T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METROBÜS HATTINDA KULLANILAN BİR OTOBÜSÜN YAKIT TÜKETİMİNİN VE KARBONDİOKSİT EMİSYONUNUN MODELLENMESİ

Abdullah KILIÇASLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Otomotiv Mühendisliği Programı

Danışman
Prof.Dr. Muammer ÖZKAN

Ocak, 2020

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METROBÜS HATTINDA KULLANILAN BİR OTOBÜSÜN YAKIT TÜKETİMİNİN VE KARBONDİOKSİT EMİSYONUNUN MODELLENMESİ

Abdullah KILIÇASLAN tarafından hazırlanan tez çalışması 21.01.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Otomotiv Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

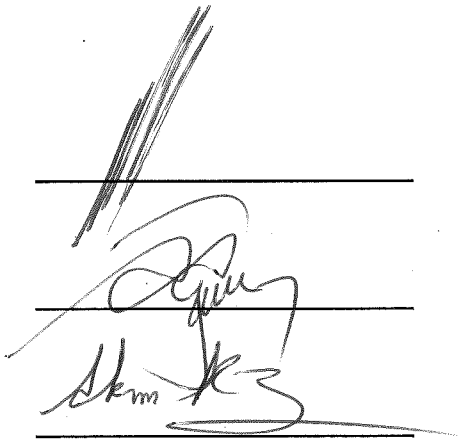
Prof.Dr. Muammer ÖZKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof.Dr. Muammer ÖZKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Orkun ÖZENER, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Osman Akın KUTLAR, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi



Danışmanım Prof.Dr. Muammer ÖZKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan METROBÜS HATTINDA KULLANILAN BİR OTOBÜSÜN YAKIT TÜKETİMİNİN VE KARBONDİOKSİT EMİSYONUNUN MODELLENMESİ başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Abdullah KILIÇASLAN

İmza



Bu çalışmanın deneysel kısmı, İSTKA ve İETT ortaklığında gerçekleştirilen BIL-86 projesi kapsamında desteklenmiştir.

Sevgili Aileme
ve Çalışma Arkadaşlarıma

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam kapsamında göstermiş oldukları özveri, yönlendirme ve paylaşımlarından ötürü kıymetli hocalarım Prof. Dr. Muammer ÖZKAN ve Dr. Öğr. Üyesi Orkun ÖZENER' e; bu süreçte göstermiş oldukları anlayıştan ötürü TÜMOSAN Motor ve Traktör A.Ş. firmasına ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Abdullah KILIÇASLAN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ x

ŞEKİL LİSTESİ xi

TABLO LİSTESİ xiii

ÖZET xiv

ABSTRACT xvi

1 Giriş 1
- 1.1 Literatür Özeti . . . 1
- 1.2 Tezin Amacı . . . 2
- 1.3 Hipotez . . . 2

2 Taşıt Hareketi ve Yakıt Tüketimi 3
- 2.1 Hareket Şartı . . . 3
- 2.2 Taşıta Etkiyen Dirençler . . . 3
  - 2.2.1 Yuvarlanma Direnci . . . 3
  - 2.2.2 Hava Direnci (Aerodinamik Direnç) . . . 7
  - 2.2.3 İvme Direnci . . . 10
  - 2.2.4 Yokuş Direnci . . . 13
  - 2.2.5 Çeki Direnci . . . 13
- 2.3 Güç Gereksinimi . . . 14
- 2.4 Yakıt Tüketimi . . . 14

3 Metrobüs Hattı ve Yol Testleri 16
- 3.1 Mercedes-Benz CapaCity Taşıt Bilgileri . . . 17
- 3.2 Taşıt Üstü Yol Testleri . . . 19

4 VECTO Programı 24
- 4.1 Kullanıcı Arayüzü . . . 26

4.2 Modellemede Kullanılan Parametreler 27

5 Metrobüs Hattında Kullanılan Şehir İçi Otobüslerin VECTO ile Modellenmesi 39

5.1 Taşıtın ve Aksın Modellenmesi 39
5.2 Motorun Modellenmesi 40
5.3 Vites Kutusunun Modellenmesi 41
5.4 Yardımcıl Yüklerin Modellenmesi 42
5.5 Sürücü Profilinin Modellenmesi 43
5.6 Seyir Çevriminin Modellenmesi 44

6 Sonuç ve Öneriler 45

Kaynakça 59

Tezden Üretilmiş Yayınlar 61

SİMGE LİSTESİ

A	Taşıt İz Düşüm Alanı $[m^2]$
A/F_{st}	Sitokiyometrik Yakıt Hava Oranı
C_D	Aerodinamik Direnç Katsayısı
C_L	Lift Etki Katsayısı
C_{L_A}	Arka Teker Lift Etki Katsayısı
C_{L_O}	Ön Teker Lift Etki Katsayısı
dV_T	Taşıt Hız Diferansiyeli $[m/s]$
$d\omega$	Açısal Hız Diferansiyeli $[rad/s]$
e	Teker Düşey Ekseni ile Teker Tepkisi Arasındaki Mesafe $[mm]$
f_0	Hareketsiz Durumdaki Yuvarlanma Direnç Katsayısı
f_R	Yuvarlanma Direnç Katsayısı
g	Yerçekimi İvmesi $[m/s^2]$
G	Taşıt Ağırlığı (Toplam Dingil Yükü) $[N]$
G_A	Arka Dingil Yükü $[N]$
G_O	Ön Dingil Yükü $[N]$
I	Eylemsizlik Momenti $[kgm^2]$
L_f	Lift Etki Kuvveti $[N]$
L_{f_A}	Arka Teker Lift Etki Kuvveti $[N]$
L_{f_O}	Ön Teker Lift Etki Kuvveti $[N]$
m	Taşıt Kütlesi $[kg]$
m_e	Eş Değer Kütle Katsayısı
M_{Teker}	Teker Momenti $[Nm]$
N	Tepki Kuvveti $[N]$

N_e	Güç Gereksinimi $[kW]$
t	Zaman $[s]$
V_R	Rüzgar Hızı $[km/h]$
V_T	Taşıt Hızı $[km/h]$
W_B	İvme Direnci $[N]$
W_{B_C}	Çeki Etkisinin Yarattığı İvme Direnci $[N]$
W_{B_i}	Dönel Hareket Kaynaklı Oluşan İvme Direnci $[N]$
W_{B_m}	Doğrusal Hareket Kaynaklı Oluşan İvme Direnci $[N]$
W_C	Çeki Direnci $[N]$
W_L	Hava Direnci (Aerodinamik Direnç) $[N]$
W_{L_C}	Çeki Etkisinin Yarattığı Hava Direnci $[N]$
W_R	Yuvarlanma Direnci $[N]$
W_{R_C}	Çeki Etkisinin Yarattığı Yuvarlanma Direnci $[N]$
W_S	Yokuş Direnci $[N]$
W_{S_C}	Çeki Etkisinin Yarattığı Yokuş Direnci $[N]$
α	Eğim $[°]$
η	Mekanik Verim
λ	Gerçek Yakıt Hava Oranı
μ	Lastikle Yol Arasındaki Sürtünme Katsayısı
ρ_H	Hava Yoğunluğu $[kg/m^3]$
ρ_r	Etkin Teker Yarıçapı $[mm]$
φ	İvme Direnç Katsayısı
ω	Açısal Hız $[rad/s]$
$\dot{m}_{egzoz}$	Egzoz Gaz Debisi $[kg/s]$
$\dot{m}_{yakit}$	Yakıt Tüketim Debisi $[kg/s]$

KISALTMA LİSTESİ

CAN	Controller Area Network
GPS	Global Positioning System
VECTO	Vehicle Energy Consumption Calculation Tool
YDK	Yuvarlanma Direnç Katsayısı
YT	Yakıt Tüketimi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Gerçek Teker Modeli 4
Şekil 2.2 Lastik Sıcaklığının Yuvarlanma Direncine Etkisi 5
Şekil 2.3 Lastik Basıncının Yuvarlanma Direnç Katsayısına Etkisi 5
Şekil 2.4 Taşıt Hızının Lastik Tipine Göre Yuvarlanma Direnç Katsayısına Etkisi 7
Şekil 2.5 Taşıt İz Düşüm Alanı 8
Şekil 2.6 Taşıt Tasarımına Göre Aerodinamik Direnç Katsayısı Değerleri 9
Şekil 2.7 Güç Aktarma Organları ve Ataletleri 10
Şekil 2.8 Yokuş Direnci 13
Şekil 2.9 Motor Haritası 15
Şekil 2.10 Motor Haritası Üzerinde İşaretlenmiş Tüketim Noktaları 15
Şekil 3.1 İstanbul Metrobüs Haritası 16
Şekil 3.2 Mercedes-Benz CapaCity (O 530 GL) 17
Şekil 3.3 Avcılar-Beylikdüzü Test Rotası 19
Şekil 3.4 Avcılar-Beylikdüzü Yol Profili 19
Şekil 3.5 AVL KMA Mobile Yakıt Ölçüm Cihazı 20
Şekil 3.6 AVL Taşınabilir Emisyon Ölçüm Cihazı 21
Şekil 3.7 Test Ekipmanlarının Taşıt İçinde Konumlandırılması 21
Şekil 3.8 Test Ekipmanlarının Şematik Gösterimi 22
Şekil 4.1 VECTO Logosu 24
Şekil 4.2 VECTO Model Şeması 24
Şekil 4.3 Güç Hesaplama Algoritması 25
Şekil 4.4 Kullanıcı Arayüzü 26
Şekil 4.5 Taşıt Modelleme Ekranı 27
Şekil 4.6 F_{C_D} Katsayısının Taşıt Hızına Bağlı Değişimi 29
Şekil 4.7 Rüzgar Hızının Taşıt Üzerindeki Bileşenleri 29
Şekil 4.8 Motor Modelleme Ekranı 31
Şekil 4.9 VECTO Motor Haritası 32
Şekil 4.10 Delaunay Üçgenlenmesi Metoduyla Oluşturulmuş Motor Haritası . . 32
Şekil 4.11 Vites Kutusu Modelleme Ekranı 33
Şekil 4.12 Vites Geçiş Poligonu 34
Şekil 4.13 Tork Konvertör İşleyiş Mimarisi 35

Şekil 4.14 Sürücü Modelleme Ekranı 36
Şekil 4.15 Aşırı Hızlanma Örneği 36
Şekil 4.16 Taşıt Hızına Bağlı Hızlanma ve Yavaşlama İvmeleri 38
Şekil 5.1 Mercedes-Benz CapaCity Motor Haritası 40
Şekil 5.2 3. Vites Değişim Poligonu 41
Şekil 5.3 CapaCity Vites Modelleme Ekranı 42
Şekil 5.4 Sürücü Profili Modelleme Ekranı 43
Şekil 6.1 Yakıt Tüketimlerinin Karşılaştırılması (32t-Model ve Test Sonuçları) 45
Şekil 6.2 Yakıt Tüketimlerinin Karşılaştırılmasına Ait Hata Payları (32t-Model ve Test Sonuçları) 46
Şekil 6.3 CO_2 Emisyonlarının Karşılaştırılması (32t-Model ve Test Sonuçları) 46
Şekil 6.4 CO_2 Emisyonlarının Karşılaştırılmasına Ait Hata Payları (32t-Model ve Test Sonuçları) 47
Şekil 6.5 Taşıta Hareketi Boyunca Etki Eden Dirençlerin ve Kayıpların Enerji Karşılıkları (32t-Model Sonuçları) 47
Şekil 6.6 Hatalı Yakıt Tüketimi Karşılaştırılması (25.5t-Model ve Test Sonuçları) 48
Şekil 6.7 Yakıt Tüketimlerinin Karşılaştırılması (25.5t-Model ve Test Sonuçları) 49
Şekil 6.8 CO_2 Emisyonlarının Karşılaştırılması (25.5t-Model ve Test Sonuçları) 49
Şekil 6.9 Taşıta Hareketi Boyunca Etki Eden Dirençlerin ve Kayıpların Enerji Karşılıkları (25.5t-Model Sonuçları) 50
Şekil 6.10 Yakıt Tüketimlerinin Karşılaştırılması (32t-Model, Test ve Yakıt Kesme Model Sonuçları) 51
Şekil 6.11 CO_2 Emisyonlarının Karşılaştırılması (32t-Model, Test ve Yakıt Kesme Model Sonuçları) 51
Şekil 6.12 Yakıt Tüketimlerinin Karşılaştırılması (32t-Model, Test ve ”Sürücü1” Model Sonuçları) 53
Şekil 6.13 Yakıt Tüketimlerinin Karşılaştırılması (32t-Model, Test ve ”Sürücü2” Model Sonuçları) 54
Şekil 6.14 İvmelenme Değişiminin Yakıt Tüketimine Etkisi 54
Şekil 6.15 Yakıt Tüketimlerinin Karşılaştırılması (32t-Model, Test ve 5kW Ekstra Yük Model Sonuçları) 56
Şekil 6.16 Yakıt Tüketimlerinin Karşılaştırılması (32t-Model, Test ve 7kW Ekstra Yük Model Sonuçları) 56
Şekil 6.17 Yakıt Tüketimlerinin Karşılaştırılması (32t-Model, Test ve 9kW Ekstra Yük Model Sonuçları) 57
Şekil 6.18 Yardımcıl Yüklerin Yakıt Tüketimi Üzerindeki Etkisi 57
Şekil 6.19 Test ve Model Sonuçlarının Motor Haritası Üzerindeki İşletme Noktaları 58

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Yol Malzemesine Göre Yuvarlanma Direnç Katsayısı Değerleri 6
Tablo 2.2 Taşıt Üzerinde Yapılan Değişikliklerin C_D Değerine Etkisi 8
Tablo 3.1 Metrobüs Filosu 17
Tablo 3.2 Mercedes-Benz OM457 Motor Özellikleri 18
Tablo 3.3 ZF Ecomat HP602 Şanzıman Özellikleri 18
Tablo 3.4 CapaCity' e Ait Diğer Teknik Bilgiler 18
Tablo 4.1 $\alpha_{1,2,3}$ Katsayılarının Taşıt Tiplerine Göre Değeri 28
Tablo 4.2 Yuvarlanma Direnç Katsayısı Hesaplama Değişkenleri 30
Tablo 4.3 Zamana Bağlı Test Çevrim Örneği 38
Tablo 5.1 Taşıt Modelleme Girdileri 39
Tablo 5.2 Aks ve Teker Bilgileri 40
Tablo 5.3 Motor Modelleme Girdileri 40
Tablo 6.1 Gerçek Sürücü İvmelenme Karakteristikleri 52
Tablo 6.2 Model Sürücü1 İvmelenme Karakteristikleri 52
Tablo 6.3 Model Sürücü2 İvmelenme Karakteristikleri 53
Tablo 6.4 Tüm Sonuçlar 58

ÖZET

METROBÜS HATTINDA KULLANILAN BİR OTOBÜSÜN YAKIT TÜKETİMİNİN VE KARBONDİOKSİT EMİSYONUNUN MODELLENMESİ

Abdullah KILIÇASLAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof.Dr. Muammer ÖZKAN

İçten yanmalı motorla tahrik edilen taşıtlarda, taşıtın harekete geçirilmesi ve istenilen seyir şartında güç talebinin karşılanması, genellikle fosil yakıtlar ile sağlanmaktadır.

20. yüzyılın sonlarında ortaya çıkan petrol krizi, taşıt üreticilerinin yakıt ekonomisi anlamında teknolojik adımlar atmasını zorunlu hale getirmiştir. Aynı seyir şartını daha düşük tüketim ile sağlamak adına başlayan bu teknolojik rekabet ile beraber taşıtların yakıt tüketim değerlerinin modellenmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Denenecek yeni teknolojik gelişmenin bu modeller üzerinde test edilmesi hem daha ekonomik hem de daha hızlı gelişme kaydetmek adına üreticilere büyük kolaylık sağlamıştır.

Bu çalışmada, İstanbul' un metrobüs hattında aktif olarak kullanılmakta olan Mercedes-Benz CapaCity otobüslerin yakıt tüketim değerlerinin modellenmesi amaçlanmıştır. Bu modelleme işlemi Avrupa Komisyonu tarafından geliştirilen VECTO (Taşıt Enerji Tüketim Hesaplama Aracı) programı ile yapılmıştır. Yapılan modellemenin doğrulanabilmesi için, gerçek seyir şartlarında uygulanmış taşıt üstü testler kullanılmıştır. Yakıt ve emisyon ölçüm cihazıyla donatılmış otobüslerin, metrobüs rotası üzerinde gerçekleştirdiği seyir esnasında taşıta ait yakıt tüketimi ve CO_2 emisyon değerleri toplanmıştır. Ardından bu veriler, kurulan model sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Metrobüs, yakıt tüketim modellemesi, VECTO

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ABSTRACT

MODELLING OF FUEL CONSUMPTION AND CARBON DIOXIDE EMISSIONS ON A BUS USED ON METROBUS LINE

Abdullah KILIÇASLAN

Department of Mechanical Engineering
Master of Science Thesis

Advisor: Prof.Dr. Muammer ÖZKAN

In vehicles driven by an internal combustion engine, the set going of the vehicle and the fulfillment of the power demand under the desired driving conditions are generally provided by fossil fuels.

The oil crisis that emergent in the end of the 20th century made it compulsory for vehicle manufacturers to take technological steps in terms of fuel economy. With this technological competition which aspiring to provide the same driving condition with more lower consumption, the need to model the fuel consumption values of the vehicles has emerged. The testing of the new technological advances to be tested on these models has provided a great convenience to the producers in order to achieve more economic and faster development.

In this study, it is aimed to model fuel consumption values of Mercedes-Benz CapaCity buses which are actively used in Istanbul's metrobus line. This modeling process was made by VECTO (Vehicle Energy Consumption Calculation Tool) developed by the European Commission.In order to validation of the modeling, on-road tests applied under real driving conditions were used. The fuel consumption and CO_2 emission values of the vehicles were collected during the trip of the buses, which were equipped with fuel and emission measurement devices, on the metrobus route. Then these data were compared with the model results.

Keywords: Metrobus, fuel consumption modelling, VECTO

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

1
Giriş

1.1 Literatür Özeti

1997 yılında M. Özkan tarafından yapılan ”İstanbul Trafiğinde Belirlenen Güzergahta Çalıştırılan Belediye Otobüsünün Optimum Yakıt Sarfiyatı Koşullarının Nümerik Yöntemle Etüdü” isimli doktora çalışmasında taşıtın yakıt tüketimine etki edebilecek faktörlerin incelenmesi amacıyla nümerik bir model oluşturulmuştur. Bu model ile durak sayısı, vites seçimi ve sürücü karakteristiklerinin yakıt tüketimi üzerine etkileri araştırılmıştır [1].

2013 yılında G. Fontaras, M. Rexeis, P. Dilara, S. Hausberger ve K. Anagnostopoulos tarafından yapılan çalışmada 12 tonluk bir ağır hizmet taşıtının VECTO yardımıyla modellemesi yapılmıştır. Bu çalışmada alınan gerçek test verileri ile kurulan VECTO modeli arasında ± %4’ lük bir hata payı bulunmuştur [2].

2016 yılında G. Fontaras, T. Grigoratos, D. Savvidis, K. Anagnostopoulos, R. Luz, M. Rexeis ve S. Hausberger tarafından yapılan doğrulama çalışmalarında, model ile gerçek yakıt tüketimi değerleri arasında ± %3’ lük bir hata payı ortaya çıkmıştır. VECTO’ nun soğuk çalışma koşullarını modellemeye dahil etmemesi ve gerçek testler sırasında yaşanabilecek ölçüm belirsizlikleri göz önüne alındığında bu değerlerin sertifikasyon çalışmaları için yeterli olduğu kanısına varılmıştır [3].

O. Özener, M. Özkan, E. Orak ve G. Acarbulut tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada ise metrobüs hattında kullanılmakta olan otobüslerin üç boyutlu yol geometrisiyle yakıt tüketimleri modellenmiştir. Alınan gerçek ölçüm sonuçları ile yapılan modelleme neticesinde alınan sonuçlar arasında yaklaşık ± %1.5’ lik bir hata payı gözlemlenmiştir [4].

1.2 Tezin Amacı

Bu tez kapsamında, İstanbul metrobüs hattında aktif olarak kullanılmakta olan otobüslerden alınan gerçek zamanlı veriler ile kurulan VECTO modelinin doğrulanması amaçlanmıştır. Doğrulama işleminin anlamlı bir hata payı çerçevesinde olması temel hedeftir.

1.3 Hipotez

Şehir içi yolcu taşımacılığında aktif olarak kullanılan bir otobüse ait yakıt tüketim modelinin varlığı, yeni bir ulaşım rotası belirlenmesinde ya da kullanılmakta olan rotada yapılacak bir değişikliğin etkisinin gözlemlenebilmesinde önemli bir yer tutmaktadır. Ayrıca taşıt üzerinde yapılacak bir modifikasyonun, gerçek bir teste ihtiyaç duyulmaksızın, taşıtın yakıt tüketimi üzerine etkisinin nümerik olarak irdelenebilmesi model ile sağlanabilmektedir. Rota ve taşıt haricinde de tüketime etki eden sürücü etmeni ve yardımcıl yüklerin tüketime etkileri de bu yöntemle modellenebilmektedir.

2
Taşıt Hareketi ve Yakıt Tüketimi

2.1 Hareket Şartı

Taşıtın hareket ekseni doğrultusunda, hareket yönüne zıt yönde etki eden kuvvetlerin toplamına hareket dirençleri adı verilir. Taşıtın harekete geçirilmesi için hareket dirençlerinin toplamı kadar bir kuvvetin tahrik tekerlerine iletilmesi gerekir. Tahrik tekerlerinde oluşturulan ve ya tahrik tekerlerine iletilen itme kuvvetinin zemine aktarılabilecek sınır değeri, lastikle yol arasındaki sürtünme katsayısının tahrik tekerlerinin dingil yükü ile çarpımına eşittir. Limit değerin üzerinde oluşturulacak itme kuvveti, taşıtla yol arasında kaymaya yani patinaja neden olacaktır. Toplam direnç kuvvetinin lastikten yola iletilecek kuvvetin sınır değerinden büyük olması durumunda ise hareket etme eğilimindeki taşıt yavaşlayacak, duran taşıt ise hareket etmeye zorlanacaktır [5].

$$\mu.G_{A,O} = \Sigma W \tag{2.1}$$

2.2 Taşıta Etkiyen Dirençler

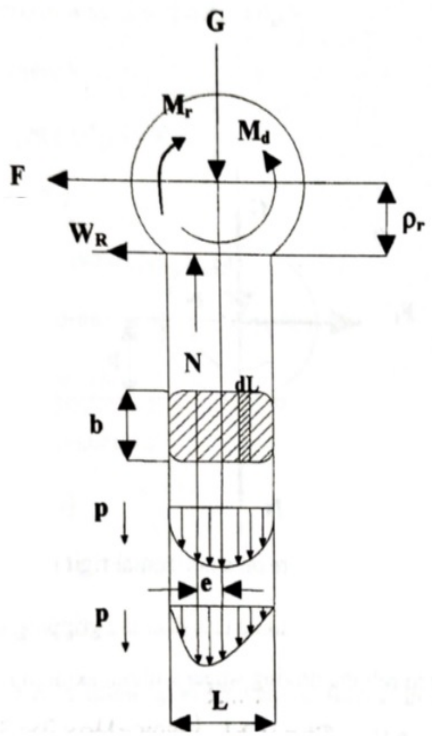
2.2.1 Yuvarlanma Direnci

Hareket halindeki bir taşıtın tüm tekerlerine, hareket yönünün tersi yönünde bir direnç gelmektedir. Literatürde ”yuvarlanma direnci” olarak geçen bu kuvvetin oluşmasında yedi farklı mekanizma irdelenebilir.

1. Lastiğin yola temas eden alanının ezilmesinden kaynaklı oluşan enerji kayıpları
2. Lastiğin yanak kısmında meydana gelen ezilmeden kaynaklı oluşan enerji kayıpları
3. Lastik temas alanının ovalanması
4. Yol yüzeyinde meydana gelen ezilme

5. Tümseklerde meydana gelen enerji kaybı
6. Lastiğin iç ve dış kısmında oluşan hava direnci
7. Enine ve boyuna oluşan lastik kayması [6]

Yolun ve tekerin, kuvvet veya moment etkisi altında şekil değiştirmeyen formda olması yani rijit olması durumunda yolda ve tekerde herhangi bir deformasyon meydana gelmeyecektir. Tekerleğin ve yolun rijit olması durumunda tekerleğe uygulanan moment, rijit teker yarıçapına bağlı olarak bir itme kuvveti oluşturur. Ancak ne teker ne de yol rijit bir yapıda değildir. Bu nedenle, özellikle lastik üzerinde bir deformasyon oluşacak ve bu durumda tepki kuvvetinin uygulama merkezi rijit teker modeline göre "e" kadar yer değiştirecektir. Bu durum, harekete karşı "e.$G_{A,O}$" kadar bir moment oluşumuna neden olacaktır.



