



**ÇEKİCİ VE ÇEKİCİ RÖMORK KOMBİNASYONLARINDA
AERODİNAMİK DİRENÇLERİN İNCELENMESİ**

Cihan BAYINDIRLI

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2015

Cihan BAYINDIRLI tarafından hazırlanan “ÇEKİCİ VE ÇEKİCİ RÖMORK KOMBİNASYONLARINDA AERODİNAMİK DİRENÇLERİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. M. Sahir SALMAN

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu Onaylıyorum

İkinci Danışman: Doç. Dr. Y. Erkan AKANSU

Makina Mühendisliği Enerji Anabilim Dalı, Niğde Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu Onaylıyorum

Başkan: Prof. Dr. Selim ÇETİNKAYA

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu Onaylıyorum

Üye: Prof. Dr. Adnan SÖZEN

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu Onaylıyorum

Üye: Prof. Dr. Duran ALTIPARMAK

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu Onaylıyorum

Üye: Prof. Dr. Atilla KOCA

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu Onaylıyorum

Üye: Prof. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon Kocatepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu Onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 3/2/2015

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

.....
Cihan BAYINDIRLI

3/2/2015

ÇEKİCİ VE ÇEKİCİ RÖMORK KOMBİNASYONLARINDA AERODİNAMİK DİRENÇLERİN İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Cihan BAYINDIRLI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2015

ÖZET

Bu çalışmada, rüzgâr tüneli içine yerleştirilmiş 1/32 ölçekli çekici ve römorktan oluşan bir ağır vasıta aracın modeli üzerinde 6 farklı hızda yüzey basıncı ve kuvvet ölçümü gerçekleştirilmiştir. Çekicinin rüzgâr tüneli testleri 59 000 - 317 000 Reynolds sayılarında yapılmıştır. Çekici römork kombinasyonunun rüzgâr tüneli testleri ise 156 000 - 844 000 Reynolds sayılarında yapılmıştır. Çekici ve römork üzerindeki basınç katsayısı (C_P) dağılımı ve aerodinamik direnç katsayıları (C_D) deneysel olarak tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda kinematik benzerlik sağlanmış ve blokaj etkileri ihmal edilmiştir. Deneysel çalışmalarda dinamik benzerlik şartında Reynolds sayısı bağımsızlığı kullanılmıştır. Çekiciye römork ilavesinin aerodinamik direnç katsayısına etkisi belirlenmiştir. Yüzey basıncı ve kuvvet ölçümleri aynı deney şartlarında Fluent® programında sayısal olarak yapılmış ve çekici römork etrafındaki akış görüntülemeleri elde edilmiştir. Çekici ve çekici römork kombinasyonunun aerodinamik direnç katsayıları (C_D) sayısal olarak hesaplanmıştır. Deneysel çalışma sonuçları sayısal çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak sayısal çalışma sonuçları doğrulanmıştır. Basınç katsayısı dağılımları ve akış görüntülemeleri sonucunda çekici römork üzerinde aerodinamik direnç oluşturan bölgeler tespit edilmiş ve pasif akış kontrolü yöntemleri ile aerodinamik iyileşme elde edilmiştir. Model 1 aracında spoiler yapısı iyileştirilerek % 11,37, model 2 aracında spoiler ile birlikte römork arka uzantısı eklenerek % 12,88, model 3 aracında spoiler ve römork arka uzantısı ile birlikte yan rüzgâr kırıcı eklenerek % 20,11 oranında aerodinamik iyileşme elde edilmiştir. Model 4 aracında ise model 2 aracının çekici römork arası körükle kapatılarak toplam % 23,85 oranında aerodinamik iyileşme elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 708.1.001
Anahtar Kelimeler : Rüzgâr tüneli, ağır vasıta, aerodinamik direnç katsayısı (C_D),
Fluent®, pasif akış kontrolü, türbülanslı akış
Sayfa Adedi : 133
Danışman : Prof. Dr. Mustafa Sahir SALMAN
İkinci Danışman : Doç. Dr. Yahya. Erkan AKANSU

THE INVESTIGATION OF AERODYNAMIC DRAGS FOR TRUCK AND TRUCK TRAILER COMBINATIONS

(Ph. D. Thesis)

Cihan BAYINDIRLI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2015

ABSTRACT

In this study, at 6 different speed surface pressure and force measurement were measured on a heavy vehicle model consisted of truck and in 1/32 scale trailer placed wind tunnel. The wind tunnel tests were made for trailer on 59 000 - 317 000 Reynolds numbers. The wind tunnel tests of truck trailer combination were made on 156 000 - 844 000 Reynolds numbers. The pressure coefficient (C_p) distribution and aerodynamic drag coefficient (C_D) on truck and trailer were experimentally determined. In experimental studies, kinematic similarity was provided and blocking effects were neglected. In the dynamic similarity condition, the independence of Reynolds number was used in the experimental studies. The effect of the addition of trailer to the truck on aerodynamic drag coefficient was determined. The surface pressure and force measurements were performed as numerically in the same experimental conditions at Fluent® software, and the flow visualization around of the truck and the trailer was obtained. The aerodynamic drag coefficients of the combination of the truck and the truck trailer were numerically calculated. Numerical study results were verified as experimental study results were being compared with experimental study results. The pressure coefficient distributions and the regions forming aerodynamic resistance on the truck trailer at the end of the flow visualization were determined and aerodynamic improvement was obtained with passive flow control methods. As the structure of spoilers was being improved on model 1 truck trailer, % 11,37 aerodynamic improvements, adding trailer rear extension with spoiler on model 2 truck trailer, % 12,88 aerodynamic improvements and trailer spoiler with trailer rear extension by adding side wind breaker on model 3 truck trailer, % 20,11 aerodynamic improvements were obtained. As between truck and trailer of model 2 was being closed with articulated, totally % 23,85 improvements were obtained on model 4 truck trailer.

Science Code : 708.1.001

Key Words : Wind tunnel, heavy vehicle, aerodynamic drag coefficient (C_D), Fluent®, passive flow control, turbulent flow

Page Number : 133

Supervisor : Prof. Dr. Mustafa Sahir SALMAN

Co-Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Yahya Erkan AKANSU

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında desteğini, nezaketini esirgemeyen, danışman hocam Prof. Dr. Mustafa Sahir SALMAN'a, değerli fikirleri ile tezime katkıda bulunan ikinci tez danışmanım Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU hocama, görüş öneri ve eleştirileri ile teze katkılarını sunan tez izleme komitesinin saygıdeğer üyeleri Prof. Dr. Selim ÇETİNKAYA ve Prof. Dr. Adnan SÖZEN'e teşekkürlerimi iletirim. Ayrıca çizim datalarının elde edilmesinde yardımlarını esirgemeyen Deniz ÇOLAK'a sayısal çözümleme konusunda birikimlerini benimle paylaşan Araştırma Görevlisi arkadaşım Vedat DEMİRTAŞ'a, tez savunması jürisi olarak katkılarını sunan Prof. Dr. Duran ALTIPARMAK, Prof. Dr. Atilla KOCA ve Prof. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN hocalarıma teşekkürlerimi iletirim. Deneysel çalışmalarında tüm olanaklarını benimle paylaşan mensubu olmaktan gurur duyduğum Niğde Üniversitesine ve Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölüm Başkanlığına ve akışkanlar mekaniği laboratuvarında çalışan her kademedeki arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim. Çalışmalarım boyunca desteğini ve güvenini esirgemeyen kıymetli eşime ve çocuklarıma dualarını esirgemeyen aileme anneme, babama ve öğrencilerime teşekkürlerimi iletirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
2.1. Deneysel ve Sayısal Olarak Yapılan Çalışmalar	3
2.2. Taşıtların Aerodinamik Yapılarının İyileştirilmesine Yönelik Yapılan Çalışmalar	8
3. MATEMATİKSEL FORMÜLASYON.....	13
3.1. Genel Denklemler	13
3.1.1. Süreklilik denklemi.....	13
3.1.2. Momentum denklemi	14
3.1.3. Navier – Stokes denklemleri.....	15
3.2. Türbülansın Modellenmesi	17
3.2.1. Türbülanslı akış için zaman ortalama denklemeler	17
3.2.2. Çeşitli türbülans modelleri.....	22
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	29
4.1. Benzerlik	29
4.1.1. Geometrik benzerlik.....	29
4.1.2. Kinematik benzerlik.....	30

	Sayfa
4.1.3. Dinamik benzerlik.....	33
4.2. Rüzgâr Tüneli Deneyleri.....	33
4.2.1. Rüzgâr tüneli.....	34
4.2.2. Model tanımı.....	35
4.3. Basınç Ölçüm Deneyleri.....	36
4.3.1. Modelin hazırlanması.....	36
4.3.2. Basınç dönüştürücü.....	38
4.3.3. Basınç dönüştürücülerin kalibrasyonu.....	38
4.3.4. Model aracın rüzgâr tüneline yerleştirilmesi	39
4.3.5. Basınç katsayılarının (C_p) belirlenmesi	40
4.3.6. Reynolds sayısı bağımsızlığı.....	41
4.3.7. Çekici üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı.....	41
4.3.8. Çekici römork üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı	42
4.4. Kuvvet Ölçüm Deneyleri	43
4.4.1. Katı durağan zemine etki eden kuvvet değerleri.....	44
4.4.2. Çekiciye etki eden kuvvet değerleri.....	45
4.4.3. Çekici ve römorka etki eden kuvvet değerleri	47
5. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR MEKANİĞİ (HAD) İLE ÇÖZÜM.	51
5.1. Çizim Datasının Elde Edilmesi.....	52
5.1.1. Üç boyutlu optik tarama.....	52
5.1.2. Modelleme	54
5.1.3. Kalite kontrol	55
5.2. Aerodinamik Analiz.....	57
5.2.1. Sayısal çözümlemede çizim datasında yapılan kabuller	58

	Sayfa
5.3. Sayısal Çözümlemeler	59
5.4. Sayısal Çözümlemelerde Ağdan Bağımsızlık.....	60
5.5. Çekicinin Sayısal Çözümlemeleri.....	61
5.5.1. Tasarım modülü (Design modeler)	61
5.5.2. Ağ yapısı oluşturma (Meshing)	62
5.5.3. Sayısal çözümleme özelliklerinin belirlenmesi (Setup).....	63
5.5.4. Sonuç (Result).....	66
5.6. Çekicinin Sayısal Çözümleme Sonuçları.....	66
5.6.1. 10 m/s serbest akış hızındaki çözümleme sonuçları	66
5.6.2. 15 m/s serbest akış hızındaki çözümleme sonuçları	70
5.6.3. 20 m/s serbest akış hızındaki çözümleme sonuçları	72
5.6.4. 27 m/s serbest akış hızındaki çözümleme sonuçları	75
5.7. Çekici ve Römorkun Sayısal Çözümlemeleri	79
5.7.1. Tasarım modülü (Design modeler)	79
5.7.2. Ağ yapısı oluşturma (Meshing)	80
5.7.3. Sayısal çözümleme özelliklerinin belirlenmesi (Setup).....	81
5.7.4. Sonuç (Result).....	84
5.8. Çekici Römorkun Çözümleme Sonuçları	84
5.8.1. 10 m/s serbest akış hızındaki çözümleme sonuçları	84
5.8.2. 15 m/s serbest akış hızındaki çözümleme sonuçları	87
5.8.3. 20 m/s serbest akış hızındaki çözümleme sonuçları	89
5.8.4. 27 m/s serbest akış hızındaki çözümleme sonuçları	92
6. PASİF AKIŞ KONTROL YÖNTEMLERİ İLE AERODİNAMİK İYİLEŞTİRME	97
6.1. Pasif Akış Kontrolü.....	97

	Sayfa
6.1.1. Model 1 (spoiler) ile aerodinamik iyileştirme	97
6.1.2. Model 2 (spoiler ve römork arka uzantısı) ile aerodinamik iyileştirme.....	99
6.1.3. Model 3 (spoiler, römork arka uzantısı ve yan rüzgar kırıcı) ile aerodinamik iyileştirme	100
6.1.4. Model 4 (spoiler, römork arka uzantısı ve körük) ile aerodinamik iyileştirme	101
6.2. Model 1 Aracında Elde Edilen Aerodinamik İyileştirmenin Sayısal Analizi.....	103
6.2.1. 10 m/s serbest akış hızındaki çözümleme sonuçları	103
6.2.2. 15 m/s serbest akış hızındaki çözümleme sonuçları	106
6.2.3. 20 m/s serbest akış hızındaki çözümleme sonuçları	107
6.2.4. 27 m/s serbest akış hızındaki çözümleme sonuçları	109
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	113
KAYNAKLAR	119
EKLER.....	123
Ek-1 Belirsizlik Analizi	124
Ek-2 Aerodinamik bakımdan iyileştirilmiş modellerin akış görüntüleri	130

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Benzin motorlu 1200 kg'lık bir otomobilde 90 km/h hızda yakıt enerjisinin % (yüzde) olarak kullanımı.....	7
Çizelge 4.1. Model aracın özellikleri ve boyutları.....	36
Çizelge 4.2. Basınç dönüştürücülerin kalibrasyon değerleri	38
Çizelge 4.3. Katı durağan zemine etki eden kuvvet değerleri	45
Çizelge 4.4. Çekiciye etki eden kuvvet değerleri ve C_D katsayıları	45
Çizelge 4.5. Çekici römork kombinasyonuna etki eden kuvvet değerleri ve C_D katsayıları.....	47
Çizelge 5.1. Çekiciye ait çizim datasının kalite kontrolündeki hatalar.....	56
Çizelge 5.2. Römorka ait çizim datasının kalite kontrolündeki hatalar	56
Çizelge 5.3. Çizelge 27 m/s hızda yapılan ağdan bağımsızlık testi sonuçları	60
Çizelge 5.4. Çekicinin sayısal çözümlemesinde kullanılan özellikler	64
Çizelge 5.5. Çekicinin sayısal çözümlemesinde relaksasyon kriterleri	64
Çizelge 5.6. Çekicinin sayısal çözümlemesinde havanın özellikleri	64
Çizelge 5.7. Çekicinin sayısal çözümlemesinde interpolasyon seçenekleri	64
Çizelge 5.8. Çekici römorkun sayısal çözümlemesinde kullanılan özellikler	82
Çizelge 5.9. Çekici römorkun sayısal çözümlemesinde relaksasyon kriterleri	82
Çizelge 5.10. Çekici römorkun sayısal çözümlemesinde havanın özellikleri	83
Çizelge 5.11. Çekici römorkun sayısal çözümlemesinde interpolasyon seçenekleri.....	83

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Taşıt Ön cam formuna göre değişen direnç kuvveti ve C_D (Sarı, 2007)	6
Şekil 2.2. Ağır vasıtalarda basınç direncinin yüksek olduğu bölgeler (Wood ve Bauer, 2003)	9
Şekil 2.3. Aerodinamik iyileştirme yapılmış çekici römork modeli (Ogburn ve Ramroth, 2007)	9
Şekil 2.4. SUV aracının sayısal çözümlemesinde ağ dağılımı (Wahba ve diğerleri, 2012)	11
Şekil 3.1. Bir akışkan elemanın yüzeylerindeki gerilme bileşenleri.....	14
Şekil 4.1. Prototip araç.....	29
Şekil 4.2. 1/32 ölçekli model araç.....	29
Şekil 4.3. Rüzgâr tüneline yol simülasyonu için uygulanabilecek çeşitli yöntemler (Şahin,2008).....	31
Şekil 4.4. Plexiglass durağan katı zemin ve airfoil ayaklar	31
Şekil 4.5. Çekici ön yüzey alanı ve blokaj	32
Şekil 4.6. Çekici ve römork ön yüzey alanı ve blokaj	32
Şekil 4.7. Rüzgâr tüneli ve deney düzeneğinin genel görünümü.....	34
Şekil 4.8. Kuvvet-moment ölçüm sisteminin genel görünümü.....	35
Şekil 4.9. Basınç prizlerinin çekici ve römork üzerindeki yerleri	36
Şekil 4.10. Basınç prizlerinin çekici üzerindeki yerleri	36
Şekil 4.11. Basınç prizlerinin römork üzerindeki yerleri.....	37
Şekil 4.12. Kelebek seti ve römork üzerine konumlandırılması	37
Şekil 4.13. Basınç dönüştürücü.....	37
Şekil 4.14. Terazisi alınmış deney düzeneği.....	39
Şekil 4.15. Başın ölçüm düzeneği genel görünüşü	39
Şekil 4.16. Tarayıcı vana	40
Şekil 4.17. Deneysel çalışmalarda Reynolds bağımsızlığı grafiği.....	41

Şekil	Sayfa
Şekil 4.18. Çekici üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı.....	42
Şekil 4.19. Çekici römork üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı.....	43
Şekil 4.20. ATI yük hücresi programının ara yüzü.....	44
Şekil 4.21. Hıza göre çekicinin C_D katsayısı grafiği.....	46
Şekil 4.22. Reynolds sayısına göre çekicinin C_D katsayısı grafiği	46
Şekil 4.23. Çekicinin akış görüntülemesi	47
Şekil 4.24. Hıza göre çekici ve römorkun C_D katsayısı grafiği	48
Şekil 4.25. Reynolds sayısına göre çekici ve römorkun C_D katsayısı grafiği.....	48
Şekil 4.26. Çekici römorkun akış görüntülemesi.....	49
Şekil 4.27. Çeşitli sınıflardaki taşıtların aerodinamik direnç katsayıları (Şahin,2008) ..	50
Şekil 5.1. Prototip çekici ve römork	51
Şekil 5.2. 1/32 ölçeğinde çekici ve römork model aracı.....	51
Şekil 5.3. Spreyle boyanmış model araç	52
Şekil 5.4. Üç boyutlu optik tarama cihazı.....	52
Şekil 5.5. Model aracın üç boyutlu taranması.....	53
Şekil 5.6. Üç boyutlu taranan çekici aracın noktasal ağ yapısı.....	53
Şekil 5.7. Üç boyutlu taranan römorkun noktasal ağ yapısı	53
Şekil 5.8. Çekicinin çizim dataları.....	54
Şekil 5.9. Römorkun çizim dataları	55
Şekil 5.10. Çekicinin kalite kontrolünde tanımlanan yüzeyler	56
Şekil 5.11. Römorkun kalite kontrolünde tanımlanan yüzeyler	57
Şekil 5.12. Çekicinin kalıp boşluğu	57
Şekil 5.13. Çekici römorkun kalıp boşluğu	58
Şekil 5.14. Basitleştirilmiş çizim dataları	58

Şekil	Sayfa
Şekil 5.15. Ağ bağımsızlığı grafiği	61
Şekil 5.16. Çekicinin "design modeler" ara yüzündeki görünümü	62
Şekil 5.17. Çekicinin "meshing" ara yüzündeki görünümü	63
Şekil 5.18. Çekicinin "setup" ara yüzündeki görünümü	65
Şekil 5.19. Çekici C_D sürüklenme kuvveti katsayısı grafiği ve yakınsama	65
Şekil 5.20. Çekicinin "result CFD-Post" ara yüzündeki görünümü.....	66
Şekil 5.21. 10 m/s ($Re=117\ 000$) hızda çekiciye etki eden kuvvet değeri sonucu	67
Şekil 5.22. 10 m/s ($Re=117\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden rüzgar hızının vektörel olarak gösterilişi.....	67
Şekil 5.23. 10 m/s ($Re=117\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden rüzgâr hızının streamline olarak gösterilişi.....	68
Şekil 5.24. 10 m/s ($Re=117\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden rüzgar hızının streamline (perspektif) olarak gösterilişi	69
Şekil 5.25. 10 m/s ($Re=117\ 000$) hızdaki çekici üzerindeki basınç katsayısı (C_P) dağılımı	69
Şekil 5.26. 15 m/s ($Re=176\ 000$) hızda çekiciye etki eden kuvvet değeri sonucu	70
Şekil 5.27. 15 m/s ($Re=176\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden rüzgar hızının vektörel olarak gösterilişi.....	70
Şekil 5.28. 15 m/s ($Re=176\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden rüzgar hızının streamline olarak gösterilişi.....	71
Şekil 5.29. 15 m/s ($Re=176\ 000$) hızda çekici üzerindeki basınç katsayısı (C_P) dağılımı	71
Şekil 5.30. 20 m/s ($Re=235\ 000$) hızda çekiciye etki eden kuvvet değeri sonucu	72
Şekil 5.31. 20 m/s ($Re=235\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden rüzgâr hızının vektörel gösterilişi.....	72
Şekil 5.32. 20 m/s ($Re=235\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden rüzgâr hızının streamline (perspektif) olarak gösterilişi.....	73
Şekil 5.33. 20 m/s ($Re=235\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden rüzgâr hızının streamline olarak gösterilişi.....	73
Şekil 5.34. 20 m/s ($Re=235\ 000$) hızda çekici üzerindeki basınç katsayısı (C_P) dağılımı	74

Şekil	Sayfa
Şekil 5.35. 20 m/s ($Re=235\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden basıncın contour şeklinde gösterilişi.....	74
Şekil 5.36. 27 m/s ($Re=317\ 000$) hızda çekiciye etki eden kuvvet değeri sonucu	75
Şekil 5.37. 27 m/s ($Re=317\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi.....	76
Şekil 5.38. 27 m/s ($Re=317\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden rüzgâr hızının streamline olarak gösterilişi	76
Şekil 5.39. 27 m/s ($Re= 317\ 000$) 000 hızda çekici üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı	77
Şekil 5.40. Reynolds sayısına göre çekicinin sayısal C_D katsayısı grafiği	77
Şekil 5.41. Hıza göre çekicinin sayısal C_D katsayısı grafiği.....	78
Şekil 5.42. Reynolds sayısına göre çekicinin sayısal-deneysel C_D katsayısı grafiği	78
Şekil 5.43. Hıza göre çekicinin sayısal-deneysel C_D katsayısı grafiği	79
Şekil 5.44. Şekil 5.44. Çekici römorkun “design modeler” ara yüzündeki görünümü...	79
Şekil 5.45. Çekici römorkun "meshing" ara yüzündeki görünümü	81
Şekil 5.46. Çekici römorkun "setup" ara yüzündeki görünümü	81
Şekil 5.47. Çekici römorkun C_D sürüklenme kuvveti katsayısı grafiği ve yakınsama	83
Şekil 5.48. Çekici römorkun "result CFD-Post" ara yüzündeki görünümü	83
Şekil 5.49. 10 m/s ($Re= 312\ 000$) hızda çekici römorka etki eden kuvvet değeri sonucu	84
Şekil 5.50. 10 m/s ($Re=312\ 000$) hızdaki çekici ve römorka etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi.....	85
Şekil 5.51. 10 m/s ($Re= 312\ 000$) hızdaki çekici ve römorka etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi (perspektif).....	86
Şekil 5.52. 10 m/s ($Re= 312\ 000$) hızdaki çekici ve römorka etki eden rüzgâr hızının streamline olarak gösterilişi	86
Şekil 5.53. 10 m/s ($Re= 312\ 000$) hızda çekici ve römork üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı	87
Şekil 5.54. 15 m/s ($Re= 469\ 000$) hızda çekici römorka etki eden kuvvet değeri sonucu	88

Şekil	Sayfa
Şekil 5.55. 15 m/s ($Re = 469\,000$) hızdaki çekici ve römorka etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi.....	88
Şekil 5.56. 15 m/s ($Re = 469\,000$) hızdaki çekici ve römorka etki eden rüzgâr hızının streamline olarak gösterilişi.....	89
Şekil 5.57. 15 m/s ($Re = 469\,000$) hızda çekici ve römork üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı	89
Şekil 5.58. 20 m/s ($Re = 625\,000$) hızda çekici römorka etki eden kuvvet değeri sonucu	90
Şekil 5.59. 20 m/s ($Re = 625\,000$) hızdaki çekici ve römorka etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi.....	90
Şekil 5.60. 20 m/s ($Re = 625\,000$) hızdaki çekici ve römorka etki eden rüzgâr hızının streamline olarak gösterilişi.....	91
Şekil 5.61. 20 m/s ($Re = 625\,000$) hızda çekici ve römork üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı	91
Şekil 5.62. 27 m/s ($Re = 844\,000$) hızda çekici römorka etki eden kuvvet değeri sonucu	92
Şekil 5.63. 27 m/s ($Re = 844\,000$) hızdaki çekici ve römorka etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi.....	93
Şekil 5.64. 27 m/s ($Re = 844\,000$) hızdaki çekici ve römorka etki eden rüzgâr hızının streamline olarak gösterilişi	93
Şekil 5.65. 27 m/s ($Re = 844\,000$) hızda çekici ve römork üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı	93
Şekil 5.66. Reynolds sayısına göre çekici römorkun sayısal C_D katsayısı grafiği.....	94
Şekil 5.67. Hıza göre çekici römorkun sayısal C_D katsayısı grafiği	94
Şekil 5.68. Reynolds sayısına göre çekici ve römorkun sayısal-deneysel C_D katsayısı grafiği.....	95
Şekil 5.69. Hıza göre çekici ve römorkun sayısal-deneysel C_D katsayısı grafiği	96
Şekil 6.1. Model 1 aracı	98
Şekil 6.2. Model 1 aracında yapılan aerodinamik iyileştirme	98
Şekil 6.3. Model 2 aracı	99
Şekil 6.4. Model 2 aracında yapılan aerodinamik iyileştirme	99

Şekil	Sayfa
Şekil 6.5. Model 3 aracı	100
Şekil 6.6. Model 3 aracında yapılan aerodinamik iyileştirme	101
Şekil 6.7. Model 4 aracı	102
Şekil 6.8. Model 4 aracında yapılan aerodinamik iyileştirme	102
Şekil 6.9. Model 1 aracının çizim datası	103
Şekil 6.10. 10 m/s ($Re=312\ 000$) hızda model 1 aracına etki eden kuvvet değeri sonucu	104
Şekil 6.11. 10 m/s hızdaki model 1 aracına etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi	104
Şekil 6.12. 10 m/s ($Re=312\ 000$) hızdaki model 1 aracına etki eden rüzgâr hızının streamline olarak gösterilişi	105
Şekil 6.13. 10 m/s ($Re=312\ 000$) hızdaki model 1 aracı üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı	105
Şekil 6.14. 15 m/s ($Re= 469\ 000$) hızda model 1 aracına etki eden kuvvet değeri sonucu	106
Şekil 6.15. 15 m/s ($Re= 469\ 000$) hızdaki model 1 aracına etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi	106
Şekil 6.16. 15 m/s ($Re= 469\ 000$) hızdaki model 1 aracına etki eden rüzgâr hızının streamline olarak gösterilişi	107
Şekil 6.17. 15 m/s ($Re= 469\ 000$) hızda model 1 aracı üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı	107
Şekil 6.18. 20 m/s ($Re=625\ 000$) hızda model 1 aracına etki eden kuvvet değeri sonucu	108
Şekil 6.19. 20 m/s ($Re=625\ 000$) hızdaki model 1 aracına etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi	108
Şekil 6.20. 20 m/s ($Re=625\ 000$) hızdaki model 1 aracına etki eden rüzgâr hızının streamline olarak gösterilişi	109
Şekil 6.21. 20 m/s ($Re=625\ 000$) hızda model 1 aracı üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı	109
Şekil 6.22. 27 m/s ($Re= 844\ 000$) hızda model 1 aracına etki eden kuvvet değeri sonucu	110

Şekil	Sayfa
Şekil 6.23. 27 m/s ($Re = 844\,000$) hızdaki model 1 aracına etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi.....	110
Şekil 6.24. 27 m/s ($Re = 844\,000$) hızdaki model 1 aracına etki eden rüzgâr hızının streamline olarak gösterilişi	111
Şekil 6.25. 27 m/s ($Re = 844\,000$) hızda model 1 aracı üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı	111
Şekil 6.26. Hıza göre model 1 aracının karşılaştırmalı sayısal-deneysel C_D katsayısı grafiği.....	112
Şekil 6.27. Reynolds sayısına göre model 1 aracının sayısal-deneysel C_D katsayısı grafiği.....	112

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
α	Açı, °
A	Araç ön yüzeyi izdüşümü alanı, m ²
C_D	Sürüklenme kuvvet katsayısı
C_{Dp}	Basınç kaynaklı sürüklenme kuvvet katsayısı
C_{Df}	Sürtünme kaynaklı sürüklenme kuvvet katsayısı
C_L	Kaldırma kuvvet katsayısı,
C_{Lp}	Basınç kaynaklı kaldırma kuvvet katsayısı
C_{Lf}	Sürüklenme kaynaklı kaldırma kuvvet katsayısı
C_p	Basınç katsayısı
F_D	Sürüklenme kuvveti, N
F_L	Kaldırma kuvveti, N
H	Model araç yüksekliği, m
W	Model araç genişliği, m
L	Model araç karakteristik uzunluk, m
P	Kare model yüzey basıncı, Pa
U_∞	Serbest akış hızı, m/s
R	Belirsizliği belirlenecek parametre
Re	Reynolds sayısı
U	Serbest akış yönündeki anlık hız, m/s
u_i	Her bir değişkene ait belirsizlik değeri
W	Model araç genişliği, m

Simgeler	Açıklamalar
ν	Kinematik viskozite, m^2/s
ρ	Yoğunluk, kg/m^3
D_h	Hidrolik çap, m
$C1, C2, C1\varepsilon, C2\varepsilon, C3\varepsilon$	Türbülans model sabitleri
D_e, D_w, D_n, D_s	Difüzyon katsayıları, kg/ms
e	Anlık deformasyon, m
E	Ortalama deformasyon, m
$e_{xx}, e_{yy}, e_{zz},$	Doğrusal uzama deformasyon elemanları
$e_{xy}, e_{yz}, e_{xz},$	Doğrusal kayma deformasyon elemanları
G	Türbülans kinetik enerji üretimi, W/m^3
i, j	x ve y yönleri indisi
l	Türbülans uzunluk skalası, m
l_m	Karışım uzunluğu (m)
k	Türbülans kinetik enerji, m^2/s^2
$k(t)$	Anlık kinetik enerji, m^2/s^2
K	Ortalama kinetik enerji, m^2/s^2
P	Basınç indisi
P	Zaman ortalamalı basınç, N/m^2
R	Ana gerinim ve ilave terimler
rms	Kök-ortalama-kare indisi
S	Kaynak terimi
t	Zaman, s
u	Anlık hız vektörü, m/s
u	Anlık hız vektörünün x bileşeni

Simgeler	Açıklamalar
v	Anlık hız vektörünün y bileşeni
w	Anlık hız vektörünün z bileşeni
d/dt	Toplam türev
ϑ	Türbülans hız skalası, m/s
Π_{ij}	Basınç-gerinim etkileşmesinden kaynaklanan aktarım
w	Çalkantı hız vektörünün z bileşeni, m/s
U	Ortalama hızın x bileşeni, m/s
V	Ortalama hızın y bileşeni, m/s
W	Ortalama hızın z bileşeni, m/s
w	Yüzey, duvar indisi
Y	Yutulma
x, y, z	Kartezyen koordinat sistemi indisi
δ	Sınır tabak kalınlığı, m
δ_{ij}	Kronecker delta
ε	Türbülans kinetik enerji yutulması, m^2/s^3
φ	Genel diferansiyel denklemde herhangi bir değişken
ϕ	Herhangi bir akış değişkeni
ϕ'	Herhangi bir akış değişkeninin çalkantılı bileşeni
Ψ	Herhangi bir akış değişkeninin ortalama bileşeni
κ	Von Karman sabiti
λ	Viskozite sabiti
μ	Laminar viskozite, Pa.s
μ_{eff}	Efektif viskozite, Pa.s
μ_t	Türbülans viskozite, Pa.s

Simgeler**Açıklamalar** **ν** Kinematik viskozite, m^2/s^2 **$k \sigma, \epsilon \sigma$**

Türbülans model sabitleri

 Ω^- Vortisite, s^{-1} **$\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}$**

Normal gerilmeler, N

 $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$

Kayma gerilimleri, N

 τ_w

Duvar kayma gerilimi, N

 ω Açısal hız, s^{-1} **Γ** Difüzyon katsayısı, $kg/m.s$ **Kısaltmalar****Açıklamalar****LES**

Large Eddy Simulation

RNG

Renormalization-Group

HAD

Hesaplamaalı akışkanlar mekaniği

SUV

Sport utility vehicle (Spor kullanım aracı)

S

Spoiler

S+RAU

Spoiler ve römork arka uzantısı

S+RAU+YRK

Spoiler, römork arka uzantısı ve yan rüzgar kırıcı

S+RAU+K

Spoiler, römork arka uzantısı ve körük

1. GİRİŞ

Hava içerisinde hareket eden cisimlerin hava ile etkileşimlerini inceleyen bilim dalı aerodinamik olarak adlandırılır. Motorlu kara taşıtlarının aerodinamik yapıları aracın performansını, yakıt tüketimini, ivmelenme özelliklerini, yol tutuş özelliklerini, çevre kirliliğini, ses gürültüsünü ve konforunu önemli derecede etkilemektedir. Bunların yanında motorun, dişli kutusu ve frenlerin soğutulmasının, iç mekânın ısıtılmasının ve havalandırılmasının aerodinamik yapı ile doğrudan ilişkisi vardır. Bunun için taşıt etrafındaki akışın özellikleri iyi bilinmeli ve buna paralel olarak uygun tasarımlar gerçekleştirilmelidir.

Taşıtlara hareketleri esnasında çeşitli kuvvetler etki etmektedir. Taşıtlara etki eden bu kuvvetleri, hareketi sağlayan kuvvetler ve bu harekete karşı koyan kuvvetler olmak üzere ikiye ayırabiliriz. Taşıta hareketi sağlayan kuvvet, motor tarafından üretilip, tekerlek tahrik kuvveti olarak kullanılır. Taşıtın hareketine karşı koyan kuvvetler ise hava, transmisyon, yokuş, yuvarlanma ve ivme dirençlerinden oluşmaktadır.

Taşıtlara etkiyen direnç kuvvetlerinden en önemlisi özellikle yüksek hızlarda araç performansını ve yakıt tüketimini önemli derecede etkileyen aerodinamik dirençtir. Ortalama 100 km/h hızda hareket eden bir taşıt gücünün % 50-70'ini aerodinamik direnç kuvvetlerini yenmek için harcar (Modi, Hill, ve Yokomimizo, 1995 ve Çakmak, 2000). Aerodinamik direnç kuvveti hızın karesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu yüzden özellikle seyirlerinin büyük bölümünü şehir dışında yüksek hızlarda gerçekleştiren ve yılda çok fazla kilometre yapan ağır vasıtalar için aerodinamik direnç çok önemli bir husus haline gelmektedir.

Motorlu taşıt üreticileri, taşıt performansını ve motor tarafından üretilen gücü arttırmaya yönelik Ar-Ge çalışmalarına büyük önem verirken diğer taraftan aracın hava içerisinde hareketi sırasında aerodinamik yapısından kaynaklanan kayıpları azaltma yollarını aramışlar ve aramaya da devam etmektedirler. Üretici firmalar bu konudaki Ar-Ge çalışmalarına son derece önem vermektedir. Özellikle otomotiv sektöründe daha geniş yer hedefleyen üreticiler araçlarının ekonomikliğini artırırken, ekonomikliği artırmada en büyük engellerden biri olan aerodinamik direnci azaltmak için bu tür araştırmalara çok büyük yatırım yapmaktadırlar.

“Taşıtlarda motorca üretilen güç, hava direnci ve sistem içindeki kayıpları dengeler. Düşük hızlarda hava direnci diğer kayıplar yanında oldukça düşük mertebelerdedir. Ancak hız 30-40 km/h değerine ulaşıncaya hava direnci önem kazanır. Bunun sebebi hava direncinin hızın karesiyle doğru orantılı olarak artmasıdır” (Demircioğlu, 2007).

Yüksek hızlarda hareket eden bir kara ulaşım veya yük aracının C_D katsayısı % 3 düşürüldüğünde yakıt tüketimi yaklaşık % 1 azalmaktadır. Türkiye enerjiye yılda 60 milyar dolar harcamakta ve bunun büyük bir kısmını petrol türevi yakıtlar oluşturmaktadır. Bu durum araçların yakıt tüketimlerinin düşürülmesi ve petrol ihracatına harcanan milli gelirin azaltılmasını daha da önemli kılmaktadır. Ulaşım giderlerinin düşürülmesi tüm ürünlerin maliyetini azaltacağından bu durum her sektörü ilgilendiren konu haline almaktadır.

Bu çalışmanın amacı yük taşımacılığında çok yoğun bir şekilde kullanılan çekici römorkların aerodinamik yapılarını incelemek ve pasif akış kontrol yöntemleri ile aerodinamik yapılarında iyileşme sağlamaktır. Çekici ve römorklar şehirlerarası yollarda yüksek hızlarda uzun mesafede yük taşımaktadırlar. Bu yüzden araçlarda elde edilecek aerodinamik iyileşme bu durumda çalışan toplam araç sayısı düşünüldüğünde daha da önemli bir hal almaktadır.

Bu çalışmanın içeriğinde çekici römorklarda aerodinamik direnç oluşturan bölgeler sayısal ve deneysel yöntemlerle tespit edilmiş, pasif akış kontrol yöntemi ile elde edilebilecek aerodinamik iyileşme potansiyelini ortaya konulmuştur. Bu çalışmanın diğer çalışmalarından farkı tasarlanan pasif akış kontrolü parçalarının özel olarak tasarlanmış ve konumlandırılmış olmasıdır. Pasif akış ile elde edilecek iyileşme miktarı 4 modelde adım adım belirlenmiş olup elde edilen aerodinamik iyileşmenin literatüre ve sanayiye katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Taşıt aerodinamiği ile ilgili literatürde yapılmış deneysel ve sayısal çalışmalar aşağıda alt başlıklar olarak ele alınmıştır. Ayrıca aerodinamik iyileştirmelerle ilgili kullanılan pasif yöntemleri içeren çalışmalarda sunulmuştur.

2.1. Deneysel ve Sayısal Olarak Yapılan Çalışmalar

Schenkel (1977) aracın önüne ve arkasına ilave edilen spoilerin direnç ve kaldırma kuvvetleri üzerindeki etkilerini 3/8 ölçekli bir model üzerinde rüzgâr tüneline incelemiştir. Spoilerler yapılarının uygun geometrik biçimde olmaları halinde aerodinamik direnç katsayısının azaldığını ifade etmiştir.

Gilhaus (1981) kamyon kabin geometrisinin ve eklenen rüzgâr yansıtıcısının aerodinamik direnci %14 azalttığını tespit etmiştir.

Modi ve diğerleri (1995)'ne göre Kuzey Amerika'da taşımacılıkta kullanılan ağır vasıtalar yılda 130 000-150 000 km mesafe kat etmekte ve 70-100 km/h hız aralıklarında güçlerinin % 50-70'ini aerodinamik direnç kuvvetlerini yenmek için harcamaktadırlar.

Çakmak (2000), saatteki hızı 100 km olan bir binek otomobilin gücünün % 60'ını aerodinamik direnç kuvvetini, % 20'sini tekerlek sürtünme kuvvetini, % 20'sini de hareketi önleyen diğer kuvvetleri yenmek için harcadığını ifade etmiştir. Aracın aerodinamik özelliklerinin iyileştirilmesi ile yakıt sarfiyatından önemli ölçüde tasarruf sağladığını ifade etmiştir.

Wood ve Bauer (2003), yaptıkları çalışmada ideal koşullar altında aerodinamik olarak tasarlanmış bir çekici ve römorkun aerodinamik direnç katsayısının 0,6-0,7 aralığında, aerodinamik olarak tasarlanmayan çekici römorkun sürüklenme katsayısının 0,7-0,9 olduğunu tespit etmişlerdir.

Aka (2003) 1/16 ölçekli bir binek otomobil modeli üzerinde deneyler gerçekleştirmiştir. Bunun için bir kuvvet ölçüm düzeneği tasarlamıştır. Düzenekteki 3 adet yaprak tip yük

hücresi ile simetrik akış koşullarında model üzerindeki sürüklenme direnci kuvveti ve kaldırma kuvvetleri ölçülmüş ve yunuslama momentini belirlemiştir. Ayrıca, modelin aerodinamik karakteristiğini gösteren boyutsuz katsayıların hesaplanmasından sonra, ölçümlerdeki belirsizlikler sayısal olarak incelenmiş ve sonuçların bu oranda tekrarlanabilir olduğu görülmüştür. Araç üzerindeki basınç katsayısı dağılımı tespit etmiş ve C_D katsayısını 0,31 hesaplamıştır. Bu değerin gerçek değer ile arasında % 5 fark olduğunu ifade etmiştir.

Desai, Channiwala ve Nagarsheth (2008), Adrene olarak adlandırdıkları hibrit bir aracın aerodinamik yapısını sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmaları açık devre tipi ve test alanı 30 cm x 30 cm x 100 cm olan rüzgâr tüneline yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda araç üzerindeki C_p (basınç katsayısı) dağılımını ve C_D katsayısını tespit etmişlerdir.

Ha, Shigeru, ve Yasuaki (2009) tarafından yapılan çalışmada pick-up aracının arka kabin geometrisinin aerodinamik yapıya etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Araç üzerindeki akış yapısını PIV yöntemi ile gözlemlemiş değişik boyutlardaki kabin yapılarının C_D katsayılarına olan etkilerini tespit etmişlerdir.

Solmaz (2010) tarafından yapılan çalışmada Reynolds sayısı bağımsızlığından faydalanılarak düşük hızlı bir rüzgâr tüneline üç değişik otomobil modeli ile bir otobüs modelinin aerodinamik direnç katsayıları belirlemiştir. 28 m/s hızda 1/24 ölçeğindeki BMW X5 E53, Alfa Romeo 156 ve Wolkswagen New Beetle modelleri ile yapılan deneyler sonucunda aerodinamik direnç katsayılarını sırasıyla % 14, % 12,5 ve % 7,8 hata oranları ile bulmuştur. Deneysel çalışmaları kesit odası 292x292 mm olan bir rüzgar tüneline gerçekleştirmiştir.

Gutierrez, Basil, Croll, ve Rutlege (1996) tarafından yapılan çalışmada Sandia GTS modelinin, çizim datalarını Catia yazılımında oluşturup, Star-CCM+ programıyla geometri üzerine sonlu eleman ağı kurup ve daha sonra analizi gerçekleştirilmiştir. Böylece GTS geometrisi etrafında ve çözüm alanındaki farklı kesitlerde akış, akım çizgileri, hız vektörleri, hız ve basınç dağılımları incelenmiş ve geometrinin basınç, aerodinamik direnç katsayıları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçları deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır.

Perzon, Janson, ve Höglin (1999) 3/10 ölçekli bir çekici ve römork modelinin deneysel sonuçlarını standart k- ϵ , RNG k- ϵ , Non-Linear Eddy Viscosity ve Reynolds Stress Transport (RSM) model türbülans modellerinin kullanıldığı STARCD ve FLUENT/UNS paket programları yardımı ile elde edilen verilerle karşılaştırmışlar, RNG k- ϵ ve Non-Linear Eddy Viscosity modelleri ile durma noktalarındaki basıncın daha doğru tayin edilebildiğini belirlemişlerdir. Verilerin doğruluğunu arttırmak için çözüm ağını arttırmak gerektiğini tespit etmişlerdir.

Perzon ve Davidson (2000) STARCD paket programı ile standart k- ϵ , non-lineer ikinci derece k- ϵ ve non-lineer üçüncü derece k- ϵ türbülans modellerinde transient simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Direnç kuvveti bütün modeller için hesaplanmış ve deneysel verilerden oldukça önemli miktarda sapmalar olduğu tespit edilmiştir. Transient veya transient olmayan k- ϵ modellerinin direnci çok yüksek belirlediğini ifade etmişlerdir.

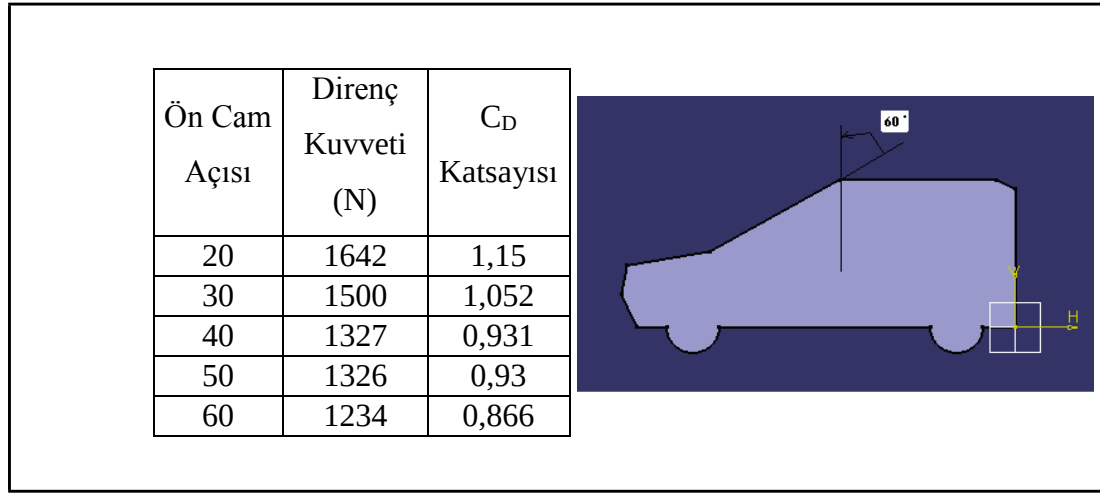
Lokhande, Sovani ve Khalighi (2003) pikap modelin aerodinamik yapısını Fluent® paket programı ile LES ve RNG k- ϵ türbülans modellerini kullanarak incelemişlerdir. Taşıta gelen akışın durma noktası olarak ön tamponun hemen üst kısmı olduğunu tespit edilmiştir.

Krajnovic ve Davidson (2005) eğimli arka geometriye sahip basitleştirilmiş taşıt üzerinden akışa hareketli bir zeminin etkisini ele almıştır. Yapılan incelemede hareketli zeminin C_D katsayısını % 8 C_L katsayısını %16 azalttığı tespit edilmiştir. Türbülans modeli olarak LES (Large Eddy Simulation) kullanılmıştır.

Apisakkul ve Kittichaikarn (2005) dört değişik yükseklikte konumlandıkları arka spoilerin bir yarış arabasının C_D ve C_L katsayılarına etkilerini Fluent® paket programında k- ϵ türbülans modeli ile hesaplamışlardır. Spoilerin konumlandırıldığı yükseklik arttıkça C_D katsayısında iyileşme tespit etmişlerdir.

Fares (2006) Power FLOW 4.0 programında Lattice Boltzman metoduna göre Ahmed modelini referans alarak yaptığı çalışmada 40 m/s hızda taşıtın arkasındaki yaklaşık 30° kritik açıyı temsilen 25° ve 35° 'lik eğim açıları için çözümleme yapmış, aracın C_D ve C_L katsayılarını karşılaştırmıştır. Durgun olmayan (unsteady) akışta farklı girdap ve ayrılma davranışları analiz sonuçlarının deneysel verilerle tutarlı olduğunu ifade etmiştir.

Sarı (2007) Renault Kangoo marka hafif ticari araç modellenmiş, nümerik yaklaşık çözüm yöntemi olan sonlu hacimler yöntemi ile Fluent® programında analiz edilerek, sanal koşullarda aracın ön formuna etkiyen hava direnci ve C_D direnç katsayıları bulunmuş, bu verilerin yakıt sarfiyatına olan etkileri araştırılmıştır. Şekil 2.1’de aracın ön cam hücum açısının aerodinamik dirence etkisini hesaplamalı akışkanlar mekaniğinde (HAD) hesaplamıştır. Ön cam hücum açısı arttıkça aerodinamik direnç katsayısı azaldığını ifade etmiştir.



Şekil 2.1. Taşıt Ön cam formuna göre değişen direnç kuvveti ve C_D (Sarı, 2007)

Desai ve diğerleri (2008) tarafından yapılan sayısal çalışmada aracın çizim datasını Gambit programında oluşturup Fluent® programında çözümleme yapmışlardır. Aracın C_D katsayısını deneysel yöntemle 0,4, sayısal yöntemle 0,55 olarak tespit etmişlerdir. Reynolds sayısına göre sayısal ve deneysel çalışma sonuçların çok farklı olduğunu bu farkın iterasyon sayısı ve çizim datasının geometrik benzerliğinin yetersizliğinden kaynaklanabileceğini ifade etmişlerdir.

Şahin (2008) tarafından yapılan çalışmada Sandia Ulusal Laboratuvarında geliştirilen 1/8 ölçekli bir kamyon modelini aerodinamik analizini gerçekleştirmiştir. Fluent® programında k-ε türbülans modeli ile dört gensel ve üç gensel ve çok gensel ağ yapıları oluşturmuştur. Dört gensel ağ sayısı 101 648 üç gensel ağ sayısı 189 539, çok gensel ağ sayısı ise 206 169’dır.Çözümlemeleri 900 iterasyonda yapmıştır. Aracın C_D katsayısını sırası ile 0,52, 0,549 ve 0,561 olarak tespit etmiştir.

Demircioğlu (2007) katı modeli çizilen bir F1 aracının C_D ve C_L katsayısını ANSYS CFX programında k- ϵ türbülans modeli ile tespit etmiştir. F1 aracının C_D katsayısını 0,516 ve C_L katsayısını 0,425 olarak hesaplamıştır. Bu değerlerin gerçek değerden çok uzak bir sonuç olduğunu bunun nedenin geometrik benzerliğin tam sağlanamaması, ağ sayısının yetersiz olduğu ve çözümleme yapan bilgisayar kapasitesinin yetersiz olduğundan kaynaklandığını ifade etmiştir.

Çizelge 2.1’ de 90 km/h hızda bir otomobilin enerjisinin dağılımı verilmiştir. Aerodinamik direnç katsayısının azaltılabilmesi için araç formları gün geçtikçe aerodinamikteki adıyla damla formuna benzetilmeye çalışılmaktadır. “En ideal şekil ise su damlası şekli olarak bilinen yatay eksene göre simetrik şekle aittir. Damla formunun özelliği doğrusal akımda bilinen en az bozuntuya sebep olan yapı olmasıdır” (Demircioğlu, 2007).

Çizelge 2.1. Benzin motorlu 1200 kg'lık bir otomobilde 90 km/h hızda yakıt enerjisinin % (yüzde) olarak kullanımı (Demircioğlu, 2007)

Kayıplar	Kısmi yük (Sabit hız)		Tam yük (İvme veya yokuş)	
Termodinamik kayıplar	% 78		% 72	
Yardımcı sistemler	% 5	Krank milindeki faydalı enerji % 22	% 5	Krank milindeki faydalı enerji % 28
Tekerlek yuvarlanma kaybı	% 4,6		% 2	
İvme veya yokuş kaybı	% 0		% 14,3	
Aerodinamik kayıplar	% 10,6		% 5,9	
Transmisyon kaybı	% 1,8		% 0,8	
Taşıta verilen toplam enerji	% 100		% 100	

Solmaz (2010) bir otobüs modelini ANSYS 12.1 programı ile analiz etmiş ve analiz sonuçlarını deney sonuçları ile karşılaştırmıştır. Otobüs modelinin aerodinamik direnç katsayısı deney sonuçlarına göre 0,65 ANSYS verilerine göre ise 0,66 olarak belirlemiştir.

