelliğine sahiptir. Her geçen gün HAD analizleri üzerine gerçekleştirilen çalışmaların sayısı artmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmalar, gerçek yol koşullarının yansıtıldığı HAD analizlerinin doğrulanması üzerinedir. Bu süreçte, gerçekleştirilen HAD analizleri, rüzgar tünel testlerinin sonuçları ile doğrulanmaktadır. Rüzgar tünel testleri ile arasında %1-2 hata payı içeren HAD analizleri, sayısal ortama taşınan testlerin önemini artırmaktadır (Kandasamy ve diğerleri, 2012).

Bunların yanı sıra, bilgisayar ortamında gerçekleştirilen tasarımlar veya geometri iyileştirmeleri HAD analizleri ile yol testleri veya rüzgar tünel testlerine göre çok daha hızlı geri bildirim sağlayabilmektedir. HAD analizlerinin modelinin kurulumu ve analizin çözüm süresi diğer aerodinamik test şekillerine göre daha kısadır. Aynı zamanda, aerodinamik analizi yapılacak geometrinin sanal ortamda değiştirilmesindeki kolaylık fiziksel testlerde bulunmamaktadır. Bir geometrinin oluşturulması ve o geometri üzerinde değişiklik yapılması fiziksel ortam testleri için güçtür. Prototip üretimi veya ölçekli model üretiminin gerçekleştirildikten sonra geometri değişikliklerinin uygulanması sanal ortama göre oldukça maliyetlidir. Bunun gibi farklar, HAD analizlerinin önemini artırırken, yaygınlaşmasını da sağlamaktadır. Tıpkı rüzgar tüneli ve yol testleri için gerekli olan yüksek maliyetli ekipmanlar gibi, sayısal ortamda gerçekleştirilecek HAD analizleri için de yüksek maliyetli iş istasyonları gerekmektedir. HAD analizlerinde gerekli hassasiyeti yaratmak ve analiz süreçlerini kısaltmak adına sayıca çok mantıksal işlemciye sahip çözüm gücü yüksek iş istasyonları veya bulut sistemleri kullanılmalıdır.

Sayısal ortamda gerçekleştirilecek HAD analizleri genel olarak 5 adımdan oluşur. Bu adımlar;

- Analizi gerçekleştirilecek geometrinin oluşturulması veya oluşturulmuş bir geometrinin HAD analizine uygun olacak şekilde düzeltilmesi,
- Geometrinin yüzey ve hacim ağ yapılarının oluşturulması,
- HAD analiz modeline ait başlangıç ve sınır koşullarının oluşturulması,
- HAD analizinin gerçekleştirilmesi (run),
- Analizi gerçekleştirilmiş HAD model sonuçlarının görselleştirilmesi, sonuç verilerinin elde edilmesi ve değerlendirilmesidir.

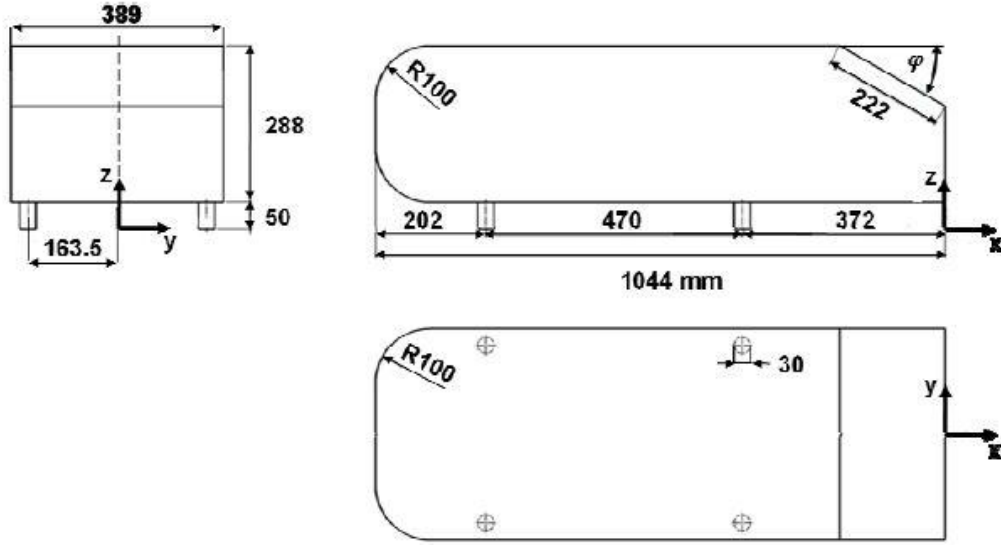
## **2.1. Geometri Oluşturulması**

Bir aracın aerodinamik performansının belirlenmesi için hazırlanacak olan geometrinin ideal olarak tek parça olması gerekmektedir. HAD analiz sonuçlarının doğrulamasının yapılacağı fiziksel test geometrisi kullanılarak akım hacmi oluşturulur. Aerodinamik performans analizlerinde ilk olarak, araç geometrisi oluşturulur veya hazır araç geometrisi tek bir katı gövde haline getirilir. Bu gövde akım hacmi içerisinden çıkarılarak, araç geometrisine ait duvarlar kalmış olan tek bir gövde elde edilir. Geometri tek bir katı gövde haline getirilirken, detaylarından taviz verilmemelidir. Bu süreçte, geometrinin en ince detaylarına kadar düzeltmeler yapılırken, en küçük kenar ve yüzey boyutları olabildiğince artırılmalıdır. Geometride bulunan çok küçük kenarlar, ağ yapısı oluşturma işlemleri sırasında zorluk çıkarabilmektedir. Ağ yapısı oluşturulurken en küçük kenar boyutu dikkate alınırken, en küçük kenarda oluşturulan ağ elemanlarının büyük kenarlara geçişi zor olabilmektedir. Bunun yanı sıra, detayı gerekli olmayan küçük kenarlardan dolayı ağ yapısında beklenmedik sıklaştırmalar yazılım tarafından otomatik olarak gerçekleştirilir ve ihtiyaç duyulan analiz süresini ve hesaplama gücünü artırır.

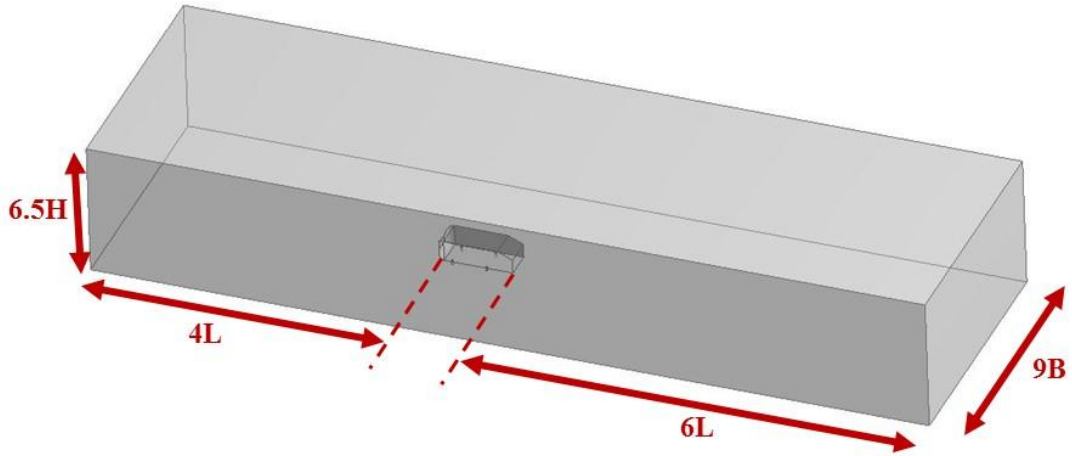
### **2.1.1. Ahmed modeli**

Bu çalışmada, ANSYS DesignModeler kullanılarak araç geometrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu geometri, aerodinamik performans analizlerinde ve performans geliştirme analizlerinde kullanılan basit, arka eğim açısı  $\phi = 25^\circ$  olan “Ahmed Body (Ahmed modeli)” geometrisidir (Şekil 2.1) (Meile ve diğerleri, 2011). Model geçerliliğinin sağlanması için akım hacmi rüzgar tüneli olarak oluşturulmuştur (Şekil 2.2). Bu geometri, model geçerliliği

sağlama işlemi için oluşturulmuştur. Geçerliliği sağlanan model ile analizleri gerçekleştirilen diğer geometriler ve ayrıntıları Bölüm 2.3.6 ve Bölüm 3’te verilmiştir.



Şekil 2.1. Ahmed modeli geometri detayı (Meile ve diğerleri, 2011).



Şekil 2.2. Ahmed modeli uzunluğu  $L$ , genişliği  $B$  ve yüksekliği  $H$  olduğu yerde rüzgar tünel boyutları.

## 2.2. Sayısal Ağ Yapısı (Mesh) Oluşturulması

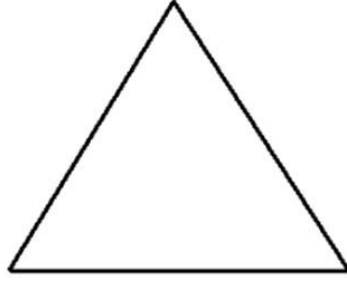
Oluşturulan geometriye uygulanacak olan yüzey ve hacim ağ yapısı HAD analizinin en kritik adımlarından birisidir. Sayısal ağ yapısı, bir geometrinin tanımlanmasını ve verilerin elde

edilmesini sağlar. Oluşturulacak ağ yapısının kalitesi ve gerçekleştirilecek olan analize uygunluğu HAD analizi sonucunda elde edilen verilere bire bir etki etmektedir. Bu yüzden ağ yapısında yapılan küçük değişiklikler de analiz sonucunda elde edilen verilerde oldukça büyük farklılıklar oluşturabilmektedir. Sayısal ağ yapısının kalitesini yalnızca ağ eleman sayısı belirlemez. Gerçekleştirilecek olan analiz sonucunda alınmak istenen verilerin bulunduğu bölgelerdeki ve akım hacmi içerisinde bu bölgeleri etkileyen diğer bölgelerdeki ağ yapısının sayısı, çarpıklığı ve ortogonalitesi gibi özellikler sayısal ağ yapısının kalitesini belirler.

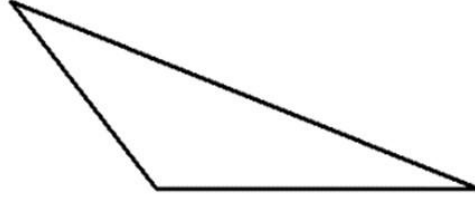
Sayısal ağ yapısı kalitesinin kontrolü için kullanılan çarpıklık (skewness) parametresi 2 şekilde belirlenebilir. Bunlar; eşkenarlı hacim esaslı çarpıklık (equilateral-volume-based skewness) ve normalize edilmiş eşaçılı çarpıklıktır (normalized equiangular skewness). Eş kenarlı hacim esaslı çarpıklık yöntemi normal ve optimal hücre boyutlarına bağlıdır (Denklem 2.1). Normalize edilmiş eşaçılı çarpıklık yöntemi ise, yüzey veya hücre içerisindeki açılara bağlıdır (Denklem 2.2) (Şekil 2.3) (ANSYS 17.0 Users Manual Guide). Hem üçgen hem de dörtgenler içeren kama veya piramidal elementlerin çarpıklık değerinin bulunması için iki yöntem de kullanılır. Bu durumda, üçgen yüzeyler için eş kenarlı hacim esaslı çarpıklık yöntemi kullanılırken, dörtgen yüzeyler ve 3 boyutlu elementler için normalize edilmiş eşaçılı çarpıklık yöntemi kullanılır. Çarpıklık değeri 0 (sıfır) değerine yaklaştıkça sayısal ağ elemanının kalitesi artmış, 1 değerine yaklaştıkça kalitesi azalmış demektir. Sayısal ağ yapısının ortalama çarpıklık değerinin 0-0.25 değerleri aralığında kalması analiz sonucundaki hassasiyeti ve doğruluğu artırır (Tablo 2.1) . Bunun yanı sıra, en büyük çarpıklık değeri 0.80 değerinin altında olmalıdır.

$$\text{Çarpıklık} = \frac{\text{Optimal Hücre Boyutu} - \text{Hücre Boyutu}}{\text{Optimal Hücre Boyutu}} \quad (2.1)$$

$$\text{Çarpıklık} = \left[ \frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e} \right] \quad (2.2)$$



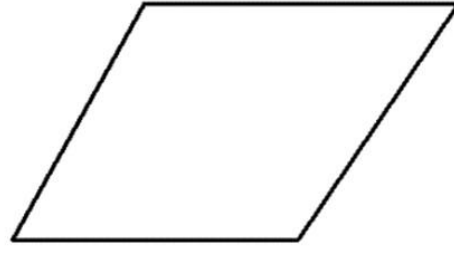
**Eşit Kenar Üçgen**



**Çok Çarpık Üçgen**



**Eş Açılı Dörtgen**



**Çok Çarpık Dörtgen**

*Şekil 2.3. İdeal ve çarpık üçgen ve dörtgenler.*

**Tablo 2.1.** Çarpıklık değerlerine göre ağ hücre kalitesi.

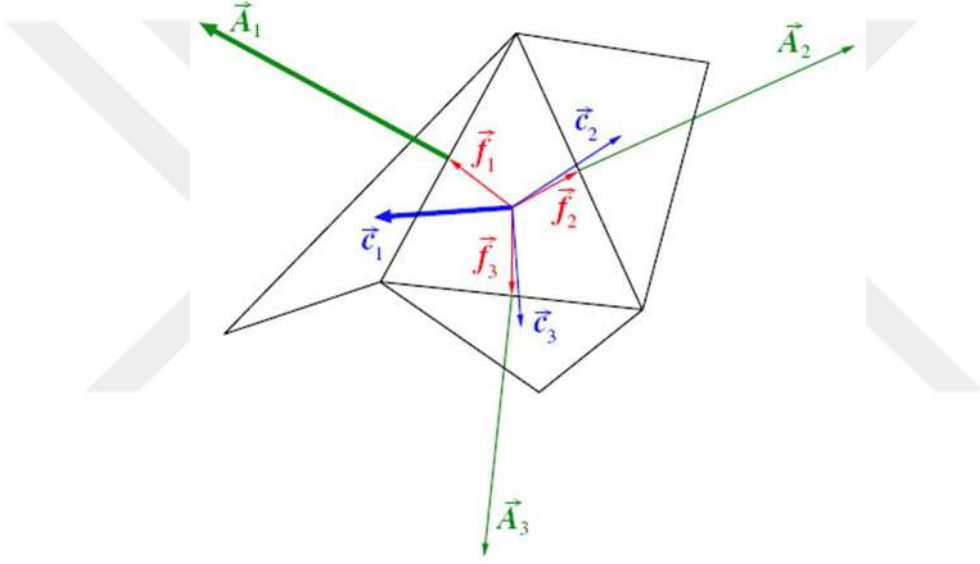
| Eşkenarlı | Mükemmel  | İyi         | Kabul Edilebilir | Kötü        | Kabul Edilemez<br>Dejenere olmuş |
|-----------|-----------|-------------|------------------|-------------|----------------------------------|
| 0.00      | >0 - 0.25 | 0.25 - 0.50 | 0.50 - 0.75      | 0.75 - 0.90 | 0.90 - 1                         |

Sayısal ağ yapısı kalitesinin kontrolü için kullanılan diğer bir parametre ortogonalitedir. Ortogonalite parametresi ağ hücresi için, ağ hücresi yüzeyinin normal vektörü ile ağ hücresinin ağırlık merkezinden o hücrenin yüzeyinin ağırlık merkezine bağlıdır (Denklem 2.3-2.4) (Şekil 2.4). Ağ yüzeyi için, ağ yüzeyinin kenarına ait normal vektörü ile ağ yüzeyinin ağırlık merkezinden o yüzeyin kenar ağırlık merkezine bağlıdır (Denklem 2.5) (Şekil 2.5). Ortogonalite değeri 0 (sıfır) değerine yaklaştıkça sayısal ağ yapısı kalitesi düşerken, 1 değerine yaklaştıkça artmaktadır.

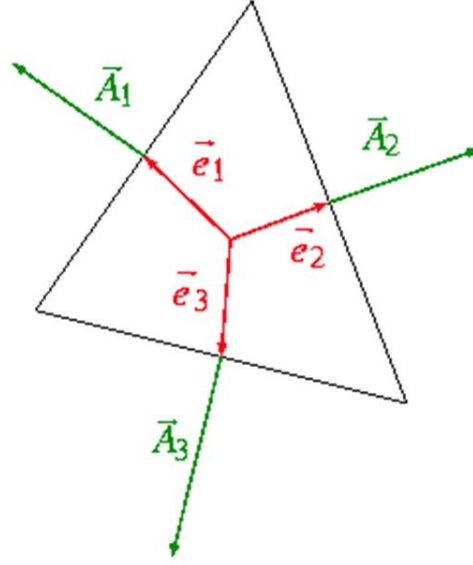
$$Ortogonalite = \frac{\vec{A}_l \times \vec{f}_l}{|\vec{A}_l| \times |\vec{f}_l|} \quad (2.3)$$

$$Ortogonalite = \frac{\vec{A}_l \times \vec{c}_l}{|\vec{A}_l| \times |\vec{c}_l|} \quad (2.4)$$

$$Ortogonalite = \frac{\vec{A}_l \times \vec{e}_l}{|\vec{A}_l| \times |\vec{e}_l|} \quad (2.5)$$

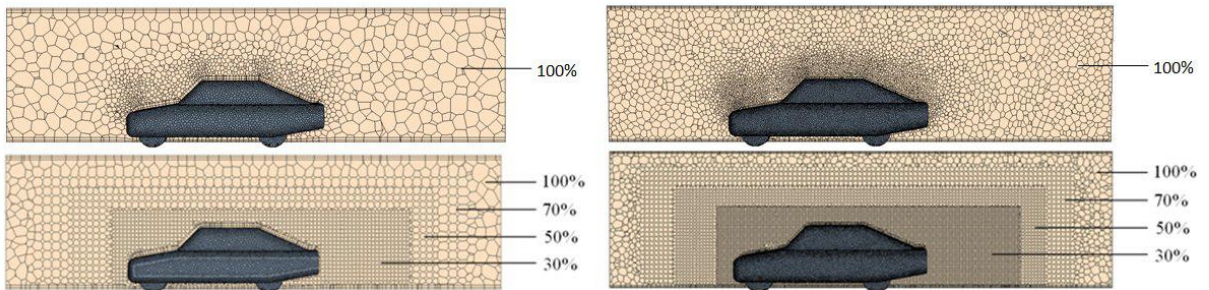


**Şekil 2.4.** Ağ hücreleri için ortogonalite hesabında kullanılan vektörler.



**Şekil 2.5.** Ağ hücresi yüzeyi için ortogonalite hesabında kullanılan vektörler.

Çarpıklık ve ortogonalite gibi parametreler göz önünde bulundurularak, akım hacmi içerisinde belirli bölgelerde ağ yapısı yüzey ve hacimsel sıklaştırmaları gerçekleştirilmelidir. Sıklaştırma işlemi, ağ eleman sayısının kontrollü artışını sağlar. Sayısal ağ yapısının hacimsel sıklaştırma işleminin gerçekleştirilmesi, analiz sonuçlarının doğrulama verilerine %5.5 oranında yaklaştırabileceği gibi %0.9 oranında da yaklaştırabilir. %5.5 oranında sonuca yaklaşma sağlanırken toplam analiz süresinde %28 artış olurken, %0.9 oranında yaklaşma sağlanırken toplam analiz süresinde %61 oranında artış olabilir (Ahmad ve diğerleri, 2010) (Şekil 2.6). Bu durum da, maksimum hassasiyet ve optimum analiz süresine ulaşmak için sayısal ağ yapısında her zaman sıklaştırma yapılması gerekliliğinin olmadığını göstermektedir.



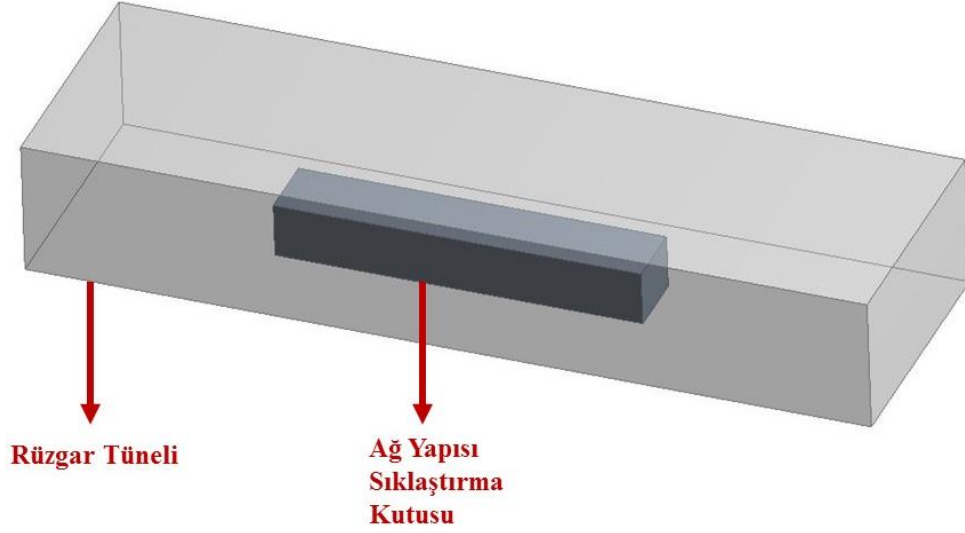
**Şekil 2.6.** Büyük boyutlu ağ yapı elemanlı (sol üst), hacimsel sıklaştırmalı büyük boyutlu ağ yapı elemanlı (sol alt), küçük boyutlu ağ yapı elemanlı (sağ üst) ve hacimsel sıklaştırmalı küçük boyutlu ağ yapı elemanlı (sağ alt) sayısal ağ yapıları sıklaştırma çalışması (Ahmad ve diğerleri, 2010).



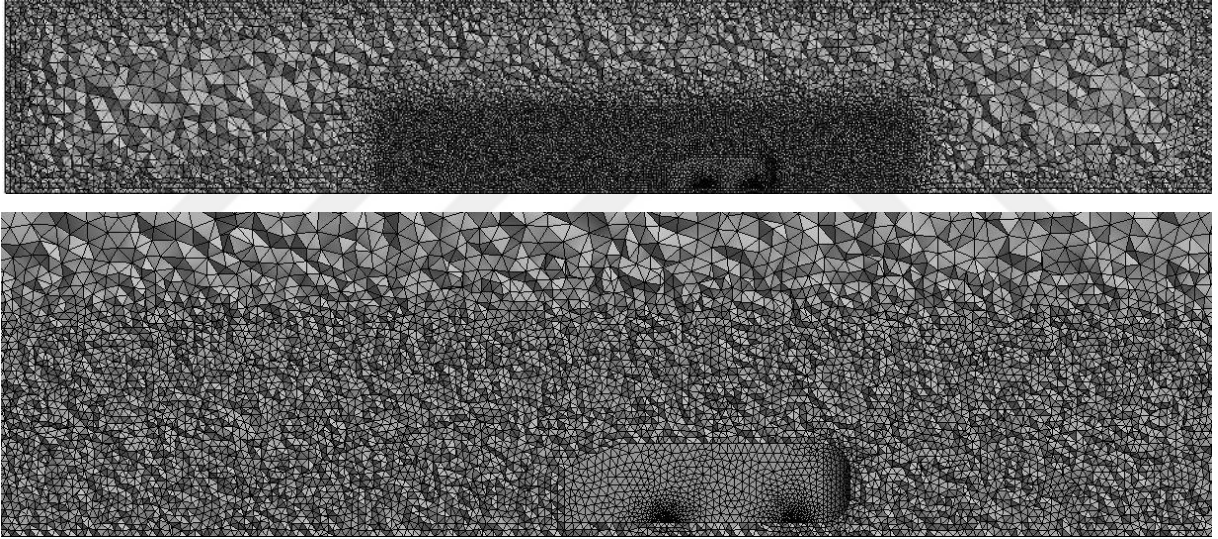
HAD analizleri için farklı ağ yapıları oluşturularak sonuçları kıyaslanmalıdır. HAD analiz sonuçlarında doğrulama verilerine yaklaşmak gerekmektedir. Farklı boyutlarda ağ yapıları oluşturma sürecinde, kalitesiz ağ yapısında analiz sonuçlarının doğrulama verilerinden çok uzak olduğu ve kaliteli ağ yapısına ulaştıkça bu sonuçların doğrulama verilerine yaklaştığı görülmektedir. Sayısal ağ yapısının kalitesinin artırılmasına rağmen analiz sonuçlarının %5 oranının da altında değişim göstermeye başlaması durumu ile sayısal ağ yapısı bağımsızlığı sağlanmış olur (Murad ve diğerleri, 2004).