Şekil 2.1 Gerçek Teker Modeli

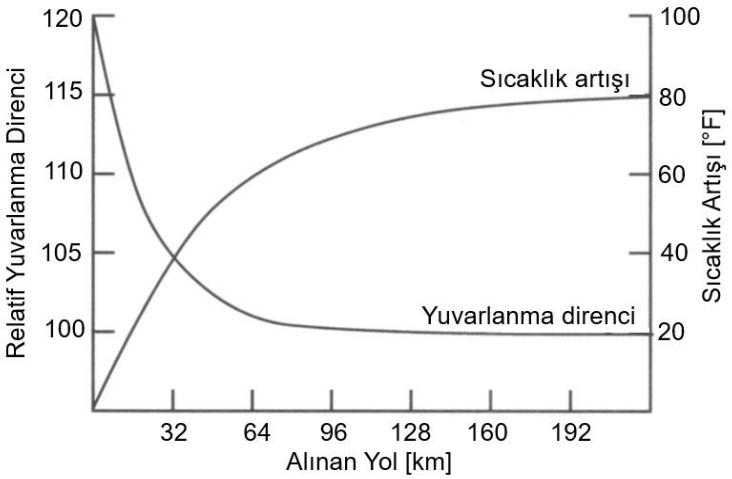
Teker düşey ekseni ile teker tepkisi arasındaki "e" mesafesinin, etkin teker yarıçapı "ρ_r" değerine oranı yuvarlanma direnç katsayısı ifadesi olan "f_R" değerini verecektir. Yuvarlanma direnç katsayısı boyutsuz bir ifadedir ve yol malzemesi, lastik basıncı, taşıtın yük durumu, lastik sıcaklığı gibi çeşitli etmenler ile bu değer değişebilmektedir.

$$W_R = \frac{e}{\rho_r}.N.cos\alpha = f_R.G.cos\alpha \tag{2.2}$$

Formül 2.2 ile gösterilen yuvarlanma direncinin hesaplanmasına ilişkin ifadede görülebileceği gibi yuvarlanma direnci; yuvarlanma direnç katsayısına, taşıtın kütlesine, yer çekimi ivmesine ve yolun eğimine bağlı olarak değişmektedir [7].

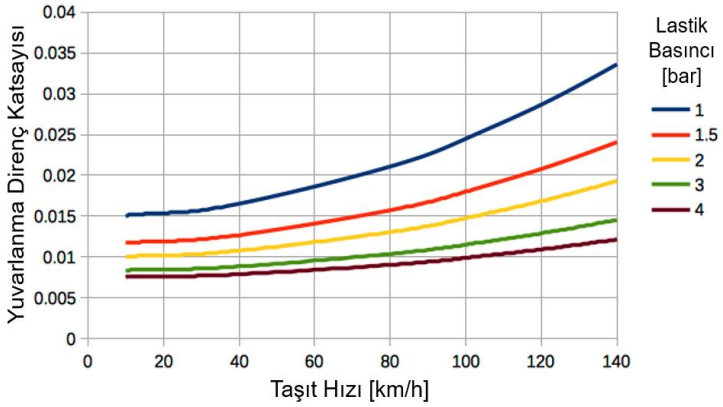
Yuvarlanma direnç katsayısı ise lastik özellikleri, yol özellikleri ve taşıt hızı gibi değişkenlerden etkilenmektedir.

Lastik sıcaklığının yuvarlanma direnç katsayısına etkisini inceleyecek olursak; normal şartlar altında, taşıt ilk harekete bağladığında lastik sıcaklığı hareketin ilerleyen zamanlarına nazaran daha düşük durumdadır. Lastik sıcaklığının artışıyla beraber yuvarlanma direnç katsayısında düşüş gözlenecektir [6].



Şekil 2.2 Lastik Sıcaklığının Yuvarlanma Direncine Etkisi

Lastik basıncındaki değişim, tekeri daha elastik ya da daha rijit yapabilecek faktörlerin başında gelmektedir. Nispeten daha yüksek lastik basıncına sahip bir araçta, teker-yol deformasyonu daha az olacağından yuvarlanma direnç katsayısı da daha düşük olacaktır [8].



Şekil 2.3 Lastik Basıncının Yuvarlanma Direnç Katsayısına Etkisi

Yol malzemesi ve yol durumu da yuvarlanma direnç katsayısına etki eden önemli parametrelerdendir. Yol malzemesi ve yol durumu, lastikle yol arasındaki deformasyon oluşumunun temel nedenlerindedir. Yol malzemesi rijitleştikçe yani yol ile teker arasında ifade edilen model rijit modele yaklaştıkça yuvarlanma direnç katsayısı değerinde dolayısıyla da yuvarlanma direncinde azalış gözlenecektir. Tablo 2.1 ile farklı yol malzemelerine göre yuvarlanma direnç katsayısı değerleri ifade edilmiştir [7].

Tablo 2.1 Yol Malzemesine Göre Yuvarlanma Direnç Katsayısı Değerleri

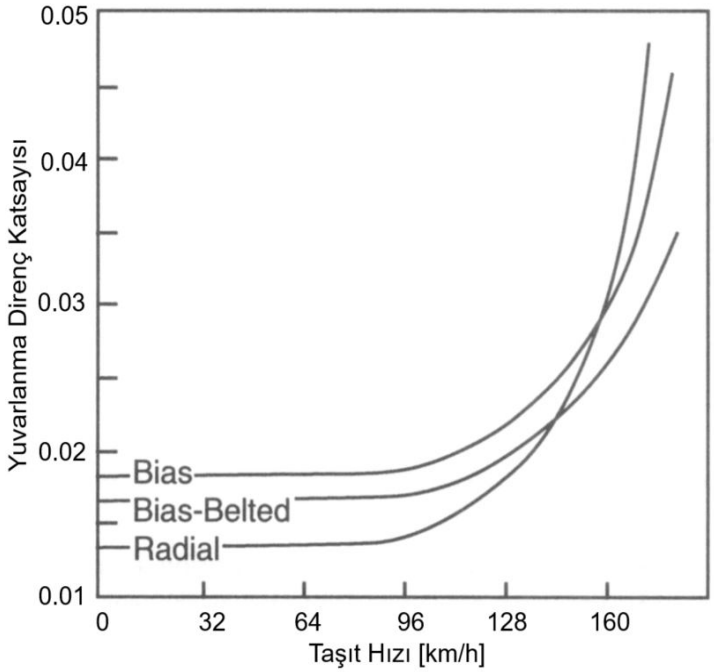
Yol Malzemesi	**Yuvarlanma Direnç Katsayısı** f_R
Parke	0.015
Asfalt	0.013
Stabilize	0.025
Toprak	0.05
Tarla	0.07-0.12
Karlı Yol	0.07-0.1
Kumlu Yol	0.1-0.35
Demir Yolu	0.001-0.002

Yuvarlanma direnç katsayısına etki eden bir diğer önemli parametre taşıt hızıdır. Düşük hızlarda (60 km/h' e kadar) yuvarlanma direnç katsayısı sabit olarak kabul edilebilmektedir. Ancak taşıt hızındaki artışla beraber lastik malzemesindeki deformasyon ve malzeme ataleti artacağından yuvarlanma direnç katsayısı da artacaktır [7].

$$f_R = f_0.(1 + \frac{V_T^2}{1500}) \tag{2.3}$$

Formül 2.3 ile gösterildiği üzere, taşıt hızı ve hareketsiz durumdaki yuvarlanma direnç katsayısı (f_0) ile yüksek hızlar için yeni bir yuvarlanma direnç katsayısı elde edilebilmektedir (Formül 2.3' te gösterilen taşıt hızının birimi m/s' dir.).

Ayrıca farklı lastik tipleri de yuvarlanma direnç katsayısını etkilemektedir. Özellikle günümüz yol taşıtlarında kullanılan, radyal, çapraz dokulu ve konvansiyonel dokulu lastiklerin yuvarlanma direnç katsayısı üzerine etkileri, taşıt hızı bileşeniyle beraber, Şekil 2.4' te gösterilmiştir. Aynı taşıt hızı için lastik tipine göre yuvarlanma direnç katsayısı değeri iki katına kadar artış ya da azalış gösterebilmektedir [6].



Şekil 2.4 Taşıt Hızının Lastik Tipine Göre Yuvarlanma Direnç Katsayısına Etkisi

2.2.2 Hava Direnci (Aerodinamik Direnç)

Taşıt hareket halinde iken hava tabakası tarafından çevrelenmektedir. Taşıtı çevreleyen bu hava tabakasının bir kısmının taşıtın radyatör ve havalandırma kanallarından geçmesi iç akışı ve iç akış kayıplarını oluşturur. Taşıtın dış yüzeyinden akan hava ise dış kayıpları oluşturmaktadır. Taşıtın ön ve arka yüzeyleri arasında oluşan basınç farkından ve taşıt yüzeyinin hava ile sürtünmesinden kaynaklı oluşan bu direnç grubuna hava direnci ya da aerodinamik direnç adı verilmektedir.

Taşıt tasarımı, hava direncine etki eden temel faktördür. Taşıtın maruz kaldığı hava akışının kompleks olması sebebiyle deneysel modellerin geliştirilmesi zorunluluk halini almış ve aerodinamik direnç kuvveti aşağıdaki gibi deneysel bir ifade ile belirtilmiştir [5].

$$W_L = \frac{1}{2}.\rho_H.C_D.A.(V_T + V_R)^2 \tag{2.4}$$

Aerodinamik direnci etkin kılan parametre yalnızca C_D değeri değildir. Araç geometrisine bağlı bir durum olan aerodinamik direnç için ölçüt $C_D.A$ değeridir.

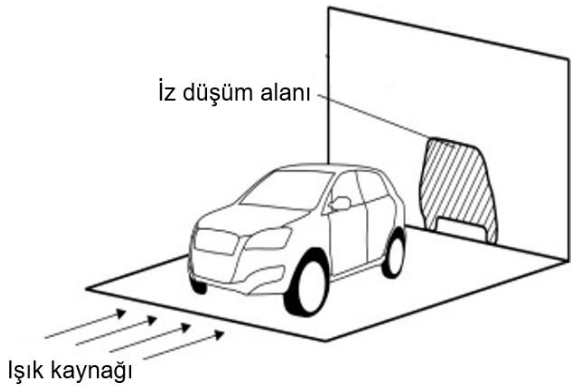
Taşıta etkiyen hava direncini oluşturan etmenler ve bunların yüzdesel payları yaklaşık olarak aşağıdaki gibidir.

1. Taşıtın arka kısmında boşalttığı bölgede meydana gelen türbülansın oluşturduğu

direnç (%80)

2. Taşıtın dış yüzeyinden akan havanın neden olduğu yüzey sürtünmesi (%10)
3. Soğutma ve havalandırma amacıyla açılan boşlukların neden olduğu iç direnç (%10)

Taşıt iz düşüm alanı (A) ya da projeksiyon alanı ifadesi taşıta karşıdan bakıldığında görülebilen alanın ifadesidir. Dış aksesuarlar (dikiz aynaları, açık farlar vb.) dahil edilmek üzere hesaplanmaktadır.



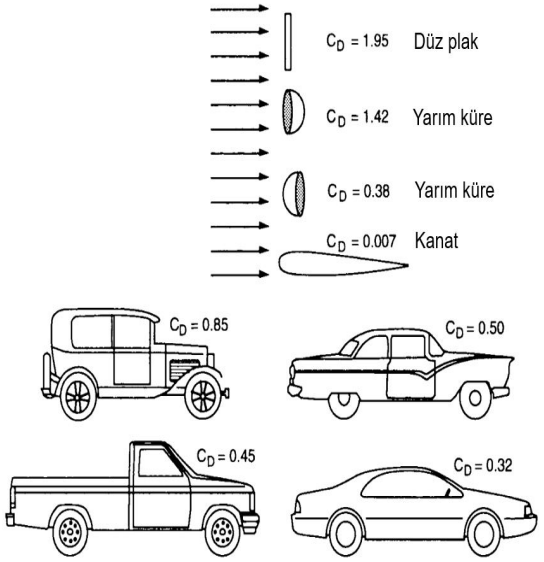
Şekil 2.5 Taşıt İz Düşüm Alanı

Aerodinamik direnç katsayısı (C_D) boyutsuz bir ifade olup taşıta özgü bir sabittir. Bu direnç katsayısının değişimi ile ilgili olarak farklı etki türlerinin yüzdesel olarak yarattığı artış ve azalış miktarları Tablo 2.2 ile gösterilmiştir [5].

Tablo 2.2 Taşıt Üzerinde Yapılan Değişikliklerin C_D Değerine Etkisi

Etki Türü	C_D **Değerine Etkisi [%]**
Araç Yüksekliğini 30 mm Azaltma	-5
Yumuşak Hatlı Çamurluk	-1 ~ -3
Geniş Lastik	+2 $\sim$ +4
Araç Gövde Boşluklarını Kapatma	-2 ~ -5
Gövde Altı Paneli	-1 ~ -7
Gizli Farlar	+3 $\sim$ +10
Yan Aynalar	+2 $\sim$ +5
Radyatörden Geçen Hava	+4 $\sim$ +14
Fren Soğutucusu	+2 $\sim$ +5
İç Havalandırma	+1
Açık Pencereler	+5
Açık Sunroof	+2
Port Bagaj	+40

Düz plak şeklindeki bir araç için 1.95 değerlerine ulaşabilen bu değer kanat formundaki bir araç için 0.007 değerine kadar düşebilmektedir. Şekil 2.5 ile farklı araç tasarım ve modellerine göre aerodinamik direnç katsayısı değerleri gösterilmektedir [6].



Şekil 2.6 Taşıt Tasarımına Göre Aerodinamik Direnç Katsayısı Değerleri

2.2.2.1 Lift Etkisi

Sınır katman dışındaki akışı tanımlamak üzere kullanılan potansiyel akış teorisine göre, taşıtın üst ve alt kısımları arasındaki basınç farkı, taşıtın etrafında hava sirkülasyonuna ve kaldırma kuvveti oluşmasına sebep olur. Bu duruma lift etkisi denir. Sirkülasyonun varlığı, akış hatlarının bükülmesine ve taşıtın arkasında girdapların oluşmasına neden olur [5].

$$L_{f_O} = \frac{1}{2}.\rho_H.C_{L_O}.A.(V_T + V_R)^2 \tag{2.5}$$

$$L_{f_A} = \frac{1}{2}.\rho_H.C_{L_A}.A.(V_T + V_R)^2 \tag{2.6}$$

$$L_f = L_{f_O} + L_{f_A} \tag{2.7}$$

$$L_f = \frac{1}{2}.\rho_H.(C_{L_O} + C_{L_A}).A.(V_T + V_R)^2 \tag{2.8}$$

$$C_L = C_{L_O} + C_{L_A} \tag{2.9}$$

$$L_f = \frac{1}{2}.\rho_H.C_L.A.(V_T + V_R)^2 \tag{2.10}$$

2.2.3 İvme Direnci

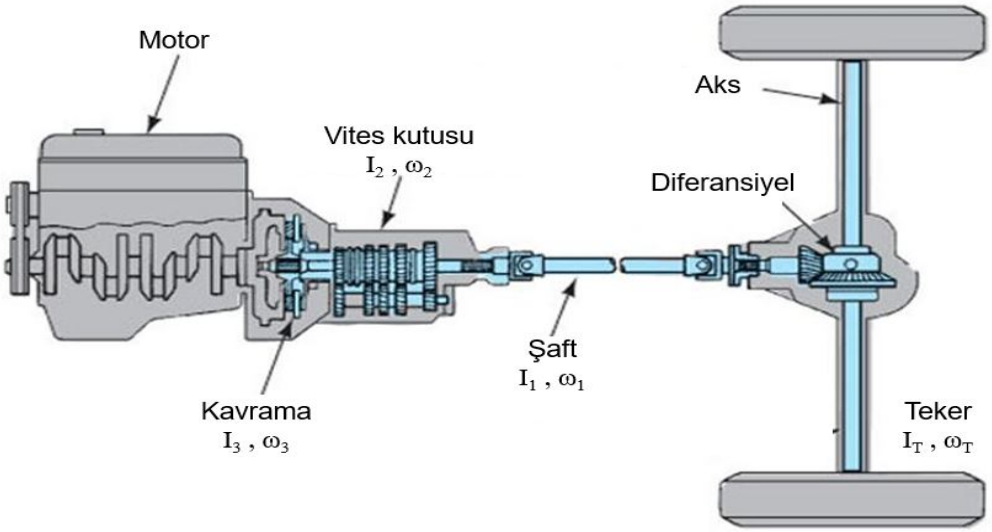
Taşıtın hareketi esnasında, bu harekete karşı atalet kuvvetleri oluşmaktadır. Bu kuvvet, ivme ile zıt yönlü olup ivme direnci olarak tanımlanır. İvme direnci, doğrusal hareket halindeki kütlelerin atalet kuvvetleri ile dönel hareket yapan tekerler, aktarma organları ve aracın diğer dönel hareket yapan birimlerinin atalet kuvvetlerinden oluşmaktadır.

$$W_B = W_{B_m} + W_{B_i} \tag{2.11}$$

$$W_{B_m} = m.\frac{dV_T}{dt} \tag{2.12}$$

Dönel Parçaların Atalet Kuvvetlerinin Hesaplanması

Dönel parçaların toplam ataletlerinin hesaplanması için dönel tüm parçaların ataletlerinin taşıt tekerinin üzerinde toplandığı varsayılarak işlem yapılır.



Şekil 2.7 Güç Aktarma Organları ve Ataletleri

$$W_{B_i} = \frac{1}{\rho_r}.\frac{d\omega}{dt} \tag{2.13}$$

$$\omega = \frac{V_T}{\rho_r} \rightarrow d\omega = \frac{1}{\rho_r}.\frac{dV_T}{dt} \tag{2.14}$$

$$W_{B_i} = \frac{1}{\rho_r^2}.\frac{dV_T}{dt} \tag{2.15}$$

Dönel parçalar için eylemsizlik momenti I_n, açısal hızları ω_n ve transmisyon verimleri η_n olsun. Bu durumda, her bir çevrim için iletilecek kinetik enerji miktarı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\frac{1}{2}.I_1.\omega_1^2.\eta_1 = \frac{1}{2}.I_T.\omega_T^2 \tag{2.16}$$

$$I_1 = I_T.(\frac{\omega_T}{\omega_1})^2.\frac{1}{\eta_1} \tag{2.17}$$

$$\frac{\omega_T}{\omega_1} = \lambda_1 \tag{2.18}$$

$$I_1 = I_T.\lambda_1^2.\frac{1}{\eta_1} \tag{2.19}$$

$$\frac{1}{2}.I_2.\omega_2^2.\eta_2 = \frac{1}{2}.I_1.\omega_1^2 \tag{2.20}$$

$$I_2 = I_1.(\frac{\omega_1}{\omega_2})^2.\frac{1}{\eta_2} \tag{2.21}$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \lambda_2 \tag{2.22}$$

$$I_2 = I_1.\lambda_2^2.\frac{1}{\eta_2} \tag{2.23}$$

$$\frac{1}{2}.I_3.\omega_3^2.\eta_3 = \frac{1}{2}.I_2.\omega_2^2 \tag{2.24}$$

$$I_3 = I_2.(\frac{\omega_2}{\omega_3})^2.\frac{1}{\eta_3} \tag{2.25}$$

$$\frac{\omega_2}{\omega_3} = \lambda_3 \tag{2.26}$$

$$I_3 = I_2.\lambda_3^2.\frac{1}{\eta_3} \tag{2.27}$$

n kademeli bir vites kutusuna sahip araç için formülasyon aşağıdaki gibi genişletilebilir.

$$I_n = I_{n-1}.\lambda_n^2.\frac{1}{\eta_n} \tag{2.28}$$

Toplam atalet momenti ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$I_{TR} = \sum_{i=1}^{n}.I_{i-1}.\lambda_i^2.\frac{1}{\eta_i} + I_T \tag{2.29}$$

$$I_0 = I_T \tag{2.30}$$

Transmisyon sistemi dışındaki dönel parçaların atalet momentleri de benzer şekilde hesaplanabilir. Tahrik edilmeyen ancak dönel durumdaki bir elemanın eylemsizlik momenti I_{x1}, açısal hızı ise ω_{x1} olarak ifade edilmiş olsun. Bu durumda:

$$\frac{1}{2}.I_{T_{x1}}.\omega_T^2 = \frac{1}{2}.I_{x_1}.\omega_{x_1}^2 \tag{2.31}$$

$$I_{Tx1} = I_{x1}.(\frac{\omega_{x1}}{\omega_T})^2 \tag{2.32}$$

$$(\frac{\omega_{x_1}}{\omega_T}) = \lambda_{x_1} \tag{2.33}$$

$$I_{T_{x1}} = I_{x_1}.\lambda_{x_1}^2 \tag{2.34}$$

$$I_{T_{x2}} = I_{x_2}.\lambda_{x_2}^2 \tag{2.35}$$

Aynı işlem m adet dönen parça için aşağıdaki gibi genişletilebilir.

$$I_{T_{xm}} = I_{xm}.\lambda_{xm}^2 \tag{2.36}$$

Bu parçaların toplam atalet momentleri ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\sum_{j=1}^{m} I_{T_{xj}} = \sum_{j=1}^{m} I_{xj}.\lambda_{x_j}^2 \tag{2.37}$$

Bu durumda tahrik edilen ve tahrik edilmeyen dönel parçaların toplam atalet momentlerini veren ifade Formül 2.39' da gösterildiği gibi olacaktır.

$$\sum I = \sum I_{TR} + \sum I_{T_x} \tag{2.38}$$

$$\sum I = \sum_{i=1}^{n} I_{i-1}.\lambda_i^2.\frac{1}{\eta_i} + I_T + \sum_{j=1}^{m} I_{xj}.\lambda_{x_j}^2 \tag{2.39}$$

Bulunan bu denklem 2.8 numaralı denkleme yerleştirildiğinde:

$$W_{B_i} = \frac{1}{\rho_r}.(\sum_{i=1}^{n} I_{i-1}.\lambda_i^2.\frac{1}{\eta_i} + I_T + \sum_{j=1}^{m} I_{xj}.\lambda_{x_j}^2).\frac{dV_T}{dt} \tag{2.40}$$

denklemi elde edilmiş olur.

Yukarıdaki denklemde $\frac{1}{\rho_r}.(\sum_{i=1}^{n} I_{i-1}.\lambda_i^2.\frac{1}{\eta_i} + I_T + \sum_{j=1}^{m} I_{xj}.\lambda_{x_j}^2)$ ile ifade edilen değer "eş değer kütle katsayısı" olup; dönel elemanların açısal hızlarının artması sonucu oluşacak direnç kuvvetine eş değer direnci taşıtın çizgisel ivmesi ile yaratacak kütle olarak tanımlanır ve "m_e" ile ifade edilir. Bu durumda dönel parçalar için ivme direnci aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$W_{B_i} = m_e.\frac{dV_T}{dt} \tag{2.41}$$

2.12 ve 2.41 numaralı denklemler 2.11 numaralı denkleme yerleştirildiğinde toplam ivme direnci bulunacaktır [5, 7].

$$W_B = m.\frac{dV_T}{dt} + m_e.\frac{dV_T}{dt} \tag{2.42}$$

$$W_B = (m + m_e).\frac{dV_T}{dt} \tag{2.43}$$

$$\frac{m + m_e}{m} = \varphi \tag{2.44}$$

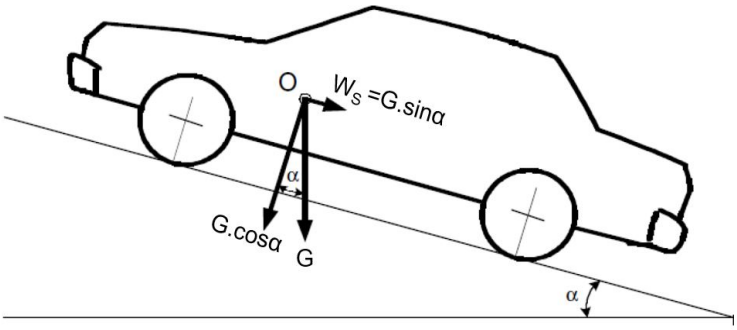
$$W_B = \varphi.m.\frac{dV_T}{dt} \tag{2.45}$$

Burada φ ile ifade edilen değer ivme direnç katsayısı değeri olup boyutsuz bir ifadedir.

2.2.4 Yokuş Direnci

Taşıt ağırlığının, taşıtın hareket yönüne ters yönde oluşan bileşenidir. Çıkış eğimli yolda harekete ters yönde bir direnç oluşurken, iniş eğimli bir yolda hareket yönünde yani pozitif bir kuvvet oluşmaktadır [5, 7].

$$W_S = m.g.sin\alpha = G.sin\alpha \tag{2.46}$$



Şekil 2.8 Yokuş Direnci

2.2.5 Çeki Direnci

Bir taşıta yedeğinde çektiği araç nedeniyle etki eden direnç kuvvetlerin toplamıdır [5, 7].

$$W_C = W_{R_C} + W_{L_C} + W_{B_C} + W_{S_C} \tag{2.47}$$

2.3 Güç Gereksinimi

Hareket şartının sağlandığı durumlarda tahrik tekerlerinde oluşturulacak ve değeri $\sum W$' ye eşit olan kuvvet taşıtı harekete geçirecektir. Tahrik tekerlerinde belirtilen kuvvetlerin oluşturulması için, büyüklüğü toplam dirençler ile etkin teker yarıçapının çarpımına eşit olan bir momentin tahrik tekerlerine iletilmesi gerekir (Taşıt hareket şartını sağladıktan sonra güç şartına bakılır.) [5, 7].

$$M_{Teker} = \sum W.\rho_r \tag{2.48}$$

$$N_{Teker} = M_{Teker}.\omega_{Teker} \tag{2.49}$$

$$\eta_m = \frac{N_{teker}}{N_e} \tag{2.50}$$

$$N_e.\eta_m = M_{Teker}.\omega_{Teker} \tag{2.51}$$

$$N_e.\eta_m = \sum W.\rho_r.\omega_{Teker} \tag{2.52}$$

$$\rho_r.\omega_{Teker} = V_{Teker} \tag{2.53}$$

$$N_e.\eta_m = \sum W.V_{Teker} \tag{2.54}$$

Taşıt ile yol arasında kaymanın olmadığı durumda $V_{Teker} = V_T$ olacaktır.

