İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİBRİT ELEKTRİKLİ HAFİF TİCARİ ARAÇTA DİZEL MOTORU AZOTOKSİT (NO_X) EMİSYONLARININ OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Seçkin Ali ERBEYLER

Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Programı : OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2007

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİBRİT ELEKTRİKLİ HAFİF TİCARİ ARAÇTA DİZEL MOTORU AZOTOKSİT (NO_X) EMİSYONLARININ OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Seçkin Ali ERBEYLER
(503031014)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Haziran 2007

Tez Danışmanı : Prof. Dr. H. Ertuğrul ARSLAN

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Metin ERGENEMAN (İ.T.Ü.)

Prof. İrfan YAVAŞLIOL (Y.T.Ü.)

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Günümüzde azalan yakıt rezervleri, buna bağlı olarak birim yakıt fiyatlarının artması ve çevre kirliliğinin gün geçtikçe kötüleşmesi sebebiyle taşıtlardaki yakıt tüketimi değerlerinin azaltılması üretici firmalar ve çeşitli enstitüler için önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bunun yanında globalleşen dünyada ticari araçların katettiği senelik ortalama mesafelerin artış göstermesi de söz konusu araştırmaların artmasındaki diğer bir etken olarak gösterilebilir.

Bu çalışmada hafif ticari bir araca ilave tahrik sistemi uygulaması incelenmiş, tahrik organlarının en avantajlı yanları bir arada değerlendirilerek yakıt tüketiminin yanında içten yanmalı dizel motora ait azotoksit (NO_X) emisyonları optimize edilmeye çalışılmıştır.

Öğrenim hayatım boyunca bana sonsuz yardım ve desteklerini sunan sevgili aileme; tez hazırlama sürecimde her an yanımda olan sevgili eşime; bu çalışmam sırasında bana değerli görüşleriyle yol gösteren ve yardım eden değerli tez danışmanım Prof. Dr. H. Ertuğrul ARSLAN' a ve tüm FORD OTOSAN Ürün Geliştirme Departmanındaki meslektaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Haziran 2007 Seçkin Ali ERBEYLER

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **v**
TABLO LİSTESİ **vi**
ŞEKİL LİSTESİ **vii**
SEMBOL LİSTESİ **x**
ÖZET **xii**
SUMMARY **xiii**

1. GİRİŞ **1**

2. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN TANIMI VE SINIFLANDIRILMASI **3**
2.1. Hibrit Elektrikli Araçların Genel Tanımı 3
2.2. Hibrit Elektrikli Araç Yapıları 3
2.2.1. Seri hibrit yapısı 4
2.2.2. Paralel hibrit yapısı 5
2.2.3. Bölünmüş paralel hibrit yapısı 6
2.2.4. Seri paralel hibrit yapısı 7

3. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN BİLEŞENLERİ VE HİBRİTLEŞME DERECELERİ **9**
3.1. Hibrit Elektrikli Araç Bileşenleri 9
3.1.1. Elektrik motorları 9
3.1.2. Jeneratörler 10
3.1.3. Güç kontrol üniteleri 11
3.1.4. Elektrik motoru kontrol üniteleri 11
3.1.5. Rejeneratif frenleme sistemleri 12
3.1.6. Araç kontrol sistemleri 13
3.1.7. Enerji depolama üniteleri (Bataryalar) 13
3.1.7.1. Enerji depolama ünitelerinin çeşitleri 15
3.2. Hibritleşme Dereceleri 16
3.2.1. Boşta çalışmama kabiliyeti 17
3.2.2. Rejeneratif frenleme kabiliyeti 18
3.2.3. İçten yanmalı motorun küçültülmesi 18
3.2.4. Sadece elektrik motoru ile sürüş 19

4. UYGULANACAK HİBRİT YAPININ VE DÖNÜŞÜMÜN YAPILACAĞI ARACIN BELİRLENMESİ **20**
4.1. Hibrit Yapının Seçimi 20

4.1.1. Seri hibrit yapının değerlendirilmesi 20
4.1.2. Paralel hibrit yapının değerlendirilmesi 21
4.1.3. Bölünmüş paralel hibrit yapının değerlendirilmesi 22
4.2. Alternatif Araçların Seçilen Hibrit Yapıya Uygunluğunun Belirlenmesi 22
4.2.1. Ford Transit Connect uzun şasinin geometrik yerleşim açısından uygunluğunun araştırılması 24
4.2.2. Ford Transit kısa şasinin geometrik yerleşim açısından uygunluğunun değerlendirilmesi 26

5. FORD TRANSİT KISA ŞASİ MİNİBÜSÜN BÖLÜNMÜŞ PARALEL HİBRİT YAPIYA DÖNÜŞTÜRÜLMESİ 29
5.1. Hibrit Araç Hedeflerinin Belirlenmesi 30
5.2. Karayolu Taşıtlarına Etki Eden Direnç Kuvvetleri 31
5.2.1. Tekerlek direnci 32
5.2.2. Yokuş direnci 33
5.2.3. İvme direnci 33
5.2.4. Rüzgar direnci 34
5.3. Elektrik Motoru Seçimi Ve Araç Seviyesinde Yerleşimi 36
5.4. Enerji Depolama Ünitesi - Kontrolcü Seçimi Ve Araç Seviyesinde Yerleşimi 43
5.5. Soğutma Sistemi Elemanları Seçimi Ve Araç Seviyesinde Yerleşimi 49
5.6. Rejeneratif Frenleme Sistemi İçin Yapılan Araç Seviyesi Değişiklikler 53
5.7. İçten Yanmalı Motor Seçimi Ve Araç Seviyesinde Yerleşimi 55

6. HİBRİT ARAÇ UYGULAMASI İLE DİZEL MOTORU AZOTOKSİT (NO_X) EMİSYONLARININ OPTİMİZASYONU 59
6.1. Yakıt Tüketimi Ve Egzoz Emisyonlarının Hibrit Araç Uygulaması İle Kontrolü 61

7. BÖLÜNMÜŞ PARALEL HİBRİT YAPIYA DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ARACIN SAYISAL YÖNTEMLER YARDIMIYLA İNCELENMESİ 66
7.1. ADVISOR Programının Tanıtılması 67
7.2. Konvansiyonel Ve Hibrit Araçların ADVISOR İle Simülasyonu 69
7.2.1. Konvansiyonel aracın modellenmesi ve performans, yakıt tüketimi, egzoz emisyon sonuçlarının doğrulanması 69
7.2.2. Hibrit aracın modellenmesi ve performans, yakıt tüketimi, egzoz emisyon sonuçlarının doğrulanması 79
7.3. Hibrit Aracın Kontrol Algoritmasının Değiştirilmesi Suretiyle Dizel Motoru Azotoksit (NO_X) Emisyonlarının Optimizasyonu 87

8. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ 99

KAYNAKLAR 104

EKLER 106

ÖZGEÇMİŞ 111

KISALTMALAR

İYM	: İçten Yanmalı Motor
EM	: Elektrik Motoru
HEV	: Hibrit Elektrikli Taşıt (Hybrid Electric Vehicle)
SUV	: Sportif Aktivite Aracı (Sport Utility Vehicle)
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
AC	: Alternatif Akım (Alternating Current)
N/S	: Kuzey/Güney (North/South)
E/W	: Doğu/Batı (East/West)
AT	: Avrupa Topluluğu
AITM	: Araçların İmal, Tadil ve Montajı
Ni-MH	: Nikel Metalhidrit
FRP	: Cam Elyaf Takviyeli Plastik (Fiberglass Reinforced Plastic)
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
RWD	: Arkadan İtiş (Rear Wheel Drive)
FWD	: Önden Çekiş (Front Wheel Drive)
A/F	: Hava/Yakıt Karışım Oranı (Air/Fuel Ratio)
ADVISOR	: Gelişmiş Araç Simülatörü (Advance Vehicle Simulator)
NEDC	: Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi (New European Driving Cycle)
EEC	: Avrupa Ekonomik Topluluğu (European Economic Community)
SVO	: Özel Araç Operasyonları (Special Vehicle Operations)
ECE 15	: Avrupa Sürüş Çevrimi (Economic Commision of Europe Driving Cycle)
EUDC	: Şehirdışı Sürüş Çevrimi (Extra Urban Driving Cycle)
GVM	: Araç Azami Ağırlığı (Gross Vehicle Mass)
GTM	: Araç Katar Ağırlığı (Gross Trailer Mass)

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 3.1	AC ve DC motorların karşılaştırılması	10
Tablo 3.2	Elektrik motorlarının özellikleri	10
Tablo 3.3	Batarya çeşitleri ve özellikleri	16
Tablo 5.1	Transit Kısa Şasi Alçak Tavan boyutları ve teknik özellikleri	30
Tablo 5.2	Hibrit araç hedefleri ve baz aracın bugünkü durumu	31
Tablo 5.3	Elektrik motorundan beklenen minimum özellikler	37
Tablo 5.4	Alternatif elektrik motorları tipleri ve özellikleri	38
Tablo 5.5	Değişik batarya tiplerinin temel özellikleri	43
Tablo 5.6	Alternatif batarya üniteleri ve özellikleri	44
Tablo 5.7	Batarya ünitelerinin kıyaslamalı karşılaştırma tablosu	44
Tablo 5.8	UQM SR218 Elektrik motoru ile Cobasys NiMHax 288-180 batarya grubunun değerlendirilmesi	45
Tablo 7.1	Fiziksel test ve ADVISOR simülasyon sonucu elde edilen egzoz emisyon sonuçları ve standart değerler	78
Tablo 7.2	Fiziksel test ve ADVISOR simülasyon sonucu elde edilen yakıt tüketimi test sonuçları	78
Tablo 7.3	Fiziksel test ve ADVISOR simülasyon sonucu elde edilen performans test sonuçları	79
Tablo 7.4	Aracın çalışma modlarına göre kontrol stratejisi	84
Tablo 7.5	Hibrit araca ait fiziksel test ve ADVISOR simülasyon sonucu elde edilen egzoz emisyon sonuçları ve standart değerler	86
Tablo 7.6	Hibrit araca ait fiziksel test ve ADVISOR simülasyon sonucu elde edilen yakıt tüketimi test sonuçları	86
Tablo 7.7	Hibrit araca ait fiziksel test ve ADVISOR simülasyon sonucu elde edilen performans test sonuçları	87
Tablo 7.8	Aracın çalışma modlarına göre optimize edilmiş kontrol stratejisi	93
Tablo 7.9	Optimizasyon sonrası hibrit araca ait kıyaslamalı egzoz emisyon sonuçları ve standart değerler	97
Tablo 7.10	Optimizasyon sonrası hibrit araca ait kıyaslamalı yakıt tüketimi test sonuçları	98
Tablo 8.1	Konvansiyonel ve hibrit araç versiyonları için azotoksit (NO_X) emisyonu ve yakıt tüketim değerleri	100
Tablo A.1	Araç bileşenlerine ait girdiler	106

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Seri hibrit araç şeması..... 4
Şekil 2.2 : Paralel hibrit araç şeması..... 5
Şekil 2.3 : Bölünmüş paralel hibrit araç şeması..... 6
Şekil 2.4 : Seri paralel hibrit araç şeması..... 7
Şekil 3.1 : Dalga boyu değişimine bağlı olarak elektrik motoru güç kontrolü..... 12
Şekil 3.2 : Kullanılan tahrik gücüne göre araçların sınıflandırılması..... 17
Şekil 4.1 : 140kW Ansaldo asenkron elektrik motoru temsili geometrik model..... 23
Şekil 4.2 : 100kW UQM fırçasız elektrik motoru temsili geometrik model..... 23
Şekil 4.3 : Ford Escape hibrit ve batarya ünitesi..... 24
Şekil 4.4 : Transit ailesine ait tahrikli arka aksın Connect modeli ile incelenmesi..... 25
Şekil 4.5 : Ford Escape batarya ünitesinin Connect modeli ile incelenmesi..... 26
Şekil 4.6 : Tahrikli arka aksın Transit hibrit modelinde yerleşimi..... 27
Şekil 4.7 : Ford Escape batarya ünitesinin Transit hibrit modelinde incelenmesi..... 27
Şekil 4.8 : En kötü koşulları temsil eden elektrik motorlarının Transit hibrit modelinde gövde altındaki yerleşimleri..... 28
Şekil 5.1 : Bölünmüş paralel hibrit yapı şeması..... 29
Şekil 5.2 : Hareket halindeki araç üzerine etki eden kuvvetler..... 32
Şekil 5.3 : Elektrik motorları genel tork-hız ve güç-hız karakteristikleri..... 36
Şekil 5.4 : UQM-SR218N Elektrik motoru tork-güç karakteristikleri ve verim haritası..... 38
Şekil 5.5 : UQM-SR218N ve CAD modeli..... 39
Şekil 5.6 : AITM ve Ford Motor Company şartnamelerine göre hazırlanan yerden yükseklik çizgileri..... 40
Şekil 5.7 : Dijital ortamda görülen elektrik motoru ve yakıt tankı girişimi... 40
Şekil 5.8 : Elektrik motoru, yakıt tankı ve egzoz susturucusunun araç üzerindeki nihai konumları..... 41
Şekil 5.9 : Elektrik motoru bağlama plakası ve CAD modeli..... 42
Şekil 5.10 : Elektrik motoru yatağı ve CAD modeli..... 42
Şekil 5.11 : Cobasys NiHMax 288-60 batarya ünitesi CAD modeli..... 45
Şekil 5.12 : Batarya ünitesinin taban sacı altına yerleşimi..... 46
Şekil 5.13 : Batarya grubu konumunun uzaklaşma açısı şartnamesi açısından incelenmesi..... 46
Şekil 5.14 : Batarya grubu ve kontrolcülerin arka tekerlek yuvaları arasında yerleşimi..... 47

Şekil 5.15 : Batarya grubu ile yolcu kompartımanının ara bölme vasıtasıyla izole edilmesi..... 48
Şekil 5.16 : FRP ara bölme ve ikinci sıra koltuk yerleşim çalışmaları ve uygulaması..... 48
Şekil 5.17 : Jabsco 50830-2012 su pompası ve CAD modeli..... 50
Şekil 5.18 : Su sirkülasyon pompasının sürücü biniş basamağı altına yerleşimi..... 51
Şekil 5.19 : Elektrikli tahrik soğutma sistemi ısı değiştiricisi ve CAD modeli..... 51
Şekil 5.20 : Elektrikli tahrik sistemi ısı değiştiricisinin dijital ortamda yapılan yerleşim çalışmaları..... 52
Şekil 5.21 : İlave tahrik sistemi ısı değiştiricisinin fiziksel araç üzerinde yerleşimi..... 53
Şekil 5.22 : Kuvvet bağlantı katsayılarının kaymaya bağlı değişimi..... 54
Şekil 5.23 : Fren sistemi vakum ünitesi pedal mili üzerine konumlandırılmış kuvvet ölçüm sensörü..... 54
Şekil 5.24 : Hidrolik fren boru hattı üzerine yerleştirilmiş basınç sensörü..... 55
Şekil 5.25 : 130 PS Doğu/Batı (E/W) motor tork ve güç karakteristikleri..... 56
Şekil 5.26 : Arkadan itişli Kuzey/Güney (N/S) motorlu Transit Minibüsün güç aktarma organları..... 56
Şekil 5.27 : Arkadan itişli (RWD) ve önden çekişli (FWD) Transit şasi kolları arasındaki fark..... 57
Şekil 5.28 : Arkadan itişli aracın önden çekişli hale getirilmesi..... 58
Şekil 6.1 : İçten yanmalı dizel motorun yakıt tüketim ve egzoz emisyonları arasındaki ilişki..... 59
Şekil 6.2 : İçten yanmalı dizel motor için, motor verimi gözetilerek seçilmiş çalışma noktaları..... 62
Şekil 6.3 : Azotoksit (NO_X) emisyon haritasında içten yanmalı dizel motorun motor verimi gözetilerek seçilen çalışma noktaları..... 63
Şekil 6.4 : İçten yanmalı motor azotoksit (NO_X) üretimi gözetilerek seçilen motor çalışma noktaları (Kırmızı çizgi)..... 63
Şekil 6.5 : İçten yanmalı motor verim haritasında azotoksit (NO_X) üretimi gözetilerek seçilen çalışma noktaları..... 64
Şekil 6.6 : Yakıt ekonomisi ve azotoksit (NO_X) emisyon sonuçlarının değişik çalışma noktalarına dayalı kontrol stratejisine göre değişimi..... 65
Şekil 7.1 : ADVISOR Ara yüzü..... 67
Şekil 7.2 : Paralel hibrit bir taşıtın Simulink blok diyagramı..... 68
Şekil 7.3 : Konvansiyonel aracın bileşenlerinin belirlendiği ADVISOR ara yüzü..... 70
Şekil 7.4 : Araç Simulink blok diyagramı..... 71
Şekil 7.5 : İçten yanmalı motor Simulink blok diyagramı..... 72
Şekil 7.6 : İçten yanmalı motor haritaları..... 72
Şekil 7.7 : Egzoz sistemi Simulink blok diyagramı..... 73
Şekil 7.8 : Şanzıman Simulink blok diyagramı..... 74
Şekil 7.9 : Lastik/Aks Simulink blok diyagramı..... 74
Şekil 7.10 : Motora mekanik bağlı yüklerin Simulink blok diyagramı..... 75
Şekil 7.11 : Kontrol algoritması Simulink blok diyagramı..... 76
Şekil 7.12 : Konvansiyonel aracın NEDC sürüş çevriminde yakıt tüketim ve egzoz emisyon test sonuçları..... 77

Şekil 7.13 : Konvansiyonel aracın NEDC sürüş çevriminde performans ve tırmanma kabiliyeti test sonuçları..... 77
Şekil 7.14 : Hibrit aracın bileşenlerinin belirlendiği ADVISOR ara yüzü..... 80
Şekil 7.15 : Elektrik motoru Simulink blok diyagramı..... 81
Şekil 7.16 : Batarya ünitesi Simulink blok diyagramı..... 81
Şekil 7.17 : Kontrol algoritması Simulink blok diyagramı..... 82
Şekil 7.18 : İçten yanmalı motor haritası üzerinde hibrit araç çalışma modları..... 83
Şekil 7.19 : Hibrit aracın NEDC sürüş çevriminde yakıt tüketim, egzoz emisyon, performans ve tırmanma kabiliyeti test sonuçları..... 85
Şekil 7.20 : Sürüş çevrimi boyunca konvansiyonel araca ait içten yanmalı motor çalışma noktaları..... 88
Şekil 7.21 : Sürüş çevrimi boyunca konvansiyonel araca ait içten yanmalı motor verimi..... 89
Şekil 7.22 : Sürüş çevrimi boyunca konvansiyonel araca ait vites değişim grafiği..... 89
Şekil 7.23 : Sürüş çevrimi boyunca hibrit araca ait içten yanmalı motor çalışma noktaları..... 90
Şekil 7.24 : Sürüş çevrimi boyunca hibrit araca ait içten yanmalı motor verimi..... 91
Şekil 7.25 : Sürüş çevrimi boyunca hibrit araca ait elektrik motoru çalışma noktaları..... 91
Şekil 7.26 : Sürüş çevrimi boyunca hibrit araca ait elektrik motoru verimi..... 92
Şekil 7.27 : Sürüş çevrimi boyunca hibrit araca ait vites değişim grafiği..... 92
Şekil 7.28 : Optimizasyon sonrası hibrit aracın NEDC sürüş çevriminde yakıt tüketim ve egzoz emisyon test sonuçları..... 94
Şekil 7.29 : Optimizasyon sonrası sürüş çevrimi boyunca hibrit araca ait içten yanmalı motor çalışma noktaları..... 95
Şekil 7.30 : Optimizasyon sonrası sürüş çevrimi boyunca hibrit araca ait içten yanmalı motor verimi..... 95
Şekil 7.31 : Optimizasyon sonrası sürüş çevrimi boyunca hibrit araca ait elektrik motoru çalışma noktaları..... 96
Şekil 7.32 : Optimizasyon sonrası sürüş çevrimi boyunca hibrit araca ait elektrik motoru verimi..... 96
Şekil 7.33 : Optimizasyon sonrası sürüş çevrimi boyunca hibrit araca ait vites değişim grafiği..... 97
Şekil 8.1 : Konvansiyonel ve hibrit araç versiyonları için azotoksit (NO_X) emisyonu değişimi..... 101
Şekil 8.2 : Konvansiyonel ve hibrit araç versiyonları için yakıt tüketimi değişimi..... 102
Şekil B.1 : İçten yanmalı motora ait yakıt tüketim haritası..... 108
Şekil B.2 : İçten yanmalı motora ait karbonmonoksit (CO) emisyonu haritası..... 108
Şekil B.3 : İçten yanmalı motora ait hidrokarbon (HC) emisyonu haritası..... 109
Şekil B.4 : İçten yanmalı motora ait azotoksit (NO_X) emisyonu haritası..... 109
Şekil B.5 : İçten yanmalı motora ait partikül madde (PM) emisyonu haritası..... 110

SEMBOL LİSTESİ

CO_2 : Karbondioksit
NO_X : Azotoksitler
F_Z : Karayolu taşıtlarına etkiyen toplam direnç kuvveti
F_R : Tekerlek direnci
F_{ST} : Yokuş direnci
F_B : İvme direnci
F_D : Rüzgar direnci
M_R : İçten yanmalı motor tarafından tekerleklere iletilen moment
r : Tekerlek statik yarıçapı
α : Yokuş eğim açısı
F_Y : Yuvarlanma Direnci
e : Zemindeki tepki kuvvetinin hareket doğrultusundaki sapması
f_r : Yuvarlanma direnci katsayısı
G : Araç ağırlık kuvveti
p : Boyutsuz eğim birimi
J_R : Atalet momenti
R : Dinamik yarıçap
λ : İvme direnci katsayısı
F_L : Kaldırma kuvveti
F_S : Yanal kuvvet
C_D : Rüzgar direnç katsayısı
C_L : Kaldırma kuvveti katsayısı
C_S : Yanal kuvvet katsayısı
ρ : Yoğunluk
A : Karakteristik izdüşüm alanı
V : Taşıtın havaya göre bağıl hızı
HC : Hidrokarbonlar
H_2O : Su
$(A/F)_S$: Stokiyometrik hava – yakıt karışım oranı
$(A/F)_G$: Gerçek hava – yakıt karışım oranı
g : Yerçekimi ivmesi
d : Hava yoğunluğu
h_{CoG} : Aracın ağırlık merkezinin yerden yüksekliği
l_{wb} : İki dingil arası mesafe
G_{curb} : Aracın boş ağırlığı
$G_{payload}$: Aracın istiap haddi
m_{base} : Motor bloğu ve silindir kafası kütlesi
m_{acc} : Motor üzerinde takılı ekipmanların kütlesi
a_{ext} : Motor toplam dış yüzey alanı
m_{fuel} : Yakıt tankı kütlesi
t_{th} : Motor termostat sıcaklığı
a_{hood} : Motor kaputu toplam yüzey alanı

$\mathbf{d_{fuel}}$	**:** Yakıt yoğunluğu
$\mathbf{H_U}$	**:** Yakıt alt ısıl değeri
CO	**:** Karbonmonoksit
PM	**:** Partikül madde

HİBRİT ELEKTRİKLİ HAFİF TİCARİ ARAÇTA DİZEL MOTORU AZOTOKSİT (NO_X) EMİSYONLARININ OPTİMİZASYONU

ÖZET

Hibrit taşıtlar, en önemli özellikleri olan yakıt ekonomisi ve rejeneratif frenleme sistemi ile fren enerjisinin geri kazanımının yanında batarya ünitesinin içten yanmalı motorun en verimli çalışma noktalarında iken doldurulup verimsiz çalışma noktalarında elektrik motorunun devreye sokulması şeklinde bir avantaja sahiptir. İlgili çalışmada hibrit taşıtların söz konusu avantajına dayanılarak dizel motoru azotoksit (NO_X) emisyonlarının optimizasyonu hedeflenmiştir.

Söz konusu tez çalışmasında ilk olarak hibrit elektrikli araçların yapıları, bileşenleri ve bu bileşenlerin araç tasarımına ve araç kontrol stratejisine etkileri incelenmiştir. Ayrıca genel olarak hibrit araç çalışma modları belirtilmiştir.

Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, uygulanacak hibrit yapının belirlenmesi için dijital ortamda en kötü şartları temsil eden hibrit araç bileşenlerinin üç boyutlu modelleri ile başlangıç geometrik fizibilite çalışmaları yapılmıştır. Alternatif araçlar üzerinde yapılan söz konusu çalışmalar ve üründen beklenen özellikler ışığında uygulanacak hibrit yapı belirlenmiştir. Daha sonra seçilen hibrit yapıya bağlı olarak dönüşümün gerçekleştirileceği araç için incelemeler yapılıp en uygun araç tipi ortaya konulmuştur.

Belirlenen araca bağlı proje hedefleri düzenlenerek hibrit araç bileşenleri seçilmiş ve bileşenlerin dijital ortamda üç boyutlu modelleri ile geometrik yerleşimi sonlandırılmıştır. Hibrit araç dönüşümü tamamlandıktan sonra ise dizel motoru azotoksit (NO_X) emisyonlarının optimizasyonu için sayısal yöntemler yardımıyla konvansiyonel ve hibrit araç modelleri kurulup fiziksel test sonuçları ile karşılaştırılarak modellerin doğruluğu kanıtlanmıştır. Sonraki aşamada doğruluğu kanıtlanan hibrit araç modeli ile sanal ortamda, içten yanmalı motorun sürüş çevrimi boyunca gösterdiği çalışma karakteristiğini değiştirmeye yönelik parametreler ile çeşitli iterasyonlar yapılarak yakıt tüketimi ve azotoksit (NO_X) emisyonları için optimum değerler elde edilmiştir. Çalışmanın sonucu olarak fiziksel test ve sanal araç modelleri arasındaki ilişki gözetilerek, optimize edilen kontrol algoritması ile aracın gerçekte sahip olacağı yakıt tüketim ve azotoksit (NO_X) emisyon değerleri belirlenmiş, seçilen stratejinin avantajları ve dezavantajları ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçların doğruluğunun kanıtlanabilmesi için referans hibrit aracın fiziksel olarak son kontrol stratejisi ile donatılarak test edilmesi gerektiği kararına varılmıştır.

OPTIMIZATION OF NITROGEN OXIDE (NO_X) EMISSIONS OF A DIESEL ENGINE IN A HYBRID ELECTRICAL LIGHT COMMERCIAL VEHICLE

SUMMARY

Hybrid electric vehicles have the ability to run the engine in a restricted, more efficient load and speed range besides the two significant advantages that contribute to fuel economy and the potential to recover some braking energy by regenerative braking system. The scope of this study is aimed at optimization of nitrogen oxides (NO_X) emissions of a diesel engine based on these advantages of HEVs.

In this thesis, firstly, configurations and components of HEVs and impacts of these components on vehicle design and control strategy are investigated. Additionally, general running modes of HEVs are described.

At the following sections of the study, 3D models of HEV components that are simulating the worst-case conditions are investigated in CAD environment in order to define appropriate hybrid configuration as the initial feasibility check. According to CAD studies done on alternative vehicles and product targets, applicable hybrid configuration is defined. As a next step, more suitable vehicle is determined from among preferred alternatives based on chosen hybrid configuration.

According to product targets that are set after the vehicle choice, final hybrid vehicle components are determined and packaging study is finalized by using 3D models of relevant components in digital environment. After vehicle modification in accordance with hybrid structure, models of conventional and hybrid vehicles are established in ADVISOR to compare the analytical and physical test results for optimization of nitrogen oxides (NO_X) emissions. Analytical models are validated according to comparison study for each vehicle type. Next step, optimum results are obtained for fuel consumption and nitrogen oxides (NO_X) emissions by changing the parameters of control algorithm on the validated analytical vehicle model. Consequently, test results of modified physical vehicle can be predicted closely by investigating the correlation of analytical and physical models. In addition to these results, advantages and disadvantages of the chosen control strategy are specified. It is also concluded that to be sure the accuracy of the results, reference hybrid vehicle needs to be modified with latest control algorithm and tested accordingly.

1. GİRİŞ

Karayolu taşıtlarına seyirleri esnasında çeşitli direnç kuvvetleri etki etmektedir. Taşıtı harekete geçirebilmek için bu direnç kuvvetlerini yenmek gereklidir. Günümüzde en çok kullanılan tahrik kaynağı içten yanmalı motorlar olup, bu motorlarda hava ile yakıt karışımının yakılması ile elde edilen enerji taşıtı harekete geçirir. Yakıt belli bir ekonomik değer ifade ettiğinden ötürü, yakıt tüketiminin düşürülmesi, aynı görevi daha ucuza yerine getirme anlamına gelmektedir. 1970'li yıllarda baş gösteren petrol krizi nedeniyle taşıtların yakıt ekonomisi önemli bir gündem maddesi olmuş ve bu konudaki araştırma-gelistirme çalışmaları son zamanlarda ivme kazanmıştır.

Bunun yanında yakıtın yanması sonucu açığa çıkan zararlı egzoz gazı emisyonu da insan sağlığını ve doğal çevreyi tehdit eder hale gelmiştir. CO_2 emisyonu da insan sağlığını direkt olarak tehdit etmemekle beraber, atmosferdeki CO_2 konsantrasyonunun artımı sera etkisi denilen küresel ısınmaya yol açmakta; bu da iklimlerin değişmesine ve doğanın dengesini bozucu bir etkiye neden olmaktadır. Bu sebeplerden ötürü egzoz gazı emisyonlarına da son yıllarda sınırlandırmalar getirilmiştir. Bu sınırlandırmaların sağlanabilmesi için gerek motordaki yanma performansının geliştirilmesi gerekse de yakıt tüketiminin düşürülmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu noktada beliren alternatif yollardan bir tanesi "Hibrit Elektrikli Taşıtlar (HEV – Hybrid Electric Vehicles)" dır. Hibrit taşıt, basitçe iki ya da daha fazla tahrik organı kullanan taşıtlara denmektedir. Konvansiyonel motorlara destek güç olarak elektrik motoruna sahiptirler ve hem içten yanmalı hem de elektrik motorundan aldıkları tahrik ile hareketlerini sağlamaktadırlar. Burada en önemli hedef, iki tahrik organının en avantajlı noktalarını bir arada değerlendirmektir. Uygulamanın diğer bir avantajı da içten yanmalı motorun en verimli çalışma şartlarında çalıştırılarak rejeneratif fren enerjisi ile bataryaların doldurulması, en verimsiz çalışma noktalarında ise elektrik motorunun devreye alınmasıdır. Böylece yakıt ekonomisi, düşük egzoz ve gürültü emisyonları elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada hibrit taşıtların genel tanımı, sınıflandırılması ve bileşenlerinden kısaca bahsedilmesinin ardından, dizel hafif ticari bir aracın hibrit bir taşıta dönüştürülmesi, bileşenlerin şartnamelere uygun geometrik yerleşimlerinin tamamlanması ile birlikte hibrit avantajından faydalanılarak içten yanmalı dizel motora ait NO_x emisyonlarının optimizasyonu gerçekleştirilecektir.

Kurulan matematik modeller MATLAB/Simulink yazılımı kullanılarak dijital ortama aktarılıp ADVISOR programı ile grafiksel neticeler elde edilmiştir.

2. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN TANIMI VE SINIFLANDIRILMASI

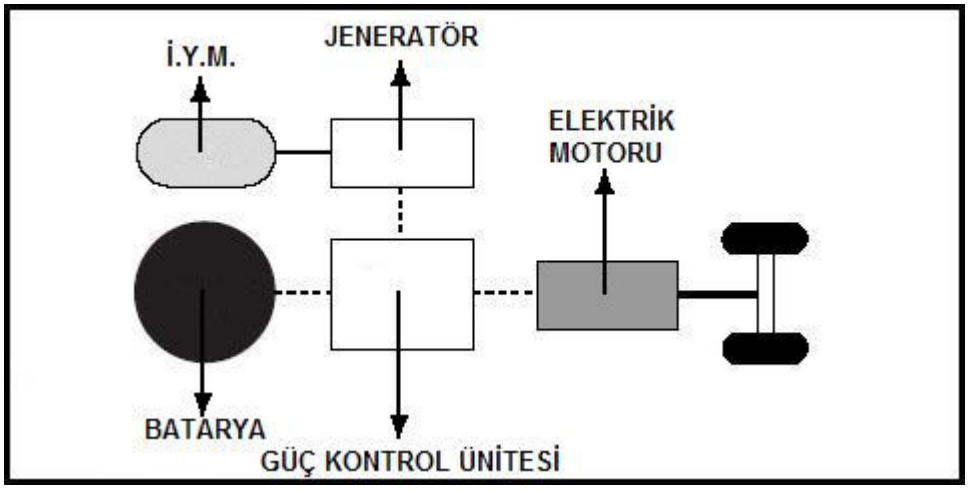
2.1 Hibrit Elektrikli Araçların Genel Tanımı

Hibrit sözcüğü, Latince'de çapraz anlamına gelen "(h)i'brida" sözcüğünden gelmektedir. "Hibrit Araç" ise İsveç Ulusal Ansiklopedisinde; "sürüş sırasında kullanılacak tipi, bir kontrol sisteminin belirlediği birden çok enerji dönüştürücü ve depolama ünitesine sahip araç" olarak tariflenmiştir. Enerji dönüştürücü sistemler, içten yanmalı motor, hidrolik motor, elektrik motoru veya yakıt pilleri olabilir. Enerji depolama sistemleri olarak ise kimyasal, kinetik, elektrik ve hidrostatik enerji depolama sistemleri kullanılmaktadır. Günümüzde Hibrit Elektrikli Araçlarda yaygın olan tahrik sistemi elemanları içten yanmalı motorlar ve elektrik motorlarıdır. Üretilmekte olan modeller dışında birçok hibrit taşıt üzerinde de araştırmalar sürmektedir. Mevcut teknolojiler, çok çeşitli hibrit taşıt modeli geliştirmeye müsait durumdadır. Ancak fiyat, performans, yüksek yakıt tasarrufu ve düşük egzoz emisyonları kriterlerinin bir arada sağlanması söz konusu taşıtların temel hedefleri durumundadır [12].

2.2 Hibrit Elektrikli Araç Yapıları

Hibrit Elektrik Araçların tasarımının en temel amacı, ana tahrik üniteleri içten yanmalı motor ve elektrik motorunun en verimli noktalarında çalışma sağlanması suretiyle konvansiyonel güç karakteristiği kaybedilmeden yakıt ekonomisini iyileştirmek ve bununla birlikte emisyon değerlerini minimuma indirmektir. Söz konusu hedef sabit kalmakla birlikte taşıtların yapısı, içten yanmalı motor ve elektrik motoru ile diğer bileşenlerin konstrüksiyonu ve aktarma elemanlarına bağlı olarak 4 ana tip altında sınıflandırılmaktadır. Bunlar "Seri Hibrit", "Paralel Hibrit", "Seri-Paralel Hibrit" veya "Split Paralel Hibrit" şeklindedir. "Split Paralel Hibrit" yapısı her ne kadar "Paralel Hibrit" yapısının bir alt türü olsa da kullanımının yaygınlaşması ile birlikte 4. ana türü oluşturmaktadır.

2.2.1 Seri hibrit yapısı



Şekil 2.1 : Seri Hibrit Araç Şeması

Seri tip hibrit araçlarda tahrik elemanı olarak yalnızca elektrik motoru kullanılmaktadır. Elektrik motorunun çalışabilmesi için gerekli elektrik enerjisi, batarya ünitesi ve içten yanmalı motor tarafından tahriklenen jeneratör vasıtasıyla sağlanmaktadır. Gücün, batarya ünitesi ve elektrik motoru arasındaki paylaşım oranı ise kontrol stratejisine bağlı çalışan bir kontrolör ile belirlenmektedir.

Bu tip araçlarda bataryalar, hem içten yanmalı motordan jeneratöre aktarılan güç hem de rejeneratif fren sistemi olarak adlandırılan ve konvansiyonel araçlarda aracın fren yapması esnasında ısı enerjisi olarak kaybedilen enerjinin depolanması ile şarj edilmektedir.

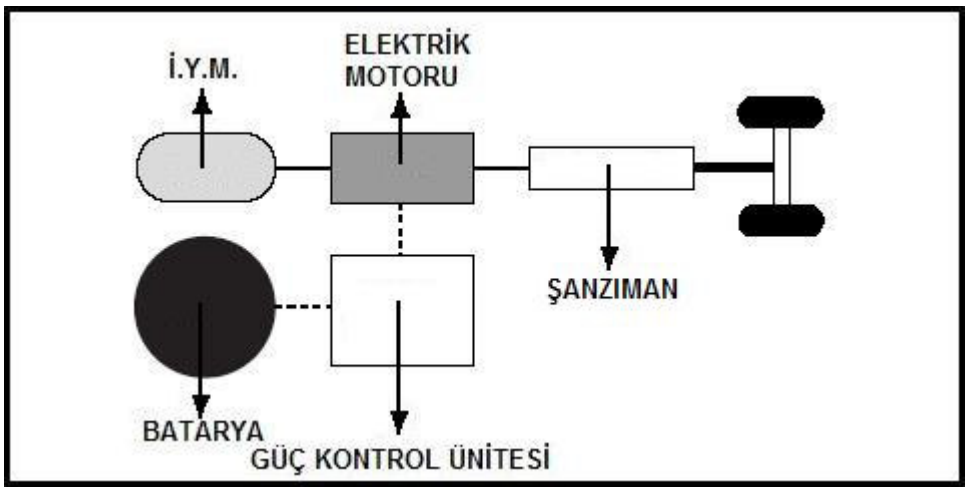
Şekil 2.1'de görülen seri hibrit yapısı, en basit hibrit elektrik araç konfigürasyonunu oluşturmaktadır. Araç, yalnızca elektrik motoru tarafından tahriklendiği için debriyaj sistemi veya çok vitesli bir şanzıman sistemine gerek duymamaktadır. Ayrıca içten yanmalı motor doğrudan aksa bağlı olmadığı için en verimli noktalarında çalıştırılabilmektedir. Bu nedenle seri konfigürasyonda geleneksel motorların yerine gaz türbini, Atkinson veya Stirling gibi farklı motor türlerinin kullanımı mümkündür.

İçten yanmalı motor ile tahrik tekerlekleri arasında direk bağlantı bulunmaması sebebiyle seri hibrit sistemlerde konvansiyonel araçlara göre daha küçük motor kullanılarak yüksek verim elde etmek amacıyla daha büyük batarya ünitesi seçilmektedir. Geleneksel bir araca kıyasla aynı gücün aranması durumunda, yüksek kapasiteli batarya üniteleri ve güçlü elektrik motorlarının pahalı olmasından dolayı seri tip hibrit elektrikli araçlar paralel hibrit yapısına göre daha az ekonomiktir.

Ayrıca içten yanmalı motordan elektrik enerjisi elde etmek için kullanılan jeneratör de bu yapıya ek maliyet getirmektedir.

Seri tip hibrit elektrikli araçların en büyük avantajı düşük hızlarda ve sık dur kalk olan şehir içi trafiğinde görülmektedir. Yüksek hızlarda ve otoyol sürüşlerinde ise içten yanmalı motor tarafından üretilen gücün devamlı olarak elektrik enerjisine çevrilmesi ve bununda bir kısmının depolanıp bir kısmının da elektrik motoru vasıtasıyla tekrar mekanik enerjiye dönüştürülmesinin getirdiği verimsizlik bu yapının dezavantajı olarak ortaya çıkmaktadır. Söz konusu avantaj ve dezavantajın şehiriçi trafiği karakteristiği ile örtüşüyor olmasından dolayı günümüzde devam etmekte olan çoğu seri tip hibrit elektrikli araç projeleri toplu taşıma araçları üzerinde yürütülmektedir [12].

2.2.2 Paralel hibrit yapısı



Şekil 2.2 : Paralel Hibrit Araç Şeması

Paralel tip hibrit araçların seri yapıdan farkı, elektrik motoru ve içten yanmalı motorun birlikte aracı tahrikleyebilmesidir. Günümüzdeki örnekleri Honda firması tarafından üretilen Insight ve Civic modelleridir.

Şekil 2.2'de görülen paralel yapı, seri yapıya nazaran mekanik bağlantılar açısından daha karmaşıktır. İçten yanmalı motorun da tekerleklere güç aktarabilmesi için konfigürasyonda bir aktarma organı mevcuttur. Bununla beraber şanzımanın elektrik ve içten yanmalı motora bağlanması için de bir elemana ihtiyaç duyulmaktadır. Son olarak tüm ünitelerin birlikte çalışmalarını sağlayacak kontrol sistemi ile seri hibrit yapısına göre daha kompleks bir yapı oluşmaktadır.

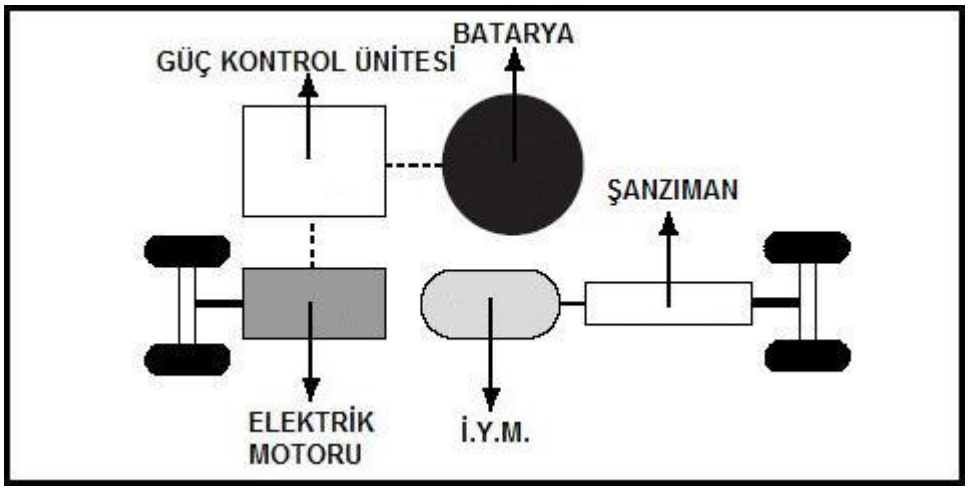
Paralel hibrit elektrikli araçların kullandığı içten yanmalı motor konvansiyonel bir aracınkine göre daha küçük olmasına karşın seri tip hibritlerin kullandığına göre çoğunlukla daha büyüklü hacimli ve pahalıdır.

Seri tip hibritlerde olduğu gibi paralel yapıda da rejeneratif frenleme ile bataryaları şarj etmek mümkün olmaktadır. Ancak bu araçlarda kullanılan batarya üniteleri daha az kapasiteli olduğundan rejeneratif frenleme ile büyük oranda şarj edilebilmektedir. Ayrıca elektrik motoru sürüş sırasında bir jeneratör gibi görev yaparak konvansiyonel araçların alternatörlerinin yaptığı şekilde bataryaları şarj etmektedir.

Paralel hibrit elektrikli araçlarda tercih edilen daha az kapasiteli elektrik motoru ve batarya üniteleri, bu araçların üretim maliyetlerinin seri hibrit araçlara göre düşük olmasını sağlamaktadır. Ancak söz konusu yapılı araçlar, aktarma organları ve diğer mekanik elemanların birbirlerine bağlanma zorunluluğu sebebiyle maliyet kıyaslamasında seri hibritlerin gerisinde kalabilmektedirler.

İçten yanmalı motorun doğrudan tekerleklere tahrik verebilmesi kabiliyeti ile seri hibritlerde karşılaşılan otoyol şartlarındaki verim kaybı gözlenmez. Şehir içi koşullarında ise paralel hibritlerin verimi azalmakta ancak tamamen yok olmamaktadır. Bu durum da paralel yapılı hibritlerin hem yüksek hız hem de şehir sürüşlerinde verim bakımından daha üstün olması anlamına gelmektedir [12].

2.2.3 Bölünmüş paralel hibrit yapısı



Şekil 2.3 : Bölünmüş Paralel Hibrit Araç Şeması

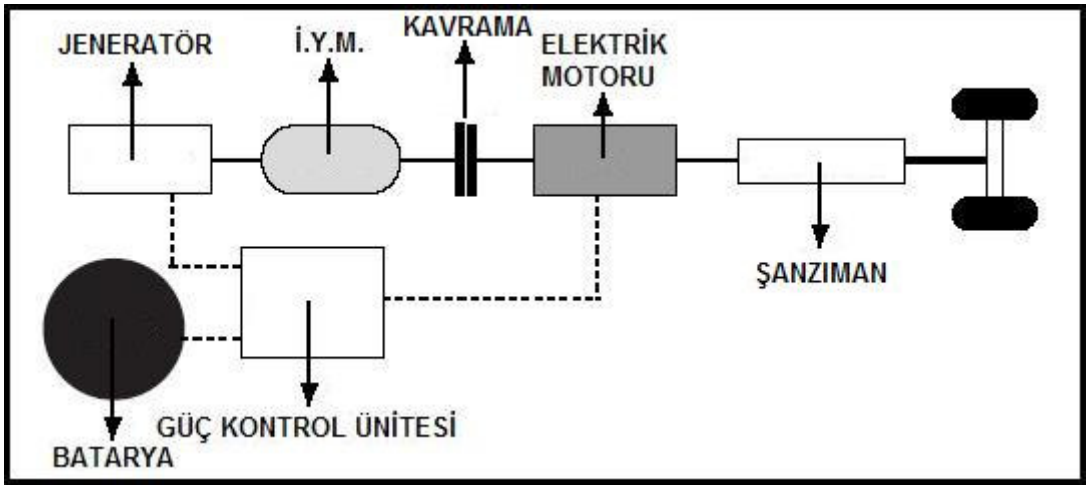
Bölünmüş paralel hibrit, paralel hibrit yapısının özel bir türüdür. Bölünmüş paralel hibrit elektrikli bir araçta elektrik motoru aracın bir aksına güç aktarırken, içten

yanmalı motor da diğer aksı tahriklemektedir (Şekil 2.3). Bu sayede 4 çeker bir sistem oluşturulabilmektedir. Ancak bu sistemde içten yanmalı motor ön aksa güç aktarırken arka aks ile rejeneratif frenleme yapılacağından içten yanmalı motor ile bataryaları beslemek daha karmaşık bir hale gelmektedir.

Bu yapının avantajları, normal şartlarda nispeten küçük içten yanmalı motor ile ekonomik sürüş sağlamasının yanında şehir sürüşlerinde yalnızca elektrik motoru sayesinde arka aksından tahrik alarak sıfır emisyon seviyesine ulaşabiliyor olmasıdır. Ayrıca engebeli arazilerde ve otoyol şartlarında dört çeker opsiyonu ile sürüş keyfini arttırmaktadır [12].

Söz konusu sistem günümüzde Daimler Chrysler tarafından Dodge Durango SUV ve Mazda tarafından üretilmiş MX Sport Tourer modellerinde kullanılmaktadır.

2.2.4 Seri paralel hibrit yapısı



Şekil 2.4 : Seri Paralel Hibrit Araç Şeması

Bu yapıda, seri hibrit elektrikli araçların sahip olduğu içten yanmalı motorun en verimli noktalarında çalıştırılabilme avantajı ile paralel hibrit yapının getirileri bir arada kullanılmaktadır (Şekil 2.4). Seri/Paralel hibrit yapısı, içten yanmalı motorun aracı tahrikleyebilmesi bakımından paralel yapı ile birbirine benzemektedir. Sistemi farklı kılan nokta, gerektiği durumlarda içten yanmalı motorun şanzımandan ayrılarak seri hibrit yapıda olduğu gibi jeneratör vasıtasıyla elektrik enerjisi üretip batarya ünitesini besleyebilmesidir.

Seri/Paralel yapılı hibrit elektrikli araçların en büyük avantajı, içten yanmalı motorun verim açısından en iyi olduğu noktalarda daha uzun süre çalıştırılabilmesidir. Düşük

hızlarda içten yanmalı motorun, tahrikliediği aks ile bağlantısı kesilerek aracın mevcut şartlar altında seri bir hibrit gibi davranarak ilerlemesi sağlanmaktadır. Ancak içten yanmalı motorun verimli çalışma bölgelerine erişilebilecek yüksek hızlara geçildiğinde, seri hibrit yapısının etkisiz enerji dönüşümleri terkedilerek veya oran azaltılarak tahrik doğrudan konvansiyonel motor ile sağlanmaktadır [12].

Seri/Paralel hibrit yapısı, seri ve paralel hibrit yapılarından daha etkili çalışma potansiyeline sahiptir. Ancak bu yapıda da seri hibrit yapısında olduğu gibi jeneratör ve yüksek kapasiteli batarya üniteleri gereksinimi sebebiyle maliyet artmaktadır. Aynı zamanda söz konusu yapıda, bir yandan paralel yapının mekanik karmaşıklığı mevcut iken diğer yandan iki farklı hibrit sisteminin bileşimi olmasından dolayı kontrol sistemine binen yük de fazladır.

3. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN BİLEŞENLERİ VE HİBRİTLEŞME DERECELERİ

3.1 Hibrit Elektrikli Araç Bileşenleri

3.1.1 Elektrik motorları

Hibrit elektrikli araç konfigürasyonlarında isminden de anlaşıldığı gibi elektrik motorları, batarya ünitesinden sağlanan elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirmek için kullanılmaktadır. Genel olarak iki tipten faydalanılmaktadır. Bunlar "Doğru Akım (DC)" ve "Alternatif Akım (AC)" motorlarıdır.

DC motorlar, tork sağlayan manyetik alanı oluşturan sargı düzenine sahip hareketsiz bölüm; stator, mekanik gücün alındığı milin üzerinde stator sargılarının ortasında serbestçe dönebilecek şekilde yerleştirilmiş olan; rotor ve manyetik güçleri tersine çevirerek rotorun dönmesini sağlayan ve böylece mekanik enerjiyi oluşturan değiştirici elemandan oluşmaktadırlar [12].

DC motorlarda olduğu gibi AC motorlarda da rotor ve stator bulunmaktadır. Ancak sürekli bir akım değişimi olduğundan değiştirici elemana ihtiyaç duyulmamaktadır. AC motorlar daha ucuz ve hafif olma özelliklerini taşırken, DC motorlar daha basit bir kontrol ünitesi ile çalışabilme özelliği sayesinde nispeten daha ucuz bir motor-kontrol ünitesi çifti oluşturmaktadırlar. AC motorların dezavantajı, batarya ünitesinden gelen doğru akımı alternatif akıma çevirmekle görevli elektronik bir elemanın getirdiği ek maliyettir. DC motor-kontrol ünitesi çifti daha ucuz olmasına rağmen, ilerleyen teknoloji ile gelişen ve fiyatları düşen elektronik paketler sayesinde hafif ve daha verimli olan AC motorlar, hibrit elektrikli araçlar için öncelikli tercih edilir hale gelmiştir (Tablo 3.1). Ayrıca hafif olmaları, uygulamalarda karşılaşılan kapasite kaybını azalttığından ilave tercih sebebidir. Bir diğer önemli fark ise AC motorların tam yükte %95 verime sahip iken DC motorların ortalama %90 verime sahip olmalarıdır. Diğer yandan DC motorlar tahrik elemanına direk bağlanamamaktadırlar. Çok vitesli bir şanzımana ihtiyaç duymaktadırlar.

