

**FARKLI TAŞIT MODELLERİNİN AERODİNAMİK  
YAPISININ NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

**Tuğçe Gizem YARIN**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI TAŞIT MODELLERİNİN AERODİNAMİK YAPISININ NÜMERİK  
OLARAK İNCELENMESİ**

**Tuğçe Gizem YARIN**  
0000-0003-1120-1134

Prof. Dr. Habib UMUR  
0000-0002-8732-5283

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

## TEZ ONAYI

Tuğçe Gizem YARİN tarafından hazırlanan “Farklı Taşıt Modellerinin Aerodinamik Yapısının Nümerik Olarak İncelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Habib UMUR  
0000-0002-8732-5283

**Başkan** : Prof. Dr. Habib UMUR  
0000-0002-8732-5283  
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Onur YEMENİCİ  
0000-0003-0011-8343  
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Celalettin YÜCE  
0000-0003-1387-907X  
Bursa Teknik Üniversitesi,  
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,  
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

İmza

İmza

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

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

12.01.2019

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

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

**beyan ederim.**

**12/09/2019**

**Tuğçe Gizem YARIN**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### FARKLI TAŞIT MODELLERİNİN AERODİNAMİK YAPISININ NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

**Tuğçe Gizem YARİN**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Habib UMUR

Aerodinamik kuvvetler, bir aracın yakıt tüketimini önemli ölçüde etkilemektedir. Aerodinamik kuvvetler içerisinde araç üzerinde en çok direnç oluşturan kuvvet sürüklenme kuvvetidir. Dolayısıyla sürüklenme kuvvetinin azaltılması araç tasarımında önemli bir parametredir. Bu çalışmanın amacı farklı taşıt modelleri üzerindeki akış hareketlerini nümerik olarak incelemek ve sürüklenme katsayılarını tespit etmektir.

Bu çalışmada, önce basit bir araç CFD programı üzerinde modellenmiş ve taşıtın sürüklenme katsayısı değeri tespit edilmiştir. Analiz sonuçlarına bakılarak model üzerinde iyileştirmeler yapılmış ve yeni model tekrar nümerik olarak analiz edilmiştir. Bu işlem dört kez tekrarlanarak beş farklı taşıt modeli iki boyutlu olarak analiz edilmiş ve çıkan sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak taşıt tasarımında keskin köşelerden kaçınılmasının ve taşıt formunun damla formuna benzetilerek tasarlanmasının taşıtlar üzerinde oluşan sürüklenme kuvvetini büyük ölçüde azalttığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Taşıt aerodinamiği, vorteks, sürüklenme katsayısı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği

**2019, vii + 45 sayfa.**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

### **NUMERICAL ANALYSIS OF AERODYNAMIC STRUCTURE OF DIFFERENT VEHICLE MODELS**

**Tuğçe Gizem YARIN**

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

**Supervisor:** Prof. Dr. Habib UMUR

Aerodynamic forces, significantly affect a vehicle's fuel consumption. Drag force is the aerodynamic force that creates the most resistance on the vehicle. Therefore, reducing drag force is an important parameter in vehicle design. The aim of this study is to investigate the flow movements on a vehicle numerically and to determine the drag coefficients.

In this study, a simple vehicle was modeled on CFD program and the drag coefficient value of the vehicle was determined. According to the analysis results were made improvements on the model and the new model was analyzed numerically again. This process was repeated four times and five different vehicle models were analyzed in two dimensions and the results were compared with each other.

As a result, it was determined that avoiding sharp corners in vehicle design and designing the vehicle form to be similar to drop form greatly reduces drag force on vehicles.

**Key words:** Vehicle aerodynamics, vortex, drag coefficient, computational fluid dynamics

**2019, vii + 45 pages.**

## TEŞEKKÜR

Tez çalıőmamın baőından sonuna kadar olan süreçte yanımıda olan, bilgi birikimiyle bana yol gösteren ve anlayıőıyla destek olan tez danıőmanım Sayın Prof. Dr. Habib UMUR'a teőekkürü bir borç bilirim. Aynı zamanda tez çalıőmam boyunca yardımlarını benden esirgemeyen Uludağ niversitesi'ndeki hocalarıma ve arkadaşlarıma da teşekkür ederim. Ayrıca çalıőmalarım süresince bana maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen değerli aile üyelerime de sonsuz saygı ve teőekkürlerimi sunarım.

Tuğçe Gizem YARİN  
12/09/2019

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1 Kaynak Araştırması.....	3
2.2 Kuramsal Temeller.....	14
2.2.1 Bernoulli denklemi.....	14
2.2.2 Sınır tabaka.....	15
2.2.3 Akım çizgileri.....	15
2.3 Aerodinamik Kuvvetler.....	16
2.3.1 Sürüklenme kuvveti.....	16
2.3.2 Kaldırma kuvveti.....	17
2.3.3 Sürüklenme katsayısı.....	18
2.3.4 Kaldırma katsayısı.....	19
2.3.5 Yanal kuvvet.....	19
2.4 Aerodinamik Momentler.....	20
2.4.1 Yunuslama momenti.....	20
2.4.2 Yana kayış momenti.....	20
2.4.3 Yuvarlanma momenti.....	20
2.5 Modelleme ve Benzerlik.....	21
2.5.1 Geometrik benzerlik.....	21
2.5.2 Dinamik benzerlik.....	21
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	22
3.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği.....	22
3.1.1 Navier-Stokes denklemleri.....	23
3.1.2 Süreklilik denklemi.....	23
3.1.3 Momentum denklemi.....	23
3.2 Sınır Şartlarının Tanımlanması.....	24
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	25
4.1 Analiz Sonuçları.....	25
4.1.1 Taşıt Modeli 1.....	25
4.1.2 Taşıt Modeli 2.....	27
4.1.3 Taşıt Modeli 3.....	29
4.1.4 Taşıt Modeli 4.....	31
4.1.5 Taşıt Modeli 5.....	34
4.2 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	36
5. SONUÇ.....	41
KAYNAKLAR.....	43
ÖZGEÇMİŞ.....	45



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$C_D$	Sürüklenme katsayısı
$C_L$	Kaldırma katsayısı
$C_P$	Statik basınç katsayısı
$C_{M_P}$	Yunuslama momenti katsayısı
$C_{M_Y}$	Yana kayış momenti katsayısı
$C_{M_R}$	Yuvarlanma momenti katsayısı
Re	Reynolds sayısı
$F_D$	Sürüklenme kuvveti (N)
$F_L$	Kaldırma kuvveti (N)
$F_Y$	Yanal kuvvet (N)
$\rho$	Havanın yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )
$\nu$	Kinematik viskozite ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$\mu$	Dinamik viskozite (Pa.s)
U	Taşıt hızı (m/s)
A	Taşıt kesit alanı ( $\text{m}^2$ )
P	Statik basınç (Pa)
$M_P$	Yunuslama momenti (Nm)
$M_Y$	Yana kayış momenti (Nm)
$M_R$	Yuvarlanma momenti (Nm)
L	Uzunluk (m)
h	Yükseklik (m)
g	Yerçekimi ivmesi ( $\text{m/s}^2$ )

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
ART	Ankara Rüzgar Tüneli
CFD	Computational Fluid Dynamics
FIAT	Fabbrica Italiano Automobili Torino
LDA	Laser Drop Anemometry
UURT	Uludağ Üniversitesi Rüzgar Tüneli

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Sınır tabaka oluşumu .....	15
Şekil 2.2. Bir taşıt etrafındaki akım çizgileri .....	16
Şekil 2.3. Değişik şekillerin ve araçların $C_D$ değerleri .....	19
Şekil 2.4 Geometrik benzerlik .....	21
Şekil 4.1. Taşıt modeli 1'in geometrisi .....	25
Şekil 4.2 Taşıt modeli 1'in üzerindeki akışın vektörel gösterimi .....	25
Şekil 4.3. Taşıt modeli 1'in arka bölümündeki akış hareketleri .....	26
Şekil 4.4. Taşıt modeli 1'e ait basınç dağılımı .....	26
Şekil 4.5. Taşıt modeli 2'nin geometrisi .....	27
Şekil 4.6. Taşıt modeli 2'nin üzerindeki akışın vektörel gösterimi .....	27
Şekil 4.7. Taşıt modeli 2'nin arka bölümündeki akış hareketleri .....	28
Şekil 4.8. Taşıt modeli 2'ye ait basınç dağılımı .....	28
Şekil 4.9. Taşıt modeli 3'ün geometrisi .....	29
Şekil 4.10. Taşıt modeli 3'ün üzerindeki akışın vektörel gösterimi.....	29
Şekil 4.11. Taşıt modeli 3'ün ön bölümündeki akış hareketleri .....	30
Şekil 4.12. Taşıt modeli 3'ün arka bölümündeki akış hareketleri .....	30
Şekil 4.13. Taşıt modeli 3'e ait basınç dağılımı .....	31
Şekil 4.14. Taşıt modeli 4'ün geometrisi .....	32
Şekil 4.15. Taşıt modeli 4'ün üzerindeki akışın vektörel gösterimi .....	32
Şekil 4.16. Taşıt modeli 4'ün ön bölümündeki akış hareketleri .....	32
Şekil 4.17. Taşıt modeli 4'ün arka bölümündeki akış hareketleri .....	33
Şekil 4.18. Taşıt modeli 4'e ait basınç dağılımı .....	33
Şekil 4.19. Taşıt modeli 5'in geometrisi .....	34
Şekil 4.20. Taşıt modeli 5'in üzerindeki akışın vektörel gösterimi .....	34
Şekil 4.21. Taşıt modeli 5'in arka bölümündeki akış hareketleri .....	35
Şekil 4.22. Taşıt modeli 5'e ait basınç dağılımı.....	35
Şekil 4.23. Taşıt modelleri üzerindeki bazı noktalara ait hız profilleri.....	37
Şekil 4.24. Taşıt modellerine ait $C_D$ değerleri .....	38

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1 Taşıt aerodinamiği üzerinde yapılan çalışmalar .....	7

## 1.GİRİŞ

Karayolu taşıtları, geçmişten günümüze en çok tercih edilen ve kullanılan ulaşım araçları olmuştur ve günümüzde hala bu alandaki liderliğini sürdürmektedir. 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. Bu etkiler de dünya üzerinde yaşayan canlıların sağlıklarını tehlikeye atmaktadır. Fosil yakıt kullanımının ülkemiz açısından önemi büyük bir başka etkisi de ekonomidir. Türkiye petrol konusunda büyük oranda dışa bağımlı bir ülkedir ve petrol kullanımının artması ülke ekonomisini ciddi anlamda etkilemektedir. Bu nedenlerden dolayı fosil yakıt kullanımı mümkün olduğu kadar azaltılmalıdır.

Türkiye’de petrol kullanımının büyük kısmı; karayolu taşıtlarından kaynaklanmaktadır ve araç sayısı da her gün artmaktadır. Bu da yakıt giderlerinin günden güne arttığı anlamına gelmektedir. Yakıt sarfiyatının azaltılması için; lüzensuz araç kullanımını minimize edilmesi, toplu taşıma kullanımının artırılması, taşıtların motor ve gövdelerinin yakıt tüketimini minimuma indirecek şekilde tasarlanması uygulanabilecek yöntemlerdir.

Bir taşıtın aerodinamik parametreleri özellikle yüksek hızlarda yakıt ekonomisi açısından çok önemlidir. 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.

Bir taşıtın aerodinamik özelliklerinin belirlenebilmesi için yol ve rüzgar tüneli testlerinden yararlanılmaktadır. Taşıtın en gerçekçi ortamda test edilebilmesi açısından yol testleri, en uygun yöntem gibi görünse de maliyeti yüksek olabilmektedir. Rüzgar tüneli testlerinde kullanılan modeller, yol testlerinde kullanılan modellere göre daha küçük olduğundan daha hesaplı bir yöntemdir. Ancak modelin boyutları artırılırsa rüzgar tüneli testi, yol testine göre daha maliyetli olabilir.

Bu yöntemlerin maliyetli olmasından dolayı son yıllarda bilgisayarlı çözümlene sistemleri oldukça yaygın kullanılmaya başlanmıştır. Bilgisayarlı çözümlene yöntemleri ile karmaşık sistemler bile hem ucuz hem de hızlı bir şekilde çözümlenebilmektedir. Bu sayede tasarım henüz üretim aşamasına geçmeden tasarım üzerindeki eksik ve kusurlar önceden belirlenebilir ve erken önlem alınabilir. Bu nedenle günümüzde birçok değişik firma hesaplamalı akışkanlar dinamiği paket programları geliştirmektedir.

Bu çalışmada basite indirgenmiş taşıt modelleri etrafında oluşan akış hareketleri ve basınç kuvvetleri ANSYS/Fluent programı üzerinde incelenerek model etrafındaki akışın şekli, hız profilleri ve basınç dağılımları elde edilmektedir. Elde edilen sonuçlar ışığında da aracın aerodinamik açıdan daha elverişli olması için neler yapılması gerektiği tartışılmaktadır.

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

Hava taşıtlarının ve otomobillerin aerodinamiği birbirine çok benzerdir. Taşıt aerodinamiğinin başlangıcı da uçakların aerodinamiğinden gelmektedir. Ancak uçakların ve taşıtların aerodinamik özellikleri birbirlerinden farklıdır. Aerodinamik tasarım olmadan uçakların havalanması mümkün değildir ancak bir otomobil aerodinamik tasarıma sahip olmadan da yolda hareket edebilir. Uçaklarda ve kara taşıtlarında aerodinamik dizaynın ortak tek bir amacı vardır o da sürtünmeyi azaltmaktır. (Houghton ve ark. 2013).

Üreticiler, araçların sadece insan taşımının yanında sürat, taşıma kapasitesi, ekonomi gibi özelliklerinin de önemli olduğunu fark ettikten sonra taşıtların güçlerini arttırma ve hava direncinden kaynaklanan sürtünme kayıplarını en aza indirmenin yollarını aramışlardır. İlk binek araçlar hiçbir aerodinamik kaygı güdülmeden üretildiklerinden performans açısından iyi değillerdi. Ancak günümüzde araç üreticileri araçların aerodinamik açıdan iyi olması için köklü form değişikliklerine gitmişlerdir ve hala daha bu alandaki çalışmalarına devam etmektedirler.

### **2.1 Kaynak Araştırması**

Ahmed ve ark. (1984), basitleştirilmiş bir araç modeli geliştirmişlerdir. Ahmed Body adı verilen bu basitleştirilmiş araç modelinin arka kısmındaki eğim açılarının, sürüklenme katsayısına etkilerini incelemişlerdir. İncelemeleri sonucunda, test edilen açılar haricindeki durumlar için sürüklenme katsayısının değerlerini bulabilmek için elde ettikleri değerleri ekstrapolasyon ile grafik haline getirmişlerdir. Ahmed ve ark. bu çalışmada basitleştirilmiş bir model kullandıklarından, sonraki çalışmalar için bir temel oluşturmuşlardır.

Aydın (1994), otomobil üzerinden akışı 2 boyutlu model üzerinde sayısal olarak incelemiştir. Sayısal yöntemler kullanılarak analiz edilmiş model üzerindeki basınç katsayısı dağılımının, literatürdeki diğer çalışmalar ile benzer sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

Aka (2003), çalışmasında 1/16 oranında küçültülmüş bir araç modelini, bir rüzgar tüneline 40 m/s akış hızında test etmiştir. Sonuç olarak sürüklenme, kaldırma ve basınç katsayılarını belirlemiştir. Sürüklenme katsayısını orijinal araca göre % 5 hata ile tespit etmiştir. Bu %5'lik hatanın nelerden kaynaklandığını belirtmiştir. Deney sonuçlarına göre, 40m/s hızındaki bir rüzgar tüneline aerodinamik testler için uygun olduğunu belirtmiştir.

