



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR SUV ARAÇ MODELİ ÜZERİNDE
SPOİLER UYGULAMASININ SÜRÜKLEME
KUVVETİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE
SAYISAL İNCELENMESİ**

Hasan ÇİFTÇİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalını

Mayıs-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Hasan ÇİFTÇİ tarafından hazırlanan “Bir SUV Araç Modeli Üzerinde Spoiler Uygulamasının Sürüklenme Kuvvetine Etkisinin Deneysel ve Sayısal İncelenmesi” adlı tez çalışması 27/04/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Adnan BERBER

.....

Danışman

Doç. Dr. İlker Örs

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Sercan DOĞAN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Ömer Faruk YÜKSEL
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Selçuk Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından 21201077 no’lu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Hasan ÇİFTÇİ

Tarih:26.05.2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİR SUV ARAÇ MODELİ ÜZERİNDE SPOİLER UYGULAMASININ SÜRÜKLEME KUVVETİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

Hasan ÇİFTÇİ

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İlker ÖRS
İkinci Danışman Doç. Dr. Cihan BAYINDIRLI

2023, 56 Sayfa

Jüri

Danışman Doç. Dr. İlker ÖRS
Doç. Dr. Adnan BERBER
Dr. Öğr. Üyesi Sercan DOĞAN

Bu çalışmada, 1/32 ölçekli SUV model bir araca spoiler (rüzgârlık) eklenerek sürüklenme kuvvetinin azaltılması, yakıt ekonomisi ve sürüş kararlılığının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalar emme tipi rüzgâr tüneline 2.3- 4.55×10⁵ Reynolds sayısı aralığında 4 farklı serbest akış hızında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada aerodinamik çalışmalarda sağlanması gereken geometrik, kinematik ve dinamik benzerlik şartları sağlanmıştır. Rüzgârlık tipi olarak Albatros kuşunun kanat yapısından esinlenilmiş, ilgili araç modeli ve spoiler modeli SolidWorks® programında tasarlanarak 3 boyutlu yazıcıda üretilmiştir. Rüzgârlık modeli, model araç yüksekliğinin %10'u (L/H=0,1), %15'i (L/H=0,15) ve %20'si (L/H=0,2) mesafesi kadar aracın arkasına monte edilmiştir. Taşıt etrafında sağlanan akış kontrolü ile sırası ile %5.72, %7.78 ve %7.49 oranlarında sürüklenme kuvvet katsayısında (C_D) iyileşme sağlanmıştır. Deneysel sonuçları desteklemek amacıyla aynı deney şartlarında temel model ve model 1 araçları için Ansys Fluent® programında akış analizleri gerçekleştirilmiş ve aerodinamik direnç katsayısında %2,58 oranında iyileşme elde edilmiştir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemi sonuçlarının deneysel sonuçları desteklediği tespit edilmiş ve taşıt etrafındaki hâkim akış yapısı belirlenmiştir. Bu çalışmada sağlanan maksimum aerodinamik iyileşme oranı için yüksek taşıt hızlarında yaklaşık %4 yakıt ekonomisinde iyileşme olabileceği tespit edilmiştir. Optimum tasarım ve yükseklikle taşıt üzerine montajı yapılan spoiler uygulamalarının SUV tipi araçlarda akış kontrolü sağlayarak aerodinamik performansı iyileştirilebileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Pasif akış kontrolü, Spoiler, Taşıt aerodinamiği, HAD, Rüzgâr tüneli

ABSTRACT

MS THESIS

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT ON DRAG FORCE OF SPOILER APPLICATION ON AN SUV VEHICLE MODEL

Hasan ÇİFTÇİ

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN AUTOMOTIVE ENGINEERING

Advisor: Assoc. Prof. Dr. İlker ÖRS
Second Advisor: Assoc. Prof. Dr. Cihan BAYINDIRLI

2023, 56 Pages

Jury
Advisor Assoc. Prof. Dr. İlker ÖRS
Assoc. Prof. Dr. Adnan BERBER
Assist. Prof. Dr. Sercan DOĞAN

In this study, it was aimed to reduce drag force, improve fuel economy and driving stability by adding a spoiler to a 1/32 scaled SUV model vehicle. Experimental studies were carried out in a suction type wind tunnel at 4 different free stream velocities in the range of 2.3 to 4.55×10⁵ Reynolds numbers. The geometric, kinematic and dynamic similarity conditions that must be met in aerodynamic studies are provided in the study. As the spoiler type, inspired by the wing structure of the Albatross bird, the relevant vehicle model and spoiler model were designed in the SolidWorks® program and produced in a 3D printer. The spoiler model was mounted to the rear of the vehicle in 10% (L/H=0.1), 15% (L/H=0.15) and 20% (L/H=0.2) height of the model vehicle. With the flow control provided around the vehicle, an improvement in the aerodynamic drag coefficient (C_D) was achieved by 5.72%, 7.78% and 7.49%, respectively. In order to support the experimental results, flow analyzes were performed in the Ansys Fluent® program for the base model and model 1 vehicles at the same experimental conditions and 2.58% improvement was obtained in the aerodynamic drag coefficient. It was determined that the results of the Computational Fluid Dynamics method supported the experimental results and the dominant flow structure around the vehicle was determined. For the maximum aerodynamic improvement rate achieved in this study, it was determined that there could be an improvement in fuel economy of approximately 4% at high vehicle speeds. It was determined that spoiler applications mounted on the vehicle with optimum design and height can improve aerodynamic performance by providing flow control in SUV type vehicles.

Keywords: Passive flow control, Spoiler, Vehicle aerodynamics, CFD, Wind tunnel

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda yardım ve desteğini esirgemeyen ve beni her aşamada yönlendiren danışmanın Doç. Dr. İlker ÖRS 'e, deneysel ve sayısal analizlerimin gerçekleştirilmesi esnasında çok yardımcı olan ve emeklerini esirgemeyen ikinci danışmanım Doç. Dr. Cihan BAYINDIRLI 'ya, Her türlü yardım ve desteğinden dolayı Sayın Süleyman SAMANCI 'ya, maddi ve manevi desteğini görmezden gelemeyeceğim her zorlukta yanımda olduğunu hissettiren canım kardeşim Selime ÇİFTÇİ SOLMAZ 'a ve çalışmalarım boyunca desteklerini hep hissettiğim aileme teşekkür ederim.

Hasan ÇİFTÇİ
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
ŞEKİL DİZİNİ	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	iv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	12
3.1. Deneysel Çalışma	12
3.1.1. SUV Modeli	12
3.1.2. Rüzgâr Tüneli.....	14
3.1.3. Yük Hücresi.....	15
3.1.4. Spoiler Uygulaması	17
3.2. Kuvvet Ölçüm Deneyleri	18
3.3 Sürüklenme Kuvvet Katsayısının Hesaplanması	19
3.4. CFD Analiz	21
3.4.1. Taşıt Modeline Ait Çizim Verisi	21
3.4.2. Aerodinamik Analiz.....	22
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	30
4.1. Deneysel Sonuçlar	30
4.1.1 Akış Görüntüleri	31
4.2. Sayısal Analiz Sonuçları	32
4.2.1. Hız Vektörleri.....	32
4.2.2. Akış Çizgileri (Streamlines)	33
4.2.3. Taşıt Modelleri üzerindeki basınç dağılımı	34
4.2.4 Sürüklenme Kuvveti	38
4.2.5 Kaldırma (Lift) Kuvveti	39
4.3. Toplam Aerodinamik Direncin Basınç-Sürtünme Kaynaklı Dağılımı	40
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	41

ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 1.1. Akış ayrılması ve drag kuvveti üzerine etkisi (Nath ve ark., 2021).....	3
Şekil 3.1a. Prototip SUV araç.....	12
Şekil 3.1b. 1/32 ölçekli SUV test model aracı.....	13
Şekil 3.2a. Rüzgâr tüneli test ekipmanları.....	14
Şekil 3.2b. Rüzgâr tüneli test ekipmanları (Bayındırlı ve ark., 2020).....	15
Şekil 3.3. Altı bileşenli yük hücresi.....	16
Şekil 3.4. Albatros tip spoiler	17
Şekil 3.5. Spoilerin SUV araç modeli üzerindeki konumu.....	18
Şekil 3.6. 3 boyutlu tarayıcı ve taşıt modelinin taranması.....	22
Şekil 3.7. Taşıt modeline ait SolidWorks® çizimi.....	22
Şekil 3.8. Fluent® programında model taşıt için kalıp boşlukları.....	23
Şekil 3.9. Taşıt modelinin “meshing” görünümü.....	24
Şekil 3.10. Ağ bağımsızlığı grafiği, $Re=4,55 \times 10^5$	26
Şekil 3.11. İterasyon bağımsızlığı grafiği, $Re=4,55 \times 10^5$	27
Şekil 3.12. SUV modelin hesaplama esnasındaki C_D yakınsama grafiği, $Re=4,55 \times 10^5$	27
Şekil 4.1. Taşıt modellerine ait deneysel C_D değerleri	31
Şekil 4.2. TM akış görüntülemesi.....	32
Şekil 4.3a. TM’ye ait vektörel akış hızı, $Re=4,55 \times 10^5$	33
Şekil 4.3b. MODEL1’e ait vektörel akış hızı, $Re=4,55 \times 10^5$	33
Şekil 4.4a. TM’ye ait akış çizgileri, $Re=4,55 \times 10^5$	34
Şekil 4.4b. MODEL1’e ait akış çizgileri, $Re=4,55 \times 10^5$	34
Şekil 4.5a. TM üzerindeki basınç dağılımı (yan görünüş)	35
Şekil 4.5b. MODEL1 üzerindeki basınç dağılımı (yan görünüş).....	35
Şekil 4.6a. TM üzerindeki basınç dağılımı (ön görünüş)	36
Şekil 4.6b. MODEL1 üzerindeki basınç dağılımı (ön görünüş).....	36
Şekil 4.7a. TM üzerindeki basınç dağılımı (izometrik görünüş).....	37
Şekil 4.7b. TM üzerindeki basınç dağılımı (izometrik görünüş).....	37
Şekil 4.8. TM ve MODEL1 için sayısal ve deneysel C_D değerleri.....	39
Şekil 4.9. TM ve MODEL1 için sayısal C_L değerleri.....	40

ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 3.1. Yük hücresi ölçüm aralıkları	17
Çizelge 3.2. Ağdan bağımsızlık testi sonuçları, $Re= 4,55 \times 10^5$	25
Çizelge 4.1. Reynolds sayısına bağlı SUV modellerine ait C_D değerleri	30
Çizelge 4.2. Sayısal analiz sonucu elde edilen sürüklenme katsayısı değerleri	38
Çizelge 4.3. Sayısal analiz sonucu elde edilen kaldırma katsayısı değerleri.....	39
Çizelge 4.4. Sayısal incelenen C_D ve değerleri oluşumuna basıncın etkisi	40



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

C_D	: Sürüklenme kuvvet katsayısı.
C_L	: Kaldırma (Lift) kuvvet katsayısı.
ν	: Kinematik viskozite m^2/s^2
ρ	: Yoğunluk, kg/m^3
P	: Basınç indisi
t	: Zaman, s
u	: Anlık hız vektörü, m/s
v	: Anlık hız vektörünün y bileşeni
w	: Anlık hız vektörünün z bileşeni
ϑ	: Türbülans hız skalası, m/s
U	: Ortalama hızın x bileşeni, m/s
V	: Ortalama hızın y bileşeni, m/s
W	: Ortalama hızın z bileşeni, m/s
U_0	: Serbest akış hızı m/s
ϵ	: Türbülans kinetik enerji yutulması, m^2/s^3
λ	: Viskozite sabiti
$k, \sigma, \epsilon, \sigma$: Türbülans model sabitleri
ω	: Açısal hız, s^{-1}
Re	: Reynolds sayısı
R	: İdeal gaz sabiti
μ	: Dinamik viskozite, pa
L	: Spoiler yüksekliği, m
H	: Taşıt yüksekliği, m
V	: Hız, m/s
T	: Sıcaklık, K
P_{atm}	: Atmosfer basıncı, kPa
F_{Net}	: Araca etki eden sürüklenme kuvveti, N
A	: Araç ön yüzey alanı, m^2
F_x	: x eksenindeki kuvvet.
F_y	: y eksenindeki kuvvet.
F_z	: z eksenindeki kuvvet.
M_x	: x eksenindeki moment.
M_y	: y eksenindeki moment.
M_z	: z eksenindeki Moment.

Kısaltmalar

CFD	: Computational Fluid Dynamics.
HAD	: Hesaplama Akışkanlar Dinamiği.
SUV	: Sport Utility Vehicle (Spor Amaçlı Arazi Aracı)
MODEL1	: 1 Numaralı Spoiler Modeli
MODEL2	: 2 Numaralı Spoiler Modeli
MODEL3	: 3 Numaralı Spoiler Modeli
TM	: Temel Model
MODEL1s	: 1 Numaralı Spoiler Modeli Sayısal
TMs	: Temel Model Sayısal

1. GİRİŞ

Hareket halindeki bir taşıta etki eden dirençler; aerodinamik direnç, yokuş direnci, yuvarlanma direnci, transmisyon direnci ve ivmelenme direnci olarak sıralanabilir (Çetinkaya, 2023). Bu dirençlerin tamamı taşıtın hareketine ters yönde bir kuvvet oluşturduğu için taşıt performansını ve yakıt tüketimini önemli ölçüde olumsuz olarak etkiler. Özellikle yakıt sarfiyatı hem ekonomik hem de çevre kirliliği bakımından dikkat edilmesi gereken bir parametredir. Taşıta etkiyen direnç kuvvetleri ne kadar az olursa enerji gereksinimi de o oranda daha az olacaktır. Bu nedenle direnç kuvvetlerinin değerini azaltmak önemli bir araştırma konusudur (Yuan ve ark., 2020; Çetinkaya, 2023).

Bir aracın sürtünme katsayısı, aracın gövdesi etrafında akan havanın mümkün olduğunca kesintisiz ve düzgün bir şekilde akmasına izin verilerek düşürülebilir. Akış kontrolü aktif (hareketli elemanlarla) ve pasif (hareketsiz elemanlarla) yöntemlerle sağlanmaktadır. Bugüne kadar yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu araçlar üzerinde pasif akış kontrol yöntemleri oluşturmaktadır. Çünkü aktif akış kontrol elemanlarının özellikle yüksek hızlarda kullanımı mümkün olmamıştır. Ancak günümüzde özellikle yarış arabalarında aktif akış kontrol elemanlarının da kullanıldığı görülmektedir (Kurec ve ark., 2019; El Gaouti ve ark., 2021; Sivaraj ve ark., 2021; Kasap, 2022).

Taşıta hareketi sağlayan kuvvet, bir içten yanmalı motor tarafından üretilip, tekerlek tahrik kuvveti olarak kullanılır. Karayolu taşımacılığında kullanılan araçlarda yakıt olarak çoğunlukla fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Fosil yakıt kullanımının çevreye ciddi oranda zararları bulunmaktadır. Bu zararların en büyüğü de yarattığı hava kirliliğidir ve hava kirliliğine bağlı olarak da küresel ısınma, karbondioksit oranının artması, asit yağmurları, oksijen oranının azalması gibi birçok etki de söz konusudur (Ashik ve ark., 2020; Yadav ve ark., 2021).

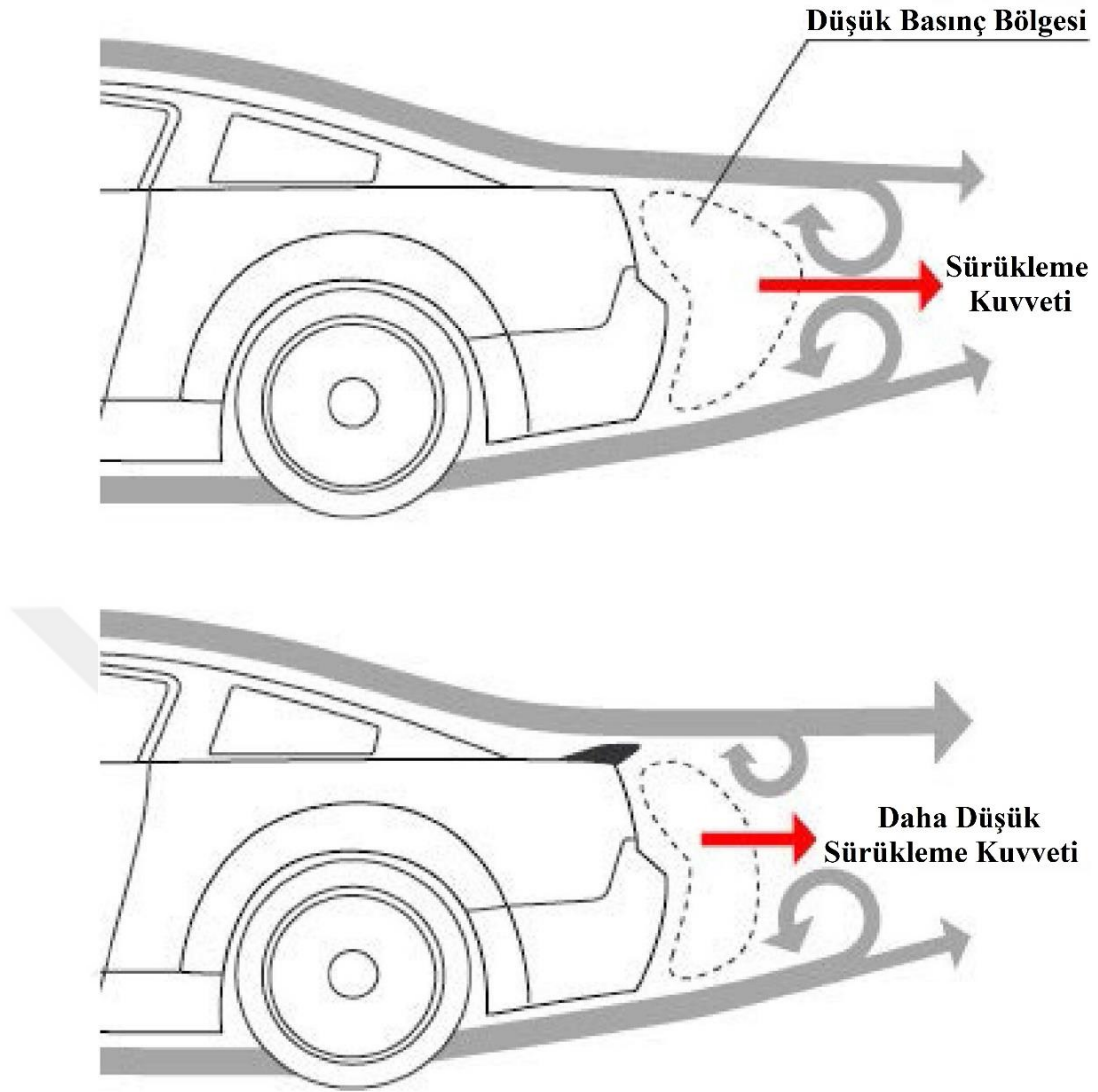
Taşıtlara etkiyen direnç kuvvetlerinden en önemlisi özellikle yüksek hızlarda araç performansını ve yakıt tüketimini önemli derecede etkileyen aerodinamik dirençtir. Aerodinamik direnç, taşıt tasarımı ve taşıt aerodinamiği konularını etkileyen çok önemli bir parametredir. Taşıt aerodinamiği, taşıt etrafındaki hava akışı, taşıtın alt gövdesiyle yol arasındaki etkileşimi ve karmaşık geometrili taşıt gövdelerini kapsamasının yanında taşıtların hem sürüş kararlılıklarını hem de yakıt tüketimlerini önemli ölçüde etkilediği için, son derece önemli bir konudur. Taşıtların yakıt ekonomisi, özellikle yüksek seyir hızlarında etkili olan aerodinamik direnç kuvvetinin azaltılmasıyla belirgin bir şekilde artırılabilir. Taşıtların yüksek hızlarda yolda giderken dengeli bir şekilde yoluna devam edebilmesi aerodinamik özellikler sayesinde. Taşıtların aerodinamiğinde, taşıtların

üstündeki hava akışı ve bu akışın taşıt dinamiğine etkileri incelenir (Bauskar ve ark., 2019; Bayındırlı ve Çelik, 2019; Yadav ve ark., 2021).