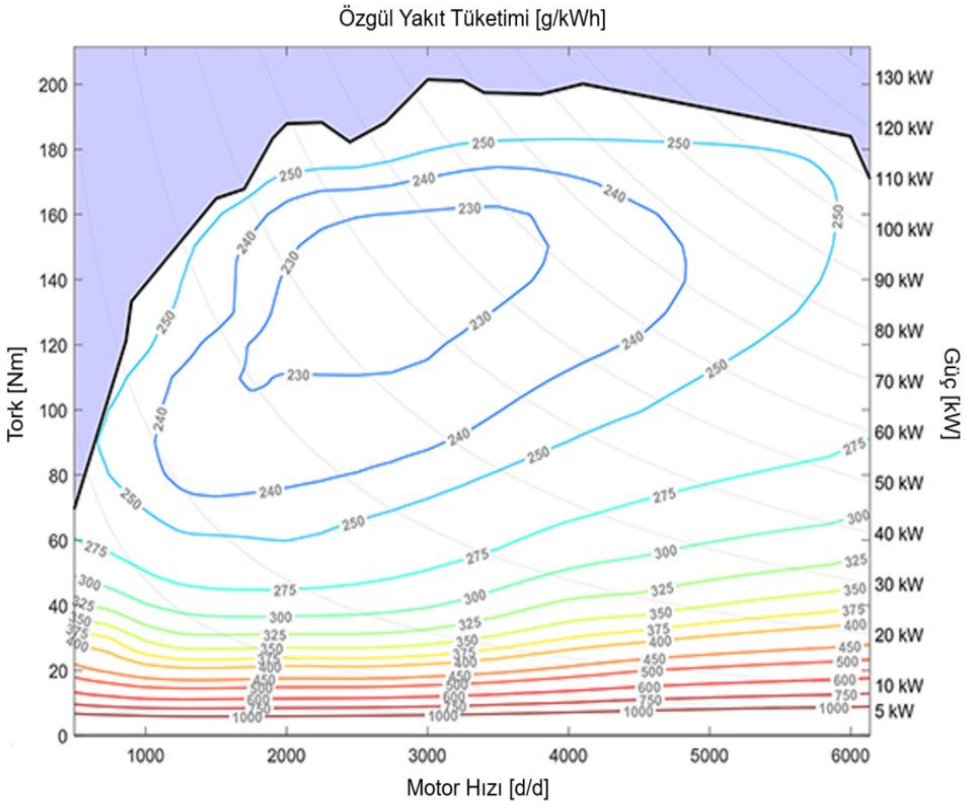
$$N_e.\eta_m = \sum W.V_T \tag{2.55}$$

$$N_e = \frac{\sum W.V_T}{\eta_m} \tag{2.56}$$

2.4 Yakıt Tüketimi

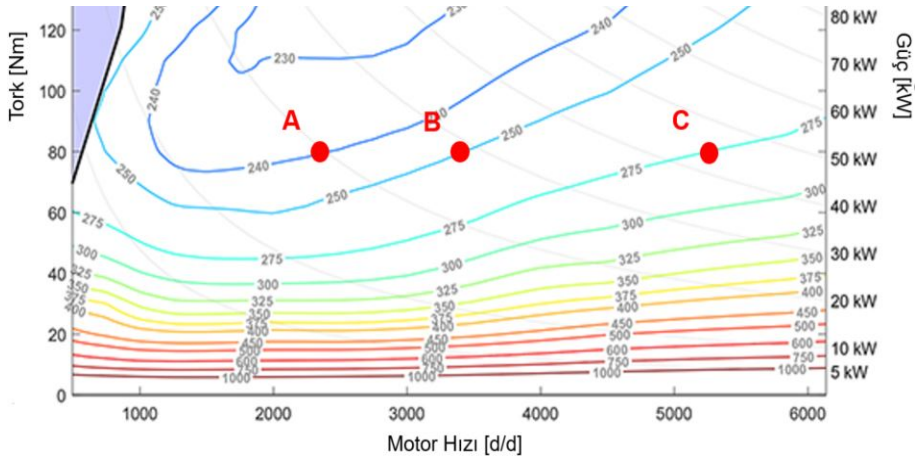
İçten yanmalı motora sahip bir taşıtta yakıt enerjisini ısı enerjisine çeviren yani taşıtın güç gereksinimini karşılayan eleman motordur. Taşıtın güç gereksinimi değeri motor hızına bağlı olarak yakıt enerjisi ile karşılanacaktır. Motor gücü veya motor torku, motor hızı ve yakıt tüketimi değerleriyle oluşturulacak olan üç boyutlu motor haritası ile taşıtın yakıt tüketimi değerleri ifade edilebilir.

Şekil 2.9 ile bir taşıta ait motor haritası verilmiştir. Burada aynı güç ekseninde, farklı tüketim noktalarının olduğu görülebilir. Motor hızına bağlı olarak değişim gösteren bu tüketim noktaları, aynı gücün farklı devirlerde alınabileceğinin ifadesidir. Bu nedenle yakıt tüketimi değeri minimum olan noktanın belirlenmesi ve motorun bu noktada çalıştırılması, taşıtlarda yakıt ekonomisi sağlamada temel etmendir.



Şekil 2.9 Motor Haritası

Şekil 2.10' da örnek olarak 50 kW'lık güç talebi için motor haritası üzerinde işaretlenen tüketim noktalarında sırasıyla, 240 g/kWh- 250 g/kWh- 275 g/kWh' lık özgül yakıt tüketimi değerleri görülmektedir. Buradan yola çıkarak bu motor için en ekonomik tüketim noktasının, 50 kW' lık güç talebinde ve işaretlenen noktalar arasında, yaklaşık 2300 d/d olduğu, belirli bir gücün daha düşük motor devirlerinde üretilmesinin özgül yakıt tüketiminin daha düşük kalmasını sağladığı anlaşılmaktadır.



Şekil 2.10 Motor Haritası Üzerinde İşaretlenmiş Tüketim Noktaları

3
Metrobüs Hattı ve Yol Testleri

Metrobüs sistemi, metro ile otobüsün birleşimi ile ortaya çıkmış bir toplu taşıma aracıdır. Otobüslerin kendilerine ayrılmış özel şeritlerinde, yolcularına hizmet vermesi prensibiyle işletilen bu sistemlerde karayolları üzerinde trafiksiz bir yolculuk imkanı sağlanmaktadır. Özellikle insan yoğunluğunun fazla olduğu metropollerde trafiksiz bir seyahat imkanı sunabilen bu toplu taşıma araçları, yoğun bir talep görmektedir.

Dünyanın en kalabalık şehirleri arasında yer alan İstanbul' da da, metrobüs sistemi 2007 yılı itibariyle kullanıcıların hizmetine sunulmuştur . D100 karayolunun ortasında kendisine ayrılmış gidiş ve geliş olmak üzere iki şerite sahip metrobüs hattının toplam uzunluğu 52 km' dir. Beylikdüzü-Söğütlüçeşme arasında hizmet vermekte olan metrobüsleri, dünyadaki diğer örneklerinden ayıran en önemli özelliği, 15 Temmuz Şehitler Köprüsü üzerinden, kıtalar arası yolculuk imkanı sağlayan ilk ve tek toplu taşıma aracı olmasıdır. 37'si Avrupa, 7'si Asya kıtasında olmak üzere toplam 44 duraktan oluşan metrobüs hattı, günlük yaklaşık 1 milyon yolcuya ulaşım hizmeti vermektedir.



Şekil 3.1 İstanbul Metrobüs Haritası

İETT tarafından işletilen metrobüs hattında toplam 535 adet araç hizmet vermektedir. Farklı özellik ve yolcu taşıma kapasitesine sahip bu araçların dağılımı ile ilgili detaylı

bilgi Tablo 3.1 ile verilmiştir [9].

Tablo 3.1 Metrobüs Filosu

Model	Araç Sayısı	Alçak Taban Özelliği	Yolcu Kapasitesi
CapaCity	250	Var	165
Citaro	100	Var	160
Conecto	85	Var	160
Phileas	50	Var	258
Karsan	50	Var	155

Bu tez çalışması kapsamında, metrobüs filosunda 250 adet ile en çok kullanılan araç olma özelliği taşıyan Mercedes' e ait CapaCity model otobüslerin, yakıt tüketimi ve CO_2 emisyonlarının modellenmesi ve doğrulanması çalışması yapılmıştır. Avcılar-Beylikdüzü arasında gerçekleştirilen seyahat esnasında, taşınabilir emisyon ve yakıt ölçüm sistemleriyle donatılmış Capacity model otobüslerden gerçek zamanlı alınan yakıt tüketimi ve CO_2 salınımı değerlerinin VECTO aracığıyla doğrulanması hedeflenmiştir.

3.1 Mercedes-Benz CapaCity Taşıt Bilgileri

Daimler AG kuruluşu olan EvoBus tarafından Almanya'nın Mannheim şehrinde, 2007 yılında üretimine başlanan, şehiriçi yolcu taşımacılığında kullanılan Mercedes-Benz CapaCity otobüsleri sağladığı alçak taban özelliği ve 13000 kg' a kadar yükleme kapasitesi nedeniyle (193 yolcuya kadar taşıma kapasitesi) İETT tarafından metrobüs hattında en çok tercih edilen otobüs olma özelliğindedir [10].



Şekil 3.2 Mercedes-Benz CapaCity (O 530 GL)

CapaCity otobüsler, 260 kW'lık Mercedes-Benz OM 457 (h) LA Euro 4 motor ile tahrik edilmektedir. Bu motora ait bazı teknik veriler Tablo 3.2 ile verilmiştir [11].

Tablo 3.2 Mercedes-Benz OM457 Motor Özellikleri

Silindir Sayısı	6
Silindir Düzeni	Sıralı-Yatay
Silindir Hacmi	11967 cm^3
Maksimum Güç	260 kW @2000rpm
Maksimum Tork	1600 Nm @1100rpm
Silindir Çap/Strok	128/155 mm
Sıkıştırma Oranı	17.75:1
Maksimum Enjeksiyon Basıncı	1800 bar

ZF' e ait Ecomat HP602 6 ileri otomatik şanzıman ile güç aktarma işlemi yapılan arkadan itişli otobüslerde yine ZF' e ait AV-132/87 akslar kullanılmaktadır. Bu şanzıman kutusuna ait bazı teknik veriler Tablo 3.3 ile verilmiştir [11].

Tablo 3.3 ZF Ecomat HP602 Şanzıman Özellikleri

Maksimum Giriş Gücü	260 kW
Maksimum Giriş Torku	1600 Nm
Maksimum Giriş Devri	2800 rpm
1.Vites Çevrim Oranı	3,43
2.Vites Çevrim Oranı	2,01
3.Vites Çevrim Oranı	1,42
4.Vites Çevrim Oranı	1,00
5.Vites Çevrim Oranı	0,83
6.Vites Çevrim Oranı	0,59
Geri Vites Çevrim Oranı	4,84
Diferansiyel Çevrim Oranı	6,21

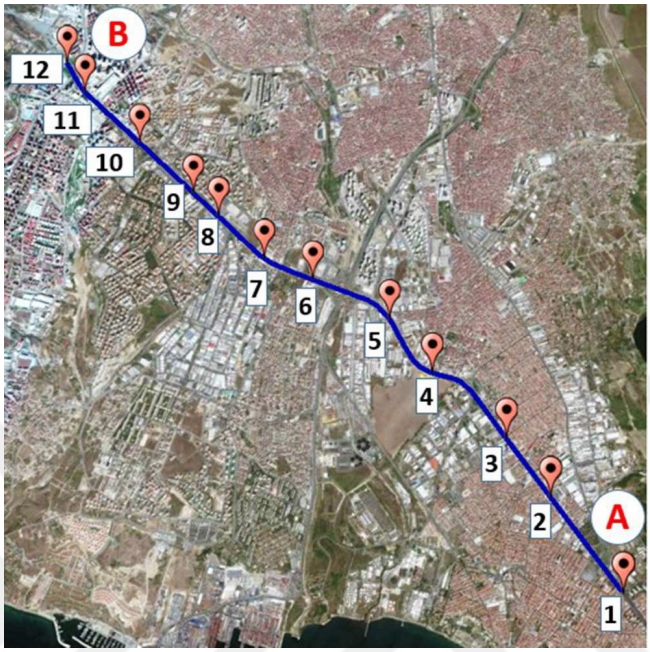
CapaCity' e ait diğer teknik bilgiler Tablo 3.4 ile verilmiştir [11].

Tablo 3.4 CapaCity' e Ait Diğer Teknik Bilgiler

Araç Uzunluğu	19540 mm
Araç Genişliği	2550 mm
Klima Sistemi Yüksekliği	605 mm
Dingil Mesafesi, Ön Aks ile Orta Aks Arası	5845 mm
Dingil Mesafesi, Tahrik Aksı ile Orta Aks Arası	5990 mm
Dingil Mesafesi, Tahrik Aksı ile İlave Arka Aks Arası	1600 mm
İz Genişliği, Tahrik Aksı	1834 mm
Lastik Bilgileri	275/70 R 22.5
Brüt Araç Kütlesi	32000 kg

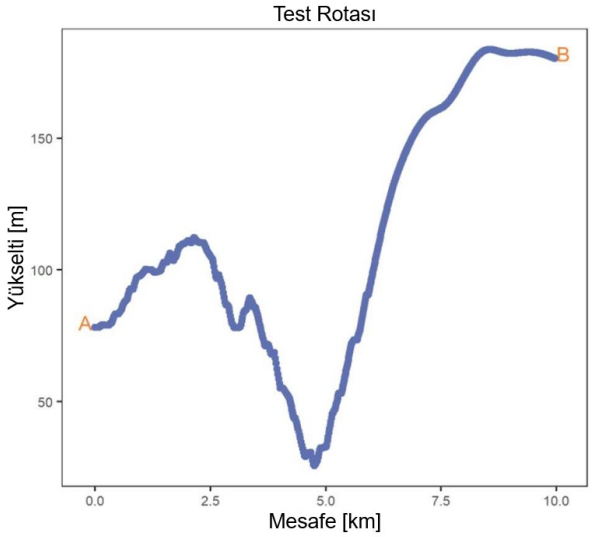
3.2 Taşıt Üstü Yol Testleri

Taşınabilir emisyon ölçüm cihazı ve yakıt ölçüm sistemiyle donatılmış CapaCity otobüs, metrobüs hattı üzerinde en fazla yükselti değişiminin olduğu (Δh=173m) toplam 12 duraklı Avcılar-Beylikdüzü rotasında taşıt üstü testlere tabi tutulmuştur.



Şekil 3.3 Avcılar-Beylikdüzü Test Rotası

Rota boyunca gerçekleştirilen testler esnasında taşıtın enlem, boylam ve anlık yükselti bilgilerinin belirlenmesi için, 2 Hz frekansında ölçüm yapan GPS cihazı kullanılmış ve Avcılar-Beylikdüzü arasında yol profili de elde edilmiştir.



Şekil 3.4 Avcılar-Beylikdüzü Yol Profili

Testler esnasında yolcuları simüle edebilmek adına kum torbaları kullanılmış ve yük homojen bir biçimde dağıtılmıştır. Gerçek çalışma koşulları dikkate alındığında; rota boyunca sürekli yolcu sayısının değişeceği ve bunun doğrudan taşıtın yakıt tüketimine ve emisyon salınımına etki edeceği aşikardır. Ancak taşıt üstü testlerin gerçek şartlar altında gerçekleştirilmesi yolcu konforu ve güvenliği açısından son derece olumsuz ve tehlikeli bir durum oluşturacaktır. Bu nedenle taşıtın maksimum taşıma kapasitesi göz önünde bulundurularak 6500 kg ve 13000 kg' lik yüklemelerle rota boyunca testler tekrarlanmıştır. Bu yük dağılımları yarım yük ve tam yük olarak ifade edilebilir.

Yol testleri esnasında yakıt tüketiminin dolayısıyla da CO_2 ve diğer emisyonların artışına neden olabilecek durumlar asgari seviyeye indirilmiştir. Rota boyunca motordan güç çekebilecek klima ve yardımcıl kompresörler gibi tüm ekipmanlar devre dışı bırakılmış, taşıta etkiyen dirençlerin artışına neden olabilecek açık camlar, düşük ya da yüksek lastik basıncı gibi parametreler dikkate alınarak tüm test kurallarına uyulmuştur.

Taşıtın anlık yakıt tüketiminin ölçümünde "AVL KMA Mobile Yakıt Ölçüm Cihazı" kullanılmıştır. PLU ölçüm prensibine göre çalışan bu cihaz, taşıtın yakıt sistemine doğrudan bağlanarak, $\Delta P=0$ olacak şekilde terazilenmiştir.



Şekil 3.5 AVL KMA Mobile Yakıt Ölçüm Cihazı

Yakıt ölçüm cihazına ait ölçüm belirsizlikleri, DIN 1319 standartlarınca (güven seviyesi P=%95) hacimsel, kütlesel ve özkütlesel ölçüm tiplerine göre farklılıklar göstermektedir. Hacimsel ve kütlesel ölçümlerde ölçüm belirsizlikleri ± %0.1, özkütlesel ölçümlerde ise ± %0.03 olarak belirlenmiştir. Yakıt ölçüm cihazı testler boyunca kütlesel ölçüm almış yani ± %0.1 belirsizlikle ölçüm yapmıştır [12].

CO_2 ve diğer emisyonların ölçümünde AVL M.O.V.E PEMS kullanılmıştır. Taşınabilir emisyon ölçüm cihazı olarak ifade edilen bu sistem doğrudan taşıtın egzoz hattına monte edilerek, egzoz hattı üzerinden ölçüm almaktadır.



Şekil 3.6 AVL Taşınabilir Emisyon Ölçüm Cihazı

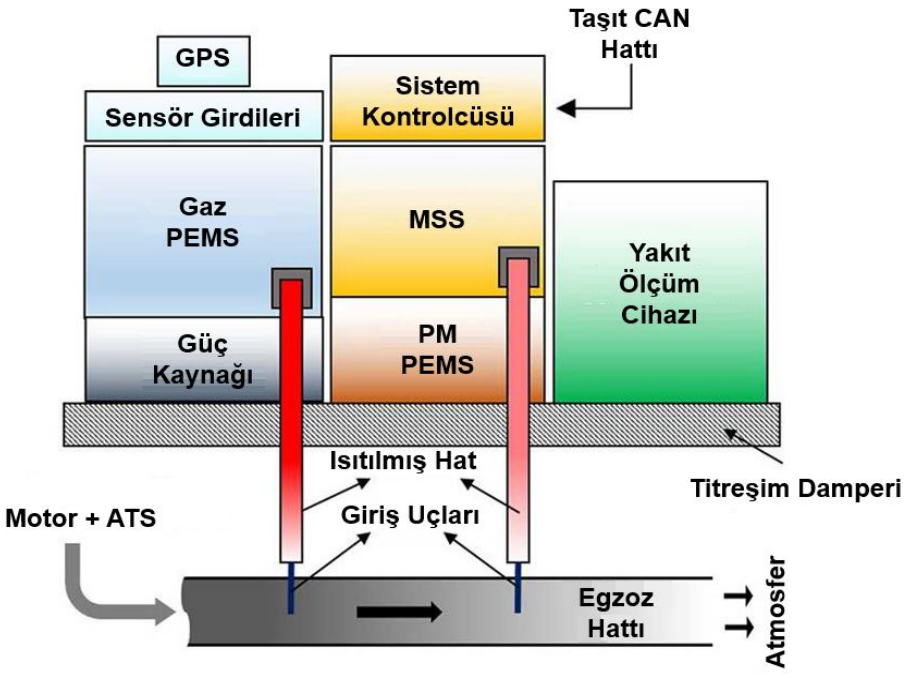
CO_2 emisyonlarının ölçümü NDIR analizör ile gerçekleştirilmiştir. Hacimsel olarak ölçümü yapılan CO_2 emisyonu verileri %0.01 çözünürlükle %0...%20 ölçüm aralığında kaydedilmiştir. Analizöre ait ölçüm hassasiyetleri %0...%9.9 ölçüm aralığında ± %0.1, %10...%20 ölçüm aralığında ise ± %2 şeklindedir [13].

Anlık yakıt tüketimi ve CO_2 emisyonları ölçümleri yukarıda belirtilen ekipmanlar vasıtasıyla yapılırken; taşıt hızı, anlık vites bilgisi ve motor devri gibi bilgiler taşıtın CAN hattı üzerinden kaydedilmiştir.



Şekil 3.7 Test Ekipmanlarının Taşıt İçinde Konumlandırılması

Sisteme ait detaylı yerleşim şeması Şekil 3.8 ile gösterilmiştir. Burada veri transferine ilişkin bilgiler ve egzoz gazlarının izlediği yol da şematize edilmiştir [14].



Şekil 3.8 Test Ekipmanlarının Şematik Gösterimi

Elde edilen test verilerinin işlenmesinde ”AVL Concerto” yazılımı kullanılmıştır. 10 Hz’ den 1 Hz’ e kadar alınan ölçüm verileri hareketli ortalama yöntemi ile filtrelenmiştir. Verilerin doğrulanması amacıyla, taşıt üzerindeki GPS ve taşıtın kontrol ünitesi üzerinden gelen bilgiler kullanılmıştır.

Egzoz debisinin hesaplanması işlemi, ISO16183 kriterleri uyarınca ”Karbon Denge” yöntemiyle yapılmıştır. Bu yöntemde egzoz gaz debisi ve ölçülen egzoz gaz bileşimi dikkate alınarak hesaplama yapılmaktadır.

Aşağıda matematiksel formülasyonu belirtilen ”Karbon Denge” yönteminde Formül 4.1 ile egzoz gaz debisi hesaplanmaktadır. Egzoz gaz debisinin hesaplanması için gerekli olan sitokiyometrik yakıt hava oranı (A/F_{st}) ile gerçek λ değeri ise formül 4.2 ve 4.3 ile bulunur. Burada gerçek λ değerini bulmak için gerekli olan katsayıların hesaplanışı ile ilgili formüller 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7 ile verilmiştir [15].

ISO standartlarının kısıtlı erişimi nedeniyle aşağıda belirtilen formüllerin notasyonuna ilişkin herhangi bir bilgi paylaşımı yapılmayacaktır.

$$\dot{m}_{egzoz} = \dot{m}_{yakit} . \frac{1 + \frac{1}{A/F_{st}.\lambda}}{\frac{1}{A/F_{st}.\lambda}} \tag{3.1}$$

$$A/F_{st} = \frac{138.(\beta + \frac{\alpha}{4} - \frac{\epsilon}{2} + \gamma)}{12,011.\beta + 1,00794.\alpha + 15,999.\epsilon + 14,0067.\delta + 32,065.\gamma} \tag{3.2}$$

$$\lambda = \frac{A + B.C}{D} \tag{3.3}$$

$$A = \beta.(100 - \frac{c_{CO}}{2} - c_{HC}) \tag{3.4}$$

$$B = \frac{\alpha}{4} . \frac{1 - \frac{2.c_{CO}}{3,5.c_{CO_2}}}{1 - \frac{c_{CO}}{3,5.c_{CO_2}}} - \frac{\epsilon}{2} - \frac{\delta}{2} \tag{3.5}$$

$$C = c_{CO_2} + c_{CO} \tag{3.6}$$

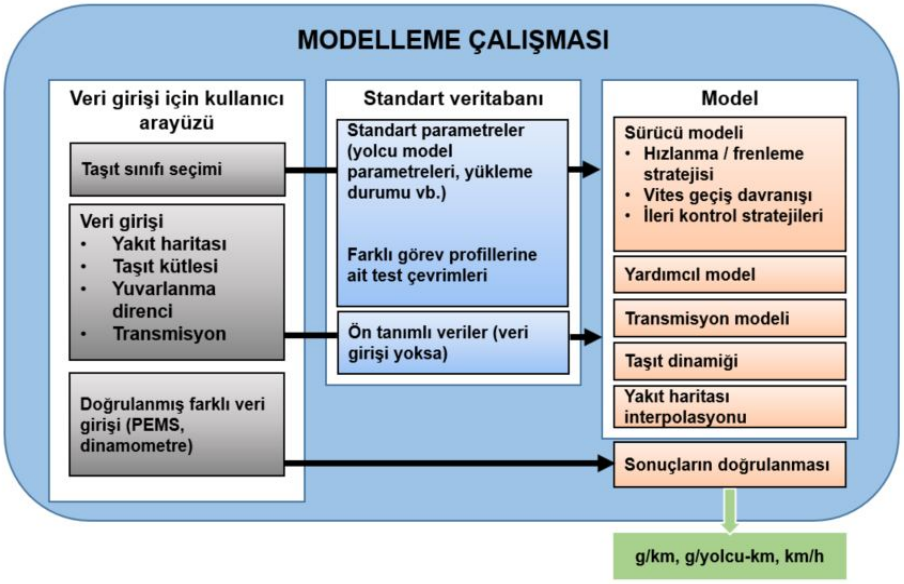
$$D = 4,764.(\beta + \frac{\alpha}{4} - \frac{\epsilon}{2} + \gamma).(c_{CO_2} + c_{CO} + c_{HC}) \tag{3.7}$$

4
VECTO Programı

VECTO (Vehicle Energy Consumption Calculation Tool), ağır vasıta hizmet taşıtlarının yakıt tüketimlerinin ve CO_2 emisyonlarının modellenebilmesi ve standardizasyonu amacıyla geliştirilen bir simülasyon programıdır. Avrupa Komisyonu' na bağlı DG Clima (Directorate-General for Climate Action) ve JRC (Joint Research Center) tarafından, Graz Teknik Üniversitesi ve Ricardo Grup' un destekleriyle geliştirilen program; %95 doğruluk oranı hedeflemektedir [16].