Koike ve ark. (2004), Mitsubishi Lancer sedan modelinin arka camı üzerindeki akışı incelemişlerdir. Modelin arka camı ile tavanın birleşim bölgesinde tavan kısmına akış ayrılmasının gecikmesini sağlayacak kısa girdap üreticileri yerleştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda sürüklenme ve kaldırma katsayılarında 0,006 değerinde bir azalma görmüşlerdir.

Henning ve King (2005), taşıt üzerindeki akışta oluşan bozulmaları denetleyebilmek için basınç kontrolü uygulamak istemişlerdir. Bunun için türbülans nedeniyle oluşan dalgalanmalarla çalışan bir sensör ile basıncı kontrol etmeyi denemişlerdir. LDA metodu ile akış hatlarını takip etmişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda gerçeğe uygun araç modellerinin kullanılmasının daha doğru sonuçlar vereceğini belirtmişlerdir.

Brunn ve Nitsche (2006), eğimli yüzeyler üzerindeki akışta meydana gelen ayrılmayı önleyebilmek için taşıtın içine ve dışına yayıcılar yerleştirmeyi düşünmüşlerdir. Bu amaçla eğim başlangıcına bir uyarıcı yerleştirerek akışta meydana gelen ayrılmaları kontrol etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda ayrılmış olan akış hattı ile dış akış hattı arasındaki momentum ve kütle transferinin ayrılan akışı tekrar yüzeye birleşmeye zorladığını belirtmişlerdir.

Sarı (2007), Renault-Kangoo araç modeli için, Ansys/Fluent programı üzerinde sonlu hacimler yöntemini kullanarak aracın ön formuna etkiyen sürüklenme katsayısı değerlerini değişen ön cam açılara göre hesaplamıştır. Ön cam açısının 20°, 30°, 40°, 50° ve 60° değerleri için sürüklenme katsayısı değerlerini; 1,150, 1,052, 0,931, 0,93 ve 0,866 olarak hesaplamıştır. Kaput açısının 0°, 5°, 10°, 15° ve 20° değerleri için sürüklenme katsayısı değerlerini; 1, 0,96, 0,95, 0,93 ve 0,929 olarak hesaplamıştır.

Demircioğlu (2007), Bu alışmada Solidworks 'te tasarladığı Ferrari F1 yarış aracı üzerinde ANSYS CFX yazılımı ve k-ε türbülans modeli kullanarak üç-boyutlu analiz ile sürükleme ve kaldırma kuvvetlerini hesaplamıştır. Serbest akış hızını 130 km/h olarak belirlemiştir. Sonuç olarak sürükleme katsayısını 0,516 ve kaldırma katsayısını 0,425 olarak hesaplamıştır. Ancak elde ettiği değerlerin gerçek değerlerle birebir örtüşmediğini söylemiştir. Bunun nedeninin kendi modeli ile gerçek bir F1 modelinin arasındaki geometrik farklılıklar, zaman ve kullanılan bilgisayarın kapasitesine bağlı olarak çözümlenme sırasında oluşturulan mesh sayısı olduğunu ileri srmştr.

Roumeas ve ark. (2008), bir aracın arka camı üzerindeki akış yapısını Ahmed Model üzerinde deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Bu iki yöntemin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak bu iki yöntem ile yapılan hesaplamalar sonucunda sürükleme katsayısında 0.04 değerinde bir fark olduğunu görmüşlerdir. Bu değerin küçülmesi için arka cam üzerindeki türbülanslı bölgenin azaltılması gerektiğini ortaya koymuşlardır.

Pujals ve ark. (2010), Sürükleme katsayısı değerini düşürmek amacıyla Ahmed Model üzerinde çalışmışlardır. Taşıtın arka kısmında oluşacak olan akış ayrılmasını geciktirmek için tavana girdap yaratıcı koymuşlardır. Ancak diğer çalışmalardan farklı olarak çok sayıda, silindirik girdap yaratıcıyı tavan boyunca enine yerleştirmişlerdir. Kullandıkları bu girdap yaratıcılar ile sürükleme katsayısında % 10 azalma olduğunu grmşleridir.

Altınışık (2013), Bu çalışmada 1:5 ve 1:10 ölçekli iki adet FIAT Linea araç modeli kullanmıştır. Deneyler için Uludağ Üniversitesi Rüzgar Tüneli ve Ankara Rüzgar Tüneli olmak üzere iki adet rüzgar tüneli kullanmıştır. Uludağ Üniversitesi Rüzgar Tünelinde 1:5, 1:10 lekli modelleri 10, 20, 30 m/s hızlarda test ederken, Ankara Rüzgar Tünelinde 1:5 lekli modeli 10, 20, 30 m/s hızlarda test etmiştir. Deneyler için iki farklı tünel kullanmasının nedeni farklı türbülans şiddetlerini ve blokaj etkilerini değerlendirmektir. alışmalarında kullandığı modeller üzerinde statik basınçları ve sürükleme kuvvetlerini ölçerek sürükleme katsayısını bulmuştur. Deneyleri Ankara Rüzgar Tünelinde 0, 5, 10 yanal rüzgar açılarında, Uludağ Üniversitesi Rüzgar Tünelinde 1:5 modelde 0, 5, 10 ve



1:10 modelde ise 40 yanal rüzgar açılarına kadar gerçekleştirmiştir. Deneysel yöntemlerle elde ettiği dağılımları ve sürükleme katsayısını sayısal CFD sonuçlarıyla kıyaslamıştır.

İpci ve ark. (2015), Bu çalışmada Ahmed Model taşıt modeli etrafındaki akışın yapısını sayısal akışkanlar dinamiği yöntemi kullanarak incelemiştir. Çözüm için su tüneli kullanılmış ve hız 0,218m/s olarak belirlenmiştir. RNG k-ε ve k-ε türbülans modellerini kullanmışlardır. Taşıt ön kısmında bir durma noktası meydana gelmiştir. Arka kısımdaki 25° eğimli alanda akışta bozulmaların meydana gelmediği ancak eğimli kısmın sonunda bozulmalar olduğunu ve vorteksli alan oluştuğunu belirtmişlerdir. Arka kısımdaki vorteksli bölgenin uzunluğu k-ε için 0,83H, RNG k-ε için de 0,69H olarak bulmuşlardır. Yaptıkları çalışmalarda elde ettikleri hız profilinin referans çalışmalarla uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Sonuçta her iki türbülans modeli ile de referans çalışmalarla uyumlu sonuçlar bulmuşlardır.

Altınışik ve Umur (2018), bu çalışmada 1:5 ve 1:10 ölçekli FIAT Linea modeli Uludağ Üniversitesi Rüzgar Tüneli'nde (UURT) 20% ve 5% blokaj oranlarında ve 1:5 ölçekli modeli ise Ankara Rüzgar Tüneli'nde (ART) 1% blokaj oranında 30 m/sn rüzgar hızında analiz etmişlerdir. Model üzerindeki sürükleme katsayısı ve statik basınç değerlerini ölçümlemişlerdir. Nümerik analizler için de deneysel şartların aynılarını oluşturmuşlar ve realizable k-ε two-layer türbülans modeli ile çözüm yapmışlardır. Sayısal ve deneysel sonuçların birbirleriyle uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre blokaj etkisinin düzeltilebilmesi için değişik formüller denemişler ve blokaj etkisini 5% oranında hatayla düzeltilebilmesi ve kolay uygulanabilirliği nedeniyle süreklilik blokaj düzeltme denkleminin blokaj etkisinin düzeltilmesi için kullanımının uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Taşıt aerodinamiği ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar kronolojik sıraya göre, Çizelge 2.1'de detaylı bir şekilde verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Taşıt aerodinamiği üzerinde yapılan çalışmalar

<b>Yazar , Yıl</b>	<b>Çalışma</b>	<b>Sonuç</b>
Ahmed ve ark. (1984)	-Basitleştirilmiş bir araç modeli geliştirmişlerdir. Ahmed Body adını verdikleri bu araç modelinin arka kısmındaki eğim açılarının, sürüklenme katsayısına etkilerini incelemişlerdir.	-Sonuç olarak modelin arka bölümündeki $5^{\circ}$ , $12,5^{\circ}$ ve $30^{\circ}$ lik açılar için sürüklenme katsayısını 0,231, 0,23 ve 0,26 olarak bulmuşlardır. -İncelemeleri sonucunda, test edilen açılar haricindeki durumlar için sürüklenme katsayısının değerlerini bulabilmek için elde ettikleri değerleri ekstrapolasyon ile grafik haline getirmişlerdir. Ahmed ve ark. bu çalışmada basitleştirilmiş bir model kullandıklarından, sonraki çalışmalar için bir temel oluşturmuşlardır.
Han (1989)	-Taşıtların aerodinamik özelliklerini, sayısal akışkanlar dinamiği yöntemini kullanarak belirleyen ilk araştırmacılardan biridir. Han, k- $\epsilon$ türbülans modelini kullanarak taşıt etrafındaki akışı simüle etmiştir.	-Çalışmaları sonucunda deneysel yolla elde edilen değerlerin, sayısal yollarla da yaklaşık olarak elde edilebileceğini bulmuştur.
Aydın (1994)	-Otomobil üzerinden akışı 2 boyutlu model üzerinde sayısal olarak incelemiştir.	-Sayısal yöntemler kullanılarak analiz edilmiş model üzerindeki basınç katsayısı dağılımının literatürdeki diğer çalışmalar ile benzer sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

**Çizelge 2.1.** Taşıt aerodinamiği üzerinde yapılan çalışmalar (devam)

Ramnefors ve ark. (1996)	-Sayısal akışkanlar dinamiği yöntemi ile standart k-ε ve RSM türbülans modellerini kullanarak, Volvo ECC model araç üzerindeki basınç ve sürüklenme katsayısı değerlerini belirlemeye çalışmışlardır.	-Spoiler ucunda, kaput önünde, keskin köşelerde, tavanın ön ve arka bölümlerinde yüksek hata oranları tespit etmişlerdir. Model ağ yapısının yoğunluğunun çözümün doğruluğu üzerinde etkili olduğu sonucuna varmışlardır.
Bayraktar (2002)	-Ahmed modelin arka kısmının eğim açısının sürüklenme katsayısı üzerindeki etkilerini deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemiştir.	-Yapılan çalışmalar sonucunda optimum sürüklenme katsayısı değerinin 12,5° eğim açısında olduğu sonucuna varmıştır.
Aka (2003)	-Aka, çalışmasında 1/16 oranında küçültülmüş araç modelini, bir rüzgar tüneline 40 m/s akış hızında test etmiştir.	-Sonuç olarak sürüklenme, kaldırma ve basınç katsayılarını belirlemiştir. Sürüklenme katsayısını orijinal araca göre % 5 hata ile tespit etmiş ve bu hatanın nedenlerini belirtmiştir. Deney sonuçlarına göre, 40 m/s hızındaki bir rüzgar tüneline aerodinamik testler için uygun olduğunu belirtmiştir.
Koike ve ark. (2004)	-Mitsubishi Lancer sedan modelinin arka camı üzerindeki akışı incelemiştir. Modelin arka camı ile tavanın birleşim bölgesinde tavan kısmına akış ayrılmasının gecikmesini sağlayacak kısa girdap üreticileri yerleştirmişlerdir.	-Çalışmaların sonucunda sürüklenme ve kaldırma katsayılarında 0,006 değerinde azalma görmüşlerdir.

**Çizelge 2.1.** Taşıt aerodinamiği üzerinde yapılan çalışmalar (devam)

Henning ve King (2005)	-Taşıt üzerindeki akışta oluşan bozulmaları denetleyebilmek için basınç kontrolü uygulamak istemişlerdir. Bunun için türbülans nedeniyle oluşan dalgalanmalar ile çalışan bir sensör ile basıncı kontrol etmeyi denemişlerdir. LDA (Laser Drop Anemometry) metodun ile akış hatlarını takip etmişlerdir.	-Yaptıkları çalışmalar sonucunda gerçeğe uygun araç modellerinin kullanılmasının daha doğru sonuçlar vereceğini belirtmişlerdir.
Kavadar (2006)	-Bir otobüs modelinin ön kısmı için mekatronik olarak çalışabilen bir burun tasarlamış ve bu burunun değişik açılarda sürüklenme katsayısına etkisini görmek için rüzgar tüneli testi ve sayısal yöntemler kullanmıştır.	-Sonuç olarak değişen burun açıları ile sürüklenme katsayısı %10,7 oranına kadar düşürülebilmektedir.
Sarı (2007)	-Renault-Kangoo araç modeli için, Ansys/Fluent programı üzerinde sonlu hacimler yöntemini kullanarak aracın ön formuna etkiyen sürüklenme katsayısı değerlerini değişen ön cam açılımlarına göre hesaplamıştır.	-Ön cam açısının 20°, 30°, 40°, 50° ve 60° değerleri için sürüklenme katsayısı değerlerini; 1,150, 1,052, 0,931, 0,93 ve 0,866 olarak hesaplamıştır. -Kaput açısının 0°, 5°, 10°, 15° ve 20° değerleri için sürüklenme katsayısı değerlerini; 1, 0,96, 0,95, 0,93 ve 0,929 olarak hesaplamıştır. -Çalışma sonucunda; en uygun sürüklenme katsayısını veren modeller, kaput için eğim açısı 20° ve ön cam için 60° 'dir.

**Çizelge 2.1.** Taşıt aerodinamiği üzerinde yapılan çalışmalar (devam)

Roumeas ve ark. (2008)	- Bir aracın arka camı üzerindeki akış yapısını Ahmed Model üzerinde deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Bu iki yöntemin sonuçlarını karşılaştırmışlardır.	-Sonuç olarak bu iki yöntem ile yapılan hesaplamalar sonucunda sürüklenme katsayısında 0,04 değerinde bir fark olduğunu görmüşlerdir. Sürüklenme katsayısının düşürülebilmesi için arka cam üzerindeki türbülanslı bölgenin azaltılması gerektiğini ortaya koymuşlardır
Helgason ve Hafsteinsson (2009)	-Otomatik araç şekil optimizasyonunun aerodinamik katsayılara olan etkisini incelemişlerdir. Öncelikle 1:1 ölçekli bir Volvo araç modellenmiştir. Model üzerinde ufak değişiklikler yaparak, bu değişikliklerin sürüklenme katsayısı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.	-Optimum sürüklenme katsayısı değerini orijinal araçta da olduğu gibi elde edebilmişlerdir. Buldukları değer deneysel sonuçlarla da %5 hata ile uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır.
Solmaz (2010)	-Solmaz çalışmasında üç değişik otomobil modeli ile bir otobüs modelinin sürüklenme katsayılarını bir rüzgar tüneline belirlenmeye çalışmıştır. Deney hızı 28 m/s'dir. Otobüs modelini ayrıca Ansys programı ile de analiz etmiş ve analiz sonuçlarını deney sonuçları ile karşılaştırmıştır.	1/24 ölçekli modeller için yaptığı deneyler sonucunda sürüklenme katsayılarını %14, %12,5 ve %7,8 hata oranlarıyla hesaplamıştır.. -Otobüs için sürüklenme katsayısını deney sonuçlarına göre 0,65 ANSYS verilerine göre de 0,66 olarak hesaplamıştır.

