T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAFİF HİBRİT TRAKTÖRLERDE DÜŞÜK YAKIT TÜKETİMİ VE EMİSYON SALIMI İÇİN HİBRİT MODLARIN ANALİZİ

Miraç ÖZTÜRK

DOKTORA TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Otomotiv Mühendisliği Programı

Danışman
Prof. Dr. Tarkan SANDALCI

Şubat, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAFİF HİBRİT TRAKTÖRLERDE DÜŞÜK YAKIT TÜKETİMİ VE EMİSYON SALIMI İÇİN HİBRİT MODLARIN ANALİZİ

Miraç ÖZTÜRK tarafından hazırlanan tez çalışması 20.02.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Otomotiv Mühendisliği Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Tarkan SANDALCI
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Tarkan SANDALCI, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Orkun ÖZENER, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Yasin KARAGÖZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Osman Taha ŞEN, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Osman Akın KUTLAR, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Tarkan SANDALCI sorumluluğunda tarafımca hazırlanan HAFİF HİBRİT TRAKTÖRLERDE DÜŞÜK YAKIT TÜKETİMİ VE EMİSYON SALIMI İÇİN HİBRİT MODLARIN ANALİZİ başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Miraç ÖZTÜRK

İmza

Bu çalışma, Ar-Ge çalışmaları kapsamında “TÜMOSAN Motor ve Traktör A.Ş” tarafından desteklenmiştir.

Kıymetli Anne, Babama

ve

Sevgili Eşime

TEŞEKKÜR

Bugünlere gelmemde çok büyük emeği olan ve eğitim hayatım için her türlü fedakarlığı gösteren kıymetli babam Burhanettin ÖZTÜRK' e; şefkatini ve merhametini benden hiç eksik etmeyen kıymetli annem Emine ÖZTÜRK' e; desteklerini hep arkamda hissettiğim kardeşlerim Gülşah ALACA ve Sümeyye ÖZTÜRK' e; eğitim hayatım boyunca değerli tecrübelerinden faydalandığım, akademik çalışmalarımda bana yol gösteren, lisans, yüksek lisans ve doktora tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Tarkan SANDALCI' ya; tez çalışmamda büyük emeği olan hocam Sayın Doç. Dr. Yasin KARAGÖZ' e, meslek hayatıma başlamamda ve tecrübe edinmemde bana imkan sağlayan, benim için özel bir yeri olan Sayın Muzaffer ALBAYRAK' a; değerli yöneticilerim Tümosan Motor ve Traktör A.Ş Genel Müdürü Sayın Halim TOSUN' a ve Motor Teknolojileri Müdürü Sayın Dr. Cihan BÜYÜK' e; değerli çalışma arkadaşlarım Sayın Hasan KEFELİOĞLU' na ve Sayın Mehmet SANDIKÇI' ya; hayatta elde ettiğim başarıların asıl mimarı olan sevgili eşim Büşra ÖZTÜRK' e; en değerlim, oğlum Ertuğrul ÖZTÜRK' e en içten, saygı, sevgi ve hürmetlerimi sunarım.

Miraç ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ **ix**

KISALTMA LİSTESİ **xii**

ŞEKİL LİSTESİ **xiii**

TABLO LİSTESİ **xvi**

ÖZET **xvii**

ABSTRACT **xix**

1 GİRİŞ **1**

1.1 Amaç 1

1.2 Kapsam 1

1.3 Yöntem 2

1.4 Literatür Özeti 2

2 TRAKTÖRLERİN GELİŞİMİ **5**

2.1 Buharla Çalışan Traktörler 5

2.2 Benzin ve Dizel Yakıtla Çalışan Traktörler 6

2.3 Traktörlerde Teknolojik Gelişmeler ve Modernizasyon 8

2.4 Akıllı Tarımın Gelişimi, Traktörlerde Hibrit ve Elektrifikasyon Süreci 10

3 HEDEF TRAKTÖR VE MOTORUN BELİRLENMESİ **13**

3.1 Tarımsal Mekanizasyonun Küresel Hedefleri 13

3.1.1 Klasik Rol 13

3.1.2 Çevresel Rol 14

3.1.3 Stratejik Rol 14

3.2 Türkiye'de Tarımsal Mekanizasyon Düzeyi 15

3.3 Hedef Traktör ve Motorun Belirlenmesi 21

4 TEST ÇALIŞMALARI **23**

4.1 İçten Yanmalı Motor Test Çalışmaları 23

4.1.1 İçten Yanmalı Motor Dinamometre Test Hazırlıkları 23
4.1.2 4 Silindirli 95 BG Dizel Motor Dinamometre Testleri 28
4.1.3 3 Silindirli 75 BG Dizel Motor Dinamometre Testleri 29
4.2 Traktör Saha Testi Çalışmaları 31
4.2.1 Traktör Saha Testi Hazırlıkları 33
4.2.2 Pulluk ile Tarla Sürme Testleri 34

5 KONVANSİYONEL TRAKTÖR TAŞIT MODELİNİN OLUŞTURULMASI 36
5.1 Bir Boyutlu Taşıt Modeli Kurulumu 36
5.1.1 İçten Yanmalı Motorun Modellenmesi 37
5.1.2 Motor Aksesuar Grubunun Modellenmesi 38
5.1.3 Traktörün ve Güç Aktarma Organlarının Modellenmesi . . . 39
5.1.4 Sürücünün Modellenmesi 40
5.1.5 Toprağın Lastik ve Pulluk ile Etkileşiminin Modellenmesi . 41
5.1.6 Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi 45

6 HİBRİT TRAKTÖR KONFİGÜRASYONUNUN BELİRLENMESİ, ELEKTRİK MOTORU VE BATARYA SEÇİMİ 50
6.1 Hibrit Taşıtların Sınıflandırılması 50
6.1.1 Hibritleşme Derecesine Göre Sınıflandırma 50
6.1.2 Güç Aktarım Düzenine Göre Sınıflandırma 51
6.1.3 Elektrik Motoru Konumuna Göre Sınıflandırma 53
6.1.4 Hibrit Konfigürasyon Belirlenmesi 54
6.1.5 Elektrik Motoru ve Batarya Seçimi 57

7 HİBRİT TRAKTÖR ENERJİ YÖNETİM STRATEJİSİNİN BELİRLENMESİ 61
7.1 Eşdeğer Yakıt Tüketim Minimizasyonu Stratejisi 63
7.2 Kontrol Stratejisinin Belirlenmesi 64

8 HİBRİT TRAKTÖR TAŞIT MODELİNİN OLUŞTURULMASI 66
8.1 İçten Yanmalı Motorun Modellenmesi 66
8.2 Elektrik Motoru ve Hibrit Taşıtın Modellenmesi 68
8.3 Bataryanın Modellenmesi 69
8.4 Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyonu Metodunun Modele Eklenmesi 71
8.5 Hibrit Traktör ile Pulluk Sürme Simülasyonu 72

9 SONUÇ 74

9.1 Konvansiyonel ve Hibrit Traktörler için Yakıt Tüketimi Kıyaslanması 74
9.2 Konvansiyonel ve Hibrit Traktörler için Emisyon Salımı Kıyaslanması 76
9.3 Çalışmanın Çıktıları 77
9.4 Sonuç ve Tartışma 78

KAYNAKÇA **80**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **84**

SİMGE LİSTESİ

I_{axl}	Aks Atalet Momenti
L	Aks Mesafesi
GT_r	Arka Aks Brüt Çekiş Gücü
MR_r	Arka Aks Hareket Direnci
NT_r	Arka Aks Net Çekiş Gücü
T_r	Arka Aks Torku
W_r	Arka Teker Dinamik Yükü
r_r	Arka Teker Yarıçapı
SOC_0	Batarya Başlangıç Şarj Durumu
SOC_{max}	Batarya Maksimum Şarj Durumu
SOC_{min}	Batarya Minimum Şarj Durumu
V_{oc},BP	Batarya Paketi Açık Devre Voltajı
Cap,BP	Batarya Paketi Kapasitesi
R,BP	Batarya Paketi Toplam Direnci
C,BP	Batarya Paketi Toplam Kapasitansı
T,BP	Batarya Paketi Zaman Sabiti
SOC	Batarya Şarj Durumu
P_{batt}	Batarya Terminal Gücü
m_{batt}	Batarya Yakıt Tüketimi
B_n	Boyutsuz Oran
GT	Brüt Çekiş Gücü
p(SOC)	Ceza Fonksiyonu
TE	Çekiş Verimliliği

$T_{(drv,v)}$	Debriyaj Torku
R_d	Diferansiyel Çevrim Oranı
W	Dinamik Tekerlek Yükü
D	Ekipman Çekme Kuvveti
ω_{motor}	Elektrik Motor Hızı
$T_{(motor,max)}$	Elektrik Motor Maksimum Torku
$T_{(motor,min)}$	Elektrik Motor Minimum Torku
T_{motor}	Elektrik Motor Torku
s(t)	Eşdeğerlilik Faktörü
m_{eqv}	Eşdeğer Yakıt Tüketimi
ω_{drv}	Güç Aktarma Organı Hızı
MR	Hareket Direnci
ρ_d	Hareket Direnç Oranı
F_{aer}	Hava Direnci
ρ	Hava Yoğunluğu
I_{eng}	İçten Yanmalı Motor Atalet Momenti
T_{eng}	İçten Yanmalı Motor Fren Torku
ω_{eng}	İçten Yanmalı Motor Hızı
$T_{(engine,max)}$	İçten Yanmalı Motor Maksimum Torku
$T_{(engine,min)}$	İçten Yanmalı Motor Minimum Torku
T_{engine}	İçten Yanmalı Motor Torku
m_f	İçten Yanmalı Motor Yakıt Tüketimi
δ	Lastik Deformasyonu
NT	Net Çekiş Gücü
GT_f	Ön Aks Brüt Çekiş Gücü
MR_f	Ön Aks Hareket Direnci
NT_f	Ön Aks Net Çekiş Gücü
T_f	Ön Aks Torku
W_f	Ön Teker Dinamik Yükü

r_f	Ön Teker Yarıçapı
N_p	Paralel Hücre Sayısı
N_s	Seri Hücre Sayısı
R_t	Şanzıman Çevrim Oranı
I_{trans2}	Şanzıman Çıkış Tarafı Atalet Momenti
I_{trans1}	Şanzıman Giriş Tarafı Atalet Momenti
I_{dsh}	Tahrik Mili Atalet Momenti
M_{veh}	Taşıt Ağırlığı
V	Taşıt Hızı
$A_{frontal}$	Taşıt Ön Yüzey Alanı
M_{load}	Taşıt Yük Ağırlığı
s	Teker Slip Oranı
r_{whl}	Teker Yarıçapı
V_{oc},Cell	Tek Hücre Açık Devre Voltajı
R_{cell}	Tek Hücre Direnci
C_{cell}	Tek Hücre Kapasitansı
Cap,Cell	Tek Hücre Kapasitesi
T_{cell}	Tek Hücre Zaman Sabiti
T	Toprak İşleme Derinliği
CI	Toprak Koni İndeksi
F_i	Toprak Sertliği Ayar Parametresi
Q_{lhv}	Yakıt Alt Isıl Değeri
g	Yerçekimi İvmesi
α	Yol Eğimi
F_{rol}	Yuvarlanma Direnci
c_{roll}	Yuvarlanma Direnç Faktörü
d_{road}	Yuvarlanma Direnç Katsayısı
d	Yüksüz Lastik Çapı
b	Yüksüz Lastik Kesit Genişliği

KISALTMA LİSTESİ

ASAE	Amerikan Tarımsal Mühendisler Derneği
BG	Beygir Gücü
BP	Battery Pack
CO2	Karbondioksit
DOC	Dizel Oksidasyon Katalizörü
DPF	Dizel Partikül Filtresi
ECMS	Equivalent Fuel Consumption Minimization Strategy
EKÜ	Elektronik Kontrol Ünitesi
EM	Elektrik Motoru
EMS	Energy Management Strategy
EPA	ABD Çevre Koruma Ajansı
EYS	Enerji Yönetim Stratejisi
EYTMY	Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyonu Yöntemi
FA-ECMS	Bulanık Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyonu Stratejisi
GPS	Küresel Konumlama Sistemi
HEA	Hibrit Elektrikli Araç
İYM	İçten Yanmalı Motor
PTO	Power Take Off
SCR	Seçici Katalitik İndirgeme
SOC	Batarya Doluluk Oranı
YSA	Yapay Sinir Ağı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Buharla Çalışan Traktör Örnekleri a-) Thomas Aveling ve Richard Porter tarafından 1860'larda İngiltere' de geliştirildi, b-) 19. yy sonlarında ABD'de New York'ta Birdsall Company tarafından üretildi, c-) 20.yy başlarında Case tarafından üretildi, d-) 1849 yılında Robert Ransome tarafından geliştirildi 6
Şekil 2.2 1892 Yılında John Froelich Tarafından Geliştirilen İlk Benzinli Traktör 7
Şekil 2.3 a-) Henry Ford Tarafından Geliştirilen Fordson Model F Traktörü, b-)John Deere Tarafından Geliştirilen Model D Traktörü 7
Şekil 2.4 Benz-Sendling S6 Traktör Modeli 8
Şekil 2.5 McCormick Deering Firması Tarafından Geliştirilen Farmall Traktör Modeli 8
Şekil 2.6 a-) Ferguson 35 Traktörlerinde 3 nokta askı sisteminin uygulanması, b-) Allis-Chalmers şirketi tarafından geliştirilen ilk kauçuk lastik uygulama örneği 9
Şekil 2.7 a-) John Deere 6R Serisi Traktör Modeli. Traktör gücü 77-184 kW @ 2100 d/dk b-) New Holland T7 Serisi Traktör Modeli. Traktör gücü 92-221 kW @ 2200 d/dk 10
Şekil 3.1 Amerika Birleşik Devletleri'nin Sektöre Göre Ekonomik Gelişimi 14
Şekil 3.2 Türkiye'de Traktör İmalatının Yıllara Göre Değişimi 16
Şekil 3.3 Türkiye'deki Traktör Sayısının Yıllara Göre Değişimi 17
Şekil 3.4 Türkiye'deki Traktörleri Yaş Ortalaması 18
Şekil 3.5 Türkiye'deki Traktörlerin Beygir Gücü Ortalamasının Yıllara Göre Değişimi 19
Şekil 3.6 Türkiye'deki Traktörlerin Beygir Gücüne Göre Dağılımı 20
Şekil 3.7 Türkiye'deki Tarım Aletlerinin Kullanımı Oranı 20
Şekil 4.1 Motor Test Odası Bağlantısı 24
Şekil 4.2 AVL Puma 2 Test Sistem Otomasyonu 25
Şekil 4.3 AVL Dyno Road 402 Aktif Dinamometre 25
Şekil 4.4 Emiş Havası ve Soğutma Suyu Şartlandırma Sistemleri 26
Şekil 4.5 Yakıt Sıcaklığı Şartlandırma ve Yakıt Tüketim Ölçüm Sistemi . . 26
Şekil 4.6 Hava ve Su Debimetreleri 27

Şekil 4.7 AVL AMA i60 Egzoz Gazı Emisyon Ölçüm Cihazı 27
Şekil 4.8 4 silindirli 95 BG İçten Yanmalı Dizel Motor 28
Şekil 4.9 4 Silindirli 95 BG Motor Tork Haritası 29
Şekil 4.10 4 Silindirli 95 BG Motor Özgül Yakıt Tüketim Haritası 29
Şekil 4.11 3 Silindirli 75 BG İçten Yanmalı Dizel Motor 30
Şekil 4.12 3 Silindirli 75 BG Motor Tork Haritası 31
Şekil 4.13 3 Silindirli 75 BG Motor Özgül Yakıt Tüketimi Haritası 31
Şekil 4.14 Saha Testlerinin Gerçekleştirildiği Konya İli 32
Şekil 4.15 Tümosan 8000 Serisi Traktör Modeli ve 5 Bıçaklı Pulluk 32
Şekil 4.16 Veri Toplama Cihazlarının Traktör Üzerine Entegrasyonu 34
Şekil 4.17 Yumuşak ve Sert Toprak Senaryosu için Pulluk Operasyonu . . . 34
Şekil 4.18 Pulluk Sürme Operasyonunda Traktörün Hız Zaman Grafiği . . . 35
Şekil 5.1 GT-SUITE İçten Yanmalı Motor Modeli 37
Şekil 5.2 Toplam Motor Hacmi ve Atalet Momentinin Modele Tanımlanması 38
Şekil 5.3 Motor Tork ve Yakıt Tüketimi Haritalarının Modele Tanımlanması 38
Şekil 5.4 Motor Aksesuar Grubunun Modellenmesi 39
Şekil 5.5 Traktörün Modellenmesi 39
Şekil 5.6 Güç Aktarma Organlarının Modellenmesi 40
Şekil 5.7 Sürücünün Modellenmesi 41
Şekil 5.8 Pulluk Operasyonunda Traktöre Etki Eden Kuvvetler 42
Şekil 5.9 Tarımsal Traktörler için Güç Aktarma Organlarındaki Güç İlişkisi 43
Şekil 5.10 Lastik-Toprak İlişkisinin Modellenmesi 44
Şekil 5.11 Lastik ve Toprak Özelliklerinin Modelde Değişken Olarak Tanımlanması 45
Şekil 5.12 Pulluk Ekipmanı ve Toprak Özelliklerinin Modelde Değişken Olarak Tanımlanması 45
Şekil 5.13 Test Çevriminin Taşıt Modeline Tanımlanması 46
Şekil 5.14 Motor Hızı, Test ve Simülasyon Sonucu Karşılaştırılması 46
Şekil 5.15 Motor Gaz Pedal Pozisyonu, Test ve Simülasyon Sonucu Karşılaştırılması 47
Şekil 5.16 İçten Yanmalı Motordan Talep Edilen Gücün Zamana Bağlı Değişimi 47
Şekil 5.17 Çevrim Boyunca Tüketilen Anlık Yakıt Miktarı 48
Şekil 5.18 Çevrim Sırasında Salınan CO_2 Emisyon Miktarının Zamana Bağlı Değişimi 48
Şekil 5.19 Traktör Çalışma Noktalarının Motor Haritası Üzerinde Gösterimi 49
Şekil 6.1 Güç Aktarma Düzenine Göre HEA'ların Sınıflandırılması 51
Şekil 6.2 Seri Hibrit Elektrikli Araçların Şematik Olarak Gösterimi 52
Şekil 6.3 Paralel Hibrit Elektrikli Araçların Şematik Olarak Gösterimi . . . 52

Şekil 6.4 Seri-Paralel Hibrit Elektrikli Araçların Şematik Olarak Gösterimi 53
Şekil 6.5 Elektrik Motoru Konumuna Göre HEA'ların Sınıflandırılması . . 53
Şekil 6.6 Hibrit Konfigürasyonu Belirlenirken Dikkat Edilen Parametreler . 55
Şekil 6.7 Hafif Hibrit P2 Konfigürasyonu 56
Şekil 6.8 P2 Konfigürasyonunun Motor ve Güç Aktarma Organları Üzerindeki Gösterimi 57
Şekil 6.9 Konvansiyonel ve Hibrit Traktörün Performans Açısından Karşılaştırılması 58
Şekil 6.10 Elektrik Motoru Seçilirken Dikkat Edilen Parametreler 58
Şekil 6.11 Batarya Seçilirken Dikkat Edilen Parametreler 59
Şekil 7.1 Hibrit Araçlarda Enerji Yönetim Stratejilerine Genel Bakış 62
Şekil 7.2 Kontrol Stratejisi 64
Şekil 8.1 3 silindir 75 BG Motor Modeli 67
Şekil 8.2 3 silindirli 75 BG Motorun Toplam Motor Hacmi ve Atalet Momentinin Tanımlanması 67
Şekil 8.3 3 silindirli 75 BG Motorun Tork ve Yakıt Tüketim Haritalarının Modele Tanımlanması 68
Şekil 8.4 P2 Hibrit Yapısında Elektrik Motorunun Konumlandırılması . . . 68
Şekil 8.5 a-) Elektrik Motoru Tork Eğrisi b-) Elektrik Motoru Verim Haritası 69
Şekil 8.6 Thevenin Elektriksel Eşdeğer Pil Modeli 69
Şekil 8.7 Tek Hücre Verisi ile Batarya Modelinin Oluşturulması 70
Şekil 8.8 Batarya Paketinin Açık Devre Voltajı ve İç Direncinin Modellenmesi 71
Şekil 8.9 Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyonu Yöntemi İçin Sisteme Tanımlanan Limitler 72
Şekil 8.10 Hibrit Traktör Modelinde Pulluk Operasyonu Sırasında İYM, EM ve SOC'nin Zamana Bağlı Değişimi 73
Şekil 8.11 Hibrit Traktör Modelinde Pulluk Operasyonu Sırasında İYM'nin Çalışma Noktaları 73
Şekil 9.1 Konvansiyonel ve Hibrit Traktör Anlık Yakıt Tüketimi Karşılaştırılması 75
Şekil 9.2 Konvansiyonel ve Hibrit Traktör Toplam Yakıt Tüketimi Karşılaştırılması 75
Şekil 9.3 Konvansiyonel ve Hibrit Traktör Anlık CO_2 Emisyon Salımı Karşılaştırılması 76
Şekil 9.4 Konvansiyonel ve Hibrit Traktör Toplam CO_2 Emisyon Salımı Karşılaştırılması 77

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Hibrit Traktör Uygulamaları 12
Tablo 3.1 Türkiye'deki Traktörlerin Güçlerine Göre Satış Adetleri 21
Tablo 4.1 Sensör ve Ekipman Listesi 24
Tablo 4.2 4 silindirli 95 BG Motor Teknik Özellikleri 28
Tablo 4.3 3 silindirli 75 BG Motor Teknik Özellikleri 30
Tablo 4.4 Traktör Teknik Özellikleri 32
Tablo 4.5 Pulluk Teknik Özellikleri 33
Tablo 4.6 Traktör Üzerine Yerleştirilen Veri Toplama Cihazları 33
Tablo 5.1 Güç Aktarma Organı Dişlilerinin Toplam Çevrim Oranı ve Verimleri 40
Tablo 5.2 CI ve B_n Değerleri 42
Tablo 6.1 Hibritleşme Derecesine Göre Farklı Hibrit Elektrikli Araçların Karşılaştırılması 51
Tablo 6.2 Hibritleşme Derecesine Göre Farklı Hibrit Elektrikli Araçların Karşılaştırılması 54
Tablo 6.3 Elektrik Motorlarının Kıyaslanması 59
Tablo 6.4 Bataryaların Kıyaslanması 60

ÖZET

Hafif Hibrit Traktörlerde Düşük Yakıt Tüketimi Ve Emisyon Salımı İçin Hibrit Modların Analizi

Miraç ÖZTÜRK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Otomotiv Mühendisliği Programı
Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Tarkan SANDALCI

Günümüzde çevresel endişelerin artması, otomotiv endüstrisini daha düşük emisyonlu araçlar üretmeye yöneltmiştir. Emisyon regülasyonlarının sıkılaştırılması, yol üstü araçlarda olduğu gibi yol dışı araçlarda da hibritleşme sürecini hızlandırmıştır. Traktörler, tarım sektörünün temel araçları olarak geleneksel içten yanmalı motorlarla uzun süredir güçlendirilmiştir. Ancak, günümüzde hibritleşme konsepti traktörlerde enerji verimliliğini arttırmak, emisyonları azaltmak ve sürdürülebilir tarım uygulamalarını teşvik etmek amacıyla giderek daha fazla benimsenmektedir.