Şekil 4.1 VECTO Logosu

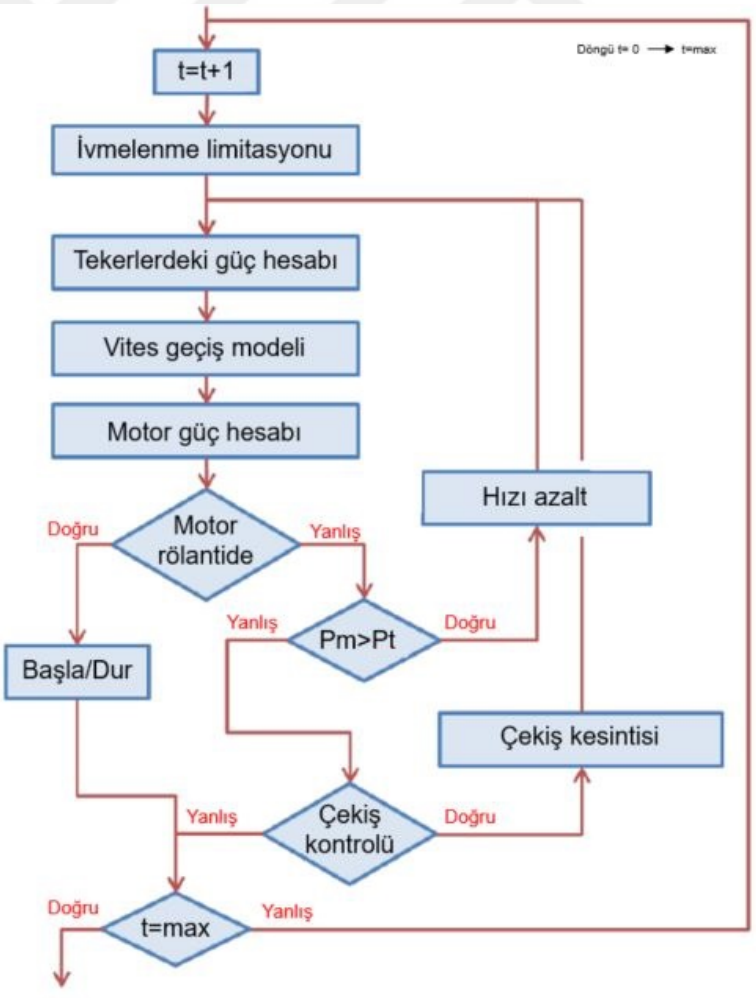


Şekil 4.2 VECTO Model Şeması

Şekil 5.2 ile şematize edilen VECTO' nun çalışma prensibi şemasında görüleceği üzere; kullanıcı tarafından girilen verilerin, programın veritabanındaki verilerle birleştirilerek; tanımlanan sürücü ile istenilen çevrimde koşulup yakıt tüketimi değerlerine ulaşılması hedeflenmektedir. Bu işleyiş şemasını yerine getirmek adına VECTO üzerinde dört ana modül üzerinden modelleme ve hesaplama yapılmaktadır. Bu modüller:

- Test çevrimi modellemesi
- Sürücü modellemesi
- Güç talebinin hesaplanması
- Yakıt tüketiminin hesaplanması

şeklindedir. Bu modüller arasındaki geçiş sıralaması maddeleme sırası ile aynı olup, güç talebinin hesaplanmasına ilişkin algoritma şeması Şekil 5.3 ile verilmiştir.



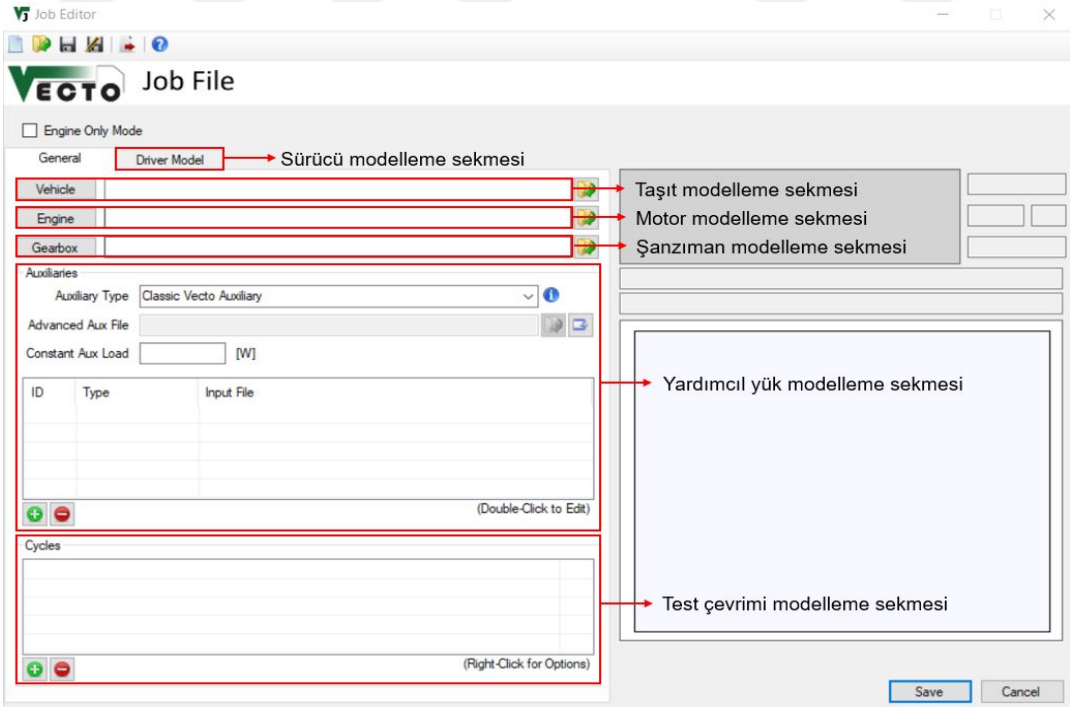
Şekil 4.3 Güç Hesaplama Algoritması

VECTO, deklarasyon ve mühendislik olmak üzere iki ana, bu modlar dışında ise test doğrulama ve yalnızca motor olmak üzere iki yardımcıl moda sahiptir. Deklarasyon modunda, girdi olarak kullanılacak verilerin birçoğu resmi sertifikasyon değerlerine uygun şekilde önceden tanımlanmış olup, kullanıcı erişimine kapalıdır. Bu girdi verilerinin dışında, koşulacak test çevrimi de VECTO' ya görev profili olarak, taşıt sınıfına göre önceden tanımlanmıştır. Mühendislik modu ise deney ve doğrulama çalışmaları amacıyla geliştirilen, kullanıcın tüm girdilere ve test çevrimine müdahele edebildiği diğer moddur.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilecek model çalışmaları için VECTO'nun mühendislik modu kullanılacaktır.

4.1 Kullanıcı Arayüzü

VECTO, taşıtın yakıt tüketimine etki edecek tüm parametreleri tek bir ekran üzerinde, alt sekmeler yardımıyla modelleme fırsatı sunmaktadır. Şekil 5.4 ile gösterilen iş dosyasında görülebileceği gibi örnek bir modellemenin tüm üst başlıkları (taşıt, motor, vites kutusu, yardımcıl yükler, test çevrimi ve sürücü davranışları) tek bir pencerede bulunmaktadır. Bu pencere üzerinden, alt sekmelere ulaşılarak modelleme işlemi yapılabilmektedir.

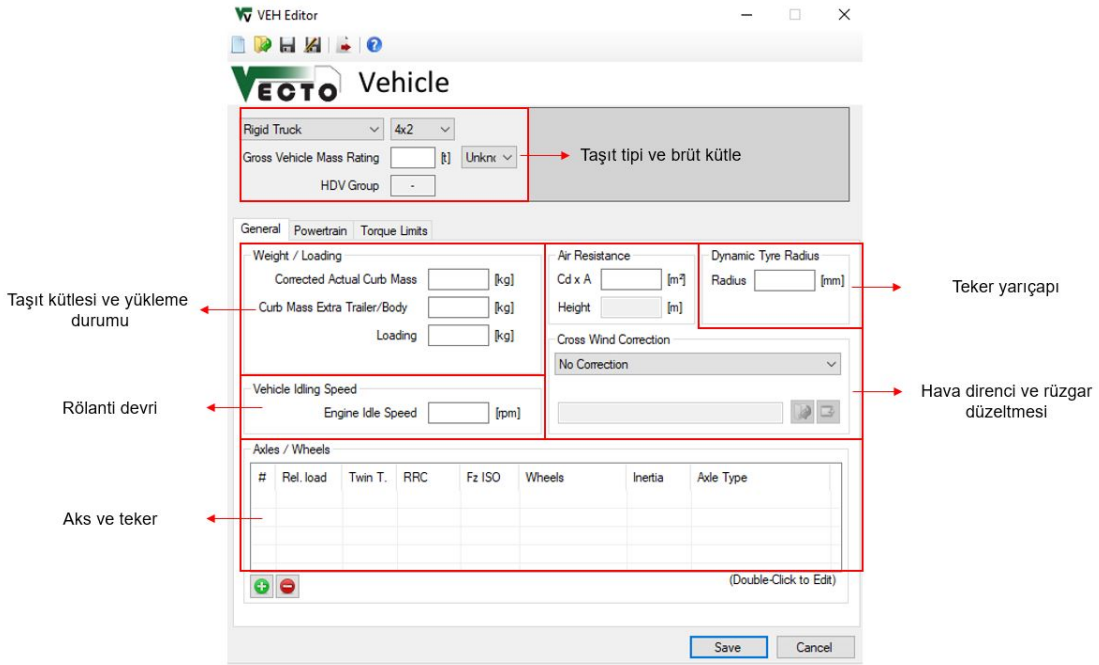


Şekil 4.4 Kullanıcı Arayüzü

4.2 Modellemede Kullanılan Parametreler

Taşıt dosyası, taşıta dair ana verilerin ve şaşi bilgilerinin modellemesinin yapıldığı sekmedir. Modellemenin ilk adımı taşıt tipinin seçilmesi (kamyon, çekici, şehir içi ve şehirler arası otobüs) ve brüt kütlesinin girilmesidir.

Taşıt editör dosyası üç ana bölümden oluşur. ”Genel” sekmesi altında; kütle, yük durumu, hava direnci ve yuvarlanma direncine ait parametreler ve taşıt aks bilgilerine ait verilerin modellemesi yapılır. ”Güç aktarma” sekmesinde varsa taşıtın geciktirici fren, dişli tahrik ile yavru şanzıman sistemlerine ait verilerin girişi sağlanır. Üçüncü sekme olan ”tork sınırlama” sekmesinde ise her bir vites için ayrı ayrı olarak azami tork sınırlamasına ilişkin veri girişi imkanı sağlanmaktadır.



Şekil 4.5 Taşıt Modelleme Ekranı

Şekil 4.5 ile taşıt editör sayfasının ana ekranı ve genel sekmesine ait veri giriş ekranı gösterilmektedir. Taşıt kütlesi, yükleme durumu, rölanti devri gibi bilgiler skaler olarak girilmekle beraber; hava direncini ve yuvarlanma direncini oluşturacak bilgiler ile taşıta ait aks bilgileri skaler ve vektörel olarak girilmektedir. VECTO modlarına (mühendislik ve deklarasyon) göre aktif ya da pasif durumda olan bu parametre girişlerinin ve modelleme aşamasının detayları, programın veritabanına gömülü olarak kullanıcıya sunulmaktadır.

Dinamik (efektif) teker yarıçapı, motor hızını hesaplamak için kullanılmaktadır. Mühendislik modunda aktif olan bu parametre, deklarasyon modunda araç tipine göre VECTO kütüphanesi üzerinden gelmektedir.

Taşıta özgü bir değer olan ve hava direncini oluşturan $C_D.A$ değeri skaler bir büyüklük olarak girilmekle beraber, kullanıcı talebine göre yanal rüzgar düzeltmesi yapılabilmektedir. Taşıt hızına bağlı deklarasyon ve taşıt hızına bağlı kullanıcı tarafından tanımlanabilen düzeltme katsayılı modlar ile rüzgar hızı ve sapma açısına bağlı düzeltme modu olmak üzere üç farklı aerodinamik direnç katsayısı düzeltme seçeneği sunulmaktadır. Hıza bağlı deklarasyon düzeltmesinde, ortalama rüzgar koşulları yerden 4 m yükselikte ve 3 m/s hızında kabul edilmekte olup $C_D.A$ değeri üçüncü dereceden sıralı polinom fonksiyonları ile ifade edilir.

$$C_D.A(\beta) - C_D.A(0) = \alpha_1.\beta + \alpha_2.\beta^2 + \alpha_3.\beta^3 \tag{4.1}$$

Formül 4.1 ile ifade edilen formülasyonda gösterilen $\alpha_{1,2,3}$ katsayılarının taşıt tiplerine göre değerleri Tablo 4.1 ile verilmiştir.

Tablo 4.1 $\alpha_{1,2,3}$ Katsayılarının Taşıt Tiplerine Göre Değeri

	α_1	α_2	α_3
Kamyon	0.013526	0.017746	-0.000666
Çekici	0.0170125	0.072275	-0.004148
Yarı çekici	0.030042	0.040817	-0.002130
Otobüs	-0.000794	0.021090	-0.001090

Ön işleme adımında VECTO, $C_D.A$ değerini araç hızının bir fonksiyonu olarak hesaplamaktadır. Sınır tabaka etkisi göz önüne alınarak, ortam rüzgarının tüm olası yönlerinin, zemin seviyesinden maksimum araç yüksekliğine kadar hesaplanması aşağıdaki formülasyonlar yardımıyla yapılmaktadır.

$$C_{D,v}A(v_t) = \frac{1}{2.\pi.v_t^2.h_t} \int_{\alpha=0}^{\alpha=360} \int_{h=0}^{h=h_t} C_D A(\beta).v_r(h,\alpha)^2 dh d\alpha \tag{4.2}$$

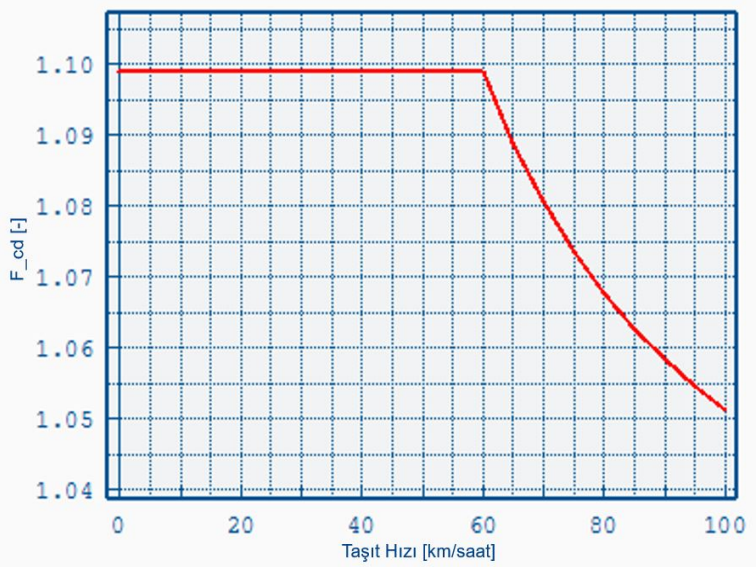
$$v_h(h) = \sqrt{(v_r(h).\cos\alpha + v_t)^2 + (v_r(h).\sin\alpha)^2} \tag{4.3}$$

$$v_r(h) = v_r(h_{ref}).(\frac{h}{h_{ref}})^2 \tag{4.4}$$

Bu düzeltme adımları yalnızca deklarasyon modu için geçerlidir. Kullanıcı tarafından tanımlaması yapılabilecek hıza bağlı düzeltme modu için kullanıcıdan taşıt hızını ve buna karşılık gelecek C_D değerinin iki sütunlu bir matris olarak tanımlanması istenmektedir. Bu girdiler yardımıyla VECTO Formül 4.5 ile gösterilen düzeltme adımını uygulayacaktır.

$$C_DA(v_t) = C_DA.F_{C_D}(v_t) \tag{4.5}$$

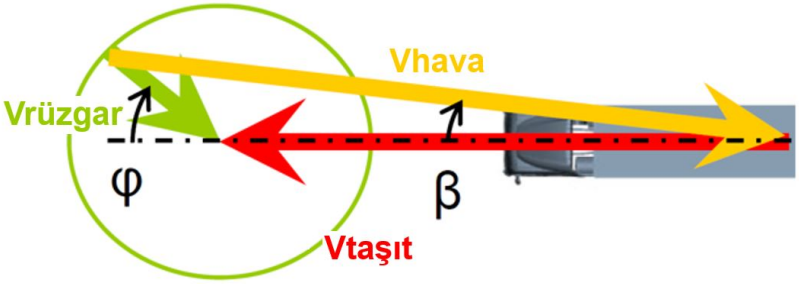
Formül 4.5 ile gösterilen F_{C_D} katsayısının taşıt hızına bağlı değişimini gösteren grafik Şekil 4.6 ile verilmiştir.



Şekil 4.6 F_{C_D} Katsayısının Taşıt Hızına Bağlı Değişimi

Üçüncü ve son düzeltme modu ise taşıt hızına bağlı sapma açısı üzerinden gerçekleştirilen düzeltme modudur. Bu yöntemde ölçülmüş rüzgar hızı ve yönü ile C_DA değerinde meydana gelen değişim test çevrimine tanımlanarak, modelde kullanılır.

$$C_DA(v_t) = C_DA + \Delta C_D(\beta) \tag{4.6}$$



Şekil 4.7 Rüzgar Hızının Taşıt Üzerindeki Bileşenleri

Taşıta etkiyen yuvarlanma direncinin hesaplanabilmesi için gerekli verilerin ve aks sistemine ait bilgilerin girişi aks ve teker sekmesinden yapılmaktadır. Teker ölçüleri, teker ataleti, tahrik akslarına ait yük dağılım oranları, ISO28580 kriterlerince girilecek

ham yuvarlanma direnç katsayısı değeri ile yine aynı standartta tanımlanan teker test yüküne ait kuvvet bilgisi bu yardımcıl sekme üzerinden tanımlanmaktadır.

VECTO, yuvarlanma direncini hızdan bağımsız olarak taşıt kütlesinin bir fonksiyonu olarak hesaplamaktadır. Toplam yuvarlanma direç katsayısı değeri Formül 4.7 ile verilen denklem üzerinden hesaplanmaktadır. Burada ifade edilen i notasyonu taşıtın akslarını ifade etmektedir.

$$\sum_{i=1}^{n} s_i.YDK_{ISO(i)}.(\frac{s_{(i)}.m.g}{\omega_i.F_{ZISO_{(i)}}})^{\beta-1} \tag{4.7}$$

Bu formülasyona ait notasyonlar Tablo 4.2 ile verilmiştir.

Tablo 4.2 Yuvarlanma Direnç Katsayısı Hesaplama Değişkenleri

Notasyon	**Açıklama**	**Girdi Türü**
YDK	Kullanıcı tarafından hesaplanan YDK	Hesaplanmış
s_i	Yük dağılım oranı	Kullanıcı girişi
$YDK_{ISO(i)}$	ISO28580 teker YDK	Kullanıcı girişi
ω_i	Teker sayısı	Kullanıcı girişi
$YDK_{ISO(i)}$	ISO28580' e göre teker YDK	Kullanıcı girişi
$F_{zISO(i)}$	ISO28580'e göre teker test yükü	Kullanıcı girişi
β	Sabit parametre=0.9	Sabit model parametresi

Taşıt sekmesinin güç aktarma alt başlığı üzerinden, geciktirici fren, tahrik şekli ve yavru şanzımana ait modellemeler yapılmaktadır.

Taşıtta harici bir geciktirici fren olması durumunda; "Geciktirici Fren Tork Kayıp Haritası" yardımıyla rölantide yaşanan tork kayıpları tanımlanabilmektedir. Bu harita geciktirici fren hızı ve tork kaybı olmak üzere iki değişkene sahiptir. Geciktirici fren için dört farklı seçenek sunulmaktadır. Bu seçenekler:

- Geciktirici fren yok
- Birincil geciktirici fren
- İkincil geciktirici fren
- Vites kutusu kayıp haritasına dahil edilmiş

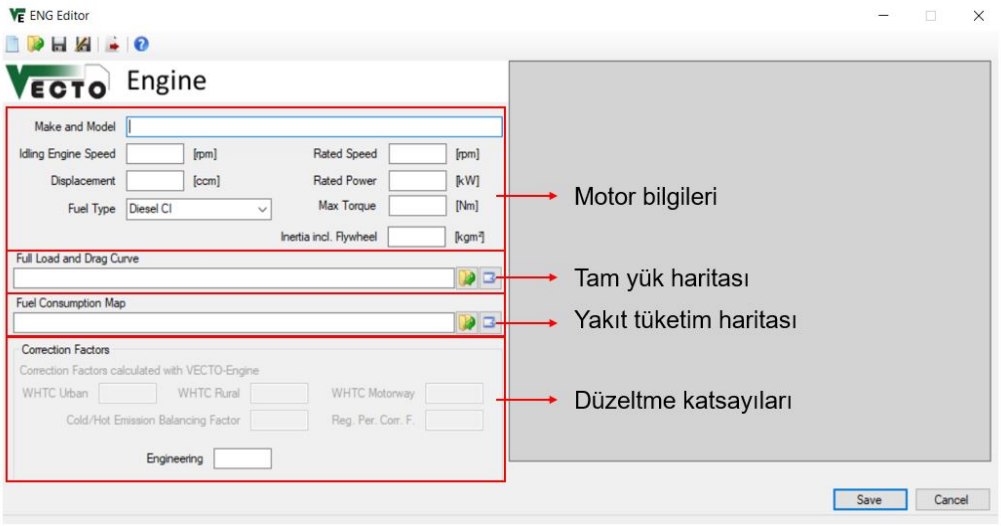
şeklindedir.

Birincil geciktirici fren (vites kutusundan önce) durumunda hız oranı geciktirici fren hızının motor hızına, ikincil geciktirici fren (vites kutusundan sonra) durumunda hız oranı geciktirici fren hızının kardan mili hızına oranı olarak tanımlanır. Hem birincil hem de ikincil geciktirici fren durumunda ”Geciktirici Fren Tork Kayıp Haritası” girilmelidir.

Yavru şanzıman modellemesinde, şanzıman tipinin seçilmesinin ardından kayıp haritası ve çevrim bilgilerinin girilmesi gerekmektedir. Bu harita motor hızı ve yavru şanzıman torkunu içermektedir.

Taşıt modellemenin son kısmı tork değerlerine sınırlama tanımlama işleminin yapıldığı ”Tork Limit” sekmesidir. Burada her bir vites için tork değerine sınır değer tanımlanabilmektedir.

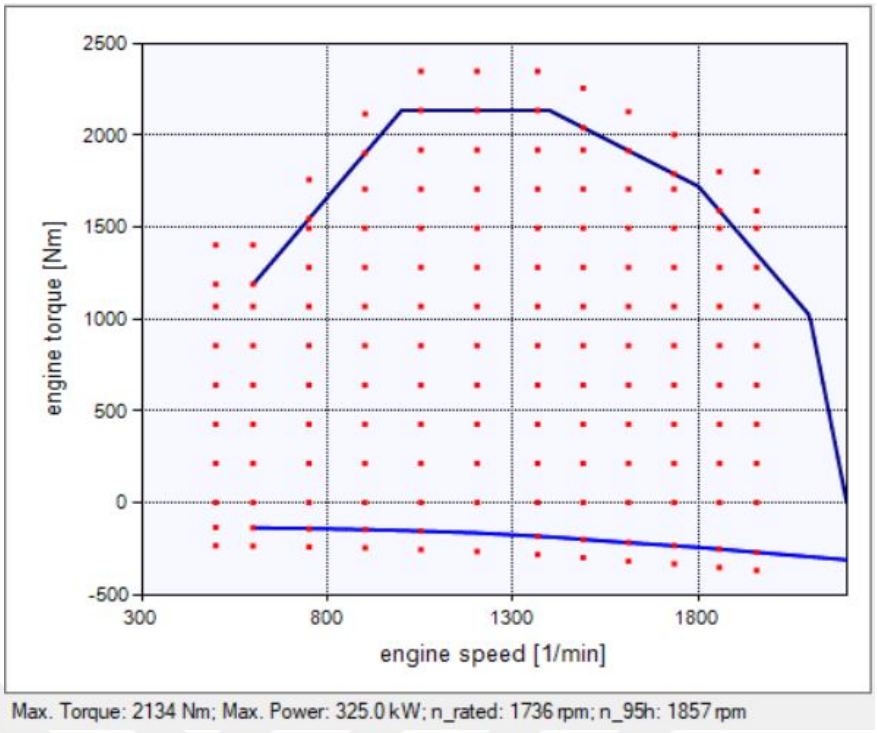
VECTO, motor modelleme ekranında; genel motor verileri ile motorun tam yük eğrisi, yakıt tüketim noktaları ve düzeltme katsayılarının girişlerinin yapılmasını sağlamaktadır.