Aerodinamik direnç veya aerodinamik direnç kuvveti, hareket halindeki bir taşıt üzerinde göz ile görülebilir olmadığı için önemsiz veya değersizmiş gibi görülebilir. Ancak, gerçekte ortalama 100 km/h hızda hareket eden bir taşıt, gücünün % 50-70'ini aerodinamik direnç kuvvetlerini yenmek için harcar (Modi ve ark., 1995; Çakmak, 2000). Modern bir araç için aerodinamik direnç kuvvetinin %45 araç gövdesi, %30 tekerlekler ve tekerlek yuvaları, %25 araç alt bölgesi ve detaylar oluşturmaktadır. Aerodinamik direnç, sürüklenme (drag) katsayısı olarak da ifade edilen aerodinamik direnç katsayısı ile ifade edilir (Wang ve ark., 2020; Nath ve ark., 2021; Sivaraj ve ark., 2021).

Birkaç yıl öncesine kadar aracın performans göstergesi motorunun gücü olarak tanımlanırdı. Günümüzde ise bir taşıtın performansı sahip olduğu motor gücünün yanında yakıt tüketimi birlikte değerlendirilmektedir. Son yıllarda tasarımcılar, aracın verimliliğini ve performansını artırmak için taşıtın aerodinamik yapısının oldukça önemli olduğunu tespit etmişlerdir (Wang ve ark., 2019; Palanivendhan ve ark., 2021). Aerodinamik direnç (sürüklenme/drag)'ten kaynaklanan yakıt tüketimi, aracın toplamda tüketmiş olduğu enerjinin %50'sini içerir. Bu nedenle, sürüklenme kuvvetini veya aerodinamik direnci azaltmak taşıt üreticileri için son derece önemli hale gelmiştir (Cai ve ark., 2020; Ekman ve ark., 2020; Gromke ve Ruck, 2021).

Bir taşıta etki eden aerodinamik direnç kuvvetleri, aktif ve pasif akış kontrol teknikleri ile azaltılabilir. Sentetik jetler, piston-silindir mekanizmaları, hareketli yüzeyler, esnek ve yer değişimli kanatlar gibi aktif akış yöntemlerinin yüksek maliyeti ve araç üzerindeki uygulamalarının zorlukları nedeni ile genel olarak taşıt üzerinde, kalıcı olarak kullanılan spoiler, difüzör, vorteks oluşturucular, akış bozucu yüzey ve tel kullanımı, keskin köşelerin yuvarlatılması gibi pasif akış kontrol sistemlerinin uygulamaları yaygındır. Bu akış kontrol tekniklerinin kullanımındaki amaç, aracın üzerinde hareket eden havanın arka uçtan ayrıldığı anda, aracın arkasında bıraktığı art izi (wake) olarak bilinen geniş ve düşük basınçlı türbülanslı bölgenin kontrol edilmesini sağlar. Çünkü bu art izi, aerodinamik basınç direncinin oluşumuna katkıda bulunur (Kabanovs ve ark., 2019; Kurec ve ark., 2019; Li ve ark., 2021; Nath ve ark., 2021). Bu nedenle, akış ayrımının engellenmesi veya etkilerinin azaltılması gerekmektedir. Şekil 1.1 bu ayrılmanın bir örneğini göstermektedir.



Şekil 1.1. Akış ayrılması ve drag kuvveti üzerine etkisi (Nath ve ark., 2021)

Özellikle aracın arkasına rüzgarlık veya kanat uygulaması en çok tercih edilen akış kontrol elemanlarıdır. Burada spoilerin ve kanadın şekli, yapısı ve konumu akışı önemli ölçüde etkiler (Kim ve ark., 2006; Kim ve ark., 2008; Palanivendhan ve ark., 2021; Guo ve ark., 2022). Arka rüzgarlıklar, aerodinamik performansını iyileştirmek için genellikle bir aracın tavanının veya bagaj güvertesinin arka kenarına eklenen aerodinamik cihazlar olarak tanımlanabilir. Öncelikle amaç, sonraki sürüklenme cezasına rağmen bastırma kuvvetini iyileştirmektir. Yere basma kuvveti, çekiş kuvveti ile orantılı olduğundan, sürüşün dengesi ve güvenliği için zorunludur. Ayrıca, aracın virajı kaymadan geçmesi için yeterli çekişe ihtiyaç duyduğu durumlarda viraj alırken iyi bir bastırma kuvveti performansı hayati önem taşır (Cheng ve ark., 2019).

Bu çalışmada, bir Spor Amaçlı Araç (SUV- Sport Utility Vehicle) üzerinde aerodinamik iyileştirme gerçekleştirmek için pasif akış kontrol yöntemlerinden spoilerin, aracın arka bölümüne uygulanması deneysel ve sayısal olarak incelenecektir. Genel olarak arka spoilerin kullanımı aerodinamik amaçlıdır. Gürültü ve titreşim tarafı pek dikkate alınmaz. Çünkü arka spoiler kaldırma (lift) kuvvetini azaltarak manevra kabiliyetini ve çekişi iyileştiren bir etki yaratır. Nitekim araştırmalar göstermiştir ki; yüksek taşıt hızlarında aerodinamik direnç katsayısı %2 azaltıldığında yakıt tüketimi %1 azalabilmektedir. Böylece, günümüzde çok geniş bir kullanım alanına sahip olan ve gün geçtikçe yaygınlaşan SUV tipi araçların aerodinamik direnç veya sürüklenme katsayılarında bir azalma sağlanarak yakıt ekonomisinin artırılması hedeflenmektedir (Bayındırlı ve Çelik, 2019).



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürde, taşıt aerodinamiği ve taşıtlarda spoiler kullanımı ile ilgili hatırı sayılır miktarda deneysel ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışması mevcuttur.

Hu ve Wong (2011) bu çalışmada, yüksek hızlı sedan bir aracın aerodinamik kaldırma, sürüklenme ve akış özellikleri sayısal olarak incelenmiştir. Spoilersiz bir araç üzerindeki toplam basınç kuvvetine ek olarak iki etki daha vardır. Birinci etki spoiler üzerindeki basınç kuvveti tarafından, ikinci etki ise spoilerin yayılma etkisinden dolayı aracın arka yüzeyindeki basıncın artmasından kaynaklanmaktadır. Nümerik simülasyonlar için türbülans modeli olarak standart bir k'& modeli seçmişlerdir. Daha sonra arka spoiler ile araç gövdesi etrafındaki üç boyutlu dış akışlar incelenmiştir. Bu çalışmada şu üç parametre dikkate alınmıştır: bağlantı konumu, spoilerin şekli ve arka cam ile arka spoilerin ön kenarı arasındaki boşluk ve spoiler tabanının bagajla arasında kalan mesafe. Bu çalışmada incelenen 24 durumun sonuçları karşılaştırılarak, daha iyi performansa sahip bir arka spoiler geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda yeni arka spoilere sahip binek otomobilde aerodinamik sürtünmenin %1,7 oranında azaldığı buna bağlı olarak yakıt tasarrufu sağlandığı ve ayrıca negatif kaldırmanın arttığı gözlemlenmiştir.

Schenkel (1977) yapmış olduğu bu çalışmada bir sedan aracın 3/8 ölçekli yarı kesiti alınmış modeliyle bir dizi rüzgâr tüneli testi yapmıştır. Kuvvet ve moment ölçümleri, modelin dışı, motor bölmesi ve araç tabanının yüzey basıncı ölçümleriyle beraber akış görselleştirme deneyleri ile desteklemiştir. Çeşitli model bileşenlerinin aerodinamik kaldırma (lift) ve sürüklenme (drag) destek bileşenleri ile bu bileşenlere “spoiler” eklenerek meydana getirilen değişiklikleri belirlemiştir. Gözlenen basınç ve kuvvet değişikliklerini üretecek akış alanı mekanizmaları önermiştir.

Damjanović ve ark. (2011) taşıt aerodinamiğini iyileştirmek için yaptıkları bu çalışmada kendi tasarladıkları bir konsept araç üzerinde spoiler ile iyileştirme yapmayı amaçlamışlardır. Tasarım yapılırken Poligonal modelleme yöntemi kullanılmış ve tasarlanan bu model araç, araç tasarımının yeni bir kavramsal çözümünü temsil etmektedir. 3DS Max® yazılım ile araç modellendikten sonra nihai dijital görüntüler de oluşturulmuştur. Nihai dijital görüntüler, Autodesk 3DS Max®'in varsayılan işleme aracı olarak “Mental Ray” oluşturma aracı kullanılarak oluşturulmuştur. Otomobilin sadece dış tasarımına dikkat edilirken, iç mekân modellenmemiştir. Ayrıca ANSYS Fluent® yazılımı kullanılarak, hava direncini azaltmak ve aerodinamiği iyileştirmek açısından tasarımı iyileştirmek için aracın geometrisinde değişiklikler yapmak maksadıyla aracın çevresindeki hava akışının 2B simülasyonu yapılmıştır. Otomobilin kaputu ile ön camı

arasındaki açının değişen değerine ve arka spoilerli ve spoilersiz otomobilin arka kısmının analiz edilmesine dikkat edilmiştir. Elde edilen 2B simülasyona öncülük eden ve ilk 2B modelin modifikasyonlarına öncülük eden mevcut bir 3B araba modelini yeniden tasarlanmışlardır. Varsayımlarına göre, yeni 3D araba modeli daha iyi aerodinamik özelliklere olmalıdır. Yeniden tasarlanan araba modelinin söz konusu değişiklikler açısından 3B analizi de ilk tasarıma göre olası iyileştirmeleri analiz etmek için yapılmıştır.

Tsai ve ark. (2009) yapmış oldukları bu çalışmayla kanat tipi arka spoilerli bir binek otomobilin çevresindeki akış yapısı modelini elde etmek için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yaklaşımıyla etkili bir nümerik model önermişlerdir. Test aracının ve ızgara sisteminin topolojisi ticari bir yazılım olan ANSYS Fluent® tarafından oluşturulmuştur. Fluent® yazılımı, bu çalışmada kullanılan HAD uygulamasıdır. Nümerik tekrarlar tamamlandıktan sonra, aerodinamik veriler ve detaylı karmaşık akış yapısı, Field View ve Tecplot uygulamaları kullanılarak görselleştirilmiştir. Bu çalışmada arka spoileri ve uç plakası olan ve olmayan bir binek otomobilin aerodinamik davranışı üzerindeki rüzgâr etkisi nümerik olarak incelenmiştir. Doğru hücum açısına sahip bir rüzgarlık takılmasının aerodinamik kaldırma katsayısını azaltabileceğini bulmuşlardır. Bununla beraber, bir uç levhanın takılmasının aracın arkasındaki gürültüyü azaltabileceği tespit edilmiştir. Bir binek otomobilin dikey stabilitesinin ve gürültü oranının, iyileştirilebileceğini açıkça göstermişlerdir ve en uygun spoiler tasarımının aerodinamiği ve aero-akustiğinin nasıl olması gerektiğini gösterip analiz etmişlerdir.

Kim ve ark. (2008) gerçekleştirdikleri bu çalışmada bir karayolu taşıtının arkasında oluşan üç boyutlu vorteksleri, parçacık görüntülü hız ölçer (PIV) tekniği kullanılarak ölçmüş ve yapıların bir spoilerin eklenmesiyle oluşan değişimi incelemişlerdir. Ölçümler, diğer düzlemdeki hızların interpolasyonu ile elde edilen düzlem dışı bir hız bileşeni de dahil olmak üzere tam üç boyutlu akış alanları elde etmek için x-y, y-z ve z-x düzlemlerinde gerçekleştirilmiştir. Akabinde, λ_2 tanımıyla vorteks çekirdeğini elde etmek için hız gradyan vektörünü değerlendirip, akış yönünde, uzunlamasına ve açıklık yönünde oluşan vorteksler arasındaki ilişki, vorteks çizgileri ve vorteks çekirdeklerinin üst üste bindirilmesiyle sistematik olarak analiz edilmiştir. Tüm akış topolojisini, spoilerin olduğu ve olmadığı her iki durumda da karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada spoilerin C sütunu vortekslerini zayıflattığı, güçlü kanat ucu vorteksleri ürettiğini, dolayısıyla aşağı doğru akışı azalttığı ve dikey yönde uzunlamasına vorteksleri arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Kim ve ark. (2006) bir karayolu taşıtının gövdesine spoiler monte edildiği ve edilmediği durumlarda arka kısmında oluşan hava akışının özelliklerini analiz etmiş ve bunun için PIV tekniği kullanmışlardır. 1/43 oranında ölçeklendirilmiş bir araç maketi, kapalı devre bir su tünelinin orta kısmına yerleştirilmiştir, Reynolds sayısı taşıt uzunluğuna bağlı olarak 105'tir. Çevrim bölgesi ve vortekslerin 3B yapısını incelemek için sırasıyla serbest akıma hem paralel hem de dik düzlemde ölçümler yapmışlardır. Sonuçlar, hava rüzgarlığının varlığına göre çevrim bölgesinde önemli ölçüde farklı vorteks dağılımlarını göstermektedir. Karmaşık 3B vorteks davranışlarını görselleştirmek ve 105 Reynolds sayısında bir spoilerin aracın yol üzerindeki etkisini incelemek için deneyler yapmışlardır. Bir spoiler tarafından indüklenen akış yönündeki kanat ucu vorteksleri, C sütunu vortekslerine ters dönüş yönüne sahiptir. Bu kanat ucu vorteksleri, sürüş dengesinin artmasıyla sonuçlanan C sütunu vortekslerini zayıflatarak negatif bir kaldırmanın oluşturulmasında önemli bir faktördür. Ayrıca, akıntı yönündeki vortekslerin düğümünün, açıklık yönündeki girdabın eyer noktası konumuna yakın olduğu için yanal tarafta oluşmasını önleyen, açıklık istikametindeki vorteksin güçlü ters akışını engelleyen bir özellik bulmuşlardır.

Altınışık (2013) yapmış olduğu doktora tez çalışmasında Fiat Linea marka model aracın alt kısmının hareketsiz, tekerleklerin sabit, hava kanallarının kapalı bulunduğu, 1:5 ve 1:10 ölçekli modelleri üzerinde gerçekleştirdiği rüzgâr tüneli testlerinde aerodinamik analizler gerçekleştirmiştir. İki farklı tüneldeki (Uludağ Üniversitesi Rüzgâr Tüneli ve Ankara Rüzgâr Tüneli) farklı türbülans ve blokaj oranlarının aerodinamik etkisini incelemiştir. Hız profilleri, sürüklenme katsayısı değerleri ve basınç katsayısı dağılımları değişken yan rüzgâr açılarında değerlendirmiştir. Bahsi geçen hava tünellerinde türbülans seviyeleri %1 civarında test edilirken gerçek hayatta otoyol üzerinde seyir halindeki araçların %5-10 türbülansa maruz kaldıkları bilinmektedir. Bu çalışmada testler türbülans şiddeti seviyesi Uludağ Üniversitesi Rüzgâr Tünelinde %7 ve Ankara Rüzgâr Tünelinde %0.5 düzeyinde gerçekleştirilmek suretiyle gerçek duruma yakın analizler gerçekleştirmiş ve elde edilen sonuçları kıyaslamıştır.