Tablo 3.1: AC ve DC Motorların Karşılaştırılması

AC ve DC Motorların Karşılaştırılması	
AC Motorlar	**DC Motorlar**
Tek vitesli şanzıman ile kullanılabilmektedirler.	Çok vitesli şanzımana ihtiyaç duymaktadırlar.
Hafif ve ucuzlar.	Aynı oranda güç için ağır ve pahalılar.
Tam yükte % 95 verime sahiptirler.	Tam yükte % 85-95 arası verime sahiptirler.
Daha karmaşık yapılı ve pahalı kontrol ünitesi ile çalışmaktadırlar.	Basit yapılı bir kontrol ünitesi ile çalışabilmektedirler.

Hibrit elektrikli araç uygulamalarında kullanılan AC motorlar, göreceli olarak ucuz ve aynı zamanda dayanıklıdırlar. Güvenilir olmalarıyla birlikte mil haricinde hareketli parçaya sahip olmadıklarından araç ömrü boyunca çok az sayıda bakıma ihtiyaç duymaktadırlar (Tablo 3.2).

Tablo 3.2: Elektrik Motorlarının Özellikleri

Elektrik Motorlarının Özellikleri			
	Fırçalı DC	**Fırçasız DC Sabit Mıknatıs**	**AC İndüksiyon**
Maksimum Verim [%]	85 – 89	95 – 97	94 – 95
% 10 Yükte Verim [%]	80 – 87	73 – 82	93 – 94
Maksimum Devir	4000-6000	4000-10000	9000-15000
Mil Gücü Başına Maliyet [$/HP]	100 – 150	100 – 130	50 – 75
Kontrol Ünitesi Maliyet Oranı	1	3 – 5	6 – 8

3.1.2 Jeneratörler

Seri ve Seri/Paralel yapılı hibritlerde, içten yanmalı motor tarafından üretilen mekanik enerjiyi, batarya ünitesini beslemek veya doğrudan elektrik motorunu tahriklemek üzere elektrik enerjisine çeviren bağımsız elemanlardır. Paralel yapılı hibritlerde ise rejeneratif frenleme vasıtasıyla batarya ünitesi şarj edildiğinden bağımsız bir elemandan ziyade motor/jeneratör çifti kullanılmaktadır. Elektrik

motorlarında tercih edildiği gibi jeneratörlerde de AC motor kullanımı mümkün olmaktadır.

3.1.3 Güç kontrol üniteleri

Güç kontrol ünitelerinde, bataryadan gelen doğru elektrik akımı kontrol altında tutularak inverter ile alternatif akıma dönüştürülerek elektrik motoruna aktarılmaktadır.

Aynı zamanda araçtaki 12V altında çalışan tüm elektrik donanımını beslemek üzere, gücünü elektrik motoru/jeneratör çiftinden veya bataryadan sağlayan bir DC/DC dönüştürücü kullanılmaktadır. Söz konusu durumdaki amaç, araçta ayrıca bir akü olması ve bu akünün konvansiyonel araçlarda olduğu şekilde bir alternatör ile şarj edilmesi yerine sisteme doğrudan elektrik aktarılmasını sağlamaktır. Bu yol ile alternatörün ortandan kaldırılması, içten yanmalı motorun yükünü azalmakta ve yakıt ekonomisini iyileştirmektedir. Ek olarak 12V elektrik donanımına batarya ünitesinden enerji sağlanması sonucu aktarılan voltaj değerleri sabit kalabilmektedir.

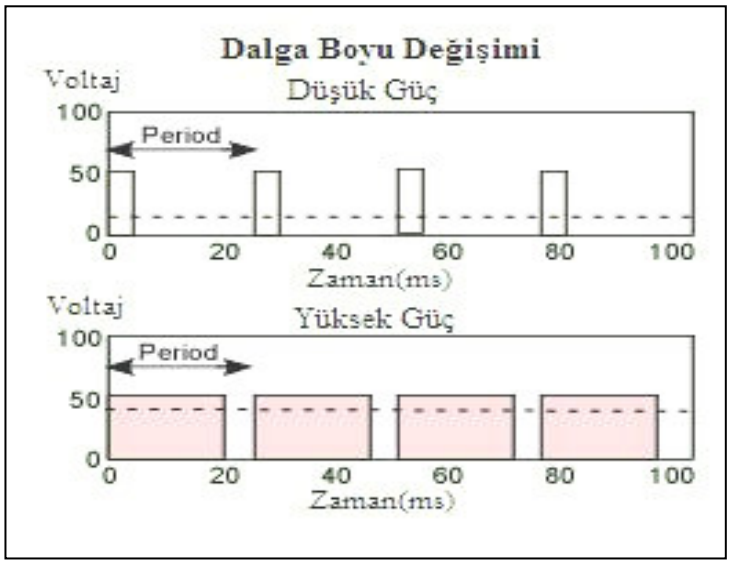
3.1.4 Elektrik motoru kontrol üniteleri

Elektrik motoruna batarya ünitesinden veya seri/paralel yapılı sistemlerde olduğu gibi doğrudan içten yanmalı motor tarafından gerçekleştirilen enerji akışı kontrol ünitesinin denetimi altında meydana gelmektedir. Aracın geriye hareketini sağlayacak elektrik motorunun ters yöndeki dönüşü yine motor kontrol ünitesi tarafından belirlenmektedir. Ayrıca kontrol ünitesi, elektrik motorunu frenleme esnasında jeneratör gibi davrandırarak bataryanın şarj olmasını sağlamaktadır.

DC motordan tahrik alan ilk elektrikli araçlarda basit değişken rezistör tipi bir kontrol ünitesi, elektrik motorunun çalışma konumunu belirlemekteydi. Bu kontrol tipinde bataryadan sürekli tam akım ve güç çekilmekteydi. Tam gücün gerekmediği düşük hızlarda motora gelen akımı azaltmak için yüksek değerde bir rezistans kullanılıyor ve bataryadan gelen enerjinin büyük bir kısmı rezistörlerde kayba uğruyordu. Yalnızca yüksek hızlarda sahip olunan gücün hepsi kullanılabilmekteydi.

Günümüzde kullanılan modern kontrol ünitelerinde ise hız ve tork ihtiyacına bağlı olarak Şekil 3.1'de görüldüğü gibi dalga boyu değişim işlemi devreye sokulmaktadır. Doğrultucu benzeri silikon kontrollü anahtarlama elemanları sayesinde elektrik motoruna giden akım kesilebilmekte veya devam ettirilebilmektedir [12].

Akımın kapalı olduğu aralıklar kısaldıkça motordan yüksek güç elde edilmekte, uzadıkça ise motor düşük güçte çalışmaktadır.



Şekil 3.1 : Dalga boyu değişimine bağlı olarak elektrik motoru güç kontrolü.

3.1.5 Rejeneratif frenleme sistemleri

Rejeneratif frenleme sistemleri, içten yanmalı motor freni veya fren pedalına basılmak suretiyle hidrolik fren sisteminin devreye alınması ile birlikte elektrik motorunu jeneratör gibi çalıştırıp aracın kinetik enerjisini elektrik enerjisine çevirerek batarya ünitesini beslemektedir. Söz konusu sistem özellikle şehir içi sürüşlerinde sıkça tekrarlanan durup kalkma esnasında önemli miktarda enerjinin geri kazanımını sağlamaktadır.

Hibrit elektrikli araçlarda, servis freni devreye alınmak için fren pedalına basıldığında, elektronik kontrollü rejeneratif frenleme sistemleri hidrolik fren ile rejeneratif fren arasındaki koordinasyonu sağlayarak önceliği mümkün olduğunca rejeneratif kazanıma verecek şekilde frenleme işleminin gerçekleşmesini sağlamaktadır. Yüksek hızların kullanılmadığı şehir içi sürüşlerinde frenleme büyük oranda elektrik motoru tarafından sağlanarak rejenarasyona imkan tanınmaktadır. Ancak kısa mesafeli duruşlar gerektirecek panik frenler söz konusu ise güvenlik açısından hidrolik frenlere öncelik verilmektedir. Söz konusu geçişlerin sağlanabilmesi için aracın sahip olduğu konvansiyonel fren sistemine ilave elemanlar eklenerek sürücünün fren pedalına ne kadar bastığı ya da fren pedalına uyguladığı kuvvetin ölçülmesi gereklidir.

3.1.6 Araç kontrol sistemleri

Hibrit elektrikli araçların kontrol sistemleri yapılarına göre değişiklik göstermekle birlikte genel olarak benzer hedeflere odaklanmışlardır. Sistemlerin temeli, içten yanmalı motoru en verimli noktalarında çalıştırmak, elektrik motorunu doğru zamanlarda devreye sokarak aracın diğer kontrol sistemlerinden gelen verilere bağlı kalıp kaynakları doğru oranlarda kullanarak gerekli gücü sağlamak ve bu gücün tahrik veya şarj için ayrılmasını belirlemektir.

Araç kontrol sistemleri sürekli olarak aracın diğer bileşenlerinden gelen verileri izlemektedir. Bir başka deyişle her bir kontrol ünitesinin bağlı olduğu ve araç geneline göre tüm çıktıları üreten sistemlerdir. İçten yanmalı motor, elektrik motoru, batarya ve jeneratörden gelen bilgilerin yanı sıra elektronik fren sisteminin aktardığı frenleme ve sürücünün belirlediği gaz pedalı konumu gibi bilgiler de araç kontrol sistemlerinde toplanmaktadır. Bu veriler sayesinde söz konusu sistemler, hibrit elektrikli aracın modlarını belirleyerek en yüksek verimde çalışmasını sağlamaktadır.

3.1.7 Enerji depolama üniteleri (Bataryalar)

Enerji depolama ünitelerinin hibrit elektrikli araçlarda görevli değişmektedir. Seri yapılı hibrit araçlarda temel güç kaynağı olarak kullanılırken, diğer türlerde temel güç kaynağı ile birlikte araca aktarılan tahrik gücünü arttırmak için de kullanılmaktadır. Aracın sahip olacağı batarya gücü, tek bir hücre ile birçok bataryanın birleştirilmesiyle oluşturulacak bir deste kullanılması arasında değişiklik göstermektedir. Batarya sisteminin temel güç kaynağı olarak kullanılacağı durumlarda, aracın ihtiyacı olan güç ve enerjiyi karşılayabilecek olan ünitenin ağırlığı ve hacmi aracın tasarımı açısından büyük önem taşımaktadır. Daha yüksek güç ve enerji yoğunluğu elde etmek üzere yapılan çalışmalar sonunda birçok batarya çeşidinin hibrit elektrikli araç uygulamalarında kullanılabileceği görülmüştür. Günümüzde geliştirilen batarya tipleri, daha fazla deşarj oranına, güce ve enerji depolama kapasitesine sahiptirler.

Enerji depolama ünitelerinin değerlendirilmesine ve değişik türlerinin kıyaslanmasına olanak sağlayan önemli özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Kapasite, enerji depolama sistemlerinin ne kadar enerji depolayabileceğinin ölçüsüdür. Tam şarj edilmiş bir bataryadan alınabilecek enerji sıcaklık, deşarj hızı, batarya yaşı ve tipi gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu nedenle bir bataryanın kapasitesi

tek bir birim ile belirlenememektedir. Kapasite tanımı için kullanılan temelde üç büyüklük mevcuttur.

Amper-Saat; bir bataryanın, sabit hızla belirli zamanda deşarj olacağı akım değerini amper-saat (Ah) özelliği belirler. 60 Ah C/20 olan bir batarya 20 saatlik deşarj süresince 60 Ah üretecektir. Bu da yeni ve tam dolu söz konusu bataryanın 20 saat boyunca 3 amperlik bir akım sağlayacağı anlamına gelmektedir.

Depolama Kapasitesi; bu özellik bataryanın belirli bir deşarj seviyesini gerçekleştireceği zamanı dakika cinsinden ifade etmektedir. Depolama kapasitesi olarak 25 amper için 35 dakika verilmiş ise tam dolu bu bataryanın 35 dakika boyunca 25 amper akım üreteceği belirtilmektedir.

Kilowatt-Saat Kapasitesi; bu ifade boş bir bataryanın tam şarj olması için gerekli enerjiyi tarif eden bir ölçüdür. Boş batarya tam olarak deşarj olmuş batarya anlamına gelmemektedir.

Söz konusu büyüklüklerin hiçbiri bir bataryanın kapasitesini tam olarak tarif edemez. Bu değerlerin her biri belirli şartlar altındaki kapasiteleri göstermektedir. Uygulamalarda batarya performansı, değişik şarj/deşarj hızları, batarya yaşı, çevrim geçmişi veya sıcaklığa bağlı olarak büyük ölçüde değişmektedir.

Voltaj, bir batarya iki veya daha fazla pil hücresinin bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Normalde 2,1V gerilim üreten bir pil hücresinden 3 tane kullanılarak oluşturulan batarya 6,3V gerilim üretecektir. Ancak bu değerler tam dolu bir batarya için geçerlidir ve kullanıldıkça sağladığı voltaj düşecektir.

Deşarj oranı; bir enerji depolama ünitesinin tam olarak boşalması çoğunlukla tahribata yol açmakta ve kullanım ömrünü kısaltmaktadır. Yüksek deşarj oranına sahip kurşun-asit bataryalar, kapasitelerinin %15-20'lik kadar kısmına kadar deşarj olabilmektedirler. Bu da %85-80 civarında bir deşarj oranına denk gelmektedir. Yüksek şarj oranlı bir batarya %80 boşalma oranıyla çalıştığı durumda 300 şarj/deşarj çevrimi kadar bir ömre sahip ise %50 boşalma oranıyla çalıştığı takdirde ömrü 600 çevrime çıkabilmektedir.

Ağırlık/Hacim; hibrit elektrikli araç tasarımı süresince batarya seçiminin önemli bir etkeni ünitenin toplam ağırlığı ve hacmi olmaktadır. Değişik batarya tipleri sabit hacim veya ağırlık için farklı enerji ve güç kapasiteleri sunmaktadırlar. Bu noktada

bataryanın hacim veya ağırlık başına verdiği güç ile enerjiyi tanımlayan parametreler özgül enerji ve özgül güçtür.

Özgül Enerji; enerji yoğunluğu olarak da tanımlanabilen bu parametre bataryadan birim hacim veya ağırlık başına ne kadar enerji alınabileceğinin ölçüsüdür. Deşarj oranı yüksek olan bataryalar genel olarak daha büyük enerji yoğunlukları sağlama potansiyeline sahiptirler.

Özgül güç ise birim hacim veya ağırlık başına düşen batarya ünitesinin gücüdür. Konvansiyonel bir aracın yakıt tüketim sistemi ile benzerlik kurulmaya çalışılır ise enerji yoğunluğu yakıt tankının büyüklüğünü, güç yoğunluğu ise yakıtın oktan sayısını simgelemektedir.

Çalışma Sıcaklığı; enerji depolama ünitelerinin en iyi çalıştıkları bir sıcaklık aralığı mevcuttur. Çoğu kurşun-asit batarya için 30-35 °C aralığı optimum çalışma bölgesidir. Kurşun-asit bataryalar 50 °C üzerindeki sıcaklıklarda zarar görmekte ve ömürleri kısalmaktadır. Yine bu bataryaların performansı 20 °C altında oldukça düşmekte ve sıcaklığın azalmasıyla birlikte performans düşüşü hızlanmaktadır. Bunun yanı sıra bataryaların donması da mümkündür. Tam dolu bir kurşun-asit batarya -20 °C civarına kadar dayanabilir ama şarj miktarı düşük olan bir batarya 0 °C sıcaklıkta dahi donabilir.

3.1.7.1 Enerji depolama ünitelerinin çeşitleri

Günümüzde hibrit elektrikli araç uygulamalarında kullanılmakta olan birçok batarya seçeneği bulunmaktadır. Tablo 3.3'te söz konusu bataryaların bazıları en genel özellikleri ile sıralanmıştır. Özgül enerji değerleri C/3 hızı, 3 saatlik deşarj süresi için geçerlidir. Özgül güç değerleri ise 20 saniyelik süre boyunca %80 boşalma oranına göre ölçülmüş değerlerdir. Ayrıca çalışma sıcaklığı aralıkları, taşıt uygulamaları için mevcut durumları, büyük ölçekli üretim için maliyetleri, ana üreticileri ve kullanıldığı taşıtlar da belirtilmiştir. Tabloda da görüldüğü gibi en yaygın kullanılan tip Ni-MH (Nikel-Metal Hidrid) bataryalardır. Çoğu büyük otomotiv üreticisi söz konusu batarya ünitelerini tercih etmektedir. Ancak dezavantaj olarak karşılaşılan nokta çalışma sıcaklığı üst limitinin nispeten düşük olmasıdır. Bu durumda elektrik motorunda olduğu gibi ilave bir soğutma sistemi ile batarya üniteleri de soğutulmalıdır. Günümüzdeki üreticileri Panasonic, Ovonic, Saft ve Cobasys firmalarıdır.

Tablo 3.3: Batarya Çeşitleri ve Özellikleri

Batarya Tipi	Enerji Yoğunluğu [Wh/kg]	Enerji Yoğunluğu [Wh/L]	Güç Yoğunluğu [W/kg]	%80 deşarj çevrim ömrü	Çalışma Sıcaklığı Aralığı [C]	Taşıt Uygulamaları İçin Mevcut Durumu	Büyük ölçekli üretimde maliyeti [$/kWh]	Ana üreticiler	Kullanıldığı taşıtlar
Kurşun-Asit	35	70	150	1000	-18/ +70	üretimde	60	Trojan, Hawker, Exide, Interstate	CARTA bus, Solectria E10
İleri Kurşun-Asit	45	-	250	1500	-	üretimde	200	Delphi, Horizon, Electrosource	Audi Duo, GM EV1 (VLRA), Solectria Force
Nickel-Metal Hidrid	70	170	200	2000+	-10/ +45	üretimde	250	Panasonic, Ovonic, SAFT	Toyota RAV4-EV, Toyota Prius, Chrysler Epic minivan, Honda EV, Chevy S-10
Nikel-Kadmiyum	50	75	200	2000	-40/ +60	üretime hazır	300	SAFT	WWU Viking 23
Lityum-İyon	120	200	120-150	1000+	-	laboratuar	150	SONY, SAFT	Nissan Altra EV
Çinko-Bromür	70	60	100	500	-	-	300	-	-
Lityum-Polimer	200	-	350	1000	60/ 100	laboratuar	150	-	-
NaNiCl	90	>150	100	-	270/ 350	prototip	-	AEG Anglo	-
Çinko-Hava	110	80	80-140	200	-	prototip	100	Liquid Fuel	-

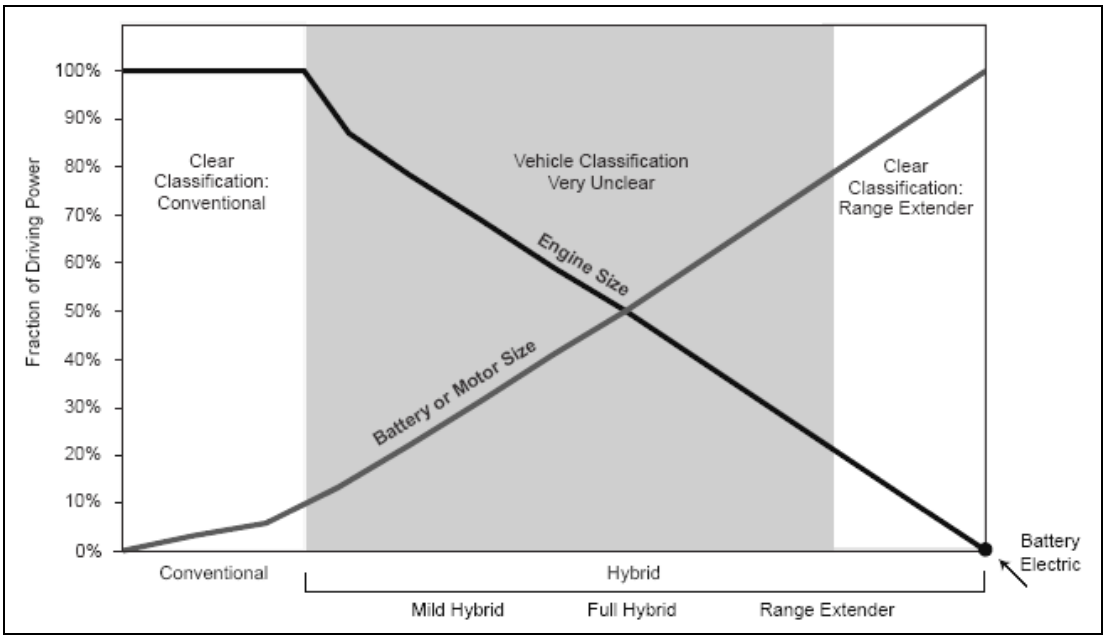
3.2 Hibritleşme Dereceleri

Hibrit elektrikli araç teknolojileri, elektrik ve içten yanmalı motorlar tarafından sağlanan tahrik gücünün oranına bağlı olarak sınıflandırılmaktadır. Bataryalı elektrikli araçlar ve daha büyük elektrik sistemli hibrit yapılı araçlar için bu sınıflandırmayı yapmak oldukça kolay olmaktadır. Benzer şekilde içten yanmalı motoru küçültülmemiş ve elektrik enerjisi bir marş motoru jeneratöründen oluşan; dolayısıyla tek farkının araç durduğunda içten yanmalı motorun çalışmaması olan geleneksel bir aracın da yeri basitçe belirlenebilmektedir.

Hibrit yapısına rejeneratif frenleme sistemi ve içten yanmalı motorun küçültülmesi gibi yeni fonksiyonlar yüklendiğinde ise sınıflandırma yapmak güçleşmektedir. Diğer önemli bir husus da elektrik sisteminin gücünün, hibrit elektrikli aracın çevresel performansını tam olarak yansıtmamasıdır. Bu durum, yakıt ekonomisinde

yapılan geliştirmelerin aracın elektrik gücüyle az miktarda ilişkili olmasından kaynaklanmaktadır.

Hibrit elektrikli araçları sınıflandırmanın daha doğru diğer bir yolu ise aracı, konvansiyonel seviyeden elektrikli araç konumuna taşıyan teknolojileri sıralamaktır. Böylece aracın, hibritleşme seviyesi ve bir elektrikli araca olan yakınlığı daha iyi belirlenebilmektedir. Araçtaki elektrik sisteminin gücü bu nokta da ikinci derecede önemli bir faktör olarak yer almaktadır.



Şekil 3.2 : Kullanılan tahrik gücüne göre araçların sınıflandırılması

Bu sınıflandırma şekline göre (Şekil 3.2) konvansiyonel ve elektrikli araçlar arasındaki farklar, her bir aracı yakıt hücreli veya bataryalı elektrikli araca bir adım yaklaştıran dört temel basamağa ayrılmıştır [4].

3.2.1 Boşta çalışmama kabiliyeti

Tüm hibrit elektrikli araçlar, hareket halinde olmadıkları sürece içten yanmalı motorlarının çalışmasını durdurabilmektedirler. Ancak bu durumu gerçekleştiren her araç hibrit değildir. Konvansiyonel araçlar da bu özelliğe alternatör ile güçlendirilmiş bir marş motoru kullanarak erişebilmektedir. Hibrit araçlar ise bu işi tam fonksiyonlu bir elektrik motoru ile gerçekleştirmektedirler. Bu nedenle boşta çalışmama özelliği, hibrit bir aracı konvansiyonel araçtan ayırmak için yeterli değildir. Bir aracın,

geleneksel yapıdan yarı hibrit yapıya geçebilmesi için takip eden iki özelliği de kapsaması gerekmektedir.

3.2.2 Rejeneratif frenleme kabiliyeti

Söz konusu sistem, frenlemenin bir bölümünü gerçekleştirebilecek büyüklükte bir elektrik motoruna ve kaybedilen enerjiyi depolayabilecek bir batarya ünitesine sahip olmalıdır. Bu özellik hibrit elektrikli araçları konvansiyonel araçlardan ayıran önemli bir özelliktir. Bazı otomotiv şirketleri tarafından geleneksel araçlarda denenen, birleşik jeneratör marş motoru ile rejeneratif frenleme kullanımı, düşük güç seviyesi ve voltaj değerlerinde çalıştığından yakıt ekonomisini arttıracak derecede bir enerji korunumu sağlayamamaktadır. Maksimum gücün en az %10'u kadarlık bir bölümünü elektrik motorundan sağlayan bir araçta ise rejenaratif frenlemenin gerçekten faydalı bir şekilde kullanılması hibrit yapının bir gerekliliğidir.

3.2.3 İçten yanmalı motorun küçültülmesi

İçten yanmalı motorun küçültülmesi ile azalan güç, elektrik motorunun katkısıyla tekrar arttırılmakta ve toplam performans daha büyük bir içten yanmalı motor ile ulaşılabilen hale gelmektedir. Söz konusu uygulama ile 6 silindirli bir iten yanmalı motor kullanan araçta 4 silindirli bir içten yanmalı motor ve elektrik motorunun birlikte çalıştığı bir yapı kurulması sonucu araçtan 4 silindirlik içten yanmalı motorun sağlayacağı yakıt ekonomisi ile 6 silindirin vereceği performansın alınması mümkün kılınmaktadır. Bu durum aracın performansını arttırırken yakıt ekonomisini de iyileştirdiği için gerçek bir hibritleşme basamağı sayılmaktadır.

Eğer araca bir elektrik motoru eklenir ancak içten yanmalı motor küçültülmezse oluşan yapı teknik açıdan hibrit olarak isimlendirilebilir. Fakat bu durumda sistem esas olarak aracın gücünün arttırılmasına yarayacak öte yandan yakıt ekonomisi açısından büyük bir fayda sağlamayacaktır. Sonuçta hibrit teknolojisinin önemli bir unsuru olan yakıt ekonomisi gözardı edilmiş ve bir güç makinesi yaratılmış olacaktır. İçten yanmalı motor hacminin küçültülmesi ile yalnız içten yanmalı motor sürüşünde araç performans açısından zayıflasa da sürücünün tork talep durumlarda iyi bir kontrol algoritması ile sorun çözülüp sürücünün gereksinim duyduğu tork elektrik motoru ve içten yanmalı motorun birlikte çalışması ile sağlanabilmektedir. Bir araç, rejenaratif frenleme ve motor küçültülmesi işlemlerine sahip ise bu araç "yarı hibrit " seviyesinde sayılabilir.

3.2.4 Sadece elektrik motoru ile sürüş

Elektrik motoru ve batarya ünitesini kullanarak aracın sürülmesi, içten yanmalı motorun sadece araç dururken değil ilerlerken de devre dışı bırakılmasına olanak tanıması açısından "yarı hibrit" yapıdan "tam hibrit" yapıya geçişi ifade etmektedir.

Bu sistemin kurulması ile içten yanmalı motorun küçültülmesinden bir adım daha ileri gidilerek elektrikli araç teknolojisine daha da yaklaşılmaktadır. Aynı zamanda içten yanmalı motorun en verimsiz çalıştığı düşük güç bölgelerindeki operasyonları durdurularak motor verimliliği arttırılabilmektedir. Böylece "tam hibrit" yapı, batarya ve elektrik motorunu kullanarak aracın kalkışını sağlar ve içten yanmalı motorun daha verimli çalışabileceği noktaya kadar sadece elektrik motoru ile sürüşe devam eder. Elektrik motorunun aracı 40 km/h hıza kadar tek başına sürmesi ile içten yanmalı motorun toplam verimliliği önemli ölçüde arttırılabilir.

4. UYGULANACAK HİBRİT YAPININ VE DÖNÜŞÜMÜN YAPILACAĞI ARACIN BELİRLENMESİ

4.1 Hibrit Yapının Seçimi

Hibrit elektrikli araç dönüşümünün tasarlanması ve bu duruma bağlı olarak gerekli bileşenlerin seçilebilmesi için öncelikle araca uygulanacak hibrit yapının belirlenmesi gerekmektedir.

Konfigürasyonun seçiminde göz önüne alınması gereken önemli kriterler aşağıdaki gibidir.

- Sistemin temel hedefinin yakıt tüketimi olarak belirlenmesi ve oluşturulacak yapının, aracın çalışma şartlarında sağlanabilecek en yüksek verimi vermesi.
- Aracın, dönüşüm sonrasında piyasadaki hedeflerine uygun olarak hafif ticari araç beklentilerini sağlamaya devam etmesi.
- Hibrit aracın Avrupa için geçerli emisyon standartlarını sağlaması ve konvansiyonel modele göre emisyonlarda iyileşme göstermesi.
- Seçilecek yapının, mevcut yapıyı en az değişikliğe zorlayacak şekilde olması ve bu sayede hem simülasyon açısından kolaylık sağlanması hem de olası bir seri imalat durumunda maliyetin düşürülüp üretimin kompleksitesinin arttırılmaması.

Günümüzde uygulanabilir olan hibrit yapılarının bu kriterlerin tamamını en iyi şekilde sağlaması mümkün değildir. Bu sebeple seçilecek hibrit sistemin, istenenleri sağlayabilme kapasitesi açısından optimum bir noktada bulunması dikkate alınmıştır.

4.1.1 Seri hibrit yapının değerlendirilmesi

Tahrik elemanı yalnızca elektrik motoru olan bu sistemde, içten yanmalı motor batarya ünitesini şarj etme görevi görmekte ve bu durumun sonucu olarak hep verimli noktalar çalışmaktadır. İçten yanmalı motorun bu şekildeki çalışma karakteri doğal olarak büyük oranda azaltılmış egzoz emisyon değerlerini beraberinde getirmektedir.

Seri hibrit yapı, en yüksek verim ve en düşük yakıt tüketimini şehiriçi çalışma şartlarında sağlamaktadır. Söz konusu hafif ticari araç da bu şartlar altında kullanılacak bir araç olması sebebiyle seri yapının avantajlarından oldukça faydalanacaktır. Ancak, yüksek hızlarda verimin düşmesi seri yapı ile gelen büyük bir dezavantajdır.

Seri hibrit yapıda aracın sürekli olarak elektrik motoru tarafından sürülmesi zorunlu olduğundan gerekli tork ve güç değerlerinin sağlanabilmesi için güçlü bir elektrik motoru seçilmesi gerekecektir. Bu durum da günümüz teknolojisi ile daha ağır ve maliyeti yüksek bir elektrik motoru anlamına gelmektedir. Ayrıca sistem, muhtemel elektrik motorunun ihtiyaç duyacağı yüksek enerjinin depolanabilmesi için oldukça büyük ve ağır batarya ünitesini de beraberinde getirecektir. İlave elemanların, hafif ticari araç olarak kullanılacak araçta yük bölmesinin hacmini küçülteceği ve taşıma kapasitesini azaltacağı açıkça görülmektedir. Maliyeti yükseltecek ve karmaşıklığı arttıracak bir diğer sistem elemanı ise jeneratördür.

Bu sistemi kullanacak bir aracın, tüm avantajlardan tam anlamıyla faydalanabilmesi için tamamen seri yapıya uygun bir biçimde tasarlanması gerekmektedir. Bu aşamada mevcut bir aracın seri yapıya dönüştürülmesi büyük dezavantajlar getirecek olması sebebiyle uygulanabilir görülmemiştir.

4.1.2 Paralel hibrit yapının değerlendirilmesi

Paralel yapıda içten yanmalı motor ve elektrik motoru birlikte tahrik elemanı olarak görev yaptıklarından araca sağlanan güç miktarı oldukça yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Böylece aracın gereksiniminin üzerinde güç elde edilebilmektedir. Hedeflenen aracın performans amaçlı düşünülmemesinden dolayı daha küçük bir içten yanmalı motor kullanımı bu yapı ile gündeme gelmektedir. Bu şekilde yakıt tüketimini iyileştirmede önemli bir avantaj sağlanırken aracın performans karakteristiğinde büyük bir değişme olmayacaktır. Aynı zamanda emisyon değerleri de bu sayede düşürülmüş olacaktır.

Ancak mevcut aracın bu yapıya dönüştürülmesi için yapılacak değişiklikler maliyet açısından oldukça yüksek değerler getireceğinden ve geometrik fizibilite çalışmalarının neticesinde ortaya çıkan uzun proje zamanı sebebiyle paralel hibrit yapı uygulanabilir olarak görülmemiştir.

4.1.3 Bölünmüş paralel hibrit yapının değerlendirilmesi

Bu yapı, paralel yapının özel bir türüdür. İçten yanmalı motora sahip aracın tahriksiz aksına bir elektrik motor/jeneratör elemanı eklenerek hibrit yapıya dönüşümün gerçekleştirilmesine dayanmaktadır.

Önden çekişli bir araçta arka aksa konulacak motor/jeneratör, aracı iki akstan tahrikli hale getirerek toplam tahrik gücünün ve çekiş yeteneğinin artmasını sağlamaktadır. Ön aks tahrik grubuna mekanik bir bağlantı söz konusu olmadığından tasarım ve uygulama diğer yapılara göre nispeten daha basit gerçekleşmektedir.

Ayrıca yapının en büyük avantajı, basit tasarım ve uygulanabilirliği ile birlikte paralel yapıda olduğu gibi şehir sürüşlerinde yalnızca elektrik motoru sayesinde arka aksından tahrik alarak sıfır emisyon seviyesine ulaşabilmesidir.

Mevcut hafif ticari bir aracın bu yapı ile hibrit hale dönüştürülmesi, düşük maliyetli ve araç üzerinde en az değişiklik gerektirecek durumda olması sebebiyle diğer yapılara nazaran daha uygun bulunmuştur.

Bununla birlikte aracın, ticari özelliklerinin de daha az kötüleşmesi bu yapının seçiminde önemli bir etken olarak görülmüştür.

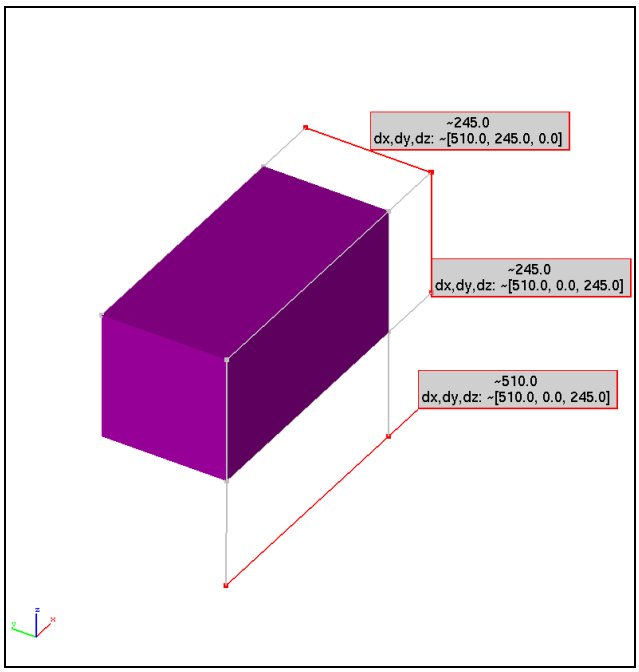
4.2 Alternatif Araçların Seçilen Hibrit Yapıya Uygunluğunun Değerlendirilmesi

Nispeten daha basit tasarım, düşük maliyet, araç üzerinde en az değişiklik ve dört çekiş gibi avantajları sebebiyle uygun bulunan "Bölünmüş Paralel Hibrit Yapı", alternatif iki hafif ticari araç için incelenmiştir.

Hibrit araç hedefleri gözetilmeden yapılan başlangıç geometrik yerleşim çalışması ile Ford Transit Connect Uzun Şasi ve Ford Transit Kısa Şasi araçlarından birinin belirlenmesi hedeflenmektedir.

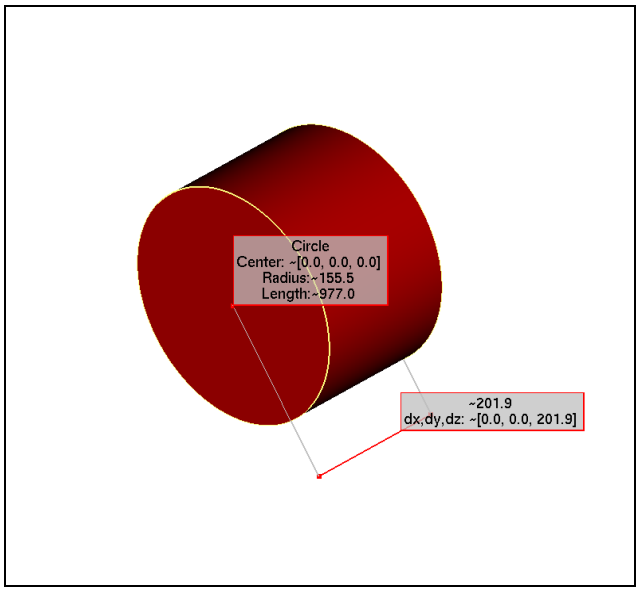
Sistemin getirdiği ilave elemanlar için en büyük boyutlar ve ortalama boyutlar esas alınarak üç boyutlu dijital ortamda regülasyonlar çerçevesinde araçların uygunluğu araştırılmıştır. Başka bir deyişle en kötü senaryo için durum incelenmiş araçların hibrit yapıya uygunluğu başlangıç çalışması olarak araştırılmıştır. Ancak araç seçimi ile birlikte belirlenecek hedeflere göre elemanların boyutları, ağırlıkları, üreticileri gibi parametreler değişecektir.

Söz konusu çalışmada elektrik motoru seçiminde, boyut ve ağırlık bakımından araç için en kötü şartları oluşturan 140kW gücünde "Ansaldo – A1H256B" asenkron motor boyutlarına yakın olan Şekil 4.1'de görülen katı model kullanılmıştır.



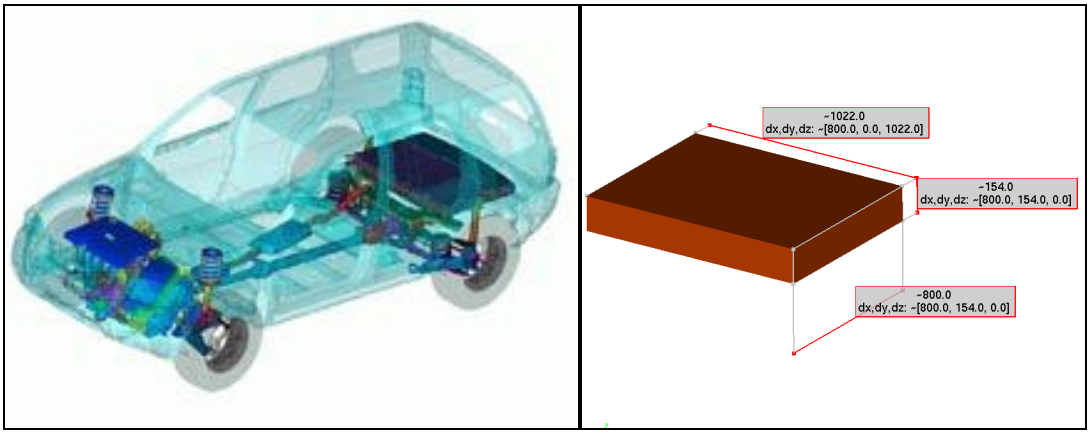
Şekil 4.1 : 140kW Ansaldo Asenkron Elektrik Motoru Temsili Geometrik Model.

Diğer bir alternatif olarak, silindirik olması sebebiyle yerleşim açısından daha fazla problem çıkarması beklenen 100kW gücünde "UQM – SR286" fırçasız elektrik motoru ise Şekil 4.2'deki model ile incelenmiştir.



Şekil 4.2 : 100kW UQM Fırçasız Elektrik Motoru Temsili Geometrik Model.

Yine hibrit yapının temel elemanlarından olan batarya ünitesinin geometrik uygunluğu ise oluşturulan araç modellerinde, Ford ürün yelpazesinden "Escape Hybrid" aracın batarya ünitesine ait katı model ile araştırılmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 : Ford Escape Hibrit ve Batarya Ünitesi.

İlk aşama olarak söz konusu elemanlar, araç modelleri üzerinde Ford ve Avrupa regülasyonlarına göre en uygun yerlere yerleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar ile projenin ilerleyen fazlarında kullanılacak prototip aracın seçimine ışık tutulmuştur.

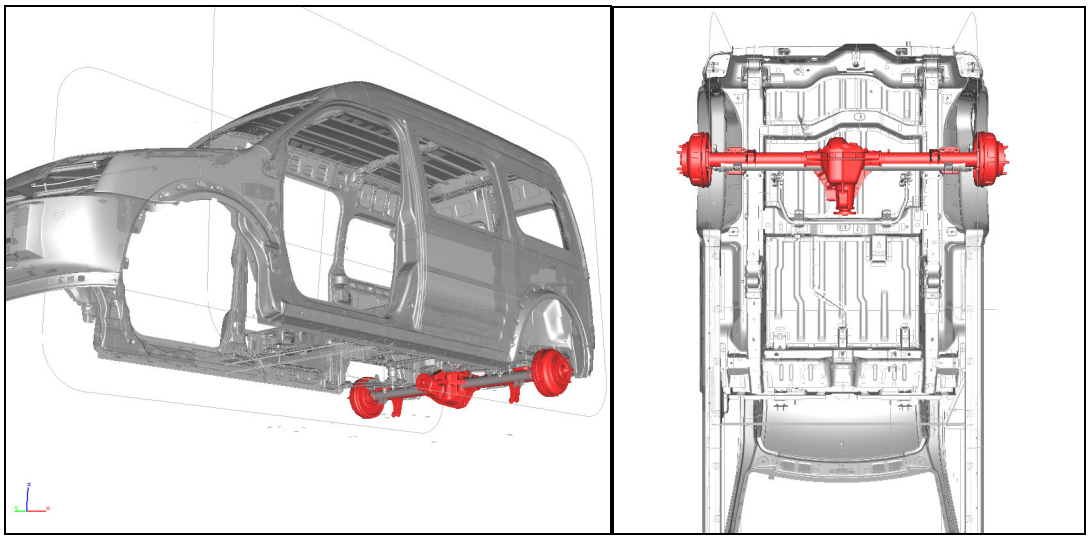
4.2.1 Ford Transit Connect uzun şasinin geometrik yerleşim açısından uygunluğunun araştırılması

Söz konusu aracın, hibrit dönüşüm incelemelerinde ikinci sıra koltuğa sahip olması, yük taşıma amaçlı kullanılan Van olarak adlandırılan yalnızca sürücü ve yolcu koltuğu içeren tiplerinin durumuna göre daha karmaşıktır. Ayrıca elemanların yerleşimi, kabin içi ergonomi ve güvenlik açısından da incelenmelidir. Bu nedenle araç modeli olarak uzun şasi diye tariflenen aks mesafesi 2912mm ve toplam uzunluğu 4525mm olan ikinci sıra koltuklu Kombi tipi seçilmiştir.

Öncelikle aracın seçilen hibrit yapıya göre arka aksında bir diferansiyel mekanizmasına sahip olması gerekmekte ancak tüm Transit Connect varyantlarının önden çekişli olması sebebiyle yapısına uygun bir arka aksı bulunmamaktadır. Dolayısıyla ilk etapta Transit grubuna ait tek tekerlekli bir arka aksın araç yapısına uygunluğu araştırılmıştır (Şekil 4.4).

Connect ailesinde araç genişliğinin ve arka aks iz mesafesinin Transit araçlara göre daha dar olması, gerekli modifikasyonların neticesinde araç dinamiğinin, yerden

yüksekliğin artması ile kötüleşecek olması sebepleri ile bu incelemede olumlu bir sonuç alınamamıştır.

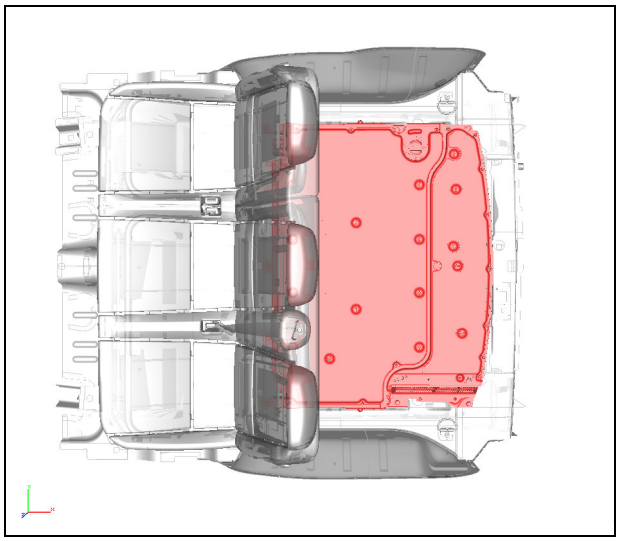


Şekil 4.4 : Transit Ailesine Ait Tahrikli Arka Aksın Connect Modeli ile İncelenmesi.

Batarya paketi için yapılan değerlendirmelerde, ilk olarak yük hacminin daralmaması için ünitenin bir kısmı taban sacının içine gömülecek şekilde bir inceleme yapılmıştır. Ancak viraj denge çubuğunun arka aks hareketi ile sisteme çarpabileceği görülmüş ve daha uygun bir yer olarak ikinci sıra koltuğun arkası ve taban sacının üzeri düşünülmüştür (Şekil 4.5). Bu yerleşim şekli, boyutsal açıdan bir problem yaratmaz iken batarya ünitesinin ağırlığı ile aracın yük taşıma kapasitesinin büyük bir kısmı kullanıldığı için ticari fonksiyonları yerine getirebilme anlamında durumu oldukça kötüleştirmiştir. Ayrıca Ford şartnamelerinde belirtilen sürücü ve yolcu yüklerinin de hesaplanması ile birlikte maksimum arka aks yükü aşılarak durum kabul edilebilir sınırlar dışına çıkmıştır.

Başlangıç incelemeleri için seçilen elektrik motorları ise yerden yükseklik (alt açıklık) regülasyonları ile değerlendirildiğinde oldukça büyük ihlaller göstermiştir. Aracın gerek binek araç tabanlı olması dolayısıyla yere daha yakın olması gerekse de arka şasi kollarının yapısının bu tip bir elemanı geometrik olarak barındırmaya müsait olmaması sebebiyle olumlu sonuçlar alınamamıştır.

Yapılan fizibilite çalışmasında elde edilen neticelere göre Connect ailesinin seçilen hibrit yapıya ve ilave elemanların boyutları açısından en kötü senaryoya uygun olmadığı kararı verilmiştir.



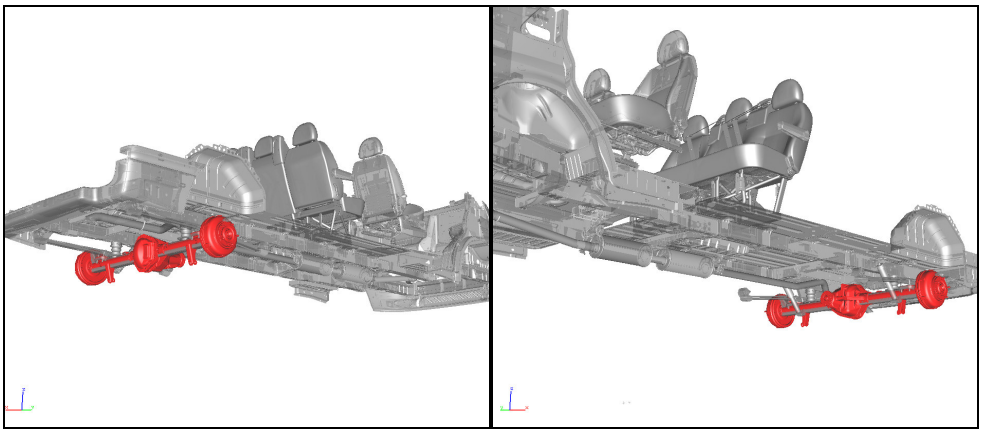
Şekil 4.5 : Ford Escape Batarya Ünitesinin Connect Modeli ile İncelenmesi.

4.2.2 Ford Transit kısa şasinin geometrik yerleşim açısından uygunluğunun araştırılması

Connect ailesine nazaran daha çok varyanta sahip Transit araçlarından, yüksek tabanlı, arkadan çekişli ve alçak tavanlı bir minibüs modeli ile hibrit yapıya uygunluk araştırılmıştır.

Seçilen yapının çalışma stratejisi gereği ilk adım olarak, önden çekişli tiplere göre daha yüksek gövdeli olan söz konusu arkadan çekişli araç doğu-batı bir içten yanmalı motor ve 5 ileri vitesli bir şanzıman ile ön akstan tahrikli hale getirilmiştir. Bu seçimin yapılmasında, varyantlara göre değişmeyen A direğinin önündeki ön şasi kollarının yapısı önemli rol oynamıştır. Şekil 4.6'da görülen, aracın sahip olduğu diferansiyel mekanizmalı orjinal arka aksı ise elektrik motoru ile tahrik için oldukça uygun görülmüştür. Böylece diğer alternatif araçta beklenen problemler çözüme kavuşturulmuştur.

Yine Transit Connect modelinde olduğu gibi ikinci sıra koltuk araç modelinde kullanılarak batarya ünitesi için en uygun yer taban sacının üzeri olarak belirlenmiştir (Şekil 4.7). Ancak ikinci koltuğun kullanılması durumunda bile aracın yük taşıma bölmesinde yeterli boşluğun kalması batarya paketinin taban sacı üzerinde tekerlek yuvaları arasına yerleştirilmesinde bir sakınca olmadığını göstermiştir. Bu şekilde elektrik motoru ve motor ile diferansiyel arasında çalışacak şaft için gerekli dinamik mesafeler korunmuştur. Arka aks ile elektrik motoru arasında kalan mesafe de bir tahrik şaftı tasarımı için yeterli görülmüştür.