**Çizelge 2.1.** Taşıt aerodinamiği üzerinde yapılan çalışmalar (devam)

Pujals ve ark. (2010)	<p>-Sürüklenme katsayısı değerini düşürmek amacıyla Ahmed Model üzerinde çalışmışlardır. Taşıtın arka kısmında oluşacak olan akış ayrılmalarını geciktirmek için tavana girdap üretici koymuşlardır.</p> <p>-Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak çok sayıda, silindirik girdap üreticiyi tavan boyunca enine yerleştirmişlerdir.</p>	<p>-Kullandıkları bu girdap üreticiler ile sürüklenme katsayısında %10 azalma olduğunu görmüşleridir.</p>
Altınışik (2013)	<p>- Bu çalışmada 1:5 ve 1:10 ölçekli iki adet FIAT Linea araç modeli kullanmıştır. Deneyler için Uludağ Üniversitesi Rüzgar Tüneli ve Ankara Rüzgar Tüneli olmak üzere iki adet rüzgar tüneli kullanmıştır. Uludağ Üniversitesi Rüzgar Tünelinde 1:5, 1:10 ölçekli modelleri 10, 20, 30 m/s hızlarda test ederken, Ankara Rüzgar Tünelinde 1:5 ölçekli modeli 10, 20, 30 m/s hızlarda test etmiştir. Deneyler için iki farklı tünel kullanmasının nedeni farklı türbülans şiddetlerini ve blokaj etkilerini değerlendirmektir.</p> <p>-Çalışmalarında kullandığı modeller üzerinde statik basınçları</p>	<p>-1:5 ölçekli model için Uludağ Üniversitesi Rüzgar Tüneli deney odasında %20 blokaj oluşturmuştur. Aynı model Ankara rüzgar tüneline %1 blokaj düzeyine sahip olup blokaj etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Ölçülen değerler arasında belirgin fark görmüştür. 30 m/s hız için UURT’de sürüklenme katsayısının değeri 0,421 iken, ART’de aynı 0,264’dir. UURT tüneline 1:10 ölçekli araç modeli için %5 blokaj oluşturmuştur ve 30 m/s hızında sürüklenme katsayısının değerini 0,298 olarak hesaplamıştır.</p> <p>-Sayısal analizlerde StarCCM+ kullanmış ve türbülans modeli olarak düzeltilmiş k-ε two-layer</p>

**Çizelge 2.1.** Taşıt aerodinamiği üzerinde yapılan çalışmalar (devam)

<p>Altınışık (2013)</p>	<p>ve sürüklenme kuvvetlerini ölçerek sürüklenme katsayısını bulmuştur.</p> <p>-Deneyleri Ankara Rüzgar Tünelinde 0, 5, 10 yanal rüzgar açılarında, Uludağ Üniversitesi Rüzgar Tünelinde 1:5 modelde 0, 5, 10 ve 1:10 modelde ise 40 yanal rüzgar açılarına kadar gerçekleştirmiştir.</p> <p>-Deneysel yöntemlerle elde ettiği dağılımları ve sürüklenme katsayısını sayısal CFD sonuçlarıyla kıyaslamıştır. Çalışmasında aynı zamanda blokaj etkisini de değerlendirmiştir.</p>	<p>kullanmıştır. Model olarak 1:5 ölçekli modeli kullanmıştır. Bulduğu değerlerin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu görmüştür. 1:5 ölçekli model için normal CFD analizinde sürüklenme katsayısının değeri 0,248 iken %20 blokaj durumu için 1:5 ölçekli modelin UURT'deki deney sonucunda 0,409'dur. Bu değer deneysel sonuçlara %2,9 seviyesinde yakındır. 1:10 ölçekli modeli %5 blokaj için UURT boyutlarıyla modelleyerek analiz etmiş ve sürüklenme katsayısını 0,303 olarak bulmuştur. Bu değer deneysel sonuçlara %1,7 seviyesinde yakındır. Blokajsız durum için bulunan sürüklenme katsayısı değeri 0,248'dir. Bu değer deneysel sonuçlara %6 seviyesinde yakındır.</p> <p>-Bulduğu sonuçlara göre CFD analizlerinin gerçek araç modelleri ile yapılan deneyler ile elde edilen sonuçlara çok yakın seviyede sonuç verdiğini görmüştür. Ayrıca düzeltilmiş k-ε two-layer türbülans modelinin analizlerinde güvenilir sonuçlar verdiğini görmüştür.</p>
-----------------------------	--	--

**Çizelge 2.1.** Taşıt aerodinamiği üzerinde yapılan çalışmalar (devam)

<p>İpci ve ark. (2015)</p>	<p>- Bu çalışmada Ahmed Model taşıt modeli etrafındaki akışın yapısını sayısal akışkanlar dinamiği yöntemi kullanarak incelemiştir. Çözüm için su tüneli kullanılmış ve hız 0,218m/s olarak belirlenmiştir. RNG k-ε ve k-ε türbülans modellerini kullanmışlardır.</p>	<p>- Taşıt ön kısmında bir durma noktası meydana gelmiştir. Arka kısımdaki 25° eğimli alanda akışta bozulmaların meydana gelmediği ancak eğimli kısmın sonunda bozulmalar olduğunu ve vorteksli alan oluştuğunu belirtmişlerdir. Arka kısımdaki vorteksli bölgenin uzunluğu k-ε için 0,83H, RNG k-ε için de 0,69H olarak bulmuşlardır. Yaptıkları çalışmalarda elde ettikleri hız profilinin referans çalışmalarla uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Sonuçta her iki türbülans modeli ile de referans çalışmalarla uyumlu sonuçlar bulmuşlardır.</p>
----------------------------	---	---



## 2.2 Kuramsal Temeller

Havanın yoğunluğu, taşıt üzerindeki aerodinamik kuvvetler üzerinde oldukça etkili bir parametredir. Yoğunluk değiştikçe taşıta etki eden aerodinamik kuvvetler de değişecektir. Havanın yoğunluğu sıcaklık ve basınca bağlı olarak değişmektedir. Taşıt etrafındaki havanın yoğunluğu 400 km/h'nin altındaki hızlarda büyük bir değişiklik göstermez ve analizlerde genellikle hava sıkıştırılmaz akışkan olarak ele alınır.

Bir akışkanın akmaya karşı gösterdiği dirence viskozite denir. Viskoz kuvvetler katı cisim ile akışkanın temas ettiği sınır tabaka boyunca iletilir. Akışkanın viskozitesi ne kadar büyükse cisme uygulanan kuvvet de o kadar büyük olur ve bu da cismin akışkan içerisindeki hareketini zorlaştırır (Bernard 1996).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.1)$$

$\nu$  : kinematik viskozite

$\mu$  : dinamik viskozite

### 2.2.1 Bernoulli denklemi

Basınç, hız ve yükseklik arasındaki ilişkiyi temsil eden yaklaşık bir bağıntıdır ve sürtünme kuvvetlerinin ihmal edilebilir olduğu daimi, sıkıştırılmaz akış bölgelerinde geçerlidir. Bu denklem ile ayrılmanın oluşmadığı ve sınır tabaka gelişiminin çok küçük olduğu yüzeylerdeki basınç etkilerini tahmin etmek mümkündür.

$$P + \rho \frac{U^2}{2} + \rho gh = \text{sabit} \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2'de ilk terim statik basıncı, ikinci terim dinamik basıncı ve son terim de hidrostatik basıncı ifade etmektedir. Yükseltinin sıfır olduğu durumlarda son terim dikkate alınmamaktadır.

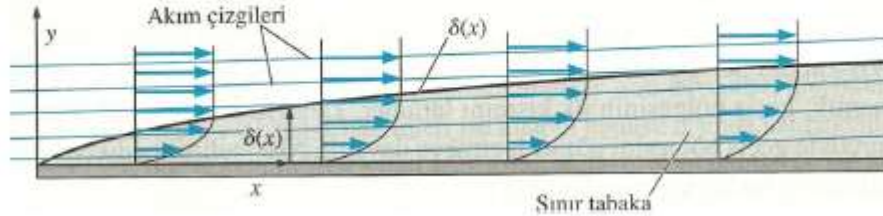
$$P + \rho \frac{U^2}{2} = \text{sabit} \quad (2.3)$$

Eşitlik 2.3 sabit bir değere eşit olduğundan statik basınçtaki artışa bağlı olarak hızda bir azalma görülecektir. Statik ve dinamik basınçların toplamı durma basıncı olarak ifade edilmektedir. Eğer hız sıfırsa durma basıncı statik basınca eşit olur.

Bernoulli denklemi havanın sıkıştırılmaz olduğunu varsayarak türetilmiştir. Bu doğru bir varsayım olmasa bile karayolu taşıtları üzerindeki akışlarda oldukça doğru sonuçlar vermektedir (Bernard 1996).

### 2.2.2 Sınır tabaka

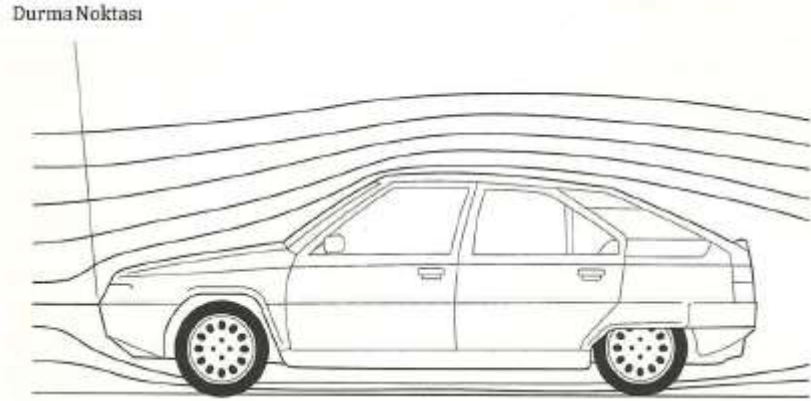
Katı bir cisim ile temas halinde olan akışkanın hızı yüzeyden uzaklaştıkça artar ve sonuçta Şekil 2.1'deki gibi bir hız profili oluşur. Buna sınır tabaka adı verilir. Sınır tabaka kalınlığı taşıtın arka kısımlarında daha fazladır ancak standart taşıt hızlarında seyreden bir otomobilde bu kalınlık birkaç santimetreden fazla olmamaktadır.



Şekil 2.1. Sınır tabaka oluşumu (Çengel 2008)

### 2.2.3 Akım çizgileri

Akış alanındaki anlık akışkan hareketlerini gözlemlemek için akım çizgileri kullanılır. Akışkanın katı cisimden ayrılma noktası, vorteks bölgeleri ve durma noktası akım çizgilerine bakılarak kolayca tespit edilebilir (Şekil 2.2).



**Şekil 2.2.** Bir taşıt etrafındaki akım çizgileri (Bernard 1996)

Sınır tabakada hızın artıp basıncın düşmesine elverişli basınç gradyanı denilmektedir. Bu durumda sınır tabaka ince ve yüzeye sıkıca tutunmuştur. Hızın azalıp basıncın arttığı duruma da elverişsiz ya da ters basınç gradyanı denilmektedir. Bu durumda daha kalın bir sınır tabaka mevcuttur ve akışkan yüzeyden kolaylıkla ayrılabilir (Çengel 2008)

Akış ayrılması taşıtın arka bölgesinde türbülanslı bir bölge oluşturmaktadır. Aracın arkasındaki türbülanslı hava nedeniyle araca hareketine zıt yönde sürüklenme kuvveti etki etmektedir. Sürüklenme kuvveti, aerodinamik sürüklemenin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Yani sürüklenme kuvvetinin düşürülmesi araç performansını doğrudan etkilemektedir.

## **2.3 Aerodinamik Kuvvetler**

Aerodinamik kuvvet, bir akışkan içerisindeki cismin üzerinde akış nedeniyle oluşan kuvvet etkisidir. Aerodinamik biliminin ilgilendiği temel kuvvetlerdir. Hareketli akışa maruz kalan her cisme aerodinamik kuvvet uygulanır.

### **2.3.1 Sürüklenme kuvveti**

Sürüklenme, bir aracın havadaki hareketine karşı çıkan aerodinamik kuvvettir. Düz yüzey üzerindeki akışta, sıfır basınç gradyanında sürüklenme kuvveti sadece sürtünmeden oluşurken, bütünüyle akışa gömülmüş belli bir kalınlığı olan cisimlerde sürüklenme

kuvveti basınç dağılımından ve sürtünmeden kaynaklanır. Akışa dik olan bir cismin önünde yüksek basınç ve arkasında ise düşük basınç bölgeleri oluşur. Ayrılmanın oluşturduğu bu düşük basınç bölgelerinde sınır tabaka modellemeleri uygulanamayacağından genelde deneysel yöntemlere başvurulur (Umur 2009).

Sürükleme, katı bir cismin bir akışkanla teması sonucu, akım içerisinde oluşturduğu akış ayrılması, türbülans ve süreksizlik gibi akım bozulmaları sonucunda ortaya çıkmaktadır.

Sürükleme kuvveti kara taşıtları üzerinde etkisi en büyük olan aerodinamik kuvvettir. Bir binek taşıtta meydana gelen sürükleme kuvvetinin % 90'dan fazlası şekil direnci nedeniyle oluşmaktadır. Sürükleme kuvveti taşıttın motoru tarafından sağlanan çeki kuvveti ile karşılanmaktadır. Bu sebeple sürükleme kuvveti, gerekli motor gücünde ve buna bağlı olarak da yakıt tüketiminde etkilidir. Yakıt tüketimi, gerekli olan güç ile orantılıdır. Aerodinamik direnci yenmek için gerekli güç, motor gücünün büyük bir kısmını oluşturmaktadır.

Sürükleme kuvvetini elde etmek için gerekli olan denklem şöyledir;

$$F_D = C_D \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{U^2}{2} \text{ [N]} \quad (2.4)$$

$C_D$  : Sürükleme katsayısı

$\rho$  : Havanın yoğunluğu

$U$  : hız (m / s)

$A$ : Taşıt kesit alanı

### **2.3.2 Kaldırma kuvveti**

Kaldırma kuvveti gövdeyi akış yönüne dik doğrultuda hareket ettirme eğiliminde olan bir kuvvettir. Bu kuvvet uçak kanadına etkiyerek uçakların havalanmalarını sağlamaktadır. Kanadın alt yüzeyi ile üst yüzeyi arasındaki basınç farkı nedeni ile oluşur. Ancak kara taşıtları için yararlı bir kuvvet değildir ve yol tutuşunu olumsuz yönde etkilemektedir.

