

**T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**TAŞITLARDA KULLANILAN BOYA, MACUN VE KAPLAMA
MALZEMELERİNİN AERODİNAMİK DİRENÇ KATSAYISINA
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Anıl OKAN

Enstitü Anabilim Dalı : OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Kemal ERMİŞ

Kasım 2020

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TAŞITLARDA KULLANILAN BOYA, MACUN VE KAPLAMA
MALZEMELERİNİN AERODİNAMİK DİRENÇ KATSAYISINA
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Amr OKAN

Enstitü Anabilim Dalı : OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ

**Bu tez 12/11/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.**

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Doç. Dr. Kemal ERMİŞ	BAŞARILI
Üye: Doç. Dr. Mehmet ÇALIŞKAN	BAŞARILI
Üye: Doç. Dr. Ethem TOKLU	BAŞARILI

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Anıl Okan

12/11/2020

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doc. Dr. Kemal ERMİŞ'e teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitim hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen annem Öğr. Fatma OKAN'a, babam Öğr. Nihat OKAN'a ve yüksek lisans eğitimim boyunca her zaman yanımda olan eşim Sıdika OKAN'a, tez hazırlanması sürecinde benden yardımlarını esirgemeyen Yüksek Otomotiv Mühendisi Yasin Kütük'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

BEYAN.....	i
TEŞEKKÜR	ii
İÇİNDEKİLER	iii
KISALTMALAR	iv
SİMGELER	v
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	ix
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
1.1. Giriş	1
1.2. Otomotiv Sektöründe Gerçekleştirilen Aerodinamik Çalışmaların Tarihçesi	2
1.3. Literatür taraması.....	5
1.4. Çalışmanın Amacı ve Beklentiler.....	7
BÖLÜM 2. TAŞIT AERODİNAMİĞİ.....	9
2.1. Hareket Halindeki Bir Taşıta Etki Eden Direnç Kuvvetleri	9
2.1.1. Aerodinamik Direnç Kuvveti	9
2.2. Akışkanlarda Sürtünme Faktörü	13
2.2.1. Sürtünme Katsayısı.....	14
2.2.2. Yüzey Pürüzlülüğü Kavramı	16
BÖLÜM 3. MATERYAL METOD	20
3.1. Yüzey Pürüzlülüğü	21
3.2. Hız Değerleri	24
3.2.2. K – epsilon Türbülans Modeli	26
3.2.3. K – omega Türbülans Modeli.....	26
3.3. Ağ Yapısı	26
3.4. Çözüm Adımları	28
BÖLÜM 4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	30
4.1. Aerodinamik Direnç Kuvveti (F_{cd}).....	30
4.2. Aerodinamik Direnç Katsayısı (C_d)	33
4.3. Hız Değerleri	37
4.4. Basınç Değerleri	39
4.5. Yüzey Pürüzlülüğünün Yakıt Tüketimine Etkisi.....	41
BÖLÜM 5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	44
KAYNAKÇA	47
ÖZGEÇMİŞ.....	51

KISALTMALAR

HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
SAE	: Society of Automotive Engineering
SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu



SİMGELER

C_d	: Aerodinamik direnç katsayısı
F_{cd}	: Aerodinamik direnç kuvveti (N)
F_l	: Yanal kuvvet (N)
R_a	: Ortalama pürüzlülük değeri (m)
F_r	: Yuvarlanma direnci (N)
F_{st}	: Yokuş direnci (N)
F_i	: İvme direnci (N)
ρ	: Hava yoğunluğu (Kg/m^3)
A	: Ön izdüşümü alanı (m^2)
V	: Aracın bağıl hızı (m/s)
C_l	: Taşıt kaldırma kuvveti katsayısı
C_f	: Ortalama pürüzlülük değeri (m)
C_s	: Yanal kuvvet katsayısı
Re	: Reynolds sayısı
V	: Akış hızı (m/s)
L	: Akışkanın etkilediği yüzeyin uzunluğu (m)
ν	: Akışkanın kinematik viskozitesi (m^2/s)
ϵ	: Bağıl pürüzlülük
P ve Q	: Örnek Alanlar (m^2)
L	: Yüzey uzunluğu (m)
V_q	: Düşey büyültme
k	: Türbülans kinetik enerjisi (J)

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2. 1 : Sıcak daldırılmış galvanizli çelik kaplama pürüzlülük değerleri	19
Tablo 3. 1 : Ölçümler için kullanılmış olan pürüzlülük değerleri (Vazirian; Neville; Penna, 2015).....	22
Tablo 3. 2 : İncelenecek hızlar ve model geometrisi gözönünde bulundurularak hesaplanmış Reynolds Sayıları	24
Tablo 3. 3 : Ağ verileri.....	27
Tablo 4. 1 : Üç farklı boya pürüzlülük değerinde paket program tarafından hesaplatılmış olan aerodinamik direnç katsayısı değerlerinin araç ölçeğine göre gerçek boyuta dönüştürülmüş değerleri	32
Tablo 4. 2 : Pürüzsüz kaporta ve floropolimer kaplama pürüzlülük değerlerinde paket program tarafından hesaplatılmış olan aerodinamik direnç katsayısı değerlerinin araç ölçeğine göre gerçek boyuta dönüştürülmüş değerleri.....	32
Tablo 4. 3 : Aerodinamik direnç katsayısı değeri	34
Tablo 4. 4 : Aerodinamik direnç katsayısı değerleri.....	34

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 1 : Rumpler'in damla modeli (Öngüner, E., 2009)	3
Şekil 1. 2 : Jaray tarafından tasarlanmış araç modeli (Öngüner, E., 2009).....	3
Şekil 1. 3 : Sclör tarafından tasarlanmış olan araç (Öngüner, E., 2009).....	5
Şekil 2. 1 : Hareket halindeki taşıta etki eden kuvvetler (Arslan, 2005)	9
Şekil 2. 2 : Taşıt üzerindeki basınç dağılımı (Arslan, 2005).....	10
Şekil 2. 3 : Taşıt üzerine etki eden aerodinamik kuvvetlerin gösterimi (Arslan, 2005)	10
Şekil 2. 4 : Aerodinamik basınç noktası (C_g – Ağırlık Merkezi, C_p – Basınç Merkezi) (Arslan, 2005).....	11
Şekil 2. 5 : Benzin motorlu bir taşıtta harcanan yakıttan elde edilen enerjinin dağılımı	12
Şekil 2. 6 : Aerodinamik direnç kuvveti bileşenleri (Çengel; Cimbala, 2015).....	13
Şekil 2. 7 : Düz levhalar için yüzey pürüzlülüğünün sürtünme katsayısına etkisini gösteren grafik (Çengel; Cimbala, 2015).....	16
Şekil 2. 8 : Ortalama yüzey pürüzlülük ölçümü R_a değerinin şematik gösterimi.....	17
Şekil 2. 9 : EBT (elektron ışınıyla pürüzlendirme) (Kolnerova, M., Sobotka, J., Solfronk, P., Doubek, P., 2007)	18
Şekil 2. 10 : EDT (elektriksel deşarjla pürüzlendirme) (Kolnerova, M., Sobotka, J., Solfronk, P., Doubek, P., 2007)	18
Şekil 2. 11 : PRETEX (Kolnerova, M., Sobotka, J., Solfronk, P., Doubek, P., 2007)	19
Şekil 3. 1 : Analizlerde kullanılacak araca ait genel görünüm.....	21
Şekil 3. 2 : Analizlerde kullanılacak araca ait kaporta görünümü	23
Şekil 3. 3 : Analizlerde kullanılacak araca ait ön ve arka cam görünümü	23
Şekil 3. 4 : İncelenecek model aracın akış uzunluğu	25
Şekil 3. 5 : Ağ yapısı genel görünüm.....	27
Şekil 3. 6 : Ağ yapısı araç tasarımı görünümü	27
Şekil 4. 1 : Aerodinamik direnç kuvvetlerinin hızlara göre değişimi	31
Şekil 4. 2 : 100 km/saat hızda aerodinamik direnç kuvvetlerinin değişimi	31
Şekil 4. 3 : Aerodinamik direnç katsayısı değerleri	34
Şekil 4. 4 : Aerodinamik direnç katsayısı yakınsama görünümü.....	35
Şekil 4. 5 : 100 km/saat hızda Boya-1 pürüzlülük değerinde araç etrafında oluşmuş hız akış çizgileri	36
Şekil 4. 6 : 100 km/saat hızda Boya-1 pürüzlülük değerinde araç arkasında oluşmuş olan girdaplar	36

Şekil 4. 7 : 100 km/saat hızda Boya-1 pürüzlülük değerinde araç araç arkasında oluşmuş olan hız akış çizgileri	37
Şekil 4. 8 : 40 km/saat hızda düşük seviyede boya pürüzlülüğüne sahip kaportaya sahip araç etrafında oluşmuş hız görüntüleri	38
Şekil 4. 9 : 150 km/saat hızda düşük seviyede boya pürüzlülüğüne sahip kaportaya sahip araç etrafında oluşmuş hız görüntüleri	38
Şekil 4. 10 : 40 km/saat hızda floropolimer kaportaya sahip bir aracın etrafında yer alan hız değerleri	39
Şekil 4. 11 : 150 km/saat hızda floropolimer kaportaya sahip bir aracın etrafında yer alan hız değerleri	39
Şekil 4. 12 : 40 km/saat hızda düşük pürüzlülükte boya ile kaplanmış kaportaya sahip bir aracın kaportasına etkileyen basınç değerleri ve hız akış çizgileri.....	40
Şekil 4. 13 : 40 km/saat hızda düşük pürüzlülükte boya ile kaplanmış kaportaya sahip bir aracın kaportasına etkileyen basınç değerleri ve hız akış çizgileri – ön görünüm ..	40
Şekil 4. 14 : 150 km/saat hızda düşük pürüzlülükte boya ile kaplanmış kaportaya sahip bir aracın kaportasına etkileyen basınç değerleri ve hız akış çizgileri – ön görünüm (Boya – 1)	41
Şekil 4. 15 : 150 km/saat hızda düşük pürüzlülükte boya ile kaplanmış kaportaya sahip bir aracın kaportasına etkileyen basınç değerleri ve hız akış çizgileri (Boya – 1)	41

TAŞITLARDA KULLANILAN BOYA, MACUN VE KAPLAMA MALZEMELERİNİN AERODİNAMİK DİRENÇ KATSAYISINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Taşıt hareketlerine etkiyen dirençler söz konusu olduğunda en ön plandaki konulardan bir tanesi olan aerodinamik direnç katsayısı (C_d), geçmişten günümüze birçok araştırmanın gündemi olmuştur. Aerodinamik direnç katsayısının düşürülme çalışmaları, günümüzde, otomotiv sektöründe gerçekleştirilmekte olan çalışmalar arasında önemli yer tutmaktadır.

Bu çalışmada, taşıtlar üzerinde kullanılmakta olan kaplama malzemelerinin (boya, macun, özel uygulamaları vb.) yarattığı yüzey sürtünmesi farklılıklarının aerodinamik direnç katsayısı üzerindeki etkileri, sonlu elemanlar metodu kullanılarak araştırılmıştır. Buna göre, paket program vasıtasıyla tasarımı yapılmış olan bir adet 1/20 ölçekli araca, kaporta aksamı ve ön-arka cam aksamı ayrı olarak tanımlanarak ve daha önceden belirlenmiş sanayiye uygun pürüzlülük değerleri verilerek 40 km/saat ve 150 km/saat hız değerleri arasında karşılaştığı aerodinamik direnç kuvvetleri (F_{cd}) ve aerodinamik direnç katsayıları hesaplanmış, sonuçlar, grafikler ve görseller vasıtasıyla ortaya koyulmuştur. Üç farklı boya pürüzlülük değeri (düşük ($R_a = 0,000000351$ m) – orta ($R_a = 0,000001032$ m) – yüksek ($R_a = 0,00000148$ m)) ve bir adet taşıtlarda yaygın olarak kullanılan floropolimer (teflon) ($R_a = 0,00000524$ m) kaplama kullanılarak yapılmış olan ölçümlerde artan pürüzlülük göre aerodinamik direnç katsayısı değişimlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Buna göre düşük boya pürüzlülük değeri baz alındığında orta derece pürüzlülük değerine göre aerodinamik direnç katsayısında, %0,000612529'lık bir artış, yüksek derece pürüzlülük değerine göre aerodinamik direnç katsayısında, %0,00104783'lik bir artış ve floropolimer pürüzlülük değerine göre aerodinamik direnç katsayısında %0,091195826'lık bir artış meydana gelmiştir.

Bununla birlikte çalışmada taşıtın hareketi boyunca karşılaştığı basınç kuvvetlerinin taşıt kaportası ve camı üzerindeki dağılımı da gözlemlenmiştir. Buna göre ön tampon, ön cam ve yan aynalar üzerinde maksimuma yaklaşan basınç kuvvetleri, arka cam bölgesinde akış ayrılması nedeniyle azalmaktadır. Ön tampon ve araç camı üzerinde yapılacak açısal iyileştirmeler benzeri işlemler vasıtasıyla aerodinamik direnç kuvvetinin düşürülebileceği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: aerodinamik, sonlu elemanlar metodu, sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülüğü, hesaplamalı akışkanlar dinamiği

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF PAINT, PASTE AND COATING MATERIALS USED ON VEHICLES ON AERODYNAMIC DRAG COEFFICIENT

SUMMARY

Aerodynamic drag coefficient (C_d), which is one of the foreground subjects that have resistance to vehicle movements, has been the agenda of many researches from past to present. The efforts to reduce the aerodynamic resistance coefficient have an important place among the studies carried out in the automotive industry today.

In this study, the effects of surface roughness differences created by coating materials (paint, paste, special applications, etc.) used on vehicles on the aerodynamic drag coefficient were investigated using the finite element method. Accordingly, the aerodynamic drag forces (F_{cd}) and aerodynamic drag coefficients encountered between 40 km/hours – 150 km/hours speeds by identifying the body parts and front-rear window parts separately to a 1/20 scale vehicle designed by means of a package program and by giving the roughness values suitable to the predetermined industry calculated, the results are presented through graphs and visuals.

Three different paint roughness values (low ($R_a = 0.000000351$ m) - medium ($R_a = 0.000001032$ m) - high ($R_a = 0.00000148$ m)) and one commonly used fluoropolymer (Teflon) ($R_a = 0.00000524$ m) coating, it has been observed that the changes in the aerodynamic resistance coefficient increase with respect to increasing roughness levels.

Accordingly, based on low paint roughness value, an increase in aerodynamic resistance coefficient according to medium roughness value, an increase of 0.000612529%, an increase in aerodynamic resistance coefficient according to high degree roughness value, an increase of 0.00104783% and aerodynamic resistance compared to fluoropolymer roughness value There was an increase in the coefficient of 0.091195826%.

In addition, the distribution of pressure forces on the vehicle hood and windscreen was also observed in the study. Accordingly, the pressure forces approaching the maximum on the front bumper, windscreen and side mirrors; In the rear windscreen area, flow is reduced due to separation. It has been observed that the aerodynamic resistance force can be reduced by processes such as angular improvements to be made on the front bumper and vehicle windscreens.

Keywords: aerodynamics, finite element method, friction coefficient, surface roughness, computational fluid dynamics

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Giriş

Hareketli katı cisimlerin hava ile ilişkisini araştıran bilim, aerodinamik olarak adlandırılmaktadır. Aerodinamik, aslen gaz dinamiğinin bir parçası olmasına ve benzerlikler barındırmasına rağmen, farklı olarak sadece hava ile sınırlandırılmıştır. Öncelikle havacılık olmak üzere otomotiv sektörü için oldukça önemli bir disiplindir.

Taşıtlarda ortaya çıkartılan güç, taşıt hareketi esnasında temelde beş dirence karşı koymaktadır. Bu dirençler; yuvarlanma direnci, yokuş direnci, ivme direnci, güç aktarma organları direnci ve aerodinamik dirençlerdir. Tükenebilir enerji kaynaklarının giderek azalması ile birlikte aerodinamik disiplini ve bu disiplinin otomotiv sektöründeki uygulamaları önem kazanmaktadır.

Otomotiv şirketleri, otomotivlerin temel işlevleri olan bir noktadan diğerine ulaşımın yanında; araç kapasitesi, araç hızı, düşük yakıt tüketimi, sürüş konforu, yol tutuşu vb. özellikleri kullanıcılara sunmak için gerekli çalışmaları sürdürmektedirler. Bu çalışmaları gerçekleştirirken aerodinamik direncin taşıt üzerindeki negatif etkilerini azaltmak, önemli yer tutmaktadır. Otomotivin ilk icat edildiği dönemdeki taşıtlar ile günümüz taşıtları karşılaştırıldığında, bu yöndeki çalışmaların sonuçları ve önümüzdeki dönemdeki beklenti potansiyelinin giderek arttığı gözlemlenmektedir.