### **2.2.1. Ahmed modeli ağ yapısı bağımsızlığı**

Bu çalışmada ilk HAD analizi, sayısal ağ yapısı ve model sınır koşullarının doğrulanması için gerçekleştirilmiştir. Akımın araç yüzeyinden ayrılarak araç arkasında oluşturduğu girdap bölgelerinin aracın aerodinamik performansına etkisinin doğru sonuçlarla detaylı olarak incelenmesi için rüzgar tüneli içerisinde kalan ve aracı içerisinde barındıran kutu sıklaştırma bölgesi olarak kullanılmıştır (Şekil 2.7). Analizin sayısal ağ bağımsızlığının sağlanması adına, sıklaştırma bölgelerinin ağ eleman boyutları farklı olan 5 farklı ağ yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan ağ yapıları, rüzgar tüneli hacim ve yüzey ağ eleman boyutları 60 [mm] ile 150 [mm] aralığında tutularak, sıklaştırma bölgesi ağ eleman boyutları 60 [mm] ile 20 [mm] aralığında değiştirilmiştir. Oluşturulan 5 farklı ağ yapısı ayrı ayrı çarpıklık ve ortogonalite parametreleri ile değerlendirilerek, analiz sonucuna etkisi incelenmiş ve ağ yapısı bağımsızlığı sağlanmıştır (Tablo 2.2). Analizin ihtiyaç duyacağı hesaplama gücünü optimum seviyede tutmak adına, çalışma içerisinde gerçekleştirilen tüm analizler için M4 olarak isimlendirilen ağ yapısı seçilmiştir (Şekil 2.8).



**Şekil 2.7.** Ahmed modeli için hazırlanan rüzgar tüneli ve ağ yapısı sıklaştırma kutusu geometrisi.

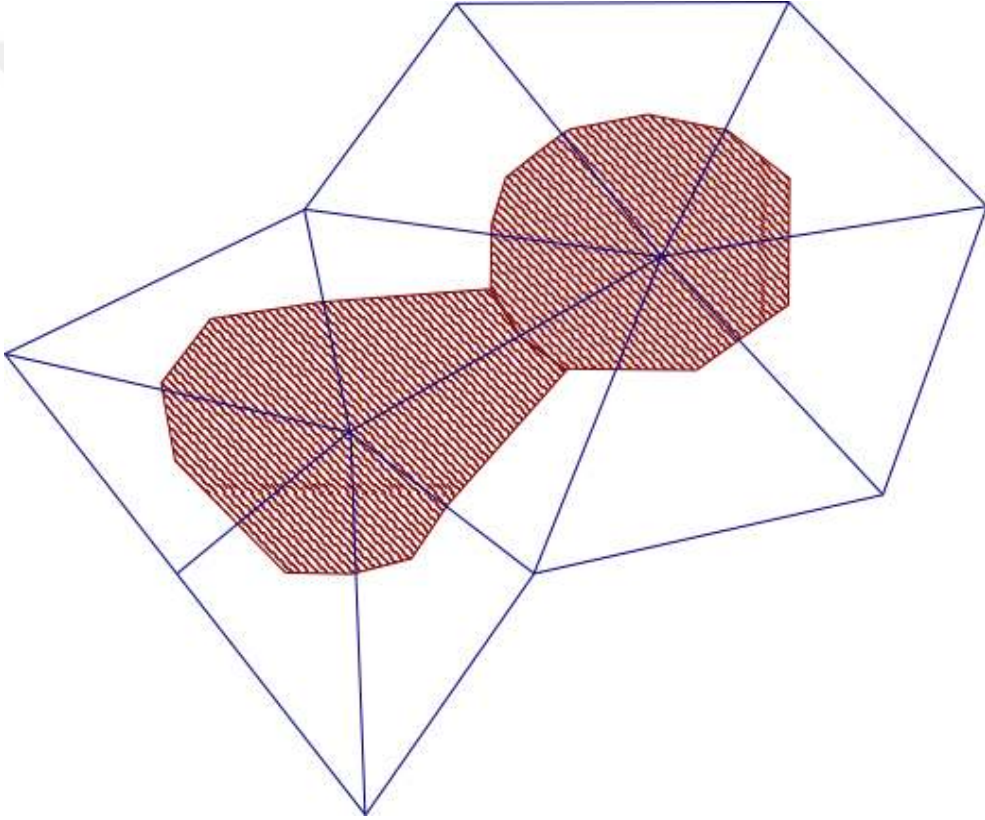


**Şekil 2.8.** Ahmed modeli için seçilen ve M4 olarak isimlendirilen ağ yapısı.

Ağ yapısı bağımsızlığı için kullanılan ağ yapıları tetrahedral (dört yüzlü) yapıdır. Hacimsel tetrahedral ağ elemanının yalnızca 4 komşu ağ elemanı bulunmaktadır ve bu durum bazı problemlere sebep olabilmektedir. Olası problemlerden birisi; komşu ağ elemanlarının hepsi tek bir düzlem üzerinde bulunabilir ve bu düzlem normalinde uzanan verilerin hesaplanmasını imkansız hale getirebilmektedir. 4 komşusu olan hacimsel tetrahedral yapıdaki ağ elemanı sınır yüzeyinde ise 3 komşusu kalmış demektir. Bunun yanı sıra, sınır yüzeyleri köşesinde bulunan ağ elemanının 1 ya da 2 komşu ağ elemanı bulunabilir. Bu durumlar, verilerin

hesaplanmasındaki doğruluğu düşürebilmektedir. Polyhedral (çok yüzlü) yapıdaki ağ elemanlarının ise çok sayıda komşu ağ elemanı bulunmaktadır. Bu sayede, sınır yüzeyleri köşesinde bulunsan bile tetrahedral yapıdaki ağ elemanına göre daha çok komşu ağ elemanı vardır.

Polyhedral ağ yapıları tetrahedral yapıya sahip ağ elemanlarının birleşim düğüm noktalarını merkez yüzey olarak alır ve diğer polyhedral yapıdaki ağ elemanı ile yüzeysel birleşim sağlar. Bu sayede, 2 polyhedral yapıdaki ağ elemanının 2 birleşim düğüm noktası olabilmektedir (Şekil 2.9) (ANSYS 17.0 Users Manual Guide).



**Şekil 2.9.** Tetrahedral yapıdaki ağ elemanlarının polyhedral yapıya dönüştürülmesi (ANSYS 17.0 Users Manual Guide).

Bunların yanı sıra, yaklaşık 400,000 ağ eleman sayısına sahip bir tetrahedral ağ yapısı polyhedral ağ yapısına dönüştürüldüğü zaman toplam ağ eleman sayısı yaklaşık 65,000 olabilmektedir (Peric ve Ferguson, 2005). Ağ eleman sayısı tetrahedral yapıya göre daha az olan polyhedral ağ yapısı analiz sonuçlarında doğruluğu daha yüksek ve hesaplama süresi daha kısa olabilmektedir (Spiegel ve diğerleri, 2009).

Tüm bu sebeplerden, tüm analizler için seçilen M4 olarak isimlendirilen ağ yapısı polyhedral yapıya dönüştürülerek kullanılmıştır. Polyhedral yapıya dönüştürülen M4 isimli ağ yapısı M6 olarak isimlendirilmiştir ve hata oranının %1.13 değerine düştüğü görülmüştür. Bu sebepten, diğer tüm analizlerde kullanılmak üzere M6 olarak isimlendirilen ağ yapısı seçilmiştir. Burada bahsi geçen hata oranı, fiziksel deney ve çalışma kapsamında gerçekleştirilen HAD analizi sonuçlarına ait verilerin arasındaki farktır.

**Tablo 2.2.** Ağ yapısı bağımsızlığı çalışmasında kullanılan ağ yapılarına ait özellikler.

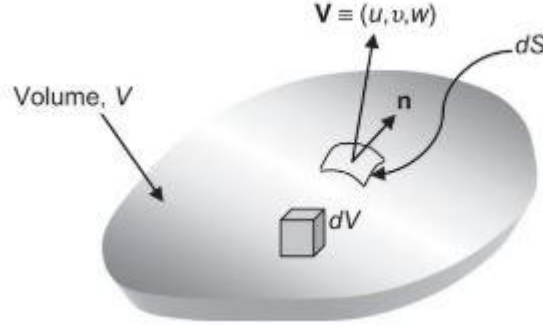
| Ağ Yapısı | Eleman Sayısı | Sıklaştırma Ağ Eleman Boyutu [mm] | Ortalama Çarpıklık Değeri | Ortogonalite Değeri | Sürükleme Kuvveti Değerindeki Değişim (%) | Analiz Süresi [sa] | Dosya Boyutu [GB] |
|-----------|---------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------|-------------------------------------------|--------------------|-------------------|
| M1        | 284,381       | 60                                | 0.2162                    | 0.86541             | 12.57                                     | 1                  | 54.4              |
| M2        | 1,686,827     | 50                                | 0.2152                    | 0.86591             | 11.39                                     | 3.5                | 58.7              |
| M3        | 1,992,730     | 40                                | 0.2134                    | 0.86712             | 12.74                                     | 4.5                | 69                |
| M4        | 2,807,615     | 30                                | 0.2103                    | 0.86905             | 3.55                                      | 5.5                | 96.3              |
| M5        | 5,822,652     | 20                                | 0.2059                    | 0.87178             | 4.77                                      | 11                 | 197               |

### 2.3. Analiz Şartlarının Tanımlanması (Setup)

HAD yöntemi akışkanlar dinamiğinin korunum denklemlerini kullanır. Genel bakış ile bu denklemlerde, akışkanın kütle korunumu, Newton'un ikinci yasası olan momentum korunumu ve termodinamiğin birinci yasası olan enerjinin korunumu baz alınmaktadır. HAD analizleri sırasında, korunum denklemlerindeki eşitlikler sıfıra "0" eşitlenmek (ya da seçilen yakınsama değerine erişmek) için iterasyonlar gerçekleştirilir. Bu iterasyonlar, analiz koşullarında belirlenen yakınsama kriterine uygun olarak gerçekleştirilir. Genel olarak seçilen yakınsama kriteri  $10^{-4}$  tür ve iterasyonlar, korunum denklemleri yakınsama kriterine ulaşmaya kadar devam eder. Türbülanslı akım uygulamalarında türbülans hesabının gerçekleştirilmesi ve kullanılan korunum denklemlerinin kapanımını sağlamak adına Bölüm 2.3.4 ve Bölüm 2.3.5'te detaylandırılan türbülans modelleri, duvar fonksiyonları ve hesaplama algoritmaları kullanılır.

### 2.3.1. Kütle korunumu (süreklilik)

Süreklilik denklemi, akışkanlar dinamiğinde kütlenin korunumu denklemidir. Bu denklem, bir akışkanın girdiği (boşluktaki ve bir zamandaki) kontrol hacimdeki ( $V$ ) yüzeyi ( $S$ ) boyunca kütle akışının, kontrol hacmi içerisindeki kütle değişim oranına eşitliği denklemidir (Tu ve diğerleri, 2018) (Şekil 2.10) (Denklem 2.6).



Şekil 2.10. Boşluktaki sabit sonlu kontrol hacmi (Tu ve diğerleri, 2018).

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = - \int_S \rho V \cdot n dS \quad (2.6)$$

Denklem 2.6'ya Gauss ıraksama teoremi uygulanarak, yüzey integrali ile hacim integrali yer değiştirilirse süreklilik denklemi elde edilir (Denklem 2.7).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (2.7)$$

Süreklilik denkleminin kartezyen koordinatlara göre yazılışı Denklem 2.8'te verilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.8)$$

### 2.3.2. Momentum korunumu

Newton'un ikinci hareket yasasına göre; bir akışkana etki eden toplam kuvvet, o akışkanın kütle ve ivmesi arasındaki bileşkeye eşittir (Denklem 2.9).

$$\sum F_x = m a_x \quad (2.9)$$

Koordinat sisteminin x bileşenindeki ivme, x yönündeki hızın zamana bağlı değişimi olarak (Denklem 2.10), akışkanın kütlesi  $\rho \Delta x \Delta y \Delta z$  olarak yazılarak koordinat sisteminin x bileşenindeki momentum elde edilir (Denklem 2.11).

$$a_x = \frac{Du}{Dt} \quad (2.10)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.11)$$

Denklem 2.9'daki eşitliğin sol tarafında bulunan x bileşenindeki kuvvetleri hızın x bileşeninin akışkanın hareketini sağlayan normal gerilme ve kayma gerilmeleri (yüzey kuvvetleri) ve katı gövde kuvvetleri oluşturur. Denklem 2.9 ve Denklem 2.11 kullanılarak ve bu denklemlere yer çekimi, merkezkaç ve elektromanyetik kuvvetler gibi katı gövde kuvvetleri eklenerek, koordinat sisteminin x bileşenindeki momentum denklemi ortaya çıkarılır (Denklem 2.12).

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho \sum F_x^{Katı\ Gövde\ Kuvvetleri} \quad (2.12)$$

Koordinat sisteminin y ve z bileşenlerindeki momentum denklemleri de x bileşenindeki momentum denklemi ile benzer tarz da yazılır (Denklem 2.13-2.14).

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho \sum F_y^{Katı\ Gövde\ Kuvvetleri} \quad (2.13)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \rho \sum F_z^{Katı\ Gövde\ Kuvvetleri} \quad (2.14)$$

Momentum denklemleri (Denklem 2.12-2.14) için süreklilik denklemindeki (Denklem 2.7) eşitlik kullanılarak düzenlendikten sonra Navier-Stokes denklemleri elde edilir (Denklem 2.15-2.17).

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho \sum F_x^{Katı\ Gövde\ Kuvvetleri} \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho \sum F_y^{Katı\ Gövde\ Kuvvetleri} \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \rho \sum F_z^{Katı\ Gövde\ Kuvvetleri} \quad (2.17)$$

### 2.3.3. Enerji korunumu

Enerji korunumu prensibi termodinamiğin birinci yasasıdır. Akışkan enerjisindeki değişim oranı ısı değişim oranı ile yüzey ve gövde kuvvetleri sayesinde akışkan üzerinde yapılan iş oranına eşittir (Denklem 2.18) (Anderson, 1992). Enerji korunum denkleminde bulunan ısı değişimi izotermal olmayan uygulamalar için kullanılır.

*Enerji değişiminin zamansal oranı (E) =*

$$Net\ ısı\ değişim\ oranı (\sum \dot{Q}) + Net\ yapılan\ iş\ oranı (\sum \dot{W}) \quad (2.18)$$

Akışkan üzerinde net yapılan iş basınç ve gerilme kuvvetleri sayesinde oluşur (Denklem 2.19).

$$\begin{aligned}
\sum W = & \left[ -\left( \frac{\partial(up)}{\partial x} + \frac{\partial(vp)}{\partial y} + \frac{\partial(wp)}{\partial z} \right) \right. \\
& + \frac{\partial(u\sigma_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} \\
& + \frac{\partial(v\sigma_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \left. \frac{\partial(w\sigma_{zz})}{\partial z} \right] dx dy dz \\
& + \rho \sum F^{Katı\ Gövde\ Kuvvetleri} \vec{V} dx dy dz
\end{aligned} \tag{2.19}$$

Net enerji değişim oranının diğer parçası olan ısı değişimi, radyasyon yayılımı ya da soğurması sebebi ile oluşan akışkanın hacimsel ısı değişimi ve ısı gradyanları sebebi ile akışkan yüzeyi boyunca oluşan ısı transferi sayesinde oluşur (Denklem 2.20).

$$\sum \dot{Q} = \left[ \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \tag{2.20}$$

Hareketli bir akışkanın birim kütlede toplam enerjisi, birim kütledeki iç enerjisi ve birim kütledeki kinetik enerjisinin toplamıdır (Denklem 2.21).

$$E = \rho \frac{D}{Dt} \left( e + \frac{\overline{v^2}}{2} \right) dx dy dz \tag{2.21}$$

Akışkanın birim kütledeki toplam enerji (Denklem 2.21), net ısı değişim oranı (Denklem 2.20) ve net yapılan iş oranı (Denklem 2.19) denklemleri Denklem 24 içerisine yerleştirilerek enerji denklemi elde edilir (Denklem 2.22). Enerji denkleminde eşitliğin sol tarafı için gerekli türev işlemlerinin ardından enerji korunum denklemi ortaya çıkarılır (Denklem 2.23).



$$\rho \frac{D}{Dt} \left( e + \frac{\vec{v}^2}{2} \right) = \left[ \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \left[ - \left( \frac{\partial (up)}{\partial x} + \frac{\partial (vp)}{\partial y} + \frac{\partial (wp)}{\partial z} \right) + \frac{\partial (u\sigma_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (v\sigma_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial (w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial (w\sigma_{zz})}{\partial z} + \rho F \right] \text{ Katı Gövde Kuvvetleri} \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( e + \frac{\vec{v}^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[ \rho \left( e + \frac{\vec{v}^2}{2} \right) \vec{v} \right] = \left[ \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \left[ - \left( \frac{\partial (up)}{\partial x} + \frac{\partial (vp)}{\partial y} + \frac{\partial (wp)}{\partial z} \right) + \frac{\partial (u\sigma_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (v\sigma_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial (w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial (w\sigma_{zz})}{\partial z} + \rho F \right] \text{ Katı Gövde Kuvvetleri} \quad (2.23)$$

#### 2.3.4. Türbülans modelleri

Belirli kuralları olmayan, zamana ve ortama göre parametreleri ve büyüklükleri değişen türbülanslı akım hareketi henüz net olarak çözümlenebilmiş değildir. Bu sebepten, türbülanslı akım hareketlerini çözümlmek adına birden fazla yöntem ve denklem ortaya konulmuştur. Bu hareketler için türetilen denklemlerin kökenini, gerçek akım hareketlerini temsil edebilme fiziki bilgisine sahip olması nedeni ile Navier-Stokes denklemleri oluşturmaktadır (Ünal, 2007).

##### 2.3.4.1. DNS modeli

Direct Numerical Simulation (DNS) olarak adlandırılan ve Navier-Stokes denklemlerinin herhangi bir türbülans modeli kullanılmadan çözülmesi ile gerçekleştirilen hesaplamalı simülasyonlar bulunmaktadır. DNS simülasyonları hesaplama süresi ve hesaplama kapasitesi açısından bilgisayarları zorlamaktadır.

##### 2.3.4.2. RANS - URANS modelleri

RANS yöntemi ortalama akım özelliklerini kullanan N-S denklem formudur. Reynolds ortalama yöntemi ile akışkanın değişken özelliklerinin zamandan bağımsız bir şekilde ortalama değerlerinin kullanıldığı RANS yöntemi, hareket süreci belirli olan akım

durumlarında geçerlidir. Akışkanın değişken özelliklerinin zamana bağlı bir şekilde ortalama değerleri elde edilen Navier-Stokes denklemlerine ise URANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes) adı verilir. RANS denklemleri zamana bağlı olarak değişen salınımları göz ardı ederken, URANS denklemleri zamana bağlı değişkenlik gösteren akım hareketlerinin ortalamasını temsil etmektedir.

#### **2.3.4.2.1. Reynold stress modeli (RSM)**

RANS ve URANS denklemleri Navier-Stokes denklemlerindeki anlık değişkenler yerine ortalama değişkenleri almakta ve denklemlere Reynolds gerilmesini de eklemektedir. RANS ve URANS denklemlerinin kapanmasının sağlanması adına, denklemler içerisinde bulunan Reynolds gerilmelerinin elde edilmesi gerekmektedir. Denklem kapanımının sağlanması için RSM (Reynolds Stress Model) türbülans modeli kullanılabilmektedir. RSM uygulanırken, her bir Reynolds gerilmesi için ayrı denklem elde edilir ve Reynolds gerilmesi taşınım denklemi de dahil olmak üzere fazladan 7 denklemin çözülmesi gerekmektedir. RSM türbülans modelinin uygulanması ile hesaplama süresi ve kapasitesi ihtiyacı artmaktadır. Yani, sayısal maliyeti yüksektir.

Reynolds gerilimlerinin hesaplanmasında kullanılabilecek bir diğer yöntem ise türbülans viskozitesini ele alan türbülans modelleridir. Bu modeller, Spalart-Allmaras modeli,  $k - \varepsilon$  modelleri ve  $k - \omega$  modelleridir. Bu türbülans modellerinin en büyük avantajı, türbülans viskozitesine yoğunlaşarak sayısal maliyeti düşürmeleridir.

#### **2.3.4.2.2. Spalart-allmaras türbülans modeli**

Tek denklemlilik olan Spalart-Allmaras modeli tek bir taşınım denklemi çözerek kinematik türbülans viskozitesine ulaşır. Bu model duvar etkili akımlarda ve ters basınç gradyanlarına bağlı sınır tabakalarında iyi sonuç vermektedir. Bunun yanı sıra, iki boyutlu akımları içeren analizlerde performansı iyi iken üç boyutlu ve geniş ayrılma bölgeleri içeren akımları içeren analizlerde başarısız sonuç vermektedir. Bu sebeplerden dolayı, genel olarak uzay ve havacılık çalışmalarında yaygın kullanılmaktadır.

#### **2.3.4.2.3. Standart $k - \varepsilon$ türbülans modeli**

$k - \varepsilon$  türbülans modellerinde, türbülans kinetik enerjisi “ $k$ ” ve dissipasyon oranı “ $\varepsilon$ ” olmak üzere iki farklı taşınım denklemi çözülür. Bu modelde, Navier-Stokes denklemlerinin yanı sıra kullanılan iki taşınım denkleminin içerdiği model sabitleri deneysel verilere göre elde edilmiş olup, türbülanslı ve Reynolds sayısı yüksek akımlarda kullanılmaya uygundur. Standart  $k - \varepsilon$  türbülans modeli; sayısal maliyetinin düşük olması ve diğer  $k - \varepsilon$  modellerinin alt yapısını oluşturacak kadar açıklanabilir doğruluğu sayesinde endüstriyel uygulamalarda çok kullanılan bir türbülans modelidir. Bunun yanı sıra, geniş ayrılma bölgeleri ve yüksek basınç gradyenlerini içeren akım koşullarında başarılı olamayan bir modeldir.

#### **2.3.4.2.4. RNG $k - \varepsilon$ türbülans modeli**

RNG  $k - \varepsilon$  türbülans modeli,  $k - \varepsilon$  denklemlerinin renormalizasyon teorisi kullanılarak düzenlenmesi ile oluşturulmuştur. Bu model, Reynolds sayısı düşük akımlarda da etkili iken aynı zamanda, girdap bölgelerinde de etkilidir. RNG  $k - \varepsilon$  modeli, standart  $k - \varepsilon$  modeline göre, kompleks yüksek gerilme oranına sahip akımlarda, girdap bölgelerinde ve akım ayrılması yaşanan bölgelerde daha iyi performans göstermektedir (ANSYS Inc, 2006). RNG  $k - \varepsilon$  türbülans modeli her ne kadar standart  $k - \varepsilon$  türbülans modeline göre girdap bölgelerinde daha uygun sonuçlar verse de yeterli hassasiyette değildir (Fuat ve Karagöz, 2007).