Karayolu taşıtlarının aerodinamiğinde kaldırma kuvvetinin düşük olması istenir. Düşük kaldırma kuvveti aracın yol tutuşunu artırır ve bu da özellikle virajlarda daha güvenli hareket sağlar. Fakat kaldırma kuvvetinin çok düşük tutulması da yerçekimi yönünde etki eden bası kuvvetini artırır ve bu da araç ve tekerlekler arasındaki sürtünmeyi artırır. Bu durum yakıt kullanımını arttıracığı gibi hız performansında da düşüşe neden olabilmektedir. Bu nedenle aerodinamik analiz yapılırken kaldırma kuvvetinin dengeli bir değerde olmasına dikkat edilmelidir.

$$F_L = C_L \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{U^2}{2} \text{ [N]} \quad (2.5)$$

$C_L$  : Kaldırma katsayısı

$\rho$  : Havanın yoğunluğu

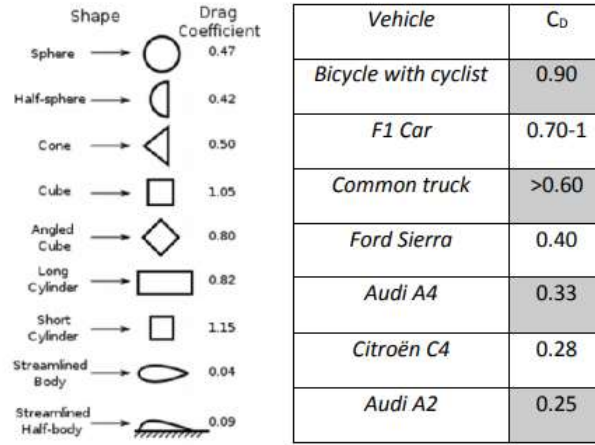
$U$  : hız (m / s)

$A$  : Taşıt kesit alanı

### 2.3.3 Sürüklenme katsayısı

Sürüklenme katsayısı, bir nesnenin sürüklenme direncinin ölçülmesini sağlayan boyutsuz bir değerdir. Bu değer düşük olması, nesnenin daha az aerodinamik sürüklenmeye sahip olduğunu gösterir. Sürüklenme katsayısı, nesnenin şekline, konumuna, akışkanın özelliklerine (akışkan türü, yoğunluk, hız...) ve hücum açısına bağlıdır.

Geometrik şekillere ve bazı araç şekillerine bağlı olarak oluşan  $C_D$  değerleri Şekil 2.3'de görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi etki alanları ve şekilleri sürtünme katsayısının değerinin azaltılması açısından oldukça önemlidir.



Şekil 2.3. Değişik şekillerin ve araçların C<sub>D</sub> değerleri

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot U^2} \quad (2.6)$$

### 2.3.4 Kaldırma katsayısı

Harekete dik yönde bir cisme etki eden kuvvet kaldırma kuvveti olarak adlandırılır ve kaldırma katsayısı da aşağıdaki bağıntı ile bulunur (Umur 2009)

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot U^2} \quad (2.7)$$

### 2.3.5 Yanal kuvvet

Hava akışı taşıtın düşey simetri düzlemine herhangi bir açıda ise, akış hattı simetriktir ve yanal bir kuvvet oluşur. Yanal kuvvete neden olan iki etkenden birisi taşıtın dönüşlerde doğrultu değiştirmesi, diğeri de taşıta doğru herhangi bir açıda esen rüzgardır. Bileşke aerodinamik kuvvet bu durumda aerodinamik direnç, aerodinamik kaldırma ve yanal kuvvet olmak üzere üç bileşene ayrılarak değerlendirilir.

$$F_Y = C_Y \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{U^2}{2} \text{ [N]} \quad (2.8)$$

## 2.4 Aerodinamik Momentler

Aerodinamik kuvvet hava ile temas halindeki bir cisim üzerinde havanın etkisi ile oluşan dikey ve teğetsel kuvvetlerdir. Ancak uygulamada çoğu zaman bu kuvvetler bir bileşke kuvvet olarak değerlendirilir. Bu kuvvetin bir noktaya göre momenti de aerodinamik moment olarak adlandırılır.

### 2.4.1 Yunuslama momenti

Taşıta etki eden sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinden kaynaklanan aracın ön ve arkasından etki eden kaldırma kuvvetlerinin birbirine eşit olmamasından kaynaklanan momenttir.

$$M_P = q \cdot A \cdot L \cdot C_{M_P} \quad (2.9)$$

$M_P$  : Yunuslama Momenti

$q$  : Dinamik Basınç

$L$  : Taşıtın karakteristik uzunluğu (ön ve arka aks arasındaki uzunluk)

### 2.4.2 Yana kayış momenti

Yanal kuvvetlerin taşıtın arka ve ön kısmına eşit derecede etki etmediği durumlarda ortaya çıkan momenttir.

$$M_Y = q \cdot A \cdot L \cdot C_{M_Y} \quad (2.10)$$

### 2.4.3 Yuvarlanma momenti

Yanal kuvvetlerin taşıtın sağ ve sol kısmına eşit derecede etki etmediği durumlarda oluşan momenttir.

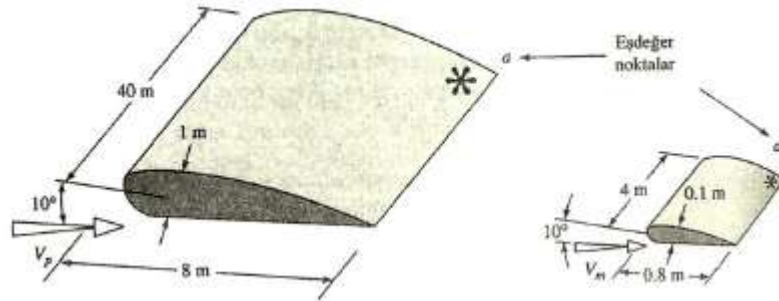
$$M_R = q \cdot A \cdot L \cdot C_{M_R} \quad (2.11)$$

## 2.5 Modelleme ve Benzerlik

Gerçek araçlar ile deney yapmak çok zor ve masraflı hatta bazı durumlarda olanaksız olduğundan, onların yerine laboratuvar şartlarına uygun olan çok daha küçük modelleri yapılarak araştırmalar yapılır. Model üzerinde akışın gözlemlenebilmesi ve deneysel çalışmalarda doğru verilerin alınması hız dağılımları, kuvvetler, basınç dağılımları ve kayıpları gerçek araçlara sahip olmadan hesaplanmayı mümkün kılmaktadır. Bu şartların yerine gelebilmesi için model ve prototip arasında geometrik ve dinamik benzerliğin sağlanmış olması gerekir (Umur 2009).

### 2.5.1 Geometrik benzerlik

Geometrik benzerlik; boyutlar arasındaki oranı esas alır. Bir koordinat sisteminde bütün boyutlar aynı lineer ölçek oranına sahipse model ve prototip benzer olarak kabul edilir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Geometrik benzerlik (White 2004)

### 2.5.2 Dinamik benzerlik

Dinamik benzerlikte, geometrik benzerlik sağlandıktan sonra, kuvvetler arasında aynı oranın sağlanması amaçlanır. Bunun için Mach sayısı, Reynolds sayısı, Sürüklenme katsayısı gibi akışı karakterize eden boyutsuz sayıların hem modelde, hem de prototipte aynı olması gerekir (Umur 2009).



### **3. MATERİYAL ve YÖNTEM**

Bu çalışmada, beş farklı taşıt profili bilgisayar üzerinde iki boyutlu olarak modellenmiştir. Hesaplmalı akışkanlar dinamiği yöntemleri kullanılarak taşıtlar için gerekli sınır şartları belirlenmiştir. Beş farklı taşıt modeli Ansys/Fluent programı üzerinde ayrı ayrı analiz edilmiş ve her profil için basınç dağılımları ve sürükleme katsayıları elde edilmiştir.

#### **3.1 Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği**

Sürekli gelişmekte olan otomotiv sektöründe, üreticiler öne çıkabilmek için en kısa sürede en doğru sonuçları elde etmeyi amaçlamaktadır. Aerodinamik testler için kullanılan rüzgar tüneli testleri ve yol testlerinde sonuçlar hem uzun sürede alınmakta hem de yüksek maliyet gerektirmektedir. Hızla gelişmekte olan otomotiv sektöründe, rekabetin içerisinde yer alabilmek için otomotiv üreticileri daha hızlı ve kolay çözümler üretmeyi amaçlamaktadırlar. Aerodinamik çalışmaları için tercih edilen rüzgar tüneli testleri ve yol testleri zaman alıcı, yüksek maliyetli ve zor uygulamalardır. Bu sebeple, aerodinamik analizler için daha hızlı ve daha düşük maliyetli olan hesaplmalı akışkanlar dinamiği uygulamaları, bu alanda sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Sayısal yöntemlerin kullanılması ürün geliştirme sırasında zamandan büyük oranda tasarruf edilmesini sağlamaktadır.

Sayısal yöntemler kullanılırken öncelikli olarak analiz edilecek model bilgisayar üzerinde çeşitli modelleme programları kullanılarak oluşturulmalıdır. Sonraki aşamada, analizin yapılabilmesi için oluşturulan model sonlu elemanlara ayrılarak bir mesh yapısı oluşturulmalıdır. Sonlu elemanlara ayrılmış model üzerinde gerekli sınır şartları tanımlanarak çözüm aşamasına geçilmelidir. Bu çalışmada taşıt aerodinamiği incelendiğinden akışkan olarak hava kullanılmaktadır.

Sayısal yöntemle analiz edilmiş bir taşıt modeli ile deneysel yöntemlerden çok daha kısa sürede taşıtın aerodinamik özellikleri ile ilgili bilgi sahibi olunabilir ve taşıt üzerinde yapılması gereken düzenlemeler yapılabilir. Bir taşıtın bilgisayar üzerinde modellenmesi,

üretmeye göre daha kolay ve kısa süreli bir işlemdir. Yapılan bu analizler de taşıt üzerinde yapılan değişikliklerin ne tür etkiler yaratacağı hakkında hızlı bir biçimde bilgi sahibi olunmasını sağlamaktadır.

### 3.1.1 Navier-Stokes denklemleri

Navier-Stokes denklemleri bir akış sistemi içindeki sürtünme ve basınç kayıplarına neden olan viskoz kuvvetlerin, akış içindeki birim kütleye etkiyen momentum değişimlerine eşit olduğunu belirten denklemlerdir. Sıvılar ve gazlar gibi akışkanların hareketini tanımlamaya yarayan bir dizi denklemden oluşmaktadır.

Denklemler kütle, enerji ve momentumun korunumu kanunlarından elde edilmektedir. Bunun için sürekli akış içerisindeki herhangi bir noktadan seçilen kontrol hacmi üzerinde bu kanunlar kolayca uygulanabilir.

### 3.1.2 Süreklilik denklemi

Süreklilik denklemi, akışkan maddelerin akış miktarının, aktığı boru içinde korunarak taşınmasını tanımlayan bir denklemdir. Kartezyen koordinatlarda boyutları dx, dy, dz olan bir kontrol hacmi için süreklilik denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilir.

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

### 3.1.3 Momentum denklemi

Newton'un II. Kanuna göre ( $\sum F = ma$ ), bir cisme dışarıdan kuvvet etki ederse, cisim ya dengede kalır, ya da bir ivme ile hareket eder. Bu kural akışkanlar üzerinde uygulanırsa kartezyen koordinatlarda seçilen dx, dy ve dz boyutlarındaki bir kontrol hacmi için momentum denklemi;

x - yönünde;

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.2)$$

y - yönünde;

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3.3)$$

z - yönünde;

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3.4)$$

olarak ifade edilir.

### 3.2 Sınır Şartlarının Tanımlanması

Bu çalışmada yapılan analizler için ANSYS programı kullanılmıştır. Kullanılacak araç profilleri 1/1 ölçekli olarak ANSYS/Fluent programının geometri kısmında 2 boyutlu olarak oluşturulmuştur. Ardından modeller üzerinde ağ yapısı oluşturulmuş ve ağdan bağımsızlık çalışmaları yapılarak en uygun ağ sayısı ve yapısı belirlenmiştir. Taşıtların taban uzunlukları aynı olup taşıt profilleri değiştirilmiştir ve değişen profillerin aerodinamik parametrelere etkisi gözlemlenmiştir.

Taşıtların analiz edileceği tünel girişi için “velocity-inlet”, çıkış için “pressure-outlet” sınır şartları tanımlanmıştır. Her bir model 25 m/s giriş hızında analiz edilmiştir. Akış alanı içerisinde türbülans modeli olarak Standard  $k - \epsilon$  modeli seçilmiştir. Sistem içerisinde herhangi bir ısı geçişi olmadığından akış adyabatik olarak tanımlanmıştır.

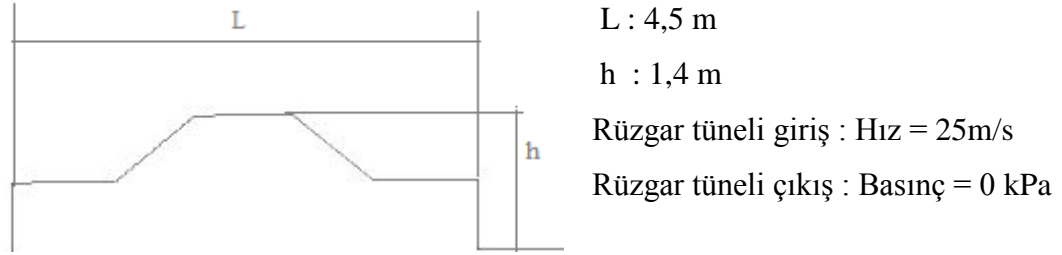
Sınır şartları belirlendikten sonra çözüm operatörü çalıştırılarak çeşitli taşıt profilleri için çözümler yaptırılmış ve sonuçlar elde edilmiştir.

## 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

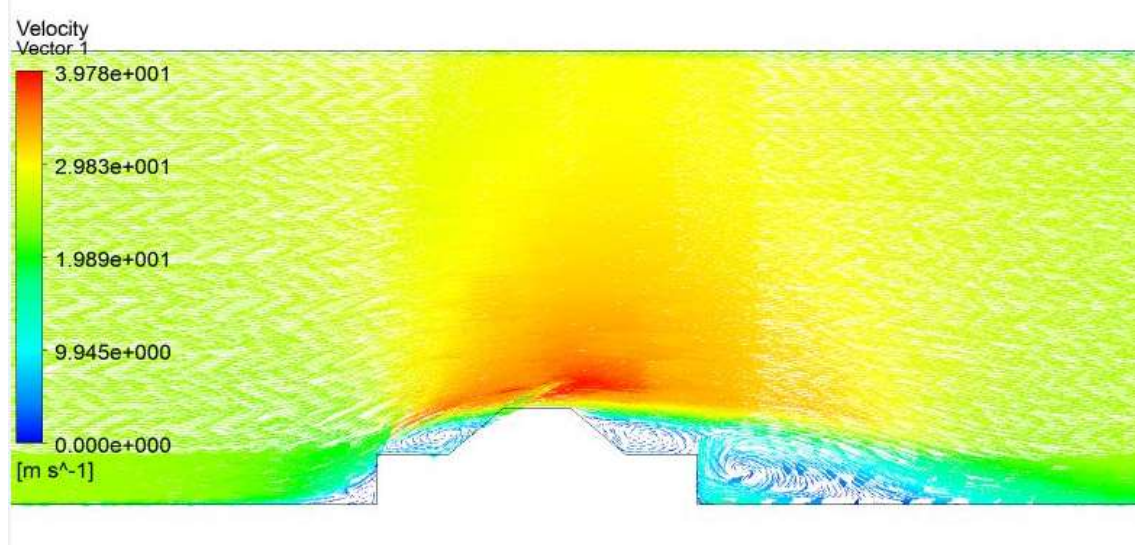
### 4.1 Analiz Sonuçları

#### 4.1.1 Taşıt modeli 1

Analizlerde kullanılacak olan ilk taşıt modeli Ansys/Fluent programı üzerinde Şekil 4.1'deki gibi modellenmiştir.