Hibrit araçlar için mevcut enerji yönetim stratejilerinde basitliği, güvenilirliği ve uygulama kolaylığı nedeniyle kural bazlı yaklaşımlar tercih edilmektedir. Bu çalışma, dizel-elektrikli hibrit traktör için gerçek zamanlı optimizasyona dayalı bir Enerji Yönetimi Stratejisi (EYS) olan Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyonu Yönteminin (EYTMY) tasarımı ve uygulanmasına odaklanmaktadır. Çalışma, deneysel çalışmalar ve modelleme çalışmaları olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Tarla sürme operasyonu için traktörün çalışma koşullarını belirlemek amacıyla Türkiye'nin Konya ilinde saha testleri gerçekleştirilmiştir. Saha testleri sert ve yumuşak olmak üzere iki farklı toprak tipinde gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, çalışmada kullanılacak olan iki farklı dizel motorun performans ve emisyon haritalarını oluşturabilmek amacıyla dinamometre üzerinde ilgili motor testleri gerçekleştirilmiştir. GT-SUITE yazılım programında, konvansiyonel ve hibrit traktörler için taşıt modelleri oluşturulmuş ve bu modeller üzerinde

yakıt tüketimi ve CO_2 emisyon salımını karşılaştırmak amacıyla simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, hibrit traktörün, konvansiyonel traktöre kıyasla yakıt tüketimi ve CO_2 emisyon salımında yaklaşık %9 oranında bir iyileşme sağladığını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hibrit traktör, emisyon, enerji yönetim stratejisi, eşdeğer yakıt tüketimi minimizasyonu yöntemi.

ABSTRACT

Analysis of Hybrid Modes for Low Fuel Consumption and Emission Reduction in Mild Hybrid Tractors

Miraç ÖZTÜRK

Department of Mechanical Engineering
Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Tarkan SANDALCI

The increase in environmental concerns today has led the automotive industry to produce vehicles with lower emissions. The tightening of emission regulations has accelerated the hybridization process in off-road vehicles, as it has with on-road vehicles. Tractors, which are essential tools in the agricultural sector, have long been powered by traditional internal combustion engines. However, the concept of hybridization is increasingly being adopted in tractors to enhance energy efficiency, reduce emissions, and promote sustainable agricultural practices.

In current energy management strategies for hybrid vehicles, rule-based approaches are preferred due to their simplicity, reliability, and ease of implementation. This study focuses on the design and implementation of an Equivalent Fuel Consumption Minimization Strategy (ECMS), a real-time optimization-based Energy Management Strategy (EMS) for a diesel-electric hybrid tractor. The study consists of two main parts: experimental studies and modeling studies. Field tests were conducted in Konya, Turkey, to determine the operating conditions of the tractor for plowing operations. These field tests were conducted on two different soil types, hard and soft. Additionally, to create the performance and emission maps for the two different diesel engines to be used in the study, relevant engine tests were conducted on a dynamometer. Vehicle models for conventional and hybrid tractors were created in the GT-SUITE software program, and simulations were performed to compare fuel consumption and CO_2 emissions in these models. The obtained data indicate that the hybrid tractor achieved approximately a 9% improvement in fuel consumption and CO_2 emissions compared to the conventional tractor.

Keywords: Hybrid tractor, emission, energy management strategy, equivalent fuel consumption minimization strategy.

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING

1
GİRİŞ

1.1 Amaç

Traktörler, tarım sektöründe verimliliği ve iş gücünü arttıran en temel araçlardan birisidir. Modern tarım uygulamalarında verimliliği arttırmak, iş gücü maliyetini düşürmek ve zaman tasarrufu sağlamak için kullanılan traktörler, çiftçilerin ekim, hasat, sulama ve toprak işleme gibi temel işlemleri daha hızlı ve etkili bir şekilde gerçekleştirmesine olanak tanır. Tarım sektöründeki mekanizasyonun en önemli unsuru olan traktörler, sürdürülebilir tarım uygulamalarının geliştirilmesi ve kaynakların daha etkin kullanılması açısından büyük öneme sahiptir. Bu nedenle, traktörlerin verimliliğini ve çevresel sürdürülebilirliğini arttıracak teknolojiler, tarım sektörü için stratejik bir avantaj sağlamaktadır.

Bu çalışmanın amacı, toprak işleme operasyonlarında traktörlerin mevcut çalışma koşullarını analiz ederek kullanım profillerini çıkarmak ve bu bağlamda hafif hibrit sistemlerin traktörlere uygulanabilirliğini araştırmaktır. Hibrit enerji yönetim stratejilerini etkin bir şekilde kullanarak yakıt tüketimi ve emisyon salımını minimize etmek bu çalışmanın diğer temel hedefidir.

1.2 Kapsam

Bu çalışmanın kapsamı, tarla sürme operasyonunda pulluk kullanımı ile sınırlıdır ve farklı toprak türlerine göre traktörlerin çalışma koşulları ve kullanım profillerindeki değişiklikleri ele almaktadır. Diğer tarım operasyonları bu çalışmanın dışında bırakılmıştır. Hafif hibrit sistemlerin traktörlerde yakıt tüketimi ve emisyon salımı üzerindeki etkisi incelenmekte olup, sistem maliyeti ve pazar beklentileri gibi unsurlar kapsam dışıdır. Çalışmada sadece hafif hibrit yapı incelenmiş, tam hibrit olarak seri ya da paralel hibrit sistemler değerlendirmeye alınmamıştır. Ayrıca, hibrit enerji yönetim stratejilerinden sadece EYTMY ele alınmış, diğer stratejiler çalışmaya dahil edilmemiştir.

1.3 Yöntem

Bu çalışmada, pulluk operasyonuna dair kullanım profillerini belirlemek amacıyla Türkiye' nin Konya ilinde farklı toprak türlerinde saha testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerde, konvansiyonel traktör üzerine yerleştirilen sensör ve ekipmanlar sayesinde operasyon sırasında gerçek zamanlı veriler toplanarak analiz ve değerlendirme yapılmıştır.

Konvansiyonel traktör üzerinde olan 4 silindirli 95 BG motor ve hibrit traktör konseptinde kullanılması hedeflenen 3 silindirli 75 BG motor, test odasında dinamometreye bağlanmış ve ilgili sensör ve ekipmanlar ile detaylı testler gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen verilere dayalı olarak, GT-SUITE analiz programı kullanılarak taşıt modelleri oluşturulmuş ve konvansiyonel model test sonuçlarıyla doğrulanmıştır. EYS' lerden birisi olan EYTMY hafif hibrit taşıt modelinde uygulanmış; ardından konvansiyonel model ile yakıt tüketimi ve emisyon salımı değerleri açısından karşılaştırılmıştır.

Bu yöntemle, hafif hibrit traktörlerin performansı, yakıt tüketimi ve emisyon salımı anlamında çevresel etkileri değerlendirilmiştir.

1.4 Literatür Özeti

Modern tarım endüstrisi, elektrik kullanımını, çevresel sürdürülebilirliği ve yaşam kalitesindeki gelişmelere paralel olarak yeniliği ön planda tutacak şekilde evrilmiştir [1] [2]. İçten yanmalı bir motor ve elektrikli bir motoru bir araya getiren hibrit traktörler, yakıt tüketimini ve emisyonları azaltırken yakıt verimliliğini en üst düzeye çıkarmak üzere tasarlanmıştır [3] [4]. Bu traktörler, yakıt verimliliğini optimize etme ve emisyonları azaltma yetenekleri sayesinde tarım endüstrisinde öncelikli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu durum çevreye fayda sağlarken, çiftçilerin ve tarım işletmelerinin işletme maliyetlerinden tasarruf etmesine de yardımcı olur. Ayrıca, sürdürülebilir tarım uygulamalarını teşvik eden hibrit traktörler, doğal kaynakların korunmasında önemli bir rol oynamaktadır [5]. Mocera ve Martini [6], bir hibrit traktör mimarisi önererek bu sistemin performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Hibrit elektrikli sürekli değişken aktarma organına (HeCVT) sahip tarım traktörü, tipik günlük iş senaryolarında geleneksel dizel traktörlerle karşılaştırıldığında daha yüksek performans ve yakıt verimliliği sergilemektedir. Daha iyi performans elde etmek için birçok araştırmacı, traktörlerde çift motorlu tahrik sistemleri için özel olarak enerji yönetim stratejileri

üzerine çalışmıştır. Hibrit traktörlerde EYS, İçten Yanmalı Motor (İYM) ve Elektrik Motoru (EM) kullanımını optimize ederek yakıt verimliliğini en üst düzeye çıkarmayı hedeflemektedir. EYS üç kategoriye ayrılabilir: kural tabanlı, optimizasyon tabanlı ve öğrenme tabanlı [7]. Kural tabanlı stratejiler, karar vermek için önceden tanımlanmış kurallar veya mantığı kullanır [8] [9]. Mevcut enerji yönetim stratejilerine, basitlikleri, güvenilirlikleri, kolay uygulanabilirlikleri nedeniyle kural tabanlı yaklaşımlar hakimdir [10] [11] [12]. Optimizasyon tabanlı stratejiler ise küresel optimizasyon ve gerçek zamanlı optimizasyon olmak üzere iki algoritmaya ayrılır [13]. Bu stratejiler, özellikle karmaşık ve dinamik ortamlarda artan uyarlanabilirlik, esneklik ve verimlilik sağlar. Gerçek zamanlı optimizasyon, enerji yönetimi sırasında motorun optimum çalışma eğrisini kullanarak (yakıt tüketimi, güç ve verimlilik gibi) hibrit/elektrikli araçların değişkenlerini kontrol etmek için en iyi çalışma noktasını bulmayı amaçlar. Bu hem motorun hem de elektrik motorunun en uygun durumda çalışmasını sağlar. Gerçek zamanlı optimizasyon stratejisi, gelecekteki sürüş bilgisine ihtiyaç duymaz ve belirli bir sürüş döngüsü koşulları ile sınırlı değildir [14]. Zhu ve arkadaşları, hidro-mekanik sürekli değişken aktarma organı (HMCVT) kullanan bir paralel hibrit traktör sistemi tasarlamışlardır. Bu sistemin güç dağılımı, Bulanık Uyarlanabilir Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyon Stratejisi (FA-ECMS) kullanılarak sağlanmaktadır [15]. Bu strateji, eşdeğerlik faktörünü gerçek zamanlı olarak dinamik bir şekilde ayarlayarak daha makul bir güç dağılımı sağlar. Zhu [16], paralel hidrolik hibrit ağır terminal traktörü için bir tasarım sunmuştur. Yazarlar, yakıt ekonomisini geleneksel tasarımlara göre %38,1–%61,6 oranında iyileştiren dinamik bir kural tabanlı kontrol stratejisi önermiştir. Xie ve arkadaşları [17], FA-ECMS'nin yönetim etkinliğini artırmak için eşdeğer faktörü düzenleyen bir Yapay Sinir Ağı (YSA) geliştirmişlerdir. Jia ve arkadaşları [18], hibrit elektrikli tarım traktörlerinin optimal kontrolü için sayısal yöntemlerin kullanımını tartışmıştır. Çalışmanın odak noktası, tipik çalışma döngüleri sırasında optimizasyon tabanlı enerji yönetim stratejileri yoluyla yakıt tüketimini azaltmaktır. Genel olarak, literatür hibrit teknolojinin traktör yakıt ekonomisini önemli ölçüde iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu ve ekonomik ve çevresel avantajlar sunduğunu göstermektedir. Diğer yandan, hibrit araçlara ilişkin enerji yönetim stratejileri ile ilgili farklı uygulama alanları ve çalışmalara literatürde rastlanmaktadır. Han ve arkadaşları [19], elektrikli hibrit araçlarda soğuk havalarda batarya şarj ve deşarj verimliliklerinin etkisini incelemişlerdir. Araştırmalarının sonucunda, soğuk havalarda batarya ısıtma sistemi ile verimliliğin önemli ölçüde arttığını tespit etmişlerdir. Han ve arkadaşları [20] ise başka bir çalışmada, batarya yaşlanmasını dikkate alarak öngörüye dayalı bir kontrol modeli ile hibrit elektrikli araçlar için hız tahmin modeli geliştirmişlerdir. Sürdürülebilir tarım sağlamak için enerji tüketimini ve çevreye

zararlı etkileri en aza indirmek esastır. Traktörlerde enerji verimliliği ve yakıt ekonomisi, çiftçiler ve sürdürülebilir tarım açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, literatürde araçlarla ilgili birçok yayın olmasına rağmen, traktörlerde hibrit çalışma üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu nedenle hem P2 hibrit dönüşümü hem de EYTMY temel alınarak bir strateji incelenmiştir. Ayrıca, P2 sınıfı hibrit dönüşüm ve EYTMY'yi traktör üzerinde çalışarak daha gerçekçi ve ticari olarak kullanılabilir bir sistem geliştirilmiştir.

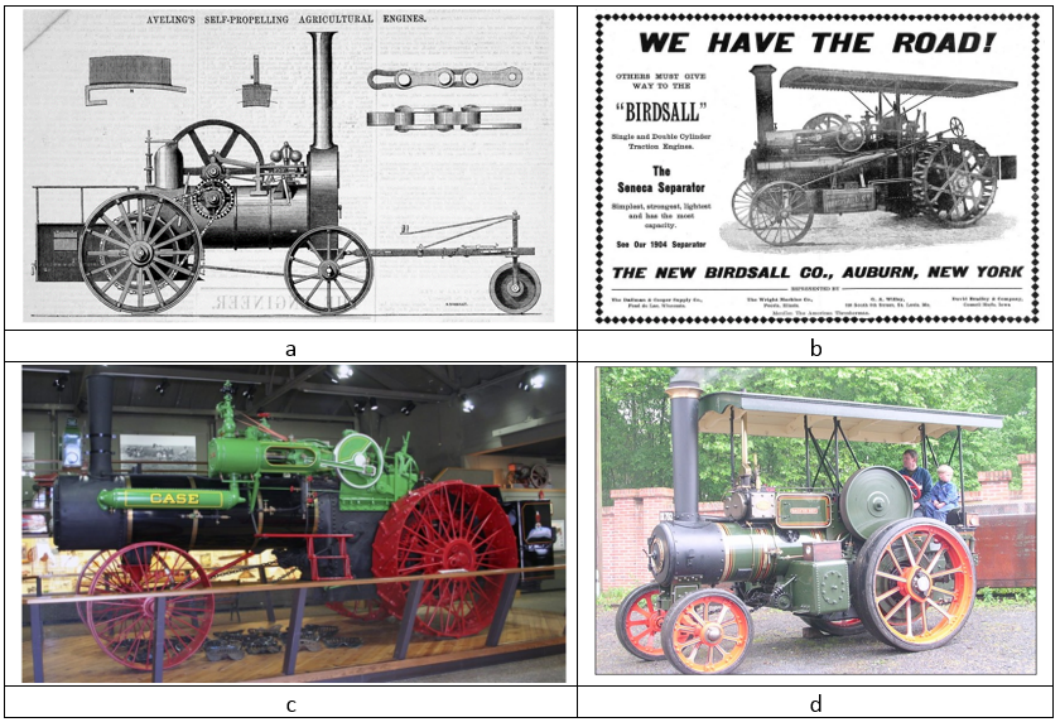
Bu çalışmada, farklı çalışma döngülerinde yakıt ekonomisi ve emisyonlar açısından traktör performansı simülasyonlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada, P2 hibrit çalışma modunda 3 silindirli bir içten yanmalı motor kullanılarak motorun küçültülmesi ile yakıt tüketimi ve CO_2 emisyonlarındaki iyileşme araştırılmış ve paralel hibrit konfigürasyonu için bir kontrol stratejisi geliştirilmiştir. Hibrit çalışma alanları ve içten yanmalı motor çalışma noktaları daha uygun alanlara taşınmıştır. Çalışmanın amacı, arazi özelliklerine bağlı olarak araç hızı ve talep edilen tork değeri temelinde bir EYTMY geliştirmektir. Tasarlanan EYTMY, sert ve yumuşak toprak koşullarında gerçek sürüş hız profilleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

2
TRAKTÖRLERİN GELİŞİMİ

Tarım sektöründe büyük değişimlere yol açan traktörlerin gelişimi, 19. yüzyılın sonlarında buhar gücüyle çalışan ilk modellerin icadıyla başladı. İnsan gücüne olan bağımlılığı azaltma ve tarımsal verimliliği artırma hedefiyle bu araçlar, zaman içinde sürekli olarak geliştirildi. İçten yanmalı motorların icadı ve traktörlerde kullanılması, traktörlerin daha yaygın ve kullanışlı hale gelmesini sağladı. 20. yüzyılın ortalarında ise traktörlere hidrolik sistemler, dört çeker tahrik sistemi, güç aktarmalı transmisyon sistemleri entegre edildi. Günümüzde ise hibrit, elektrikli ve otonom traktörler, sürdürülebilir tarımın öncüsü olarak üretim süreçlerini dönüştürmeye devam etmektedir.

2.1 Buharla Çalışan Traktörler

19. yüzyılda buharlı traktörlerin icadı, tarım tarihinde önemli bir dönüm noktası olmuştur. Buhar gücü, tarlaları sürmek ve ağır işleri yapmak için atlar ve öküzlere dayanan geleneksel yöntemlere kıyasla daha güçlü ve verimli bir alternatif sunmuştur. Ancak, buharlı traktörlerin büyük boyutları, karmaşık yapıları ve kazan patlaması riski gibi sorunları, çiftçiler arasında yaygın kullanımını engellemiştir. Yüksek maliyetleri de erişilebilirliğini sınırlamıştır. Buna rağmen, bu yenilik, tarımda mekanizasyonun ilk adımı olarak, modern tarım teknolojilerinin temelini atmış ve gelecekteki yeniliklere zemin hazırlamıştır [21] [22] [23]. Buharla çalışan traktör örnekleri Şekil 2.1' de gösterilmiştir [24] [21] [25] [26].



Şekil 2.1 Buharla Çalışan Traktör Örnekleri a-) Thomas Aveling ve Richard Porter tarafından 1860'larda İngiltere' de geliştirildi, b-) 19. yy sonlarında ABD'de New York'ta Birdsall Company tarafından üretildi, c-) 20.yy başlarında Case tarafından üretildi, d-) 1849 yılında Robert Ransome tarafından geliştirildi

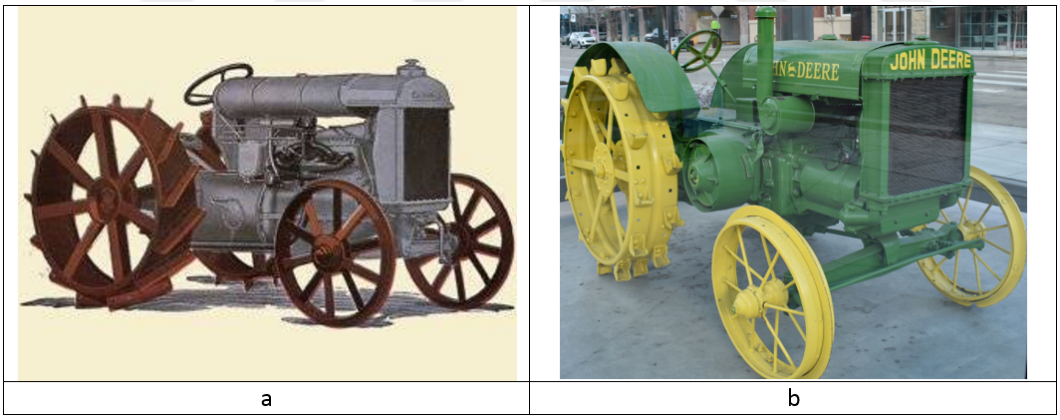
2.2 Benzin ve Dizel Yakıtla Çalışan Traktörler

19. yüzyıl sonlarında ve 20. yüzyıl başlarında, içten yanmalı motorların ortaya çıkması, tarımda mekanizasyonun bir dönüm noktası olarak görülmüştür. Bu motorların traktörlerde uygulanmaya başlaması çiftçilere daha düşük maliyetli ve pratik çözümler sunarak tarım makinelerinin yaygınlaşmasını hızlandırmıştır. İçten yanmalı motorlar, buhar makinelerine kıyasla daha güvenilir olmaları, yakıt tüketiminde daha verimli çalışmaları, daha az bakım gerektirmeleri ve traktöre daha iyi manevra kabiliyeti sunmaları nedeniyle çiftçiler tarafından daha çok benimsenmiştir.