Bayındırlı (2015) yapmış olduğu bu çalışmada rüzgâr tüneli testlerinde 1/32 ölçekli çekici ve treylerden oluşan ağır vasıta araç modeli üzerinde 6 farklı hızda yüzey basıncı ve kuvvet ölçümü gerçekleştirmiştir. Yalnızca çekici üzerinde yapılan testler 59 000 - 317 000 Reynolds sayılarında gerçekleştirilmiştir. Hem çekici hem treyler üzerinde yapılan testlerde iste Reynolds sayıları 156 000 - 844 000 'dir. Basınç katsayısı dağılımları ve aerodinamik direnç katsayıları deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel

çalışmalarda kinematik benzerlik sağlanmış ve bloke edici etkiler ihmal edilmiştir. Deneysel çalışmalarda dinamik benzerlik koşulunda Reynolds sayı bağımsızlığı kullanılmıştır. Çekiciye treyler eklemenin aerodinamik sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Fluent® yazılımında aynı deney koşulları altında nümerik olarak yüzey basıncı ve kuvvet ölçümleri yapılmış ve treyler etrafındaki akış görüntüleri elde edilmiştir. Çekici ve treyler birleşiminin aerodinamik sürüklenme katsayıları (C_D) nümerik olarak hesaplanmıştır. Deneysel çalışma sonuçları nümerik çalışma sonuçları ile karşılaştırılıp sayısal çalışma sonuçları doğrulanmıştır. Basınç katsayısı dağılımları ve akış görüntüleme sonucunda treylerde direnç oluşturan bölgeler belirlenmiş ve pasif akış kontrol yöntemleri ile aerodinamik iyileşme sağlanmıştır. MODEL1'in spoiler yapısının %11,37 oranında iyileştirilmesi, spoilerli bir arka uzatma eklenmesi ve bir 2 numaralı model araçta %12,88'e bir treyler arka uzatması eklenmesi ve spoilerli bir yan rüzgarlık eklenerek aerodinamik bir gelişme sağlamıştır. 3 numaralı modele %20,11 oranında bir römork arka uzatması 4 numaralı model araçta, 2 numaralı model aracın çekici ve treyleri arasındaki boşluğun kapatılmasıyla toplam %23,85 aerodinamik iyileşme sağladığını gözlemlemiştir.

Kaplan (2015) bu çalışmada 1/16 ölçekli BMW 3 Serisi isimli ticari unvana sahip bir model otomobilin daha önce yapılmış rüzgâr tüneli testlerinde aerodinamik karakteristikleri incelenmiş tersine mühendislik yöntemiyle 3 boyutlu olarak tasarlanarak bilgisayar ortamında yeniden oluşturulmuştur. Oluşturulan bu model için Fluent® yazılımı kullanarak HAD uygulaması yapmış aynı koşullarda bir dış akış simülasyonu oluşturulmuştur. Oluşturulan simülasyonda elde edilen veriler benzer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Firmanın kendi ürettiği 3 serisi ticari isimli sedan otomobilin sürüklenme katsayısı değeri 0,31 olarak verilmiştir, aynı aracın deneysel çalışma sonucunda ise elde edilen sürüklenme katsayısı değeri 0,355 olarak bulunmuştur. Yapılan deneysel çalışmadaki ile aynı ölçeğe sahip bir model araçla yapılan çalışma sonucunda araç gövdesine ait C_{Da} değeri 0,255 olarak elde etmiş, motor soğutma sisteminin katkısını hesaba dahil ettiğinde ise toplam sürüklenme katsayısı değerini 0,308 olarak elde etmiştir.

Ak (2015) yapmış olduğu bu çalışmada daha önce 160 km/s hızlarda çalışabilen standart araç sileceklerinin gerçekleştirmiş olduğu HAD analizleri yardımıyla 240 km/s araç hızlarına kadar güvenli ve sorunsuz bir şekilde çalışabilecek bir prototipini geliştirmiştir. Yarım araç modeli kullanarak her iki taraftaki silecek süpürgesi ve kollarının performanslarını incelemiş, incelemesi sonucu oluşan kaldırma (lift)

kuvvetinin silecek kollarından kaynaklandığını gözlemlemiştir. Bu gözleminin sonucunda süpürgeler üzerindeki baskı kuvvetini artırarak silecek sistemi kaldırma (lift) kuvvetini azaltmayı planlamıştır.

Kesat (2019) çalışmasında bir çekici ve römork araca doğadan esinlendiği pasif akış kontrol sistemlerini ekleyerek aerodinamik iyileştirmeler elde etmeyi amaçlamış ve bu değişimleri gözlemlemiştir. Çekici ve römorka ait üç farklı bölge için üç farklı pasif akış kontrol sistemi tasarlamıştır. Bu üç farklı pasif akış kontrol tasarımlarından bir tanesi kanarya geometrisinden ilham aldığı dört farklı tasarım olmuştur. İkincisi ise römork üst kısmı için tasarladığı yarım uçak kanadı geometrisi tasarımlarından ilham aldığı üç farklı tasarım olmuştur. Tasarladığı üçüncü ve son pasif akış kontrol sistemi ise çeşitli geometriler, uzunluklar ve açılara sahip olan 48 farklı kuyruk tasarımı olmuştur. Çalışmada rüzgâr tüneli testleri uygulanarak Reynolds sayısı bağımsızlığı 160000 – 650000 aralığında sağlanmıştır ve tüm deneyler 560000 sayısında gerçekleştirilmiştir. Çekici römork araca tasarlanan rüzgarlık eklendiği durumda sürüklenme katsayısında en fazla %17,8'lik azalma meydana geldiğini gözlemlemiştir. Rüzgarlık tasarımına ek olarak yarım uçak kanadı eklendiği durumda bu etki %27,5 olmuş ve bu kombinasyona konik kuyruk ilave edildiği durumda ise sürüklenme kuvvetindeki iyileşme %28.5'e kadar yükseldiği gözlemlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar akış görüntüleme deney sonuçları ile uyum içerisinde olduğunu görmüş ve pasif akış kontrol sistemlerinin büyük etkisi olduğunu ortaya koymuştur.

Kalaycı (2021) gerçekleştirmiş olduğu bu HAD çalışmasında SUV kategorisinde yer alan bir binek motorlu kara taşıtının aerodinamik performansını ANSYS Fluent® yazılımı kullanarak incelemiştir. Orijinal boyutlarından referans alınarak 1:1 ölçekte ve tek boyutta model SolidWorks® paket programı kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulmuş olan bu model üzerinde ön cam açısı, keskin hatların yumuşatılması ve tavan çizgi eğiminin azaltılması değişikliklerini sürüklenme ve kaldırma katsayılarına olan etkilerini gözlemlemiştir. Yapmış olduğu iyileştirmeler sayesinde aracın aerodinamik etkinliği arttırılmıştır.

Kamacı (2022) ahmed gövdesi üzerinde yaptığı bu çalışmada gövdenin arka eğimli yüzeyinin hücum kenarı üzerine dikdörtgen kesitli kanatlar yerleştirilmiş ve Reynolds sayısı bağımsızlığının 2.6 milyon olduğu durum için mevcut model çevresindeki üç boyutlu, türbülanslı, süreğen, sıkıştırılmaz akış alanı nümerik çözümler metoduyla hesaplamıştır. Nümerik çözümler için ANSYS Fluent® paket programı kullanılmıştır. Farklı türbülans modeli ve duvar fonksiyon kombinasyonları için sayısal

çözümler uygulanmış ve kanatların eklendiği Ahmed gövdesinin incelendiği deneysel bir çalışmadan elde edilen sürüklenme katsayısı sonuçlarına atıfta bulunarak nümerik modeli doğrulamıştır. Buna göre, k-epsilon Realizable türbülans modeli ile Menter-Lechner duvar fonksiyonunun kombinasyonu, deneysel çalışmaya %8,8'lik bir hatayla en yakın sonucu verdiğini belirlemiştir. Nümerik çözüm sonuçlarına göre, arka eğim açısının 25° olduğu Ahmed gövdesi için en iyi performans, kanatsız modele kıyaslandığında sürüklenme katsayısındaki % 2,6'lık azalma ile üç kanatlı durumda elde etmiştir. Arka eğim açısının 35° olduğu Ahmed gövdesinde ise spoiler eklenmesinin neden olduğu sürüklenme katsayısındaki iyileşme ihmal edilebilir seviyede kalmış, fakat iki, üç ve dört kanat eklenmesi durumlarında sürüklenme katsayısının biraz arttığını belirlemiştir.

Kasap (2022) tezinde bir binek taşıtın aerodinamik analizini HAD yöntemi ile gerçekleştirmiştir. Aracın çizimi üretici tarafından verilen ölçüler referans alınarak CATIA® V5R21 programı ile gerçekleştirmiştir. Aerodinamik analiz için gerekli olan düzenlemeler, meshing ve sayısal çözümler için ANSYS Fluent® programını kullanmıştır. Akış alanının çözümü için realizable k- ϵ türbülans modelini kullanmıştır. Araca ait C_D değeri %2,2'nin altındaki hata ile 0,313 olarak bulmuştur. ANSYS Fluent® programında aracın çevresinde oluşan hava akışı ile ilgili çeşitli düzlemlerdeki hız ve basınç kontürlerini, akış çizgilerini ve hız vektörlerini incelemiştir. Aracın C_D katsayısı değerlerini düşürmek için çeşitli vorteks üreteçleri tasarlamıştır. Vorteks üreteçler, tavanın arka kısmına akış ayrılması noktasının 15 mm önüne 100 mm aralıklarla yerleştirilmiştir.

Yarin (2019) HAD yöntemi kullanarak gerçekleştirdiği bu çalışmasında bir araç modelleyerek taşıtın sürüklenme katsayısını tespit etmiştir. Elde ettiği analiz sonuçlarına göre model araç üzerinde iyileştirmeler yaparak yeni oluşturduğu modellerin analizini gerçekleştirmiştir. Bu işlemleri dört kez beş farklı model ile tekrarlayarak elde ettiği sonuçları birbiriyle kıyaslamıştır. Bu çalışmalar sonucunda araç tasarımında keskin hatların kullanılmaması ve mümkün olduğunca damla biçimine yakın taşıt tasarımları oluşturmaya çalışılmasının sürüklenme kuvvetinin azalmasında büyük rol oynadığı kanaatine varmıştır.

Keleş (2015) gerçekleştirdiği tez çalışmasında bir model çekici-römork üzerinde HAD yöntemi ile farklı yan rüzgâr hızlarındaki aerodinamik direnç katsayısı değişimlerini gözlemlemiştir. Bu çalışmalar esnasında Fluent® yazılımı ile türbülans analizleri için realizable k-epsilon, Spalart Allmaras ve SST k-Omega DES ve RANS

modellerini incelemiş en yüksek doğru sonuca ulaştığı modelin DES realizable k-epsilon olduğuna karar vermiştir.

Özen (2015) çalışmasında, araç etrafındaki hava akışı sebebiyle araç üzerinde oluşan aerodinamik etkiler ile bu aerodinamik etkileri oluşturan sebepleri incelemiştir. Güncel olarak kullanılmakta olan bir araç modelinin aerodinamik özellikleriyle ilgili parametreleri belirlemek amacıyla matematiksel ve deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Elde etmiş olduğu bulgulardan faydalanarak belirlemiş olduğu model aracın aerodinamik etkinliğini arttırmak için gövde tasarımını iyileştirme odaklı çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bunun için, aracın arka alt kısmına açılan bir difüzör kanalı vasıtasıyla aracın sürüklenme katsayısının % 2 azaldığı ve yol tutuşunun büyük oranda iyileştiği tespit edilmiştir.

Chainani ve Perera (2008) HAD yöntemiyle gerçekleştirmiş oldukları bu çalışmada, sürüklenme kuvvetinin aracın ileri hareketini olumsuz etkilediğini ve aracın üst ve alt kısmından akan hava arasında basınç farkı olduğunu göstermiştir. Bu basınç farkı, dikey ekseninde kuvvet oluşmasına sebep olur. Bir taşıt üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetler verimliliğin büyük oranda azalmasına sebep olur. Taşıtın bu kuvvetleri ideal duruma getirecek şekilde tasarlanması daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlar. Bu makalede radyo kontrollü bir model yarış aracını yeniden tasarlamak ve en iyi duruma getirmek için kullanılmış olan teknikleri göstermişlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, bir SUV araç modelinin üzerinde aerodinamik dirence etki eden sürüklenme katsayısının azaltılabilmesi için pasif akış kontrol yöntemi olarak spoiler uygulaması gerçekleştirilmiştir. Spoiler uygulaması hem deneysel hem de sayısal metot olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile incelenmiştir.

3.1. Deneysel Çalışma

Belirlenen SUV araç modeli ile üzerinde yapılan rüzgâr tüneli uygulamaları Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Akışkanlar Mekaniği laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bilinen bir taşıta ait taşıt model temin edilerek deneyler yapılmıştır.

3.1.1. SUV Modeli

Spoiler uygulamasının gerçekleştirileceği SUV araç ve modeli, Şekil 3.1a ve 3.1b'de gösterilmiştir. Araç modeli, gerçek boyutunun 1/32 ölçekli ve lisanslı modelidir.



Şekil 3.1a. Prototip SUV araç



Şekil 3.1b. 1/32 ölçekli SUV test model aracı

Şekillerden de görüleceği üzere model araç gerçek araç ile büyük oranda geometrik benzerliğe sahiptir. Bu benzerlik sayesinde gerek yüzey pürüzlülüğü gerekse çok küçük detaylar sebebi ile oluşabilecek hatalar ihmal edilmiştir.

Rüzgâr tüneli ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kinematik benzerliğin sağlanabilmesi için model ve deney alanı arasındaki blokaj oranının sınırlar (%10) dahilinde olması gerekir. Blokaj oranı, modelin kesit alanının tünel kesit alanına oranıdır. Modelin büyüklüğü, tünel duvarlarına yakın olursa akışkan hava model etrafından geçerken hızını koruyamayacağı için bloke olur. Bu durumda sınır tabakanın üzerindeki bir akış hızı serbest akış hızına eşit olamayacağından akış düzeni bozulur ve blokaj hataları oluşur (Aka, 2003).

SUV model araç, 25 cm uzunluk, 11,20 cm genişlik ve 10,21 cm yüksekliğe sahiptir. Taşıt ön yüzey alanı $102,9 \text{ cm}^2$ olarak hesaplanmıştır. Rüzgâr tüneline deneysel ölçümlerin alındığı rüzgâr tüneli test bölgesi ölçüleri ise $40 \times 40 \text{ cm}$ ölçülerdedir. Bu durumda blokaj oranı: $102,9/1600$ yani %6,43'tür. Bu değer %10 blokaj oranı sınırının altında olmasından dolayı deneysel veriler üzerine blokaj etkileri ihmal edilmiş ve model için kinematik benzerlik sağlanmıştır.

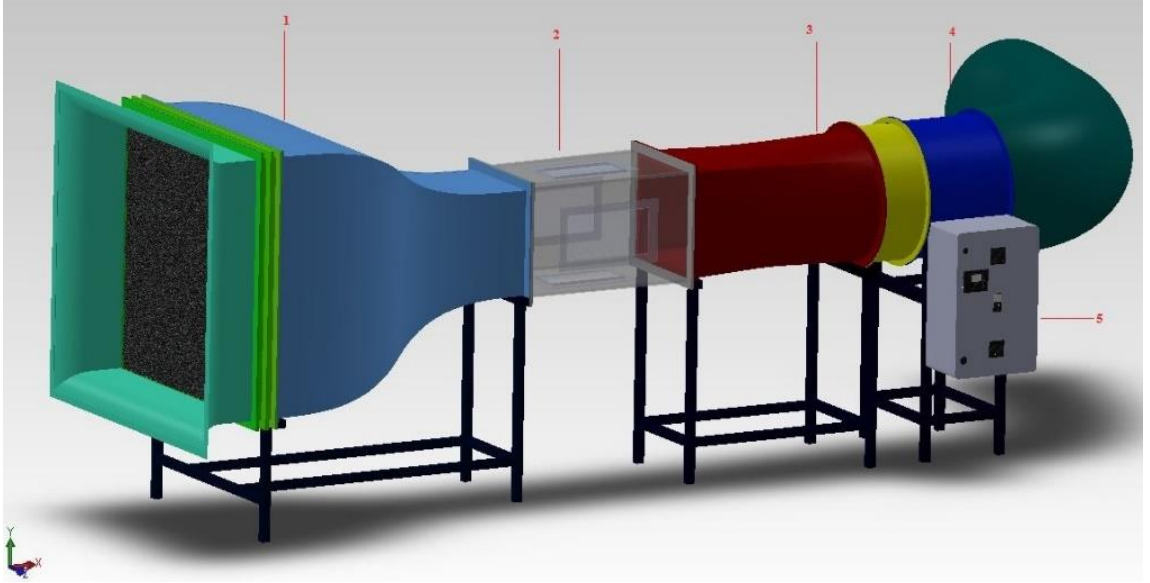
Cengel ve Cimbala (2013) ise blokaj oranının %7,5'ten daha düşük olmasını önermektedir. Araç modeli rüzgâr tüneli test bölgesinde taban yüzeyinden 5 cm yukarıdaki bir düz levha üzerine konulmuştur. Levhanın üst kısmının rüzgâr tüneli sınır tabaka bölgesinin yukarısında kalması nedeniyle araca üniform hız profili uygulanmıştır. Hem blokaj hem de serbest akış hız profili olarak kinematik benzerlik sağlanmıştır. Ancak, araçla yer arasında oluşan bağıl hız sınır şartı sağlanamamıştır. Dinamik benzerliğin sağlanmasında ise Reynolds sayısı bağımsızlığı kullanılmıştır.

3.1.2. Rüzgâr Tüneli

Deneysel çalışmada kullanılan rüzgâr tünelinin ölçüm odası 40 cm × 40 cm kare şeklinde kesite sahip olup 100 cm uzunluğundadır. Tünel içerisinde istenen serbest akış hızı 70 cm çapında bir aksenal fan ve fanı kontrol eden 4000W güce sahip bir elektrik motoru sayesinde sağlanmaktadır. Fan motoru hızı 0,1 Hz hassasiyetle 0-50 Hz aralığında kontrol edilebilmektedir. Tünel içerisinde oluşan havanın akış hızı 3-30 m/s, türbülans şiddeti ise %1'den düşüktür. Rüzgâr tüneli ile kontrol ünitesi Şekil 3.2a ve 3.2b'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2a. Rüzgâr tüneli test ekipmanları



1-Kısılma konisi 2- Deney alanı 3- Yayıncı(difüzör) 4-Fan ünitesi 5- Frekans inverter

Şekil 3.2b. Rüzgâr tüneli test ekipmanları (Bayındırlı ve ark., 2020)

3.1.3. Yük Hücresi

Deneyler esnasında model araç etrafında oluşan aerodinamik kuvvet ve moment değerlerini ölçmek için Şekil 3.3'te gösterilen ve özellikleri Çizelge 3.1'de verilen altı bileşenli yük hücresi kullanılmıştır.