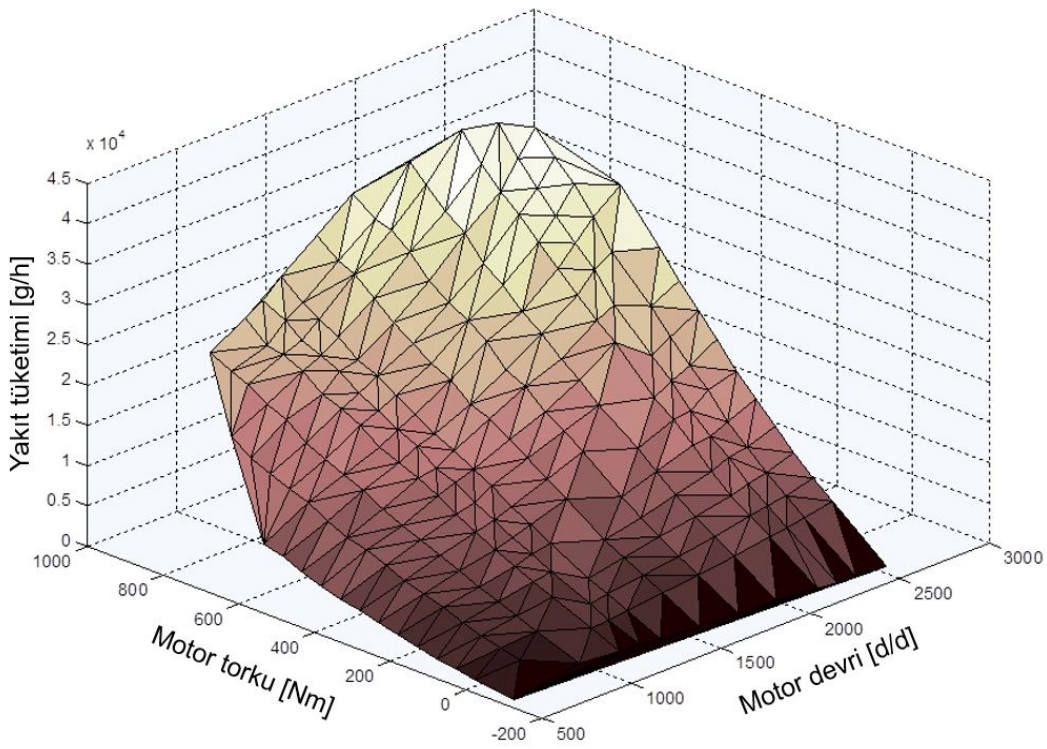
Şekil 4.8 Motor Modelleme Ekranı

Motorun tam yük eğrisinde, motor devrine göre; tam yük torku ve sürtünme torku değerleri girilmektedir. Tüketim haritasında ise net tork değerlerine karşılık gelecek tüketim noktaları g/s cinsinden girilmektedir. Motora dair verilerin girişinin tamamlanmasının ardından, motor haritası VECTO üzerinde Şekil 4.9’ da gösterildiği gibi oluşturulmaktadır.

Test çevrimine karşılık gelen yakıt tüketim noktalarının belirlenmesi işlemi interpolasyon ile yapılmaktadır. En verimli matematik üçgenleme yöntemlerinden olan delaunay üçgenlemesi ile oluşturulmuş motor haritası Şekil 4.10 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.9 VECTO Motor Haritası



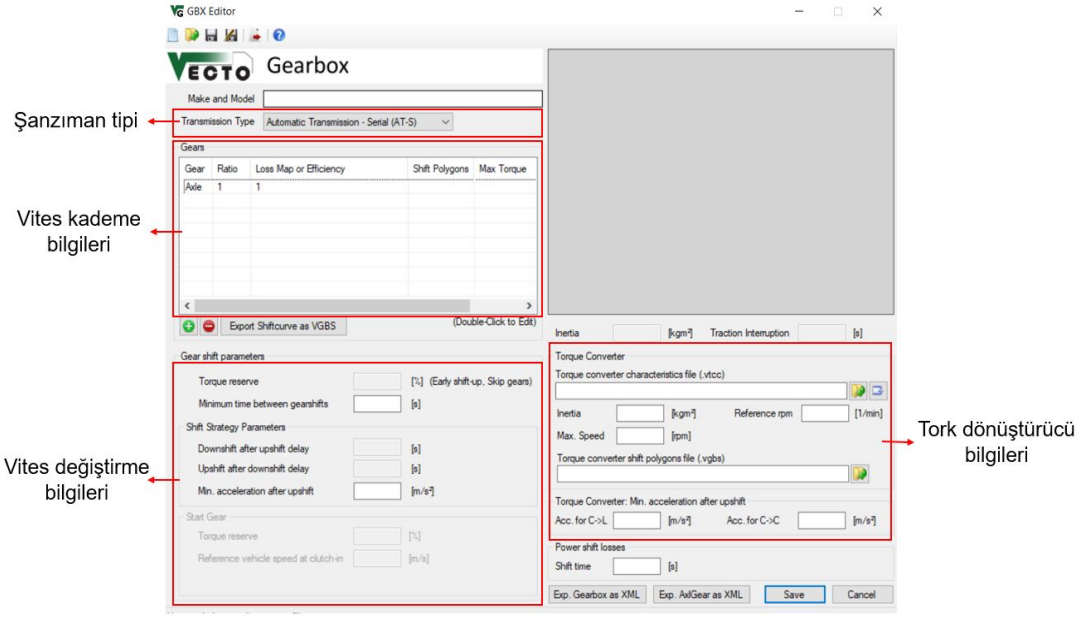
Şekil 4.10 Delaunay Üçgenlenmesi Metoduyla Oluşturulmuş Motor Haritası

Bu üçgenleme yöntemi ile yapılan interpolasyon işleminde aşağıdaki işlem adımları üzerinden tüketim hesaplaması yapılmaktadır.

1. Haritada üzerinde motor devri ve tork (x,y) ile belirlenmiş tüketim noktaları (z) bir üçgeni oluşturacak köşe noktaları olarak belirlenir ve bu verilerle üçgenler zinciri oluşturulur.
2. Hesaplama yapılacak üçgen üzerinde motor devri ve tork (x,y) yardımıyla yakıt noktası (z) aranmaktadır. Şayet bu noktalara karşılık bir tüketim noktası bulunmaz ise hesaplama iptal edilir.
3. Motor devri ve tork (x,y) bir üçgen üzerinde ise yakıt tüketim noktası (z) belirlenmiş olur.

Belirlenen yakıt tüketimi değerinin CO_2 emisyonuna dönüştürülmesi işlemi gravimetrik CO_2/YT faktörüyle hesaplanmaktadır. Bu noktada VECTO veritabanında bu dönüşüm katsayısı değeri 3.13 kgCO_2/kgyakıt ve yakıt alt ısıl değeri 42.7 MJ/kg şeklinde tanımlanmıştır.

VECTO, vites kutusu modelleme ekranında; şanzıman tipinin seçimi, her bir vites kademesi için değişkenlerinin ve haritalarının girişinin yapıldığı, vites geçiş parametrelerinin ve varsa tork konvertörü bilgilerinin girişinin yapıldığı sekmeler sunmaktadır.

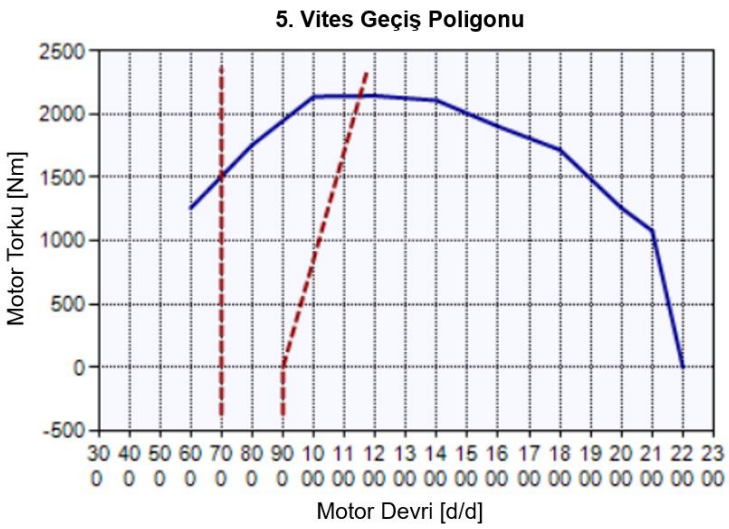


Şekil 4.11 Vites Kutusu Modelleme Ekranı

Manuel (MT), yarı manuel (AMT), seri otomatik (AT-S) ve güç ayrımlı otomatik (AT-P) olmak üzere dört farklı şanzıman tipi bulunan VECTO kütüphanesinde, farklı

şanzıman tiplerine göre veri giriş ekranları aktif ya da pasif olmaktadır. Seri otomatik şanzıman tipi için aktif olan sekmelerin çalışma prensipleri ve detaylı tanımları yapılacaktır.

Şanzıman tipinin seçiminin ardından her bir vites kademesine ait vites çevrim oranları, tork kayıp haritaları (giriş devri-giriş torku-tork kaybı), mekanik verimleri, vites geçiş poligonları, izin verilen azami tork ve hız bilgilerinin girişi yapılmaktadır. Bu verilerin girişinin ardından her bir vitese ait geçiş poligonları VECTO ekranında yapılan sınırlandırmalar ile birlikte gösterilmektedir. Şekil 4.12' de bu gösterimin bir örneği verilmiştir. Kırmızı kesikli çizgiler vites artış ve azalış eğrileridir. Talep edilen tork değerini sağlayacak en ekonomik motor devri için vites artırma ya da azaltma işlemi, vites kademesinin kesikli çizgiler aralığında kalıp kalmadığının kontrolüyle gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.12 Vites Geçiş Poligonu

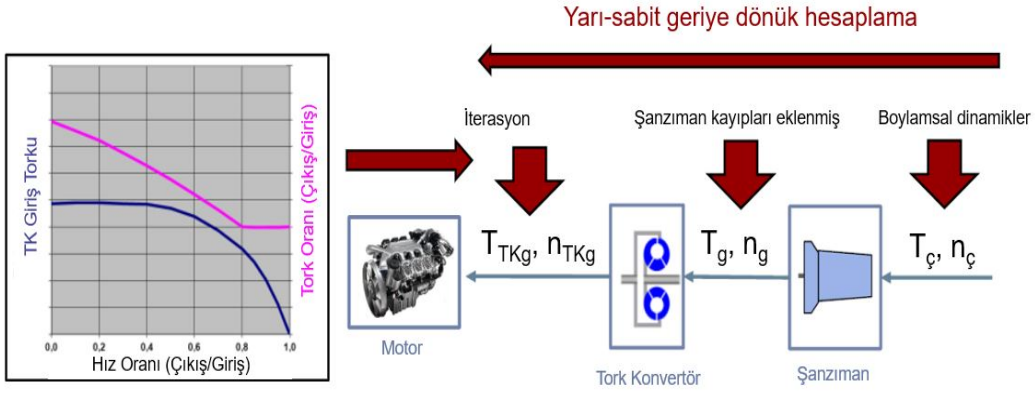
Yalnızca mühendislik modunda aktif halde bulunan atalet ve çekiş kesintisi sekmeleri, her bir vites için atalet momenti değerinin ve vites geçişleri esnasında yaşanan gecikmenin süre olarak girişi için kullanılmaktadır.

VECTO, vites geçişi için farklı stratejilerin modellenmesine olanak sağlamaktadır. Vites geçiş stratejileri sekmesi üzerinden; vites dalgalanmalarını önlemek adına vites artırma ve vites azaltma adımlarının ardından belirli bir süre vites geçişi engellenebilmektedir. Ayrıca bir vites artırma adımından sonra, taşıta asgari bir ivmelenme değeri tanımlanabilmektedir.

Başlangıç vitesi sekmesinde, aracın çalıştırılması için en uygun vitesi (araç durduktan sonraki ilk vites) bulmak için, gerçek bir yol eğimi, şanzıman kayıpları ve yardımcı güç

talebi ile birlikte belirli bir referans araç hızı ve referans ivmesi kullanılarak kurgusal bir yük durumu hesaplanmaktadır. Bu şekilde başlangıç vitesi hedef hızdan bağımsız olarak belirlenmektedir. VECTO, tanımlanan tork rezervini sağlayan mümkün olan en yüksek vitesi kullanmaktadır.

VECTO, tork konvertör modellemesinde, seçilen otomatik şanzıman tipinden bağımsız olarak, seri tork konvertör mimarisi kullanmaktadır. Şekil 4.13 ile bu mimariye ait işleyiş şeması gösterilmektedir.



Şekil 4.13 Tork Konvertör İşleyiş Mimarisi

Gerçek motor tork değeri kullanılarak, referans motor hızı için giriş torku hesaplaması gerekmektedir. Bu hesaplama için 4.8 ve 4.9 ile verilen formülasyonlar kullanılmaktadır. Bu formülasyonda v indisi hız oranını, μ indisi tork oranını ifade etmektedir. Referans devirdeki, referans hız değeri kullanıcı tarafından tanımlanan "Tork Konvertör Karakteristiği" haritasından gelmektedir.

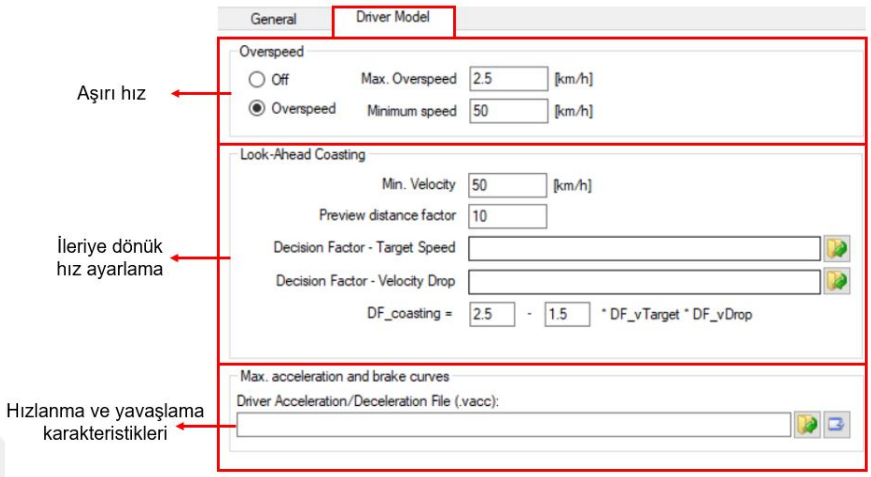
$$T_g = T_{ref(v)}.(\frac{n_g}{n_{ref}})^2 \tag{4.8}$$

$$\mu(v) = \frac{T_c}{T_g} \tag{4.9}$$

Taşıta, hareketi esnasında etkiyen dirençlerden kaynaklı oluşan güç talebinin yanı sıra; fan, direksiyon pompası, iklimlendirme elemanları, pnömatik sistemler ve elektrik sistemleri gibi ekipman ve sistemlerden kaynaklanan ekstra güç talebi de bulunmaktadır.

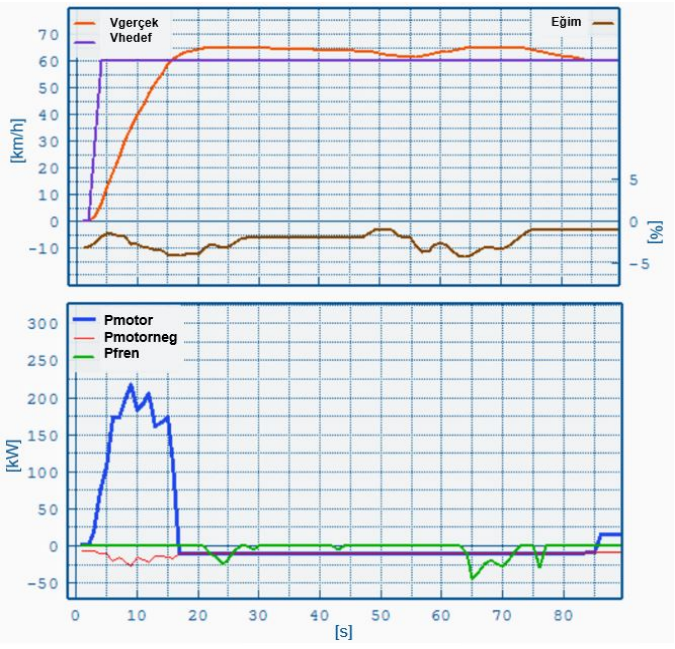
VECTO, bu ekstra yüklerin modellenmesi konusunda her sisteme ait detaylı veri girişi moduna sahip olmakla beraber tüm yüklerin toplamını sabit tek bir güç değeri olarak da modelle imkanı vermektedir.

VECTO, test çevrimi boyunca sanal bir sürücü modeli oluşturmaktadır. Bu modelleme ekranında taşıtın aşırı hızlanmasını sınırlayıcı etkenlerin, çevrimin bir sonraki adımına göre hız artış-azalış ayarlamasının yapılmasına ilişkin talebin, sürücünün hızlanma ve yavaşlama ivmelerinin girdileri tanımlanmaktadır.



Şekil 4.14 Sürücü Modelleme Ekranı

Aşırı hız modu, taşıtın toplam güç talebi sıfırın altına düşer düşmez devreye girer, yani araç negatif bir eğimde hızlanmaktadır. Debriyaj bağlı kalır, motor sürüş modundadır ve araç çevrimin hedef hızının ötesinde hızlanır. Hız sınırına (hedef hız artı tanımlanan azami aşırı hız değeri) ulaşıldığında, daha fazla hızlanmayı önlemek için mekanik frenler devreye girer.



Şekil 4.15 Aşırı Hızlanma Örneği

Şekil 4.15 ile aşırı hızlanmayı engelleyici yönteme sahip bir modelin çevrim boyunca göstermiş olduğu hız ve güç davranışları verilmiştir. 5 km/h hız değerine kadar aşırı hızlanmaya izin verilen araçta hedef hız değerinin (60km/h) üzerine ancak 5 km/h kadar aşırı hızlanma sınırı verilmiştir. Bu nedenle taşıt 65 km/h hıza ulaştığı anda mekanik frenler devreye girerek taşıtın hızını azaltmaktadır.

İleriye dönük yavaşlama, gerçek sürücü davranışını modellemeyi hedefleyen bir fonksiyondur. Test çevriminde sonraki adımları göz önünde bulundurarak, mekanik frenler devreye girmeden önce motor freniyle taşıtı yavaşlatmaya veya durdurmaya yönelik tepki göstermektedir. Yaklaşan bir hedef hız değeri için, taşıtın sahip olduğu anlık enerji ile bir sonraki adımda ihtiyacı olacak enerji karşılaştırılır. Bu enerji farkı ortalama yavaşlama kuvvetini tahmin etmek için kullanılır.

İleriye dönük yavaşlama işlemi, ortalama yavaşlama kuvvetinin ”Karar Faktörü” ile çarpım sonucunun gerekli yavaşlama kuvvetinden daha düşük olması durumunda başlamaktadır.

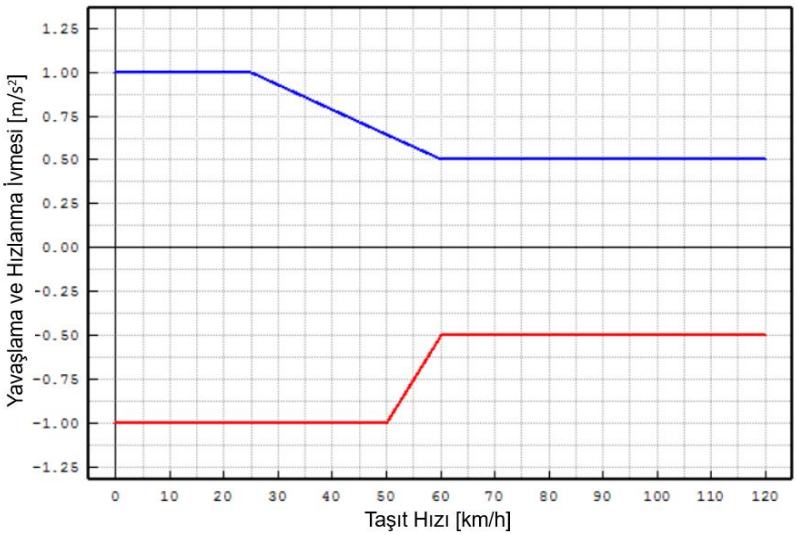
$$KF_{yavaslama} = 2,5 - 1,5.KF_{hiz}.KF_{hizdusumu} \tag{4.10}$$

İleriye dönük yavaşlama işleminin kontrolü, taşıt hızının girdi olarak verilen önizleme mesafe faktörü ile çarpımıyla ortaya çıkan mesafenin kalmasıyla başlamaktadır.

VECTO, gerçekçi bir sürücü davranışını modellemek için mevcut araç hızına bağlı olarak araç hızlanma ve yavaşlamasını sınırlamaktadır. Bu limitler, ”Hızlanma Sınırlayıcı Giriş Dosyası” ile tanımlanabilmektedir. Deklarasyon modunda bu önceden tanımlanmıştır.

- Motor gerekli gücü sağlayamıyorsa, araç tanımlanan sürücü sınırından daha yavaş hızlanabilir.
- Minimum yavaşlama her zaman frenlerle sağlanır.
- Ölçülen hız modunda bu sınırlar kullanılmaz, çünkü bu modun niteliği nedeniyle hızlar ve ivmeler zaten gerçek ölçülen değerlerdir, bu nedenle VECTO bunları sınırlama olmadan doğrudan kullanır.

Şekil 4.16 ile örnek bir modele ait hızlanma ve yavaşlama ivmelerinin taşıt hızına bağlı girilen değerlerini göstermektedir. Bu veriler ”Hızlanma Sınırlayıcı Giriş Dosyası” ile üç sütunlu bir harita olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 4.16 Taşıt Hızına Bağlı Hızlanma ve Yavaşlama İvmeleri

Bir test çevrimi, VECTO'da simüle edilmiş bir rotanın girdilerini tanımlamaktadır. Ya zamana bağlı ya da mesafeye bağlı olup sürüş döngüsü türüne göre farklı tipte girdilere sahiptir.

Deklarasyon modu için VECTO veritabanına yüklenmiş on farklı test çevrimi bulunmaktadır. Bu test çevrimleri farklı araç türlerine özgü olmakla beraber toplam rota uzunlukları 10 km'den 275 km' ye kadar artış göstermektedir.

Mühendislik modunda, ölçülmüş hız değerleri ya da vites kademe bilgileri yardımıyla zaman tabanlı test çevrimleri oluşturulabilmektedir. Bu çevrimlerde temel parametreler zaman ve hız olmakla beraber; eğim profili, yardımcıl yükler, rüzgar hızı, rüzgar yönü ve vites bilgileri de girdi olarak sağlanabilmektedir.

Tablo 4.3 Zamana Bağlı Test Çevrim Örneği

Zaman [s]	**Hız [km/h]**	**Eğim [%]**
0	0	2.95
1	2.2	2.97
2	3.5	3
3	6	3
4	7.9	2.9
5	10	2.8

Diğer VECTO modlarının kendilerine özgü test çevrimi tanımlamaları da mevcuttur. Yalnız motor modu için; zaman, devir ve güçten oluşan bir test çevrimi oluşturmak ve motoru tıpkı bir dinamometre üzerinde gibi test etmek mümkündür [17].

5
Metrobüs Hattında Kullanılan Şehir İçi Otobüslerin VECTO ile Modellenmesi

Tez çalışması kapsamında, Mercedes-Benz CapaCity şehir içi otobüsün modellemesi için VECTO-3.3.1.1492 mühendislik modu kullanılmıştır.

Bölüm 4' te VECTO' ya ait alt sekmelerin kullanım amaçları ve işleyiş prensipleri anlatılmıştır. Modelleme çalışmasının detayları da bu alt sekmelerin modellenmesini kapsamaktadır.

5.1 Taşıtın ve Aksın Modellenmesi

Taşıt modellemesine ilişkin girdiler Tablo 5.1 ile verilmiştir. Taşıt modellemesinde, aerodinamik direnç katsayısı için hıza bağlı bir düzeltme yapılmamıştır. Tüm hız değerlerinde C_D değeri sabit ve 0.8 olarak alınmıştır.

Tablo 5.1 Taşıt Modelleme Girdileri

Taşıt Tipi	Şehir içi otobüs
Çekiş Sistemi	8x2
Taşıtın Yüksüz Kütlesi	10500 kg
Römork Kütlesi	8500 kg
Yükleme Durumu	6500-13000 kg
Azami Kütle	32000 kg
Taşıt İz Düşüm Alanı	8.917 m^2
Aerodinamik Direnç Katsayısı	0.8
Dinamik Teker Yarıçapı	460 mm

Taşıtta ikincil tip geciktirici fren mevcuttur. Güç aktarma sekmesinde, bu geciktirici frene ait tork kayıp haritası [1100 d/d geciktirici hızı için 12.46 Nm, 1800 d/d geciktirici hızı için 16.56 Nm] ve kardan şaft oranı [1] girilmiştir.