1892 yılında Froelich, benzinli bir motor ile çekiş tahrik sistemini birleştirerek, içten yanmalı motorları traktörlerde ilk kez kullanan kişi olmuştur. Traktörde, şasiye monte edilmiş tek silindirli bir Van Duzen motor bulunuyordu ve bu motor, tahrik tekerleklerini devreye almak veya çıkarmak için bir debriyaj sistemiyle donatılmıştı. Bu tasarım, çiftçilere daha fazla kontrol imkânı sunarken, buharla çalışan makinelerde sıkça rastlanan kazaların riskini önemli ölçüde azalttı. Şekil 2.2'de Froelich tarafından geliştirilen traktör görseli paylaşılmıştır [27].

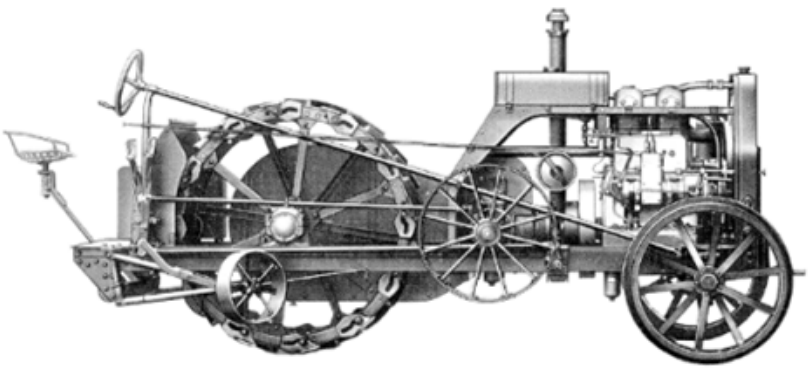
Şekil 2.2 1892 Yılında John Froelich Tarafından Geliştirilen İlk Benzinli Traktör

1920-1940 yılları, traktörlerin en önemli yeniliklerinin ortaya çıktığı ve bu makinelerin modern halini şekillendirdiği bir dönem olarak "Traktörlerin Altın Çağı" olarak adlandırılır [23]. Bu süreçte, John Deere ve Fordson gibi öncü firmalar, tarım makineleri tarihinde iz bırakan ikonik traktör modellerini geliştirmiştir [28] [29].



Şekil 2.3 a-) Henry Ford Tarafından Geliştirilen Fordson Model F Traktörü,
b-)John Deere Tarafından Geliştirilen Model D Traktörü

İçten yanmalı dört zamanlı dizel motor, ilk kez 1922 yılında Benz-Sendling S6 modelinde kullanılmıştır. Bu motor, kompresörsüz ön yanma odasına sahip iki silindirli bir tasarıma sahip olup, 135 mm silindir çapı ve 200 mm stroku ile 800 dev/dk'da 25 beygir güç üretebiliyordu [30]. Şekil 2.4'te traktör görseli paylaşılmıştır [31].



Şekil 2.4 Benz-Sendling S6 Traktör Modeli

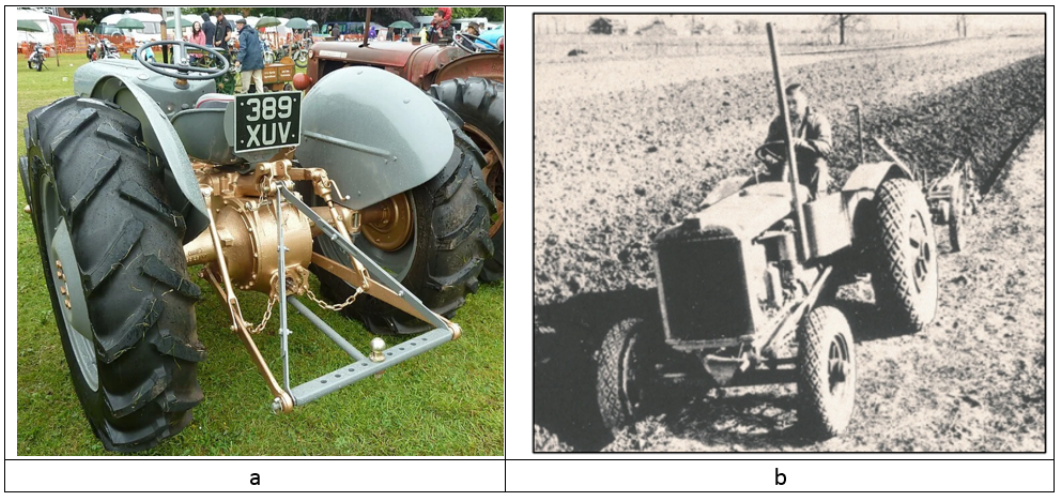
2.3 Traktörlerde Teknolojik Gelişmeler ve Modernizasyon

Traktörlerdeki teknolojik gelişmelerin en önemlilerinden biri, dizel motorların kullanılmaya başlanmasıdır. Dizel motorlar, daha iyi yakıt verimliliği, daha yüksek güç ve daha uzun motor ömrü sunarak traktörlerin performansını önemli ölçüde artırmıştır. 1918 yılında traktörlerde ilk 'Power Take-Off (PTO) olarak bilinen güç çıkışı entegre edilmiştir. Ana güç kaynağı olan dizel motordan ilaçlama, sulama, biçme makinesi gibi ekipmanlara harici güç iletmek için tasarlanan mekanizmadır. 'McCormick-Deering' firması tarafından 'Farmall' modeli traktörlerinde ilk PTO kullanımına ait görsel Şekil 2.5'te paylaşılmıştır [31].

Şekil 2.5 McCormick Deering Firması Tarafından Geliştirilen Farmall Traktör Modeli

1922 yılında çitçilerin operasyon sırasındaki manevra kabiliyetini arttırmak için 'Rogers Tractor' tarafından mafsallı hidrolik direksiyon kullanılmıştır. 1925 yılında Harry Ferguson tarafından tasarlanan ve patenti alınan 3 kollu askı sistemi geliştirilmiştir. Patentin temel amacı, tarımsal işler için kullanılan traktörlerin

ağırlığını azaltmak ve daha hafif makinelerle daha verimli işler yapılmasını sağlamaktır. Henry Ford, Ferguson sistemini 1938 yılında lisans anlaşması imzalayarak 9N modeli traktörüne uyarlamıştır [21].



Şekil 2.6 a-) Ferguson 35 Traktörlerinde 3 nokta askı sisteminin uygulanması, b-) Allis-Chalmers şirketi tarafından geliştirilen ilk kauçuk lastik uygulama örneği

1932 yılında Allis-Chalmers şirketi tarafından geliştirilen hava ile şişirilmiş kauçuk lastikler çelik jantların yerini aldı. 1935 yılında ABD' de üretilen traktörlerin yalnızca %14 ünde pnömatik lastikler varken, bu oran 1940 yılında %95 olmuştur. 1948 yılında hava soğutmalı dizel motor traktörlerde ilk kez Eicher tarafından kullanılmıştır. 1950 yılından itibaren tüm Deutz traktörlerinde bu motorlar kullanılmıştır. 1949 yılında MAN şirketi 4 çeker, direkt enjeksiyonlu dizel motorlu traktörünü tasarlamıştır. 1954 yılında International Harvester (IH) tarafından ABD'de geliştirilen Torque Amplifier, ilk Hi-Lo (yüksek-düşük hız seçimi) uygulamalarından biri olarak kabul edilir. Bu sistem, sürücüye traktörü çalıştırırken hareket halinde vites değiştirmeden düşük veya yüksek tork moduna geçme imkânı sunar. Özellikle 1950'li yıllarda IH traktörlerinde kullanılmış ve çiftçiler arasında büyük bir yenilik olarak karşılanmıştır. Torque Amplifier, sürücüye ağır işler sırasında daha fazla çekiş gücü, hafif işler sırasında ise daha fazla hız sağlayarak traktörün çok yönlülüğünü artırmıştır. 1958 yılında traktörlerde kullanmak üzere ABD ve Birleşik Krallık'ta 'Ford-Select-O-Speed' adında ilk tam güç aktarmalı şanzıman geliştirilmiştir. Bu şanzıman 10 ileri, 2 geri vites seçeneğine sahiptir. Bu sistem sayesinde operatör, traktör hareket halinde iken durmasına gerek kalmadan vites değiştirebilmektedir. Özellikle farklı hız gerektiren tarımsal operasyonlarda çiftçilere büyük esneklik kazandırmıştır. 1947 yılında traktörlerde kabin uygulamasının ilk örneklerinden birisi Harry Ferguson tarafından geliştirilen Ferguson TE20 modelidir. 1960 ve 1970 li yıllarda daha modern ısıtmalı, ses yalıtımlı kabinler uygulanmaya başlamıştır [31].

1990 yıllara gelindiğinde, birçok üretici firma tarafından üretilen yüksek hacim ve sabit özelliklere sahip traktörler yerine daha çok kullanıcı talebine göre şekillenen farklı teknik donanımlara sahip traktörlerin üretimi yaygınlaşmaya başlamıştır [31].

Aynı yıllarda, traktörlerin yaydığı kirletici egzoz gazı emisyonunu kontrol edebilmek adına ABD'de 1996 yılında ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından Tier 1 regülasyonu uygulamaya konulmuştur. Avrupa'da 1999 yılında Avrupa Birliğinin Stage 1 emisyon standardı uygulamaya konulmuştur. Bu standartlar, dizel motorlardan kaynaklanan karbon monoksit, hidrokarbonlar, azot oksitler ve partikül maddelerin azaltılmasına yöneliktir. 2000' li yıllardan sonra ilgili kurumlar tarafından bu regülasyonlar sıkılaştırılmış, traktör üreticileri bu zararlı egzoz gazı emisyonlarının etkilerini azaltabilmek amacıyla katalizör, partikül filtresi, indirgeyici gibi egzoz gazı arıtıcı sistemleri traktörlere entegre etmeye başlamışlardır.

Şekil 2.7'de Traktör üretici firmalar tarafından tasarlanan modern traktör örnek görselleri paylaşılmıştır [31].

Şekil 2.7 a-) John Deere 6R Serisi Traktör Modeli. Traktör gücü 77-184 kW @ 2100 d/dk b-) New Holland T7 Serisi Traktör Modeli. Traktör gücü 92-221 kW @ 2200 d/dk

2.4 Akıllı Tarımın Gelişimi, Traktörlerde Hibrit ve Elektrifikasyon Süreci

Modern traktörlerdeki mevcut gelişmeler, verimlilik açısından güncel teknolojinin sunduğu optimizasyon sınırlarına yaklaşmıştır. İklim değişikliği ve karbon salımını azaltılma gerekliliği, tarım sektöründe yenilikçi teknolojilere olan ihtiyacı arttırmıştır. Emisyon regülasyonlarının sıkılaştırılması, traktör üretici firmaları daha verimli ve düşük emisyona sahip alternatif güç sistemlerini geliştirmeye teşvik etmiştir. Bu bağlamda, hibritleşme ve elektrifikasyon sürecinin traktörlerde

çalışılmaya başlanması sürdürülebilir tarım uygulamaları için önemli gelişmedir [32].

Bunun yanında, gıda kıtlığının önüne geçebilmek ve gıda güvenliğinin sağlanabilmesi ülkeler için stratejik öneme sahiptir. Hibrit ve elektrikli traktörler sayesinde daha hassas ve optimize edilmiş enerji kullanımı ile tarım arazilerindeki üretim süreçleri iyileştirilebilir [32].

Akıllı tarım, dijitalleşme ve otomasyon terimlerinin hayatımıza girmesinin modern traktörlerde hibritleşme ve elektrifikasyon sürecini hızlandıracağı düşünülmektedir. Dijitalleşme sayesinde, traktörlerde kullanılan telematik sistemler, ISOBUS protokolleri ve sensör teknolojileri birleştirilerek toprak analizi, hassas ekim ve ilaçlama gibi işlemleri minimum enerji ile gerçekleştirilebilir. Otonom sürüş teknolojilerinin traktörlere entegre edilmesi ve yapay zekâ destekli kontrol sistemleri sayesinde traktörlerin kabiliyetleri genişletilerek, kullanıcıya bağlı hataların minimize edilmesi sayesinde tarımsal verimlilik arttırılabilir [32].

Batarya ömrü, performansı ve maliyeti, zorlu arazi şartları, arazide şarj istasyonuna erişim zorluğu gibi parametreler göz önünde bulundurulduğunda, traktörlerin elektrifikasyon sürecinin geleneksel içten yanmalı motor ve elektrik motorunun birleştirilmesi ile elde edilen hibrit sistemlerin orta vadede etkili bir çözüm olacağı öngörülmektedir [32].

Tablo 2.1' de üretici firmaların hibrit traktör uygulama örneklerinden bahsedilmiştir. Bahsedilen traktörlerin tamamı prototip seviyesinde olup, geliştirme aşamasındadır. Seri üretim olarak üretime geçmemiştir.

Tablo 2.1 Hibrit Traktör Uygulamaları

	Case firması tarafından üretilen ProHybrid EECVT modelidir. 2005 yılında Hannover'deki Agritechnica'da tanıtıldı. 120 kW gücünde bir dizel motor ile 800 Nm torka sahip iki adet 50 kW'lık elektrik motoru birleştirilerek dizel hibrit yapı elde edildi. Sistemin üretildiği fazla enerji, traktörün ön kısmına yerleştirilen yaklaşık 10.5 kWh kapasitesindeki bir bataryada depolanıyor [33].
	John Deere firması tarafından üretilen E-Premium modelidir. 2007 yılında Hannover'deki Agritechnica'da tanıtıldı. 20kW'lık bir jeneratör, jeneratör motorlarını ve tarımsal ekipmanları çalıştırmak için kullanıldı [34].
	Belarus ve Bosch firmaları tarafından iş birliği ile üretilen Belarus 3023 modelidir. 2009 yılında tanıtılmıştır. 220 kW dizel motor, 172 kW jeneratör ve elektrikli tahrik sistemi ile donatılmıştır. Ek olarak, elektrikle çalışan PTO mevcuttur [35].
	Rigitrac firması tarafından üretilen EWD 120 modelidir. 2011 yılında Agritechnica'da tanıtılmıştır. Her biri 3 kW gücündeki dört elektrikli tekerlek sürüş sistemi ile donatılmıştır. Tahrik gücü, 91 kW güçteki motora bağlı 85 kW'lık bir jeneratörden sağlanmaktadır [36].
	Fendt firması tarafından üretilen Fendt X-Concept modelidir. 2013 yılında Hannover'deki Agritechnica'da tanıtıldı. 4 litre 147 kW'lık dizel motor yerine elektrikli bir jeneratörle çalışmaktadır. Bu jeneratör, elektrikli ekipmanlar için 100 kW'a kadar güç üretebilmektedir [37].
	Carraro firması tarafından üretilen hibrit traktör modelidir. 2018 yılında İtalya'daki EIMA fuarında tanıtılmıştır. 55 kW dizel motor, 50 kW elektrik motoru ve 25 kW batarya sistemi kullanılmaktadır. Tam dizel, tam elektrik 50 kW'a kadar dizel-elektrik 75 kW'a kadar olmak üzere üç farklı modda çalışabilen paralel bir mimariye sahiptir [38].

3
HEDEF TRAKTÖR VE MOTORUN BELİRLENMESİ

Tarım mekanizasyonu, tarımsal işlemlerin makineler ve modern ekipmanlarla gerçekleştirilmesi sürecidir. Bu yaklaşım, geleneksel el işçiliğini azaltarak tarımda hız, verimlilik ve ürün kalitesini yükseltmeyi amaçlar. Mekanizasyon sayesinde, toprak işleme, ekim, hasat gibi işler daha etkin ve ekonomik bir şekilde yapılır, aynı zamanda doğal kaynaklar daha verimli kullanılır.

3.1 Tarımsal Mekanizasyonun Küresel Hedefleri

Tarımın mekanizasyonu, ülkelerin refahı ve kalkınması için kritik bir adım olarak tanımlanır. Bu misyon üç ana rol üstlenir [31].

3.1.1 Klasik Rol

Bitki ve hayvan üretimi, depolama ve işleme süreçlerinde mekanizasyon yoluyla, sürekli artan dünya nüfusunun beslenme ihtiyacını karşılamak olarak tanımlanabilir. Tarım mekanizasyonu kırsal tarımda iki ana verimlilik unsuruna katkı sağlar: toprak verimliliği ve iş gücü verimliliği.

Toprak Verimliliği: Mekanizasyon, bitki koruma, gübreleme, sulama, hasat sonrası işlemler gibi birçok alanda toprak verimliliğini artırır. Geleneksel yöntemlerle %20-30 olan ürün kayıpları, modern makineler sayesinde %1-2'ye kadar düşebilir. Bu sayede daha yüksek kalitede ve miktarda ürün elde edilirken, iş yükü ve kullanılan girdi miktarı da azalır.

İş Gücü Verimliliği: Mekanizasyon, iş gücü verimliliğinde en belirleyici faktördür. Örneğin, büyük bir traktör, aynı sürede 1000'den fazla işçinin yapabileceği kadar araziyi işleyebilir. Bu da tarımda verimliliği büyük ölçüde artırır.

3.1.2 Çevresel Rol

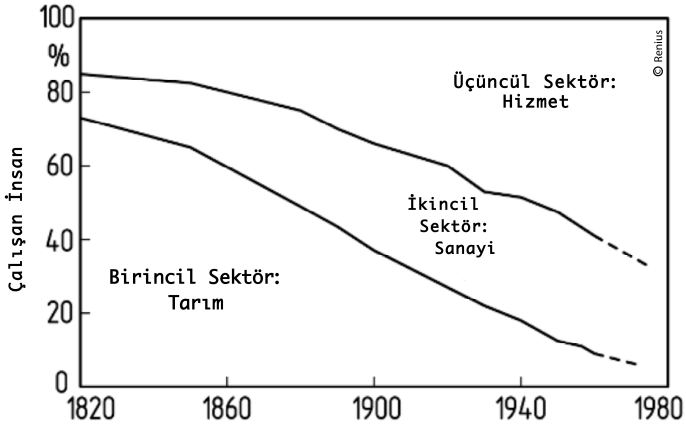
Tarımsal mekanizasyonun çevresel rolü, hammadde ve enerji üretiminde etkinlik sağlarken, doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunmayı amaçlar. Bu süreçte modern tarım makineleri ve teknolojilerinin kullanımı, doğal kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlar. Örneğin, hassas tarım uygulamaları sayesinde gübre ve pestisit gibi kimyasalların optimal dozlarda kullanılması mümkün olur, böylece kimyasal kirlilik azalır ve toprak sağlığı korunur.

Ayrıca, toprak işleme ve ekim işlemlerinde kullanılan makineler, toprak erozyonunu minimize edecek şekilde tasarlanmıştır. Yine sulama sistemlerinin mekanize edilmesi, su kaynaklarının daha verimli kullanılmasına olanak tanır, böylece su israfı azaltılır ve su kaynakları korunmuş olur. Enerji verimliliği yüksek tarım makineleri, fosil yakıt tüketimini azaltarak sera gazı salınımını düşürür ve iklim değişikliği ile mücadeleye katkıda bulunur.

Sonuç olarak, tarımsal mekanizasyon, çevresel sürdürülebilirliği destekleyerek tarımsal faaliyetlerin çevre üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirir ve gelecekteki tarım için daha sağlıklı bir ekosistem sağlar.

3.1.3 Stratejik Rol

Tarımda iş gücü verimliliğini artırarak, iş gücünü diğer sektörlere kaydırmak ve böylece ulusal ekonomiye değer katmak olarak tanımlanabilir.



Şekil 3.1 Amerika Birleşik Devletleri'nin Sektöre Göre Ekonomik Gelişimi

Şekil 3.1 Amerika Birleşik Devletleri'nde 1820'den 1980'e kadar farklı sektörlerdeki çalışan oranlarının değişimini göstermektedir [31]. Üç ana sektör olan tarım (birincil), sanayi (ikincil) ve hizmet (üçüncül) sektörlerindeki istihdam oranları, ülkenin ekonomik yapısının nasıl dönüştüğünü ortaya koyar.

Birincil Sektör (Tarım): 1820'lerde tarım sektörü, toplam iş gücünün büyük kısmını oluşturmaktadır. Ancak zamanla, tarım sektöründeki iş gücü oranı giderek azalır. 1980'e gelindiğinde, bu sektörde çalışan oranı %5'in altına düşmüştür. Bu düşüş, tarımda mekanizasyonun ve verimliliğin artmasıyla açıklanabilir; yani daha az iş gücüyle daha fazla üretim yapılabilmiştir.

İkincil Sektör (Sanayi): Sanayi sektörü 19. yüzyılın sonlarında ve 20. yüzyılın başlarında yükselişe geçmiştir. 1940'larda zirveye ulaşan sanayi sektörü istihdamı, sonrasında yavaş yavaş azalmaya başlar. Sanayi sektöründeki bu istihdam azalması, üretimde otomasyonun artması ve hizmet sektörünün genişlemesi ile ilişkilidir.

Üçüncül Sektör (Hizmet): 20. yüzyıl boyunca hizmet sektörünün istihdamdaki payı hızla artmış ve 1980'lerde toplam iş gücünün büyük çoğunluğunu oluşturmuştur. Hizmet sektörü, mekanizasyonun tarım ve sanayide yarattığı iş gücü fazlasını absorbe eden bir alan haline gelmiştir.

Amerika örneğinde, tarımda çalışanların %2'nin altında olmasına rağmen, üretim seviyeleri geçmişe göre çok daha yüksektir. Mekanizasyon, yoksulluk, düşük yaşam süresi, yüksek bebek ölümleri ve altyapı eksikliği gibi sorunlarla mücadelede ilk adım olarak görülmektedir.