Şekil 4.1. Taşıt modeli 1'in geometrisi



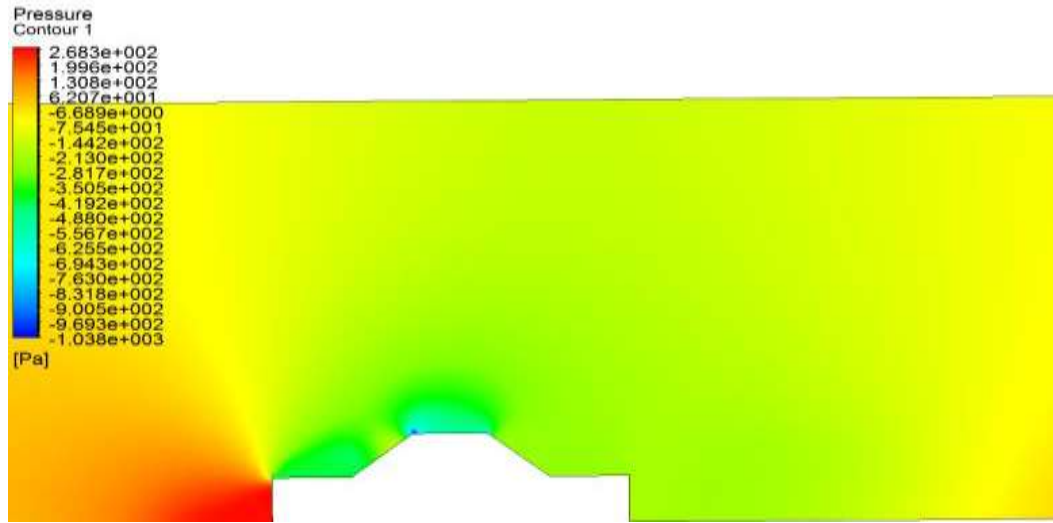
Şekil 4.2. Taşıt model 1'in üzerindeki akışın vektörel gösterimi

Taşıtın ön bölgesindeki akış hareketleri Şekil 4.2'de görüldüğü gibidir. Taşıtın ön bölgesinde akış durmaya zorlandığından burada basınç yükselmesi mevcuttur. Ayrıca blokaj etkisinden dolayı taşıt üst bölgesindeki akışkan hızı bir miktar artmıştır. Blokaj etkisinin azaltılabilmesi için üst sınır daha yukarı çekilerek akış alanı genişletilmelidir. Ancak akış alanının artırılması analiz süresini büyük oranda etkilemektedir. Ayrıca 2 boyutlu çözümlerinde akış sadece model üzerinden akmaya zorlandığı için tünel üst sınırı yukarı çekilse bile blokaj etkisi düşük değerlere indirilemeyebilir.



Şekil 4.3. Taşıt modeli 1'in arka bölümündeki akış hareketleri

Taşıt modelinin arka bölgesinde ise ani kesit genişlemesi nedeniyle hızda bir düşüş gözlemlenmektedir. Ayrıca Şekil 4.3'de de görüldüğü gibi aracın bitiş bölümünde akış ayrılması, bu bölgede vorteks oluşturmuştur. Buna bağlı olarak da taşıt arka kısmında negatif yönde bir basınç oluşumu gözlemlenmektedir. Taşıt modelinin geometrisine bağlı olarak sivri köşelerde akış ayrılmaları gözlemlenmektedir ve bu da taşıt üzerinde istenmeyen basınç kuvvetleri oluşturarak taşıt aerodinamiğini olumsuz yönde etkilemektedir.

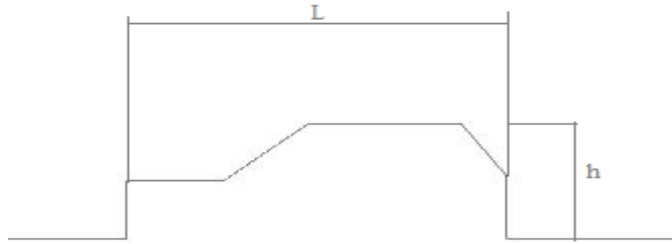


Şekil 4.4. Taşıt modeli 1'e ait basınç dağılımı

Taşıtın ön kısmında akış durmaya zorlandığından en düşük hız değeri burada meydana gelmiştir. Şekil 4.4'de görülmektedir ki hızın en düşük olduğu bu bölgede pozitif yönlü yüksek basınç bölgesi oluşmuştur. Taşıtın arka bölümlerine doğru ilerledikçe basınç değeri düşmektedir. Bu model için  $C_D$  değeri 0,74 olarak hesaplanmıştır.

#### 4.1.2 Taşıt modeli 2

Taşıt modeli 2' de taşıtın ön formunda bir değişiklik yapılmamıştır. Ancak aracın arka kısmı daraltılarak üst yüzey büyütülmüştür (Şekil 4.5).



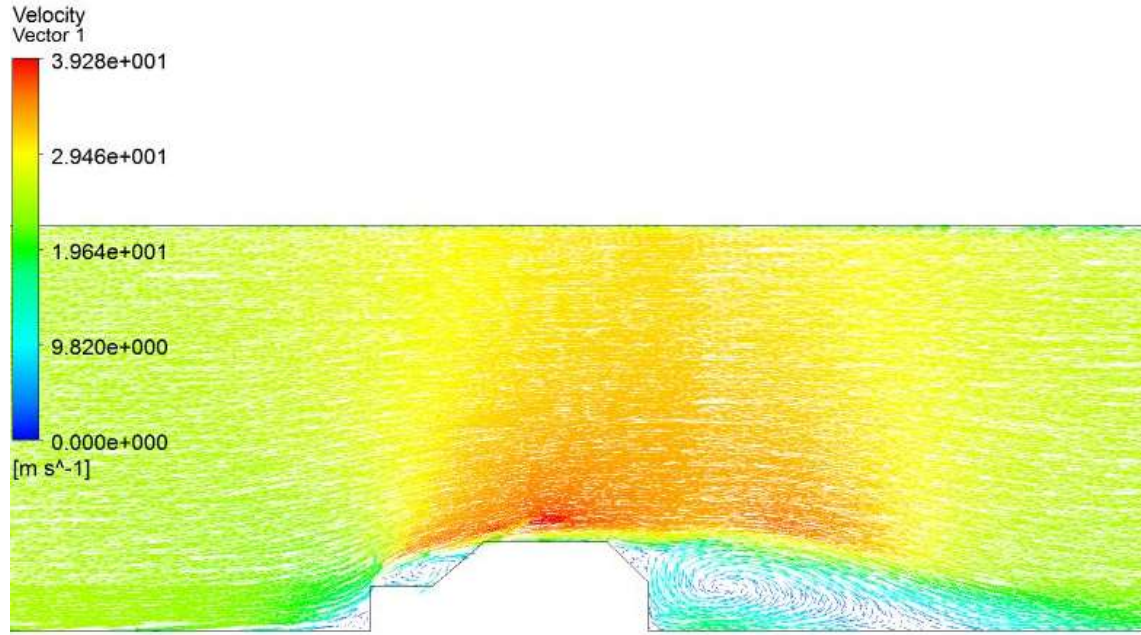
L : 4,5 m

h : 1,4 m

Rüzgar tüneli giriş : Hız = 25m/s

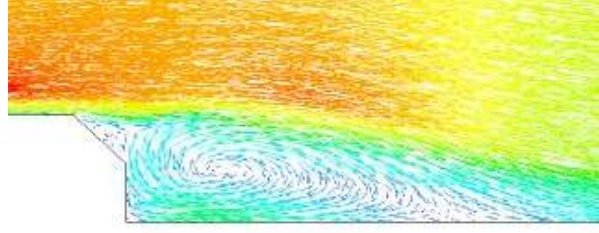
Rüzgar tüneli çıkış : Basınç = 0 kPa

Şekil 4.5. Taşıt modeli 2'nin geometrisi



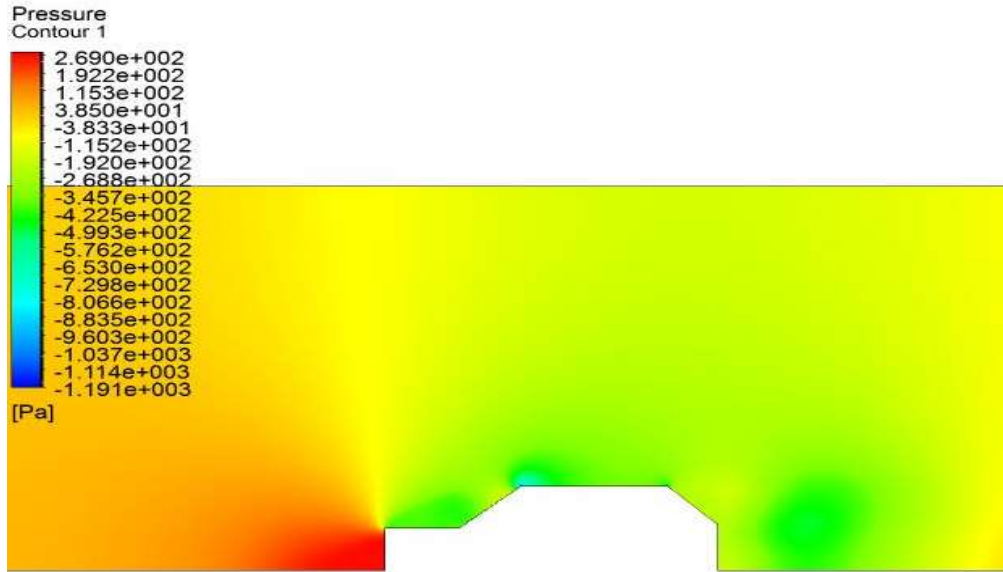
Şekil 4.6. Taşıt modeli 2'nin üzerindeki akışın vektörel gösterimi

Taşıt modeli 1'in üzerinde yapılan değişiklik sonucunda elde edilen yeni modele ait hız dağılımı Şekil 4.6'da görüldüğü gibidir. Burada şeklin ön formunda değişiklik yapılmadığı için ön bölgedeki hız dağılımı Şekil 4.2'deki ile aynıdır. Taşıt ön bölgesinde durmaya zorlanan akış burada da yüksek basınç oluşturmuştur.



**Şekil 4.7.** Taşıt modeli 2'nin arka bölümündeki akış hareketleri

Taşıt arka bölümündeki akış hareketleri Şekil 4.7'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi bu modelde de akış ayrılmalarından kaynaklı vorteks oluşumu vardır. İkinci modelde de taşıtın arka bölgesinde oluşan vorteks nedeniyle taşıt üzerinde negatif yönlü basınç oluşumu gözlenmektedir. Bu modelde de akış doğrultusunda sivri köşeler olduğundan taşıt ön ve arka bölgelerinde akış ayrılmaları vardır. Bu da aerodinamik açıdan iyi bir taşıt tasarımı için istenmeyen bir durumdur.

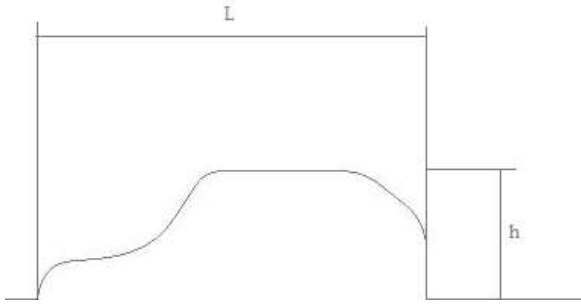


**Şekil 4.8.** Taşıt modeli 2'ye ait basınç dağılımı

Taşıt ön kısmında akış durmaya zorlandığından en yüksek basınç bu bölgede oluşmaktadır. Şekil 4.8'de görülmektedir ki hızın en düşük olduğu bu bölgede pozitif yönlü yüksek basınç oluşmuştur. Taşıtın arkalarına doğru ilerledikçe basınç değerleri düşmüştür. Bu model için  $C_D$  değeri 0,71 olarak hesaplanmıştır. Taşıt arka formunda yapılan bu değişikliğin  $C_D$  değerini % 4,054 oranında düşürdüğü görülmüştür.

### 4.1.3 Taşıt modeli 3

Taşıt modeli 3’de, model 2 üzerindeki sivri köşeler yuvarlatılmış ve bu iyileştirmenin aerodinamik parametrelere etkisi incelenmiştir (Şekil 4.9).



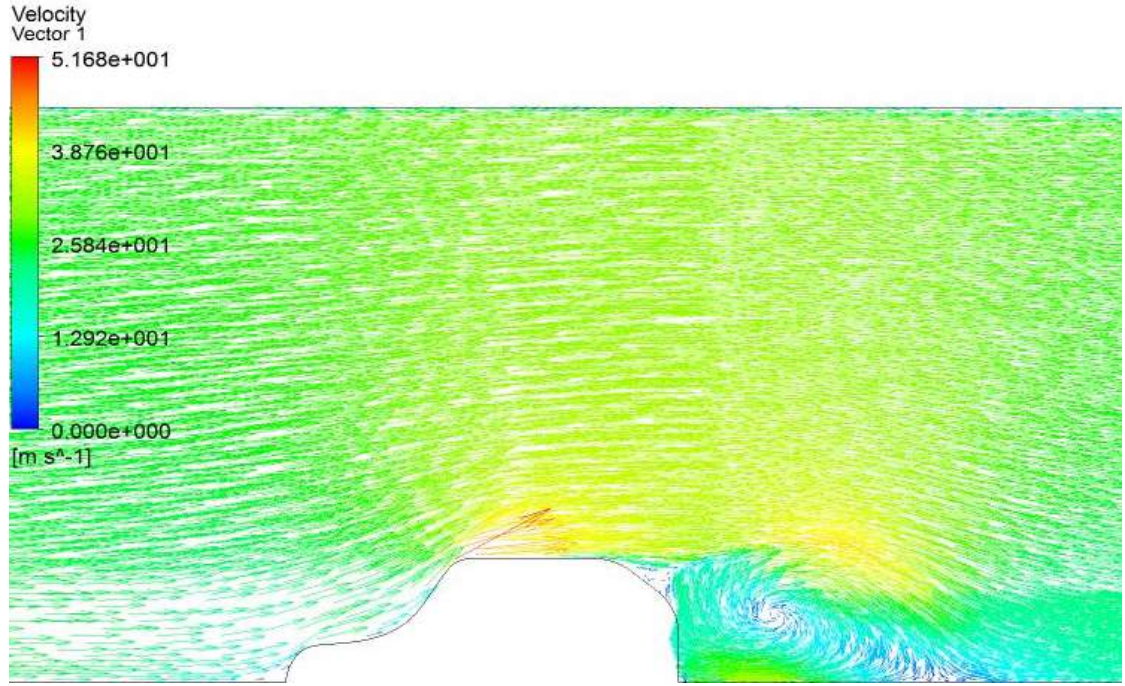
L : 4,5 m

h : 1,4 m

Rüzgar tüneli giriş : Hız = 25m/s

Rüzgar tüneli çıkış : Basınç = 0 kPa

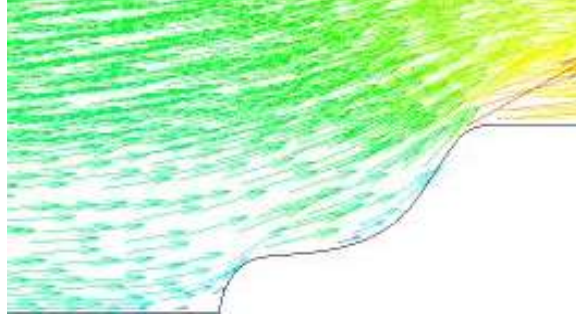
Şekil 4.9. Taşıt modeli 3’ün geometrisi



Şekil 4.10. Taşıt modeli 3’ün üzerindeki akışın vektörel gösterimi

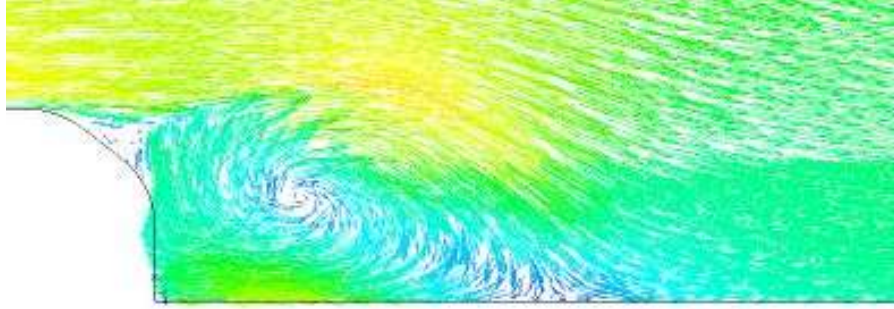
Taşıt modeli 2’nin üzerinde yapılan değişiklik sonucunda elde edilen yeni modele ait hız dağılımı Şekil 4.10’da görüldüğü gibidir. Burada şeklin ön formunda sivri köşeler yok edildiği için akış taşıtın üstünden ayrılmadan paralel bir şekilde yoluna devam etmiştir. Ön kısımdaki akış Şekil 4.11’de daha net şekilde görülmektedir.