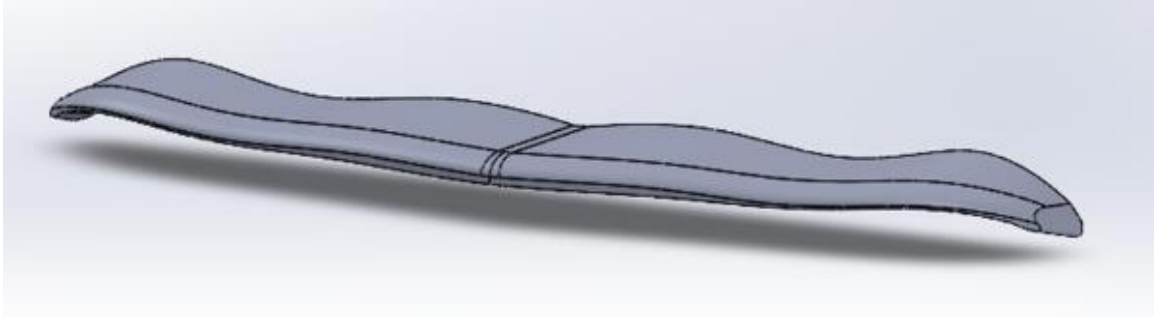
Şekil 3.3. Altı bileşenli yük hücresi

Çizelge 3.1. Yük hücresi ölçüm aralıkları

x eksen kuvveti (F_x), N	± 32
y eksen kuvveti (F_y), N	± 32
z eksen kuvveti (F_z), N	± 100
x eksen momenti (M_x), Nm	$\pm 2,5$
y eksen momenti (M_y), Nm	$\pm 2,5$
z eksen momenti (M_z), Nm	$\pm 2,5$

3.1.4. Spoiler Uygulaması

SUV taşıt modelinin üzerine spoiler yüksekliği/taşıtlı yüksekliği (L/H) oranı sırası ile 0,1, 0,15 ve 0,2 olacak şekilde spoiler montajı yapılmıştır. Tasarlanan spoilerde ilham kaynağı olarak albatros kuşu kanat profili esas alınmıştır. Spoilerin araca değişik yüksekliklerde montajında kullanılan vidaya etki eden sürüklenme kuvveti ayrıca tespit edilip hesaplamalarda bu vidanın neden olduğu fazladan kuvvet çıkartılmıştır. Kullanılan spoilere ait resimler ve spoilerin model araç üzerindeki konumu Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’ de gösterilmiştir.

**Şekil 3.4.** Albatros tip spoiler



Şekil 3.5. Spoilerin SUV araç modeli üzerindeki konumu

3.2. Kuvvet Ölçüm Deneyleri

Hareket halindeki katı bir cisme, yüzeyine dik yönde basınç kuvvetleri ve yüzeyi boyunca yüzeye paralel kayma kuvvetleri etki etmekte olup bu kuvvetlerin bileşenine sürüklenme kuvveti denilmektedir. Toplam sürüklenme kuvveti basınç ve sürtünme kaynaklıdır. Taşıtlarda toplam sürüklenme kuvvetinin çok büyük bir kısmı basınca

bağlıdır. Basınç kaynaklı sürüklenme kuvveti cismin akışa dik olan yüzey bileşenlerine etki eden basınç dağılımı nedeniyle oluşmaktadır. Sürtünme kaynaklı sürüklenme kuvveti ise cismin akışa paralel olan yüzey bileşenlerine etki eden kayma gerilmesi nedeniyle oluşmaktadır. Sürüklenme kuvveti yoğunluk, hız ve alana bağlı olarak ifade edildiğinden bunların boyutsuz ifade edilebileceği boyutsuz katsayı aerodinamik direnç katsayısı (C_D) olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada elde edilen aerodinamik direnç katsayısı, basınç ve sürtünme kaynaklı sürüklenme kuvvetlerinin toplamını içermekte olup yük hücresi kullanılarak ölçülmüştür. Model araca etki eden toplam sürüklenme kuvvetlerinin ölçümünde altı eksenli Honeywell 41 marka yük hücresi kullanılmıştır.

3.3 Sürüklenme Kuvvet Katsayısının Hesaplanması

Bu proje araştırmasında ilk olarak test modeli için aparatlar üretildikten sonra her bir aparat için ayrı ayrı hızlarda rüzgâr tüneli deneyleri yapılarak sürüklenme kuvveti hesabı yapılmıştır. Rüzgâr tüneline yapılan deneyler sırasında ortamın atmosfer basıncı ve sıcaklık değeri tespit edilmiştir. Bu değerlere göre her bir hız için Reynolds sayısı (Re) ve aerodinamik direnç katsayısı (C_D) elde edilmiştir.

Reynolds sayısı (Re) formülü

$$Re = \frac{\rho * V * L}{\mu} \dots\dots\dots(3.1)$$

Burada;

$$\rho = \text{Yoğunluk [kg/m}^3\text{]}$$

$$V = \text{Hız [m/sn]}$$

$$L = \text{Aracın uzunluğu [m]}$$

$$\mu = \text{Dinamik viskozite [Pa·s]}$$

Reynolds sayısı bulunurken ilk olarak yoğunluğu bulmak gerekmektedir. (3.1) numaralı denklemden yoğunluk, formülden hesaplanarak bulunmuştur. Hız ise deneyde çalışılan rüzgâr tüneli serbest akış hızıdır. Aracın uzunluğu test modeli uzunluğu ölçülerek elde edilmiştir. Dinamik viskozite sıcaklık ve basınç değerlerine göre hava özellikleri tablosundan elde edilmiştir.

Yoğunluk formülü

$$\rho = \frac{P_{atm}}{R * T} \dots\dots\dots(3.2)$$

Burada;

$$P_{atm} = \text{Atmosfer basıncı [kPa]}$$

$$R = \text{İdeal gaz sabiti} = 0,287 \text{ [kJ/kgK]}$$

$$T = \text{Sıcaklık [K]}$$

(2) numaralı denklemdeki atmosfer basıncı, deneyde ölçülen hava basıncıdır. İdeal gaz sabiti hava için olan ideal gaz sabitidir. Sıcaklık ise deneyler sırasında ölçülen ortam sıcaklığıdır.

Sürüklenme Katsayısı (C_D) formülü

$$C_D = \frac{F_{Net}}{\frac{1}{2} * \rho * V^2 * A} \dots\dots\dots(3.3)$$

Burada;

$$\rho = \text{Yoğunluk [kg/m}^3\text{]}$$

$$V = \text{Serbest akış hızı [m/s]}$$

$$A = \text{Aracın ön bakış alanı [m}^2\text{]}$$

$$F_{Net} = \text{Araca etki eden net sürüklenme kuvveti [N]}$$

Aerodinamik direnç katsayısı Eşitlik 3.3'te verilmiş olup sürüklenme kuvveti F_D , yoğunluk ρ , serbest akış hızı V ve aracın ön kesit alanı A parametrelerinin fonksiyonudur.

Belirsizlik Analizi

Bu çalışmada ölçülen ve hesaplanan parametrelerin belirsizlik değerleri tarafından kullanılan yöntemler ile belirlenmiştir. Deney parametreleri eşitlik 3.4 formunda fonksiyonlardır (Yeşildağ, 2013).

$$r = kX_1^a X_2^b X_3^c \dots \dots\dots(3.4)$$

Bu formdaki fonksiyonun belirsizlik ifadesi eşitlik 4.1'de ifade edilmiştir.

$$u_r = \frac{w_r}{r} = \left[a^2(u_{x_1})^2 + b^2(u_{x_2})^2 + c^2(u_{x_3})^2 + \dots \right]^{1/2} \dots\dots\dots(3.5)$$

Bu çalışma kapsamında deneysel olarak hız, kuvvet, yoğunluk, sıcaklık vb. parametreler ölçülmüş olup bu ölçüm sonuçları kullanılarak Reynolds sayısı, sürüklenme kuvveti katsayısı hesaplanmıştır.

Sürüklenme kuvvetinin ölçümünde oluşan belirsizlikler

Sürüklenme kuvvet katsayısına etki eden belirsizlik değerleri $U_0=10 \text{ m/s}$ ($Re= 3.2 \times 10^5$) değeri için elde edilmiştir. Eşitlik 3.5'te ön mikromanometre belirsizliği, pitot açısı ve basınç hortumlarının belirsizliği yerine konulduğunda serbest akış hızının ölçümündeki

belirsizlik % 2,1 olarak elde edilir.

Reynolds sayısının belirsizlik değerinin hesaplanması

$$Re = \frac{\rho U_{\text{pitot}} H}{\mu} \quad (3.6)$$

Şeklinde tanımlanan Re sayısı için belirsizlik değeri, ρ , U_{pitot} , H ve μ değerine bağlı olarak değişmektedir. Eşitlik 3.6 kullanılarak Re sayısının belirsizlik değeri hesaplanabilmektedir.

$$u_{Re} = \frac{w_{Re}}{Re} = \left[(u_{\rho})^2 + (u_{\text{pitot}})^2 + (u_H)^2 + (u_{\mu})^2 \right]^{1/2} \quad (3.7)$$

Reynolds sayısının belirsizlik değeri, daha önce yukarıda tespit edilen; yoğunluk, hız, karakteristik uzunluğun ve dinamik viskozitenin belirsizliğinin eşitlik 3.8’de yerine yazılması ile % 3,87 olarak hesaplanmıştır.

Aerodinamik direnç katsayısının (C_D) belirsizlik değerinin hesaplanması

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}(\rho)(U_{\text{pitot}})^2 \cdot (A_{\text{ön}})} \quad (3.8)$$

denklemleri ile hesaplanan sürüklenme kuvveti katsayısının belirsizliğini belirlemek için benzer şekilde eşitlik 3.9 kullanılmaktadır.

$$u_{C_D} = \frac{w_{C_D}}{C_D} = \left[(u_{F_D})^2 + (u_{\rho})^2 + 4(u_{\text{pitot}})^2 + (u_{A_{\text{ön}}})^2 \right]^{1/2} \quad (3.9)$$

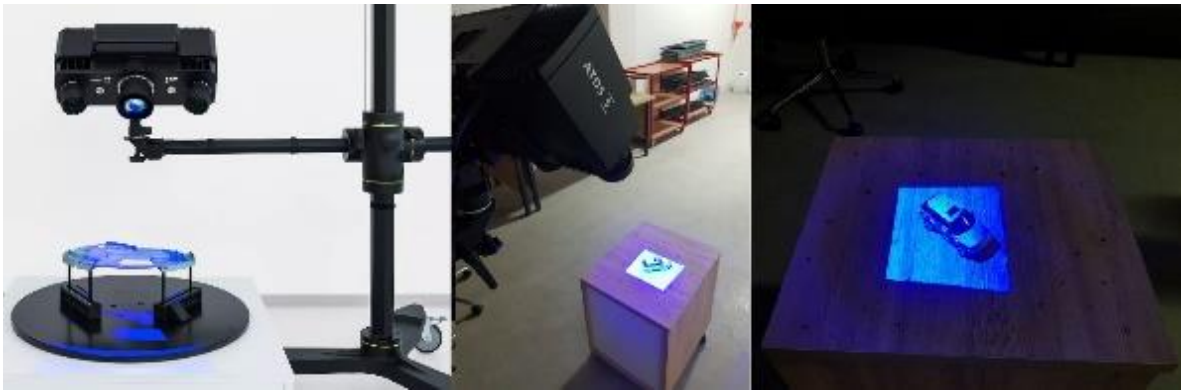
Sürüklenme kuvveti katsayısının belirsizliğinin değeri, daha önce yukarıda tespit edilen; sürüklenme kuvveti, yoğunluk, hız, ön bakış alanının belirsizliğinin eşitlik 3.9’da yerine yazılması ile sürüklenme kuvveti katsayısının belirsizliği Reynolds sayısının 3.2×10^5 değerindeki şartlar için % 4,7 olarak hesaplanmıştır (Yeşildağ, 2013).

3.4. CFD Analiz

SUV taşıt modelinde spoiler uygulaması üzerine gerçekleştirilen sayısal analiz için bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği tabanlı ile çalışan ANSYS Fluent® programı kullanılmıştır. Taşıt modeline ait çizim verilerinin elde edilmesinde 3 boyutlu tarayıcı kullanılmıştır.

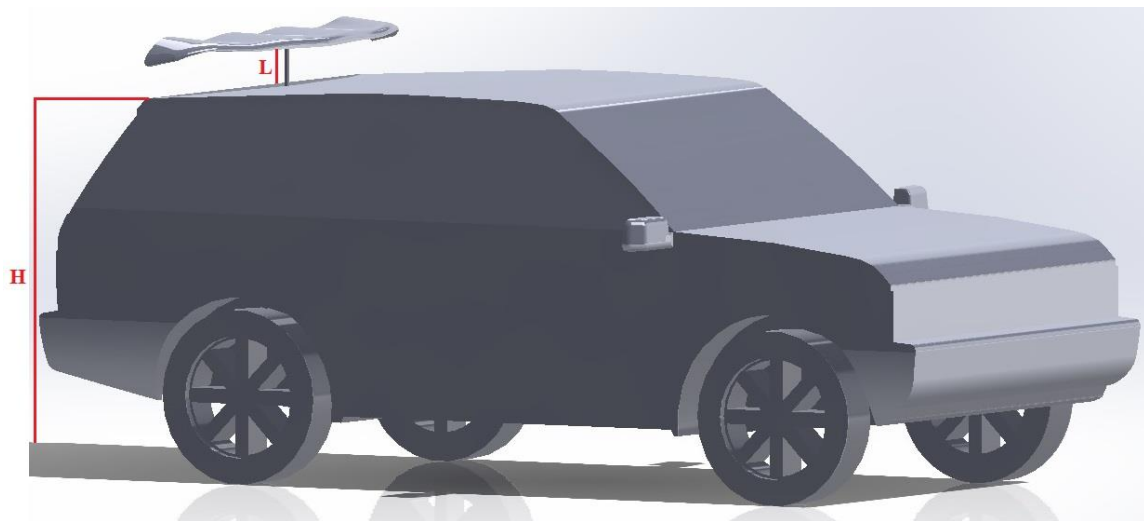
3.4.1. Taşıt Modeline Ait Çizim Verisi

Taşıt modelinin çizim verileri SolidWorks® programı ile oluşturulmuştur. SolidWorks® programında taşıta ait katı model oluşturulmadan önce, deneylerde kullanılan model taşıt Şekil 3.6’da görülen 3 boyutlu tarayıcı (GOM-Atos 5) ile taratılıp doğru ölçülendirme ve çizim verisi elde edilmiştir.



Şekil 3.6. 3 boyutlu tarayıcı ve taşıt modelinin taranması

3 boyutlu tarayıcı ile taranan taşıt modeline ait doğru ölçüler tarama verileri üzerinden alınarak taşıtın SolidWorks® programı ile modellenmesi yapılmıştır. Tarayıcı tarafından oluşturulan modelin çok fazla detay içermesi ve birçok küçük ayrıntıyı dahi tarayarak yüzey oluşturması, modelin Fluent® programında analizinin gerçekleştirilmesine olanak vermemektedir. Bu nedenle, Şekil 3.7’de de gösterildiği üzere taşıt Fluent® ile sayısal analize uygun olarak SolidWorks® programı çizim basitleştirilerek modellenmiştir.

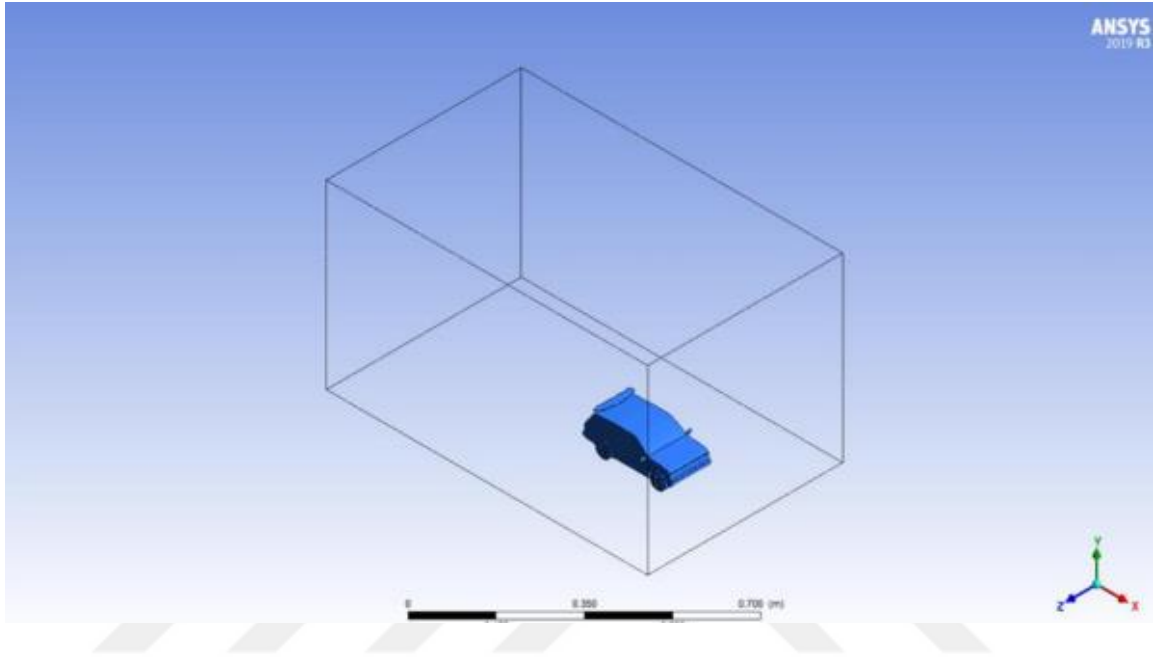


Şekil 3.7. Taşıt modeline ait SolidWorks® çizimi

3.4.2. Aerodinamik Analiz

SolidWorks® ile modellenen taşıt, Fluent® programında analiz için uygulamaya hazır hale getirilmiştir. Sayısal analiz verilerinin deneysel veriler ile karşılaştırılabilmesi

için Fluent® programında da model taşıtın Şekil 3.8’de görüldüğü gibi kalıp boşlukları rüzgâr tüneline test alanının kesit ölçüleri gibi 40×40×100 cm olarak oluşturulmuştur. Çizilen taşıt modeli aynı deneysel ölçümlerdeki gibi rüzgâr tüneline yerleştirilerek model aracın üniform akış yapısından etkilenmesi sağlanmıştır. Sayısal analizler temel taşıt modeli ve 0,1 L/H spoiler modeli için uygulanmıştır.