3.2 Türkiye'de Tarımsal Mekanizasyon Düzeyi

Bir ülkenin tarımsal mekanizasyon seviyesini ortaya koymada traktör varlığının miktarı ve özellikleri, yıllar içerisindeki değişim trendi, tarımsal iş makineleriyle bağlantısı, hektar başına düşen traktör sayısı ve traktörlerin güç kapasiteleri gibi kriterler oldukça önemlidir [39]

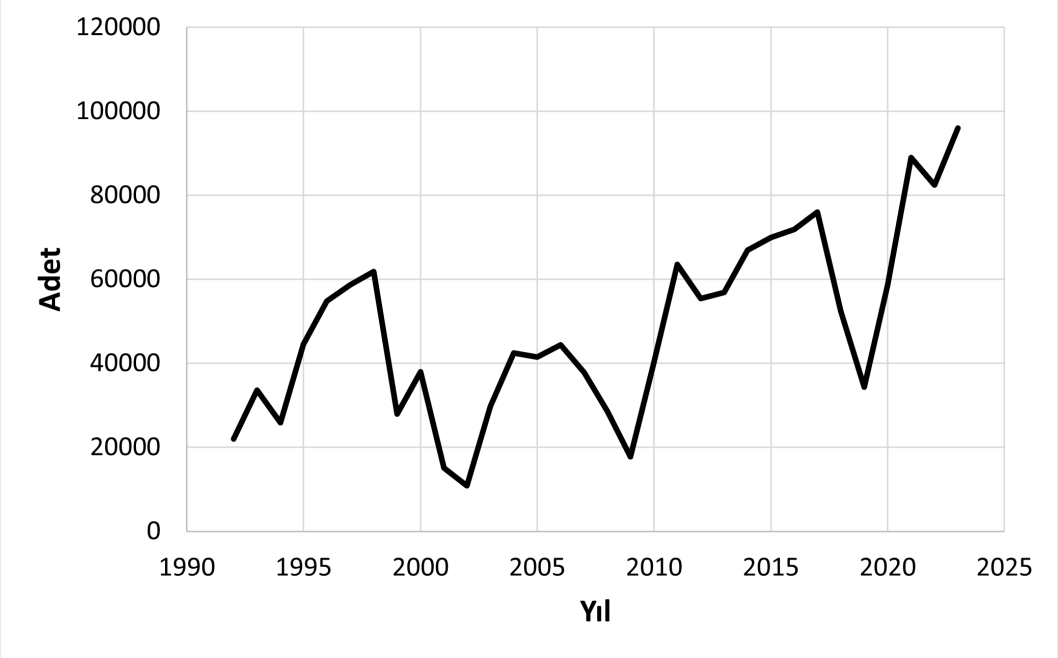
Türkiye'de traktör imalatının yıllara göre değişimi Şekil 3.2'de grafik olarak paylaşılmıştır [40]. Traktör imalatı (Adet) grafiği, Türkiye'deki traktör üretiminin zaman içindeki dalgalanmalarını ve genel eğilimlerini göstermektedir. 1992 yılında 22.011 adet traktör üretilmişken, bu sayı 1996'da 54.819'a ulaşmıştır. Bu dönemdeki artış, büyük ölçüde Türkiye'nin tarımsal mekanizasyona yönelik politikaları ve çiftçilerin modern ekipmanlara erişimini kolaylaştıran teşviklerle ilişkilendirilebilir. Ancak, bu artış trendi, ekonomik krizlerin etkisiyle zaman zaman kesintiye uğramıştır.

Özellikle, 2001 yılında yaşanan ekonomik kriz, traktör üretimini ciddi şekilde etkilemiştir. Bu kriz, tarımsal girdi fiyatlarının yükselmesine ve çiftçilerin yeni ekipman alımında zorlanmasına yol açmıştır. Üreticiler de bu talep daralmasına

paralel olarak üretimlerini kısmak zorunda kalmıştır. Aynı şekilde, 2008 küresel ekonomik krizinin etkilerinin Türkiye'de hissedildiği 2009 yılında da traktör üretiminde belirgin bir düşüş yaşanmıştır. Bu dönemde, global finansal sıkıntılar tarımsal kredilere erişimi zorlaştırmış ve çiftçilerin alım gücünü sınırlamıştır.

Türkiye ekonomisi 2018'in sonlarında başlayan finansal dalgalanmalardan etkilenmiştir. Döviz kurundaki hızlı artış, yüksek enflasyon ve finansal piyasaların istikrarsızlığı gibi unsurlar, tarım sektöründe maliyetlerin yükselmesine yol açmıştır. Özellikle ithal tarım makineleri ve ekipmanlarının maliyetlerindeki artış, traktör fiyatlarını da yukarı çekmiştir. Bunun yanında, çiftçilerin gelirlerinde düşüş yaşanması, kredi faiz oranlarının artması ve tarımsal üretim girdilerinin (mazot, gübre gibi) maliyetlerinin yükselmesi, çiftçilerin yeni traktör alımını sınırlayan diğer faktörler arasında yer almıştır. Ayrıca, 2019 yılında küresel ekonomik büyümenin yavaşlaması ve tarımsal ürün fiyatlarının durağan seyretmesi de talepteki daralmayı tetiklemiştir.

Tüm bu unsurların bir araya gelmesi, traktör üretiminde talep kaynaklı bir gerilemeye neden olmuştur. Ancak 2020 ve sonrasında toparlanma sinyalleri görülmüş ve üretim rakamları yeniden yükselişe geçmiştir.

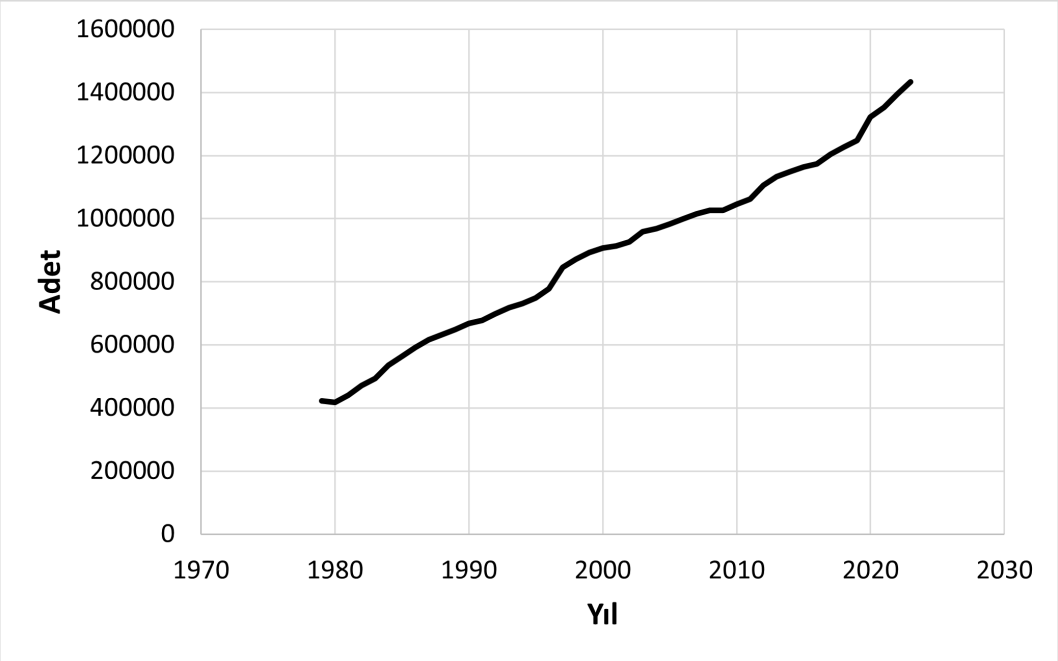


Şekil 3.2 Türkiye'de Traktör İmalatının Yıllara Göre Değişimi

Türkiye'de tarımsal mekanizasyonun yaygınlaşmasını ve traktör sayısındaki uzun vadeli değişimleri Şekil 3.3'te sayısal verilerle göstermektedir [40]. Özellikle 1979 yılında traktör parkı 421.800 adet olarak kaydedilmişken, sonraki yıllarda bu sayı istikrarlı bir şekilde artmıştır.1980 yılında traktör parkı, 417.849 adede

düşerek küçük bir gerileme yaşamıştır. Ancak bu düşüş, 1981 yılından itibaren tersine dönmüş ve traktör sayısı hızla artarak 1982 yılında 471.493, 1983 yılında ise 493.029 adede ulaşmıştır. 1990'lı yıllara gelindiğinde traktör parkı yaklaşık 700.000 adet seviyesine ulaşmıştır. Bu artış, 2000'li yıllarda da devam etmiş ve 2010 yılında traktör parkı 1.000.000 adedi aşmıştır.

Sonraki dönemde, traktör parkında her yıl yaklaşık %2-3 oranında artış gözlenmiştir. Örneğin, 2015 yılında traktör parkı yaklaşık 1.760.000 adet iken, 2020 yılında bu sayı 2.100.000 adede ulaşmıştır. Bu artış, tarımsal mekanizasyona yönelik yatırımların arttığını ve çiftçilerin daha modern ekipmanlar kullanmaya yöneldiğini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 3.3 Türkiye'deki Traktör Sayısının Yıllara Göre Değişimi

Türkiye'deki traktörlerin yaşa göre dağılım grafiği Şekil 3.4'te verilmiştir [40]. Grafik, traktör parkının yaşa göre önemli bir bölümü olan 1-24 yaş aralığında 1.037.237 adet (%49,74) traktör bulunduğunu, bununla birlikte 25 yaş ve üzeri traktör sayısının 1.047.963 adet olduğunu (%50,26) göstermektedir. Yaş ortalaması ise 25,5 yıl olarak belirtilmiştir.

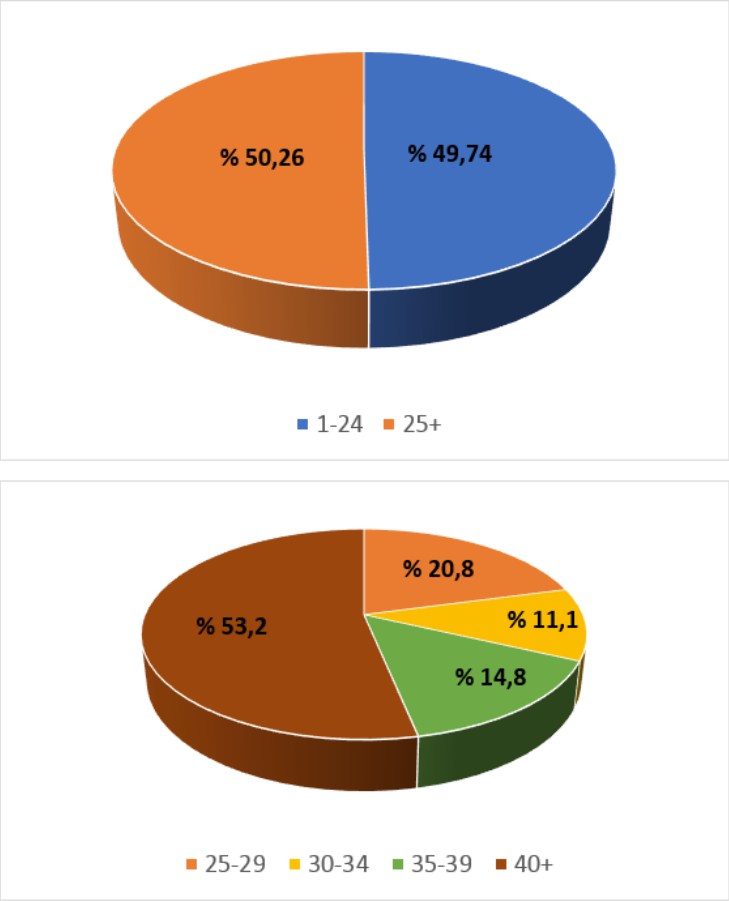
Bir traktörün mekanik ömrü genellikle 10.000 ile 12.000 saat arasında değişmektedir. [41]. Ortalama bir traktörün yıllık 500-600 saat kullanıldığı düşünüldüğünde, mekanik ömrünü tamamlama süresi yaklaşık 20 yıl olarak hesaplanabilir.

1-24 yaş aralığındaki traktörler: Bu grup, çoğunlukla mekanik ömrünün içinde veya ömrünü tamamlamak üzere olan traktörleri içermektedir. Ancak bu grubun daha

genç yaş dilimleri (örneğin 1-10 yaş) genellikle daha verimli çalışmaktadır.

25 yaş ve üzerindeki traktörler: Mekanik ömrünü büyük ölçüde tamamlamış traktörlerden oluşur. Bu gruptaki traktörlerin önemli bir kısmının ya sık bakım gördüğü ya da modernize edilerek kullanıldığı söylenebilir. Ayrıca, bu yaş grubundaki traktörlerin düşük verimlilikte çalışması ve daha yüksek bakım maliyetleri oluşturması muhtemeldir.

Traktör parkının yaş ortalamasının 25,5 yıl olması, Türkiye'deki traktörlerin önemli bir kısmının teknolojik ve mekanik olarak eskidiğine işaret eder. Mekanik ömrünü tamamlamış traktörlerin yaygın olması, yakıt tüketimi, verimlilik ve emisyon açısından tarım sektörünü olumsuz etkileyebilir. Bununla birlikte, bu traktörlerin yerini daha modern ve verimli makinelerle değiştirme sürecinin hızlandırılması, tarımsal üretimde hem maliyetlerin düşürülmesine hem de çevresel etkilerin azaltılmasına katkıda bulunabilir.

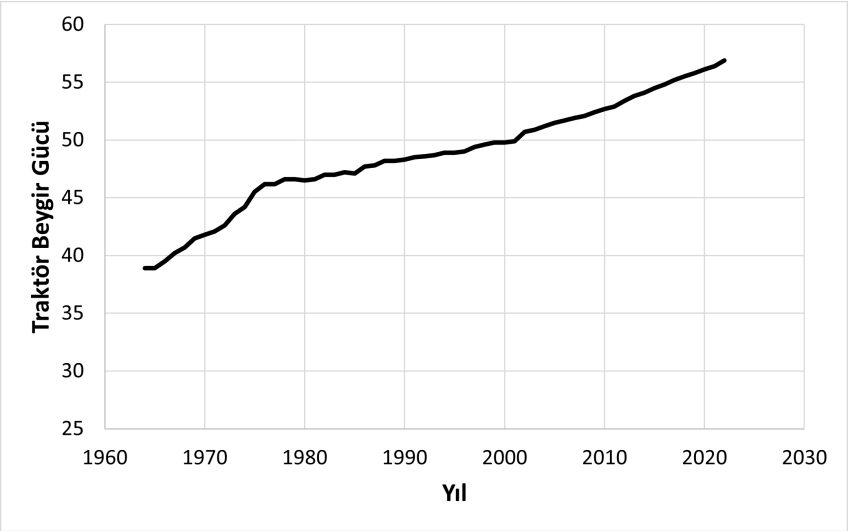


Şekil 3.4 Türkiye'deki Traktörleri Yaş Ortalaması

1964 yılında ortalama traktör gücü 38,9 BG olarak kaydedilmiştir. Bu dönemde küçük ve orta ölçekli tarım faaliyetleri için bu güç yeterli kabul edilmekteydi. 2000 li yılların başında ortalama traktör gücü 48,9 BG'ye yükselmiştir. 36 yılda

10 BG'lik bir artış (%25) gerçekleşmiştir. Bu, tarım makinelerinin ağırlaşması ve büyük ölçekli tarım faaliyetlerinin artmasıyla ilişkilendirilebilir. 2022 yılında ortalama traktör gücü 56,9 BG'ye ulaşmıştır. 1994'ten itibaren geçen 28 yılda ortalama gücün 8 BG arttığı görülmektedir. Bu, %16'lık bir artışı temsil eder ve daha güçlü traktörlere olan talebin sürdüğünü göstermektedir.

Türkiye' deki traktörlerin beygir gücü ortalamasının yıllara göre değişimi Şekil 3.5'te gösterilmiştir [40]. 1964'ten 2022'ye kadar geçen sürede traktör parkının ortalama gücü yaklaşık 18 BG artarak %46'lık bir büyüme sergilemiştir. Bu artış, özellikle modern tarımsal uygulamalarda ihtiyaç duyulan yüksek çekiş gücü ve ekipman desteğinin önemini yansıtır.

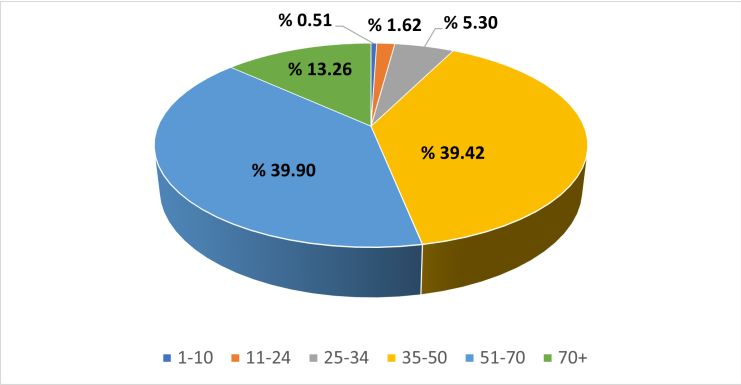


Şekil 3.5 Türkiye'deki Traktörlerin Beygir Gücü Ortalamasının Yıllara Göre Değişimi

Traktörlerin beygir gücü dağılımı grafiği Şekil 3.6'te verilmiştir [40]. Grafik, farklı beygir gücü aralıklarına sahip traktörlerin sayısındaki değişimi göstermektedir. En fazla kullanılan traktör aralığının 35-50 BG ve 51-70 BG olduğu görülmektedir. Bu aralıkların yıllar boyunca istikrarlı bir şekilde artması, tarımda orta düzey güce sahip traktörlerin yaygın olarak tercih edildiğini göstermektedir.

Türkiye'de tarım aletlerinin kullanım oranı Şekil 3.7'te gösterilmiştir [40]. Grafik, çiftçilerin kullandığı ekipmanların üretim ve kullanım trendlerini göstermektedir. Veriler, özellikle kulaklı traktör pulluğu ve römork gibi temel tarım ekipmanlarının çiftçiler arasında yaygın şekilde tercih edildiğini ortaya koymaktadır.

Kulaklı Traktör Pulluğu: 2013 yılında 410.324 adet olarak kaydedilen bu ekipman, 2023 yılına kadar belirgin bir artışla 530.210 adede ulaşmıştır. Bu %29'luk artış, pullukların temel toprak işleme aracı olarak tarımda vazgeçilmez olduğunu ve çiftçilerin bu ekipmanlara olan talebinin sürdüğünü göstermektedir. Kulaklı

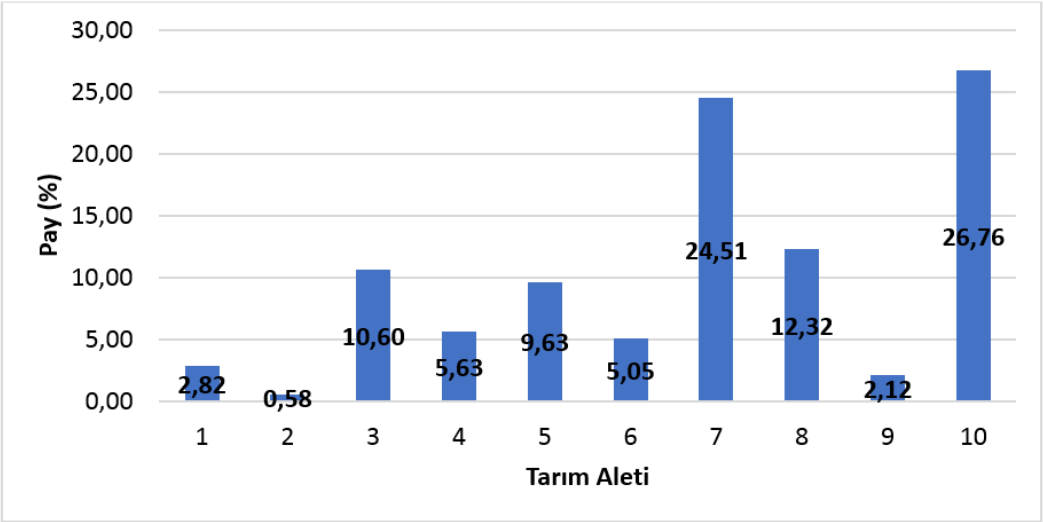


Şekil 3.6 Türkiye'deki Traktörlerin Beygir Gücüne Göre Dağılımı

pulluk, özellikle Türkiye'nin tarımsal toprak yapısına uygun olması nedeniyle tercih edilmektedir.

Römork: 2013 yılında 510.612 adet olan römork sayısı, 2023 yılında 612.478 adede çıkarak yaklaşık %20'lik bir artış göstermiştir. Römorkların tarımda taşımacılık faaliyetlerinde kullanımı yaygındır ve çiftçiler için olmazsa olmaz bir ekipman olmayı sürdürmektedir. Artan üretim miktarı, tarımsal faaliyetlerin çeşitliliği ve genişliği ile doğrudan ilişkilidir.

Bu iki ekipmanın üretim ve kullanımındaki artış, tarımda temel işleme ve taşıma faaliyetlerinin önemini yansıtmaktadır. Çiftçilerin, bu ekipmanlara olan talebinin devam edeceği ve bu tür ekipmanların tarım sektörünün modernizasyonunda öncelikli olacağı öngörülmektedir.