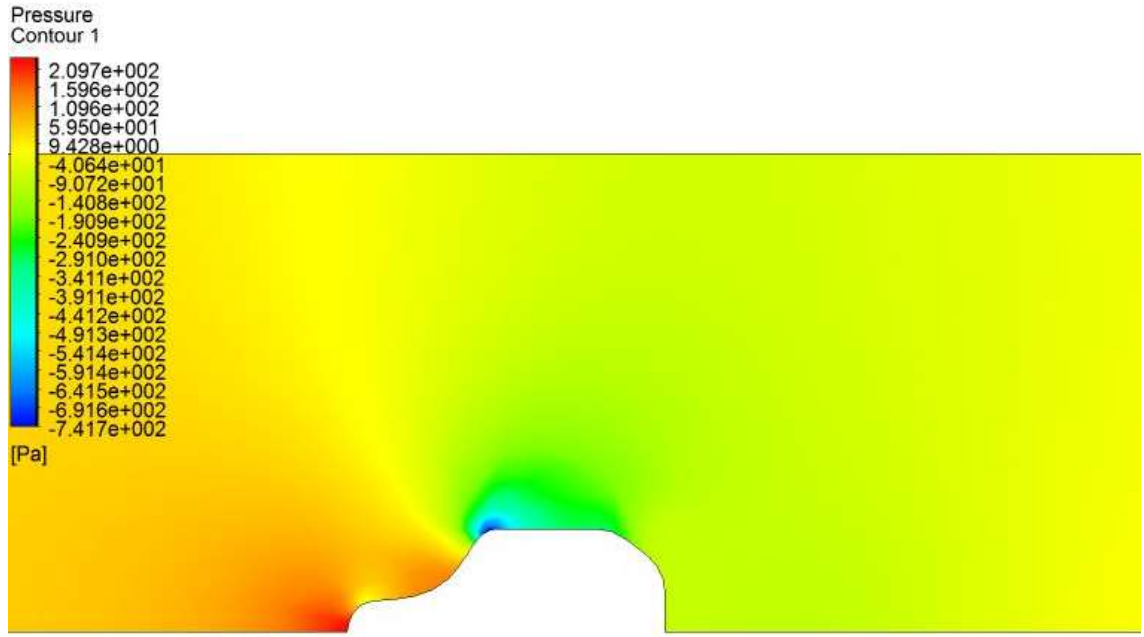
**Şekil 4.11.** Taşıt modeli 3'ün ön bölümündeki akış hareketleri

Taşıt modeli 1 ve 2'de akış taşıtın önünde daha sert bir şekilde yavaşlamış ve bu da ani basınç artışına neden olmuştur ancak model 3'de bu durum minimize edilmiştir. Taşıt ön formunda akış ayrılmasına bağlı vorteks oluşumu gözlemlenmediği için de negatif yönde basınç oluşumu görülmemektedir.



**Şekil 4.12.** Taşıt modeli 3'ün arka bölümündeki akış hareketleri

Taşıtın arka kısmındaki akışkan hareketleri Şekil 4.12'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi bu modelde de akış ayrılmalarından kaynaklı vorteks oluşumu vardır.

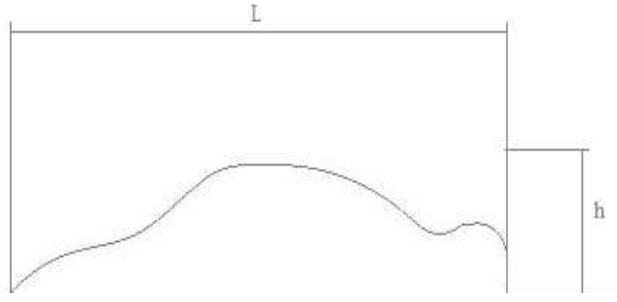


**Şekil 4.13.** Taşıt modeli 3'e ait basınç dağılımı

Taşıt modeli 3'e ait basınç dağılımı Şekil 4.13'de görüldüğü gibidir. Bu modelde de en yüksek basınç taşıtın önünde oluşmuştur ancak taşıt modeli 2 ve 1'e göre daha düşük basınç değerleri gözlemlenmiştir. Taşıtın arkalarına doğru ilerledikçe basınç değerleri düşmüştür. Bu model için  $C_D$  değeri 0,48 olarak hesaplanmıştır. Taşıtın genel formunda yapılan bu değişikliğin  $C_D$  değerini bir önceki modele göre % 32,395 oranında düşürdüğü görülmüştür.

#### 4.1.4 Taşıt modeli 4

Taşıt modeli 4'de taşıt ön formu, model 3 referans alınarak iyileştirilmiş ve taşıtın arka kısmı da damla formuna benzer şekilde modellenmiştir. Yapılan bu değişikliklerin aerodinamiğe etkisi incelenmiştir (Şekil 4.14).



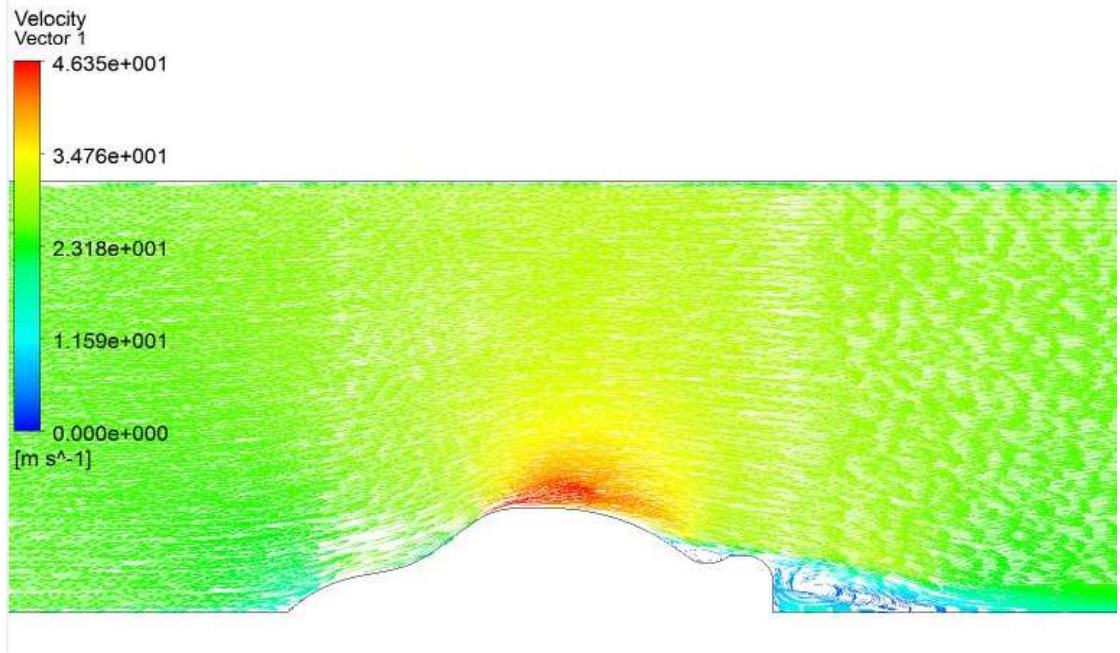
L : 4,5 m

h : 1,4 m

Rüzgar tüneli giriş : Hız = 25m/s

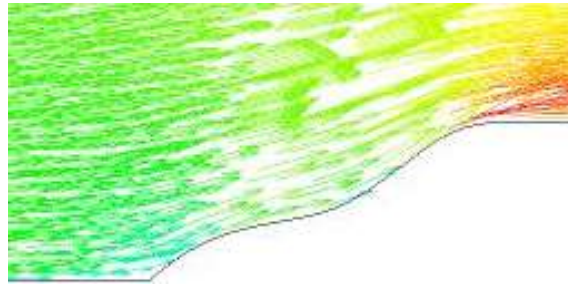
Rüzgar tüneli çıkış : Basınç = 0 kPa

Şekil 4.14. Taşıt modeli 4'ün geometrisi



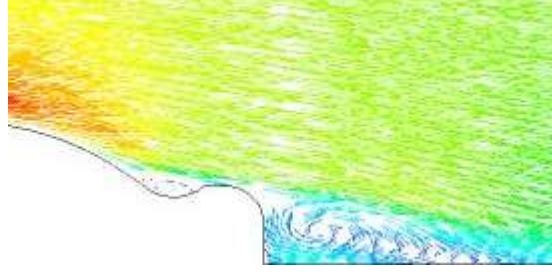
Şekil 4.15. Taşıt model 4'ün üzerindeki akışın vektörel gösterimi

Taşıt modeli 3 üzerinde yapılan değişiklik sonucunda elde edilen yeni modele ait hız dağılımı Şekil 4.15'de görüldüğü gibidir. Burada şeklin ön kısmında hava, taşıt üzerinde linear bir şekilde yoluna devam etmiştir. Ön kısımdaki akış Şekil 4.16'da daha net şekilde görülmektedir.



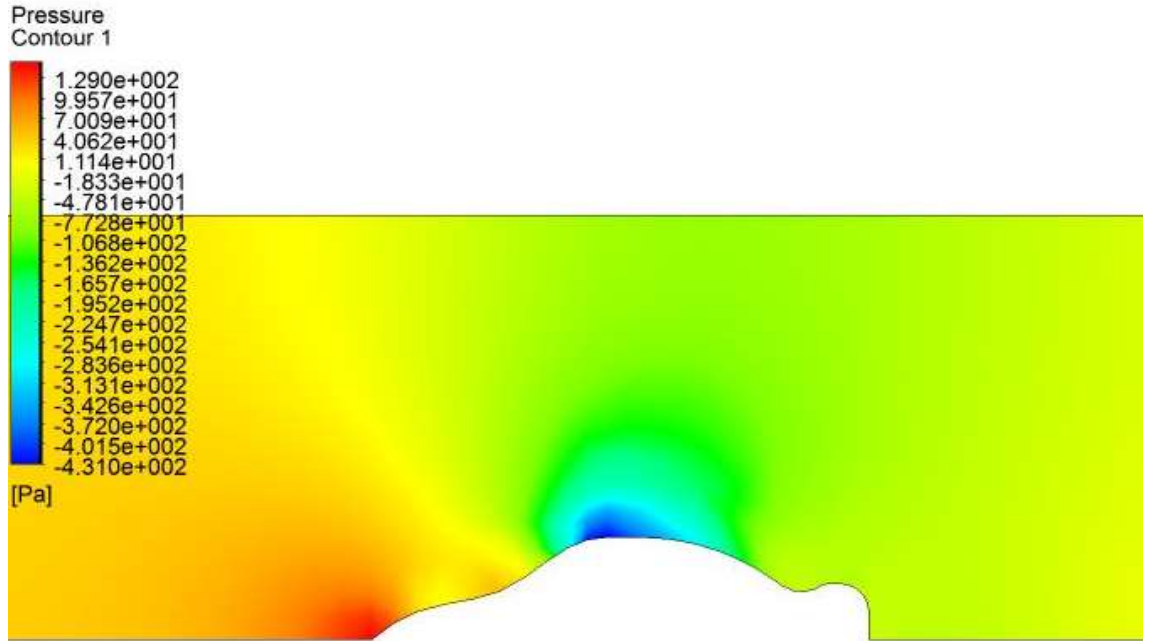
Şekil 4.16. Taşıt modeli 4'ün ön bölümündeki akış hareketleri

Ön kısımdaki akış hareketlerini incelediğimizde akışta herhangi bir ayrılma ve buna bağlı vorteks oluşumu gözlenmemektedir. Buna bağlı olarak da ters basınç oluşumu yoktur. Ancak akışkanın taşıtla ilk temas ettiği noktada akış ani durmaya zorlandığından bu bölgede pozitif yönlü yüksek basınç bölgesi oluşumu gözlemlenmektedir.



**Şekil 4.17.** Taşıt modeli 4'ün arka bölümündeki akış hareketleri

Taşıtın arka kısmındaki akış hareketleri Şekil 4.17'de görülmektedir. Burada akış ayrılmasına bağlı vorteks oluşumu gözlemlenmektedir. Ancak model 1, 2 ve 3'le kıyaslandığında oluşan vorteks çok daha küçüktür. Vorteksten kaynaklı oluşan negatif basıncın etki alanı da taşıt arka profilinde yapılan değişiklikler sonucunda büyük ölçüde azaltılmıştır.

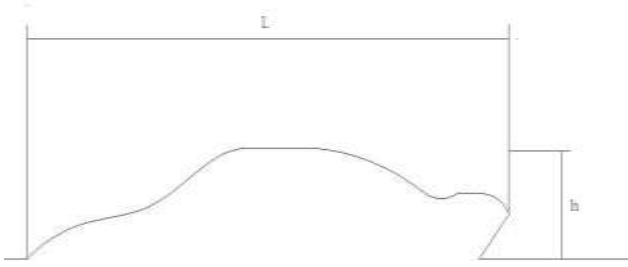


**Şekil 4.18.** Taşıt modeli 4'e ait basınç dağılımı

Taşıt modeli 4 için en yüksek basıncın taşıtın önünde olduğu Şekil 4.18'de görülmektedir. Ancak bu modelde, model 3, 2 ve 1'e göre daha düşük basınç değerleri gözlemlenmiştir. Bu model için  $C_D$  değeri 0,27 olarak hesaplanmıştır. Taşıtın genel formunda yapılan bu değişikliğin  $C_D$  değerini bir önceki modele göre % 43,75 oranında düşürdüğü görülmüştür.