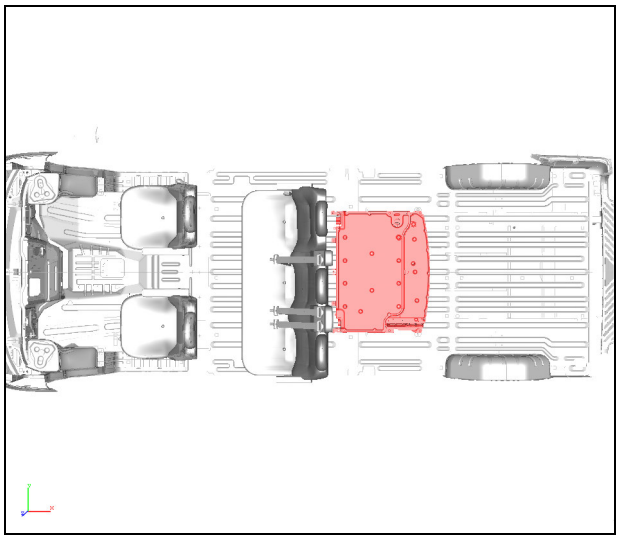


Şekil 4.6 : Tahrikli Arka Aksın Transit Hibrit Modelinde Yerleşimi.

Transit modeli, gerek yük taşıma hacmi gerekse de yük taşıma kapasitesi bakımlarından Connect e göre daha avantajlı durumdadır. Bu sebeple de batarya paketi, aracın ticari fonksiyonlarını beklenenin üzerinde kötüleştirmemiştir.

Ayrıca daha makul sonuçlar ile ortaya çıkan Transit araçta, yolcu kompartımanı ile batarya ünitesi, kontrolör ve yüksek gerilim hatlarının yine orjinal bir ayırıcı bölme ile izole edilmesi de mümkündür.

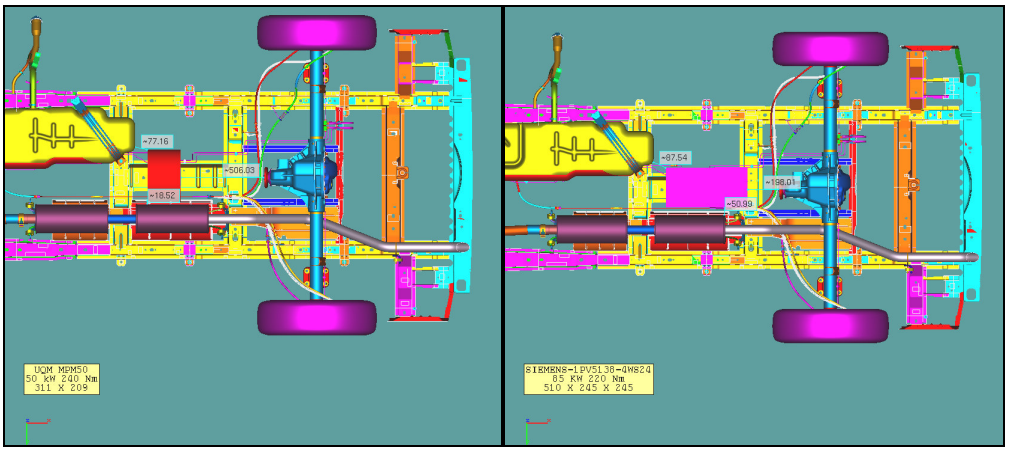
Tüm avantajların yanında elektrik motorunun Şekil 4.8'de görüldüğü gibi arka şasi kolları arasında gövde altına bağlanması durumunda, yerden yükseklik (alt açıklık) regülasyonuna göre de bir ihlal söz konusu olmamaktadır.



Şekil 4.7 : Ford Escape Batarya Ünitesinin Transit Hibrit Modelinde İncelenmesi.

Böylece seçilen hibrit yapıya ait tüm ana bileşenlerin yerleşimi için en uygun araç olarak Transit Kısa Şasi Minibüs görülmüştür. İlerleyen aşamalarda da hibrit araç

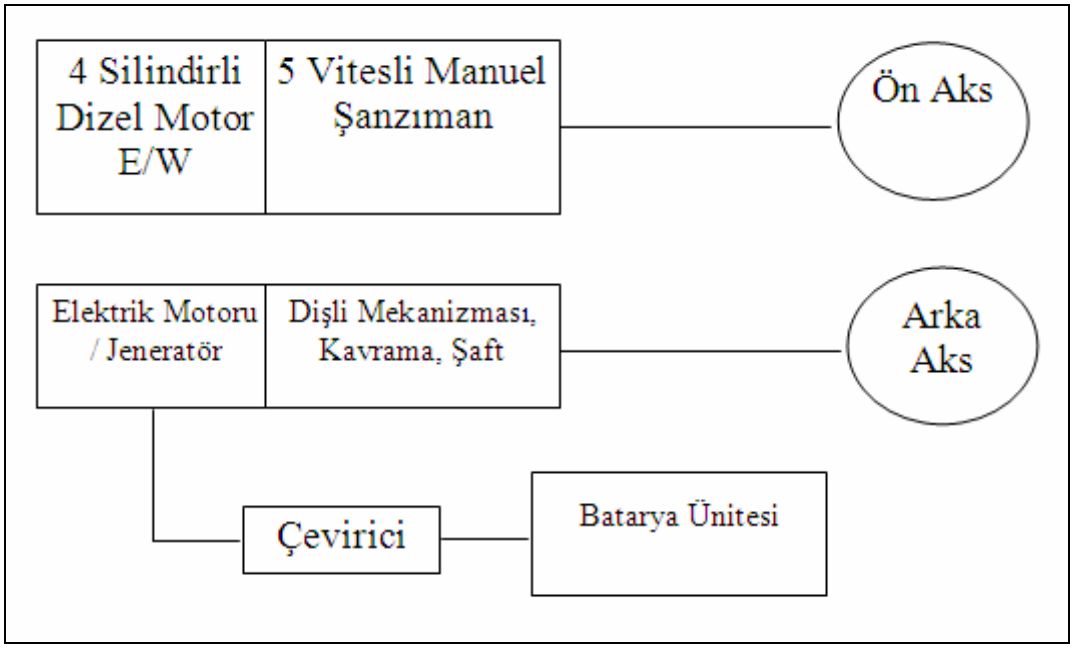
hedeflerinin belirlenmesi, diğer elemanların yerleşimi ve sistemin tüm ince ayarlamaları bu araç spesifikasyonlarına göre incelenmiştir.



Şekil 4.8 : En Kötü Koşulları Temsil Eden Elektrik Motorlarının Transit Hibrit Modelinde Gövde Altındaki Yerleşimleri.

5. FORD TRANSİT KISA ŞASİ MİNİBÜSÜN BÖLÜNMÜŞ PARALEL HİBRİT YAPIYA DÖNÜŞTÜRÜLMESİ

Yapısal açıdan en az değişiklik ile hibrit bileşenlerine yerleşim kolaylığı sağlamak için araç arkadan çekişli seçilmiştir. Önden çekişli Transit varyantlarına göre, daha yüksek taban sacına sahip olması ve daha büyük tekerlekler ile kullanılması elektrik motorunun araç altına montajını kolaylaştırmış ve alt açıklık regülasyonu bakımından mevcut durumu korumaya fayda sağlamıştır. Araç üzerinde N/S (Kuzey – Güney) pozisyonunda duran içten yanmalı motor, bir E/W (Doğu – Batı) motor ile değiştirilmiştir. Böylece tahrik mekanizmasına sahip arka aks elektrik motoru kullanımı için ayrılmış ve içten yanmalı motor ile sağlanan güç aktarımı aracın gövdesinde değişiklik yapılmadan ön aksa kaydırılmıştır (Şekil 5.1).

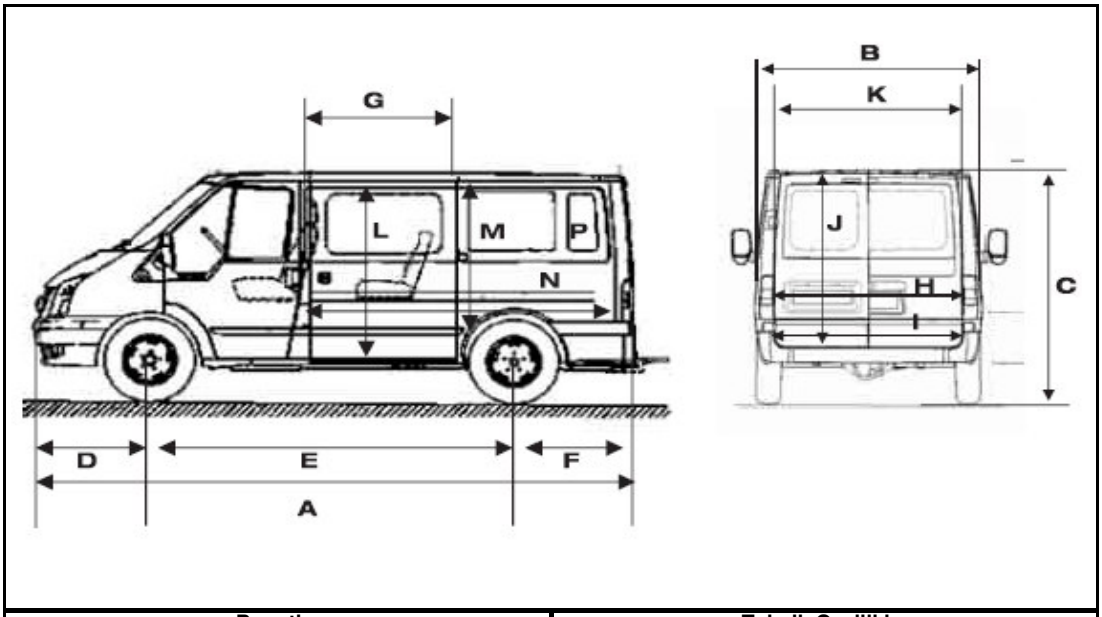


Şekil 5.1 : Bölünmüş Paralel Hibrit Yapı Şeması.

Ayrıca hibrit yapı ile kullanılacak elemanların soğutma sistemi için fazladan bir radyatör ve su pompası da araca, mevcut diğer sistemleri etkilemeden eklenmiştir.

Dönüşüm için seçilen Transit ailesine ait Kısa Şasi Minibüsün boyutsal ve teknik temel özellikleri Tablo 5.1'deki gibidir.

Tablo 5.1: Transit Kısa Şasi Alçak Tavan Araç Boyutları ve Teknik Özellikleri.



Boyutlar		Teknik Ozellikler	
Tavan Yüksekliği	Alçak	Motor Hacmi [cm3]	2200
A - Toplam Uzunluk	4863	Maksimum Güç [PS/rpm]	130
B - Toplam Genişlik	2374/1974	Maksimum Tork [Nm/rpm]	310
C - Toplam Yükseklik	2070	Sıkıştırma Oranı	17,5:1
D - On Uzunluk	933	Diferansiyel Oranı	4,54
E - Dingil Mesafesi	2933	Tırmanma Kabiliyeti	31%
F - Arka Uzunluk	997	Maksimum Hız [km/h]	163
I - Tekerlek Yuvaları Arası Genişlik	1390	Azami Yüklü Ağırlık [kg]	3000
M - Maksimum İç Yükseklik	1430	Boş Ağırlık [kg]	1753
N - Maksimum İç Uzunluk	2582	On Aks Kapasitesi [kg]	1600
P - Yükleme Hacmi [VDA/SAE]	5,62/6,55	Arka Aks Kapasitesi [kg]	1760

Aracın hibrit yapıya dönüşümü, ticari fonksiyonları asgari seviyede etkileyip mevcut teknik özellikleri azami seviyede koruyacak şekilde planlanmıştır.

Yapının ana bileşenlerinin seçimi için öncelikle bir karşılaştırmalı değerlendirme çalışması sonucu ile hibrit araç hedefleri belirlenmiştir. Böylece çalışmanın ilk aşamasında koyulan bu hedeflere göre de temel elemanların seçimi gerçekleştirilmiştir.

5.1 Hibrit Araç Hedeflerinin Belirlenmesi

Araç hedefleri, yapılan karşılaştırmalı değerlendirme çalışmasına göre rekabetçi olacak şekilde düşünülmüştür. Tasarlanan hibrit araçtan ilk olarak %10–20 mertebelerinde yakıt tasarrufu ve düşük emisyon seviyeleri ile çevreci bir araç olması beklenmiştir. Ayrıca performans karakteri ise baz araca göre bazı güç taleplerine daha iyi yanıt verebilecek şekilde iyileştirilmiştir. 130 HP lik E/W (Doğu – Batı) dizel motor ile ön akstan tahrik sağlanırken elektrik motoru/jeneratör ile arka aks

tahriklenip aracın yokuş tırmanma kabiliyeti, 0-100 km/h ve 80-120 km/h hızlanma performanslarının arttırılması hedeflenmiştir. Ancak söz konusu hedeflerin yanında aracın ticari fonksiyonlarını kötüleştirmemek için eklenecek hibrit sistemi elemanlarının getireceği ağırlık artışı için araç yük taşıma kapasitesinin %20'sinin aşılmaması planlanmıştır. Tüm bunlar göz önünde bulundurularak hibrit araç için konulan hedefler ve baz aracın mevcut durumu aşağıda Tablo 5.2'deki gibidir.

Tablo 5.2: Hibrit Araç Hedefleri ve Baz Aracın Bugünkü Durumu.

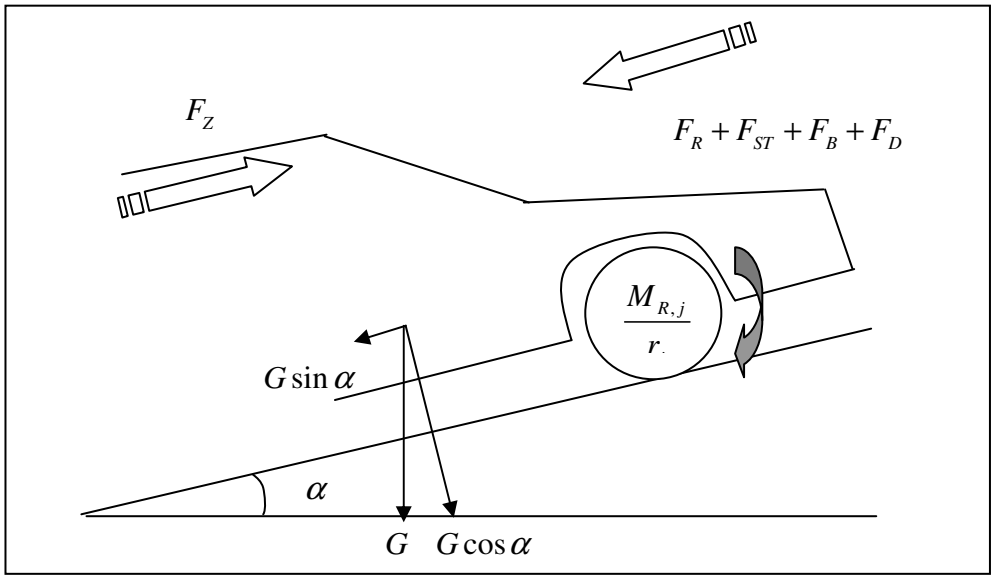
	Baz Araç	Hibrit Araç
0 – 100 km/h Hızlanma	19.1 sec	16.2 sec
60 – 100 km/h Hızlanma	12.1 sec	9.7 sec
80 – 120 km/h Son Viteste Hızlanma	17.4 sec	14 sec
Yakıt Tüketimi	7.8 l/100km	6.2 l/100km
Egzoz Emisyon Seviyesi	Euro 4	Euro 4 dan daha iyi
Yük Taşıma Kapasitesi [kg]	1389	%20 Kayıp
Yükleme Hacmindeki Kayıp [lt]	-	200 lt
Tırmanma Kabiliyeti	%30 @ 4500kg	>%30
Menzil (Yalnız Elektrik Motoru ile)	-	40 km

5.2 Karayolu Taşıtlarına Etki Eden Direnç Kuvvetleri

Doğrusal hareket halindeki bir taşıt, hareketi esnasında çeşitli direnç kuvvetlerinin etkisine maruz kalmaktadır. Söz konusu direnç kuvvetleri, kütle kuvvetleri ve dış kuvvetler olarak iki ayrı grupta sınıflandırılabilir. Kütle kuvvetleri, kütlelerin yatay düzleme göre bağıl pozisyonları ile taşıtın doğrusal ve açısal hızlardaki değişimlerinin sonucu olarak ortaya çıkan kuvvetlerdir. Dış kuvvetler ise, kütle ile doğrudan ilişkisi olmayan, taşıtın hareketini sağlayan veya hareketine karşı koyan kuvvetlerdir. Bu direnç kuvvetleri tahrik tekerleklerinde ihtiyaç duyulan moment ve

güç gereksinimlerinin ve dolayısıyla yakıt tüketiminin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır (Şekil 5.2).

$$F_Z = \sum_{j=1}^{n} \frac{M_{R,j}}{r_j} = F_R + F_{ST} + F_B + F_D \qquad \textbf{(5.1)}$$



Şekil 5.2 : Hareket Halindeki Araç Üzerine Etki Eden Kuvvetler.

5.2.1 Tekerlek direnci F_R

Tekerlek dirençleri, genel olarak tekerleğin yuvarlanma direnci, su öteleme direnci, ilk hareket direnci ve Toe-in dirençlerinden oluşmaktadır. Ancak kuru bir zeminde düz olarak hareket eden tek bir tekerleğin toplam direnci yaklaşık olarak F_Y yuvarlanma direncine eşittir.

$$F_R = \sum_{i=1}^{n} F_{R,i} = \sum_{i=1}^{n} F_{Y,i} \qquad \textbf{(5.2)}$$

$$F_Y = F_Z \frac{e}{r} \qquad \textbf{(5.3)}$$

$\frac{e}{r} = f_r$ Yuvarlanma direnci katsayısı **(5.4)**

$$F_Y = Fz.\ f_r \qquad \textbf{(5.5)}$$

Burada f_r yuvarlanma direnci katsayısını, F_Z de tekerlek yükünü ifade etmektedir. Genellikle bir taşıtın bütün tekerleklerinin yuvarlanma direnci katsayıları yaklaşık olarak eşit kabul edilebilir. Dolayısıyla herhangi bir aracın toplam tekerlek direnci her bir tekerlekteki yuvarlanma dirençlerinin toplamına eşittir.

$$\sum_{i=1}^{n} F_{Y,i} = \sum_{i=1}^{n} F_{z,i}\ f_r \qquad \textbf{(5.6)}$$

Tekerlek yükleri toplamının $\sum_{i=1}^{n} F_{Z,i}$, toplam taşıt ağırlığı (G) değerine eşit olduğu düşünülür ve yol eğim açısı (α) da dikkate alınırsa toplam tekerlek direnci formülü aşağıdaki gibi şekillenir [1].

$$\sum_{i=1}^{n} F_{Y,i} = G\cos\alpha\ f_r \qquad \textbf{(5.7)}$$

$$F_R = G\cos\alpha\ f_r \qquad \textbf{(5.8)}$$

5.2.2 Yokuş direnci F_{ST}

Karayolu taşıtlarının yokuşlarda hareket etmeleri durumunda zemine dik tekerlek kuvvetleri, toplam ağırlık kuvvetine eşit değildir. İki kuvvet arasındaki fark taşıt hareket eksenine paralel başka bir kuvvet bileşeni tarafından dengelenmektedir. Söz konusu taşıt hareket eksenine paralel ve taşıt hareket yönüne ters yöndeki bu kuvvet yokuş direnci F_{ST} olarak adlandırılan $G\sin\alpha$ bileşenidir [1].

$$F_{ST} = G\sin\alpha \qquad \textbf{(5.9)}$$

5.2.3 İvme direnci F_B

Newton'un ikinci hareket yasasına göre; bir taşıtın hızlanması veya yavaşlaması sırasında bu hareketlere ters yönde atalet kuvvetleri oluşmaktadır. Newton'a göre bu kuvvet, $F = ma$ eşitliği ile ifade edilmiştir.

Taşıtın hareketi sırasında karşılaşılan bu kuvvet, ivme ile ters yönlü olduğundan, ivme direnci F_B olarak tanımlanır. İvme direnci; doğrusal hareket halindeki kütlelerin atalet

kuvvetleri ile; dönme hareketi yapan tekerlekler, aktarma organları ve motorun dönel atalet kuvvetlerinden oluşmaktadır. Taşıt hızındaki bir değişim, dönen bu elemanların hızlarının değişmesi ile sağlanmaktadır.

Bir taşıtı ivmelendirmek için belirli bir ivme direncinin yenilmesi gerekmektedir. F_B, herhangi bir taşıtı ivmelendirmek için yenilmesi gereken ivme direnci değerini göstermektedir.

$$F_B = \left[m + \sum_{j=1}^{n} \frac{J_{R,j}}{r_j R_j} \right] \ddot{x} \qquad \textbf{(5.10)}$$

Burada, F_B ivme direncini, m taşıt kütlesini, J_R aks atalet momentini, r statik tekerlek yarıçapını, R dinamik tekerlek yarıçapını ve j aks numarasını göstermektedir.

$$F_B = \left[1 + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{n} \frac{J_{R,j}}{r_j R_j} \right] m\ddot{x} \qquad \textbf{(5.11)}$$

Parantez içerisindeki ifade dönen kütlelerin etkisi sonucu ortaya çıkan ilave bir terim olup, kolaylık olması açısından λ ile gösterilir ve ivme direnci katsayısı adını alır.

$$F_B = \lambda m\ddot{x} \qquad \textbf{(5.12)}$$

$$F_B = \lambda G\, \ddot{x} / g \qquad \textbf{(5.13)}$$

Bu ifadenin anlamı, taşıta bir *a* ivmesi kazandırmak için gerekli kuvvetin sadece *ma* olmadığı, bunun λ katı kadar daha kuvvet gereksinimi olduğudur [1].

5.2.4 Rüzgar direnci F_D

Sabit hızlı bir akışkanın, herhangi bir gövde etrafında akması halinde, iki bileşenden oluşan bir aerodinamik kuvvet oluşur. Bu bileşenler, yüzeyin yapışkanlık etkisine bağımlı yüzey sürtünme direnci ve gövdeye etki eden ana akış basınç dağılımının sonucu olarak meydana gelen basınç direncidir.

Bileşke aerodinamik kuvvetin, taşıtın ileriye doğru hareketine karşı olan bileşenine "Rüzgar Direnci" adı verilmektedir.

Tüm taşıt yüzeyine dağılmış olan basınç kuvvetlerinin bileşkesi olan aerodinamik kuvvetin, basınç merkezi adı verilen sanal bir noktaya etki etmekte olduğu kabul edilmektedir. Basınç merkezi kabulü, araç üzerine etki eden kuvvetlerin hesaplanmasında ve bu kuvvetlerin araç karakteristiği üzerindeki etkilerinin saptanmasında kolaylık sağlamaktadır.

Ortalama olarak 100km/h hıza kadar kaldırma ve yanlama direnci etkileri toplam rüzgar direncine göre çok düşük mertebelerdedir. Kaldırma ve yanlama dirençleri, yüksek araç hızlarında etkin rol üstlenmektedir. Dolayısıyla aerodinamik kuvvet bileşenleri arasında dikkat edilmesi gereken en önemli aerodinamik etki aracın hareket doğrultusuna ters yönde etki eden rüzgar direnci bileşenidir.

Basınç merkezi adı verilen noktaya etki eden aerodinamik direnç bileşenlerinden "Rüzgar Direnci" , genellikle şu eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$F_D = \frac{1}{2}\rho A C_D V^2 \qquad \text{Rüzgar Direnci} \qquad \textbf{(5.14)}$$

ρ : Havanın Yoğunluğu (kg/m3)

A : Karakteristik İzdüşüm Alanı (m2)

V : Taşıtın Havaya Göre Bağıl Hızı (m/s)

C_D : Rüzgar Direnç Katsayısı

C_L : Kaldırma Kuvveti Katsayısı

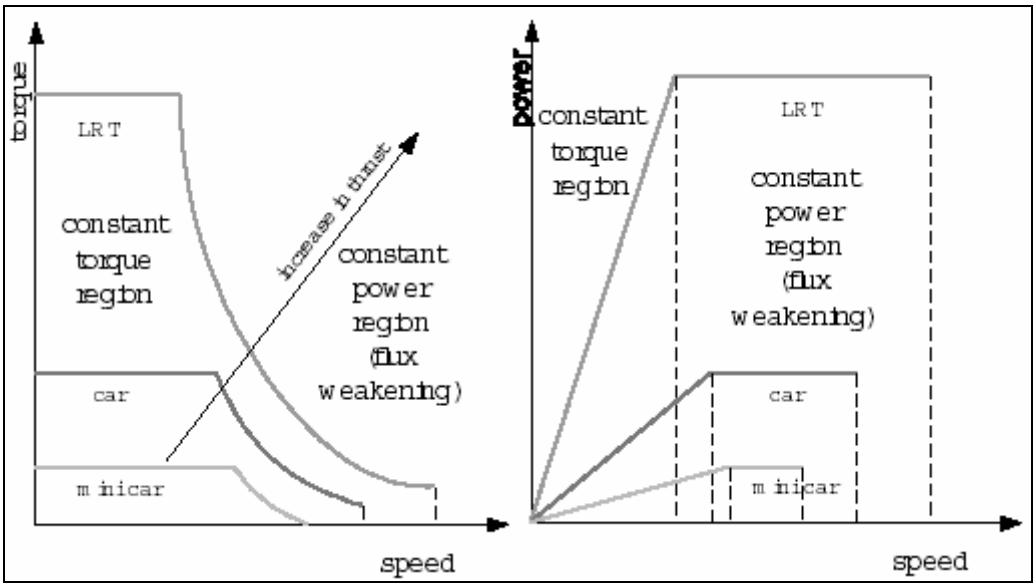
C_S : Yanal Kuvvet Katsayısı

Rüzgar direnci, eşitlikte de görüldüğü gibi havanın yoğunlu, karakteristik iz düşüm alanı, taşıtın havaya göre bağıl hızı ve rüzgar direnç katsayısına bağlıdır. Ancak rüzgar direncinin, araç hızının karesi ile doğru orantılı olması yüksek hızlarda araca etkiyen rüzgar direnci kuvvetinin oldukça fazla artmasına sebep olmaktadır.

İlerleyen alt bölümlerde, hibrit yapıya uygun olarak belirlenmiş hedefleri sağlayacak hibrit araç elemanlarının seçimi, karayolu taşıtlarına etkiyen direnç kuvvetleri esas alınarak yapılmıştır [1].

5.3 Elektrik Motoru Seçimi Ve Araç Seviyesinde Yerleşimi

Hibrit elektrikli araçların temelini oluşturan elektrikli tahrik sistemleri, elektrik motoru dönüştürücü, elektronik kontrol ünitesi, şanzıman ve tekerleklerden oluşmaktadır. Elektrikli tahrik sistemlerinden beklenen ana gereksinimler; yüksek ani güç, kalkış ve tırmanma kabiliyeti için düşük hızlarda yüksek tork, otoyol sürüşleri için yüksek hızlarda yüksek güç, sabit tork ve güç bölgelerini içeren geniş bir hız yelpazesi, tork talebine karşın hızlı cevap verebilme kabiliyeti, yüksek rejeneratif frenleme verimi ve tüm bunlarla birlikte kabul edilebilir maliyetler şeklindedir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 : Elektrik Motorları Genel Tork-Hız ve Güç-Hız Karakteristikleri.

Hibrit araçlar için elektrikli tahrik sistemlerinin seçimi temel olarak üç etkene bağlıdır. Bunlar sürücü beklentileri, araç kısıtları ve enerji depolama kaynaklarıdır. Sürücü beklentileri, sürüş özelliği (hızlanma, maksimum hız, tırmanma kabiliyeti ve frenleme) olarak da ifade edilebilir. Aracın tipi, ağırlığı, geometrik yapısı ve istiap haddi ise elektrik motoru seçimini önemli ölçüde etkilemektedir. Enerji depolama üniteleri ise oldukça çeşitlidir. Bataryalar, yakıt pilleri, kapasitörler ve volanlar en fazla tercih edilenleridir. Bu yüzden araçtan beklenen özelliklerin ve geometrik uygunluğun sağlanabilmesi için alt sistemler seviyesinde incelemeler yapılamalıdır.

Bu yol haritasına uygun biçimde, hibrit araç hedefleri ve kabaca yapılan geometrik yerleşim çalışmaları ışığında seçilmesi muhtemel elektrik motorları üzerinde sistem seviyesi incelemeler yapılarak hibrit araca en uygun elektrik motoru belirlenecektir.

Split paralel hibrit yapısına göre seçilen tahrikli arka aks oranı 5,88 ve bataryalardan elektrik motoruna, elektrik motorundan da tekerleklere olan verim değerlerinin 0,90 kabul edilmesi ile yapılan hesaplamalar elektrik motorunun seçimini sonladırmaya yardımcı olmuştur [13].

Belirlenen hedeflere bağlı kalınarak hesaplanan elektrik motorundan beklenen minimum gereksinimler aşağıda Tablo 5.3'deki gibidir.

Tablo 5.3: Elektrik Motorundan Beklenen Minimum Özellikler.

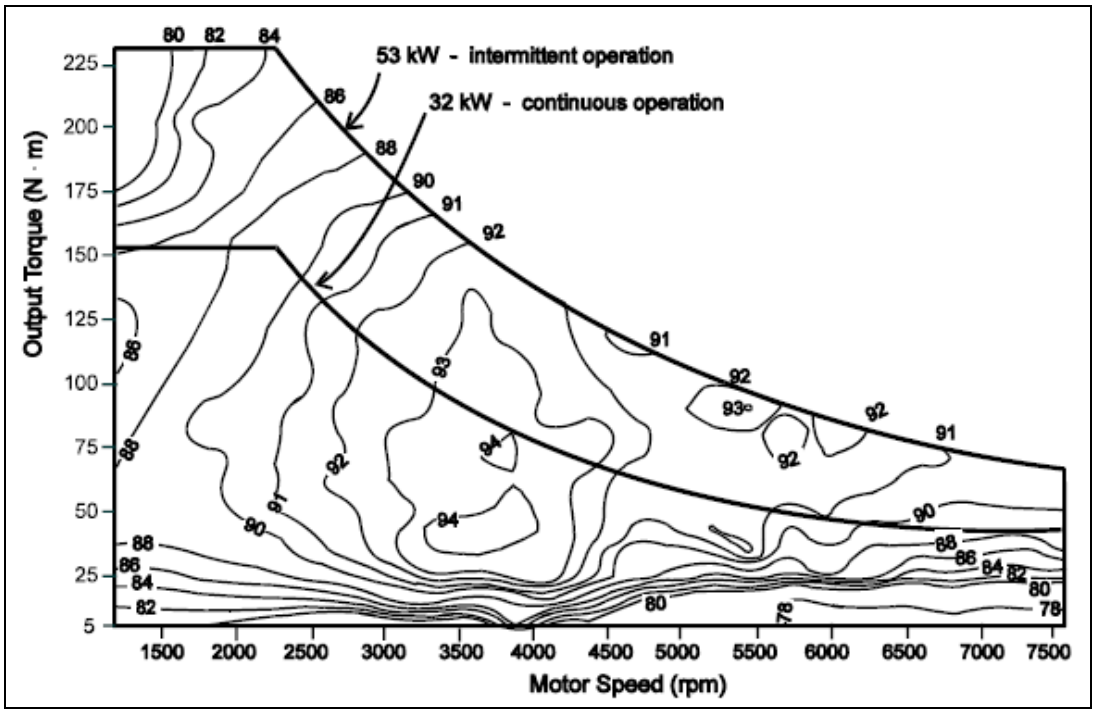
	ECE Sürüş Çevrimi	**40 km/h Sabit Hız**	**30 km/h Sabit Hız**	**Tırmanma Kabiliyeti 10 km/h @ % 15**
Toplam Menzil [km]	40,73	39,53	41,48	-
Batarya Ünitesinden Deşarj Olan Toplam Enerji [kWh]	10,05	5,54	5,21	-
Frenleme Enerjisi [kWh]	4,17	-	-	-
Batarya Ünitesinden Deşarj Olan Maksimum Güç [kW]	33,60	34,60	20,00	17,05
Sabit Hızda Batarya Ünitesinden Deşarj Olan Güç [kW]	-	5,61	3,74	15,29
Maksimum Motor Torku [Nm]	220 Nm@670 rpm	169 Nm@1780 rpm	130 Nm@1335 rpm	335 Nm@445 rpm
Sabit Hızda Motor Torku [Nm]	-	27,4 Nm@1780 rpm	24,5 Nm@1335 rpm	300 Nm@445 rpm
	% 15 lik Eğim		**% 10 luk Eğim**	
Tork İhtiyacı @ 445 rpm	335 Nm		234 Nm	
Güç İhtiyacı @ 445 rpm	15 kW		10,9 kW	
2000 rpm de Gerekli Güç İhtiyacı [kW]	70,16 kW		49 kW	

Elde edilen bu veriler ile alternatif motorlar arasında yapılacak eleme safhası için nihai tablo, Tablo 5.4 ortaya çıkmıştır. UQM firmasına ait iki farklı elektrik motoru, Ansaldo firmasına ait iki farklı elektrik motoru, Solectria, Enova ve MES firmalarından da birer elektrik motoru, güç, tork, boyutsal büyüklük, ağırlık, kontrolcü boyutları, araç hedeflerine uygunluğu bakımından incelenmiştir. Tüm bu motorlar için araç seviyesinde hesaplamalar yapılarak beklenenin ne kadarlık bir kısmını sağladıkları ortaya konulmuştur. Oluşan tablonun her bir maddesi göz önüne alınarak maliyet hesaplamaları ile birlikte elektrik motoru seçimi tamamlanmıştır. Üretici firmadan tedarik edilen bilgiler ışığında kıyaslamalı karşılaştırma yapılmış ve taşıt uygulamalarında en yaygın kullanılan elektrik motorlarının temel özellikleri sıralanmıştır. Ayrıca kontrolcü boyutları ve ağırlıkları da elektrik motoru seçimi için önemli rol almaktadır. Maliyet hesaplarının yanında diğer bir belirleyici faktör olarak göz önünde bulundurulmuştur.

Tablo 5.4: Alternatif Elektrik Motorları Tipleri ve Özellikleri.

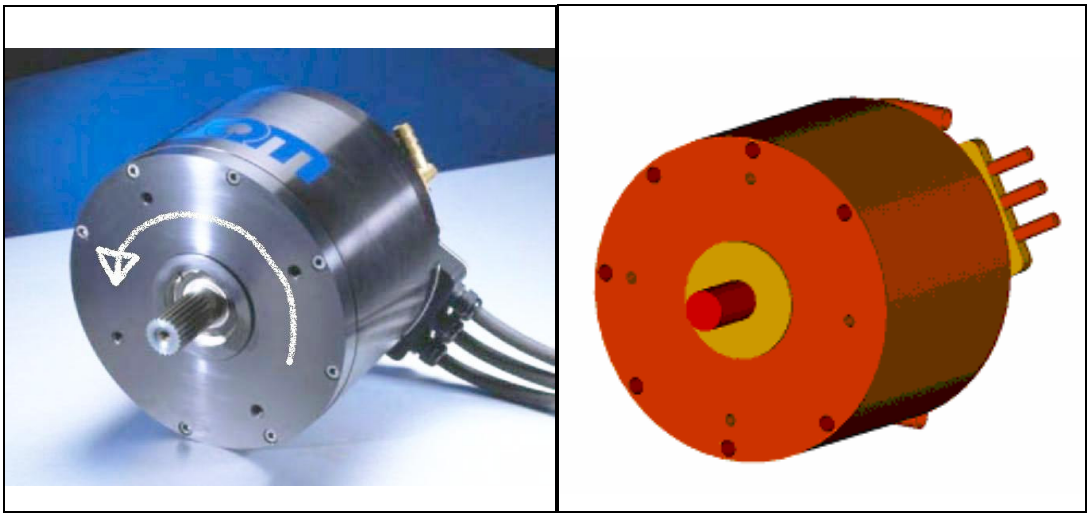
	Alternatif 1	Alternatif 2	Alternatif 3	Alternatif 4	Alternatif 5	Alternatif 6	Alternatif 7
Üretici Firma	UQM	UQM	Ansaldo	Ansaldo	Solectria	Enova	MES
Model Numarası	SR 218N	SR 286	A1H207C	A1H256B	AC55	EDM90	MES 200-250
Tip	Fırçasız PM	Fırçasız PM	Asenkron	Asenkron	Asenkron	Asenkron	asenkron
Sürekli Güç [kW]	30	55	30	70	34	30	30
Maksimum Güç [kW]	75	100	60	140	78	90	94,8
Sürekli Tork [Nm]	150		130	220	55		100
Maksimum Tork [Nm]	240	550	260	450	369	239	
Maksimum Hız [rpm]	8000	5000	9000	9000	8000	10000	9000
Maksimum Verim [%]	94	90			95		
Çap [mm]	280	405	230	300	343	270	235
Uzunluk [mm]	216	241	400	500	447	362	391
Ağırlık [kg]	40	86	80	130	106	65	61
Kontrolcü Ağırlığı [kg]	15,9	15,9	14	14	14,7	35	10
Kontrolcü Boyutları [mm]	380x365x119	380x365x119	430x330x145	420x320x180	450x235x240	606x518x201	326x212x115
Voltaj [VDC]	250-400	250-400	260-300	300-600	100-400	250-425	185-400
Tırmanma Kabiliyeti % 15lik Eğim [E/H]	H	E	H	E		H	E
%15 lik Eğimde 10km/h Hıza Çıkma Süresi [s]	--	8.6 s	--	3.5 s		--	27 s
Maksimum Tırmanma Kabiliyeti	11%	29%	12%	23%		11%	15%
Maksimum Eğimde İvmelenme Zamanı [s]	10 km/h @ 36 s	5 km/h @ 32 s	10 km/h @ 31 s	5 km/h @ 27 s		10 km/h @ 40 s	10 km/h @ 27 s
Düz Yolda 40km/h Hıza Çıkana Kadar Geçen Zaman [s]	10 s	4 s	9 s	5 s		10 s	7.2 s

Yapılan kıyaslamalar ile ağırlık hedefleri ve geometrik yerleşim fizibilitesi sonuçlarına göre belirlenen araç konfigürasyonuna en uygun elektrik motoru olarak 75 kW gücünde 240 Nm torka sahip Fırçasız UQM-SR218N görülmüştür (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 : UQM-SR218N Elektrik Motoru Tork – Güç Karakteristikleri ve Verim Haritası.

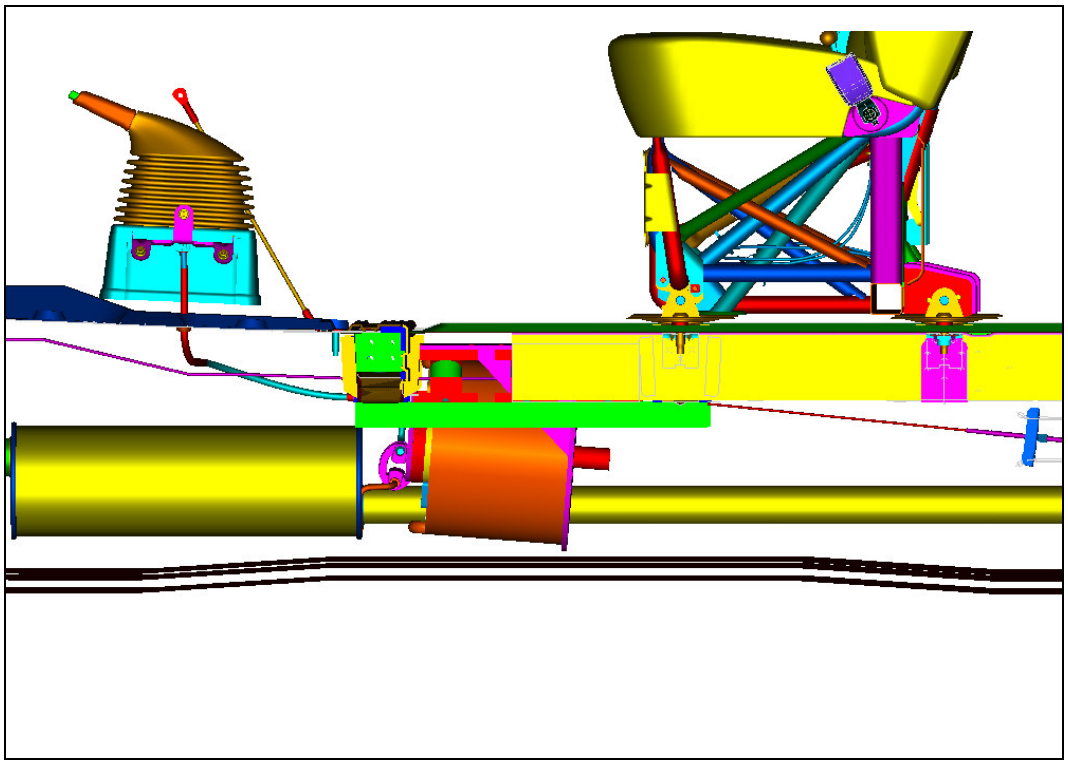
Bundan sonraki aşamalarda dijital ortamda yapılacak yerleşim çalışmaları için seçilen motorun üreticisinden elde edilen teknik özelliklerine bağlı kalınarak üç boyutlu CAD modeli oluşturulmuştur (Şekil 5.5). Bu sayede fiziksel prototip üzerinde tasarımı yönlendirecek fikirleri, oluşabilecek problemleri önceden görmek ve dolayısıyla zaman kazanmak mümkün olmuştur.



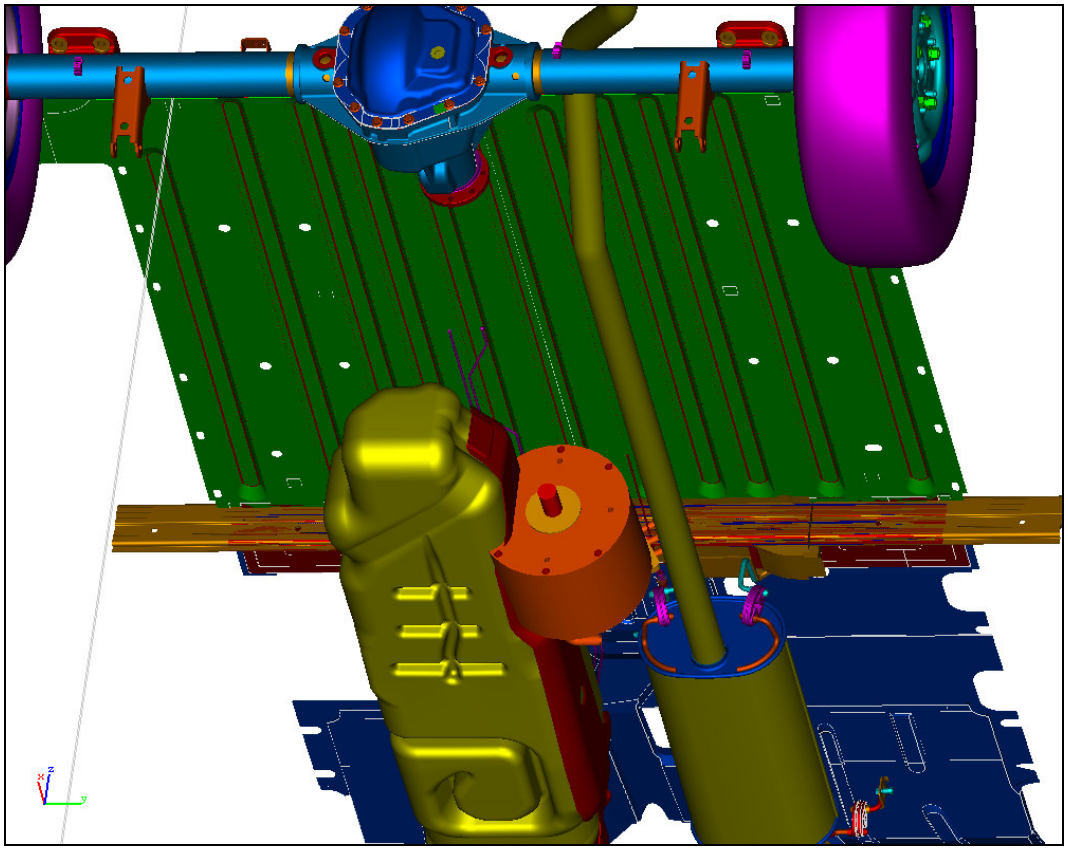
Şekil 5.5 : UQM-SR218N ve CAD Modeli

Hibrit araç dönüşümü esnasında en çok önem verilmesi gereken konu, motor/jeneratör elemanının mevcut yapıya entegrasyonu olmuştur. Gövde altında mümkün olduğunca az değişiklik yapılarak aracın yük dağılımı karakteristiğini etkilememek hedeflenirken söz konusu parçaların nihai yerlerinde yerden yükseklik şartnamelerine uygunluğu da irdelenmiştir (Şekil 5.6) [17].

Motorun bağlanacağı yapının yeterince mukavim olabilmesi için; aracın altında bulunan şasi kollarına 90^0 açı ile duran araç mukavemetini arttıran elemanlar incelenmiş ve uygun görülmüştür. Motorun arka aksa olan mesafesini ise mevcut araçta kullanılan iki parçalı kardan milinin ortasındaki gövdeye bağlı mafsal belirlemiştir. Böylece kayar mil tasarımına hız kazandırılmakla birlikte elektrik motoru miline bağlanacak kavramanın da araç üzerinde oldukça mukavim bir yere gelmesi düşünülmüştür. Mevcut araçta kullanılan 80lt'lik ve nispeten ince uzun olan yakıt tankı, elektrik motorunun bağlanmasının planlandığı yerde problem çıkarmıştır. Dijital ortamda yapılan söz konusu geometrik yerleşim çalışmasında, belirlenen konumda elektrik motoru ile yakıt tankının girişimiyle karşılaşılmıştır (Şekil 5.7). Daha kısa ve geniş yakıt tankı ile problemin çözüme kavuşturulması araştırılmıştır.



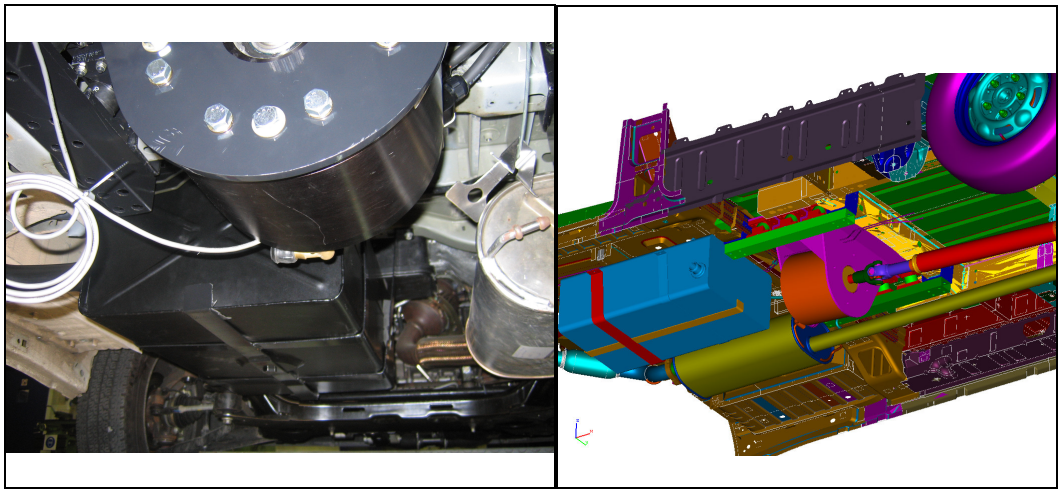
Şekil 5.6 : AITM ve Ford Motor Company Şartnamelerine Göre Hazırlanan Yerden Yükseklik Çizgileri.



Şekil 5.7 : Dijital Ortamda Görülen Elektrik Motoru ve Yakıt Tankı Girişimi.

Söz konusu problemin çözümü için, hibrit araç temelinde yatan yakıt tasarrufu mantığına dayanarak yakıt tankının küçültülmesi kararlaştırılmıştır. Ayrıca gövde altından geçen fren boruları ve el freni telinin rotaları üzerinde tekrar çalışılıp aracın soğuk tarafı olarak adlandırılan tank tarafına doğru 110 mm kaydırılmıştır.

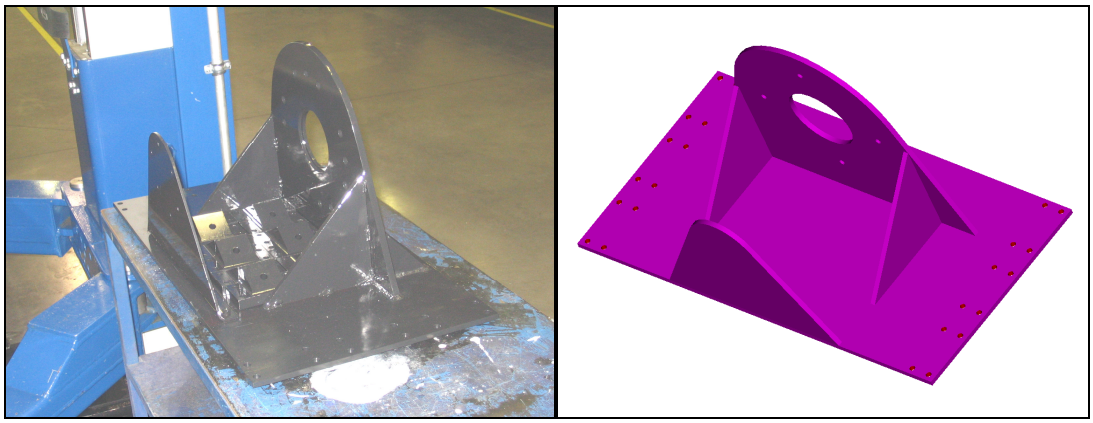
Elektrik motorunun soğutma sistemine ait borular yine soğuk taraftan geçirilirken ısıl yönetimi kolaylaştırabilmek için egzoz sistemine ait susturucu, katalitik konventör ile susturucu arasındaki borunun kesilip kısaltılması suretiyle 100 mm aracın önüne doğru konumlandırılmıştır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 : Elektrik Motoru, Yakıt Tankı ve Egzoz Susturucusunun Araç Üzerindeki Nihai Konumları.