1-Atomizör, 2-Balya Makinesi, 3-Damla Sulama Makinesi, 4-Diskli Tırmık, 5- Kimyevi Gübre Dağıtma Makinesi, 6- Kombine Hububat Ekim Makinesi, 7- Kulaklı Traktör Pulluğu, 8- Kültivatör, 9-Merdane, 10-Römorkor

Şekil 3.7 Türkiye'deki Tarım Aletlerinin Kullanımı Oranı

Tablo 3.1'de Türkiye'deki traktörlerin güçlerine göre satış adetleri gösterilmiştir [40].

Tablo 3.1 Türkiye'deki Traktörlerin Güçlerine Göre Satış Adetleri

Güç (BG)	**Yıl**							**Toplam**
	2017	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	
<50	3892	2115	1419	2189	2819	3206	2967	18607
50-59	21944	13578	7805	14880	17617	15726	13891	105441
60-69	13135	7148	3657	6905	8249	7868	11150	58112
70-79	10442	7408	4290	6807	10020	13736	16619	69322
80-89	7279	5341	2311	4280	5902	4475	5480	35068
90-99	7572	5661	3027	6265	8219	6769	9366	46879
100-119	6633	5427	2432	4978	7965	11693	12911	52039
>120	965	774	592	1517	2386	2779	4870	13883
Toplam	71862	47452	25533	47821	63177	66252	77254	

3.3 Hedef Traktör ve Motorun Belirlenmesi

Bu çalışmanın temel amacı, performanstan ödün vermeden daha düşük yakıt tüketimi sağlayan ve karbon ayak izini azaltan bir hafif hibrit sistemin geliştirilmesidir. Çalışma kapsamında, traktörlerin bir sonraki teknolojik gelişim aşaması olarak öngörülen hafif hibrit sistemlerin entegrasyonu ele alınacaktır. Hafif hibrit sistemlerin tarımsal operasyonlardaki uygulanabilirliği ve sağladığı avantajlar, test ve simülasyon çalışmaları aracılığıyla analiz edilecektir.

Bu çalışma için nasıl bir traktör seçilmesi gerektiği sorusuna yanıt aradığımızda, Türkiye'deki traktör kullanım istatistiklerini ve bu istatistiklerin ortaya koyduğu eğilimleri incelemek yol gösterici olmaktadır. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi, Türkiye'de traktör kullanım sayısı düzenli bir artış eğilimi göstermektedir. Bu artış, tarımsal mekanizasyona olan talebin ve çiftçilerin modern ekipmanlara yöneliminin sürekli bir şekilde arttığını göstermektedir. Ancak yalnızca traktör sayısındaki artış değil, aynı zamanda bu traktörlerden talep edilen güç seviyelerindeki değişimler de dikkatle incelenmelidir.

Şekil 3.5'te görüldüğü üzere, kullanılan traktörlerdeki beygir gücü talebi yıllar içinde düzenli bir artış göstermektedir. Şekil 3.6'te ise, mevcut durumda traktör talebinin en yoğun olduğu aralığın 50-70 BG olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, bu çalışmanın ileriye dönük bir perspektif sunduğunu göz önünde bulundurduğumuzda, pazardaki yüksek beygir gücü ihtiyacının ilerleyen yıllarda daha da artacağını öngörmek mümkündür. Bu durum, Tablo 1'de yer alan yıllara ve güç seviyelerine göre traktör satış adetlerinden de anlaşılmaktadır. Örneğin,

2017 yılında traktör satışlarının yaklaşık %30'unu oluşturan 50-59 BG aralığındaki modellerin oranı, 2023 yılına gelindiğinde %18 seviyelerine gerilemiştir. Buna karşılık, 70-79 BG aralığındaki traktörlerin satış oranı aynı dönemde %14'ten %21'e yükselmiştir. Bu veriler, tarım sektöründe daha yüksek kapasiteli ve güçlü traktörlere olan talebin giderek arttığını açıkça göstermektedir.

Bu veriler ışığında, çalışmada kullanılacak traktörün seçiminde yalnızca mevcut pazar ihtiyaçları değil, gelecekte artacak talepler de dikkate alınmalıdır. Traktör talebindeki güç eğilimlerini anlamak ve buna uygun bir model seçmek, çalışmanın sonuçlarının uygulanabilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. İleriye dönük bu bakış açısıyla, çalışma kapsamında kullanılacak traktörün seçimi, mevcut durumun ötesine geçerek gelecekteki tarımsal gereksinimlere yönelik bir çözüm sunmayı hedeflemektedir.

Bu çalışma kapsamında belirlenen traktör, gelecekteki artması öngörülen güç talebi de dikkate alınarak seçilmiştir. Tarım sektöründe artan iş yükü ve genişleyen tarımsal alanların daha güçlü traktörlere olan gereksinimi artırdığı gerçeği göz önünde bulundurulmuştur. Bu bağlamda, konvansiyonel traktör olarak TÜMOSAN firmasına ait 4 silindirli ve 95 beygir gücündeki bir traktör tercih edilmiştir. Stage 5 emisyon standartlarına uygun olan bu traktörde, egzoz arıtma sistemi olarak DOC (Dizel Oksidasyon Katalizörü), DPF (Dizel Partikül Filtresi) ve SCR (Seçici Katalitik İndirgeme) üniteleri kullanılmaktadır.

Hibrit konsept traktör çalışması kapsamında, TÜMOSAN firmasına ait 3 silindirli ve 75 beygir gücünde bir traktör tercih edilmiştir. Stage 5 emisyon standartlarına uygun olan bu traktörde, egzoz arıtma sistemi olarak DOC ve DPF üniteleri bulunmaktadır. Bu traktöre bir elektrik motoru ve batarya sistemi entegre edilerek, 95 beygir gücündeki konvansiyonel traktörle eşdeğer performansa sahip bir hibrit sistem oluşturulması hedeflenmiştir.

Yapılacak test ve simülasyon çalışmaları, sahadaki gerçek kullanım koşullarını modelleyerek hem konvansiyonel hem de hibrit traktörlerin çekiş performansı, yakıt tüketimi ve karbon emisyon salımını karşılaştırmayı hedeflemektedir. Bu çalışmalar kapsamında elde edilecek bulgular, hafif hibrit teknolojilerin tarımsal mekanizasyona entegrasyonu konusunda önemli bir öngörü sağlayarak, bu alandaki gelecekteki teknolojik gelişmeler için yol gösterici olacaktır.

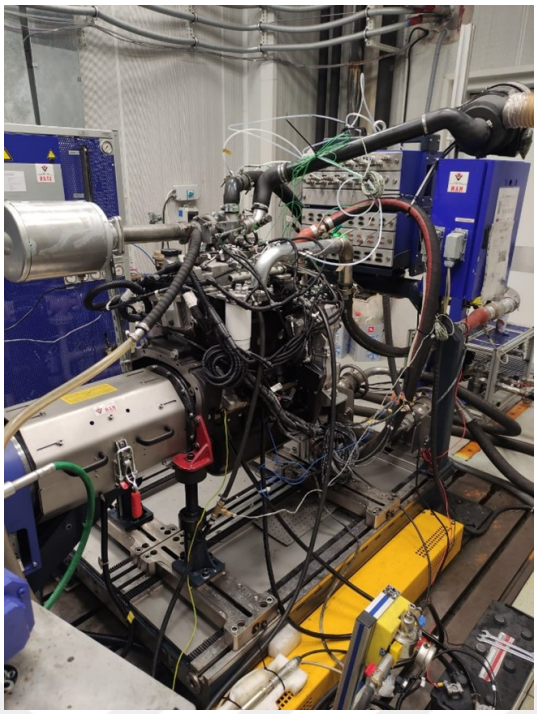
4
TEST ÇALIŞMALARI

4.1 İçten Yanmalı Motor Test Çalışmaları

Hafif hibrit traktör konsepti ile konvansiyonel traktörü yakıt tüketimi ve emisyon salımı açısından kıyaslayabilmek ve simülasyon çalışmaları kapsamında kurulacak olan taşıt modellerinde motor kısmını modelleyebilmek için 3 ve 4 silindirli dizel motorlar motor test dinamometresine bağlanmıştır. Aktif dinamometre sayesinde farklı motor hızı ve pedal değerleri için güç, tork, yakıt tüketimi ve emisyon değerleri ölçülmüştür.

4.1.1 İçten Yanmalı Motor Dinamometre Test Hazırlıkları

Motor testleri TÜBİTAK RUTE Motor Mükemmeliyet Merkezinde bulunan, tam akreditasyonlu test odalarında gerçekleştirilmiştir. Motor ve dinamometre bağlantısı bir şaft yardımıyla yapılmıştır. Motorların performans ve emisyon testleri ISO 1585 standardı referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Test odası, standartta belirtilen ortam şartlarına (Sıcaklık, Basınç, Nem) iklimlendirme sistemi sayesinde şartlandırılmıştır. Testlerde TSE EN 590 standardına uygun motorin yakıt kullanılmıştır. Motor emiş havası, soğutma suyu ve yakıt sıcaklığı testler sırasında standartta belirtilen sıcaklık değerlerine şartlandırma cihazları ile birlikte şartlandırılmıştır. Şekil 4.1' de motor test odası bağlantısı paylaşılmıştır.



Şekil 4.1 Motor Test Odası Bağlantısı

Testler sırasında kullanılan sensör ve ekipmanlar aracılığıyla tork, sıcaklık, basınç, debi gibi parametreler motorun her bir çalışma noktasında ölçülmüş ve kayıt altına alınmıştır. Tablo 4.1'de kullanılan sensör ve ekipmanların detaylı bilgileri verilmiştir.

Tablo 4.1 Sensör ve Ekipman Listesi

	Cihaz	**Model**	**Set Değer**
1	Dinamometre	AVL Dyno Road 402	-
2	Soğutma Suyu Şartlandırma	AVL Consycool	80 °C
3	Emiş Havası Sıcaklığı Şartlandırma	AVL ConsysBoost	50 °C
4	Yakıt Sıcaklığı Şartlandırma	AVL 753C	40 °C
5	Yakıt Debisi Ölçümü	AVL 735	-
6	Hava Debisi Ölçümü	AVL FSA 100	-
7	Su Debisi Ölçümü	RSTLD-500	-
8	Sıcaklık Sensörleri	K-Tipi Termokupl	-
9	Basınç Sensörleri	AVL Relatif Basınç Sensör	-
10	Emisyon Cihazları	AVL AMA i60	-
11	Sistem Otomasyonu	AVL Puma 2	-

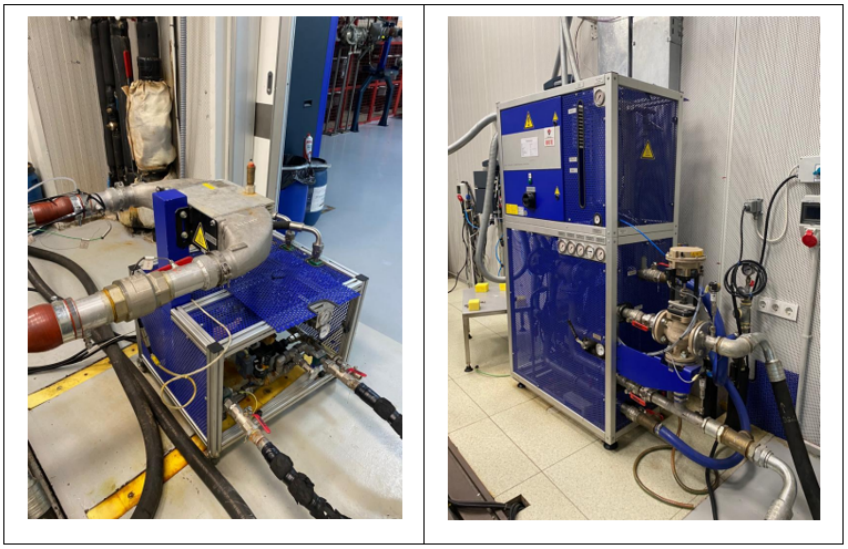
Testler sırasında motorun devir ve yük kontrolünü yapmak; motor hızı, güç, tork, yakıt tüketimi, sıcaklık, basınç ve debi gibi parametrelerin değerlerini anlık olarak takip edip, kayıt altına alabilmek için AVL Puma 2 test sistem otomasyonu kullanılmıştır.

Şekil 4.2 AVL Puma 2 Test Sistem Otomasyonu

Motoru istenilen hızda çalıştırmak ve motorun farklı devir ve pedal pozisyonlarında ürettiği tork değerlerini ölçmek amacıyla 440 kW maksimum güç ve 934 Nm maksimum tork kapasitesine sahip bir aktif dinamometre kullanılmıştır.

Şekil 4.3 AVL Dyno Road 402 Aktif Dinamometre

Motor emiş havası sıcaklığını şartlandırmak için AVL ConsyBoost sistemi, soğutma suyu sıcaklığını şartlandırmak için AVL Consyscool sistemi kullanılmıştır.



Şekil 4.4 Emiş Havası ve Soğutma Suyu Şartlandırma Sistemleri

Motorun yakıt sıcaklığını standartta belirtilen referans değerde sabit tutabilmek için AVL 753C cihazı, tüketilen yakıt miktarını ölçmek için AVL 735 cihazı kullanılmıştır.

Şekil 4.5 Yakıt Sıcaklığı Şartlandırma ve Yakıt Tüketim Ölçüm Sistemi

Motorun intercooler (ara soğutucu) ve radyatör (soğutma suyu soğutucu) aracılığıyla attığı ısı miktarını belirlemek ve dizel motorlar için kritik öneme sahip hava fazlalık katsayısı (lambda) değerini hesaplayabilmek amacıyla hava debisi AVL FSA 100 cihazıyla, su debisi ise RSTLD-500 cihazlarıyla ölçülmüştür.

Şekil 4.6 Hava ve Su Debimetreleri

Motorun farklı çalışma şartlarında çevreye yaydığı kirletici egzoz gazı emisyonları ölçümleyebilmek için AVL AMA i60 cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz kombine egzoz gazı emisyon ölçüm sistemidir. İçerisinde bulunan FID, CLD, IRD vb analizörler ile THC, CH_4, CO, NO_x, CO_2 ve O_2 gazları ölçülmektedir.

Şekil 4.7 AVL AMA i60 Egzoz Gazı Emisyon Ölçüm Cihazı

4.1.2 4 Silindirli 95 BG Dizel Motor Dinamometre Testleri

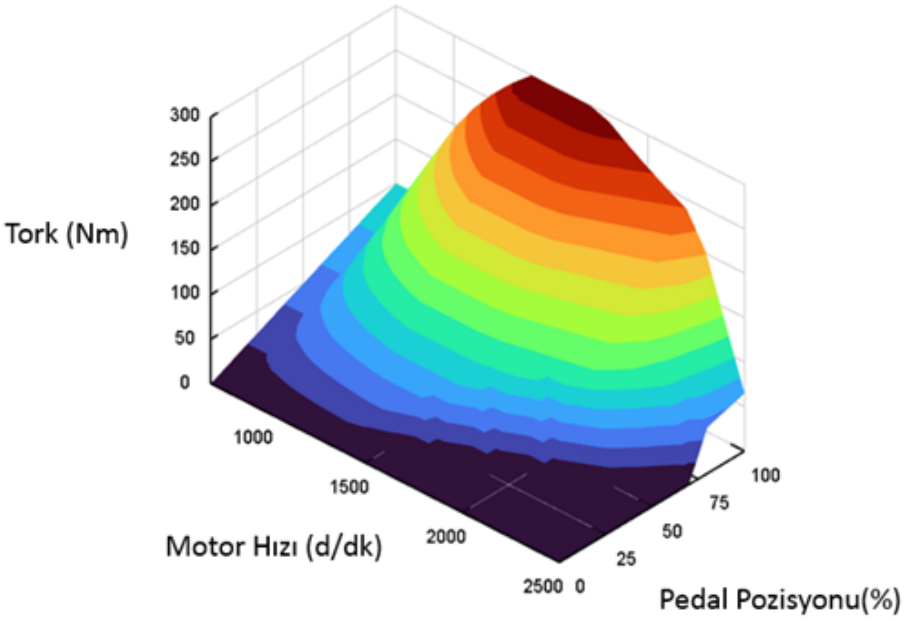
Bu çalışmada, Tümosan tarafından yerli imkanlarla geliştirilen, başta traktör olmak üzere, endüstriyel, marin, jeneratör projelerinde de kullanılan 4 silindirli 95 BG, Stage 5 emisyon seviyesine sahip dizel motor kullanılmıştır. Motora ait teknik özellikler Tablo 4.2'de içerisinde gösterilmiştir.

Şekil 4.8 4 silindirli 95 BG İçten Yanmalı Dizel Motor

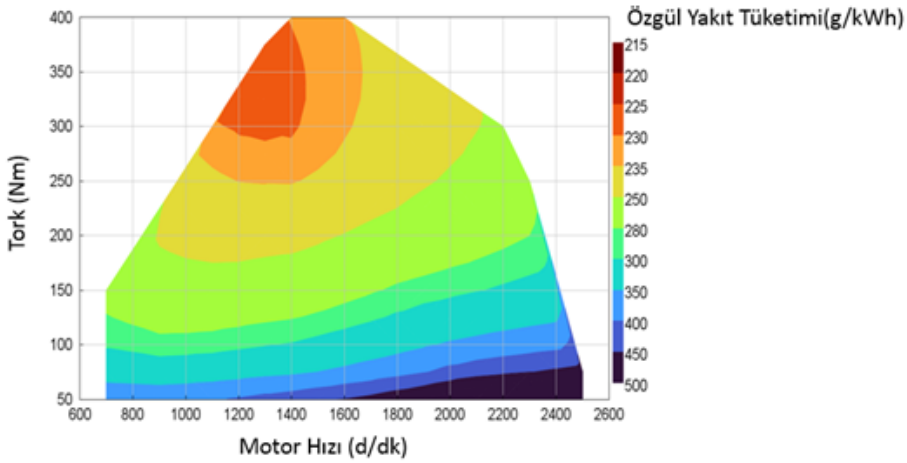
Tablo 4.2 4 silindirli 95 BG Motor Teknik Özellikleri

Çap	104 mm
Strok	115 mm
Silindir Sayısı	4
Toplam Motor Hacmi	3,9 litre
Maksimum Güç	95 BG @ 2200 d/dk
Maksimum Tork	400 Nm @ 1500 d/dk
Aspirasyon	Turboşarj
Yakıt Sistemi	Common Rail
Emisyon Sistemi	DOC + DPF + SCR
Emisyon Seviyesi	Stage 5

Motorun dinamometreye şaft ile bağlantısı yapıldıktan sonra, aktif dinamometre ile birlikte farklı motor hızı ve pedal pozisyonları için ürettiği tork ve yakıt tüketimi değerleri ölçülmüş ve motor haritaları oluşturulmuştur.



Şekil 4.9 4 Silindirli 95 BG Motor Tork Haritası



Şekil 4.10 4 Silindirli 95 BG Motor Özgül Yakıt Tüketim Haritası

4.1.3 3 Silindirli 75 BG Dizel Motor Dinamometre Testleri

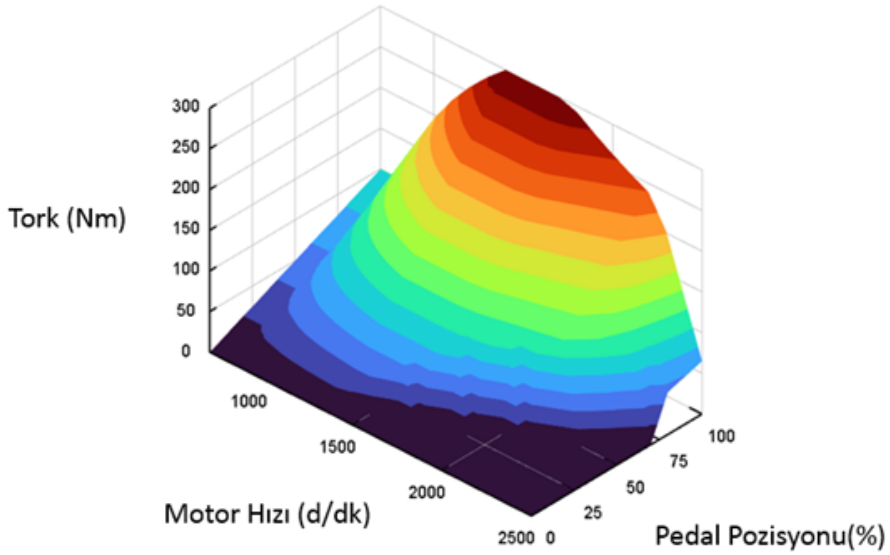
Bu çalışmada, Tümosan tarafından yerli imkanlarla geliştirilen, başta traktör olmak üzere, endüstriyel, marin, jeneratör projelerinde de kullanılan 3 silindirli 75 BG, Stage 5 emisyon seviyesine sahip dizel motor kullanılmıştır. Motora ait teknik özellikler Tablo 4.3 içerisinde gösterilmiştir.