#### **2.3.4.2.5. Realizable $k - \varepsilon$ türbülans modeli**

Bu model, standart  $k - \varepsilon$  türbülans modelinin bir başka versiyonudur. Standart ve RNG  $k - \varepsilon$  modellerinin eksiklerini kapatabilmek ve gerçekleştirilebilirlik terimini sağlamak adına türbülans viskozitesi için yeni denklemler içeren bu model, dissipasyon oranı için yeni bir taşınım denklemi içermektedir. Realizable  $k - \varepsilon$  modeli, tıpkı standart  $k - \varepsilon$  modeli gibi Reynolds sayısı yüksek ve türbülanslı akımlar için uygundur. Bunun yanı sıra, geliştirilmiş olan bu türbülans modeli, RNG  $k - \varepsilon$  türbülans modelinden daha hızlı yakınsanıp, daha az hata payı (doğruluk) içermektedir.

#### **2.3.4.2.6. Standart $k - \omega$ türbülans modeli**

$k - \omega$  türbülans modelinde tıpkı  $k - \varepsilon$  gibi iki farklı denklem kullanılmaktadır. Bu modelde  $k - \varepsilon$  türbülans modelinden farklı olarak, dissipasyon taşınım denklemi yerine birim kinetik enerji dissipasyon denklemi kullanılmaktadır. Standart  $k - \omega$  türbülans modeli  $k - \varepsilon$  türbülans modeli ile kıyaslandığı zaman, sınır tabaka akışlarında daha iyi performans göstermektedir. Özellikle de, Reynolds sayısı düşük ve duvar etkisi altındaki sınır tabaka akımlarında iyi performans sergilemektedir. Boru akımlarından ziyade, aerodinamik çalışmalarda öne çıkmaktadır.

#### **2.3.4.2.7. Shear stress transport (SST) $k - \omega$ türbülans modeli**

SST  $k - \omega$  türbülans modeli, standart  $k - \omega$  ve  $k - \varepsilon$  türbülans modellerinin eksikliklerini ve hatalarını kapatmak amacıyla geliştirilmiştir.  $k - \omega$  modelinin yakın duvar bölgelerindeki etkileri ile  $k - \varepsilon$  modelinin duvardan uzak bölgelerdeki serbest akış bağımsızlığı etkisini bir araya getirerek geliştirmek adına  $k - \varepsilon$  modeli  $k - \omega$  denklemleri içerisine gömülmüştür. SST  $k - \omega$  türbülans modeli, standart  $k - \omega$  türbülans modeline göre ters basınç gradyanları içeren akımları içeren çalışmalar ve aerodinamik çalışmalar gibi daha geniş alandaki uygulamalarda daha az hata payı ve daha güveniliridir.

#### **2.3.4.3. Large-eddy simulation (LES) modeli**

Büyük ölçekteki üç boyutlu ve türbülanslı akım hareketlerinin çözümünde çok iyi performans gösteren LES yöntemi, katı etrafındaki akım ve ayrılma bölgelerine ve bu bölge çevresinde oluşan girdap bölgelerine yoğunlaşmaktadır. LES modeli, DNS ve RANS-URANS modellerin eksiklerini kapatmak adına geliştirilmiştir. DNS modeline göre daha az hesaplama yükü getirir de, RANS-URANS modellerine göre oldukça çok hesaplama yükü getirmektedir. Genel olarak, patlama ve yanma analizleri ve aerodinamik çalışmalarda kullanılmaktadır.

#### 2.3.4.4. Detached eddy simulation (DES) modeli

DES türbülans modeli, duvar yakınlığında RANS-URANS modellerini kullanırken büyük ölçekteki yüksek türbülanslı akım bölgelerinde ise LES modelini kullanan hibrit modeldir. Bu model, RANS-URANS ve LES modellerinin en başarılı hesaplama yaptıkları bölgelere uygulanması ile geliştirilmiştir.

RANS-URANS modelleri aerodinamik çalışmalar için kendi aralarında kıyaslandığı zaman; Spalart-Allmaras ve Standart  $k - \varepsilon$  türbülans modellerinin yeterince iyi olmadığı görülmektedir. Bunun en büyük sebebi; bu iki türbülans modelinin katı cidardan ayrılan akıma ve bu akımın oluşturduğu girdap bölgelerinde iyi performans gösterememeleridir.  $k - \omega$  türbülans modelleri ve RNG  $k - \varepsilon$  türbülans modeli araç aerodinamiği çalışmaları için hata payı en düşük RANS-URANS modellerindendir. Bu tür çalışmalarda, RSM türbülans modeli ise, hem  $k - \omega$  modelleri ve RNG  $k - \varepsilon$  modeli kadar hassas değil hem de bu modellerden daha fazla hesaplama zamanı ve sayısal bellek alanı harcar (Taşan, 2011).

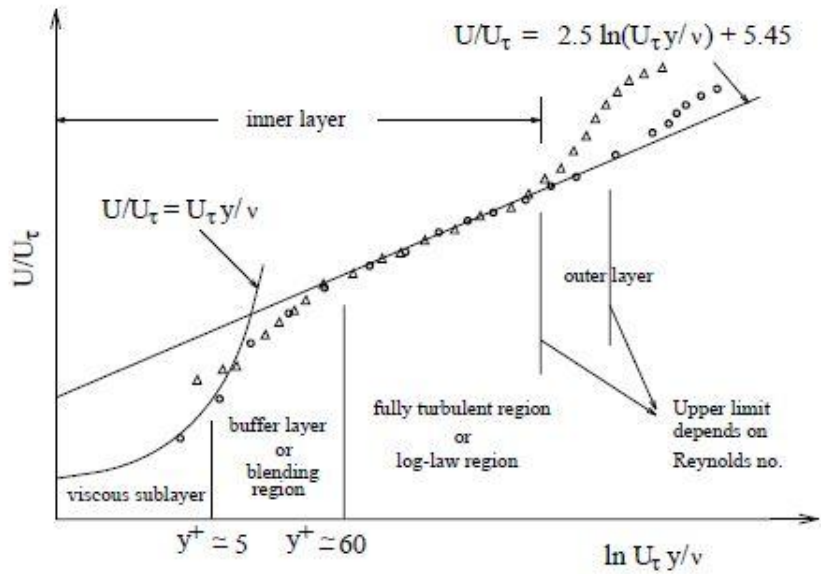
#### 2.3.4.5. Duvar fonksiyonları ve yakın cidar uygulaması

Duvar fonksiyonları, cidar yakınındaki viskozite etkisinin yüksek olduğu bölgeler ile cidar uzağındaki türbülanslı akım bölgeleri arasındaki viskozite iletişimini sağlamak (transition) adına kullanılır. Reynolds sayısının yüksek olduğu türbülanslı akımlarda, cidar viskoz etkileri cidar ve yakınlığında hesaplama değişkenlerini değiştirmektedir. Bundan dolayı, cidardan türbülanslı geniş akım bölgesine doğru farklı özelliklerde viskoz tabaka (viscous sublayer), tampon tabaka (buffer layer) ve tam türbülanslı tabaka (fully-turbulent layer) olmak üzere 3 akım bölgesinden oluşmaktadır. Viskoz tabaka, cidara en yakın olan ve viskoz etkilerin en çok olduğu tabakadır. Tampon bölge ise viskozitenin ve türbülansın neredeyse eşit oranda akıma etki ettiği bölgedir. Cidardan çok daha uzak olan tam türbülanslı tabakada ise, akıma tamamen türbülans etki etmektedir (Şekil 2.11). Bu tabakaların kontrolü ve çözülmesi için cidar ve ağ yapısı elemanının merkezi arasındaki boyutsuz mesafe olan  $y^+$  ve boyutsuz hız olan  $u^+$  parametreleri kullanılır (Denklemler 2.24-2.26).

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_{wall}}{\rho}} \quad (2.24)$$

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (2.25)$$

$$y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu} \quad (2.26)$$



Şekil 2.11. Cidar yakını bölgeleri (ANSYS Inc., 2006).

Viskoz tabaka için  $y^+ < 5$ , tampon tabaka için  $5 < y^+ < 30$ , tam türbülanslı tabaka için ise  $30 < y^+ < 60$ 'tır. Boyutsuz  $y^+$  parametresi, uygun ağ yapısı oluşturma koşullarının ve türbülans modelinin belirlenmesi için iyi bir kriterdir (Salim ve Cheah, 2009).

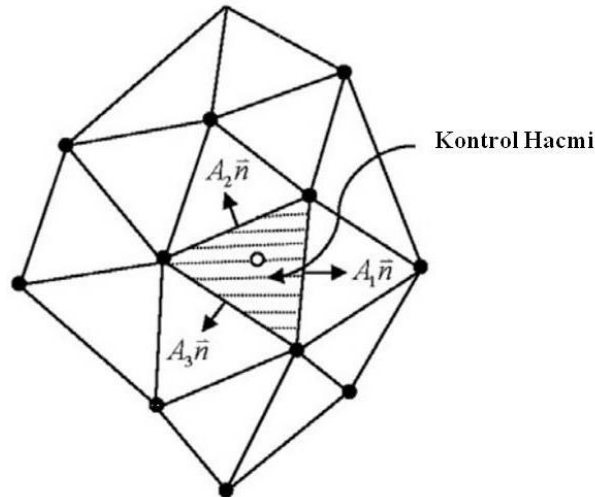
### 2.3.5. Sonlu hacimler yöntemi ile ayrıklaştırma

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde kullanılan yönetici denklemlerin (korunum denklemleri ve bu denklemlere bağlı olan tüm denklemler) sayısal çözülebilirliğinin sağlanmasına adına ayrıklaştırma ve cebirsel denklem sistemine dönüştürülme işlemlerinin gerçekleştirilmesi

gerekmektedir. Yönetici denklemlerin ayrıklaştırılması için geliştirilen 3 ana yöntem bulunmaktadır. Bunlar;

- Sonlu farklar yöntemi,
- Sonlu hacimler yöntemi ve
- Sonlu elemanlar yöntemidir.

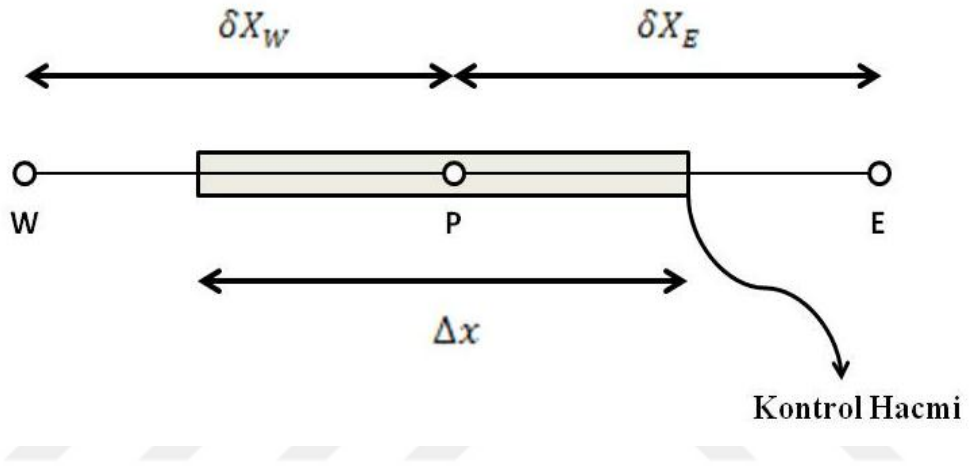
Bu tez kapsamında gerçekleştirilen tüm sayısal analizler sonlu hacimler yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Sonlu hacimler yönteminde, sayısal ortamda oluşturulan ağ yapıları içerisindeki her kontrol hacminin merkezindeki değerler hesaplanır. Kontrol hacimlerinin merkezlerine ait değerler üzerinde interpolasyon (ara değer hesabı) yapılarak kontrol hacimlerinin yüzeylerindeki değerlere ulaşılır. Bu ayrıklaştırma yöntemi, 3 boyutlu kompleks geometri içerisinde veya etrafındaki akım hareketleri için diğer yöntemlerden daha kullanışlı ve yaygındır (Blazek, 2015). Sonlu hacimler yöntemi, kontrol hacimlerinin entegrasyonunu esas almaktadır ve kontrol hacmi içerisindeki bağlanma yüzeyleri, akış bölgesindeki değişkenlerin birinci ve ikinci dereceden türevlerinin ayrıklaştırılma bağlantı yüzeyleridir (Tu ve diğerleri, 2018) (Şekil 2.12). Gauss ıraksama teoreminin hacim integraline uygulanması ile akım hacmi içerisindeki akış değişkeninin bir doğrultudaki birinci dereceden denklemi Denklem 2.27'deki hali alır.



**Şekil 2.12.** Sonlu hacimler yöntemi için kontrol hacmi hesaplama merkezi, eleman köşe birleşim noktaları ve birleşme yüzeyleri (Tu ve diğerleri, 2018).

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right) = \frac{1}{\Delta V} \int_{\Delta V} \frac{\partial \phi}{\partial x} dV = \frac{1}{\Delta V} \int_A \phi dA^x \approx \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^N \phi_i A_i^x \quad (2.27)$$

Sonlu hacimler yöntemi ile ayrıklaştırılmış denklemlerin cebirsel denklemlere dönüştürülmesi sürecinin basitçe anlaşılması için süreç 1 boyutta detaylandırılmıştır. Sonlu hacimler yöntemi uygulanırken, düğüm noktasının çevresindeki diğer düğüm noktaları ile olan bağlantı dikkate alınmalıdır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. 1 boyutlu akım hacminde sonlu hacimler metodunda dikkate alınan düğüm noktaları ve aralarındaki bağlantı.

Sonlu hacimler yönteminde, Denklem 2.27 ve kaynak terimi ( $S_\phi$ ) (Denklem 2.28) yalın difüzyon denklemine (Denklem 2.29) uygulanarak Denklem 2.30 elde edilir.

$$S_\phi = \frac{1}{\Delta V} \int_{\Delta V} S_\phi dV \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + S_\phi = 0 \quad (2.29)$$

$$\frac{1}{\Delta V} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e A_E - \frac{1}{\Delta V} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w A_W + S_\phi = 0 \quad (2.30)$$



Ayrıklaştırma denkleminin cebirsel denklem haline dönüştürülmesi için merkezi farklar (Denklem 2.31 ve 2.32) kullanılarak yeniden düzenlenir (Denklem 2.33).

$$(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x})_e A_E = \Gamma_e A_E (\frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_E}) \quad (2.31)$$

$$(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x})_w A_W = \Gamma_w A_W (\frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_W}) \quad (2.32)$$

$$\frac{1}{\Delta V} \left( \frac{\Gamma_e A_E}{\delta x_E} + \frac{\Gamma_w A_W}{\delta x_W} \right) \phi_P = \frac{1}{\Delta V} \left( \frac{\Gamma_e A_E}{\delta x_E} \right) \phi_E + \frac{1}{\Delta V} \left( \frac{\Gamma_w A_W}{\delta x_W} \right) \phi_W + S_\phi \quad (2.33)$$

E, W ve P düğüm noktalarındaki değişkenlerin katsayıları sırasıyla,  $a_E, a_W$  ve  $a_P$  olarak yazılırsa,  $a_E = \frac{\Gamma_e A_E}{\Delta V \delta x_E}$ ,  $a_W = \frac{\Gamma_w A_W}{\Delta V \delta x_W}$ ,  $a_P = a_E + a_W$  ve  $b = S_\phi$  eşitliklerinin olduğu yerde ayrıklaştırma denkleminin cebirsel hali (Denklem 2.34) yazılabilir.

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + b \quad (2.34)$$

### 2.3.6. Hesaplama algoritmaları

Bu çalışmada üzerinde durulan, SIMPLE, SIMPLEC, PISO ve COUPLED olmak üzere 4 farklı algoritma vardır. Bu algoritmalar, basınç tabanlı ayrılmış algoritmalar. N-S denklemlerinin tamamlayıcısı olması adına geliştirilen SIMPLE ve SIMPLEC algoritmaları kütle korunumunu desteklemek için hız ve basınç doğrulamaları içermektedir. PISO algoritması, yüksek çarpıklığa sahip ağ yapılarının bulunduğu çalışmaların hem zamana bağlı hem de zamana bağlı olmayan hesaplamalarında da iyi performans ile kullanılabilir. COUPLED algoritması ise tam basınç-hız bileşim özelliğini kullanarak, hem zamana bağlı olan hem de olmayan hesaplamalarda kullanılmaktadır.

### **2.3.6.1. SIMPLE-SIMPLEC algoritmaları**

SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) ve SIMPLEC (SIMPLE-Consistent) algoritmaları birbirleriyle çok yakın özelliklere sahiptir. N-S denklemlerinde basınç belirlenmesine ilişkin bir denklem olmamasından dolayı SIMPLE algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma, standart bir algoritma olup karmaşık olmayan akım hesaplamalarında kullanılmaktadır. Genellikle, SIMPLE algoritmasının kullanılıp problemler yaşanan karmaşık akım hesaplamalarında kullanılan SIMPLEC algoritması yüzey akış doğrulaması kullanır. Ayrıca, under-relaxation factor özelliğinin artırılması ile hesaplamaların daha hızlı yakınsanarak sonuca erişmesine yardımcı olabilmektedir.

### **2.3.6.2. PISO algoritması**

PISO (The Pressure-Implicit with Splitting of Operators) algoritması da basınç-hız bileşim şeması içeren SIMPLE algoritmalarının bir parçasıdır. Basınç süreklilik denklemi hesaplandıktan sonra momentum dengesi sağlanamama durumu SIMPLE ve SIMPLEC algoritmalarının kısıtlarından birisidir. Bu kısıtın çözülmesi için denge sağlanana kadar hesaplamaların tekrar etmesi gerekir. PISO algoritması, hesaplamaların verimliliğini artırmak amacıyla momentum ve çarpıklık (momentum correction ve skewness correction) olmak üzere iki doğrulama içermektedir.

#### **2.3.6.2.1. Momentum ve çarpıklık doğrulaması**

PISO algoritmasında momentum doğrulaması olarak bilinen iterasyon işlemleri, SIMPLE ve SIMPLEC algoritmalarının içerdiği tekrarlanan hesaplamaları basınç doğrulama denklemlerinin son adımına taşır. Birden fazla PISO hesaplama döngüsü sayesinde doğrulanmış hızlar, süreklilik ve momentum denklemleri daha yakından karşılar. PISO algoritması SIMPLE ve SIMPLEC algoritmalarına göre hesaplama gücünü daha çok kullansa da hesaplamaların yakınsama kriterine yaklaşmasını sağlayan iterasyon sayısını azaltır.

Çarpıklık doğrulama işlemi sayesinde, basınç doğrulama denkleminin başlangıç sonuçları kullanılarak basınç doğrulama gradyeni yeniden hesaplanır ve kütle akış doğrulamalarının

güncellenmesinde kullanılır. Bu sayede, çarpıklığı yüksek olan ağ yapısı içeren durumlarda yakınsama zorluklarını azaltır.

### 2.3.6.3. COUPLED algoritması

COUPLED, basınç tabanlı bileşen algoritmasıdır. Yani, basınç tabanlı süreklilik ve momentum denklemlerini bir arada hesaplamaktadır. COUPLED algoritması ayrık çözüm şemaları içeren algoritmalar ile kıyaslandığında, zamana bağlı olmayan ve tek fazlı uygulamalar için daha dayanıklı ve verimli olmaktadır. Çok fazlı akımlar ve periyodik kütle akışlı sınır koşullarının bulunduğu uygulamalarda kullanılamamaktadır. Kalitesiz ağ yapısı ya da büyük zaman aralıkları kullanılan zamana bağlı uygulamalarda COUPLED algoritması diğerlerine göre daha etkindir (ANSYS 17.0 Users Manual Guide).

### 2.3.7. Ahmed modeli analiz şartları

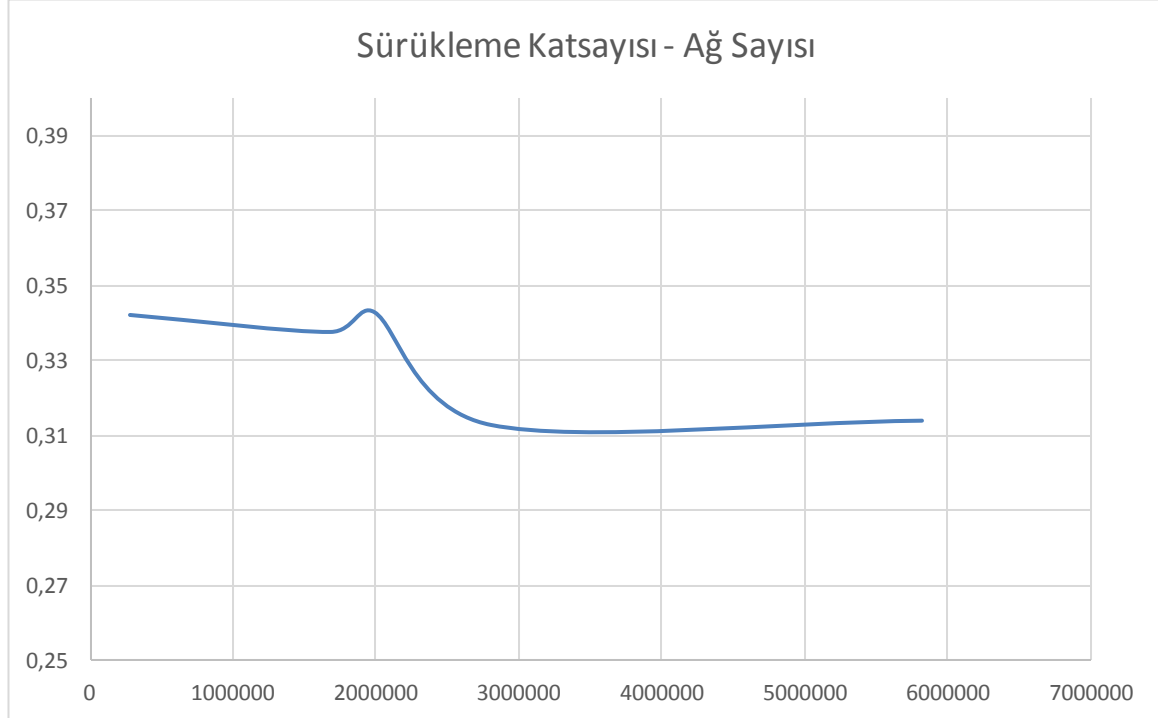
Model geçerliliği sağlama çalışmasında, model akım hızı 40 [m/s] olarak belirlenmiş olup, akım hacminin çıkışı basınç sınır koşulu olarak belirlenmiştir. Akım hacmine ait yan duvarların etkisini azaltmak için simetri koşulu ile belirlenmiştir. Modelde yerçekimi ivmesi de kullanılmaktadır ve akım hacminin yüzeylerinden yer çekim ivmesine dik olanların yerçekimi ivmesini simetrik olarak yansıtması fiziksel olarak imkansız olması sebebi ile akım hacminin üst ve alt yüzeyleri simetri koşulu ile belirlenmeyip, kaymaz duvar (No-Slip Wall) sınır koşulu ile belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, model geçerliliğinin sağlanması için karşılaştırma yapılacak olan çalışmada (Meile ve diğerleri, 2011) olduğu gibi Reynolds sayısı  $2.78 \times 10^6$  olacak şekilde akım verileri belirlenmiştir.