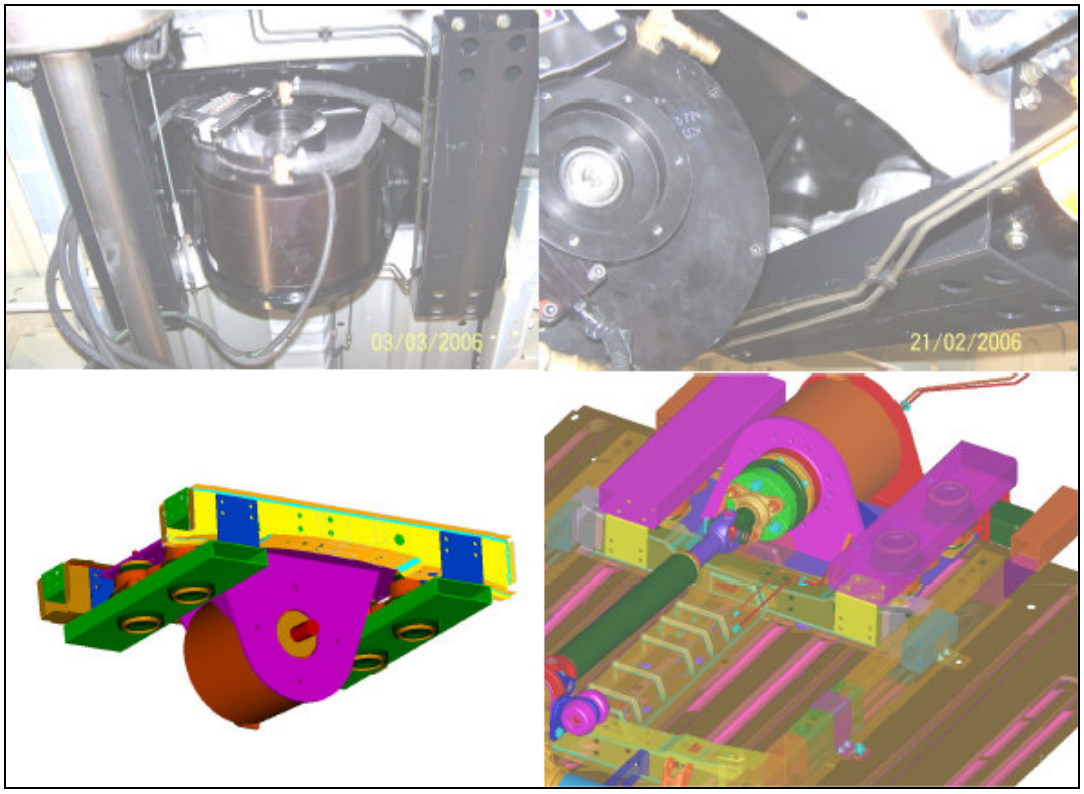
Bu aşamadan sonra ilave tahrik sisteminin gövdeye bağlanması için, dört tane yağlı motor takozu alınarak motor destek ünitesi ile önceden belirlenmiş konumda fizibilite çalışmaları yapılmıştır. Seçilen motor takozları ile yapısal kaynaklı seslerin azaltılması hedeflenirken yanal ve eksenel kuvvetleri azaltmak ve elektrik motorunun rulmanlarının servis ömürlerini uzatmak için rotorun önüne oldukça mukavim bir kavrama yerleştirilmiştir. Arka aksın tahriklenmesi için gerekli tahrik şaftı ise söz konusu kavrama ile diferansiyel arasına tasarlanmıştır.

Elektrik motoru, kalınlığı 10 mm olan bir plakaya M12 olan cıvatalar ile bağlanırken daha küçük ancak şekil itibariyle ön yüzdeki plakaya benzeyen 3mm kalınlığındaki bir diğer plaka ve M6 cıvatalar ile de arka yüzünden de desteklenmiştir. Söz konusu plakalar aracın taban sacı ile yer değiştiren yine 10 mm kalınlığındaki ana plakaya da kaynakla sabitlenmiştir (Şekil 5.9) [14].



Şekil 5.9 : Elektrik Motoru Bağlama Plakası ve CAD Modeli.

Aracın şasi kollarına 90^0 açı yapan enine elemanlar dört köşeden U profiller ile güçlendirilerek üstlerine motor plakasını taşıyacak aracın önünden arkasına uzanan iki profil bağlanmıştır. Böylece elektrik motoru ve taşıyıcı plakası ile gövde üzerinde hazır olan elektrik motoru yatağı görevini görecek iki farklı sistem elde edilmiştir. Söz konusu sistemlerin birbirlerine entegrasyonu için ise gövde üzerinde bulunan boyuna profillerin başına ve sonuna ikişer tane olmak kaydıyla toplam dört adet yağlı motor takozu kullanılmıştır. Bu sayede daha sağlam ve daha az yapısal kaynaklı ses üreten bir tasarım ortaya çıkmıştır (Şekil 5.10) [14].



Şekil 5.10 : Elektrik Motoru Yatağı ve CAD Modeli.

5.4 Enerji Depolama Ünitesi – Kontrolcü Seçimi Ve Araç Seviyesinde Yerleşimi

Hibrit araç yapılarında enerji depolama sistemlerini batarya üniteleri teşkil etmektedir. İdeal bir hibrit elektrikli araç yapısında kullanılacak batarya ünitelerinin özellikleri, yüksek enerji yoğunluğu, yüksek çıkış gücü, uzun ömür, yüksek şarj ve deşarj verimleri, geniş bir düşük sıcaklıklardan yüksek sıcaklıklara kadar kullanım yelpazesi, minimum derece kendi kendine deşarj, iyi yük karakteristikleri, oldukça iyi ısı izolasyon özellikleri, düşük iç direnç, hızlı şarj edilebilme, yüksek güvenlik seviyeleri, güvenilirlik, düşük maliyet ve iyi geri dönüşüm karakteri şeklinde sıralanmaktadır. Hibrit araç uygulamalarında kullanılan çok çeşitli batarya tipleri mevcuttur. Bunların temel özellikleri aşağıda Tablo 5.5'teki gibidir.

Tablo 5.5: Değişik Batarya Tiplerinin Temel Özellikleri.

	Özgül Enerji [Wh/kg]	**Enerji Yoğunluğu [Wh/l]**	**Özgül Güç [W/kg]**	**Ömür [Çevrim]**
VRLA	30-45	60-90	200-300	400-600
Ni-Cd	40-60	80-110	150-350	600-1200
Ni-Zn	60-65	120-130	150-300	300
Ni-MH	60-70	130-170	150-300	600-1200
Zn/Air	230	269	105	NA
Al/Air	190-250	190-200	7-16	1
Na/S	100	150	200	800
Na/$NiCl_2$	86	149	150	1000
Li-Polymer	155	220	315	600
Li-Ion	90-130	140-200	250-450	800-1200

Hibrit araç hedefleri doğrultusunda yapılan hesaplamalar ile alternatifler arasından ortaya çıkan elektrik motoru, yine aynı şekilde alternatif batarya üniteleri ile değerlendirilmiştir. Ancak batarya ünitesinin seçiminde göz önünde bulundurulan en önemli etken araca ek olarak gelecek ağırlık olarak düşünülmüş ve alternatif ünitelerin minimum tork ve güç gereksinimlerine verdiklerin yanıtın yanında toplam ağırlıklarına göre değerlendirilmeleri yapılmıştır. Araç ekstra ağırlık hedefi olarak belirlenen 250 kg'ı sağlayan elektrik motoru ve batarya sistemleri öncelikli olarak diğer alternatiflerden ayrılmıştır. Sonraki adımda ise gerekli minimum şartlara göre bir eleme işlemi daha yapılmış ve geriye kalan iki sistem arasında bir sonuca varılmaya çalışılmıştır. Piyasada mevcut ürünlerde yaygın olarak kullanılan sistemi seçme eğiliminin yanında yapılan maliyet analizi ışığında en doğru batarya ünitesine

karar verilmiştir. Alternatif batarya paketleri ve değerlendirme neticeleri aşağıdaki Tablo 5.6 ve Tablo 5.7'de daha detaylı görülmektedir.

Tablo 5.6: Alternatif Batarya Üniteleri ve Özellikleri.

	Model	Voltaj [V]	Kapasite [Ah]	Güç [kW]	Enerji [kWh]	Ağırlık [kg]	Boyutlar [mm]
Ni-MH Batarya Üniteleri							
Cobasys							
	NiMHax 288-60	288	8,5	60	2,4	75	430 x 850 x 210
	NiMHax 288-120	288	17	120	4,8	150	2 x NiMHax 288-60
Varta							
	1.0kWh	40	25	70	1	48,4	549 x 460 x 326
	1.5kWh	300	5	100	1,5	61,7	734 x 474 x 206
Kurşun Asit Batarya Üniteleri							
Optima							
	D34/78	12	55	50	1	19,5	254 x 172 x 198
Exide							
	Maxima MAX900DC	12	50	50	0,8	18	260 x 172 x 205

Söz konusu batarya paketlerinin değişik açılardan yapılan incelemelerinde, Kurşun – Asit batarya üniteleri gerekli elektrik motoru gücü, voltaj ve ağırlık şartlarını sağlayamadıkları görülmüştür.

Tablo 5.7: Batarya Ünitelerinin Kıyaslamalı Karşılaştırma Tablosu.

Uretici		**UQM**	**Enova**	**MES**
Toplam Ekstra Ağırlık Hedefi	kg	250	250	250
Elektrikli Tahrik Sistemi Ağırlığı	kg	65,9	110	81
Batarya Unitesi Ağırlığı	kg	184,1	140	169
Optima D34/78 - Kurşun Asit Batarya Ünitesi				
Maksimum Güç	kW	73,60	56,00	67,60
Batarya Gücü - E.M. Gücü	kW	*-1,40*	*-34,00*	*-27,20*
Ağırlık Hedefine Bağlı Olarak Batarya Sayısı		9,40	7,20	8,70
Belirli Batarya Sayısı İçin Bus Voltajı	V	108,00	84,00	108,00
Gerekli Bus Voltajı İçin Batarya Sayısı	adet	27,10	28,10	20,80
Batarya Unitesi Ağırlığı	kg	*526,20*	*545,70*	*409,30*
Ağırlık Hedefinden Sapma	kg	*342,10*	*405,70*	*240,30*
Cobasys NiMHax 288-120 - NiMH Batarya Ünitesi				
Maksimum Güç	kW	120,00	120,00	120,00
Batarya Gücü - E.M. Gücü	kW	45,00	30,00	25,20
Batarya Unitesi Ağırlığı	kg	150,00	150,00	150,00
Ağırlık Hedefinden Sapma	kg	-34,10	*10,00*	-19,00
Kapasite	kWh	4,80	4,80	4,80
Avrupa Şehiriçi Çevriminde 40km İçin Gerekli Enerji	kWh	10,05	10,05	10,05
Enerji Farkı	kWh	*5,25*	*5,25*	*5,25*
Cobasys NiMHax 288-180 - NiMH Batarya Ünitesi				
Maksimum Güç	kW	180,00	180,00	180,00
Batarya Gücü - E.M. Gücü	kW	105,00	90,00	85,20
Batarya Unitesi Ağırlığı	kg	225,00	225,00	225,00
Ağırlık Hedefinden Sapma	kg	*40,90*	*85,00*	*56,00*
Kapasite	kWh	7,20	7,20	7,20
Avrupa Şehiriçi Çevriminde 40km İçin Gerekli Enerji	kWh	10,05	10,05	10,05
Enerji Farkı	kWh	*2,85*	*2,85*	*2,85*

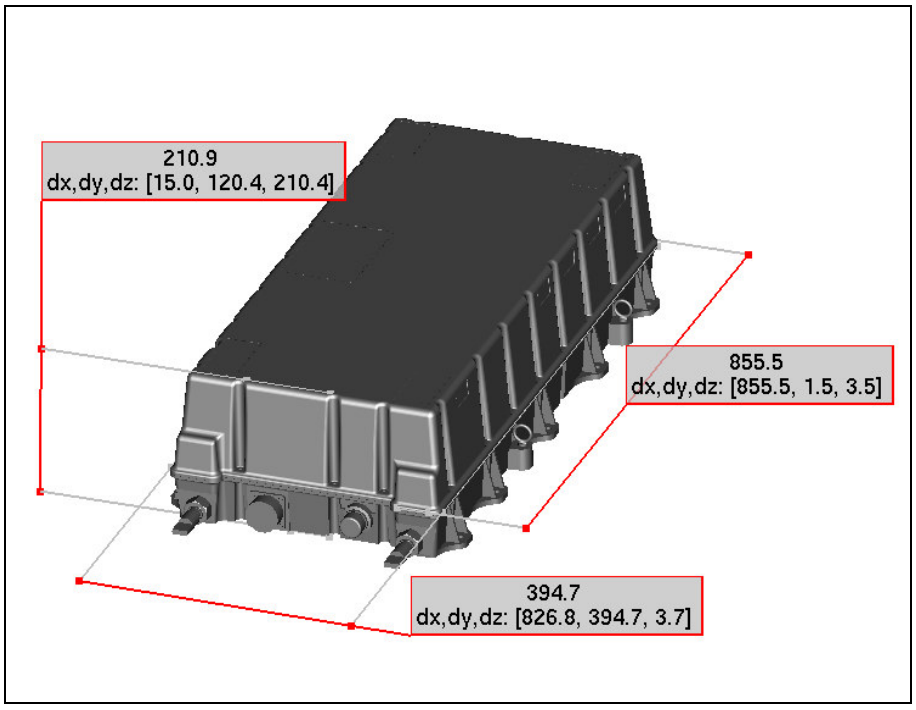
Bu durumda Ni-MH batarya üniteleri belirlenen elektrik motoru ile birlikte değerlendirilip seçilecek sistem en iyi şekilde optimize edilmiştir. Sonuç olarak

hedeflenen hibrit araç yapısına "Cobasys NiMHax 288-180" batarya ünitesinin uygun olacağı kararına varılmıştır (Tablo 5.8) [13].

Tablo 5.8: UQM SR218 Elektrik Motoru ile Cobasys NiMHax 288-180 Batarya Grubunun Değerlendirilmesi.

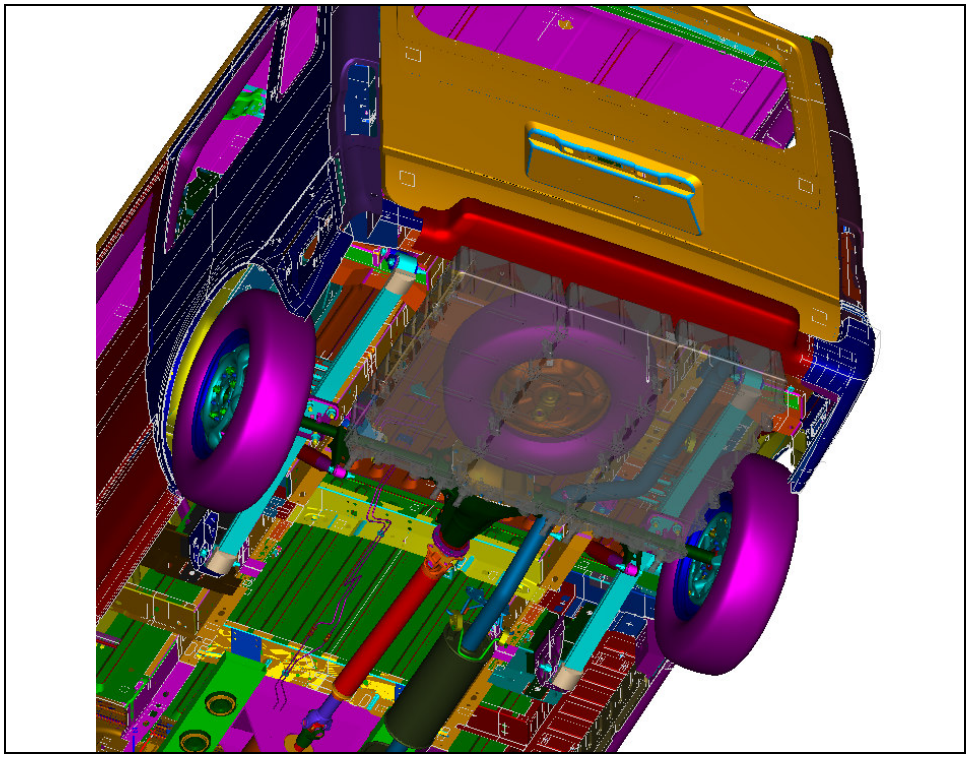
Batarya Ünitesi Özellikleri	**Uretici**	**Cobasys**
	Batarya Tipi	**288-180**
	Kapasite [kWh]	7,20
	Maksimum Güç [kW]	180,00
	Batarya Unitesi Ağırlığı [kg]	225,00
Menzil [km]	**Avrupa Şehiriçi Çevrimi**	44,79
	40 km/h Sabit Hız	57,10
	100 km/h Sabit Hız	22,57
	130 km/h Sabit Hız	15,30
Ağırlık [kg]	**UQM Elektrik Motoru**	66,00
	Toplam Ekstra Ağırlık	291,00
	Ağırlık Farkı	41,00
Maliyet	**Batarya**	€ 18,352.94
	Elektrik Motoru	€ 19,117.65
	Toplam	€ 37,470.59

Projenin başlangıç safhasında yapılan fizibilite çalışmasında batarya ünitesi için ayrılabilecek hacim kabaca belirlenmişti. Gelinen bu aşamadan sonra yapılan seçimler doğrultusunda netlik kazanan fiziksel büyüklükler ile üç boyutlu yerleşim çalışmaları tekrar başlamıştır (Şekil 5.11).

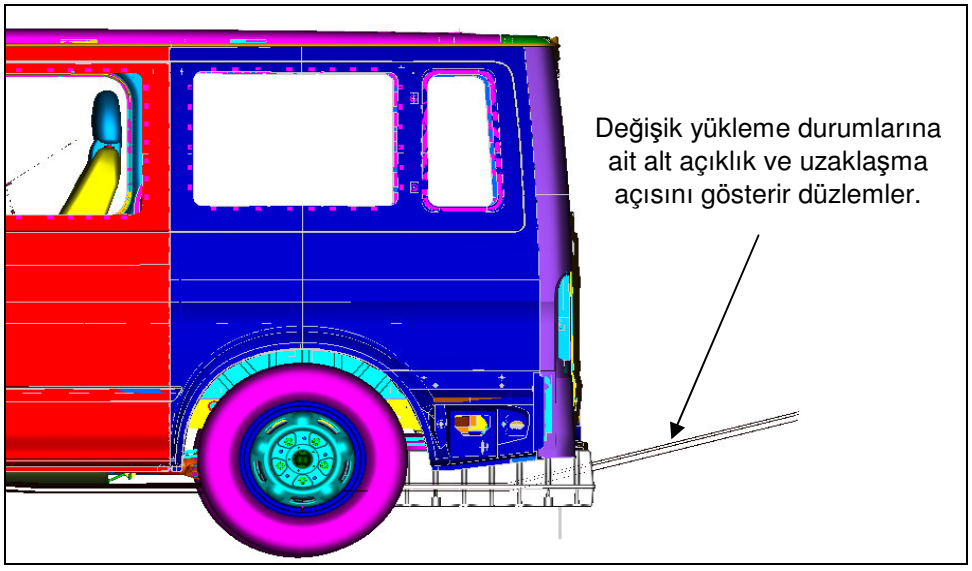


Şekil 5.11 : Cobasys NiMHax 288-60 Batarya Ünitesi CAD Modeli.

Aracın yük taşıma hacmini küçültmemek ve aynı zamanda yolcu taşımaya yönelik kullanımları da ortadan kaldırmamak için batarya ünitelerinin taban sacının altına yerleştirilmesi araştırılmıştır. Bu noktada karşılaşılan güçlükler viraj demir çubuğunun, susturucudan sonraki egzoz borusunun ve yedek lastiğin üniteler ile etkileşimi olmuştur. Söz konusu etkileşimler Şekil 5.12'de de görülmektedir.



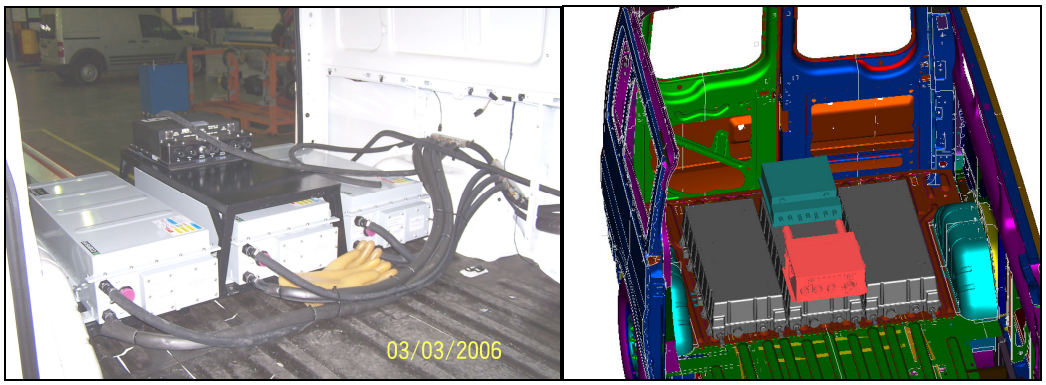
Şekil 5.12 : Batarya Ünitesinin Taban Sacı Altına Yerleşimi.



Şekil 5.13 : Batarya Grubu Konumunun Uzaklaşma Açısı Şartnamesi Açısından İncelenmesi.

Ancak durum regülasyonlar açısından incelendiğinde, aracın Şekil 5.13'te görüldüğü gibi söz konusu problemler haricinde "Alt Açıklık" ve "Araç Uzaklaşma Açısı" nı belirleyen 70/156 AT şartnamesini sağlayamadığı ortaya çıkmıştır [17].

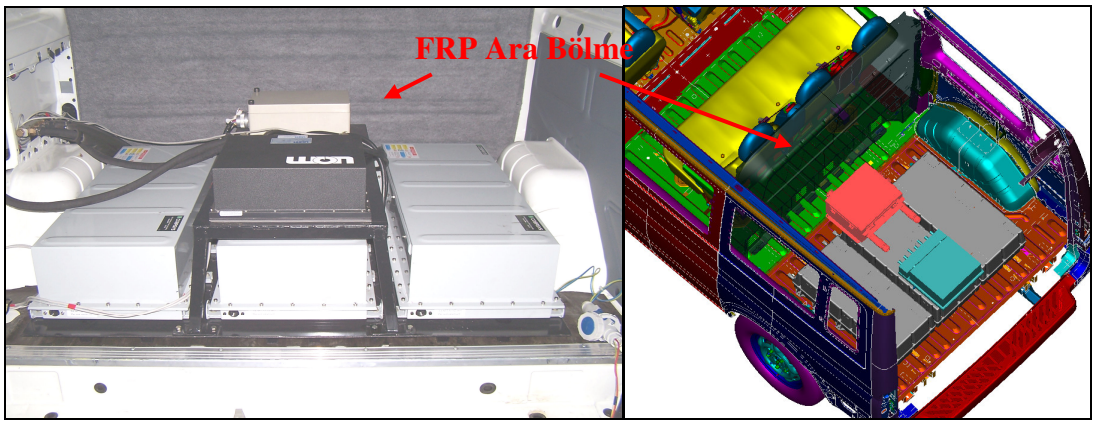
Söz konusu üç boyutlu incelemelerde görülen etkileşimler dikkate alınarak batarya paketinin taban sacı üzerinde arka tekerlek yuvaları arasına yerleştirilmesi uygun görülmüştür. Elektrik kablo ve su hattı çıkışları aracın önüne doğru bakacak şekilde üç batarya ünitesi boylamasına yaklaşık olarak arka aks üzerine konumlandırılmıştır. Ancak bu durumun dezavantajı, yolcu kompartımanı ile yüksek voltaja sahip elemanların bir arada olması ortaya çıkmıştır. Soğutma suyu hattı ünitelerden çıktıktan sonra gövde sacı içerisinde sürücü tarafı biniş basamağının altına yerleştirilmiş su pompasına yönlendirilirken elektrik hattı ise taban sacı delinerek mümkün olduğunca aracın ortasından geçen boyuna düzleme paralel bir şekilde elektrik motoruna bağlanmıştır. Böylece yalnızca batarya grubu, kontrolcüsü ve elektrik motoru kontrolcüsünün yolcu kompartımanından izole edilmesi gerekliydi. Bunun içinde aracın C direğine uygun bir biçimde FRP den yapılmış üst yarısı camlı bir ara bölme kullanılmıştır (Şekil 5.15). Kontrolcüler de ortadaki batarya üzerine, taban sacına rijit bağlanan bir platform yardımıyla oturtularak söz konusu elemanların aracın arka kısmında birbirlerine olabildiğince yakın durmaları sağlanmıştır (Şekil 5.14). Ortaya çıkan son yerleşim şekliyle yolcu kompartımanı erişilebilecek en üst seviyede güvenli tutulmuştur.



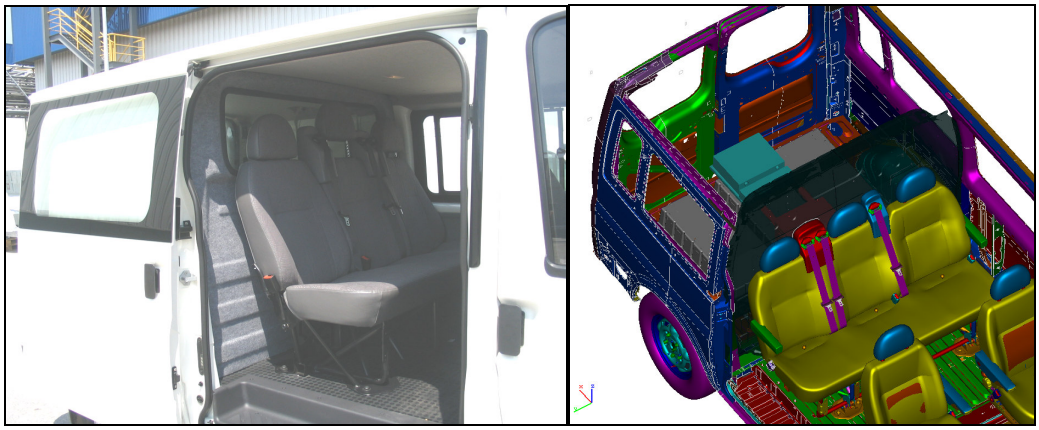
Şekil 5.14 : Batarya Grubu ve Kontrolcülerin Arka Tekerlek Yuvaları Arasında Yerleşimi.

Ayrıca yine sanal ortamda imalatçı firmanın bildirdiği ön koşulları dikkate alarak yapılan çalışma ile kablo boyları, soğutma sistemi hortumlarının boyları, elemanları araç gövdesine bağlama aparatları ve toplayıcı – dağıtıcı ara birimlerinin yerleri

belirlenmiştir. Bu şekilde fiziksel doğrulama safhası hızlandırılarak çalışmalar bir yandan araç üzerinde devam ederken diğer yandan çapları ve boyları önceden belirlenen kablolar sisteme ait konnektörler ile hazırlanıp kolaylıkla araç üzerine takılmaya uygun hale getirilmiştir.



Şekil 5.15 : Batarya Grubu ile Yolcu Kompartımanın Ara Bölme Vasıtasıyla İzole Edilmesi.



Şekil 5.16 : FRP Ara Bölme ve İkinci Sıra Koltuk Yerleşim Çalışmaları ve Uygulaması.

Uygulamanın toplam süresini kısaltmak ve tek seferde doğru tasarımı araca takabilmek için CAD ortamında aracın C direkleri, taban ve tavan sacından oluşan kesit incelenmiş ve konunun detayları imalatçı firma ile paylaşılmıştır. Aracın hazırlanması sırasında paralel olarak birden fazla koldan işlerin yürütülmesi bu sayede gerçekleşmiştir (Şekil 5.16). Ayrıca uygulanan ara bölme hali hazırda mevcut Transit ailesi araçlarda da uygulanmaktadır. Çift kabinli van tipi araçlarda, yük bölmesi ile yolcu bölmesi bu tip bir bölme ayrılıp yolcu güvenliği sağlanmaktadır.

5.5 Soğutma Sistemi Elemanları Seçimi Ve Araç Seviyesinde Yerleşimi

Hibrit araç uygulamalarında elektrikli tahrik sistemi elemanlarının performansları doğrudan soğutma sistemi performansı ile ilgilidir. Ayrıca sistemin soğutma gereksinimine olan hassasiyeti de konvansiyonel araçlarınkine göre oldukça fazladır. Bir başka deyişle çalışma sıcaklıkları son derece katı limitler çerçevesinde bulunmaktadır.

Sistem, aynı içten yanmalı motor soğutma sisteminde olduğu gibi soğutma sıvısının bir ısı değiştiricisinde geçerek tahrik elemanlarını dolaşması mantığına dayalıdır. Ancak elektrikli tahrik sistemi tamamıyla kendine ait soğutma elemanlarını kullanmaktadır. Aracın ön tampon açıklığına yerleştirilmiş bir radyatör, bir sirkülasyon pompası ve soğutma sıvısının dolaşımını sağlayan hortumlar sistemi teşkil etmektedir.

Tüm özellikleri belli olan elektrik motoru, batarya ünitesi ve kontrolcüler, söz konusu radyatör ve pompa seçimi için "Aspen HYSYS" ve "ACOL" yazılımları kullanılarak modellenip sistemin ihtiyaçları belirlenmiştir [13].

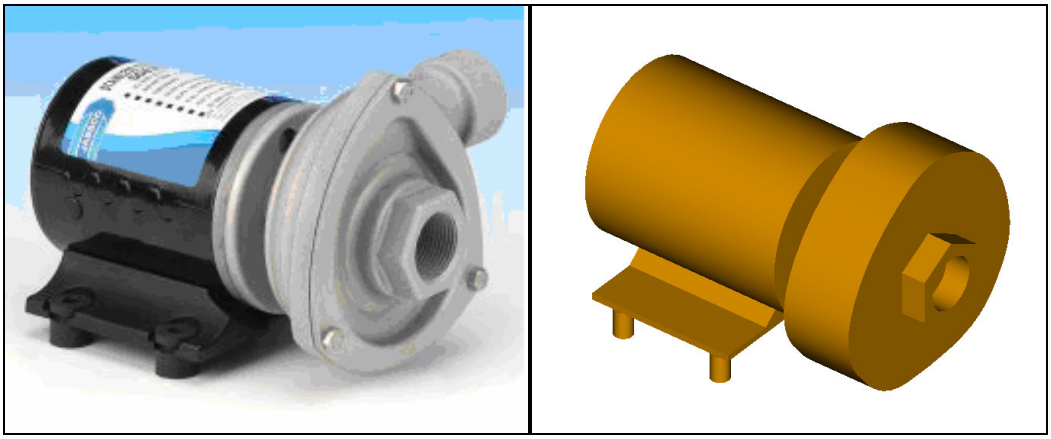
Motor ve batarya grubu için ısı yükleri kW cinsinden;

Elektrik motoru ve kontrolcüsü	5 kW
Bir batarya ünitesi	1 kW

şeklinde öngörülmüştür. Takiben simülasyon çalışmaları, elektrik motoru, çevirici ve batarya paketi içerisindeki sıcaklık artışını, hortum boylarına bağlı basınç düşüşlerini ve ısı değiştiricisinin performansını belirlemek için gerçekleştirilmiştir [13].

Soğutma sıvısı sistemi batarya grubuna ve elektrik motoru – kontrolcüsüne olmak üzere iki paralel koldan dolaşmaktadır. Batarya ünitelerine giden hortum taban sacı üzerine yerleştirilmiş bir ayırıcı ile üç adet batarya ünitesine paralel olarak dağıtılmıştır. Yine bir toplayıcı yardımıyla sistemden çıkan akışkan tek bir hatta düşürülmüştür. İmalatçı firmanın bildirdiği akış oranı, basınç düşüşü ve çalışma sıcaklıkları değerleri göz önünde bulundurularak pompa ve radyatör seçiminde kullanılmıştır. Diğer soğutma hattı ise seri bağlı elektrik motoru ve kontrolcüsünü dolaşıp ısı değiştiricisine yönelmektedir. Yine batarya grubunda olduğu gibi imalatçı firmanın elektrik motoru ve ona bağlı elemanlar için bildirdiği değerler pompa ve radyatör seçiminde dikkate alınmıştır.

İlgili yazılımlar vasıtasıyla yapılan simülasyon sonuçları optimize edilerek sistemin sirkülasyon pompası "Jabsco" firmasına ait "Su Sirkülasyon Pompası 50830-2012" şeklinde belirlenmiştir (Şekil 5.17). Araç hibrit ya da elektrikli çalışma modundayken su pompası daima aktif durumda olacak ve çalışması için gerekli gücü aracın konvansiyonel akü grubundan beslenecektir [13].

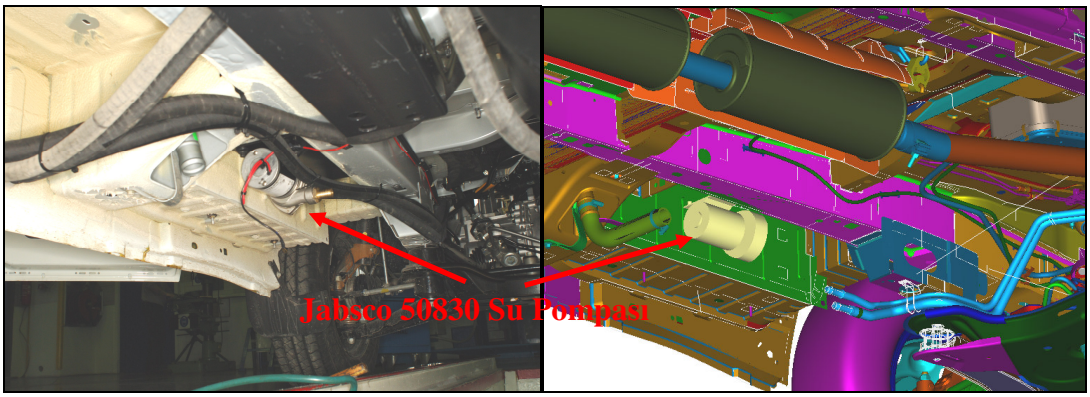


Şekil 5.17 : Jabsco 50830-2012 Su Pompası ve CAD Modeli.

Araç seviyesi yerleşim incelemelerinde, pompanın ve soğutma hattının hava akışından faydalanması, kolay servis edilebilir ancak çalışma şartlarından zarar görme ihtimali düşük ve sistem elemanlarına uzaklık bakımından en optimum bir yerde konumlandırılması esas alınmıştır. Aracın fiziki yapısı itibariyle taban sacının üstü ve altı olmak üzere iki ana alternatif incelenmiştir. Herhangi bir arıza durumunda oluşabilecek soğutma sıvısı kaçaklarının elektrikli tahrik sistemi elemanları ile temas etmesi ile doğacak güvenlik riski ve Ford şartnamelerinde tariflenen sıvı hattı ile elektrik hattı arasındaki ilişki nedenleriyle kabin içinde bir yerleşim düşünülmemiştir. Bu durumda ikinci alternatif olarak aracın gövde altı incelenerek esas alınan kriterlere en uygun yer olarak sürücü biniş basamağının altı düşünülmüştür (Şekil 5.18).

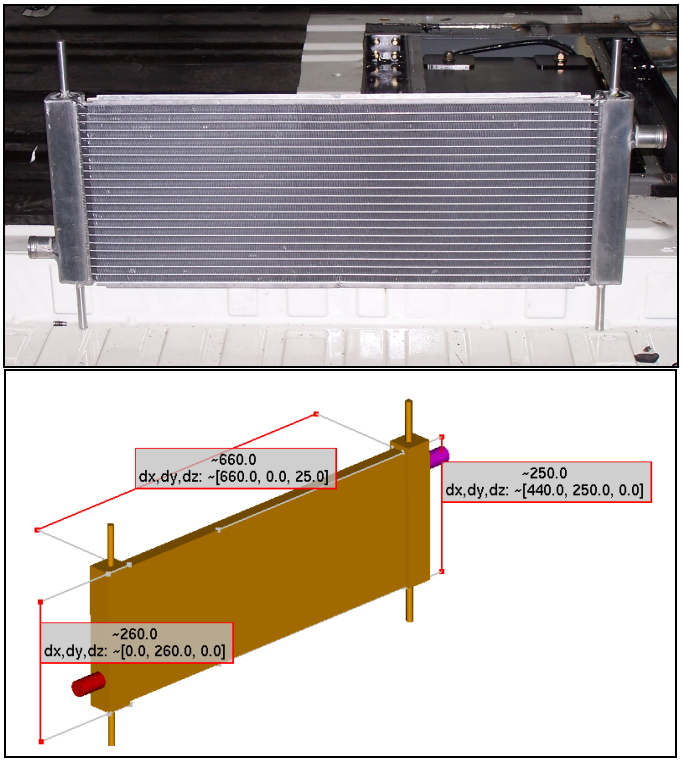
Bu şekilde aracın altındaki hava akışından faydalanabilmenin yanında soğutma sistemi hortumları da yolcu kompartımanına girmeden yan panellerin içinden geçerek ara bölmenin arkasında dağıtıcı yardımıyla ayrılıp sistem elemanlarına güvenlice ulaştırılmıştır. Ayrıca konumun seçiminde, tüm hattın aracın soğuk tarafında dolaşımını tamamlayabilecek olması önemli bir etken olmuştur. Diğer yandan yol şartlarında karşılaşılabilecek olumsuzluklar için pompanın yer ile

mesafesi oldukça fazla tutulmuş ve ekstrem durumlarda teması engelleyebilmek için alt muhafaza kullanılmıştır.



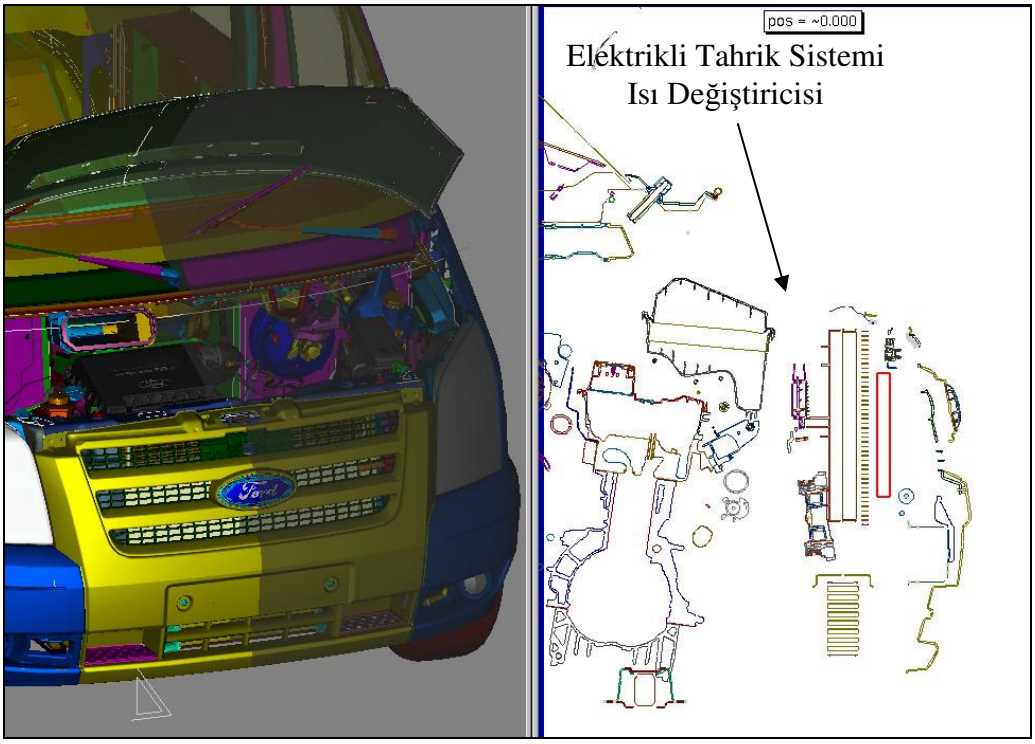
Şekil 5.18 : Su Sirkülasyon Pompasının Sürücü Biniş Basamağı Altına Yerleşimi.

Diğer bir ana soğutma sistemi elemanı olan radyatör için ise konvansiyonel araçlardaki gibi aracın tampon açıklığının arkası düşünülüp yerleşim açısından bir fizibilite çalışması yapılmıştır. Mevcut aracın soğutma paketi içerisinde bulunan kondenserin gövdeye bağlandığı noktalar ve kapladığı boşluk referans alınarak imalatçı firma ile yapılan temaslar neticesinde elde edilen boyutlar sanal ortamda katı modele dönüştürülüp araç seviyesinde incelenmiştir (Şekil 5.19).



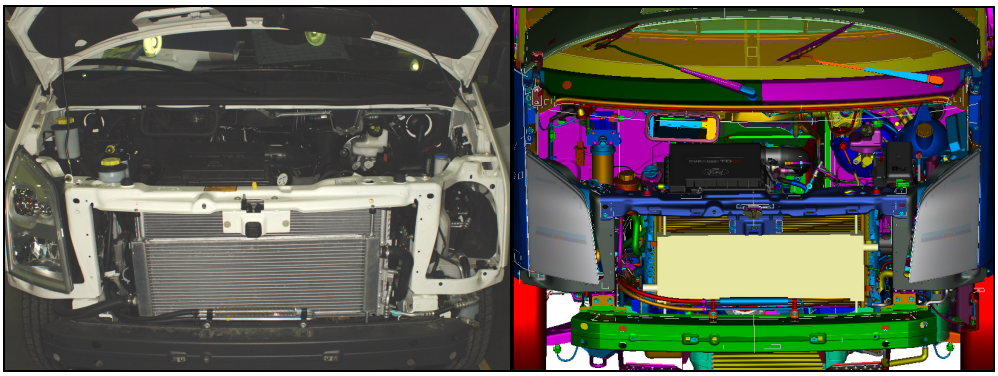
Şekil 5.19 : Elektrikli Tahrik Soğutma Sistemi Isı Değiştiricisi ve CAD Modeli.

Isı değiştirici, ön tampon açıklığından daha fazla faydalanabilmek ve içten yanmalı motor soğutma sistemine ait soğutma paketinin hava akışını kendi kondenserinden daha fazla kapatmamak için şekilde de görüldüğü gibi oldukça geniş ancak kısa seçilmiştir. Yerleşim çalışmaları ışığında radyatör üst ve alt köşelerinde bulunan bağlama ayaklarının boyları ve radyatör üzerindeki yerleri belirlenmiştir. Böylece bir seferde araç üzerinde ilave bir çalışmaya gerek kalmadan tasarım doğrulanmıştır. Seçilen konum sayesinde elektrikli tahrik sistemi için gerekli sıcaklık limitleri sağlanırken içten yanmalı motor için mevcut durumu kötüleştirmek söz konusu olmamıştır.



Şekil 5.20 : Elektrikli Tahrik Sistemi Isı Değiştiricisinin Dijital Ortamda Yapılan Yerleşim Çalışmaları.

Soğutma sıvısı giriş ve çıkış portları ise yine aynı çevre parçaların konumları, kendine has özellikleri dikkate alınarak ısı değiştiricinin sol ve sağ yanlarına konumlandırılmışlardır (Şekil 5.20). Hortum imalatçı firmasından alınan iç çap, dış çap ve minimum dönüş yarıçapı bilgilerine göre hortumların rotaları belirlenmiş, araç üzerine bağlanmaları gereken yerler ve bağlama elemanları seçilmiştir. Ayrıca söz konusu çalışmalar sayesinde hortumların boyları kendiliğinden ortaya çıkmış ve prototip yapım safhası imalatçı tarafından her açıdan hazırlanıp sonlandırılmış olan bu parçalarla desteklenmiştir.



Şekil 5.21 : İlave Tahrik Sistemi Isı Değiştiricisinin Fiziksel Araç Üzerinde Yerleşimi.

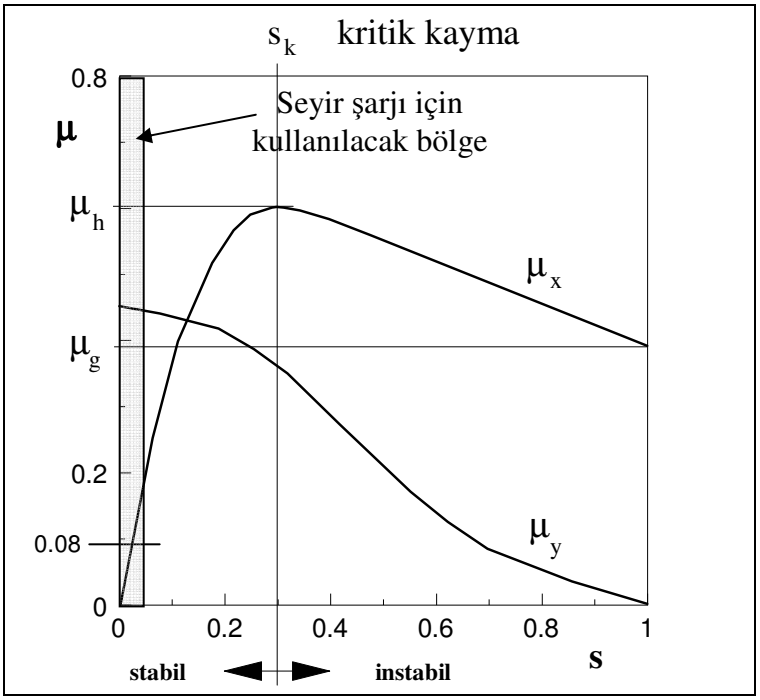
Ayrıca içten yanmalı motor soğutma sistemine ait radyatör paketi ile motor arasına ilave bir fan daha yerleştirilmiştir. Böylece aracın toplam iki tane elektrikli fanı olmuştur. Bir tanesi gerekli durumlarda içten yanmalı motor soğutma performansına destek verirken diğeri gerektiği zaman sürekli olarak çalıştırılabilecek şekilde tasarlanıp elektrikli tahrik soğutma sistemine ayrılmıştır (Şekil 5.21).

5.6 Rejeneratif Frenleme Sistemi İçin Yapılan Araç Seviyesi Değişiklikler

Hibrit araç uygulamalarında rejeneratif frenleme sistemi, servis freni pedalına basılmak suretiyle hidrolik fren sisteminin devreye sokulması ile birlikte elektrik motoru jeneratör olarak çalışmaya başlayıp aracın kinetik enerjisini elektrik enerjisine çevirerek batarya ünitesini şarj etme şeklinde çalışmaktadır. Bu sistem sayesinde özellikle şehir içi sürüşlerinde sıkça tekrarlanan durup kalkma sırasında önemli miktarda enerjinin geri kazanılmasını sağlamaktadır. Aracın hidrolik fren sistemini devreye sokmak için fren pedalına basıldığında kontrol sistemi hidrolik fren ile rejeneratif fren arasındaki koordinasyonu sağlayarak önceliği mümkün olduğunca rejeneratif frene verecek şekilde frenleme işleminin gerçekleşmesini sağlamaktadır. Ancak ani duruşlar gerektirecek panik frenler söz konusu olunca ise durma mesafesini kısaltacak şekilde hidrolik fren sistemine öncelik verilmektedir.

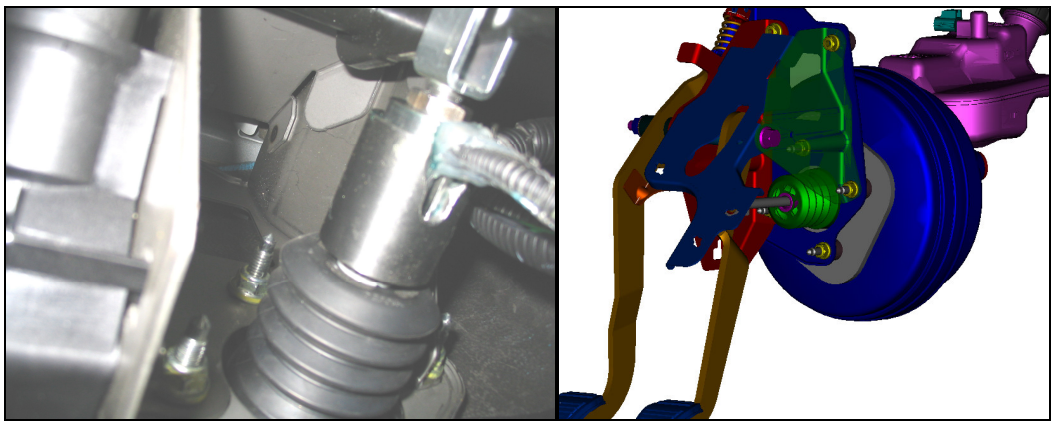
Rejeneratif frenleme sırasında arka tekerleklerde ortaya çıkacak fren momentlerinin belli sınırların altında tutulmaması halinde tekerleklerin yan kuvvet taşıma kapasiteleri düşecek ve taşıtın dönme karakteri dolayısıyla dinamik karakteri kötüleşebilecektir. Ancak uygulamada içten yanmalı motordan enerji alarak batarya şarjı modunda arka tekerleklerin boyuna kuvvet bağlantı katsayılarının μ_x = 0,08

değerinin üzerine çıkmaması sağlanarak aşağıda şekilde görülen yan kuvvet bağlantı katsayısının μ_y değişikliğe uğramadığı bölgede kalınması hedeflenmiştir (Şekil 5.22) [14].



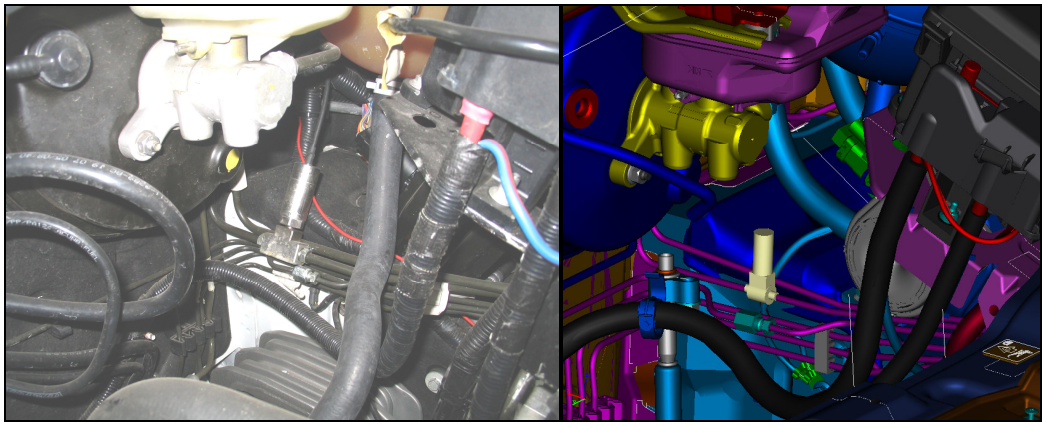
Şekil 5.22 : Kuvvet Bağlantı Katsayılarının Kaymaya Bağlı Değişimi.