Cheli, Ripamonti, Sabbioni, ve Tomasini (2011) tarafından yapılan çalışmada ağır vasıtalarla değişik zeminlerde ve değişik rüzgar açısında etki eden kuvvet değerlerini araştırmışlardır. Araç uzunluğu arttıkça yanal momentinde arttığını tespit etmişlerdir.

Hu Xu-xia ve Wong (2011) yaptıkları çalışmada yeni geliştirdikleri arka spoilerin sedan otomobilin C_D ve C_L katsayılarına etkilerini Fluent® paket programında k- ϵ türbülans modeli ile hesaplamışlardır. Geliştirdikleri spoilerin C_D katsayısını % 1,7 C_L katsayısını % 4 iyileştirdiğini tespit etmişlerdir.

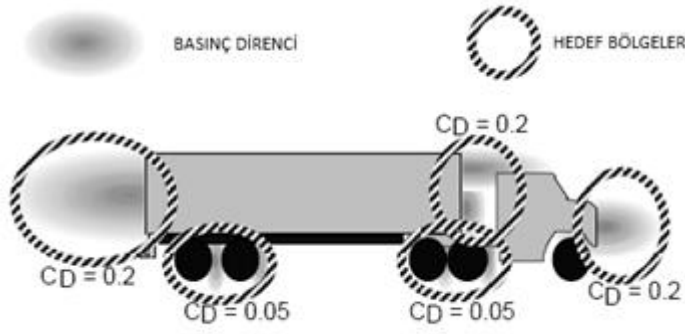
Madugundi ve Garrison (2013) yaptıkları çalışmada çekici ve römorkların aerodinamik yapılarını sayısal olarak incelemişlerdir. Bu araçlarda aerodinamik direnç oluşturan bölgeleri tespit etmişlerdir. Star CCM+ paket programında Rans ve Des türbülans modeli sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

2.2. Taşıtların Aerodinamik Yapılarının İyileştirilmesine Yönelik Yapılan Çalışmalar

Modi ve diğerleri (1995) çalışmalarında 1/6 ölçeğinde bir tır modelinde aerodinamik iyileştirme yapmışlardır. Römorkun ön tarafına yerleştirdiği dikey ve yatay spoiler ile sırasıyla % 12,5 ve % 28 oranında iyileşme elde etmişlerdir.

McCallen ve diğerleri (2000)'ne göre çekici ve römorktan oluşan bir ağır vasıtanın aerodinamik direnç katsayısı yaklaşık 0,6 civarındadır. Bu araçların 112 km/h hızda gücünün % 65'ini aerodinamik kuvveti yenmek için harcadıklarını ifade etmişlerdir. Yaptıkları aerodinamik iyileştirme çalışmasında römorka tekne kuyruğu (boat tailing) ekleyerek aerodinamik iyileşme sağlamışlardır.

Wood ve Bauer (2003) ağır vasıtalarda basınca bağlı aerodinamik direncini oluşturan bölgeler ve tipik olarak direnç katsayısına etkilerini tespit etmişlerdir. Şekil 2.2'de ağır vasıtalarda basınç direncinin yüksek olduğu bölgelerin ön yüzey, tekerlekler, çekici ve römork arasındaki boşluk ve taşıtın arkası olduğunu ifade etmiştir. Burada özellikle çekici römork boşluğu, römorkun altı ve römorkun arka kısmındaki dirençler değişik aerodinamik parçalarla azaltılmaya çalışmışlardır.



Şekil 2.2. Ağır vasıtalarda basınç direncinin yüksek olduğu bölgeler (Wood ve Bauer, 2003)

Minoru, Katsuji ve Tatsuo (2003) yaptıkları çalışmada trenlerin ve araçların çapraz rüzgârlar altındaki aerodinamik karakterleri sadece araçların şekline değil aynı zamanda araç alt yüzeylerine bağlı olduğunu ifade etmişleridir.



Şekil 2.3. Aerodinamik iyileştirme yapılmış çekici römork modeli (Ogburn ve Ramroth, 2007)

Ogburn ve Ramroth (2007) 1/1 ölçeğinde gerçek bir ağır vasıta aracında bazı eklerle % 20' e varan iyileşme yapılabileceği bu iyileşmenin 105 km/h hızdaki bir araç için % 10' a varan yakıt tüketiminde iyileşme sağlayabileceğini ifade etmişlerdir. Spoileri iyileştirerek % 2, şasi eteği ile % 4, römorkun arka kısmını iyileştirerek % 6 çekici ve römork boşluğuna kaporta eki yerleştirerek % 2'lik bir yakıt tüketimi iyileşmesi sağlamışlardır.

Buresti, Lungu, ve Lombardi (2007) tarafından yapılan çalışmada ağır vasıtalarda aerodinamik iyileştirme yapmak üzere değişik tekne kuyruğu modeli geliştirmişlerdir. Tekne kuyruğu ile aerodinamik iyileştirme oranının % 5 - % 10 arasında olabileceğini ifade etmişlerdir. Römork üzerine hareketli silindir koyarak, çekici römork arasındaki negatif

basıncı düşürmenin ve tekerlekleri kapatmanın C_D katsayısına etkisini sayısal yöntemle hesaplamışlardır.

Xiao ve Yong-qi (2011) yaptıkları çalışmada römork yapısını değiştirerek ağır vasıtalarda aerodinamik yapılarını incelemişlerdir. Çekici römork arasının mesafesine göre değişik boyutlarda kaporta çitası montajı yapıp deneysel ve sayısal sonuçları karşılaştırmıştır.

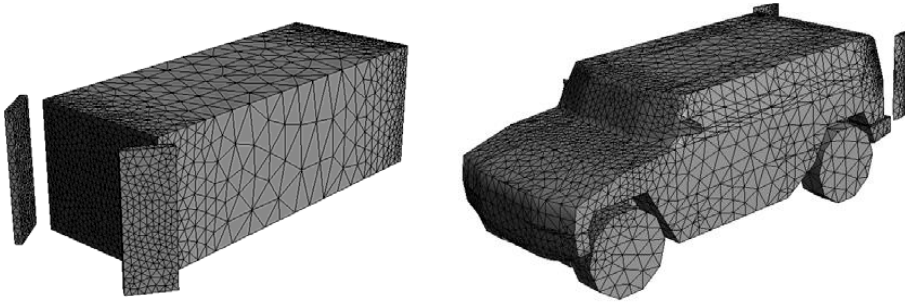
Daniel ve diğerleri (2011) 1/8 ölçekli GMC çekici ve römorkun basınç katsayısı dağılımlarını değişik rüzgâr açılarında sayısal olarak hesaplamıştır. Ayrıca aerodinamik direnç katsayısını azaltacak ekler geliştirmişlerdir. Bu sayısal çalışmalarını literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırmış ve ağır vasıtalarla römork ilavesinin aerodinamik direnç katsayısını % 15, çamurluk kapağının % 27 arttırdığını ifade etmişlerdir.

Miralbes (2012) yaptığı üç değişik model ile aerodinamik iyileştirme sağlamıştır. Römorkun arka kısmını yuvarlayarak % 4 bir iyileştirme elde etmiş. Burun konisi ile % 3 ve şasi eteği ile % 7 iyileştirme elde ettiğini ifade etmiştir.

Rohatgi (2012) bir SUV aracının arka kaporta kısmının geometrik yapısını değiştirerek aerodinamik yapısını iyileştirme denemiştir. Aracın arka kaporta kısmının % 26 iyileşme sağlanabileceğini ifade etmiştir.

Wahba, Al-Marzooqi, Shaath, Shahin, ve El-Dhmarshawy (2012) bir otobüs ve SUV aracının (Sport Utility Car) kılavuz kanatlarının ile aerodinamik direnç katsayısına etkisini ANSYS CFX programında SST k- ϵ ve k- ϵ türbülans modelleri ile sayısal olarak hesaplamışlardır. SST k- ϵ türbülans modelinde deneysel çalışma sonuçlarına göre sapma oranı % 8,04, k- ϵ türbülans modelinde % 8,74 olarak elde etmişlerdir.

Deney alanının giriş bölümünde türbülans şiddetini % 0,5 olarak alıp aracın C_D katsayısını 0,593 olarak hesaplamıştır. Kılavuz kanatları ile SUV aracının C_D katsayısında yaklaşık % 18 iyileşme olabileceğini ifade etmişlerdir. Şekil 2.4.' de sayısal analizi için oluşturulan ağ yapısı verilmiştir.



Şekil 2.4. SUV aracının sayısal çözümlemesinde ağ dağılımı (Wahba ve diğerleri, 2012)

Chowdhury, ve diğerleri (2013) tarafından yapılan çalışmada ağır vasıtalar aerodinamik direnç katsayısının azaltacak eklemeler yapmışlardır. Ağır vasıtanın spoiler yapısını iyileştirip çekici ve römork arasını kapatmış ve tekerleklerin neden olduğu sürüklenme direncini azaltacak eklemeler yaparak ortalama % 26,1 iyileştirme elde etmişlerdir. Sadece ön spoiler ile % 17,6 iyileştirme olabileceğini ifade etmişlerdir.

Vaghela (2013) ağır vasıtalarda spoiler açısının aerodinamik dirence etkisini deneysel olarak ölçmüştür. Ağır vasıtalarda 10° , 13° , $17,5^\circ$, 20° hücum açılarındaki spoilerin aerodinamik dirence etkisini tespit etmiştir. $17,5^\circ$ hücum açısına sahip spoiler aerodinamik direnç bakımından en kötü sonucu verdiğini ifade etmiştir.

3. MATEMATİKSEL FORMÜLASYON

Bu çalışmada bir çekici ve çekici römork kombinasyonundan oluşan model araç üzerindeki akış yapısı Fluent® paket programı kullanılarak incelenmiştir. Bu paket programı süreklilik ve momentum denklemlerini numerik olarak çözmekte ve literatürde kabul görmektedir.

3.1. Genel Denklemler

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

3.1.1. Süreklilik denklemi

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

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.2)$$

olarak ifade edilir. Eşitliğin solundaki birinci terim yoğunluğun zaman içindeki değişim hızını, ikinci terim ise akışkan elemanının sınırlarından çıkan kütlenin net akışını tanımlar ve konvektif terim olarak adlandırılır. Sıkıştırılamayan akışkanlar için yoğunluk(ρ) sabit olup Eş.(3.1)

$$\text{div} \vec{u} = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$

haline gelir.

3.1.2. Momentum denklemi

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

Momentum denkleminin x-bileşeni;

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{M_x} \quad (3.5a)$$

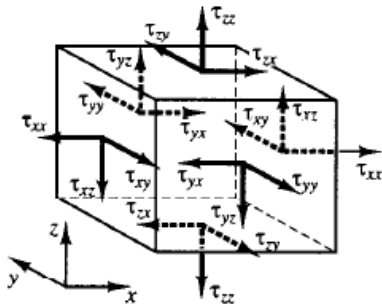
Momentum denkleminin y-bileşeni;

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{M_y} \quad (3.5b)$$

Momentum denkleminin z-bileşeni;

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{M_z} \quad (3.5c)$$

olarak ifade edilir. Burada p basıncı, τ viskoz gerilmeleri, τ_{ij} eşitlik 3,1'de görüldüğü gibi viskoz gerilmelerin yönünü (j yönündeki yüzeyde i yönüne dik), S ise kaynak terimini (S_{M_x} = Birim zamanda birim hacmin x-momentumunun kaynak terimi) belirtir.



Şekil 3.1. Bir akışkan elemanın yüzeylerindeki gerilme bileşenleri (İnce, 2010)

3.1.3. Navier – Stokes denklemleri

Navier – Stokes ve süreklilik denklemleri diferansiyel hareket denklemleri olarak da ifade edilir. Bu denklemleri çözümlenmesinde bazı kabuller alınarak basınç ve hızın üç bileşeni (x,y,z) hesaplanır.

Birçok akışta viskoz gerilmeler bölgesel deformasyon hızı (veya gerinim hızı)’nın fonksiyonu olarak ifade edilir. Üç boyutlu bir akışta bölgesel deformasyon hızı, doğrusal deformasyon hızı ile hacimsel deformasyon hızından meydana gelir. Akışkanları izotropik kabul ederek bir akışkan elemanının doğrusal deformasyon hızı üç yönde dokuz elemana sahiptir (İnce,2010). Üçü doğrusal uzama deformasyon elemanı;

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} , \quad e_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} , \quad e_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.6a)$$

altısı doğrusal kayma deformasyon elemanıdır.

$$e_{xy} = e_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (3.6b)$$

$$e_{xz} = e_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (3.6c)$$

$$e_{yz} = e_{zy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (3.6d)$$

Hacimsel deformasyon,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \text{div } \vec{u} \quad (3.7)$$

ile tarif edilir. Bir Newton akışkanında viskoz gerilmeler deformasyon hızlarıyla orantılıdır. Gerilmeleri doğrusal deformasyonlarla ilişkilendirebilmek için μ , dinamik viskozite,

gerilmeleri hacimsel deformasyonlarla ilişkilendirebilmek için λ ,viskozite sabitleri kullanıldığında altısı bağımsız dokuz viskoz gerilme elemanları elde edilir.

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} \vec{u} \quad (3.8a)$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \operatorname{div} \vec{u} \quad (3.8b)$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \operatorname{div} \vec{u} \quad (3.8c)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (3.8d)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (3.8e)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (3.8f)$$

Eşitlik 3.8a-f, Eşitlik 3.5a-c ile birlikte kullanıldığında Navier – Stokes denklemlerinin sonlu hacimler metodunun geliştirilmesi için en kullanışlı hali,

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \operatorname{div} (\mu \operatorname{grad} u) + S_{M_x} \quad (3.9a)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \operatorname{div} (\mu \operatorname{grad} v) + S_{M_y} \quad (3.9b)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \operatorname{div} (\mu \operatorname{grad} w) + S_{M_z} \quad (3.9c)$$

olarak elde edilir.

3.2. Türbülansın Modellenmesi

“Türbülanslı akış, akış parametrelerinin zamana ve uzay koordinatlarına bağımlı olarak düzensiz değişimler gösterdiği akış olarak tanımlanabilir. Türbülans, yüksek Reynolds sayılarında ortaya çıkan bir akış özelliği olup, kesinlikle bir akışkan özelliği değildir. Türbülanslı akış, çok karmaşık ve düzensiz bir yapıya sahip olmasından dolayı, akış özelliklerinin tamamen tanımlanabilmesinin makul boyutta ekonomik bir yöntemi yoktur. Bununla birlikte pratik mühendislik uygulamalarında türbülanslı akışlara sıkça rastlanmaktadır. Bu nedenle mühendisler türbülanslı akışlar hakkında yeterli derecede bilgi sağlayacak hesaplama yöntemlerine ihtiyaç duymaktadırlar. Bu amaçla, pratikte türbülanslı akışın sadece zaman-ortalama özellikleri ile ilgilenilmektedir. Böylece türbülans çalkantılarının (fluctuation) ortalama akış özellikleri üzerindeki etkisi incelenmekte ve bir çok mühendislik uygulamalarında yeterli sayılabilecek sonuçlar elde edilmektedir. Bu yaklaşımla, laminar akış denklemleri; hızlı ve düzensiz çalkantıların ortalama değerlerde olduğu kabul edilerek yapılan ortalama işlemi ile türbülanslı akış için zaman-ortalama denklemlere dönüştürülmektedir. Bu işlemden sonra, Reynolds gerilimleri, türbülans ısı akısı, vb. ekstra terimler ortaya çıkmaktadır. Bu terimleri akışın ortalama özellikleri ile ifade etmek için etkili türbülans modellerine ihtiyaç duyulmaktadır”(İnce, 2010).

3.2.1. Türbülanslı akış için zaman ortalama denklemler

Türbülanslı akış içerisinde oluşan çalkantıların ortalama akış özelliklerine etkisini incelemek ve zaman-ortalama türbülanslı akış denklemlerini türetmek üzere herhangi bir akış değişkeni φ in ortalama değeri Φ şu şekilde tanımlanabilir;

$$\Phi = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi(t) dt \quad (3.10)$$

φ zamana bağımlı bir değişken olup, zaman ortalama değeri Φ ve sıfır ortalama değerli zamana bağımlı çalkantı bileşeninin, Φ' toplamı olarak $\varphi = \Phi + \Phi'$ şeklinde ifade edilirse, çalkantıların zaman ortalaması tanım gereği sıfır olur.

$$\overline{\varphi'} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi' dt \equiv 0 \quad (3.11)$$

Akışın çalkantılı kısmına ilişkin bilgiler, çalkantıların ortalama karekök (*root-mean-square*, *rms*) değeri:

$$\varphi_{rms} = \sqrt{\overline{(\varphi')^2}} = \left[\frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} (\varphi')^2 dt \right]^{1/2} \quad (3.12)$$

ile elde edilebilir. Hız bileşenlerinin rms değerleri, türbülans çalkantılarına duyarlı hız problemleri ve basit elektrik devreleri ile kolaylıkla ölçülebilmesi açısından, çok büyük önem taşımaktadır (Koçyiğit ve Ünal 2005).

Türbülanslı akışa ait ortalama akış denklemlerini türetmek için gerekli olan çalkantılı akış değişkenleri $\varphi = \Phi + \varphi'$ ve $\psi = \Psi + \psi'$ nin zaman ortalamaları, türevleri ve integrasyonu ile ilgili matematiksel ilişkiler şu şekilde verilebilir;

$$\overline{\varphi'} = \overline{\psi'} = 0 \quad (3.13a)$$

$$\overline{\Phi} = \Phi \quad (3.13b)$$

$$\overline{\varphi + \psi} = \Phi + \Psi \quad (3.13c)$$

$$\overline{\varphi\psi} = \Phi\Psi + \overline{\varphi'\psi'} \quad (3.13d)$$

$$\overline{\varphi\Psi} = \Phi\Psi \quad (3.13e)$$

$$\overline{\varphi'\Psi} = 0 \quad (3.13f)$$

$$\overline{\frac{\partial \varphi}{\partial s}} = \frac{\partial \Phi}{\partial s} \quad (3.13g)$$

$$\overline{\int \varphi ds} = \int \Phi ds \quad (3.13h)$$

bununla birlikte çalkantılı vektörel $\vec{a} = \vec{A} + \vec{a}'$ büyüklüğünün ve çalkantılı skalar $\varphi = \Phi + \varphi'$ büyüklüğünün kombinasyonu için şu matematiksel ifadeler elde edilebilir;

$$\overline{\text{div} \vec{a}} = \text{div} \vec{A} \quad (3.14a)$$

$$\overline{\text{div}(\varphi \vec{a})} = \text{div}(\overline{\varphi \vec{a}}) = \text{div}(\Phi \vec{A}) + \text{div}(\overline{\varphi' \vec{a}'}) \quad (3.14b)$$

$$\overline{\text{div}(\text{grad} \varphi)} = \text{div}(\text{grad} \Phi) \quad (3.14c)$$

Sabit viskoziteli sıkıştırılmaz akış için kartezyen koordinatlarda Navier-Stokes denklemleri, hız vektörü için $\vec{u} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$ gösterimi kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\text{div} \vec{u} = 0 \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \text{div}(u\vec{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \text{div}(\text{grad} u) \quad (3.16a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \text{div}(v\vec{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \text{div}(\text{grad} v) \quad (3.16b)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \text{div}(w\vec{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \text{div}(\text{grad} w) \quad (3.16c)$$

Çalkantıların etkilerini ifade etmek için denklem (3.15) ve (3.16a-c) de $\vec{u}$, dolayısıyla u , v , w ve p değişkenleri yerine ortalama ve çalkantılı bileşenlerin toplamı, yani;

$$\vec{u} = \vec{U} + \vec{u}' \quad (3.17a)$$

$$u = U + u' \quad (3.17b)$$

$$v = V + v' \quad (3.17c)$$

$$w = W + w' \quad (3.17d)$$

$$p = P + p' \quad (3.17e)$$

yazılır ve eşitlik (3.15) de verilen ilişkilerden yararlanarak zaman ortalamaları alınır ve türbülanslı akış için zaman ortalamalı denklemler şu şekilde elde edilir;

$$\text{div} \vec{U} = 0 \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \text{div}(U\vec{U}) + \text{div}(\overline{u'u'}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \text{div}(\text{grad}U) \quad (3.18a)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \text{div}(V\vec{U}) + \text{div}(\overline{v'u'}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \text{div}(\text{grad}V) \quad (3.18b)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \text{div}(W\vec{U}) + \text{div}(\overline{w'u'}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \text{div}(\text{grad}W) \quad (3.18c)$$

Momentum denklemlerinin solundaki üçüncü terimlerin dışındaki diğer bütün terimlerin laminar akış denklemleri ile aynı görüntüye sahip olduğu görülmektedir. Laminar akış denklemlerinden farklı olarak ortaya çıkan ve çalkantılı hız bileşenlerinin çarpımlarını içermekte olan farklı terimler, hız çalkantılarından kaynaklanan konvektif momentum transferini ifade etmektedir. Bu terimlerin fiziksel anlamda, türbülansın kaynaklanan ekstra gerilimler olduğu söylenebilir (İnce,2010) Bunlar; üçü normal, üçü ise kayma gerilimleri olmak üzere,

$$\tau_{xx} = -\overline{\rho u'^2} \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = -\overline{\rho u'v'} \quad (3.19a)$$

$$\tau_{yy} = -\overline{\rho v'^2} \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} = -\overline{\rho u'w'} \quad (3.19b)$$

$$\tau_{zz} = -\overline{\rho w'^2} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = -\overline{\rho v'w'} \quad (3.19c)$$

şeklinde ifade edilen altı ekstra türbülans gerilimleridir. Bu gerilimler Reynolds gerilimleri, denklem seti (3.18a-c) ise Reynolds denklemleri olarak adlandırılmaktadır. Reynolds denklemleri, Reynolds gerilimlerinin de açık olarak gösterildiği biçimde şu şekilde yeniden yazılabilir;

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \text{div}(U\vec{U}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \text{div}(\text{grad}U) + \left[-\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right] \quad (3.20a)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \text{div}(V\vec{U}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \text{div}(\text{grad}V) + \left[-\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right] \quad (3.20b)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \text{div}(W\vec{U}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \text{div}(\text{grad}W) + \left[-\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right] \quad (3.20c)$$

Türbülanslı akışlarda normal gerilimler, hız çalkantılarının karelerini içerdiklerinden dolayı, daima sıfırdan farklı değerler alırlar. Kayma gerilmeleri ise, farklı hızların çalkantılarının çarpımını içermekte olup çoğu zaman viskoz gerilimlerden çok daha büyüktürler.

Buraya kadar verilen denklemlerde akışkan yoğunluğunun sabit olduğu kabul edilmiştir. Ancak pratik uygulamalardaki akışların bir çoğunda ortalama yoğunluk değişebilirken, anlık yoğunluk ise daima türbülans çalkantılar göstermektedir. Bradshaw, Cebeci ve Whitelaw (1981), küçük yoğunluk çalkantılarının akışı önemli ölçüde etkilemediğini ifade etmiştir. Buna göre, yoğunluk çalkantılarının ihmal edilebileceği ancak ortalama yoğunluk değişimlerinin önemli olduğu sıkıştırılabilir türbülanslı akışlar için zaman ortalamalı denklemler aşağıda verildiği gibidir;

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \text{div}(\rho U\vec{U}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad}U) + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'^2})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial z} \right] \quad (3.21a)$$

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \text{div}(\rho V \vec{U}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} V) + \left[-\frac{\partial(\rho \overline{u'v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{v'^2})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{v'w'})}{\partial z} \right] \quad (3.22b)$$

$$\frac{\partial(\rho W)}{\partial t} + \text{div}(\rho W \vec{U}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} W) + \left[-\frac{\partial(\rho \overline{u'w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{v'w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{w'^2})}{\partial z} \right] \quad (3.23c)$$

Türbülanslı akışlar için herhangi bir skalar değişkenin, Φ (sıcaklık, konsantrasyon vb.) taşınım denklemi benzer yaklaşımla,

$$\frac{\partial(\rho \Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \Phi \vec{U}) = \text{div}(\Gamma_{\Phi} \text{grad} \Phi) + \left[-\frac{\partial(\rho \overline{u'\Phi'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{v'\Phi'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{w'\Phi'})}{\partial z} \right] + S_{\Phi} \quad (3.24)$$

şeklinde yazılabilir (İnce, 2010).

3.2.2. Çeşitli türbülans modelleri

Türbülans modellerinin temel amacı hesaplama yöntemleri geliştirmektir. Mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan ve zaman ortalamalı akış denklemlerini temel alan klasik türbülans modelleri şunlardır;

- ✓ Karışma uzunluğu modeli (Mixing length model)
- ✓ Spalart – Allmaras modeli (One equation model)
- ✓ k-ε modeli (two-equation model)
 - ✓ Standart
 - ✓ RNG
 - ✓ Realizable
- ✓ k-ω modeli (two-equation model)
 - ✓ Standart
 - ✓ SST (Shear stress transport)
- ✓ Reynold gerilim denklemi modeli (Reynold stress equation model)
- ✓ Cebirsel gerilim modeli (Algebraic stress model)

Bu modellerin hepsi kullanılmakla beraber $k-\varepsilon$ modeli pratikte en çok kullanılan ve deneysel verilerle karşılaştırıldığında güvenilir sonuçlar verdiği belirlenen modeldir. Literatürde kabul görmesi, deneysel sonuçlarla uyumlu olması ve çözümleme süresinin daha kısa olmasından bu çalışmada türbülans modeli olarak RNG $k-\varepsilon$ modeli kullanılmıştır.

Standart $k-\varepsilon$ modeli

İki boyutlu ince tabakalarda akış yönündeki değişimler türbülansın kendisini bölgesel şartlara göre ayarlayabilecek kadar yavaş olmaktadır. Türbülans özelliklerin difüzyonu ve konveksiyonu ihmal edilebilirse, türbülansın ortalama akış üzerindeki etkisini karışma uzunluğu ile ifade etmek mümkün olabilecektir. Döngülü akış örneğinde olduğu gibi difüzyon ve konveksiyonun önemli olduğu durumlarda karışma uzunluğu için önerilen cebirsel ifadeler uygun olmamaktadır. Bu durumda yapılması gereken şey türbülansın dinamiği ile ilgilenmektir. Standart $k-\varepsilon$ modeli türbülans kinetik enerjisini etkileyen mekanizmalar üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Türbülanslı bir akışın anlık kinetik enerjisi $k(t)$, ortalama kinetik enerjisi K ve türbülans kinetik enerjisi, k 'nın toplamı olarak tanımlanabilir.

Bunlar sırasıyla;

$$k(t) = K + k \quad (3.25)$$

$$K = \frac{1}{2} (U^2 + V^2 + W^2) \quad (3.26a)$$

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (3.26b)$$

şeklinde ifade edilebilir. Akışkan elemanının deformasyon oranı da benzer şekilde ortalama ve çalkantılı bileşenleriyle şu şekilde gösterilebilir;

$$e_{ij}(t) = E_{ij} + e'_{ij} \quad (3.27)$$

Burada;

$$e_{xx}(t) = E_{xx} + e'_{xx} = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial u'}{\partial x} \quad (3.28a)$$

$$e_{yy}(t) = E_{yy} + e'_{yy} = \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial v'}{\partial y} \quad (3.28b)$$

$$e_{zz}(t) = E_{zz} + e'_{zz} = \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial z} \quad (3.28c)$$

$$e_{xy}(t) = e_{yx}(t) = E_{xy} + e'_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u'}{\partial y} + \frac{\partial v'}{\partial x} \right) \quad (3.28d)$$

$$e_{xz}(t) = e_{zx}(t) = E_{xz} + e'_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial x} \right) \quad (3.28e)$$

$$e_{yz}(t) = e_{zy}(t) = E_{yz} + e'_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial y} \right) \quad (3.28f)$$

şeklinde ifade edilebilir. Ortalama kinetik enerji, zaman ortalamalı momentum denklemlerinin, ortalama hız vektörünün aynı yöndeki bileşenleri ile çarpılarak toplanmasından sonra bazı cebirsel işlemlerin neticesinde aşağıda verilen şekilde elde edilebilir;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho K) + \text{div}(\rho K \vec{U}) = \text{div} \left(-P \vec{U} + 2\mu \vec{U} E_{ij} - \rho \vec{U} \overline{u'_i u'_j} \right) - 2\mu E_{ij} \cdot E_{ij} + \rho \overline{u'_i u'_j} \cdot E_{ij} \quad (3.29)$$

Benzer biçimde türbülans kinetik enerjisi k için taşınım denklemi, Navier-Stokes denklemlerinin (4.19 a-c), sırasıyla, çalkantılı hız vektörünün aynı yöndeki bileşenleri ile çarpılarak toplanmasından sonra aynı şekilde Eş. 4.24a-c'de verilen zaman ortalamalı momentum denklemlerinin sırasıyla, çalkantılı hız vektörünün aynı yöndeki bileşenleri ile çarpılarak toplanıp, elde edilen bu iki denklemin birbirinden çıkarılmasından sonra bazı cebirsel işlemlerin neticesinde şu şekilde elde edilebilir;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \text{div}(\rho k \vec{U}) = \text{div}\left(-\overline{p' \vec{u}'} + 2\overline{\mu \vec{u}' e'_{ij}} - \frac{1}{2}\overline{\rho u'_i \cdot u'_i u'_j}\right) - 2\overline{\mu e'_{ij} \cdot e'_{ij}} - \overline{\rho u'_i u'_j} \cdot E_{ij} \quad (3.30)$$

Eşitliğin sağ tarafında yer alan son iki terim sırasıyla ortalama kinetik enerji, K ve türbülans kinetik enerjisi, k' nın yutulma oranı ile türbülans üretimini ifade etmektedir. Sonuncu terim her iki denklemden de aynı büyüklükte fakat farklı işaretle görünmektedir. İki boyutlu ince tabakalarda ortalama hız gradyanı du/dy pozitif olduğunda, $-\overline{\rho u' v'}$ teriminin de pozitif olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir. Buna göre söz konusu terim, k denkleminde pozitif olarak, K denkleminde ise negatif olarak etki etmektedir. Bu durum matematiksel olarak, ortalama kinetik enerjinin türbülans kinetik enerjisine dönüşümünü ifade etmektedir. Sonuçta ikinci terim yani yutulma oranı, $-2\overline{\mu e'_{ij} \cdot e'_{ij}}$ ise k denkleminde negatif olarak etkimektedir. Birim kütledeki yutulma oranının, ε (m^2/s^3) türbülans dinamiğinin incelenmesinde çok önemli bir yeri olup şu şekilde tanımlanmaktadır;

$$\varepsilon = 2\nu \overline{e'_{ij} \cdot e'_{ij}} \quad (3.31)$$

Birim kütledeki yutulma oranı, türbülans kinetik enerji denkleminde türbülans üretim teriminin büyüklüğü ile benzer ölçüde olup kesinlikle ihmal edilemez. Aksine, Reynolds sayısının büyük olduğu akışlarda, türbülans taşınım terimi viskoz taşınım teriminden daima çok daha büyük olmaktadır.

Lauder ve Spalding (1974) standart k - ε modelinde, biri k , diğeri ise ε için olmak üzere iki denklem belirtmektedir. Bu modelde türbülans hız skalası m/s ve uzunluk skalası L tanımlamak için k ve ε kullanılmakta ve şu şekilde ifade edilmektedir;

$$\mathcal{G} = k^{1/2} \quad \ell = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (3.32)$$

Türbülans viskozite, karışma uzunluğu modelindeki yaklaşımla,

$$\mu_t = C\rho \mathcal{G} \ell = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.33)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada C_μ boyutsuz bir sabittir. Standart k - ε modeli türbülans kinetik enerjisi ve türbülans kinetik enerji yutulması için aşağıda verilen denklemleri kullanmaktadır;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \text{div}(\rho k \vec{U}) = \text{div}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k\right) + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \text{div}(\rho \varepsilon \vec{U}) = \text{div}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad } \varepsilon\right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.35)$$

Standart k - ε modelinde, yapılan bir çok deney neticesinde elde edilen $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$ sabit değerleri kullanılmaktadır. Türbülans kinetik enerji yutulma oranı tanımından,

$$-2\mu_t \overline{e'_{ij} \cdot e'_{ij}} = -\rho \varepsilon \quad (3.36)$$

olduğu görülür. Reynolds gerilimleri, Boussinesq yaklaşımı ile;

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.37)$$

birlikte kullanılarak,

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = 2\mu_t E_{ij} \quad (3.38)$$

şeklinde ifade edilir. Buna göre,

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} \cdot E_{ij} = 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} \quad (3.39)$$

biçiminde tanımlanır. k 'nın basınç etkisi ile taşınımını temsil eden $-\overline{p'u'}$ teriminin direkt olarak hesaplanabilmesi veya deneysel olarak ölçülebilmesi mümkün değildir. Bu nedenle, k 'nın basınç, viskoz gerilimler ve Reynolds gerilimlerinin etkisi ile taşınımını ifade eden

$$\text{div}\left(-\overline{p'u'} + 2\overline{\mu u'e'_{ij}} - \frac{1}{2}\overline{\rho u'_i \cdot u'_i u'_j}\right) \quad (3.40)$$

ifadesi, k 'nın difüzyonla taşınımı

$$\text{div}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k\right) \quad (3.41)$$

şeklinde temsil edilmektedir. Buradaki sabitler, sözü edilen etkilerin doğru olarak temsil edilebilmesi amacıyla deneysel olarak tespit edilmektedir (İnce, 2010). Türbülans kinetik enerji yutulumu, ε için kullanılan, türbülans kinetik enerjisi, k için kullanılan denkleme benzer şekilde elde edilmiştir. Bu denklemde, ε 'nın üretimi ve yutulumu, k 'nın üretimi ve yutulumu ile orantılı kabul edilmiştir. $C_{1\varepsilon}$ ve $C_{2\varepsilon}$ katsayıları bu oranları temsil etmektedir. Türbülans kinetik enerji yutulumu denkleminde görülen çarpanının kullanılması, k 'nın artmasıyla ε 'nın artmasını ve k 'nın azalmasıyla ε 'nın azalmasını sağlamakta, böylece k 'nın (zaman ortalamalı çalkantılı hız bileşenlerinin karelerinin toplamının yarısı, fiziksel olarak yanlış olan negatif değerler almasını engellemektedir.

RNG k- ε modeli

RNG “renormalization group theory” k- ε modeli kullanılan istatistiksel tekniklerden üretilmiştir. Standart k- ε model ile benzerlik taşır. Fakat birkaç farklılık gösterir;

- ✓ RNG k- ε modelinde ε denklemine ek bir terim sağlar ki bu ek terim hızlı akan akışkanların doğruluğunu düzenler,
- ✓ RNG modelinde girdap etki türbülanslı viskozite tanımını ile temsil edilebilir,
- ✓ RNG teorisi bir analitik formül ile türbülans Prandtl sayısını tanımlar fakat standart k- ε modelinde sabit değerindedir,

- ✓ Standart k-ε modeli yüksek Reynolds sayısı modeli iken RNG k-ε modeli, sürüklenme etkileri için farklı bir analitik denklem sağlar ki buda düşük Reynolds sayısı etkilerinin hesaplanmasında kullanılır. Bu özelliğin kullanılması yakın-duvar bölgesi yaklaşımını güvenilir yapar (Koçyiğit ve Ünal, 2005).

Bu özelliklerle RNG k-ε modeli k-ε modeli ile karşılaştırıldığında , ε ‘nun az tüketilmesi ε’nın artması, k’nın ve efektif viskozitesi azalması demektir. Sonuç olarak, daha hızlı gerilen RNG modelin türbülanslı viskozitesi Standard k-ε modelinden daha düşüktür. RNG analizlerinden doğan sabitler şöyledir:

$$c_{\mu} = 0.0845, c_{\epsilon 1} = 1.42, c_{\epsilon 2} = 1.68, \sigma_k = \sigma_{\epsilon} = 0.72$$

Güçlü akım çizgili eğrisel akımlarda ve gerinim oranlarında, geçiş akımlarında ve duvar ısı ve kütle transferinde oldukça iyi sonuçlar vermektedir.

Türbülans kinetik enerjisi;

$$\rho U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \mu_t S^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) - \rho \epsilon \quad (3.42)$$

denklemini ile ifade edilmektedir. Burada birinci terim taşınımı, ikinci terim üretimi, üçüncü terim difüzyonu ve dördüncü terim yutulmayı ifade etmektedir. S ifadesi ise

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.43)$$

dir. Yutulma oranı,

$$\rho U_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = C_{1\epsilon} \left(\frac{\epsilon}{k} \right) \mu_t S^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_{\epsilon} \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) - C_{2\epsilon} \rho \left(\frac{\epsilon^2}{k} \right) - R \quad (3.44)$$

denklemini ile ifade edilmektedir. Burada birinci terim taşınımı, ikinci terim üretimi, üçüncü terim difüzyonu, dördüncü terim yok olmayı ve R terimi ana gerinim ve türbülans miktarları ile ilgili ilave terimleri ifade etmektedir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Akışkanlar Mekaniği laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Çekici römork kombinasyonunun aerodinamik karakteristiği, rüzgâr tüneline çeşitli serbest akış hızlarında tespit edilmiştir. Model araç üzerindeki belirlenen noktalarda basınç katsayısı dağılımı, sürüklenme direnci kuvvetleri tespit edilmiştir. Aerodinamik direnç oluşturan bölgeler tespit edilerek pasif akış kontrolleri ile aerodinamik iyileşme sağlanmıştır.

4.1. Benzerlik

Taşıt aerodinamiği ile ilgili deneysel çalışmaların gerçek prototipler üzerinde yapılması, oldukça maliyetli ve çok güç olduğundan deneylerde ölçekli model araçlar kullanılır. Sonuçların doğruluğu için modelin belirli özelliklerinin prototipin özellikleri ile aynı veya yakın değerlerde olması şarttır. Taşıt aerodinamiği deneylerinde prototip ve model arasında üç farklı benzerlik şartı aranır:

4.1.1. Geometrik benzerlik

Geometrik benzerliğin sağlanması için modelin boyutsal ölçülerinin, prototipin boyutsal ölçüleri ile orantılı olması gerekir. Bu çalışmada kullanılan model araç prototip aracın 1/32 ölçekli lisanslı modelidir.



Şekil 4.1. Prototip araç



Şekil 4.2. 1/32 ölçekli model araç

Araçlar büyük oranda benzer olsa da yüzey pürüzlülüğü, çok küçük parçalar ve hava akış kanallarından dolayı meydana gelebilecek hatalar ihmal edilmiştir.

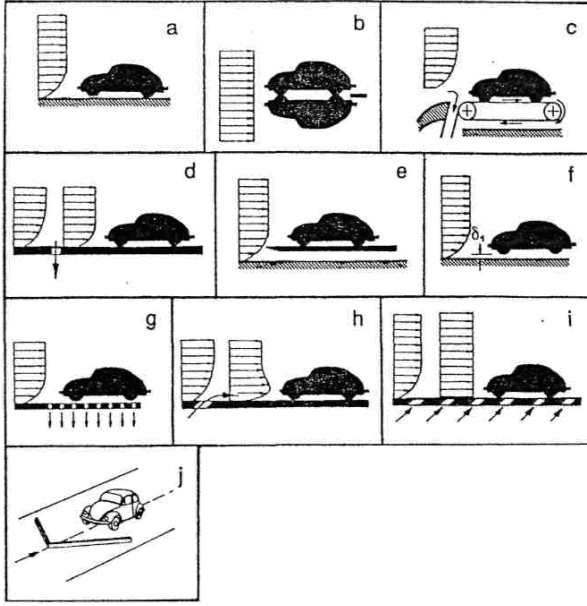
4.1.2. Kinematik benzerlik

Kinematik benzerlik şartının sağlanması için prototip ve model üzerindeki hız vektörleri paralel ve mutlak değerlerinin oranlarının sabit olması gerekir. “Aerodinamik deneylerde kinematik benzerlik şartının sağlanması, akım çizgilerinin model ve prototip için aynı olduğu anlamına gelir. Rüzgar tüneli deneylerinde kinematik benzerliğin sağlanması blokaj etkisine de bağlıdır. Gerçekte durağan halden hareketli hale geçen otomobil çevresinde oluşan hava hareketi, aracın dış yüzeyinde bir sınır tabaka oluşmasına neden olur. Akışkanın sınır tabaka içindeki hızı plaka yüzeyinden yukarı doğru parabolik bir oranla artar, plaka yüzeyinden itibaren belirli bir yükseklikte hız serbest akış hızına eşit olur. Prandtl, bu hız profilinin yüksekliği "sınır tabakası kalınlığı" olarak adlandırmıştır” (Aka, 2003).

Model aracın, tünel kesit alanı içerisinde büyük bir alanı işgal etmesi durumunda tünel duvarı arasında kalan alan daralır ve akışkan hızını koruyarak bu dar alandan akıp geçmeden bloke olur ve sınır tabakanın üzerinde akış hızı serbest akış hızına eşit olamaz, akış düzeni bozularak blokaj hataları oluşur. Bunun sonucu olarak akım çizgilerinin gerçekte prototip üzerinde oluşan akım çizgileriyle paralellik şartı sağlanamaz. Ölçülen serbest akış değeri doğru olamayacağından deneylerde elde edilen sonuçlar da gerçeği yansıtamaz. Blokaj oranı model kesit alanının rüzgar tüneli deney odasının kesit alanına oranı olarak tanımlanır.

Gerçek araç ile yer ve ilerisindeki durgun hava arasında aracın hızına eşit olarak oluşan bağıl hız şartının rüzgâr tünelinde sağlanması gerekmektedir. Bu çalışmada araç rüzgâr tüneli içerisinde 5 cm taban plakası üzerine yerleştirilerek üniform serbest akışın araca etki etmesi sağlanmıştır. Ancak yer ile araç arasındaki bağıl hız şartı sağlanamamıştır. Bununla birlikte literatürde yapılan bazı çalışmalarda bunun ihmal edilebileceği belirtilmiştir (Çakmak, 2000, Lokhande ve diğerleri, 2003 ve Minoru ve diğerleri, 2003).

Rüzgâr tünelinde yolun simülasyonu için, çeşitli yöntemler Şekil 4.3 'de gösterilmiş olup, uygulamada daha çok sınır tabaka kontrolü olmayan durağan katı zemin (a), teğetsel üfleme (b), sınır tabaka emmeli (d ve g), hareketli kayış ile sınır tabakanın emiliminin beraber kullanıldığı tünel yöntemleri kullanılmaktadır. Yolun temsili için en basit ve yaygın yöntem, durağan, katı zemindir” (Şahin, 2008). Şekil 4.3’de rüzgâr tünelinde yol simülasyonu için uygulanabilecek çeşitli yöntemler belirtilmiştir.



Şekil 4.3. Rüzgâr tüneline yol simülasyonu için uygulanabilecek çeşitli yöntemler (Şahin, 2008)

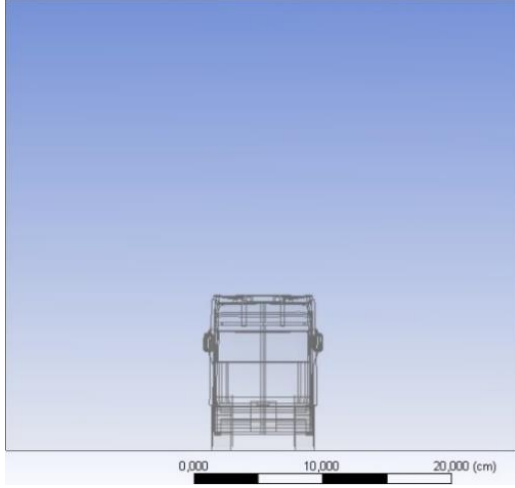
Deneysel çalışmada yolun temsili şartlarına uyum için durağan katı zemin seçilmiştir. 5 mm kalınlığında plexiglass malzemedan 28 cm en ve 71 cm uzunluğa sahip uç açıları 60° olan zemin oluşturulmuştur.



Şekil 4.4. Plexiglass durağan katı zemin ve airfoil ayaklar

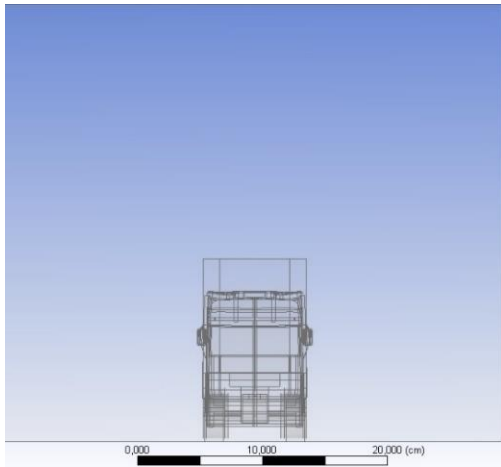
Bu zemin tünel zemininden 5 cm yukarıda olacak şekilde airfoil ayaklar üzerine oturtulmuştur. Solidworks programında çizim datası oluşturulan airfoil ayaklar 10 mm kalınlığındaki plexiglass malzemedan lazer kesim yöntemi ile üretilmiştir. Model araç

zemine kuvvetli yapıştırıcı ile tutturulmuş ve pnömatik hortumlarla basınç prizi bağlantıları tarayıcı vanaya bağlanmıştır. Tarayıcı vananın çıkış ucu 1 no'lu basınç dönüştürücünün pozitif ucuna bağlanmıştır.



Şekil 4.5. Çekici ön yüzey alanı ve blokaj

Çekicinin genişliği 9,4 cm, yüksekliği 12,81 cm olup ön yüzey alanı ($A=0,9 \cdot H \cdot W$) 108 cm^2 deney alanının genişliği 40 cm yüksekliği 40 cm olup ön yüzey alanı 1600 cm^2 'dir. Bu durumda blokaj oranı % 6,75 olup literatüre uymaktadır (Çakmak, 2000). Çekici için yapılan deneysel çalışmalarda kinematik benzerlik sağlanmış ve blokaj etkileri ihmal edilmiştir.



Şekil 4.6. Çekici ve römork ön yüzey alanı ve blokaj

Çekici ve römorkun genişliği 9,4 cm, yüksekliği 15,63 cm olup ön yüzey alanı ($A=0,9 \cdot H \cdot W$) 132 cm^2 deney alanının genişliği 40 cm yüksekliği 40 cm olup ön yüzey alanı 1600 cm^2 'dir. Bu durumda blokaj oranı % 8,25 olup literatüre uymaktadır (Çakmak, 2000 ve Aka, 2003). Çekici ve römork için yapılan deneysel çalışmalarda kinematik benzerlik sağlanmış ve blokaj etkileri ihmal edilmiştir.

4.1.3. Dinamik benzerlik

Geometrik ve kinematik olarak benzerliğin sağlandığı rüzgâr tüneli deneylerinde dinamik benzerliğin de sağlanması için, kuvvet vektörlerinin paralel ve mutlak değerleri orantılı olmalıdır. Akışkan hareketi sırasında atalet, viskozite, basınç, yerçekimi, yüzey gerilimi ve sıkıştırılabilirlik kuvvetleri ile karşılaşır. Burada herhangi iki kuvvetin birbirine oranı boyutsuz olacaktır. Dinamik benzerlik için analiz sonucunda elde edilen boyutsuz katsayıların model ve prototip için aynı olması gerekmektedir. Dinamik bakımdan benzer akışlar için sadece bir boyutsuz katsayının eşit olması yeterlidir. Eş. 4.1 'de verilen Re sayısı atalet kuvvetlerinin, viskoz kuvvetlerine oranıyla elde edilir.

$$Re = U_{\infty} L / \nu \quad (4.1)$$

Burada yer alan simgelerden U_{∞} ortalama serbest akım hızını (m/s), L model araç uzunluğunu (m), ν ise kinematik viskoziteyi ifade etmektedir. Atalet ve viskoz kuvvetin etkin kuvvet olduğu örneklerde tam dinamik benzerliğin sağlanması için Re sayılarının model ve prototip için aynı olmaları gerekir. Ancak eşitlikten görüldüğü üzere model ve prototip aynı boyutlarda olmadığı sürece, Re sayılarında eşitliğin sağlanması çok güçtür. Ancak ölçülen büyüklükleri ifade eden boyutsuz katsayılar belirli bir hız değerinin üzerinde Reynolds sayısından etkilenmiyor ve Re sayısı arttıkça değişmiyorsa dinamik benzerlik sağlanmış demektir (Solmaz, 2010). Bu çalışmada C_D katsayısının değişmediği Re sayısı tespit edilmiş ve değerlendirmeler Re sayısının bu değerinden sonraki hız aralığı için yapılmıştır.

4.2. Rüzgâr Tüneli Deneyleri

Deneysel çalışmada kullanılan model araç 1/32 ölçekli çekici ve bir römork modelidir. Deneysel çalışmanın ilk bölümünde çekici üzerindeki basınç katsayısı dağılımları deneysel

olarak ölçülmüştür. Aynı çalışma çekiciye römork eklenerek çekici römork kombinasyonu üzerindeki basınç katsayısı dağılımları tespit edilmiştir. Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde çekici üzerine etki eden kuvvet değerleri ölçülerek aerodinamik direnç katsayısı (C_D) hesaplanmıştır. Aynı deney şartlarında çekiciye römork eklenerek çekici römork kombinasyonunun aerodinamik direnç katsayısı hesaplanarak römork ilavesinin direnç katsayısı ne derece değiştirdiği tespit edilmiştir. Deneysel çalışmanın üçüncü bölümünde çekici römork kombinasyonu aerodinamik bakımdan iyileştirilmiştir. Pasif akış kontrol yöntemleri uygulanarak 4 model oluşturulmuştur. Bu aerodinamik parçalar sırası ile araç üzerine eklenerek elde edilen iyileşmeler deneysel olarak ölçülmüştür.

4.2.1. Rüzgâr tüneli

Rüzgâr tüneli test düzeneğinde kullanılan altı bileşenli yük hücresi ile F_x ve F_y kuvvetlerini $\pm 32N$ 'a ve F_z kuvvetini $\pm 100N$ 'a kadar, M_x , M_y ve M_z momentleri ise $\pm 2.5Nm$ aralığında ölçülebilmektedir. Rüzgar tünelinin test bölgesi 400mm x 400mm kare kesite ve 1000mm uzunluğa sahip olup test bölgesinde istenilen hız fan motorunun devir sayısının kontrol edilmesiyle sağlanmaktadır. İstenilen hızın elde edilmesi için 0-50 Hz aralığında ve 0,1 Hz adıma sahip frekans inverter kullanılmıştır. Tünel içerisinde akışı oluşturmak için 4 kW gücünde ve 700mm çapında eksenel fan bulunmaktadır. Rüzgar tüneli serbest akış hızı 3 m/s ile 30 m/s arasında elde edilmekte olup türbülans şiddeti % 1'in altında bulunmaktadır.



Şekil 4.7. Rüzgâr tüneli ve deney düzeneğinin genel görünümü



Şekil 4.7. (Devam) Rüzgâr tüneli ve deney düzeneğinin genel görünümü



Şekil 4.8. Kuvvet-moment ölçüm sisteminin genel görünümü

4.2.2. Model tanımı

Çekici römork modelinin 1/32 ölçeğinde küçültülmüş modeli olup aşağıdaki özelliklere sahiptir. Çizelge 4.1’de model aracın özellikleri, boyutları ve ön yüzey alanları verilmiştir. Model aracın ön yüzey alanı 3 boyutlu tarama cihazında taratılıp elde edilen çizim datasından hesaplanmıştır.