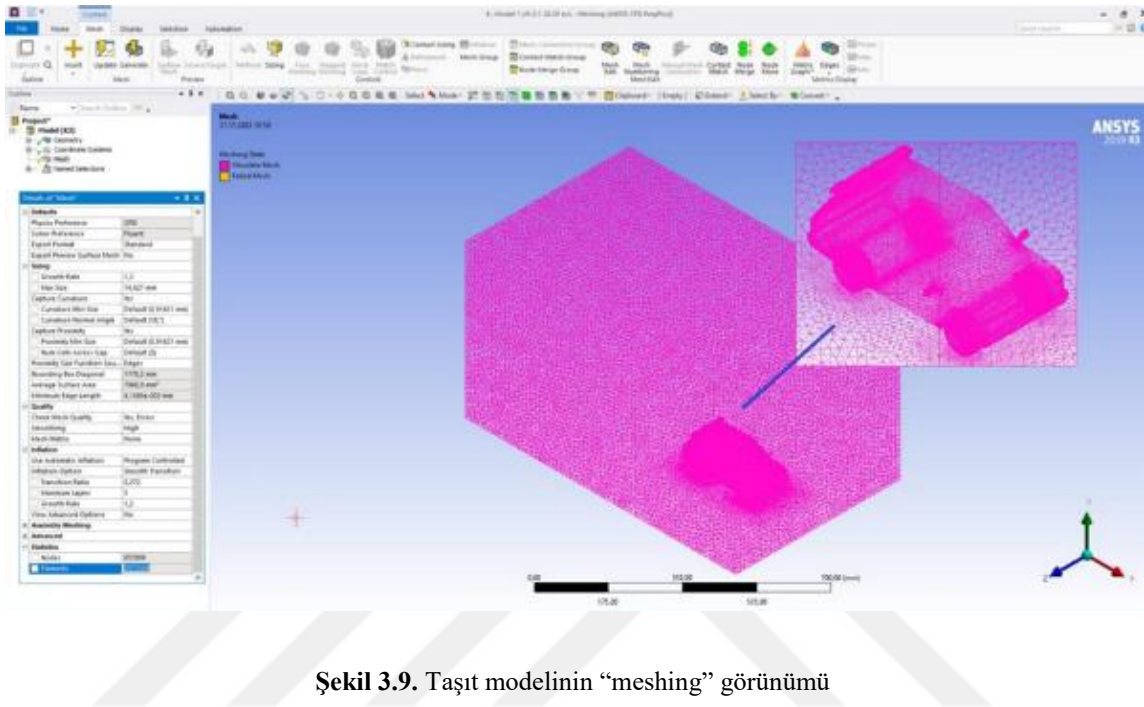
Şekil 3.8. Fluent® programında model taşıt için kalıp boşlukları

3.4.2.1. Ağ Yapısının Oluşturulması

Model taşıta ait aerodinamik analizlerin gerçekleştirilmesi için Şekil 3.9’da gösterildiği gibi model ve akışın gerçekleşeceği hacim üzerinde mesh (ağ yapısı) oluşturulmuştur. Sayısal analiz esnasında hesaplamaların daha hassas olması için ağ yapısı olarak tetrahedrons (üçgensel) hücre yapısı tercih edilmiştir. Sayısal çözüm için belirlenen sınırlar;

- Sabit hız sınır şartı olarak tanımlanan ve akışkanın girdiği yüzey olan GİRİŞ,
- Sabit basınç sınır şartı olarak tanımlanan ve akışkanın çıktığı yüzey olan ÇIKIŞ,
- Dikdörtgen prizması olarak belirlenen hacmin kenarlarını oluşturan sınır şartı olarak DUVAR,
- Duvar tarafından sınır şartı olarak belirlenen ve aracın konumlandırıldığı yüzey olan YOL,

- Duvar sınır şartı olarak tanımlanan ve aerodinamik analizi yapılan araç olarak belirlenen model taşıtın KALIP BOŞLUĞU.
- Deneysel çalışma ile aynı şartların sağlanabilmesi için duvar sınır şartları SABİT DUVAR olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.9. Taşıt modelinin “meshing” görünümü

3.4.2.2 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Çözümlemede Ağdan Bağımsızlık

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılarak gerçekleştirilen analizlerin güvenilir olması hazırlanan geometrinin doğruluğuna ve geometri üzerinde oluşturulan ağ yapısına önemli ölçüde bağlıdır. Mesh (ağ) uygulanacak elemanlarının sayısı, hesaplamaların doğruluğunu ve süresini oldukça etkiler. Bu yüzden, mesh (ağ) bağımsızlık çalışmaları ile doğru hesaplamalar yapabilmek için gerekli olan minimum eleman sayısının belirlenmesi çok önemlidir (Oktay ve Eraslan, 2021).

Ağ uygulanacak elemanların belirlenmesinden sonra elemanlar üzerinde gerçekleştirilen mesh kalitesi de hesaplamaların güvenilirliğini etkilemektedir. Geometrik olarak karmaşık şekillere sahip elemanlar üzerinde uygulanan mesh işleminin kalitesi düşük olabilir. Bu kalitenin artırılabilmesi için ağ uygulaması yapılan elemanın düzgün olmayan yüzeylerinin (kavisler, keskin uçlar vb.) çizim verilerini biraz daha basitleştirilerek mesh işlemine uygun hale getirilmesi önerilmektedir. Çizim verisini basitleştirme sürecinde gerçek modele olan benzerlikten uzaklaşılmalıdır.

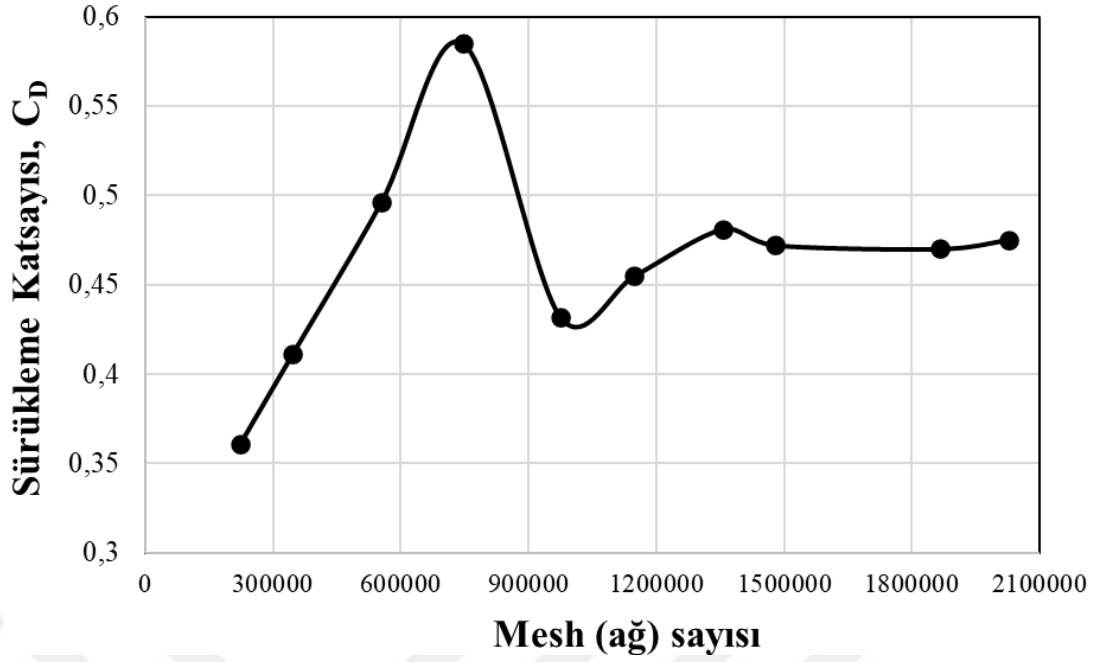
SUV araç modelinin çizim verileri üzerinde uygulanan mesh işlemi sonucunda ağ kalitesi değeri (element quality) ortalama 0,78'dir. Ağ kalitesi değerinin 0,5'ten yüksek olması HAD uygulamasında kullanılacak modelin çizim verisinin kabul edilebilir olduğunu göstermektedir.

Hesaplama akışkanlar dinamiği kullanılarak yapılan sayısal analizlerin çözümleri ağ sayısındaki artışa bağlı olarak bir süre sonra değişmemeye başlar. Analiz sonuçlarının değişmediği ağ sayısının belirlenmesi işlemine de ağdan bağımsızlık testi denilir.

Bu çalışmada, SUV araç modeli için gerçekleştirilen ağdan bağımsızlık testi sonuçları Çizelge 3.2 ve Şekil 3.10'da verilmiştir. Ağdan bağımsızlık testi 4×10^5 Reynolds sayısında ve 10 farklı mesh yapısı için yapılmıştır. Özellikle 1479338 ağ sayısı değerinden sonra sürükleme katsayısında önemli bir değişikliğin olmadığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 3.2. Ağdan bağımsızlık testi sonuçları, $Re = 4,55 \times 10^5$

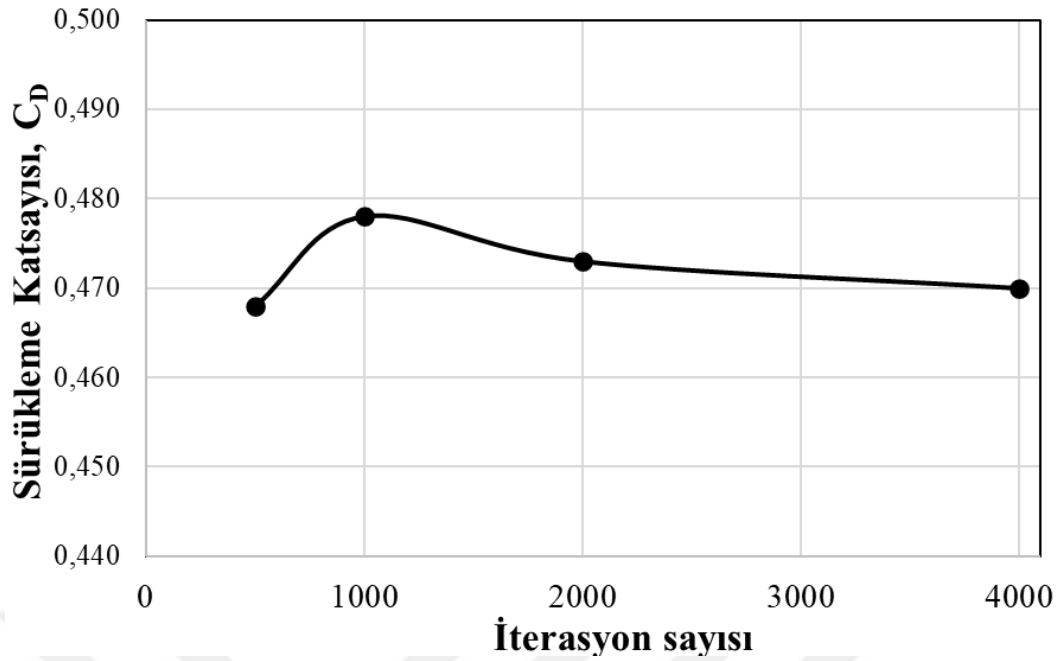
Ağ sayısı	C_D
223430	0,361
345665	0,411
554215	0,496
745681	0,585
974120	0,432
1148565	0,455
1355671	0,481
1479338	0,472
1865365	0,47
2025965	0,475



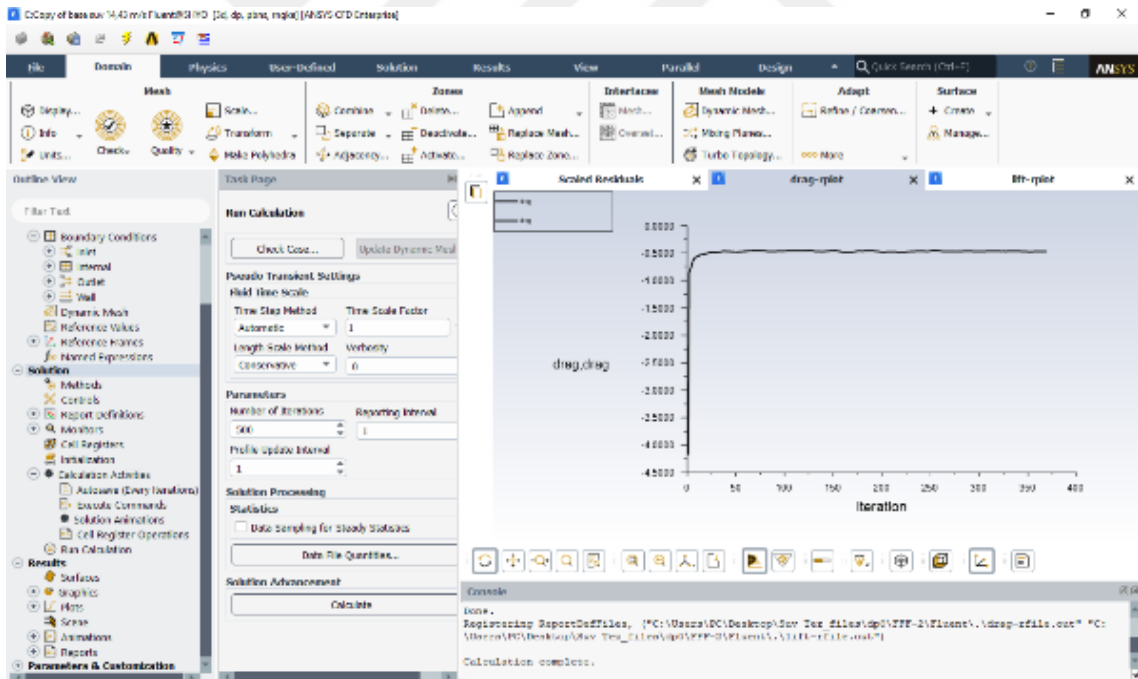
Şekil 3.10. Ağ bağımsızlığı grafiği, $Re=4,55 \times 10^5$

3.4.2.3. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Çözümlemede İterasyondan Bağımsızlık

HAD analizleri için uygulanan bir başka bağımsızlık testi de iterasyondan bağımsızlıktır. İterasyondan bağımsızlık testinin amacı da yine ağdan bağımsızlık testinde olduğu gibi doğru çözümlmeyi en kısa sürede yapabilmektir. Çünkü, belirli bir iterasyon sayısından sonra analiz sonucunda önemli bir değişiklik olmamaktadır. Yine $4,55 \times 10^5$ Reynolds sayısında gerçekleştirilen iterasyondan bağımsızlık testi sonucu Şekil 3.11’de gösterilirken Şekil 3.12 aynı Reynolds sayısında sürüklenme katsayısı hesaplanırken gerçekleştirilen iterasyon sayısı- C_D değerlerinin grafiğini anlık olarak göstermektedir.



Şekil 3.11. İterasyon bağımsızlığı grafiği, $Re=4,55 \times 10^5$



Şekil 3.12. SUV modelin hesaplama esnasındaki C_D yakınsama grafiği, $Re=4,55 \times 10^5$

3.4.2.4. Genel Denklemler

Fluent® programı sonlu hacimler metodunu kullanarak süreklilik, momentum, enerji, türbülans için genel integral denklemlerini çözmektedir. Sonlu hacimlerin

hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile çözümlenmesinde süreklilik ve momentum denklemleri kullanılır. Uygulamada bu denklemleri analitik olarak çözmek zordur. Bu yüzden bu denklemler paket programlar kullanılarak numerik olarak çözümlenir.

Süreklilik denklemi

Süreklilik denklemi, bir akış içerisinde yer alan kontrol hacmindeki kütle dengesi olarak ifade edilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.10)$$

Momentum denklemi

Newton'un ikinci kanununa göre bir akışkan parçasının momentumunun değişim hızı bu akışkan parçasına etki eden kuvvetlerin toplamına eşittir. Bir akışkan parçasının birim hacminin x, y ve z yönlerindeki momentum artış hızı sırasıyla $\rho \frac{Du}{Dt}$, $\rho \frac{Dv}{Dt}$ ve $\rho \frac{Dw}{Dt}$ terimleri ile ifade edilir (İnce, 2007).