Tablo 5.2 Aks ve Teker Bilgileri

Aks	Oransal Yük	Çift Teker	YDK	Fz ISO	Teker	Atalet	Aks Tipi
1	0.275	Hayır	0.00546	15000	275/70 R22.5	10	Tahrik yok
2	0.275	Hayır	0.00546	15000	275/70 R22.5	10	Tahrik yok
3	0.225	Evet	0.00546	15000	275/70 R22.5	20	Tahrik var
4	0.225	Evet	0.00546	15000	275/70 R22.5	20	Tahrik yok

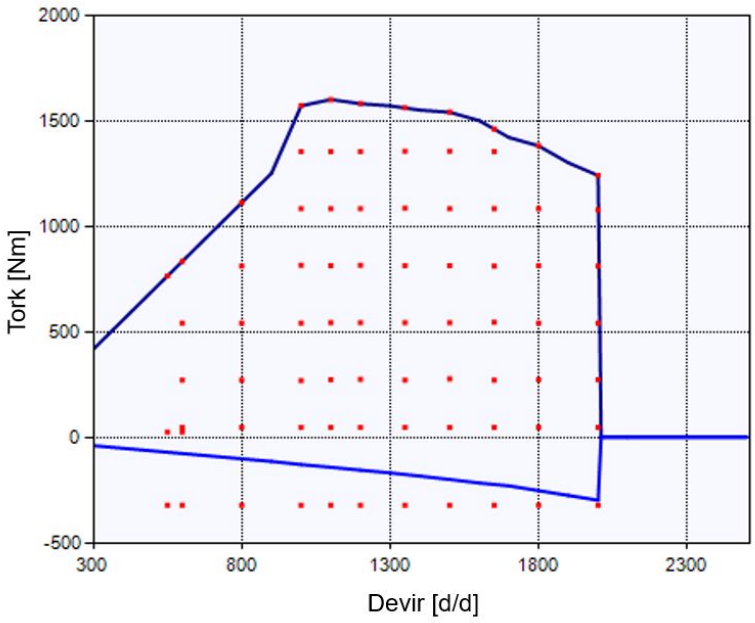
5.2 Motorun Modellenmesi

Motor modellemesine ilişkin girdiler Tablo 5.3 ile verilmiştir.

Tablo 5.3 Motor Modelleme Girdileri

Motor Rölanti Devri	560 d/d
Motor Hacmi	11967 cm^3
Yakıt Tipi	Dizel
Anma Devri	1800 d/d
Anma Gücü	260.2 kW
Azami Tork	1600 Nm
Volan Ataleti	2.16 kgm^2

Taşıt üzerinde bulunan motora ait motor haritası Şekil 5.1 ile gösterilmiştir. Haritada tanımlı tork değerleri, sürtünme düşüldükten sonra kalan net değerlerdir. Haritada işaretli kırmızı noktalar ise yakıt tüketim noktalarıdır. 1800 d/d motor hızında, 540 Nm tork talebinde motora ait tüketim değeri 7.1652 g/s' dir.



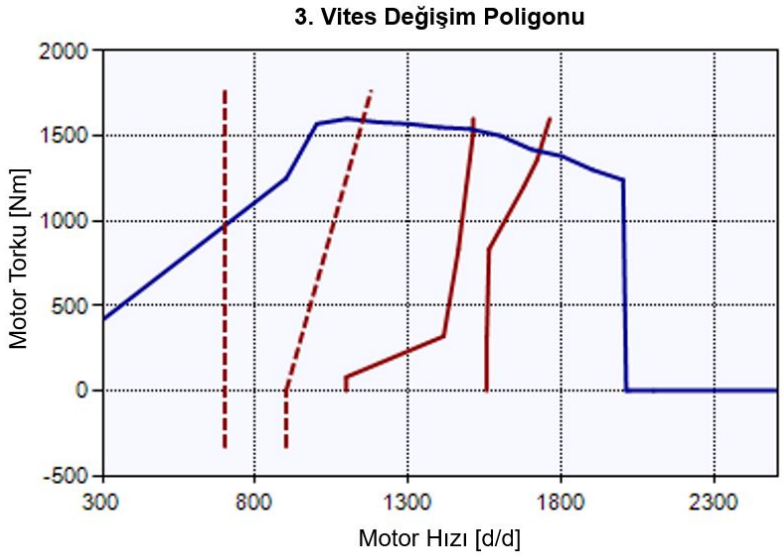
Şekil 5.1 Mercedes-Benz CapaCity Motor Haritası

5.3 Vites Kutusunun Modellenmesi

CapaCity otobüsler ZF Ecomat HP602 seri otomatik şanzıman (AT-S) ile donatılmıştır. Bu şanzımana ait çevrim oranları daha önce Bölüm 3, Tablo 3.3' te verilmiştir. Her bir vites kademesi için bu çevrim oranlarının yanı sıra, tork kayıp değerleri ve vites geçiş poligonları da modele girilmelidir.

Tork kayıp değerleri her viteste, hıza ve iletilecek torka göre değişiklik göstermektedir. Örneğin; 1. vites kademesinde 1000 d/d hızda 1000 Nm'lik tork iletimi sırasında 20.85 Nm' lik tork kaybı meydana gelirken, 1500 d/d hızda aynı tork iletim talebi için bu kayıp 21.27 Nm' ye çıkmaktadır.

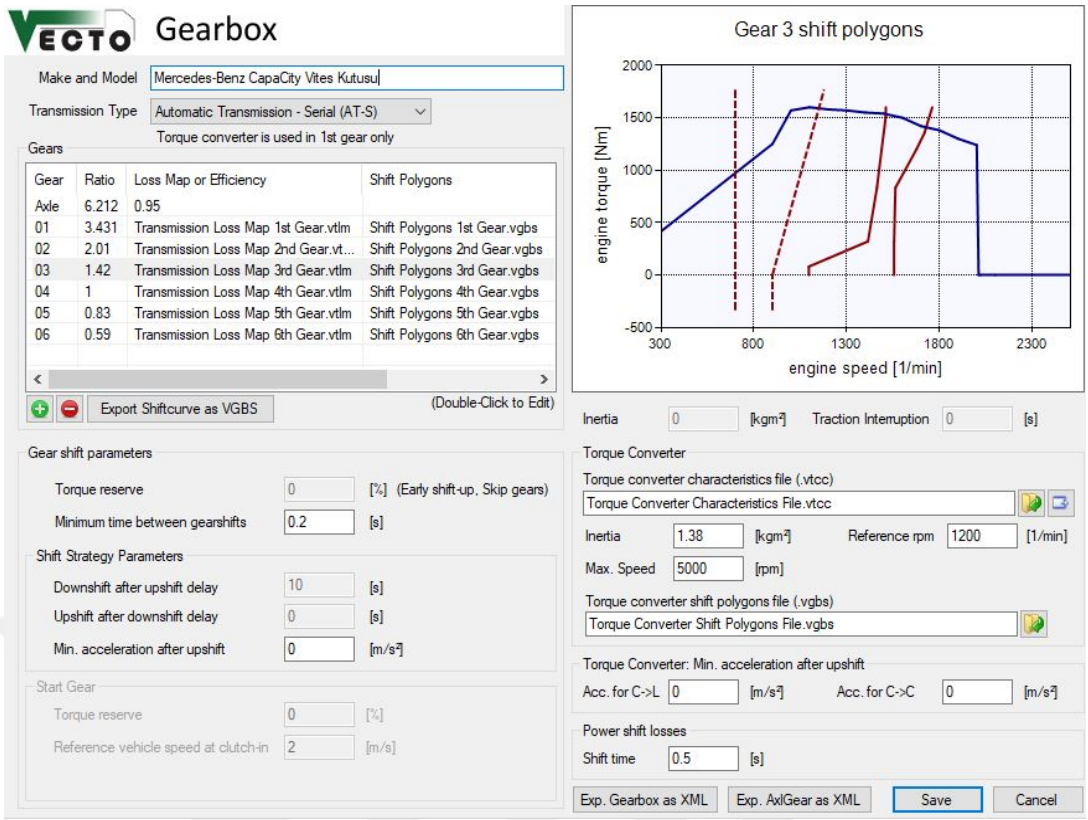
Vites geçiş poligonları her vites kademesinde, motor torkuna bağlı olarak artış ve azalış devirlerine sahiptir. Örneğin; 3. viteste, 1200 Nm motor torku ile seyrine devam eden CapaCity otobüste, vites düşürme devri 1488 d/d, vites yükseltme devri 1676 d/d' dır.



Şekil 5.2 3. Vites Değişim Poligonu

Vites geçişlerinde yaşanabilecek dalgalanmalarını engellemek için, vites artırma ve vites azaltma adımlarının ardından asgari 0.2 saniyelik vites geçiş zaman payı bırakılmıştır. Bu sayede çevrim üzerinde aynı zaman diliminde birden fazla vites geçişi önlenmiştir.

Otomatik vitesli taşıtlarda, şanzıman ile motor arasında yer alan, özellikle taşıtın ilk kalkış ve düşük hızdaki seyir durumlarında tork iletimine yardımcı olan devre elemanlarına tork konvertör adı verilmektedir. Güç aktarma sistemi üzerindeki bu yardımcı eleman, aynı zamanda kayıpların da meydana geldiği bir pompa-türbin mekanizmasıdır. Bu nedenle bu güç aktarma kayıplarının da bir harita yardımıyla modellenmesi gerekmektedir.



Şekil 5.3 CapaCity Vites Modelleme Ekranı

5.4 Yardımcıl Yüklerin Modellenmesi

Normal çalışma koşullarında, şehir içi hizmet veren bir taşıtta seyir dirençlerinin haricinde klima, fan, kompresör, su pompası, direksiyon pompası, alternatör ve elektrik sistemi gibi elemanların da motordan güç çektiği bilinmektedir. Bu harici yük talebinin niceliği çeşitli faktörlerin etkisi altındadır. Hat üzerindeki durak sayısından ötürü pnömatik kapıların kullanım sıklığı, mevsimsel koşullara göre iklimlendirme sistemlerinin devrede olup olmaması, çalışma saatlerine göre elektrik sistemi üzerinden motora iletilen güç talebinin büyüklüğü bu faktörlerden bazılarıdır.

Yardımcıl yüklerin büyüklüğü doğrudan yakıt tüketimine etki göstermektedir. Bu nedenle, taşıt modellemesinde bu yükler harici bir güç talebi olarak modele girilmelidir. Bu konuda yapılan literatür araştırmasına ilişkin bazı veriler aşağıdaki gibidir.

- Andersson tarafından yapılan doktora tez çalışmasında, bir otobüse ait yardımcıl yükün 9.3 kW olduğu, bu yüklerin direksiyon pompası, klima, kompresör ve 24V elektrik sistemi dahil edilerek hesaplandığı bilgisi yer almaktadır [18].
- Boulter ve McCrae tarafından 2007 yılında yayınlanan değerlendirme raporunda ağır hizmet taşıtları için yardımcıl yükün, azami gücün yaklaşık %2.5' i olduğu

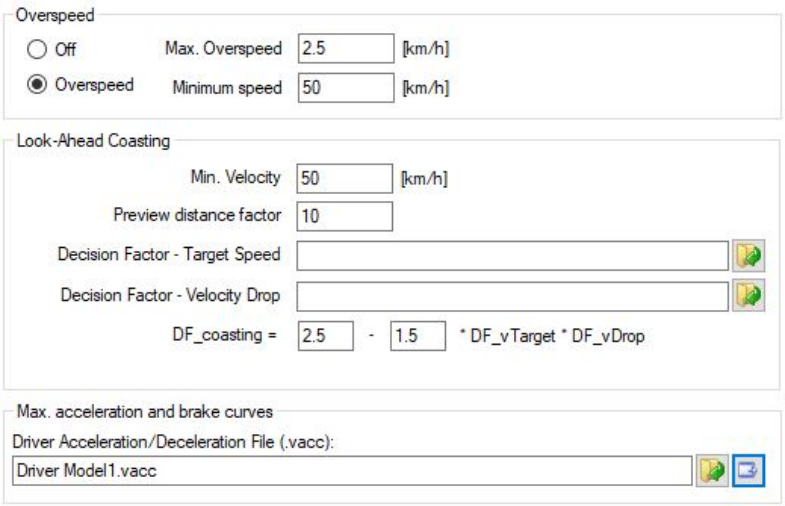
çıkarımı yapılmıştır. 260 kW' lık azami güce sahip bir taşıt için bu değer 6.5 kW' ya tekabül etmektedir [19] .

- Khan ve Clark tarafından yapılan ampirik çalışmada, yardımcıl yüklerin bir otobüs için yaklaşık 7.5 kW olduğu hesaplanmıştır [20].
- Vepsäläinen ve arkadaşları tarafından yapılan şehir içi otobüs modellemesi çalışmasında sürekli kapıların açılıp kapanmasının kompresör üzerinden motora yaklaşık 6 kW' lık bir yük bindirdiği ifade edilmiştir. Yine aynı çalışmada direksiyon pompası için yaklaşık 1.5 kW, klima için 11 kW, diğer yardımcıl ekipmanlar için ise yaklaşık 1 kW' lık bir güç talebi olduğu belirtilmiştir [21].

Gerçekleştirilen yol testleri esnasında kapıların kullanılmadığı, iklimlendirme elemanlarının devreye alınmadığı, 24V elektrik hattına asgari düzeyde yük bindirildiği ve yukarıda belirtilen literatür araştırmaları göz önünde bulundurulduğunda; CapaCity için belirtilen seyir şartlarında ideal yardımcıl yükün 3.5 kW olduğu varsayımı yapılmıştır. Bu değer sabit bir parametre olarak VECTO' ya tanımlanmıştır.

5.5 Sürücü Profilinin Modellenmesi

Sürücü profilinin oluşturulmasında taşıt üstü test verileri esas alınmıştır. 10 km/h hız aralıklarında alınan test sonuçlarının hızlanma ve yavaşlama ivmeleri irdelenmiştir. Bu aralıktaki ortalama değerin standart sapmasından 2.5 katı kadar uzaklaşan sonuçlar çıkarılarak azami hızlanma ve yavaşlama karakteristiklerine sahip bir sürücü profili oluşturulmuştur. Sürücü profiline ilişkin diğer bilgiler Şekil 5.4 ile verilmiştir.



Şekil 5.4 Sürücü Profili Modelleme Ekranı

5.6 Seyir Çevriminin Modellenmesi

Modellemenin son aşaması, taşıtın koşacağı seyir çevriminin modellenmesidir. Bu modelleme için taşıtın CAN hattından ve GPS üzerinden gelen veriler kullanılmıştır. Taşıt hızı CAN hattı üzerinden akan verilerden, yolun eğim durumunun belirlenmesi için gerekli yükselti bilgileri ise GPS vasıtasıyla alınan veriler üzerinden modellenmiştir. Avcılar-Beylikdüzü rotası bouyunca her iki yükleme durumu (6500kg ve 13000kg) için de seyir çevrimi oluşturulmuştur.

Seyir çevriminin oluşturulması hususunda ortaya çıkan en önemli problem GPS verilerinin aşırı gürültülü olması durumudur. Bu problemi ortadan kaldırmak için kaydedilmiş veriler;

- Her 15 m aralıkla alınan veriler üzerinden veri kümelerinin oluşturulması
- Bu kümelerin ortanca değerlerinin belirlenmesi
- Kaydedilen her mesafe için interpolasyon uygulanarak yükselti değerlerinin analiz edilmesi
- Eğim değerinin hesaplanması
- Bir sonraki değerle arasında ± %10 fark bulunan uç değerlerin atılması

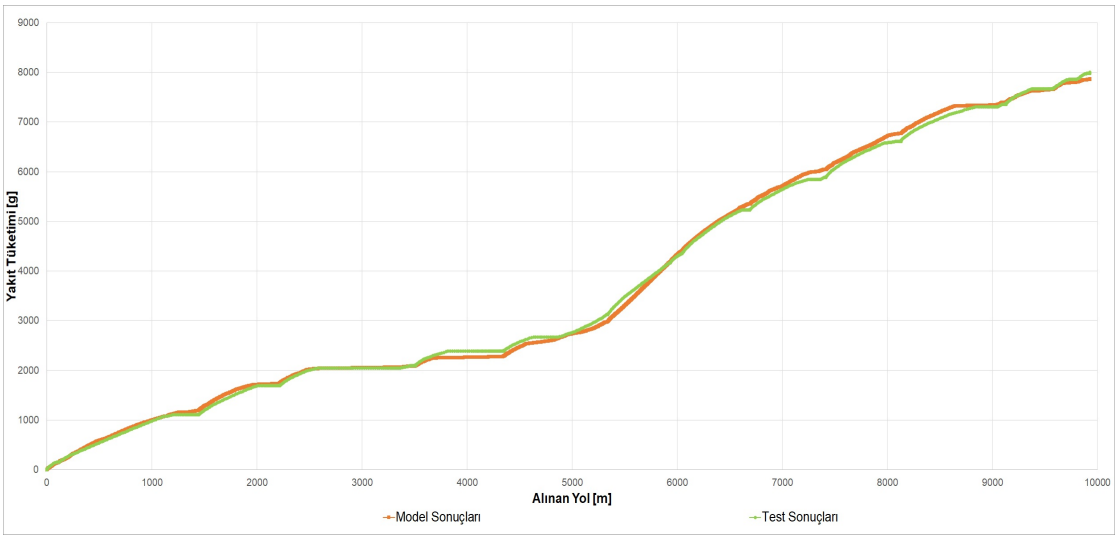
işlem adımları takip edilerek filtrelenmiştir.

6
Sonuç ve Öneriler

VECTO, koşulan çevrimin sonuçlarını .vsum ve .vmod uzantılı iki dosya ile vermektedir. Bu dosyalardan .vsum uzantılı olan sonuç dosyası verilerin kümülatif ve ortalama halini, .vmod dosyası ise kümülatif verileri oluşturan bileşenleri göstermektedir.

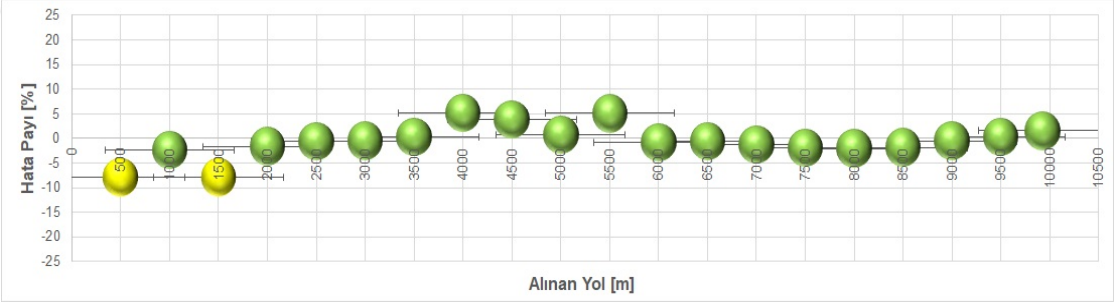
Tez çalışması kapsamında; modellemesi yapılan Mercedes-Benz CapaCity şehir içi otobüsün, 6500 ve 13000 kg yükleme şartları altında, Avcılar-Beylikdüzü rotası boyunca yaptıkları seyir VECTO ile modellenmiştir. Bu model sonuçları ile taşıt üstü testlerden alınan yakıt tüketimi ve CO_2 emisyonu verilerinin doğrulanması hedeflenmiştir. Araç üstü testlerden alınan veriler ile model sonuçlarının alınan yola göre kümülatif olarak detaylı karşılaştırılması amacıyla tüm veriler mesafe tabanında analiz edilmiştir.

Avcılar-Beylikdüzü rotasında 13000 kg yükleme şartında (toplam taşıt kütlesi 32000 kg) alınan taşıt üstü veriler ile VECTO model sonuçlarının yakıt tüketimlerinin karşılaştırılmasına ilişkin grafik Şekil 6.1 ile verilmiştir.



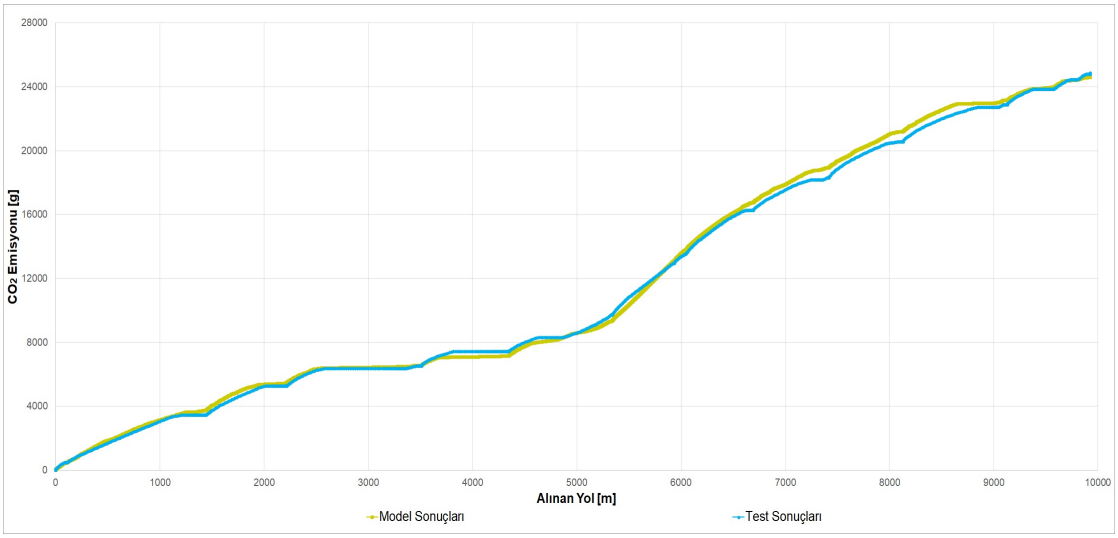
Şekil 6.1 Yakıt Tüketimlerinin Karşılaştırılması (32t-Model ve Test Sonuçları)

Taşıt üstü testlerden alınan sonuçlarda, Avcılar-Beylikdüzü rotasında 13000 kg yükleme durumunda toplam yakıt tüketimi değeri 7996.6 gram olarak ölçülmüştür. Aynı şartların modellendiği VECTO simülasyon sonucunda ise yakıt tüketimi değeri 7872.9 gram olarak hesaplanmıştır. Gerçek test sonuçları ile model sonuçları arasında %1.5469' luk bir hata payı mevcuttur. Bu değer hedeflenen hata payı aralığındadır. Ancak toplam tüketimler arasındaki bu hata payı ile doğrulama işleminin tamamlandığını söylemek mümkün değildir. Modelin doğruluğu, sonuçlar üzerinde, birden fazla nokta ile kontrol edilmelidir. Bu amaçla kümülatif yakıt tüketimi değerleri her 500 metre aralıklarla oluşturulmuş veri noktaları ile kontrol edilmiştir. Toplam 20 adet noktadan kontrolü sağlanan yakıt tüketimi değerlerine ilişkin hata payları Şekil 6.2 ile verilmiştir. Bu hata payları incelendiğinde, tüketim verilerinin birbirlerinden uzaklaşmadığı görülmektedir.



Şekil 6.2 Yakıt Tüketimlerinin Karşılaştırılmasına Ait Hata Payları (32t-Model ve Test Sonuçları)

Çalışma kapsamında, CO_2 emisyonlarının da doğrulanması hedeflenmiştir. PEMS ile ölçümü yapılmış CO_2 emisyonu değeri gerçek testlerde 24856.6 gramdır. VECTO model sonuçlarında ise bu değer 24642.2 gram olarak hesaplanmıştır.

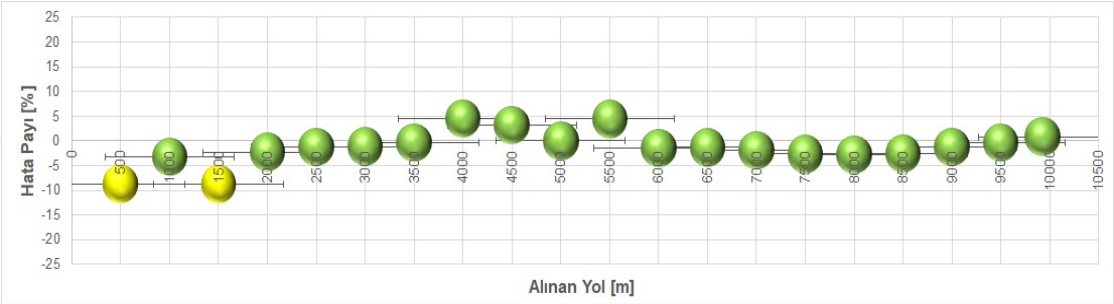


Şekil 6.3 CO_2 Emisyonlarının Karşılaştırılması (32t-Model ve Test Sonuçları)

Gerçek test sonuçları ile model sonuçları arasında %0.8625' lik bir hata payı mevcuttur. Bu değerlerin kümülatif olarak karşılaştırılması Şekil 6.3 ile yapılmıştır.

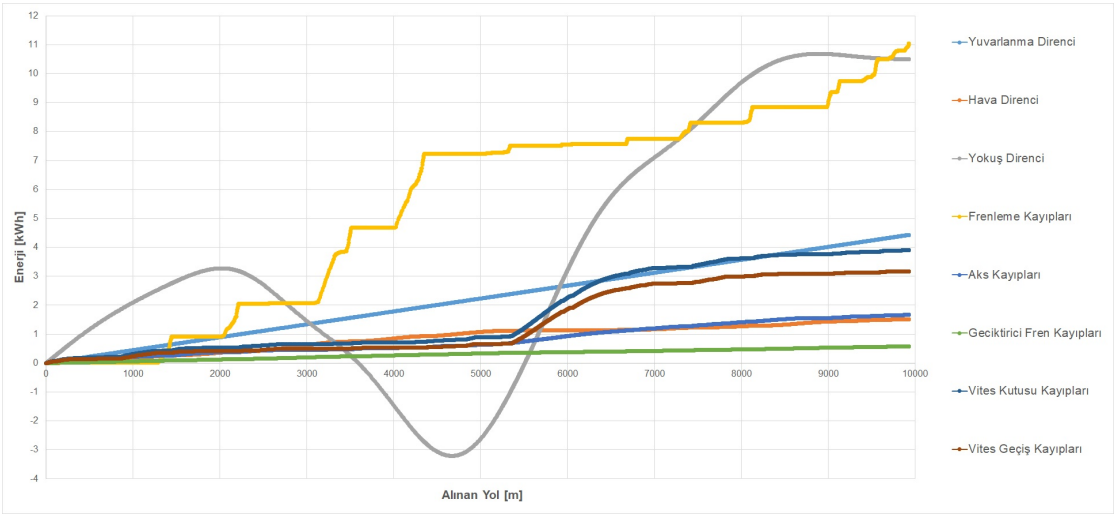
Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi VECTO, CO_2 emisyonlarının hesaplanmasında sabit bir katsayısı kullanmakta olup, bu değer 3.13' tür. Yani 1 gramlık yakıt tüketimine karşılık olarak 3.13 gram CO_2 emisyonu salınımı yapıldığı kabul edilmektedir.