#### 4.1.5 Taşıt modeli 5

Taşıt modeli 5, taşıt modeli 4 ile neredeyse aynıdır, sadece taşıt arka kısmına eğim verilerek bu değişimin aerodinamik özelliklere etkisi incelenmiştir (Şekil 4.19).



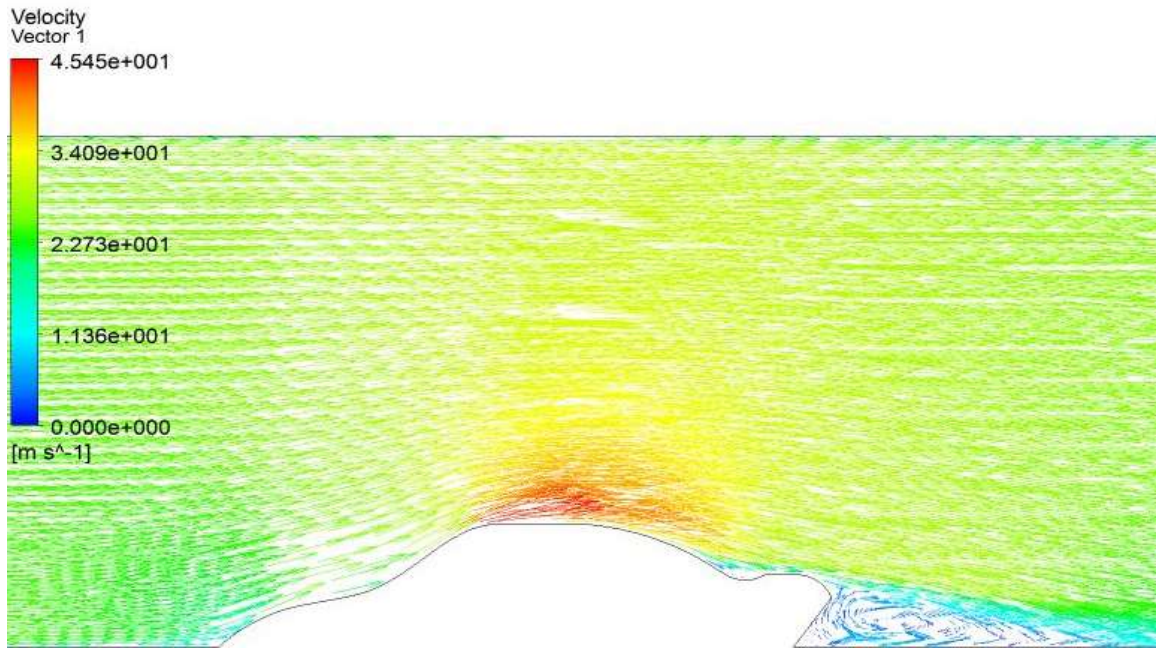
L : 4,5 m

h : 1,4 m

Rüzgar tüneli giriş : Hız = 25m/s

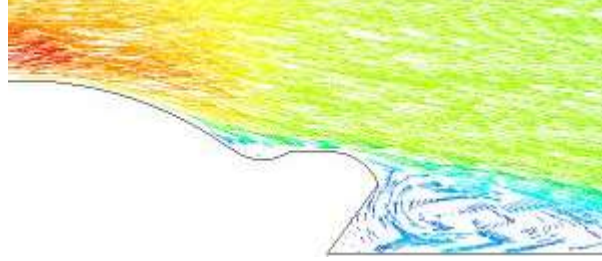
Rüzgar tüneli çıkış : Basınç = 0 kPa

Şekil 4.19. Taşıt modeli 5'in geometrisi



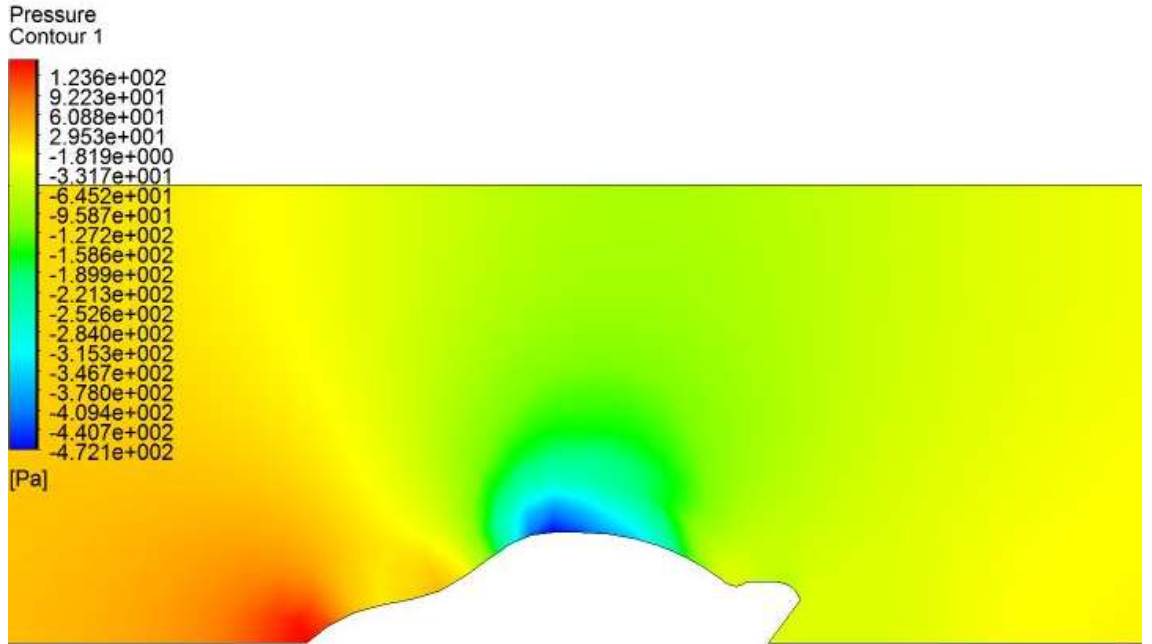
Şekil 4.20. Taşıt modeli 5'in üzerindeki akışın vektörel gösterimi

Taşıt modeli 4 üzerinde yapılan değişiklik sonucunda elde edilen yeni modele ait hız dağılımı Şekil 4.20’de görüldüğü gibidir. Burada şeklin ön formunda değişiklik yapılmadığı için akış hareketleri önceki modeldekiyle birebir aynıdır.



**Şekil 4.21.** Taşıt modeli 5'in arka bölümündeki akış hareketleri

Taşıtın arka kısmındaki akış hareketleri Şekil 4.21’de görülmektedir. Burada akış ayrılmasına bağlı vorteks oluşumu gözlemlenmektedir. Buradaki vorteks alanı, taşıt modeli 4’de elde edilen vorteks alanına yakındır.



**Şekil 4.22.** Taşıt modeli 5'e ait basınç dağılımı

Taşıt modeli 5'in basınç dağılımı Şekil 4.22’de görülmektedir. Bu model için de en yüksek basınç taşıtın önünde oluşmuştur. Taşıtın arkalarına doğru ilerledikçe basınç

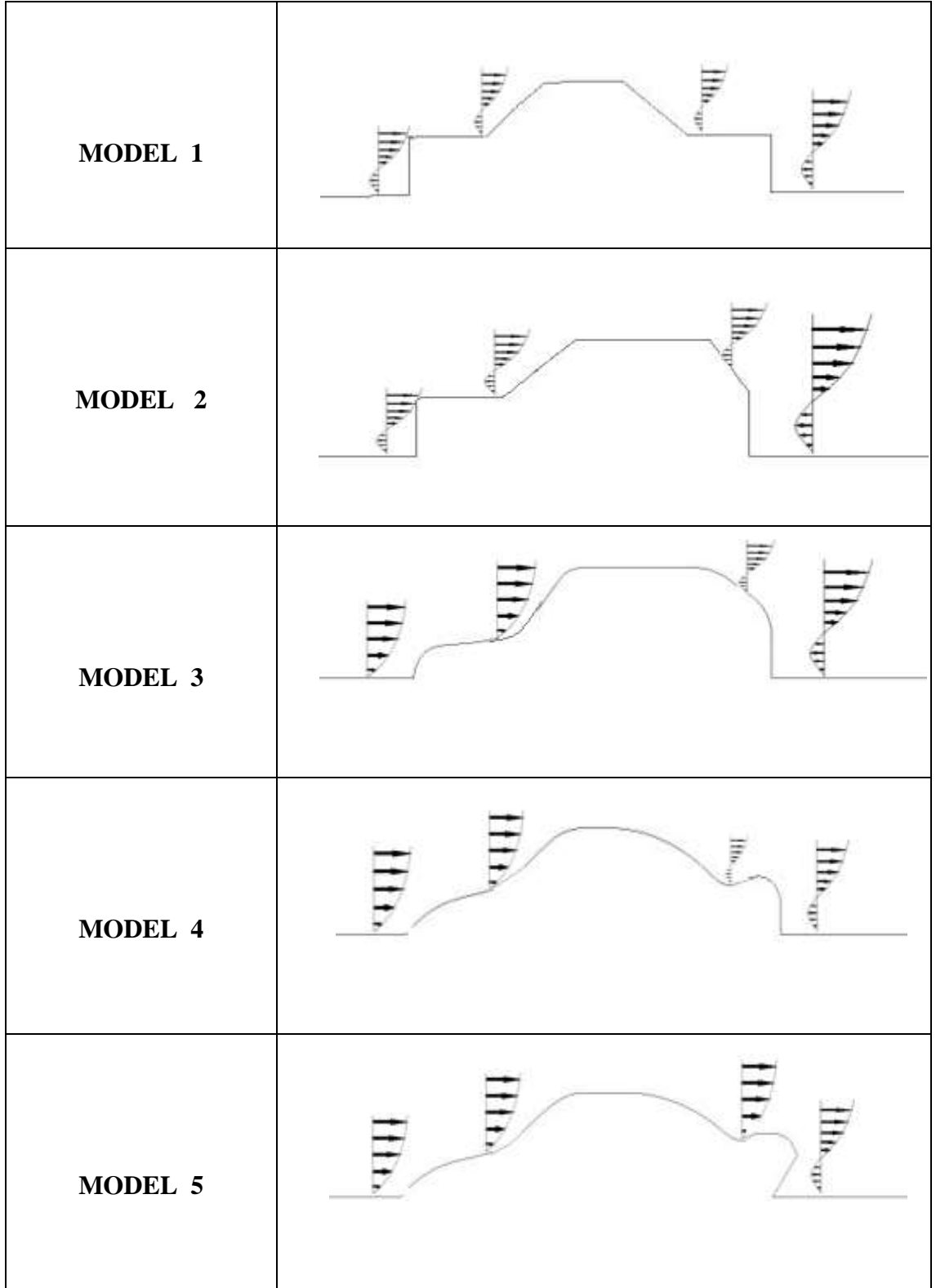
değerleri düşmektedir. Bu model için  $C_D$  değeri 0,25 olarak hesaplanmıştır. Taşıtın genel formunda yapılan bu değişikliğin  $C_D$  değerini bir önceki modele göre % 7,408 oranında düşürdüğü görülmüştür.

## 4.2 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Taşıt modellerine ait akış hareketlerinin vektörel gösterimi bir önceki bölümde verilmişti. Buna bağlı olarak da taşıt üzerindeki çeşitli noktalarda oluşacak hız profilleri Şekil 4.23'de görüldüğü gibidir.

Taşıt modeli 1'in üzerindeki akış Şekil 4.2'de vektörel olarak gösterilmiştir. Burada taşıtın hemen ön kısmında bir vorteks alanı oluştuğu görülmektedir. Şekil 4.23'de de taşıt modeli 1 için ilk noktadaki hız profiline baktığımızda taşıtın ön bölgesindeki ters akış oluşumu açıkça görülmektedir. Aynı şekilde ön cam başlangıcı, arka cam bitişi ve taşıtın arka kısmında da akış ayrılmalarına bağlı vorteksler oluşmuştur. Bu akış ayrılmaları taşıt üstündeki istenmeyen basınç kuvvetlerini arttırmakta ve buna bağlı olarak da sürüklenme katsayısını büyütmektedir.

Taşıt modeli 1'in üzerinde yapılan değişiklikler sonucu elde edilen ikinci model üzerindeki akış, Şekil 4.6'da vektörel olarak gösterilmiştir. Taşıtın ön kısmında herhangi bir değişiklik yapılmadığından ön kısım için oluşan vorteksler birinci taşıt modeli ile aynıdır. Taşıtın arka camının üstünde ise yine vorteks oluşumu görülmektedir ancak oluşan vorteks alanı, birinci modelde oluşan vorteks alanından daha küçüktür. Şekil 4.23'de görüldüğü gibi taşıt modeli 2'nin üzerinde de vorteks oluşumu görülmektedir. Taşıt modeli 1'in üzerinde yapılan değişiklikler ters akış oluşumunun giderilmesinde yararlı olmamıştır.



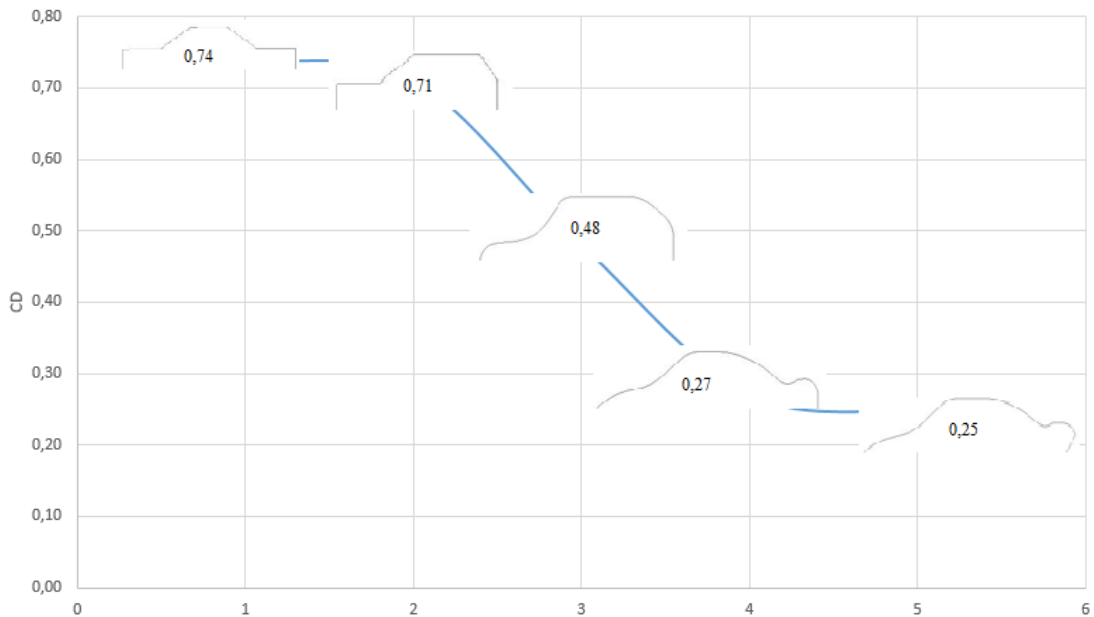
**Şekil 4.23.** Taşıt modelleri üzerindeki bazı noktalara ait hız profilleri



Taşıt modeli 2'nin üzerinde yapılan değişiklikler sonucu elde edilen üçüncü model üzerindeki akış, Şekil 4.10'da vektörel olarak gösterilmişti. İkinci modeldeki keskin köşelerin giderilmesine bağlı olarak taşıt ön kısmında hiçbir akış ayrılması ve buna bağlı vorteks oluşumu görülmemektedir. Taşıt ön kısmındaki hız profillerini incelediğimizde de hiçbir akış bozulmasının olmadığı açıkça görülmektedir. Taşıt modeli 2'nin üzerinde yapılan değişiklikler, ters akış oluşumunu büyük ölçüde azaltmıştır.