Hızı 100 km/s olan bir binek araç, gücünün % 60'ını hava ile sürtünmeden kaynaklanan aerodinamik direnç kuvvetini (aerodinamik direnç), % 20'sini tekerlek sürtünme kuvvetini (yuvarlanma direnci), % 20'sini hareketi engelleyen diğer kuvvetleri yenmek için harcar. Aracın aerodinamik özelliklerinin iyileştirilmesi ile yakıt tüketimi de azaltılmaktadır (Çakmak, 2000). Taşıtlar üzerinde, kullanılan boya, macun vb. kaplama malzemeleri, belirli bir pürüzlülük değerine sahiptir. Bu pürüzlülük değeri, sürtünme durumunu artırarak hareket halindeki taşıtlara etkiyen aerodinamik direnç kuvveti

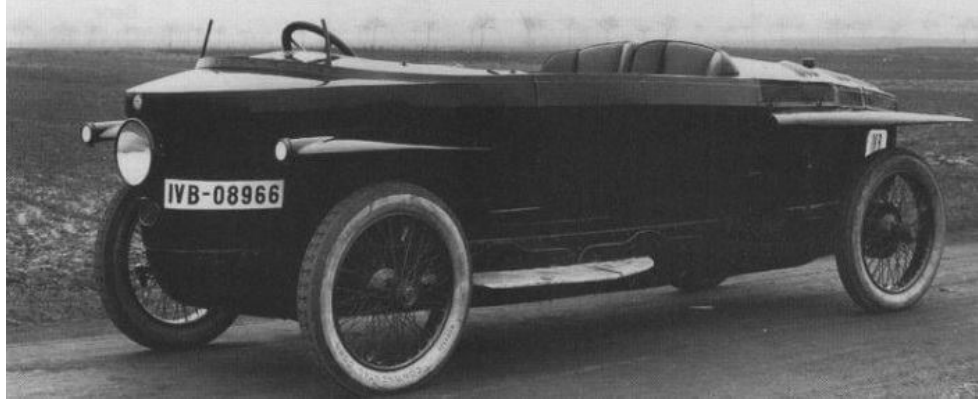
üzerinde bir takım negatif etkiler oluşturmaktadır. Bu çalışmada bu etkilerin boyutları üzerinde durulacaktır.

1.2. Otomotiv Sektöründe Gerçekleştirilen Aerodinamik Çalışmaların Tarihçesi

Taşıtlar üzerindeki aerodinamik çalışmalar, oldukça eskiye dayanmaktadır. İlk etapta aerodinamik prensibi genellikle hava taşıtları için ön plana çıksa da, ileriki yıllarda otomotiv teknolojisi için de aynı derecede önem kazanmıştır. Bu hususta araçlar üzerindeki aerodinamik etkileri azaltacak geometride araçlar üretilmiştir. 1920’li yıllarda başlayan bu çalışmalar, günümüzde de aynı şekilde devam etmektedir.

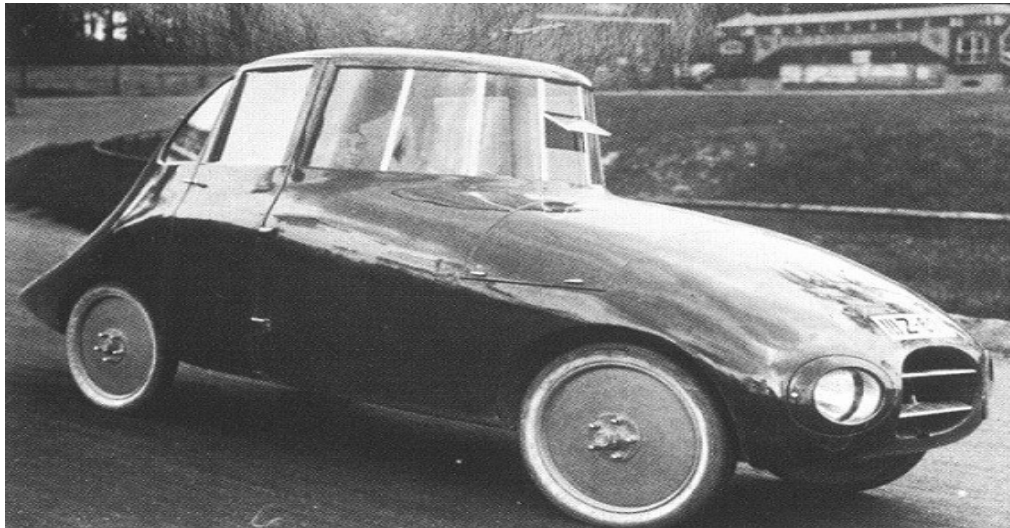
Birinci Dünya Savaşı’nın bitimiyle birlikte, kullanıcılar arasında otomobillerin daha yüksek hızlarda seyredebilmesi üzerine bir talep oluşmuştur. Bu talebi karşılamak üzere daha güçlü motorlar kullanılmış fakat bu güçlü motorlar, araç tasarımını olumsuz etkilemiştir. Bunun önüne geçmek için kullanılan alternatif yöntemlerden bir tanesi olarak tasarımcılar, araçlar üzerine etki eden aerodinamik kuvvetleri azaltarak hızı artırma yoluna gitmenin faydalı olacağı fikrini bulmuşlardır. Aerodinamik etkileri en aza indirmek üzere aerodinamik direnç katsayısının en küçük olduğu ‘su damlası modeli’, kullanıcılar tarafından oldukça rağbet görmüş ve binek araçlar bu modele benzetilmeye çalışılmıştır (Özgüner, 2009).

Rumpler (1921) damla modelini benimseyerek arkadan motorlu ve eğik çizgilere sahip bir araç tasarlamıştır. Rumpler’in tasarlamış olduğu bu araçtaki en büyük problem olarak tekerleklerin dışarıda bulunması ile birlikte gerekli aerodinamik etkinin sağlanamaması olduğu söylenebilir. Tekerleklerin çıkartılması ile birlikte gerçekleştirilen deneylerde direnç katsayısının 50% azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 1. 1 : Rumpler'in damla modeli (Öngüner, E., 2009)

Jaray (1921) Birinci Dünya Savaşı'nda zeplin geliştirilmesi alanında çalıştığı için aerodinamik konuda tecrübeli olup su damlası modeline benzer araçlar tasarlamıştır. Şekil 1.2'de görüleceği üzere araçların arka taraflarında oluşan türbülans akımlarını engellemek için aracın arka tarafını sivri bir şekilde tasarlamıştır. Böylece aracın arka tarafında oluşacak olan türbülans akımlarını azaltarak aerodinamik etkileri en aza indirmeyi planlamıştır. Persu (1922) de Jaray gibi damla formuna benzer arkaya doğru incelen formda araç tasarlamış fakat arka aksın kısalması problemi nedeniyle çalışmaları sekteye uğramıştır. İlgili çalışmalar için gerekli ekonomik şartları da sağlayamayan Persu'nun tasarımları aerodinamik ve dış görünüm açısından yetersiz olarak kabul edilmiştir.



Şekil 1. 2 : Jaray tarafından tasarlanmış araç modeli (Öngüner, E., 2009)

Lay (1933) öncelikle taşıtlar üzerindeki akım dağılımlarını inceleyerek çalışmalarına başlamış, akabinde dikdörtgen prizma modeller ile çalışmıştır. Çalışmalarını ilerlettiğinde; araçların ön yani rüzgârı karşılayan yüzeylerinde yapılacak olan bombeli parçaların aerodinamik direnç katsayısının azaltılmasında önemli rol oynadığını keşfetmiştir.

Kamm (1935) araç tasarımı ile birlikte araç üretimi ile de ilgilendiği için kullanıcılardan gelen geri bildirimler doğrultusunda trafikteki manevra ve park problemi vb. durumlarını da göz önünde bulundurarak araç tasarımında aerodinamik etkileri kullanıcı geri bildirimleriyle birleştirmiştir.

Reid (1935) taşıtların tekerleklerinin konumlarının taşıta göre pozisyonlarının aerodinamik direnç katsayısı üzerinde önemli etkileri olduğunu keşfetmiştir. Açık versiyonlarda %60 olarak ifade edilen hava dirençleri, gizlenmiş tekerlek versiyonlarında %33 değerlerine kadar inmiştir.

Alman menşeli bir otomotiv şirketi olan FNKS (1936) kurumu; araçların uzunluklarının artışıyla birlikte aerodinamik direnç katsayısının azaldığı yönünde ortaya atmış oldukları hipotezi desteklemek üzere çalışmalarda bulunmuşlardır.

Sclör (1938) araçların iç taraflarının oldukça büyük olması ve dış yüzeylerinin de tek hacimli bir platform olarak tasarlanması üzerine çalışmalarda bulunmuştur. Bu hususta Şekil 1.3'te görülen aracı tasarlayan Sclör, zemin mesafe üzerinde çalışmalarda da bulunmuştur. Zemin mesafesi ile aerodinamik direnç arasında doğru orantı olduğunu tespit etmiştir.



Şekil 1. 3 : Selör tarafından tasarlanmış olan araç (Öngüner, E., 2009)

1.3. Literatür taraması

Aerodinamik direnç katsayısının belirlenmesi hususunda geçmişten günümüze bir takım yöntemler kullanılmıştır. En bilinen metot olarak taşıtların rüzgâr tünelleri vasıtasıyla aerodinamik direnç katsayılarının belirlenmesi sayılabilir. Bununla birlikte son dönemlerde teknolojinin gelişimi ile birlikte HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yöntemleri, paket programlar vasıtasıyla bu katsayının belirlenmesi için kullanılmaya başlanmıştır. Böylece hem maliyet hem de zaman anlamında kazanımlar mevcuttur.

Bu alanda birçok çalışmalar mevcut olmasına rağmen, yüzey pürüzlülüğü ve bu pürüzlülüğün aerodinamik direnç katsayısına etkileri üzerine yeterince çalışma mevcut değildir.

White (1969) taşıtların aerodinamik direnç katsayısını sayısal olarak ortaya koymuştur. Deneysel olarak 20 araç üzerinde gerçekleştirmiş olduğu çalışmalar vasıtasıyla %7 oranında toleranslar içermektedir.

Taşıtların aerodinamik direnç katsayısının azaltılması üzerine çalışmalar yapan Schenkel (1977), taşıtın önüne ve arkasına yerleştirilen ek elemanların aerodinamik direnç katsayısı üzerindeki etkilerini incelemiştir. 3/8 ölçekli bir taşıt modeli üzerine spoiler monte eden Schenkel (1977), rüzgâr tüneli metodu ile direnç ve kaldırma kuvvetleri üzerindeki etkilerini hesaplamıştır.

Roussillon (1981) aerodinamik direnç katsayısının düşük hızlarda, türbülans rüzgâr ile hesaplanması üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Gilhaus (1981) 1/5 ölçekte bir kamyon modeli kullanarak eklenen rüzgâr reflektörünün aerodinamik direnç katsayısını %14 azalttığını hesaplamıştır.

Hucho ve arkadaşları (1993) aerodinamik direnç katsayısı belirleme üzerine Reynolds sayısını baz alan Navier – Stokes metotlarının daha etkili olacağı üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

Hiroiyuki Ozawa ve arkadaşları (1998) 96 Honda, güneş enerjisi ile çalışan taşıtın aerodinamik karakteristikleri üzerinde çalışmışlardır. Taşıt yüzeyindeki basınç durumlarını baz alarak nümerik akışkanlar dinamiği metodu MAC (Markerand – Cell)’ kullanmışlardır. Sonuç olarak dağınık bir basınç göstergesi ile karşılaşmışlar, bu nedenle taşıtların aerodinamik analizlerinde tek yönlü yerine çok yönlü hava akımlarının uygulanmasının faydalı olacağını ortaya koymuşlardır.

Krajnović ve Davidson, hareketli zeminin taşıt çevresindeki hava akışına etkilerini araştırmışlardır.

Asım ve arkadaşları (2019), kamyon dorselerinin yüzey pürüzlülüğünün aerodinamik direnç katsayısına etkisi üzerine sonlu elemanlar metodunu kullanarak bir çalışma gerçekleştirmiştir. Özellikler yüksek hızlarda aerodinamik direnç katsayısının arttığını tespit etmişlerdir.

Mallick (2014), silindirik ebatlardaki cisimlerdeki yüzey pürüzlülüklerinin aerodinamik direnç katsayısına etkileri üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Günümüzde; bir aracın aerodinamik direnç katsayısını belirlemek için iki yaklaşım seçilmektedir: rüzgâr tüneli testi ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi. Rüzgâr tüneli testleri güvenli sonuç vermesine rağmen zaman alıcı ve pahalıdır.

Sedan ve kare formu arasında yapılan incelemede Bijlani ve ark. (2013) Sedan otomobillerin daha az aerodinamik direnç katsayısına sahip olduklarını ortaya koymuşlardır.

Beccaria ve arkadaşları (1999), HIPERROAD adlandırdıkları, çok işlemcili bilgisayarlarda kullanılan programı geliştirmişlerdir. Aerodinamik kontrol için kullanılan

bu program ile Ferrari F5050 aracı test ettiklerinde, ölçümlerin uygun olduğunu görmüşlerdir.

Kieffer ve arkadaşları (2006), Mazda marka bir spor araçta $k - \epsilon$ modelini kullanarak HAD analizi vasıtasıyla analizler gerçekleştirmişlerdir. Buna göre ön kanat tasarımının yer etkisi üzerinde önemli sonuçları olduğunu ortaya koymuşlardır.

Aka (2003) 1/16 ölçekli bir binek taşıt tasarımı üzerinde deneyler gerçekleştirmiş, kuvvet ölçüm sistemi hazırlamıştır. Bununla birlikte boyutsuz katsayıları hesaplamış ve sonuçları ortaya koymuştur. Taşıt üzerindeki basınç dağılımını hesaplamış ve aerodinamik direnç katsayısı değerinin 0,31 olduğunu tespit etmiştir. Bu değer, gerçek değer ile %5 fark oluşturmaktadır.

McCallen ve arkadaşları (2000), çekici ve römorktan meydana gelen bir taşıtın aerodinamik direnç katsayısını 0,6 olarak hesaplamışlardır. Bu taşıtların 112 km/saat hızda motordan alınan tahrikin %65'ini bu kuvveti yenmek için kullanıldığını belirtmişlerdir.

Xiao ve Yong-qi (2011), römork yapısı üzerinde değişiklikler gerçekleştirerek aerodinamik direnç katsayısını incelemişlerdir.

Rohatgi (2012), bir arazi taşıtının arka kaportasının formunu değiştirerek aerodinamik direnç katsayısı üzerinde iyileştirmeler gerçekleştirmiştir. Çalışma neticesinde % 26 oranında bir avantaj oluşacağını belirtmiştir.

Solmaz (2010), bir otobüs modelini paket programı kullanarak HAD metodu ile analiz etmiş ve deney sonuçlarına göre 0,65, Ansys sonuçlarına göre 0,66 aerodinamik direnç katsayısı değeri ile karşılaşmıştır.

1.4. Çalışmanın Amacı ve Beklentiler

Bu çalışmada, taşıtlarda kullanılan boya, macun, ve kaplama malzemelerinin yüzey pürüzlülüklerinin aerodinamik direnç katsayısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İlgili araştırmanın tamamlanması için sonlu elemanlar metodunu temel alan HAD yazılım programı kullanılmıştır.

Çalışma neticesinde, yüzey pürüzlülüğünün aerodinamik direnç katsayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. İncelemede, özellikle yüksek taşıt hızları ile birlikte aerodinamik direnç katsayısının artması ön görülmüştür.

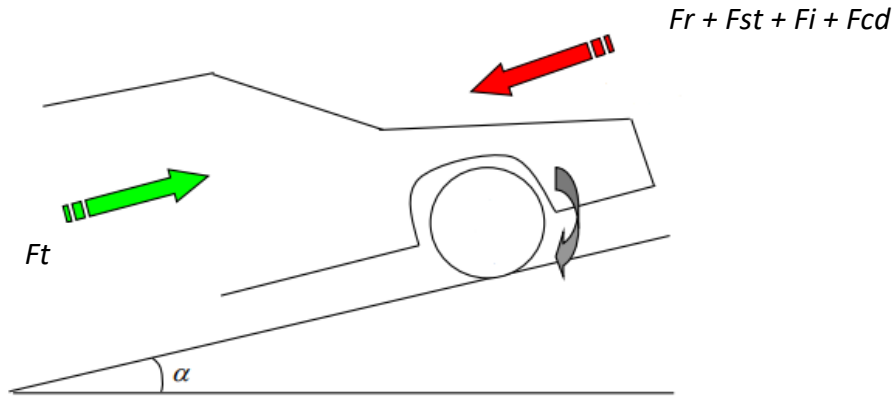


BÖLÜM 2. TAŞIT AERODİNAMİĞİ

2.1. Hareket Halindeki Bir Taşıta Etki Eden Direnç Kuvvetleri

Doğrusal hareket esnasında araçlar; bazı direnç kuvvetlerinden etkilenirler. Bu kuvvetler, aracın motorundan tekerleklerine aktarılmış olan hareket kabiliyetini sınırlandırıcı yönde etki yapmaktadırlar. İlgili kuvvetlerin araç üzerinde gerçekleştirmiş olduğu etkiler Şekil 2.1’de gösterildiği üzere yuvarlanma direnci (F_r), yokuş direnci (F_{st}), ivme direnci (F_i) ve aerodinamik direnç (F_{cd}) olarak adlandırılabilir. Bununla birlikte taşıtın zeminle yaptığı açı (α), kuvvetlerin etkisi açısından önem arz etmektedir (Arslan, 2005).

$$F_t = F_r + F_{st} + F_i + F_{cd} \quad (2.1)$$

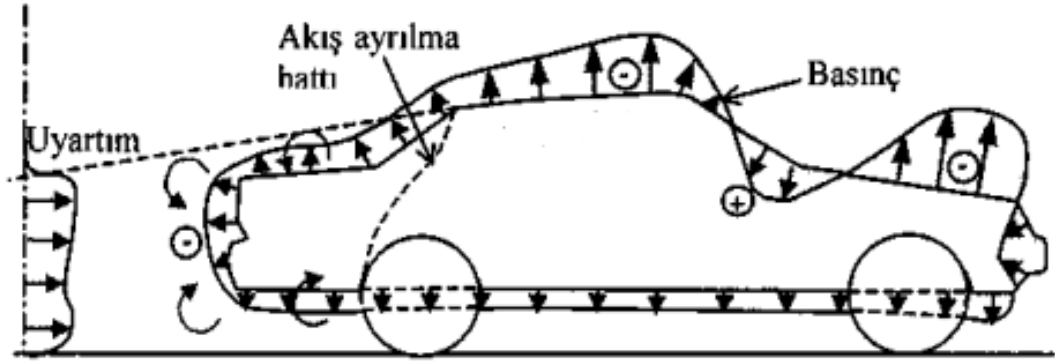


Şekil 2. 1 : Hareket halindeki taşıta etki eden kuvvetler (Arslan, 2005)

2.1.1. Aerodinamik Direnç Kuvveti

Sabit hızlı bir havanın bir taşıt gövdesi etrafında hareket etmesi durumunda, iki vektörlü bir aerodinamik direnç kuvveti meydana gelmektedir. Bu vektörler, yüzeyin sürtünme etkisine bağlı yüzey sürtünme direnci ve taşıt gövdesine etki eden basınç dağılımının

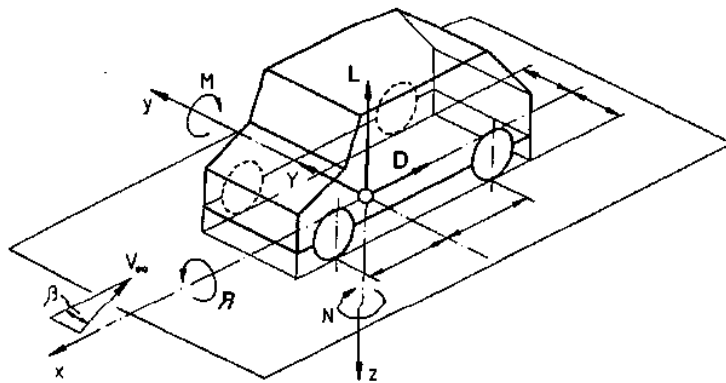
sonucu olarak basınç direncidir. Şekil 2.2’de taşıt üzerine etki eden basınç dağılımı görülmektedir (Arslan, 2005).