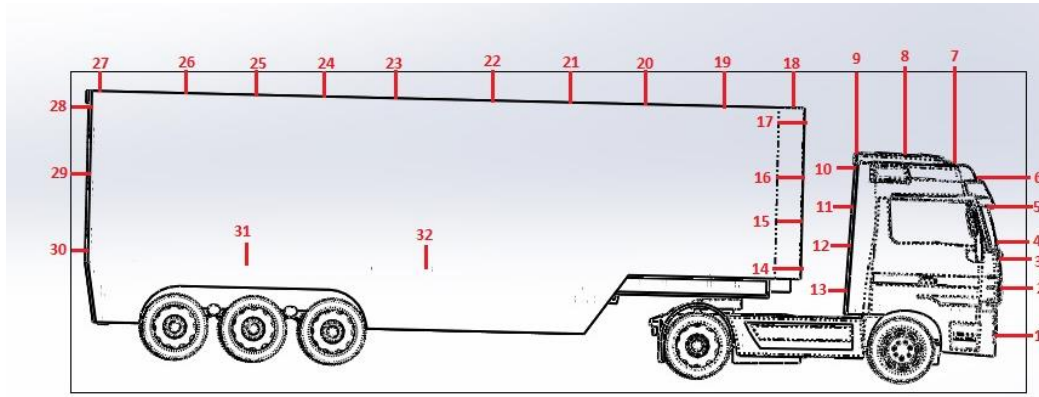
Çizelge 4.1. Model aracın özellikleri ve boyutları

Gövde ve şasi: Diecast metal,
Tampon, aynalar, römork ve cam: Plastik
Görünüş: Metalik-mavi-gri boyalı- pürüzsüz
Çekici yükseklik: 12,81 cm Genişlik: 9,4 cm, Uzunluk (L) : 18,832 cm
Çekici Karakteristik Alan (A) : 0,0108 m ²
Çekici + römork yükseklik: 15,63 cm, Genişlik: 9,4 cm, Uzunluk (L): 48,878 cm
Çekici+ Römork Karakteristik Alan (A) : 0,0132 m ²

4.3. Basınç Ölçüm Deneyleri

4.3.1. Modelin hazırlanması

Şekil 4.9 'da görüldüğü gibi basınç prizi yerleştirmek üzere aracın tam simetri ekseninden geçecek şekilde 1mm çapında yüzeye dik olarak çekici üzerine 13, römork üzerine 19 adet olmak üzere toplam 32 adet delik delinmiştir.



Şekil 4.9. Basınç prizlerinin çekici ve römork üzerindeki yerleri

Şekil 4.10 - 4.12' de görüleceği üzere açılan deliklere kelebek setinin iğne uçları yerleştirilmiş ve kuvvetli yapıştırıcı ile araca sabitlenmiştir. İğne uçlarının araç yüzeyi üzerinde çıkıntı meydana getirmeyecek şekilde yüzeye sıfır olması sağlanmıştır. Araç içinde kalan iğne uçlarına tarayıcı vana ve basınç dönüştürücü ile irtibatı sağlayacak hortum bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Model üzerine yerleştirilen bu deliklerdeki statik basınç değişik hızlarda ölçülmüştür. Deneylerde rüzgâr tüneli serbest akış hızına ait dinamik

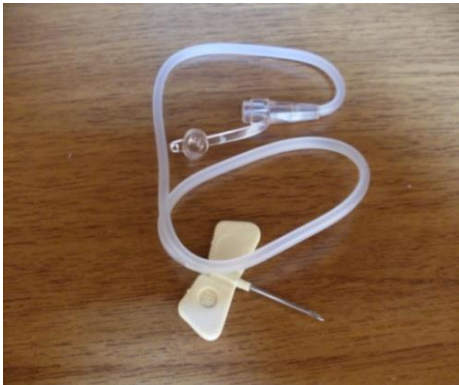
basınç daralma konisi girişı ve çıkışı (test bölgesi girişı) arasındaki basınç farkı ölçölerek elde edilmiştir.



Şekil 4.10. Basınç prizlerinin çekici üzerindeki yerleri



Şekil 4.11. Basınç prizlerinin römork üzerindeki yerleri



Şekil 4.12. Kelebek seti ve römork üzerine konumlandırılması

4.3.2. Basınç dönüştürücü

Basınç ölçüm deneylerinde ölçülen basıncın büyüklüğünü veya değişimini standart bir elektriksel değere çeviren iki adet basınç dönüştürücü kullanılmıştır. Şekil 4.13’ verilen basınç dönüştürücüler diferansiyel tip, Omega PX163-2.5BD5V modeli olup çıkış gerilimleri 0 ile 5 volt aralığında olup algılama süresi 1 milisaniyedir.



Şekil 4.13. Basınç dönüştürücü

4.3.3. Basınç dönüştürücülerin kalibrasyonu

Rüzgâr tüneline deneylerinde basınç ölçümlerinin yapılabilmesi için basınç dönüştürücülerin bilinen basınç değerlerinde çıkış voltaj değerleri elde edilerek kalibrasyonun yapılması gerekmektedir. Kalibrasyon işlemi değerleri Çizelge 4.2’ de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Basınç dönüştürücülerin kalibrasyon değerleri

U1	E1	T1 (C°)	P1 (kpa)	U2	E2	T2 (C°)	P2 (kpa)
-370	2,087	32	85	-370	2,078	32	85
-234	2,625	32	85	-234	2,62	32	85
-128,8	3,032	32	85	-128,8	3,03	32	85
-54,7	3,32	32	85	-54,7	3,32	32	85
0	3,532	32	85	0	3,533	32	85
129	4,035	32	85	129	4,039	32	85
235	4,444	32	85	235	4,451	32	85
370	4,959	32	85	370	4,968	32	85

Bu işlem rüzgar tüneline pitot tüpü ile farklı hızlarda basınç farkı oluşturularak yapılmıştır. Pitot tüpü hem referans basınçölçer olan Manoair 500 mikro manometre cihazına hem de kalibrasyonu yapılan basınçölçere bağlanmıştır. Basınçölçerde oluşan çıkış gerilimleri MiniCTA programı ile bilgisayara aktarılmıştır. Rüzgâr tüneli değişik hızlarda çalıştırılarak bu hızlara karşılık gelen basınç değerleri Manoair 500 model mikro manometresinden okunmuş ve MiniCTA programında bu basınç değerlerine karşılık gelen gerilim değerleri okunarak kalibrasyon eğrisi oluşturulmuştur.

4.3.4. Model aracın rüzgâr tüneline yerleştirilmesi

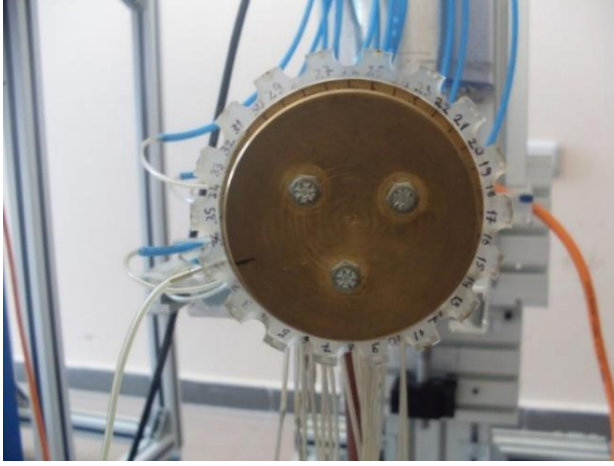
Deneysel çalışmada doğru sonuçların elde edilebilmesi için gerek rüzgâr tünelinin gerekse model aracın rijit ve düz bir şekilde konumlandırılması gerekmektedir. Rüzgâr tüneli test bölgesinin giriş kısmının yüksekliği 40 cm çıkış kısmı 41 cm olduğundan bağlantı ayaklarından bu durum normalize edilmiş Şekil 4.14'te su terazisi ile tünelin tüm bölgeleri teraziye getirilmiştir.



Şekil 4.14. Terazisi alınmış deney düzeneği



Şekil 4.15. Başın ölçüm düzeneği genel görünüşü



Şekil 4.16. Tarayıcı vana

4.3.5. Basınç katsayılarının (C_p) belirlenmesi

Basınç birim yüzeye etki eden dik kuvvet olarak tanımlanır. Toplam basınç ise akışkanın hareketi nedeni ile sahip olduğu dinamik basınç ile statik basıncın toplamıdır. Akışın dinamik basıncı hızın bir fonksiyonu olup aynı zamanda yoğunluğa bağlı olarak değişmektedir. Basınç katsayısı (C_p) ise yüzeydeki basınç prizinden ölçülen basınçtan akışın statik basıncının çıkarılması ile elde edilen basınç farkının, akışın dinamik basıncına oranı şeklindedir. Yüzey basınçlarının tespitinde saniyede 800 veri alınmış olup bu değer basınç dönüştürücünün algılama süresi kapasitesinin (1 000 Hz) altında bir değerdir. Basınç katsayısının tespitinde toplam 16 384 veri alınmış olup her bir ölçüm 20,48 saniye sürmüştür. Bu verilerin ortalamasına göre her basınç prizindeki basınç katsayıları tespit edilmiştir.

Her bir basınç prizindeki ait basınç katsayıları (C_p), Eşitlik 4.2' den hesaplanmıştır.

$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (4.2)$$

ΔP : Her bir basınç prizinde alınan 3 seri basınç ölçümünün aritmetik ortalaması (Pa)

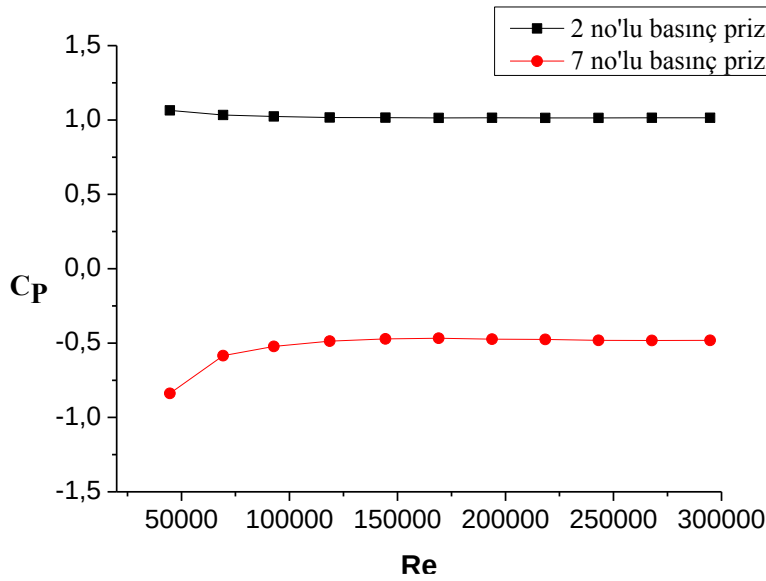
ρ : Havanın yaklaşık yoğunluğu (laboratuvar ortam koşullarında 1 kg/m³)

V : Serbest akış hızı (m/s)

C_p : Basınç katsayısı

4.3.6. Reynolds sayısı bağımsızlığı

Model araç üzerinde belirlenen 2 ve 10 no'lu basınç prizlerinde 3,8 m/s, 5,9 m/s, 7,9 m/s, 10,1 m/s, 12,3 m/s, 14,4 m/s, 16,5 m/s, 18,6 m/s, 20,7 m/s, 22,8 m/s ve 25,1 m/s serbest akış hızlarında statik basınç değerleri tespit edilmiştir. Bu hızlara karşılık gelen Reynolds sayılarında (44 000 – 294 000) C_p katsayısı hesaplanmıştır. 2 no'lu basınç prizi ön tampon üzerinde 10 no'lu basınç prizinin yeri ise çekicinin arka kısmında olup negatif basınç bölgesindedir. Şekil 4.17'de görüldüğü üzere yapılan deneylerden sonra $Re=150\ 000$ ' den sonraki sonuçlara bakıldığında C_p katsayısının her iki priz için sabit bir değerde seyrettiği gözlemlenmiştir. 7 no'lu basınç prizi negatif basınç bölgesinde türbülanslı bölgede yer aldığından burada Reynolds bağımsızlığı daha geç elde edilmektedir. 2 nolu basınç prizinde ise yaklaşık $Re=60\ 000$ 'den sonra Reynolds bağımsızlığı elde edilmiştir. Bu çalışmada belirlenen aerodinamik dirençlerinin büyük bir kısmı basınca bağlı olarak meydana geldiğinden Reynolds sayısı bağımsızlığının kabulü için deney çalışmaları özellikle $Re=60\ 000$ üzeri Reynolds sayılarına karşılık gelen hızlarda gerçekleştirilmiştir.

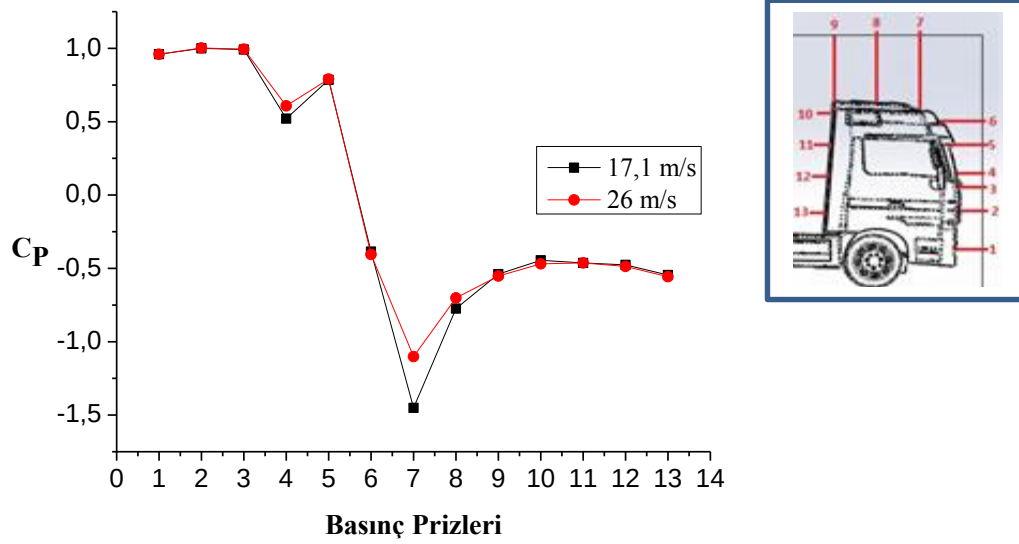


Şekil 4.17. Deneyel çalışmalarda Reynolds bağımsızlığı grafiği

4.3.7. Çekici üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı

İki değişik hızda gerçekleştirilen deneyler sonucunda basınç prizlerindeki statik basınç değerleri tespit edilmiştir. Bu statik basınç değerleri manometre ile ölçülen dinamik basınç

değerlerine oranlanarak her bir basınç prizindeki basınç katsayısı (C_p) tespit edilmiştir. Her iki hızda elde edilen basınç katsayıları birbirine oldukça yakın değerlerde elde edilmiş olup Şekil 4.18’ de verilmiştir.



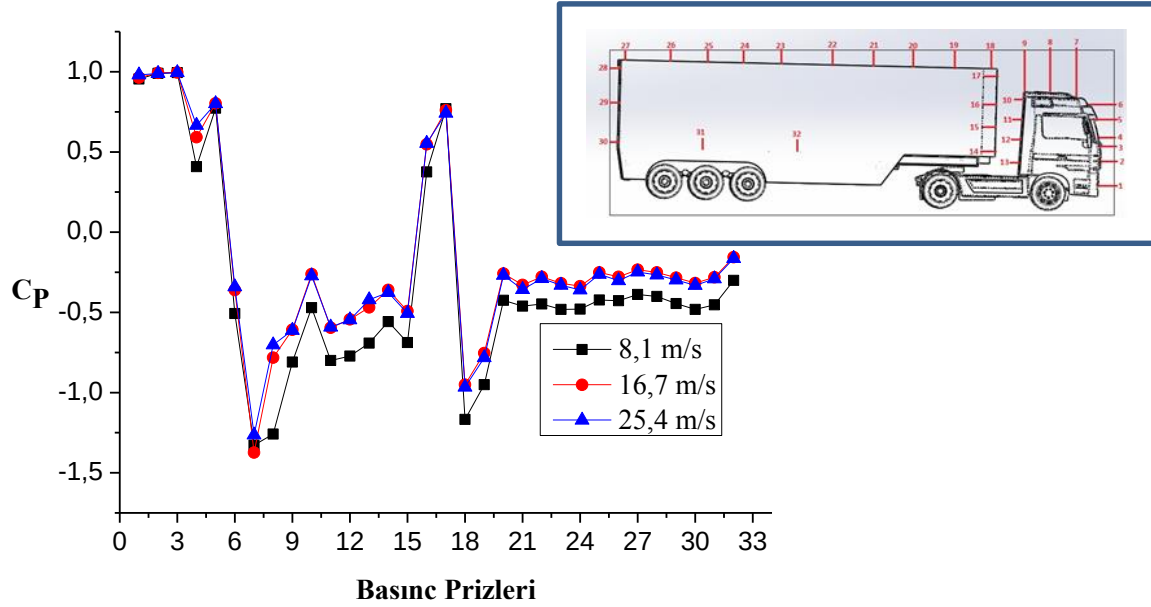
Şekil 4.18. Çekici üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı

Deney sonuçlarına göre 2 no’lu basınç prizinde (ön tampon üzeri) C_p katsayısı 1 olarak ölçülmüş ve durma basıncının burada oluştuğu tespit edilmiştir. Akış görüntülemelerinde de görüldüğü üzere akış ön tamponun geometrik şekline bağlı olarak bu noktada durmuş ve toplam basıncın tamamını statik basınç meydana getirmiştir. 1 ve 3 no’lu basınç prizlerinde C_p katsayısının yüksek olduğu, 4 no’lu basınç prizinde ön camın hücum açısına bağlı olarak basıncın düştüğü 5 no’lu basınç prizi şapkalığın altında kalması nedeniyle şapkalığın altına giren havanın basıncı arttırdığı görülmüştür. 6 no’lu basınç prizinin şapkalığın üzerine yerleştirildiğinde ve bu kısım yuvarlatılmış olduğundan bu 6 ve 7 no’lu basınç prizlerinde statik basınç negatif okunmuştur. 8 ve 9 no’lu basınç prizleri taşıtın tavan bölgesinde 10, 11, 12 ve 13 no’lu basınç prizleri çekicinin arkasında yer aldığından bu bölgelerde basınç katsayısı değerleri negatif ve birbirine yakın olduğu görülmüştür.

4.3.8. Çekici römork üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı

Üç değişik hızda gerçekleştirilen deneyler sonucunda çekici ve römork üzerine konumlandırılan basınç prizlerindeki statik basınç değerleri tespit edilmiştir. Bu statik basınç değerleri manometre ile ölçülen dinamik basınç değerlerine oranlanarak her bir basınç

prizindeki basınç katsayısı (C_p) tespit edilmiştir. Üç değişik hızda elde edilen basınç katsayıları birbirine yakın değerlerde elde edilmiş olup Şekil 4.19' de verilmiştir.



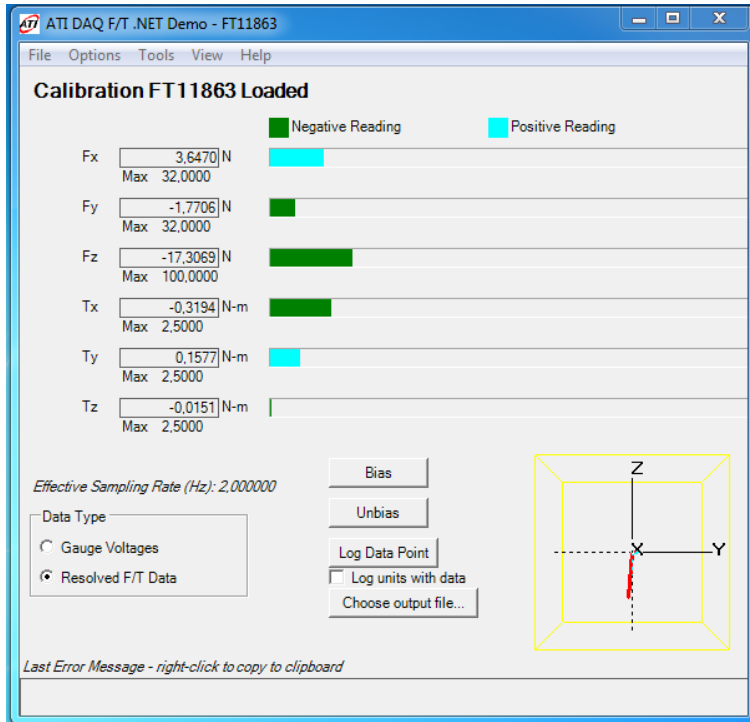
Şekil 4.19. Çekici römork üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı

Bu deney çalışmasında çekiciye römork eklenmiş ve basınç katsayısı dağılımları tespit edilmiştir. Özellikle römork çekiciden yüksek olması nedeni ile 17, 18 ve 19 no'lu basınç prizlerinde basınç katsayısının yüksek olduğu tespit edilmiştir. 18 no'lu basınç prizindeki C_p katsayısının 0,966 olduğu görülmüş ve bu değer ön tampon üzerinde bulunan 2 no'lu basınç prizindeki durma basıncına yakın olduğu görülmüştür. Bu durumun özellikle spoiler seçiminin önemini ortaya koymuştur. 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 ve 27 no'lu basınç prizleri römorkun üzerinde bulunmakta olup ölçülen basınç katsayısı değerleri birbirine yakın değerdedir. 28, 29 ve 30 no'lu basınç prizleri römorkun arka tarafında yer almakta olup 30 no'lu prizde ölçülen C_p katsayısı taşıtın altından giren havanın etkisi ile bir miktar yüksek ölçülmüştür. 31 ve 32 prizler römorkun altına konumlandırılmış ve buradaki statik basıncın römorkun üzerindeki negatif basınç değerinden daha düşük olduğu görülmüştür.

4.4. Kuvvet Ölçüm Deneyleri

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

Taşıtlarda toplam sürüklenme kuvvetinin çok büyük bir kısmı basınca bağlıdır. Basınç kaynaklı sürüklenme kuvveti cismin akışa dik olan yüzey bileşenlerine etki eden basınç dağılımı nedeniyle oluşmaktadır. Sürtünme kaynaklı sürüklenme kuvveti ise cismin akışa paralel olan yüzey bileşenlerine etki eden kayma gerilmesi nedeniyle oluşmaktadır. Sürüklenme kuvveti yoğunluk, hız ve alana bağlı olarak ifade edildiğinden bunların boyutsuz ifade edilebileceği boyutsuz katsayı aerodinamik direnç katsayısı (C_D) olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada elde edilen aerodinamik direnç katsayısı, basınç ve sürtünme kaynaklı sürüklenme kuvvetlerinin toplamını içermekte olup yük hücresi kullanılarak ölçülmüştür. Model araca etki eden toplam sürüklenme kuvvetlerinin ölçümünde altı eksenli ATI yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücresi x, y ve z eksenlerine uygulanan kuvvet ve momentleri hassas olarak ölçebilmektedir. Şekil 4.20’de ATI yük hücresi programının ara yüzü verilmiştir.



Şekil 4.20. ATI yük hücresi programının ara yüzü

Aerodinamik direnç katsayısı eşitlik 4.3 ‘de verilmiş olup sürüklenme kuvveti F_D , yoğunluk ρ , serbest akış hızı V ve ön bakış alanı $A_{\text{ön}}$ parametrelerinin fonksiyonudur.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_{\text{ön}}} \quad (4.3)$$

4.4.1. Katı durağan zemine etki eden kuvvet değerleri

Çizelge 4.3’de görüleceği üzere kuvvet ölçümünde aracın konumlandığı zemine değişik hızlarda etkiyen kuvvet ölçülmüştür. Basınç ölçümünde olduğu gibi plexiglass malzemedan yapılmış olan katı durağan zemin yerden 5 cm yukarıda konumlandırılacak şekilde yük hücresine bir mil ile bağlanmıştır. Rüzgâr tüneli 6 değişik hızda çalıştırılarak zemine etki eden kuvvet değerleri 3 tekrarlı ölçülmüştür.

Çizelge 4.3. Katı durağan zemine etki eden kuvvet değerleri

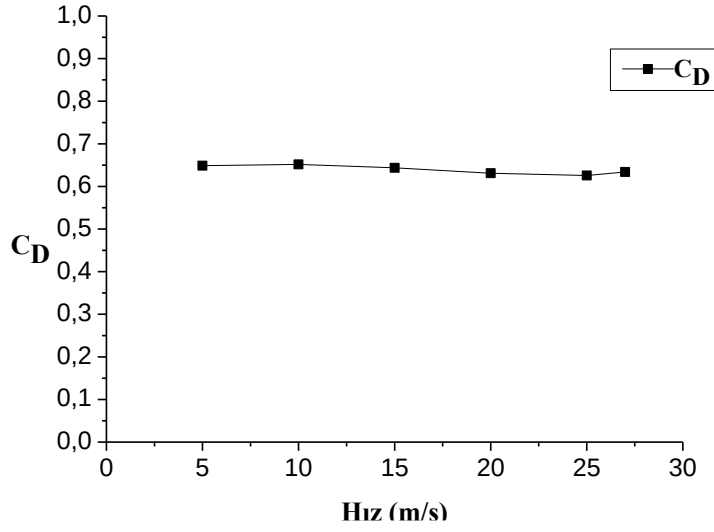
Hız (m/s)	Kuvvet (N)
5	0,046
10	0,165
15	0,365
20	0,654
25	0,974
27	1,147

4.4.2. Çekiciye etki eden kuvvet değerleri

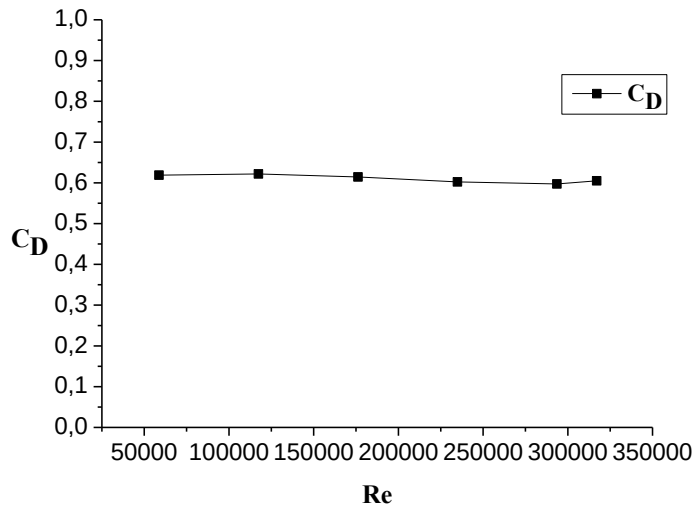
Çekici katı durağan zemin üzerine kuvvetli yapıştırıcı ile sabitlenmiştir. Araca etki eden kuvvet değerleri 6 değişik hızda ölçülerek katı durağan zeminin kuvvet değeri bu değerlerden çıkarılmış ve çekiciye etki eden net kuvvet değerleri tespit edilmiştir. Bu kuvvet değerlerine göre Eşitlik 4.3 kullanılarak çekicinin aerodinamik direnç katsayısı tespit edilmiştir. Tespit edilen kuvvet değerleri ve bu değerlere karşılık hesaplanan aerodinamik direnç katsayıları Çizelge 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Çekiciye etki eden kuvvet değerleri ve C_D katsayıları

Hız (m/s)	Kuvvet (N)	C_D katsayısı
5	0,084	0,619
10	0,337	0,622
15	0,749	0,614
20	1,305	0,602
25	2,022	0,597
27	2,389	0,605



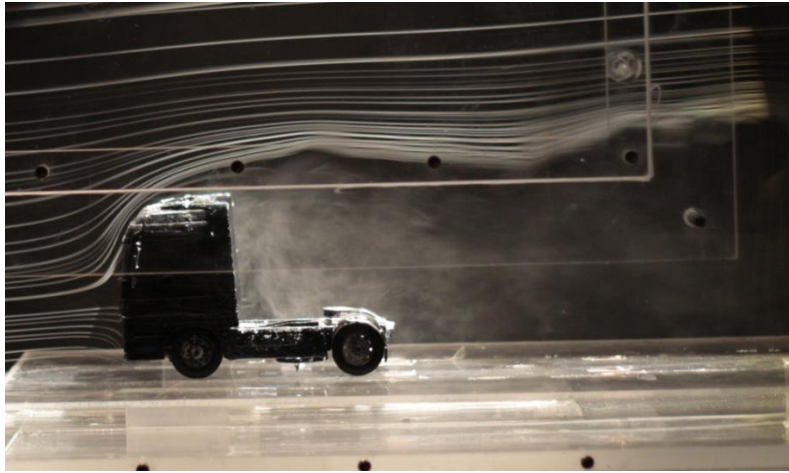
Şekil 4.21. Hıza göre çekicinin C_D katsayısı grafiği



Şekil 4.22. Reynolds sayısına göre çekicinin C_D katsayısı grafiği

Deney çalışmaları ATI programında yapılmıştır. Her deney öncesinde rüzgâr tüneli kapalı iken bias yapılarak deney şartlarındaki küçük değişikliklere bağlı olabilecek sapmalar azaltılmıştır. Deneyler 6 değişik hızda, her hız için saniyede 2 veri alınarak 60 sonuç alınmış ve bu 120 değerın ortalamaları alınarak ortalama kuvvet değerlerine göre C_D katsayısı hesaplanmıştır. Şekil 4.21 ve 4.21' de görüldüğü üzere çekiciye etki eden C_D katsayısı ortalama 0,610 olarak tespit edilmiştir. Basınç katsayısı dağılımları incelendiğinde özellikle ön tampon bölgesi, ön cam hücum açısı ve spoiler tasarımlarında yapılabilecek iyileştirmeler ile bu katsayının düşürülebileceği görülmüştür.

Şekil 4.23’de görüldüğü üzere akış görüntülenmesinde araç önüne dikey eksen boyunca direnç teli yerleştirmiş ve telin üzerine parafin damlatılarak direnç teli doğru akım kaynağına bağlanmıştır. Rüzgar tüneli çekici için $Re = 17\,600$ (1,5 m/s) sayısında, çekici römork için $Re = 46\,900$ (1,5 m/s) sayısında çalıştırılmış direnç teli doğru akım ile ısıtılarak üzerindeki parafin buharlaştırılmıştır. Çekici etrafında oluşan akış görüntülerinin fotoğrafı çekilerek çekici üzerindeki akış yapısı, akış kopmaları ve türbülanslı bölgeler gözlemlenmiştir.



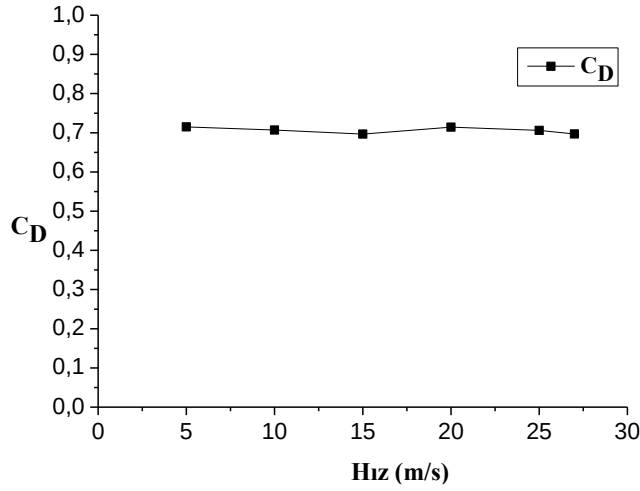
Şekil 4.23. Çekicinin akış görüntülemesi

4.4.3. Çekici ve römorka etki eden kuvvet değerleri

Çekici römork modeline 6 değişik hızda aynı deney şartlarında etki eden net kuvvet değerleri tespit edilmiştir. Çekici römork kombinasyonuna x yönünde etki eden net kuvvet değerlerine göre sürüklenme katsayısı (C_D) hesaplanmıştır.

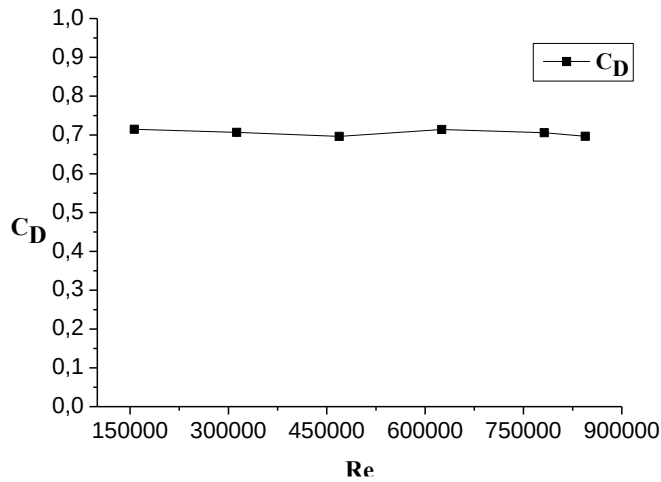
Çizelge 4.5. Çekici römork kombinasyonuna etki eden kuvvet değerleri ve C_D katsayıları

Hız (m/s)	Kuvvet (N)	C_D katsayısı
5	0,118	0,715
10	0,467	0,707
15	1,036	0,697
20	1,889	0,714
25	2,917	0,706
27	3,359	0,697



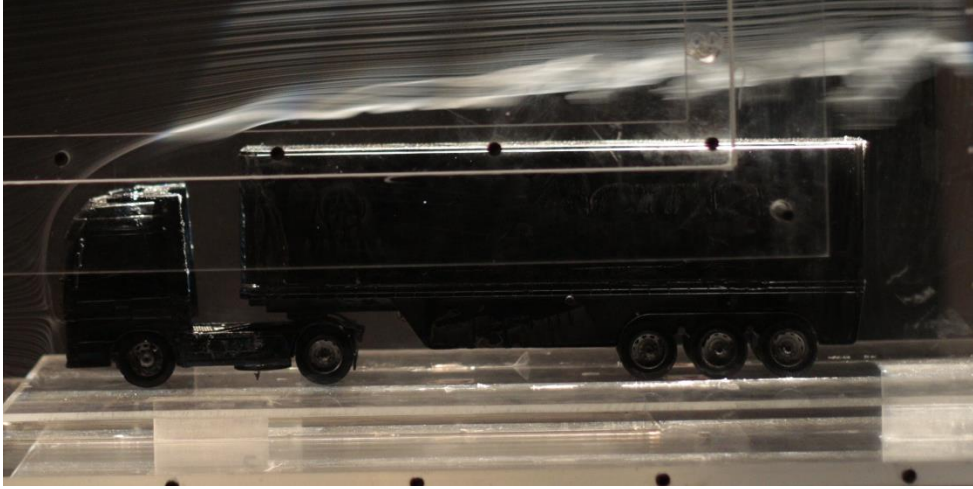
Şekil 4.24. Hıza göre çekici ve römorkun C_D katsayısı grafiği

Şekil 4.24 ve 4.25’de görüldüğü üzere Çekici ve römork kombinasyonunun toplam aerodinamik direnç katsayısı ortalama 0,706 olarak ölçülmüştür. Çekiciye eklenen römorkun C_D katsayısını ortalama % 15,75 arttırdığı görülmüştür.

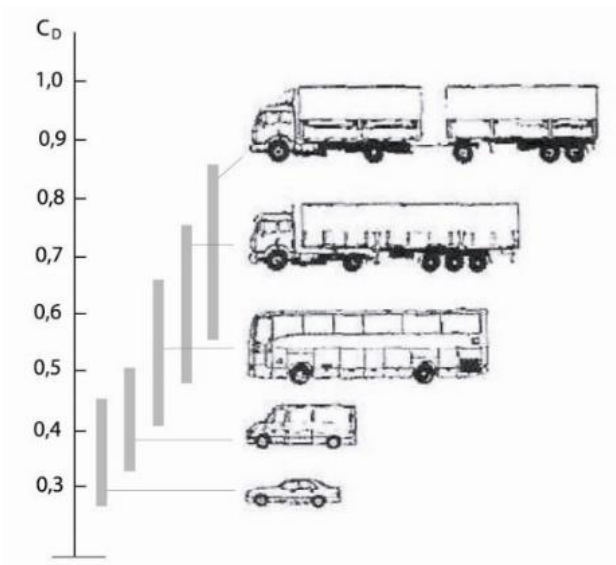


Şekil 4.25. Reynolds sayısına göre çekici ve römorkun C_D katsayısı grafiği

Basınç katsayısı dağılımı grafiği incelendiğinde basınç katsayısının yüksek olduğu 17 ve 18 numaralı basınç prizlerin bulunduğu römorkun ön üst kısmında spoiler ile aerodinamik iyileştirme yapılabileceği görülmüştür. Çekici römork arasındaki negatif basınç bölgesi ile römorkun arkasında kalan negatif basınç bölgelerinde de iyileştirme yapılabileceği tespit edilmiştir.



Şekil 4.26. Çekici römorkun akış görüntülemesi



Şekil 4.27. Çeşitli sınıflardaki taşıtların aerodinamik direnç katsayıları (Şahin, 2008)

Şekil 4.25' de görüldüğü üzere çekici ve römork kombinasyonlarının C_D katsayıları 0,7 - 0,9 aralığındadır. Deney sonuçları incelendiğinde tespit edilen C_D katsayısının literatüre de uyduğu görülmüştür.

5. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR MEKANİĞİ (HAD) İLE ÇÖZÜM

Bu çalışmada hesaplamalı akışkanlar mekaniği yöntemi (HAD) kullanılarak çekici römork kombinasyonunun aerodinamik yapısı incelenmiştir. Sayısal çalışmada model araç olarak üretiminin Türkiye’de en çok bulunan modellerden birisi olan bir çekici modeli ve standart bir römork modeli seçilmiştir. Şekil 5.1’de prototip çekici römork kombinasyonu Şekil 5.2’de 1/32 ölçekli model araç verilmiştir.



Şekil 5.1. Prototip çekici ve römork



Şekil 5.2. 1/32 ölçeğinde çekici ve römork model aracı

5.1. Çizim Datasının Elde Edilmesi

Taşıt aerodinamiği ile ilgili çalışmalarda geometrik benzerliğin sağlanması temel benzerlik şartlarından birisidir. Bu çalışmada geometrik benzerliği sağlamak üzere aşağıda yapılan işlemler neticesinde çizim datası katı model olarak elde edilmiş ve kalite kontrolü yapılmıştır. Bu taşıtın 1/32 ölçeğindeki modeline sırasıyla aşağıdaki işlemler uygulanmıştır.

5.1.1. Üç boyutlu optik tarama

Şekil 5.3’ de çekici ve römork ayrı ayrı 1 adet developer sprej kullanılarak boyanmış, Şekil 5.4’ de üç boyutlu optik tarama cihazı ile optik tarama yöntemiyle 3 boyutlu çizim datası elde edilmiştir. Şekil 5.5’ de üç boyutlu tarama cihazı, Şekil 5.6’ da çekiciye ait noktasal ağ yapısı, Şekil 5.7’ de ise römorkun üç boyutlu noktasal ağ yapısı verilmiştir.



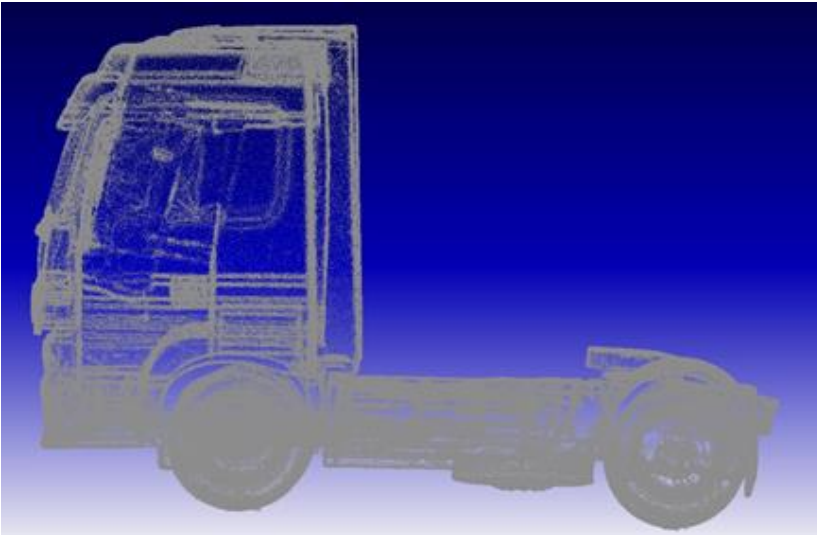
Şekil 5.3. Spreyle boyanmış model araç



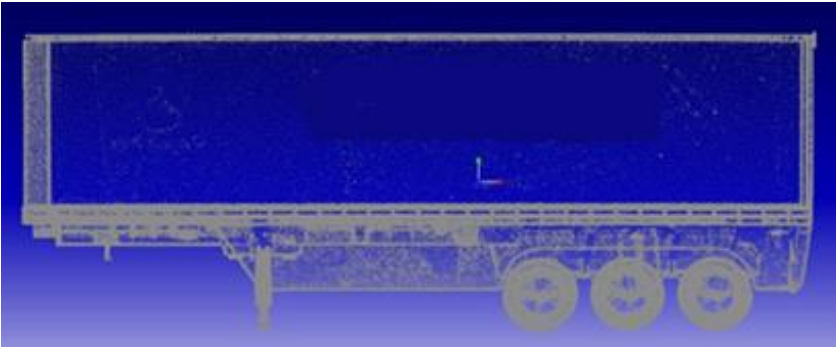
Şekil 5.4. Üç boyutlu optik tarama cihazı



Şekil 5.5. Model aracın üç boyutlu taranması



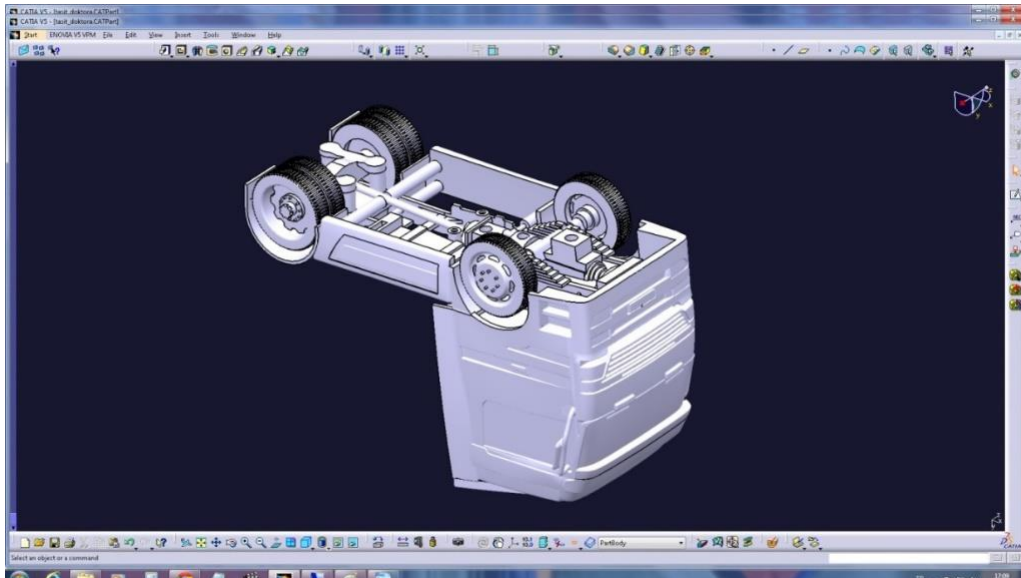
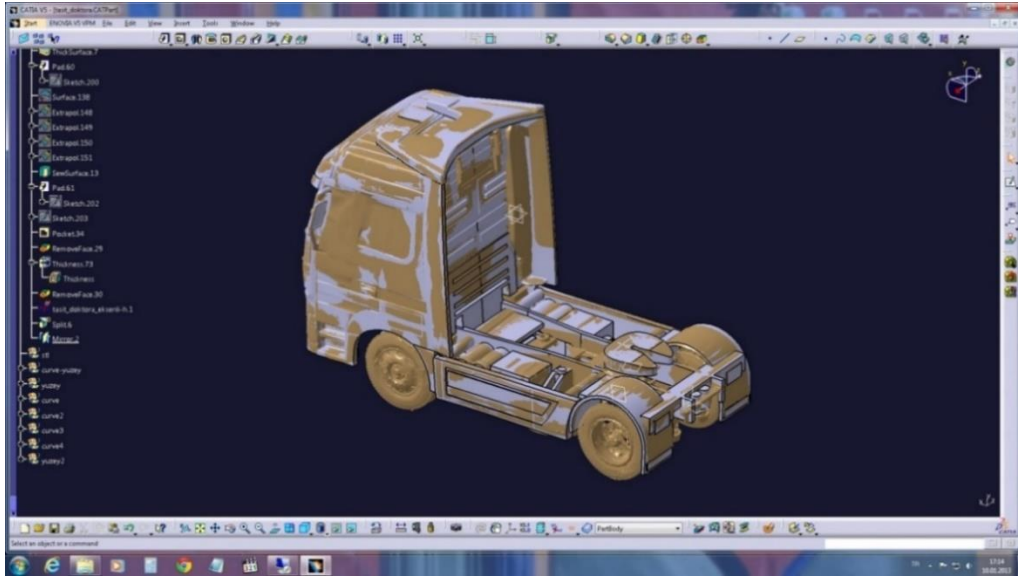
Şekil 5.6. Üç boyutlu taranan çekicinin noktasal ağ yapısı



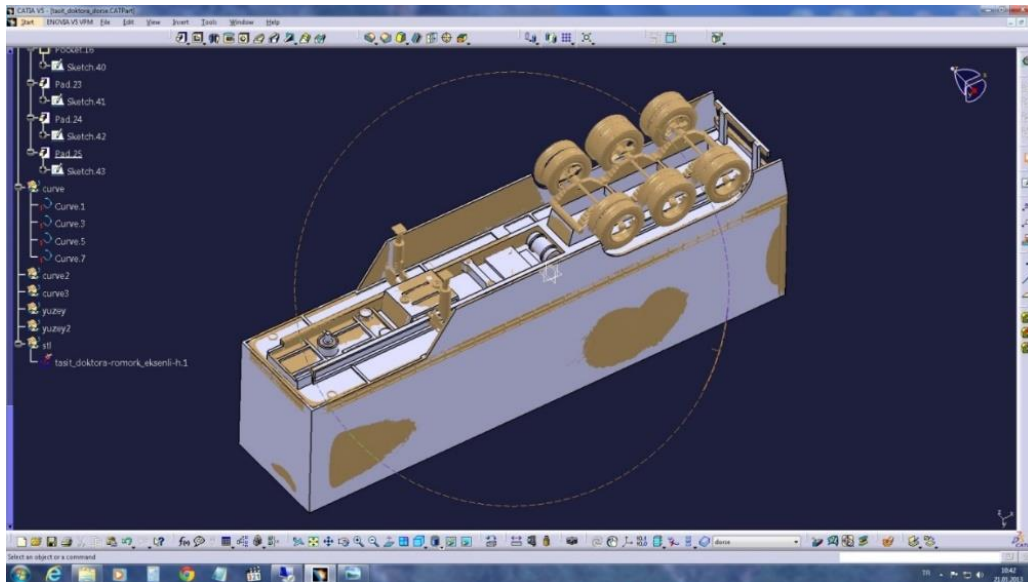
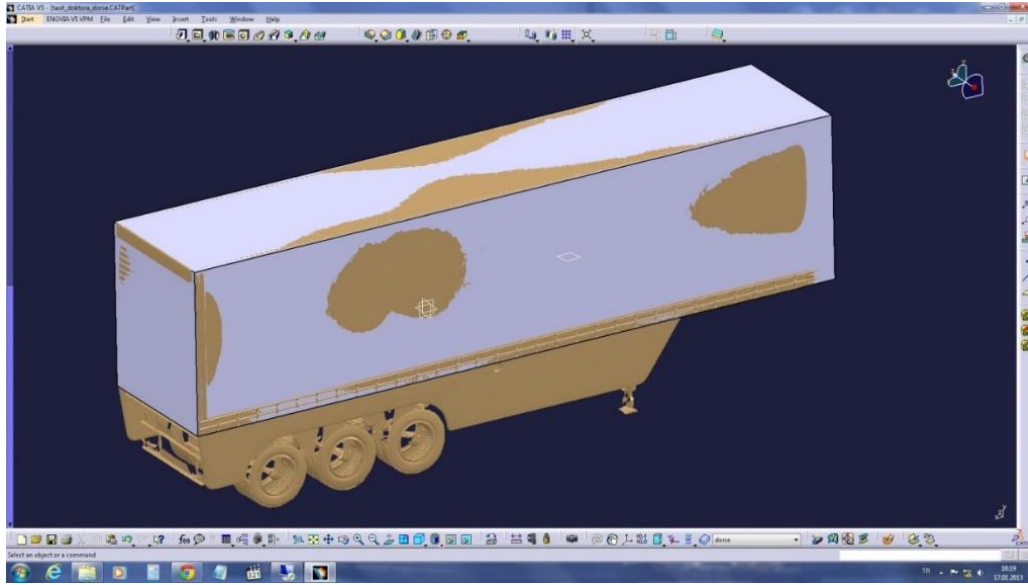
Şekil 5.7. Üç boyutlu taranan römorkun noktasal ağ yapısı

5.1.2. Modelleme

Şekil 5.8 ve Şekil 5.9 görüleceği üzere noktasal ağ yapılarından faydalanılarak bilgisayar destekli tasarım yazılımı (Catia V5) ile elde edilen ölçüm datası üzerinden parametrik modelleme yöntemi ile 3 boyutlu çizim dataları elde edilmiştir. Elde edilen çizim dataları incelendiğinde geometrik benzerlik büyük oranda sağlanmıştır. Ancak prototip araca göre yüzey pürüzlülüğüne bağlı oluşabilecek hatalar ihmal edilmiştir.



Şekil 5.8. Çekicinin çizim dataları



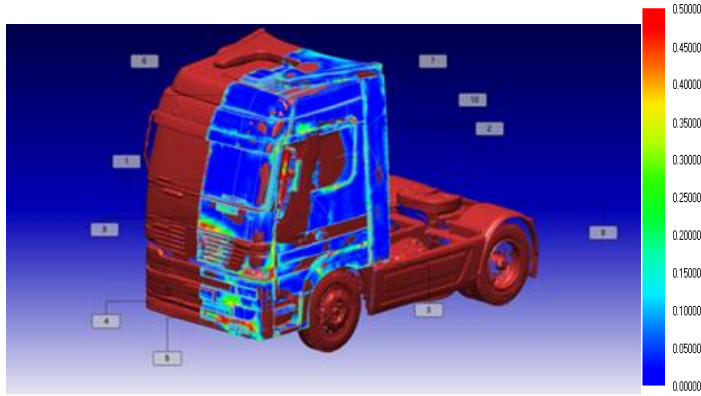
Şekil 5.9. Römorkun çizim dataları

5.1.3. Kalite kontrol

Model araçta üç boyutlu tarama sonrası elde edilen ölçüler ve elde edilen çizim datalarına ait ölçüler Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2’ de verilmiştir. Yapılan kalite kontrolde Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’ görüldüğü üzere araca ait yüzeyler tanımlanmış tarama cihazında elde edilen ölçüler ile çizim datası ölçüleri arasındaki ölçü farkı kontrol edilmiştir. Model araç ile 3 boyutlu çizim dataları arasında olabilecek hatalar tersine mühendislik yazılımı olan Rapid Form 2006® ile mikron düzeyinde kontrol edilmiştir.