Bu çalışma içerisinde, ağ yapısı bağımsızlığı sağlanmış olan ilk HAD analizinin türbülans modeli performans analizleri ve kullanılması gereken algoritma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Araç aerodinamiği çalışmalarında en önemli bölgeler akımın katı cıdardan ayrıldığı bölgeler (separation zone) ve bu ayrılma sonrasında akım hareketinin oluşturduğu girdap bölgeleridir. Bu sebepten, sınır tabaka akımlarında iyi performans gösteren standart  $k - \omega$  türbülans modelinin ve hem  $k - \omega$  hem de serbest akım bölgelerinde iyi performans gösteren  $k - \varepsilon$  türbülans modellerini içinde barındıran SST  $k - \omega$  türbülans modelinin PISO algoritması ve M4 ağ yapısı kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonuçları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Standart  $k - \omega$  türbülans modeli ile gerçekleştirilen analizin

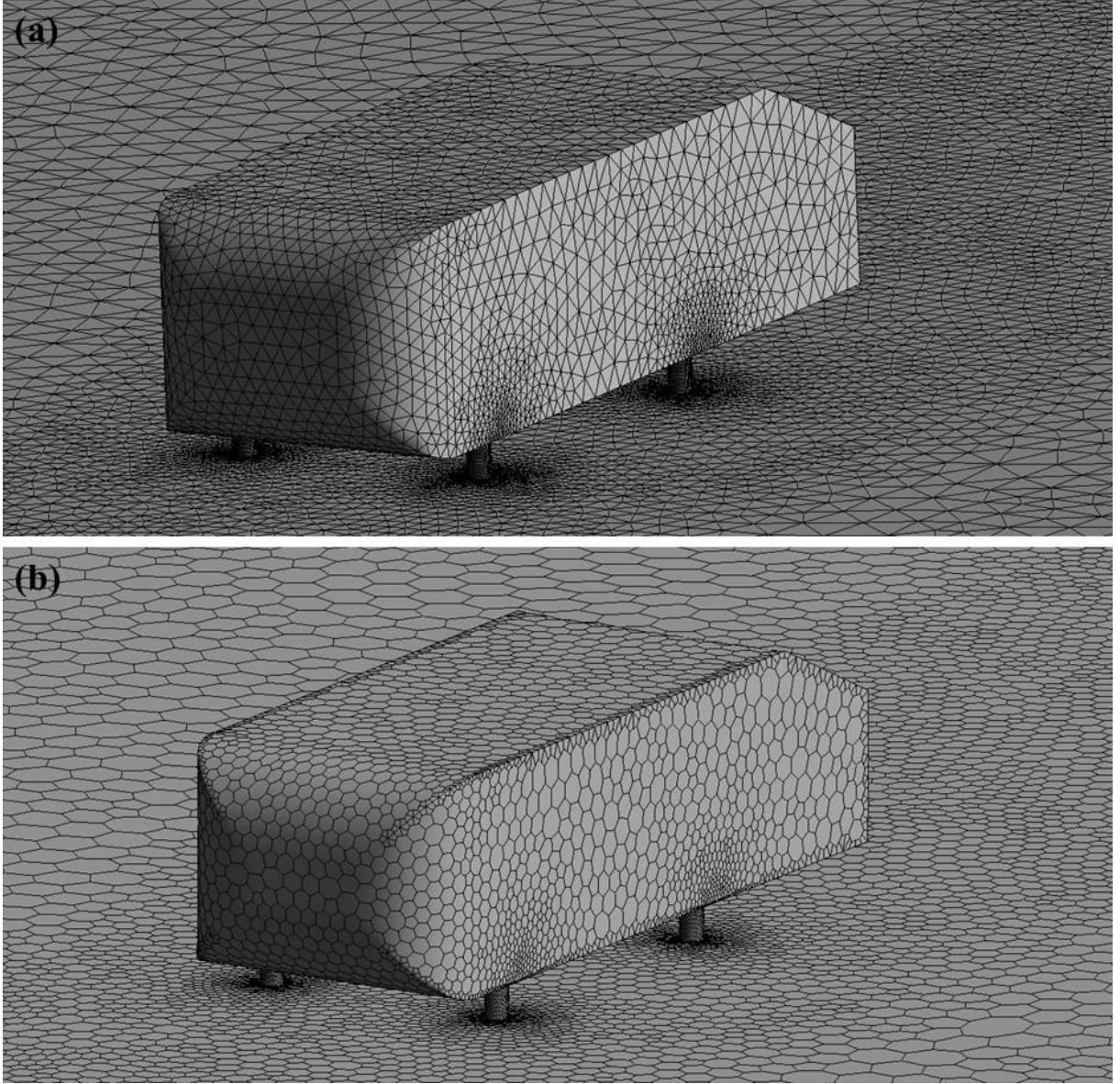
hata payı %6.27 iken, SST  $k - \omega$  türbülans modeli ile gerçekleştirilen analizin hata payı %3.55'tir. Bunun sebebi, SST  $k - \omega$  modelinin hem sınır tabaka akım bölgelerinde hem de serbest akım bölgelerinde standart  $k - \omega$  modeline göre iyi performans göstermesidir. Bu sebepten, bu çalışma içerisinde gerçekleştirilen diğer tüm analizlerde SST  $k - \omega$  türbülans modeli kullanılmıştır.

### 2.3.8. Model geçerliliğinin sağlanması

Model geçerliliğinin sağlanması çalışmalarının ilk adımı ağ yapısı bağımsızlığının sağlanması olmuştur. Akım hacminin ağ eleman boyutları sabit bir aralıkta tutularak ve sıklaştırma kutusunun ağ eleman boyutları küçültülerek analiz sonuçları incelenmiştir. Hem analiz sonuçlarına etkisi, hem analiz sonuç dosya boyutu, hem de analiz süresi gibi parametreler dikkate alınarak en uygun olan ve M4 olarak adlandırılan ağ yapısı seçilmiştir (Tablo 2.2 ve Şekil 2.14). Seçilen ağ yapısı tetrahedral yapıdan polyhedral yapıya dönüştürülmüş ve analiz hata payı %3.55'ten %1.13'e düşürülmüştür (Şekil 2.15).



Şekil 2.14. Sürüklenme Katsayısı-Ağ Sayısı grafiği.



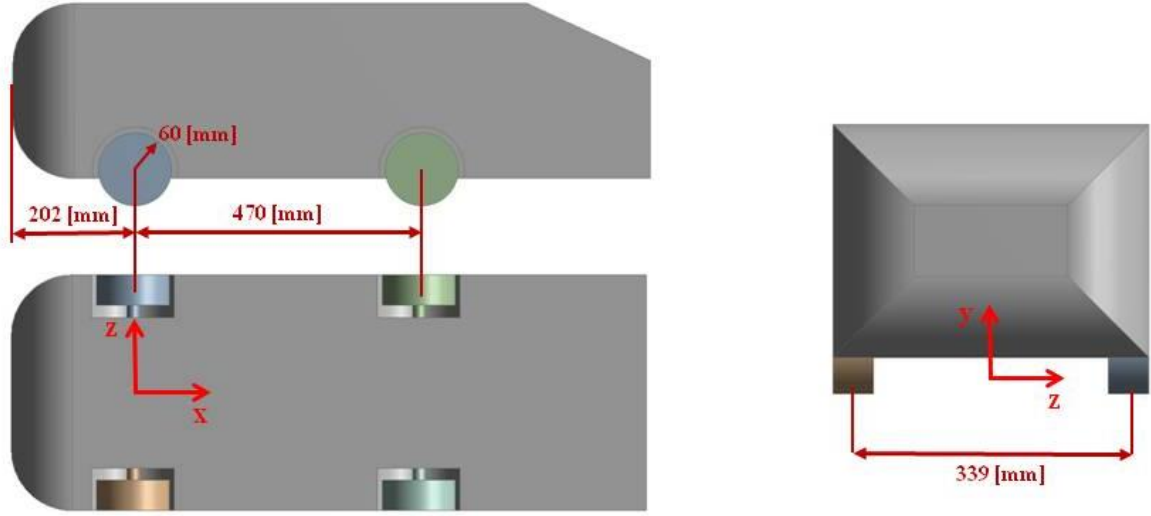
**Şekil 2.15.** (a) M4 olarak adlandırılan tetrahedral yapıdaki ağ yapısının (b) M6 olarak adlandırılan polyhedral ağ yapısına dönüştürülmesi.

Model geçerliliği sağlama çalışmalarında, polyhedral yapıya sahip ağ yapısı, zamana bağlı analiz yöntemi, PISO algoritması ile SST  $k - \omega$  türbülans modeli kullanılarak, Ahmed modelinin sürüklenme katsayısı 0.2956 olarak elde edilmiştir ve fiziksel deneyler sonucunda sürüklenme katsayısı 0.299 olan Ahmed modeli (Meile ve diğerleri, 2011) ile arasında %1.13'lük hata payı ile kullanılan modelin geçerliliği sağlanmıştır.

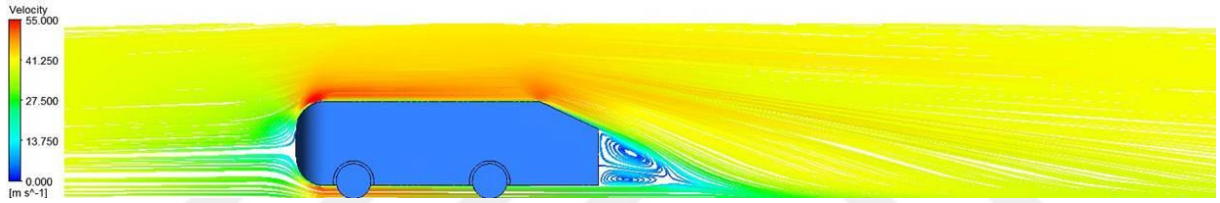
### 3. HAD ANALİZLERİNDE DUVAR HAREKETİ

Rüzgar tünellerinde uygulanan durgun araç etrafındaki akım yöntemi gerçek yol koşullarını tam olarak yansıtamamaktadır. Rüzgar tünellerinde araç hareketinin mümkün olmaması durumu, duran bir aracın tekerlek hareketlerinin ve yol hareketinin sağlanmasını zorunlu kılmaktadır. Tamamen durgun bir araç ile tekerlekleri dönen durgun bir araç etrafındaki akım sonucunda oluşan tekerleklerle etki eden sürüklenme kuvvetleri arasında yaklaşık %25 oranında fark oluşabilirken, tekerleklerle etki eden kaldırma kuvvetleri arasında yaklaşık %42 oranında fark oluşabilmektedir. Tekerlekleri dönen aracın tekerleklerine etki eden kuvvetlerin değerleri daha düşük olmaktadır (Axon ve diğerleri, 1998). Hem yol hem de araç tekerleklerinin hareketinin sağlanması durumu, aynı şekilde kaldırma kuvveti değerinde büyük değişiklikler yaratmaktadır. Tüm araca etki eden sürüklenme kuvveti 0.020 değerinde değişirken, kaldırma kuvveti yaklaşık 0.1 değerinde değişim görülmektedir (Singh, 2008). Aracın tekerlek hareketi ve yol hareketinin olması durumundaki aerodinamik kuvvetlerde oluşan değişimler, tamamen durgun bir araç etrafındaki akım sonucunda araca etki eden kuvvetlerin tam olarak doğru olmadığını göstermektedir. Tüm bu sebeplerden dolayı, bu tez kapsamında tamamen durgun araç, yol hareketi, tekerlek hareketi ve hem yol hem de tekerlek hareketi olmak üzere 4 farklı karşılaştırma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmalar için, Ahmed modelinde tekerlek boşlukları oluşturulmuş ve tekerlekler eklenmiştir (Şekil 3.1). Tekerlek boşlukları, Model geçerliliğinin sağlandığı silindir sehpalı Ahmed modelinin sehpa merkezlerinden 70 [mm] çapa ve Ahmed modeli içine doğru 70 [mm] derinliğe sahiptir. Bununla birlikte, tekerlekler de aynı merkezden 60 [mm] çapta ve 50 [mm] derinlikte oluşturulmuştur. Hareketsiz ve hareketli analizlerin hepsinde ana koordinat sistemi Ahmed modelinin ön iki tekerlek merkezlerinin orta noktasındadır (Şekil 3.1).

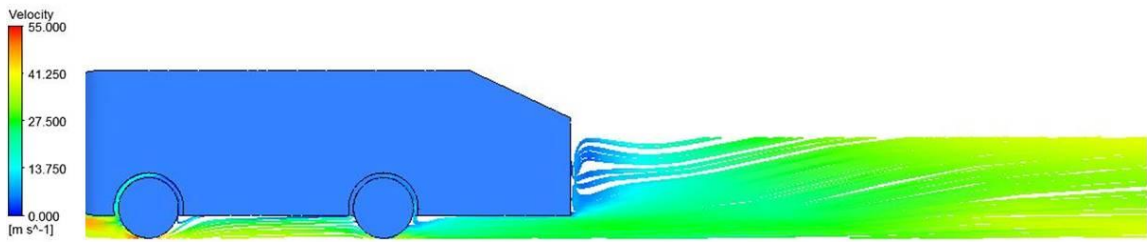
Durgun araç için, ağ yapısı bağımsızlığı sağlanan ağ yapısı kullanılmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2-3.3). Gerçekleştirilen analiz sonucuna göre, durgun araç 0.35617 değerinde sürüklenme katsayısına sahiptir. Bunun yanı sıra, 4 tekerleğe toplamda etki eden kaldırma kuvveti negatif yönde 6.7 [N] değerindedir.



Şekil 3.1. Tekerlekli Ahmed modeli geometri detayı.



Şekil 3.2. Tekerlekli Ahmed modeli hareketsiz model analiz sonucu, XY düzlemi  $Z=0$  [mm] konumunda  $0$  [m/s] -  $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.



Şekil 3.3. Tekerlekli Ahmed modeli hareketsiz model analiz sonucu, XY düzlemi  $Z=169.5$  [mm] konumunda  $0$  [m/s]- $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.

### 3.1. Tekerlek Hareketi

Duvar hareketi içeren HAD analizlerinden birincisi olan tekerlek hareketi için tekerlek eklenmiş Ahmed modeli kullanılmıştır. Ağ yapısı bağımsızlığı sağlanmış olan ağ yapısı kullanılan tekerlek hareketi analizi için geçerliliği sağlanan model kurulumunda değişiklikler

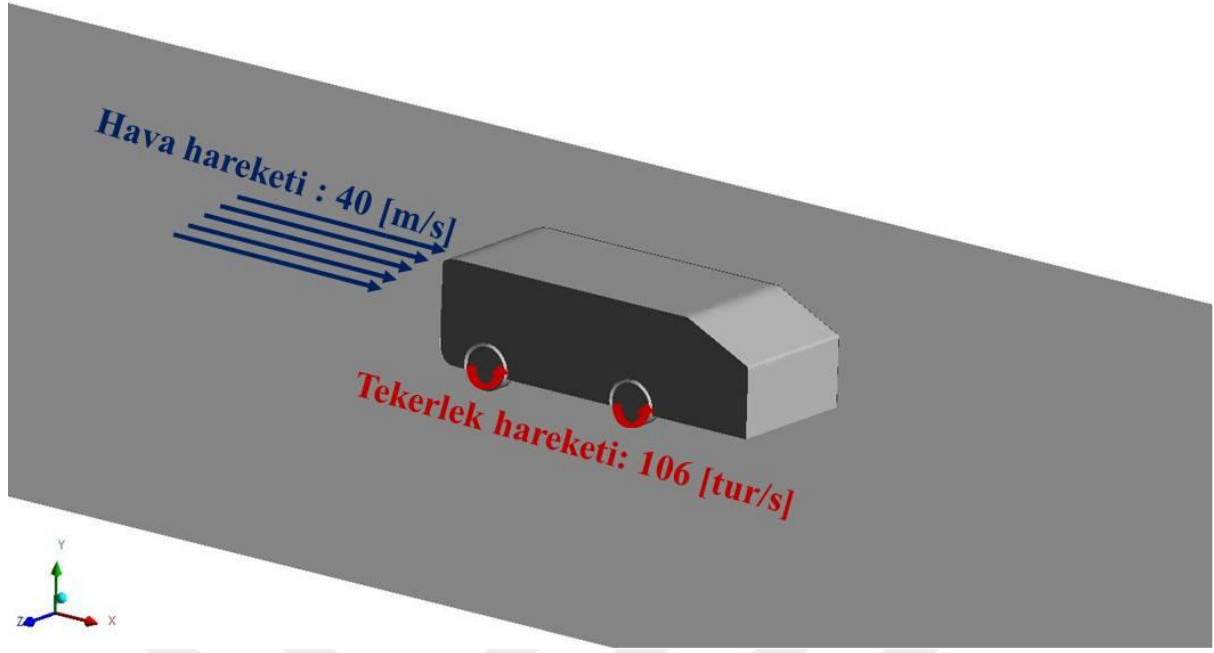
yapılması gerekmektedir. Model geçerliliği sağlanan analizlerde olduğu gibi, tekerlek hareketi analizi için de SST  $k - \omega$  türbülans modeli kullanılmıştır. Bununla birlikte, 40 [m/s] hız ile hava girişi verilirken, 4 tekerlek de kendi merkez eksenini etrafında dönecek şekilde hareketli duvar özelliği tanımlanmıştır. Hareketli duvar işleminin sağlanması için, her tekerlek için kendi merkezinde saniyede 106 tur atacak şekilde tek dereceli serbestlik belirlenmiştir.

Duvar hareketi içeren analizler için dinamik ağ yapısı özelliğinin kullanılması gerekmektedir. Hareketli duvar uygulamalarında dinamik ağ yapısı, akım hacmine ait ağ yapısının şekil değişikliğini sağlamaktadır. Dinamik ağ yapısı uygulamaları için hareket edecek duvarın hareket detaylarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu detayların belirlenmesi için kullanıcı tanımlı fonksiyonların (user-defined functions, UDFs) ya da 6 dereceli serbestlik (six degree of freedom, 6DoFs) özelliklerinin tanımlanması gerekmektedir (ANSYS 17.0 Users Manual Guide).

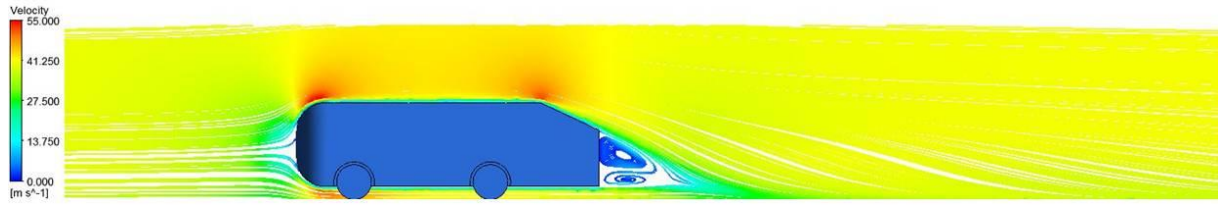
Dinamik ağ yapısı işlemlerinde, her tekerlek, hareketi sağlanacak olan katı gövde yüzeyi olarak tanımlanmıştır. Hareketi sağlanacak olan tekerleklerin sahip olduğu yüzey ağ elemanlarının akım hacmi ağ elemanları ile bağlantılarının sağlanması için akım hacmine ait ağ yapısı deforme olacak ağ hacmi olarak tanımlanmıştır.

Gerçekleştirilen analiz sonucuna göre, 4 tekerleğin de dönüşü sağlanmıştır (Şekil 3.4). Tekerlek dönüşü araç alt kısmında ön tekerlek hizasından itibaren hava akım hızını azaltmıştır. Bu sebepten, araç arka alt yüzeyinden akım kopma bölgesinde oluşan alt girdap yoğunluğu azalmıştır (Şekil 3.5). Bununla birlikte, tekerlek boşluklarında yeni girdaplar oluşmuştur (Şekil 3.6). 4 tekerleğe toplamda etki eden kaldırma kuvveti negatif yönde 9.948 [N] değerindedir. 4 tekerleğin de hareketi sonucunda, tekerlekli Ahmed modeli 0.3606 değerinde sürüklenme katsayısına sahiptir.

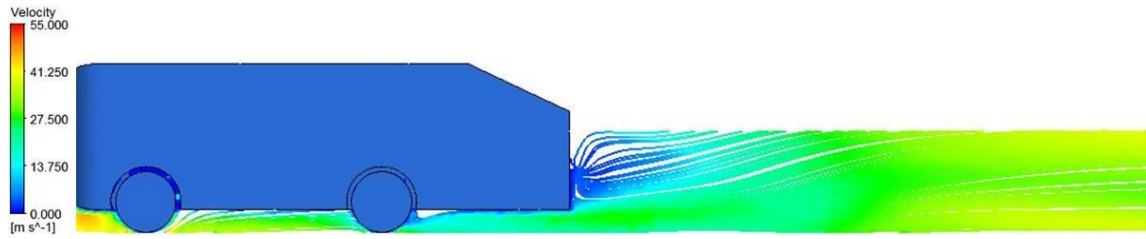




Şekil 3.4. Tekerlekli Ahmed modelinin tekerlek ve hava hareketi.



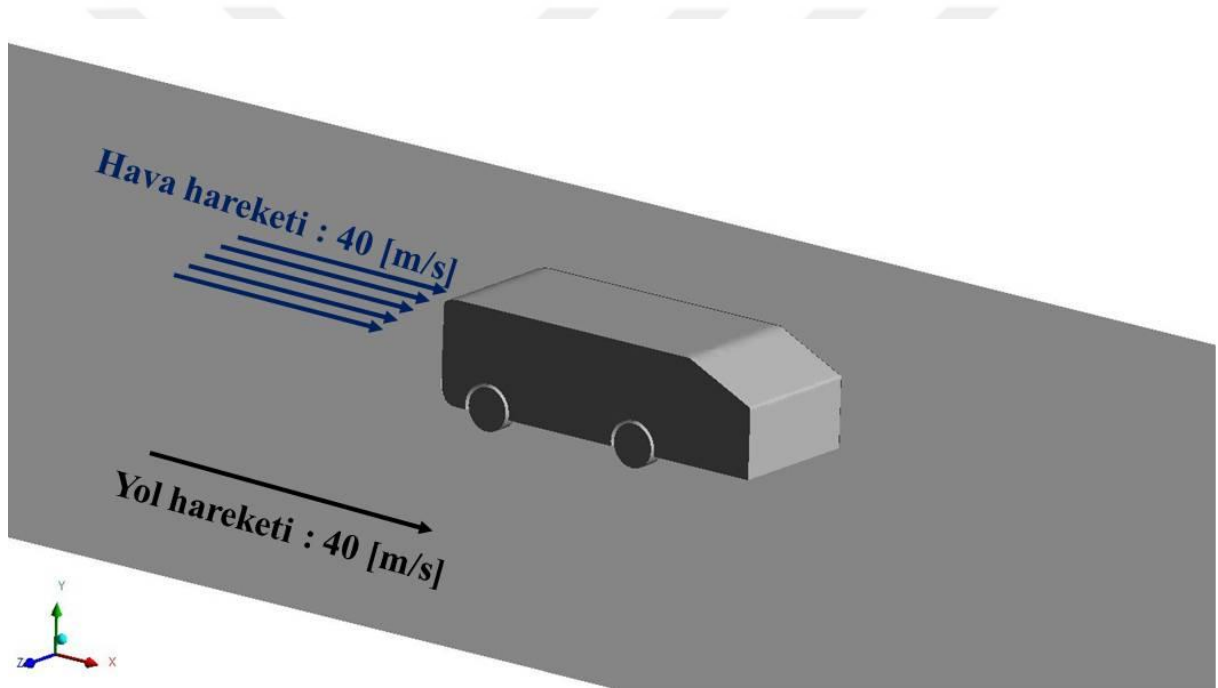
Şekil 3.5. Tekerlekli Ahmed modeli tekerlek hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi  $Z=0$  [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.