Şekil 2. 2 : Taşıt üzerindeki basınç dağılımı (Arslan, 2005)

Toplam aerodinamik direnç kuvveti üç adet temel bileşke kuvvetten oluşmaktadır. Bu kuvvetler, aracın ileriye doğru hareketini kısıtlayan rüzgâr kuvveti, aerodinamik kaldırma kuvveti ve yanal kuvvetlerdir. Aerodinamik kaldırma kuvveti, aracın tekerleği ile yüzey arasındaki tutunma kuvvetini azaltarak, taşıtın kontrol ve hareket kabiliyetini, aerodinamik yanal kuvvet ise aracın hareket halindeyken kararlılığını kısıtlamaktadır.

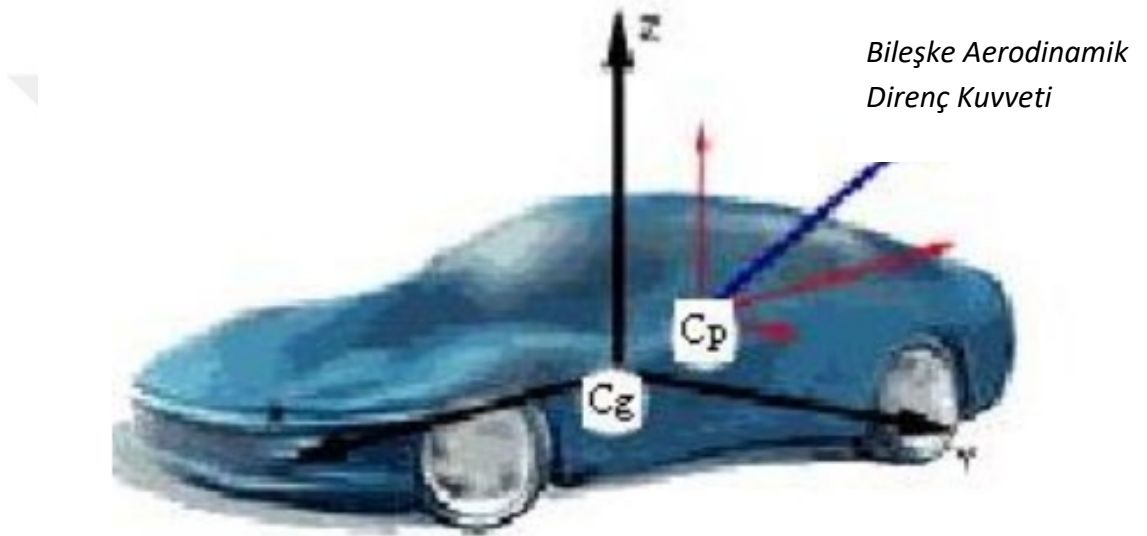
Şekil 2.3’te taşıta etki eden aerodinamik kuvvetler gösterilmiştir.



Şekil 2. 3 : Taşıt üzerine etki eden aerodinamik kuvvetlerin gösterimi (Arslan, 2005)

Araç yüzeyine etki eden basınç kuvveti, etki etmekte olan tüm basınç bileşen vektörlerinin bir noktaya etki ettiği kabul edilerek ve bu vektörler toplanarak

belirlenmektedir. Bu kabul, bileşen basınç kuvvetinin hesaplanması için kolaylık sağlamaktadır (Arslan, 2005). Şekil 2.4'te bileşke aerodinamik direnç kuvvetinin etki ettiğini aerodinamik basınç noktası görülmektedir. Taşıtlar üzerindeki aerodinamik kuvvetlerin ölçümü için en fazla kullanılan uygulamalar, rüzgâr tüneli uygulamalarıdır. Uygun simülasyon koşulları için, sınır tabaka kontrolü olmayan durgun zemin, teğetsel rüzgâr gönderilen, sınır tabaka emilimine sahip hareketli kayış ile sınır tabakanın emiliminin kombine kullanıldığı tüneller en fazla tercih edilen tünellerdir (Çağan M., 2000).



Şekil 2. 4 : Aerodinamik basınç noktası (Cg – Ağırlık Merkezi, Cp – Basınç Merkezi) (Arslan, 2005)

Merkezi aerodinamik basınç noktası aşağıdaki eşitlikler ile ifade edilmektedir.

$$F_{cd} = \frac{1}{2} \rho A C_d V^2 \quad (2.2)$$

$$F_l = \frac{1}{2} \rho A C_l V^2 \quad (2.3)$$

$$F_s = \frac{1}{2} \rho A C_s V^2 \quad (2.4)$$

ρ :Hava Yoğunluğu (kg/m³)

A: Ön İzdüşümü Alanı (m²)

V: Aracın Bağlı Hızı (m/s)

Cd: Aerodinamik Direnç Katsayısı

Cl: Taşıtlı Kaldırma Kuvveti Katsayısı

Cs: Yanal Kuvvet Katsayısı (Arslan, 2005).

Aerodinamik direnç katsayısı (Cd), taşıtlı kaldırma kuvveti katsayısı (Cl) ve yan al kuvvet katsayısı (Cs) değ erleri, aracın aerodinamik karakteristiğ i olarak yorumlanabilir. Bu değ erler ne kadar düşük olursa sürüş ş artları (kararlılık, manevra vb.) o kadar dü zelmektedir. Bununla birlikte yakıt tüketimi de önemli ölçüde iyileş mektedir. Hızı ve ebatları belirli bir aracın aerodinamik direnç kaybını düşürmenin tek yolu aerodinamik direnç katsayısını düşürmektir. Düşük hızlarda araç hareketini çok fazla etkilemeyen bu katsayı, araç hızlandıkça önemini artırmaktadır. Benzin motorlu 1.200 kg ağırlığ a sahip bir aracın 90 km/h hızda yakmış olduğ u yakıttan elde edilen enerjinin kullanımı Tablo 2.1 'de gösterilmiştir.

Tasarımın geliştirilmesi ve geleneksel araçlardan günümüzdeki araçlara geçilmesi ile birlikte aerodinamik direnç katsayıları yaklaşık %30 oranında azaltılmıştır. (Sachin T., Amba G., Prasad R., (2011).

Kayıplar	Kısmi Yük (Sabit Hız)	Tam Yük (İvmelenme ya da Yokuş)
Termodinamik kayıplar	% 78	
Yardımcı sistemler	% 5	Krank
Tekerlek yuvarlanma kaybı	% 4,6	Milindeki
İvme ya da yokuş kaybı	% 0	Faydalı
Aerodinamik kayıplar	% 10,6	Enerji
Transmisyon kaybı	% 1,8	% 22
Taşıtlı verilen toplam enerji	% 100	% 5,9
		% 0,8
		% 100

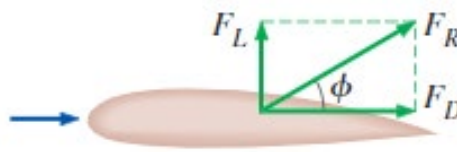
Şekil 2. 5 : Benzin motorlu bir taşıtlı harcanan yakıttan elde edilen enerjinin dağılımı

2.2. Akışkanlarda Sürtünme Faktörü

Akışkanlar, hareket etmeyen nesnelerin etrafında hareket edebilirken, bazen de hareket eden nesneler durgun akışkanların içerisinde geçer. Bu iki durum birbirinden farklı olarak görünse de mühim olan birbirleri arasındaki bağıl hareket durumudur. Bu hareketler, dış akış olarak isimlendirilmektedir. Hareket eden aracın etrafındaki hava aksiyonları ya da bir ağacın etrafındaki rüzgâr hareketleri bu durumlara örnek olarak verilebilir. Dış akışlar, genellikle matematiksel formüller ile çözülemeyecek kadar karmaşıktırlar. Bu akışların çözümleri için deneysel metotlar kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte paket HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) çözümlerinde kullanılan programlar; bu deneysel metotlar ile birlikte akış analizleri için vazgeçilmez yöntemler durumuna gelmişlerdir. H.F. Philips 1894 yılında ilk rüzgâr tüneline inşa ederek bir taşıtın aerodinamik direnç katsayısını belirlemiştir (Çengel; Cimbala, 2015).

Dış akışlar, sıkıştırılabilir (Jet uçakları, roketler, vb.) ve sıkıştırılamaz (Araçlar, ağaçlar etrafındaki akışlar, vb.) dış akışlar olarak ikiye ayrılırlar. Görüldüğü üzere düşük hızlarda akışlar genellikle sıkıştırılamaz akış olarak adlandırılabilir (Çengel; Cimbala, 2015).

İki boyutlu akışta, cisimler üzerine etkiyen aerodinamik direnç kuvveti; cisme y ekseninde etki eden kaldırma kuvveti (F_L) ve x ekseninde etki eden direnç kuvvetinin (F_D) vektörel bileşenleridir.



$$F_D = F_R \times \cos \phi$$

$$F_D = F_R \times \cos \phi$$

Şekil 2. 6 : Aerodinamik direnç kuvveti bileşenleri (Çengel; Cimbala, 2015)

Aerodinamik direnç kuvveti (F_D)'nin akışkan yoğunluğu (ρ), akışkan ile karşılaşan yüzey alanına (A), cismin geometrisine ve bağıl hıza (V) bağlı olduğu 2.2 ve 2.3 numaralı formüller ile belirtilmiştir. τ kayma gerilmesi nedeniyle meydana gelen direnç bölümüne yüzey sürtünme direnci, P basıncından meydana gelen direnç bölümüne ise basınç direnci

adı verilir. Akışa paralel olan yüzeylerde basınç direnci sıfırken; akışa dik olarak konumlandırılmış olan yüzeylerde yüzey sürtünme direnci sıfırdır. Sürtünme direnci viskozite ile doğru orantılıdır. Reynolds sayısının viskozite ile ters orantılı olması nedeniyle yüksek Reynolds sayılarında sürtünme direnci ihmal edilebilir(Çengel; Cimbala, 2015).

Reynolds sayısı, akış karakteristiğini belirleyen sayı olarak bilinmektedir.

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (2.5)$$

formülü ile ifade edilmektedir. Burada;

Re: Reynolds Sayısı

V: Akış hızı

L: Akışkanın etkilediği yüzeyin uzunluğu

ν : Akışkanın kinematik viskozitesi olarak ifade edilmektedir.

Sürtünme direnci yüzey alanı ile doğru orantılıdır. Bu nedenle ön yüzey alanı büyük olan ticari araçlarda yüzey sürtünmesi; dolayısıyla aerodinamik direnç katsayısı daha büyüktür. Laminer akışta yüzey pürüzlülüğünün aerodinamik direnç katsayısı değerine katkısı sıfırdır. Yüzey pürüzlülüğü; türbülanslı akışlarda aerodinamik direnç katsayısı değerini etkileyen bir parametredir(Çengel; Cimbala, 2015).

2.2.1. Sürtünme Katsayısı

Sürtünme katsayısının laminer akışta teorik olarak hesaplanabileceği fakat, türbülans akışta çözüm için deneysel metotlar kullanıldığı önceki bölümlerde belirtilmiştir. Sürtünme katsayısı, belirli bir yüzey üzerinde değişkenlik gösterdiği için genellikle ortalama sürtünme katsayısı kavramı kullanılmaktadır. Ortalama sürtünme katsayısını ifade eden formül;

$$C_f = \frac{1}{L} \int_0^L C_{f,x} dx \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

olarak verilebilir (Çengel; Cimbala, 2015).

Laminer akışta yüzey pürüzlülüğü, sürtünme katsayısını etkilememekle birlikte, sürtünme katsayısı Reynolds sayısına bağlıdır. Bununla birlikte türbülanslı akışta ise yüzey pürüzlülüğü, sürtünme katsayısının iki ile üç kat artmasına neden olabilmektedir (Çengel; Cimbala, 2015). Yüzey pürüzlülüğünün sürtünme katsayısına etkisini araştırmak için Schlichting tarafından belirli sınır koşullarında sonuç veren bir denklem geliştirilmiştir (Çengel; Cimbala, 2015).

$$C_f = (1.89 - 1.62 \log \frac{\epsilon}{L})^{-2.5} \quad (2.7)$$

Olarak ifade edilen bu formülde;

ϵ : Bağlı pürüzlülük

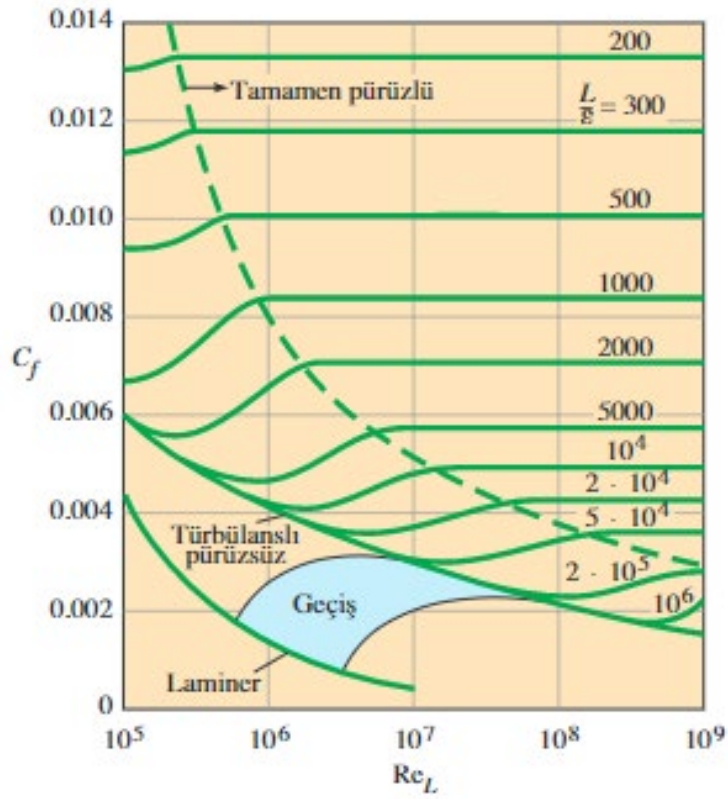
L: Akış yönünde levha uzunluğudur.

$Re > 10^6$ ve $\epsilon/L > 10^{-4}$ şartlarında sonuç veren bu formülde ϵ/L değeri sonuçların ortaya koyulması için büyük önem arz etmektedir (Çengel; Cimbala, 2015). Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizlerinde bu değer üzerinde çalışılmıştır.

Laminer akışta yüzey pürüzlülüğünün sürtünme katsayısına etkisini değişen Reynolds sayılarıyla anlatan grafik aşağıda verilmiştir.

Şekil 2.6 'dan da görüleceği üzere pürüzlülük değerinin artışıyla birlikte sürtünme katsayısı da artmaktadır. Aerodinamik direnç katsayısının iki bileşeninden birisi olan sürtünme katsayısının artışı ile birlikte türbülanslı akışlar için doğal olarak aerodinamik direnç katsayısının da artması beklenmektedir (Çengel; Cimbala, 2015).

Bununla birlikte dış akış olarak isimlendirilen akışların karakterlerini belirlemek için kullanılan Reynolds sayıları, boru içi akışlara göre farklılıklar arz etmektedir. Normal şartlar altında boru içi sıkıştırılamaz akışlar için; $Re < 2300$ değeri laminar akışı tarif ederken $Re > 4000$ değeri türbülanslı akışı için geçerlidir. 2300 – 4000 arası değerlerde kalan akışlar geçiş akışı olarak adlandırılmaktadır (Çengel; Cimbala, 2015).