Yakıt tüketimlerinin doğrulanması amacıyla gerçekleştirilen 20 noktalı kontrol işlemi, CO_2 emisyonlarının doğrulanması için de kullanılmıştır. Doğrulama amaçlı gerçekleştirilen bu kıyaslamaya ilişkin hata payları ise Şekil 6.4 ile verilmiştir.



Şekil 6.4 CO_2 Emisyonlarının Karşılaştırılmasına Ait Hata Payları (32t-Model ve Test Sonuçları)

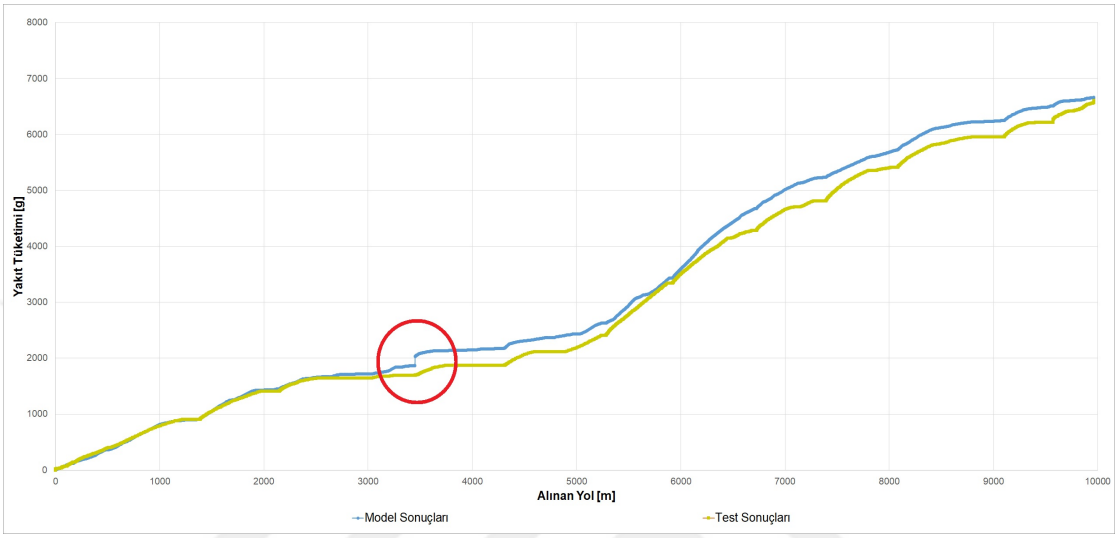
Taşıta, hareketi boyunca etki eden dirençlerin ve meydana gelen kayıpların incelenmesi için, anlık olarak enerji hesaplamaları yapılmıştır. Bu kayıpların enerji bazlı kümülatif sonuçları Şekil 6.5 ile verilmiştir.



Şekil 6.5 Taşıta Hareketi Boyunca Etki Eden Dirençlerin ve Kayıpların Enerji Karşılıkları (32t-Model Sonuçları)

Verilen enerji diyagramındaki tüm parametreler VECTO model sonucu üzerinden alınmıştır.

Avcılar-Beylikdüzü rotasında 6500 kg yükleme şartında (toplam taşıt kütlesi 25500 kg) gerçekleştirilen testlerin doğrulanması amacıyla kurulan VECTO modelinde; yükleme şartı, test çevrimi ve sürücü modeli değiştirilmiştir. Ancak testler esnasında toplanan GPS datalarında meydana gelen bozulmalar nedeniyle model çalışmasının sonuçlarında hata meydana gelmiştir. Şekil 6.6' da bu hatalı yakıt tüketimine ilişkin veriler paylaşılmıştır.



Şekil 6.6 Hatalı Yakıt Tüketimi Karşılaştırılması (25.5t-Model ve Test Sonuçları)

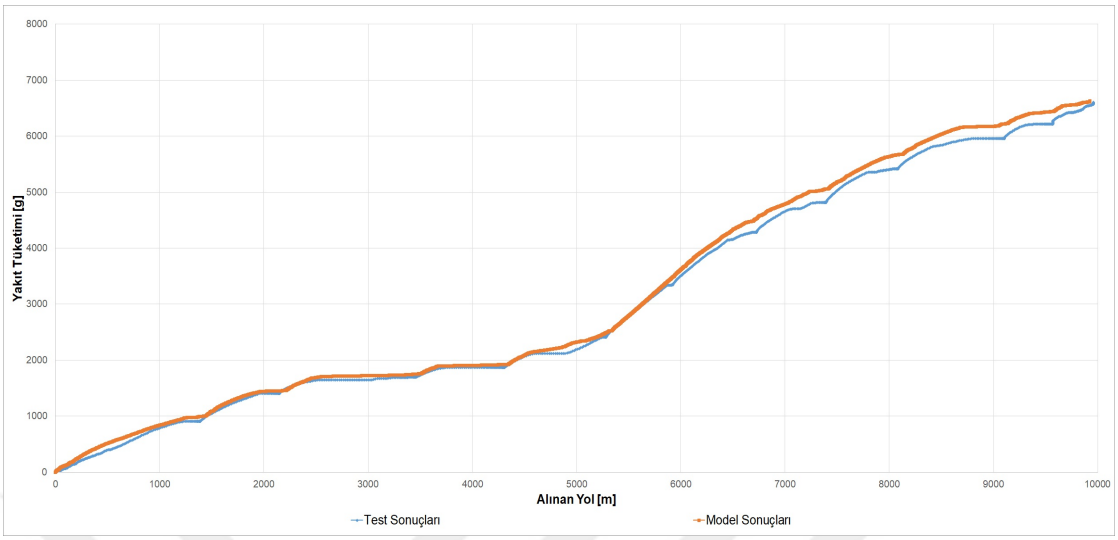
Seyrin 3400. metresinde yükselti verilerinde meydana gelen bozulmalar, doğrudan eğim hesabına ve yakıt tüketimine yansımıştır. Şekil 6.6' da, kırmızı daire içerisine alınmış olan kırılma noktası bu hatayı göstermektedir.

6500 kg yükleme şartının modellenebilmesi ve doğrulama çalışmasının yapılabilmesi için 13000 kg yükleme şartında alınan yol verileri kullanılmıştır. Bu iki seyir şartı arasında meydana gelen değişiklikler yalnızca yükleme durumu ve sürüş karakteristiği olduğundan, 13000 kg yükleme durumundaki yol verilerinin kullanılması bir sorun oluşturmayacaktır. Bu sayede kurulan model ile toplam yakıt tüketimi değeri 6623.3 gram olarak hesaplanmıştır. Taşıt üstü testlerde ise yakıt tüketimi değeri 6604.6 gram olarak ölçülmüştür. İki sonuç arasında %0.2831' lik bir hata payı mevcuttur. CO_2 emisyonu değerleri ise modelde 20731 gram olarak hesaplanmış, testlerde ise 20585.4 gram olarak ölçülmüştür. Buradaki hata payı ise %0.7073' tür.

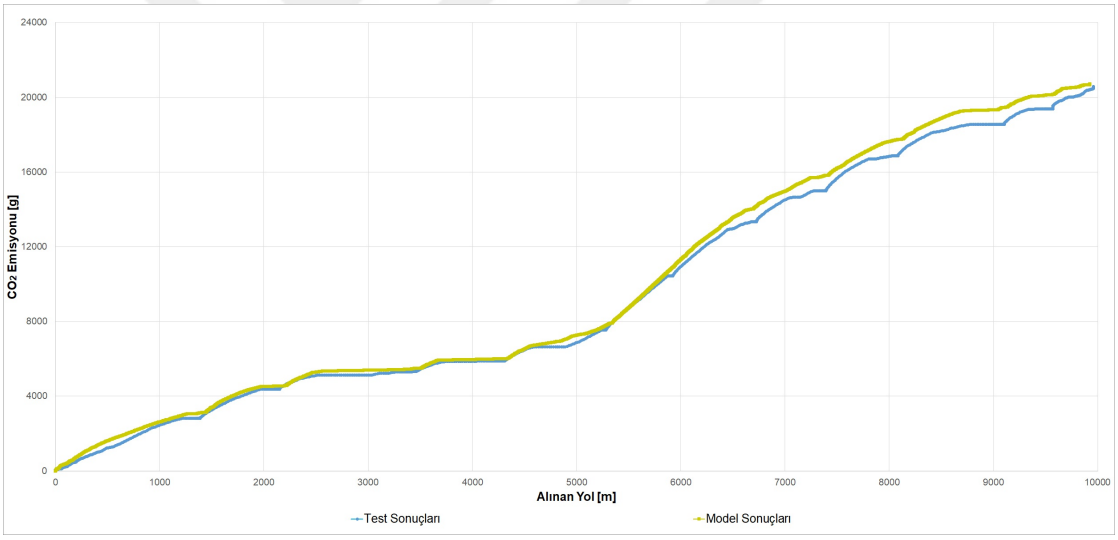
Yakıt tüketimlerinin karşılaştırılmasına ilişkin kümülatif sonuçlar Şekil 6.7 ile, CO_2 emisyonlarının karşılaştırılmasına ilişkin kümülatif sonuçlar ise Şekil 6.8 ile verilmiştir. Her iki karşılaştırma sonucu için de hata payları anlamlı değer aralığındadır.

Yol verilerinin, 6500 kg yükleme şartındaki gerçek tüketim verileriyle arasında yaklaşık 20 metrelik bir mesafe kayması mevcuttur. Bu değer yaklaşık 10 km' lik bir

uzunluğa sahip rota için binde iki gibi bir değer olup ihmal edilebildir ve karşılaştırma verilerinde görülebilmektedir.



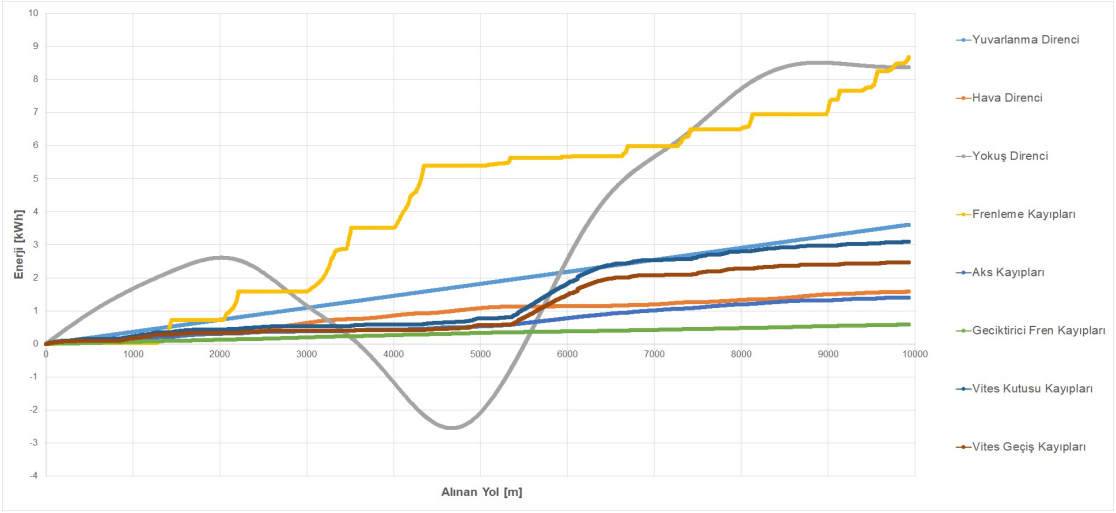
Şekil 6.7 Yakıt Tüketimlerinin Karşılaştırılması (25.5t-Model ve Test Sonuçları)



Şekil 6.8 CO_2 Emisyonlarının Karşılaştırılması (25.5t-Model ve Test Sonuçları)

Farklı iki yükleme koşulu göz önüne alındığında; taşıt kütlesinde meydana gelen yaklaşık %20' lik azalma (toplam taşıt kütlesi 32 tondan 25.5 tona düşmüştür) doğrudan direnç kaybından kaynaklı enerjiler üzerine yansımıştır. Kütleye birinci dereceden bağlı; yuvarlanma direncinde %18.5, yokuş direncinde %20.3, frenleme kaybında %21.3 ve vites kutusu kayıplarında %20.8' lik bir azalma söz konusu olmuştur. Öte yandan taşıt kütlesine doğrudan bağlı olmayan hava direnci gibi dirençlerde ise neredeyse herhangi bir değişiklik söz konusu olmamıştır.

Taşıta, hareketi boyunca etkiyen direnç ve kayıpların enerji karşılıkları Şekil 6.9 ile verilmiştir.



Şekil 6.9 Taşıta Hareketi Boyunca Etki Eden Dirençlerin ve Kayıpların Enerji Karşılıkları (25.5t-Model Sonuçları)

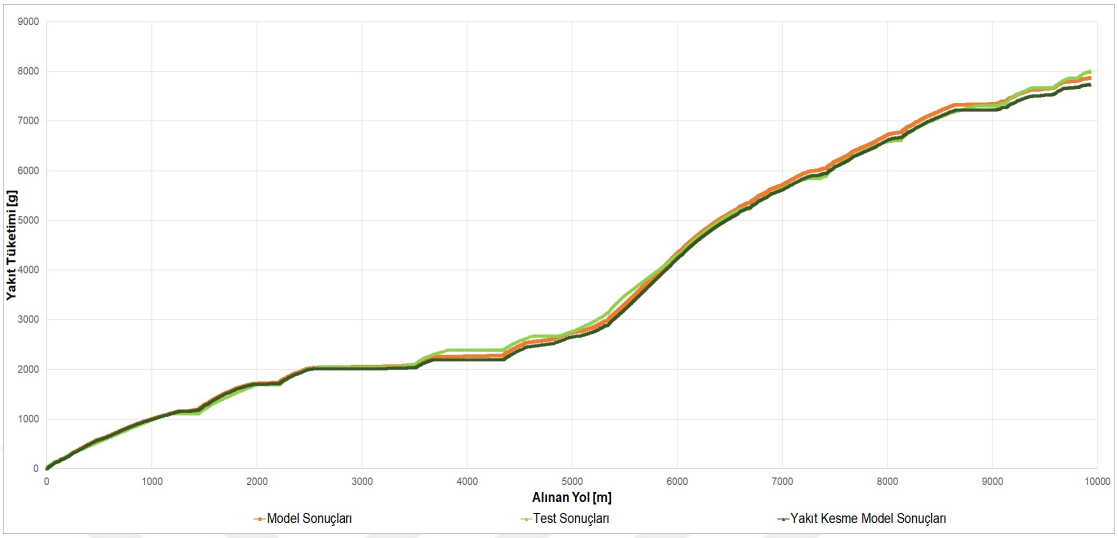
Yapılan her iki modelleme çalışması da göz önünde bulundurulduğunda; yakıt tüketimleri ve CO_2 emisyonları referans alınarak yapılan doğrulama çalışmalarının tamamının hedef hata payı aralığında ve %2' nin altında olduğu görülmüştür.

Çalışmanın bundan sonraki aşamasında; 13000 kg yükleme şartı (toplam 32 ton araç kütlesi) baz alınarak yakıt tüketime etki eden bazı parametrelerin ve yakıt ekonomisine yönelik olarak geliştirilen yakıt kesme teknolojisinin yakıt tüketimi ve CO_2 emisyonları üzerine etkisi irdelenecektir.

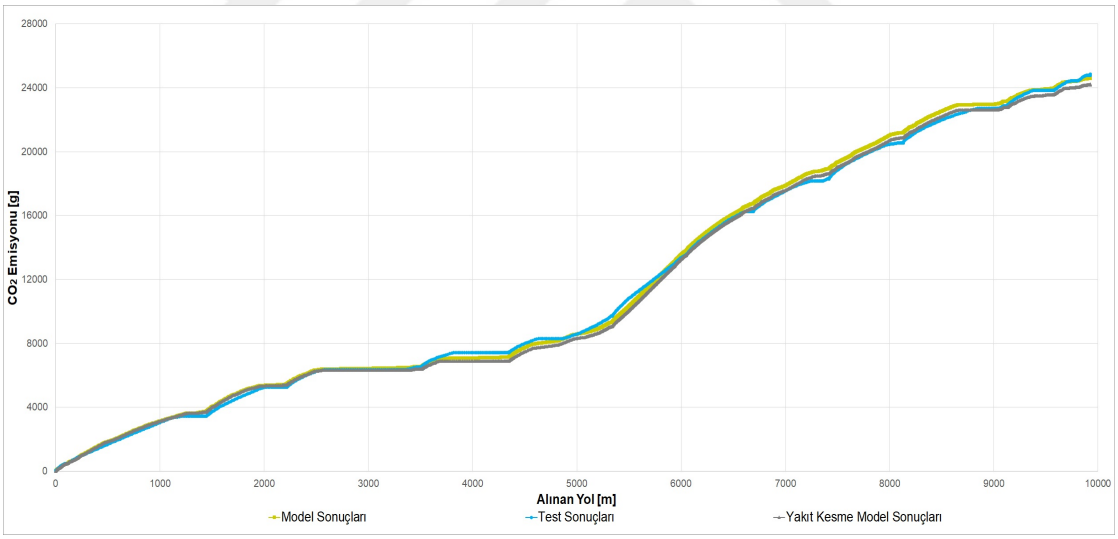
Taşıtlarda yakıt ekonomisi amacıyla, farklı şartlar dikkate alınarak, silindirlere gönderilen yakıtın kesilmesi hedeflenebilmektedir. Yakıt kesme ya da literatürdeki karşılığıyla "fuel cut-off" olarak isimlendirilen bu sistemin modele uygulanması motordan talep edilen güç yani tork ile ilişkilendirilmiştir. Seyir şartına göre talep edilen tork miktarının sıfırın altına düşmesi bir başka deyişle taşıtın hareketine karşı etki eden tüm seyir dirençlerinin toplamının negatif olması ve motor hızının 800 d/dk' nın üzerinde olması durumunda; silindirlere yakıt enjeksiyonu kesilerek yakıt ekonomisi hedeflenmiştir. VECTO model sonuçları üzerinden, negatif tork talebine karşılık gelen tüketim noktalarında yakıt tüketimi değerleri sıfırlanmıştır. Bu sayede toplam tüketim değeri 7742.5 gram olarak hesap edilmiştir. Yakıt kesme işlemi uygulanmadan koşulan seyir çevriminin toplam tüketim değerinin 7872.9 gram olduğu hesaba katılırsa; yakıt kesme teknolojisinin, belirtilen seyir şartında yaklaşık %1.66' lık yakıt ekonomisi sağlayabileceği görülmektedir. CO_2 emisyonlarının hesaplanmasında, VECTO sabit dönüşüm katsayısı kullandığından yüzdesel fark aynı kalmaktadır.

Yakıt kesme teknolojisinin toplam yakıt tüketimi üzerine etkisinin karşılaştırmalı

sonucu Şekil 6.10, toplam CO_2 salınımı üzerine etkisi ise Şekil 6.11 ile gösterilmiştir. Grafikler hem gerçek test sonuçlarını, hem standart model sonuçlarını, hem de yakıt kesme teknolojisi kullanıldığı varsayılan model sonuçlarını içermektedir.



Şekil 6.10 Yakıt Tüketimlerinin Karşılaştırılması (32t-Model, Test ve Yakıt Kesme Model Sonuçları)



Şekil 6.11 CO_2 Emisyonlarının Karşılaştırılması (32t-Model, Test ve Yakıt Kesme Model Sonuçları)

Yakıt tüketimine etki eden önemli parametrelerden biri de taşıtın hızlanma ve yavaşlama karakteristikleridir. Bu değişkenler doğrudan sürücü kontrolündedir.

Gerçek yol testleri ile sürücüye ait hızlanma ve yavaşlama ivmeleri belirlenerek oluşturulan sürücü modeline ait hızlanma ve yavaşlama ivmeleri Tablo 6.1 ile verilmiştir. Bu değerler Avcılar-Beylikdüzü rotasında 13000 kg yükleme ile gerçekleştirilen testlere aittir. Bölüm 5.5' te sürücü modelinin oluşturulmasına ilişkin detaylı bilgiler verilmiştir.

Tablo 6.1 Gerçek Sürücü İvmelenme Karakteristikleri

Taşıt Hızı	Pozitif İvmelenme	Negatif İvmelenme
0	1.48334	-1.97862
10	1.31334	-2.10945
20	1.19028	-1.08723
30	1.00889	-2.13695
40	0.88084	-1.28334
50	0.76806	-0.83779
60	0.68778	-0.82418
70	0.31556	-0.84362
80	0.31556	-0.84362

Sürüş karakteristiğinin yakıt tüketimi üzerindeki etkisinin incelenmesi için iki yeni sürücü modeli daha oluşturulmuştur. "Sürücü1" olarak isimlendirilen ilk model 1 m/s^2 daha agresif ivmelenme değerlerine sahiptir ve bu değerler Tablo 6.2 ile verilmiştir.

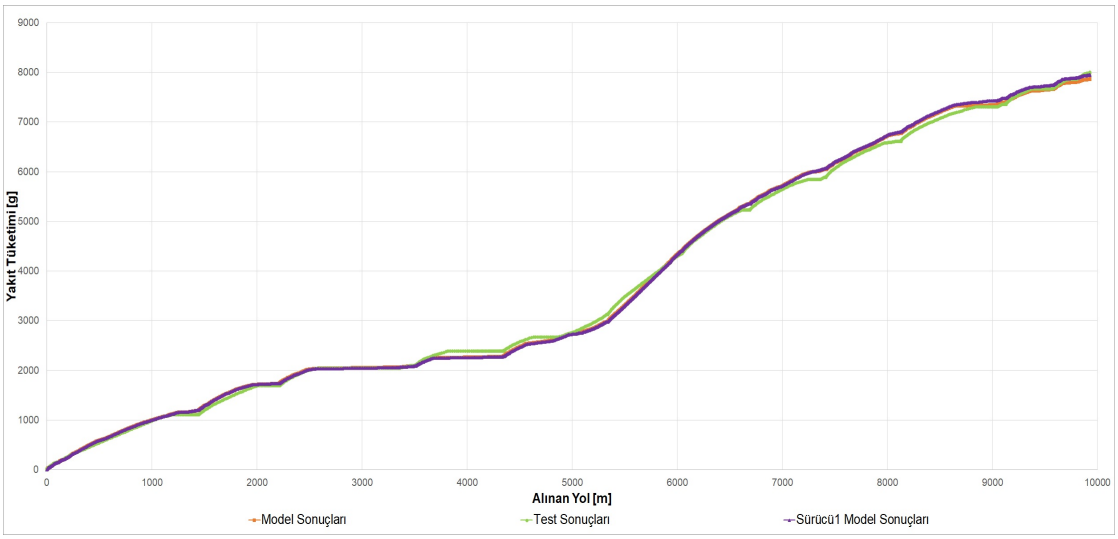
Tablo 6.2 Model Sürücü1 İvmelenme Karakteristikleri

Taşıt Hızı	Pozitif İvmelenme	Negatif İvmelenme
0	2.48334	-2.97862
10	2.31334	-3.10945
20	2.19028	-2.08723
30	2.00889	-3.13695
40	1.88084	-2.28334
50	1.76806	-1.83779
60	1.68778	-1.82418
70	1.31556	-1.84362
80	1.31556	-1.84362

Avcılar-Beylikdüzü rotasında 13000 kg yükleme şartında, gerçek sürücü modeli ile VECTO' da koşulan simülasyon sonuçlarına göre; yakıt tüketimi değeri 7872.9 gram olarak bulunmuştu. Sürücü1 modeli ile koşulan simülasyon sonuçlarında ise toplam yakıt tüketimi değeri 7952.85 gram olarak bulunmuştur. Sonuçlar karşılaştırıldığında 1 m/s^2' lik ivmelenme agresyonu yakıt tüketimi üzerinde yaklaşık 80 gramlık artışa neden olmuştur. Bu değerin yüzdelik karşılığı ise yaklaşık olarak %1.015'tir.

Yakıt tüketiminde meydana gelecek 80 gramlık artışın, CO_2 emisyonu karşılığı ise yaklaşık olarak 250 gramdır. VECTO "Sürücü1" model sonuçlarına göre toplam CO_2 emisyonu değeri 24892.4 gram olarak bulunmuştur.

Taşıt üstü test sonuçları, gerçek sürücü modeli sonuçları ve "Sürücü1" model sonuçlarının yakıt tüketimi değerlerinin alınan yola göre, kümülatif olarak karşılaştırılmasına ilişkin sonuçlar Şekil 6.12 ile verilmiştir.



Şekil 6.12 Yakıt Tüketimlerinin Karşılaştırılması (32t-Model, Test ve ”Sürücü1” Model Sonuçları)

”Sürücü2” olarak isimlendirilen ikinci sürücü modeli ise 2 m/s^2 daha agresif ivmelenme değerlerine sahiptir ve bu değerler Tablo 6.3 ile verilmiştir.