Çizelge 5.1. Çekiciye ait çizim datasının kalite kontrolündeki hatalar

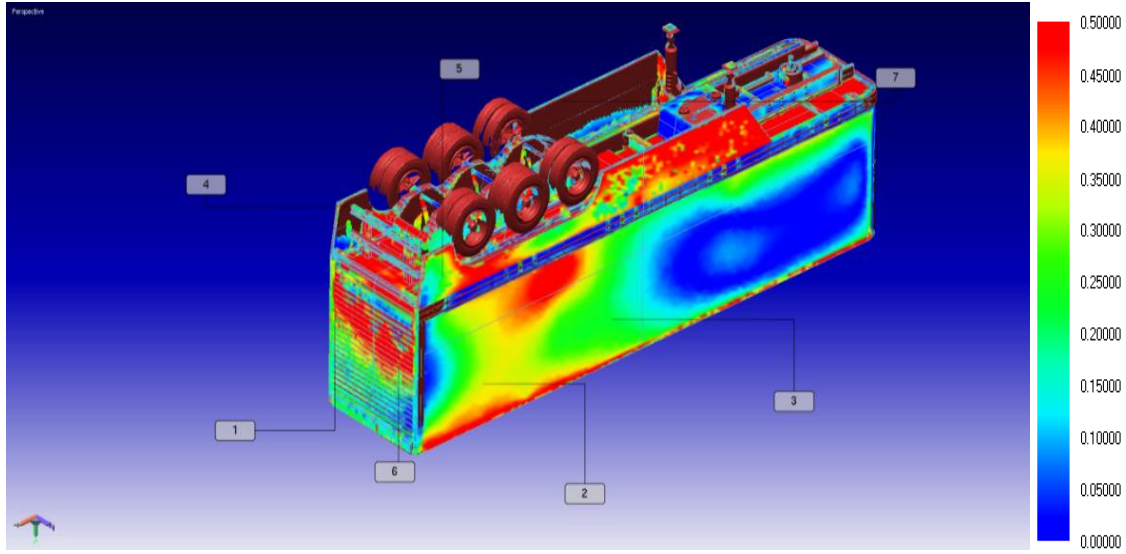
Yüzey	Tarama cihazında ölçülen uzunluk			Çizim datasındaki uzunluk			Koordinatlardaki ölçü farkı			En büyük ölçü farkı
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	85,042	-11,288	-10,195	85,044	-11,288	-10,195	0,002	0	0	0,002
2	15,837	6,171	-38,961	15,83	6,17	-38,932	-0,006	-0,001	0,029	0,029
3	45,926	-48,098	-38,336	45,927	-48,096	-38,425	0,001	0,002	-0,089	0,089
4	85,078	-61,769	-17,698	85,348	-61,78	-17,699	0,271	-0,011	-0,001	0,271
5	84,332	-69,918	-12,817	84,945	-69,943	-12,801	0,613	-0,025	0,017	0,614
6	73,241	22,722	-6,872	73,27	22,739	-6,873	0,029	0,017	0	0,034
7	27,928	32,067	-1,173	27,929	32,081	-1,173	0,001	0,014	0	0,014
8	28,006	-25,249	-38,584	28,006	-25,25	-38,563	0	-0,001	0,02	0,02
9	87,91	-27,417	-8,338	87,99	-27,411	-8,341	0,08	0,006	-0,002	0,08
10	75,412	16,555	-34,314	75,391	16,541	-34,278	-0,021	-0,014	0,036	0,044



Şekil 5.10. Çekicinin kalite kontrolünde tanımlanan yüzeyler

Çizelge 5.2. Römorka ait çizim datasının kalite kontrolündeki hatalar

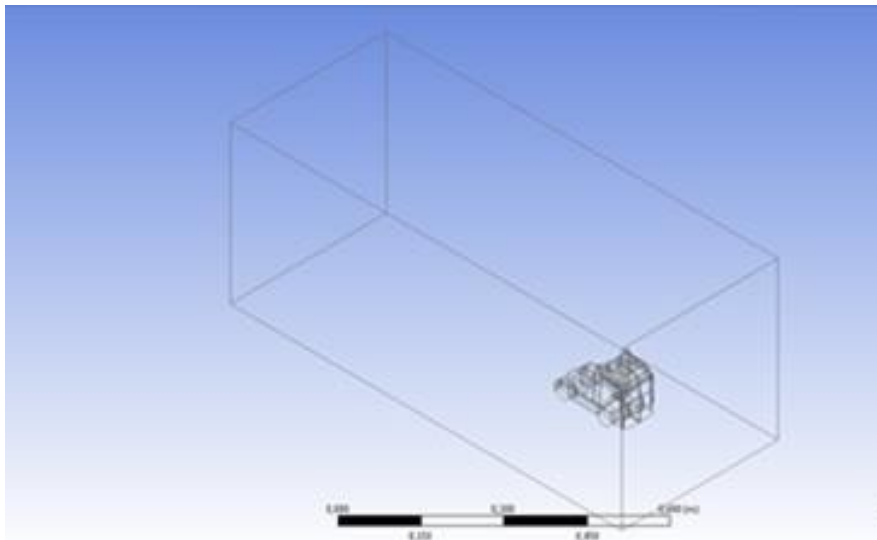
Yüzey	Tarama cihazında ölçülen uzunluk			Çizim datasındaki uzunluk			Koordinatlardaki ölçü farkı			En büyük ölçü farkı
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	161,294	10,051	-36,139	161,7	10,051	-36,139	0,406	0	0	0,406
2	107,826	46,013	40,149	107,826	46,013	40,5	0	0	0,351	0,351
3	2,431	44,03	40,28	2,431	44,03	40,5	0	0	0,22	0,22
4	153,894	-52,99	-29,37	153,894	-53,15	-29,37	0	-0,159	0	0,159
5	141,966	-34,09	40,237	141,966	-34,09	40,5	0	0	0,263	0,263
6	161,055	17,39	22,044	161,7	17,39	22,044	0,645	0	0	0,645
7	-24,742	-50,27	-37,984	-24,742	-50,27	-38,5	0	0	-0,516	0,516



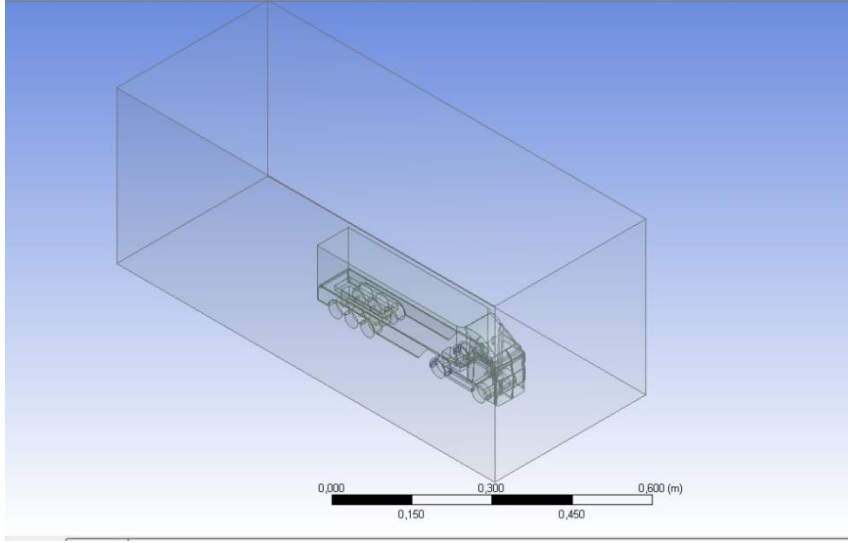
Şekil 5.11. Römorkun kalite kontrolünde tanımlanan yüzeyler

5.2. Aerodinamik Analiz

Model aracın çizim dataları katı model olarak elde edilmiş bilgisayar destekli tasarım yazılımı ile Şekil 5.12’ de çekicinin, Şekil 5.13’ çekici ve römorkun kalıp boşluğu oluşturulmuştur. Kalıp boşlukları rüzgâr tüneli test alanı ölçülerinde (40 cm x 40 cm x 100 cm) oluşturulan dikdörtgen prizma hacmi içerisine yerleştirilmiştir. Çizim datası deneysel çalışmalarda olduğu gibi giriş kısmından 15 cm içeriye konumlandırılarak üniform akış yapısının model araca etki etmesi amaçlanmıştır.



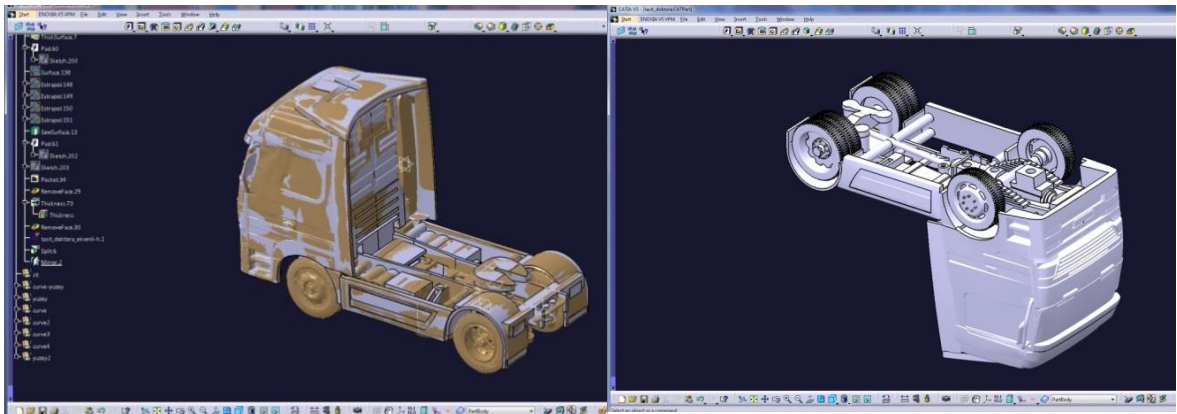
Şekil 5.12. Çekicinin kalıp boşluğu



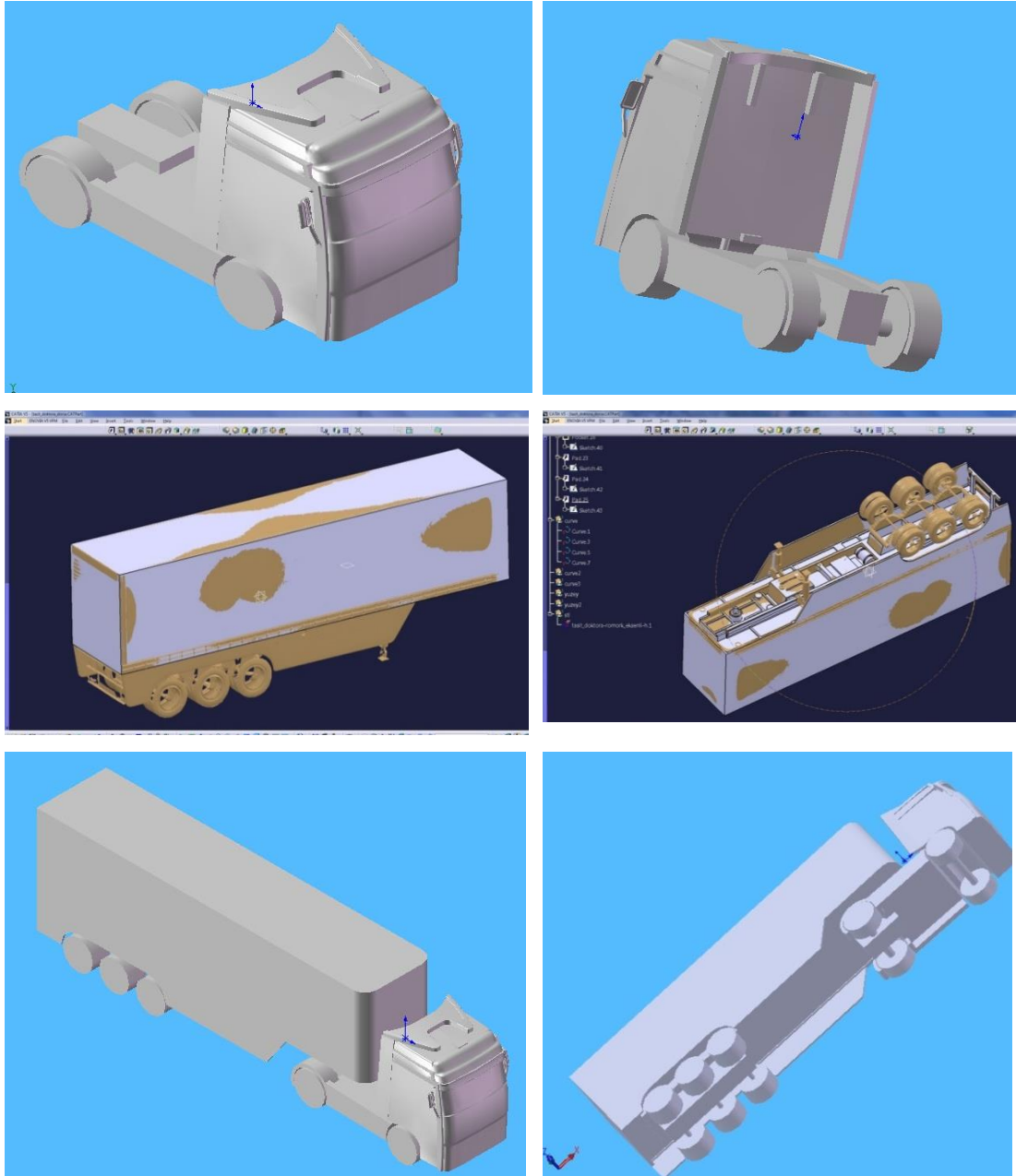
Şekil 5.13. Çekici römorkun kalıp boşluğu

5.2.1. Sayısal çözümlemede çizim datasında yapılan kabuller

Taşıt aerodinamiğinin sayısal çalışma bölümünde çizim datasının geometrik benzerliği doğru sonucun elde edilmesi için çok önemlidir. Ancak çizim datasının karmaşıklığı, küçük çizim ayrıntıları ve katmanlar ağ oluşturma bölümünde minimum ağ ölçüsünden daha da küçük olduğunda ağ hatası vermekte ve sayısal çözümleme yapılamamaktadır. Bu yüzden Şekil 5.14’de araç üzerindeki akış yapısını ve geometrik benzerliği bozmayacak şekilde bu küçük parçalar kapatılmış veya aynı sürüklenme direncini oluşturacak karmaşık olmayan daha basit parçalar eklenmiştir. Sayısal çözümleme sonuçlarında bu durumdan kaynaklanan hatalar ihmal edilmiştir.



Şekil 5.14. Basitleştirilmiş çizim dataları



Şekil 5.14. (Devam) Basitleştirilmiş çizim dataları

5.3. Sayısal Çözümler

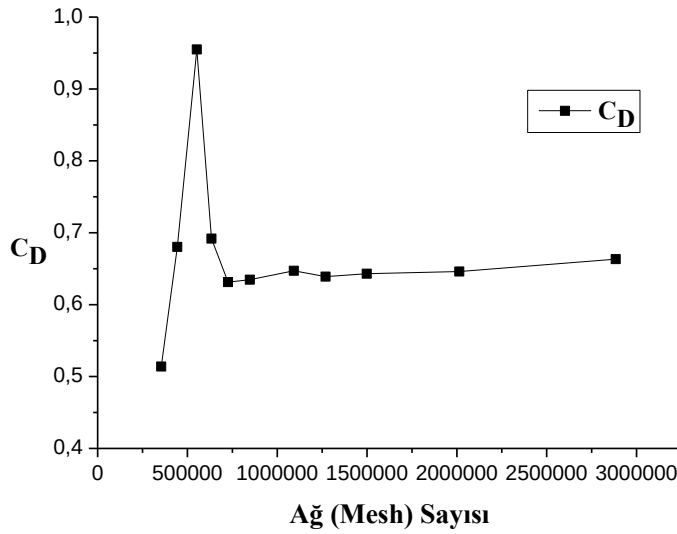
Sayısal çözümler Fluent® programında, Intel® Core TM i5 3570 CPU 3.40 GHz işlemci ve 8 GB ram özelliklerine sahip bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Çözümler 10m/s, 15m/s, 20m/s ve 27 m/s hızlarında yapılmıştır.

5.4. Sayısal Çözümlerlerde Ağdan Bağımsızlık

Sonlu hacimler ile ilgili yapılan sayısal çalışmalarda düzgün ve kaliteli bir ağ oluşturmak sonuçların doğruluğu açısından çok önemlidir. Bu yüzden sayısal çalışmalarda ağ kalitesi aranmaktadır. Ancak geometrinin karmaşıklığı arttıkça bu ağ kalitesini elde etmek zorlaşmaktadır. Bölüm 5.2.1’ de yapılan kabullere rağmen çekici ve çekici römork kombinasyonunun çizim datasında birçok ayrıntılı, küçük ve kavis açısı bulunan parçalar bulunmaktadır. Bu durum da istenilen düzeyde ağ kalitesi elde edilememiştir. Daha iyi ağ kalitesini elde etmek için çizim datasını daha da basitleştirmek, kavis açısı olan parçaların yerine daha düz parçalar çizmek ya da küçük parçaları kapatmak gerekmektedir. Bu durumda da çizim datası geometrik benzerlikten uzaklaşacak sonuçlar deneysel sonuçlardan ve gerçek değerlerden uzaklaşacaktır. Bu çalışmada ağ kalitesi (element quality) ortalama 0,81 olmuştur. Bu değerin 0,5 den yüksek olması önerilmemektedir. Sayısal çalışmaların doğrulanmasında başvurulacak yöntemlerden birisi de ağdan bağımsızlık testleridir. Sayısal çözümlemede ağ sayısı artmasına rağmen sonuç belli bir değerden sonra değişmiyorsa, çözümlemede ağdan bağımsızlık elde edilmektedir. Bu çalışmada 11 değişik ağ sayısında üçgensel hacim (tetrahedrons) ağ yapısı için ağdan bağımsızlık testleri yapılmıştır. Çekici aracının ağ yapılandırılmalarında üçgensel ağların minimum ve maksimum boyutları değiştirilerek değişik çarpıklık oranında ve değişik sayıda ağ yapısı oluşturulmuş ve aynı türbülans modellerinde çözümleme yapılmıştır.

Çizelge 5.3. 27 m/s hızda yapılan ağdan bağımsızlık testi sonuçları

Reynolds Sayısı	Ağ sayısı	Kuvvet (N)	C _D
317 077	354 306	2,03	0,51
317 077	443 632	2,687	0,68
317 077	552 212	3,772	0,95
317 077	633 671	2,733	0,69
317 077	725 898	2,494	0,63
317 077	847 328	2,507	0,63
317 077	1 092 454	2,556	0,65
317 077	1 269 195	2,524	0,64
317 077	1 497 968	2,54	0,64
317 077	2 013 573	2,552	0,65
317 077	3 032 090	2,446	0,62



Şekil 5.15. Ağ bağımsızlığı grafiği

Ağdan bağımsızlık testleri sırası ile 354 306, 443 632, 552 212, 633 671, 725 898, 847 328, 1 092 454, 1 269 195, 1 497 968, 2 013 573, 3 032 090 ağ sayılarında yapılmıştır. Çizelge 5.3' de görüleceği üzere 847 328 ağ sayısında yapılan çözümlemelerden sonra C_D katsayısı yaklaşık değerlerde elde edilmiştir. Bu çalışmada çekicinin sayısal çözümlemelerinde ağ sayısı 1 071 921, çekici römorkun ağ sayısı ise 1 681 381 olarak belirlenmiştir. Bu ağ sayıları ağdan bağımsızlığın elde edildiği bölgede olduğundan sayısal çalışmaların tümünün ağdan bağımsız olarak gerçekleştirildiği kabul edilmiştir. Sayısal sonuçlarda ağ sayısı ve kalitesinden kaynaklanan hatalar ihmal edilmiştir.

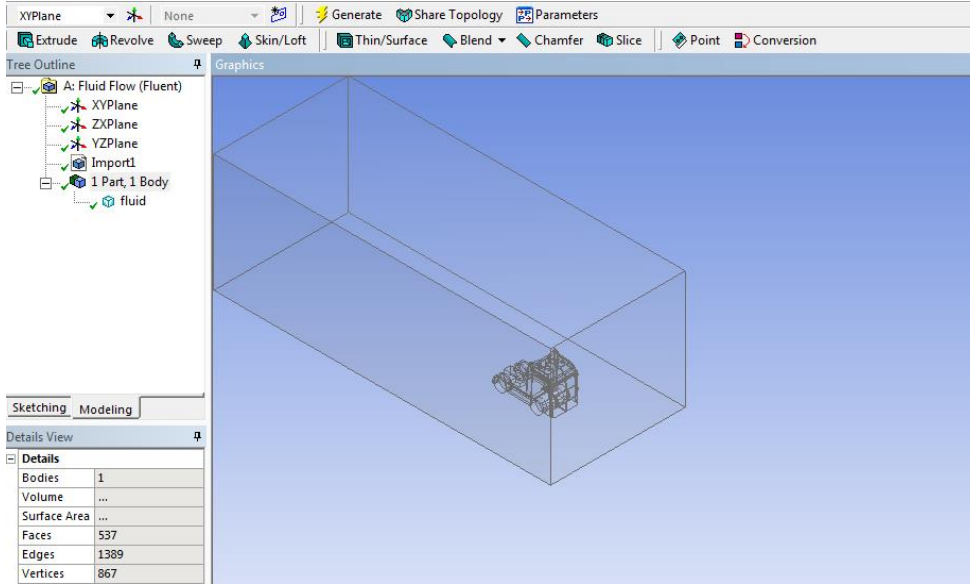
5.5. Çekicinin Sayısal Çözümlemeleri

Catia programında oluşturulan katı modele ait kalıp boşluğu datası design modeler programında tanımlanmış ve meshing bölümünde uygun ağ yapısı oluşturulmuştur. Setup bölümünde sınır şartları, çözümleme koşulları tanımlanmış yapılan çözümleme sonucunda araca etki eden kuvvet hesaplanmış ve akış yapısı ile ilgili görseller ve grafikler elde edilmiştir.

5.5.1. Tasarım modülü (Design modeler)

Şekil 5.16' da ara yüzü verilen bu bölümde aracın çizim datası programa tanımlanmış ve meshing bölümüne aktarılmıştır. Çizim datasının katı model olması, geometrik benzerliği

bozmayacak şekilde çok küçük girinti ayrıntıların basitleştirilmesi gerekmektedir. Aksi durumda meshing bölümünde hatalara neden olmakta ve ağ oluşturma gerçekleştirilememektedir.



Şekil 5.16. Çekicinin “design modeler” ara yüzündeki görünümü

5.5.2. Ağ yapısı oluşturma (Meshing)

Şekil 5.17’ de ara yüzü verilen bölümde aracın aerodinamik yapısını önemli derecede etkileyen bölgelerinde daha sık ağ yapısı oluşturulmuş, sınır tanımlamaları yapılmış ve ağ dosyası setup bölüme aktarılmıştır. Çekici için 1 071 921 üçgensel hacim (tetrahedrons) hücre yapısı oluşturulmuştur. Çözüm alanındaki sınırlar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

- ✓ Giriş: Akışkanın girdiği yüzey olup sabit hız sınır şartı olarak tanımlanmıştır.
- ✓ Çıkış: Akışkanın çıktığı yüzey olup sabit basınç sınır şartı olarak tanımlanmıştır.
- ✓ Duvar ve yol: Duvar deney alanını oluşturan dikdörtgen hacmin kenar yüzeyleri olup duvar sınır şartı kullanılmıştır. Yol aracın konumlandırıldığı taban yüzeyi olup duvar sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Deneysel çalışma ile aynı şartları sağlamak için hareketli duvar sınır şartı kullanılmamıştır.
- ✓ Çekicinin çizim datasına ait kalıp boşluğu: Aerodinamik özellikleri belirlenen araçtır. Duvar sınır şartı olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 5.4. Çekicinin sayısal çözümlemesinde kullanılan özellikler

Fonksiyon	Özellik
Çözücü	Ayrık (segregated)
Fomülasyon	İmplicit
Zaman	Sabit
Hız formülasyonu	Mutlak
Değişim seçeneği	Düğüm-esaslı
Akışkan	Hava (sıkıştırılmaz)
Basınç – Hız bağlantısı	Simple

Çizelge 5.5. Çekicinin sayısal çözümlemesinde relaksasyon kriterleri

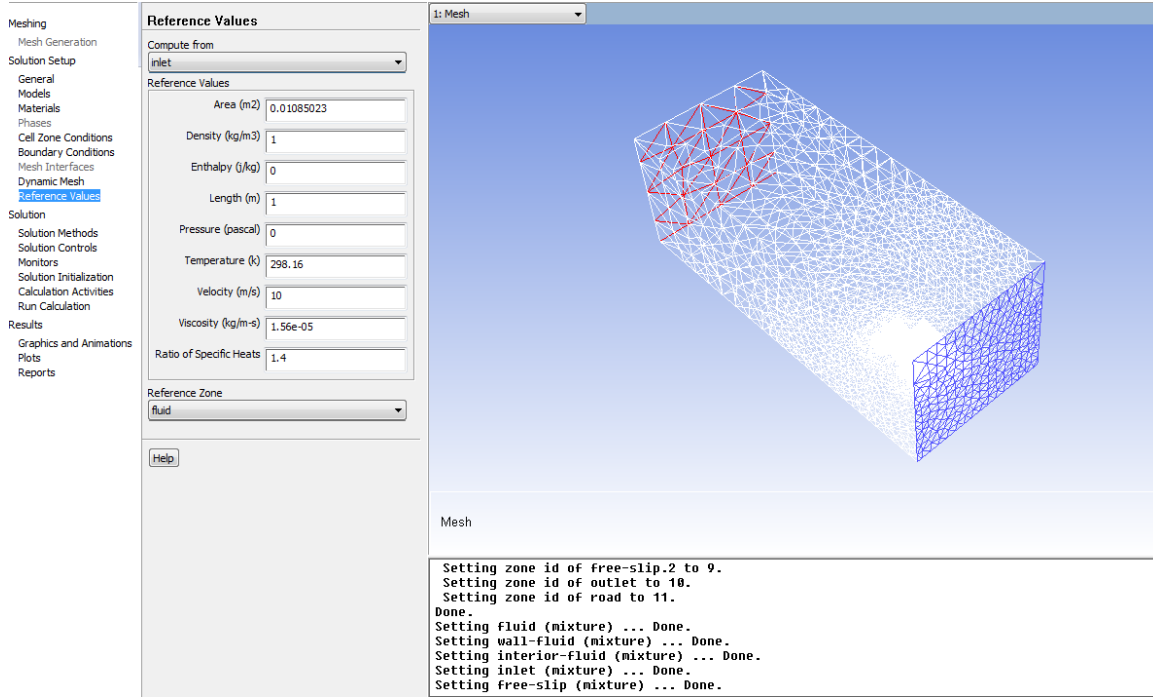
Basınç	0.3 Pa
Yoğunluk	1 kg/m ³
Gövde kuvvetleri	1N
Momentum	0.7 m ² /s
Türbülans kinetik enerji	0.8 m ² /s ²
Spesifik yayılım oranı	0.8
Türbülans viskozite	1 kg/m.s

Çizelge 5.6. Çekicinin sayısal çözümlemesinde havanın özellikleri

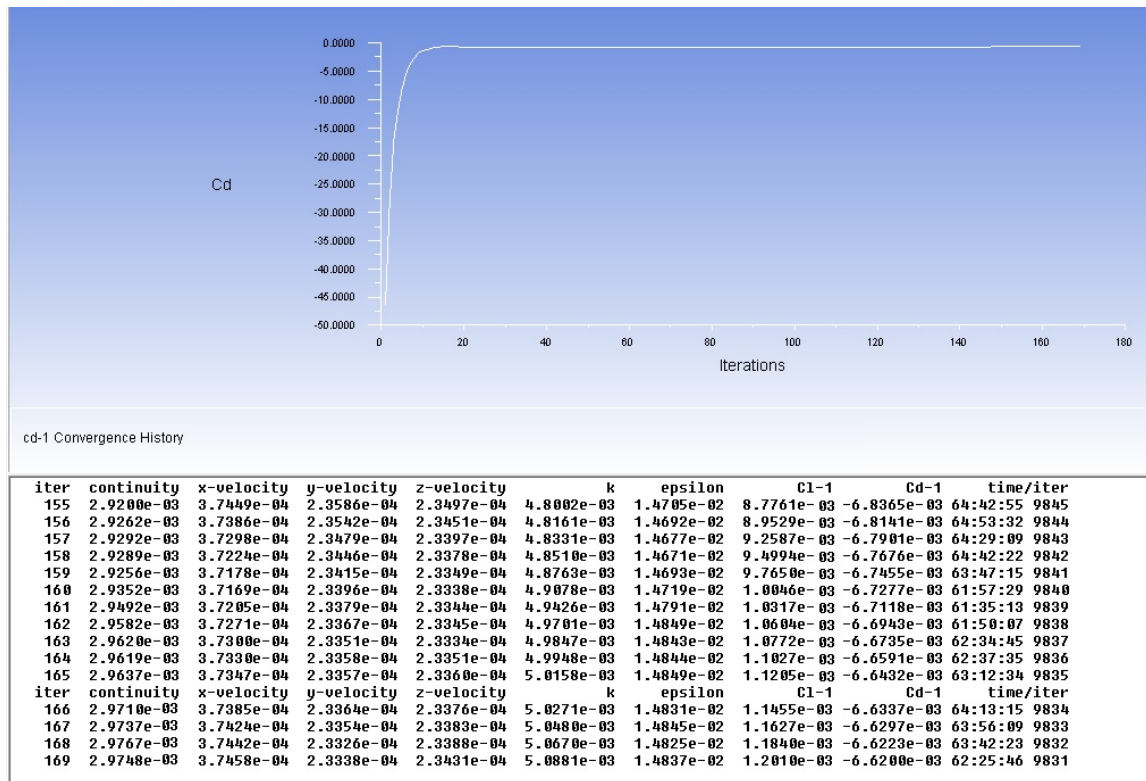
Özellik	Tanım	Sayısal Değer
ρ	Yoğunluk	1 kg/m ³
μ	Dinamik viskozite	1.560×10 ⁻⁵ kg/m.s

Çizelge 5.7. Çekicinin sayısal çözümlemesinde interpolasyon seçenekleri

Özellik	Sayısal Değer
Basınç	İkinci Derece Ayrıklaştırma (Second-Order)
Momentum	İkinci Derece Ayrıklaştırma (Second-Order)
Türbülans kinetik enerjisi	Birinci Derece Ayrıklaştırma (First-Order)
Türbülans yayılım oranı	Birinci Derece Ayrıklaştırma (First-Order)



Şekil 5.18. Çekicinin “setup” ara yüzündeki görünümü

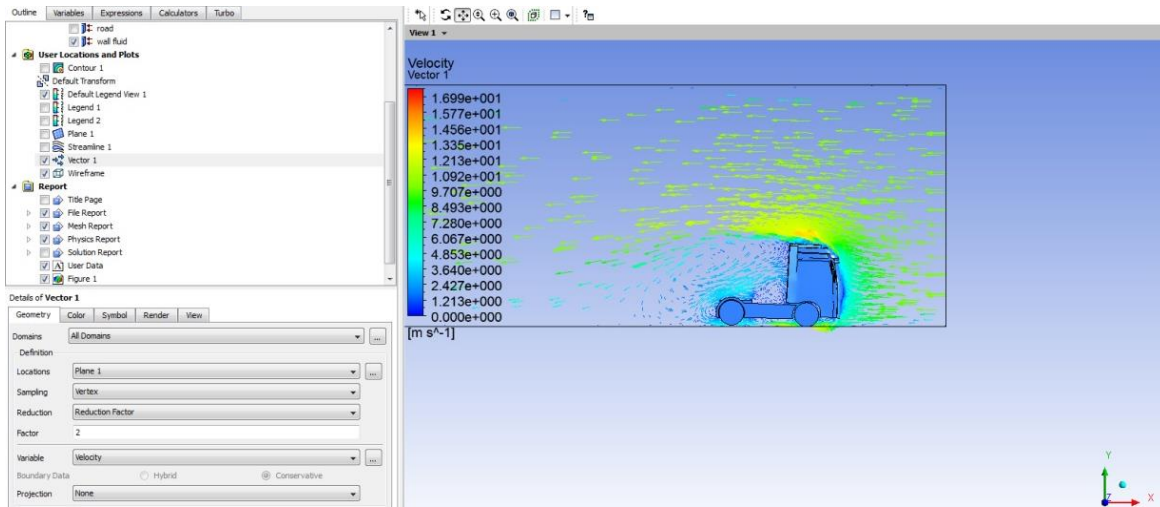


Şekil 5.19. Çekici C_D sürüklenme kuvveti katsayısı grafiği ve yakınsama

Çözümleme yapılırken eş zamanlı olarak, momentum ve kütle, türbülans miktarları, C_L (lift) ve C_D sürüklenme kuvveti katsayısı grafikleri izlenmiştir. Şekil 5.19'da görüldüğü üzere çözümün yakınsaması, hata eğrilerinin ekrandan izlenmesi ile takip edilmiştir. Fluent programının bir özelliği olarak tanımlanan araç üzerine etki eden basınç ve sürtünme kaynaklı sürüklenme kuvvetleri ayrı ayrı hesaplanabilmektedir. Aerodinamik direnç katsayısı (C_D) bu iki kuvvetin toplamından elde edilmiştir

5.5.4. Sonuç (Result)

Şekil 5.20' de ara yüzü verilen CFD-Post bölümünde sayısal çözümleme sonuçları incelenmiş, araca tanımlanan hızda etki eden kuvvet değeri ve C_D katsayısı hesaplanmıştır. Hız değerine bağlı olarak akış çizgileri vektör olarak ve yüzey üzerindeki akış çizgileri (streamline) halinde renk skalası olarak elde edilmiştir. Ayrıca çekici üzerinde basınç bölgelerine ait görsellerde elde edilmiştir.



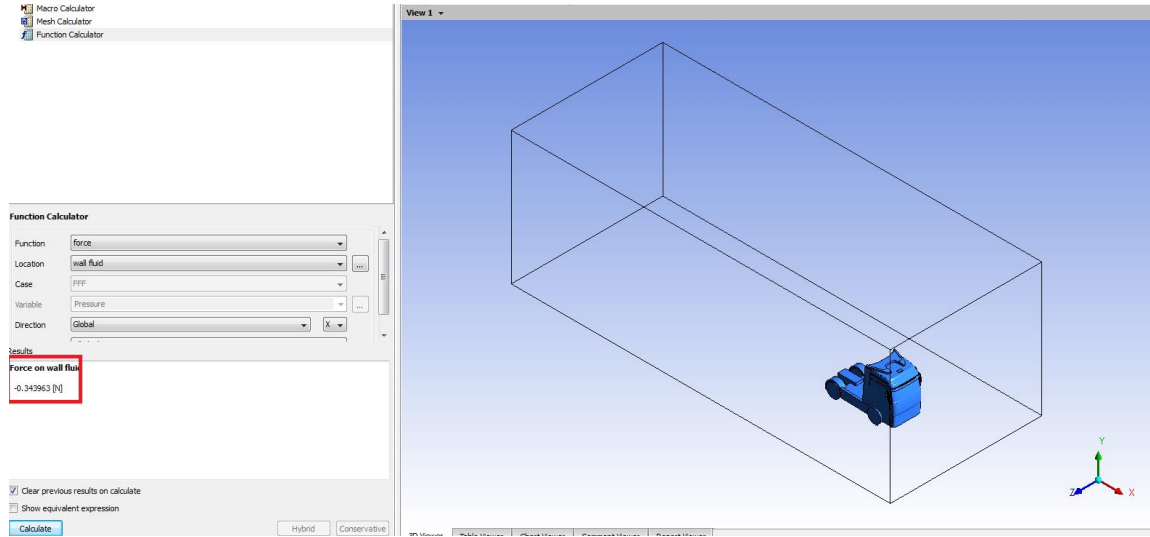
Şekil 5.20. Result CFD-Post ara yüzü

5.6. Çekicinin Sayısal Çözümleme Sonuçları

5.6.1. 10 m/s akış hızındaki çözümleme sonuçları

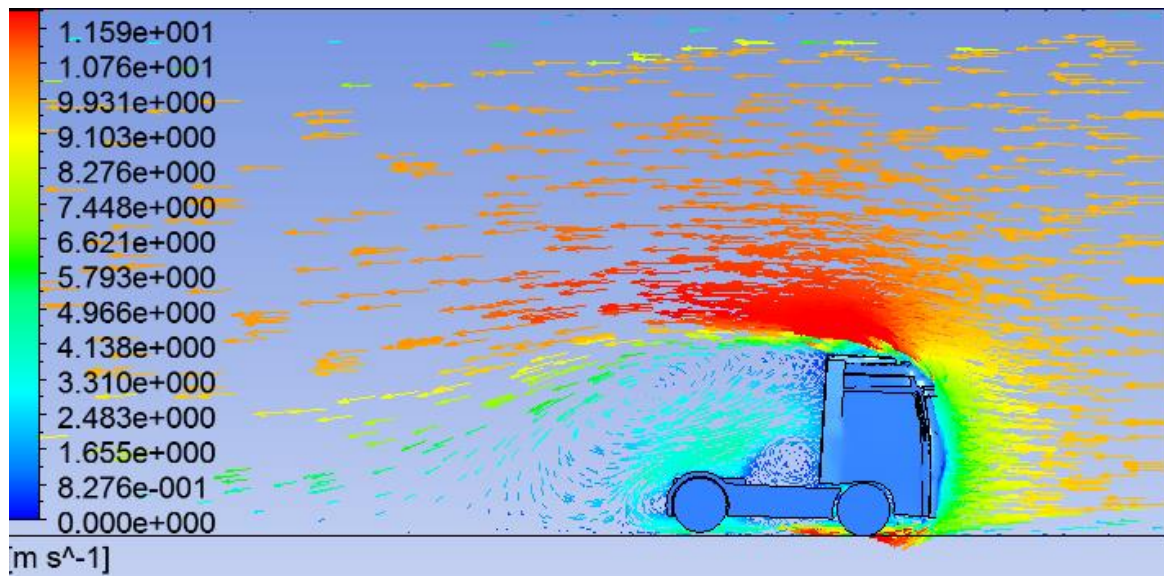
Çekici için 10 m/s hızla yapılan simülasyonda deney sonuçlarında araca etki eden kuvvet değeri elde edilmiştir. Şekil 5.21'de çekiciye etki eden kuvvet 0,343 N hesaplanmıştır.

Toplam aerodinamik direnç kuvvetinin % 98,05' basınç kaynaklı %1,95'inin sürtünme kaynaklı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.21. 10 m/s ($Re=117\ 000$) hızda çekiciye etki eden kuvvet değeri sonucu

Elde edilen kuvvet değerine göre çekicinin C_D katsayısı ise 0,633 olarak belirlenmiştir. Aynı hızda yapılan deneysel sonuçlara göre C_D katsayısı 0,621 olarak elde edilmiştir. Sayısal çözümleme sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki fark % 1,79 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.22' de akış hızının vektörel görüntüsü verilmiştir.

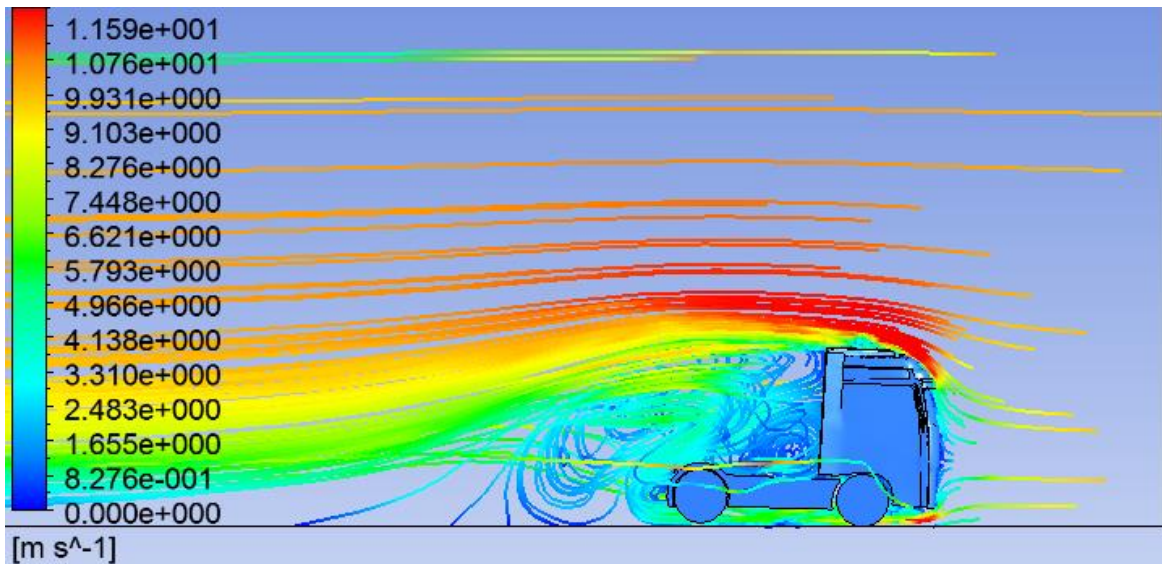


Şekil 5.22. 10 m/s ($Re=117\ 000$) hızda çekiciye etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi

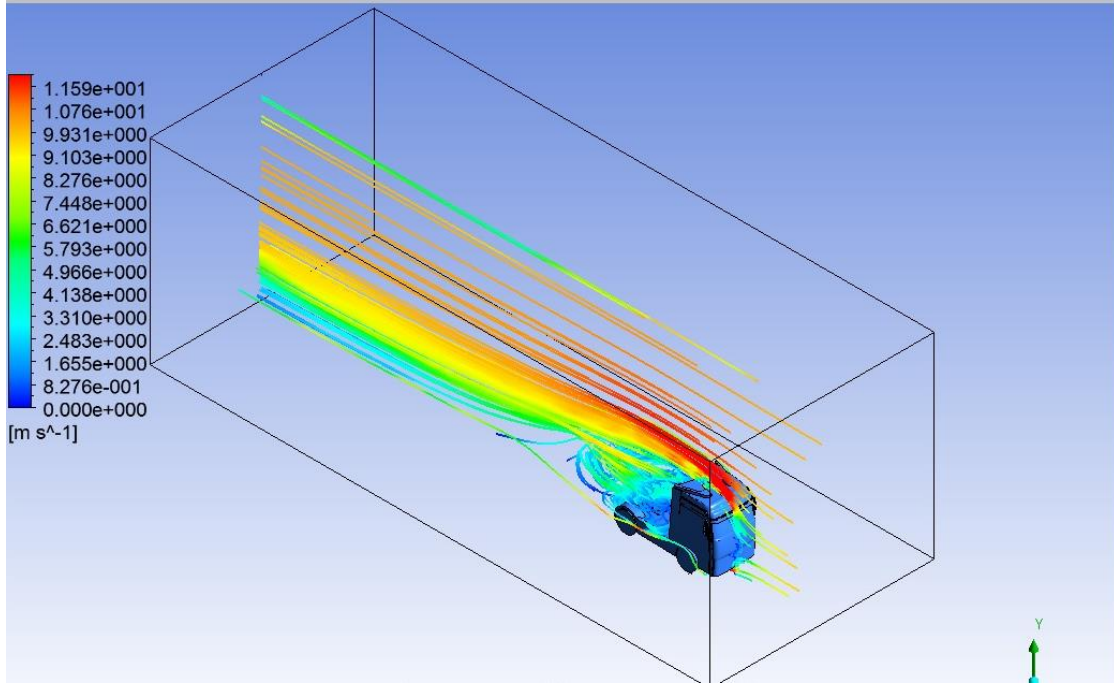
Şekil 5.23 ve 5.24' akış hızının akış çizgisi şeklinde görüntüsü verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere tekerleklerin üzerinde akış hızı sıfır olup bu durum tekerleklerden kaynaklanan aerodinamik direncin önemini ortaya koymaktadır. Bu durum deneysel çalışmalarla uyumludur. Ayrıca kabinin arka kısmında negatif basınç bölgesi oluşmakta ve bu durum araca etki eden aerodinamik kuvvetin büyük bir kısmını oluşturmaktadır.

Deneysel çalışmalarda çekici üzerindeki basınç katsayısı dağılımında ön tampon bölgesinde basınç katsayısı $C_p=1$ olarak tespit edilmişti. Sayısal çözümlemede Şekil 5.25'den anlaşılabacağı üzere bu değer 1,2 civarındadır. Bu fark Navier-Stokes denklemlerinin çözülmesinde numerik yaklaşım metodundan ve ya süreklilik denklemindeki yakınsama kriterinden kaynaklanabilmektedir. Ayrıca çözümlemenin ayrıklaştırma özelliklerinin de oluşan bu farka etkisi vardır.

Bu araçlarda aerodinamik direncin büyük bir kısmı aracın ön yüzey alanının geometrik yapısına bağlı olarak bu bölgede oluşmaktadır. Bu yüzden akış yapısını iyileştirmek için ön cam hücum açısı daha dar yapılması ya da akış kontrol yöntemleri ile aerodinamik iyileşme yapılması gerekmektedir. Ayrıca araç kabininin arka bölümünde ve aracın alt bölgesinde negatif basınç oluştuğu görülmektedir.

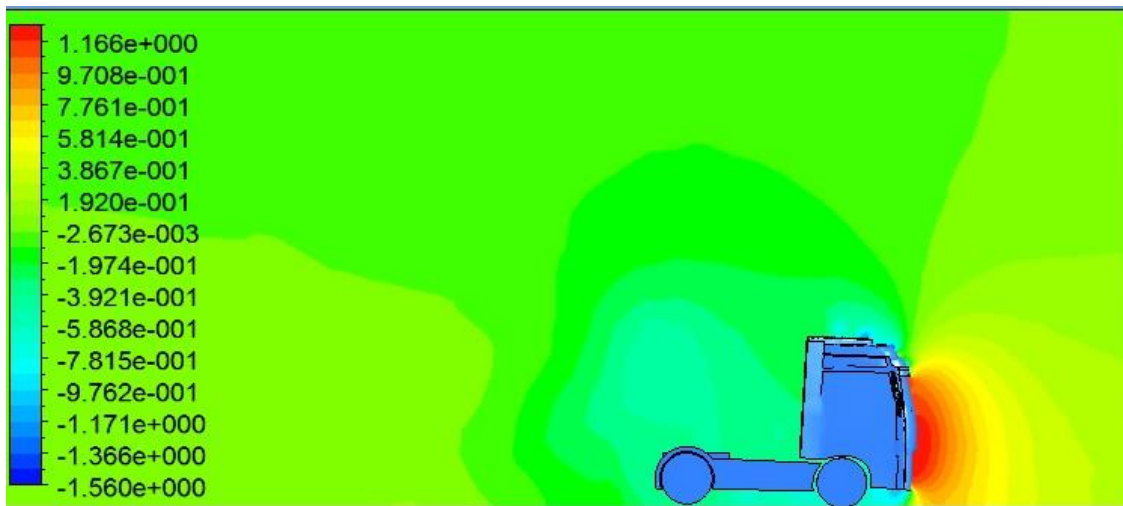


Şekil 5.23. 10 m/s ($Re=117\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden rüzgar hızının streamline olarak gösterilişi



Şekil 5.24. 10 m/s ($Re=117\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden rüzgâr hızının streamline (perspektif) olarak gösterilişi

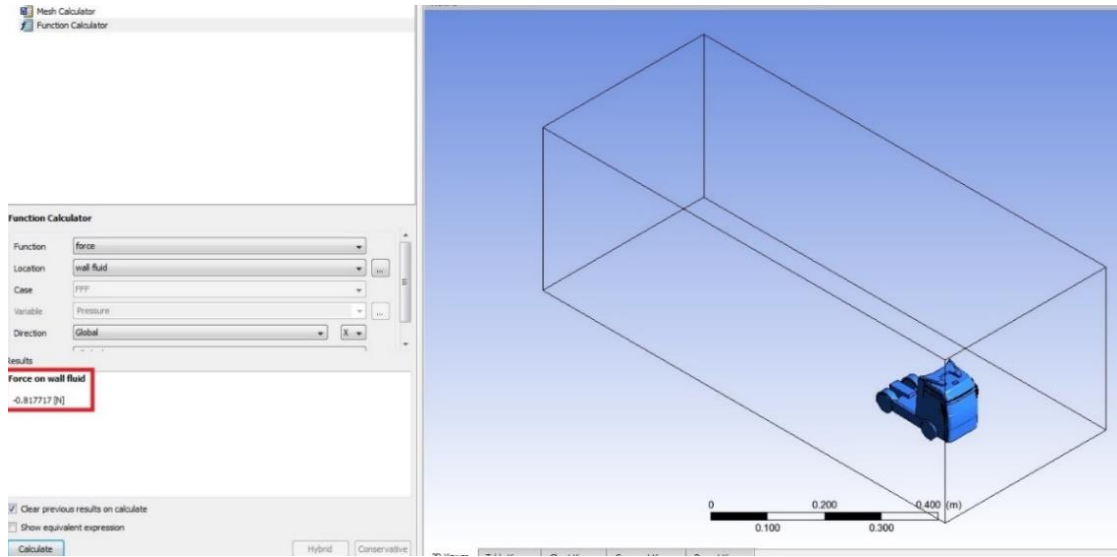
Şekil 5.25' de çekici üzerindeki basınç katsayısı dağılımı verilmiştir. Çekicinin ön yüzey alanında basınç katsayısı yüksektir. Ön tampon üzerindeki basınç katsayısı 1,2 olup bu değer deneysel yöntemle belirlenen C_P katsayısından yüksek çıkmıştır. Çekicinin arka kısmında negatif basınç katsayıları oluşmuştur.