Şekil 3.6. Tekerlekli Ahmed modeli tekerlek hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi  $Z=169.5$  [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.

### 3.2. Yol Hareketi

Kıyaslama analizlerinden ikincisi olan yol hareketi analizi için de tekerlekli Ahmed modeli kullanılmıştır. Bu analizde tekerlekler sabit tutulmuş ve yol hareketi sağlanmıştır. Tekerlek analizinde hareketi sağlanan duvarlar sıklaştırma kutusu içerisinde kaldığı için ağ yapısında değişikliğe gidilmemiştir. Fakat, yol hareketi analizinde hareketli olan duvar (yol) ve çevresi için de sıklaştırma gerekmiştir. Önceki analizlerde kullanılan sıklaştırma kutusuna ait ağ yapısı özellikleri hareketli yol duvarına sıklaştırma olarak uygulanmıştır. SST  $k - \omega$  türbülans modeli kullanılarak, 40 [m/s] hız ile giriş ve 40 [m/s] hız ile hareket eden yol duvarı tanımlanmıştır (Şekil 3.7).



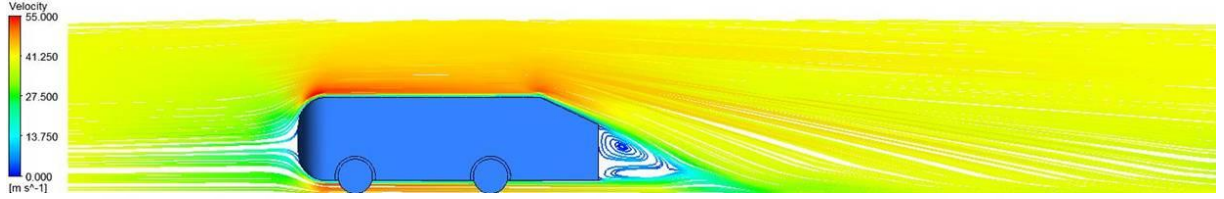
Şekil 3.7. Tekerlekli Ahmed modelinin yol ve hava hareketi.

Yol hareketi için de ihtiyaç duyulan dinamik ağ yapısı işlemlerinde, hareketi sağlanacak olan katı gövde yüzeyi olarak yol tanımlanırken, akım hacmine ait ağ yapısı deforme olacak ağ hacmi olarak tanımlanmıştır.

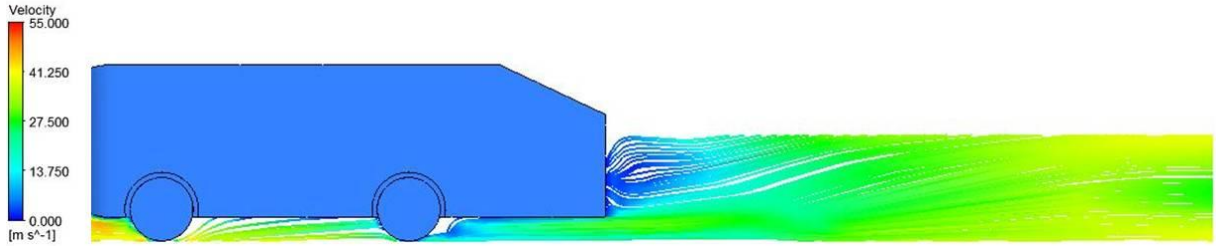
Yol hareketinin sağlanması, araç alt kısmındaki hava akımının hızının sabit modele göre artmasına sebep olmuştur. Bu yüzden, araç alt arka akım ayrılma bölgesinde hızlı akım sayesinde alt girdap bölgeleri araç yüzeyinden uzaklaşırken, üst girdap bölgeleri araç yüzeyine yaklaşmıştır (Şekil 3.8). Bununla birlikte, sadece yol hareketinin sağlanmış olduğu

bu analizde, tekerlek yüzeylerinde akım ayrılmalarının düzenli olmadığı görülmüştür (Şekil 3.9).

Yol hareketi için gerçekleştirilen analiz sonucuna göre, 4 tekerleğe etki eden toplam kaldırma kuvveti negatif yönde 8.026 [N] değerindedir. Yol hareketi sonucunda, Ahmed modelinin sürüklenme katsayısı 0.3950 değerindedir.



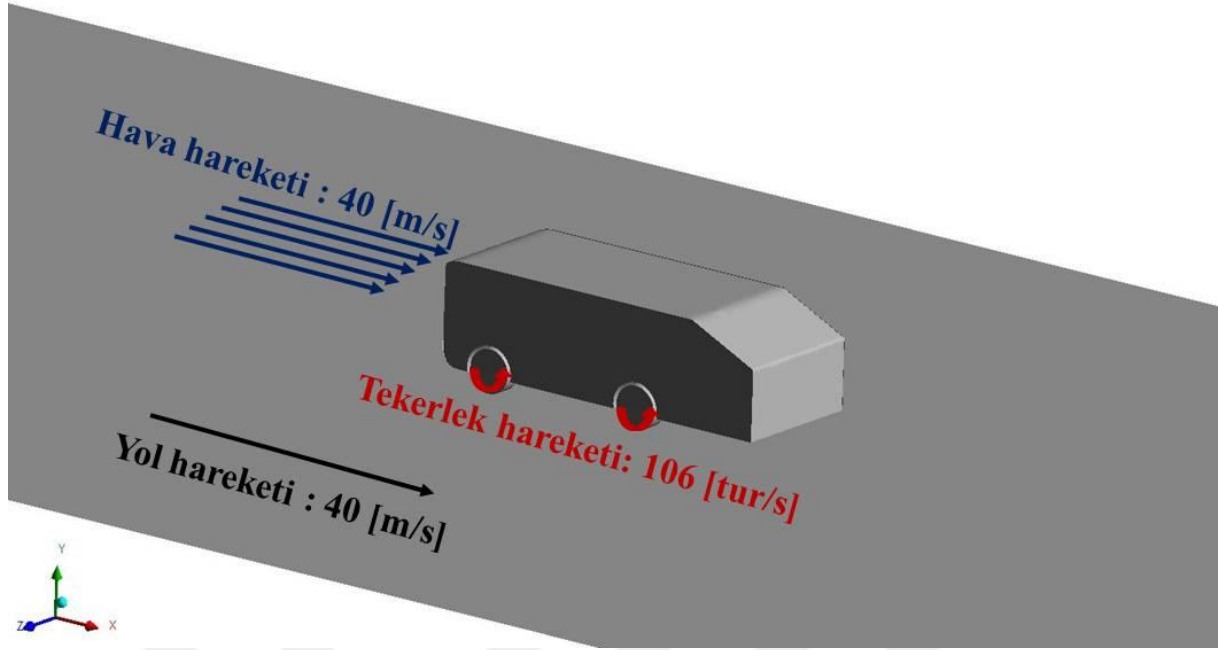
**Şekil 3.8.** Tekerlekli Ahmed modeli yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi Z=0 [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.



**Şekil 3.9.** Tekerlekli Ahmed modeli yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi Z=169.5 [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.

### 3.2. Tekerlek ve Yol Hareketi

Kıyaslama analizlerinden sonuncusu olan tekerlek ve yol hareketi analizinde tekerleklerin ve yolun hareketi sağlanmıştır. Tekerlek ve yol hareketi analizinde, yol hareketi analizinde yol hareketinin sağlanması adına ağ yapısında oluşturulan ek sıkılaştırma bölgesi kullanılmıştır. Diğer kıyaslama analizlerinde kullanılan sınır koşulları hariç diğer model koşulları uygulanarak, 40 [m/s] hız ile giriş, 40 [m/s] hız ile hareket eden yol duvarı ve 106 [tur/s] dönüş sağlanan tekerlek duvarları tanımlanmıştır (Şekil 3.10).

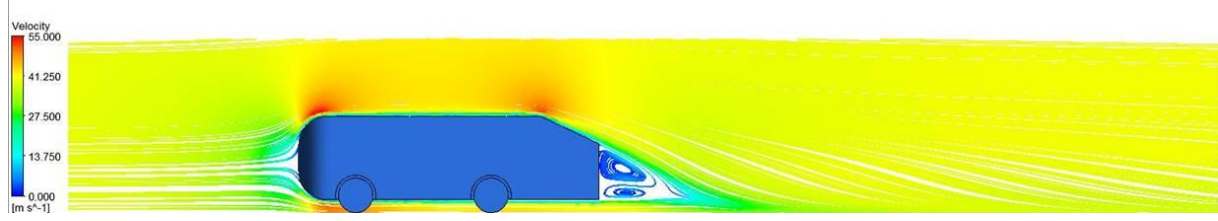


Şekil 3.10. Tekerlekli Ahmed modelinin yol, tekerlek ve hava hareketi.

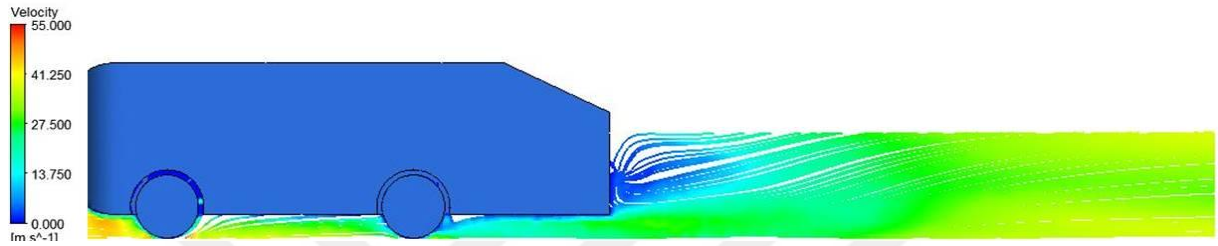
Dinamik ağ yapısı işlemlerinde, yol hareketi ve tekerlek hareketi analizlerinde tanımlanan katı gövde yüzeyleri ortak aynı analiz içerisinde tanımlanmıştır. 4 tekerlek ve yol, hareketi sağlanacak olan katı gövde yüzeyi olarak, akım hacmi ise deforme olacak ağ hacmi olarak tanımlanmıştır.

Hem tekerlek hem de yol hareketinin sağlanmış olması, araç altı hava akımının hızının artmasına ve arka alt girdap bölgesinin araç yüzeyinden uzaklaşmasına ve arka üst girdap bölgesinin araç yüzeyine yaklaşmasına sebep olmuştur (Şekil 3.11). Bununla birlikte, hava akımının tekerlek yüzeyinden kopan akımın, yol hareketinin de sağlanması sayesinde tekerlek boşluklarında beklenmedik girdaplar oluşturmamasının engellendiği görülmüştür (Şekil 3.12).

Tekerlek ve yol hareketi için gerçekleştirilen analiz sonucuna göre, 4 tekerleğe etki eden toplam kaldırma kuvveti negatif yönde 10.005 [N] değerindedir. Yol hareketi sonucunda, Ahmed modelinin sürüklenme katsayısı 0.3567 değerindedir.



**Şekil 3.11.** Tekerlekli Ahmed modeli tekerlek ve yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi  $Z=0$  [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.



**Şekil 3.12.** Tekerlekli Ahmed modeli tekerlek ve yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi  $Z=169.5$  [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.

#### 4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu tez kapsamında, aerodinamik çalışmalarda kullanılan yol testleri ve rüzgar tüneli testleri arasında oluşabilecek farklar ve bu testlerin gerçek koşullara uygunluğu üzerine HAD yöntemi kullanılarak çalışılmıştır. Bu çalışmalar, Anadolu Üniversitesi ve Eskişehir Teknik Üniversitesi kaynaklarından, akademik lisanslı ANSYS FLUENT yazılımı ve 48 mantıksal işlemcisi ve 512 GB yüklü belleği bulunan iş istasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Aerodinamik çalışmalardaki farklılıkların en büyük etkeni, çalışmalarda kullanılan geometridir. Karmaşık araç geometrilerinde çok küçük geometrik değişkenler bulunmaktadır. Geometri üzerindeki en küçük değişiklik, aracın aerodinamik performansını tamamen değiştirebilmektedir. Bu çalışmalar kapsamında, genel aerodinamik performans testlerinde geometrik değişkenlerden uzaklaşarak, test yöntemleri üzerine durulmuştur. Bu sebepten, en basit araç geometrilerinden olan Ahmed modeli kullanılmıştır. Geometri detayları ve referans aerodinamik performans verileri modelin hem fiziksel hem de nümerik deneyleri gerçekleştirilen çalışmadan (Melie ve diğerleri, 2011) alınmıştır.

Gerçekleştirilen ilk çalışma, üzerinde çalışılacak olan geometriye ait model kurulumunun geçerliliğinin sağlanması adına, kurulumu gerçekleştirilen modele ait analiz sonuçları ve

literatürden elde edilen Ahmed modeline ait fiziksel deney sonuçları kıyaslanmıştır. Bu süreç içerisinde, hem literatürün desteği hem de tecrübe ile edinilmiş bilgiler kullanılarak ön model kurulumu gerçekleştirilmiştir. Akımın katı cidardan ayrılma bölgeleri, aerodinamik performans analizleri için en büyük öneme sahip olan akım bölgeleridir. Akım, katı cidardan düzensiz bir şekilde ayrılarak (separation), ayrılma bölgesinin hemen ardından ana hava akım hattından ayrılmış yeni girdap bölgeleri (vertex zone) oluşturur. Bu durum, araç arka yüzeyinde düşük basınç bölgeleri oluşturmaktadır. Bu durum, aerodinamik kuvvetlerden sürüklenme kuvvetinin oluşumunda %90 etkili olan ve basınç farklarından dolayı oluşan, temel sürüklenme kuvvetinin (base drag) ortaya çıkmasındaki en büyük etkidir. Bu sebepten, model kurulumunda akımın katı cidar yüzeyinde, katı cidardan ayrılma süreçlerinin çözümlenmesinde ve serbest akım bölgelerinde başarılı olan SST  $k - \omega$  türbülans modeli PISO algoritması ile birlikte kullanılmıştır.

Kurulumu gerçekleştirilen ön model için ağ yapısı bağımsızlığı çalışması yapılmıştır. Ağ yapısı bağımsızlığının sağlanması için ilk aşamada 5 farklı ağ yapısı kullanılmıştır. Kullanılan bu ağ yapıları, sadece ağ yapısı sıklaştırma kutularındaki ağ eleman boyutları küçültülerek oluşturulmuş ve bu ağ yapılarının analiz sonuç parametrelerinden olan sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Model geçerliliği sağlanması çalışmalarında kullanılan referans sonuç verilerine göre %12.57 oranında hata payına sahip ağ yapısı oluşturularak, ağ yapısının sıklaştırma bölgesinde iyileştirme yapılarak hata payı %4.77' düşürülmüştür. Gerçekleştirilen ağ yapısı bağımsızlığı çalışmalarında, hata payı ile birlikte analiz süresi ve analiz dosya boyutu da kıyaslanarak en uygun ağ yapısı olarak M4 isimlendirilmesi yapılmış ağ yapısı seçilmiştir.

Tek parametresi değiştirilerek oluşturulan ağ yapıları tetrahedral yapıya sahiptir. Tetrahedral ağ yapılarının sınır yüzeyleri veya katı cidar ile bağlantısının sağlandığı bölgelerde komşu yüzey sayılarının 3 veya daha az olması ve 1 komşu ağ elemanı ile yalnızca 1 düğüm noktası sayesinde birleşmesi durumları, çözümlmeyi zorlaştırırken hata oluşturabilmektedir. Bu sebepten, yüzey sayısı çok olan ve komşu elemanlar ile 2 düğüm noktası ile bağlantı kurabilen polyhedral ağ yapısı kullanılmıştır. Ağ yapısı bağımsızlığının sağlandığı M4 ağ yapısı tetrahedral yapıdan polyhedral yapıya dönüştürülmüştür. Bu sayede, ağ eleman sayısı 2.8 milyondan 500 bine kadar düşürülmüş ve hesaplama gücü azaltılmıştır. Bunun yanı sıra, polyhedral ağ yapısı (M6) sayesinde model hata payı %1.13'e kadar düşürülmüştür.

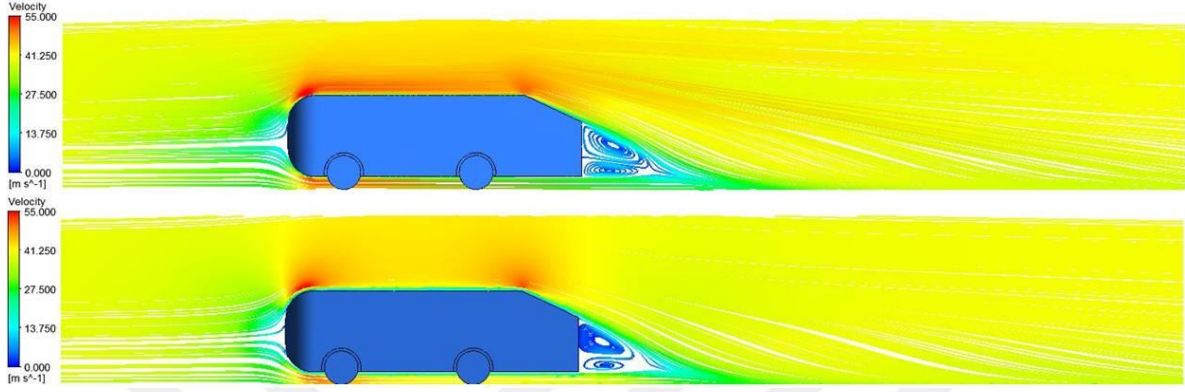
Ağ yapısı bağımsızlığı sağlanan ön model kurulumu geçerliliğinin sağlanması adına, aerodinamik performans analizlerinde büyük önem arz eden akım ayrılma bölgelerinin (separation zone) çözümlenmesinde başarılı olan standart  $k - \omega$  ve SST  $k - \omega$  türbülans modelleri kıyaslanmıştır. M4 ağ yapısı kullanılan bu kıyas analizlerinde, akım ayrılma bölgelerinin çözümlenmesinde başarılı olan standart  $k - \omega$  türbülans modeli kullanılan analiz sonucuna göre sürüklenme katsayısındaki hata payı %6.27 iken, hem akım ayrılma bölgeleri için  $k - \omega$  modelini hem de serbest akım bölgelerinin çözümlenmesinde başarılı olan  $k - \varepsilon$  modelini içeren SST  $k - \omega$  türbülans modeli kullanılan analiz sonucuna göre sürüklenme katsayısındaki hata payı %3.55'tir. Türbülans modeli çalışmasının sonuçları da, aerodinamik çalışmalarda SST  $k - \omega$  türbülans modelinin üstünlüğünü göstermiştir. Bu sebepten, gerçekleştirilen diğer tüm analizlerde SST  $k - \omega$  türbülans modeli kullanılmıştır.

Model geçerliliğinin sağlanmasından sonra, sehpalı Ahmed modelinin sehpa bölgelerinde tekerlek boşlukları ve tekerlekler oluşturulmuştur. Geçerliliği %1.13 hata payı ile sağlanan model kurulumu kullanılarak, tekerlekli Ahmed modeli yalnızca hava hareketi sağlanarak analiz edilmiştir. 40 [m/s] hıza sahip hava akımı durgun haldeki tekerlekli Ahmed modeli tekerleklerinin hareketsiz olması sebebi ile herhangi bir etki ile karşılaşmadan tekerlek boşluklarına girmektedir. Tekerlek boşluklarındaki hava akımının hareketi gerçek koşulları sağlamayıp, yalnızca o bölgedeki geometrik detaylara göre hareket etmektedir.

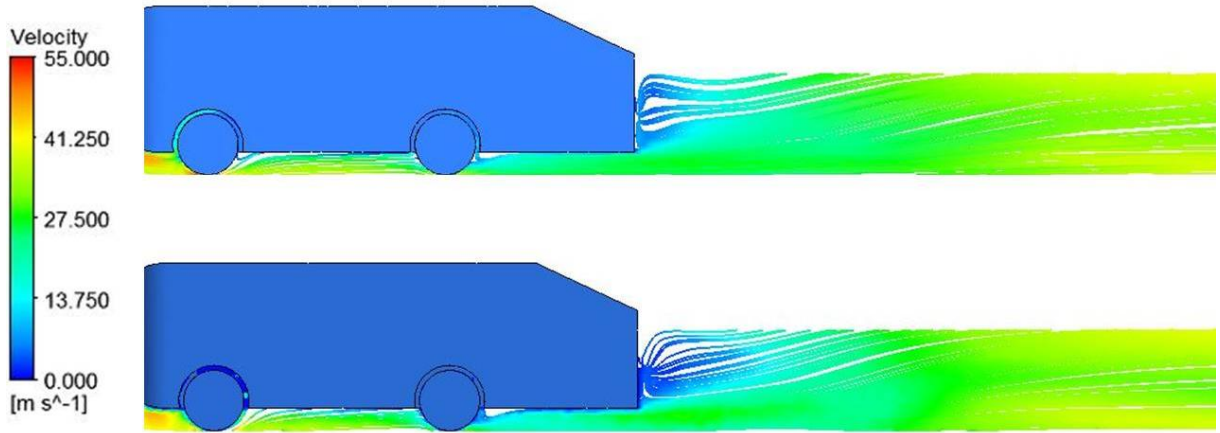
Tekerlekleri oluşturulan Ahmed modeli kullanılarak, tekerlek hareketi, yol hareketi ve hem tekerlek hem yol hareketi sağlanmış olan 3 farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Yalnızca tekerlek hareketinin sağlanması durumunda, tekerlek etkisi ile hava akımı tekerlek boşluklarına girmektedir. Bu durum, durgun Ahmed modeli analizlerine göre gerçek koşullara daha yakındır. Tekerlek hareketinin etkisi ile tekerleklerle etki eden kaldırma kuvveti negatif yönde %48.90 artarken, tüm araç gövdesine etki eden kaldırma kuvveti pozitif yönde %2.20 artmıştır. Bunun en büyük sebebi; tekerlek hareketi sayesinde hava akımı tekerleklerin ön bölgesinden itibaren tekerlek dönüşü etkisi altında kalmasıdır. Tekerlek ön bölge ve araç alt bölgesinde akım hızı hareketsiz Ahmed modeline göre düşmüş olup, tüm araç üzerine etki eden kaldırma kuvvetini pozitif yönde artırmıştır (Şekil 4.1). Tekerleklerin hareketi ile birlikte, hava akımının ön tekerlek ön bölgesinde hızı azalarak ön tekerlek çevresinde yeni girdaplar oluşturmuştur (Şekil 4.2-4.3). Bu girdapların ve arka tekerleklerin etkisi sayesinde araç alt bölgesinde oluşan yeni girdaplar (Şekil 4.4), hava akımının araç arka yüzeyinden ayrıldığı noktada arka alt bölge girdapların araç yüzeyine olan etkisini azaltırken, arka üst girdap bölgesinin etkisini artırmıştır (Şekil 4.5-4.6). Girdapların etkisi ile araç arka



yüzeyindeki toplam basınç artmıştır ve bu sebepten, yalnızca tekerlek hareketi sağlanan tekerlekli Ahmed modelinin sürüklenme katsayısı hareketsiz tekerlekli Ahmed modeline göre %1.26 oranında artmıştır (Tablo 3.1).