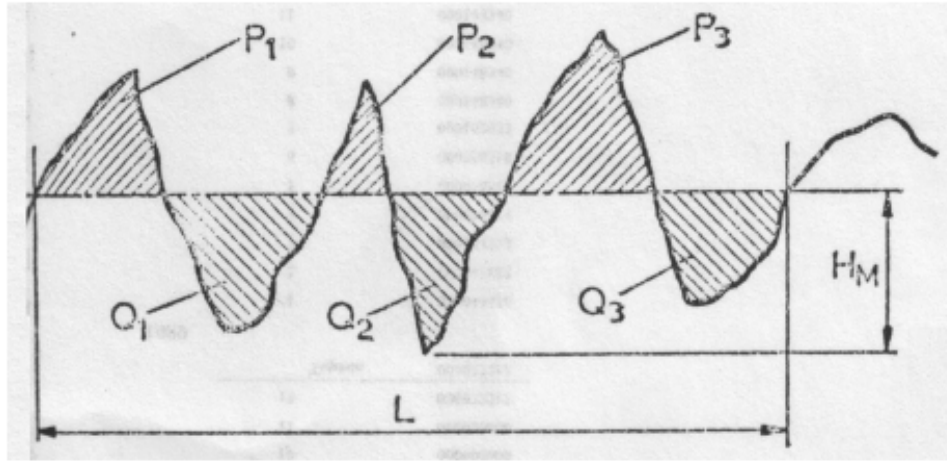


Şekil 2. 7 : Düz levhalar için yüzey pürüzlülüğünün sürtünme katsayısına etkisini gösteren grafik (Çengel; Cimbala, 2015)

Boru içi sıkıştırılabilir akışlar için durum böyle iken, düz levhalar üzerindeki paralel dış akışlarda Reynolds sayısının sınırları değişmektedir. Buna göre, $Re < 10^5$ değerinde laminar olan akış, $Re > 5 \times 10^5$ değerinde ise türbülanslı akış özellikleri gösterir. Arada kalan değerler ise geçiş akışıdır. Yine de 3×10^6 değerlerine ulaşmadan tam türbülanslı akış halini almaz(Çengel; Cimbala, 2015).

2.2.2. Yüzey Pürüzlülüğü Kavramı

Yüzey pürüzlülüğünün bir çok parametresi olsa da yaygın olarak kullanılan değer, Ra (Rayleigh sayısı) değeri olarak adlandırılır. Buna göre merkez çizgisinin ortalama yükseklik değeri olarak ifade edilen Ra değeri; bu çalışmada da pürüzlülük parametresi olarak kullanılacaktır. Şekil 2.7 'de detaylı olarak gösterilmiştir (<http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/ot/yuzey.puruzlulugu.pdf> adresinden Haziran 21, 2020 tarihinde alınmıştır.)



Şekil 2.8 : Ortalama yüzey pürüzlülük ölçümü Ra değerinin şematik gösterimi

$$Ra (\mu m) = \frac{(P \text{ alanı} + Q \text{ alanı})1000}{L Vq} \dots\dots\dots(2.8)$$

Buna göre;

Ra: Ortalama yüzey pürüzlülük değeri (μm)

P ve Q alanları: (mm^2)

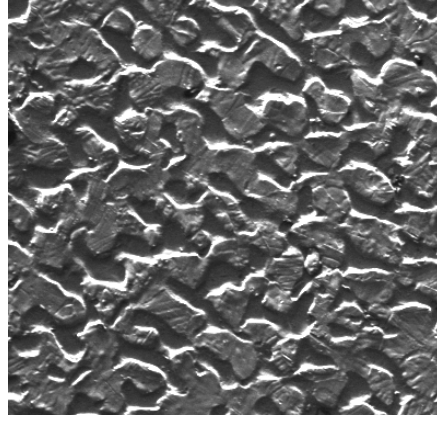
L : Yüzey uzunluğu (mm)

Vq: Düşey büyültme değeridir

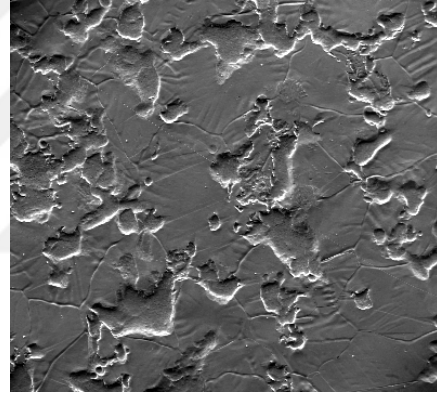
Günümüzde, otomotiv endüstrisinde yer alan binek araçlarda yüzey pürüzlülüğü kavramı net bir ifadeyle yer almamakla birlikte toleranslar ile ifade edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan pürüzlülük değerleri; yaklaşık değerlerdir ve binek taşıtlarda kullanılan kaplama malzemelerinin pürüzlülük değerleri ile benzerlikler arz etmektedir. (Vazirian; Neville; Penna, 2015)

2007 yılında yayımlanmış olan ‘Araba Gövde Üretiminde Metal Sac Yüzeylerin Özellikleri’ makalesinde de otomotiv endüstrisinde çok fazla kullanılan, sıcak kaplama galvanizli çeliklerin yüzeysel özellikleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaya göre araç kaportası üzerinde galvanizli çelik kullanımı neticesinde üç çeşit pürüzleme işlemi yapılmıştır. Bu işlemler; EDT (elektriksel deşarjla pürüzlendirme), EBT (elektron ışınıyla pürüzlendirme) ve PRETEX işlemi ile pürüzleme işlemleridir. Bu

işlemler neticesinde oluşmuş olan yüzey şekilleri; Şekil 2.9, 2.10 ve 2.11’de görülmektedir. (Kolnerova, M., Sobotka, J., Solfronk, P., Doubek, P., 2007)

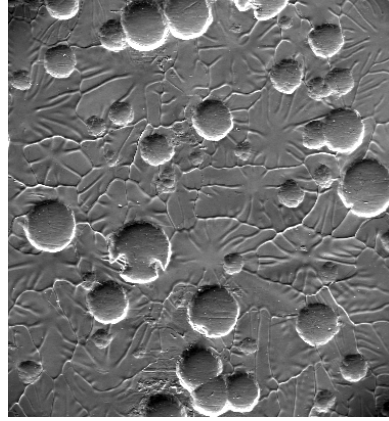


Şekil 2. 9 : EBT (elektron ışınıyla pürüzlendirme) (Kolnerova, M., Sobotka, J., Solfronk, P., Doubek, P., 2007)



Şekil 2. 10 : EDT (elektriksel deşarjla pürüzlendirme) (Kolnerova, M., Sobotka, J., Solfronk, P., Doubek, P., 2007)

Yukarıda görülen pürüzleme işlemleri neticesinde oluşmuş olan yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüş ve bunun neticesinde Ra değerleri Tablo 2.1 vasıtasıyla sunulmuştur. Çıkmış olan değerler ile bu çalışmada kullanılan değerlerin benzerlikleri görülmektedir. (Kolnerova, M., Sobotka, J., Solfronk, P., Doubek, P., 2007)



Şekil 2. 11 : PRETEX (Kolnerova, M., Sobotka, J., Solfronk, P., Doubek, P., 2007)

Tablo 2. 1 : Sıcak daldırılmış galvanizli çelik kaplama pürüzlülük değerleri

Sıcak Daldırılmış Galvanizli Çelik Kaplama			
Yüzey Morfolojileri	EBT	EDT	PRETEX
Ra (m)	$1,12 \times 10^{-6}$	$1,11 \times 10^{-6}$	$1,13 \times 10^{-6}$
	$1,16 \times 10^{-6}$	$1,14 \times 10^{-6}$	$1,15 \times 10^{-6}$

Bu çalışmada kullanılan ve Tablo 3.1’de gösterilen değerler ile kıyaslandığında çalışmada kullanılan değerlerin gerçeğe yakın değerler oldukları görülmektedir. (Kolnerova, M., Sobotka, J., Solfronk, P., Doubek, P., 2007)

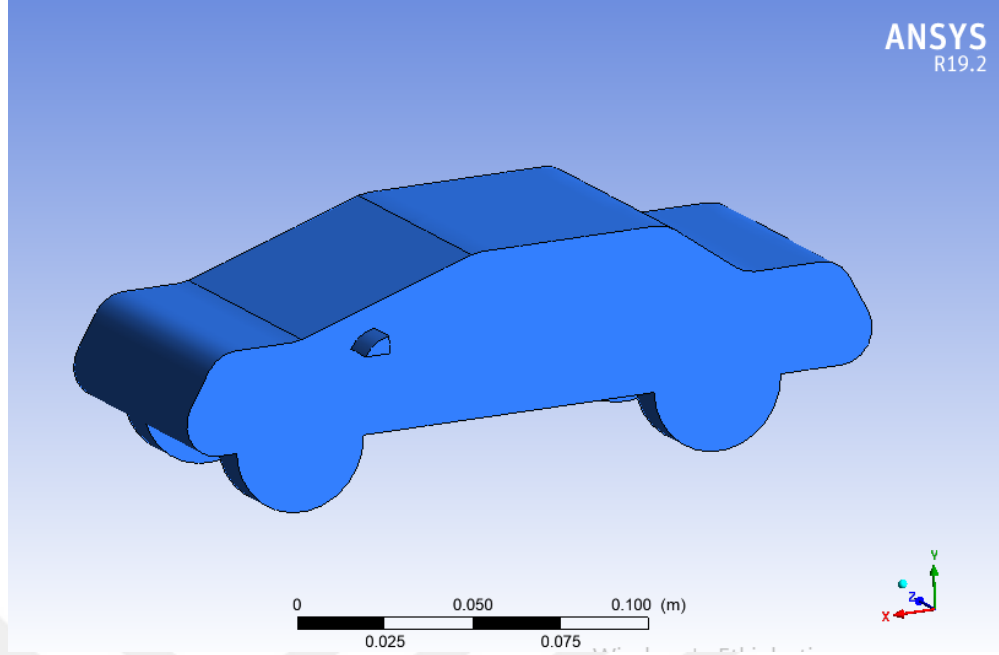
BÖLÜM 3. MATERYAL METOD

Aerodinamik direnç kuvveti ve aerodinamik direnç katsayısı hesaplamaları; günümüzde genel olarak paket programlar vasıtası ile yapılmaktadır. Ölçümü yapılacak geometrinin çizimi, sonlu elemanlar metodunda kullanılacak uygun ağ yapısının belirlenmesi, bu yapıya uygun olarak ilgili giriş parametrelerinin girilmesi ve çözümün başlatılması, çözümün neticelenmesi ile ortaya çıkan sayısal verilerin değerlendirilmesi ve model etrafında gerçekleşmiş olan hız vektörlerinin ve basınç dağılımlarının değerlendirilmesi işlevleri, bu işlemlerde karşımıza çıkacak işlem adımlarıdır. Tüm bu işlemlerin tamamı hesaplamalı akışkanlar dinamiği olarak tanımlanmaktadır.

İlgili işlem adımlarından ilki olan incelenecek modelin oluşturulması; AutoCad, NX, CATIA, Creo, SolidWorks, Design Moduler vb. paket programlarla yapılabilmektedir. Bununla birlikte analiz işlemleri Ansys Fluent, Comsol Multiphysics vb. paket programlarla gerçekleştirilebilmektedir. Tüm bu programlar, hesaplamalı akışkanlar dinamiği işlemlerini gerçekleştirmek için sonlu elemanlar metodunu kullanan paket programlardır. Farklı arayüzlerde işlemlerini gerçekleştirirler bile yöntem ve sonuçları değişmeyecektir.

Bu çalışmada; Design Moduler programı vasıtasıyla çizilmiş olan 1/20 ölçekli bir araç tasarımı hazırlanmış olup; ağ yapısının oluşturulması, hazırlanmış olan modele uygun olan daha önceden belirlenmiş giriş değerlerinin girilmesi ve çözüm işlemleri Ansys Fluent 19.2 paket programı vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada kullanılan araç modeline ait görüntü Şekil 3.1’de görünmektedir.



Şekil 3. 1 : Analizlerde kullanılacak araca ait genel görünüm

3.1. Yüzey Pürüzlülüğü

Araçlarda kullanılan kaplama malzemeleri; boya, teflon kaplama, seramik kaplama vb. şekilde materyaller olabilirler. Bu materyallerin her birinin değişik yüzey pürüzlülük değerleri bulunmaktadır. Otomotiv üreticileri, kaportalarda kullanılan kaplama maddelerinin yüzey pürüzlülüklerinin olabildiğince düşük olması için çalışırlar.

Bu çalışmada çizimi yapılmış olan örnek araç modelinin kaportası; üç farklı pürüzlülük değerine sahip boya, floropolimer kaplama ve tamamen pürüzsüz yüzey olarak ele alınarak toplamda beş farklı pürüzlülük seviyesinde ölçümler yapılmıştır. Aracın ön ve arka camları için ise sabit olarak cam ortalama pürüzlülük değeri olan $9,40 \times 10^{-8}$ m değeri kullanılmıştır (Vazirian; Neville; Penna, 2015)

Tablo 3.1’de gösterilen değerlerin dışında taşıtlarda kullanılan kaplama malzemeleri haricinde otomotiv kaportalarında genel olarak tercih edilen çelik malzemenin de pürüzlülük değeri de 6×10^{-7} m ile 8×10^{-7} m arasında değişmektedir. (Streitberger; Dosser, 2008) Bu değer de göz önünde bulundurulduğunda düşük pürüzlülükte bir boya malzemesinin, pürüzlülük değerinin boyanmamış araç kaportasından daha düşük değerde

olduğu ve aerodinamik direnç katsayısının düşürülmesi üzerine faydalı olacağı söylenebilir.

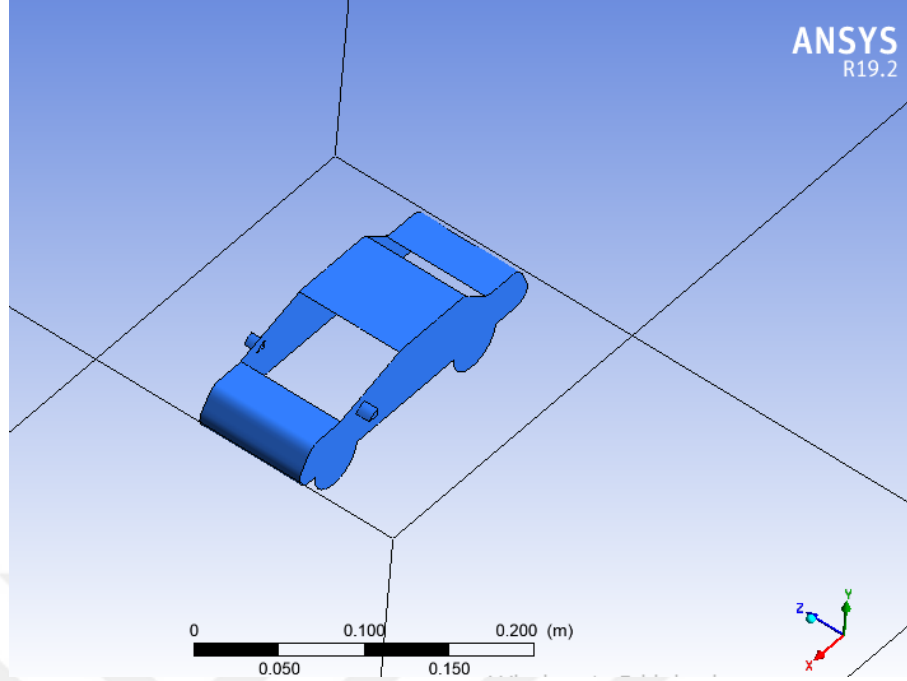
İlgili pürüzlülüklerin değerleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3. 1 : Ölçümler için kullanılmış olan pürüzlülük değerleri (Vazirian; Neville; Penna, 2015)

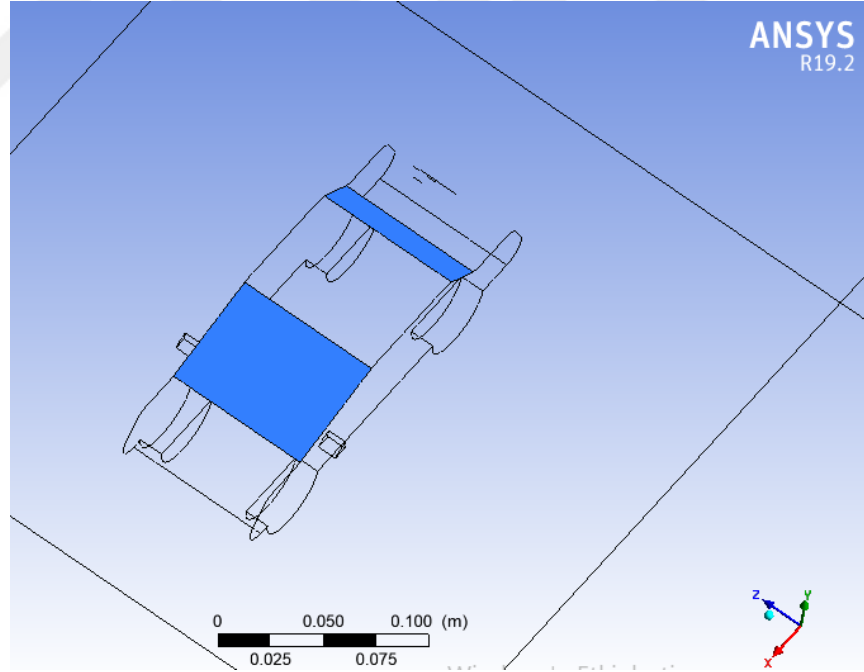
Pürüzlülük Yüksekliği (Ra),m	
Boya - 1	$3,51 \times 10^{-7}$
Boya - 2	$1,03 \times 10^{-6}$
Boya - 3	$1,48 \times 10^{-6}$
Floropolimer	$5,24 \times 10^{-6}$
Cam	$9,40 \times 10^{-8}$

Analizlerde kullanılacak olan 1/20 ölçekli taşıt modeline ait aşağıdaki görüntülerden de anlaşılacağı üzere kaporta aksamı olarak tanımlanan Şekil 3.2 ve cam olarak tanımlanan Şekil 3.3 bölümler görünmektedir.