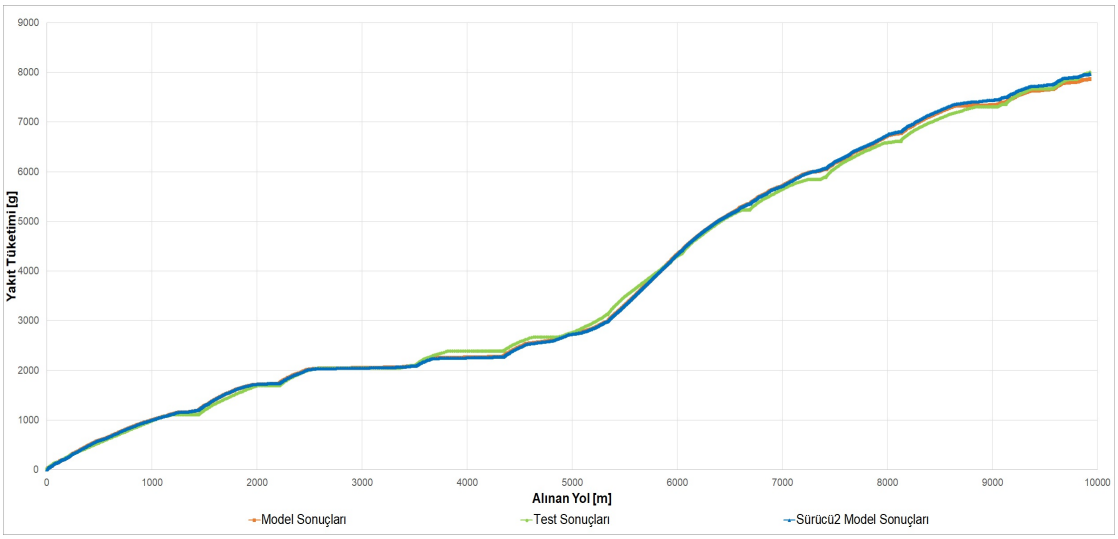
Tablo 6.3 Model Sürücü2 İvmelenme Karakteristikleri

Taşıt Hızı	Pozitif İvmelenme	Negatif İvmelenme
0	3.48334	-3.97862
10	3.31334	-4.10945
20	3.19028	-3.08723
30	3.00889	-4.13695
40	2.88084	-3.28334
50	2.76806	-2.83779
60	2.68778	-2.82418
70	2.31556	-2.84362
80	2.31556	-2.84362

”Sürücü2” modeli ile koşulan VECTO simülasyon sonuçlarına göre; toplam yakıt tüketimi değeri 7970.2 gram olarak bulunmuştur. Bu değer gerçek sürücüye ait model ile koşulan simülasyon sonucuyla karşılaştırıldığında 97.3 gram daha fazla yakıt tüketimi olduğunu hesaplanmıştır. Bu değerin yüzdesel karşılığı %1.2359’ tur.

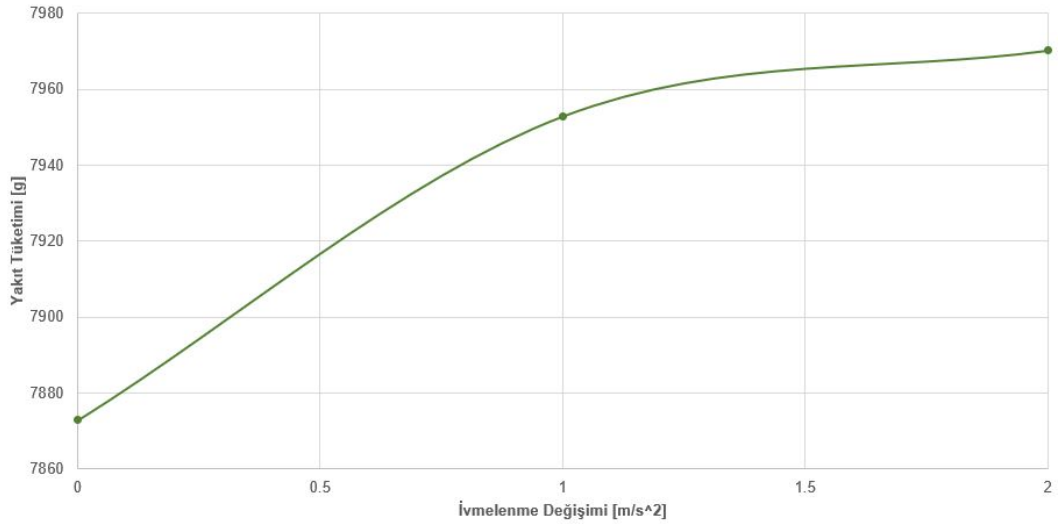
Yakıt tüketiminde meydana gelecek 97.3 gramlık artışın, CO_2 emisyonu karşılığı ise yaklaşık olarak 304.5 gramdır. VECTO ”Sürücü2” model sonuçlarına göre toplam CO_2 emisyonu değeri 24946.7 gram olarak bulunmuştur.

Taşıt üstü test sonuçları, gerçek sürücü modeli sonuçları ve ”Sürücü2” model sonuçlarının yakıt tüketimi değerlerinin alınan yola göre, kümülatif olarak karşılaştırılmasına ilişkin sonuçlar Şekil 6.13 ile verilmiştir.



Şekil 6.13 Yakıt Tüketimlerinin Karşılaştırılması (32t-Model, Test ve ”Sürücü2” Model Sonuçları)

İvmelenme karakteristiğinin yakıt tüketimi üzerindeki etkisini görmek amacıyla gerçekleştirilen model çalışmaları göstermiştir ki sabit ivmelenme değişimi, yakıt tüketimi üzerinde aynı etkiyi göstermemektedir. Yani tüketimdeki artış lineer değil paraboliktir. Şekil 6.14 ile ivmelenme değişiminin yakıt tüketimine etkisi ve artış eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 6.14 İvmelenme Değişiminin Yakıt Tüketimine Etkisi

Taşıtın seyri esnasında, doğrudan motora iletilecek güç talebini ve dolayısıyla yakıt tüketimini artıran bir diğer değişken grubu yardımcıl yüklerdir. Bölüm 5.4 ile yardımcıl yüklerin nasıl modellendiği ve 3.5 kW sabit değerinin neden seçildiği anlatılmıştı.

Yardımcıl yüklerin (iklimlendirme sistemi, pnömatik devre, 24V elektrik sistemi vb.)

yakıt tüketimi üzerindeki etkisini araştırmak için her bir yardımcıl yükün motora bindireceği ekstra güç talebinin bilinmesi gerekmektedir. Bu sayede VECTO modelinde girilen yük değeri artırılarak her bir değişkenin yakıt tüketimine etkisi incelebilecektir. Bu noktada güç taleplerinin belirlenmesi literatür çalışmalarından referanslar elde edilerek yapılacaktır. Bölüm 5.4' te belirtilen literatür araştırmaları haricinde, konu hakkında yapılan bazı literatür araştırmaları aşağıdaki gibidir.

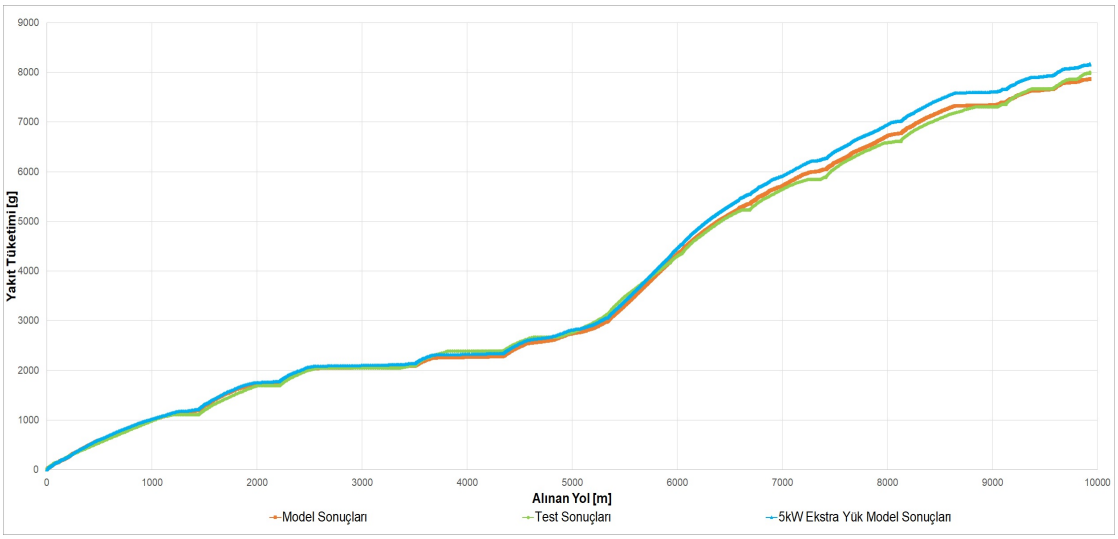
- Campbell ve Kittelson tarafından 2009 yapılan çalışmada, 194kW güce sahip bir şehir içi otobüste yardımcıl yüklerin etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonunda yayınlanan raporda iklimlendirme elemanlarının 8.3 kW' lık yardımcıl yük oluşturduğu belirlenmiştir [22].
- Hendricks ve O'Keefe tarafından Class-8 olarak nitelendirilen 19 tonluk bir ağır vasıta taşıtta gerçekleştirilen çalışmalarda, motor hızına bağlı olarak klima kompresörünün 4kW @1500 d/d ile 6 kW @2500 d/d aralığında bir yardımcıl yük oluşturduğu belirlenmiştir [23].
- Bilgili ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, şehirler arası bir otobüsün iklimlendirme sisteminin ekserji yıkım analizleri yapılmış ve tüm sistem elemanlarının kayıpları bulunmuştur. Toplam yük kaybının 7kW olduğu belirlenmiştir [24].

Yapılan literatür çalışmaları motor devrine göre, iklimlendirme elemanlarının güç talebinin 5-9 kW aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu ekstra yük etkisinin yakıt tüketimi karşılığının belirlenebilmesi için harici 5-7-9 kW' lık (3.5 kW' lık standart yardımcıl yüke ek olarak) yardımcıl yüke sahip modeller oluşturulmuştur. Söz konusu modellerde toplam yardımcıl yükler 8.5-10.5-12.5 kW' dır.

5 kW harici yüklemeyle oluşturulan model sonuçlarında toplam yakıt tüketimi değeri değeri 8173 gram olarak bulunmuştur. Harici yükleme olmayan, standart model sonucu için toplam yakıt tüketimi değeri 7872.9 gram olarak bulunmuştu. Buna göre 5 kW' lık harici yardımcıl yükün yakıt tüketim karşılığı yaklaşık 300 gram ve yüzdesel olarak %3.81' dir.

300 gramlık tüketim artışının CO_2 karşılığı 939.3 gram olup, toplam CO_2 emisyonu değeri 25581.6 gram olarak bulunmuştur.

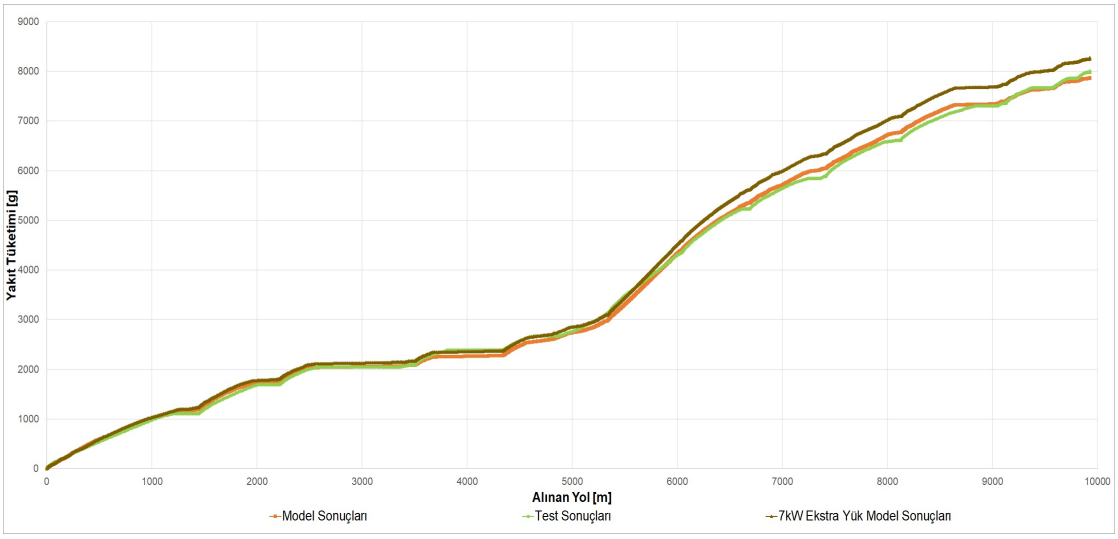
Şekil 6.15 ile kümülatif yakıt tüketimlerinin 5 kW' lık harici yüklü model ile karşılaştırılması verilmiştir. Grafik incelendiğinde; yardımcıl yüklerin, çıkış eğimiyle beraber yakıt tüketimi üzerinde gösterdiği etkinin arttığı görülebilmektedir.



Şekil 6.15 Yakıt Tüketimlerinin Karşılaştırılması (32t-Model, Test ve 5kW Ekstra Yük Model Sonuçları)

7 kW harici yüklemeyle oluşturulan model sonuçlarında toplam yakıt tüketimi değeri değeri 8271.8 gram olarak bulunmuştur. Harici yükleme olmayan, standart model sonucu için toplam yakıt tüketimi değeri 7872.9 gram olarak bulunmuştu. Buna göre 7 kW' lık harici yardımcıl yükün yakıt tüketim karşılığı yaklaşık 399 gram ve yüzdesel olarak %5.07' dir. 399 gramlık tüketim artışının CO_2 karşılığı 1248.5 gram olup, toplam CO_2 emisyonu değeri 25890.7 gram olarak bulunmuştur.

Şekil 6.16 ile kümülatif yakıt tüketimlerinin 7 kW' lık harici yüklü model ile karşılaştırılması verilmiştir.

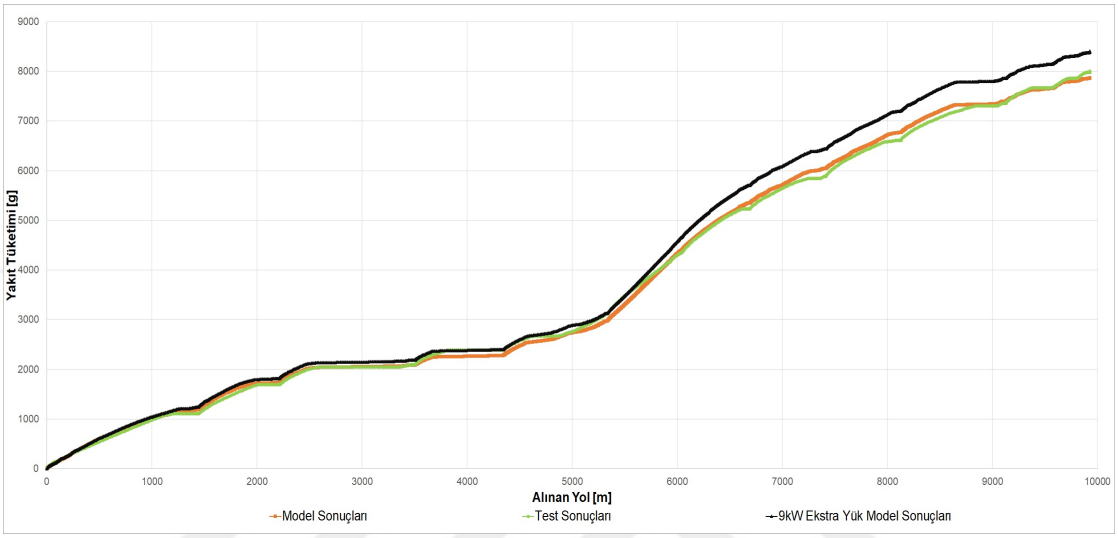


Şekil 6.16 Yakıt Tüketimlerinin Karşılaştırılması (32t-Model, Test ve 7kW Ekstra Yük Model Sonuçları)

9 kW harici yüklemeyle oluşturulan model sonuçlarında toplam yakıt tüketimi değeri değeri 8406.5 gram olarak bulunmuştur. Harici yükleme olmayan, standart model

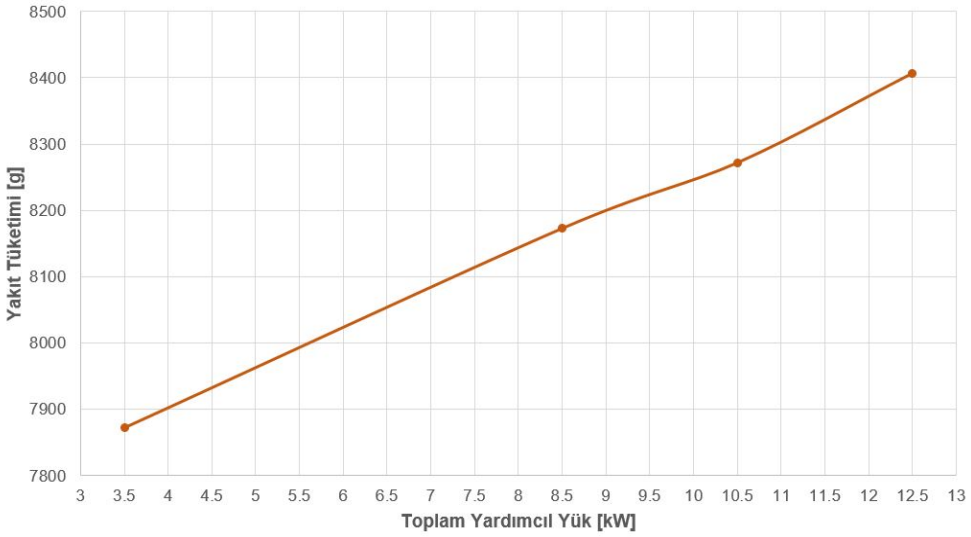
sonucu için toplam yakıt tüketimi değeri 7872.9 gram olarak bulunmuştu. Buna göre 9 kW' lık harici yardımcıl yükün yakıt tüketim karşılığı yaklaşık 533.6 gram ve yüzdesel olarak %6.78' dir. 533.6 gramlık tüketim artışının CO_2 karşılığı 1670.1 gram olup, toplam CO_2 emisyonu değeri 26312.5 gram olarak bulunmuştur.

Şekil 6.17 ile kümülatif yakıt tüketimlerinin 9 kW' lık harici yüklü model ile karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 6.17 Yakıt Tüketimlerinin Karşılaştırılması (32t-Model, Test ve 9kW Ekstra Yük Model Sonuçları)

Yardımcıl yüklerin etkisini görmek amacıyla yapılan model çalışmalarına ait sonuçların tamamı Şekil 6.18 ile verilmiştir. Toplam yardımcıl yüklerin, yakıt tüketimleri ile beraber verildiği bu grafikte, yardımcıl yükte meydana gelen artışın tüketim üzerinde lineere yakın bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir.



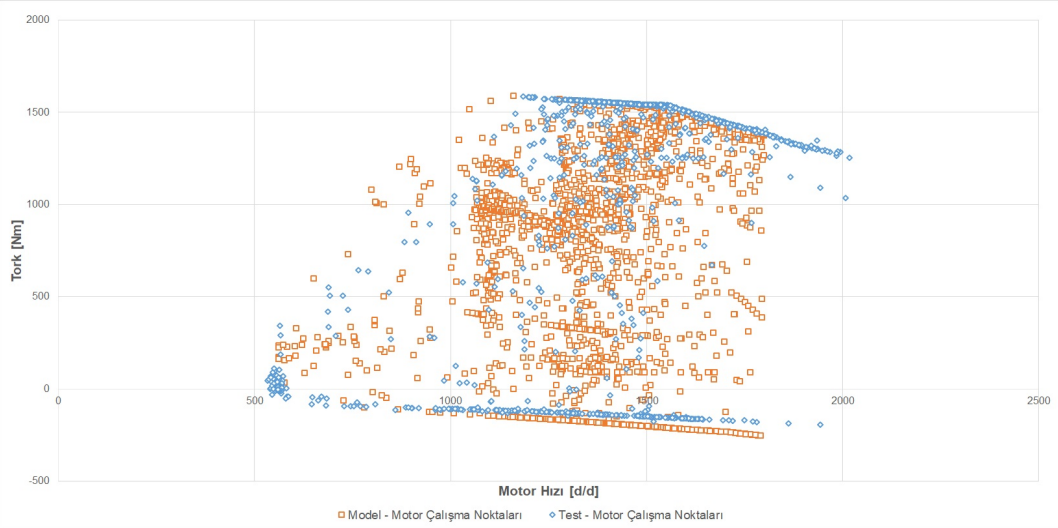
Şekil 6.18 Yardımcıl Yüklerin Yakıt Tüketimi Üzerindeki Etkisi

Tez çalışması kapsamında; 13000 kg yükleme şartında, yapılan testlere ve kurulan modellere ait yakıt tüketimi ve CO_2 emisyonu değerleri Tablo 6.4 ile verilmiştir.

Tablo 6.4 Tüm Sonuçlar

	Yakıt Tüketimi [g]	**CO_2 Emisyonu [g]**
Test	7996.6	24856.6
Model	7872.9	24642.2
Yakıt Kesme Modeli	7742.5	24234
Sürücü1 Modeli	7952.8	24892.4
Sürücü2 Modeli	7970.2	24946.7
5kW Harici Yük Modeli	8173	25581.6
7kW Harici Yük Modeli	8271.8	25890.8
9kW Harici Yük Modeli	8406.5	26312.5

Şekil 6.19' da gerçek test sonuçları ile model sonuçlarının motor haritası üzerindeki işletme noktaları gösterilmiştir.



Şekil 6.19 Test ve Model Sonuçlarının Motor Haritası Üzerindeki İşletme Noktaları

Kaynakça

[1] M. Özkan, *"İstanbul Trafiğinde Belirlenen Güzergahta Çalıştırılan Belediye Otobüsünün Optimum Yakıt Sarfiyatı Koşullarının Nümerik Etüdü", Doktora Tezi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, 1997.

[2] G. Fontaras, M. Rexeis, P. Dilara, S. Hausberger, and K. Anagnostopoulos, "An Experimental Evaluation of The Methodology Proposed for The Monitoring and Certification of CO_2 Emissions from Heavy-Duty Vehicles in Europe," 2013.

[3] G. Fontaras, T. M. Grigoratos, D. Savvidis, K. Anagnostopoulos, R. Luz, M. Rexeis, and S. Hausberger, "The Development of a Simulation Tool for Monitoring Heavy-Duty Vehicle CO_2 Emissions and Fuel Consumption in Europe," 2016.

[4] O. Özener, M. Özkan, E. Orak, and G. Acarbulut, "A Fuel Consumption Model for Public Transportation with 3-D Roda Geometry Approach," 2018.

[5] M. Özkan, *Taşıtlarda Tahrik Dinamiği ve Güç Aktarma Sistemleri Ders Notları*. Yıldız Teknik Üniversitesi, 2017.

[6] T. D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE, 1992, ISBN: 1560911999.

[7] İ. Yavaşlıol, *Motor Vehicles - I*. Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, 2007, ISBN: 9789754614299.

[8] *Rolling Resistance*, `https://engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html`, [Çevrimiçi - Erişim Tarihi: 25 Kasım 2019].

[9] *Metrobüs Hattı*, `https://metrobus.iett.istanbul`, [Çevrimiçi - Erişim Tarihi: 25 Kasım 2019].

[10] *Mercedes-Benz CapaCity*, `https://wikizero.com/tr/Mercedes-Benz_CapaCity`, [Çevrimiçi - Erişim Tarihi: 25 Kasım 2019].

[11] *CapaCity Standart Tanıtım El Kitabı*. EvoBus / Daimler Chrysler AG, 2007.

[12] *AVL KMA Mobile Fuel Consumption Measuring System Ürün Kılavuzu*. AVL List GmbH, 2011.

[13] *AVL Gas PEMS System Ürün Kılavuzu*. AVL List GmbH, 2012.

[14] O. Özener, "Real Driving Emissions and Fuel Consumption Characteristics of istanbul Public Transportation," 2017.

[15] *AVL PEMS Post Processing Software Kullanıcı Kılavuzu*. AVL List GmbH, 2010.

[16] *Presentation of VECTO*. Dimitrios Savvidis, DG Clima, 2014.

[17] *VECTO 3.3.1.1492 Kullanıcı El Kitabı*. European Commission, 2018.

[18] C. Andersson, *"On Auxiliary Systems inCommercial Vehicles", Doktora Tezi*. Lund Üniversitesi, 2004.

[19] P. Boulter and I. McCrae, *"ARTEMIS: Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems", Değerlendirme Raporu*. TRL, 2007.

[20] S. Khan and N. Clark, "An Empirical Approach in Determining The Effect of Road Grade on Fuel Consumption from Transit Buses," 2010.

[21] J. Vepsäläinen, K. Otto, A. Lajunen, and K. Tammi, "Computationally Efficient Model for Energy Demand Prediction of Electric City Bus in Varying Operating Conditions," 2018.

[22] J. Campbell and D. Kittelson, *"Center for Transportation Studies, University of Minnesota", Araştırma Raporu*. CTS, 2009.

[23] T. Hendricks and M. O'Keefe, "Heavy Vehicle Auxiliary Load Electrification for the Essential Power System Program: Benefits, Tradeoffs, and Remaining Challenges," 2002.

[24] M. Bilgili, E. Cardak, and A. E. Aktas, "Thermodynamic Analysis of Bus Air Conditioner Working with Refrigerant R600a," 2017.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgileri: abdullahkilicaslan1@gmail.com

Makale

1. Zacharof N., Özener O., Özkan M., Kilicaslan A. and Fontaras G., ”Simulating City-Bus On-Road Operation With VECTO” , 2019.