Söz konusu sistemin araç üzerinde uygulanabilmesi için jeneratör fren momenti seviyesini düzenleme amacı ile limitleri belirlenmiş fren pedal kuvveti ölçücü sensör ve hidrolik sistem basınç sensörü kullanılmıştır. 0 – 200 N aralığındaki sıkıştırma kuvvetlerini ölçebilecek kuvvet ölçüm sensörü, kuvvet sınırlayıcı ile birlikte fren pedalının bağlandığı vakum ünitesinin mili üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 5.23) [14].



Şekil 5.23 : Fren Sistemi Vakum Ünitesi Pedal Mili Üzerine Konumlandırılmış Kuvvet Ölçüm Sensörü.

Hidrolik sisteme bağlanacak 100 bar a kadar ölçüm yapabilen basınç sensörü ise hidrolik fren sıvısının arka tekerleklere aktarımını sağlayan boru hattı üzerine takılmıştır (Şekil 5.24) [14].



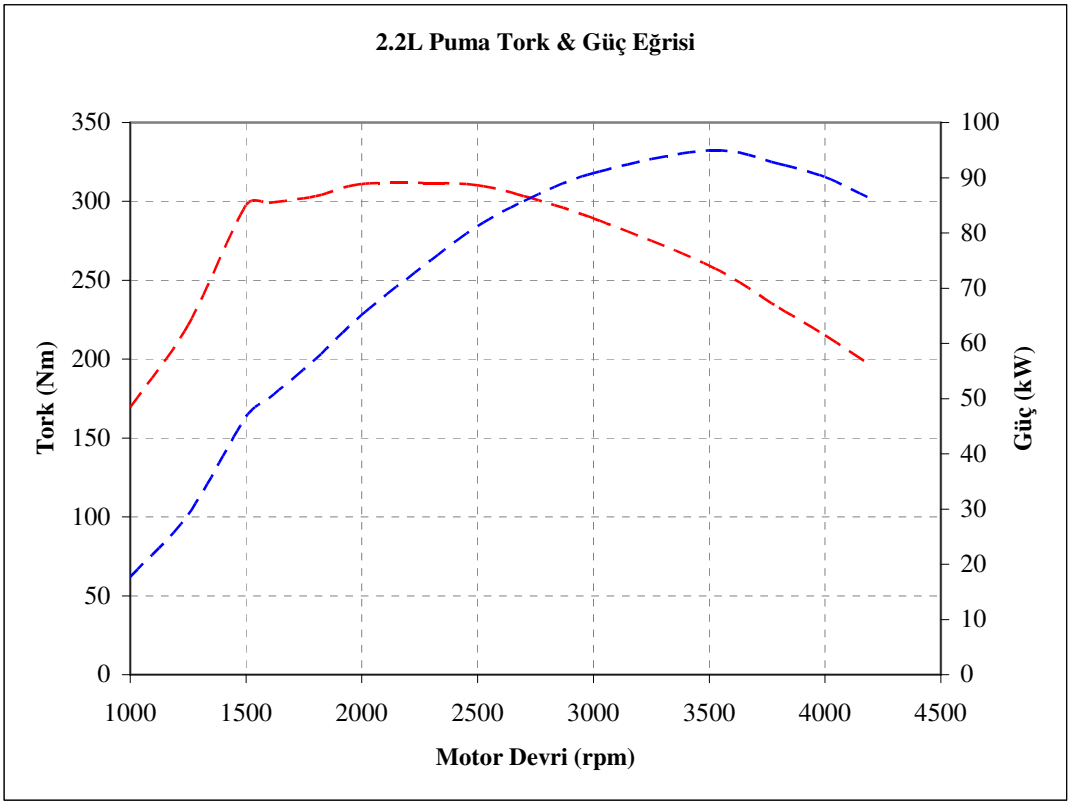
Şekil 5.24 : Hidrolik Fren Boru Hattı Üzerine Yerleştirilmiş Basınç Sensörü.

Söz konusu sensörler yardımıyla kurulmuş olan algoritma, 100 N'luk bir pedal kuvvetine kadar rejeneratif frenleme sisteminin batarya ünitesini beslemesini 100 N'nun üzerindeki pedal kuvvetleri için ise hidrolik sistemin devreye girmesini öngörmektedir.

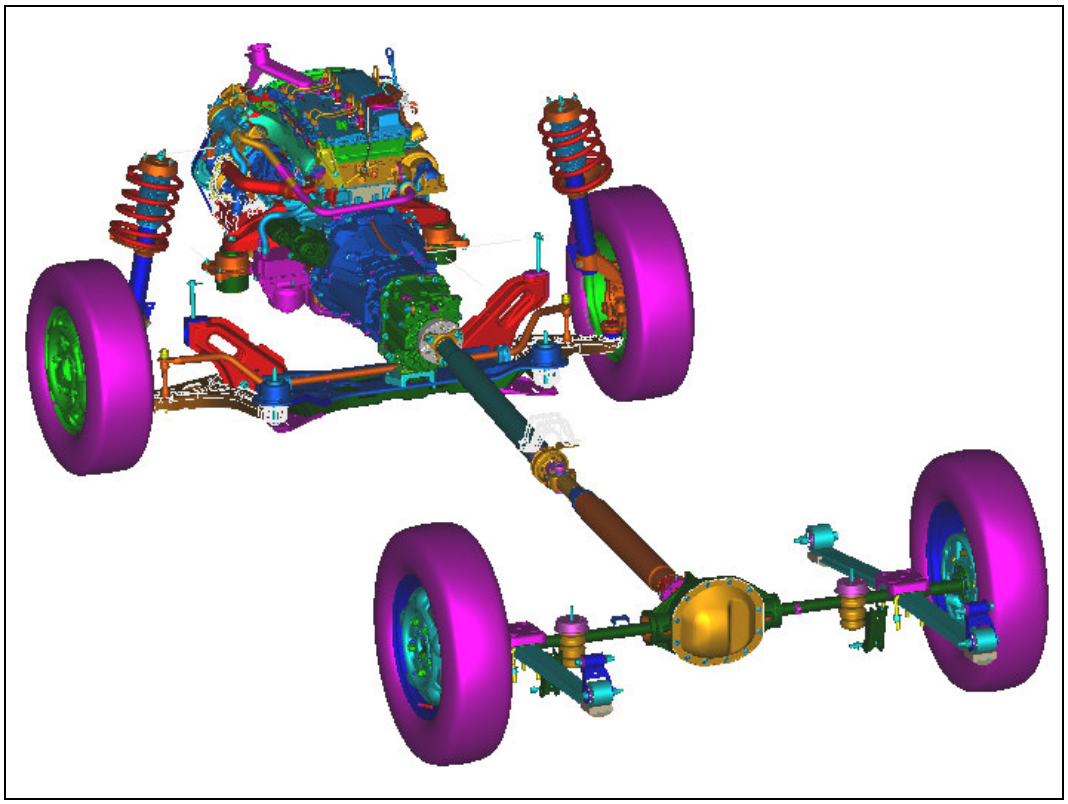
5.7 İçten Yanmalı Motor Seçimi Ve Araç Seviyesinde Yerleşimi

İçten yanmalı motor seçiminde en önemli kriter, aracın gövde yapısında değişiklik gerektirmeyecek, uygulaması hızlı ve pratik olacak bir motor şeklinde göz önünde tutulmuştur. Böylece hibrit araç mantığı altında yatan içten yanmalı motorun küçültülmesi temasından uzaklaşılmış olsa da prototip hazırlama aşamasında önemli ölçüde zaman kazanılarak hibrit araç bileşenlerine daha fazla yoğunlaşabilme imkanı bulunmuştur. Yüksek tabanlı arkadan itişli Transit ailesine ait kısa şasi alçak tavan minibüsün, bu açıdan incelenince yine bir Ford ürün yelpazesi arasında yer alan 130 PS'lik Doğu/Batı (E/W) motor ile birlikte kullanılabileceği görülmüştür (Şekil 5.25).

Bu doğrultuda dijital ortamda yürütülen geometrik fizibilite çalışmaları ile araç seviyesi gerekli olan değişiklikler belirlenmiştir. Dönüşüm yapılmadan karşılaşılabilecek zorluklar ve motor kompartımanına ait elemanların yerleşimleri çalışılmıştır. Şekil 5.26'da arkadan itişli Transit ailesine ait bir aracın güç aktarma organları görülmektedir. Kuzey/Güney bir motor ve ona bağlı şanzıman ile birlikte iki parçalı bir tahrik şaftından oluşmaktadır.

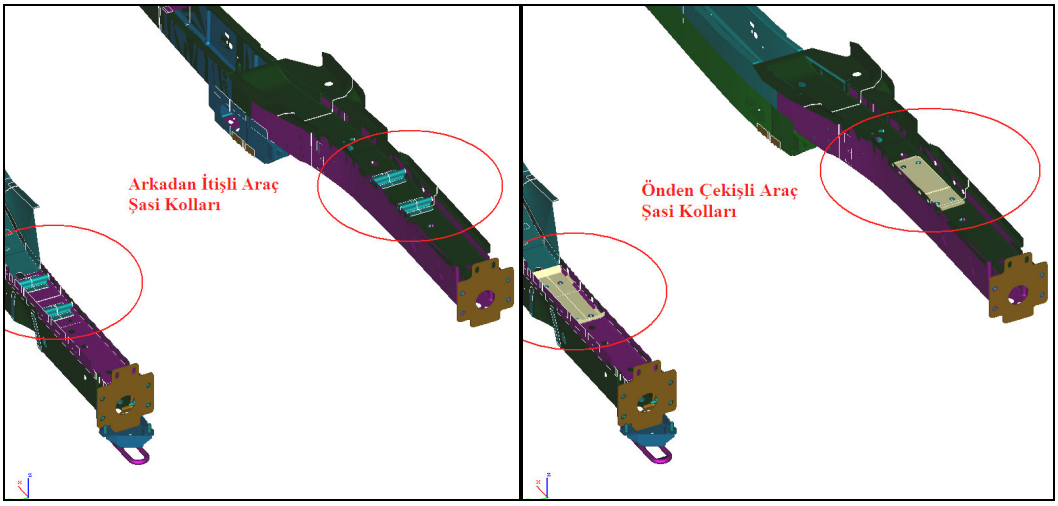


Şekil 5.25 : 130 PS Doğu/Batı (E/W) Motor Tork ve Güç Karakteristikleri.



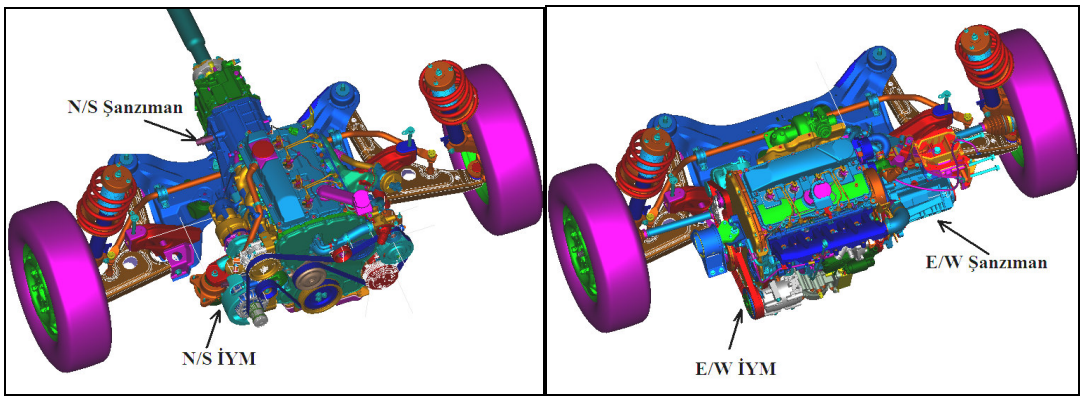
Şekil 5.26 : Arkadan İtişli Kuzey/Güney (N/S) Motorlu Transit Minibüsün Güç Aktarma Organları.

Yapısı itibariyle arkadan çekişe müsait olan gövdenin, elektrik sistemi tahriki için 5.88 dişli oranlı diferansiyele uygunluğu incelenmiştir. Gövde üzerindeki bağlantı noktalarının değişemeyecek olması ve değişen aksın dış geometrisinin bir önceki ile aynı olması sebepleri ile çalışma söz konusu işlemin uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Diğer bir incelemede şanzıman ve içten yanmalı motorun önden çekişli konfigürasyona dönüşümü için gerekli şasi kolları üzerindeki motor ve şanzıman takozlarının bağlantı noktalarının uyuşmazlığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.27 : Arkadan İtişli (RWD) ve Önden Çekişli (FWD) Transit Şasi Kolları Arasındaki Fark.

İncelemenin neticesinde önden çekişli araçların motor – şanzıman ikilisini gövdeye bağlamak için kullanılan şasi kolları üzerindeki plakaların, arkadan itişli araçların şasi kolları üzerine kaynak ile birleştirilebileceği görülmüştür. Bu aşamada prototip aracın takoz bağlantı noktalarındaki güçlendirici braketler çürütülerek gövdeden ayrılıp önden çekişli araç konfigürasyonuna uygun motor takozu plakaları şasi kollarına kaynatılmıştır. Şasi kolları ile ön süspansiyon traversi arasındaki ilişkinin önden çekişli ve arkadan itişli varyantlar arasında değişiklik göstermemesi sebebiyle süspansiyon sisteminde ve buna bağlı tahrik milleri üzerinde herhangi bir değişikliğe ihtiyaç duyulmamıştır. Motor kompartımanı ile yolcu kompartımanını ayıran sac parçanın da ortak kullanılması sayesinde motor – şanzıman dışındaki sistemlerin değişimi de problemsiz gerçekleştirilmiştir. Önden çekişli araçlar için kullanılan daha küçük ebatlı lastikler yerine arkadan itişli araçtan gelen büyük lastikler aynen kullanılmış ancak lastik yarıçapından kaynaklanan gösterge panelindeki uyuşmazlıklar gösterge paneli üzerinde çözülmüştür (Şekil 5.27).



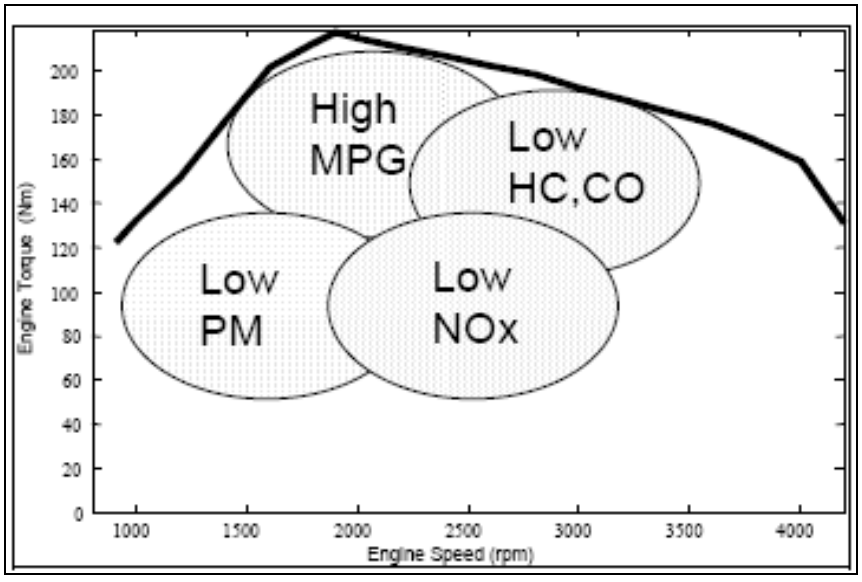
Şekil 5.28 : Arkadan İtişli Aracın Önden Çekişli Hale Getirilmesi.

İçten yanmalı motor değişimine bağlı olarak vites kolu mekanizması, hava emiş sistemi, elektrik tesisatı, yakıt hattı, soğutma sistemi hortumları gibi elemanlarda motor – şanzıman ikilisine uygun seçilerek konsept aracın kaput altı yerleşimi tamamlanmıştır (Şekil 5.28).

6. HİBRİT ARAÇ UYGULAMASI İLE DİZEL MOTORU AZOTOKSİT (NO_X) EMİSYONLARININ OPTİMİZASYONU

Artan yakıt maliyetleri ve daralan emisyon sınırları daha düşük yakıt tüketimine ve emisyonlara sahip güç üretim sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu hale getirmektedir. Hibrit araç uygulamalarının önemli bir avantajı, içten yanmalı motorun boşta çalışma (rölanti) durumlarında durdurularak yakıt ekonomisi, düşük egzoz ve gürültü emisyonlarının elde edilebilmesini sağlamasıdır. Bir diğer üstünlüğü ise fren enerjisinin rejeneratif frenleme sistemleri ile geri kazanımıdır.

Hibrit araç uygulamalarında en önemli nokta, bataryaların içten yanmalı motor en verimli çalışma şartlarındayken doldurulup verimsiz çalışma şartlarında içten yanmalı motor yerine elektrik motorunun devreye sokulabilmesidir. Böylece çalışma şartlarına bağlı olarak egzoz emisyonları ve yakıt tüketim değerleri optimize edilebilmektedir. İçten yanmalı motorun çalışma noktaları, egzoz emisyonları ve yakıt tüketimi açısından nispeten yüksek değerlerin elde edildiği bölgelerden daha düşük emisyon ve tüketim değerlerinin elde edileceği bölgelere kaydırılmaya çalışılarak optimizasyon gerçekleştirilebilmektedir (Şekil6.1).



Şekil 6.1 : İçten Yanmalı Dizel Motorun Yakıt Tüketimi ve Egzoz Emisyonları Arasındaki İlişki.

Hibrit araç kontrol algoritmalarında, optimizasyon parametreleri, yakıt ekonomisinin sağlanması ve düşük egzoz emisyon değerlerinin elde edilmesi yönünde belirlenmektedir. Aracın çalışması gereken işletme şartları, belirlenen yakıt tüketim ve egzoz emisyon hedefleri çerçevesinde optimizasyon yöntemi ile seçilebilmektedir.

İçten yanmalı motorun yakıt tüketim değerleri, sürücünün tork talebine, motor tasarımına, aracın aerodinamik özelliklerine, sürüş çevrimine ve yakıt içeriğine bağlıdır. Ayrıca araç ağırlığı da yakıt tüketimi üzerinde oldukça önemli bir paya sahiptir.

Egzoz emisyonları ise yakıt tüketimi ve kat edilen yol ile lineer bir ilişki içerisinde değildir. Araç tasarımı, kontrol methodları, sürüş çevrimi, sürücü talepleri ve yakıt seçimi gibi parametrelerin hepsi birlikte toplam emisyon seviyesini belirlemektedir.

Yanma odasında gerçekleşen tam yanmada, tüm hidrokarbonlar (HC) karbondioksit (CO_2) ve suya (H_2O) dönüşmekte ve stokiyometrik yanma olarak adlandırılmaktadır.

Stokiyometrik hava – yakıt karışımı $(A/F)_S$, minimum hava ile teorik olarak tam yanmanın gerçekleştirilebildiği karışım oranıdır. Gerçek hava – yakıt karışım oranının, stokiyometrik hava – yakıt karışım oranına oranı ise hava fazlalık katsayısı (λ) olarak bilinmektedir [4].

$$\lambda = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_G}{\left(\frac{A}{F}\right)_S} \qquad \textbf{(6.1)}$$

Hava fazlalık katsayısının 1'den küçük olduğu durumlarda, yakıtın tamamı karbondioksit (CO_2) ve suya (H_2O) dönüşemeyip istenmeyen egzoz emisyonları ortaya çıkmaktadır. Benzinli motor kullanılan hibrit araç uygulamalarında, elektrik motorunu süreksiz kılan bir kontrol algoritması ile hava fazlalık katsayısının 1 mertebelerinde tutulması mümkündür.

Emisyon ölçümü sırasında, aynı şartlar altında iki ölçüm sonucu kendi arasında farklılık gösterebilmektedir. Söz konusu değişkenlik için motor ve dış ortam sıcaklığı önemli bir parametredir. Ayrıca ölçüm methodlarının sağlıklı ve tekrarlanabilir olması da önemli bir diğer parametredir. Bundan dolayı ölçüm sonuçları simülasyon modelinde, bağıl karşılaştırma yapabilmek için bir araç olarak kullanılmaktadır.

Ayrıca simülasyon sonuçları yorumlanırken, bağıl emisyon değişiminden ziyade gerçek tekil sonuçların üzerinde durulmalıdır.

6.1 Yakıt Tüketimi ve Egzoz Emisyonlarının Hibrit Araç Uygulaması ile Kontrolü

Dizel motorların yüksek verimi hibrit araç uygulaması ile bir avantaj haline dönüştürülebilmektedir. Ancak dizel motorları, azotoksit (NO_X) emisyonu gibi oldukça ağır bir dezavantaja sahiplerdir. Bu sebeple azotoksit (NO_X) emisyonlarının azaltılmasına odaklanmak oldukça önemlidir.

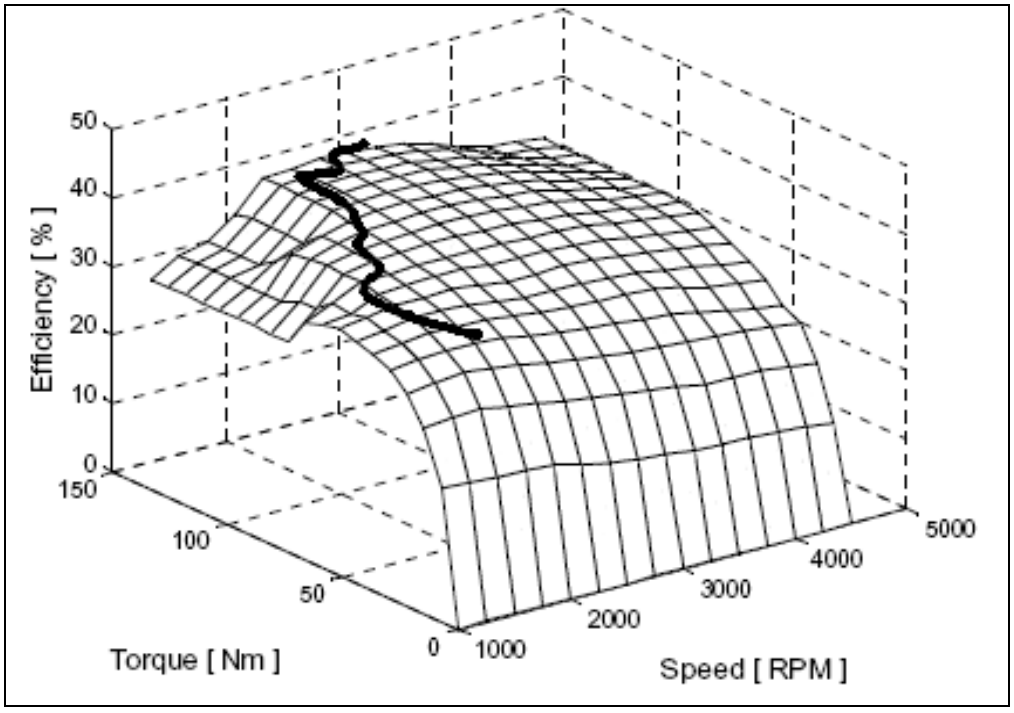
Hibrit araç uygulaması ile azotoksit (NO_X) emisyonlarının optimizasyonu, ancak içten yanmalı motorun sürüş çevrimi boyunca hangi aralıkta ve nasıl çalışacağını kontrol ederek gerçekleştirilebilmektedir. Bir başka deyişle hibrit kontrol algoritmasının, dizel azotoksit (NO_X) emisyonlarının optimizasyonuna yönelik olarak oluşturulması gerekmektedir.

Hibrit araç kontrol algoritması için birçok serbestlik derecesi mevcuttur. Bazı parametreler tasarım ile ilgiliyken bazıları çalışma şartlarını belirleyen parametrelerdir. Bu durum, araç şasi parametreleri, içten yanmalı motor, elektrik motoru, batarya ünitesinin büyüklüğü ve tipi, kayıplar, şarj/deşarj stratejileri ve sürücü talepleri gibi birçok değiştirilebilir parametreler anlamına gelmektedir. Söz konusu çalışmada, tüm bu parametrelerin incelenmesinden ziyade sınırlı sayıda muhtemel kontrol algoritmatları üzerinde durularak yakıt tüketiminin azaltılması ve gelecekte devreye alınacak egzoz emisyon regülasyonlarının sağlanması hedeflenmiştir.

Hibrit araç uygulamalarında, gerek içten yanmalı motor gerekse de elektrik motoru için dezavantajlardan kaçınan aksine avantajlardan faydalanan bir kontrol algoritması seçilerek aracın kontrolüne yeni bir boyut kazandırılabilir. Söz konusu çalışmada, içten yanmalı motorun çalışma noktaları değiştirilerek verimliliğin arttırılmasına odaklanılmıştır. Sürücü tarafından talep edilen güç miktarının karşılanabilmesi için birden çok değişik tork/hız kombinasyonları mevcuttur. Ancak bu değişik çalışma noktaları, değişik verim değerlerini de beraberinde getirmektedir. Hibrit araçların önemli avantajlarından biri içten yanmalı motor hızının göreceli olarak araç hızına bağlı seçilebilmesidir. Böylece, tüm muhtemel yükleme şartları ve içten yanmalı

motora ait tüm güç seviyeleri için verimlilik değerleri yükseltilebilmektedir. Amaç içten yanmalı motorun, her zaman sürücü tarafından talep edilen güce karşılık gelen mümkün olan en verimli noktada çalışmasını sağlamaktadır.

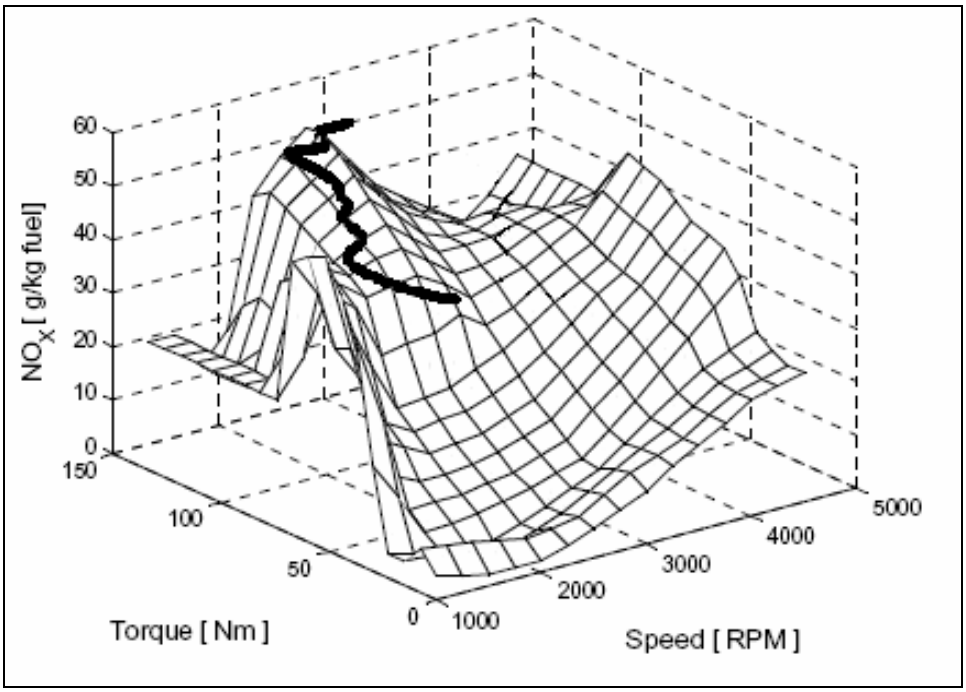
İçten yanmalı motorun, her bir güç değerine karşılık gelen en verimli noktaları gözetilerek bir dizi çalışma noktaları elde edilebilir. Elde edilen bu noktalar da yumuşak geçişler ile birbirlerine bağlandığı takdirde bir sürüş çevrimi boyunca içten yanmalı motorun en verimli şekilde çalışmasını sağlayan Şekil 6.2'de görülen bir rota ortaya çıkmış olur [4].



Şekil 6.2 : İçten Yanmalı Dizel Motor İçin, Motor Verimi Gözetilerek Seçilmiş Çalışma Noktaları.

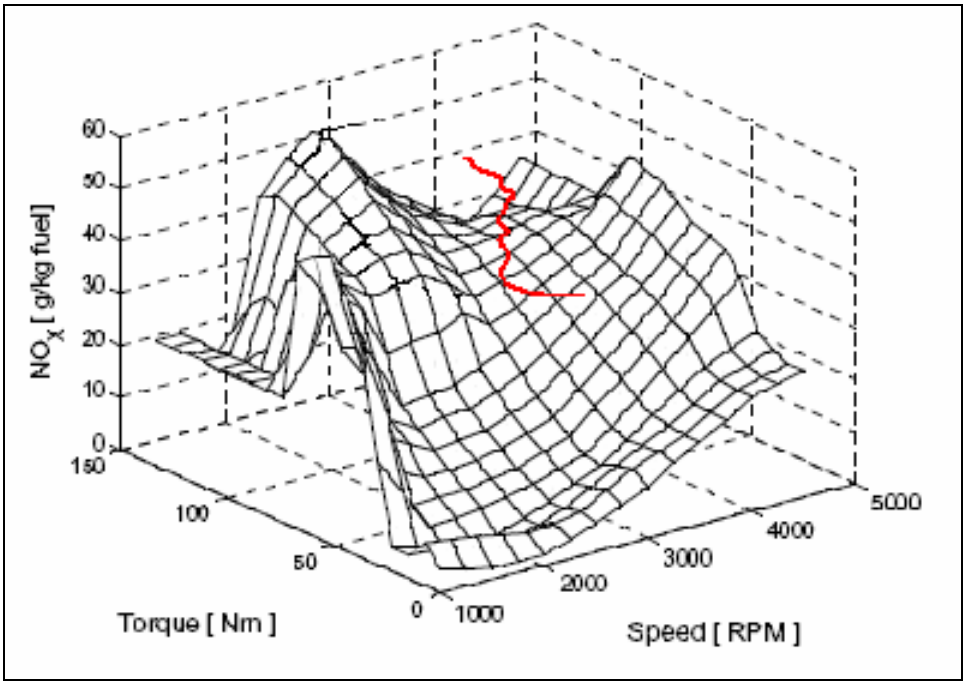
Ancak öte yandan azotoksit (NO_X) emisyonlarının optimizasyonu için, içten yanmalı motora ait azotoksit (NO_X) emisyon haritası incelendiğinde maksimum verimin elde edildiği çalışma noktalarında azotoksit (NO_X) değerlerinin de maksimum seviyelere ulaştığı görülmektedir (Şekil 6.3) [4].

Bu durumda, emisyon haritası ile verim haritası birlikte incelenince alternatif bir kontrol algoritmasına ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Söz konusu alternatif algoritma ile verimlilik ve emisyonlar arasındaki zıt ilişki dikkate alınarak, değişen güç taleplerine karşılık minimum azotoksit (NO_X) miktarlarının ortaya çıktığı noktalar seçilip yeni bir rota oluşturulabilmektedir (Şekil 6.4).

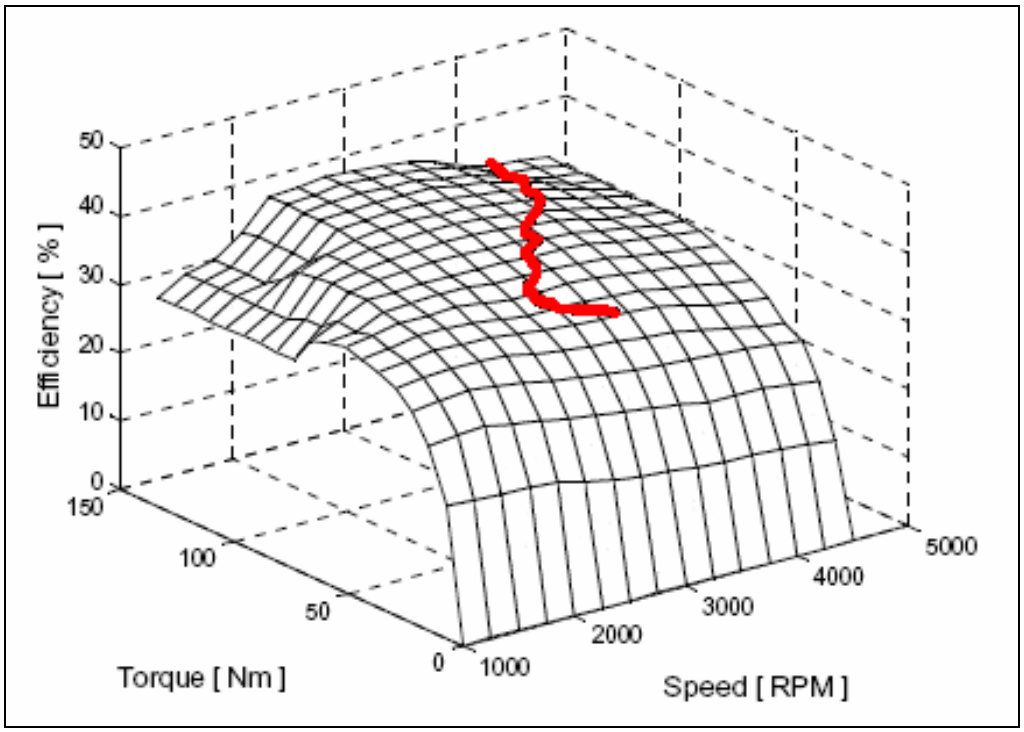


Şekil 6.3 : Azotoksit (NO_X) Emisyon Haritasında İçten Yanmalı Dizel Motorun Motor Verimi Gözetilerek Seçilen Çalışma Noktaları.

Elde edilen çalışma noktaları verim haritası ile incelediğinde ise içten yanmalı motorun, azotoksit (NO_X) emisyonlarının düşmesine karşın çok verimsiz bölgelerde çalışmadığı göze çarpmaktadır (Şekil 6.5) [4].



Şekil 6.4 : İçten Yanmalı Motor Azotoksit (NO_X) Üretimi Gözetilerek Seçilen Motor Çalışma Noktaları. (Kırmızı Çizgi)

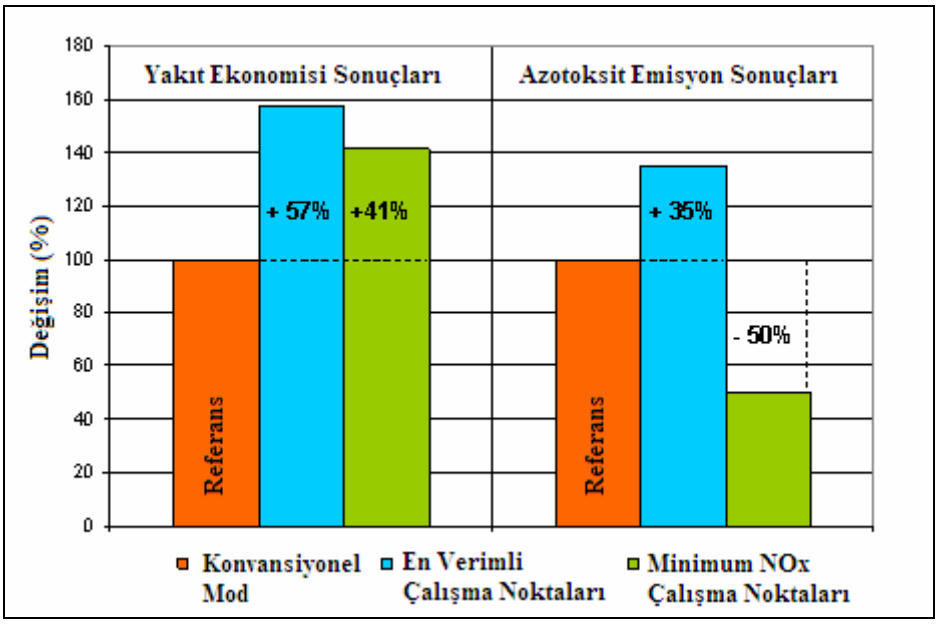


Şekil 6.5 : İçten Yanmalı Motor Verim Haritasında Azotoksit (NO_X) Üretimi Gözetilerek Seçilen Çalışma Noktaları.

Ancak azotoksit (NO_X) emisyonlarının azaltılmasına dayalı bir kontrol algoritması ile içten yanmalı motorun daha düşük verimli bölgelerde çalışmasına bağlı olarak yakıt tüketiminin artması muhtemeldir. Hatta kontrol algoritmasında seçilen içten yanmalı motor çalışma noktalarının gittikçe verimsizleşmesi ile artan yakıt tüketimi emisyon optimizasyonunu da bozarak sonuçları oldukça kötüleştirebilmektedir.

Söz konusu ihtimal göz önünde bulundurularak içten yanmalı motorun azotoksit (NO_X) emisyon haritasına göre seçilen çalışma noktaları ile daha olumlu sonuçlar elde edilebilmektedir.

Şekil 6.6'da, içten yanmalı motorun en verimli bölgelerinde çalıştırılmasını esas almış kontrol stratejisine göre, yakıt ekonomisinin %57'lik artışına karşın azotoksit emisyonlarının da %35 oranında arttığı görülmektedir. Diğer kontrol algoritmasında ise azotoksit (NO_X) emisyon haritası esas alınarak, yakıt ekonomisinde %41'lik bir iyileşme ve azotoksit (NO_X) emisyonlarında %50'lik bir düşüş gerçekleştirilmiştir. Görüldüğü gibi azotoksit (NO_X) emisyonları ile yakıt tüketimi değerleri arasında ters bir ilişki mevcuttur. Bu konudaki optimizasyon çalışmalarının amacı, söz konusu ters ilişki göz önünde bulundurularak her iki parametrenin de birlikte azalmasını sağlayacak şekilde olmalıdır [4].



Şekil 6.6 : Yakıt Ekonomisi ve Azotoksit (NO_X) Emisyon Sonuçlarının Değişik Çalışma Noktalarına Dayalı Kontrol Stratejisine Göre Değişimi.

Hibrit araç uygulamalarında azotoksit (NO_X) emisyonlarının optimizasyonu, içten yanmalı motorun çalışma noktaları, kontrol stratejisinin sahip olduğu esneklik ile değiştirilerek başarılabilmektedir. Ancak söz konusu noktaların tayini sırasında içten yanmalı motor verimi ile yakıt tüketimi ve yakıt tüketimi ile azotoksit (NO_X) emisyonları arasındaki ilişkiler daima göz önünde tutulmalıdır. Bilgisayar ortamında kurulacak ve doğruluğu kanıtlanabilen bir hibrit araç modeli yardımıyla değişik iterasyonlar yapılarak ilgili parametreler için optimum sonuçlar elde edilebilir.

7. BÖLÜNMÜŞ PARALEL HİBRİT YAPIYA DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ARACIN SAYISAL YÖNTEMLER YARDIMIYLA İNCELENMESİ

Otomotiv endüstrisinde, üretilmesi planlanan taşıtın sayısal yöntemler yardımıyla incelenmesi iş gücünün ve enerjinin verimli kullanılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu şekilde ürün geliştirme süreci kısalırken hedef aracın performans optimizasyonu da daha başarılı yapılabilmektedir. Ayrıca dijital ortamda yapılan incelemeler araştırma ve geliştirme maliyetlerinin de oldukça azalmasına yardımcı olmaktadır.

Özellikle hibrit araç geliştirme programları gibi detaylı ve sistem elemanlarının maliyetlerinin yüksek olduğu araç programlarında, bilgisayar ortamında gerçekleştirilen çeşitli simülasyonlar ile hem maliyetlerin düşürülmesi hem de kısa bir zaman içerisinde değişik yapıların incelenerek optimize edilmesi son derece önemlidir. Söz konusu gereksinimlerin karşılanabilmesi için otomotiv endüstrisine hizmet eden değişik simülasyon programları mevcuttur.

Bunların bazıları;

"Idaho Ulusal Mühendislik ve Çevre Laboratuarı" tarafından geliştirilmiş olan SIMPLEV, DOS tabanlı ve önceden belirlenmiş elemanların seçimi ile kullanıcıyı sınırlayan bir programdır. Sürüş çevrimini girdi olarak alıp her bir elemanın kendi iç verimini göz önünde bulundurarak hedef aracın bu çevrimi tamamlayabilmesi için gerekli gücü hesaplayabilmektedir. Ayrıca yakıt tüketimi, egzoz emisyonları gibi değişken diğer parametreleri de kullanıcıya yaklaşık olarak bildirebilmektedir [5].

Diğer bir simülasyon programı MARVEL, hibrit aracın performans değerlerini gerçeğe yakın olarak analiz edebilmektedir. Ayrıca araç ömrüne ve maliyetlerine bağlı olarak, batarya ünitesinin kapasitesi ve içten yanmalı motorun büyüklüğünün optimizasyonu da gerçekleştirilebilmektedir. Ancak yakıt tüketimi, son hız, hızlanma gibi değişken parametreler hesaplanamamaktadır.

Ohio State Üniversitesi tarafından geliştirilmiş OSU-HEVSIM ise MATLAB/Simulink tabanlı, yakıt tüketimi, son hız, hızlanma gibi parametreleri

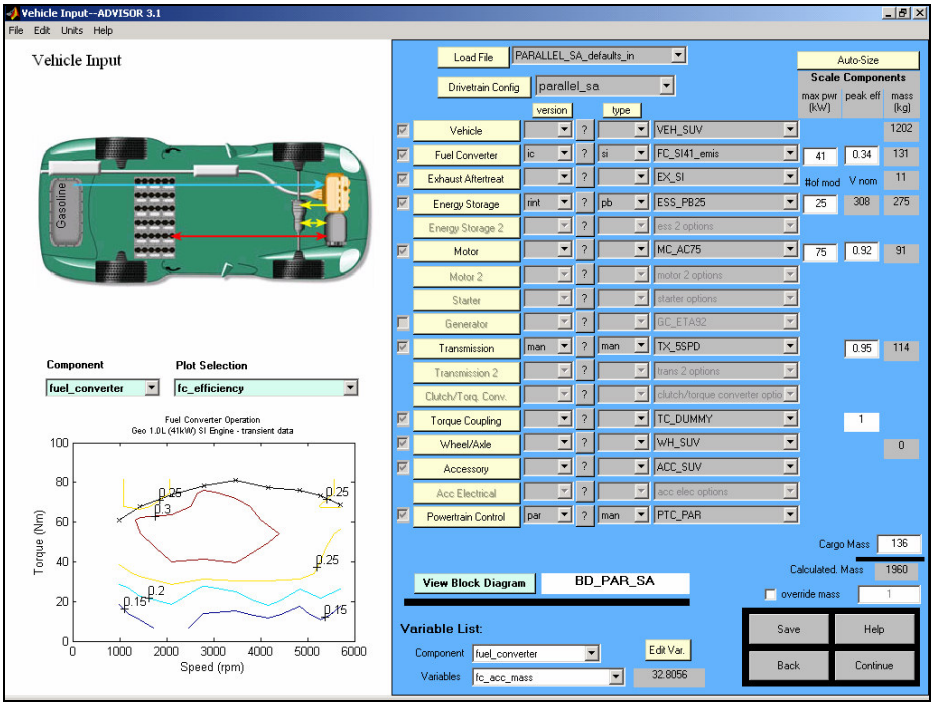
hesaplayabilen, elemanları detaylı ve kolayca değiştirilebilen bir simülasyon programıdır. Ohio State Üniversitesi'nde bir dönem çalışmasında kullanılmıştır.

Son olarak "Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuarı" (NREL – National Renewable Energy Laboratory) tarafından üretilmiş ADVISOR (**AD**vance **V**eh**I**cle Simulat**OR**), konvansiyonel araç yapılarının yanında paralel ve seri hibrit araç modelleri kurmakta ve simüle etmekte kullanılmaktadır. MATLAB/Simulink tabanlı bir programdır. Grafiksel bir ara yüz ile kullanıcının araç parametrelerini çeşitli alternatifler içerisinde kolayca değiştirebilmesine imkan tanımaktadır. Ayrıca yakıt tüketimi, egzoz emisyonları, tırmanma kabiliyeti gibi parametreleri de hesaplayabilmektedir.

Söz konusu çalışmada kullanılmak üzere, dünya çapındaki önemli otomotiv üreticileri arasındaki yaygın kullanımı, geniş bir alana yayılmış kabul edilirliği ve kolay kullanımı sebepleriyle ADVISOR programı seçilmiştir.

7.1 ADVISOR Programının Tanıtılması

MATLAB tabanında çalışmakta olan ADVISOR programı, Şekil 7.1'de görülen bir arayüz yardımıyla taşıtın içten yanmalı motor, elektrik motoru, jeneratör, batarya, şanzıman, egzoz sistemi, kavrama, kontrol sistemi gibi parametrelerinin kolayca değiştirilebilmesini sağlamaktadır.

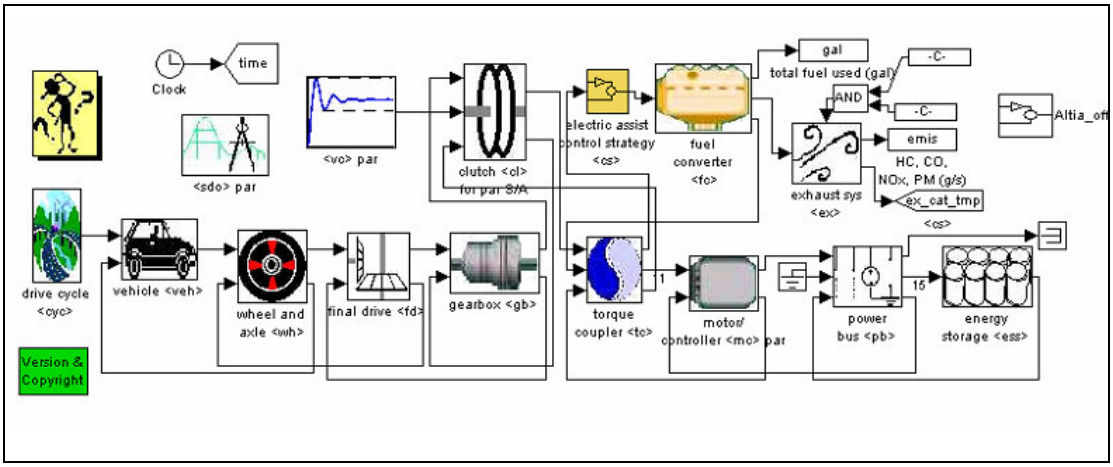


Şekil 7.1 : ADVISOR Arayüzü.

Taşıtın her bir elemanı için birer MATLAB kodu bulunmaktadır. İlgili kodlar alt sistemlerin performanslarını modelleyebilmek ve diğer alt sistemler ile olan ilişkilerini kurabilmek için gerekli değişkenlerin çalışma aralıklarını içermektedir. Söz konusu arayüzde görünmeyen hesaplamalar ise yine MATLAB tabanlı ancak modelleme için kullanılan grafiksel programlama aracı Simulink ile gerçekleştirilmektedir. Simulink, MATLAB kodları içerisinde bulunan değişkenler vasıtasıyla aracı modellemek için gerekli hesaplamaları yapmaktadır.

ADVISOR iki ana tip hesaplama metodu kullanmaktadır. Birincisi olan yoldan sürücüye metodunda (backward-facing), programa girdi olarak sürücü modeli yerine sürüş çevrimi ve hız profili verilmektedir. Gerekli çekiş kuvveti ADVISOR tarafından hesaplanıp tork değerine dönüştürülmektedir. Bu durum yakıt ve elektrik enerjisi tüketim değerleri hesaplanana kadar tekrarlanmaktadır. Gaz pedalı pozisyonu, fren pedalı konumu gibi parametreler göz ardı edilmektedir. Diğer hesaplama yöntemi olan sürücüden yola metodunda (forward-facing) ise girdi olarak sürücü modeli kullanılmaktadır. Bu şekilde program, gaz ve fren pedalı konumlarını oluşturup motor tork değeri olarak güç aktarma organlarından geçirerek gerekli çekiş kuvvetini hesaplamaktadır [18].

ADVISOR programı özünde ampirik modeller ile elemanların performanslarını kullanarak yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarını hesaplayan bir taşıt simülasyon programıdır. İçten yanmalı bir motorun yakıt tüketimi ve emisyon değerleri için bu motorun laboratuar şartlarında elde edilen çeşitli devir ve yük konumlarındaki yakıt tüketim ve egzoz gaz akışı verilerini kullanmaktadır. Bu veriler ile de motorun verimi termodinamik yasalarından hesaplanmaktadır [18].



Şekil 7.2 : Paralel Hibrit Bir Taşıtın Simulink Blok Diyagramı.

Bu şekilde kurulan alt sistemler, Şekil 7.2'de görüldüğü gibi bir blok diyagramı sayesinde istenilen araç konfigürasyonuna çevrilerek çeşitli taşıt simülasyonlarının yapılmasında kullanılmaktadır. ADVISOR programı içerisinde Simulink ile üretilmiş değişik blok diyagramları mevcuttur. Bu diyagramlar her eleman için olduğu kadar değişik güç üretme mekanizmalarına sahip taşıtlar için de mevcuttur. Böylece dış kuvvetlerin etkisine göre farklı tepkiler veren bir mekanizmanın hareketi simüle edilebilir.

Sonuç olarak ADVISOR programı kullanılarak, yakıt tüketimi, egzoz emisyonları hızlanma, son hız ve tırmanma kabiliyetleri, batarya dayanımı, güç üreticilerinin bir çevrim boyunca çalışma noktaları gibi temel çıktılar elde edilebilir. Ayrıca motor kaputunun sıcaklık değişiminin çevrim boyunca değişimi ve katalitik konvertörün verimi gibi yan bilgiler de elde edilebilir.