Şekil 3.2’de görüldüğü üzere tasarımın mavi ile görülen taşıt bölümleri kaporta olarak kabul edilmiş ve bu bölgelerdeki pürüzlülük değerleri; Tablo 3.1’de verilen değerler göz önünde bulundurularak değiştirilerek 40 km/saat – 150 km/saat hızlar arasında aerodinamik direnç kuvveti ve katsayısı ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 3. 2 : Analizlerde kullanılacak araca ait kaporta görünümü



Şekil 3. 3 : Analizlerde kullanılacak araca ait ön ve arka cam görünümü

Şekil 3.3'te görülen ön ve arka cam bölümleri; Tablo 3.1'de görülen cam pürüzlülük değeri göz önünde bulundurularak yapılmış olan analizlerde sabit tutulmuştur.

3.2. Hız Değerleri

Taşıtlarda kullanılan boya, macun vb kaplama malzemelerinin aerodinamik direnç katsayısına etkilerinin araştırılması için, Design Modular programı vasıtasıyla hazırlanmış olan Şekil-1’de görülen tasarım, rüzgar tüneli metodu kullanılarak Ansys Fluent 19.2 programı içerisinde incelenmiştir.

Buna göre ilgili araç, Ansys Fluent 19.2 paket programında oluşturulmuş olan rüzgar tüneli içerisinde 40 km/saat – 150 km/saat hızlar arasında 10 km/saat hız artışları ile her bir hızda beş farklı pürüzlülük seviyesi kullanılarak incelenmiştir.

Bu hız değerleri ve incelenecek olan tasarımın ölçüleri incelenerek hesaplanmış olan Reynolds Sayısı tablosu Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3. 2 : İncelenecek hızlar ve model geometrisi göz önünde bulundurularak hesaplanmış Reynolds Sayıları

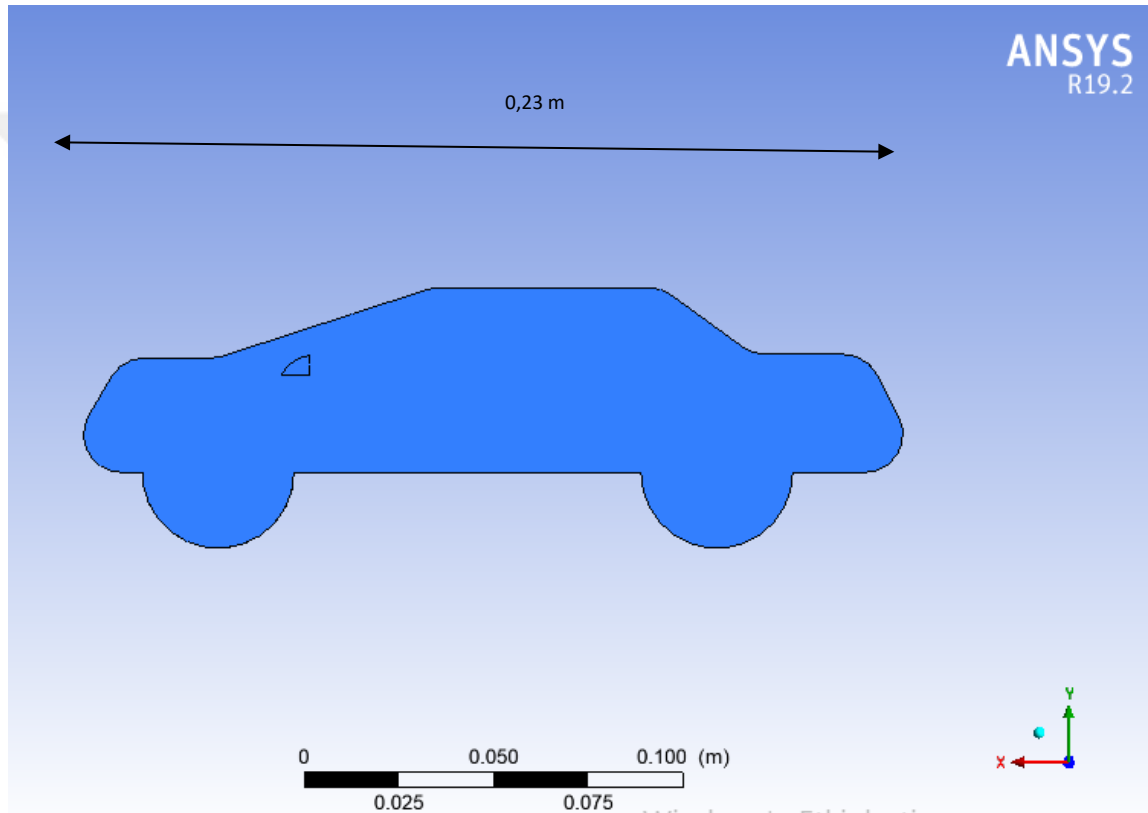
Akış Uzunluğu(m)	Hız(m/s)	Hız(km/saat)	Reynolds Sayısı
0,23	11,11	40	$1,44 \times 10^5$
0,23	13,89	50	$1,79 \times 10^5$
0,23	16,67	60	$2,15 \times 10^5$
0,23	19,44	70	$2,51 \times 10^5$
0,23	22,22	80	$2,87 \times 10^5$
0,23	25	90	$3,23 \times 10^5$
0,23	27,78	100	$3,59 \times 10^5$
0,23	30,56	110	$3,95 \times 10^5$
0,23	33,33	120	$4,31 \times 10^5$
0,23	36,11	130	$4,67 \times 10^5$
0,23	38,89	140	$5,02 \times 10^5$
0,23	41,67	150	$5,38 \times 10^5$

Tablo 3.2’de belirtilmiş olan Reynolds sayısı değerleri göz önünde bulundurulduğunda, araç etrafında gerçekleşecek olan akış teorik olarak 140 km/saat ve 150 km/saat hızlarda türbülanslı akış, diğer hızlarda ise geçiş akışı olarak değerlendirilebilir(Çengel; Cimbala, 2015).

Laminer akışta yüzey pürüzlülüğünün aerodinamik direnç katsayısının etkisinin olmadığı da göz önünde bulundurularak yapılacak olan analizler türbülans akış modeli çerçevesinde gerçekleştirilecektir(Çengel; Cimbala, 2015).

Geçiş akışında da akış çizgilerindeki bozulmalar düşünüldüğünde, türbülans akış modeli bu araştırma için en uygun model olarak değerlendirilebilir.

Tablo 3.2’de belirtilmiş olan akış uzunluğu değeri, Şekil 3.4’te görüldüğü üzere aracın üzerindeki akış uzunluğunu ifade etmektedir.



Şekil 3. 4 : İncelenecek model aracın akış uzunluğu

Yapılacak olan türbülans akış modeli için kullanılacak olan paket program bir çok akış modeli sunmuş olsa da arasında en fazla kullanılan modeller; k – epsilon ve k – omega modelleridir. Bu paket programlar, süreklilik ve momentum denklemlerini kullanarak aşağıda detaylı olarak tanımlanmış olan modeller vasıtasıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümlerini gerçekleştirirler.

3.2.2. K – epsilon Türbülans Modeli

İki denklemlili bir türbülans akış modeli olan k – epsilon modeli; düşük maliyeti ve pratik yapısıyla ön plana çıkmaktadır. Dezavantaj olarak pürüzlülüğün yüksek olduğu sınır tabaka koşullarında k – omega kadar doğru sonuçlar vermemesi ve geri akışlarda düşük hassasiyete sahip olması sayılabilir(Keleş, 2015)

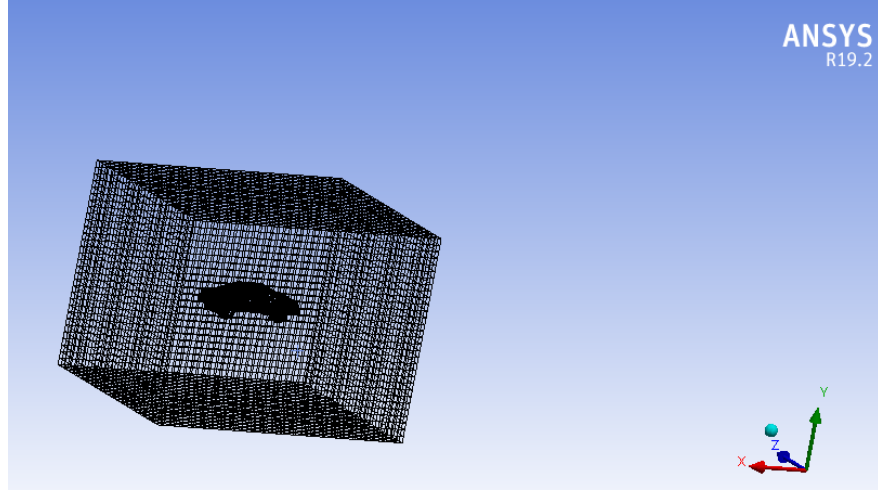
Lauder ve Spalding k - epsilon modelinde, biri k; diğeri epsilon olacak şekilde iki denkelem bulunduğunu ifade etmişlerdir. k, modelin kinetik enerjisini temsil etmektedir. (Lauder B.E., Spalding D.B., 1974)

3.2.3. K – omega Türbülans Modeli

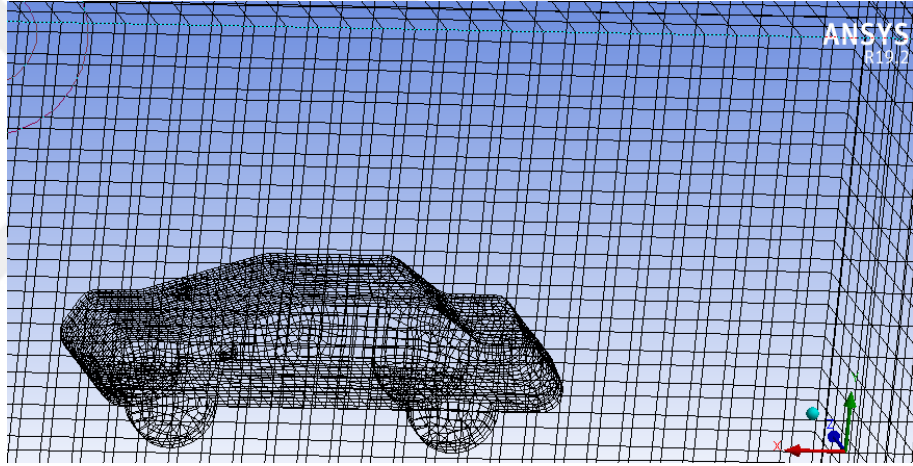
K- omega modelindeki k; türbülanslı akışın kinetik enerjisini gösterirken omega ise enerji kaybını göstermektedir. Akışın daha yoğun olduğu sınır tabaka koşullarında k- epsilon modeline göre daha hassas sonuç veren bir model olduğu için bu analizimizde de k – omega türbülanslı akış modeli kullanılmıştır. SST k-omega ve realizable k-epsilon çözüm modelleri ile yapılan analizler ise %0,5'in altında hata ile sonuç vermektedir. SAE (Society of Automotive Engineering)'in yayınladığı aerodinamik analiz rehberinde k- omega modelinin yüksek doğruluklu sonuçlar verdiği görülmüştür. (SAE, 2013)

3.3. Ağ Yapısı

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde analizin doğru sonuç vermesi açısından en önemli parametre ağ yapısı kalitesidir. Ağ yapılarında önemli olan nokta ağ yapısının sıklığından ziyade her bir ağın komşu ağlar ile birbirlerine bağlandıkları kenar uzunluklarının oranıdır. Bu oranın bire yakın olması çözümlerin doğru sonuçlar vermesi ile birlikte yapılacak olan çözümlerin sürelerinin de azalması hususunda önem arz etmektedir. Çok sık ve fazla sayıda olan ağ yapılarının kesin sonuç vermesi gibi bir durum söz konusu olmamakla birlikte bu durum, çözüm süresini artıracaktır. Bu çalışma için oluşturulmuş olan ağ yapısı, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 vasıtasıyla görülebilir. Orta yoğunluklu ağ modeli konu çalışma için yeterli olarak görülmektedir. (Unaune, S., V., Sovani, S., D., ve Kim, S., E., 2005)



Şekil 3. 5 : Ağ yapısı genel görünüm



Şekil 3. 6 : Ağ yapısı araç tasarımı görünümü

Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 vasıtasıyla görüleceği üzere; rüzgar tüneli çeperleri için kare prizma meshler tercih edilmiş olup, akışın etrafından geçecek olan araç tasarımı için biraz daha sık olan yine kare ve dikdörtgen prizma ağ yapıları tercih edilmiştir.

Genel olarak bu çalışma için hazırlanmış olan ağ adedi ve ağların birleşim noktaları olan ağ düğümlerinin adetlerine Tablo 3.3. vasıtasıyla ulaşabilir.

Tablo 3. 3 : Ağ verileri

	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı
Ağ Verileri	107365	93935

3.4. Çözüm Adımları

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri yapılırken ağ yapısı ile birlikte en önemli adım, çözüm adımlarının doğru bir şekilde oluşturulmasıdır. Kullanılacak olan akış modeli, daha önce ağ yapısı uygulanırken tanımlanmış olan alanlara uygun değerlerin girilmesi, uygun sınır şartlarının belirlenmesi, ulaşılabilecek olan değerler ve grafiklerin belirlenmesi neticesinde çözümün başlatılması, bu adımda gerçekleştirilecektir. Bu nedenle çözüm işlemi büyük önem arz etmektedir.

Ansys 19.2 paket analiz programında kurulum adımları olarak aşağıdaki adımlar izlenmiştir.

Model > Viskoz (k-omega türbülans modeli)

Materyaller > Akışkan > Hava

Bu adımlar vasıtasıyla k-omega türbülans modeli ve akışkan olarak hava seçilmiştir.

Bunun akabinde ‘kaporta (hood)’ olarak tanımlanan aracın kaportası için belirlenmiş olan pürüzlülük değeri girilmiştir. Pürüzlülük değeri için,

Sınır şartları> Kaporta> Pürüzlülük yüksekliği > m olarak girilen analizin yapılacağı pürüzlülük değeri adımları izlenmiştir.

Bu değer kullanılan kaplama malzemesinin, akış uzunluğuna bölümü (K_s/L) ile elde edilmiştir. ‘Pürüzlülük Sabiti’ olarak gösterilen değer ise boyutsuz bir ifade olup pürüzlülüğün karakteristiğini ifade etmektedir. Tüm çözümlerde 0,5 olarak alınmaktadır. Araç üzerinde yer alan ön ve arka camlar ‘cam(wind)’ olarak tanımlanmış olup pürüzlülük sabiti 0,5 bırakılarak cam için ilgili pürüzlülük değeri girilmiştir. (Ansys Tutorial, 2020)

Pürüzlülük değerlerinin girilmesi akabinde analizlerin yapılacağı hız değerleri girilecektir. Bunun için;

Sınır şartları> Giriş>Giriş Hızı bölümlerine 40 km/saat’ten 150km/saat’e kadar hızlar 10’ar km/saat artırılarak girilerek analizler yapılmıştır.

Hız değerlerinin girilmesinin ardından ‘Referans Değerleri’ iterasyon adımlarında programın kullandığı değerler olup içerisinde tasarlanmış olan modelin ön izdüşüm alanı, havanın yoğunluğu, giriş hızı vb. değerler girilmektedir. Yapılacak olan analizler enerji aktarımından bağımsız yapılacağı için burada ilgili değerler programın tanımladığı şekilde bırakılmıştır.

Buna göre;

Ön yüzey alanı (m²): 0,00498449 (1/20 ölçekli alan olduğu için küçük bir değer olarak görünmektedir.)

Havanın yoğunluğu(kg/m³): 1,225

Entalpi (j/kg): 0

Sıcaklık(K): 288.16

Hız(km/saat): 40 km/saat – 150 km/saat arasında denenmiş olan hız değerleri

Vizkozite(kg/m*s): $1,7894 \times 10^{-5}$

Değerleri, başlangıç değerleri olarak kabul edilmiştir.

Bu adımın ardından çözüm başlangıcı bölümüne geçilerek Hibrit çözüm seçilmiş ve ‘Hesaplamayı Başlat’ bölümüne iterasyon sayısı girilip, ‘Hesapla’ komutu ile çözüme başlanmıştır.