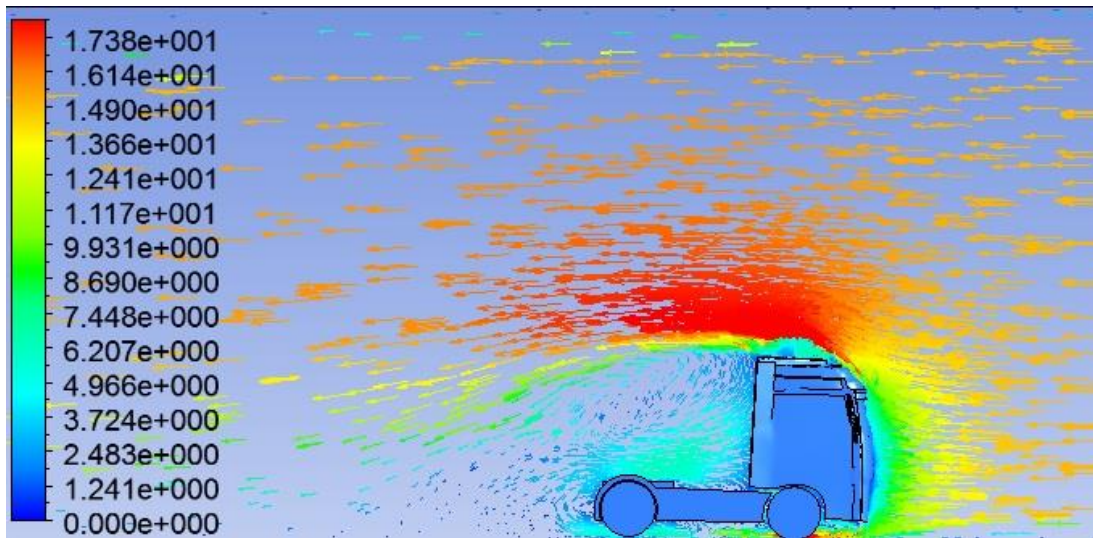
Şekil 5.25. 10 m/s ($Re=117\ 000$) hızda çekici üzerindeki basınç katsayısı (C_P) dağılımı

5.6.2. 15 m/s akış hızındaki çözümleme sonuçları

Çekici için 15 m/s hızla yapılan deney sonuçlarında araca etki eden kuvvet değeri ve C_D katsayısı elde edilmiştir. Şekil 5.26' da çekiciye etki eden kuvvet 0,817 N, C_D katsayısı ise 0,670 olarak belirlenmiştir. Aynı hızda yapılan deneysel sonuçlara göre C_D katsayısı 0,614 olarak elde edilmiştir. Sayısal çözümleme sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki fark % 9,06 olarak tespit edilmiştir.

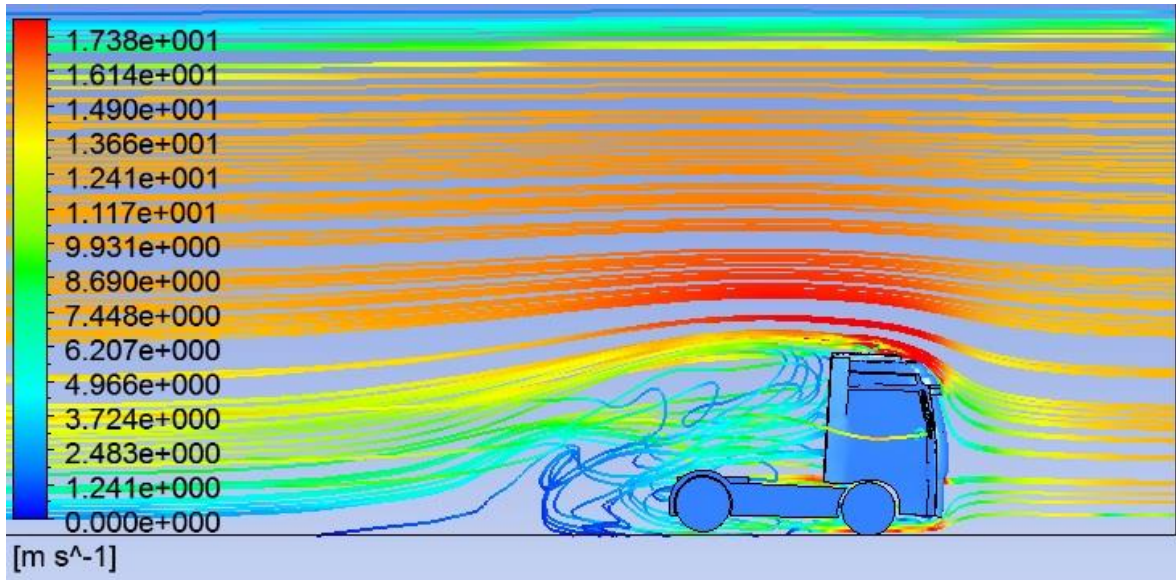


Şekil 5.26. 15 m/s ($Re=176\ 000$) hızda çekiciye etki eden kuvvet değeri sonucu

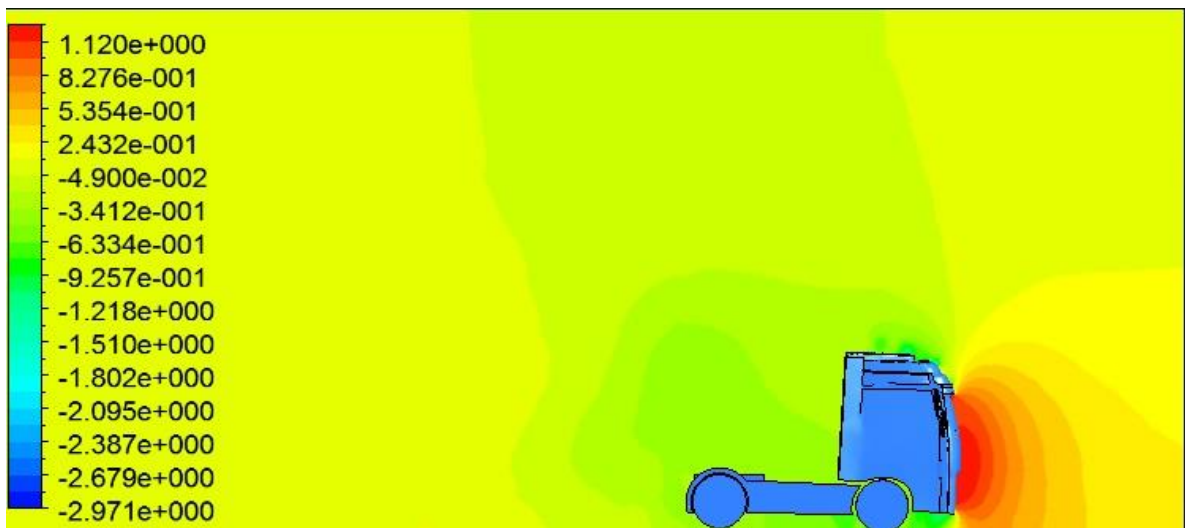


Şekil 5.27. 15 m/s ($Re=176\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi

Şekil 5.27 ve Şekil 5.28’ de görüldüğü üzere bu çalışmada 10 m/s hızdaki sonuçlarla paralel benzer akış yapıları gözlemlenmiştir. Çekici araçları trafikte römorksuz bulunmasa bile kabinin geometrik yapısı akış yapısı ve sürüklenme kuvveti açısından son derece önemlidir. Çekici üzerindeki basınç katsayısı dağılımları incelendiğinde ön tampon ve ön cam bölgesinde basınç katsayısı yüksektir. 15 m/s hızda tespit edilen C_D katsayısının % 98,41’ i basınç kaynaklı, % 1,59’u sürtünme kaynaklıdır.



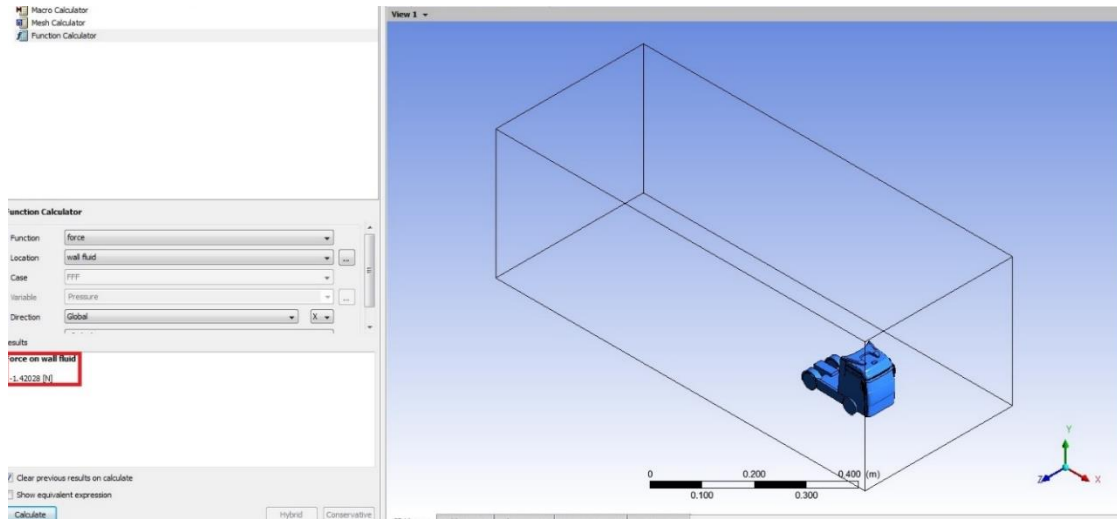
Şekil 5.28. 15 m/s ($Re=176\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden rüzgar hızının streamline olarak gösterilişi



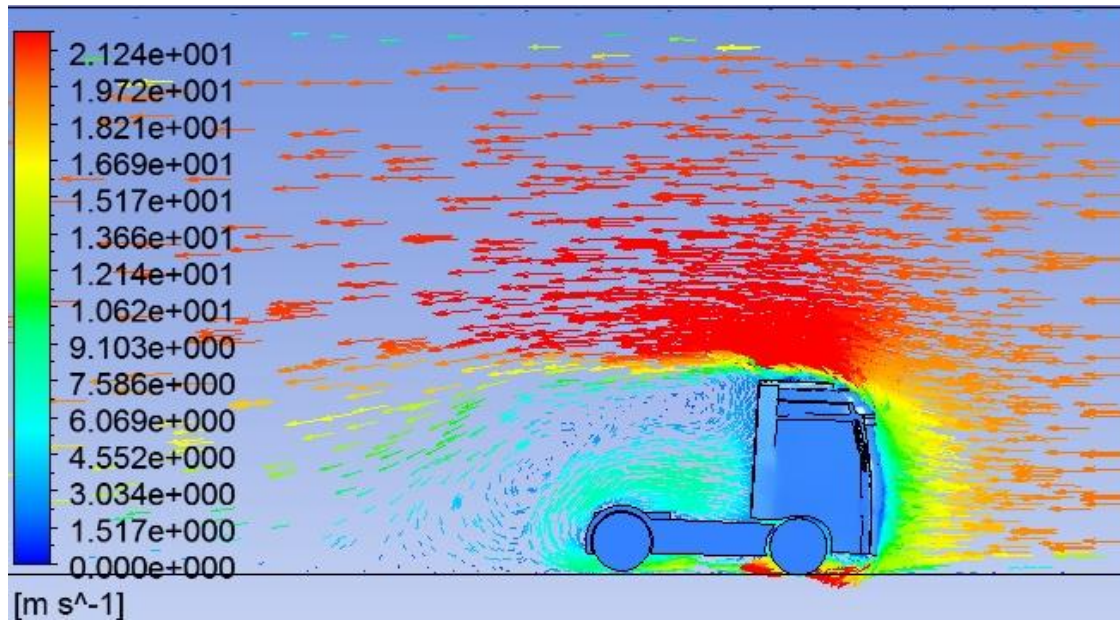
Şekil 5.29. 15 m/s ($Re=176\ 000$) hızda çekici üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı

5.6.3. 20 m/s akış hızındaki çözümleme sonuçları

Şekil 5.30'de çekici için 20 m/s hızla yapılan deney sonuçlarına göre araca etki eden kuvvet 1.420 N olarak C_D katsayısı ise 0,655 olarak hesaplanmıştır. Aynı hızda yapılan deneysel sonuçlara göre C_D katsayısı 0,602 olarak elde edilmiştir. Sayısal çözümleme sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki fark % 8,79 olarak tespit edilmiştir.

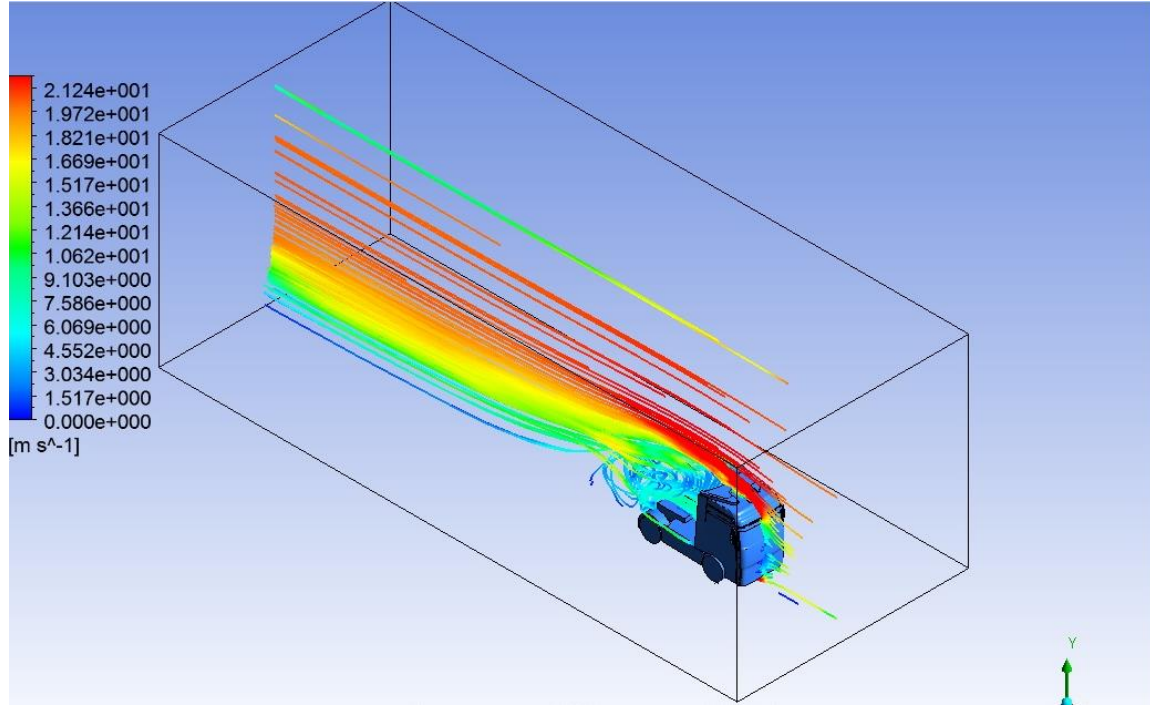


Şekil 5.30. 20 m/s ($Re=235\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden kuvvet değeri sonucu

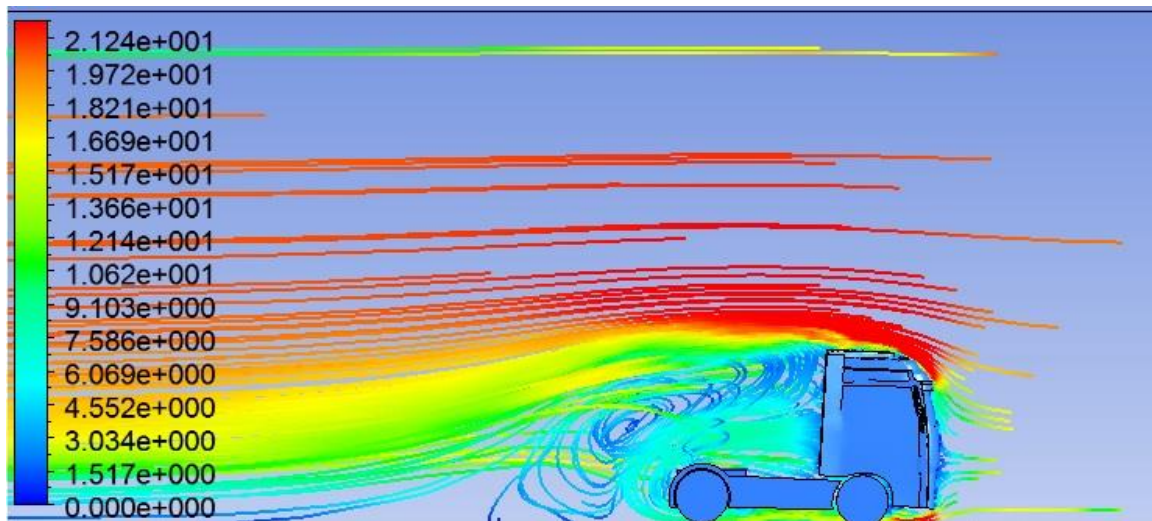


Şekil 5.31. 20 m/s ($Re=235\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi

Şekil 5.31 - Şekil 5.33’ de görüldüğü üzere akış hızı aracın ön bölgesinde durma noktasına gelmiş olup ayrıca kabinin arka kısmında türbülans oluştuğu görülmüştür. Yapılan akış analizi sonucunda 15 m/s hızda tespit edilen C_D katsayısının % 98,45’ i basınç kaynaklı, % 1,55’i sürtünme kaynaklıdır.

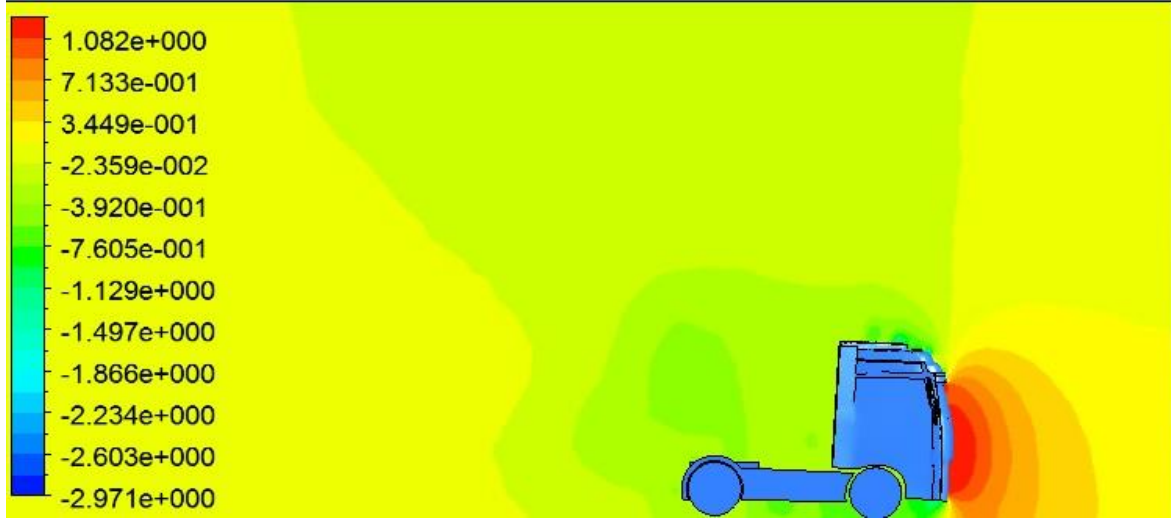


Şekil 5.32. 20 m/s ($Re=235\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden rüzgâr hızının streamline (perspektif) olarak gösterilişi



Şekil 5.33. 20 m/s ($Re=235\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden rüzgâr hızının streamline olarak gösterilişi

Şekil 5.34 ve Şekil 5.35’de çekici üzerindeki basınç katsayısı dağılımı ve basıncın contour şeklinde gösterilmesinde araç ve ön cam hücum açısının küçük olmasına bağlı olarak aracın ön tampon üzerinde ve ön cam bölgesinde basınç katsayısının yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 5.34. 20 m/s ($Re=235\ 000$) hızda çekici üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı



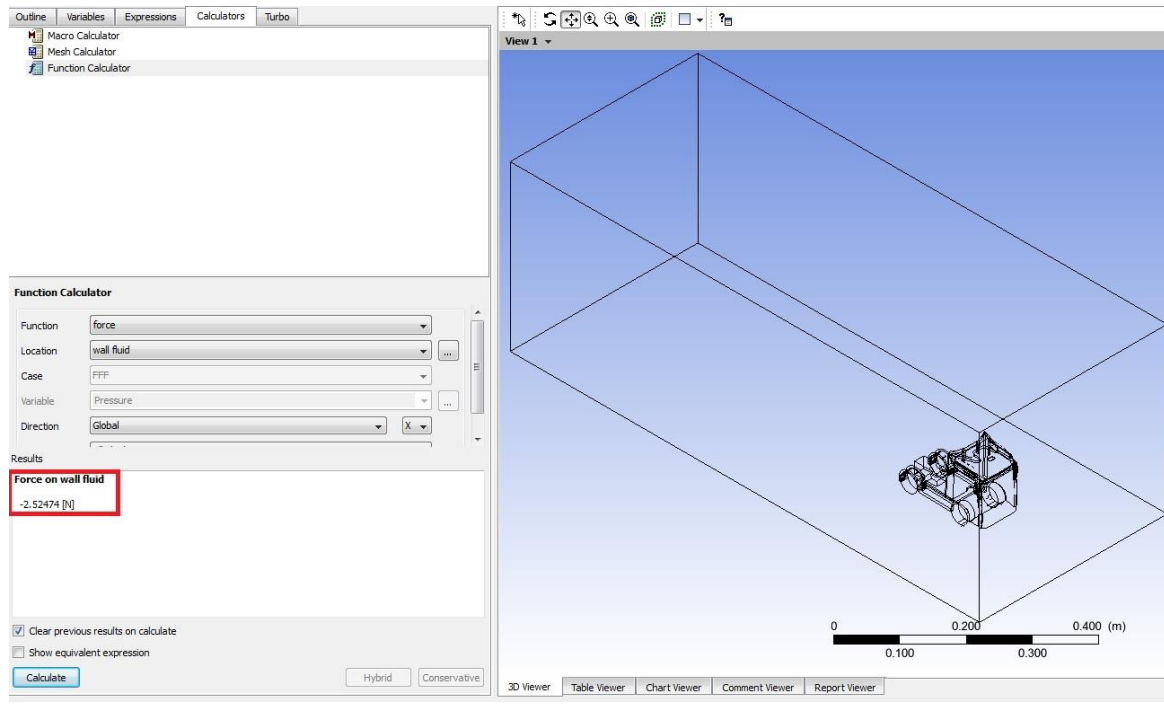
Şekil 5.35. 20 m/s ($Re=235\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden basıncın contour şeklinde gösterilişi

Ağır vasıtalarda toplam aerodinamik direnç kuvveti çok büyük kısmı basınca bağlı oluşan kuvvettir. Sürtünmeye bağlı kuvvet oldukça düşüktür. Ayrıca alt bölgesinden giren akış aktarma organları, tekerlekler ve zemin ile olan sürtünme etkisi nedeniyle yavaştır.

5.6.4. 27 m/s akış hızındaki çözümleme sonuçları

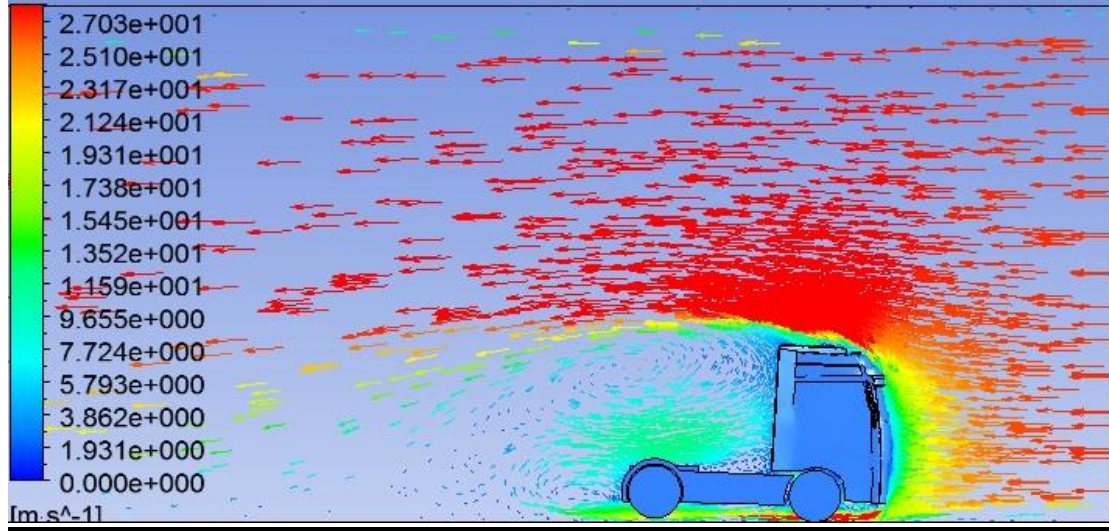
Şekil 5.36'da çekici için 27 m/s hızla yapılan sayısal çözümlemede araca etki eden kuvvet 2.524 N olarak C_D katsayısı ise 0,638 olarak hesaplanmıştır. Aynı hızda yapılan deneysel sonuçlara göre C_D katsayısı 0,605 olarak elde edilmiştir. Sayısal çözümleme sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki fark % 5,61 olarak tespit edilmiştir.

Akış görüntülemelerinde diğer sonuçlarda olduğu gibi aracın ön tampon ve ön cam bölgesinde akış yavaştır. Ayrıca tekerleklerin üzerinde akış hızı sıfır olup bu durum tekerlerden kaynaklanan aerodinamik direncin önemini ortaya koymaktadır. Bu durum deneysel çalışmalarla uyumludur. Kabinin arka kısmında negatif basınç bölgesi oluşmakta ve bu durum araca etki eden aerodinamik kuvvetin büyük bir kısmını oluşturmaktadır.



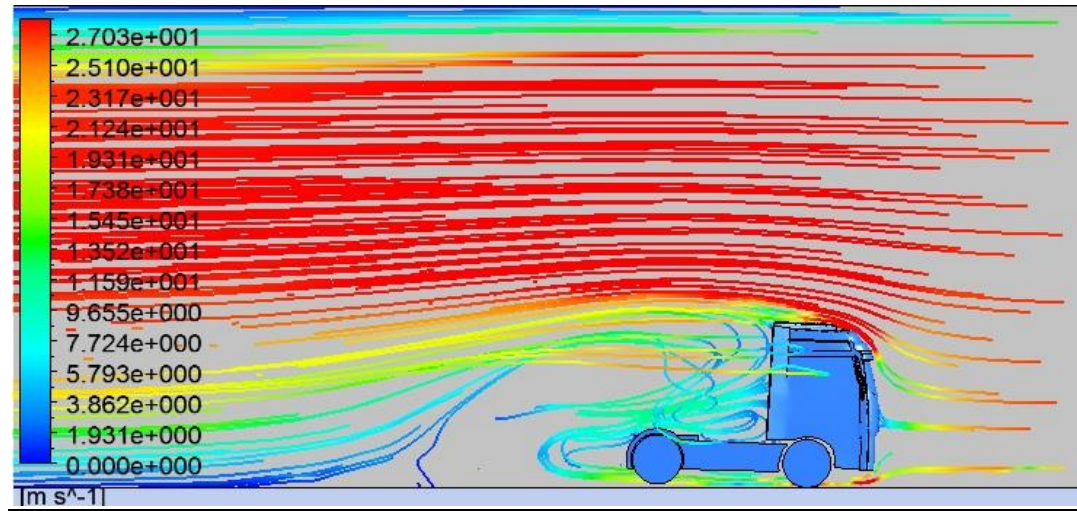
Şekil 5.36. 27 m/s ($Re=317\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden kuvvet değeri sonucu

Şekil 5.37’ de çekiciye etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak görüntülenmesi verilmiştir. Çekicinin ön yüzey hücum açına bağlı olarak akış hızı yavaştır. Kabinin ara kısmında negatif basınç bölgesi oluşmakta ve türbülanslı bölge görülmektedir.

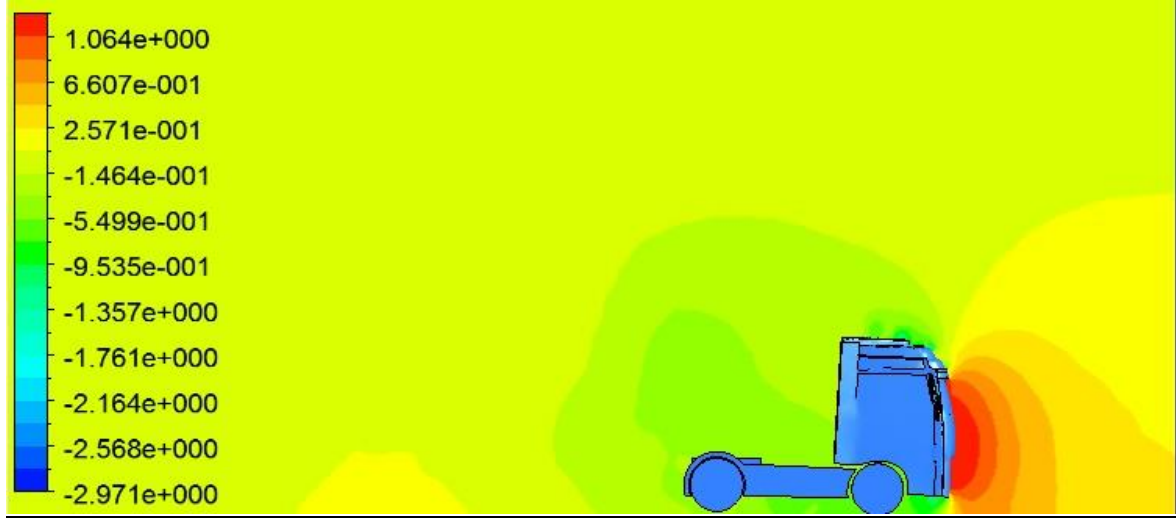


Şekil 5.37. 27 m/s ($Re=317\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi

Şekil 5.38’ de çekiciye etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak görüntülenmesi, Şekil 5.39’ da çekici üzerindeki basınç dağılımı verilmiş olup bu sonuçlar deneysel çalışmalar ile uyumludur.

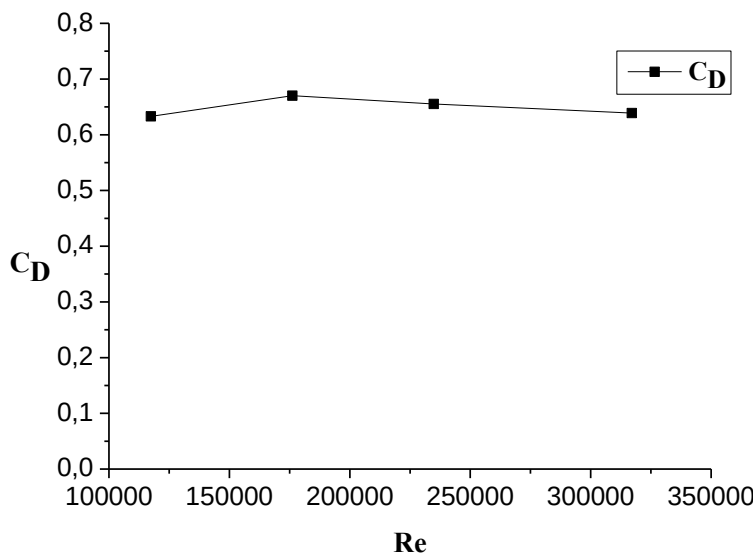


Şekil 5.38. 27 m/s ($Re=317\ 000$) hızdaki çekiciye etki eden rüzgâr hızının streamline olarak gösterilişi

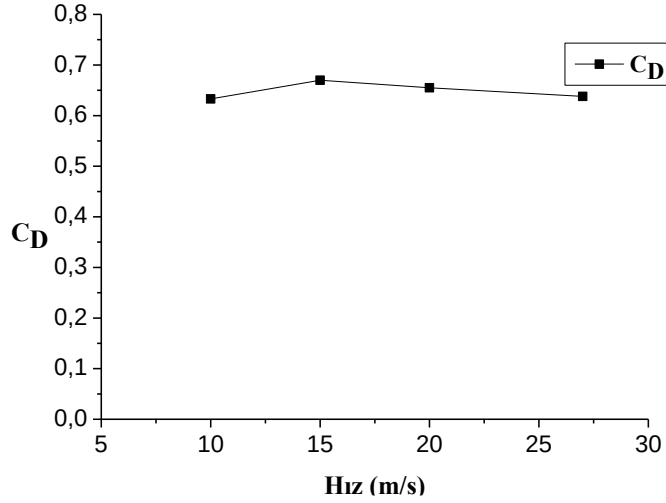


Şekil 5.39. 27 m/s ($Re=317\ 000$) hızdaki çekici üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı

Şekil 5.40 ve Şekil 5.41’ de 10 m/s, 15m/s, 20m/s ve 27 m/s hızda yapılan deney sonuçlarına göre çekicinin C_D katsayısı ortalama 0,649 olarak tespit edilmiştir. Toplam aerodinamik direnç katsayısının ortalama % 98,4’ü basınç kaynaklı, % 1,6’sı sürtünme kaynaklı olduğu tespit edilmiştir. Basınç kaynaklı oluşan aerodinamik direnci en çok etkileyen faktör çekicinin ön geometri şekli ve ön cam hücum açısının büyüklüğüdür. Durma basıncının olduğu yüzey alanının azaltılması ile aerodinamik direncin düşürülebileceği yapılan çalışma sonucunda görülmüştür.

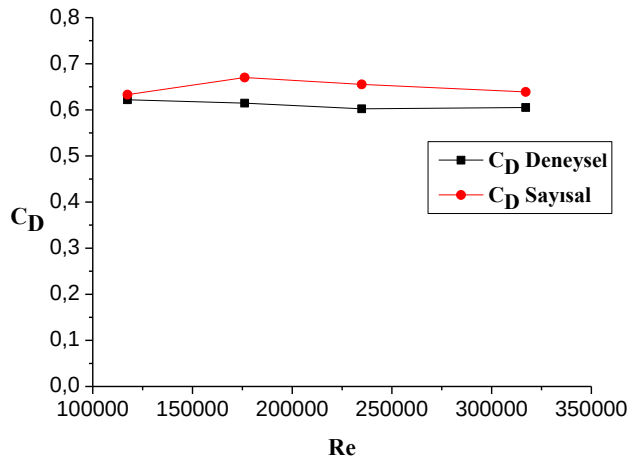


Şekil 5.40. Reynolds sayısına göre çekicinin sayısal C_D katsayısı grafiği

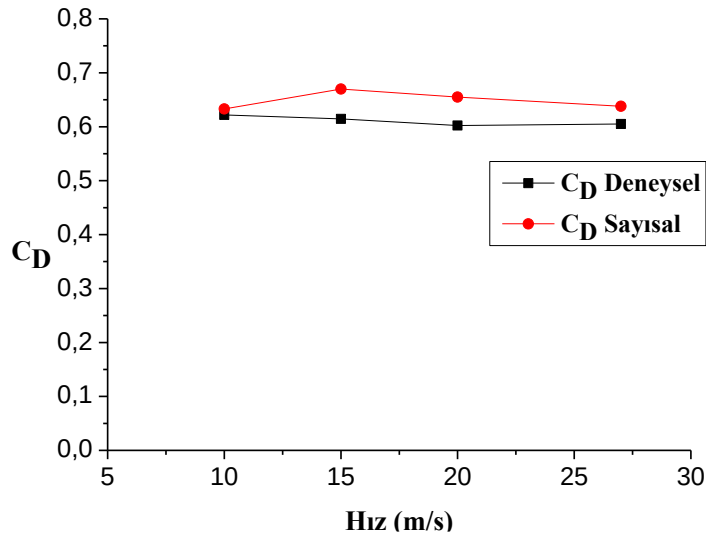


Şekil 5.41. Hıza göre çekicinin sayısal C_D katsayısı grafiği

Şekil 5.42 ve Şekil 5.43’ de bu çalışmada çekici aracı için 4 değişik hızda yapılan sayısal çözümleme sonuçları aynı hızda ve şartlarda gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonuçlarına göre sayısal olarak tespit edilen C_D katsayısı deneysel çalışma sonuçlarından ortalama % 6,31 daha yüksek çıkmıştır. Deney düzeneğinde C_D katsayısının belirlenmesinde toplam belirsizlik % 4,7’ dir. Sonuçların sayısal olarak farklı çıkmasının nedeni deney düzeneğinin belirsizliğinden kaynaklanabileceği gibi çizim datasının ayrıntısından, ağ kalitesinden, denklemlerin ayrıklaştırma özelliklerinden ve hareket denklemlerinin yaklaşık çözümünden vb. kaynaklanabilmektedir. Bu durum elde edilen sonucun kabul edilebilir bir sonuç olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.42. Reynolds sayısına göre çekicinin sayısal-deneysel C_D katsayısı grafiği



Şekil 5.43. Hıza göre çekicinin sayısal-deneyisel C_D katsayısı grafiği

Sonuçların sayısal olarak farklı çıkmasının nedeni deney düzeneğinin belirsizliğinden kaynaklanabileceği gibi çizim datasının ayrıntısından, ayırıklaştırma özelliklerinden, ağ dağılımından vb. kaynaklanabilmektedir.

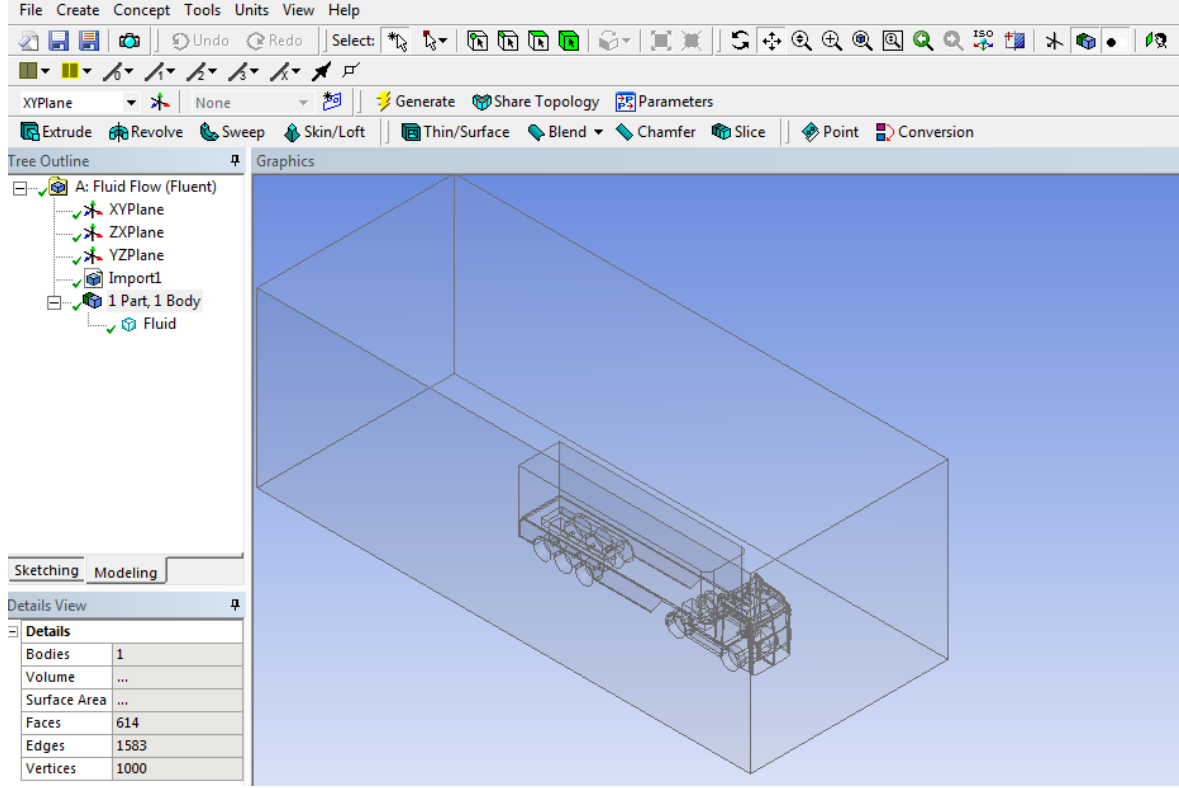
Aerodinamik ile ilgili yapılan sayısal çalışma sonuçlarını deneysel çalışmalarla doğrulamak önemlidir. Bu doğrulama neticesinde sayısal olarak farklı tasarımların incelenebilmesi sayesinde üretim maliyetleri ve süresi azalabilmektedir. Ayrıca sayısal çözümlemeler ile akış alanı hakkında çok daha detaylı bilgiler elde edilebilmektedir.

5.7. Çekici ve Römorkun Sayısal Çözümlemeleri

Bu bölümde Catia programında katı modeline ait kalıp boşluğu oluşturulan çizim datası design modeler programında tanımlanmış ve meshing bölümünde uygun ağ yapısı oluşturulmuştur. Setup bölümünde sınır şartları, çözümleme koşulları tanımlanmış ve yapılan çözümleme sonucunda çekici ve römork kombinasyonuna etki eden kuvvet değerleri hesaplanarak akış yapısı ile ilgili görseller ve grafikler elde edilmiştir.

5.7.1. Tasarım modülü (Design modeler)

Şekil 5.44’de aracın çizim datası programa tanımlanmış ve meshing bölümüne aktarılmıştır.

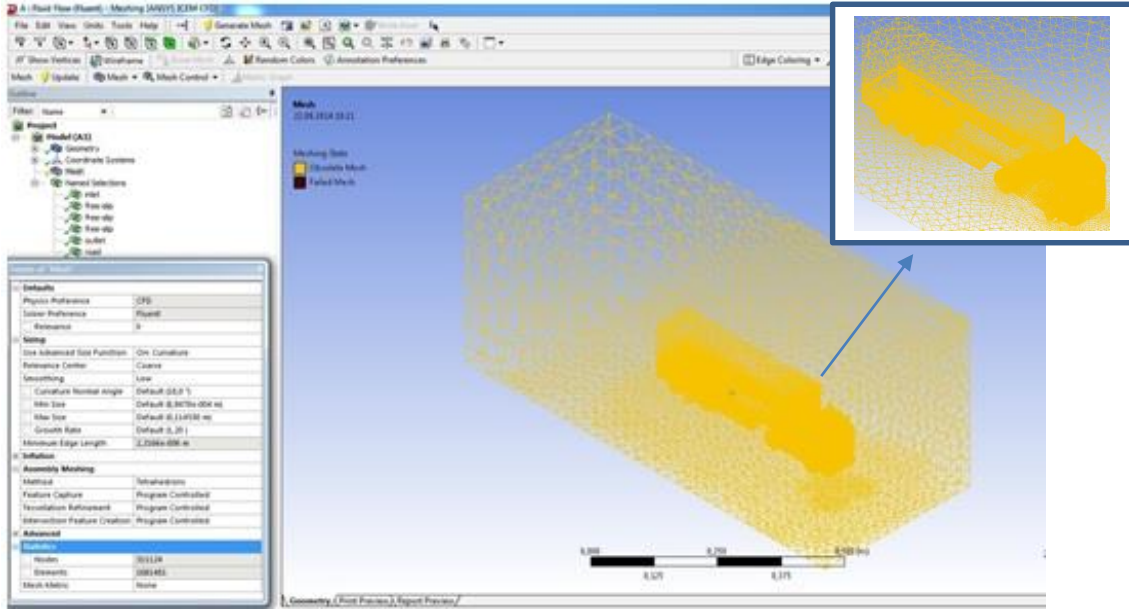


Şekil 5.44. Çekici römorkun “design modeler” ara yüzündeki görünümü

5.7.2. Ağ oluşturma (Meshing)

Şekil 5.45’de aracın aerodinamik yapısını önemli oranda etkileyen bölgelerde gelişme oranı (grow rate) 1,20 alınarak daha sık ağ yapısı oluşturulmuş, sınır tanımlamaları yapılmış ve mesh dosyası setup bölümüne aktarılmıştır. Çekici römork kombinasyonunun sayısal çözümlenmesinde 1 681 381 üçgensel hacim (Tetrahedrons) hücre yapısı oluşturulmuştur.

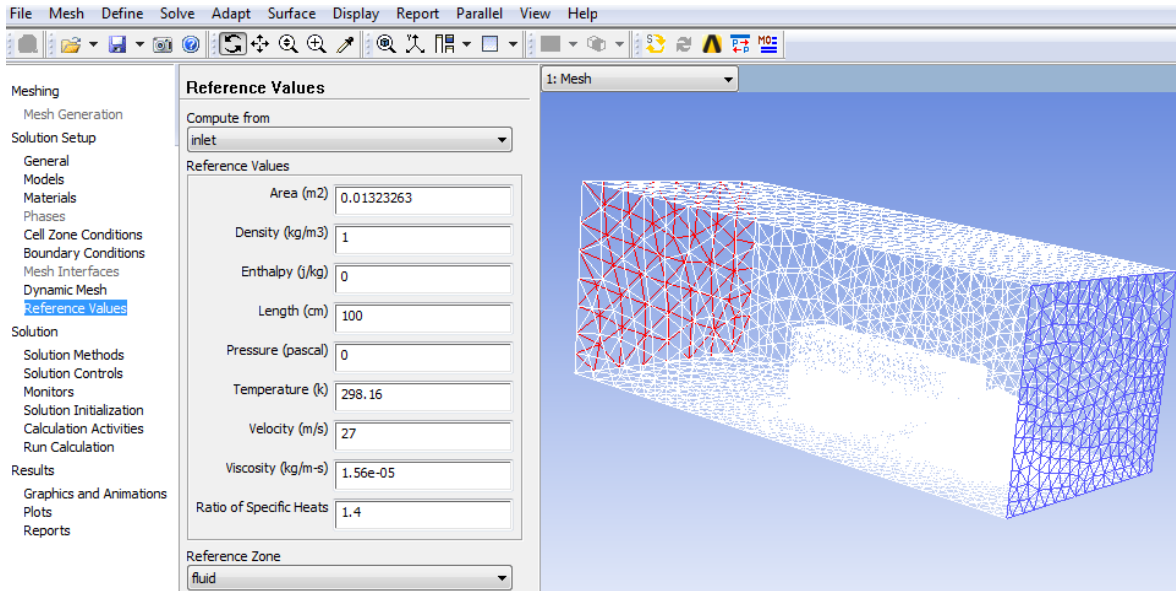
- ✓ Giriş: Akışkanın girdiği yüzey olup sabit hız sınır şartı olarak tanımlanmıştır.
- ✓ Çıkış: Akışkanın çıktığı yüzey olup sabit basınç sınır şartı olarak tanımlanmıştır.
- ✓ Duvar ve yol: Duvar deney alanını oluşturan dikdörtgen hacmin kenar yüzeyleri olup duvar sınır şartı kullanılmıştır. Yol aracın konumlandırıldığı taban yüzeyi olup duvar sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Deneysel çalışma ile aynı şartları sağlamak için hareketli duvar sınır şartı kullanılmamıştır.
- ✓ Çekici römorkun çizim datasına ait kalıp boşluğu: Aerodinamik özellikleri belirlenen araçtır. Duvar sınır şartı olarak tanımlanmıştır.



Şekil 5.45. Çekici römorkun ”meshing” ara yüzündeki görünümü

5.7.3. Sayısal çözümleme özelliklerinin belirlenmesi (Setup)

Şekil 5.46’ ara yüzü verilen bu bölümde sınır şartları, havanın özellikleri ve çözümleme modeli belirlenmiştir.



Şekil 5.46. Çekici römorkun “setup” ara yüzündeki görünümü

Bu çalışmada kullanılan Fluent programı sonlu hacimler metodunu esas alarak süreklilik, momentum, enerji, türbülans için genel integral denklemlerini çözmektedir. Bu denklemler çözüm alanındaki her noktada dengeye geldiği zaman çözümlemelerde yakınsama gerçekleşmektedir. Her akışkan değişkeni için artıklar çözümdeki hatanın şiddetini belirtmektedir. Artıklar normalize edilerek denklemler hesaplanmaktadır. Bu çalışmada yakınsama kriterleri süreklilik, x-hızı, y-hızı ve z-hızı için 1.0×10^{-3} olarak alınmıştır. Çözümlemelerde tanımlanan akışkan havanın 25°C deki yoğunluğu 1 kg/m³, referans basınç değeri 85 kPa alınmıştır. Bu değerler deneysel çalışma verileri ile aynı olacak şekilde tanımlanmıştır. Aracın ön yüzey alanı reports-projected area bölümünde 0,0132 m² olarak hesaplanmıştır. Çözümlemeler SIMPLE Least Squared Cell Based, k-ε RNG türbülans modelinde standart initialization olarak gerçekleştirilmiştir. Çekici römork kombinasyonunun sayısal çözümlemesinde tanımlanan diğer sınır şartları Çizelge 5.8 - 5.11' de verilmiştir.