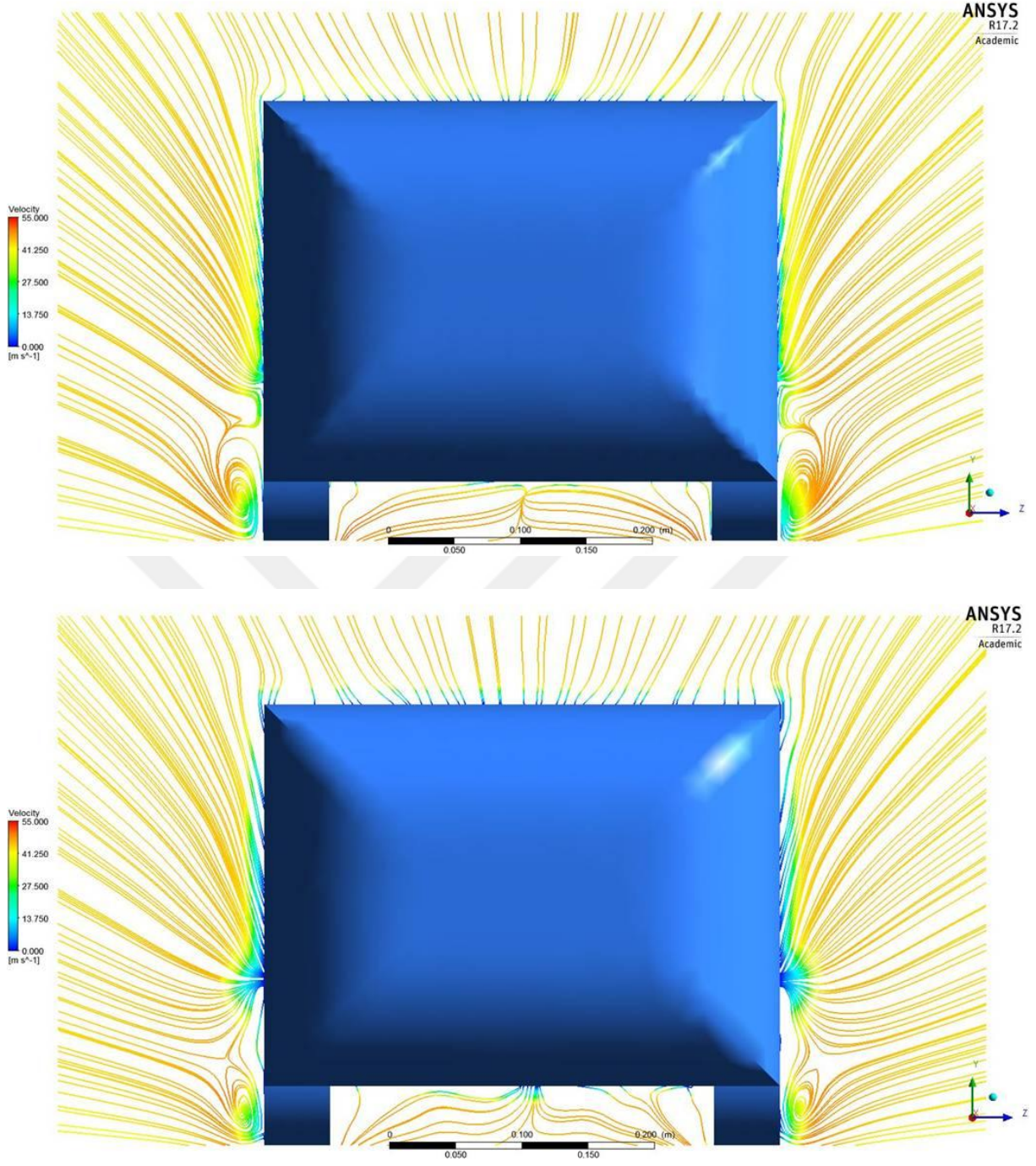


**Şekil 4.1.** Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi  $Z=0$  [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.

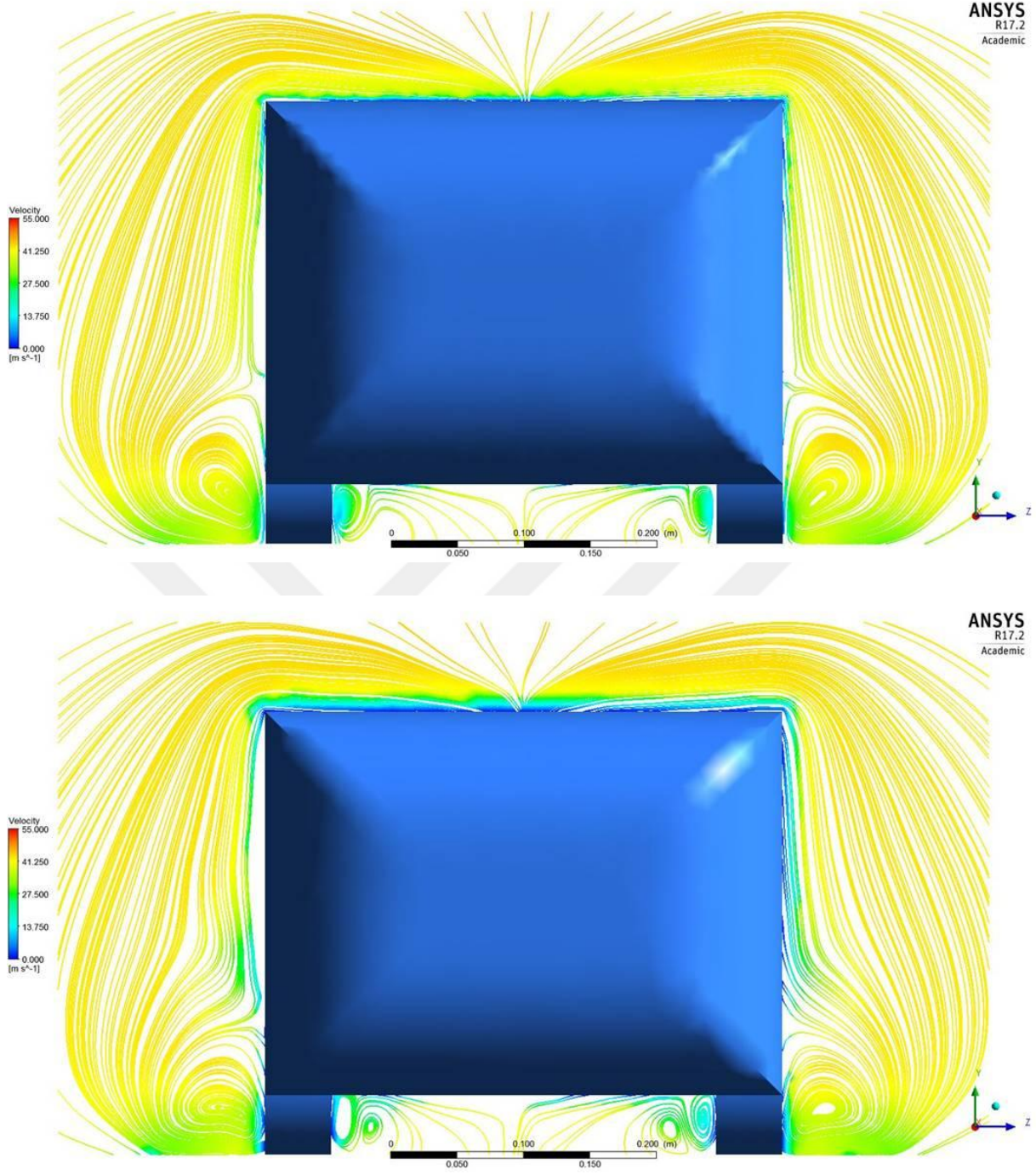


**Şekil 4.2.** Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi  $Z=169.5$  [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.



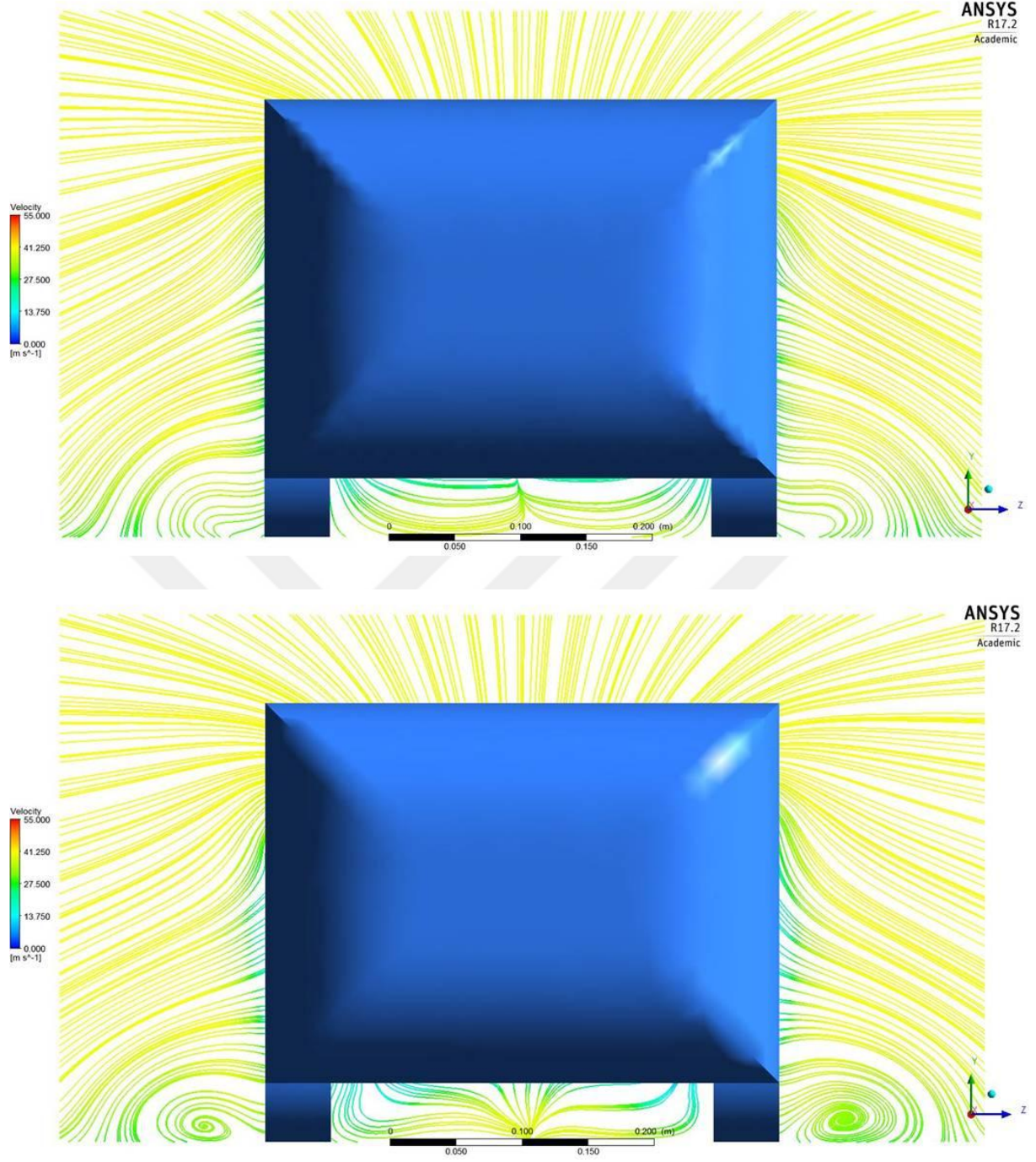


**Şekil 4.3.** Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi  $X=0$  [mm] konumunda  $0$  [m/s] -  $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.



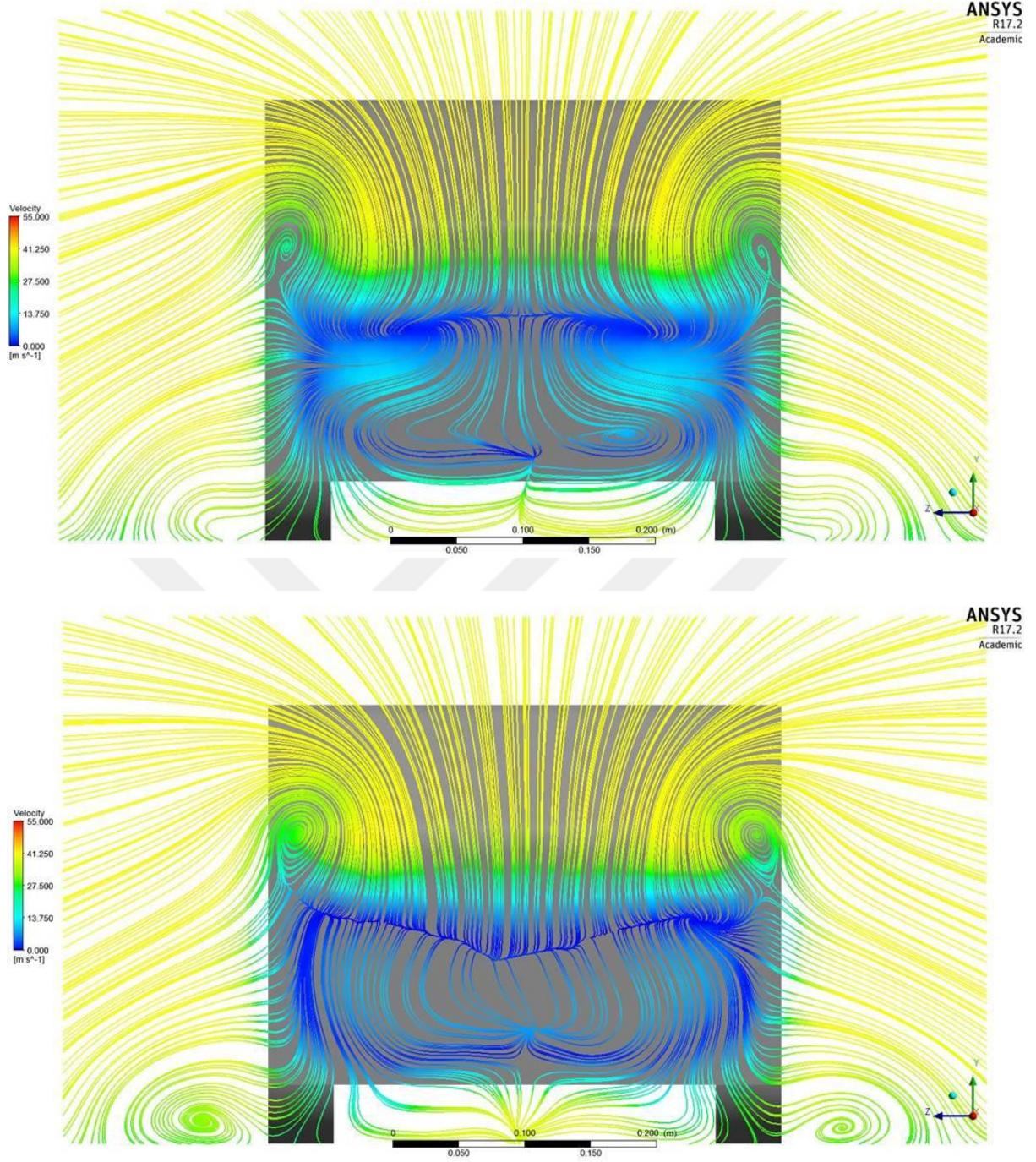
**Şekil 4.4.** Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi  $X=470$  [mm] konumunda  $0$  [m/s]- $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.





**Şekil 4.5.** Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi  $X=940$  [mm] konumunda  $0$  [m/s]- $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.

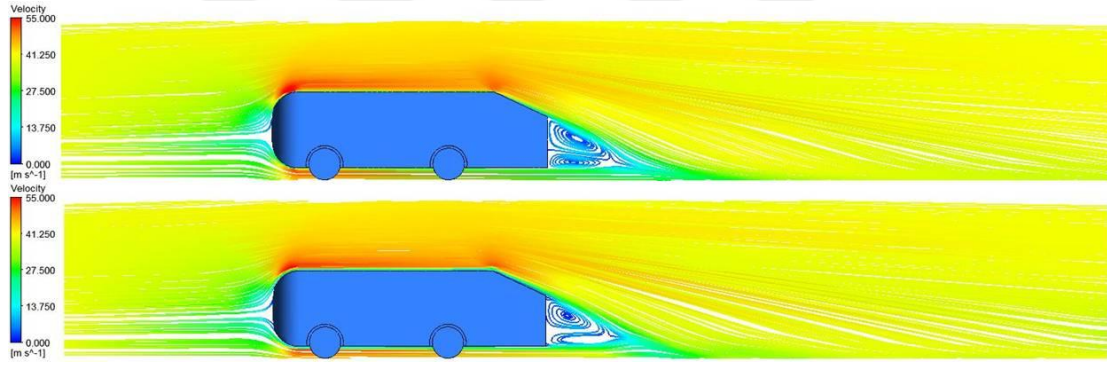




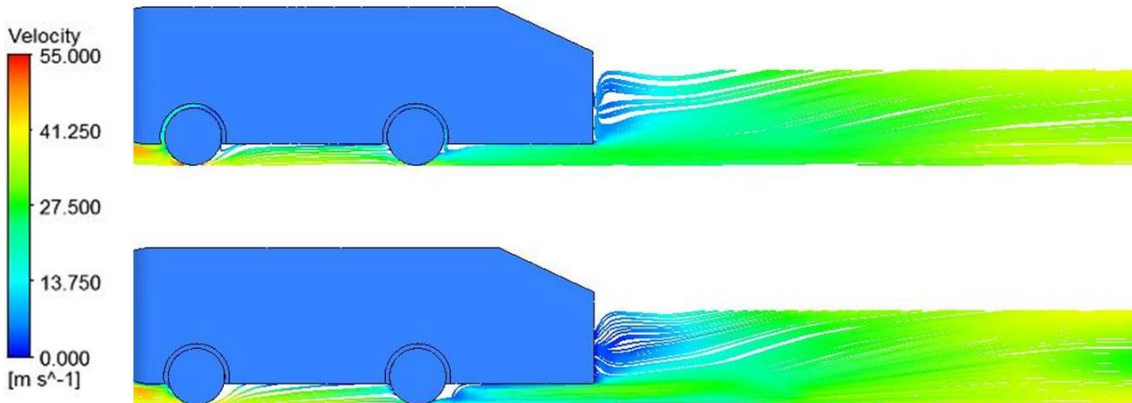
**Şekil 4.6.** Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi  $X=940$  [mm] konumunda  $0$  [m/s]- $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri (araç arka görünüm).

Kıyaslama analizlerinden ikincisi olan yol hareketinin sağlanması durumunda, tekerleklerle etki eden kaldırma kuvveti negatif yönde %20.13 artarken, tüm araca etki eden toplam kaldırma kuvveti %2.84 oranında azalmıştır. Yalnızca yol hareketi sağlanan Ahmed modelinde, hava akımı hızının araç alt bölgesinde hızlandığı görülmüştür (Şekil 4.7). Bu

sebepten, araç alt bölgesinde basınç düşmüş ve kaldırma kuvveti azalmıştır. Hareketsiz Ahmed modelinde olduğu gibi, tekerlek etkisinde kalmayıp, gerçek koşullarda beklenen araç alt bölgesindeki girdaplar oluşmamış ve hava akımı tekerlek geometrisinden ayrılırken büyük durağanlık alanı (stagnation area) oluşturmuştur (Şekil 4.8). Yalnızca tekerlek geometrisinin etkisi ile tekerlek çevresinde oluşan girdap bölgeleri yol hareketinin sağlanması ile ön tekerlek çevresinde etkisini yitirmiş olup, arka bölgelere ilerledikçe etkisi daha da düşmüştür (Şekil 4.9-4.12). Yol hareketi analizinde tekerlek dönüş etkisi olmadığı için oluşamayan girdap bölgeleri ve araç alt kısmındaki akım hızının artışı nedeni ile araç arka alt girdap bölgesinin ötelenemeyip, arka üst girdap bölgesini araç yüzeyine yaklaştırmış ve araç arka yüzeyine etki eden basıncı artırmıştır. Bunun sonucu olarak; hareketsiz Ahmed modeline göre, yol hareketi sağlanan Ahmed modelinin sürüklenme katsayısı %10.92 oranında artırmıştır (Tablo 3.1).

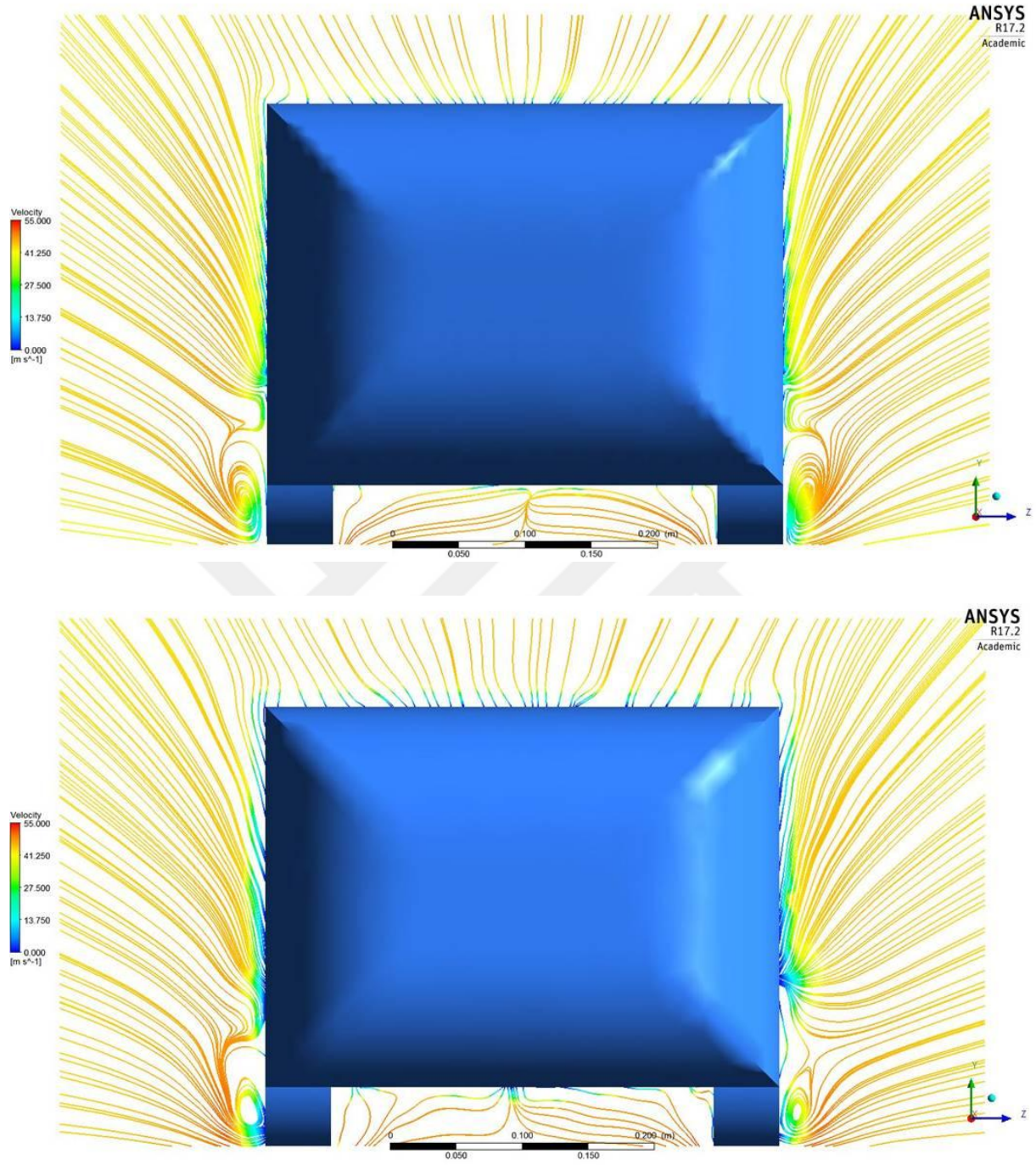


**Şekil 4.7.** Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi  $Z=0$  [mm] konumunda  $0$  [m/s] -  $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.