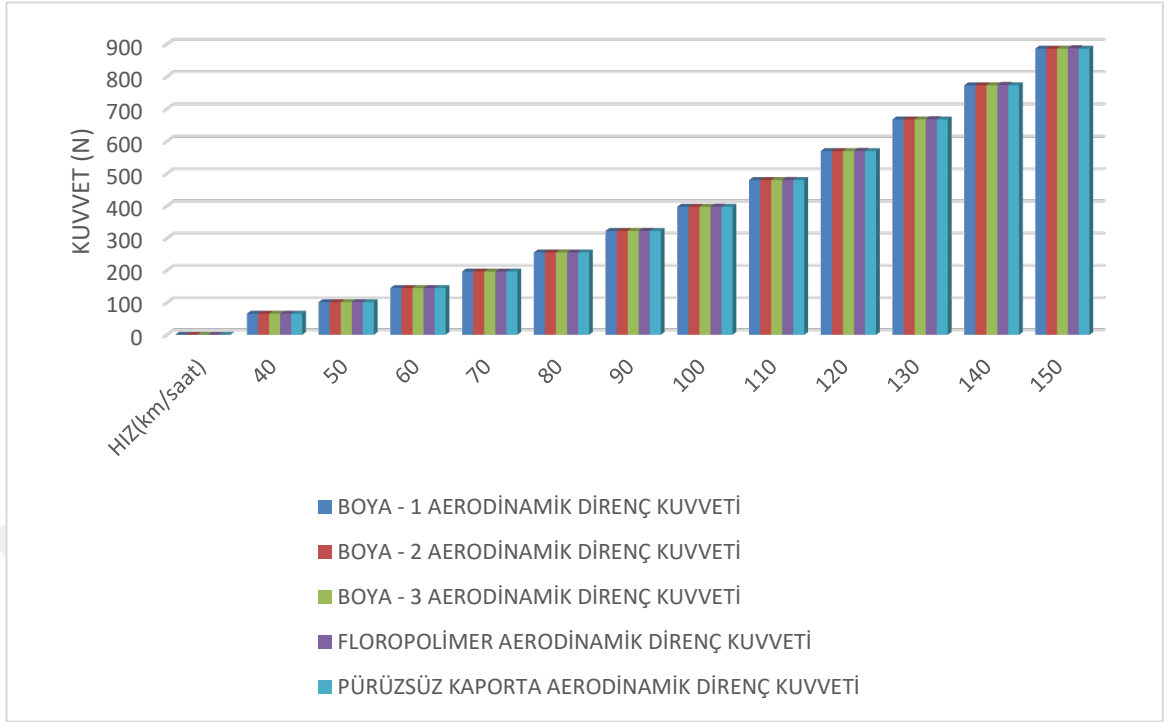
BÖLÜM 4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Design Modular paket programı kullanılarak tasarımı gerçekleştirilmiş olan aracın ağ yapısı belirlenmiş olup, 40 km/saat – 150 km/saat hız aralıklarında beş farklı kaporta pürüzlülük seviyesi ile aerodinamik direnç kuvveti ve aerodinamik direnç katsayısı hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

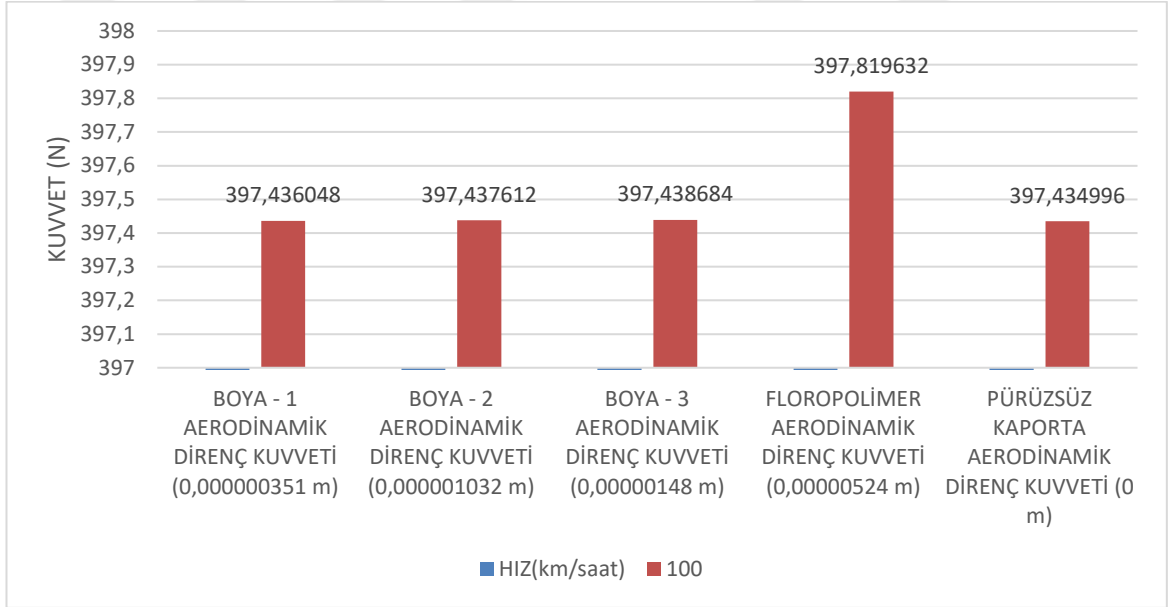
4.1. Aerodinamik Direnç Kuvveti (F_{cd})

Yapılmış olan analizler neticesinde ortaya çıkmış olan aerodinamik direnç kuvvetlerine ait Ansys 19.2 paket programı vasıtasıyla hesaplatılmış değerler neticesinde çıkartılmış grafikler bu başlık altında ortaya koyulmuştur.

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere aerodinamik direnç kuvvetleri; hızın karesiyle doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu değerler çıkartılırken 1/20 olan ölçek değeri hesaba katılmış ve ön yüzey alanı 400 ile çarpılarak grafikte görülen sonuçlar ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte değerler arasında çok küçük farkla olması nedeniyle pürüzlülük seviyesine göre kuvvet değişimi tam olarak anlaşılamamaktadır. Bu nedenle Şekil 4.2’de belirtilen grafik kullanılmıştır. Şekil 4.2’de görülen grafikte 100 km/saat hızdaki aerodinamik direnç kuvvetleri ve bu kuvvetlerin kaporta kaplama malzemesine göre değişimleri net bir şekilde görünmektedir.



Şekil 4. 1 : Aerodinamik direnç kuvvetlerinin hızlara göre değişimi



Şekil 4. 2 : 100 km/saat hızda aerodinamik direnç kuvvetlerinin değişimi

Şekil 4.2’den görüleceği üzere floropolimer kaplama araçlarda pürüzlülük değerinin fazla olması ile birlikte karşılaşılan aerodinamik direnç kuvveti değeri de daha yüksektir.

Tablo 4. 1 : Üç farklı boya pürüzlülük değerinde paket program tarafından hesaplatılmış olan aerodinamik direnç katsayısı değerlerinin araç ölçeğine göre gerçek boyuta dönüştürülmüş değerleri

HIZ(km/saat)	KUVVET (N) (GERÇEK BOYUT) – Boya -1 PÜRÜZLÜLÜK	KUVVET (N) (GERÇEK BOYUT) Boya - 2 PÜRÜZLÜLÜK	KUVVET (N) (GERÇEK BOYUT) Boya - 3 PÜRÜZLÜLÜK
40	65,480912	65,481280	65,481520
50	101,492056	101,492648	101,493072
60	145,271872	145,272584	145,273072
70	196,596104	196,596900	196,597360
80	255,825716	255,826776	255,827512
90	322,778776	322,779592	322,780148
100	397,436048	397,437612	397,438684
110	479,794320	479,797640	479,799880
120	569,525760	569,531000	569,534400
130	667,271960	667,277440	667,282040
140	772,725280	772,732480	772,737840
150	885,875600	885,883520	885,889840

Tablo 4. 2 : Pürüzsüz kaporta ve floropolimer kaplama pürüzlülük değerlerinde paket program tarafından hesaplatılmış olan aerodinamik direnç katsayısı değerlerinin araç ölçeğine göre gerçek boyuta dönüştürülmüş değerleri

FLOROPOLİMER AERODİNAMİK DİRENÇ KUVVETİ (0,00000524 m Pürüzlülük)		PÜRÜZSÜZ KAPORTA AERODİNAMİK DİRENÇ KUVVETİ (0 m Pürüzlülük)
HIZ(km/saat)	KUVVET (N) (GERÇEK BOYUT)	KUVVET (N) (GERÇEK BOYUT)
40	65,483676	65,480664
50	101,500180	101,491680
60	145,297312	145,271388
70	196,661432	196,595468
80	255,960668	255,825244

90	323,015088	322,778528
100	397,819632	397,434996
110	480,378360	479,792320
120	570,340040	569,522880
130	668,364280	667,269200
140	774,151520	772,721080
150	887,690560	885,869800

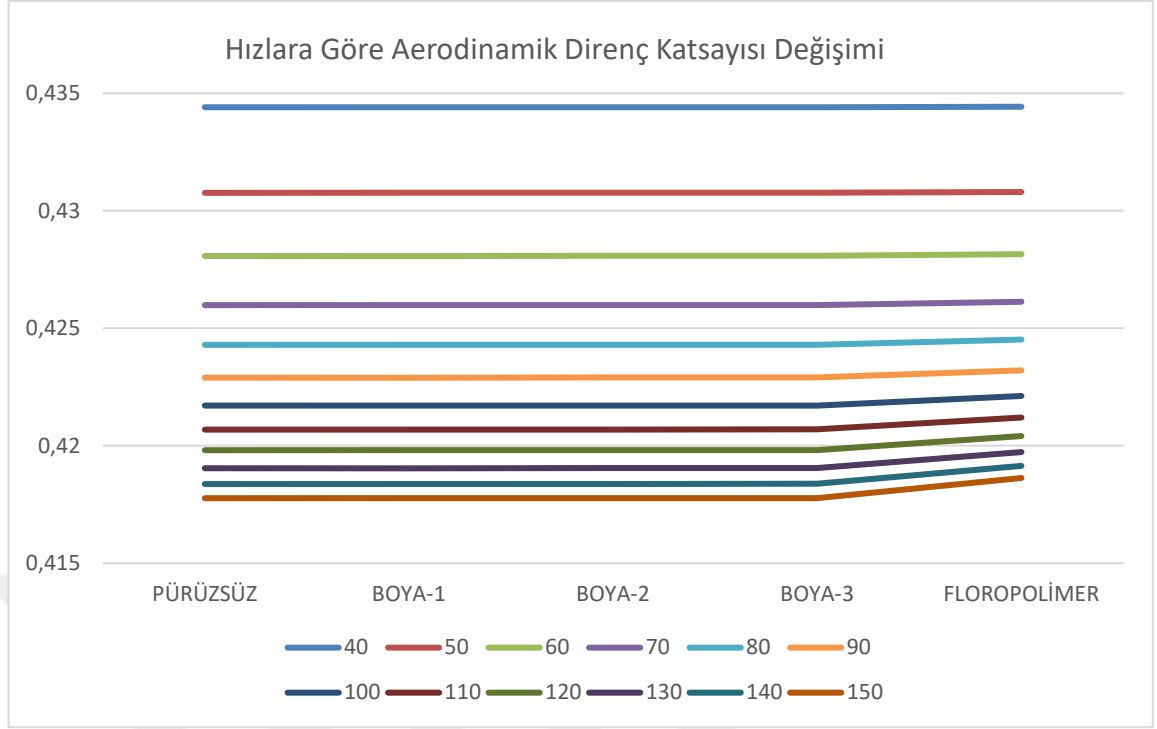
Yukarıda yer alan Şekil 4.1 – Şekil 4.2 arasındaki şekiller ve Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de; paket program tarafından tasarlanmış model araç üzerindeki aerodinamik direnç kuvvetlerinin hızlara ve değişiklik pürüzlülük değerlerine göre değişimleri hem sayısal olarak verilmiş, hem de grafikler vasıtasıyla ortaya koyulmuştur.

Tablo 4.1’de görüleceği üzere üç değişik pürüzlülükte boya değerinde, aerodinamik direnç kuvvetleri, ortalama olarak virgülden sonra 2. veya 3. basamakları etkileyen değişimler gerçekleştirmektedirler.

Bununla birlikte Tablo 4.2’de görüldüğü üzere pürüzsüz kaporta yapısı ve yüksek pürüzlülükte floropolimer kaplama arasındaki aerodinamik direnç kuvvetlerinin değişimleri görülmektedir. Buna göre 100 km/saat hızda giden bir araç için 0,97%’lik bir aerodinamik direnç kuvveti farkı olduğu görülmektedir.

4.2. Aerodinamik Direnç Katsayısı (Cd)

Aerodinamik direnç katsayısı değeri, önceki bölümlerde bahsedildiği üzere araçlar için çok önemli olup ilgili çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Buna göre taşıt üzerine 40 km/saat – 150 km/saat aralığında etkimiş olan kuvvetler neticesinde ortaya çıkmış aerodinamik direnç katsayısı grafiği Şekil 4.3’te gösterilmiştir. Görüleceği üzere hız arttıkça pürüzlülüğün aerodinamik direnç katsayısına etkisi daha belirgin görülmektedir.



Şekil 4. 3 : Aerodinamik direnç katsayısı değerleri

Tablo 4. 3 : Aerodinamik direnç katsayısı değeri

HIZ(km/saat)	PÜRÜZSÜZ	BOYA-1	BOYA-2	BOYA-3	FLOROPOLİMER
100	0,42171088	0,42171199	0,42171365	0,42171479	0,422119

Tablo 4.3 vasıtasıyla görüleceği üzere, 100 km/saat hızda aerodinamik direnç katsayıları, floropolimer kaplama hariç virgülden sonra 6. basamakta fark oluşturmaktadır. Floropolimer kaplamada ise bu fark 3. basamakta olmaktadır. Bu değerler, aerodinamik direnç kuvveti formülü göz önünde bulundurulduğunda aerodinamik direnç kuvvetleri değerleri ile doğru orantılıdır.

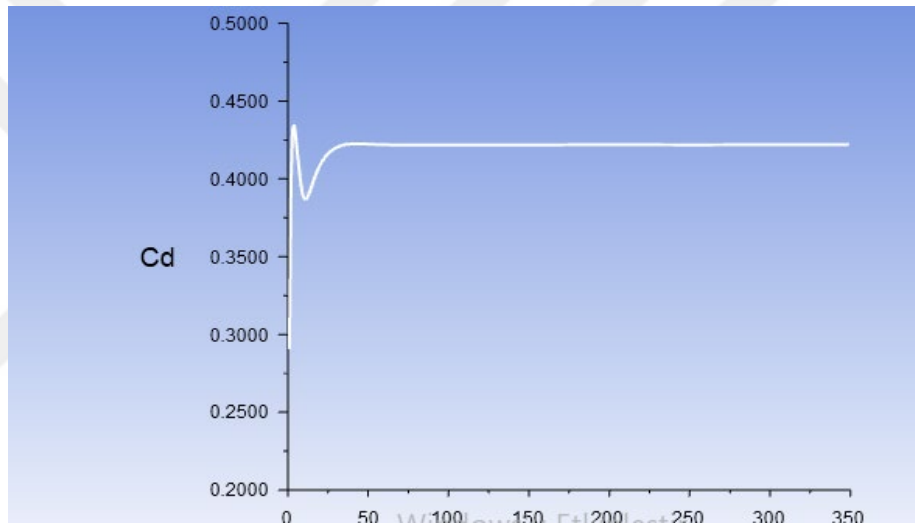
Tablo 4.4 vasıtasıyla her bir hız değeri ve boya pürüzlülüğü değerleri için aerodinamik direnç katsayısı değerlerine ulaşılabilir. Görüldüğü üzere hız değeri yükseldikçe boya pürüzlülüğünün aerodinamik direnç katsayısı üzerindeki etkisi negatif yönde artmaktadır.

Tablo 4. 4 : Aerodinamik direnç katsayısı değerleri

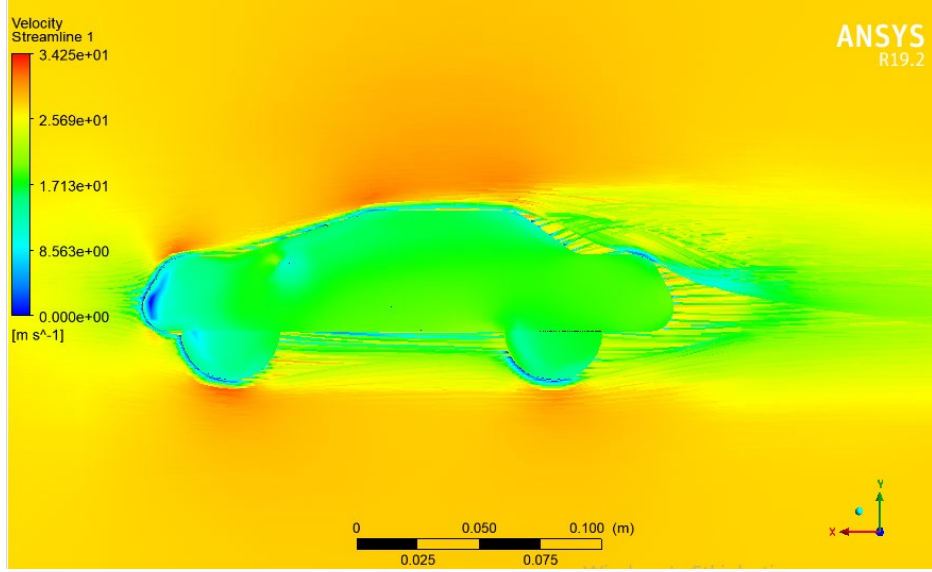
HIZ	PÜRÜZSÜZ	BOYA-1	BOYA-2	BOYA-3	FLOROPOLİMER
40	0,43440832	0,43440995	0,4344124	0,43441401	0,43442831
50	0,43076373	0,43076532	0,43076784	0,43076964	0,43079981
60	0,42807717	0,4280786	0,42808069	0,42808213	0,42815356

70	0,42598486	0,42598623	0,42598796	0,42598895	0,42612778
80	0,42429554	0,42429632	0,42429808	0,4242993	0,42452015
90	0,42290011	0,42290043	0,4229015	0,42290223	0,42321005
100	0,42171088	0,42171199	0,42171365	0,42171479	0,422119
110	0,42068767	0,42068942	0,42069233	0,42069428	0,42120152
120	0,41981092	0,41981305	0,4198169	0,4198194	0,42041327
130	0,41904366	0,4190454	0,41904885	0,41905173	0,41973137
140	0,41836954	0,4183718	0,41837571	0,41837861	0,41914401
150	0,41776888	0,4177716	0,41777534	0,41777831	0,41862753

Şekil 4.4'te 100 km/saat hız değerinde Boya-1 pürüzlülük seviyesinde kullanılmış olan paket programın aerodinamik direnç katsayısı değeri için yakınsama değeri görülmektedir.