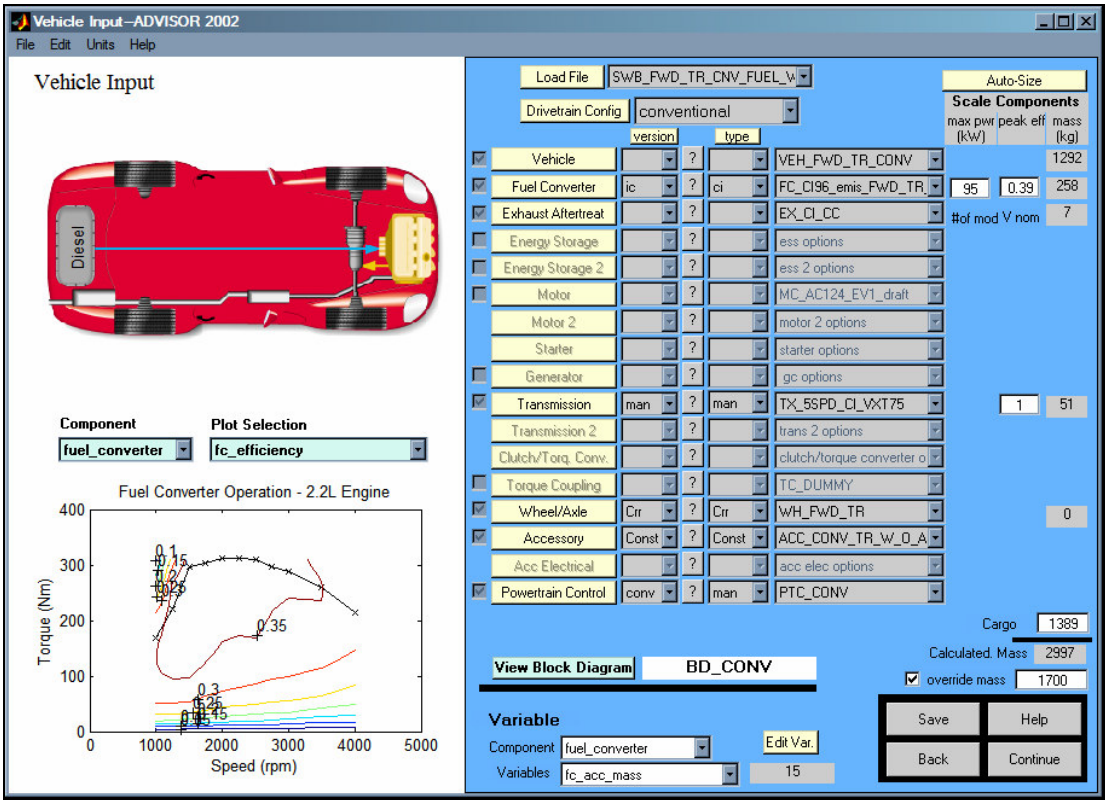
7.2 Konvansiyonel ve Hibrit Araçların ADVISOR ile Simülasyonu

ADVISOR programı ile araç modelleme safhasına geçmeden önce simülasyonlarda kullanılan kodlar ve programlama dilinin anlaşılması önem arz etmektedir. Simulink ile aracın bütün elemanları için oluşturulmuş blok diyagramlarının birleşimi sayesinde tüm bir aracın modeli oluşturulabilmektedir. Program içerisinde bulunan konvansiyonel ve değişik hibrit yapılara ait elemanların MATLAB kodlarının modifikasyonu ile istenilen araç modelini elde etmek mümkündür. Proje kapsamında hem konvansiyonel araç hem de hibrit araç için olmak üzere iki farklı ADVISOR modeli oluşturulup fiziksel test neticeleri ile karşılaştırılarak sayısal modellerin doğruluğu araştırılmıştır. Böylece incelemeler sonucunda ortaya çıkacak geleceğe yönelik tahminlerin gerçeğe yakınlığı arttırılarak optimizasyon çalışmaları daha verimli hale getirilmeye çalışılmıştır.

7.2.1 Konvansiyonel aracın modellenmesi ve performans, yakıt tüketimi, egzoz emisyon sonuçlarının doğrulanması

Söz konusu tez çalışması kapsamında, önceki bölümlerde detaylıca belirtildiği gibi hibrit dönüşümü için seçilmiş ve belirlenmiş hibrit yapısının uygulanacağı "Transit Kısa Şasi Minibüs", 5 ileri vitesli VXT75 şanzıman ve 2.2 lt 130 PS'lik kaput altında E/W şeklinde konumlandırılmış bir içten yanmalı motor ile yapılandırılmıştır.

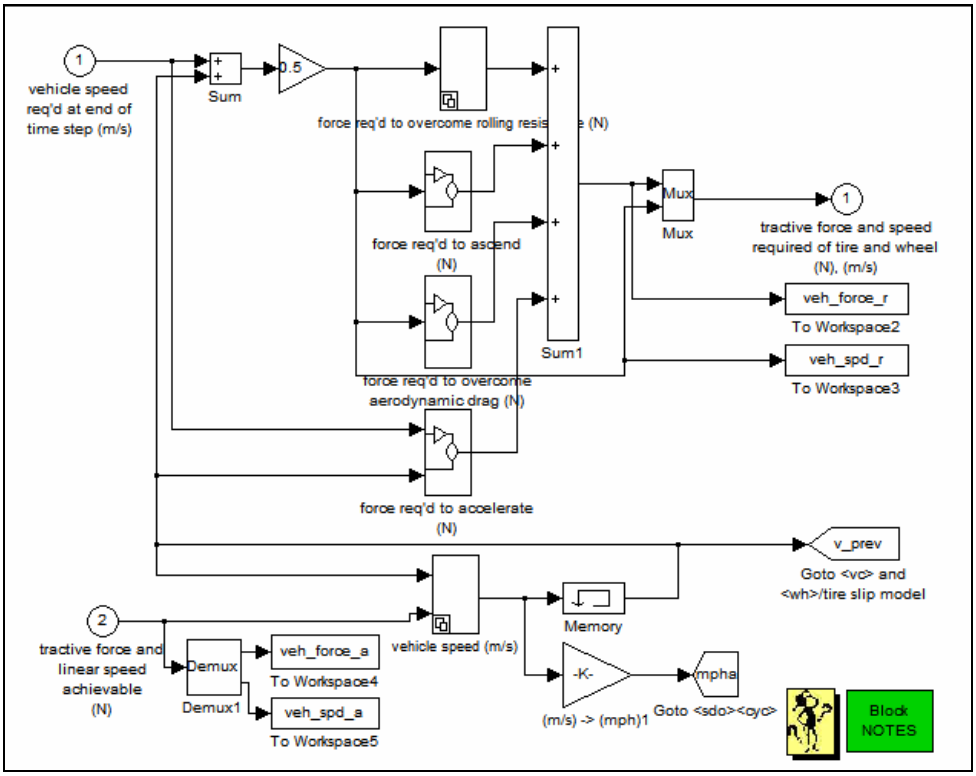
Konvansiyonel araca ait nihai ADVISOR modelinin oluşturulabilmesi için araç bileşenlerinin spesifik değerleri ile uygun MATLAB kodlarının modifiye edilmesi gerekmektedir (Şekil 7.3). Söz konusu temel bileşenler; aracın direnç katsayıları, aks mesafesi, ön kesit alanı, yer çekim ivmesi, hava yoğunluğu gibi değerlerini içeren "Vehicle" dosyası, içten yanmalı motora ait yakıt tüketimi ve egzoz emisyon haritalarını içeren "Fuel Converter" dosyası, egzoz sistemi verimi, ağırlığının ve çalışma sıcaklığı aralığının belirtildiği "Exhaust Aftertreat" dosyası, şanzımana ait kayıplar, ağırlık, vites oranları ve son dişli oranı değerlerini gösterir "Transmission" dosyası, lastik ölçüleri, direnç katsayıları ve yarıçapı değerlerinin belirtildiği "Wheel/Axle" dosyası, içten yanmalı motora mekanik bağlı olan su pompası, direksiyon pompası, alternator ve klima kompresörü gibi elemanların oluşturduğu kayıpların belirtildiği "Accessory" dosyası ve optimum vites değiştirme noktaları ile içten yanmalı motorun rölanti hızının gösterildiği "Powertrain Control" dosyasından oluşmaktadır.



Şekil 7.3 : Konvansiyonel Aracın Bileşenlerinin Belirlendiği ADVISOR Ara Yüzü.

Tüm dosyaların MATLAB yardımıyla değiştirilmesi sayesinde hedeflenen araç modelleri oluşturulabilmekte ve istenilen sürüş çevriminde simüle edilebilmektedir.

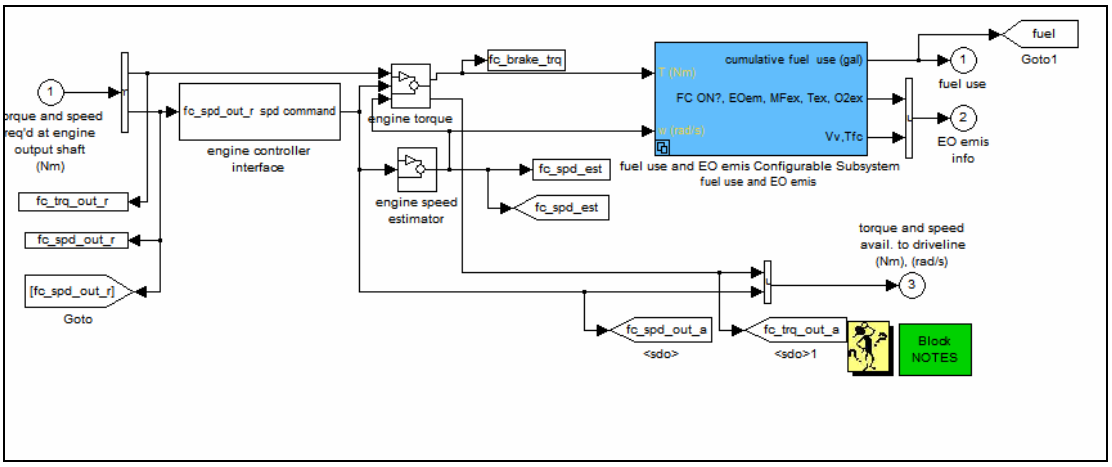
Seçilen aracın değerleri, ADVISOR programında "Vehicle" sekmesi altında yer alan "VEH_FOCUS.m" isimli MATLAB dosyasının modifikasyonu olan "VEH_FWD_TR_CONV.m" dosyasına girilerek gerekli uyarlamalar yapılmıştır.



Şekil 7.4 : Araç Simulink Blok Diyagramı.

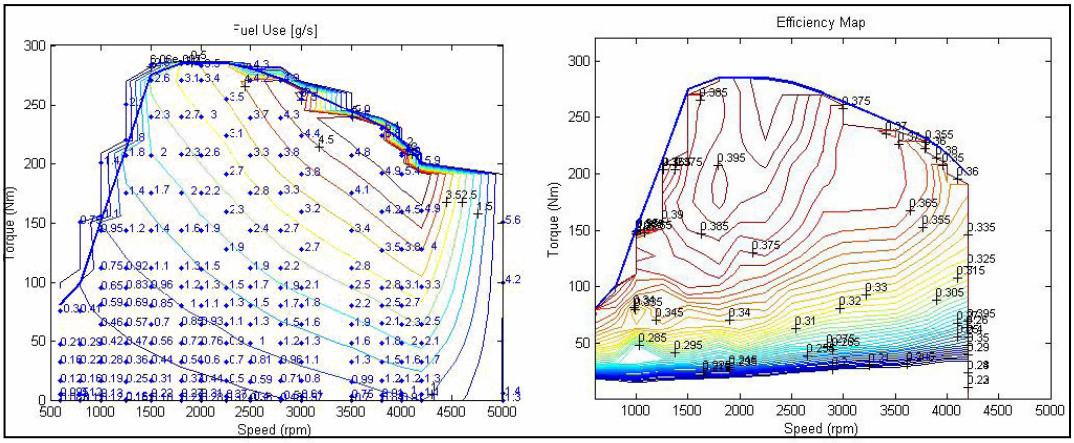
Araca etkiyen yerçekimi ivmesi (g) olarak $g = 9{,}81 m/s^2$, aerodinamik direnci oluşturan hava yoğunluğu olarak $d = 1{,}18 kg/m^3$ alınmıştır. Aerodinamik direnç katsayısı $C_D = 0{,}394$ ve aracın ön yüzey alanı $F_A = 3{,}60 m^2$ değerleri üreticiden elde edilip ilgili dosyaya işlenmiştir. Ayrıca araç ağırlık merkezinin yerden yüksekliği $h_{CoG} = 0{,}765 m$, iki dingil arası mesafe $l_{wb} = 2{,}933 m$, araç boş ağırlığı $G_{curb} = 1292 kg$ ve araç istiap haddi $G_{payload} = 1389 kg$ gibi datalar da söz konusu MATLAB kodu içerisine girilerek simülasyonda aracı tanımlamak üzere nihai dosya oluşturulmuştur (Şekil 7.4).

Araca ait içten yanmalı motor dataları ise, "Fuel Converter" sekmesinde yer alan "FC_CI92_emis.m" isimli MATLAB kodu değiştirilerek oluşturulan "FC_CI96_emis_FWD_TR.m" dosyasına işlenmiştir. Oluşturulan dosya araç modelinde içten yanmalı motoru ve motora ait emisyon, yakıt tüketimi haritaları ile ağırlık, toplam dış yüzey alanı, malzeme cinsi gibi bilgileri içermektedir.



Şekil 7.5 : İçten Yanmalı Motor Simulink Blok Diyagramı.

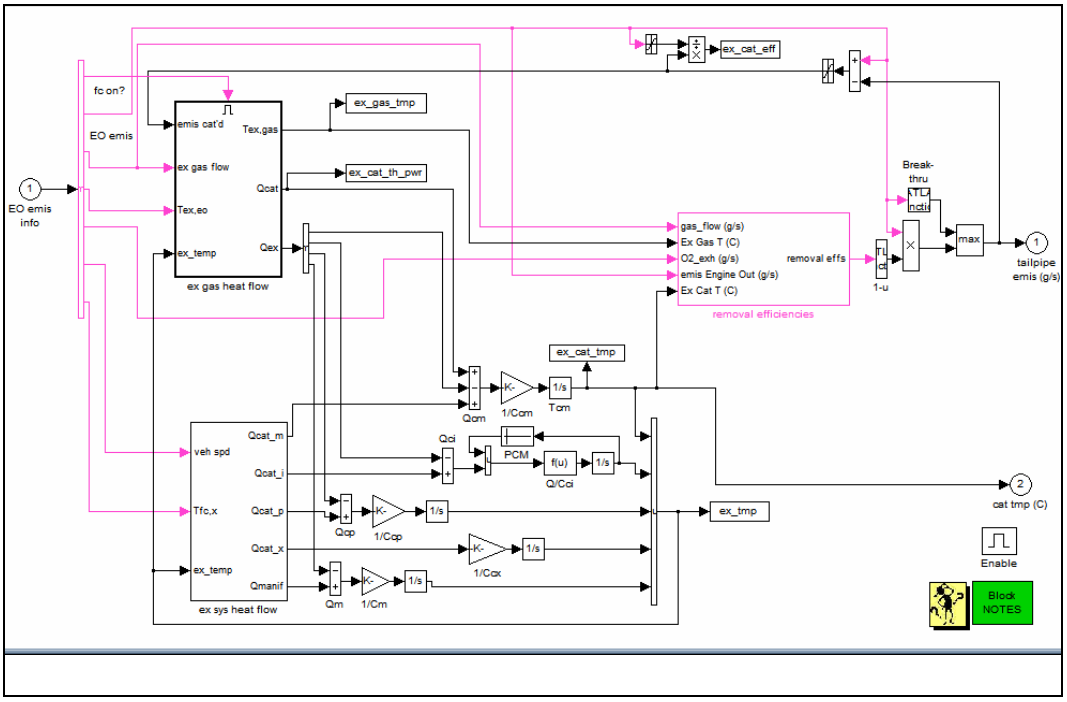
Ford Motor yelpazesinden seçilen "2.2L Duratorq TDCi" dizel içten yanmalı motora ait, maksimum güç $96\,kW\,@\,3500\,rpm$, maksimum tork $310\,Nm\,@\,1600\,rpm$, sıkıştırma oranı 17,5:1, motor bloğu ve silindir kafası kütlesi $m_{base} = 183\,kg$, motor üzerinde takılı ekipmanların kütlesi $m_{acc} = 15\,kg$ ve içten yanmalı motorun toplam dış yüzey alanı $a_{ext} = 10{,}4478\,m^2$ değerleri ile ilgili dosya değiştirilmiştir (Şekil 7.5).



Şekil 7.6 : İçten Yanmalı Motor Haritaları.

Ayrıca motora ait özgül yakıt tüketimi, azotoksit (NO_X), karbonmonoksit (CO), hidrokarbon (HC) ve partikül madde (PM) haritaları, yakıt tankı kütlesi $m_{fuel} = 60\,kg$, motor termostat sıcaklığı $t_{th} = 96\,^{o}C$, toplam kaput yüzey alanı $a_{hood} = 0{,}91\,m^2$, yakıt yoğunluğu $d_{fuel} = 834{,}9\,g/l$ ve yakıt alt ısıl değeri $H_U = 44800\,J/g$ gibi dataların da girilmesi ile dosyanın modifikasyonu sonlandırılmıştır (Şekil 7.6).

Katalitik konvertör değerleri için, programda "Exhaust Aftertreat" sekmesinde "EX_CI_CC.m" kodu modifiye edilerek "EX_CI_CC_FWD_TR.m" dosyası oluşturulmuştur (Şekil 7.7).



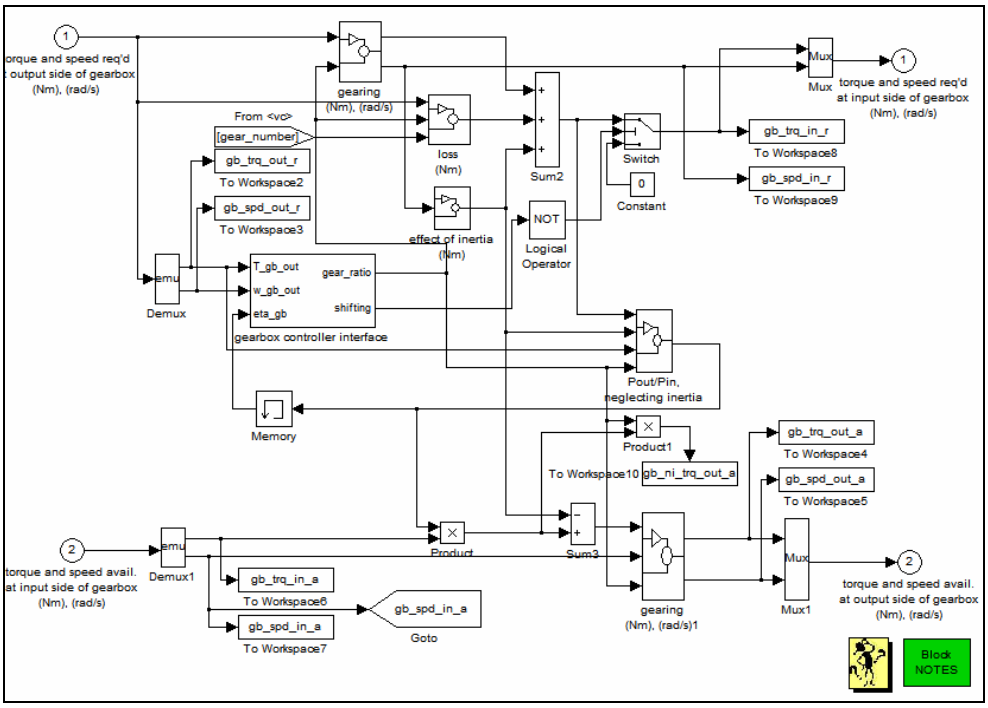
Şekil 7.7 : Egzoz Sistemi Simulink Blok Diyagramı.

Katalizör çalışma sıcaklığı aralığı olarak $-40-1200\,^{o}C$ ve bu aralık boyunca katalizörün emisyonlar üzerindeki verimi, toplam egzoz sistemi ağırlığı olarak $10\,kg$ değerleri ile araca ait katalizör ve egzoz sistemini tanımlayan dosya oluşturulmuştur.

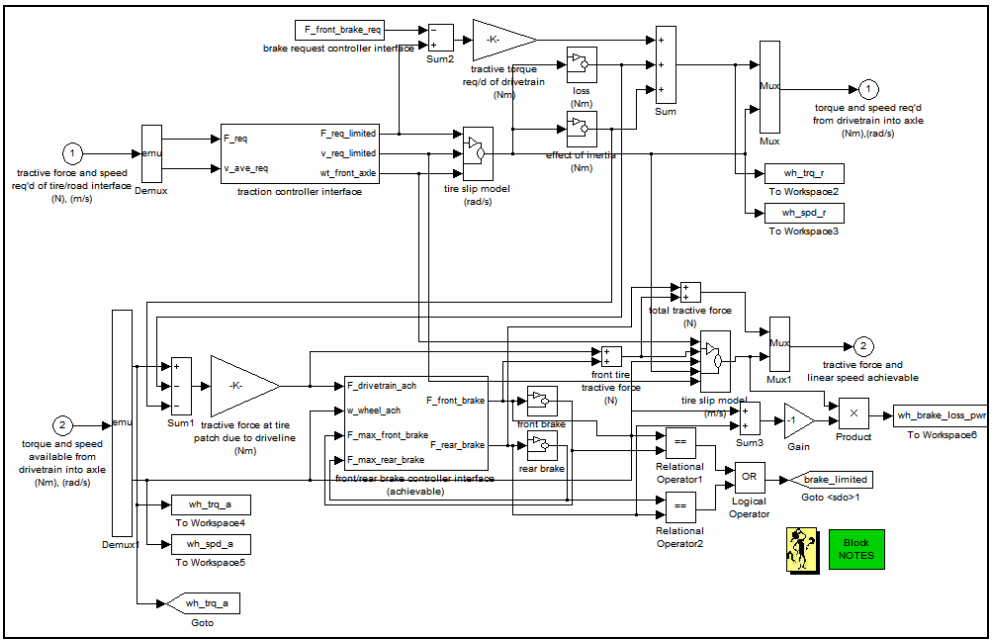
Aracın şanzıman verileri, "Transmission" sekmesinde yer alan "TX_5SPD_CI.m" kodunun değiştirilmesi ile oluşturulan "TX_5SPD_CI_VXT75.m" dosyasına uyarlanmıştır.

5 ileri vitesli şanzımanın vites oranları, $1.3{,}8; 2.2{,}14; 3.1{,}35; 4.0{,}92; 5.0{,}67$ ve son dişli oranı $4{,}54$, şanzıman ağırlığı olarak $51\,kg$, çıkış mili üzerindeki tork kayıpları ve şanzıman verimi değerleri ile aracın sahip olduğu şanzıman programa tanımlanmıştır (Şekil 7.8).

Lastik değerleri, "Wheel/Axle" sekmesinde yer alan "WH_SMCAR.m" dosyasından türetilerek oluşturulan "WH_FWD_TR.m" dosyasına girilmiştir (Şekil 7.9). Lastik boyutları, yarıçapı, yuvarlanma yarıçapı, direnç katsayıları gibi bilgiler ilgili dosya içerisinde simülasyona girdi olarak sunulmuştur.



Şekil 7.8 : Şanzıman Simulink Blok Diyagramı.

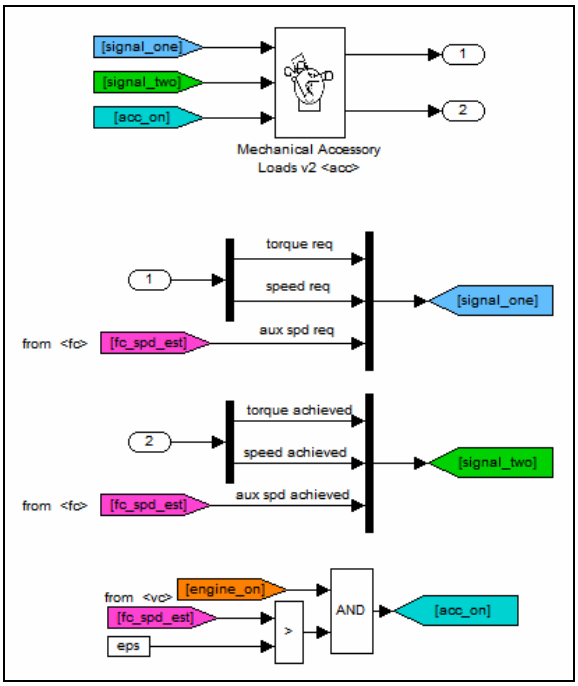


Şekil 7.9 : Lastik/Aks Simulink Blok Diyagramı.

Önden çekişli Transit araçlarda kullanılan lastik ebatları 195/70R15 5.5”, üreticiden elde edilen statik yuvarlanma yarıçapı, direnç katsayıları, ağırlık ve atalet bilgileri ile aracın lastiklerini belirleyen dosyanın modifikasyonu sonlandırılmıştır.

İçten yanmalı motorun çalışması ile birlikte devreye giren motora mekanik bağlı elemanlar için, “Accessory” sekmesine ait “ACC_CONV.m” dosyası verilere uygun

değiştirilerek "ACC_CONV_TR_W_O_AC.m" isimli MATLAB kodu oluşturulmuştur (Şekil 7.10).

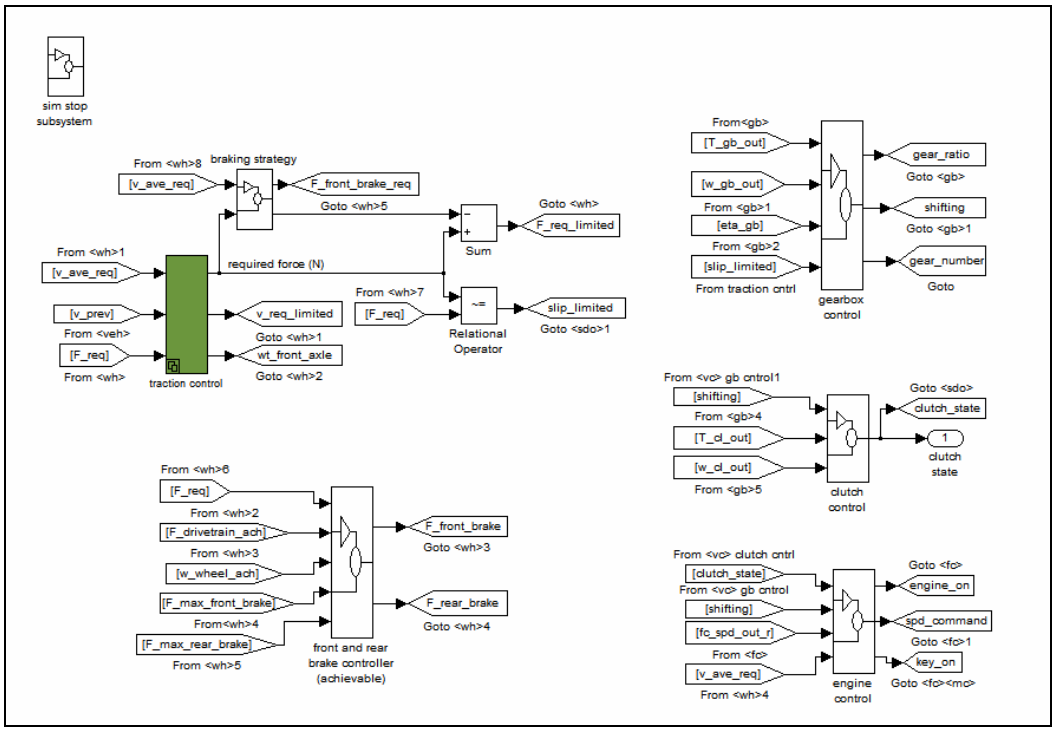


Şekil 7.10 : Motora Mekanik Bağlı Yüklerin Simulink Blok Diyagramı.

Aracın motoruna mekanik bağlı olarak çalışmakta olan elemanların motordan çektikleri maksimum güç değerleri, NEDC sürüş çevrimi boyunca oluşan şartlarda ortalama güç tüketimleri, mekaniksel ve elektriksel verim değerleri ile dosya düzeltilmiş ve yakıt tüketimi ile aracın performansına doğrudan etki eden söz konusu değerler ADVISOR programına tanıtılmıştır.

Konvansiyonel aracın kontrol ve optimum vites değiştirme değerleri ise "Powertrain Control" sekmesi altındaki "PTC_CONV.m" dosyasının modifikasyonu olan "PTC_CONV_FWD_TR.m" dosyasına girilmiştir (Şekil 7.11).

Rölanti hızı $800\,dev/dak$, debriyaj stratejisi, şanzıman tipi, vites arttırma/azaltma yükleri, araç hızına bağlı optimum vites değiştirme noktaları $1.0-29; 2.29-51; 3.51-80; 4.80-115; 5.115-1000$ ve vites değişimi esnasındaki gecikme süresi $0{,}125\,s$ gibi değerler ile oluşturulan dosya yardımıyla konvansiyonel aracın NEDC sürüş çevrimi boyunca simüle edilecek yakıt tüketimi, egzoz emisyonları ve performans testlerindeki kontrol stratejisi belirlenmiştir. Ayrıca vites değiştirme stratejisi hız ya da yük bağımlı alternatiflerinden hız bağımlı olarak seçilmiştir.

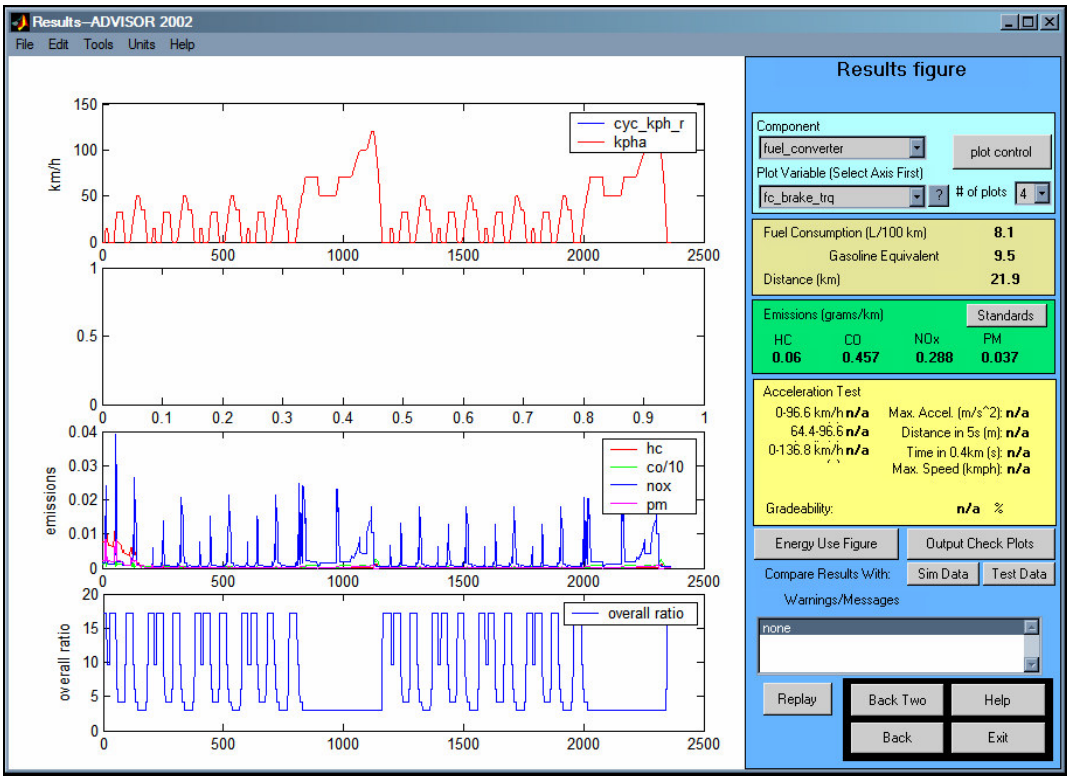


Şekil 7.11 : Kontrol Algoritması Simulink Blok Diyagramı.

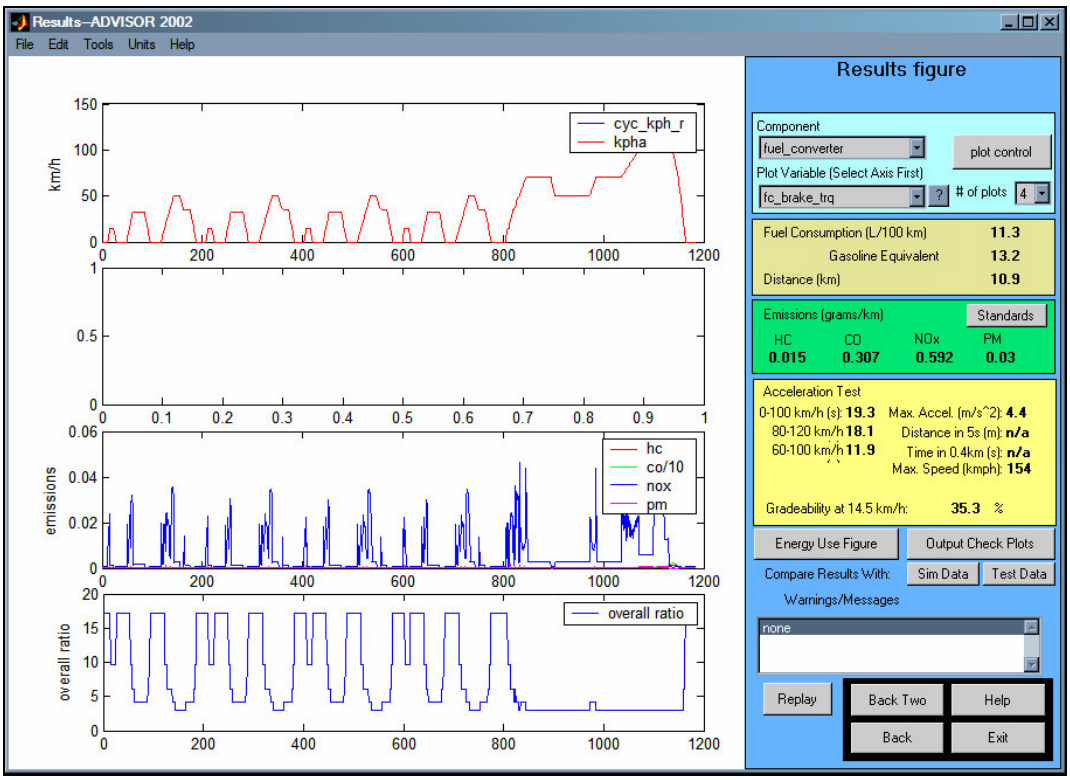
Seçilen araca ait elemanların spesifikasyonları ile oluşturulan söz konusu dosyalar ADVISOR programının ara yüzü yardımıyla aracın simüle edilebilmesi için bir araya getirilmiştir. Program, kurulan modelin doğruluğunun kanıtlanması için 3 farklı şartta koşturulmuştur. Performans testleri için gerçeğe uygun olarak klima kapalı ve yüklü halde çalıştırılmıştır. Tırmanma kabiliyetinin doğrulanması için ise Ford Motor Company prosedürlerinde de yer aldığı gibi araç toplam çekici ağırlığı kullanmıştır. Yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarının doğrulama testinde, 70/220 EEC "Motor Vehicle Emissions" regülasyonuna uygun aracın boş ağırlığına göre belirlenen test ağırlığı 1700 kg olarak alınmıştır [16].

Şekil 7.12'deki grafiklerden de anlaşıldığı gibi iki NEDC çevrimi boyunca elde edilen yakıt tüketim ve egzoz emisyonları sonuçları görülmektedir. İlk NEDC çevrimi ön ısıtma olup sonuçlar iki çevrimin ortalaması olarak ortaya çıkmaktadır. Kat edilen toplam mesafe, aynı çevrimde benzinli bir motorun harcayacağı yakıta eş değer yakıt miktarı, l/100km cinsinden yakıt tüketimi ve egzozdan çıkan her bir gazın değerleri elde edilmektedir.

Performans ve tırmanma kabiliyetinin doğrulaması için yapılan simülasyon sonuçlarında (Şekil 7.13), son hız, maksimum ivmelenme, ara hızlanma değerleri, yakıt tüketimi ve egzoz emisyonları görülebilmektedir.



Şekil 7.12 : Konvansiyonel Aracın NEDC Sürüş Çevriminde Yakıt Tüketim ve Egzoz Emisyon Test Sonuçları.



Şekil 7.13 : Konvansiyonel Aracın NEDC Sürüş Çevriminde Performans ve Tırmanma Kabiliyeti Test Sonuçları.

Yakıt tüketimi ve performans testlerinden elde edilen değerler, Ford Motor Company tarafından yapılmış nihai test sonuçları ve içten yanmalı motorun bağımsız kuruluşlarca yapılan homologasyon test sonuçları ile kıyaslandığında, sonuçların oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Tablo 7.1: Fiziksel Test ve ADVISOR Simülasyon Sonucu Elde Edilen Egzoz Emisyon Sonuçları ve Standart Değerler.

Egzoz Emisyon Değerleri [g/km]					
	CO	**HC**	**HC + NOx**	**NOx**	**PM**
N1 Class II Euro IV	0,630	-	0,390	0,330	0,040
Araç Fiziksel Test Sonuçları	0,454	-	0,279	0,215	0,035
ADVISOR Sonuçları	0,457	-	0,348	0,288	0,037

Egzoz emisyon sonuçlarının araç fiziksel test sonuçlarına, azotoksit (NO_X) emisyon sonucu dışında en fazla %6'lık bir sapma ile yakınsadığı gözlemlenmektedir. Elde edilen değerler gerçeğe oldukça yakın bulunup azotoksit (NO_X) emisyonlarındaki %30'luk sapmanın, araç üzerindeki katalizör veriminin beyan edilenden ve modelde kullanılandan daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Tablo 7.1).

Tablo 7.2: Fiziksel Test ve ADVISOR Simülasyon Sonucu Elde Edilen Yakıt Tüketimi Test Sonuçları.

Yakıt Tüketimi Değerleri [l/100km]			
	ECE 15	**EUDC**	**NEDC**
Araç Fiziksel Test Sonuçları	9,8	6,7	7,8
ADVISOR Sonuçları	10,2	7,0	8,1

Yakıt tüketimi değerlerinin kıyaslanması sonucu, Tablo 7.2'de görüldüğü gibi %4'lük bir sapma ile aynı zamanda Ford Motor Company kabul kriteri de olan ± %5'lik bir aralık içerisinde kaldığı görülmüş ve yakıt tüketimi açısından da kurulan ADVISOR modelinin doğruluğu kanıtlanmıştır. ADVISOR modelinden elde edilen yakıt tüketim değeri 8,1 l/100km iken fiziksel araç test sonucu 7,8 l/100km şeklindedir. Aradaki fark yaklaşık 0,3 l/100km civarında olup yüzdesel olarak %4'lük bir sapmaya denk gelmektedir.

Tablo 7.3: Fiziksel Test ve ADVISOR Simülasyon Sonucu Elde Edilen Performans Test Sonuçları.

Performans Değerleri					
	0-100 km/h	**80-120 km/h**	**60-100 km/h**	**Son Hız**	**Tırmanma (15 km/h @GTM)**
Araç Fiziksel Test Sonuçları	19,1 s	17,4 s	12,1 s	156 km/h	% 30,0
ADVISOR Sonuçları	19,3 s	18,1 s	11,9 s	154 km/h	% 35,3

Aracın performansı, duruştan 100 km/h hıza çıkış süresi, 80-120 km/h, 60-100 km/h gibi ara hızlanmalar ve son hız değeri ile değerlendirilmiştir (Tablo 7.3). ADVISOR sonuçları ile fiziksel test sonuçları arasında yine performans değerlendirmesi bakımından Ford Motor Company kabul kriteri olan ± %10'luk aralığın dışına çıkılmadığı gözlemlenmiştir. Tırmanma kabiliyeti açısından, aracın yüklü ve römorklu ağırlığı göz önünde bulundurularak çıkabileceği maksimum eğim %35,3 olarak bulunmuştur. Fiziksel olarak aracın aynı şartlarda %30'luk eğime tırmanabildiği bilinerek modelin doğruluğu performans açısından da kanıtlanmıştır.

Yapılan testlerin fiziksel test neticeleri ile karşılaştırılması sonucundan ortaya çıkan farkların kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu gözlemlenerek konvansiyonel araç için kurulan ADVISOR modelinin doğrulaması başarılı bir şekilde tamamlanmış ve kurulacak hibrit araç modeli için referans teşkil etmesinde sakınca olmayacağı kanıtlanmıştır.

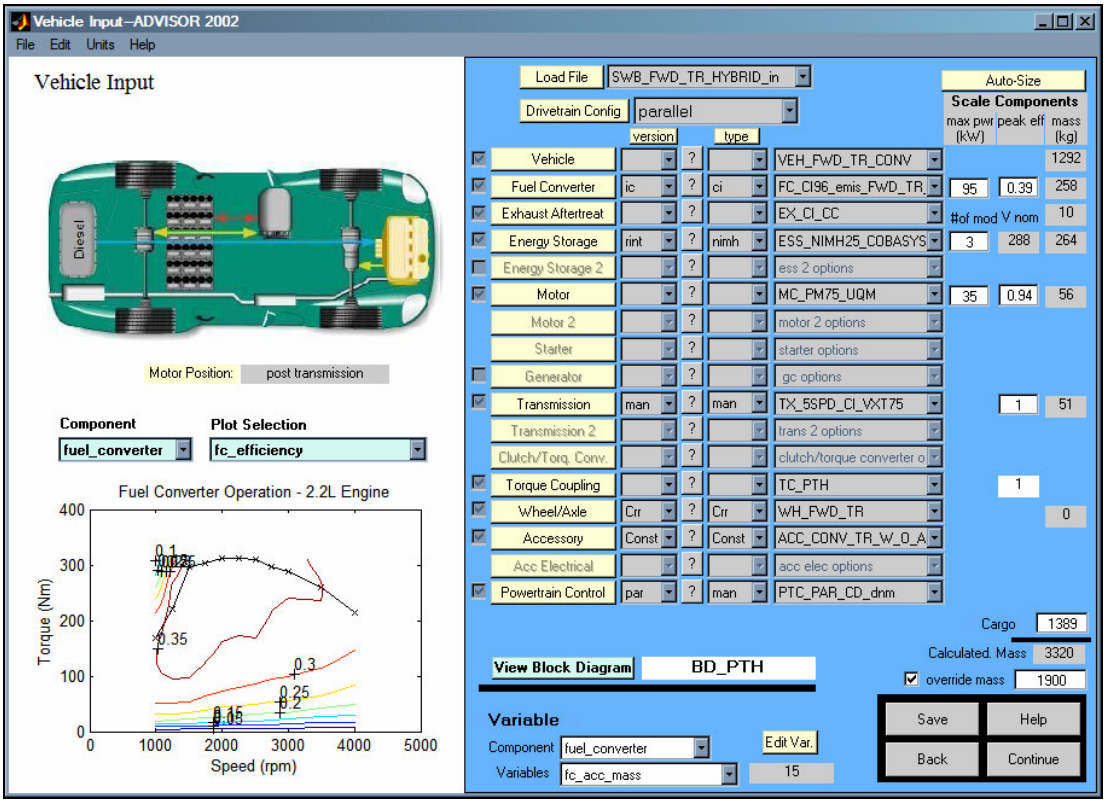
7.2.2 Hibrit aracın modellenmesi ve performans, yakıt tüketimi, egzoz emisyon sonuçlarının doğrulanması

Geometrik fizibilite çalışmaları esas alınarak, seçilen hibrit yapıya uygun bir şekilde dönüşümü gerçekleştirilmiş "Kısa Şasi Transit Minibüs" ün optimizasyon çalışmalarında kullanılacak nihai ADVISOR modelinin kurulabilmesi için ilave elemanların modellerinin oluşturulup MATLAB kodları ile programa tanıtılması gerekmektedir.

İçten yanmalı motor, şanzıman, egzoz sistemi ve lastiklerin konvansiyonel araçtan aynen kullanılması sebebiyle ilgili dosyalar modifiye edilmemiştir. Hibrit konfigürasyonunun gerektirdiği elemanlardan elektrik motoru ve batarya ünitesi için ise ayrı birer MATLAB kodu oluşturularak nihai araç modeline girilmiştir. Motora

mekanik bağlı elemanların modeli ise araca eklenen elektrik motoru ve batarya ünitesinin soğumasını sağlayacak yardımcı soğutma sisteminin su pompasının alternatörden çektiği elektrik yükü sebebiyle değiştirilmiştir.

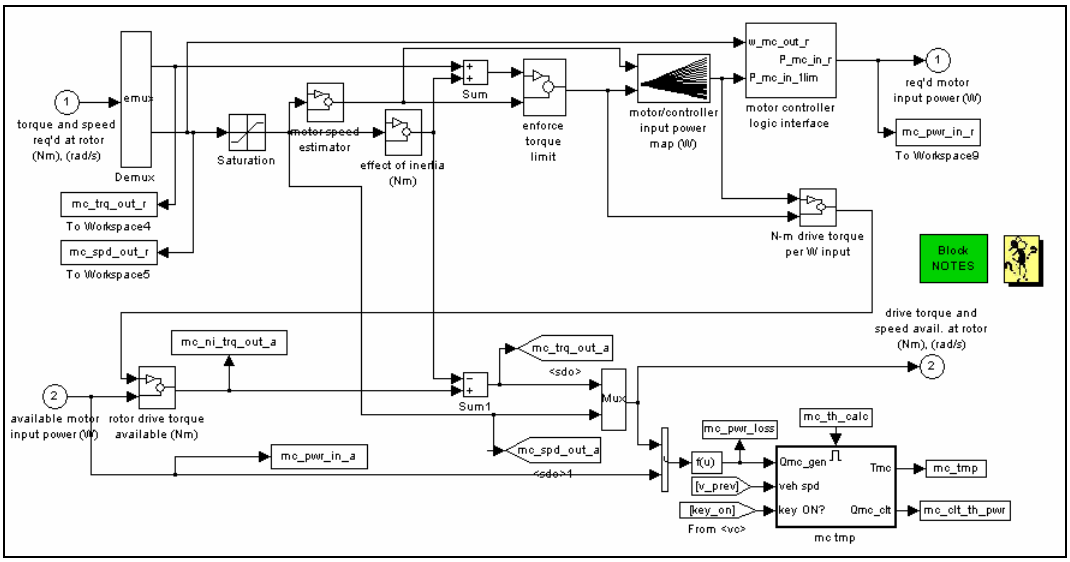
Ayrıca taşıtın hibrit halde kullanımı için şarj seviyesine bağlı şarj/deşarj seviyeleri, yalnız elektrik motoru ile sürüşte çıkılacak maksimum hız, içten yanmalı motorun çalışma şekli, optimum vites değiştirme noktaları gibi aracın kontrolüne yönelik parametrelerin yer aldığı güç aktarma organları kontrol stratejisi de modifiye edilerek yeni bir MATLAB kodu ile programa tanıtılmıştır (Şekil 7.14).



Şekil 7.14 : Hibrit Aracın Bileşenlerinin Belirlendiği ADVISOR Ara Yüzü.

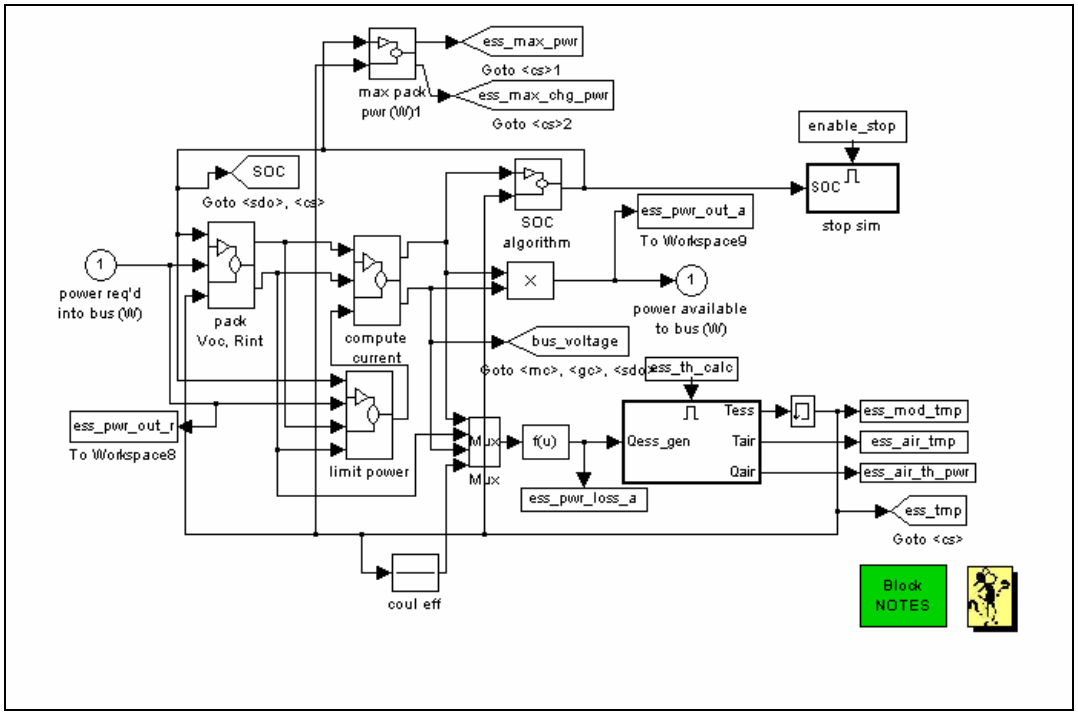
Seçilen elektrik motorunun spesifikasyonları, ADVISOR programında "Motor" sekmesi altında yer alan "MC_AC75.m" isimli MATLAB dosyasının modifikasyonu olan "MC_PM75_UQM.m" dosyasına girilerek gerekli uyarlamalar yapılmıştır (Şekil 7.15).

UQM firmasına ait elektrik motoru ürün yelpazesinden seçilen fırçasız SR-218N elektrik motoru, maksimum güç ve tork değerleri, verim haritası, ağırlık, hacim, dış yüzey alanı, devir aralığı, maksimum akım, minimum voltaj ve rotor atalet değeri ile ilgili dosya oluşturulmuştur.



Şekil 7.15 : Elektrik Motoru Simulink Blok Diyagramı.

Belirlenen batarya ünitesine ait değerler ile "Energy Storage" sekmesinde yer alan "ESS_NIMH28_OVONIC.m" isimli MATLAB kodu değiştirilerek "ESS_NIMH25_COBASYS.m" isimli dosya oluşturulmuştur (Şekil 7.16).