Çizelge 5.8. Çekici römorkun sayısal çözümlemesinde kullanılan özellikler

Fonksiyon	Özellik
Çözücü	Ayrık (segregated)
Fomülasyon	İmplicit
Zaman	Sabit
Hız formülasyonu	Mutlak
Değişim seçeneği	Düğüm-esaslı
Akışkan	Hava (sıkıştırılmaz)
Basınç – Hız bağlantısı	Simple

Çizelge 5.9. Çekici römorkun sayısal çözümlemesinde relaksasyon kriterleri

Basınç	0.3 Pa
Yoğunluk	1 kg/m ³
Gövde kuvvetleri	1 N
Momentum	0.7 m ² /s
Türbülans kinetik enerji	0.8 m ² /s ²
Spesifik yayılım oranı	0.8
Türbülans viskozite	1 kg/m.s

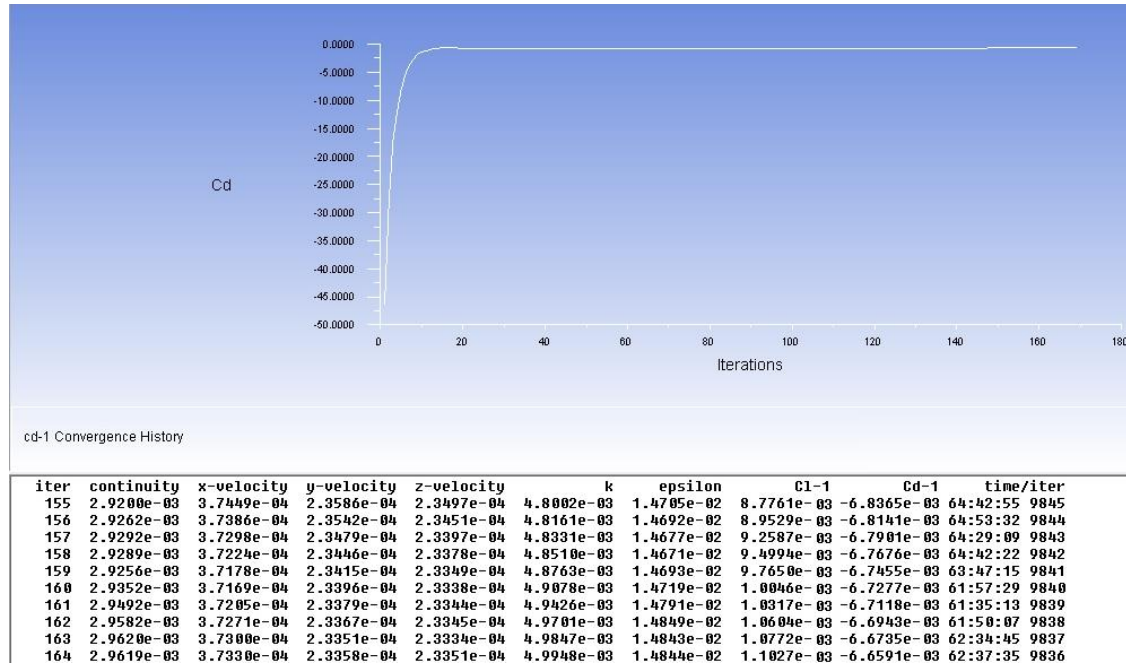
Çizelge 5.10. Çekici römorkun sayısal çözümlemesinde havanın özellikleri

Özellik	Tanım	Sayısal Değer
ρ	Yoğunluk	1 kg/m ³
μ	Dinamik viskozite	1.560×10 ⁻⁵ kg/m.s

Çizelge 5.11. Çekici römorkun sayısal çözümlemesinde interpolasyon seçenekleri

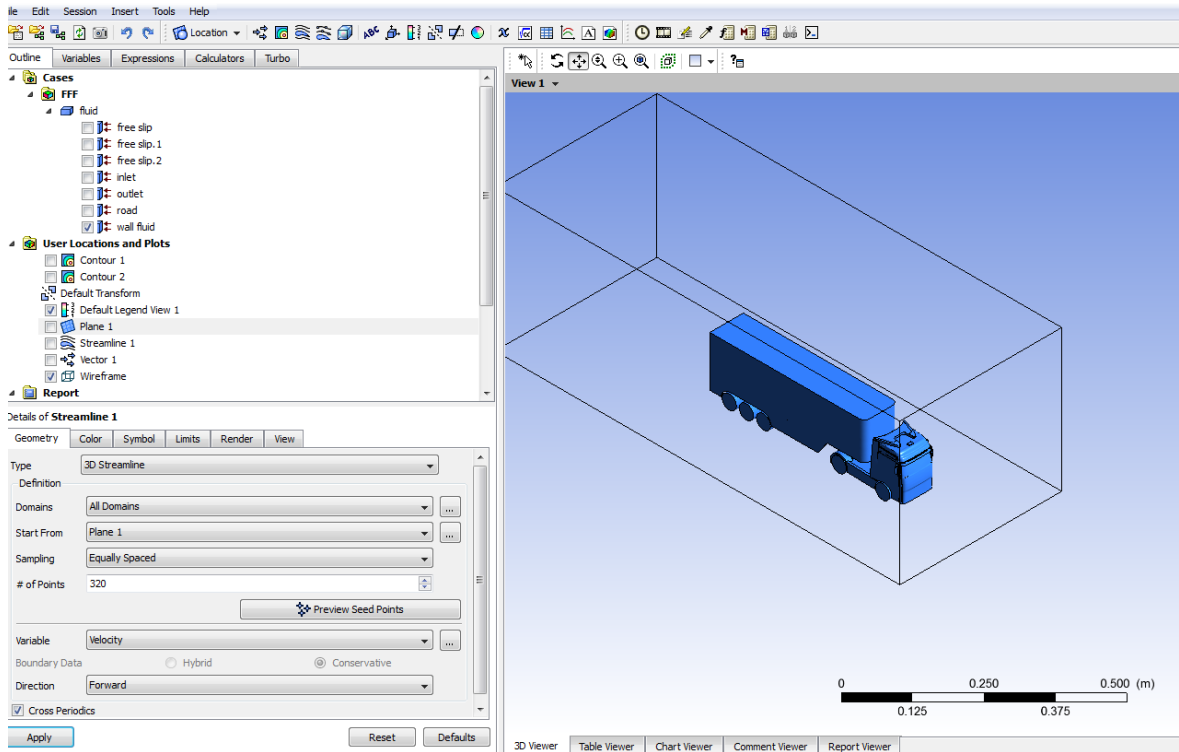
Özellik	Sayısal Değer
Basınç	İkinci Derece Ayırıklaştırma (Second-Order)
Momentum	İkinci Derece Ayırıklaştırma (Second-Order)
Türbülans kinetik enerjisi	Birinci Derece Ayırıklaştırma (First-Order)
Türbülans yayılım oranı	Birinci Derece Ayırıklaştırma (First-Order)

Şekil 5.47’de çözümleme yapılırken eş zamanlı olarak, momentum ve kütle, türbülans miktarları, C_L (lift) ve C_D sürüklenme kuvveti katsayısı grafikleri izlenmiştir. Çözümün yakınsaması, hata eğrilerinin ekrandan izlenmesi ile takip edilmiştir.

Şekil 5.47. Çekici Römorkun C_D sürüklenme kuvveti katsayısı grafiği ve yakınsama

5.7.4. Sonuç (Result)

Şekil 5.48’de ara yüzü verilen CFD-Post bölümünde çekici römork kombinasyonuna ait sayısal çözümleme sonuçları incelenmiş, araca tanımlanan hızda etki eden kuvvet değeri ve C_D katsayısı hesaplanmıştır. Hız değerine bağlı olarak akış çizgileri vektör olarak ve yüzey üzerindeki akış çizgileri (streamline) halinde ve renk skalası olarak elde edilmiştir. Ayrıca çekici üzerinde basınç bölgelerine ait görseller elde edilmiştir.

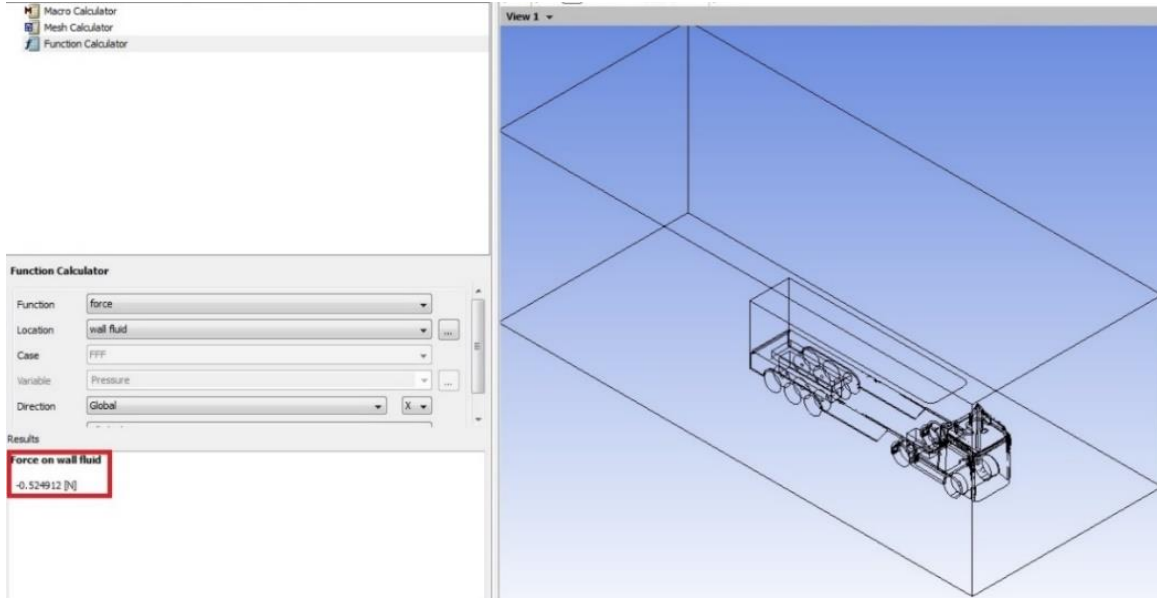


Şekil 5.48. Çekici römorkun “result CFD-Post” ara yüzündeki görünümü

5.8. Çekici Römorkun Çözümleme Sonuçları

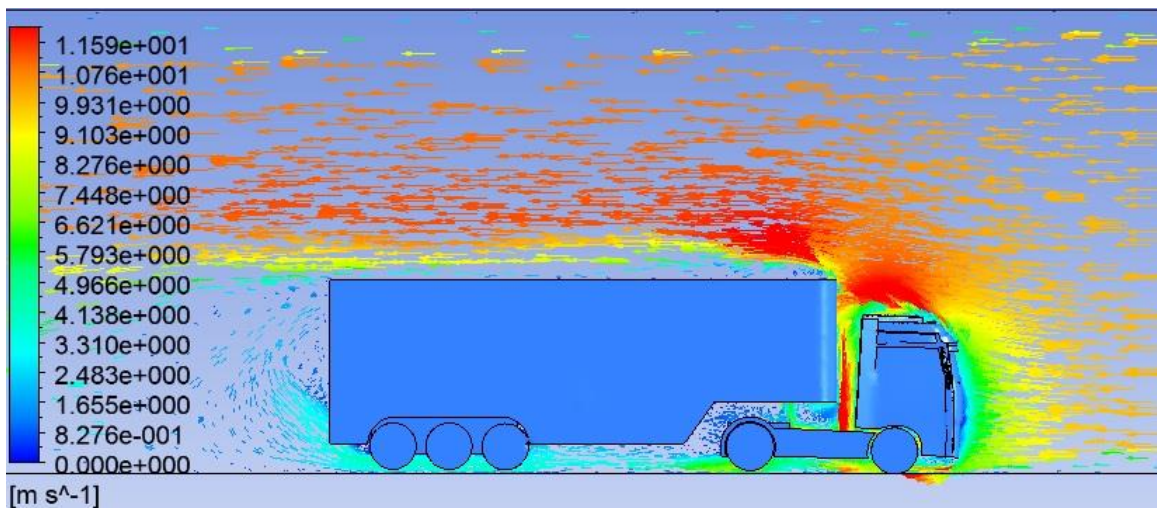
5.8.1. 10 m/s serbest akış hızındaki çözümleme sonuçları

Çekici ve römork kombinasyonu için 10 m/s hızla yapılan deney sonuçlarında araca etki eden kuvvet değeri elde edilmiştir. Şekil 5.49’de çekici römork kombinasyonuna etki eden kuvvet 0,524 N olarak hesaplanmıştır. Elde edilen kuvvet değerine göre C_D katsayısı ise 0,792 olarak hesaplanmıştır. Sayısal çözümleme sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki fark % 12,11 olarak tespit edilmiştir.

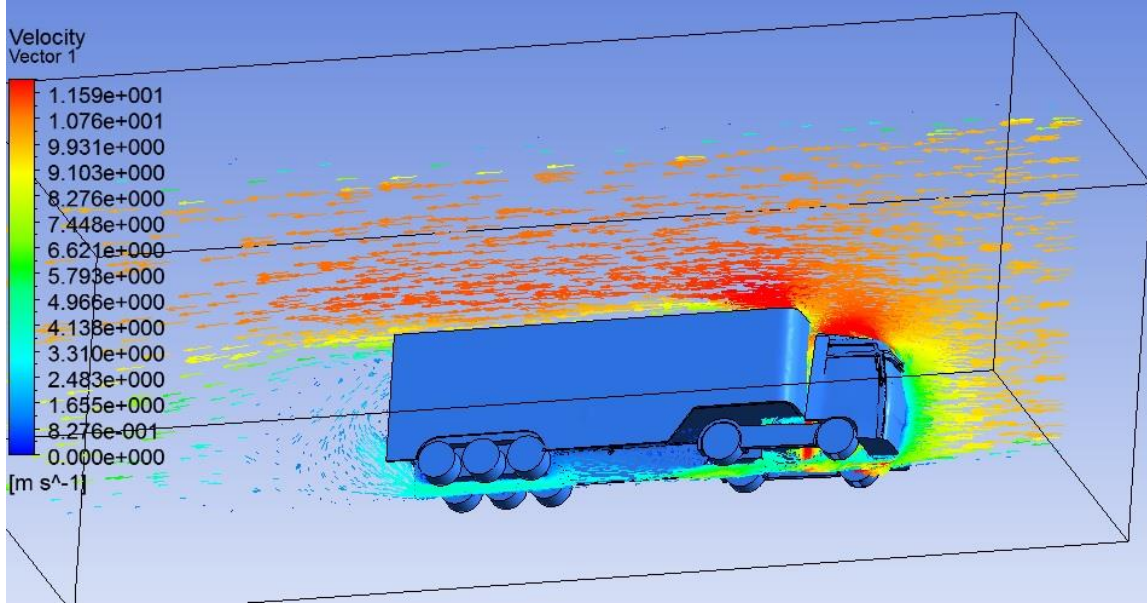


Şekil 5.49. 10 m/s ($Re=312\ 000$) hızda çekici römorka etki eden kuvvet değeri sonucu

Şekil 5.50 ve Şekil 5.51’de çekici ve römork üzerindeki akış hızının vektörel görüntüsünde çekicinin ön tamponu ve ön cam bölgesinde akış oldukça yavaştır. Ayrıca römorkun arka kısmında negatif basınç bölgesi oluşmakta ve bu durum araca etki eden toplam aerodinamik kuvveti önemli derecede etkilemektedir. Ayrıca aracın alt kısmından geçen havanın römork tekerlekleri üzerindeki hızı yavaş olduğundan tekerlekler üzerinde aerodinamik direnç oluşmaktadır.

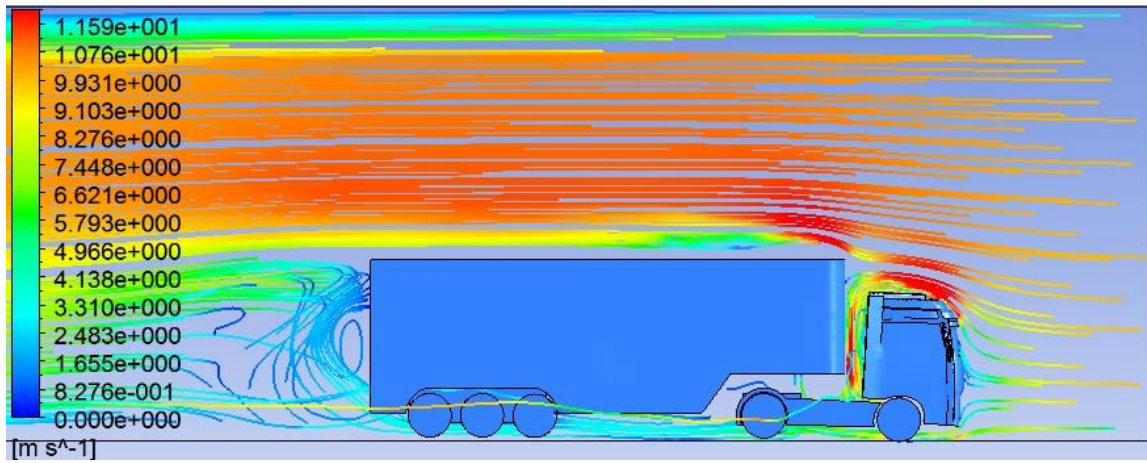


Şekil 5.50. 10 m/s ($Re=312\ 000$) hızdaki çekici ve römorka etki eden rüzgar hızının vektörel olarak gösterilişi



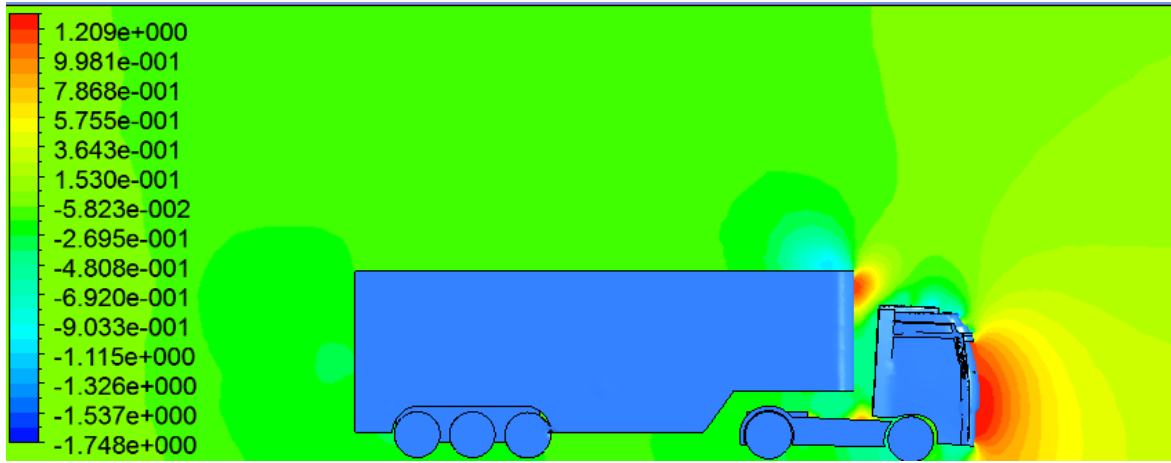
Şekil 5.51. 10 m/s ($Re=312\ 000$) hızdaki çekici ve römorka etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi (perspektif)

Şekil 5.52’de akışın streamline olarak görüntülenmesinde çekici römork arası ve römorkun arka kısmındaki türbülanslı bölge görülmektedir. Ayrıca çekicinin yan bölümünden geçen akışın römorkun alt bölümüne geçmesi ile bu bölgede bulunan tekerleklerde basınca bağlı aerodinamik direnç oluşmaktadır. Çekici römork arasına giren akış burada negatif basınç bölgesi oluşturmakta ve aerodinamik kuvveti arttırmaktadır. Çekici römork aralığının optimum mesafede olması gerekmektedir.



Şekil 5.52. 10 m/s ($Re=312\ 000$) hızdaki çekici ve römorka etki eden rüzgâr hızının streamline olarak gösterilişi

Şekil 5.53’de 10 m/s hızda çekici ve römork üzerindeki basınç katsayısı (C_P) dağılımında özellikle römorkun çekiciden yüksek bölümünde oluşan basıncın aracın ön tampon üzerinde oluşan durma basıncına yakın olduğu görülmektedir. Bu durum deneysel olarak tespit edilen basınç katsayısı dağılımında da tespit edilmiş ön tampon üzerinde deneysel sonuçlara göre daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni sayısal çözümlemede numerik yaklaşımdan kaynaklanan hata olabilmektedir.

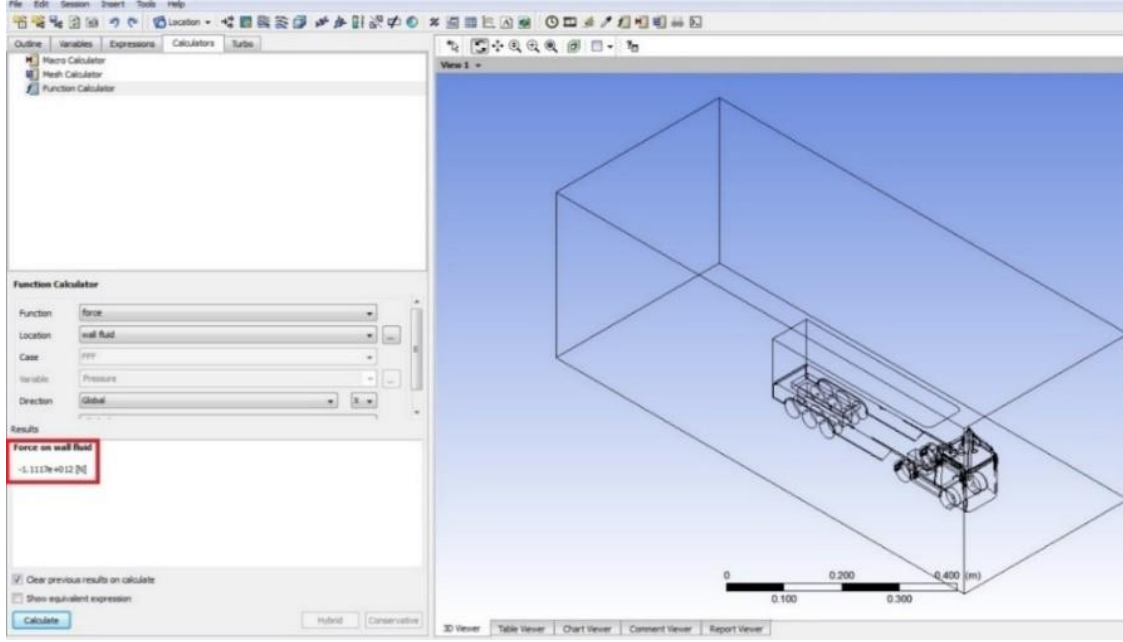


Şekil 5.53. 10 m/s ($Re=312\ 000$) hızda çekici ve römork üzerindeki basınç katsayısı (C_P) dağılımı

5.8.2. 15 m/s serbest akış hızındaki çözümleme sonuçları

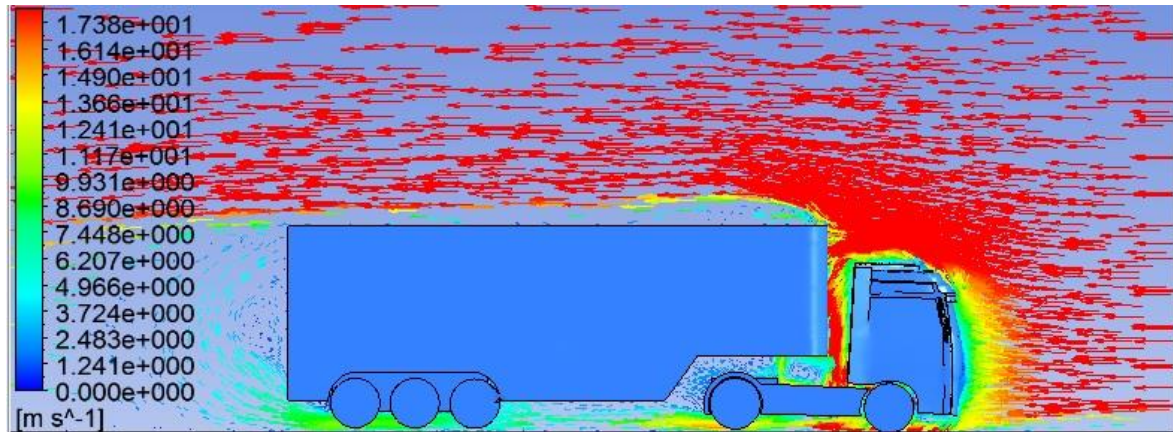
Bu çalışmada çekici ve römork kombinasyonuna 15 m/s hızda etki eden kuvvet değeri ve C_D katsayısı elde edilmiştir. Şekil 5.54’de çekici ve römork kombinasyonuna 15 m/s hızda etki eden kuvvet 1,111 N, C_D katsayısı ise 0,746 olarak belirlenmiştir.

Aynı hızda yapılan deneysel sonuçlara göre C_D katsayısı 0,696 olarak elde edilmiştir. Sayısal çözümleme sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki fark % 7,19 olarak elde edilmiştir. Sayısal çözümlemede numerik olarak çözülen Navier-Stokes denklemleri tam olmayıp yaklaşım metodudur. Bu durum ve deneysel çalışmadaki belirsizlik düşünülürse elde edilen sonuçlardaki fark kabul edilebilir değerdedir. Ayrıca farka neden olan diğer etkenler denklemlerin ayrıklaştırma özellikleri, mesh kalitesi ve yakınsama kriteri seçeneğidir.

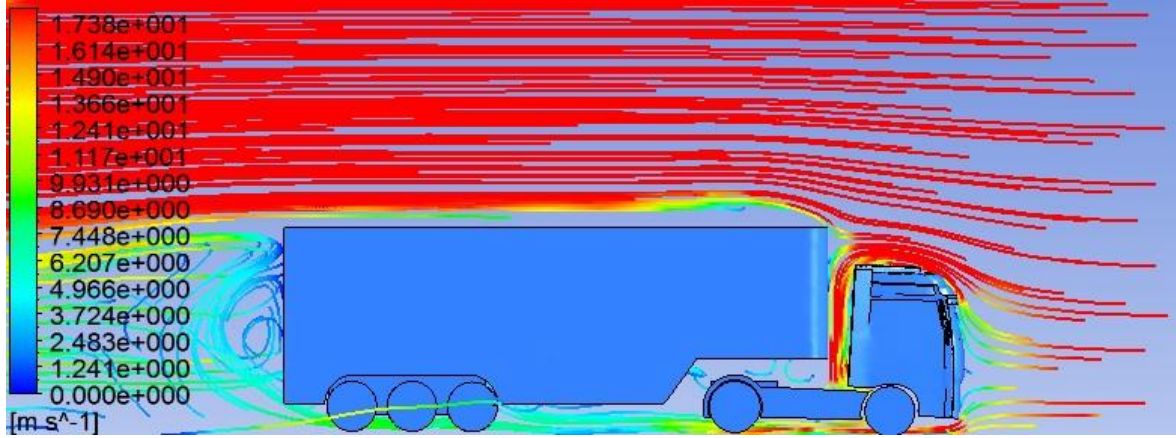


Şekil 5.54. 15 m/s ($Re=469\ 000$) hızdaki çekici römorka etki eden kuvvet değeri sonucu

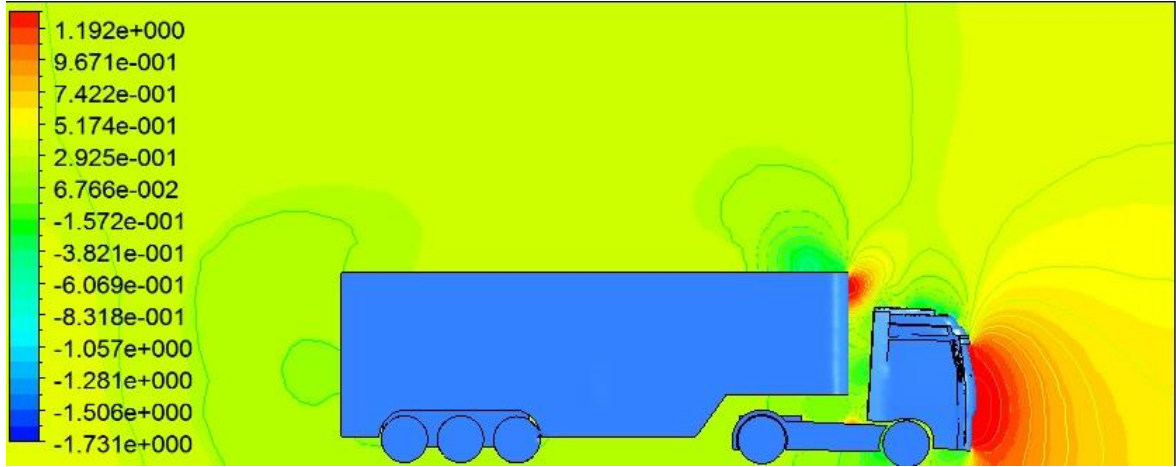
Şekil 5.55 ve Şekil 5.56' de çekici ve römorkun üzerindeki akış hızının vektörel ve streamline olarak görüntüsü ve Şekil 5.57' de çekici römork kombinasyonu üzerindeki basınç katsayısı dağılımı verilmiştir. Çekicinin ön tampon ve ön cam bölgesi ile römorkun alt kısmında akış oldukça yavaştır. Ayrıca römorkun arka kısmında negatif basınç bölgesi oluşmakta ve bu bölgedeki negatif basınç bölgesinin büyüklüğü araca etki eden toplam aerodinamik direnç kuvvetinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır.



Şekil 5.55. 15 m/s ($Re=469\ 000$) hızdaki çekici ve römorka etki eden rüzgar hızının vektörel olarak gösterilişi



Şekil 5.56. 15 m/s ($Re=469\ 000$) hızdaki çekici ve römorka etki eden rüzgar hızının streamline olarak gösterilişi

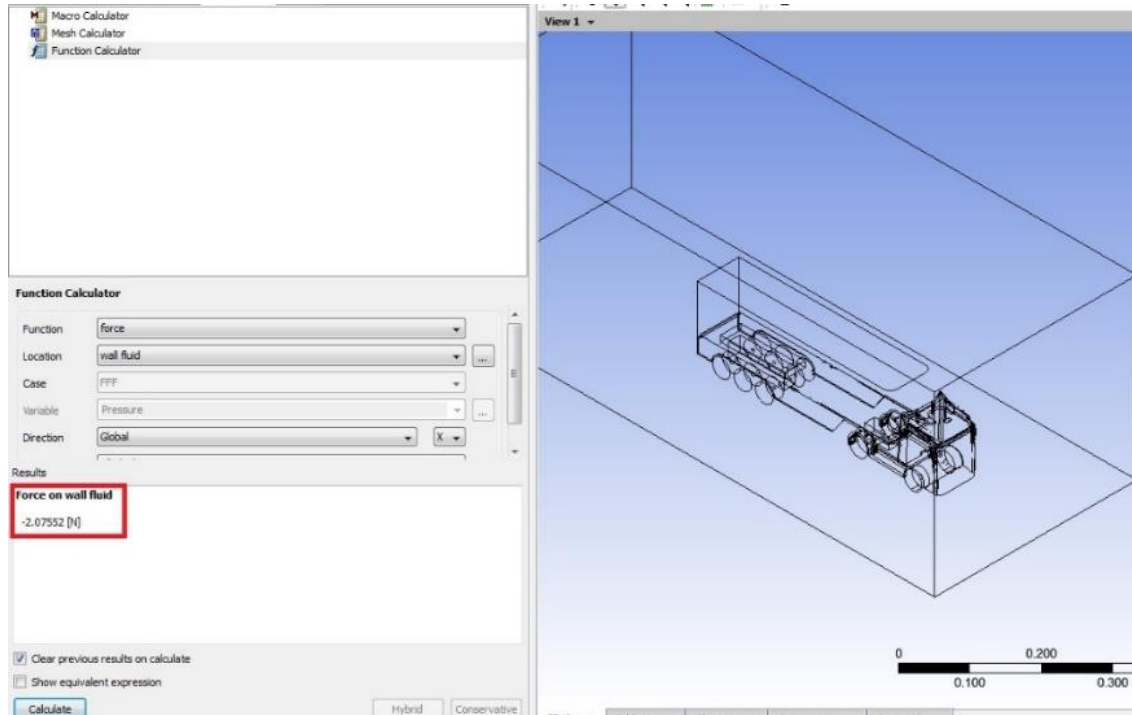


Şekil 5.57. 15 m/s ($Re=469\ 000$) hızda çekici ve römork üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı

5.8.3. 20 m/s serbest akış hızındaki çözümleme sonuçları

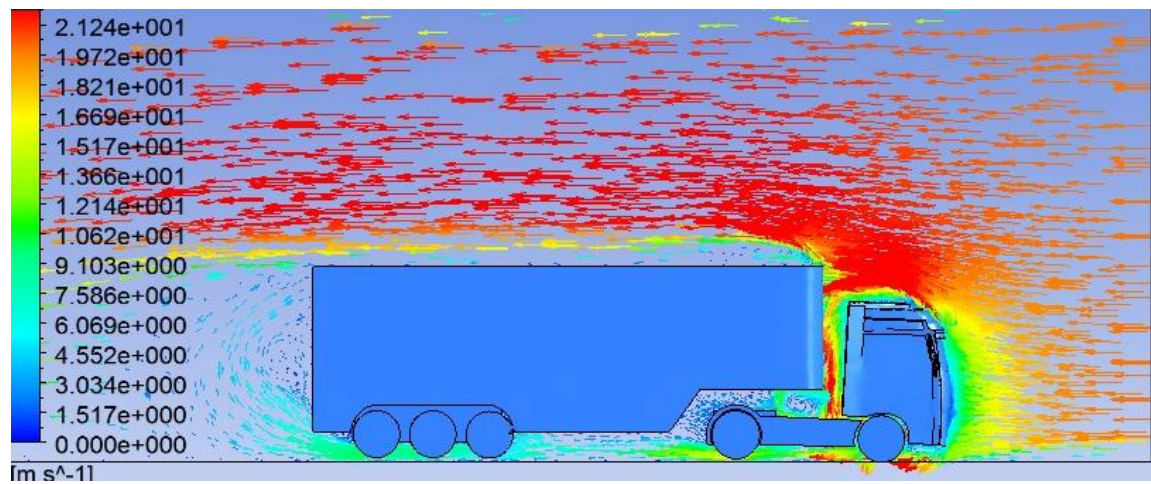
Şekil 5.58’da çekici ve römork aracı için 20 m/s hızla yapılan deney sonuçlarında araca etki eden kuvvet 2,075 N olarak C_D katsayısı ise 0,784 olarak hesaplanmıştır. Aynı hızda yapılan deneysel sonuçlara göre C_D katsayısı 0,713 olarak elde edilmiştir. Aerodinamik direnç katsayısının % 94,60’ basınç, %5,40’si sürtünme kaynaklı olduğu tespit edilmiştir.

Deneysel sonuçlara göre fark % 9,85 olarak elde edilmiştir. Bu fark deney düzeneğinin belirsizliğinden, mesh kalitesinden, ağ kalitesinden, denklemlerin ayrıklaştırma özelliklerinden kaynaklanabilmektedir.

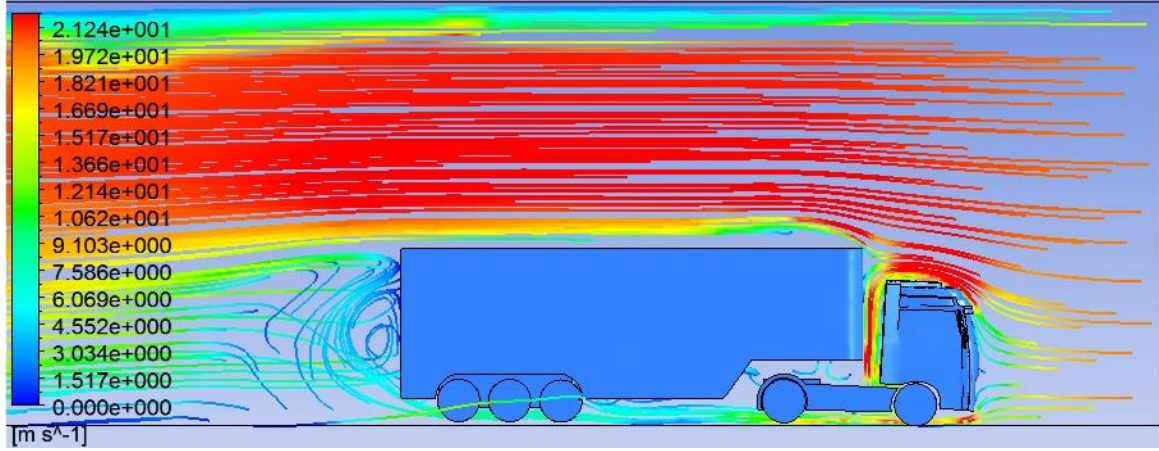


Şekil 5.58. 20 m/s ($Re=625\ 000$) hızda çekici römorka etki eden kuvvet değeri sonucu

Şekil 5.59 - Şekil 5.61 ' de elde edilen akış görüntülenmelerinde aracın yan bölümünden geçen akışın aracın alt kısmında oluşan negatif basınç bölgesine doğru geçtiği burada bulunan çok sayıdaki tekerleklerin yüzeylerinde basınca bağlı sürüklenme kuvveti oluşturduğu görülmüştür.

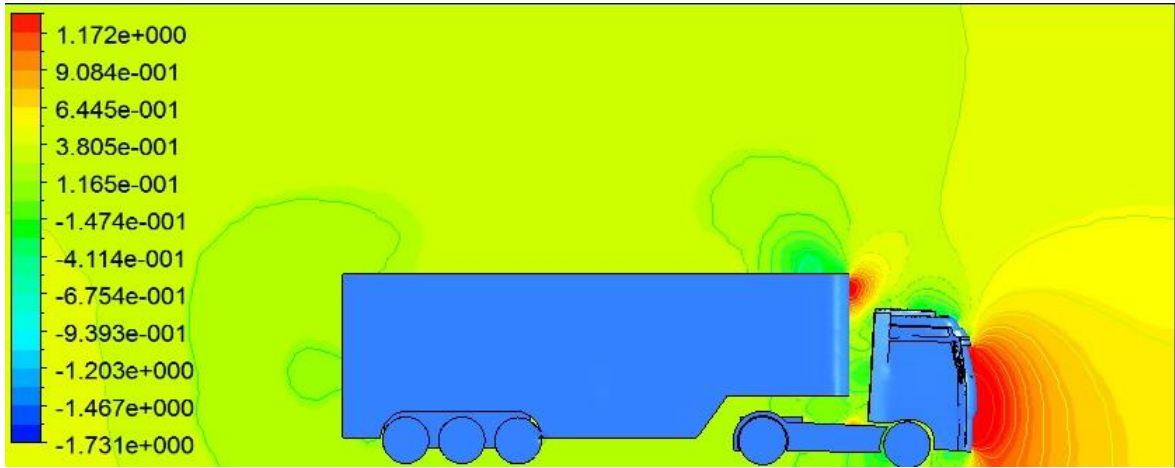


Şekil 5.59. 20 m/s ($Re=625\ 000$) hızdaki çekici ve römorka etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi



Şekil 5.60. 20 m/s ($Re=625\ 000$) hızdaki çekici ve römorka etki eden rüzgar hızının streamline olarak gösterilişi

Akış hızının akım çizgisi (streamline) ve vektör olarak görüntülemelerinde akış hızının tekerlekler üzerinde çok yavaş olduğu tespit edilmiştir. Bu akış görüntülemesinde lift kuvveti için olmasa dahi römorkun tekerleklerinde oluşan sürüklenme kuvvetini azaltmak için ön tamponda iyileşme yapılabileceği görülmüştür.

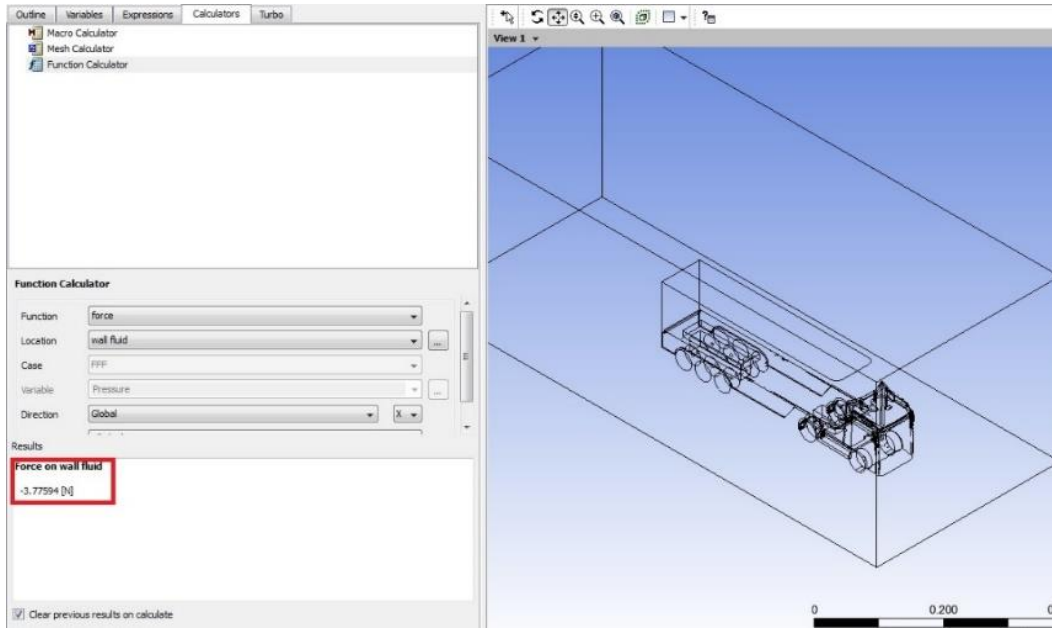


Şekil 5.61. 20 m/s ($Re=625\ 000$) hızda çekici ve römork üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı

Çekici römork kombinasyonu üzerindeki basınç katsayısı dağılımları incelendiğinde diğer hızlarda elde edilen basınç katsayısı dağılımına yakın katsayılar elde edilmiştir. Çekici ön yüzey alanında ve römork üst kısmında basınca bağlı oluşan direnç kuvveti yüksek olup toplam direnç kuvvetinin büyük bir kısmı bu bölgelerde oluşmaktadır.

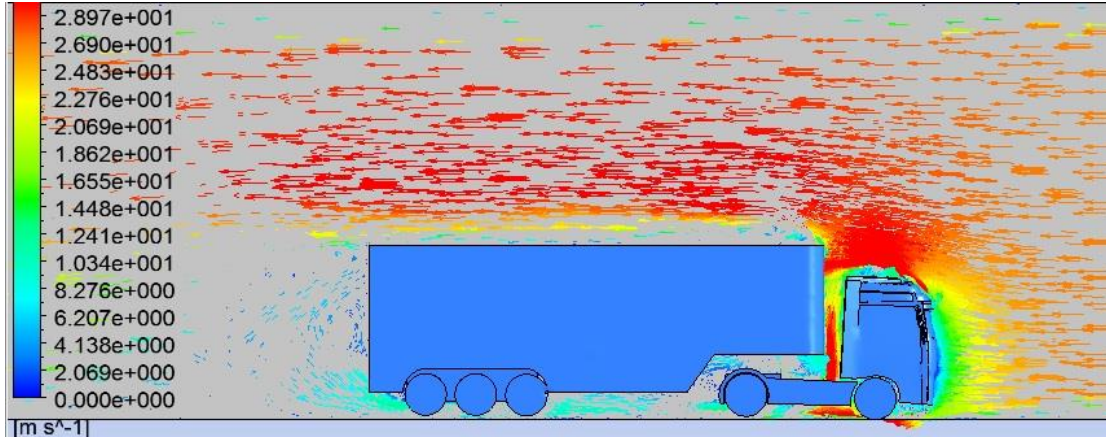
5.8.4. 27 m/s serbest akış hızındaki çözümleme sonuçları

Şekil 5.62’de çekici ve römork için 27 m/s hızla yapılan deney sonuçlarında araca etki eden kuvvet 3,775 N olarak C_D katsayısı ise 0,782 olarak hesaplanmıştır. Aynı hızda yapılan deneysel sonuçlara göre C_D katsayısı 0,696 olarak elde edilmiştir. C_D katsayısının tespitinde deneysel sonuçlara göre fark % 12,39 olarak elde edilmiştir.

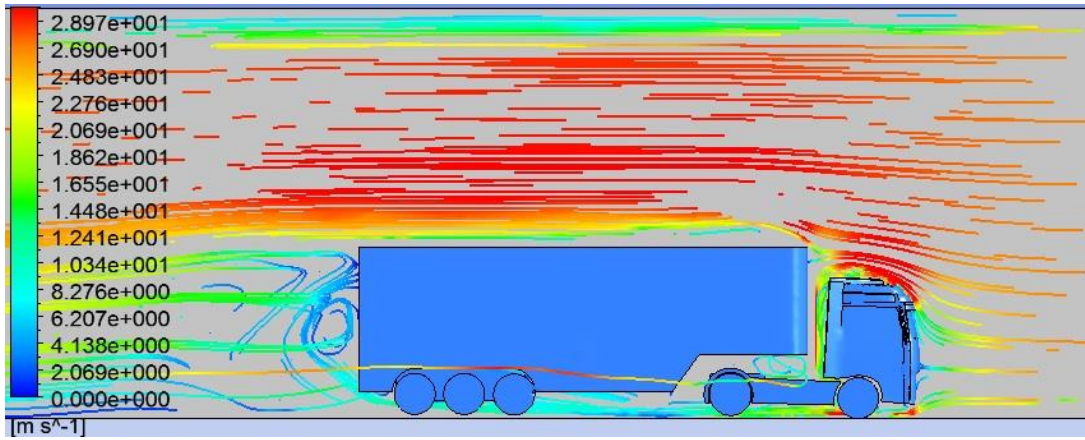


Şekil 5.62. 27 m/s ($Re=844\ 000$) hızda çekici römorka etki eden kuvvet değeri sonucu

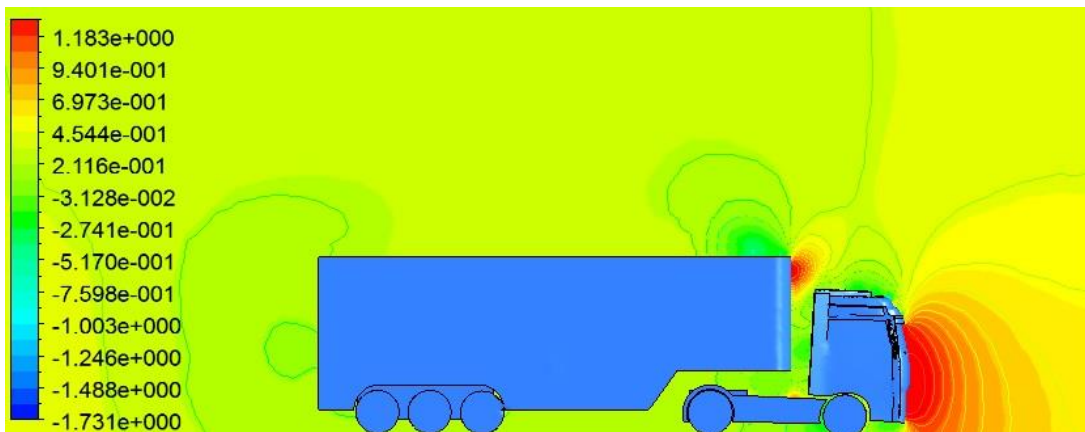
Şekil 5.63’de akış hızının aracın ön yüzey formunda, tekerleklerde ve negatif basınç bölgelerinde azaldığı görülmektedir. Ayrıca akış hızının römork uzunluğuna bağlı olarak römork yüzeyine yakın bölgelerde akışın sürtünmeye bağlı olarak yavaşladığı görülmüştür. Şekil 5.64’ de akışın streamline olarak görüntülenmesinde araç yüzeyinden geçen akışın negatif basınç bölgelerine geçtiği görülmüş yüksek hızlarda çekici ve römork arasına geçen akışın hızının da arttığı tespit edilmiştir. Şekil 5.65’ da görüldüğü üzere aracın ön formunda basınca bağlı, römorkun üst kısmında sürtünmeye bağlı sürüklenme kuvvetinin oluştuğu görülmüştür. Römorkun arka kısmı ve çekici römork arasında negatif basınca bağlı direnç oluştuğu görülmüştür. 27 m/s hızda çekici römork kombinasyonuna etki eden aerodinamik direnç kuvvetinin % 98,2’si basınç kaynaklı, % 5,8’inin sürtünme kaynaklı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.63. 27 m/s ($Re=844\ 000$) hızdaki çekici ve römorka etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi

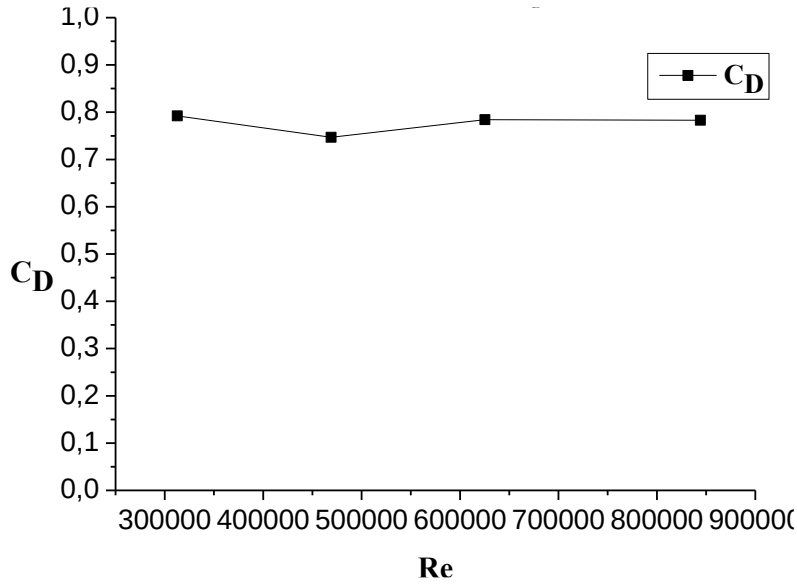


Şekil 5.64. 27 m/s ($Re=844\ 000$) hızdaki çekici ve römorka etki eden rüzgâr hızının streamline olarak gösterilişi

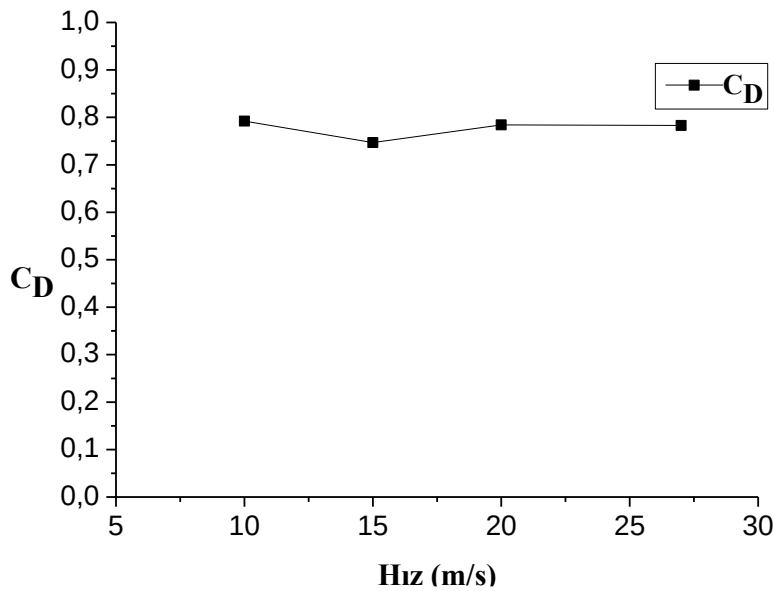


Şekil 5.65. 27 m/s ($Re=844\ 000$) hızda çekici ve römork üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı

Şekil 5.66 ve Şekil 5.67’de elde edilen grafiklerde görüleceği üzere 10 m/s, 15 m/s, 20m/s ve 27 m/s hızlarında yapılan sayısal çözümleme sonuçlarına göre çekici römork kombinasyonunun C_D katsayısı ortalama 0,776 olarak tespit edilmiştir. Toplam aerodinamik direnç katsayısının ortalama % 94,2’si basınç kaynaklı % 5,8’i sürtünme kaynaklı olarak tespit edilmiştir.



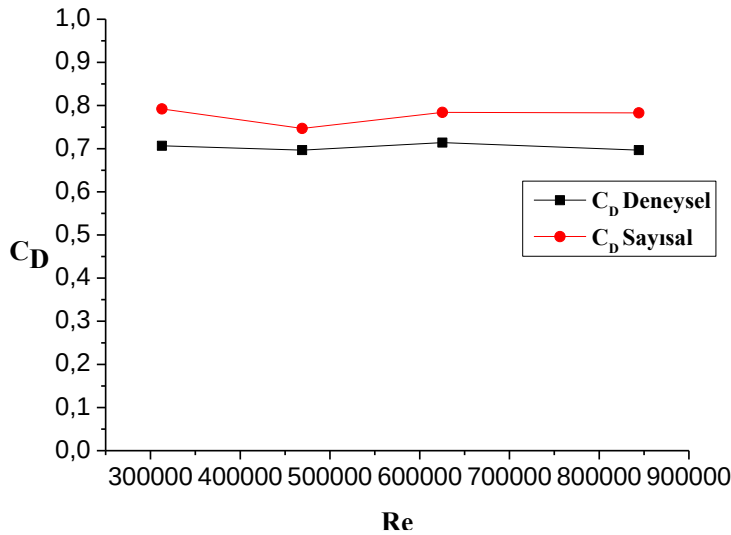
Şekil 5.66. Reynolds sayısına göre çekici römorkun sayısal C_D katsayısı grafiği



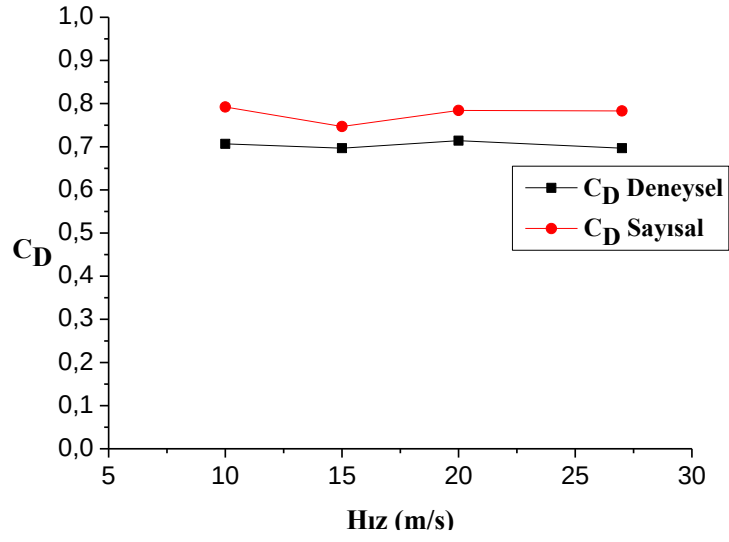
Şekil 5.67. Hıza göre çekici römorkun sayısal C_D katsayısı grafiği

Bu çalışmada çekici için dört değişik hızda yapılan sayısal çözümleme sonuçları aynı hızda ve şartlarda gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.68 ve Şekil 5.69’da yapılan karşılaştırma sonuçlarına göre sayısal olarak tespit edilen C_D katsayısı deneysel çalışma sonuçlarından ortalama % 10,38 daha yüksek çıkmıştır. Deney düzeneğinde C_D katsayısının belirlenmesinde toplam belirsizlik toplam % 4,7’ dir. Sonuçların sayısal olarak farklı çıkmasının nedeni deney düzeneğinin belirsizliğinden kaynaklanabileceği gibi çizim datasının ayrıntısından, ağ kalitesinden, denklemlerin ayrıklaştırma özelliklerinden vb. kaynaklanabilmektedir. Bu çalışmada aerodinamik yapısı incelenen çekiciye eklenen römork çekicinin C_D katsayısını % 19,59 arttırmıştır.