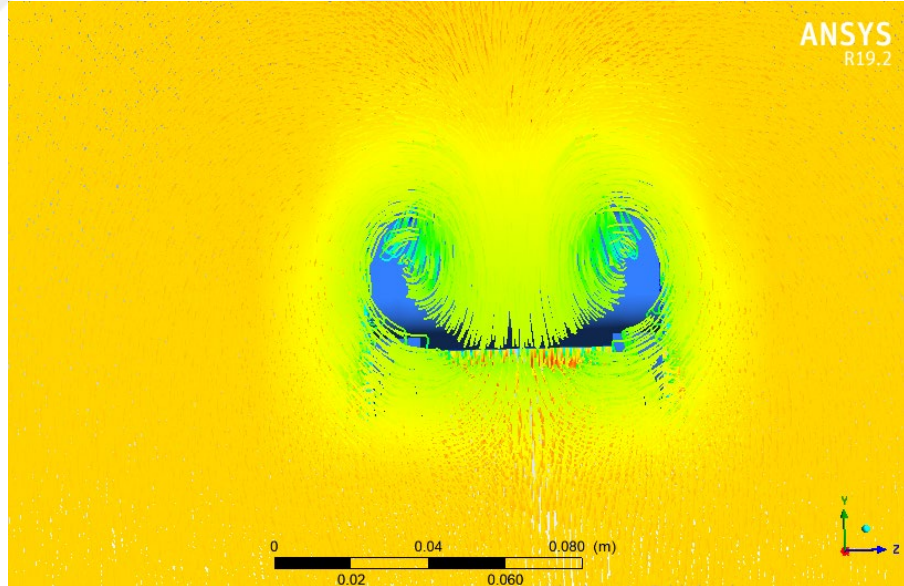


Şekil 4. 4 : Aerodinamik direnç katsayısı yakınsama görünümü



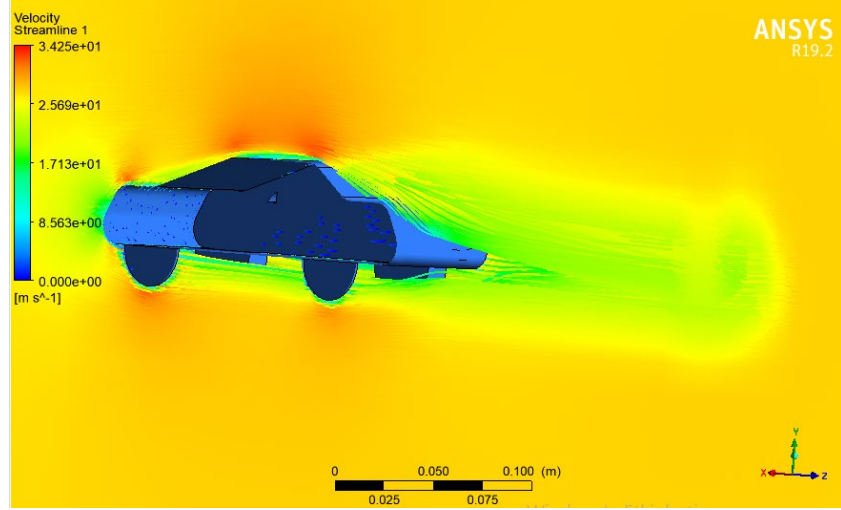
Şekil 4. 5 : 100 km/saat hızda Boya-1 pürüzlülük değerinde araç etrafında oluşmuş hız akış çizgileri

Şekil 4.5'te görüleceği üzere araç üzerindeki hız akış çizgileri gösterilmiştir. Bununla birlikte taşıtın arka tarafındaki hız düşüşleri de görülmektedir. 100 km/saat hızda ve Boya-1 pürüzlülük seviyesinde gerçekleştirilmiş olan simülasyonda, Şekil 4.6'da



Şekil 4. 6 : 100 km/saat hızda Boya-1 pürüzlülük değerinde araç arkasında oluşmuş olan girdaplar

belirtildiği üzere taşıtın arka tarafında girdaplar oluştuğu görülmektedir. Şekil 4.7'de ise ilgili perspektif görünümüne yer verilmiştir.

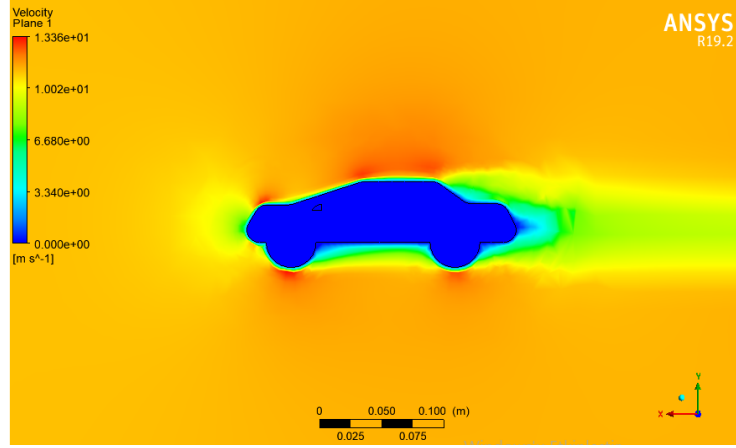


Şekil 4. 7 : 100 km/saat hızda Boya-1 pürüzlülük değerinde araç araç arkasında oluşmuş olan hız akış çizgileri

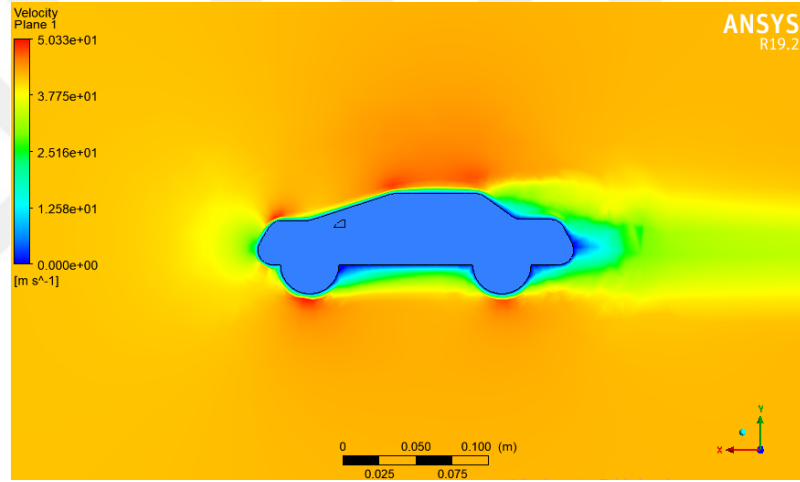
4.3. Hız Değerleri

Yapılmış olan Aerodinamik direnç kuvveti ve aerodinamik direnç katsayısı hesaplamaları ile birlikte, tasarıma ait hız görüntüleri de oluşturulmuştur. Buna göre Şekil 4.8'de görüleceği üzere tasarım etrafındaki hız dağılımı verilmiştir.

Görüleceği üzere aracın ön tamponu üzeri ve altında ve arka bagaj üzeri ayrılma bölgesinde, giriş hızı normal şartlarda 40 km/saat olmasına rağmen hızın 45 km/h hızlara kadar çıkmış olduğu görülmektedir.



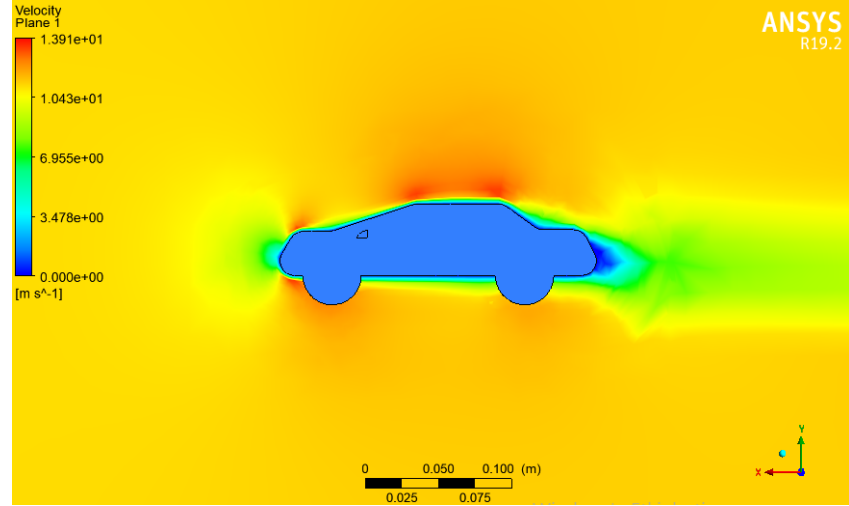
Şekil 4. 8 : 40 km/saat hızda düşük seviyede boya pürüzlülüğüne sahip kaportaya sahip araç etrafında oluşmuş hız görüntüleri



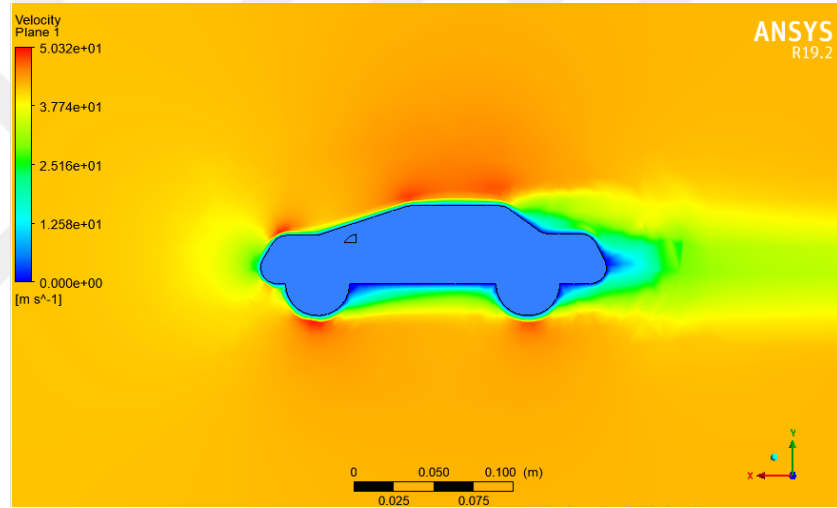
Şekil 4. 9 : 150 km/saat hızda düşük seviyede boya pürüzlülüğüne sahip kaportaya sahip araç etrafında oluşmuş hız görüntüleri

Şekil 4.9’da görüleceği üzere araç hızı 150 km/saat olan rüzgar tüneline ön kaporta alt ve üstünde ve arka bagaj üzeri ayrılma bölgesinde hızların 160 – 170 km/saat hızlara kadar çıktığı görülmektedir.

Aynı durumlar çalışmamızda maksimum pürüzlülük olarak değerlendirilen floropolimer kaplama için de geçerlidir. Floropolimer kaplamaya ait 40 km/saat ve 150 km/saat hızlarda hız görüntüleri Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



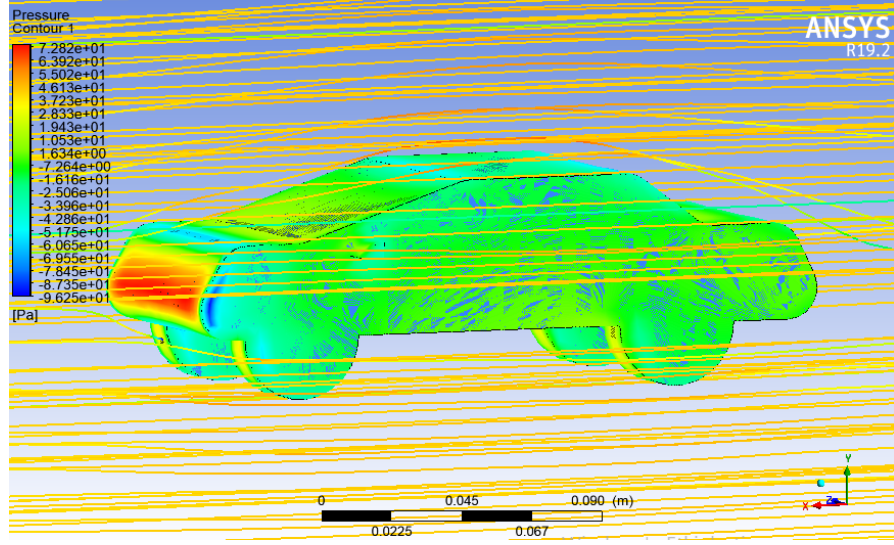
Şekil 4. 10 : 40 km/saat hızda floropolimer kaportaya sahip bir aracın etrafında yer alan hız değerleri



Şekil 4. 11 : 150 km/saat hızda floropolimer kaportaya sahip bir aracın etrafında yer alan hız değerleri

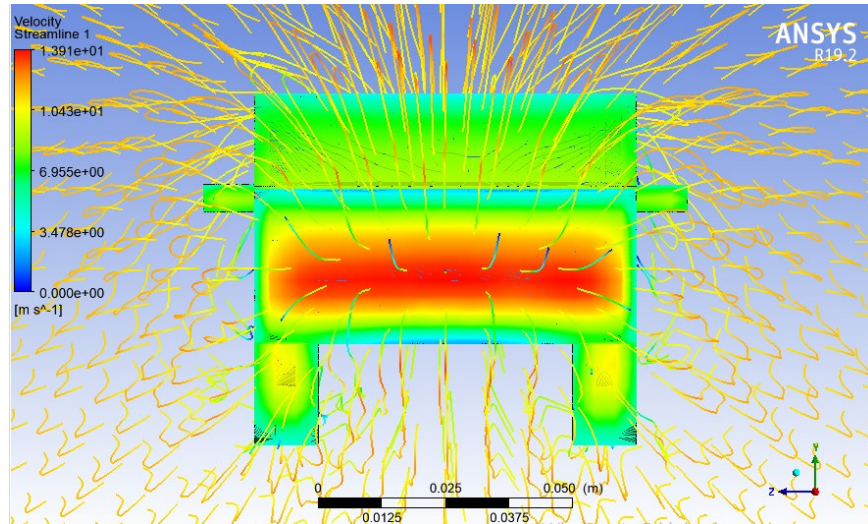
4.4. Basınç Değerleri

Yapılmış olan analizler neticesinde hız değerleri ile birlikte tasarlanmış olan araç üzerine etkiyen basınç değerleri de ortaya koyulmuştur. Şekil 4.12’de verilmiş olan görselde görüleceği üzere 40 km/saat hızda ilerleyen düşük pürüzlülükte boya kaplamasına sahip kaportaya sahip bir aracın kaportasına etkiyen basınç değerleri ile birlikte araç çevresinde oluşan hava akış çizgileri görünmektedir.

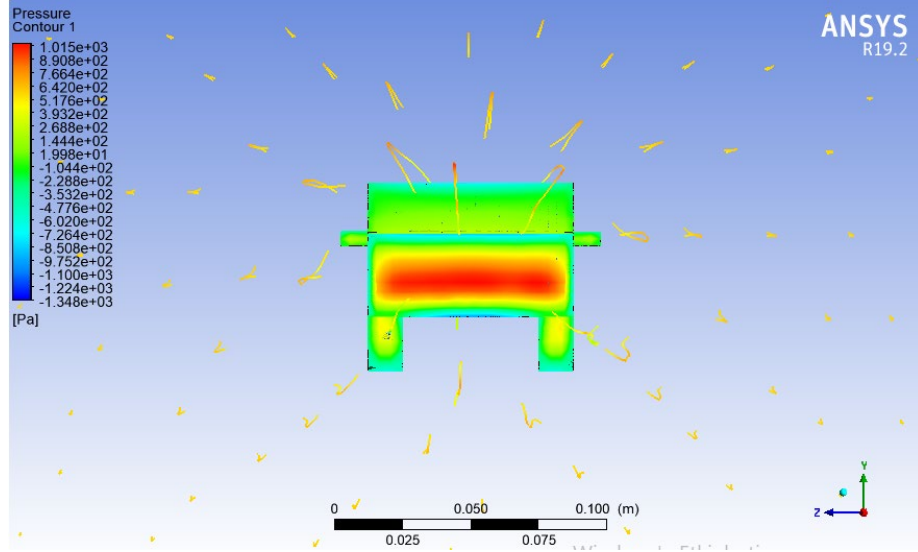


Şekil 4. 12 : 40 km/saat hızda düşük pürüzlülükte boya ile kaplanmış kaportaya sahip bir aracın kaportasına etkiyen basınç değerleri ve hız akış çizgileri

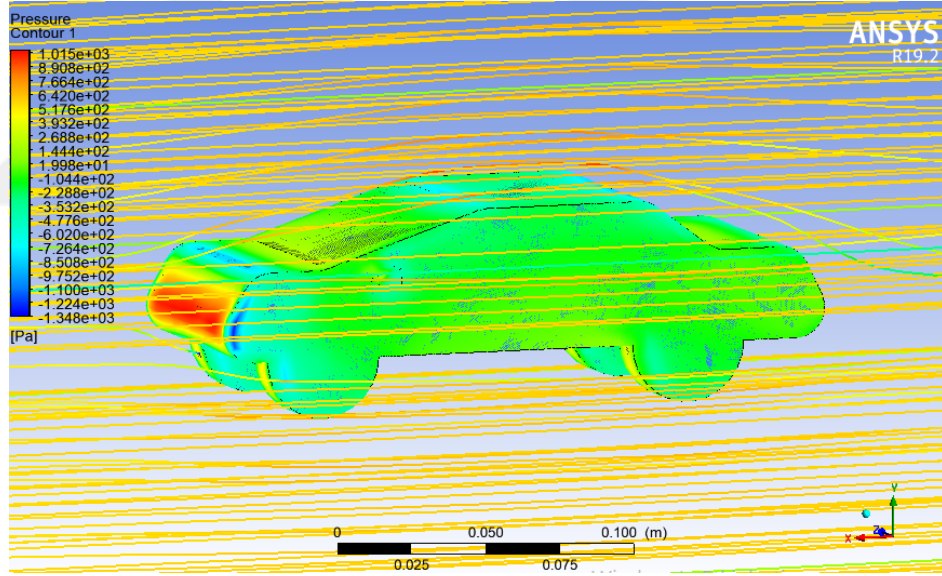
Şekil 4.13'den de daha net görüleceği üzere ön kaporta ve tekerlek üzerinde yer alan basınç kuvvetleri ve hız çizgileri verilmiştir. Taşıt üzerinde en fazla basıncın ön tampon bölgesine geldiği net olarak görülmektedir. Bu bölge üzerinde gerçekleştirilecek açılal iyileştirmeler; taşıtın karşılaşıacağı direnç kuvvetlerinin azalması hususunda önem arz edecektir. Aynı pürüzlülükte boya malzemesine sahip aracın üzerine 150 km/saat hızda etki eden basınç kuvvetlerinin görünümü de Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te görülmektedir.