Navier – Stokes denklemleri

Navier – Stokes ve süreklilik denklemleri diferansiyel hareket denklemleri olarak da ifade edilir. Bu denklemleri çözümlenmesinde bazı kabuller yapılarak basınç ve hızın üç bileşeni (x,y,z) hesaplanır. Navier – Stokes denklemlerinin sonlu hacimler metodunun geliştirilmesi için en kullanışlı hali;

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{M_x} \quad (3.11)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{M_y} \quad (3.12)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{M_z} \quad (3.13)$$

Akış analizleri Fluent® programında gerçekleştirilmiştir. Model SUV rüzgâr tüneli test alanı ölçüleri olan 40×40×1000 cm deney alanı içerisinde zemine konumlandırılmış, kalıp boşluğu oluşturulmuştur. Setup bölümünde bu denklemler çözüm alanındaki her noktada dengeye geldiği zaman Fluent® programı ile yapılan çözümlemede yakınsama gerçekleşmektedir. Her akışkan değişkeni için artıklar çözümdeki hatanın şiddetini belirtmektedir. Bu çalışmada yakınsama kriterleri süreklilik,

x-hızı, y-hızı ve z-hızı için 1.0×10^3 olarak alınmıştır. Türbülans şiddeti ise %1 olarak alınmıştır. Aracın ön yüzey alanı reports-projected area bölümünde temel taşıt modeli için $0,01029 \text{ m}^2$, spoiler uygulanan MODEL1 için $0,00114 \text{ m}^2$ olarak hesaplanmıştır. Çözümlenmeler SIMPLE Least Squared Cell Based, k- ϵ RNG türbülans modeli standart duvar fonksiyonları kullanılarak standart initialization olarak gerçekleştirilmiştir. Çözümlenmeler Fluent® programında, AMD Ryzen 9 5950X 16-Core Processor 3.4 GHz işlemci, NVIDIA RTX A4000 16 GB ekran kartı ve 64 GB ram özelliklerine sahip iş istasyonu (Work Station) bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

3.4.2.5. Türbülans Modeli Seçimi

Türbülans modellemesi hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde büyük bir öneme sahiptir çünkü mühendislik hesaplamalarının çoğunluğu türbülanslıdır. ANSYS Fluent®, söz konusu hesaplamaların yapılması amacıyla Spalart-Allmaras, k- ω , RNG k- ϵ ve Transition SST gibi çeşitli modeller sunmaktadır. Literatürde yer alan benzer çalışmalarda özellikle durma noktalarındaki basıncın daha doğru tayin edilebilmesi için RNG k- ϵ türbülans modelinin kullanımının tercih edildiği görülmüştür. Söz konusu modelin dış akışlarda uygun sonuçlar vermesi nedeni ile karayolu taşıtlarının aerodinamik uygulamalarında kullanılması tercih sebebi olmaktadır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada belirlenen SUV modeline spoiler uygulaması deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda taşıt üst yüzeyine 3 farklı yükseklikte montajı yapılan spoilerin sürüklenme katsayısı değerlerindeki değişimi gösterirken, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analiz bölümünde MODEL1'in sürüklenme katsayısı belirlenmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

4.1. Deneysel Sonuçlar

Spoiler uygulaması ile taşıt ön yüzey alanını genişlettiği için sürüklenme kuvvetinin artmasına sebep olsa da akış yönlendirmesi sağlayarak taşıt arka iz bölgesinde negatif basınç alanının azalmasını sağlayarak aerodinamik direnç kuvvetinin azalmasını sağlamıştır.

TM ile spoiler uygulamasının yapıldığı modellere ait rüzgâr tüneli testlerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1.'de sunulmuştur.

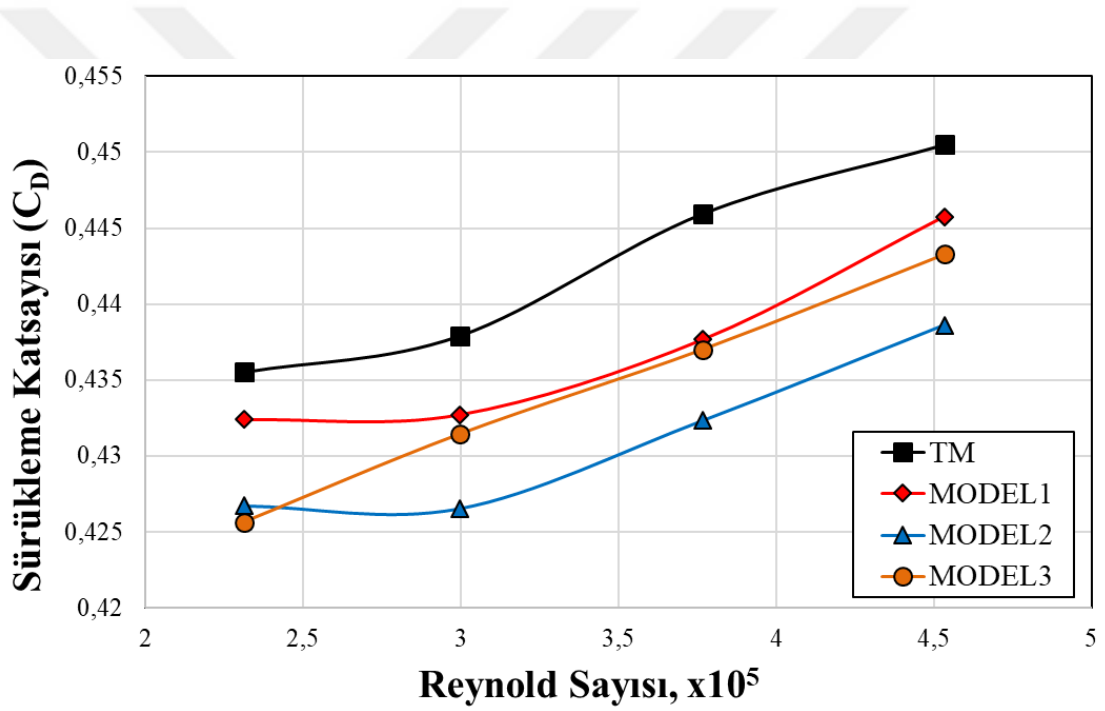
Çizelge 4.1. Reynolds sayısına bağlı SUV modellerine ait C_D değerleri

Re, 10^5	TM	MODEL1	MODEL2	MODEL3
2,3	0,435	0,412	0,403	0,400
3	0,437	0,412	0,403	0,406
3,75	0,445	0,417	0,409	0,412
4,55	0,450	0,425	0,415	0,418

Şekil 4.1, elde edilen deneysel sonuçlara ait C_D değerlerinin değişimlerini göstermektedir. Spoiler uygulaması ile sürüklenme katsayısı değerlerinde önemli bir azalmanın olduğu gözlemlenmektedir. Özellikle $C_{D(MODEL2)}$ modelinde bu azalmanın daha yüksek olduğu, spoiler yüksekliğinin daha da artması ile sürüklenme katsayısındaki iyileşmenin azaldığı görülmektedir. SUV model üzerinde kullanılan spoiler, akışın daha fazla yüzeye tutulmasını ve aracın hemen arkasında meydana gelen türbülansın oluşturduğu negatif basınç bölgesinin azalmasını sağlayarak basınç kaynaklı oluşan sürüklenme katsayısının azalmasına sebep olmuştur. Spoiler yüksekliğinin artması ile istenen akış yönlendirmesi azalmıştır. Bu nedenle, taşıt geometrisi ve spoiler tasarımına bağlı olarak optimum spoiler yüksekliklerinin tespiti önemlidir. Bu taşıt ve spoiler

modelleri için spoiler yüksekliğindeki daha fazla artış sürüklenme katsayısını olumsuz etkilemiştir.

Spoiler uygulamasının gerçekleştirildiği modellerin TM'ye oranla sırası ile yaklaşık olarak ortalama, %5.72, %7.78 ve %7.49 daha düşük sürüklenme katsayısına sahiptir. (Kim ve ark., 2006; Demircioğlu, 2007; Sarı, 2007; Kim ve ark., 2008)'de çalışmalarında benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Bunların yanında (Palanivendhan ve ark., 2021), çalışmalarında spoilerin sürüklenme kuvvetini %12-15 azalttığını ve bunun önemli bir yakıt tasarrufu sağlayacağını (Han ve ark., 2016), aktif çalışan spoiler sayesinde C_D değerinde %41'e varan iyileşme elde edilebileceğini, (Yuan ve Gu, 2019) ise değişken hücum açılı spoiler ile %11'e kadar sürüklenme katsayısında azalma sağlanabileceğini rapor etmişlerdir.



Şekil 4.1. Taşıt modellerine ait deneysel C_D değerleri

4.1.1 Akış Görüntüleri

Şekil 4.2, TM'ye ait akış görüntülemesini göstermektedir. Akış çizgisinin yüzeyden ayrıldığı bölgelerde basınç oluşumu gerçekleşmektedir. Taşıta ait köşe bölgelerde kışın hızlandığı, tampon ve ön bölümde akışın daha yavaş olduğu gözlemlenmektedir.



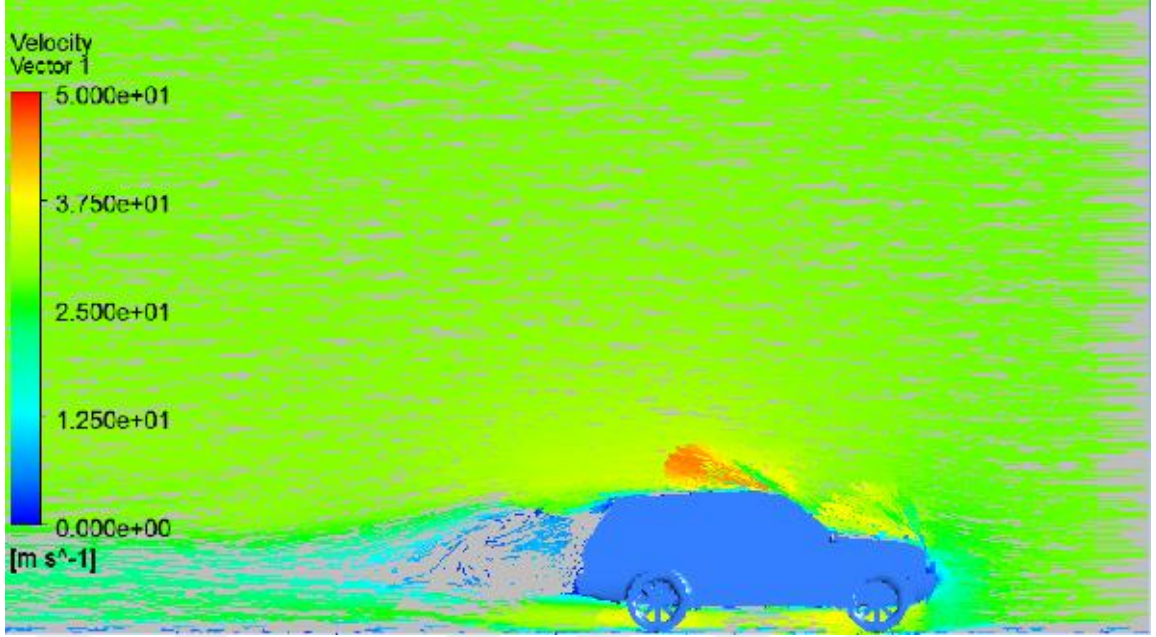
Şekil 4.2. TM akış görüntülemesi

4.2. Sayısal Analiz Sonuçları

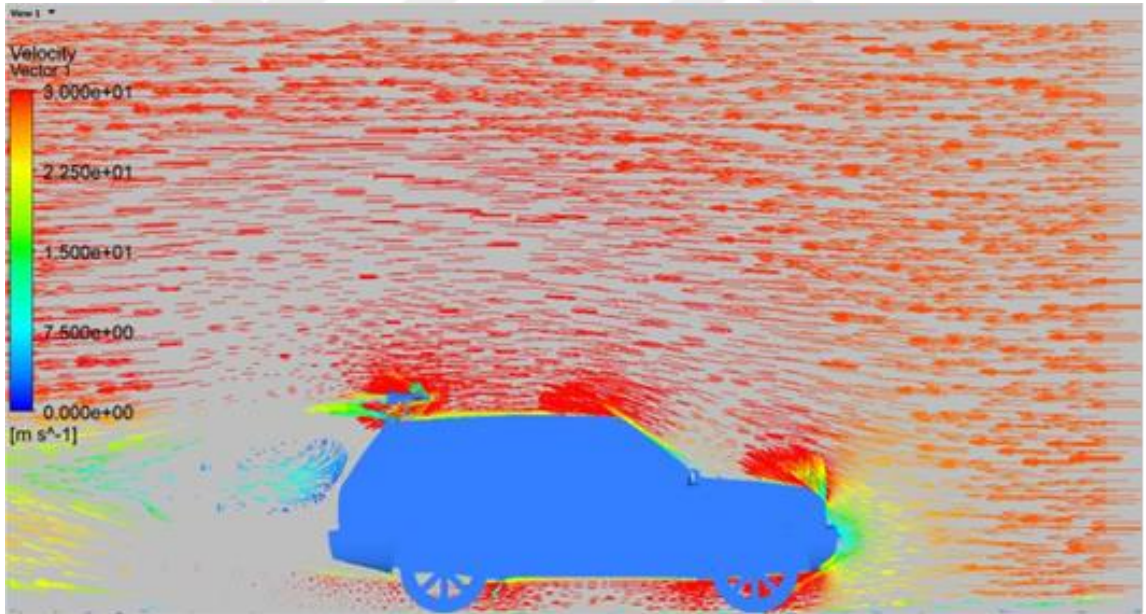
Deneysel çalışmalarda elde edilen aerodinamik iyileşmeleri desteklemek ve doğrulamak için temel taşıt modeli ile MODEL1 deney şartlarında HAD yöntemi kullanılarak modellenmiş ve ilgili modellerin aerodinamik özellikleri ve C_D katsayıları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak spoiler uygulamasının C_D değeri üzerine etkisinin doğruluğu ortaya konulmuştur.

4.2.1. Hız Vektörleri

Şekil 4.3a ve 4.3b, analizleri gerçekleştirilen taşıt modellerinin düzlemleri boyunca oluşan akış hareketinin yönü ve şiddeti hız vektörleri ile gösterilmiştir. Her iki modelde de akış ayrılmasının olduğu bölgelerde vortekslerin meydana geldiği görülmektedir. Temel taşıt modelde oluşan vorteks yoğunluğunun daha yüksek olduğu, spoiler uygulamasının akış yönünü değiştirerek vorteks yoğunluğunu düşürdüğü de görülmektedir.



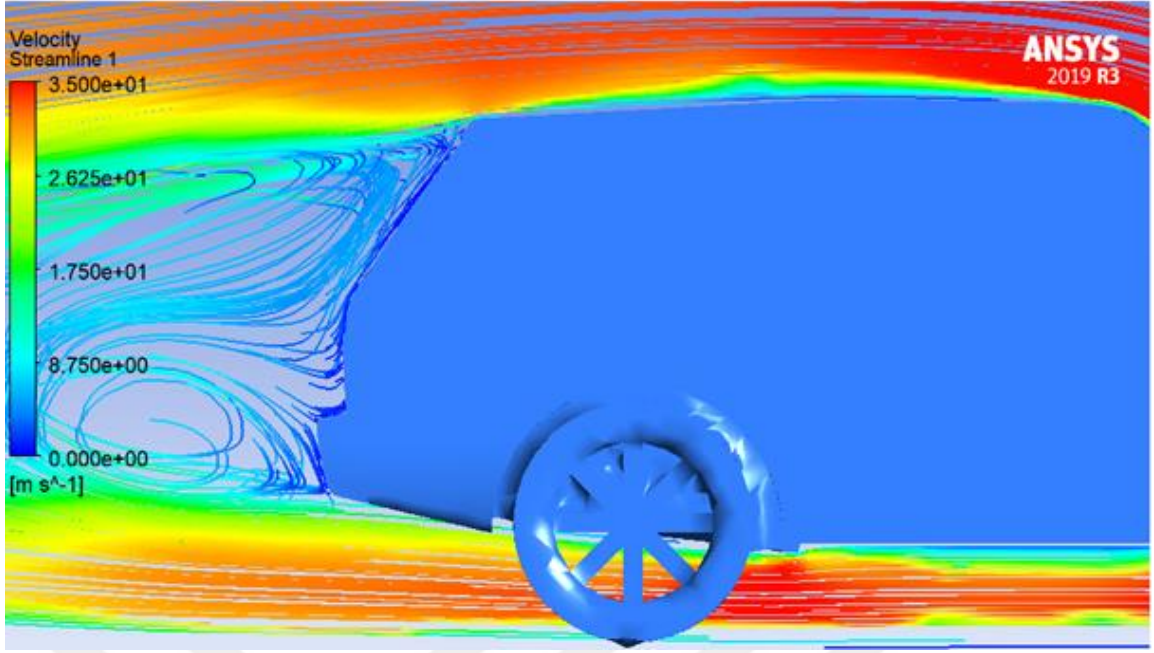
Şekil 4.3a. TM'ye ait vektörel akış hızı, $Re=4,55 \times 10^5$



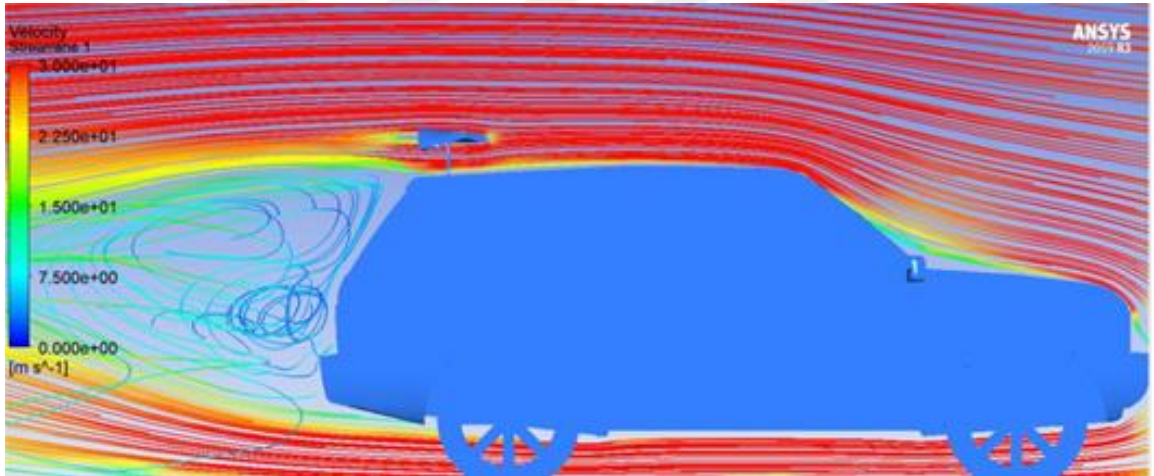
Şekil 4.3b. MODEL1'e ait vektörel akış hızı, $Re=4,55 \times 10^5$

4.2.2. Akış Çizgileri (Streamlines)

Şekil 4.4a ve 4.4b'de gösterilen akış çizgileri oluşumunun hız vektörleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Spoiler uygulaması ile akışı taşıtın arka art iz bölgesine yönlendirilmiş ve yüzeye tutunması sağlanmıştır. Arka cam önündeki vortekslerin ise yoğunluğunun önemli ölçüde azalmasına ve taşıttan uzaklaşmasına sebep olmuştur.