Akış görüntülemelerinde ve çekici römork üzerindeki statik basınç dağılımlarında römorkun çekiciden yüksek olan (17,18,19 no’lu basınç prizleri) bölümünde basınç katsayısı durma basıncına yakın olduğunda aerodinamik direnç katsayısındaki % 19,59’lük artışın büyük bir kısmı bu bölgeden kaynaklanmaktadır. Bu durumu iyileştirmek için uygun yükseklikte ve römork seçimi yapılmalı ya da akışı römorkun üzerine taşıyabilecek uygun hücum açısına sahip spoiler yapısı seçilmelidir. Bölüm 6’da bu şekilde bir çalışma yapılmış olup benzer yapıdaki spoilerler ile aerodinamik iyileştirmelerin yapıldığı literatürdeki diğer çalışmalarda görülmüştür.



Şekil 5.68. Reynolds sayısına göre çekici ve römorkun sayısal-deneysel C_D katsayısı grafiği



Şekil 5.69. Hıza göre çekici ve römorkun sayısal-deneysel C_D katsayısı grafiği

6. PASİF AKIŞ KONTROL YÖNTEMLERİ İLE AERODİNAMİK İYİLEŞTİRME

6.1. Pasif Akış Kontrolü

Akış ortamı içerisinde yer alan cismin etrafında belirli bir akış yapısı hakimdir. Bu akış yapısını olağan akış yapısının dışına çıkarma işlemine akış kontrolü denilmektedir. Akış kontrolünde enerji harcanmasına dayalı olarak aktif akış kontrolü ve pasif akış kontrol yöntemi olmak üzere iki çeşit akış kontrol yöntemi vardır. Pasif akış kontrolü sistem içerisine herhangi bir enerji harcamadan genel olarak aerodinamik yapısı incelenen geometrinin şeklinde yapılan değişiklikler ile gerçekleştirilen akış kontrol yöntemidir.

Kontrol çubuğu, ayırıcı plaka, yüzey pürüzlülüğü, keskin köşelere uygulanan yuvarlatma ve kesme işlemleri, cisme üzerine açılan yarıklar, oluşturulan girintiler ve çıkıntılar, cisim yüzeyi dalga yapısı, pasif girdap üreteçleri ve serbest salınım yapan cisimler, pasif akış kontrol yöntemlerine birer örnektirler (Saygı, 2008).

Yapılan deney çalışmalarında araç üzerindeki basınç katsayısı dağılımları ile sayısal çalışma sonucundaki akış görüntülemelerinde ağır vasıtalar da aerodinamik direncin en çok olduğu bölgeler tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde pasif akış kontrol yöntemleri ile 4 model geliştirilmiştir. Araç üzerine yapılacak bu tür eklemelerle aerodinamik iyileşme sağlanmıştır.

6.1.1. Model 1 (spoiler) ile aerodinamik iyileştirme

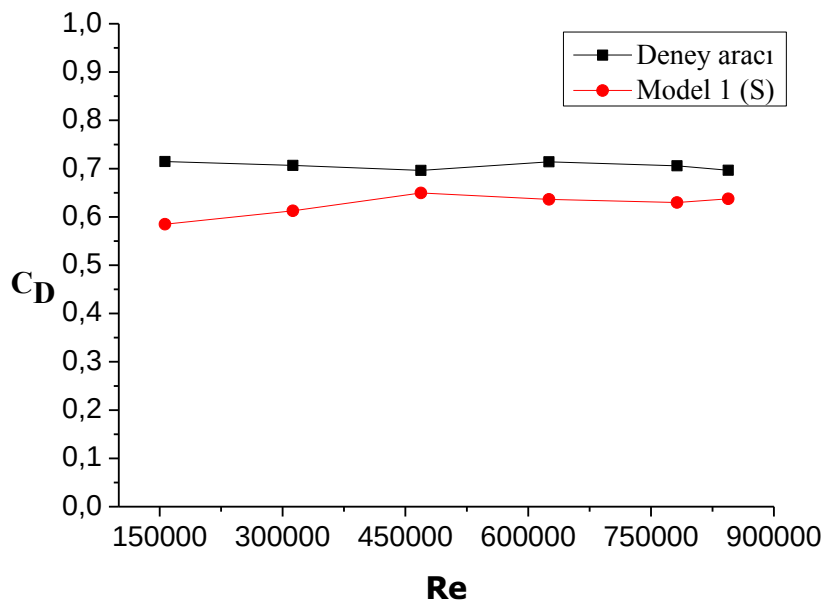
Ağır vasıtalar şehirlerarası yollarda yüksek hızlarda uzun mesafeler kat etmektedir. Basınç katsayısı dağılımları incelendiğinde 17, 18, 19 no'lu basınç prizlerinin bulunduğu bölgede basınç katsayısının (C_p) yüksek olduğu görülmüştür. Bunun nedeni bu bölgenin çekiciden yukarıda olması ve havanın doğrudan burada direnç oluşturmasıdır. Standart spoiler ile yönlendirilen hava römorkun üst tarafına aktarılamadığından bu basınç prizlerinde basınç katsayısı ön tampon üzerindeki durma basıncına yakın olduğu görülmüştür. Bu durumun Şekil 6.1'de verilen bir spoiler ile iyileştirileceği öngörülerek hücum açısı 30° olan bir spoiler üretilmiştir. Üretilen spoiler ile çekici arasında sızdırmazlık sağlanarak akışın

spoilerin altından veya boşluklardan çekicinin arka kısmında negatif basınç oluşturmaları engellenmiştir.



Şekil 6.1. Model 1 aracı

Şekil 6.2’ de altı değişik hızda yapılan deney çalışmaları sonucunda model 1 aracının C_D katsayısı ortalama 0,625 olarak hesaplanmıştır. Model aracının C_D katsayısı ise 0,706’dır. Bu durumda üretilen spoiler ile elde edilen aerodinamik iyileşme oranı % 11,37 olmuştur.



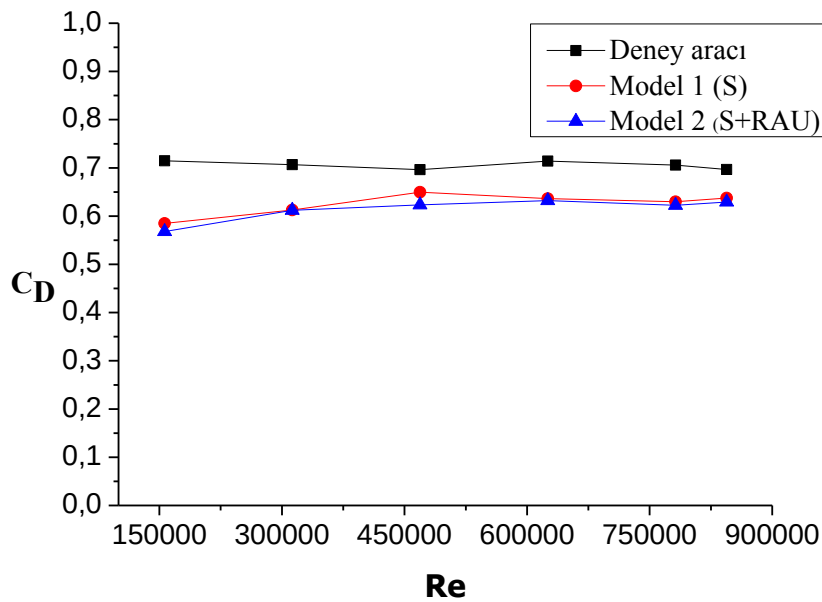
Şekil 6.2. Model 1 aracında yapılan aerodinamik iyileştirme

6.1.2. Model 2 (spoiler ve römork arka uzantısı) ile aerodinamik iyileştirme

Ağır vasıtalarda römorkun arka kısmında kalan negatif basınç bölgesinin büyük olması önemli bir direnç oluşturmaktadır. Bu modelde ise römork yüzeyinden geçen havanın römorkun arka kısmında daha küçük bir negatif basınç alan oluşturması hedeflenmiştir. Bu hedefle model 1 aracına yuvarlatma açısı 10° olan römork arka uzantısı (RAU) üretilerek römorkun arka bölümüne eklenmiş ve Şekil 6.3’de model 2 aracı elde edilmiştir.



Şekil 6.3. Şekil Model 2 aracı

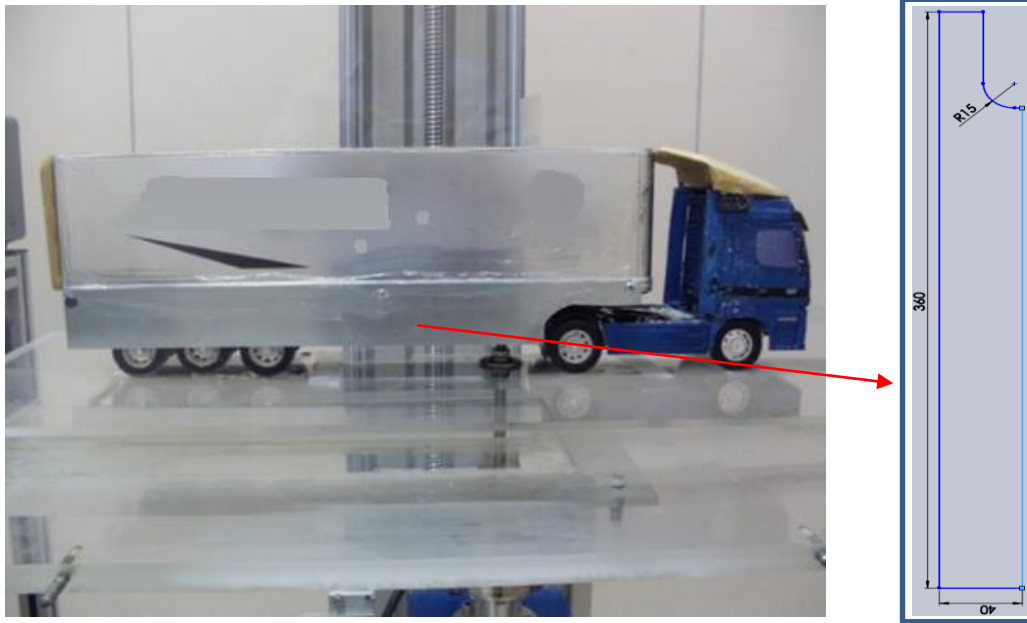


Şekil 6.4. Model 2 aracında yapılan aerodinamik iyileştirme

Yapılan deney çalışmaları sonucunda model 2 aracının C_D katsayısı ortalama 0,615 olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.4’de deney aracına göre elde edilen aerodinamik iyileşme oranı %12,88, model 1 aracına göre ise elde edilen aerodinamik iyileşme oranı % 1,51 olmuştur.

6.1.3. Model 3 (spoiler, römork arka uzantısı ve yan rüzgar kırıcı) ile aerodinamik iyileştirme

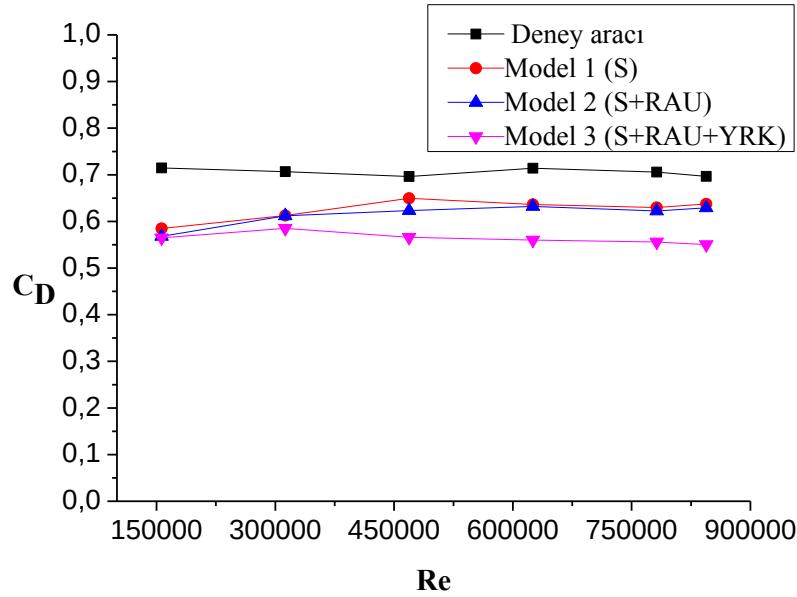
Çekici römork kombinasyonların da tekerleklerin neden olabileceği aerodinamik direnç toplam direncin % 5’i kadardır. (Wood ve Bauer, 2003) Şekil 6.5’de model 2 aracına ek olarak römorkun tekerleklerini kapatan ek kaporta üretilmiştir. Karayollarında römorklu araçların karıştığı kazalarda otomobillerin aracın altına girmesi nedeniyle ölümlü kazaların oranı artmaktadır.



Şekil 6.5. Model 3 aracı

Şasi eteği olarak adlandırılan bu aerodinamik iyileştirme ile çarpma anında oluşan enerjinin bir kısmı bu parça ile sönmülenebilir diğer aracın römorkun altına girmesi engellenebilir. Bu model çalışmasının aerodinamik iyileştirme ile birlikte böyle bir faydası da öngörülmektedir.

Şekil 6.6’da görüldüğü üzere model 3 aracının C_D katsayısı ortalama 0,564 olarak hesaplanmıştır. Deney aracına göre elde edilen aerodinamik iyileşme oranı % 20,11, model 1 aracına göre % 8,73, model 2 aracına göre ise elde edilen aerodinamik iyileşme oranı % 7,22 olmuştur. Römork tekerleklerin kapatılması ile elde edilen iyileşme oranı literatür ile de uyusmaktadır.



Şekil 6.6. Model 3 aracında yapılan aerodinamik iyileştirme

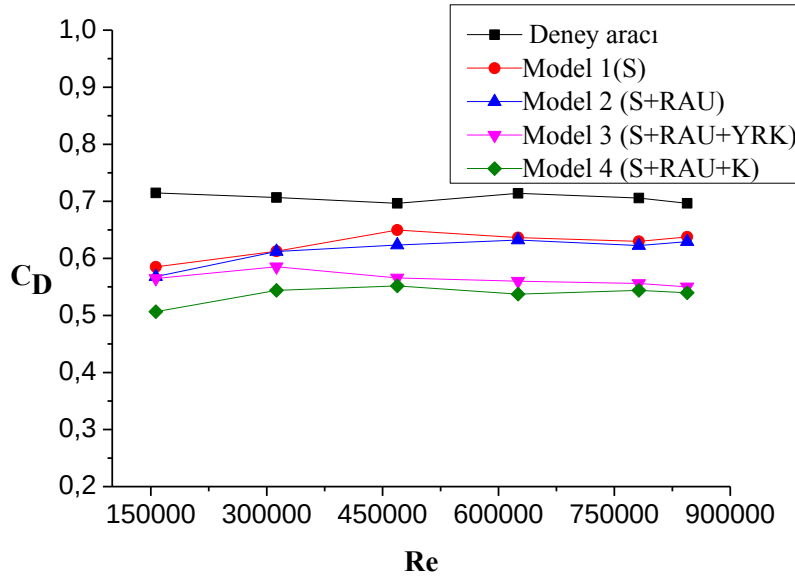
6.1.4. Model 4 (spoiler, römork arka uzantısı ve körük) ile aerodinamik iyileştirme

Deneysel çalışmalarda basınç katsayısı dağılımlarının tespitinde çekici ile römork arasındaki boşlukta negatif basınç alanı oluşmaktadır. Bu negatif basınç alanına bağlı olarak bu bölgede basınç katsayıları da negatif olarak elde edilmiştir. Sayısal çalışmalarda elde edilen görsellerde ve özellikle de akışın streamline olarak görüntülenmesinde çekici ve römork arasındaki negatif basınç bölgesine akış gözlemlenmiştir.

Şekil 6.7’de görüldüğü üzere bu aerodinamik iyileştirme çalışmasında model 2 aracına ek olarak çekici ile römork arası bir körük ile kapatılmıştır. Üretilen körük ile çekici römork arasına giren akış engellenerek akışın römorkun yanlarına aktararak aerodinamik iyileşme sağlamak hedeflenmiştir.



Şekil 6.7. Model 4 aracı

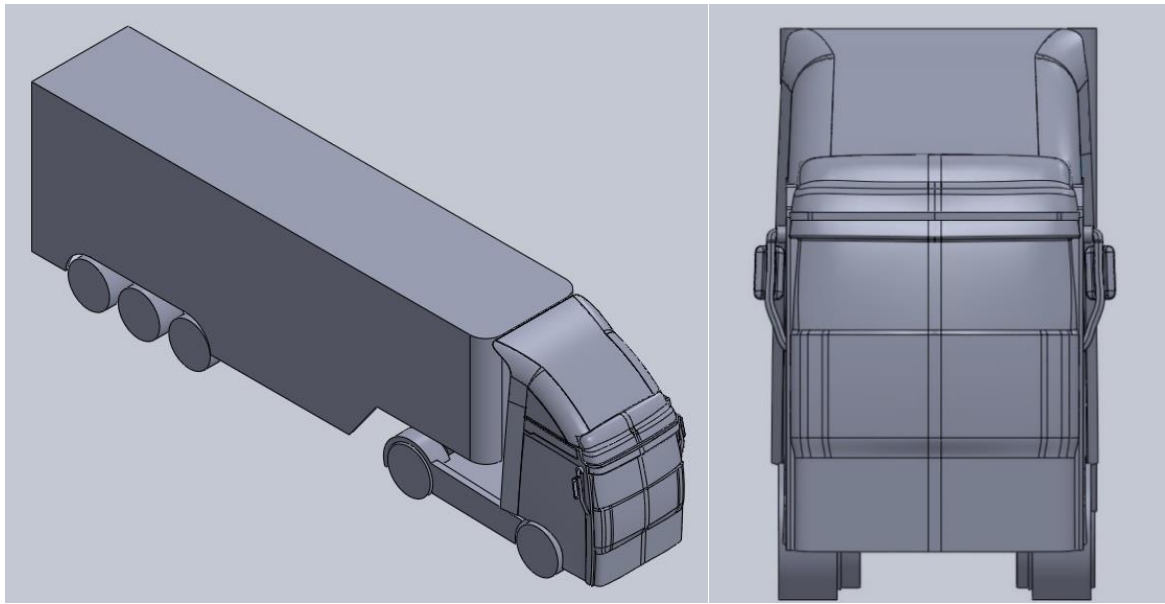


Şekil 6.8. Model 4 aracında yapılan aerodinamik iyileştirme

Şekil 6.8’de altı değişik hızda yapılan deney sonuçlarında model 4 aracının C_D katsayısı ortalama 0,537 olarak tespit edilmiştir. Deney aracına göre elde edilen aerodinamik iyileşme oranı % 23,85, model 1 aracına göre % 12,48, model 2 aracına göre ise elde edilen aerodinamik iyileşme oranı % 10,97 olmuştur. Geliştirilen 4 model ile elde edilen aerodinamik iyileşme oranı toplamda % 23,85 olarak tespit edilmiştir.

6.2. Model 1 Aracında Elde Edilen Aerodinamik İyileştirmenin Sayısal Analizi

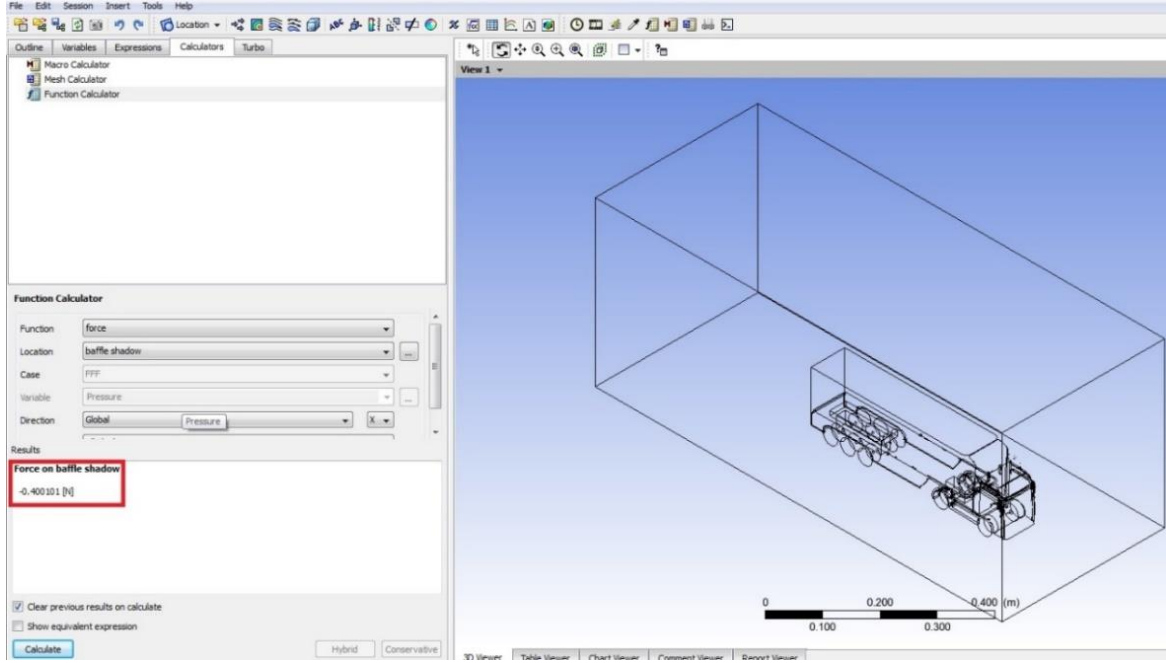
Bu çalışmada model 1 aracında üretilen spoiler ile deneysel olarak tespit edilen aerodinamik iyileşme sonuçları sayısal olarak da hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Şekil 6.9’ da model 1 aracında geliştirilen spoilerin çizim datası oluşturulmuş ve model araca montajı yapılmıştır. Elde edilen çizim datasının kalıp boşluğu oluşturularak aynı deney şartlarında 10 m/s, 15 m/s, 20 m/s ve 27 m/s hızlarında sayısal analizi yapılmıştır. Elde edilen görseller ile iyileştirilmiş akış yapısı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.9. Model 1 aracının çizim datası

6.2.1. 10 m/s serbest akış hızındaki çözümleme sonuçları

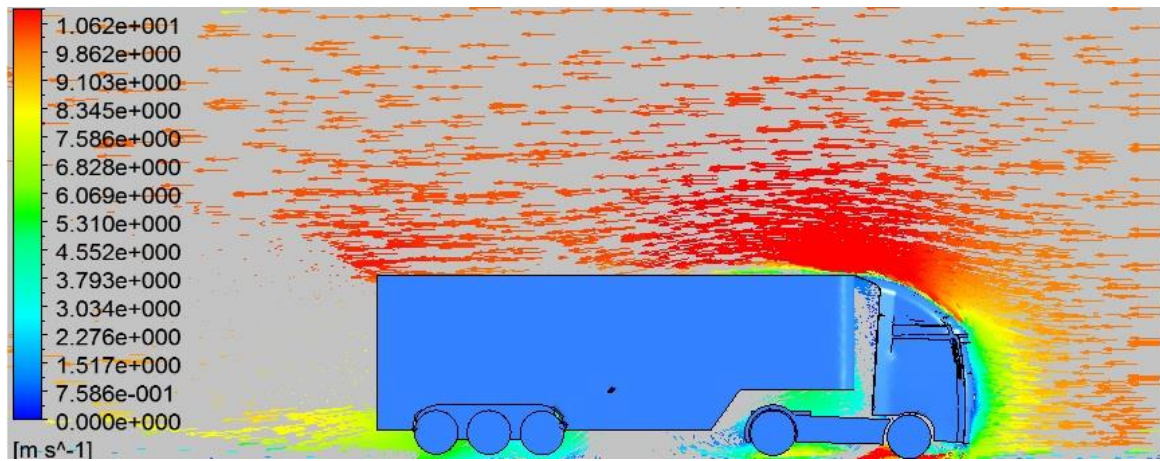
Şekil 6.10’da model 1 aracı için 10 m/s hızla yapılan sayısal çözümleme sonuçlarında araca etki eden kuvvet 0,4 N olarak aerodinamik direnç katsayısı (C_D) ise 0,605 olarak hesaplanmıştır. Aynı hızda ve şartlarda yapılan deneysel çalışmalarda araca etki eden kuvvet 0,405 N, aerodinamik direnç (C_D) katsayısı ise 0,613 olarak hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlara göre fark % 1,29 olmuştur.



Şekil 6.10. 10 m/s ($Re=312\ 000$) hızda model 1 aracına etki eden kuvvet değeri sonucu

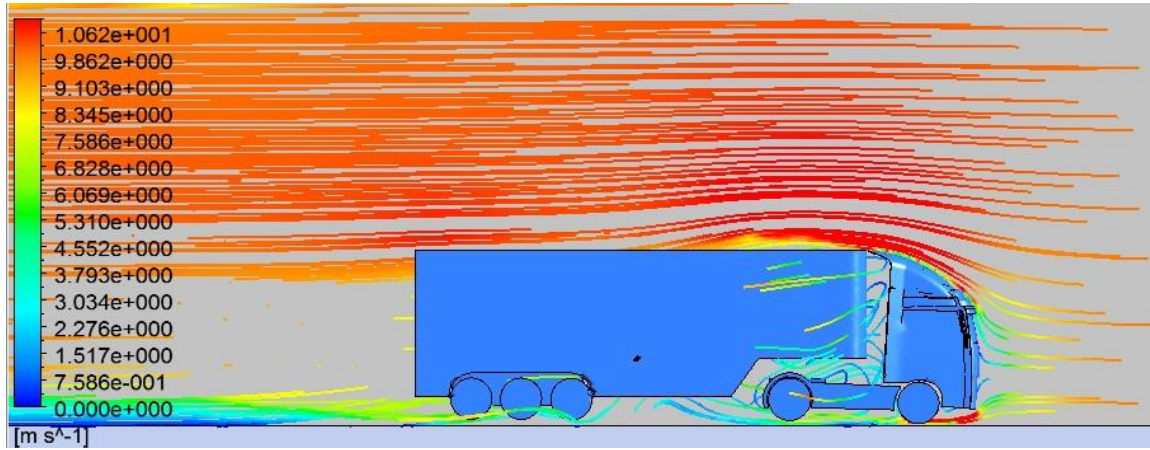
Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda römorkun çekiciden yüksek olan üst kısmında basınç katsayısı (C_p) durma basıncına yakın elde edilmiştir. Model 1 aracında geliştirilen spoiler ile bu bölgede aerodinamik iyileşme sağlanmıştır.

Şekil 6.11’de spoilerin hücum açısına bağlı olarak hava akışı römorkun üst kısmına aktarılmış ve bu bölgede oluşan basınç kaynaklı direnç kuvveti azaltılmıştır.



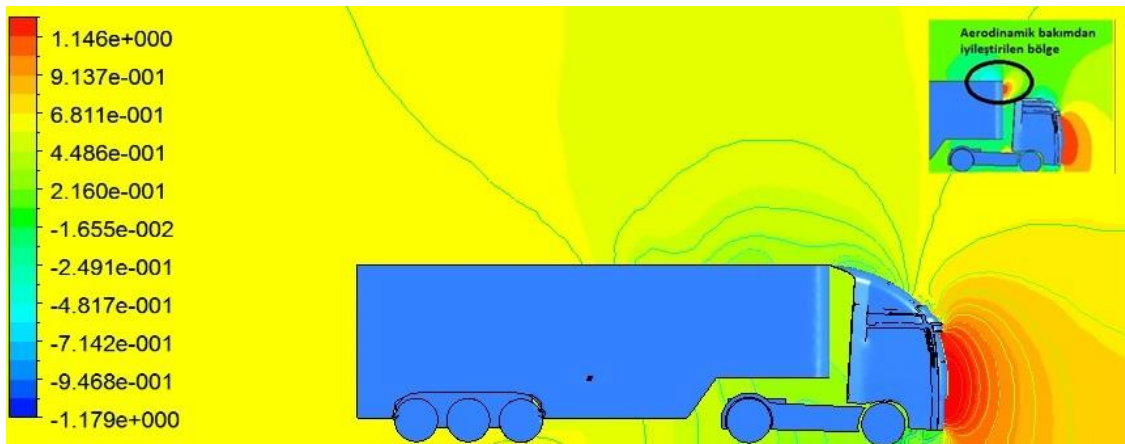
Şekil 6.11. 10 m/s ($Re=312\ 000$) hızdaki model 1 aracına etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi

Şekil 6.12’de akışın streamline olarak görüntülenmesinde geliştirilen spoiler ile römork üzerine aktarılan hava akışı görülmektedir. Spoilerin üst kısmından uzunluğu boyunca geçen hava burada sürtünmeye bağlı bir direnç oluşturmaktadır. Sürtünmeye bağlı direnç basınca bağlı dirence göre çok düşük etki yaptığında model 1 aracında sayısal olarak % 11,37 oranında aerodinamik iyileşme elde edilmiştir.



Şekil 6.12. 10 m/s ($Re=312\ 000$) hızdaki model 1 aracına etki eden rüzgâr hızının streamline olarak gösterilişi

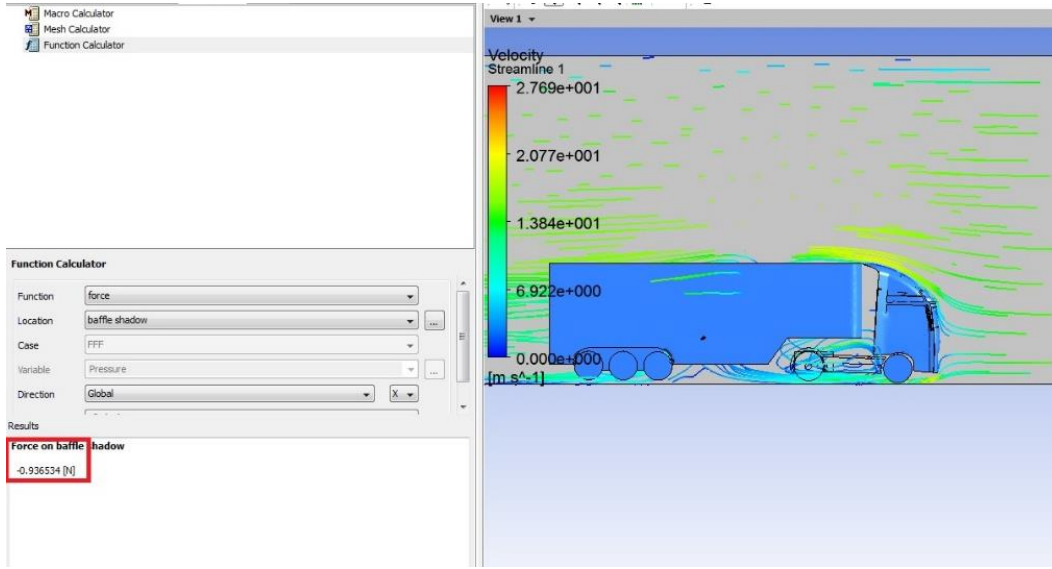
Şekil 6.13’de model 1 aracı üzerindeki basınç katsayısı dağılımı verilmiştir. Römorkun çekiciden yüksek olan bu bölge ve akışa dik durumda olup durma basıncına yakın basınç katsayısı oluşmaktadır. Geliştirilen spoiler ile bu bölgedeki basınca bağlı oluşan aerodinamik direnç kuvveti azaltılarak C_D katsayısı düşürülmüştür.



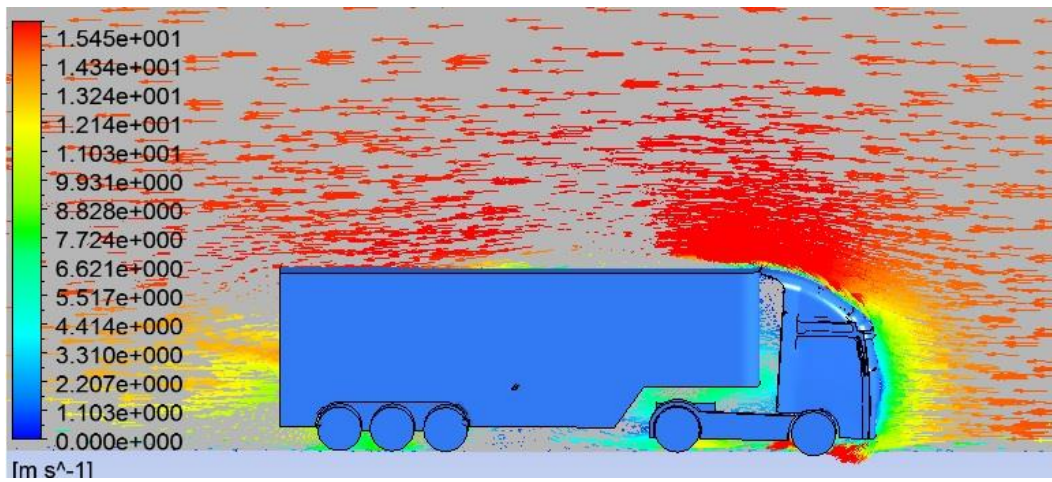
Şekil 6.13. 10 m/s ($Re=312\ 000$) hızda model 1 aracı üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı

6.2.2. 15 m/s serbest akış hızındaki çözümleme sonuçları

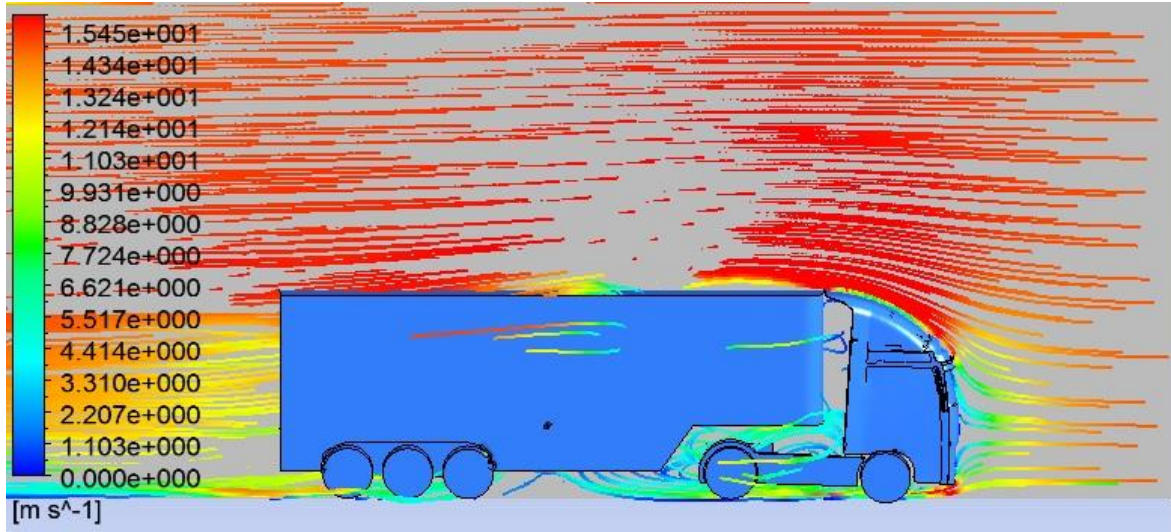
Şekil 6.14' da model 1 aracı için 15 m/s hızla yapılan deney sonuçlarında araca etki eden kuvvet 0,936 N olarak C_D katsayısı ise 0,629 olarak hesaplanmıştır. Aynı şartlarda yapılan deneysel çalışmalarda kuvvet 0,967 N C_D katsayısı ise 0,65 olarak hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlara göre fark % 3,2 olarak elde edilmiştir. 15 m/s hızdaki akış yapısına ait görseller Şekil 6.15 – 6.17' de verilmiştir.



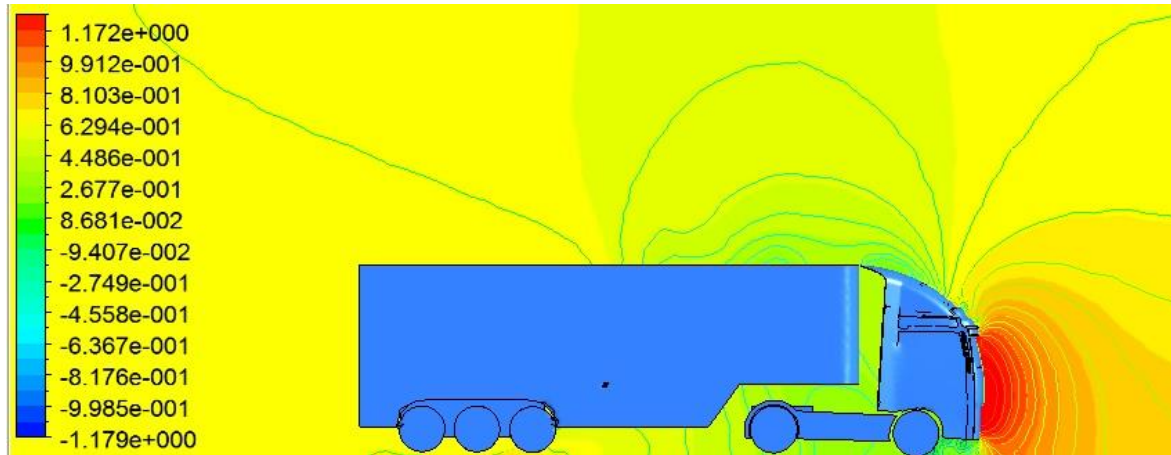
Şekil 6.14. 15 m/s ($Re=469\ 000$) hızda model 1 aracına etki eden kuvvet değeri sonucu



Şekil 6.15. 15 m/s ($Re=469\ 000$) hızdaki model 1 aracına etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi



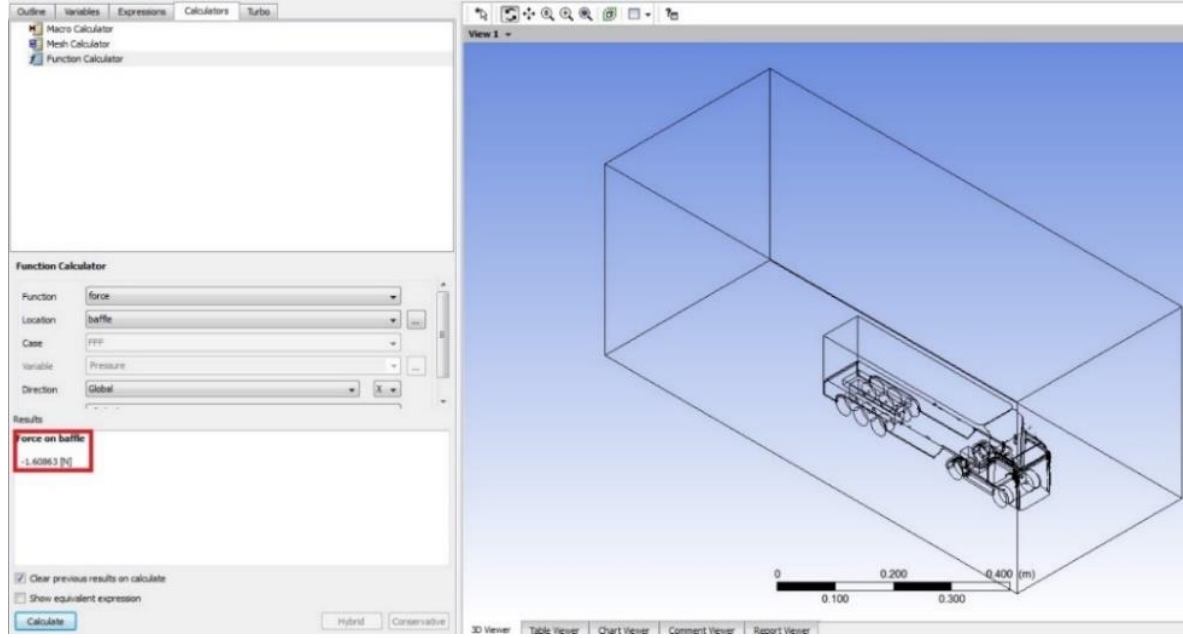
Şekil 6.16. 15 m/s ($Re=469\,000$) hızdaki model 1 aracına etki eden rüzgar hızının streamline olarak gösterilişi



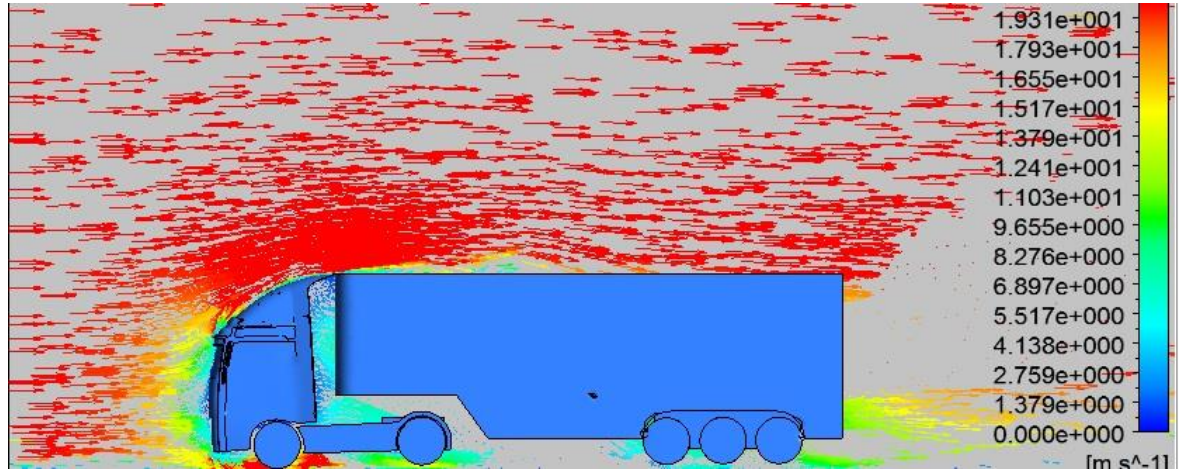
Şekil 6.17. 15 m/s ($Re=469\,000$) hızda model 1 aracı üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı

6.2.3. 20 m/s serbest akış hızındaki çözümleme sonuçları

Şekil 6.18’de model 1 aracı için 20 m/s hızla yapılan deney sonuçlarında araca etki eden kuvvet 1,608 N olarak C_D katsayısı ise 0,608 olarak hesaplanmıştır. Aynı hızda ve şartlarda yapılan deneysel çalışmalarda kuvvet 1,684 N C_D katsayısı ise 0,637 olarak hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlara göre fark % 4,51 olarak elde edilmiştir. 20 m/s hızdaki akış yapısına ait görseller Şekil 6.19 – 6.21’ de verilmiştir.

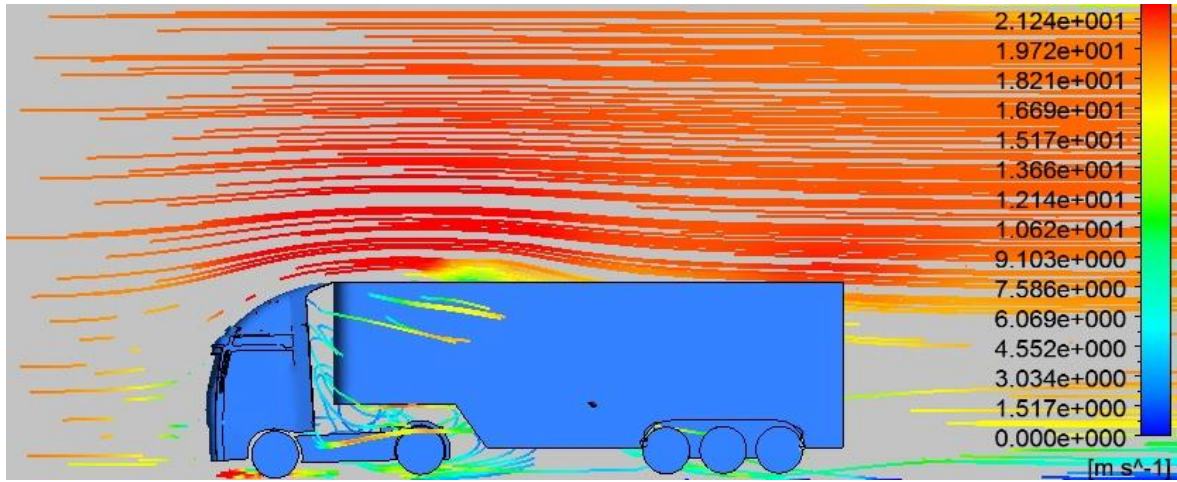


Şekil 6.18. 20 m/s ($Re=625\,000$) hızda model 1 aracına etki eden kuvvet değeri sonucu

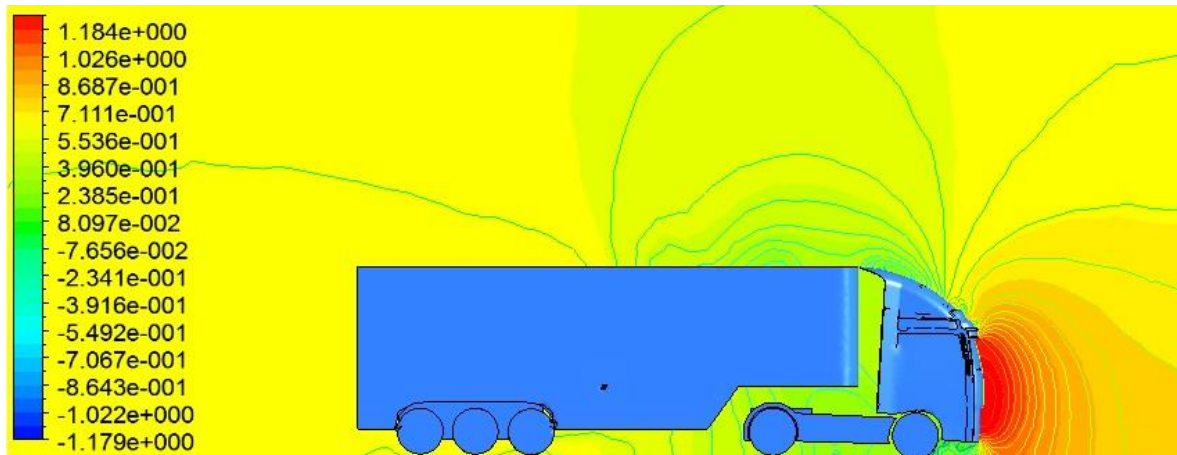


Şekil 6.19. 20 m/s ($Re=625\,000$) hızdaki model 1 aracına etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi

Rüzgâr hızının vektörel olarak görüntülenmesinde geliştirilen spoiler ile römorkun çekiciden yüksek olan bölümünde basınca bağlı aerodinamik kuvvet oluşturan bölgedeki akış römorkun üzerine taşınmıştır. Römorkun üzerindeki akışın hızlı olduğu Şekil 6.19’ da görülmektedir. Bu sayede bu çekici römork modelinin 0,637 olan C_D katsayısı 0,608 tespit edilmiştir. Elde edilen aerodinamik iyileşme bu bölgede (17 ve 18 no’lu basınç prizinin bulunduğu römorkun çekiciden yüksek olduğu ön-üst alan) basınca bağlı oluşan aerodinamik direnç kuvvetinin azaltılması ile sağlanmıştır.



Şekil 6.20. 20 m/s ($Re=625\ 000$) hızdaki model 1 aracına etki eden rüzgar hızının streamline olarak gösterilişi

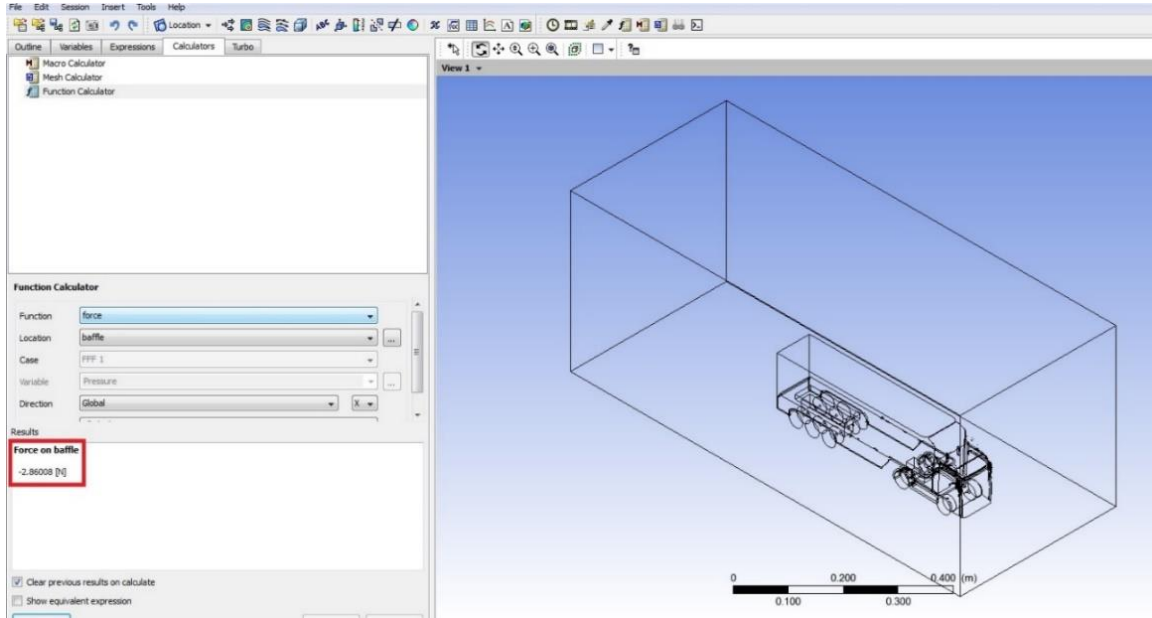


Şekil 6.21. 20 m/s ($Re=625\ 000$) hızda model 1 aracı üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı

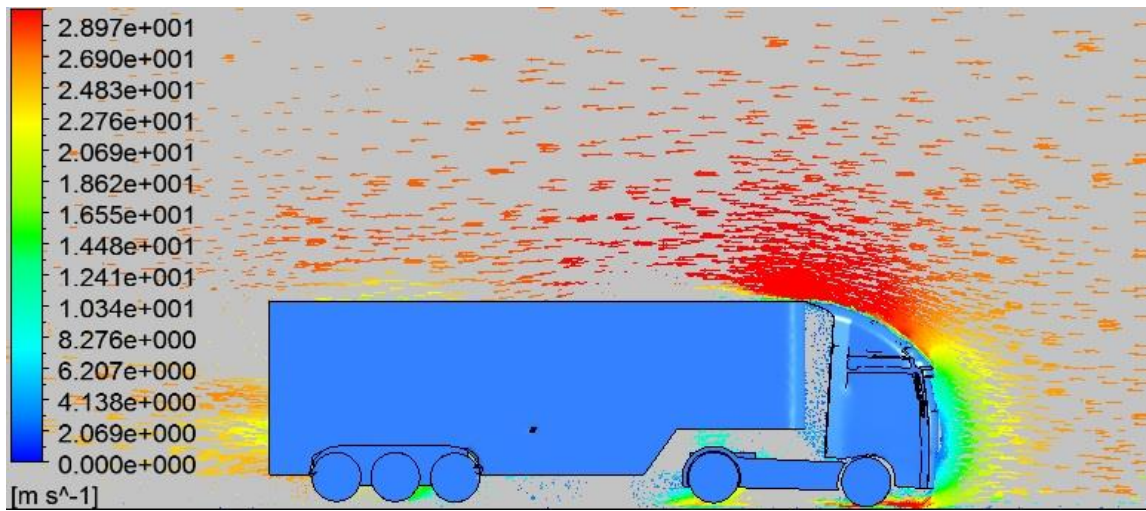
6.2.4. 27 m/s serbest akış hızındaki çözümleme sonuçları

Şekil 6.22’de model 1 aracı için 27 m/s hızla yapılan deney sonuçlarında araca etki eden kuvvet 2,860 N olarak C_D katsayısı ise 0,593 olarak hesaplanmıştır. Aynı şartlarda yapılan deneysel çalışmalarda kuvvet 3,075 N C_D katsayısı ise 0,638 olarak hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlara göre fark % 6,98 olarak elde edilmiştir.