Şekil 4.11 3 Silindirli 75 BG İçten Yanmalı Dizel Motor

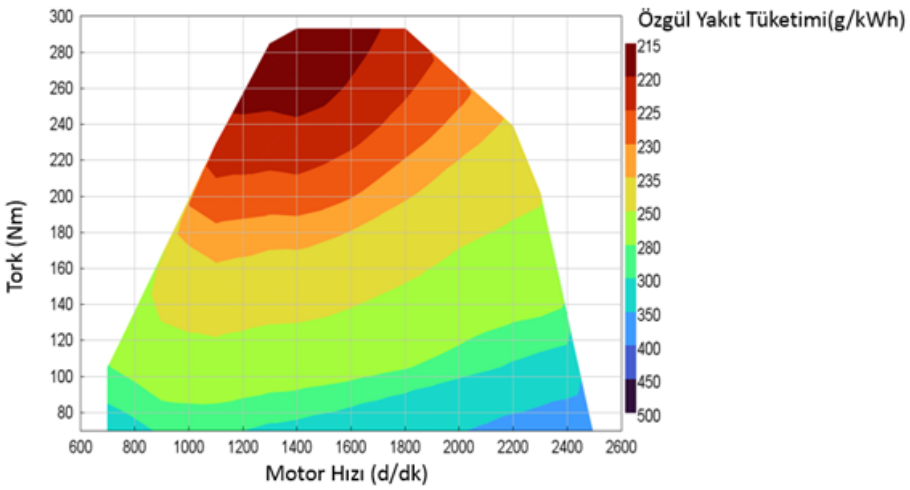
Tablo 4.3 3 silindirli 75 BG Motor Teknik Özellikleri

Çap	104 mm
Strok	115 mm
Silindir Sayısı	3
Toplam Motor Hacmi	2,9 litre
Maksimum Güç	75 BG @ 2200 d/dk
Maksimum Tork	300 Nm @ 1500 d/dk
Aspirasyon	Turboşarj
Yakıt Sistemi	Common Rail
Emisyon Sistemi	DOC + DPF
Emisyon Seviyesi	Stage 5

Motorun dinamometreye şaft ile bağlantısı yapıldıktan sonra, farklı motor hızı ve pedal pozisyonları için ürettiği tork ve yakıt tüketimi değerleri ölçülmüş ve motor haritaları oluşturulmuştur.



Şekil 4.12 3 Silindirli 75 BG Motor Tork Haritası



Şekil 4.13 3 Silindirli 75 BG Motor Özgül Yakıt Tüketimi Haritası

4.2 Traktör Saha Testi Çalışmaları

Tümosan firmasının 8000 serisi traktörüyle, Konya ilinde, yumuşak ve sert toprak türlerinde gerçekleştirilen pullukla tarla sürme operasyonları sayesinde, traktörlerin tarlada pulluk çekme operasyonu için kullanım profilleri belirlenmiştir [42]. Bu testlerle, operasyon sırasında motordan talep edilen gücün belirlenmesi ve özellikle farklı toprak türlerinde bu gücün nasıl değiştiğinin analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma, aynı performansı sunabilecek alternatif dizel motor ve elektrik motoru

kombinasyonuna dayalı hafif hibrit traktör konseptinin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır.

Şekil 4.14 Saha Testlerinin Gerçekleştirildiği Konya İli

Testlerde kullanılan traktöre ve pulluk ekipmanına ait görseller Şekil 4.15'te gösterilmiştir.

Şekil 4.15 Tümosan 8000 Serisi Traktör Modeli ve 5 Bıçaklı Pulluk

Traktöre ait teknik özellikler Tablo 4.4'de gösterilmiştir.

Tablo 4.4 Traktör Teknik Özellikleri

Traktör Modeli	8000 Klasik Seri
Ağırlık	3500 kg
Ön iz düşüm alanı	3,5 m2
Transmisyon	12 ileri + 12 geri
Ağırlık Dağılımı	%40 Ön %60 Arka
Ön Teker	380/70R24
Arka Teker	420/85R34

Pulluk ekipmanına ait teknik özellikler Tablo 4.5'de gösterilmiştir.

Tablo 4.5 Pulluk Teknik Özellikleri

Toplam Ağırlık	760 kg
Teorik Sürme Genişliği	1,5 metre
Bıçak Sayısı	5
Bıçak Genişliği	35 cm

4.2.1 Traktör Saha Testi Hazırlıkları

Testler sırasında traktör üzerine yerleştirilen sensör ve ekipmanlar sayesinde bazı sıcaklık, basınç, debi ve taşıt hızı değerleri ölçülüp kayıt altına alınmıştır. Testler sırasında kullanılan ekipmanlar Tablo 4.6'de gösterilmiştir.

Tablo 4.6 Traktör Üzerine Yerleştirilen Veri Toplama Cihazları

Cihaz Modeli	**Ölçülen Değerler**
DEWESOFT SIRIUS HS DEWESOFT SIRIUS LV+	Motor üzerine yerleştirilen basınç sensörlerinden gelen veriler ve debimetre üzerinden gelen değerler toplandı.
KRYPTON	Motor üzerine yerleştirilen sıcaklık sensörlerinden gelen veriler ve fan devri bilgisi toplandı.
GPS	Traktörün patinajda kalıp kalmadığının kontrolünü sağlamak için taşıt hızı bilgisi toplandı.
GÜÇ KAYNAĞI	Traktör üzerinde kullanılan veri toplama cihazlarının elektrik beslemesi yapıldı.

Pulluk operasyonu sırasında motorun hangi bölgelerde çalıştığını analiz edebilmek için motor Elektronik Kontrol Ünitesi (EKÜ) den motor devri ve pedal pozisyonu verileri toplandı. Küresel Konumlama Sistemi (GPS)' e ek olarak araç kontrol ünitesi üzerinden taşıt hızı verisi toplandı.

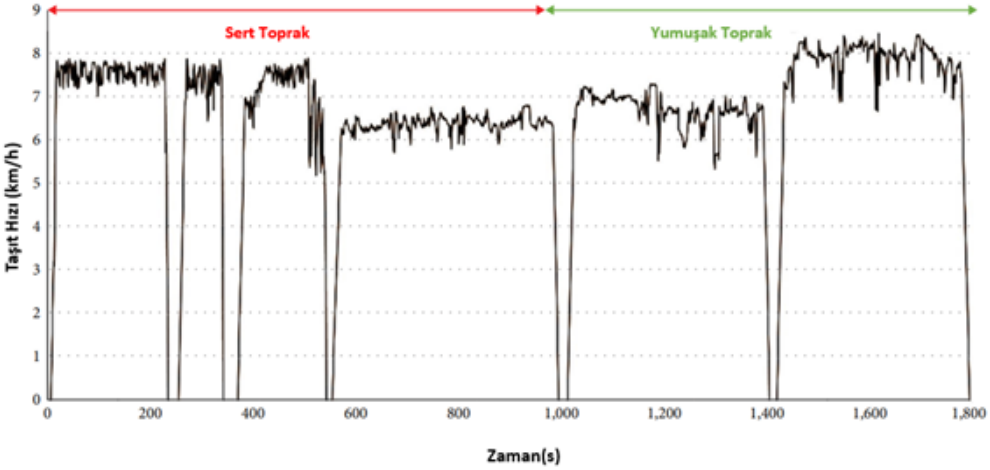
Şekil 4.16 Veri Toplama Cihazlarının Traktör Üzerine Entegrasyonu

4.2.2 Pulluk ile Tarla Sürme Testleri

Pulluk operasyonları, yumuşak ve sert toprak koşullarını içeren iki farklı senaryoda test edilmiştir.

Şekil 4.17 Yumuşak ve Sert Toprak Senaryosu için Pulluk Operasyonu

Yumuşak ve sert toprak koşulları için, motor hızı, pedal pozisyonu, taşıt hızı verileri toplanmıştır. Çevrim süresi 30 dk olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.18 Pulluk Sürme Operasyonunda Traktörün Hız Zaman Grafiği

5
KONVANSİYONEL TRAKTÖR TAŞIT MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Simülasyon çalışmaları kapsamında, konvansiyonel traktör için GT-SUITE programı aracılığıyla bir boyutlu taşıt modeli geliştirilmiştir. Motor, güç aktarma organları ve taşıt sistemleri için kapsamlı kütüphaneler sunan GT-SUITE, özellikle ürün geliştirme süreçlerinde matematiksel modellerinin yüksek doğruluk oranı nedeniyle otomotiv sektöründeki birçok firma tarafından yaygın şekilde kullanılan bir simülasyon yazılımıdır [43].

5.1 Bir Boyutlu Taşıt Modeli Kurulumu

Simülasyon sonuçlarının gerçek testleri yansıtabilmesi amacıyla taşıt, alt sistemleri ile birlikte dinamik olarak modellenmiş ve sürücü tepkileri modele dahil edilmiştir. Hareket denklemleri ve enerji korunumunun temel ilkeleri kullanılarak, seyir dirençlerine bağlı olarak aracın tahrik tekerleklerine iletilen kuvvetten motor torku ve gücü hesaplanmıştır.

Motor hareket denklemi, motor fren torkunu, motor atalet torkunu ve debriyajdan gelen motor tarafı yük torkunu dengeler. Denklem 5.1'de ifade edilmiştir.

$$T_{eng} = [I_{eng}](d\omega_{eng}/dt) \tag{5.1}$$

Güç Aktarma Organı Denklemi, debriyajın araç tarafındaki hızını ifade eder. Debriyajdan gelen araç tarafı çıkış torkunu, tüm güç aktarma organı ve aracın atalet torku ile aracın üzerindeki yavaşlatıcı (aerodinamik, yuvarlanma direnci ve eğim) kuvvetlerin etkili torku ile dengeler. Denklem 5.2'de ifade edilmiştir.

$$T_{drv,v} = [I_{trans1} + \frac{I_{trans2}}{R_t^2} + \frac{I_{dsh}}{R_t^2} + \frac{I_{axl}}{R_d^2 R_t^2} + \frac{M_{veh} r_{whl}^2}{R_d^2 R_t^2}]\frac{d\omega_{drv}}{dt} - [\frac{I_{trans2}}{R_t^3} + \frac{I_{dsh}}{R_t^3} + \frac{I_{axl}}{R_d^2 R_t^3} + \frac{M_{veh} r_{whl}^2}{R_d^2 R_t^3}]d\omega_{drv}\frac{dR_t}{dt} + [\frac{F_{aer} + F_{rol} + F_{grd}}{R_d R_t}]r_{whl} \tag{5.2}$$

Ayrıca, aerodinamik direnç, yuvarlanma direnci ve yokuş direnci kuvveti hesaplamaları sırasıyla Denklem 5.3, Denklem 5.4 ve Denklem 5.5'te verilmiştir.

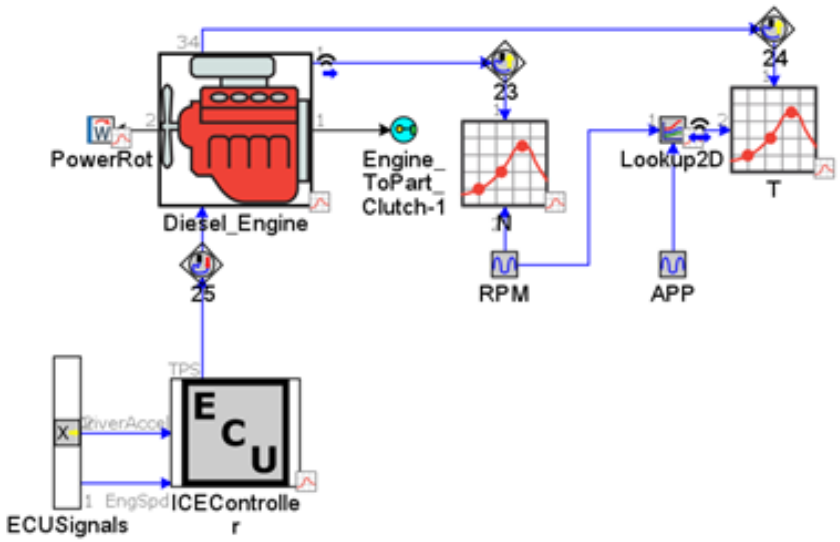
$$F_{aer} = \frac{1}{2}\rho V^2 A_{frontal} \tag{5.3}$$

$$F_{rol} = d_{road} c_{roll}((M_{veh} + M_{load})gcos\alpha \tag{5.4}$$

$$F_{grd} = (M_{veh} + M_{load})gsin\alpha \tag{5.5}$$

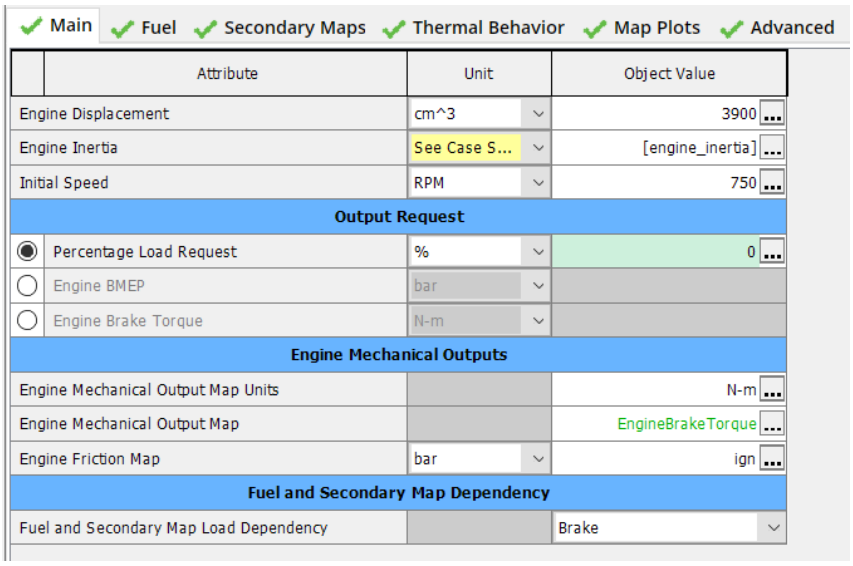
5.1.1 İçten Yanmalı Motorun Modellenmesi

İYM, harita tabanlı bir motor modeli aracılığıyla temsil edilmiştir. Motor rölanti hızı bir EKÜ modeli sayesinde kontrol edilmiştir.

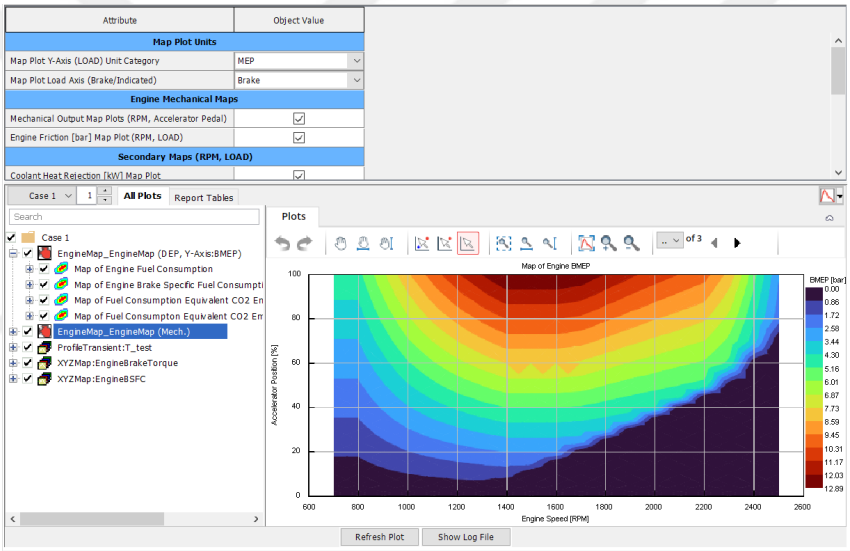


Şekil 5.1 GT-SUITE İçten Yanmalı Motor Modeli

Toplam motor hacmi ve atalet momenti değerleri modele tanımlanmıştır. İçten yanmalı motor dinamometre testleri sayesinde elde edilen tork ve yakıt tüketimi değerleri motor modeline harita olarak girilmiştir.



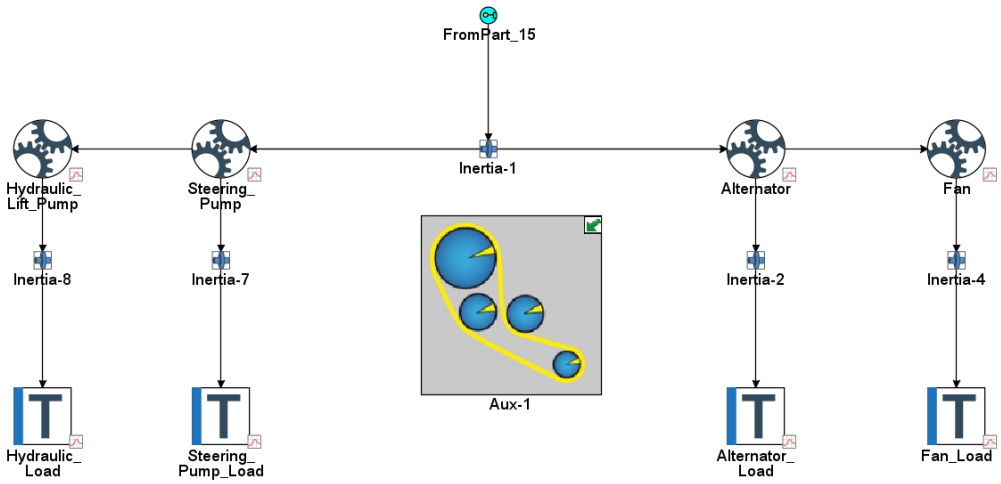
Şekil 5.2 Toplam Motor Hacmi ve Atalet Momentinin Modele Tanımlanması



Şekil 5.3 Motor Tork ve Yakıt Tüketimi Haritalarının Modele Tanımlanması

5.1.2 Motor Aksesuar Grubunun Modellenmesi

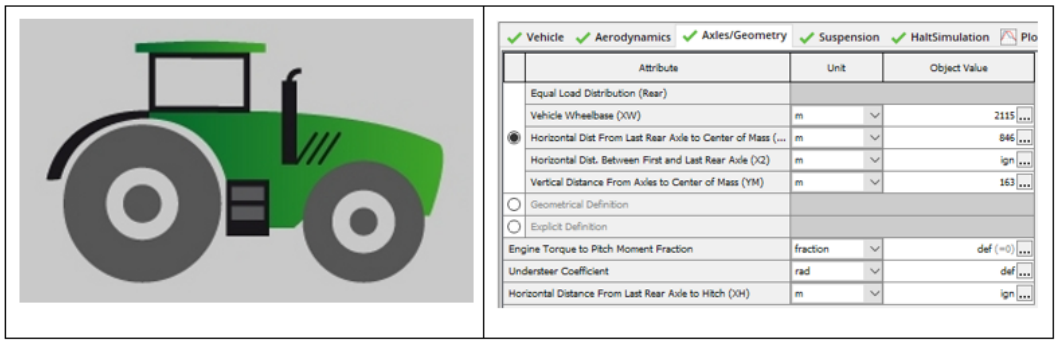
Motor üzerindeki kayış-kasnak sistemiyle bağlantılı olan aksesuarların (hidrolik pompalar, direksiyon pompası, fan, alternatör, hava kompresörü, klima kompresörü) devirle orantılı olarak çektikleri güçler eğriler halinde tanımlanmış ve modele dahil edilmiştir.



Şekil 5.4 Motor Aksesuar Grubunun Modellenmesi

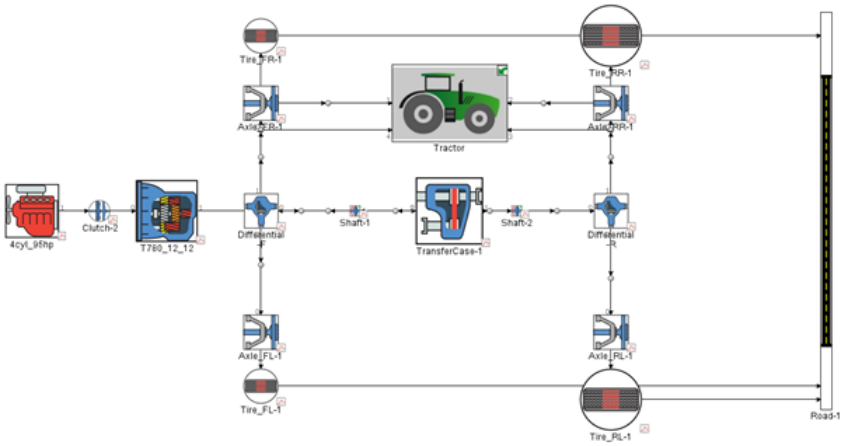
5.1.3 Traktörün ve Güç Aktarma Organlarının Modellenmesi

Traktör ağırlığı, hava direnç katsayısı, ön iz düşüm alanı ve aks mesafesi gibi parametreler, oluşturulan taşıt modeline dahil edilmiştir.



Şekil 5.5 Traktörün Modellenmesi

Traktörün güç aktarma organları; şanzıman, takviye dişlileri, diferansiyel ve tekerlek içerisinde bulunan planet dişli mekanizmasından oluşmaktadır. Her bir vites konumu için, toplam çevrim oranı, atalet momenti ve verim değeri modele tanımlanmıştır. Testlerde kullanılan traktör 4 tekerden tahrikli olduğu için, transfer kutusu da modellenerek tork dağıtım oranı ile birlikte modele eklenmiştir.



Şekil 5.6 Güç Aktarma Organlarının Modellenmesi

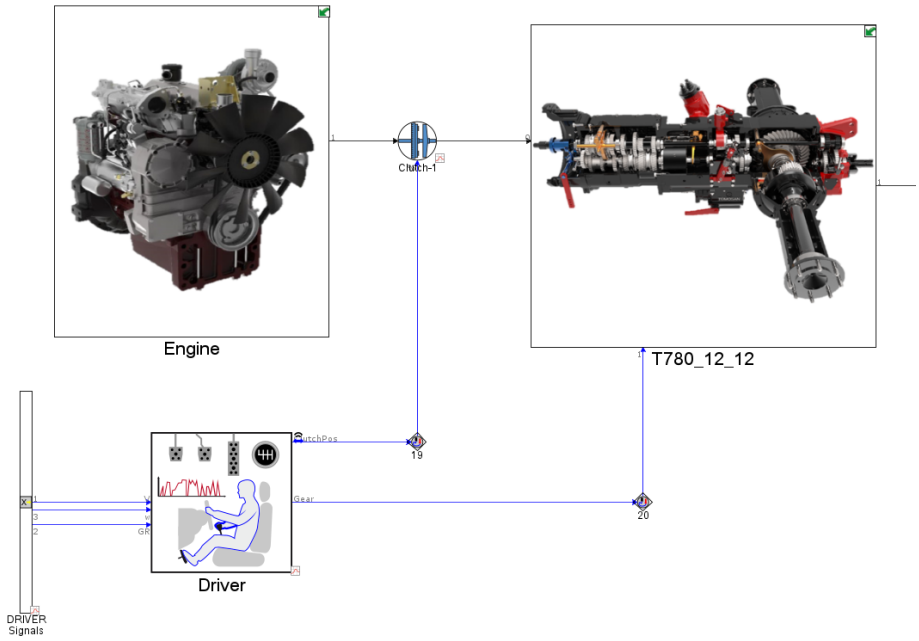
Sistemdeki dişlilerin toplam çevrim oranları ve verimleri Tablo 5.1 de verilmiştir.