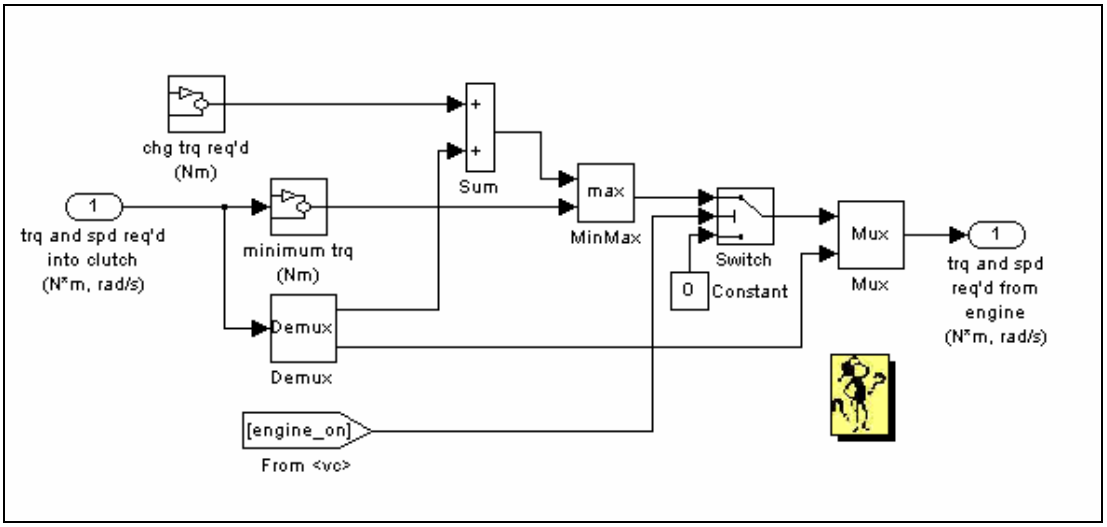


Şekil 7.16 : Batarya Ünitesi Simulink Blok Diyagramı.

Araç hedeflerine bağlı olarak Ovonic firmasının ürün yelpazesinden seçilen NiMHax 288-180 batarya ünitesinin, ağırlık, adet, boyut, nominal voltaj, nominal kapasite, nominal enerji, çalışma sıcaklık aralığı, şarj/deşarj dirençleri, minimum ve

maksimum voltaj, termostat sıcaklığı ve toplam dış yüzey alanı bilgileri ile söz konusu kod oluşturularak programa batarya ünitesinin tanıtılması gerçekleştirilmiştir.

Hibrit araç kontrol algoritması için ise, "Powertrain Control" sekmesi altındaki "PT_PAR_CD.m" isimli kodu modifiye edilerek "PT_PAR_CD_FOHEV.m" dosyası oluşturulmuştur (Şekil 7.17).



Şekil 7.17 : Kontrol Algoritması Simulink Blok Diyagramı.

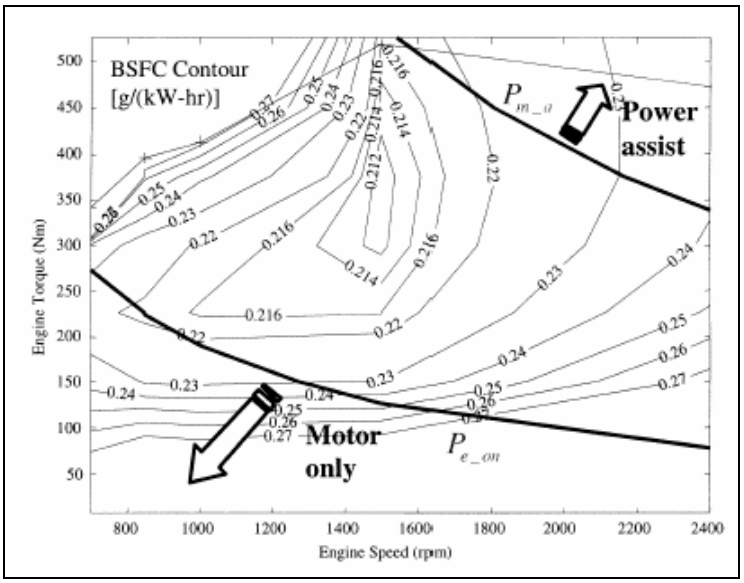
Belirlenen kontrol algoritmasının amacı, performans ve sürülebilirliği etkilemeden yakıt tüketiminin ve egzoz emisyon değerlerinin düşürülmesidir. Günümüzdeki uygulamalarda kontrol stratejilerine ilave yardımcı önlemler olarak araç tasarımında çeşitli değişiklikler de yapılmaktadır. Söz konusu hibrit araç için uygulanan kontrol algoritmasının senaryoları, yalnızca içten yanmalı motor modu, yalnızca elektrik motoru modu, hibrit modu, şarj modu ve rejeneratif frenleme modu şeklindedir.

Yalnızca içten yanmalı motorun tahrik elemanı olarak kullanıldığı modda, araç hızının 40 km/h hızın üzerinde olması gerekmektedir. Yalnızca içten yanmalı motor çalışmakta ve elektrik motoru sıfır tork üretmektedir. Ancak yakıt tüketimi ve egzoz emisyon değerleri, içten yanmalı motorun geçici rejimlerde çalışması durumunda kararlı rejime oranla daha yüksektir.

Yalnızca elektrik motoru modunda, araç hızının 37 km/h hızın altında ve batarya şarjının aranan aralıkta olması gerekmektedir. Ayrıca aracın durma durumundan harekete geçirilmesi sırasında da eğer batarya ünitesinin sahip olduğu şarj miktarı yeterli ise araç yalnızca elektrik motoru modunda çalışacaktır. Ancak sürücünün talep ettiği tork, yalnız başına elektrik motorunun sağlayabileceğinden büyük ise

veya batarya şarj miktarı öngörülen değerin altına düşüyor ise araç hibrit çalışma moduna geçecektir.

Hibrit çalışma modu, elektrik motorunun yardımcı güç kaynağı olarak kullanıldığı, içten yanmalı motorun ise tahrik elemanı olarak kullanımının yanı sıra aynı zamanda batarya ünitesini şarj etmeye başladığı çalışma modudur. Kontrolcü batarya ünitesi şarj miktarını %20 ile %80 arasında tutmaya çalışmaktadır. Batarya şarj durumu ve sıcaklıkları göz önünde bulundurularak gaz pedalı konumuna göre tork dağılımı yapılmaktadır. Belirlenen eşik hız değerinin altındaki hızlarda ve araç durma durumlarında içten yanmalı motor kapatılarak yakıt tüketimi ve egzoz emisyon değerleri iyileştirilmektedir. Hibrit çalışma modundan aracın şarj moduna geçebilmesi için gerekli şart, batarya ünitesi şarj miktarının belirlenen aralığın alt değerinin altında olması ve içten yanmalı motorun sürücü tarafından talep edilen tork profilini karşılayabiliyor olmasıdır (Şekil 7.18).



Şekil 7.18 : İçten Yanmalı Motor Haritası Üzerinde Hibrit Araç Çalışma Modları.

Aracın rejeneratif fren modu, frenleme sırasında tekerleklerdeki mekanik enerjinin elektrik motorunun jeneratör özelliğinden faydalanılarak batarya ünitesinde depolanmak üzere elektrik enerjisine dönüşümünü esas almaktadır. Seçilen rejeneratif fren stratejisinde, fren pedalına basıldığında batarya ünitesinin şarj durumu belirlenen aralığın üst değerinin üzerinde değil ise ilgili moda geçilmektedir. Fren pedalı mili üzerine konumlandırılmış olan kuvvet ölçüm sensörü ile pedala uygulanan basma kuvveti ölçülerek 80 N'dan küçük kuvvetler için rejeneratif fren

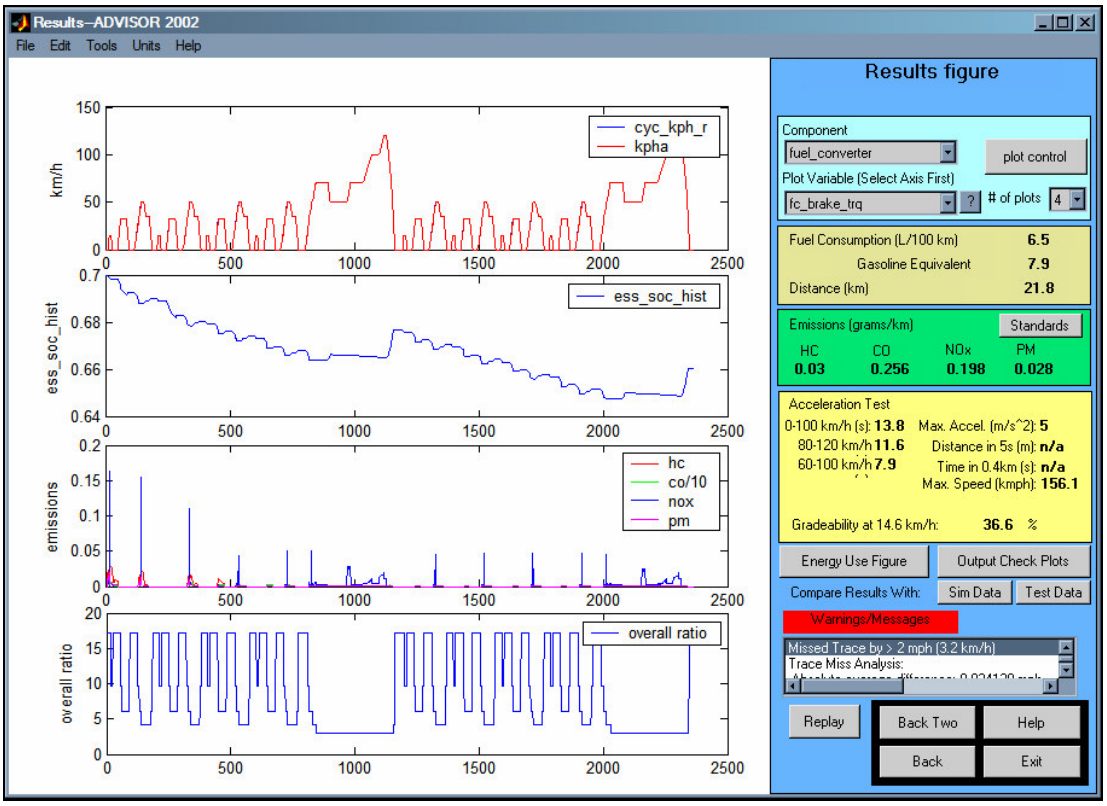
modu aktifleştirilmektedir. Bu aralıkta hidrolik fren sistemi devreye kullanılmamaktadır. Uygulanan kuvvetin 80 N'u aşması halinde ise yalnızca hidrolik fren sistemi çalışarak aracın durmasını sağlamaktadır. Ayrıca ani frenleme durumunda, rejeneratif fren sistemi yerine tamamen hidrolik fren sistemi kullanılmaktadır (Tablo 7.4).

Aracın mevcut donanımına ilave olarak gelen, vites konumu sensörü, kavrama ve direksiyon konumu sensörleri, araç hızı, dört tekerlekte bulunan açısal hız ve fren pedalı kuvvet ölçüm sensörleri ile söz konusu kontrol stratejisi tahrik elemanlarının yumuşak geçişleri ile seçilen ve dönüşümü yapılan araçta başarıyla uygulanmıştır.

Tablo 7.4: Aracın Çalışma Modlarına Göre Kontrol Stratejisi.

Çalışma Modları	Araç Hızı [km/h]	Batarya Şarj Durumu	İYM Max. Tork [Nm]	EM Max. Tork [Nm]	Fren Pedal Kuvveti [N]
Yalnız EM	< 40 km/h	> % 20	-	> Sürücü tarafından talep edilen tork değeri.	-
Yalnız İYM	> 40 km/h	< % 20	-	-	-
Yalnız İYM	> 40 km/h	> % 20	> Sürücü tarafından talep edilen tork değeri.	-	-
Hibrit	-	> % 20	< Sürücü tarafından talep edilen tork değeri.	-	-
EM Jeneratör	-	< % 20	> Sürücü tarafından talep edilen tork değeri + Şarj için gerekli tork değeri.	-	-
Rejeneratif Fren	-	< % 20	-	-	< 80
Hidrolik Fren	-	≥ % 80	-	-	-
Hidrolik Fren	-	< % 20	-	-	> 90

Seçilen aracın hibrit yapıya dönüşümü ile birlikte gelen ilave elemanların değerleri ile oluşturulan söz konusu dosyalar, ADVISOR programının ara yüzü ile hibrit konfigürasyonu altında toplanarak simülasyon için sanal araç hazır hale getirilmiştir. Konvansiyonel araçta da yapıldığı gibi kurulan modelin kanıtlanabilmesi için aynı şartlar kullanılarak 3 farklı koşu gerçekleştirilmiştir. Ancak hibrit bileşenlerinin aracın boş ağırlığına getirdiği ilave ağırlık dikkate alınarak, yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarının doğrulama testinde, 70/220 EEC "Motor Vehicle Emissions" regülasyonuna göre test ağırlığı 1900 kg olarak alınmıştır (Şekil 7.19) [16].



Şekil 7.19 : Hibrit Aracın NEDC Sürüş Çevriminde Yakıt Tüketim, Egzoz Emisyon, Performans ve Tırmanma Kabiliyeti Test Sonuçları.

Kurulan hibrit araç modeli vasıtasıyla sanal ortamda elde edilen test sonuçları, "GKN AutoStructures - System and Chassis Integrator", "Azure Dynamics - Hybrid Technology" ve "Ingimex - SVO Body Conversions" konsorsiyumu tarafından geliştirilen aynı içten yanmalı motor ve şanzıman ikilisine sahip, benzer hibrit araç bileşenlerinin kullanıldığı, aynı toplam ağılık kapasiteli ancak farklı gövde yapılı bir Hibrit Transit Kamyonetin Ford Motor Company test şartnamelerine uygun yapılan test sonuçları ile kıyaslanarak hibrit araç modelinin de doğruluğu kanıtlanmıştır. Fiziksel testler iki akslı şasi dinamometresinde Ford Motor Company'nin İngiltere Ürün Geliştirme merkezinde NEDC sürüş çevrimine göre gerçekleştirilmiştir. Kullanılan elektrik motoru ve içten yanmalı motor özdeş ancak batarya sistemi ise birebir aynı değildir. Yapısal anlamda ise elektrik motorunun taban sacı altında araç enine dayanım elemanlarına bağlanmış ve arka aksı tahrikliyor olması ve batarya paketinin arka aks üzerine yerleştirilmiş olması sebebiyle benzerdir. Boş araç ağırlığı ise emisyon testinin ağırlığını belirlediğinden, kullanılan batarya paketinin bilgilerinin mevcut olmaması sebebiyle iyi bir yaklaşımla dönüşümü tamamlanmış kısa şasi minibüs ile aynı kabul edilmiştir.

Tablo 7.5: Hibrit Araca Ait Fiziksel Test ve ADVISOR Simülasyon Sonucu Elde Edilen Egzoz Emisyon Sonuçları ve Standart Değerler.

Egzoz Emisyon Değerleri [g/km]					
	CO	**HC**	**HC + NOx**	**NOx**	**PM**
N1 Class II Euro IV	0,630	-	0,390	0,330	0,040
Araç Fiziksel Test Sonuçları	0,245	-	0,184	0,151	0,024
ADVISOR Sonuçları	0,256	-	0,228	0,198	0,028

Konvansiyonel aracın test sonuçlarında da olduğu gibi azotoksit (NO_X) emisyon değerleri dışındaki değerlerin ± %15'lik bir aralık içerisinde kaldığı görülmektedir (Tablo 7.5). Söz konusu azotoksit (NO_X) emisyon değerlerinde bulunan yaklaşık %30'luk sapma, hibrit araç test sonuçlarına bakınca da gözlemlenmektedir. Dolayısıyla konvansiyonel ve hibrit araç ADVISOR sonuçlarının kendi içerisinde tutarlı olduğu anlaşılıp yüzdesel olarak azotoksit (NO_X) emisyonlarının değişimi izlenmiştir. Kıyaslama neticelerine bakılarak, yapılacak iterasyonlarda kullanılacak ilgili hibrit araç modelinin, yüzdesel değişimleri başarıyla göstereceği kanısına varılmış ve modelin doğruluğu kanıtlanmıştır.

Tablo 7.6: Hibrit Araca Ait Fiziksel Test ve ADVISOR Simülasyon Sonucu Elde Edilen Yakıt Tüketimi Test Sonuçları.

Yakıt Tüketim Değerleri [l/100km]			
	ECE 15	**EUDC**	**NEDC**
Araç Fiziksel Test Sonuçları	-	-	6,20
ADVISOR Sonuçları	8,20	5,58	6,50

Yakıt tüketimi değerlerinde ise fiziksel test ile simülasyon sonuçları arasında %5'lik bir fark olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Ford Motor Company kabul kriteri de olan ± %5'lik aralığın dışına çıkılmamış olması kurulan hibrit araç modelinin doğruluğunu ortaya koymaktadır. ADVISOR araç modelinin simülasyonu sonucu elde edilen yakıt tüketim değeri 6,5 lt/100km iken fiziksel test sonucu elde edilen yakıt tüketim değeri 6,2 lt/100km olarak ortaya çıkmıştır. Fiziksel araç test sonuçları, sürüş çevriminin tamamı boyunca elde edilen ortalama yakıt tüketimini göstermektedir (Tablo 7.6).

Tablo 7.7: Hibrit Araca Ait Fiziksel Test ve ADVISOR Simülasyon Sonucu Elde Edilen Performans Test Sonuçları.

Performans Değerleri					
	0-100 km/h	**80-120 km/h**	**60-100 km/h**	**Son Hız**	**Tırmanma (15 km/h @GTM)**
Araç Fiziksel Test Sonuçları	15,0	12,0	8,4	160,0	-
ADVISOR Sonuçları	13,8	11,6	7,9	156,1	% 36,6

Konvansiyonel aracın performans değerlendirme safhasında da yapıldığı gibi, hibrit aracın performansı, duruştan 100 km/h hıza çıkış süresi, 80-120 km/h, 60-100 km/h gibi ara hızlanmalar ve son hız değeri ile değerlendirilmiştir (Tablo 7.7). ADVISOR sonuçları ile fiziksel test sonuçları arasında en fazla %8, en az %2,5'luk bir sapma olduğu görülmüştür. Bu noktada yine performans değerlendirmesi bakımından Ford Motor Company kabul kriteri olan ± %10'luk aralığın dışına çıkılmadığı gözlemlenmektedir. Tırmanma kabiliyeti açısından, aracın yüklü ve römorklu ağırlığı göz önünde bulundurularak çıkabileceği maksimum eğim %36,6 olarak bulunmuştur. Fiziksel olarak aracın aynı şartlarda tırmanma kabiliyeti test edilmemiştir. Ancak kurulan model hakkında bu aşamaya kadar elde edilen izlenimler, tırmanma kabiliyeti ile ilgili bir doğrulama yapmadan simülasyon sonucunun yaklaşık değer olarak kabul edilmesinde bir sakınca olmayacağını göstermektedir.

Elde edilen test sonuçlarının, fiziksel test neticeleri ile karşılaştırılması sonucundan ortaya çıkan farkların kabul kriterlerine uyduğu gözlemlenerek hibrit araç için kurulan ADVISOR modelinin de doğruluğu kanıtlanmış ve azotoksit (NO_X) emisyonu optimizasyon çalışmalarında temel alınmıştır.

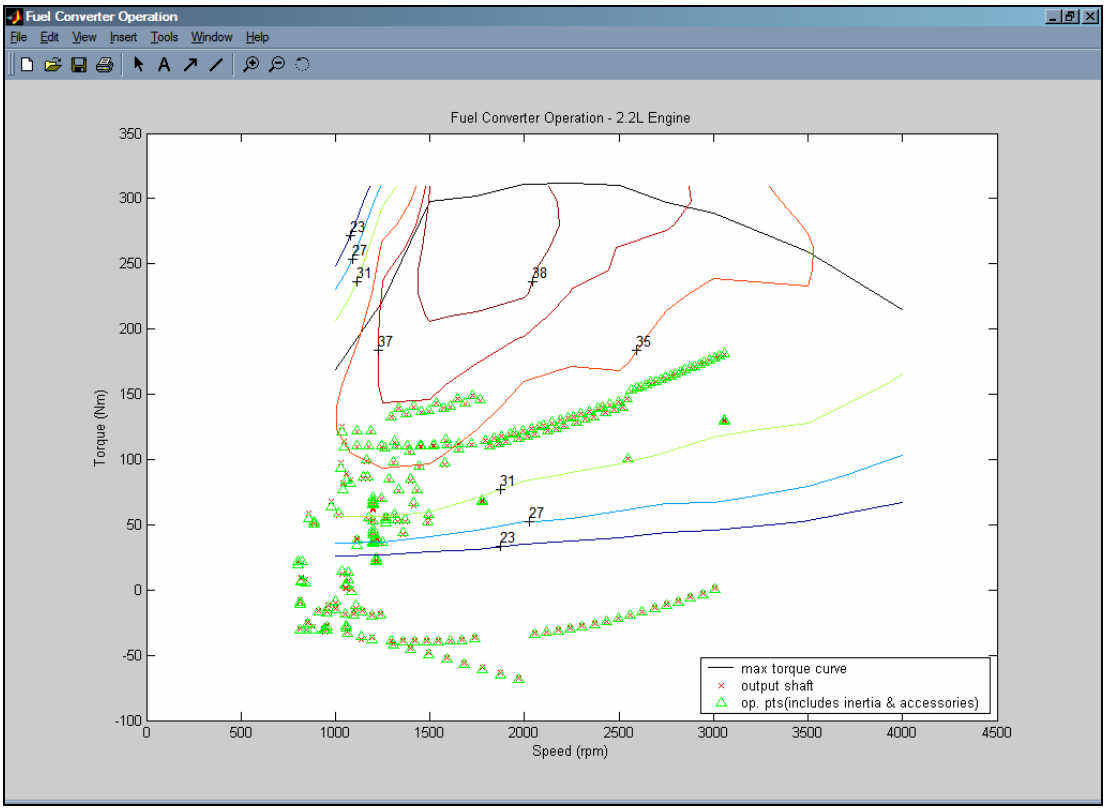
7.3 Hibrit Aracın Kontrol Algoritmasının Değiştirilmesi Suretiyle Dizel Motoru Azotoksit (NO_X) Emisyonlarının Optimizasyonu

Konvansiyonel ve hibrit araç için kurulan araç modellerinin, fiziksel test sonuçları ile kıyaslanarak doğruluğunun kanıtlanması, ilgili modeller üzerinde çeşitli iterasyonlar yapılarak gerçek testlerde elde edilebilecek sonuçlara oldukça yakın sonuçları önceden görmeye ve yorumlamaya fayda sağlayacaktır. Bu şekilde bir projenin toplam zamanının kısaltılmasının yanında, geliştirmeye yönelik fiziksel testler ve ön hazırlıkları gibi adımların maliyetleri ortadan kaldırılmaktadır. Bilgisayar ortamında

yapılacak simülasyonlar ve elde edilecek sonuçlar ile hedeflerin tutturulması durumunda doğrulama amaçlı tek fiziksel testin yapılması yeterli olacaktır.

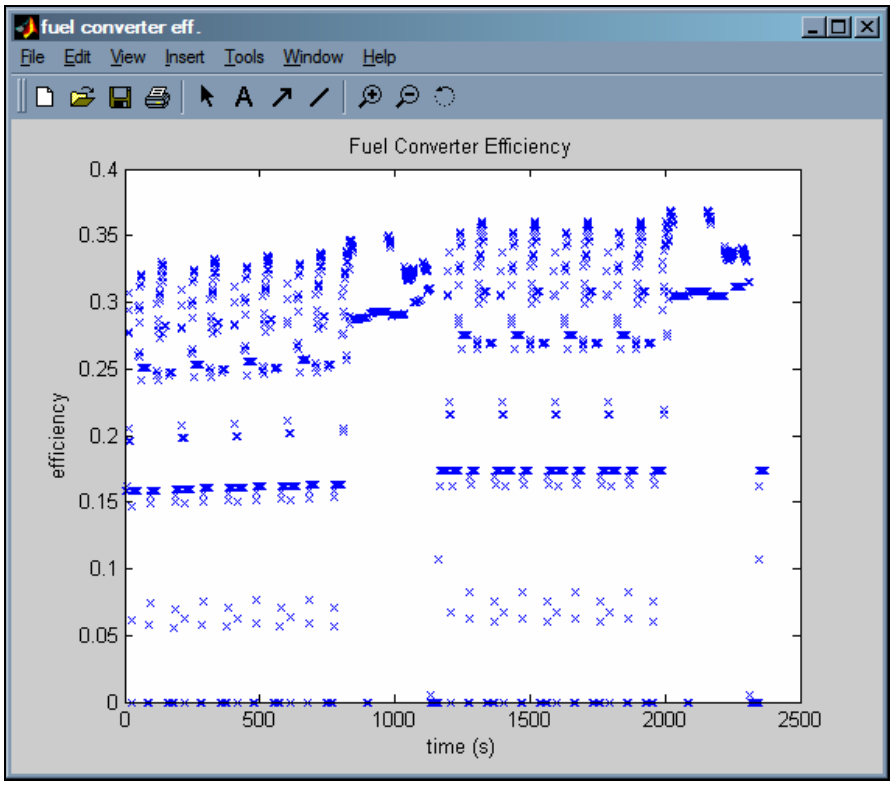
Konvansiyonel araç için hazırlanan ADVISOR modelinden elde edilen sonuçlar fiziksel test sonuçları ile kıyaslandığında kabul edilebilir sınırlar dahilinde birbirlerine yakınsadığı görülmüş ve modelin doğruluğu kabul edilmişti. Yapılan simülasyondan elde edilen bir diğer çıktı ise içten yanmalı motorun tork haritası üzerinde çalışma, vites değiştirme noktalarını ve içten yanmalı motorun verimini gösteren diyagramlardır (Şekil 7.21, 7.22).

Sürüş çevrimi boyunca, vites değiştirme stratejisine göre içten yanmalı motorun çalışma noktaları Şekil 7.20'deki gibidir ve optimizasyon çalışmaları için referans kabul edilmiştir.

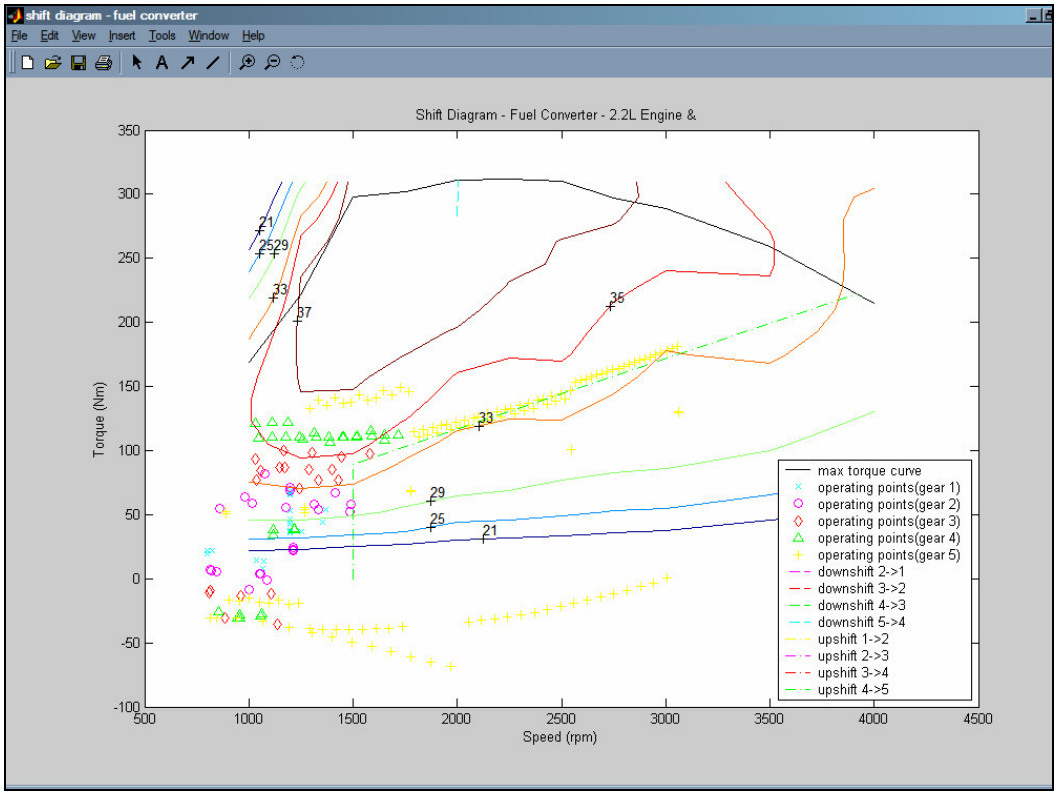


Şekil 7.20 : Sürüş Çevrimi Boyunca Konvansiyonel Araca Ait İçten Yanmalı Motor Çalışma Noktaları.

İçten yanmalı motor çalışma noktalarının ortalaması yaklaşık olarak tam gaz tork eğrisi altında 50 – 100 Nm tork elde edilen aralık arasında kalmıştır. Başka deyişle emisyon ve yakıt tüketimi açısından düşük değerlerin elde edildiği bölgelerden uzaktırlar.

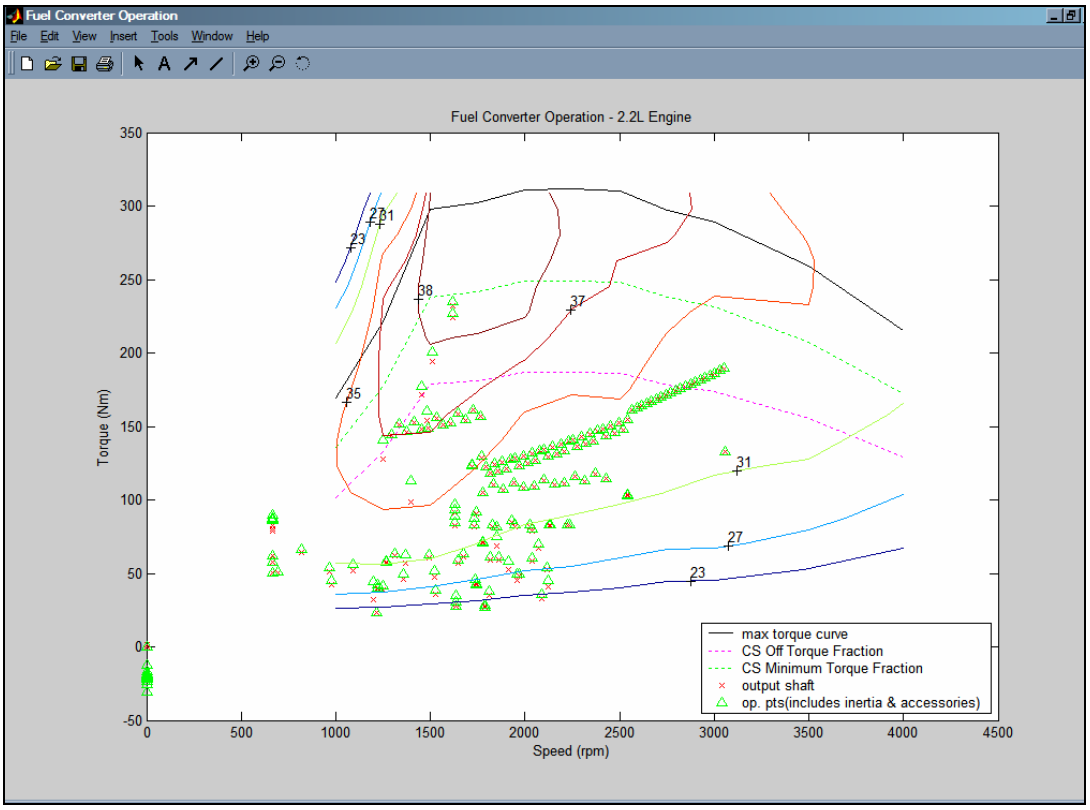


Şekil 7.21 : Sürüş Çevrimi Boyunca Konvansiyonel Araca Ait İçten Yanmalı Motor Verimi.



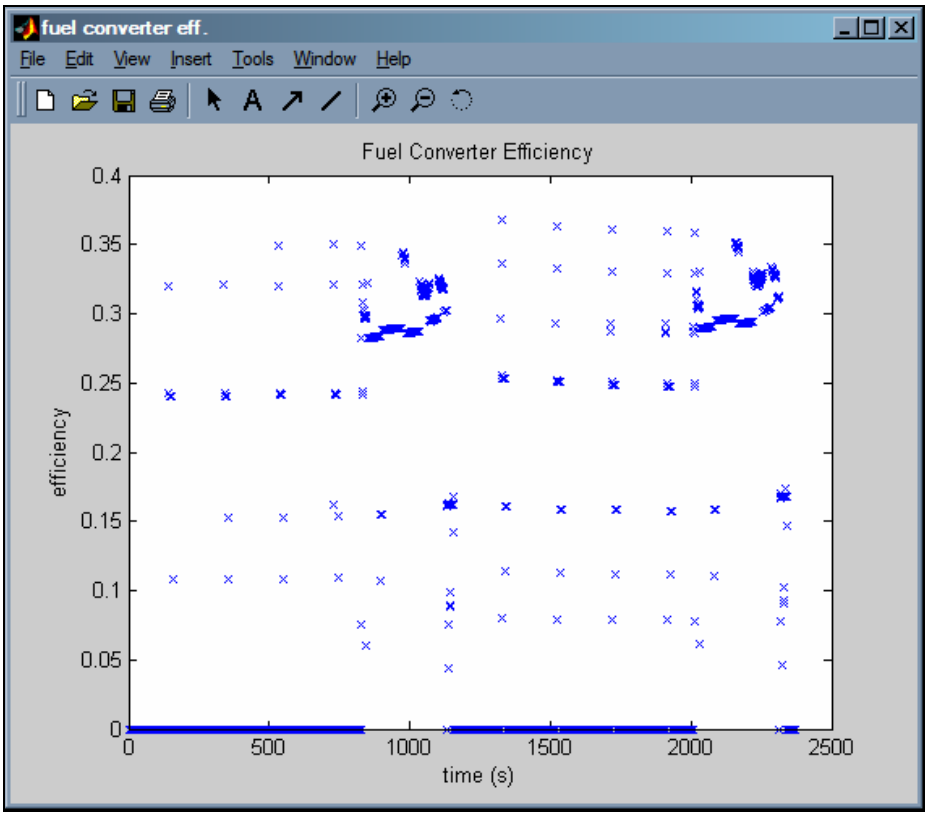
Şekil 7.22 : Sürüş Çevrimi Boyunca Konvansiyonel Araca Ait Vites Değişim Grafiği.

Hibrit araç kontrol algoritmasına bağlı olarak kurulan ADVISOR modelinden elde edilen, hibrit araç için sürüş çevrimi boyunca içten yanmalı motor ve elektrik motoru çalışma noktaları, yine içten yanmalı motor ve elektrik motorlarının verimleri ve vites değiştirme diyagramları aşağıdaki Şekil 7.23'te görüldüğü gibidir.

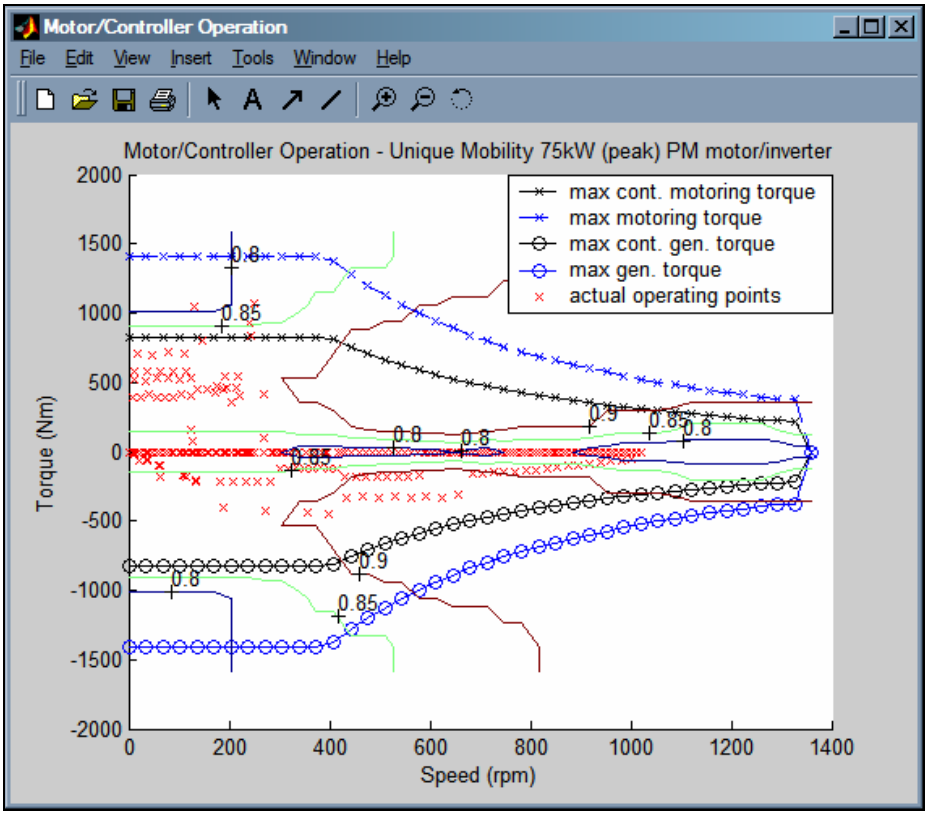


Şekil 7.23 : Sürüş Çevrimi Boyunca Hibrit Araca Ait İçten Yanmalı Motor Çalışma Noktaları.

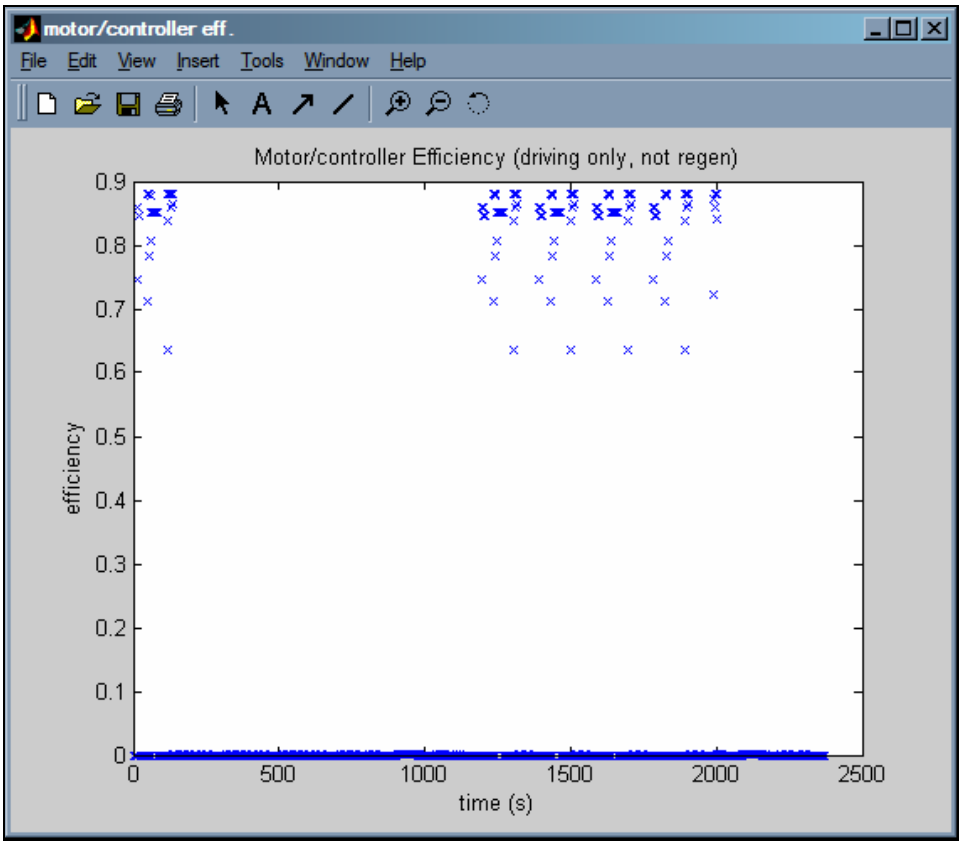
Elde edilen sonuçların birbirleriyle karşılaştırılması sonucu, hibrit araç konfigürasyonu ile çalışan içten yanmalı motorun çalışma noktalarının nispeten daha verimli ve tork haritasında daha az emisyon ve yakıt tüketimi elde edilen bölgelere kaydığı görülmüştür. Dizel motoru çalışma bölgelerinin genel tanımına bakılınca, düşük yakıt tüketimi ve egzoz emisyon seviyeleri olarak tariflenen tam gaz tork eğrisinin alt orta bölgelerinin alt kısımlarının kullanıldığı gözlemlenmiştir. Ağırlıklı ortalamaların incelenmesi sonucu içten yanmalı motorun daha verimli bölgelerde çalıştırılabileceği, çalışma noktalarının tam gaz tork eğrisine daha da yaklaştırılabileceği ortaya çıkmaktadır. Böylece söz konusu bölgelerin, emisyon ve yakıt tüketimi açısından daha düşük değerlerin elde edildiği bölgeler olmasından dolayı çevrim boyunca elde edilecek sonuçların daha düşük çıkması beklenmektedir.



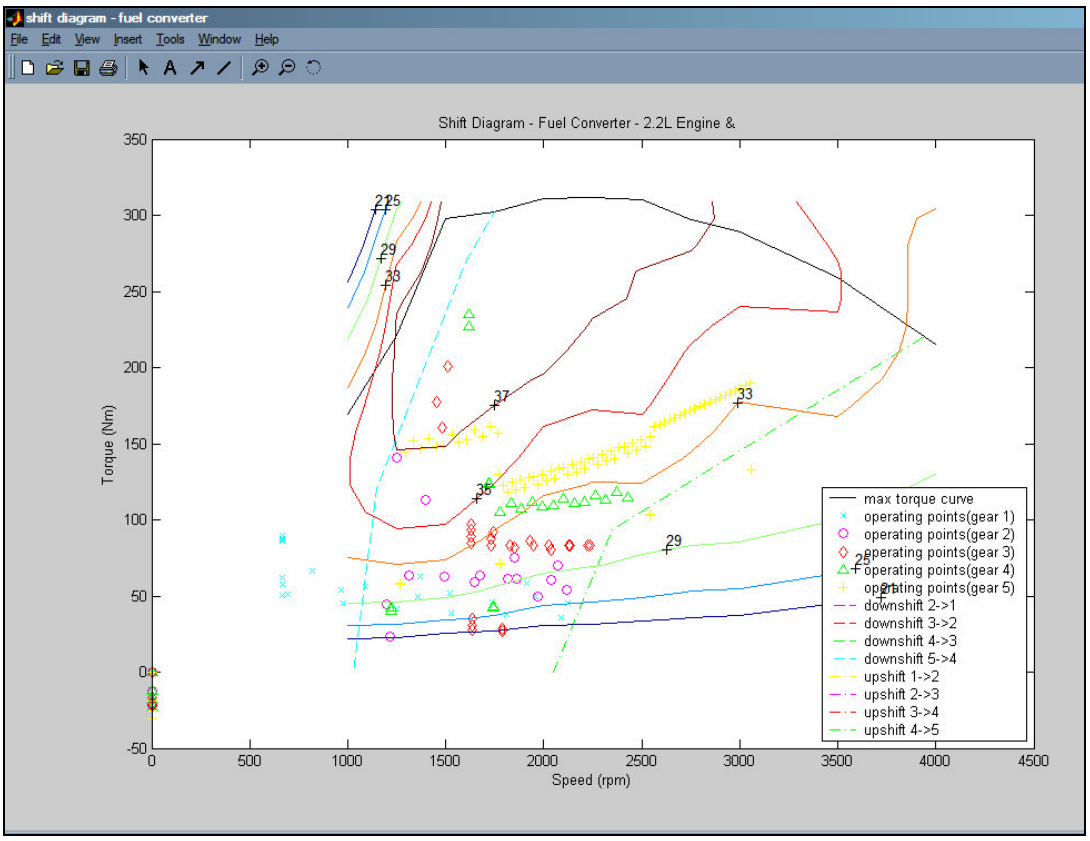
Şekil 7.24 : Sürüş Çevrimi Boyunca Hibrit Araca Ait İçten Yanmalı Motor Verimi.



Şekil 7.25 : Sürüş Çevrimi Boyunca Hibrit Araca Ait Elektrik Motoru Çalışma Noktaları.



Şekil 7.26 : Sürüş Çevrimi Boyunca Hibrit Araca Ait Elektrik Motoru Verimi.



Şekil 7.27 : Sürüş Çevrimi Boyunca Hibrit Araca Ait Vites Değişim Grafiği.

Verim grafiklerine bakıldığında, içten yanmalı motorun hibrit araç konfigürasyonuyla, konvansiyonel versiyonuna göre veriminin yükseldiği görülmüştür (Şekil 7.24). Elektrik motoru ise yoğunluklu olarak %75–85 aralığında çalışmıştır (Şekil 7.25). Kullanılan kontrol stratejisine bağlı olarak elde edilen sonuçlar konvansiyonel çalışma şekline göre azalma göstermiştir. Ancak aracın yalnız elektrik motoru ile çıkacağı maksimum hız, batarya şarj aralığı ve içten yanmalı motorun çalışacağı devir/tork aralığı üzerinde yapılacak iterasyonlar ile daha başarılı sonuçlar elde etmek mümkündür.

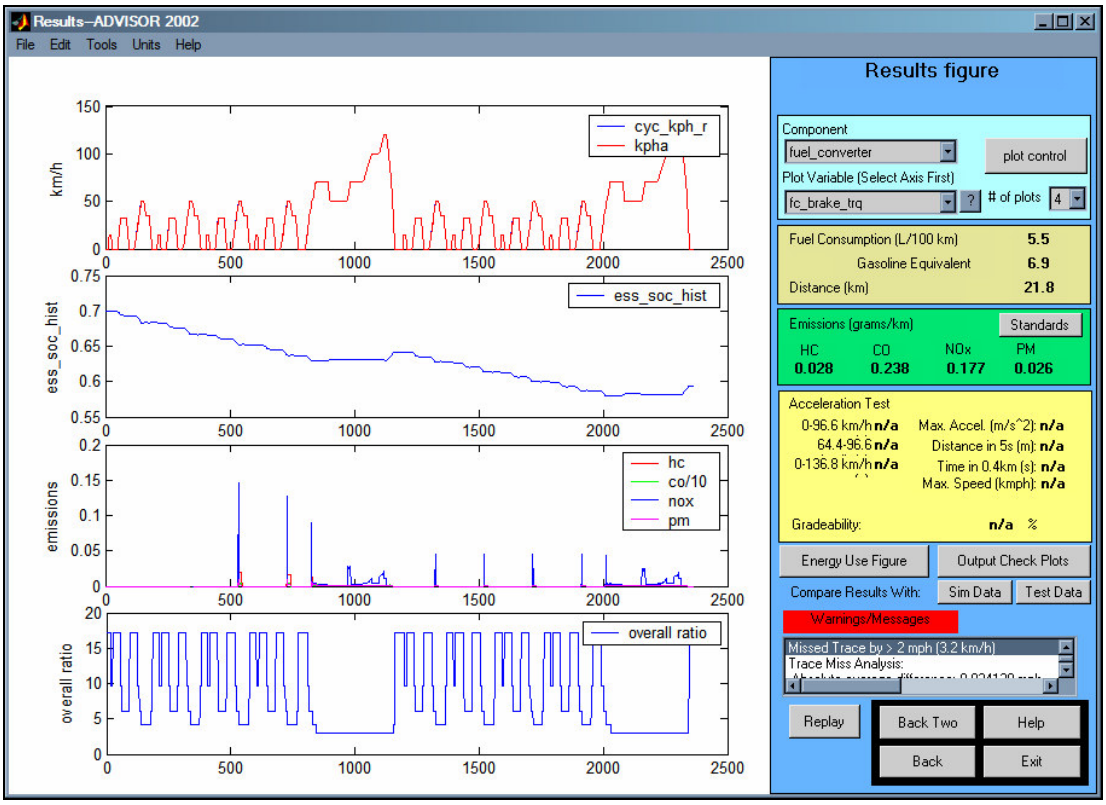
Araç kontrol stratejisinin değiştirilmesine dayanan optimizasyon çalışmalarında, doğruluğu kanıtlanan ADVISOR hibrit araç modeli üzerinde, hibrit bileşenleri aynı tutularak yalnızca kontrol algoritması değiştirilmek suretiyle ilgili iterasyonlar yapılmış ve yakıt tüketimi/azotoksit (NO_X) emisyonları bakımından optimum sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 7.8: Aracın Çalışma Modlarına Göre Optimize Edilmiş Kontrol Stratejisi.