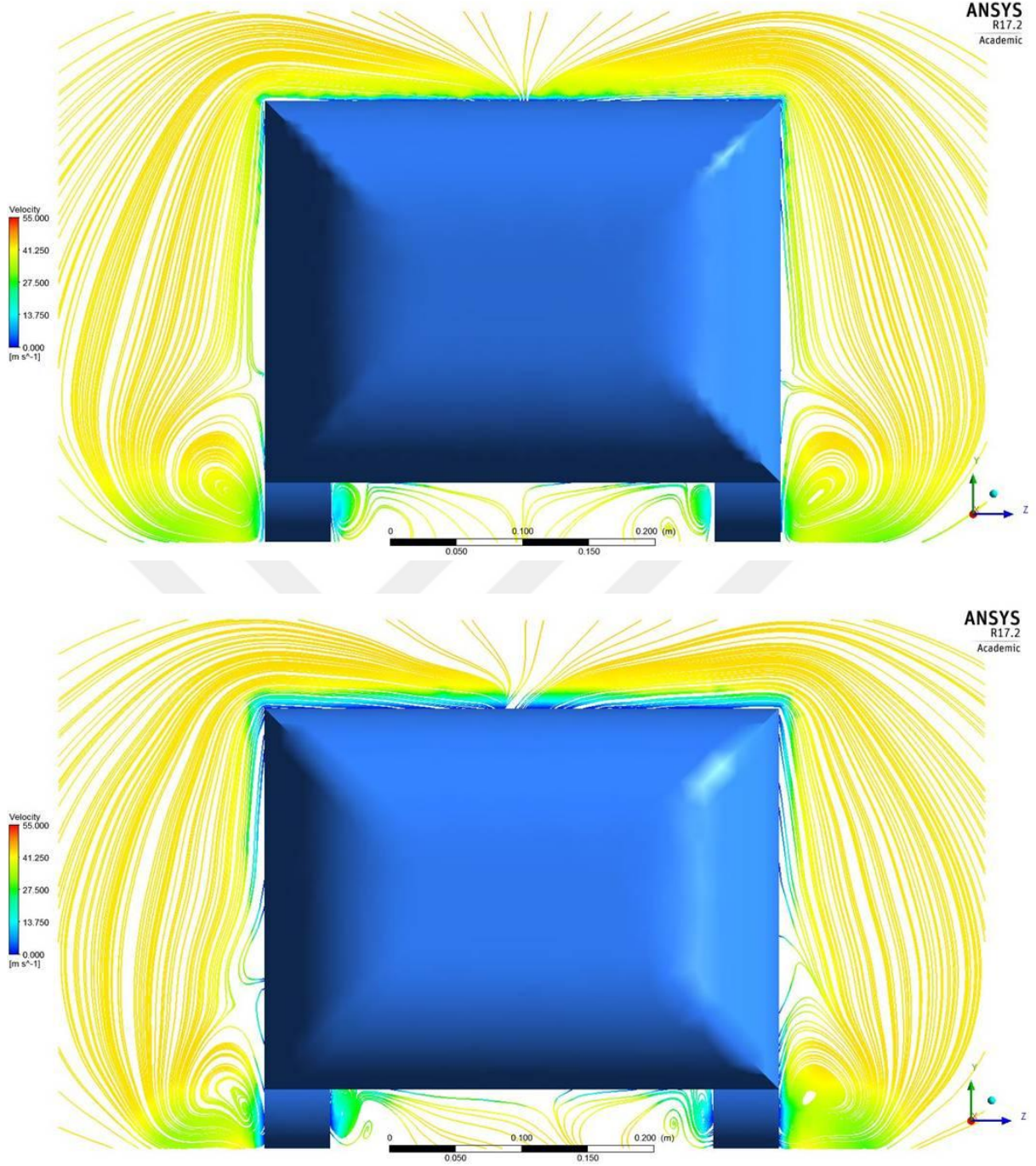


**Şekil 4.8.** Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi  $Z=169.5$  [mm] konumunda  $0$  [m/s] -  $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.



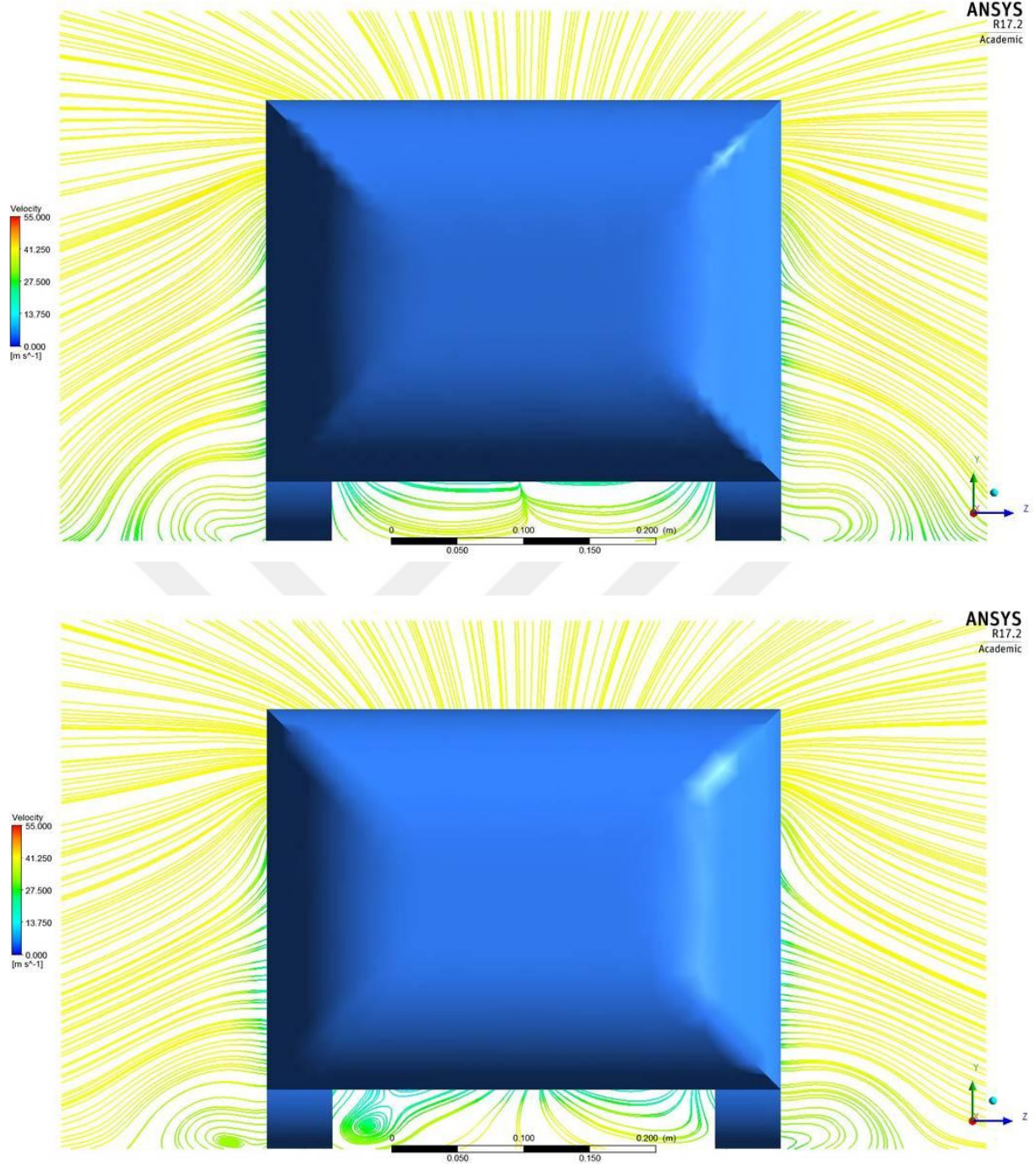


Şekil 4.9. Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi  $X=0$  [mm] konumunda 0 [m/s]-55 [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.



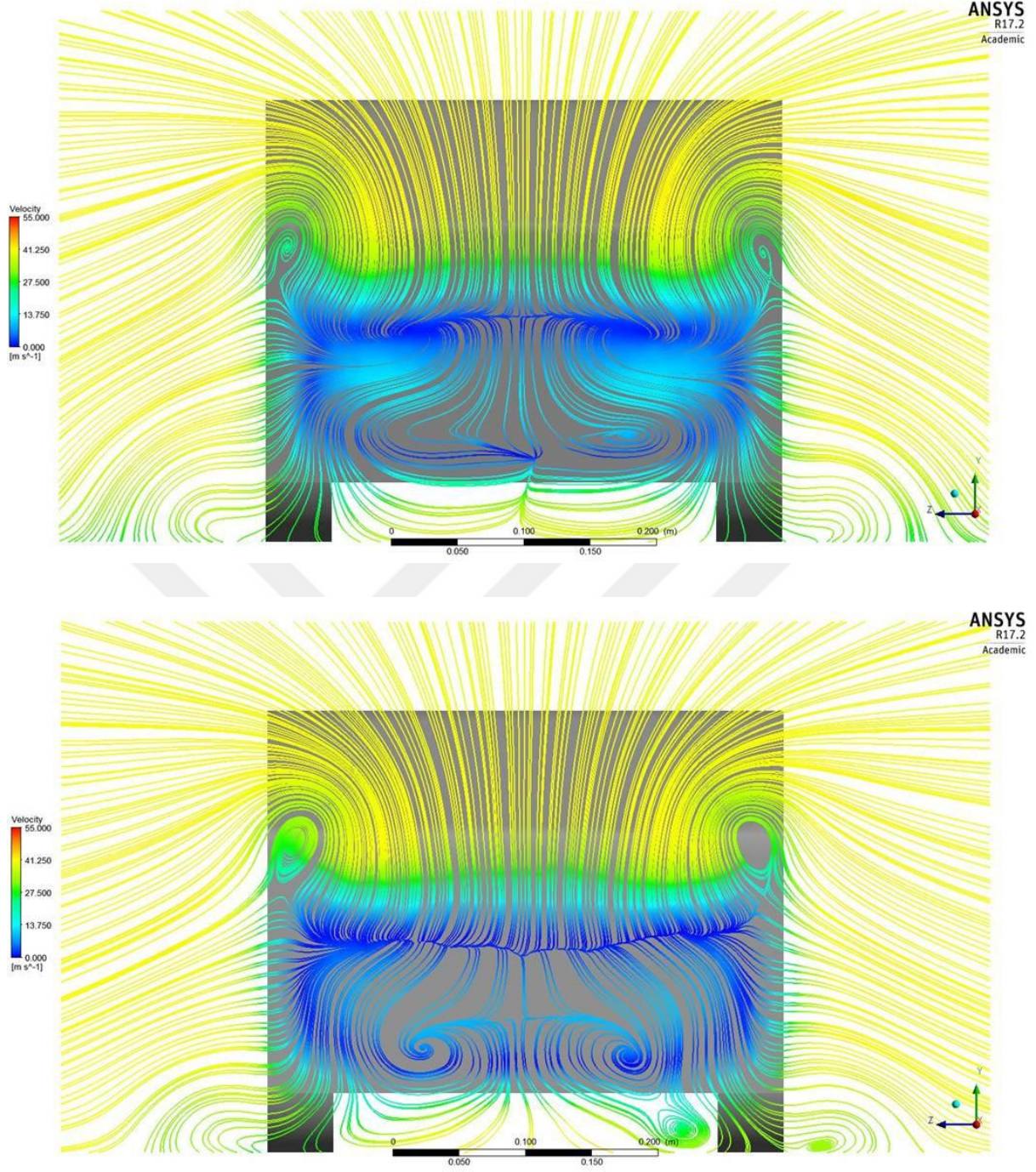
**Şekil 4.10.** Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi  $X=470$  [mm] konumunda  $0$  [m/s]- $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.





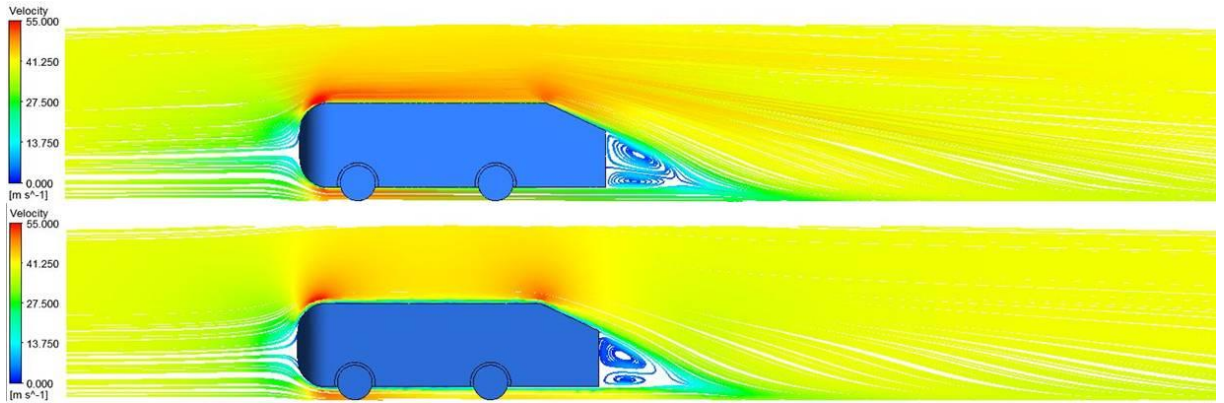
**Şekil 4.11.** Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi  $X=940$  [mm] konumunda  $0$  [m/s]- $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.



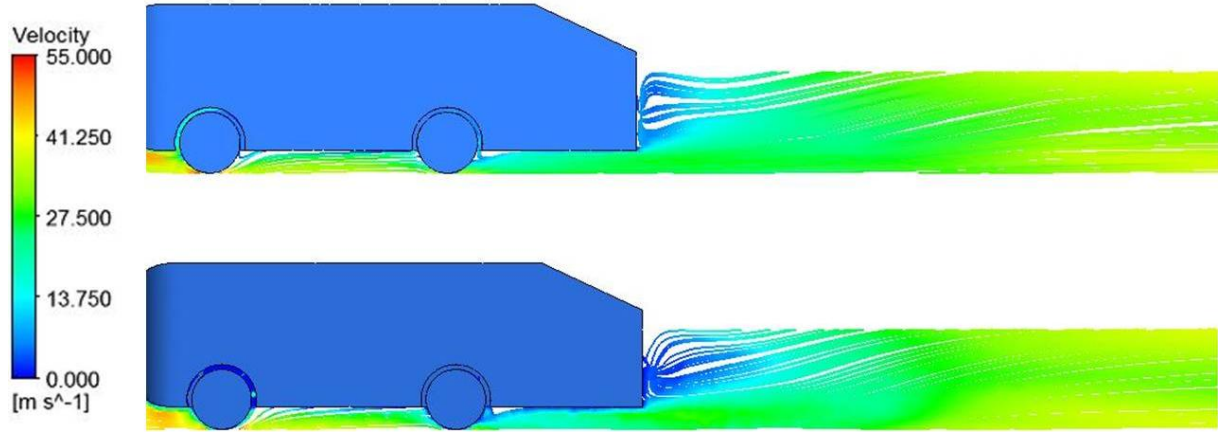


**Şekil 4.12.** Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi  $X=940$  [mm] konumunda  $0$  [m/s]- $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri (araç arka görünüm).

Tekerlek ve yol hareketinin aynı anda sağlandığı Ahmed modeli analizinde ise, tekerleklere etki eden kaldırma kuvveti negatif yönde %49.75 oranında artarken, tüm araç geometrisine etki eden toplam kaldırma kuvveti %5.50 oranında azalmıştır. Bu analizde, yol hareketi etkisi ile araç alt bölgesindeki hava akım hızı artarken, tekerlek hareketinin etkisi ile azalmaktadır. Bu sayede, hava akımı araç alt ön bölgesinde yüksek hıza ulaşır alt arka ayrılma noktasına ulaştığında düşük hızda olmak yerine, düşük bir hız aralığında değişim göstererek araç alt arka ayrılma bölgesine hareketsiz Ahmed modeline göre daha yüksek hız ile ulaşmaktadır (Şekil 4.13). Araç alt bölgesindeki akım hız dağılımına bakıldığında zaman, alt bölgedeki hızın artışı basıncın azaldığını gösterir. Bu sebepten, tekerlek ve yol hareketi sağlanmış olan Ahmed modeline etki eden kaldırma kuvveti hareketsiz Ahmed modeline göre daha düşüktür. Hem yol hem de tekerlek hareketinin sağlanmış olması, hava akımının tekerleklerden ayrıldığı bölgelerde büyük durağanlık alanları oluşturmadığı ve tekerlek boşluklarında düşük hızlarda girdaplar oluşturduğu görülmüştür (Şekil 4.14). Yol ve tekerlek hareketleri etkisi altında kalan hava akımı ön tekerlekler çevresinde yeni girdap bölgeleri oluşturmuş ve bu girdap bölgeleri arka tekerlek çevresinde büyüyerek hem tekerlek iç kısımlarında hem de dış kısımlarında araç yüzeyine yaklaşmıştır (Şekil 4.15-4.16). Bu etki sayesinde, araç arka alt girdap bölgesi ötelenmiş ve üst girdap bölgesi de araç yüzeyine yaklaşarak sıkışmıştır (Şekil 4.17-4.18). Tüm bu etkilerden dolayı, yol ve tekerlek hareketi sağlanmış Ahmed modelinin sürüklenme katsayısı hareketsiz Ahmed modeline göre %0.17 oranında artmıştır (Tablo 3.1).

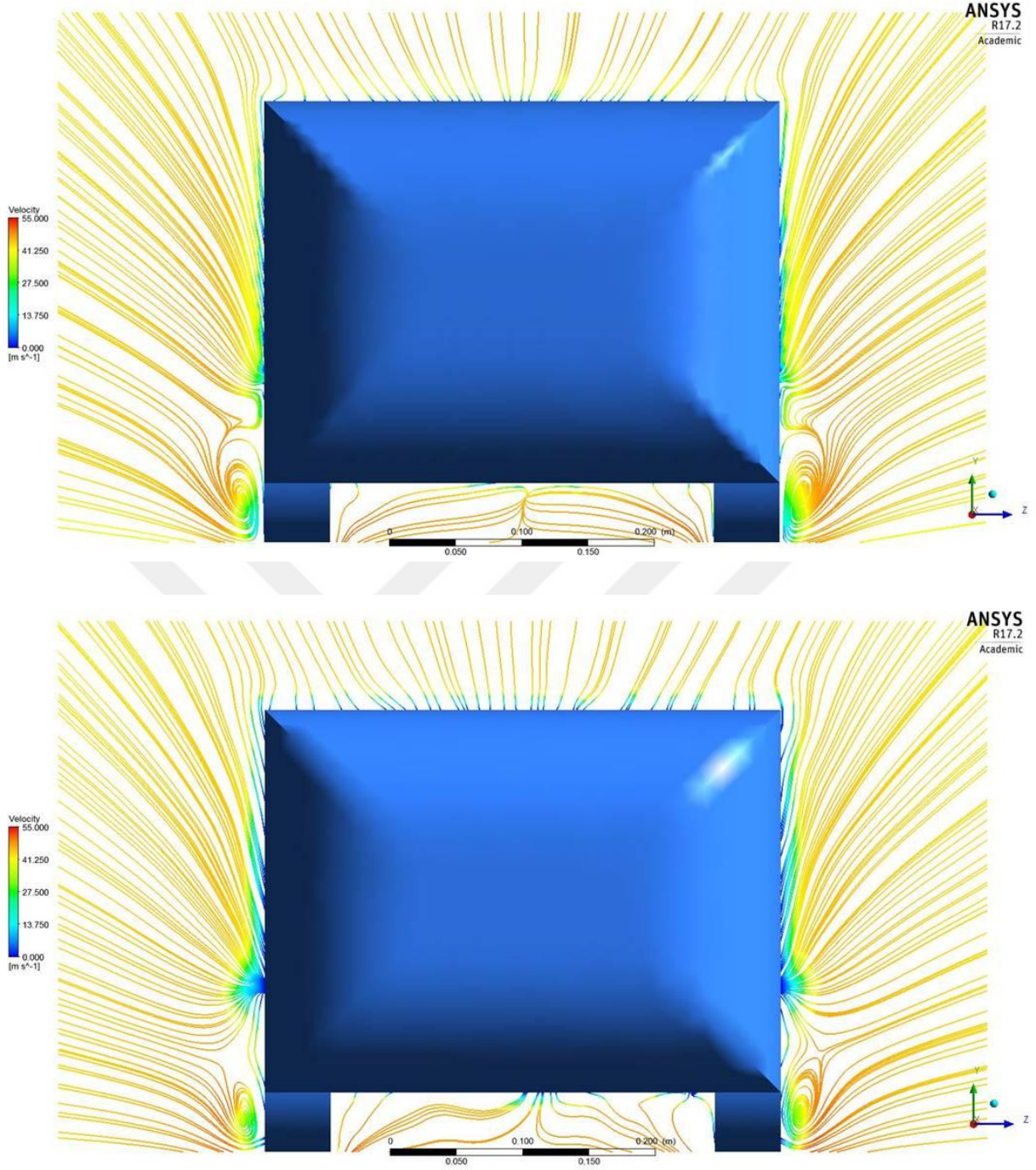


**Şekil 4.13.** Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek ve yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi  $Z=0$  [mm] konumunda  $0$  [m/s]- $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.

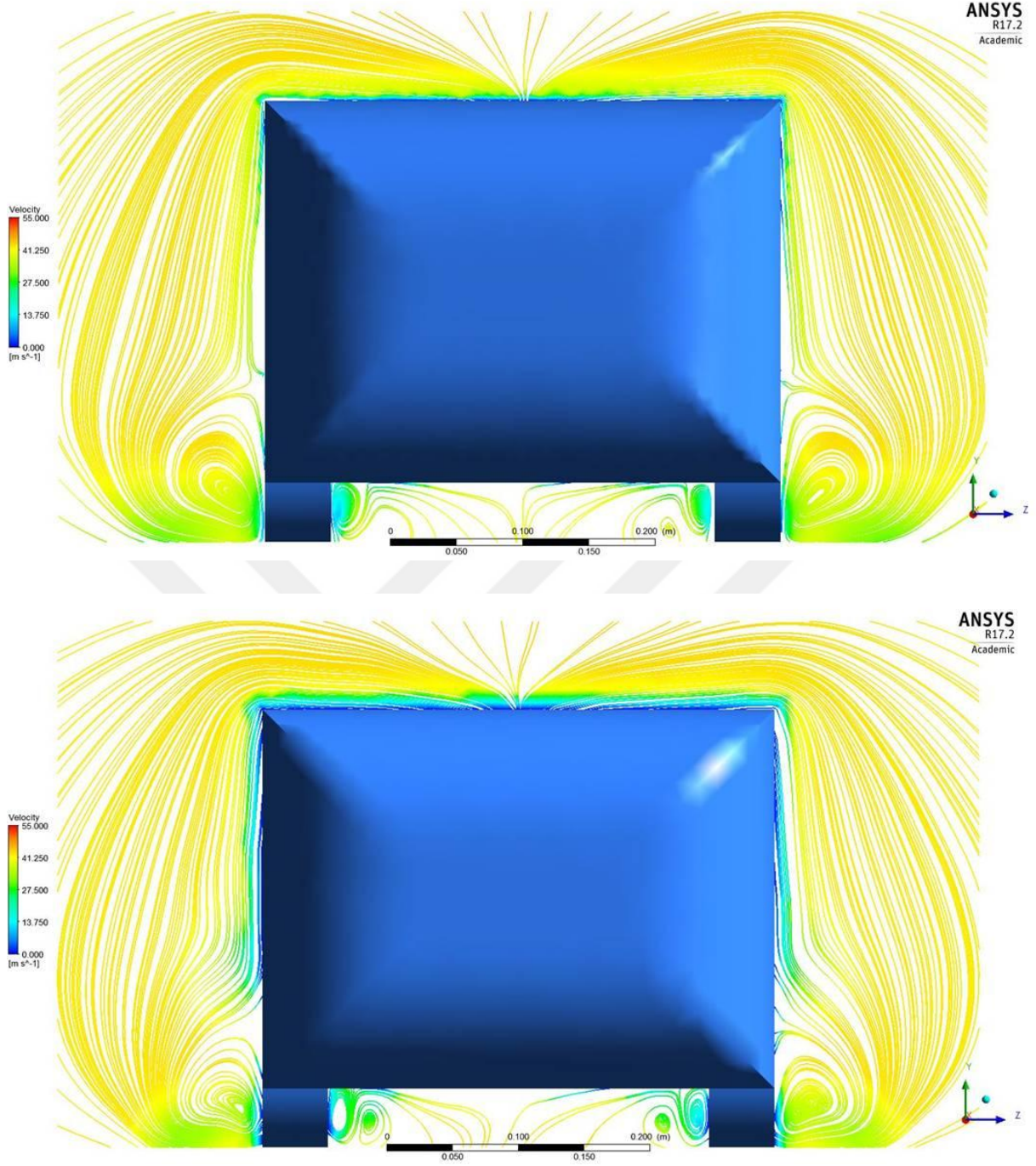


**Şekil 4.14.** Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek ve yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, XY düzlemi  $Z=169.5$  [mm] konumunda  $0$  [m/s]- $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.