Tablo 5.1 Güç Aktarma Organı Dişlilerinin Toplam Çevrim Oranı ve Verimleri

Vites	Toplam Çevrim Oranı	Toplam Verim
1	470.09	0.78
2	351.44	0.78
3	231.24	0.82
4	159.83	0.83
5	161.29	0.86
6	120.58	0.86
7	79.34	0.88
8	54.84	0.89
9	55.35	0.9
10	41.38	0.88
11	27.23	0.89
12	18.82	0.87

5.1.4 Sürücünün Modellenmesi

Pulluk ile tarla sürme operasyonunda, test çevrimi sırasında elde edilen anlık traktör hızını yakalamak amacıyla bir sürücü modeli kullanılmıştır. Sürücü, taşıt modelinden anlık olarak araç hızı, motor devri ve şanzıman vites bilgilerini alarak, debriyaj kavrama sistemi ve şanzımana uygun vites seçimini sağlamak üzere sinyal göndermektedir. Gerçek test koşullarını doğru bir şekilde yansıtabilmek için, sürücü modelinde sürücü tepki süresi ve vites geçiş süreleri ayrıca tanımlanmıştır.

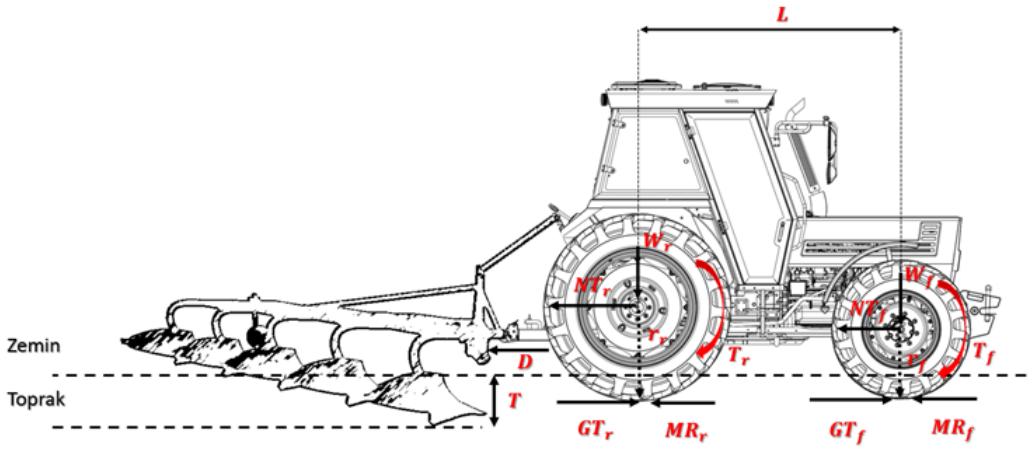


Şekil 5.7 Sürücünün Modellenmesi

5.1.5 Toprağın Lastik ve Pulluk ile Etkileşiminin Modellenmesi

Traktörler, yol üstü taşıtlardan farklı olarak, yumuşak zemin olarak tanımlanan toprak zeminlerde çalışmaktadır. Asfalt veya beton gibi sert zeminlerde tekerlek ve yol arasındaki yuvarlanma direnci hesaplanırken, zemin rijit kabul edilirken lastiğin deforme olabileceği varsayılır. Ancak toprak gibi yumuşak zeminlerde, zemin rijit olmaktan çıkar ve deforme olabilir. Bu nedenle, lastik ile toprak arasında oluşan direnci farklı bir şekilde ele almak gerekmektedir.

Toprak zeminde pulluk operasyonu sırasında bir traktöre etki eden kuvvetler Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



Şekil 5.8 Pulluk Operasyonunda Traktöre Etki Eden Kuvvetler

Bu çalışmada, Amerikan Tarımsal Mühendisler Derneği (ASAE) tarafından geliştirilen hareket denklemleri esas alınmıştır. Hareket direnci, MR, (ASAE S296'da tanımlandığı üzere), brüt çekiş gücü, GT, ile net çekiş gücü, NT, arasındaki farka eşittir [41]

$$MR = GT - NT = W(\frac{1}{B_n} + 0.04 + \frac{0.5s}{\sqrt{B_n}}) \tag{5.6}$$

$$B_n = (\frac{Clbd}{W})(\frac{1 + 5\frac{\delta}{h}}{1 + 3\frac{b}{d}}) \tag{5.7}$$

Tipik toprak yüzeylerinde tarımsal tahrik lastikleri için (W/bd > 30 kN/ m^2)$CIve$B$_n$ değerleri Şekil 5.2'de gösterilmiştir [41].

Tablo 5.2 CI ve B_n Değerleri

Soil	C_l **(kPa)**	B_n
Hard	1800	80
Firm	1200	55
Tilled	900	40
Soft, sandy	450	20

Hareket direnç oranı ρ_d, hareket direncinin dinamik tekerlek yüküne oranını ifade eder.

$$\rho_d = \frac{MR}{W} = \frac{1}{B_n} + 0.04 + \frac{0.5s}{\sqrt{B_n}} \tag{5.8}$$

Net çekiş gücü, NT (ASAE S296'da tanımlandığı üzere) Denklem 5.9'de ifade edilmiştir.

$$NT = W(0.88(1 - e^{(-0.1B_n)}(1 - e^{(-7.5s)}) - \frac{1}{B_n} - \frac{0.5s}{\sqrt{B_n}}) \tag{5.9}$$

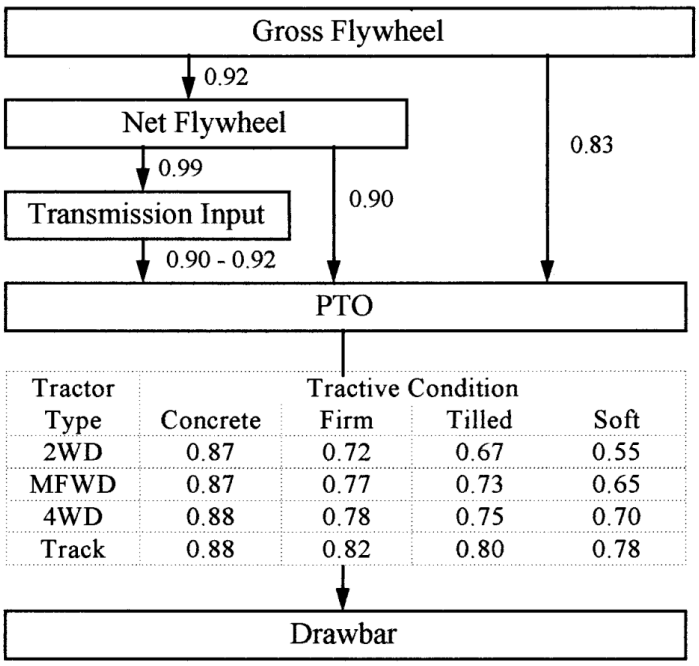
Brüt çekiş gücü, GT (ASAE S296'da tanımlandığı üzere) Denklem 5.10'de ifade edilmiştir.

$$GT = W(0.88(1 - e^{(-0.1B_n)}(1 - e^{(-7.5s)}) + 0.04) \tag{5.10}$$

Çekiş verimliliği, TE, Denklem 5.11'de ifade edilmiştir.

$$TE = (1 - s)(\frac{NT}{GT}) \tag{5.11}$$

Tarımsal traktörler için güç ilişkileri Şekil 5.9'da gösterilmiştir [41]. Güç aktarma organındaki belirli bir noktadaki gücü tahmin etmek için kullanılır. Örnek olarak PTO (Kuvvet Çıkış Mili) gücü, net volan gücünün 0.9 ile çarpılmasıyla tahmin edilebilir. Eğer pulluk gücü hesaplanacaksa, traktör tipi ve toprak koşulu seçilerek oran belirlenmelidir.



Tractor Type	Tractive Condition			
	Concrete	Firm	Tilled	Soft
2WD	0.87	0.72	0.67	0.55
MFWD	0.87	0.77	0.73	0.65
4WD	0.88	0.78	0.75	0.70
Track	0.88	0.82	0.80	0.78

Şekil 5.9 Tarımsal Traktörler için Güç Aktarma Organlarındaki Güç İlişkisi

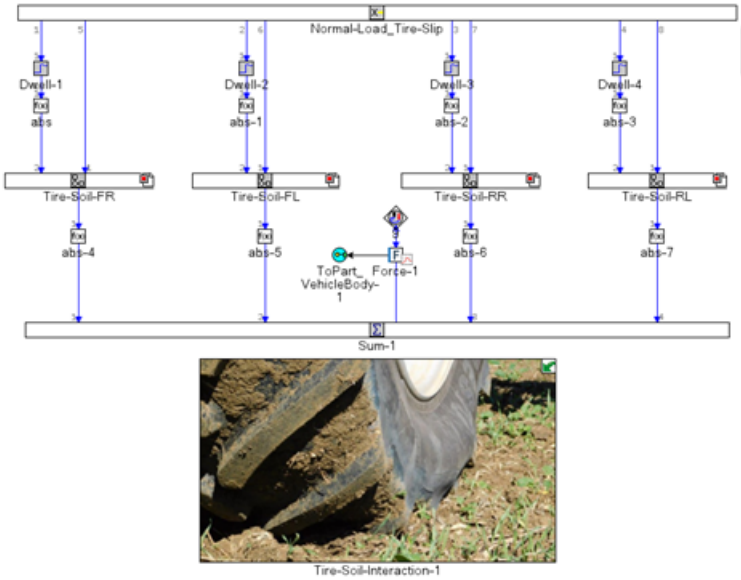
Birçok ekim ekipmanını ve sığ derinliklerde kullanılan toprak işleme aletlerini

çekmek için gereken çekme kuvveti, öncelikle ekipmanın genişliği ve çekme hızıyla ilişkilidir. Daha derin ve derinliklerde çalışan toprak işleme aletleri için çekme kuvveti, toprağın dokusu, işleme derinliği ve aletin geometrisine de bağlıdır. Tipik çekme kuvveti gereksinimleri Denklem 5.12'de gösterildiği gibi hesaplanabilir [41].

$$D = F_i[A + B(V) + C(V)^2]WT \tag{5.12}$$

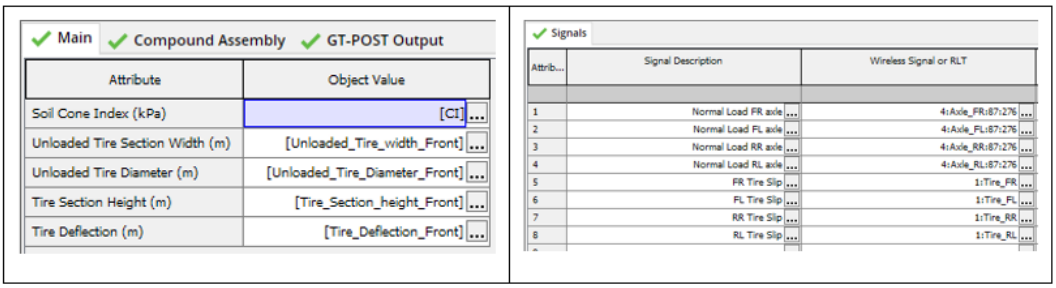
D ekipman çekme kuvvetini temsil etmektedir. F boyutsuz bir ayar parametresi olup, toprağın dokusuna göre belirlenir. (1: Yumuşak, 2: Orta, 3: Sert topraklar). A, B ve C makineye özgü parametrelerdir. S tarla hızını ifade eder. W makine genişliğini, sıra sayısı veya alet sayısını temsil eder. T büyük aletler için işleme derinliğidir. Küçük toprak işleme aletleri ve ekim ekipmanları için ise 1 (boyutsuz) olarak alınır [41].

GT – SUITE programında, lastik ile toprak arasındaki ilişki ASAE standartları dikkate alınarak modellenmiştir. Lastik ile toprak arasında oluşan hareket direnci her bir tekerlek için ayrı alt sistem olarak modellenmiş ve taşıt modeline eklenmiştir.



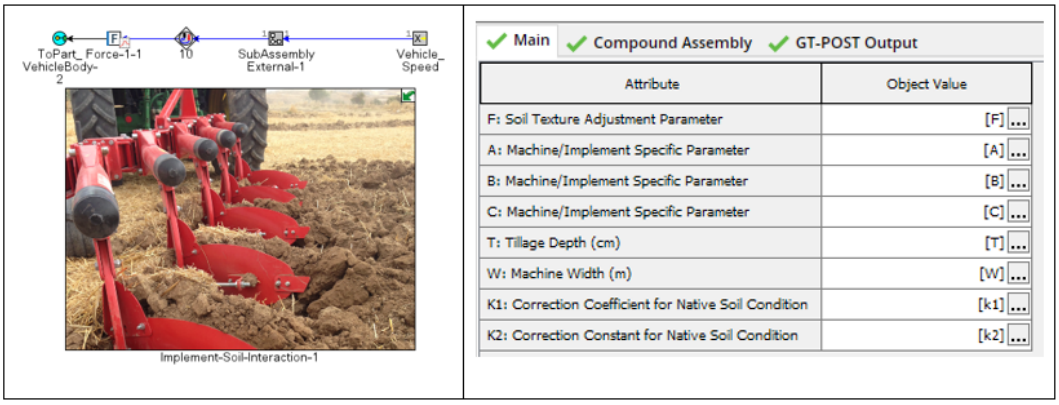
Şekil 5.10 Lastik-Toprak İlişkisinin Modellenmesi

Lastik ve toprak özelliklerinin her biri için ayrı değişkenler tanımlanarak model parametrik hale getirilmiştir. Direnç hesaplamalarında kullanılacak tekerlek yükleri ve patinaj oranları, dinamik taşıt modelinden anlık olarak alınarak, direnç kuvvetleri gerçek zamanlı olarak hesaplanabilmiştir.



Şekil 5.11 Lastik ve Toprak Özelliklerinin Modelde Değişken Olarak Tanımlanması

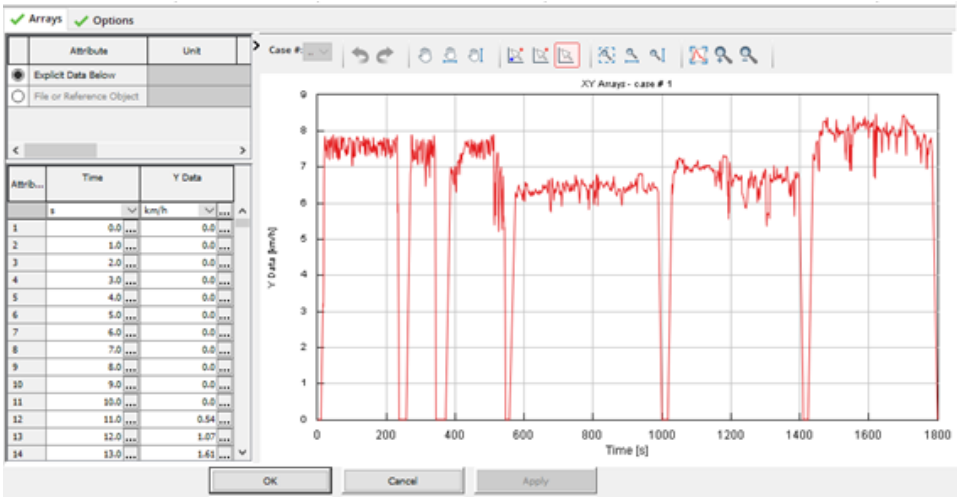
Pulluk ekipmanı ile toprak arasındaki ilişkiyi tanımlamak amacıyla ASAE standartlarından yararlanılmıştır. Ekipman ve toprak özelliklerine ilişkin değişkenler tanımlanmış, direnç hesaplamalarında kullanılacak taşıt hızı değeri dinamik taşıt modelinden anlık olarak alınarak, direnç kuvveti gerçek zamanlı olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.12 Pulluk Ekipmanı ve Toprak Özelliklerinin Modelde Değişken Olarak Tanımlanması

5.1.6 Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Geliştirilen bir boyutlu taşıt modeline, saha testleri sırasında elde edilen test çevrimi, hedef hız profili olarak tanımlanmıştır. Sürücü modeli, hedef hız profilini yakalamak amacıyla gaz ve fren pedallarına sinyaller göndererek aracı kontrol etmeye çalışmıştır.

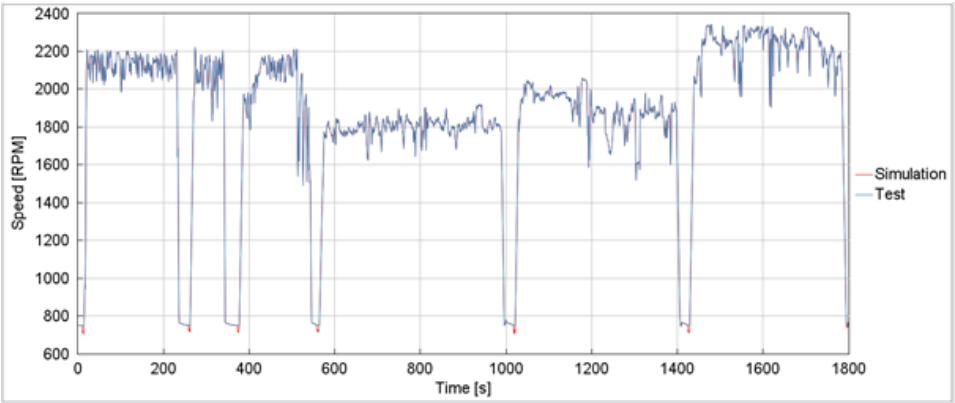


Şekil 5.13 Test Çevriminin Taşıt Modeline Tanımlanması

Simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesinden önce, sonuçların güvenilirliğini sağlamak amacıyla model doğrulamasıyla ilgili hususlar ele alınacaktır. Önceki bölümlerde detaylı olarak açıklandığı üzere, geliştirilen taşıt modeli dinamik bir model olup, hız profili girdi olarak verilmekte, motor devri ve gaz pedal pozisyonu ise model çıktısı olarak elde edilmektedir. Bu nedenle, test sonuçları ile simülasyon karşılaştırması yapılırken, model doğruluğunu değerlendirmek için simülasyon sonucu elde edilen motor hızı ve gaz pedal pozisyonları karşılaştırılacaktır.

Testler sırasında, toprak sertliği çevrim boyunca anlık olarak değişebildiği için, özellikle pulluk çekme kuvveti hesaplamalarında kullanılan K1 ve K2 düzeltme faktörleri zamana bağlı olarak ayarlanmış ve bu sayede test sırasında kaydedilen motor hızı ve gaz pedal pozisyonları simülasyonda yeniden elde edilebilmiştir.

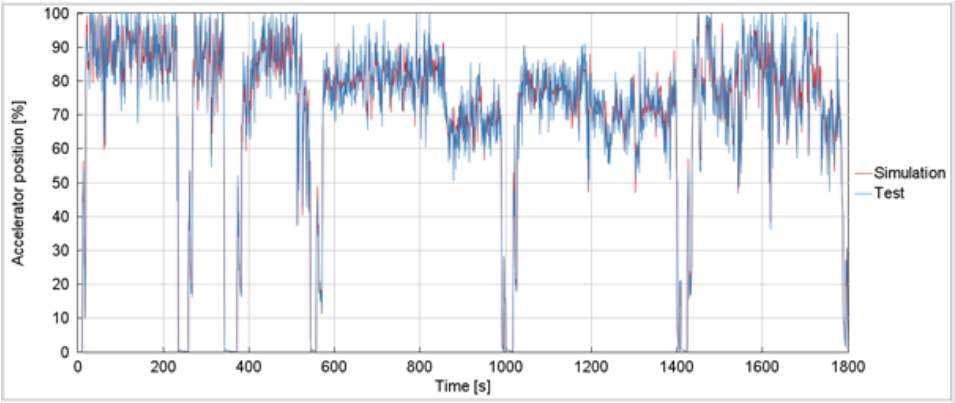
Motor hızı verileri karşılaştırıldığında, maksimum hata oranı %6,45, ortalama ise %1,06 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.14 Motor Hızı, Test ve Simülasyon Sonucu Karşılaştırılması

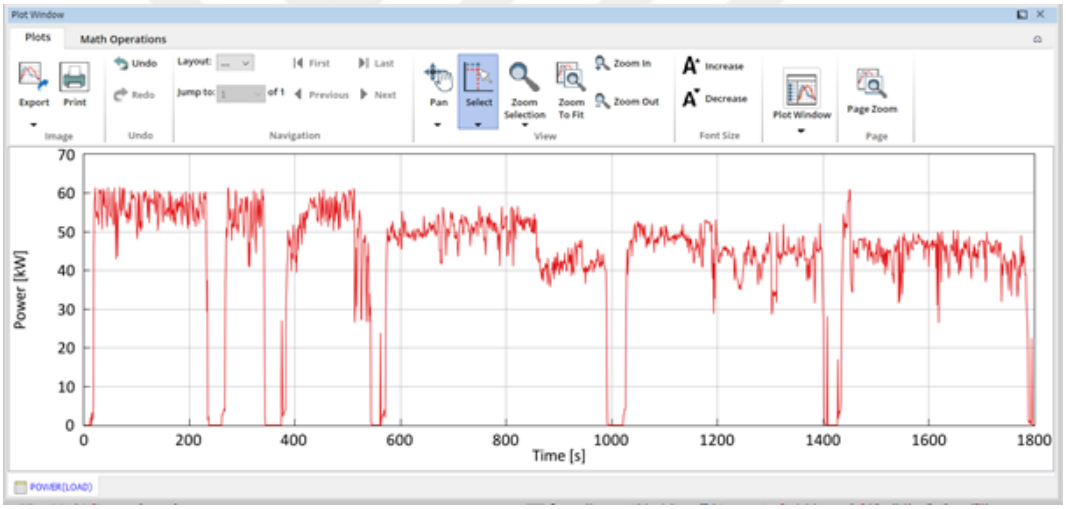
Motor Gaz Pedal Pozisyonu verileri karşılaştırıldığında, maksimum hata oranı

%9,87, ortalama hata oranı ise %4,88 olarak hesaplanmıştır.