Çalışma Modları	Araç Hızı [km/h]	Batarya Şarj Durumu	İYM Max. Tork [Nm]	EM Max. Tork [Nm]	Fren Pedal Kuvveti [N]
Yalnız EM	< 60 km/h	> % 10	-	> Sürücü tarafından talep edilen tork değeri.	-
Yalnız İYM	> 60 km/h	< % 10	-	-	-
Yalnız İYM	> 60 km/h	> % 10	> Sürücü tarafından talep edilen tork değeri.	-	-
Hibrit	-	> % 10	< Sürücü tarafından talep edilen tork değeri.	-	-
EM Jeneratör	-	< % 10	> Sürücü tarafından talep edilen tork değeri + Şarj için gerekli tork değeri.	-	-
Rejeneratif Fren	-	< % 10	-	-	< 80
Hidrolik Fren	-	≥ % 80	-	-	-
Hidrolik Fren	-	< % 10	-	-	> 90

Referans kontrol stratejisinde içten yanmalı motor, aracın çalıştırılması ile birlikte çalışmaya başlayıp elektrik motoru ile sürüş modunda sürüklenirken optimize edilen kontrol stratejisinde batarya ünitesinin şarjı yeterli olduğu sürece ve aracın hızı 60 km/h'in üzerine çıkmadıkça kapalı tutulmuştur. Batarya ünitesi üreticisinden alınan

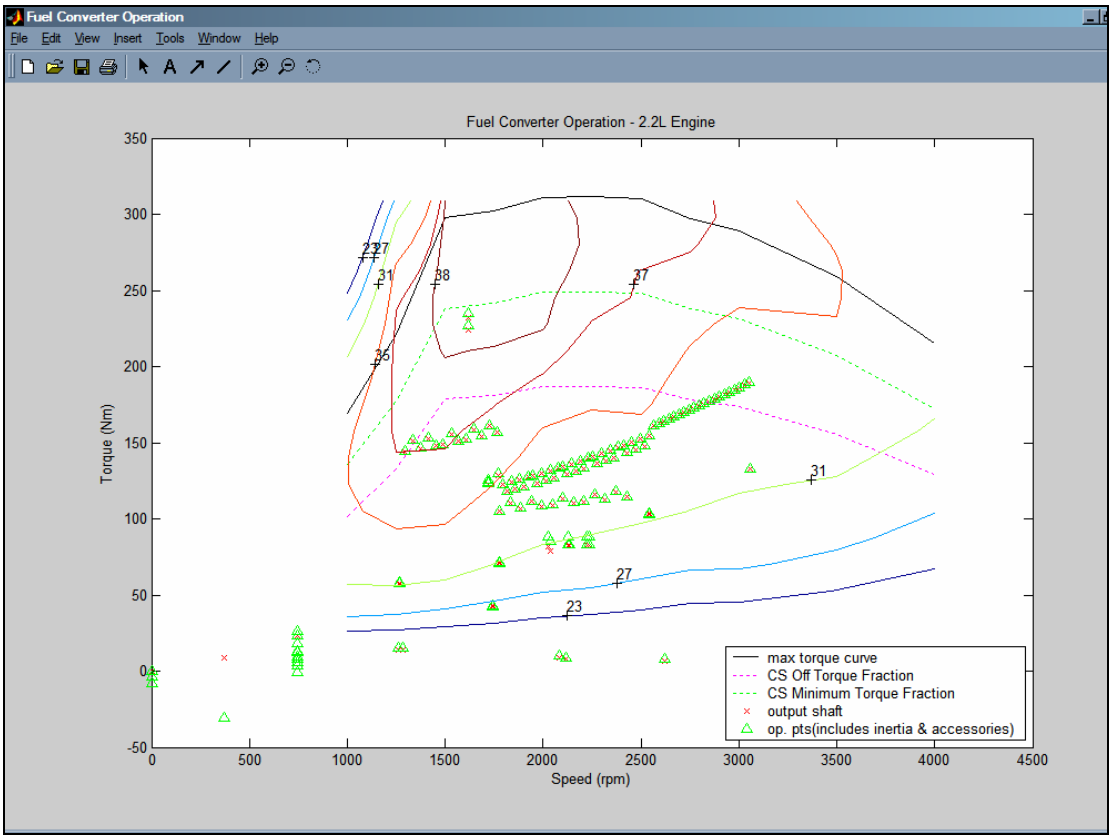
bilgiler ışığında, batarya ünitesinin şarj durumu için izin verilen aralığın en alt sınırı, elektrik motoru çalışma aralığının belirlenmesinde kullanılmıştır (Tablo 7.8).



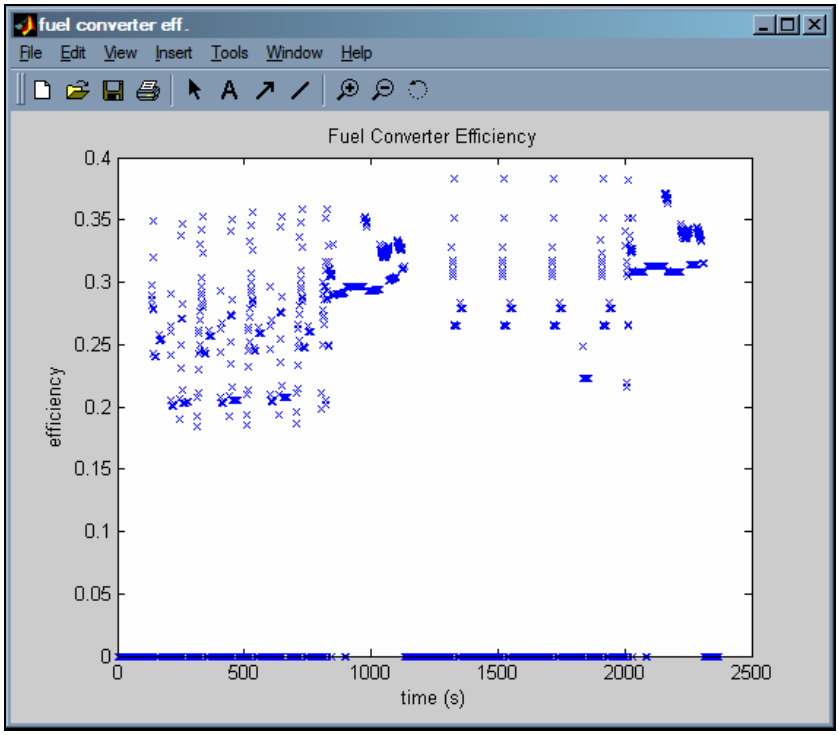
Şekil 7.28 : Optimizasyon Sonrası Hibrit Aracın NEDC Sürüş Çevriminde Yakıt Tüketim ve Egzoz Emisyon Test Sonuçları.

Konvansiyonel ve hibrit araçta olduğu gibi ADVISOR ara yüzü kullanılarak optimize edilmiş kontrol stratejisi ile yeni bir araç modeli kurulup NEDC çevrimi boyunca koşturulmuştur. Yakıt tüketimi ve egzoz emisyon sonuçları hibrit araç ADVISOR sonuçlarına göre ortalama %10 azalma göstermiştir (Şekil 7.28).

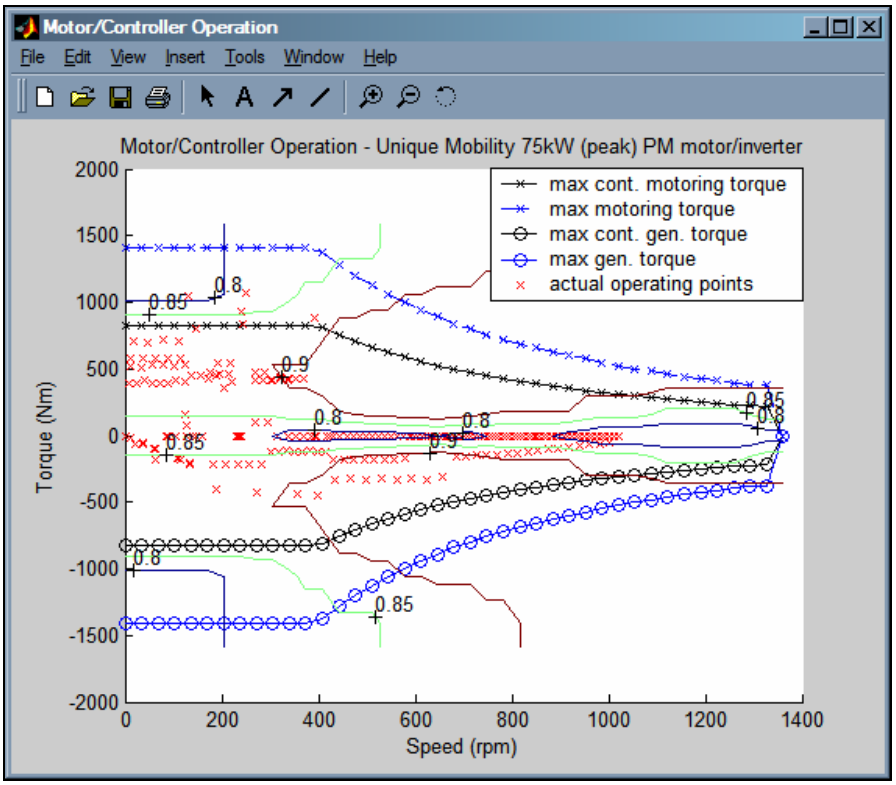
İçten yanmalı motorun çalışma noktalarının, tork haritası üzerinde incelendiğinde daha verimli bölgelere doğru kaydığı, genel olarak dizel içten yanmalı motorların düşük yakıt tüketimi ve egzoz emisyon bölgeleri şeklinde belirtilen tam gaz tork eğrisinin alt ortalarını kullanmaya başladığı gözlemlenmiştir (Şekil 7.29). Sürüş çevrimi boyunca gözlemlenen çalışma noktalarından elde edilen ağırlıklı ortalamalar neticesinde ortaya çıkan yakıt tüketimi ve egzoz emisyon değerleri de haliyle iyileşme göstermiştir. Sürüş çevrimi boyunca elektrik motorunun içten yanmalı motora yardımcı olması, içten yanmalı motorun çalışma noktalarının daha verimli bölgelere ötelenmesini sağlamıştır.



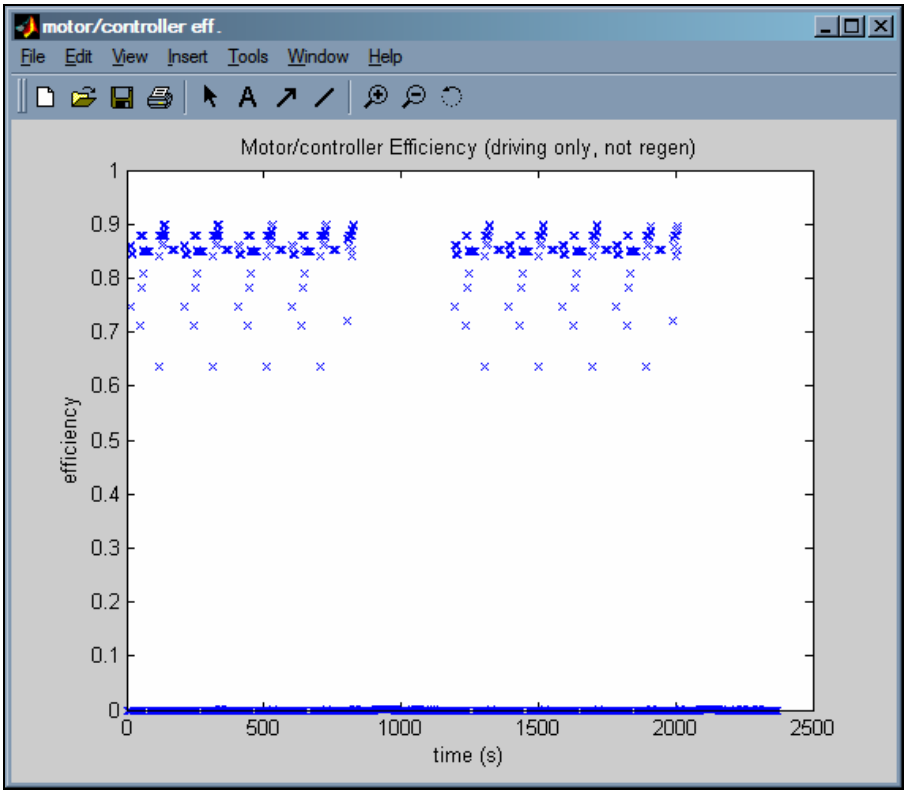
Şekil 7.29 : Optimizasyon Sonrası Sürüş Çevrimi Boyunca Hibrit Araca Ait İçten Yanmalı Motor Çalışma Noktaları.



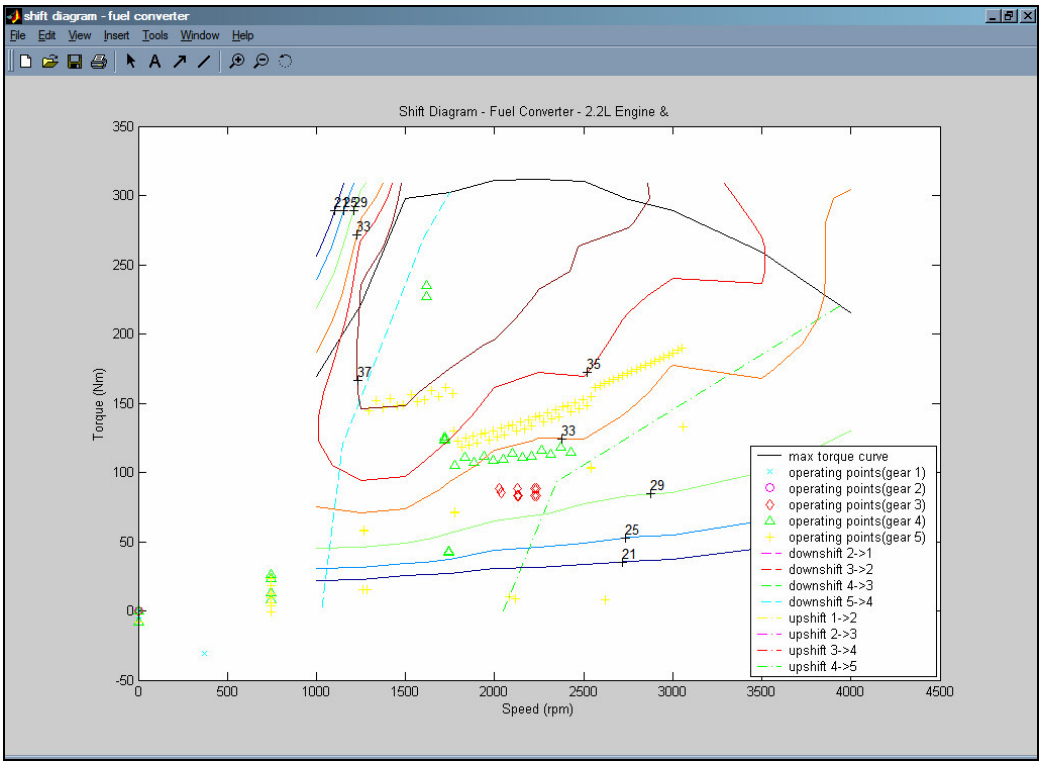
Şekil 7.30 : Optimizasyon Sonrası Sürüş Çevrimi Boyunca Hibrit Araca Ait İçten Yanmalı Motor Verimi.



Şekil 7.31 : Optimizasyon Sonrası Sürüş Çevrimi Boyunca Hibrit Araca Ait Elektrik Motoru Çalışma Noktaları.



Şekil 7.32 : Optimizasyon Sonrası Sürüş Çevrimi Boyunca Hibrit Araca Ait Elektrik Motoru Verimi.



Şekil 7.33 : Optimizasyon Sonrası Sürüş Çevrimi Boyunca Hibrit Araca Ait Vites Değişim Grafiği.

Yapılan ADVISOR koşuları sonunda optimum kontrol algoritmasının belirlenmesiyle ortaya çıkan grafikler, içten yanmalı motorun yoğunluklu olarak %25–40, elektrik motorunun ise %85–90 verim aralıkları içerisinde kaldığını göstermiştir (Şekil 7.30, 7.32). İlgili değerler hem konvansiyonel hem de hibrit araç koşularından elde edilen neticelere göre iyileşmiş durumdadır.

Kıyaslamalı sonuçlara bakıldığında, egzoz emisyonları bakımından azotoksit (NO_X) emisyonlarının referans hibrit araçtan elde edilen değere göre %12 daha azaldığı ve buna karşın yakıt tasarrufunun da %18 arttığı ortaya çıkmıştır (Tablo 7.10).

Tablo 7.9: Optimizasyon Sonrası Hibrit Araca Ait Kıyaslamalı Yakıt Tüketimi Test Sonuçları.

Yakıt Tüketim Değerleri [l/100km]			
	ECE 15	**EUDC**	**NEDC**
Hibrit Araç Fiziksel Test Sonuçları	-	-	6,20
Hibrit Araç ADVISOR Sonuçları	8,20	5,58	6,50
Optimizasyon Sonrası ADVISOR Sonuçları	6,95	4,73	5,50

Tablo 7.10: Optimizasyon Sonrası Hibrit Araca Ait Kıyaslamalı Egzoz Emisyon Sonuçları ve Standart Değerler.

Egzoz Emisyon Değerleri [g/km]					
	CO	**HC**	**HC + NOx**	**NOx**	**PM**
N1 Class II Euro IV	0,630	-	0,390	0,330	0,040
Hibrit Araç Fiziksel Test Sonuçları	0,245	-	0,184	0,151	0,024
Hibrit Araç ADVISOR Sonuçları	0,256	-	0,228	0,198	0,028
Optimizasyon Sonrası ADVISOR Sonuçları	0,238	-	0,205	0,177	0,026

Ayrıca konvansiyonel olarak ADVISOR'dan bulunan 8,10 l/100km'lik yakıt tüketimi, referans alınan hibrit araçta 6,50 l/100km'ye, kontrol algoritması optimize edilmiş araçta 5,50 l/100km'ye kadar düşerek oldukça iyi bir yakıt tüketimine işaret etmektedir (Tablo 7.9).

8. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Söz konusu tez çalışmasında dizel motorlu hafif ticari bir konvansiyonel aracın, incelemeler neticesinde ortaya çıkan uygun hibrit yapıya dönüşümü gerçekleştirilmiş ve ortaya çıkan konvansiyonel ve hibrit araçların ADVISOR modelleri kurularak yakıt tüketim ve egzoz emisyon sonuçları değerlendirilmiştir. Ayrıca doğruluğu fiziksel test sonuçları ile kıyaslanarak kanıtlanan ADVISOR hibrit araç modeli üzerinde, dijital ortamda araç kontrol stratejisi parametreleri değiştirilerek daha az yakıt tüketim ve egzoz emisyon seviyeleri için optimizasyon çalışması yapılmıştır.

Tez çalışması neticesinde fiziksel testler ve ADVISOR modellerinden elde edilen azotoksit (NO_X) emisyonu ve yakıt tüketimi sonuçlarına bakıldığında, aracın kontrol parametrelerinin değiştirilerek içten yanmalı motorun çalışma karakteristiğini değiştirmenin mümkün olduğu görülmüştür.

Aracın mevcut rejeneratif fren karakteristiğini koruyarak optimize edilmiş kontrol stratejisinin ana şartları;

- İçten yanmalı motor kapalı tutularak, batarya ünitesi şarj miktarının %10'dan büyük olması ve talep edilen tork miktarının elektrik motoru tarafından karşılanabilmesi durumunda 60 km/h hıza kadar yalnızca elektrik motoru ile sürüş.
- 60 km/h hızın üzerinde, batarya şarj miktarının %10'dan küçük olması ya da talep edilen tork miktarının elektrik motoru tarafından karşılanamaması durumunda yalnızca içten yanmalı motor ile sürüş.
- Talep edilen tork değerinin, elektrik motoru ve içten yanmalı motor tarafından üretilen maksimum tork değerinden büyük olması ve batarya şarj miktarının % 10' dan fazla olması durumunda hibrit modda sürüş.

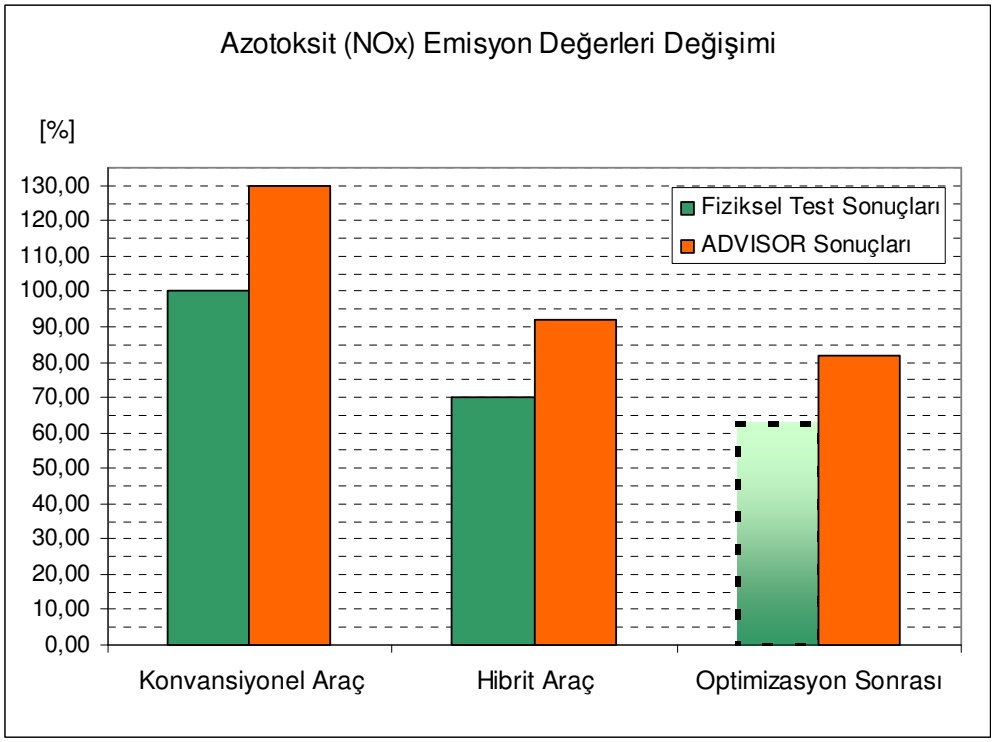
şeklinde belirlenmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda yakıt tüketimi ve azotoksit (NO_X) emisyonları arasındaki ters ilişki göz önünde bulundurularak her ikisi birlikte azaltılmaya çalışılarak Tablo 8.1'de görülen sonuçlar elde edilmiştir. Görüldüğü gibi yakıt tüketim ve azotoksit (NO_X) değerleri yaklaşık aynı seviyelerde azalmıştır.

Tablo 8.1: Konvansiyonel ve Hibrit Araç Versiyonları İçin Azotoksit (NO_X) Emisyonu ve Yakıt Tüketimi Değerleri.

	Azotoksit (NOx) Emisyon Değ. [g/km]	Yüzdesel Değişim [%]	Yakıt Tüketim Değerleri [l/100km]	Yüzdesel Değişim [%]
Konvansiyonel Araç Fiziksel Test Sonuçları	0,215	100	7,80	100
Konvansiyonel Araç ADVISOR Sonuçları	0,288	130	8,10	104
Hibrit Araç Fiziksel Test Sonuçları	0,151	70	6,20	80
Hibrit Araç ADVISOR Sonuçları	0,198	92	6,50	83
Optimizasyon Sonrası ADVISOR Sonuçları	0,177	82	5,50	70

Çalışmanın sonucunda azotoksit (NO_X) emisyon değerleri değişimine bakıldığında, konvansiyonel araç için fiziksel test ve ADVISOR sonuçları arasında yaklaşık %30 civarında bir sapma olduğu görülmüştür. İlgili sapmanın gerçek araçta, egzoz sistemine ait spesifik bilgilerin ve katalizör veriminin beyan edilen değerlerden farklı olmasından kaynakladığı düşünülmüştür. Konvansiyonel araç için çıkan bu farkın, yaklaşık olarak hibrit araç modeli sonuçlarının değerlendirilmesi sırasında da gözlemleneceği tahmin edilmiştir. Hibrit araç sonuçlarına bakıldığında ise yine yaklaşık olarak %31'lik bir sapma göze çarpmıştır. Bu durumda sonuçlar arasındaki farkın korunması, kurulan araç modelleri ile azotoksit (NO_X) emisyon seviyesi değişiminin yüzdesel olarak izlenmesinde bir sakınca olmayacağını göstermiştir. Araç kontrol parametreleri üzerinde yapılan çalışma ile ortaya çıkan ilgili emisyon değeri, hibrit araç için ADVISOR programında bulunan değere göre yaklaşık olarak %12 azalma göstermiştir (Şekil 8.1).

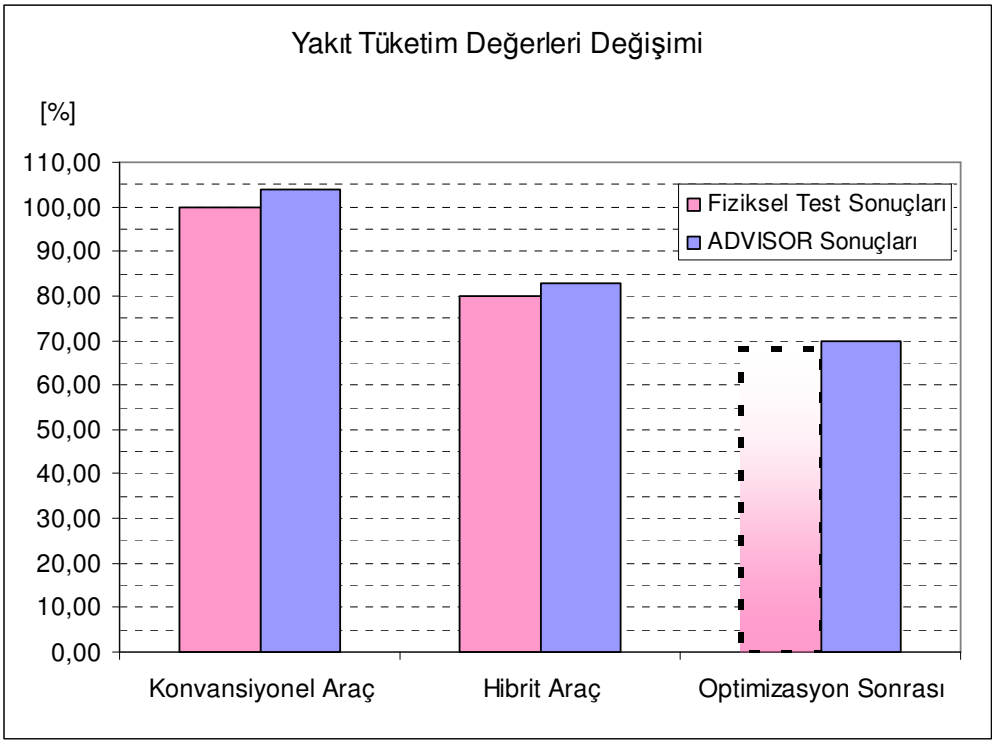
Şekil 8.1'de görülen yüzdesel değişim sonuçlarına bakılarak, söz konusu kontrol algoritmasına sahip olacak fiziksel aracın azotoksit (NO_X) emisyon değerleri için, konvansiyonel aracın test neticelerine göre %37, hibrit aracın test neticelerine göre de %11 azalacağı söylenebilir. Bir başka deyişle optimize edilmiş kontrol algoritması ile oluşturulacak fiziksel bir hibrit aracın azotoksit (NO_X) emisyon değerleri için, konvansiyonel aracın %63'ü kadar olması beklenmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi benzer bir ilişki ADVISOR sonuçları arasında da gözlenmektedir. Sonuçlar azalan bir trend izlemekte ancak fiziksel test sonuçları ile arasında değişmeyen bir fark ortaya koymaktadır. Söz konusu farkın korunması fiziksel test sonuçları ile yapılan yaklaşımlar sayesinde oluşacak fiziksel aracın test sonuçlarını tahmin etmeye yardımcı olmaktadır.



Şekil 8.1 : Konvansiyonel ve Hibrit Araç Versiyonları İçin Azotoksit (NO_X) Emisyonu Değişimi.

Yakıt tüketimi değerleri değişiminde ise konvansiyonel araç için fiziksel test sonuçları ile ADVISOR sonuçları arasında yaklaşık olarak %4'lük bir sapma gözlemlenmiştir. Hibrit araç için kurulan modelden elde edilen sonuçlar ile fiziksel test sonuçları arasında ise %5 civarında bir yakınsama görülmüştür. Yakıt tüketimi için ilgili yüzdeler, simülasyon ve fiziksel test sonuçları karşılaştırılması bakımından Ford Motor Company kabul kriterleri içerisinde de kaldığından kurulan ADVISOR modellerinin doğruluğu kanıtlanmıştır. Söz konusu modeller temel alınarak yapılan optimizasyon çalışması sonucunda ise referans hibrit araç için elde edilen yakıt tüketimi değerinin %15 azaldığı ortaya çıkmıştır (Şekil 8.2).

Şekil 8.2'de görülen yüzdesel değişimler arasında kurulan ilişkiye dayanarak, optimize edilmiş kontrol algoritmasına sahip fiziksel aracın yakıt tüketimi test sonuçları için, konvansiyonel araca göre %32, hibrit araca göre de %16 azalacağı söylenebilir. Benzer ilişki ADVISOR simülasyon sonuçları arasında da mevcuttur. Ancak ADVISOR programında kurulan araç modellerinden elde edilen sonuçlar fiziksel test sonuçlarına göre belli bir oranda sapma göstermektedir. Fakat yapılan çalışmalar sonucunda yakıt tüketim değerlerinin hangi yönde ve hangi seviyelere doğru ilerlediğini belirlemeye yeterli olduğu görülmüştür.



Şekil 8.2 : Konvansiyonel ve Hibrit Araç Versiyonları İçin Yakıt Tüketimi Değişimi.

ADVISOR programı ile kurulan hibrit araç modelinden elde edilen sonuçlar, program dahilinde sınırlı parametrelerin göz önüne alınmasından dolayı, aracın gerçekte olabileceğinden daha az verimli çalışma koşullarına sahip olacağını göstermiştir. Fakat fiziksel test sonuçları ile yapılan yaklaşımlar yardımıyla, optimizasyon sonrası ortaya çıkan sonuçların gerçekte hangi yönde ve hangi seviyelerde olabileceği tahmin edilebilmiştir.

Optimizasyon çalışmaları sonucunda ortaya çıkan kontrol algoritması, yakıt tüketimi ve azotoksit (NO_X) emisyonları açısından ortalama %35 civarında iyileşme göstermiştir. Ancak batarya ünitesi, şarj durumu bakımından limit değerlerde kullanılması ve yalnızca elektrik motoru ile sürüş modunda belirlenen maksimum hız için oldukça hızlı deşarj olması sebebiyle parça bazında dayanıklılık açısından problem çıkarma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle kontrol algoritması, ünitenin yapısal dayanıklılığı bakımından tekrar gözden geçirilmelidir. Hatta daha yüksek kapasiteli batarya ünitesi kullanımı maliyeti ile mevcut batarya ünitesinin söz konusu şartlarda çalışarak ortaya çıkaracağı tamir bakım maliyetleri ilave bir analizde incelenerek seçim yapılmalıdır. Ayrıca hibrit araç için hedeflenen pazara ait müşteri beklentileri ve araç kullanım şartları belirlenip bunlara bağlı olarak algoritmanın ve seçilen hibrit bileşenlerinin bir kez daha optimize edilmesi gerekmektedir.

Simülasyon programı olarak seçilen ADVISOR ile yapılan testlerin sonuçları her ne kadar bütün alanlarda gerçek değerlerle birebir örtüşmese de, tasarımda kullanılan bileşenlerin değişimi sonucunda oluşacak sistem kazanç ve kayıplarını yeterli bir doğruluk oranıyla tespit etmeye fayda sağlamıştır. Buna bağlı olarak oluşturulan hibrit araç versiyonları, ADVISOR test sonuçlarının da işaret ettiği şekilde bir hibrit yapısından beklenen verimlilik ve kazancın sağlandığını doğrulamak için yeterli olmuştur. Bu aşamadan sonra söz konusu hibrit aracın daha da geliştirilmesi ve hedeflenen faydaların daha da arttırılması için gereken modifikasyonların fiziksel olarak araç üzerinde gerçekleştirilerek ilgili testlerin tamamlanıp sonuçlarının değerlendirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **Güney, A.,** 1989. Taşıtlarda Güç İletimi Yüksek Lisans Ders Notları. İ.T.Ü Makina Fakültesi, İstanbul.

[2] **Ergeneman, M., Arslan, H.E., Mutlu M.,** 1998. Taşıt egzozundan kaynaklanan kirleticiler, Kutlar O.A. (editör), Birsen Yayınevi, İstanbul.

[3] **Arslan, M.Ö.,** 2005. Ticari taşıt aerodinamiğinin temelleri ve sayısal yöntemlerle incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[4] **Jonasson, K.,** 2005. Control of hybrid electric vehicles with diesel engines, Europe, *PhD Thesis,* Lund University, Lund, Sweden.

[5] **Arnett, M.,** 2005. Modeling and simulation of a hybrid electric vehicle for the challenge X competition, *MSc Thesis,* The Ohio State University, Columbus, Ohio.

[6] **Koga, H., Tadros, T., Maglast, D. and Blackman, L.,** 2005. Penn State future truck hybrid electric vehicle: Light-duty diesel exhaust emission control system to meet ULEV emissions standard, *SAE Technical Paper,* 2005-01-3877.

[7] **Duoba, M., Larsen, R.,** 1998. Investigation of practical HEV test procedures with prototypes from the 1997 FutureCar challenge, *SAE Technical Paper,* 981080.

[8] **Bocci, D., Casson, L., and Bower, G.,** 2004. Control strategy development for Wisconsin's hybrid crossover vehicle, *SAE International,* University of Wisconsin, Madison.

[9] **Kelly, K.,J., Zolot, M., Glinsky, G., Hieronymus, A.,** 2001. Test results and modeling of the Honda Insight using ADVISOR, *SAE Techinal Paper,* 2001-01-2537.

[10] **Boyalı, A., Demirci, M., Acarman, T., Güvenç, L., Kıray, B., Özatay, E.,** November, 2006. Modeling and control of a four wheel drive parallel hybrid electric vehicle, *IEEE The proceedings of conference on control applications,* Munich, Germany.

[11] **Uçarol, H., Tur, O., Özsu, E., Demirci, M., Yıldırım, M.,** 2007. Design and prototype development of a split drive hybrid electric vehicle, *EET-2007 European Ele-Drive Conference,* Brussels, Belgium, May 30 – June 01.

[12] **Friedman, D.,** 2003. A new road. The technology and potential of hybrid vehicles, *Union of Concerned Scientists,* Cambridge, MA.

[13] **Tur, O., Uçarol, H., Özsu, E.,** 2006. Ford Otosan hybrid light commercial vehicle project final report, *TÜBİTAK MRC EI,* Kocaeli.

[14] **Yıldırım, M., Kıray, B., Özatay, E**., 2006. Ford Otosan hybrid light commercial vehicle project final report, *Ford Otosan,,* Kocaeli.

[15] **Güvenç, L., Boyalı, A., Demirci, M., 2006.** Ford Otosan hybrid light commercial vehicle project final report, *İTÜ Mekar,* İstanbul.

[16] **70/220/EEC**, 1970. Motor vehicle emissions, *European Economic Community,* Germany.

[17] **Araçların İmal, Tadil ve Montajı Hakkında Yönetmelik,** 2004. *Sanayi ve Ticaret Bakanlığı,* Ankara.

[18] **Advanced Vehicle Simulator,** 2002. ADVISOR Documentation.

[19] **Ford Motor Company,** Internal confidential documents, 01.12.2006.

[20] **Karditsas, N., Freiman, J., Konecky, K., Kitchel, A.,** 2006. Cobasys 288-60 Application Manual, Orion MI.

[21] **UQM Technologies Inc.,** 2003. Electric motor and Inverter User and Installation Manual, Frederick, Colorado.

EKLER

EK A

ADVISOR programında, araç bileşenlerinin tanımlanması için kullanılan MATLAB dosyaları içerisine girilen değerler Tablo A.1'de görüldüğü gibidir.

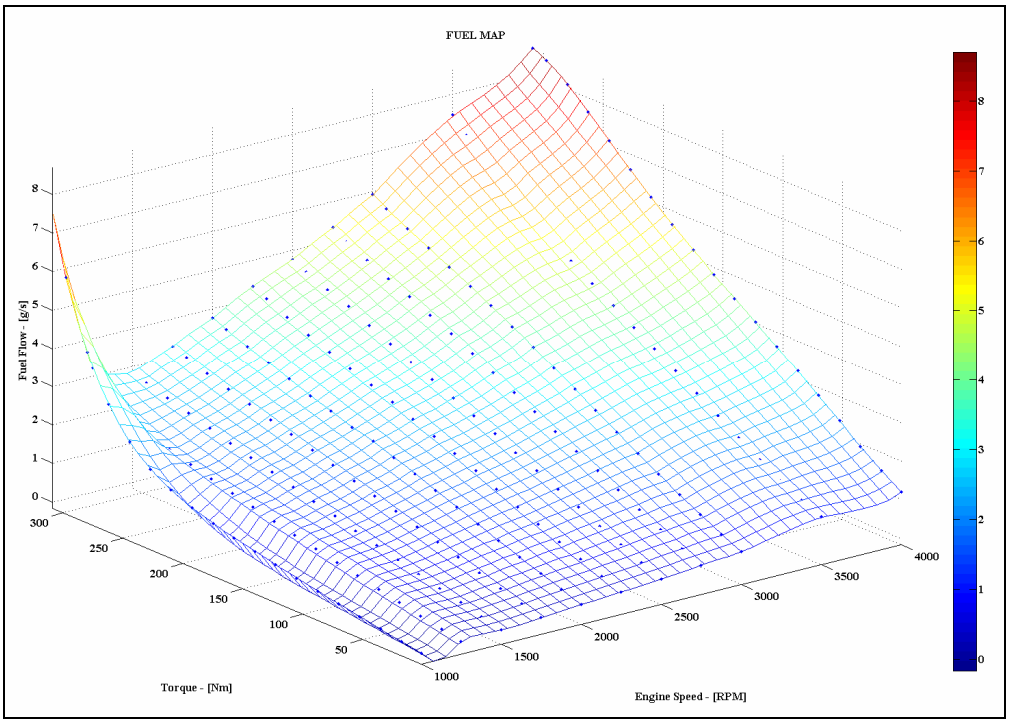
Tablo A.1: Araç Bileşenlerine Ait Girdiler.

Lastik markası	Firestone CV3000	-
Lastik boyutları	195/70 R15	-
Dinamik yuvarlanma yarıçapı	318,5	mm
Yuvarlanma direnci katsayısı	0,011	-
Lastik yuvarlanma ataleti	1,15615	kg/m^2
Yakıt yoğunluğu	0,8349	kg/l
Yakıt alt ısıl değeri	44800	J/g
Ağırlık merkezi yüksekliği	765	mm
Baz boş ağırlık	1639	kg
Harekete hazır ağırlık	1714	kg
Maksimum boş ağırlık	1881	kg
GVM	3000	kg
GTM	4500	kg
Ön aks ağırlığı @ Baz boş ağırlık	1018	kg
Ön aks ağırlığı @ Maksimum boş ağırlık	1107	kg
Arka aks ağırlığı @ Baz boş ağırlık	621	kg
Arka aks ağırlığı @ Maksimum boş ağırlık	774	kg
Ön aks ağırlığı @ GVM	1305	kg
Arka aks ağırlığı @ GVM	1695	kg
Ön aks ağırlığı @ Harekete hazır ağırlık	1067	kg
Arka aks ağırlığı @ Harekete hazır ağırlık	647	kg
İki aks arası açıklık	2933	mm
Şanzıman	5 Vitesli VXT75	-
İçten yanmalı motor	2,2L Duratorq TDCi Dizel 130PS Puma I4	-
Şanzıman ağırlığı	51	kg
İçten yanmalı motor ağırlığı	198	kg
İYM'ye mekanik bağlı elemanların yükleri		
İYM fan	0,4	kW
Su pompası	0,5	kW
Direksiyon pompası	1,14	kW
Vakum pompası	0,5	kW
Alternatör	1,5	kW
Kompresör	5,8	kW

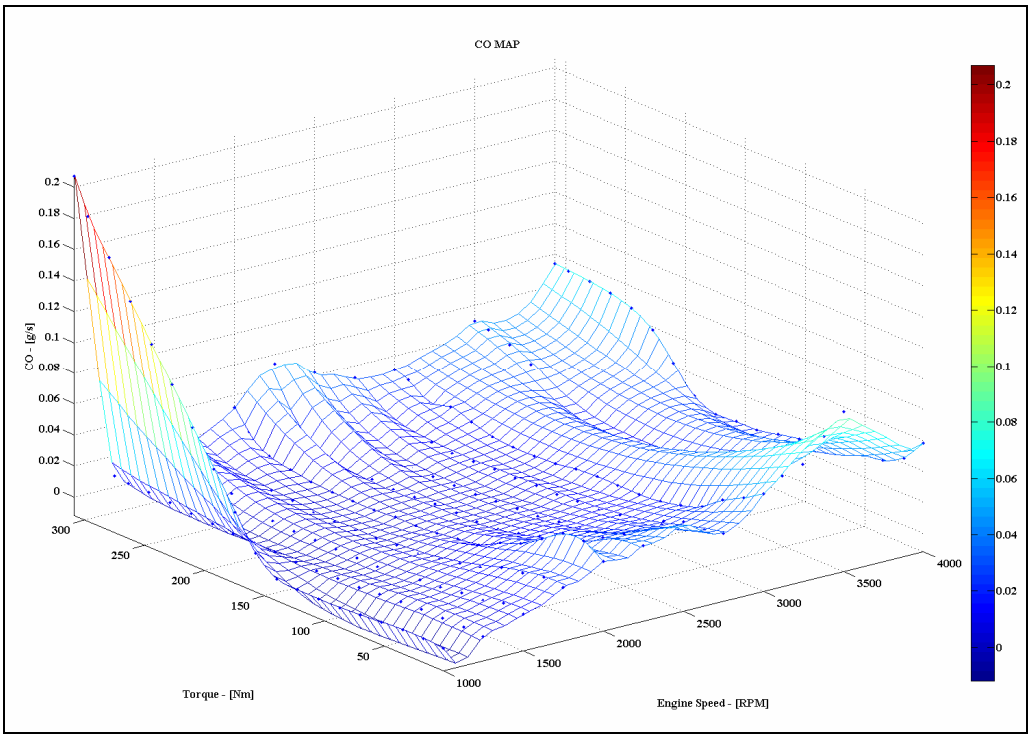
Rüzgar direnç katsayısı	0,394	-
Karakteristik iz düşüm alanı	3,6	m^2
İYM'nin toplam dış yüzey alanı	10,4478	m^2
İYM termostat sıcaklığı	96	°C
Motor kaputu toplam yüzey alanı	0,91	m^2
Vites oranları		
1. Vites	3,80	-
2. Vites	2,14	-
3. Vites	1,35	-
4. Vites	0,92	-
5. Vites	0,67	-
Son dişli oranı	4,54	-
Vites yükseltme/düşürme hızları		
0 - 1	0/3,6	-
1 - 1	29/3,6	-
1 - 2	29/3,6	-
2 - 2	51/3,6	-
2 - 3	51/3,6	-
3 - 3	80/3,6	-
3 - 4	80/3,6	-
4 - 4	115/3,6	-
4 - 5	115/3,6	-
5 - 5	1000/3,6	-

EK B

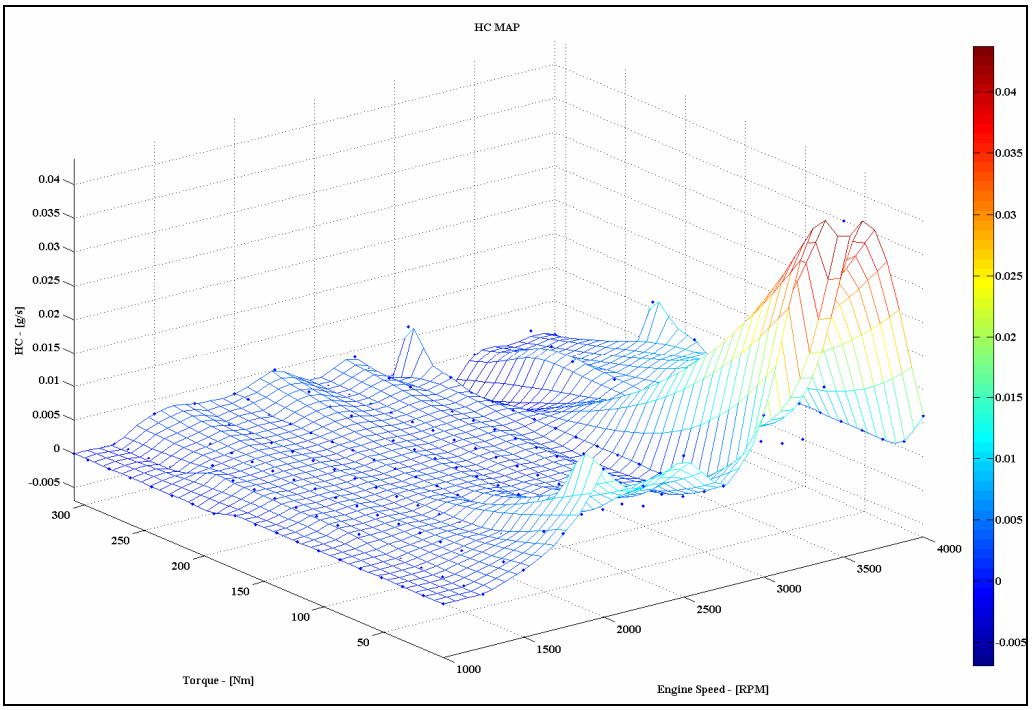
Konvansiyonel ve hibrit araçların dizel içten yanmalı motoruna ait yakıt tüketim ve egzoz emisyonları haritaları Şekil B.1, B.2, B.3, B.4 ve B.5'te görüldüğü gibidir.



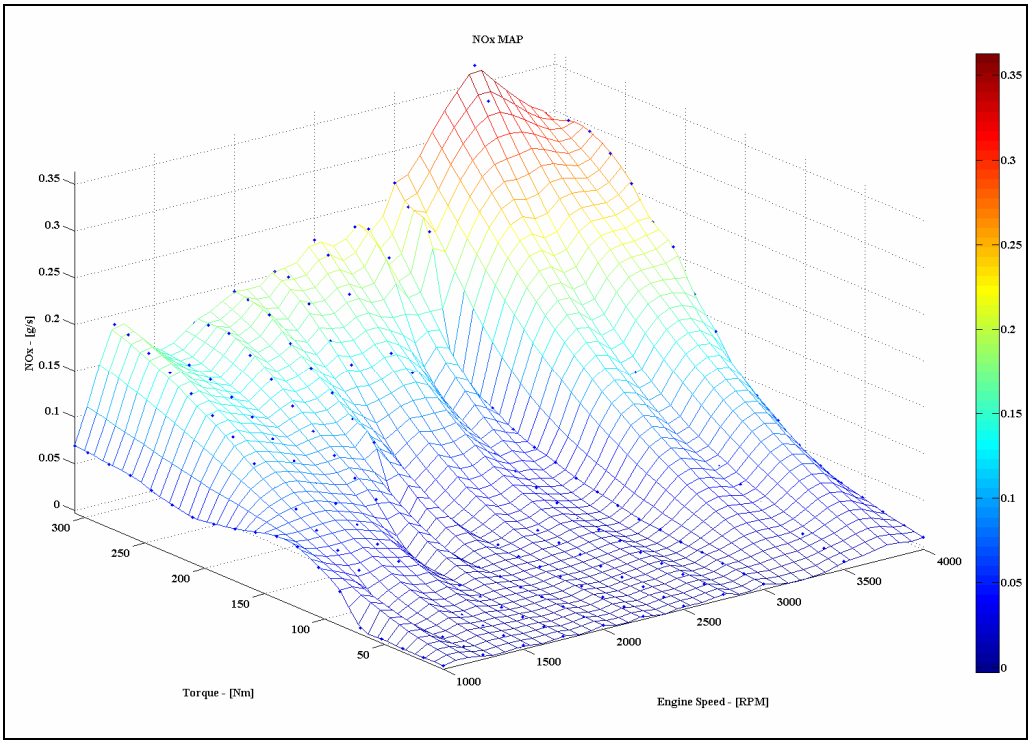
Şekil B.1 : İçten Yanmalı Motora Ait Yakıt Tüketim Haritası.



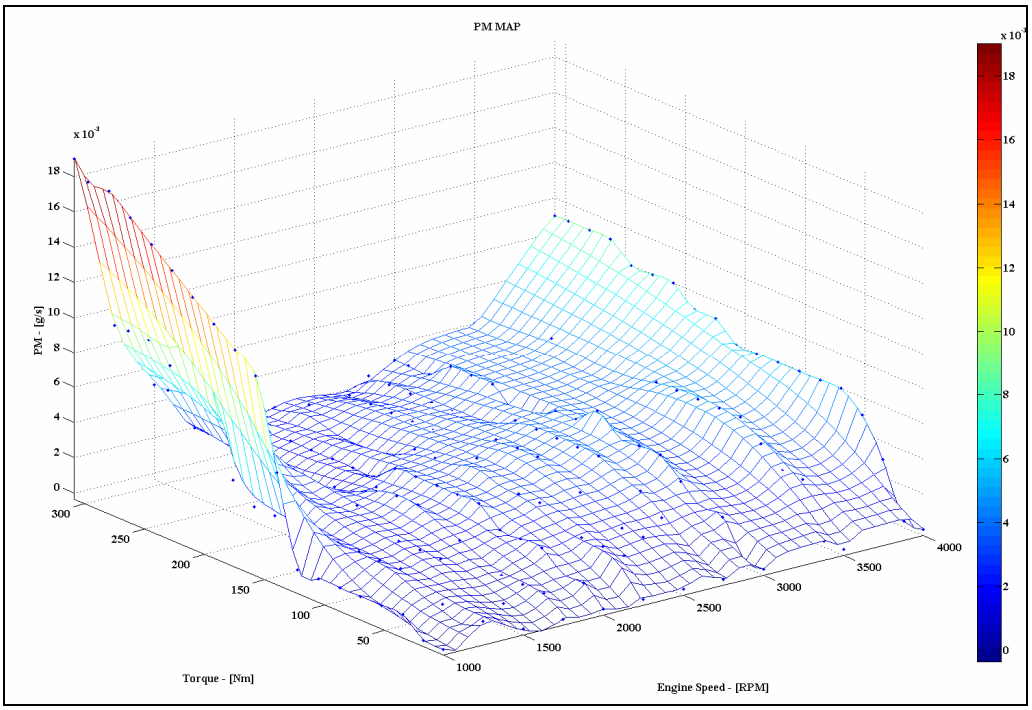
Şekil B.2 : İçten Yanmalı Motora Ait Karbonmonoksit (CO) Emisyonu Haritası.



Şekil B.3 : İçten Yanmalı Motora Ait Hidrokarbon (HC) Emisyonu Haritası.



Şekil B.4 : İçten Yanmalı Motora Ait Azotoksit (NO_X) Emisyonu Haritası.



Şekil B.5 : İçten Yanmalı Motora Ait Partikül Madde (PM) Emisyonu Haritası.

ÖZGEÇMİŞ

Seçkin Ali Erbeyler 1980 senesinde İzmir' de doğdu. İlköğrenimini İzmir Ali Rıza Özmenoğlu İlkokulunda tamamladı (1986-1991). Ortaöğrenimini İzmir Ali Erentürk Ortaokulu (1991-1994), lise öğrenimini İzmir Atatürk Lisesinde (1994-1998) tamamladıktan sonra 1998 yılında İstanbul Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fakültesinde yüksek öğrenim hayatına başladı. 2003 yılında lisans öğrenimini tamamlayarak İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında Otomotiv Yüksek Lisans programına başladı ve halen devam etmektedir. Aynı zamanda 2004 yılından beri Ford Otosan Otomotiv San. A.Ş.' de Araç Tasarım Bölümünde Ürün Geliştirme ve Dizayn Mühendisi olarak görev yapmaktadır.