Taşıt modeli 3'ün üzerinde yapılan değişiklikler sonucu elde edilen dördüncü taşıt modeli üzerindeki akış, Şekil 4.15'de vektörel olarak gösterilmişti. Bu modelde taşıtın ön kısmındaki hız profillerini incelediğimizde hiçbir akış bozulması görülmemektedir. Arka cam bitiminde bir vorteks oluşumu görülmektedir ancak bu vorteks alanı diğer modellerde oluşan vorteks alanlarına göre oldukça küçüktür.

Taşıt modeli 4'ün arka kısmında küçük bir değişiklik yapılarak elde edilen beşinci model üzerindeki akış hareketleri dördüncü model ile neredeyse aynıdır. Ancak Şekil 4.23'de beşinci taşıt modelinin hız profilini incelediğimizde taşıt üzerinde hiçbir vorteks oluşumu görülmemektedir. Taşıt üzerinde hiçbir akış ayrılmasının oluşmaması sürüklenme katsayısı değerini düşürmektedir.



Şekil 4.24. Taşıt modellerine ait C<sub>D</sub> değerleri

Taşıt modellerinde yapılan değişiklikler sonucu elde edilen  $C_D$  değerleri Şekil 4.24'te gösterilmektedir. En yüksek basınç katsayısı değerleri birinci modele aittir. Buna bağlı olarak da yine en yüksek  $C_D$  değeri 0,74' le birinci taşıt modeline aittir. Şekle bakıldığında ikinci modelin  $C_D$  değeri 0,71'dir. Taşıt modeli 1'in üzerinde yapılan iyileştirmeler taşıtın  $C_D$  değerini, bir önceki taşıt modeline göre % 4,054 oranında düşürmüştür. Taşıt modeli 2'deki keskin köşeler yuvarlatılarak üçüncü taşıt modeli oluşturulmuştur. Yapılan bu iyileştirme sonucunda üçüncü taşıt modelinin  $C_D$  değeri 0,48 olarak hesaplanmıştır. Bu işlemler sonucunda taşıtın  $C_D$  değeri ikinci taşıt modeline göre % 32,395 oranında azalmıştır. Taşıt modeli 3'ün ön ve arka formunda yapılan iyileştirmeler sonucunda dördüncü taşıt modeli elde edilmiştir. Şekil 4.24'te taşıt modeli 4'ün  $C_D$  değerinin 0,27 olduğu görülmektedir.  $C_D$  değeri üçüncü taşıt modeline göre % 43,75 oranında azalmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlara bakıldığında taşıt profilleri üzerinde yapılan iyileştirmelerin  $C_D$  değeri üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir. İlk modelde oldukça fazla sivri köşe bulunmaktadır. Buna bağlı olarak da  $C_D$  değeri oldukça yüksek hesaplanmıştır. Taşıt profili sivri köşelerden arındırıldığında ve şekli damla formuna yaklaştırıldığında  $C_D$  değerinde büyük oranlarda azalma gözlemlenmektedir. Ayrıca taşıtların arka bagaj kısımları daraltıldıkça arka kısımda oluşan vorteks alanı da küçülmektedir. Buna bağlı olarak da sürüklenme katsayısı değeri azalmaktadır.

Altınışık (2013), çalışmalarında yaptığı CFD analizi ile FIAT Linea model araca ait sürüklenme katsayısını %1,7 sapma ile hesaplamıştır. Altınışık çalışmasında Linea model aracı 3 boyutlu olarak modellenmiştir ve bu nedenle gerçek değere oldukça yakın bir değer hesaplamıştır. Fiat Linea model aracın sürüklenme katsayısı üretici firma tarafından 0,32 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan model 4 profil olarak FIAT Linea modeline benzemektedir ve CFD analizi sonucu sürüklenme katsayısı 0,27 olarak bulunmuştur. Bu değer gerçek bir Linea model aracın sürüklenme katsayısından %15,6 oranında sapma göstermektedir. Bu sapma değeri oldukça büyüktür. Bunun nedeni modellenmenin 2 boyutlu yapılması ve modelin Linea profili ile birebir aynı olarak modellenmemesidir.

Solmaz (2010), çalışmasında yapığı rüzgar tüneli testlerinde Alfa Romeo 156 model sedan araç için sürüklenme katsayısını 0,36 olarak hesaplariken, BMW X5 E53 model cip için sürüklenme katsayısını 0,40 olarak hesaplamıştır. Bu çalışmada kullanılan model 4

sedan profile sahip bir modeldir ve model 3'de cip profiline benzemektedir. Model 4'ün sürüklenme katsayısı 0,27 ve model 3'ün sürüklenme katsayısı 0,48 olarak hesaplanmıştır. Bu iki çalışmada da taşıt profillerinin sürüklenme katsayısına etkisi için benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada iki boyutlu taşıt modelleri üzerinde akış analizleri yapılmış ve taşıtların profillerine bağlı olarak oluşan sürüklenme katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Bu çalışma bize taşıt formunda yapılan değişikliklerin taşıt aerodinamiğinde etkisi konusunda genel bir bilgi vermektedir. Ancak yapılan çalışmanın iki boyutlu olması nedeniyle elde edilen sonuçlar gerçek değerlerle birebir örtüşmemektedir. Üç boyutlu analizler sonucu elde edilen değerler elbette ki daha gerçekçi olacaktır. Çünkü üç boyutlu modellemelerde gerçeğe daha yakın bir yapı elde edilebilir. Ancak üç boyutlu model kullanılarak yapılan analizlerde kullanılacak model sonlu elemanlara ayrılırken, kullanılacak elemanı sayısı oldukça artacaktır. Akış çözümlerinde kaba elemanlı ağ yapısı daha küçük elemanlar kullanılarak iyileştirilmek istendiğinde ise çözüm için gerekli süre oldukça fazla olacaktır. İki boyutlu analizlerde ise bu süre oldukça azaltılabilmektedir. Ayrıca taşıt profilinin aerodinamiğe etkisi genel olarak incelenmek istendiğinde de elde edilen sonuçlara bakılarak yapılacak çıkarımlar üç boyutlu analiz sonuçlarına bakılarak yapılacak çıkarımlarla benzer olacaktır. Yani iki boyutlu analizler bize bu konuyla ilgili yorum yapacak bilgiyi çok daha kısa sürede sağlamaktadır. Ayrıca bu çalışmada araçların tekerlek kısımları ve taşıt alt kısmı hesaplamalara dahil edilmemiştir. Bu da elde ettiğimiz değerlerin gerçek değerlerden sapmasını açıklamaktadır.

Çalışmada beş ayrı taşıt modeli için sürüklenme katsayısı değerleri ANSYS/Fluent programı üzerinde analiz edilmiştir. Taşıt modeli 1, aerodinamik açıdan çok kötü bir profile sahiptir, model üzerinde çok fazla keskin köşe bulunmaktadır. Buna bağlı olarak da taşıt üzerindeki akışta bozulmalar meydana gelmekte ve bu da taşıta etkiyen sürüklenme kuvvetini arttırmaktadır. Yapılan analizler sonucunda taşıt modeli 1 için sürüklenme katsayısı 0,74 olarak hesaplanmıştır. Taşıt modeli 1'in üzerinde yapılan iyileştirmeler sonucunda ikinci taşıt modeli oluşturulmuş ve bu modelin sürüklenme katsayısı 0,71 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen yeni modelin sürüklenme katsayısı değeri birinci taşıt modeline göre daha düşüktür ama yine de aerodinamik olarak istenilen değerler elde edilememiştir. Üçüncü modelde, ikinci taşıt modeli üzerindeki keskin köşeler yok edilmiş ve elde edilen analiz sonuçlarına göre sürüklenme katsayısı 0,48 olarak hesaplanmıştır. Yapılan iyileştirmeler ile önceki modellerde elde edilen sürüklenme katsayısı değerlerinden

oldukça düşük bir değer elde edilmiştir. Dördüncü taşıt modeli, damla formuna yakın bir şekilde modellenmiştir ve sürüklenme katsayısı değeri 0,27 olarak hesaplanmıştır. Dördüncü taşıt modelinin arka bagaj kısmına eğim verilerek beşinci taşıt modeli elde edilmiş ve yapılan analizler sonucunda sürüklenme katsayısı değeri 0,25 olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçlara bakılarak anlaşılmaktadır ki taşıt tasarımında gerekli parametrelere dikkat edildiğinde sürüklenme katsayısı değeri önemli ölçüde düşürülebilmektedir. İlk olarak analiz edilen birinci taşıt modeli üzerinde çok sayıda keskin köşe bulunmaktadır ve analiz sonuçlarına bakıldığında oldukça yüksek bir sürüklenme katsayısı değeri hesaplanmıştır. Analiz sonuçlarına göre akışta bozulmaların olduğu bölgelerde iyileştirmeler yapılarak oluşturulan yeni modeller analiz edildiğinde sürüklenme katsayısı değerinde büyük oranda düşüş gözlemlenmektedir.

Taşıtlar üzerindeki sürüklenme katsayısı değerlerinin düşürülmesi, taşıt performansını artırır ve taşıtların yakıt tüketimini önemli ölçüde düşürür. Bu durum da yakıt tasarrufuna büyük katkı sağlar. Ayrıca çevreye salınan zararlı egzoz gazı bileşenlerinin miktarı azaltılarak, çevreye daha az zarar verilmesi sağlanabilir. Bu nedenle taşıt tasarımında aerodinamik parametrelere dikkat edilmesi hem ekonomi hem de çevre açısından oldukça önemlidir.

## KAYNAKLAR

- Ahmed, S. R., Ramm, G. 1984.** Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. *SAE Technical Paper*, 93: 473-503.
- Aka, H. 2003.** Otomobillerin aerodinamik karakteristiğinin bir rüzgar tüneline İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Altınışık, A. 2013.** Binek araç modeli üzerindeki aerodinamik analizlerin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi. *Doktora Tezi*, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Altınışık, A., Umur, H. 2018.** Hava tüneli blokaj etkisinin otomobil aerodinamiğine etkileri. 9. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, 7-8 Mayıs 2018, Sheraton Hotel, Bursa.
- Aydın, O. 1994.** İki boyutlu bir otomobil modeli etrafındaki akışın sayısal olarak incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Bayraktar, İ. 2002.** External aerodynamics of heavy ground vehicles: computations and wind tunnel testing. *Ph.D Thesis*, Old Dominion University, Faculty of Aerospace Engineering, Norfolk.
- Barnard, B. H. 1996.** Road Vehicle Aerodynamic Design, Longman, London, 286pp.
- Brunn, A., Nitsche, W. 2006.** Active control of turbulent seperated flows over slanted surfaces. , *International Journal Of Heat And Fluid Flow*, 27: 748-755
- Çengel, Y. A., Cimbala, J. M. 2008.** Akışkanlar Mekaniği. McGraw Hill, İzmir, 938s.
- Demircioğlu, T. K. 2007.** Bir araç modelinin aerodinamik analizi ve sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Han, T. 1989,** Computational analysis of three-dimensional turbulent flow around a bluff body in ground proximity, *AIAA J.*, 27 (9): 1213-1219.
- Helgason, E., Hafsteinsson, H.E., 2009,** Automatic shape optimization of aerodynamic properties of cars. *Master Thesis*, Chalmers University of Technology, Department of Applied Mechanics, Göteborg.
- Henning, L., King, R. 2005.** Drag reduction by closed-loop of a seperated flow over a bluff body with a blunt trailing edge. Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, 15 December 2005, Seville, Spain.
- Houghton, E. L., Carpenter, P.W., Collicott, S. H., Valiente D.T. 2013.** Aerodynamics for Engineering Students. Butterworth-Heinemann, Oxford, 724pp.
- İpci, D., Yılmaz E., Aysal F.E., Solmaz H. 2015.** Bir kara taşıt modeli etrafındaki akış yapısının sayısal olarak incelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 12(2):51-64.
- Kavadar, G. 2006.** Design and prototyping of a mechatronic system as a drag reduction device for buses. *Master Thesis*, İzmir Institute of Technology, Faculty of Mechanical Engineering İzmir.
- Koike, M., Nagayoshi, T. And Hamamoto, N. 2004.** Research on aerodynamic drag reductionby vortex generators. *Mitsubishi Motors Technical Review*, 16: 11-16.
- Pujals, G., Depardon, S. And Cossu, C. 2010.** Drag reduction of a bluff body using coherent streamwise streaks. *Springer*, 49(5): 1085-1094.
- Ramnefors, M., Bensiyd, R., Holmberg, E., Perzan, S. 1996,** Accuracy of drag prediction on cars using CFD-effect of grid refinement and turbulence models. *SAE Technical Paper Series*, 960681: 865-879.

- Roumeas, M., Gillieron, P. And Kourta, A.** 2008. Seperated flows around the rear window of a simplified car geometry. *Journal of Fluid Engineering*, 130(2): 1-10.
- Sarı, F. M.** 2007. Hafif ticari tasıtlarda tasıt ön formuna etkiyen hava direncinin aerodinamik analizi ve yakıt sarfiyatına etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Solmaz, H.** 2010. Değişik araç modellerinin rüzgar direnç katsayılarının bir rüzgar tüneline belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Umur, H.** 2009. Akışkanlar Mekaniği. Dora Yayınları, Bursa, 553s.
- White, M. F.** 2004. Akışkanlar Mekaniği. McGraw Hill, İstanbul, 910s.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Tuğçe Gizem YARIN  
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa 1994  
Yabancı Dil : İngilizce

### Eğitim Durumu

Lise : Mudanya Sami Evkuran Anadolu Lisesi  
Lisans : Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği  
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği

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



BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
TEZ ÇOĞALTMA VE ELEKTRONİK YAYIMLAMA İZİN FORMU

Yazar Adı Soyadı	Tuğçe Gizem YARİN
Tez Adı	Farklı Taşıt Modellerinin Aerodinamik Yapısının Nümerik Olarak İncelenmesi
Enstitü	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	Makine Mühendisliği
Tez Türü	Araştırma
Tez Danışman(lar)ı	Prof. Dr. Habib UMUR
Çoğaltma (Fotokopi Çekim) izni	<input type="checkbox"/> Tezimden fotokopi çekilmesine izin veriyorum <input type="checkbox"/> Tezimin sadece içindekiler, özet, kaynakça ve içeriğinin % 10 bölümünün fotokopi çekilmesine izin veriyorum <input checked="" type="checkbox"/> Tezimden fotokopi çekilmesine izin vermiyorum
Yayımlama izni	<input type="checkbox"/> Tezimin elektronik ortamda yayımlanmasına izin veriyorum

Hazırlamış olduğum tezimin belirttiğim hususlar dikkate alınarak, fikri mülkiyet haklarım saklı kalmak üzere Bursa Uludağ Üniversitesi Kütüphane ve Dokümantasyon Daire Başkanlığı tarafından hizmete sunulmasına izin verdiğimi beyan ederim.

Tarih : 12.09.2019

İmza :