Şekil 4.4a. TM'ye ait akış çizgileri, $Re=4,55 \times 10^5$



Şekil 4.4b. MODEL1'e ait akış çizgileri, $Re=4,55 \times 10^5$

4.2.3. Taşıt Modelleri üzerindeki basınç dağılımı

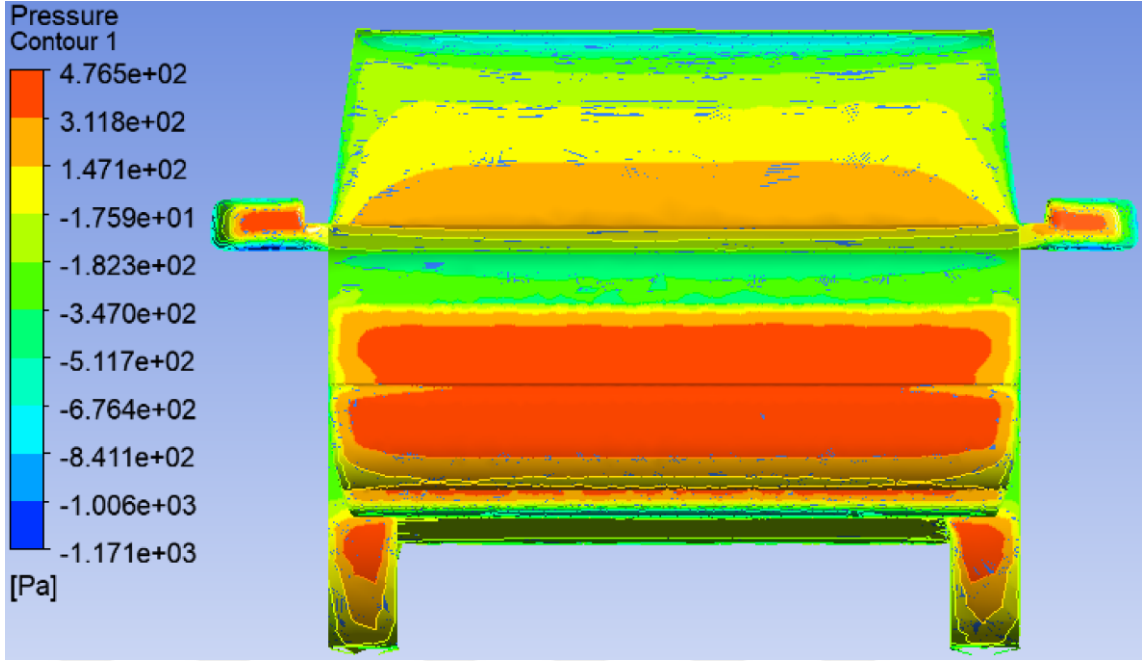
Şekil 4.5a. – 4.7b. TM ve MODEL1 üzerindeki basınç dağılımını göstermektedir. Elde edilen analiz sonuçlarına göre, spoiler uygulamasının ön kaput ve ön camın kesiştiği bölgede basıncı düşürdüğü, üst kaput ile ön camın kesiştiği bölge de is basınç artışına sebep olduğu görülmektedir. Spoiler uygulamasının aracın arka bölgesinde oluşan pozitif basıncın da düzgün bir şekilde yükselmesine sebep olduğu gözlemlenmektedir.



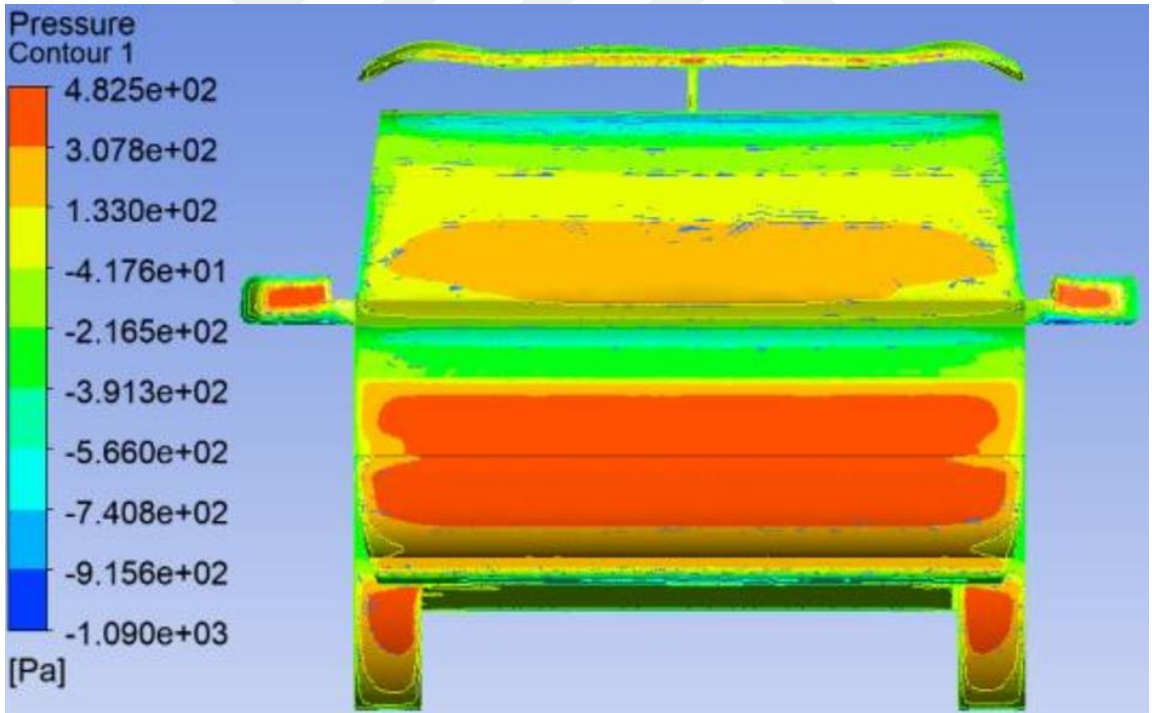
Şekil 4.5a. TM üzerindeki basınç dağılımı (yan görünüş)



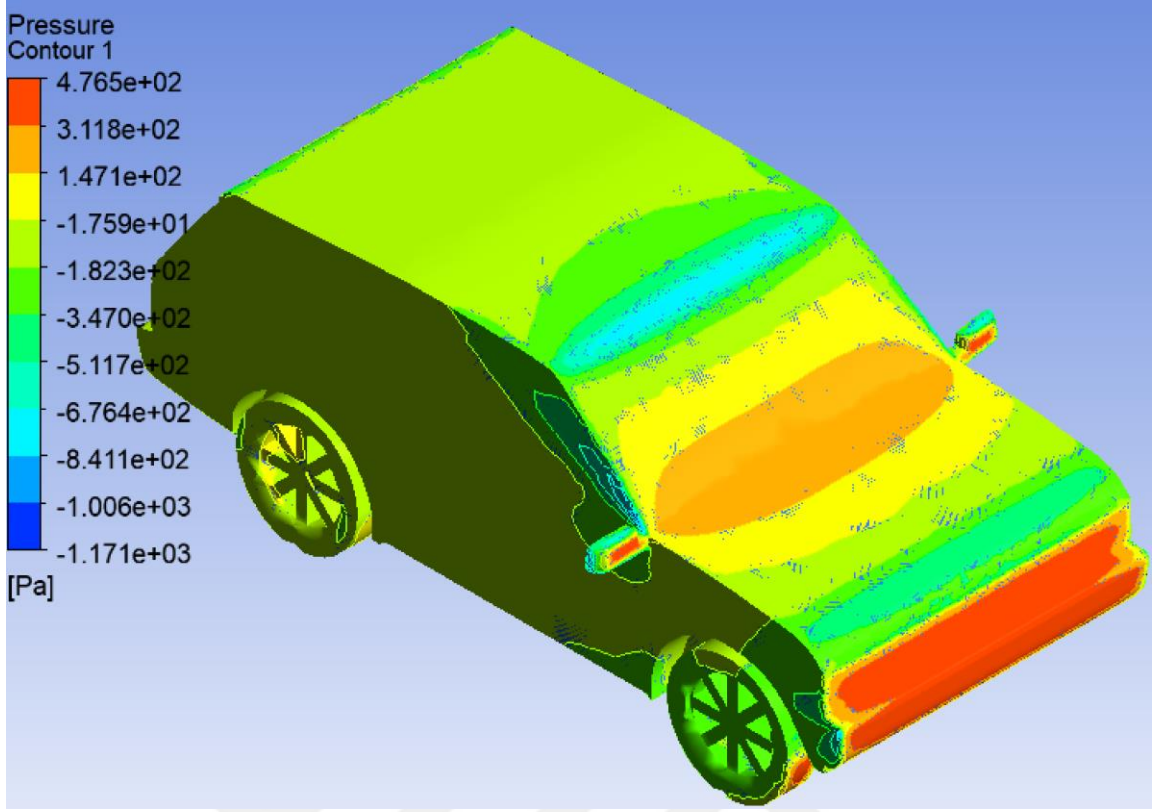
Şekil 4.5b. MODEL1 üzerindeki basınç dağılımı (yan görünüş)



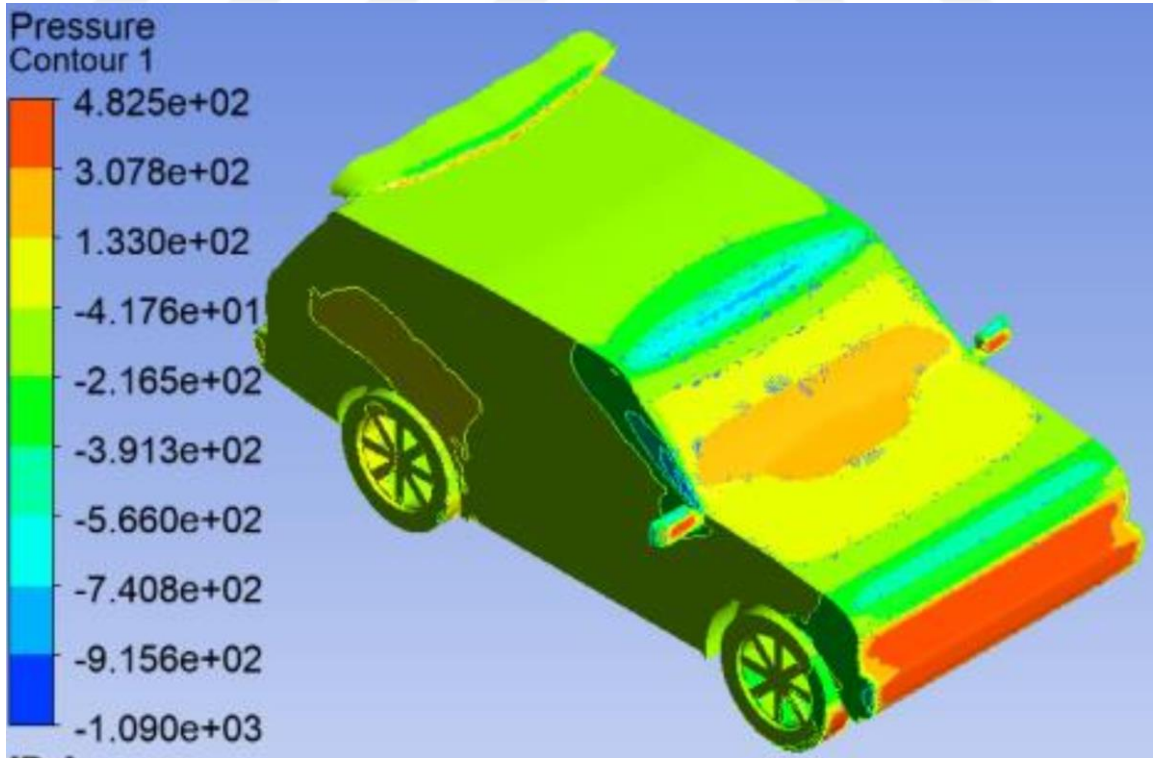
Şekil 4.6a. TM üzerindeki basınç dağılımı (ön görünüş)



Şekil 4.6b. MODEL1 üzerindeki basınç dağılımı (ön görünüş)



Şekil 4.7a. TM üzerindeki basınç dağılımı (izometrik görünüş)



Şekil 4.7b. TM üzerindeki basınç dağılımı (izometrik görünüş)

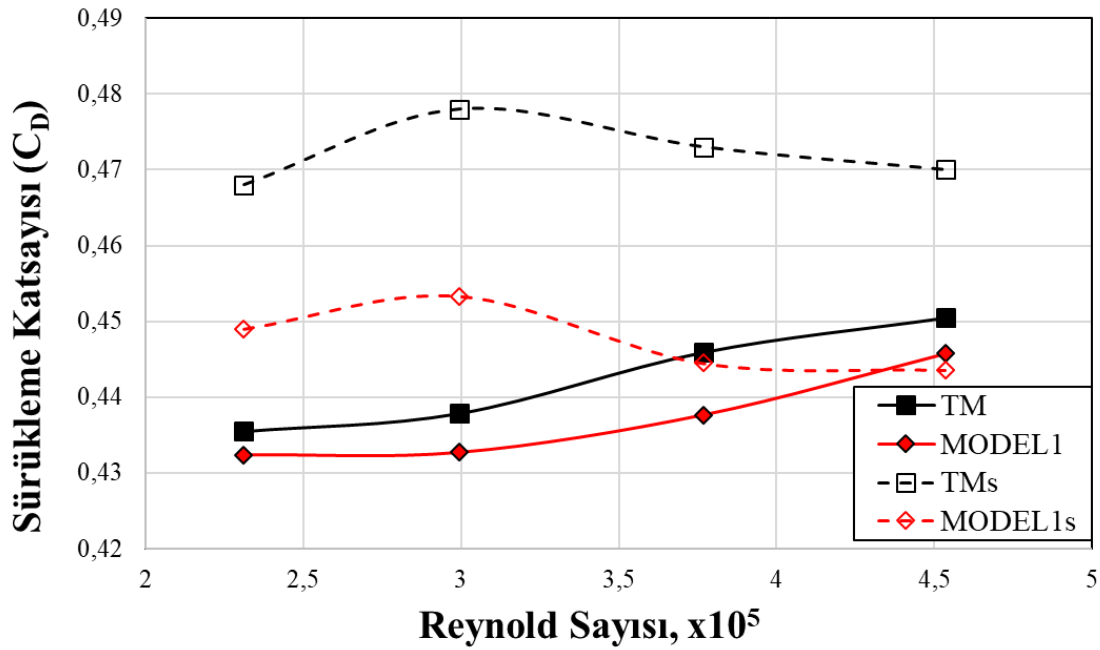
4.2.4 Sürükleme Kuvveti

Şekillerde gösterilen akış hareketleri incelendiğinde, spoiler uygulamasının aracın arka bölgesinde oluşan vorteks oluşumlarını azalttığı görülmektedir. Bu sayede taşıtın sürükleme katsayısında da bir iyileşme olacağı öngörülebilir. Çizelge 4.2, incelenen her iki taşıt modeli için 4 farklı hızdaki C_D değerlerini göstermektedir.

Çizelge 4.2. Sayısal analiz sonucu elde edilen sürükleme katsayısı değerleri

$Re, 10^5$	$C_{D(TM_s)}$	$C_{D(MODEL_s)}$
2,3	0,468	0,449
3	0,478	0,453
3,75	0,473	0,444
4,55	0,470	0,443

Şekil 4.8, taşıt modelleri için hesaplanan C_D değerlerine ait değişim eğrilerini göstermektedir. Hesaplanan verilere göre, spoiler uygulamasının C_D değerini ortalama olarak yaklaşık %5,22 iyileştirdiği, bu değer deneysel sonuçlar ile de uyumlu olduğu ortaya konulmuştur. Böylece, belirlenen taşıt modeline göre daha ayrıntılı aerodinamik hesaplamalar sayısal analiz yöntemi ile gerçekleştirilebilir. (Feng, 2011), çalışmasında spoiler uygulamasının sürükleme kuvvetini %10 azalttığını, kaldırma (lift) kuvvetini ise %7 artırdığını ortaya koymuştur. (Palanivendhan ve ark., 2021) çalışmalarında, %20 açısına sahip bir spoiler ile sürükleme kuvvetinin %12-15 iyileştirilebileceğini hem deneysel hem de sayısal olarak göstermişlerdir. Bu çalışmamızda elde edilen sonuçların literatüre uygun olduğunu gösteren birçok çalışma daha mevcuttur (Feng, 2011; Hetawal ve ark., 2014; Han ve ark., 2016).