Şekil 4. 13 : 40 km/saat hızda düşük pürüzlülükte boya ile kaplanmış kaportaya sahip bir aracın kaportasına etkiyen basınç değerleri ve hız akış çizgileri – ön görünüm



Şekil 4. 14 : 150 km/saat hızda düşük pürüzlülükte boya ile kaplanmış kaportaya sahip bir aracın kaportasına etkiyen basınç değerleri ve hız akış çizgileri – ön görünüm (Boya – 1)



Şekil 4. 15 : 150 km/saat hızda düşük pürüzlülükte boya ile kaplanmış kaportaya sahip bir aracın kaportasına etkiyen basınç değerleri ve hız akış çizgileri (Boya – 1)

4.5. Yüzey Pürüzlülüğünün Yakıt Tüketimine Etkisi

Yapılmış olan çalışmayı daha iyi ortaya koymak amacıyla örnek bir hesaplama yapılmıştır. Buna göre düşük pürüzlülükte boya kullanımı ve floropolimer kaplama

kullanımı arasında, yıllık ve on yıllık kullanım ile pürüzlülük değerlerinin etkisi neticesinde ortaya çıkacak maliyet farkı hesaplanmıştır.

Ortalama 80 km/saat hız ile yılda ortalama 20.000 km yol yapan bir araç için yapılmış olan hesaplama ait girdi verileri ve ortaya çıkartılmış sonuçlar aşağıda verilmiştir(Çengel; Cimbala, 2015).

Yapılacak olan hesaplama için;

Hava yoğunluğu: $1,225 \text{ kg/m}^3$ (Çengel; Cimbala, 2015).

Benzin yoğunluğu: $800 \text{ kg/m}^3 = 0,8 \text{ kg/L}$ (Çengel; Cimbala, 2015).

Benzinin alt ısı değeri: 44.000 kJ/kg (Çengel; Cimbala, 2015).

Motorun toplam verimi: 30% (Çengel; Cimbala, 2015).

80 km/saat hızda düşük pürüzlülükte aerodinamik direnç kuvveti: $255,825716 \text{ N}$

80 km/saat hızda floropolimer aerodinamik direnç kuvveti: $255,960668 \text{ N}$

Toplam direnç= Aerodinamik direnç kuvveti x Yol
 $(255,825716 \text{ N}) \times (20000 \text{ km/yıl}) = 5116514,32 \text{ kJ/yıl}$

Toplam enerji= Toplam direnç/Motorun toplam verimi
 $(5116514,32 \text{ kJ/yıl}) / 0,3 = 17055047,73 \text{ kJ/yıl}$

Yakıt miktarı= (Toplam enerji/Yakıt alt ısı değeri) / Yakıt yoğunluğu
 $(17055047,73/44000)/0,8 = 484,5184 \text{ L/yıl}$

Azalma oranı= $(F_{cd} \text{ Floropolimer} - F_{cd} \text{ Boya}) / F_{cd} \text{ Floropolimer}$
 $(255,960668 \text{ N} - 255,825716 \text{ N}) / 255,960668 \text{ N} = 0,00052724$

Yakıttaki Azalma= Azalma oranı x Yakıt miktarı
 $0,00052724 \times 484,5184 \text{ L/yıl} = 0,2555 \text{ L/yıl}$

Görüleceği üzere boyanın pürüzlülük derecesini düşürerek ya da yüksek pürüzlülükte kaplamalar tercih etmeyerek yılda araç başına ortalama 0,2555 L yakıt tasarruf etmek mümkündür. Bu miktar araç başına düşük olarak görünmekle birlikte büyük şehir

trafiklerinde kullanılan araçlar için toplam olarak düşünüldüğünde ciddi rakamlar oluşturmaktadır. Mayıs ayı sonu itibariyle 2020 yılı için Türkiye’de kayıtlı binek araç sayısı 12.683.707 adettir(<http://www.tuik.gov.tr/UstMenu.do?metod=temelist> adresinden Temmuz 18, 2020 tarihinde alınmıştır.).Bu araçlar için toplam hesaplama yapıldığında;

Tasarruf edilecek olan yakıt miktarı = Araç sayısı x Yakıttaki azalma
 $12683707 \times 0,2555 \text{ L/yıl} = 3240687.139 \text{ L}$ olarak hesaplanmıştır.



BÖLÜM 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Ansyes 19.2 paket programı içerisinde yer alan tasarım aracı, Design Modular programı kullanılarak tasarlanmış 1/20 ölçekli örnek araç modeli; Ansyes 19.2 paket programı içerisinde uygun ağ yapısı oluşturularak daha önceden belirlendiği üzere 40 km/saat – 150 km/saat hız aralıklarında, beş farklı kaporta pürüzlülük seviyesi ve bu seviyelere ait pürüzlülük değerleri kullanılarak, k-omega türbülans akış modeli ile aerodinamik açıdan incelenmiştir. Yapılmış olan incelemeler neticesinde; aerodinamik direnç kuvveti (F_{cd}), aerodinamik direnç katsayısı (C_d) ve minimum - maksimum basınç değerleri hem sayısal olarak hem de ekran görüntüleri vasıtasıyla ortaya koyulmuştur.

Günümüzde araç kaportalarının boya kalınlıkları; markalara göre değişmek ile birlikte ortalama 90 mikron ile 250 mikron arasında bir değer almaktadır. Bu değerler boya kalınlıklarını vermekte olup boya pürüzlülükleri ile ilgili ifadeler değildirler. Boya pürüzlülükleri, otomotiv firmaları için birer katalog verisi değildir. Aynı hattan çıksa bile boya pürüzlülük değerleri boya makinesi kondüsyonu, hava sıcaklığı, boyanan malzemenin sıcaklığı vb. parametreler nedeniyle değişmektedir. Boya pürüzlülük değerleri (R_a) genel olarak bu çalışmada belirtilmiş olan 0,2 mikron ile 1.5 mikron arasında değişmektedir. Bununla birlikte boyalar üzerinde yapılmış olan kaplamalara göre yüzey pürüzlülükleri artmakta ya da azalmaktadır. Zamanın da boya üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Zaman geçtikçe boya üzerindeki pürüzlülükler artmakta, yaptırılacak olan pasta işlemlerinin kalitesine göre de artmakta ya da azalmaktadır.

Bu çalışmada temel amaç; kaporta üzerine uygulanan kaplama malzemelerinin, aerodinamik direnç kuvvetleri ve aerodinamik direnç katsayısı üzerindeki etkilerini gözlemlemek ile birlikte bu etkilerin ortaya çıkartacağı olası maddi sonuçları değerlendirmektir. Bununla birlikte boya pürüzlülüğü gibi metrenin altıda biri büyüklüklerde oluşan pürüzlülük değerlerinin, uzun vadede ve artan nüfus ve dolayısıyla

artan araç sayısı koşullarında hangi boyutlara ulaştığını ortaya koymak, çalışmanın bir diğer amacı olarak düşünülebilir.

Metrenin (m), 1/1000000 değerinde farklılıklar arz eden bu pürüzlülük değerleri, tahmin edileceği üzere aerodinamik direnç kuvveti ve aerodinamik direnç katsayısı değerlerini etkilemiştir. Üç farklı boya pürüzlülüğü (düşük, orta, yüksek), floropolimer kaplama ve pürüzsüz kaporta üzerinde gerçekleştirilen bu analizlerde, aerodinamik direnç kuvveti üzerinden yapılmış olan hesaplamalar neticesinde virgülden sonra ikinci veya üçüncü basamakta gerçekleşen kuvvet değişimleri; maksimum pürüzlülükteki floropolimer kaplama ve sıfır pürüzlülükteki pürüzsüz kaplama arasında ortalama 0,205%'lik bir fark oluşturmaktadır.

Aerodinamik direnç katsayılarında ise yüksek pürüzlülükte boya ile düşük pürüzlülükte boya kaplaması arasında virgülden sonra dördüncü veya beşinci basamaklarda gerçekleşen değişimler olmakla birlikte; floropolimer kaplama ile sıfır pürüzlülük değerinde fark, virgülden sonra üçüncü basamakta oluşmaya başlamaktadır. Buna göre düşük boya pürüzlülük değeri baz alındığında orta derece pürüzlülük değerine göre aerodinamik direnç katsayısında %0,000612529'lik bir artış, yüksek derece pürüzlülük değerine göre aerodinamik direnç katsayısında %0,00104783'lik bir artış ve floropolimer pürüzlülük değerine göre aerodinamik direnç katsayısında %0,091195826'lik bir artış meydana gelmiştir.

Tüm bu veriler ışığında taşıtlarda kullanılan kaplama malzemeleri; günümüz koşullarında genel olarak kullanılan metrenin 1/1000000 küçüğü (mikron) değerlerinin çok fazla üzerine çıkılmadığı koşullarda çok ciddi maddi zararlar ortaya çıkartmamaktadır. Bununla birlikte otomobiller dışında geniş yüzey alanına sahip ve yılda daha fazla ortalama yol yapan otobüsler, kamyonlar veya tırlar göz önünde bulundurulduğunda bu farklılıklar artacaktır.

Ortaya koyulmuş olan basınç görsellerinden görüleceği üzere taşıtlar üzerine en fazla etkiyen basınçlar ön tampon bölgesinde oluşmaktadır. Oluşan bu basıncın etkisi ile artan aerodinamik direnç kuvvetleri ve aerodinamik direnç katsayıları; ön tampon bölgesine

verilecek açısai eğimler vasıtasıyla azaltılarak etkiyecek olan kuvvetlerin azaltılması sağlanabilmektedir.



KAYNAKÇA

- Aka, H. (2003). Otomobillerin Aerodinamik Karakteristiğinin Bir Rüzgâr Tünelinde İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 32-45.
- Asım, T., Ubbi, K., Mishra, R. and Nsom, B. 2019. Effect of surface roughness on the aerodynamic performance of an articulated truck-trailer assembly. Presented at the 24th Congrès Français de Mécanique (CFM 2019), 2019
- Bayraktar I., Landman D., Baysal O. Experimental and computational investigation of ahmed body for ground vehicle aerodynamics J Commer Vehicles, 110 (2001), pp. 321-331
- Beccaria, M., Buresti, G., Ciampa, A., Lombardi, G., Gentzsch, W., Paap, H.-G. and Vicere, A., "High-performance road-vehicle optimised aerodynamic design: Application of parallel computing to car design", Future Generation Computer Systems, 15, 3, (1999) 323.
- Bijlani B., Dr. Pravin P. Rathod, Prof. Arvind S. Sorthiya, Experimental and Computational Drag Analysis of Sedan and Square-Back Car, International Journal of Advanced Engineering Technology, 4(2013) 63-65.
- Çağan, M., Taşıt aerodinamik özelliklerinin sayısal yöntemlerle incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilimdalı, İstanbul, (2000).
- Çakmak, M.A., "Kara Taşıtlarının Aerodinamik Bakımdan İncelenmesi", Mühendis Makina, 41, 489, (2000), 35.
- Çengel, Y., Cimbala, J., M., Akışkanlar Mekaniği: Temelleri ve Uygulamaları, 2015

Gilhaus, A, "The influence of cab shape on air drag of trucks", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 9, 77-87, 1981

Hiroyuki Ozawa, Sumio Nishikawa and Dai Higashida, "Development of aerodynamics for a solar race car", JSAE Review, 19, 4, (1998) 343.

HJ. Streitberger, KF. Dossel, Automotive Paints and Coatings, 2008, 135.G. Roussillon Spoilers SAE Technical Paper 770389.

<http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/ot/yuzey.puruzlulugu.pdf> adresinden alınmıştır.

<http://www.tuik.gov.tr/UstMenu.do?metod=temelist> adresinden alınmıştır.

Hucho, W., Savran, G., "Aerodynamics of Road Vehicles", 25: 485-537, 1993

In Wikipedia, Özgür Ansiklopedi.

[https://tr.wikipedia.org/wiki/Aerodinamik_\(otomobil\)](https://tr.wikipedia.org/wiki/Aerodinamik_(otomobil)) adresinden Haziran 21, 2020'de alınmıştır

Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Volume 9, Issues 1–2 November 1981 Pages 33-48

Keleş. U, Yan Rüzgar Etkisi Altındaki Ağır Ticari Araçlarda Aerodinamik Direnç Katsayısının HAD ile Analizi, 2015

Kieffer, W., Moujaes, S., and Armbya, N., "CDF study of section characteristics of formula mazda race car wings", Mathematical and Computer Modelling, 43, 11-12, (2006) 1275.

Kolnerova, M., Sobotka, J., Solfronk, P., Doubek, P., 'PROPERTIES OF METAL SHEETS SURFACES BY MANUFACTURING OF CAR BODY STAMPINGS', Technical University of Liberec, Faculty of Mechanical Engineering, 22.-24.5.2007, Hradec nad Moravici

Department of Engineering Technology – Section of Metal Forming and Plastics

- Krajnović, S. and Davidson L., "Influence of floor motions in wind tunnels on the aerodynamics of road vehicles", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93, 9, (2005) 677.
- Launder, B.E., and Spalding, D.B. (1974). The Numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods Applied Mechanics and Engineering*, 3: 269-289.
- M. Ö. Arslan, Ticari Taşıt Aerodinamiğinin Temelleri ve Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2005
- M. Vazirian, A. Neville, M. Penna, Surface Inorganic Scale Formation in Oil and Gas Industry: As Adhesion and Deposition Processes, 2015
- Mallick K., A Critical Evaluation on the Role of Aerodynamic and Canopy–Surface Conductance Parameterization in SEB and SVAT Models for Simulating Evapotranspiration: A Case Study in the Upper Biebrza National Park Wetland in Poland, 2014
- McCallen, R., Flowers, D., Owens T.D., Owens, J., Browand, F., Hammache, M., Leonard, A., Brady, M., Salari, K., Rutledge, W., Ross, J., Storms, B., Heineck, J. T., Driver, D., Bell, J., Walker, S., and Zilliac, G. (2000). Aerodynamic drag of heavy vehicles class 7-8: simulation and benchmarking. SAE Technical Paper Series, 01-2209, 1-19.
- Öngüner, E., Aerodynamische Formgebung eines Personenkraftwagens unter Berücksichtigung des Masskonzepts, Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Uni-Stuttgart, 2009
- Rohatgi, U.S. (2012). Methods of Reducing Vehicle Aerodynamic Drag. Paper presented at ASME 2012 Heat Transfer Conference Puerto Rico, USA.
- Sachin T., Amba G., Prasad R., Computational analysis of intercity bus with improved aesthetics and aerodynamic performance on Indian roads July-Sept Int. J. Adv. Eng. Technol. (2011), pp. 103-109

SAE, (2013). Guidelines for Aerodynamic Assessment of Medium and Heavy Commercial Ground Vehicles Using Computational Fluid Dynamics, J2966 SEP2013, Warrendale.

Schenkel F 1977 The Origins of Drag and Lift Reductions on Automobiles with Front and Rear

Solmaz, H. (2010). Değişik Araç Modellerinin Rüzgâr Direnç Katsayılarının Bir Rüzgâr Tünelinde Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 43-47.

Unaune, S., V., Sovani, S., D., ve Kim, S., E., (2005). “Aerodynamics of a Generic Ground Transportation System: Detached Eddy Simulation”, SAE International, 45-60.

Xiao, QI., and Yong-qi, Liu. (2011). Experimental and Numerical Studies of Aerodynamic Performance of Trucks, Journal of Hydrodynamics, 23,6, 752-758.

ÖZGEÇMİŞ

Anıl Okan, [REDACTED] doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Osmaniye'nin Kadirli ilçesinde tamamladı. 2009 yılında Kadirli Gülten Ali Zıyan Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2010 yılında başladığı Gazi Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü'nü 2015 yılında bitirdi. 2017 yılında Sakarya Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2016 yılında Türk ve Ziraat Makineleri A.Ş. firmasında Pazarlama Uzmanı olarak kariyerine başladı akabinde 2020 yılında T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na bağlı Türk Patent ve Marka Kurumu'nda Sınai Mülkiyet Uzman Yardımcısı olarak devam etti. Halen Türk Patent ve Marka Kurumu'nda Sınai Mülkiyet Uzman Yardımcısı olarak çalışmaktadır.