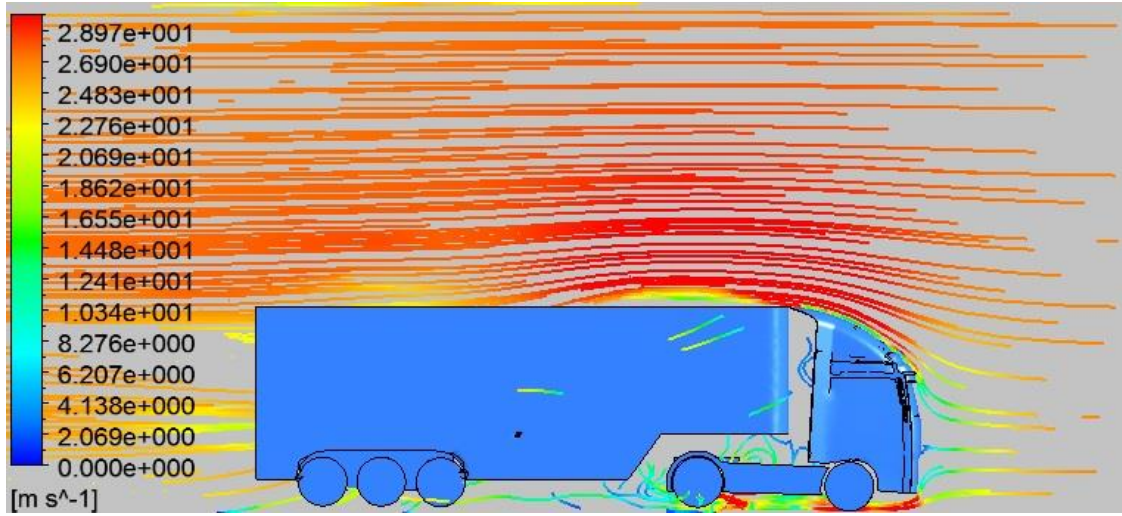
27 m/s hızdaki akışın vektörel ve streamline yapısına ait görseller Şekil 6.23 ve 6.24’ de verilmiştir. Çekici römork kombinasyonu üzerindeki statik basınç dağılımları ise Şekil 6.25’ de verilmiştir. Şekil 6.4’de geliştirilen yeni spoiler ile römorkun çekiciden yüksek olan üst kısmında yüksek olan basınç katsayısı azaltılmıştır. Bu bölgede basınca bağlı oluşan bu aerodinamik direnç kuvvetinin azaltılması C_D katsayısının daha düşük olmasını sağlamıştır.



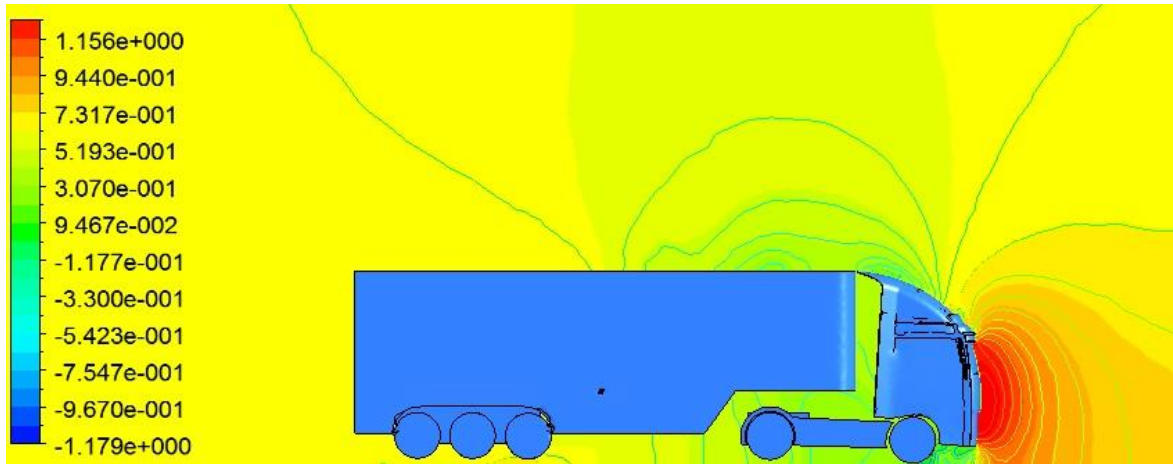
Şekil 6.22. 27 m/s ($Re=844\ 000$) hızda model 1 aracına etki eden kuvvet değeri sonucu



Şekil 6.23. 27 m/s ($Re=844\ 000$) hızdaki model 1 aracına etki eden rüzgâr hızının vektörel olarak gösterilişi

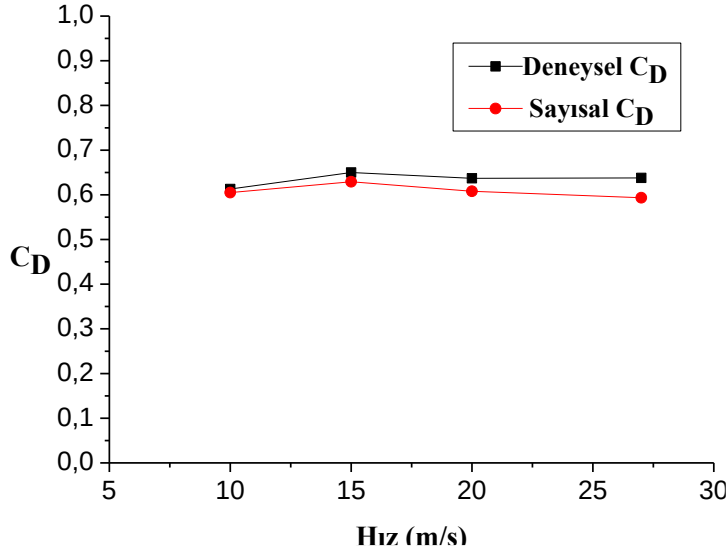


Şekil 6.24. 27 m/s ($Re=844\ 000$) hızdaki model 1 aracına etki eden rüzgar hızının streamline olarak gösterilişi

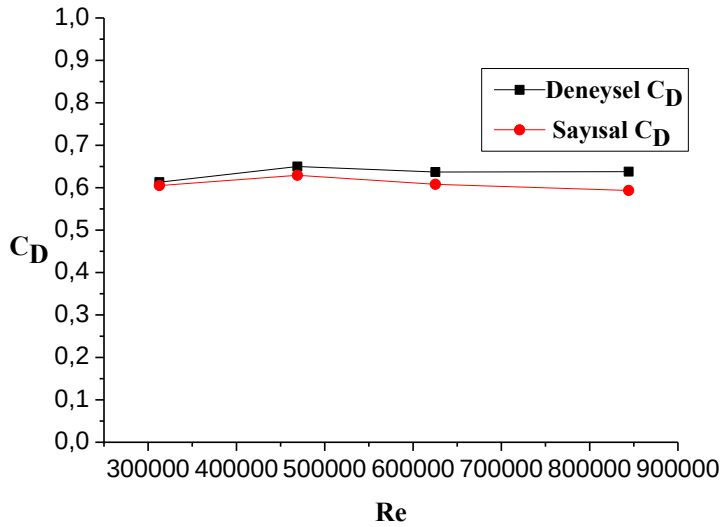


Şekil 6.25. 27 m/s ($Re=844\ 000$) hızda model 1 aracı üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı

Bu çalışmada aerodinamik iyileşme elde etmek üzere geliştirilen spoilerin hücum açısı 30° dir. Hücum açısı geniş yapılarak spoilerin üzerinde oluşacak aerodinamik direnç etkisinin azaltılması hedeflenmiştir. Karayollarında benzer uygulamalar olduğu gibi uygun yükseklikte olup dar açılarda konumlandırılmış spoiler yapıları oldukça fazla sayıdadır. Bu şekilde olan çekici römork kombinasyonlarında akış yapısı römork üzerine taşınabilir ancak spoilerin üzerinde basınca bağlı direncin oluşacağı düşünülmektedir. Bu yüzden spoiler hücum açılarının daha dar açılarda olması spoilerin üzerinde basınca bağlı oluşan aerodinamik direnç kuvvetini azaltacağı öngörülmektedir.



Şekil 6.26. Hıza göre model 1 aracının sayısal-deneyisel C_D katsayısı grafiği



Şekil 6.27. Reynolds sayısına göre model 1 aracının sayısal-deneyisel C_D katsayısı grafiği

Model 1 aracının 10 m/s, 15 m/s, 20 m/s ve 27 m/s hızlarında sayısal analizi yapılmış ve çözümleme sunucunda araca etki eden direnç kuvveti tespit edilmiştir. Yapılan sayısal analizler sonucunda model 1 aracının C_D katsayısı ortalama 0,609 olarak elde edilmiştir. Deneyisel deney çalışmaları sonucunda model 1 aracının C_D katsayısı ortalama 0,625 olarak hesaplanmıştır. Sayısal analiz sonuçları deney sonuçlarına göre % 4 daha düşük çıkmıştır. Bu fark çizim datasında yapılan basitleştirmelerden ya da deney düzeneğinin belirsizliğinden kaynaklanabilmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada karayolu yük taşımacılığında kullanılan çekici römork modeli üzerindeki akış yapıları, araç üzerine etki eden kuvvet değerleri sayısal ve deneysel olarak tespit edilerek araç etrafındaki akış yapısı 59 000 - 844 000 Reynolds sayısı aralığında incelenmiştir. Çekiciye römork ilavesinin aerodinamik direnç katsayısına etkisi ortaya konulmuştur. Çekici ve römork üzerinde aerodinamik direnç oluşturan bölgeler tespit edilmiş ve pasif akış kontrol yöntemleri ile aerodinamik dirençte iyileşme sağlanmıştır. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçların özetleri aşağıda sunulmuştur.

Rüzgâr tüneline Reynolds bağımsızlığı sağlanarak yapılan deneysel çalışma sonuçları aşağıda özetlenmiştir;

- ✓ Rüzgâr tüneline basınç ölçüm deneyleri sonucunda çekici üzerindeki basınç katsayısı dağılımı elde edilmiştir. Basınç katsayısı dağılımı incelendiğinde ön tampon üzerinde C_p katsayısı 1 olarak ölçülmüş ve durma basıncının burada oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca ön camın hücum açısının büyüklüğü nedeniyle ön cam üzerinde basınç katsayısının yüksek olduğu görülmüş, bu araçlarda ön cam hücum açısının daha dar olmasının gerektiği önerilmiştir.
- ✓ Rüzgâr tüneline basınç ölçüm deneyleri sonucunda çekici römork kombinasyonu üzerindeki basınç katsayısı dağılımları tespit edilmiştir. Özellikle römorkun çekiciden yüksek olduğu 17,18 ve 19 no'lu basınç prizlerinde basınç katsayısının yüksek olduğu görülmüştür. 18 no'lu basınç prizindeki C_p katsayısının 0,966 olduğu görülmüş ve bu değer ön tampon üzerinde bulunan 2 no'lu basınç prizindeki durma basıncına yakın olduğu görülmüştür. Bu durumun özellikle spoiler tasarımının önemini ortaya koymuş uygun spoiler tasarımı ile elde edilebilecek iyileşme potansiyelini göstermiştir.
- ✓ Çekicinin kuvvet ölçüm deneylerinde çekicinin C_D katsayısı ortalama 0,610 olarak tespit edilmiştir. Basınç katsayısı dağılımları incelendiğinde özellikle ön tampon bölgesi, ön cam hücum açısı ve spoiler tasarımlarında yapılabilecek iyileştirmeler ile bu katsayının düşürülebileceği öngörülmüştür.

- ✓ Çekici ve römork kombinasyonun kuvvet ölçüm deneylerinde toplam aerodinamik direnç katsayısı ortalama 0,706 olarak ölçülmüştür. Çekiciye eklenen römorkun CD katsayısını ortalama % 15,75 arttırdığı görülmüştür.

Fluent® programında gerçekleştirilen sayısal akış analizi ve çözümleme sonuçları aşağıda özetlenmiştir;

- ✓ 10 m/s, 15m/s, 20m/s ve 27 m/s hızlarda yapılan sayısal çözümleme ve akış analizi sonuçlarına göre çekicinin CD katsayısı ortalama 0,649 olarak tespit edilmiştir. Toplam aerodinamik direnç katsayısının ortalama % 98,4'ü basınç kaynaklı, % 1,6'sı sürtünme kaynaklı olduğu belirlenmiştir. Akış yapısı görüntülemelerinde aracın ön formunun şekli toplam aerodinamik kuvvetin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırıldığında sayısal olarak tespit edilen CD katsayısı deneysel çalışma sonuçlarından ortalama % 6,31 daha yüksek çıkmıştır.
- ✓ Sonuçların sayısal olarak farklı çıkmasının nedeni deney düzeneğinin belirsizliğinden kaynaklanabileceği gibi çizim datasının ayrıntısından, denklemlerin ayrıklaştırma özelliklerinden, ve hareket denklemlerinin yaklaşık çözümünden, ağ kalitesinden vb. kaynaklanabilmektedir. Deney düzeneğinde CD katsayısının tespitinde toplam belirsizlik oranı % 4,7' dir. Bu durum göz önüne alındığında yapılan sayısal çözümleme sonuçları deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır.
- ✓ Çekici römork kombinasyonunun sayısal çözümlemesinde CD katsayısı ortalama 0,776 olarak hesaplanmıştır. Toplam aerodinamik direnç katsayısının ortalama % 94,2'si basınç kaynaklı % 5,8'i sürtünme kaynaklı olarak tespit edilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırıldığında sayısal olarak tespit edilen CD katsayısı deneysel çalışma sonuçlarından ortalama % 10,38 daha yüksek tespit edilmiştir.
- ✓ Sayısal analiz sonuçlarına göre çekiciye eklenen römork CD katsayısını % 19,59 arttırmıştır. Bu artışın önemli bir kısmı römorkun uzunluğu ve yüzey pürüzlülüğü nedeniyle sürtünmeye bağlı oluşan direnç kuvvetinin artmasından kaynaklanmaktadır.

- ✓ Çekici römorklarda standart römork yerine çekicinin geometrik şekline ve ölçülerine göre römork seçilmelidir. Çekici römorkların bir arada ya da işbirliği içerisinde üretilmesi önerilmektedir.
- ✓ Sayısal analizde akış görüntülemelerinde römorkun tekerleklerinde oluşan sürüklenme kuvvetini azaltmak için iyileşme yapılabileceği görülmüştür. Bunun için ön tampon şekillerini iyileştirilip akışın tekerlerin kenarından geçişini sağlayacak kaporta eki uygulamaları önerilmektedir.

Pasif akış kontrolü yöntemleri ile aerodinamik iyileştirme çalışmaları aşağıda özetlenmiştir.

- ✓ Yapılan deneysel ve sayısal analiz sonuçlarında römorkun çekiciden yüksek ön yüzeyinde aerodinamik iyileşme sağlamak üzere hücum açısı 30° olan bir spoiler üretilmiştir. Bu pasif akış kontrol yöntemi ile model 1 aracının CD katsayısı ortalama 0,625 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen aerodinamik iyileşme oranı % 11,372 olmuştur. Bu orandaki aerodinamik iyileşme yüksek hızlarda (96 km/h) yakıt tüketimini yaklaşık % 6 azaltmaktadır.
- ✓ Spoiler yapılarının çekici üzerindeki akışı römork üzerine taşıyacak yükseklikte ve yatay eksene göre dar açılarda yapılması önerilmektedir. Böylece basınca bağlı oluşan aerodinamik direnç kuvvetinin azaldığı tespit edilmiştir.
- ✓ Model 1 aracının çizim datası oluşturulmuş ve sayısal analizi yapılmıştır. Yapılan sayısal analizler sonucunda model 1 aracının CD katsayısı ortalama 0,609 olarak elde edilmiştir. Sayısal analiz sonuçları deneysel sonuçlara göre % 4 farkla elde edilmiştir. Bu fark çizim datasının basitleştirilmesinden ya da deney düzeneğinin belirsizliğinden kaynaklanmaktadır. Yapılan bu çalışma ile sayısal analiz sonucunun deneysel verilerle uygun olduğu ortaya konulmuştur.
- ✓ Model 2 aracında römorkun arka kısmında kalan negatif basınç bölgesini azaltacak bir ek yapılarak aerodinamik iyileşme oranı deneysel yöntemlerle tespit edilmiştir. Model 1 aracının römorkuna yuvarlatma açısı 10° olan römork arka uzantısı eklenmiştir. Yapılan deneysel çalışmaları sonucunda rüzgarlık kullanılan model 1 aracına göre aerodinamik iyileşme oranı % 1,51 olarak tespit edilmiştir. Bu yöntemle elde edilecek

aerodinamik iyileşme oranını arttırmak için daha geniş açılarda yuvarlatma yapılması gerektiği öngörülmüştür.

- ✓ Sayısal analiz sonuçlarında elde edilen görsellerde tekerleklerin üzerinde basıncın oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir. Model 3 aracında arka tekerleklerin neden olduğu aerodinamik direnci azaltmak için römorkun arka tekerleklerini kapatan ek kaporta üretilmiştir. Bu kaporta eki ile model 2 aracına göre elde edilen aerodinamik iyileşme oranı % 7,22 olmuştur. Model 3 aracının CD katsayısı ortalama 0,564 olarak hesaplanmıştır. Model 3 aracında, temel araç modeline göre elde edilen aerodinamik iyileşme oranı % 20,11 olarak tespit edilmiştir.
- ✓ Römork tekerleklerinin kapalı olması aerodinamik iyileşme sağladığı gibi aynı zamanda kaza anında küçük taşıtların römorkun altına girmesini engelleyebilecek kaza anında enerjinin bir kısmını sönmöleyecek şekilde yapılması önerilmektedir. Bu sayede bu araçların karıştığı ölümcöl kaza oranlarının düşmesi öngörülmektedir.
- ✓ Sayısal analizde akışın akım çizgisi olarak görüntülenmesinde çekici ve römork arasındaki negatif basınç bölgesine giren hava akışı önemli bir direnç oluşturmaktadır. Deneysel çalışma sonuçlarında da bu bölgede negatif basınç katsayısının yüksek olduğu görölmüşür. Model 2 aracının çekici ve römork arası bir körük ile kapatılarak aerodinamik iyileşme elde edilmiştir. Model 4 aracının CD katsayısı ortalama 0,537 olarak hesaplanmıştır. Üretilen körük ile elde edilen model 2 aracına göre aerodinamik iyileşme oranı % 10,97 olarak hesaplanmıştır. Model 4 aracında, temel deney aracına göre elde edilen toplam aerodinamik iyileşme oranı % 23,85 olarak tespit edilmiştir.
- ✓ Çekici römork aralıklarının olabildiğince az olması ve bu boşluğun körük, kılavuz kanatları vs. ile kapatılması önerilmektedir.
- ✓ Çekici ve römorklar yılda uzun kilometreler yapmakta ve seyirlerini şehirlerarası yollarda yüksek hızlarda gerçekleştirmektedirler. Aerodinamik direnç hızın karesi ile doğru orantılı olarak arttığından bu araçlar güçlerinin büyük bir kısmını aerodinamik direnci yenmek için harcarlar. Bu durum bu araçların yakıt tüketimlerini de arttırmaktadır. Bu çalışmada pasif akış kontrol yöntemleri ile elde edilebilecek aerodinamik iyileşme potansiyeli ortaya konulmuştur. Geliştirilen 4 model de

belirtilen pasif akış kontrol yönteminin aynı araçta uygulanması durumunda toplamda % 23,85'lik bir iyileşme sağlanmıştır.

- ✓ Wood ve Bauer (2003)'e göre 96 km/h hızdaki bir çekici römork kombinasyonunun aerodinamik direnç katsayısında % 2' lik bir iyileşme yakıt tüketimini % 1 azaltmaktadır. Bu çalışmada elde edilen en yüksek iyileşme oranı % 23,85 olup yüksek hızlarda bu orandaki bir aerodinamik iyileşme yakıt tüketimini yaklaşık % 12 azaltabilmektedir.
- ✓ Yük taşımacılığında kullanılan ve aerodinamik olarak tasarlanmamış bir çekici römorkun yılda 50 000 km yol kat edip ortalama 25/100 (Litre/100km) yakıt tüketimine sahip olduğunu düşünürsek (04.02.12.2015 tarihinde 1 LT dizel yakıtı 3,79 TL) bu aracın yıllık yakıt tüketimi 12 500 Litre olmaktadır. Bu çalışmada belirtilen pasif akış kontrol yöntemleri ile elde edilebilecek iyileşme oranı ile yakıt tüketimini % 12 azalttığımızda, yaklaşık yıllık 1 500 litre yakıt tasarrufu sağlanabileceği görülmektedir. Türkiye'de yük taşımacılığında bu durumda çalışan on binlerce araç bulunmaktadır. Ülke ekonomisi ve çevresel faktörler göz önüne alındığında bu araçlarının yarısında bile yapılabilir aerodinamik iyileşmenin son derece önemli boyutlarda olduğu ortaya çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

- Aka, H. (2003). Otomobillerin Aerodinamik Karakteristiğinin Bir Rüzgâr Tünelinde İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 32-45.
- Akansu, Y.E. (2004). Ardışık Olarak Yerleştirilen Farklı Geometrilere Sahip Küt Cisimlerin Aerodinamik Karakteristiklerinin İncelenmesi. *Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 67-85.
- Apisakkul, K.T., and Kittichaikarn, C. (2005). Numerical analysis of flow over car spoiler. Paper presented *The Ninth Annual National Symposium on Computational Science and Engineering Papers ANSCSE-9*, Bangkok, Thailand.
- Bradshaw, P., Cebeci, T., and Whitelaw, J. H. (1981). Engineering calculation methods for turbulent flows. *Academic Press*, London, 180-243.
- Buresti, G., Lungu, G.V., and Lombardi, G. (2007). Methods for the drag reduction of bluff bodies and their application to heavy road vehicles. *First Interim Report CRF and DIA*, 2-29.
- Cheli, F., Ripamonti, E., Sabbioni, E., and Tomasini, G. (2011). Wind Tunnel Tests on Heavy Road Vehicles: Cross Wind Induced Loads. *Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, 99, 1011-1024.
- Chowdhury, H., Moria, H., Abdulkadir, A., Khan I., Alam, F., and Watkins, S. (2013). A Study on aerodynamic drag of a semi-trailer truck. *Procedia Engineering* Volume 56, 201-205.
- Çakmak, M.A. (2000). Kara taşıtlarının aerodinamik bakımdan incelenmesi. *Mühendis ve Makina*, Cilt 1, Sayı 489, 35-41.
- Çengel, Y.A., and Cimbala, J.M. (2008). Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları (çev. Engin. T, Öz. H.R, Küçük. H, ve Çeşmecı. Ş.) Güven Bilimsel Yayınları, 562-599. Daimler Daimler Class 8 Truck External Aerodynamics (2013). Choice of Numerical Methods” *Daimler Portland PVE Vehicle Analysis*, 1-19.
- Daniel, G.H., Kidambi, S., Ramesh, P., Nichols, D.D., Briley, W.R., and Whitfield, D.L. (2011). Computational Simulation of Model and Full Scale Class 8 Trucks With Drag Reduction Devices, *Computers and Fluids*, 41, 27-40.
- Demircioğlu, T.K. (2007). Bir araç modelinin Aerodinamik Analizi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Simülasyonu. *Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 54-98.
- Desai M., Channiwala S. A., Nagarsheth, H. J. (2008). Experimental and Computational Aerodynamic Investigations of a Car. *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics* Issue 4, Volume 3, 359-366.

- Fares, E. (2006). Unsteady flow simulation of the Ahmed reference body using a lattice Boltzmann approach. *Computers & Fluids*, 35, 8-9.
- Gilhaus, A. (1981). The Influence Of Cab Shape On Air Drag Of Trucks. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 9, 77-87.
- Gutierrez, W.T., Basil, H., Croll, R.H. and Rutledge, W.H. (1996). Aerodynamics overview of the ground transportation systems GTS project for heavy vehicle drag reduction. *SAE Technical Paper*, 960906, 14-28.
- Ha, J., Shigeru, O., and Yasuaki, K. (2009). Drag Characteristics Of A Pickup Truck According to Bed Geometry. Paper presented at *7th IASME/WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics*, Moscow, Russia.
- Hu, Xu-xia., and Wong, E.T.T. (2011). A Numerical Study On Rear-spoiler Of Passenger Vehicle. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 57, 636-641.
- Hucho, W. H. (1987). Aerodynamics of Road Vehicles. *1st Edition, Butterworth – Heinemann*, London, England, 38-238.
- İnce, İ.T. (2010). GTD Model İdari Hizmet Pikap Aracının Aerodinamik Analizi. *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 30-66.
- Karabey, A. (2001). Partiküllerin boyutsal sınıflandırılmasında gaz-katı partikül iki fazlı akışın sayısal incelenmesi. *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 190-207.
- Koçyiğit, N., ve Ünal M.F. (2005). Askı ve ileri uçustaki helikopter gövdesinin aerodinamik katsayılarının Fluent kullanılarak hesaplanması. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, Cilt 2, Sayı 1, 57-64.
- Krajnovic, S., and Davidson, L. (2005). Influence of floor motions in wind tunnels on the aerodynamics of road vehicles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93, 677-696.
- Launder, B.E., and Spalding, D.B. (1974). The Numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods Applied Mechanics and Engineering*, 3: 269-289.
- Lokhande, B., Sovani, S., and Khalighi, B. (2003). Transient simulation of the flow field around a generic pickup truck. *SAE Technical Paper Series*, 01-1313, 1- 19.
- 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.
- Menter, F.R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598-1605.

- Minoru, S., Katsuji, T., and Tatsuo, M. (2003). Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 91 Issue 1-2, 209-218.
- Miralbes, R. (2012). Analysis of Some Aerodynamic Improvements for Semi-trailer Tankers. Paper presented at *Roceedings of the World Congress on Engineering*, London U.K.
- Modi, V.J., Hill, S.St. and Yokomimizo, T. (1995). Drag reduction of trucks through boundary-layer control. *Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics* 54/55, 583-594.
- Ogburn, M.J., and Ramroth L.A. (2007). A truck efficiency and GHD reduction opportunities in the Canadian Truck Fleet (2004-2007). *Rocky Mountain Instutue Report, Canadian*, Canadian, 1-13.
- Perzon, S., and Davidson, L. (2000). On transient modeling of the flow around vehicles using the Reynolds equation. *International Conference on Applied Computational Fluid Dynamics (ACFD)* Beijing China, 720-727.
- Perzon, S., Janson, J., and Höglin, L. (1999). On comparisons between CFD methods and wind tunnel tests on a bluff bod. *SAE Technical Paper Series*, 01-0805, 1-11.
- Rohatgi, U.S. (2012). Methods of Reducing Vehicle Aerodynamic Drag. Paper presented at *ASME 2012 Heat Transfer Conference Puesto Rico,USA*.
- Sarı, M.F. (2007). Hafif Ticari Taşıtlarda Taşıt Ön Formuna Etkiyen Hava Direncinin Aerodinamik Analizi ve Yakıt Sarfıyatına Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 28-54.
- Saygı. M.I. (2008). Kare Model Etrafındaki Akışın Üfleme ve Emme İle Aktif Kontrolünde Hücüm Açısının Ve Slot Kanal Konumunun Etkisinin Deneysel İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 88-95.
- Schenkel, K.F. (1977). The origins of drag and lift reduetions on automobiles with front and rear spoiler. *SAE Technical Paper Series*, 770389, 1-11.
- Solmaz, H. (2010). Değişik Araç Modellerinin Rüzgâr Direnç Katsayılarının Bir Rüzgar Tünelinde Belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 43-47.
- Şahin, C. (2008). Ağır Yük Taşıtlarının Aerodinamik Şekil Direnç Katsayılarının Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği Yöntemi ile Analizi. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 12-13.

- Vaghela, K. (2013). Optimization of Roof Fairing Angle to Reduce the Aerodynamic Drag of Heavy Duty Truck. *International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences IJETCAS*, 13-322, 113-117.
- Versteeg, H. K., and Malalasekera, W. (1995). An introduction to computational fluid dynamics-The finite volume method. *Longman Scientific & Technical*, London, 42-82.
- Wahba, C. E.M., Al-Marzooqi, H., Shaath, M., Shahin, M., and El-Dhmashawy. T. (2012). Aerodynamic Drag Reduction for Ground Vehicles using Lateral Guide Vanes. *CFD Letters Vol. 4*(2), 68-78.
- Wood, R.M. and Bauer, S.X.S. (2003). Simple and low cost aerodynamic drag reduction devices for tractor-trailer Trucks. *SAE Technical Paper*, 01-3377, 1-18.
- Xiao, QI., and Yong-qi, Liu. (2011). Experimental an Numerical Studies of Aerodynamic Performance of Trucks, *Journal of Hydrodynamics*, 23,6, 752-758.
- Yeşildağ, C. (2013). DBD Plazma Aktüator ile Kare Kesitli Küt Cisim Etrafındaki Akış Kontrolünün İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 74-89.

EKLER

Ek-1 Belirsizlik Analizi

Bu çalışmada ölçülen ve hesaplanan parametrelerin belirsizlik değerleri Yeşildağ (2013) tarafından kullanılan yöntemler ile belirlenmiştir. Deney parametreleri Eşitlik 1.1 formunda fonksiyonlardır.

$$r = kX_1^a X_2^b X_3^c \dots \quad (1.1)$$

Bu formdaki fonksiyonun belirsizlik ifadesi Eş.1-2'de ifade edilmiştir.

$$u_r = \frac{w_r}{r} = \left[a^2(u_{x_1})^2 + b^2(u_{x_2})^2 + c^2(u_{x_3})^2 + \dots \right]^{1/2} \quad (1.2)$$

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

Kullanılan parametrelerin belirsizliğinin tespiti

Burada kullanmakta olduğumuz diğer bağımlı ve bağımsız değişkenler, Atmosfer basıncı (P_{atm}), sıcaklık (T), karakteristik uzunluk (H), model karakteristik uzunluğu (L), sürüklenme katsayısı (C_D), basınç katsayısı (C_P), dinamik viskozite (μ), pitot tüpü ile ölçülen hız (U_{Pitot}), dinamik basınç ($P_{dinamik}$), belirsizlik değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Burada bağımsız değişkenlere ait belirsizliklerin tespitinde kullanılan ölçüm cihazlarının kullanım kılavuzları ve benzer belirsizlik analizlerini çalışmalarında kullanan Yeşildağ (2013)'ın çalışmalarından faydalanılmıştır.

- 85 kPa atmosfer basıncının ölçümünde 1 kPa hata oluşabilmektedir. Bu durumda atmosfer basıncının belirsizliği %1,1 olarak elde edilir.

$$\left(u_{P_{atm}} = \frac{w_{P_{atm}}}{P_{atm}} \cong \frac{1000}{85000} = 0,011 = \%1,1 \right)$$

Ek-1 (Devam) Belirsizlik Analizi

- Sıcaklık ölçümünde ölçüm sisteminden kaynaklanan veya deney süresince sıcaklık değişimine bağlı olarak 2°C hata oluşabilmektedir. Bu durumda 25°C'deki sıcaklığın ölçümünde, sıcaklığa ait belirsizlik % 0,671 olarak elde edilir.

$$\left(u_T = \frac{w_T}{T} \cong \frac{2}{298} = 0.00671 = \%0,671\right)$$

- 488,7 mm karakteristik uzunluğun ölçümünde oluşan 2 mm'lik hata nedeni ile oluşan belirsizlik %0.49'dir. $\left(u_H = \frac{w_H}{H} \cong 0,0049 = \% 0,49\right)$
- 25°C sıcaklığındaki havanın 2°C değişimi ile dinamik viskozitesindeki oluşan belirsizlik, % 3' dür. $\left(u_\mu = \frac{w_\mu}{\mu} \cong 0,03 = \% 3\right)$

Yoğunluğun belirsizliğinin hesaplanması

$\rho = \frac{P_{atm}}{RT}$ olarak tanımlanan yoğunluk için belirsizlik değeri, atmosfer basıncı ve sıcaklık değerine bağlı olarak değişmektedir. Yoğunluk için belirsizlik denklemi,

$$u_\rho = \frac{w_\rho}{\rho} = \left[(1)^2 \left(\frac{w_{P_{atm}}}{P_{atm}} \right)^2 + (-1)^2 \left(\frac{w_T}{T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1.3)$$

olarak bulunur ve yoğunluğun belirsizliği Eş. 1.3 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

Eş. 1.3'de atmosfer basıncının ve sıcaklığın belirsizliğinin değerlerinin yazılması ile yoğunluğun belirsizliği $u_\rho \cong 0,012$ veya % 1,2 olarak elde edilir.

Ön bakış alanının belirsizliğinin hesaplanması

$A_{\text{ön}} = H \times L$ olarak tanımlanan ön bakış alanın değeri model aracın genişliği ve

Ek-1 (Devam) Belirsizlik Analizi

yüksekliğine bağlı olarak değişmektedir. Ön bakış alanının belirsizliği Eş. 1.4' de verilmiştir.

$$u_{A_{\text{ön}}} = \frac{w_{A_{\text{ön}}}}{A_{\text{ön}}} = \left[\left(\frac{w_H}{H} \right)^2 + \left(\frac{w_L}{L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1.4)$$

Eş. 1.4'de ön yüzey alanının belirsizliğinin yerine koyulmasında genişlik ve yükseklik ölçümü 2 mm hata ile ölçüldüğü kabul edilirse ile ön bakış alanının belirsizliği $u_{A_{\text{ön}}} \cong 0,02$ veya % 2 olarak elde edilir.

Sürüklenme kuvvetinin ölçümünde oluşan belirsizlikler

Sürüklenme kuvvet katsayısına etki eden belirsizlik değerleri $U_0=10$ m/s ($Re= 312692$) değeri için elde edilmiştir.

X₁-) Kuvvet ölçümünde yük hücresinin belirsizlik değeri y-yönünde % 2'dir. $\left(u_{X_1} = \frac{w_{X_1}}{X_1} \cong 0,02 = \% 2 \right)$

X₂-) Yük hücresini eksenin ayarlanmasında 1°'lik hata nedeni ile kuvvet ölçümünde oluşan belirsizlik % 0,6'dir. $\left(u_{X_2} = \frac{w_{X_2}}{X_2} \cong 0,006 = \% 0,6 \right)$

X₃-) Veri toplama kartı çözünürlüğü nedeni ile oluşan belirsizlik % 0,34'dür. $\left(u_{X_3} = \frac{w_{X_3}}{X_3} \cong 0,0034 = \% 0,34 \right)$

X₄-) Yük hücresinin kalibrasyon sonuçlarına göre hata payı $\pm 0,01$ N'dur. Kalibrasyon işleminde 0,632 N'luk kuvvet için oluşan belirsizlik % 0,15'dir. $\left(u_{X_4} = \frac{w_{X_4}}{X_4} \cong 0,15 = \% 1,5 \right)$

Bu belirsizlikler dikkate alınarak sürüklenme kuvveti ölçümünde oluşan toplam belirsizlik;

Ek-1 (Devam) Belirsizlik Analizi

X₅-) Serbest akış hızı ölçümünde kullanılan pitot tüpün belirsizliği mikromanometre belirsizliğine ve pitot açısına ve basınç hortumlarının durumuna bağlıdır. Mikromanometrenin hata oranı ± 0.5 Pa olup ölçülen basınç değerlerine belirsizlik $\frac{w_{X_5}}{X_5} \cong \frac{0.5}{282} = 0,001 = \% 0,1$

Pitot açısına bağlı ve basınç hortumlarının durumuna bağlı belirsizlik $\% 2$ kabul edilmiştir. Buna bağlı olarak serbest akış hızının ölçümündeki toplam belirsizlik;

$$u_{X_5} = \left[\left(\frac{w_{Mm}}{Mm} \right)^2 + (w_{Pa+Bh})^2 \right]^{1/2} \quad (1.5)$$

Eş. 1-5’de ön mikromanometre belirsizliği, pitot açısı ve basınç hortumlarının belirsizliği yerine konulduğunda serbest akış hızının ölçümündeki belirsizlik $u_{X_5} \cong 0,021$ veya $\% 2,1$ olarak elde edilir.

$$\frac{w_{F_D}}{F_D} = \left[\left(\frac{w_{X_1}}{X_1} \right)^2 + \left(\frac{w_{X_2}}{X_2} \right)^2 + \left(\frac{w_{X_3}}{X_3} \right)^2 + \left(\frac{w_{X_4}}{X_4} \right) \left(\frac{w_{X_4}}{X_4} \right) + \left(\frac{w_{X_5}}{X_5} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$u_{F_D} = \frac{w_{F_D}}{F_D} = [(0,02)^2 + (0,006)^2 + (0,0034)^2 + (0,15)^2 + (2,1)^2]^{1/2} \cong 0,045$$

$\% 4,5$ olarak elde edilir.

Reynolds sayısının belirsizlik değerinin hesaplanması

$Re = \frac{\rho U_{pitot} H}{\mu}$ Şeklinde tanımlanan Re sayısı için belirsizlik değeri, ρ , U_{Pitot} , H ve μ değerine bağlı olarak değişmektedir. Eş. 1.2 kullanılarak Re sayısının belirsizlik değeri hesaplanabilmektedir (Eş 1.6).

$$u_{Re} = \frac{w_{Re}}{Re} = \left[(u_{\rho})^2 + (u_{Pitot})^2 + (u_H)^2 + (u_{\mu})^2 \right]^{1/2} \quad (1.6)$$

Ek-1 (Devam) Belirsizlik Analizi

Reynolds sayısının belirsizlik değeri, daha önce yukarıda tespit edilen; yoğunluk, hız, karakteristik uzunluğun ve dinamik viskozitenin belirsizliğinin denklem 1.6'de yerine yazılması ile hesaplanmaktadır.

$$u_{Re} = \frac{w_{Re}}{Re} = [(0,012)^2 + (0,021)^2 + (0,0049)^2 + (0,03)^2]^{1/2} = 0,013$$

$$= \%1,3$$

Aerodinamik direnç katsayısının (C_D) belirsizlik değerinin hesaplanması

$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}(\rho) \cdot (U_{pitot})^2 \cdot (A_{\text{ön}})}$ denklemi ile hesaplanan sürüklenme kuvveti katsayısının belirsizliğini belirlemek için benzer şekilde Eş. 1.2 kullanılmaktadır. Eş. 1.2 kullanılarak Sürüklenme kuvveti katsayısının belirsizlik değeri hesaplanabilmektedir (Eş. 1.7).

$$u_{C_D} = \frac{w_{C_D}}{C_D} = \left[(u_{F_D})^2 + (u_{\rho})^2 + 4(u_{pitot})^2 + (u_{A_{\text{ön}}})^2 \right]^{1/2} \quad (1.7)$$

Sürüklenme kuvveti katsayısının belirsizliğinin değeri, daha önce yukarıda tespit edilen; sürüklenme kuvveti, yoğunluk, hız, ön bakış alanının belirsizliğinin denklem 1.7'de yerine yazılması ile sürüklenme kuvveti katsayısının belirsizliği hesaplanmaktadır.

$$u_{C_D} = \frac{w_{C_D}}{C_D} = [(0,045)^2 + (0,012)^2 + 4(0,021)^2 + (0,02)^2]^{1/2} = 0,047 = \% 4,7$$

Basınç katsayısının (C_p) belirsizlik değerinin hesaplanması

$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho U^2} \text{ şeklinde tanımlanan basınç katsayısına ait belirsizlik, } \Delta P, \rho \text{ ve } U \text{ bağımsız}$$

değişkenlerine bağlıdır ve basınç katsayısının bu değişkenlere göre türevleri,

Ek-1 (Devam) Belirsizlik Analizi

$$u_{C_P} = \frac{w_{C_P}}{C_P} = \left[(u_{\Delta P})^2 + (u_\rho)^2 + 4(u_{\text{pitot}})^2 \right]^{1/2} \quad (1.8)$$

Basınç farkının belirsizliğini basınç ölçümlerinde tespitinde kullanılan cihazların toplam belirsizlikleri belirler.

Mikro manometrenin belirsizlik değeri ± 600 Pa için % 1 olup MA500 model mikro manometre cihazın kullanım kılavuzunda belirtilmiştir. $\frac{w_{X_1}}{X_1} \cong \frac{6}{282} = 0,021 = \% 2,1$

Tarayıcı vana ve hortumların bağlantısından kaynaklanabilecek belirsizlik oranı % 2 kabul edilmiştir.

Basınç dönüştürücünün kalibrasyonundan kaynaklanabilecek göre hata payı cihazın kullanım kılavuzunda belirtildiği üzere % 1 dir. ($u_{X_2} = 0,1 = \% 1$)

$$u_{\Delta P} = \frac{w_{\Delta P}}{\Delta P} = [(0,021)^2 + (0,02)^2 + (0,01)^2]^{1/2} \cong 0,0215 = \% 2,15 \text{ dir}$$

Basınç farkı, yoğunluk ve pitot tüpü ile hız ölçümünden kaynaklanabilecek hata payları denklem 1.8’de yerine koyulursa; Basınç katsayısının tespitinde toplam belirsizlik;

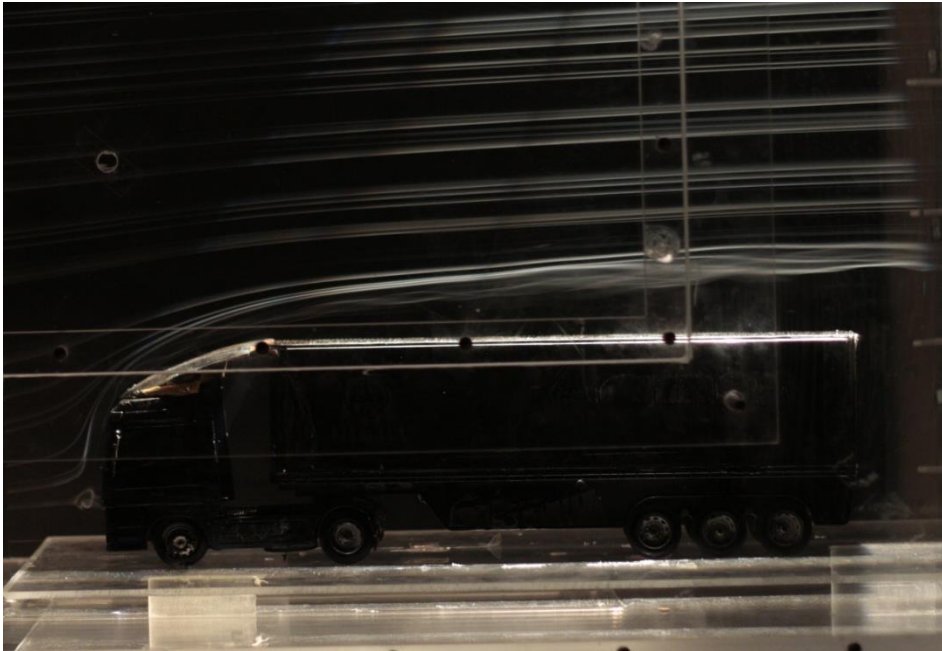
$$u_{C_P} = \frac{w_{C_P}}{C_{DP}} = [(0,021)^2 + (0,012)^2 + 4(0,021)^2]^{1/2} = 0,211 = \% 2,11 \text{ olmaktadır.}$$

Ek-2 Aerodinamik bakımdan iyileştirilmiş modellerin akış görüntüleri

Pasif akış kontrol yöntemleri ile aerodinamik bakımdan iyileştirilen modellere ait akış görüntüleri $Re= 49\ 600$ sayısında elde edilmiş olup Şekil 2.1-2.4'te verilmiştir.

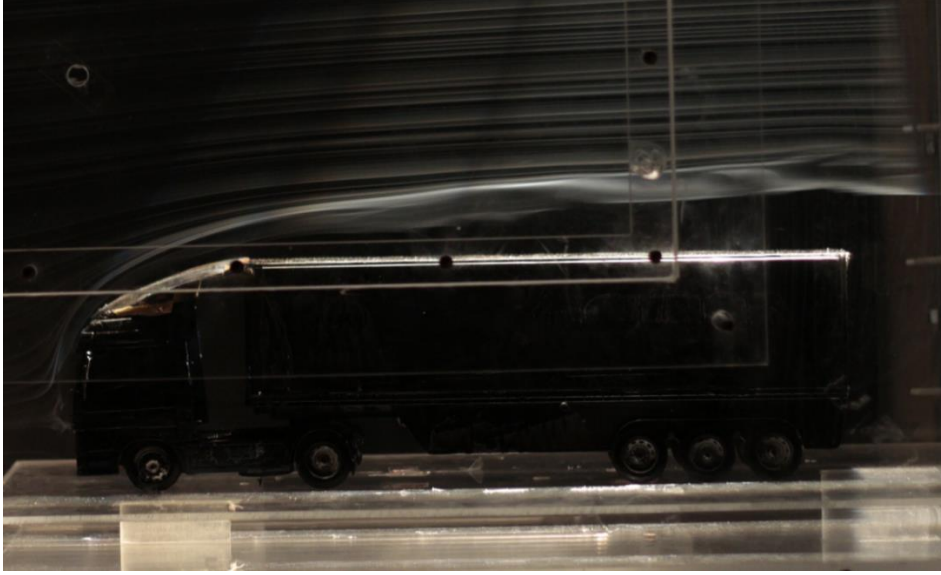


Şekil 2.1. Model 1 aracının akış görüntülemesi



Şekil 2.2. Model 2 aracının akış görüntülemesi

Ek-2 Aerodinamik bakımdan iyileştirilmiş modellerin akış görüntüleri (Devam)



Şekil 2.3. Model 3 aracının akış görüntülemesi



Şekil 2.4. Model 4 aracının akış görüntülemesi

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : BAYINDIRLI, CİHAN

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 05.05.1985 Nizip /Gaziantep

Medeni hali : Evli

Telefon : 0530 467 2669

E-posta : cbayindirli@nigde.edu.tr



Eğitim Derecesi	Okul/Program	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Selçuk Üni., FBE, Makine Eğt. ABD.	2008
Lisans	Selçuk Üni., TEF, Otomotiv Eğt. ABD.	2005
Lise	Adana Motor Anadolu Teknik Lisesi	2001

İş Deneyimi, Yıl	Çalıştığı Yer	Görev
2009-Halen	Niğde Üniversitesi, Niğde	Öğr. Gör.
2006-2008	Meydan Group Otomotiv LTD.ŞTİ	Ar-Ge Elemanı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Bayındırlı, C., Acaroğlu, M.(2012). The effects of the use of different catalyst in the cotton seed methyl esters production on the engine emissions performance. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research Volume (issues) 28(2)*, 1167-1174.
2. Çelik, M., Bayındırlı, C., Demiarlp, M.(2012). The investigation of the effects of washing process on biodiesel production to fuel properties and engine performance. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research Volume (issues) Special Issue*: 249-254.

3. Bayındırlı, C., Acaroğlu, M. (2010).The Determination Of The Effect Of Cotton Seed Methyl Esters-Diesel Mixtures On The Engine Emissions Performance, *5th International Ege Energy Symposium and Exhibition (IEESE-270)*, Denizli, Turkey.
4. Çelik, M., Bayındırlı, C., Demiralp, M., Kılıç, Ç. (2013). İnsan Kaynaklarının Mesleki Eğitim Yoluyla Geliştirilmesi Projesi' nin (İKMEP) Niğde Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Uygulaması: Otomotiv Teknolojisi Programı Örneği, *5. Uluslararası Eğitim Araştırmaları Kongresi*, Çanakkale.
5. Çelik, M., Bayındırlı, C., Demiralp, M., Kılıç, Ç. (2013). Meslek Yüksekokulundaki Eğitim Kalitesinin Öğrenciler Tarafından Değerlendirmeleri Üzerine Bir Araştırma: Niğde Üniversitesinde Bir Uygulama, *5. Uluslararası Eğitim Araştırmaları Kongresi*, Çanakkale.
6. Yıldız, O., Bayındırlı, C., Çelik, M., Demiralp, M. (2014). The Feasibility Analysis of Photovoltaic Solar Irrigation Systems For Potatoes Manufacturers in Niğde, *2. International Conference on Environmental Science and Technology ICOEST*, Antalya.
7. Bayındırlı, C., Demiralp, M., Çelik, M. (2012). Farklı Katalizör Kullanılarak Üretilen B5 ve B15 Pamuk Yağı Metil Esteri-Motorin Karışımlarının Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Belirlenmesi, *6. Otomotiv Teknolojileri Kongresi*, Bursa.
8. Çelik, M., Bayındırlı, C., Demiralp, M., Kılıç, Ç. (2012). Meslek Yüksekokulu Öğrencilerinin Mesleki Kariyer Ve Statülerine Bakış Açısının Değerlendirilmesi Üzerine Bir Araştırma, *Ulusal Meslek Yüksekokulu Çalıştayı ve Öğrenci Sempozyumu*, Nevşehir.

Hobiler

Müzik, Spor



GAZİ GELECEKTİR..