Şekil 4.8. TM ve MODEL1 için sayısal ve deneysel C_D değerleri

4.2.5 Kaldırma (Lift) Kuvveti

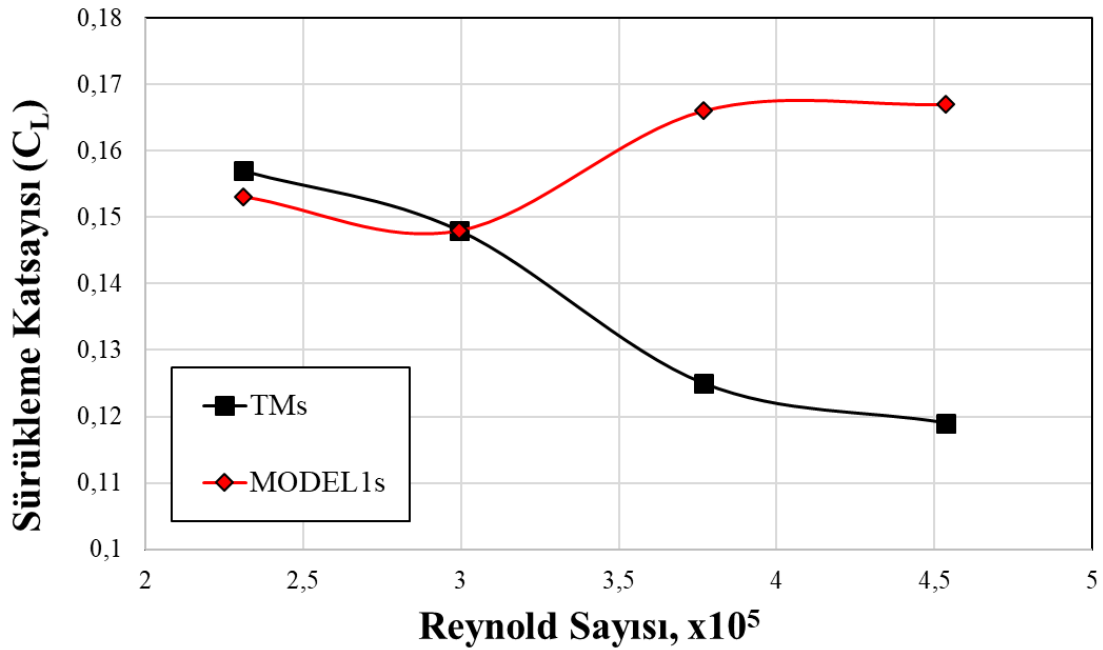
Taşıtın altından akan havanın taşıtın hareket yönüne dik doğrultuda oluşturduğu kaldırma (lift) kuvveti lastikle yol arasında meydana gelen yuvarlanma direncini direkt olarak etkilemektedir. Kaldırma (lift) kuvvetinin artması, yuvarlanma direncini düşüreceği için yakıt ekonomisi sağlar. Ancak, taşıtın yola tutunma ve sürüş güvenliği nedenleri ile kaldırma (lift) kuvvetinin belirli bir katsayının üzerine çıkmaması gerekir. İncelenen taşıt modellerine ait kaldırma katsayısı değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Sayısal analiz sonucu elde edilen kaldırma katsayısı değerleri

Re, 10^5	TMs	MODEL1s
2,3	0,157	0,153
3	0,148	0,148
3,75	0,125	0,166
4,55	0,119	0,167

Şekil 4.9'da da görüldüğü üzere düşük taşıt hızlarında spoilerin kaldırma (lift) kuvvetine etkisinin çok az olduğu, ancak yüksek taşıt hızlarında spoiler sayesinde taşıtın arkasında oluşan basıncın artması ile kaldırma katsayısının ortalama olarak yaklaşık %15,5 arttığı hesaplanmıştır. (Kim ve ark., 2006) çalışmalarında, spoiler kullanımının lift

kuvvetini artırarak aksa binen yük miktarının %28,4 oranında azaltılabileceğini söylemişlerdir. Elde edilen bu sonuçlar; (Hetawal ve ark., 2014; Han ve ark., 2016; Yuan ve Gu, 2019) çalışmaları ile de uyumludur. Ayrıca, (Tsai ve ark., 2009) çalışmalarında, spoiler sayesinde negatif basınç bölgesindeki %20'lik bir basınç artışı sayesinde lift katsayısının arttığını belirtmişlerdir.



Şekil 4.9. TM ve MODEL1 için sayısal C_L değerleri

4.3. Toplam Aerodinamik Direncin Basınç-Sürtünme Kaynaklı Dağılımı

Spoiler uygulaması sayesinde taşıt arkasında oluşan vorteks yoğunluğunun düşük olması, bu bölgedeki basıncın artmasına sebep olmuştur. Bu durum, Şekil 4.4a ve Şekil 4.4b'de de gösterilmiştir. Aynı sebepten dolayı taşıtın altında oluşan statik basıncın da spoiler kullanımı ile arttığı görülmektedir. İncelenen taşıt modelleri için hesaplanan C_D ve C_L değerlerine basıncın etkisi Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Sayısal incelenen C_D ve değerleri oluşumuna basıncın etkisi

Re, 10 ⁵	TM Basınç %	TM Sürtünme %	MODEL1 Basınç %	MODEL 1 Sürtünme %
2,3	91,85	8,15	98,1	1,9
3	92,81	7,19	98	2
3,75	93,17	6,83	97,44	2,56
4,55	93,39	6,61	97,14	2,86

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; spoiler uygulamasının C_D değerinde önemli bir iyileşme sağlamıştır. Ancak, spoilerin araç gövdesinden uzaklığı arttıkça C_D değerinde artış olduğu görülmüştür. Bu nedenle, deneysel sonuçlara göre en uygun spoiler yüksekliği 0,15 L/H (MODEL 2) oranında elde edilmiştir. MODEL 2 aracında C_D değerinde ortalama olarak yaklaşık %7,88 bir iyileşme görülmüştür.

Hesaplama akışkanlar dinamiği ile sayısal analiz çözümlemesi, temel taşıt modeli ile L/H=0,1 oranına sahip (MODEL 1) spoiler uygulamalı araç modeli için gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz sonuçları incelendiğinde, temel taşıt modeli için elde edilen C_D değerinin ortalama olarak 0,472 ve Model 1 taşıt modeli C_D değerinin 0,448 olduğu tespit edilmiştir. Sayısal analiz işlemi sonucu elde edilen bu değerler deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında, sırası ile yaklaşık olarak %9,68 ve %9,24 oranlarında farklılık olduğu hesaplanmıştır. Bu farkın nedeni deney düzeneğinin belirsizliği ya da ağ dağılımından kaynaklanabilmektedir. %10'nun altında olan bu değerler, sayısal analiz sonuçlarının deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğunu ve elde edilen verilerin gerçekçi olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, deneysel yöntemle belirlenemeyen bazı aerodinamik parametrelerin aynı taşıt modelleri için sayısal analiz yöntemiyle belirlenebilmesi mümkün olmuştur. Hesaplama akışkanlar dinamiği metodu ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarından, spoiler uygulamasının kaldırma (lift) kuvveti değerini ortalama olarak %15,5 iyileştirdiği hesaplanmıştır. Ayrıca toplam aerodinamik direncin basınç ve sürtünme kaynaklı dağılımı tespit edilmiş, taşıt etrafındaki akış yapısı detaylı olarak incelenmiştir.

Hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle gerçekleştirilen taşıt aerodinamiği uygulamalarında, taşıt modelinin gerçeğe yakın olması çok önemli bir parametredir. Bu analizler için kullanılan modellerin mümkün olduğunca özenle seçilmesi ve hazırlanması gerekmektedir. Taşıt aerodinamiği testleri, elbette ki gerçek sürüş koşullarında hareket eden bir araca etki eden havanın uyguladığı direnç kuvvetlerinin tam olarak simüle edilmesini sağlayamaz. Özellikle taşıt üzerindeki havanın oluşturduğu yanal kuvvetler, hareketli zemin ve spoilerin yanal kuvvetler altındaki etkisi rüzgâr tüneli ile belirlenmesi zordur. Daha gerçekçi analizlerin yapılabilmesi için deney düzeneğinin tüm sürüş şartları için detaylı tasarlanması gerekir.

Bu çalışmanın sonucu olarak, bir SUV araç üzerine spoiler uygulamasının optimum yükseklik ve uygun akış kontrolü sağlayabilecek şekilde uygun tasarımı sürüklenme ve kaldırma (lift) kuvvetlerine olumlu etkilerinin olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Ak, S. E., 2015, Yüksek Hızlı Araçlar İçin Silecek Sisteminin Aerodinamik Optimizasyonu, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul, 123.
- Aka, H., 2003, Otomobillerin Aerodinamik Karakteristiğinin Bir Rüzgar Tünelinde İncelenmesi.
- Altınışik, A., 2013, Binek araç üzerindeki aerodinamik analizlerin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, *Uludağ Üniversitesi*, Bursa, 212.
- Ashik, P. N., Suseendhar, P., Manoj, N. ve Feroze, S. W., 2020, Reduction of drag in box-type and half streamlined automobile vehicles, *Materials Today: Proceedings*.
- Bauskar, M. P., Dhande, D. Y., Vadgeri, S. ve Patil, S. R., 2019, Study of aerodynamic drag of sports utility vehicle by experimental and numerical method, *Materials Today: Proceedings*, 16, 750-757.
- Bayındırlı, C., 2015, Çekici ve çekici römork kombinasyonlarında aerodinamik dirençlerin incelenmesi, *Gazi Üniversitesi*, Ankara, 157.
- Bayındırlı, C. ve Çelik, M., 2019, Bir taşıta etki eden aerodinamik direnç kuvvetinin bagaj üstü spoiler ile iyileştirilmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19 (2), 470-479.
- Bayındırlı, C., Akansu, E. Y. ve Çelik, M., 2020, Experimental and numerical studies on improvement of drag force of a bus model using different spoiler models, *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 27 (6), 743-776.
- Cai, C., Ming, T., Fang, W., De Richter, R. ve Peng, C., 2020, The effect of turbulence induced by different kinds of moving vehicles in street canyons, *Sustainable Cities and Society*, 54, 102015.
- Cengel, Y. ve Cimbala, J., 2013, Ebook: Fluid mechanics fundamentals and applications (si units), McGraw Hill, p.
- Chainani, A. ve Perera, N., 2008, CFD investigation of airflow on a model radio control race car.
- Cheng, S.-Y., Chin, K.-Y. ve Mansor, S., 2019, Experimental study of yaw angle effect on the aerodynamic characteristics of a road vehicle fitted with a rear spoiler, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 184, 305-312.
- Çakmak, M. A., 2000, Investigation of vehicles as aerodynamically, *Mühendis Makina*, 41, 489.

- Çetinkaya, S., 2023, Taşıt Mekaniği, p.
- Damjanović, D., Kozak, D., Živić, M., Ivandić, Ž. ve Baškarić, T., 2011, CFD analysis of concept car in order to improve aerodynamics, *Járműipari innováció*, 1 (2), 108-115.
- Demircioğlu, T. K., 2007, Bir araç modelinin aerodinamik analizi ve sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonu, *Balikesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Ekman, P., Wieser, D., Virdung, T. ve Karlsson, M., 2020, Assessment of hybrid RANS-LES methods for accurate automotive aerodynamic simulations, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 206, 104301.
- El Gaouti, Y., Colin, G., Thiam, B. ve Mazellier, N., 2021, Online vehicle aerodynamic drag observer with Kalman filters, *IFAC-PapersOnLine*, 54 (2), 51-56.
- Feng, H., 2011, Low mass vehicle and its aerodynamic study.
- Gromke, C. ve Ruck, B., 2021, Passenger car-induced lateral aerodynamic loads on cyclists during overtaking, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 209, 104489.
- Guo, Z., Liu, T., Xia, Y. ve Liu, Z., 2022, Aerodynamic influence of the clearance under the cowcatcher of a high-speed train, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 220, 104844.
- Han, M.-W., Rodrigue, H., Cho, S., Song, S.-H., Wang, W., Chu, W.-S. ve Ahn, S.-H., 2016, Woven type smart soft composite for soft morphing car spoiler, *Composites Part B: Engineering*, 86, 285-298.
- Hetawal, S., Gophane, M., Ajay, B. ve Mukkamala, Y., 2014, Aerodynamic study of formula SAE car, *Procedia Engineering*, 97, 1198-1207.
- Hu, X.-x. ve Wong, E. T., 2011, A numerical study on rear-spoiler of passenger vehicle, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 57, 636-641.
- İnce, İ. T., 2007, GTD model idari hizmet pikap aracının aerodinamik analizi, *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara*.
- Kabanovs, A., Garmory, A., Passmore, M. ve Gaylard, A., 2019, Investigation into the dynamics of wheel spray released from a rotating tyre of a simplified vehicle model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 184, 228-246.
- Kalaycı, C., 2021, SUV Model Bir Motorlu Taşıtın Aerodinamik Performansının Sayısal İncelenmesi ve Optimizasyonu, *Batman Üniversitesi, Batman*, 81.

- Kamacı, C., 2022, Ahmed Gövdesinin Farklı Arka Yüzey Geometrik Konfigürasyonları İçin Aerodinamik Özelliklerinin Sayısal İncelenmesi, *İstanbul Aydın Üniversitesi*, İstanbul, 70.
- Kaplan, G., 2015, Seçilen Bir Otomobil Tipinin Aerodinamik Karakteristiklerinin Sayısal Olarak İncelenmesi ve Sonuçlarının Mevcut Deneysel Çalışma Sonuçları ile Karşılaştırılması, *Gazi Üniversitesi*, Ankara, 92.
- Kasap, H., 2022, Binek Araç Üzerindeki Aerodinamik Analizlerin Sayısal Olarak İncelenmesi, *Bursa Uludag University (Turkey)*.
- Keleş, U., 2015, Yan Rüzgar Etkisi Altındaki Ağır Ticari Bir Araçta Aerodinamik Direnç Katsayısının Had ile Analizi, *Yıldız Teknik Üniversitesi*, İstanbul, 75.
- Kesat, T. M., 2019, Çekici Römörke Etki Eden Aerodinamik Kuvvetler Üzerine Doğadan Esinlenerek Geliştirilen Pasif Akış Kontrol Parçalarının Etkilerinin İncelenmesi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi*, Trabzon, 92.
- Kim, J. S., Kim, S., Sung, J. ve Choi, J., 2006, Effects of an Air Spoiler on the Wake of a Road Vehicle by PIV Measurements, *Journal of visualization*, 9 (4), 411-418.
- Kim, J. S., Sung, J. ve Kim, S., 2008, PIV measurements on the change of the three-dimensional wake structures by an air spoiler of a road vehicle, *Journal of visualization*, 11 (1), 45-54.
- Kurec, K., Remer, M. ve Piechna, J., 2019, The influence of different aerodynamic setups on enhancing a sports car's braking, *International Journal of Mechanical Sciences*, 164, 105140.
- Li, X.-B., Liang, X.-F., Wang, Z., Xiong, X.-H., Chen, G., Yu, Y.-Z. ve Chen, C.-M., 2021, On the correlation between aerodynamic drag and wake flow for a generic high-speed train, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 215, 104698.
- Modi, V., Hill, S. S. ve Yokomizo, T., 1995, Drag reduction of trucks through boundary-layer control, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 54, 583-594.
- Nath, D. S., Pujari, P. C., Jain, A. ve Rastogi, V., 2021, Drag reduction by application of aerodynamic devices in a race car, *Advances in Aerodynamics*, 3 (1), 1-20.
- Oktay, T. ve Eraslan, Y., 2021, Numerical investigation of effects of airspeed and rotational speed on quadrotor UAV propeller thrust coefficient, *Journal of Aviation*, 5 (1), 9-15.

- Özen, İ., 2015, Bir binek aracın aerodinamik etkinliğinin modellenmesi, *Fırat Üniversitesi*, Elazığ, 109.
- Palanivendhan, M., Chandradass, J., Saravanan, C., Philip, J. ve Sharan, R., 2021, Reduction in aerodynamic drag acting on a commercial vehicle by using a dimpled surface, *Materials Today: Proceedings*, 45, 7072-7078.
- Sarı, F. M., 2007, Hafif ticari taşıtlarda taşıt ön formuna etkiyen hava direncinin aerodinamik analizi ve yakıt sarfiyatına etkisi, *ESOGÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Schenkel, F. K., 1977, The origins of drag and lift reductions on automobiles with front and rear spoilers, *SAE Transactions*, 1661-1671.
- Sivaraj, G., Parammasivam, K., Prasath, M., Vadivelu, P. ve Lakshmanan, D., 2021, Flow analysis of rear end body shape of the vehicle for better aerodynamic performance, *Materials Today: Proceedings*, 47, 2175-2181.
- Tsai, C.-H., Fu, L.-M., Tai, C.-H., Huang, Y.-L. ve Leong, J.-C., 2009, Computational aero-acoustic analysis of a passenger car with a rear spoiler, *Applied Mathematical Modelling*, 33 (9), 3661-3673.
- Wang, S., Avadiar, T., Thompson, M. C. ve Burton, D., 2019, Effect of moving ground on the aerodynamics of a generic automotive model: The DrivAer-Estate, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 195, 104000.
- Wang, Y., Sicot, C., Boree, J. ve Grandemange, M., 2020, Experimental study of wheel-vehicle aerodynamic interactions, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 198, 104062.
- Yadav, R., Islam, A. ve Chaturvedi, R., 2021, Efficient reduction of the consumption of fuel in road vehicles using aerodynamic behavior in CDF analysis, *Materials Today: Proceedings*, 45, 2773-2776.
- Yarin, T. G., 2019, Farklı Taşıt Modellerinin Aerodinamik Yapısının Nümerik Olarak İncelenmesi, *Uludağ Üniversitesi*, Bursa, 56.
- Yeşildağ, C., 2013, DBD Plazma Aktüatör İle Kare Kesitli Küt Cisim Etrafındaki Akış Kontrolünün İncelenmesi, *Niğde Üniversitesi*.
- Yuan, H., Yang, Z., Wang, Y., Fan, Y. ve Fang, Y., 2020, Experimental analysis of hydrodynamic and acoustic pressure on automotive front side window, *Journal of Sound and Vibration*, 476, 115296.
- Yuan, Z. ve Gu, Z., 2019, Aerodynamic drag reduction mechanism of automobile spoiler based on porous media and bionic design, *China Mechanical Engineering*, 30 (07), 777.