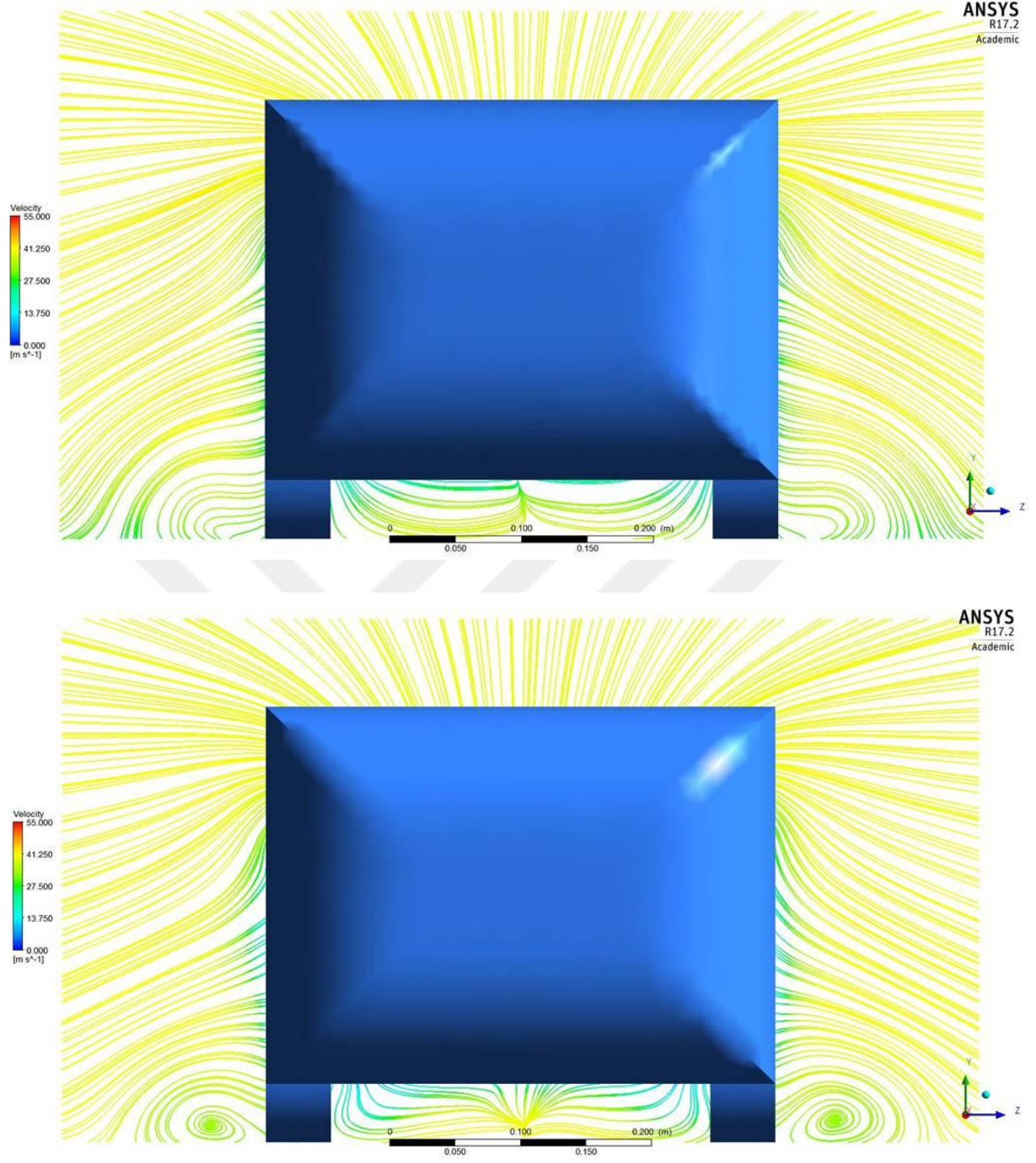


**Şekil 4.15.** Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek ve yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi  $X=0$  [mm] konumunda  $0$  [m/s]- $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.



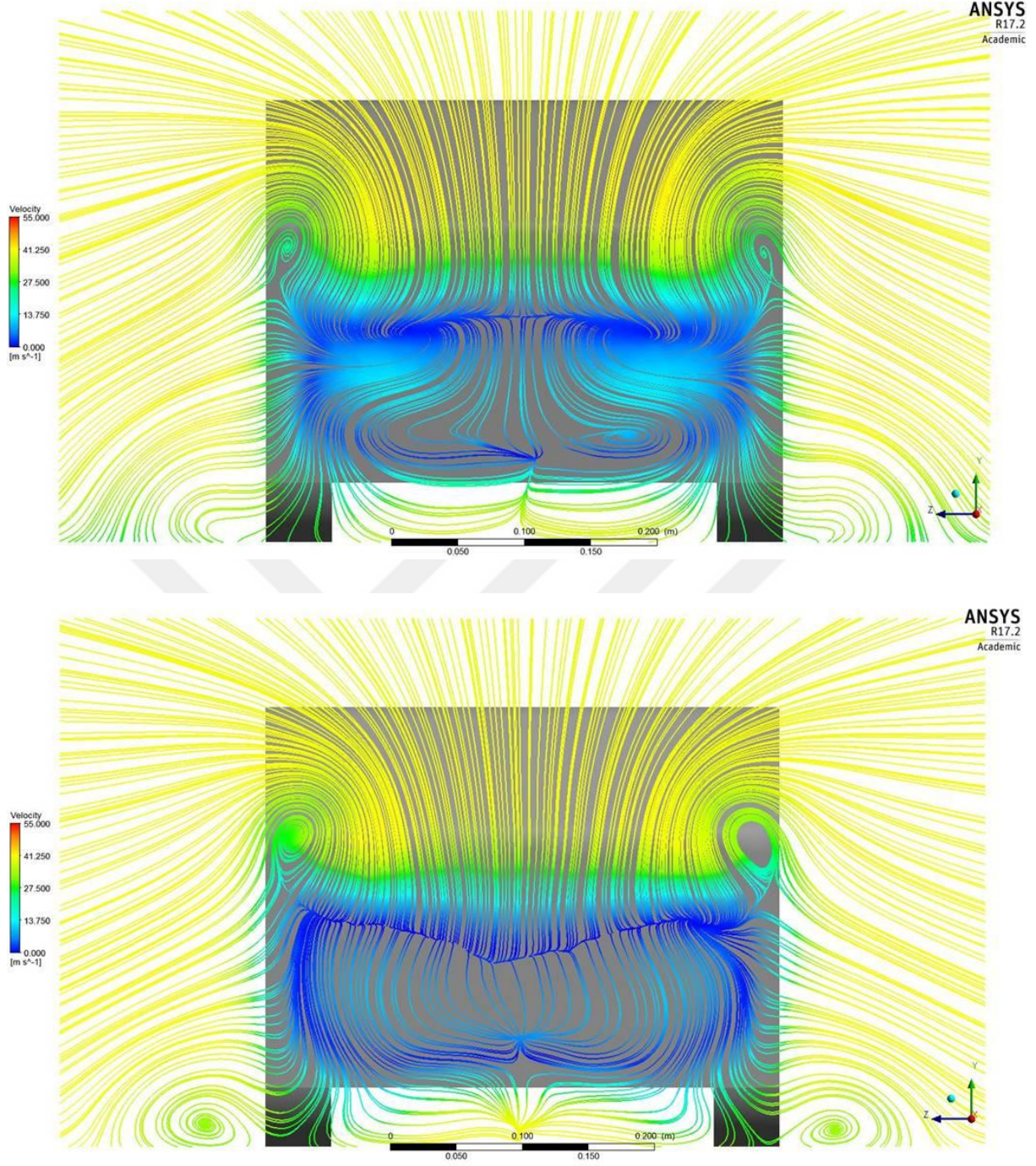
**Şekil 4.16.** Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek ve yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi  $X=470$  [mm] konumunda  $0$  [m/s] -  $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizimleri.





**Şekil 4.17.** Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) tekerlek ve yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi  $X=940$  [mm] konumunda  $0$  [m/s] -  $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri.





**Şekil 4.18.** Tekerlekli Ahmed modeli (a) hareketsiz model ve (b) yol hareketi sağlanmış olan model analiz sonucu, YZ düzlemi  $X=940$  [mm] konumunda  $0$  [m/s]- $55$  [m/s] aralığında hız parametrelili akım çizgileri (araç arka görünüm).

**Tablo 4.1.** Kıyaslama analizleri sonuç verilerindeki değişim.

| Model                 | Toplam F <sub>1</sub> Değişimi | Tekerleklerle Etki<br>Eden F <sub>1</sub> Değişimi | Sürüklenme<br>Katsayısındaki Değişim |
|-----------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Hareketsiz            | %0 (47.434 [N])                | %0 (-6.681 [N])                                    | %0 (0.3561)                          |
| Tekerlek Hareketi     | +%2.20                         | -%48.90                                            | +%1.26                               |
| Yol Hareketi          | -%2.84                         | -%20.13                                            | +%10.92                              |
| Tekerlek-Yol Hareketi | -%5.50                         | -%49.75                                            | +%0.17                               |

Bu tez kapsamında, aerodinamik performans testlerinde gerçekleştirilen her değişikliğin performans sonuç verilerine etkisi incelenmiş olup, gerçekleştirilen değişikliklerin ayrı ayrı uygulanması durumu ve değişikliklerin bir arada uygulanması durumunun etkilerinin çok farklı olduğu görülmüştür. Yalnızca tekerlek hareketinin uygulanması durumu sürüklenme katsayısında küçük bir fark yaratırken, yol hareketinin sağlanması durumu büyük fark yaratmaktadır. Fakat, bu iki ayrı duvar hareketinin bir arada sağlanması durumu sürüklenme katsayısında çok daha küçük bir fark yaratmaktadır. Bu durum, gerçek koşullara uygunluğunun sağlanmaya çalışıldığı aerodinamik performans analizlerinde yapılan uygulamaların belirli bir seviyede kalmaması gerektiğini göstermektedir. Yalnızca tekerlek hareketinin sağlanması ya da ölçekli model kullanılması gibi durumların, testleri gerçek koşullara yaklaştırdığını söylemek imkansızdır. Gerçek koşulların sağlanması için gerçek koşullarda olması beklenen tüm uygulamaların gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Unutulmamalıdır ki; bu tez kapsamında gerçekleştirilen tüm HAD analizlerinde, kontrollü aerodinamik performans çalışmalarında sıklıkla kullanılan Ahmed modeli kullanılmıştır. Basit bir geometrinin kullanılması durumu, bu çalışmalarda geometri etkenini minimale indirmektedir. Aerodinamik performans test detaylarının incelendiği bu çalışmalarda basit bir geometri kullanımı ile elde edilen veriler, yalnızca sonuç verilerinde oluşabilecek değer değişikliklerini vurgulamaktadır. Tüm bu çalışmalarda karmaşık detaylara sahip araç geometrisinin kullanılması durumu, sonuç verilerinde değer değişikliği sağlayabilir. Fakat, sonuç değerlerinde yaşanan değişimlere engel olmayacaktır. Geometri değişiminin yanı sıra, kullanılan türbülans modelinin değiştirilmesi de aynı şekilde sonuç değerlerinde küçük farklılıklar yaratacaktır.

Bu tez kapsamındaki tüm çalışmalar aerodinamik performans testlerinin gerçek duruma uygunluğunun sağlanması gerekliliğini göstermektedir. Fakat, hem yol testlerinde hem de rüzgar tüneli testlerinde uygulanan koşullar fiziksel olarak büyük güçlükler içermektedir ve



gerçek koşulları kontrollü bir şekilde sağlayamamaktadır. Fiziksel testlerde gerçek koşulların sağlanması adına yapılan tüm çalışmalar zaman ve maliyet açısından büyük yükler ve riskler taşımaktadır. Açık kaynak veya lisanslı yazılımların her geçen gün gelişmesi ile birlikte, aerodinamik çalışmalarda HAD analizleri büyük önem kazanmaktadır. Fiziksel testler ile kıyaslandığında çok daha küçük zorlukları olsa da, HAD analizleri de zaman ve maliyet problemleri içermektedir. Açık kaynak kodlara göre çok daha hızlı geliştirilen yüksek maliyetli lisanslı yazılımların ve güçlü iş istasyonlarının kullanılması ve analiz süresi gibi problemler bulunmaktadır. Fiziksel ve sayısal ortamda yapılan aerodinamik performans testleri kıyaslandığında, sayısal ortamda gerçekleştirilen testlerin daha kullanışlı olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalardan elde edilen tüm sonuçların yanı sıra, HAD analizlerinin önemi de vurgulanmaktadır. Özellikle maliyet açısından bakıldığı zaman; aerodinamik performans analizleri için gerçekleştirilen HAD analizleri ile gerçek koşullara uygunluğun sağlanması diğer test yöntemlerine göre daha gerçekçi ve olağandır.

Tüm bunların yanı sıra, bu tez kapsamında gerçekleştirilen tüm çalışmalar, HAD yöntemi ile gerçek koşulları sağlanmış aerodinamik performans analizlerinin gerçekleştirilmesi için bir kapı daha açmıştır. Tüm bu çalışmaların devamında, farklı yanal rüzgarlar, araç hareketi ve ısı değişimleri gibi koşullar üzerinde parametrik çalışmalar gerçekleştirilecek olup, gerçek koşullara uygunluğun sağlanması üzerine çalışılacaktır.

## KAYNAKÇA

- Ahmad, N. E., Abo-Serie, E. F., & Gaylard, A. (2010). Mesh optimization for ground vehicle aerodynamics. *CFD Letters*, 2(1), 54-65.
- Ahmed, S. R., Gawthorpe, R. G. and Mackrodt, P. A. (1985). Aerodynamics of Road-and Rail Vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 14(4-6), 319-392.
- Anderson, J. D. (1992). Governing equations of fluid dynamics. In *Computational fluid dynamics* (pp. 15-51). Springer, Berlin, Heidelberg.
- ANSYS 17.0 Users Manual Guide.
- ANSYS, Inc. (2006). Modeling Turbulent Flows –Introductory FLUENT Training (Fluent User Services Center).
- Axon, L., Garry, K., & Howell, J. (1998). An evaluation of CFD for modelling the flow around stationary and rotating isolated wheels. *SAE transactions*, 205-215.
- Duell, E. G., Kharazi, A., Muller, S., Ebeling, W., & Mercker, E. (2010). The BMW AVZ wind tunnel center (No. 2010-01-0118). *SAE Technical Paper*.
- Fuat, K. A. Y. A. ve KARAGÖZ, İ. (2007). Girdaplı Akışlarda Türbülans Modellerinin Uygunluğunun İncelenmesi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 12(1).
- Garry, K. P., Cooper, K. R., Fediw, A., Wallis, S. B., Wilsden, D. J. (1994). The Effect on Aerodynamic Drag of The Longitudinal Position of a Road Vehicle Model in a Wind Tunnel Test Section. *SAE Transactions*, 478-489.
- Hucho, W. and Sovran, G. (1993). Aerodynamics of Road Vehicles. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 25(1), 485-537.
- İçingür, Y. ve Solmaz, H. (2011). Düşük Hızlı Bir Rüzgar Tünelinde Değişik Otomobil Modellerinin Aerodinamik Direnç Katsayılarının Belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(2).
- Kandasamy, S., Duncan, B., Gau, H., Maroy, F., Belanger, A., Gruen, N. and Schäufele, S. (2012). Aerodynamic Performance Assessment of B<MW Validation Models using Computational Fluid Dynamics (No. 2012-01-0297). *SAE Technical Paper*.
- Katz, J. (1995). *Race Car Aerodynamics*. Robert Bentley.
- Krajnović, S. and Davidson, L. (2005). Influence of Floor Motions in Wind Tunnels on The Aerodynamics of Road Vehicles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93(9), 677-696.
- Le Good, G. M. and Garry, K. P. (2004). On The Use of Reference Models in Automotive Aerodynamics (No. 2004-01-1308). *SAE Technical Paper*.

- Le Good, G. M. and McArthur, A. (1996). On-Road Measurements of Aerodynamic Lift Compared with Wind Tunnel Data (No. 960900). SAE Technical Paper.
- Meile, W., Brenn, G., Reppenhagen, A. and Fuchs, A. (2011). Experiments and numerical simulations on the aerodynamics of the Ahmed body. CFD letters, 3(1), 32-39.
- Murad, N. M., Naser, J., Alam, F. and Watkins, S. (2004). Simulation of Vehicle A-Pillar Aerodynamics using Various Turbulence Models (No. 2004-01-0231). SAE Technical Paper.
- Salim, S. M. and Cheah, S. (2009). Wall Y strategy for dealing with wall-bounded turbulent flows. In Proceedings of the international multiconference of engineers and computer scientists (Vol. 2, pp. 2165-2170). Hong Kong.
- Singh, R. (2008). CFD simulation of NASCAR racing car aerodynamics (No. 2008-01-0659). SAE Technical Paper.
- Taşan, U. (2011). Investigation of Turbulence Models Used in Automotive Industry (The Degree of Master of Science Thesis, Middle East Technical University).
- Tu, J., Yeoh, G. H. and Liu, C. (2018). Computational fluid dynamics: a practical approach. Butterworth-Heinemann.
- Ünal, U. O. (2007). Girdap YarATICILARIN Dairesel Silindir Etrafindaki Akışa Etkisinin Deneysel ve Hesaplamalı Olarak İncelenmesi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi).
- Watkins, S., Saunders, J. W. and Hoffmann, P. H. (1995). Turbulence Experienced by Moving Vehicles. Part I. Introduction and turbulence intensity. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 57(1), 1-17.

## ÖZGEÇMİŞ

**Canberk İnsel**

TEQFLOW Ar-Ge ve Mühendislik San. Tic. A.Ş.  
Eskişehir, 26110 TÜRKİYE.

canberk.insel@teqflow.com

### EĞİTİM GEÇMİŞİ

---

**Eyl. 2015 - halen**

**Eskişehir Teknik Üniversitesi,**  
Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı,  
Hidrolik Bilim Dalı,  
Akışkanlar Mekaniği Yüksek Lisans Eğitimi.

**Eyl. 2010 - Haz. 2015**

**Anadolu Üniversitesi,**  
Fen Bilimleri Enstitüsü,  
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı,  
Lisans Eğitimi.

### İŞ GEÇMİŞİ

---

**Kas. 2017 - halen**

**TEQFLOW Ar-Ge ve Mühendislik San. Tic. A.Ş.,**  
Eskişehir/TÜRKİYE.  
Kurucu Ortak, Ar-Ge Mühendisi.

**Tem. 2014 - Ağu. 2014**

**Ece-Tur İnşaat A.Ş.**  
Düzce/TÜRKİYE.  
Stajyer, Saha Mühendisi.

**Tem. 2013 - Ağu. 2013**

**MESA İnşaat Sanayi A.Ş.**  
Ankara/TÜRKİYE.  
Stajyer, Saha Mühendisi.

## BİLİMSEL YAYINLAR, ÇALIŞMALAR VE PATENTLER

---

- Mart 2017** Celik, A. O., Kiricci, V. and Insel, C. (2017). Reassessment of the flood damage at a river diversion hydropower plant site: lessons learned from a case study. Natural Hazards, 86(2), 833-847.
- Kas. 2016** Kiricci, V., Celik, A. O., Insel, C. and Guner, E. (2016, November). Aerodynamic analysis and improvements of a solar car. In Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II: Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies, 29 June-1 July 2016, High Tatras Mountains, Tatranské Matliare, Slovak Republic (p. 153). CRC Press.
- Mart 2016** Insel, C., Celik, A.O., Kiricci, V. ve Dal, T. (2016). Kanal Tipi Bir HES Sahasında Oluşan Doğal Afet Hasarının İncelenmesi, Doğal Afet ve Afet Yönetimi Sempozyumu.
- Ara. 2015 - Mart 2016** Anadolu Üniversitesi Anadolu Solar Takımı Güneş Arabası (Sunatolia - III) Aerodinamik Gövde Tasarımı (2016). Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP).
- Nis. 2015** Solar Car Design and Geometry Improvement by Computational Fluid Dynamics (CFD). Sanayi işbirlikli lisans bitirme projesi, TÜBİTAK 2209 B programı. Sanayi partneri: ALFATEC.
- Patent 2019** "DUNE" Büyük Gövdeli Araçlar için Hava Direncini Azaltıcı Eklenti. PCT/TR2019/050050, TKNK/034684/000023 - Patent Bekliyor.
- Patent 2016** Protective Device for Regulating The Fluid Pressure And for Damping The Fluid Pressure Surge. PCT/EP2016/060284 - WO2017194075A1

## PROJELER

---

- Tem. 2018** Treyler ve Yarı Römork Kombinasyonları CFD Simülasyonları. TIRSAN A.Ş.-TEQFLOW A.Ş., CFD Analist
- Tem. 2018** Cam Taşıyıcı Treyler Aerodinamik Analizi ve Treyler Havalandırma Çıkışı Tasarımı. TIRSAN A.Ş.-TEQFLOW A.Ş., CFD Analist ve tasarımcı.

|                          |                                                                                                                          |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Haz. 2018 - halen</b> | Elektrikli Şehirler Arası Otobüsün Aerodinamik Gövde Tasarımı. TEMSA A.Ş.-TEQFLOW A.Ş., CFD Analist ve tasarımcı.        |
| <b>Haz. 2018 - halen</b> | ANSYS FLUENT Türkçe Kullanıcı Kılavuzu Bölüm Hazırlıkları. NUMESYS A.Ş. - TEQFLOW A.Ş., CFD Analist.                     |
| <b>Ara. 2017</b>         | Kızılırmak Petrol Dağılım Analizi. SEAGULL Ltd. Şti. - TEQFLOW A.Ş., Analist.                                            |
| <b>Ara. 2017</b>         | Hafifletilmiş ve Verimliliği Artırılmış Kelebek Vana Tasarımı. DOĞUŞ VANA A.Ş. - TEQFLOW A.Ş., CFD Analist ve tasarımcı. |
| <b>Ara. 2017</b>         | Yer Araçlarının Yakıt Tüketimini Azaltmaya Yönelik Özgün Aerodinamik Eklentileri. TÜBİTAK 1512-BİGG Programı Ödülü.      |