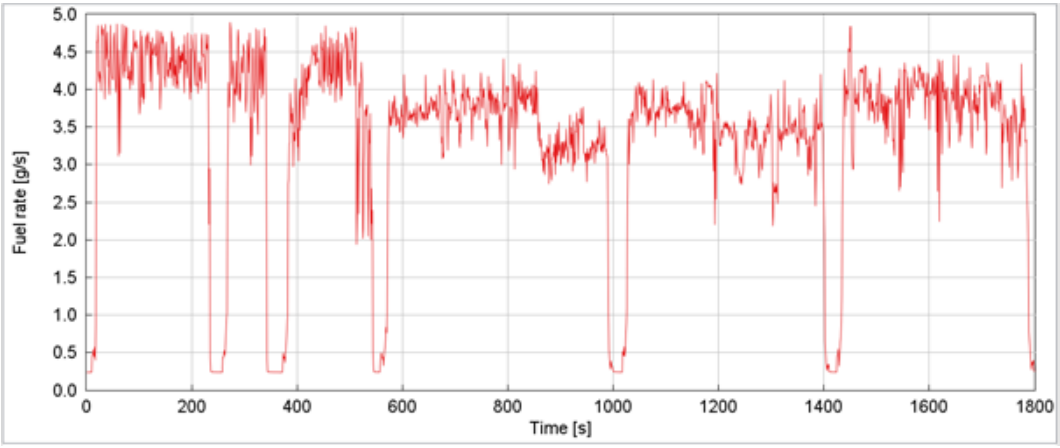
Şekil 5.15 Motor Gaz Pedal Pozisyonu, Test ve Simülasyon Sonucu Karşılaştırılması

Pulluk sürme operasyonu sırasında içten yanmalı motordan talep edilen gücün zamana bağlı değişimi Şekil 5.16'de gösterilmiştir.



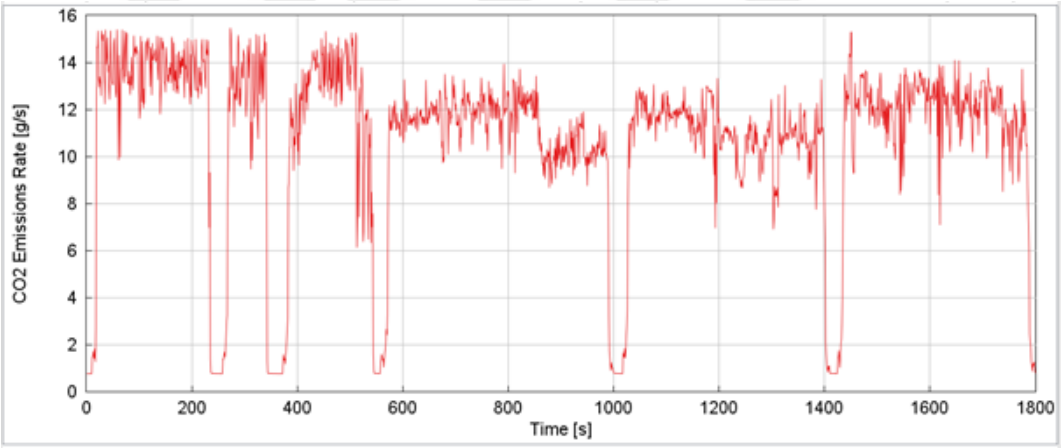
Şekil 5.16 İçten Yanmalı Motordan Talep Edilen Gücün Zamana Bağlı Değişimi

Test çevrimi boyunca tüketilen anlık yakıt miktarı Şekil 5.17'de gösterilmektedir. Yakıt tüketimi, anlık olarak maksimum 4.88 g/s değerine ulaşırken, ortalama olarak 3.4 g/s seviyesinde gerçekleşmiştir.



Şekil 5.17 Çevrim Boyunca Tüketilen Anlık Yakıt Miktarı

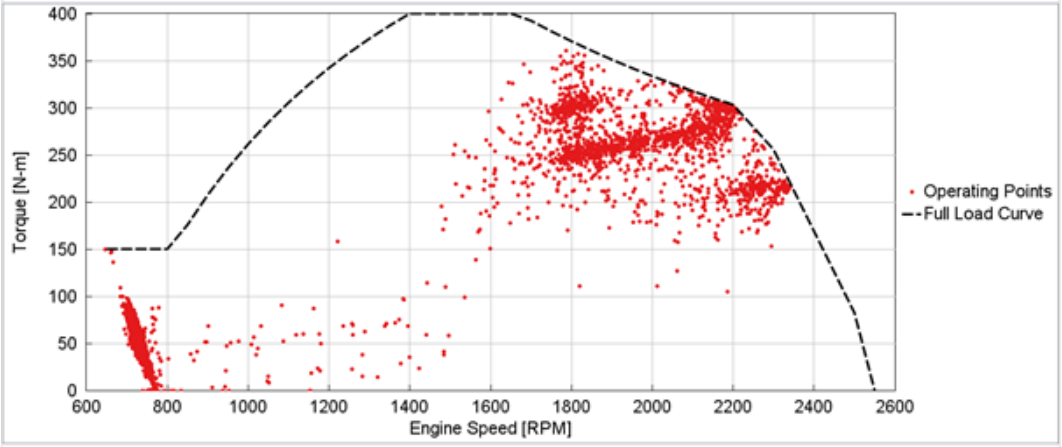
Test çevrimi sırasında salınan CO_2 emisyon miktarı zamana bağlı Şekil 5.18'de gösterilmektedir. CO_2 salımı anlık olarak maksimum 15.45 g/s değerine ulaşırken, ortalama olarak 10.75 g/s seviyesinde gerçekleşmiştir.



Şekil 5.18 Çevrim Sırasında Salınan CO_2 Emisyon Miktarının Zamana Bağlı Değişimi

Test çevrimi boyunca içten yanmalı motorun çalışma noktaları, motorun tam yük performans eğrisi üzerinde gösterilmiştir. Şekil 5.19'de görüleceği üzere, motor ağırlıklı olarak 1800-2200 d/dk motor hızı arasında ve %50 ile %100 yük bölgesinde çalışmıştır. Motor hızının 800 d/dk altında ve yükün %10 değerinin altında olduğu bölgeler, tarla bitişi sırasında traktörün dönüşünü ve dur kalk senaryolarını temsil etmektedir.

Bu grafik, pulluk ile tarla sürme operasyonu sırasında traktörün ihtiyaç duyduğu güç ve motor hızının çalışma aralığını belirleyerek, geliştirilecek hafif hibrit traktör konsepti için uygun elektrik motoru ve batarya çiftinin seçimine yardımcı olacaktır. Ayrıca, motorun daha verimli bölgelerde nasıl çalıştırılabileceği konusunda da değerlendirmeler yapılmasına olanak tanıyacaktır.



Şekil 5.19 Traktör Çalışma Noktalarının Motor Haritası Üzerinde Gösterimi

6
HİBRİT TRAKTÖR KONFİGÜRASYONUNUN BELİRLENMESİ, ELEKTRİK MOTORU VE BATARYA SEÇİMİ

6.1 Hibrit Taşıtların Sınıflandırılması

Hibrit güç sistemleri, hibritleşme derecesi, elektrik motorunun konumu, güç aktarım düzeni ve harici güç kaynağı ile şarj edilebilme özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır [44].

6.1.1 Hibritleşme Derecesine Göre Sınıflandırma

Hibritleşme derecesi, Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA)'larda elektriksel güç kaynağının, toplam güç sistemine katkısını yüzdelik oranla belirleyen bir parametre olarak tanımlanabilir. [45].

$$HibritlemeDerecesi = \frac{P_{elektrik}}{P_{toplam}} * 100 \tag{6.1}$$

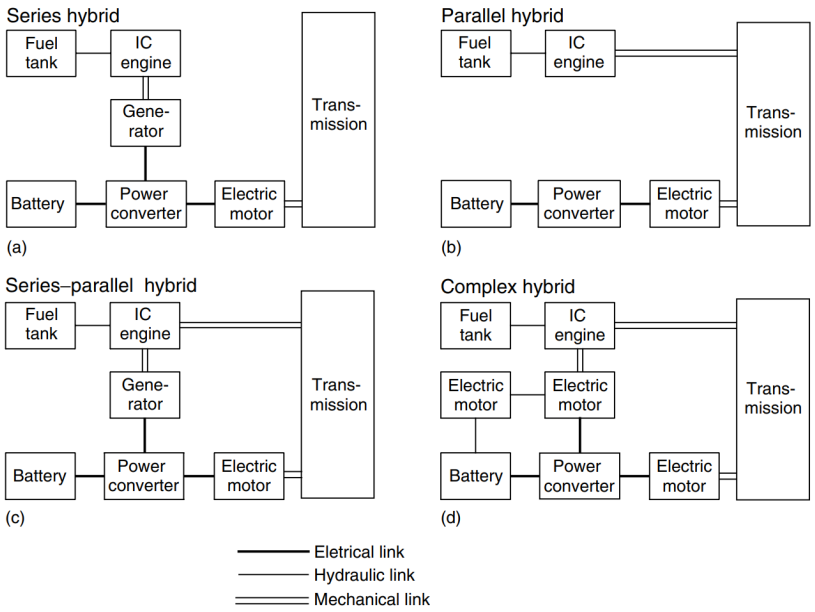
Hibritleşme derecesine bağlı olarak hibrit elektrikli araçlar; mikro, hafif ve tam hibrit olarak üç ana kategoriye ayrılmaktadır [45].

Tablo 6.1 Hibritleşme Derecesine Göre Farklı Hibrit Elektrikli Araçların Karşılaştırılması

	Mikro Hibrit	**Hafif Hibrit**	**Tam Hibrit**
Hibritleşme Derecesi [%]	<10	10-30	>40
Elektrik Motor Gücü [kW]	3-5	7-15	30-50
Motor Voltajı [V]	12	48-200	200-600
Fonksiyonlar	Motor Start-Stop, Rejeneratif Frenleme	Motor Start-Stop, Rejeneratif Frenleme, Tork Desteği	Motor Start-Stop, Rejeneratif Frenleme, Elektrikli Tahrik

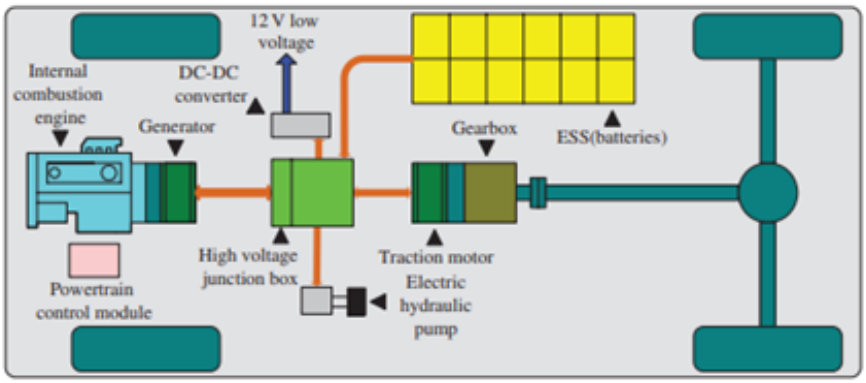
6.1.2 Güç Aktarım Düzenine Göre Sınıflandırma

HEA'lar, güç aktarım düzenine göre geleneksel olarak seri ve paralel olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Ancak 2000 yılından sonra piyasaya yeni sürülen bazı HEA'lar bu türlerden birine sınıflandırılamamıştır. Bu nedenle, HEA'lar günümüzde seri, paralel, seri-paralel ve karmaşık hibrit olmak üzere dört farklı kategoriye ayrılmaktadır [46].



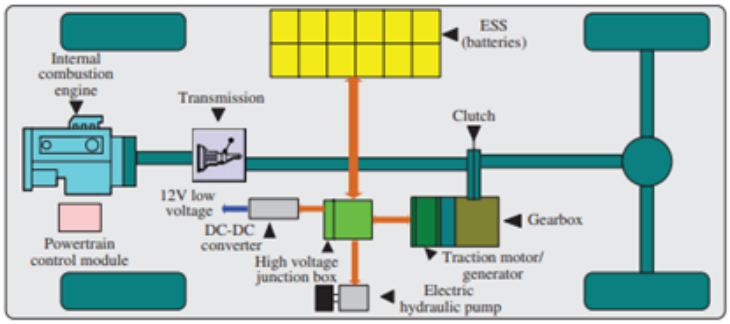
Şekil 6.1 Güç Aktarma Düzenine Göre HEA'ların Sınıflandırılması

Seri HEA'larda, içten yanmalı motorun temel görevi doğrudan tekerleklere güç iletmek değil, elektrik üretmektir. Bu sistemde içten yanmalı motor, bir jeneratör aracılığıyla elektrik üreterek bataryayı şarj eder. Batarya, yakıt ekonomisini optimize etmek için şarj edilir veya boşaltılır; elektrik motoru ise tahrik için kullanılır. Bu yapı, batarya kapasitesinin yetersiz kaldığı durumlarda jeneratör sayesinde ek enerji sağlar. Basit dinamik yapısıyla, özellikle ağır ve orta hizmet kamyonları ve servis otobüslerinde yaygın olarak kullanılır. Ana teknik zorluk, enerji kaynakları ve güç akışının verimli şekilde yönetilmesidir [47].



Şekil 6.2 Seri Hibrit Elektrikli Araçların Şematik Olarak Gösterimi

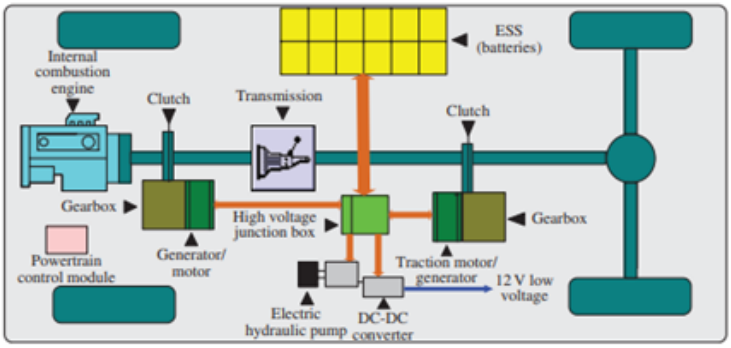
Paralel HEA'larda, içten yanmalı motor ile elektrikli motor/jeneratör birlikte çalışır. Bu iki güç kaynağı, güç aktarım sistemine çeşitli noktalardan bağlanabilir. Paralel hibrit yapı, geleneksel güç aktarım sistemine bir elektrikli motoru ve batarya eklenmesiyle oluşur ve bu sistem, taşıtı her iki motor ile birlikte tahrik edebilmeye olanak sağlar. Bu sistemlerde, elektrik motor gücü ve batarya kapasitesi sürüş çevrimine göre belirlenir. İçten yanmalı motor ve elektrik motoru uyumlu şekilde çalışarak aracın tork gereksinimlerini karşılar. Sistem kontrol stratejisine bağlı olarak motor sık sık açılıp kapatılabilir.



Şekil 6.3 Paralel Hibrit Elektrikli Araçların Şematik Olarak Gösterimi

Seri-paralel mimarisi, seri ve paralel hibrit sistemlerin birleşimidir. Bu yapıda elektrik motoru, jeneratör, içten yanmalı motor ve tekerlekler, bir planet dişli

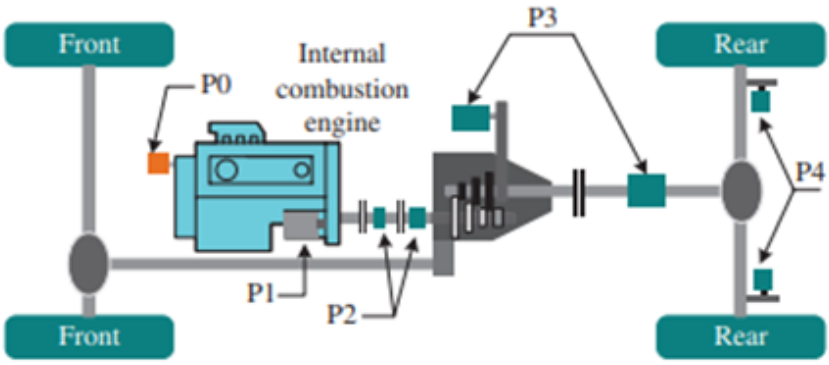
mekanizması ile birbirine bağlanır. Güç, aracın ihtiyacına göre iki yoldan iletilir. Seri yol, motor gücünü elektrik enerjisine çevirip tekerleklere veya bataryaya aktarırken; paralel yol, gücü doğrudan tekerleklere mekanik olarak iletir. Böylece seri sistemin yakıt tasarrufu ve paralel sistemin mekanik verim avantajını bir araya getirilir. Ancak bunun yanında, sistem karmaşık bir kontrol sistemi gerektirir.



Şekil 6.4 Seri-Paralel Hibrit Elektrikli Araçların Şematik Olarak Gösterimi

6.1.3 Elektrik Motoru Konumuna Göre Sınıflandırma

Hibrit Elektrikli Araçlar, elektrik motoru konumuna göre, P0, P1, P2, P3, P4 olmak üzere beş farklı grupta sınıflandırılabilirler. 'P' harfi motorun yerini ifade eder ve her numara motorun farklı bir pozisyonda olduğunu gösterir. Şekil 6.5'de şematik olarak gösterilmiştir [47].



Şekil 6.5 Elektrik Motoru Konumuna Göre HEA'ların Sınıflandırılması

Tablo 6.2'de sınıflandırma ile alakalı detaylı bilgilere yer verilmiştir [44].

Tablo 6.2 Hibritleşme Derecesine Göre Farklı Hibrit Elektrikli Araçların Karşılaştırılması

	Konfigürasyon	**Avantajlar**	**Dezavantajlar**
P0	EM, İYM'nin önünde konumlandırılmıştır. Kayış-Kasnak sisteminden tahrik almaktadır.	Entegrasyonu kolay ve maliyeti düşüktür.	Düşük yakıt tasarrufu, Kayış-Kasnak sisteminin aktarabileceği tork limiti olduğu için düşük Hibritleşme Derecesi.
P1	EM, İYM'nin arkasında, debriyaj-kavrama sisteminin önünde konumlandırılmıştır. Krank milinden tahrik almaktadır.	Yüksek güvenilirlik ve düşük maliyet.	Elektrik motorunun güç çıkışı, İYM tarafından etkilenir.
P2	EM, debriyaj-kavrama sistemi ile şanzıman giriş mili arasında konumlandırılmıştır.	Yüksek hibritleşme derecesi ve yüksek yakıt tasarruf oranı, Elektrikli sürüş modu	Karmaşık yapı ve alan kullanım oranı düşük.
P3	EM, şanzıman arkasında ve şanzıman çıkış miline bağlı olarak konumlandırılmıştır.	Yüksek hibritleşme derecesi ve yüksek yakıt tasarruf oranı	Geleneksel araçlara göre şanzımanda büyük değişiklikler gerekmektedir.
P4	EM, arka aks üzerinde konumlandırılmıştır.	Elektrikli sürüş modu, Rejeneratif frenleme için çok verimli.	Yüksek sistem maliyeti, Sınırlı batarya şarj etme yeteneği.

6.1.4 Hibrit Konfigürasyon Belirlenmesi

Hafif hibrit traktör konseptinde, elektrik motorunun konumu belirlenirken çeşitli performans ve verimlilik parametreleri dikkate alınır. Bunların başında, yakıt verimliliğini optimize etme, farklı çalışma modları arasında esnek geçiş sağlama,

sistemi mevcut içten yanmalı motor ve şanzıman yapısına entegre etme kolaylığı gelir. Aynı zamanda sistemin kontrol edilebilirliği, karmaşık ve maliyetli bileşenlerden kaçınarak traktörün toplam maliyetini düşürme hedefi de önemli rol oynar. Elektrik motorunun ideal konumlandırılması, bu faktörler doğrultusunda traktörün hem tarımsal operasyonlardaki performansını artıracak hem de işletme maliyetlerini minimumda tutacak şekilde tasarlanır.

Şekil 6.6 Hibrit Konfigürasyonu Belirlenirken Dikkat Edilen Parametreler

Tablo 6.2'ye bakıldığı zaman, "P0 yapı, entegrasyon kolaylığı, sistem kontrolü ve düşük maliyet avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Ancak, elektrik motorunun içten yanmalı motora kayış-kasnak mekanizmasıyla bağlanması, iletilen torku sınırladığı için daha büyük bir elektrik motoru kullanımını engeller. Bu durum, hibritleşme derecesinin düşmesine ve yakıt verimliliğinin sınırlanmasına yol açar. P0 sistem, özellikle dur-kalk trafikte tork desteği sağlayarak yol üstü araçlarda verimli bir çözüm sunarken, traktör gibi ağır yük taşıyan ve sabit hızda değişken yük altında çalışan araçlar için ideal bir seçenek değildir. Ayrıca, saf elektrikli sürüş moduna izin vermediğinden, çalışma modu esnekliği açısından da sınırlı bir yapıya sahiptir.

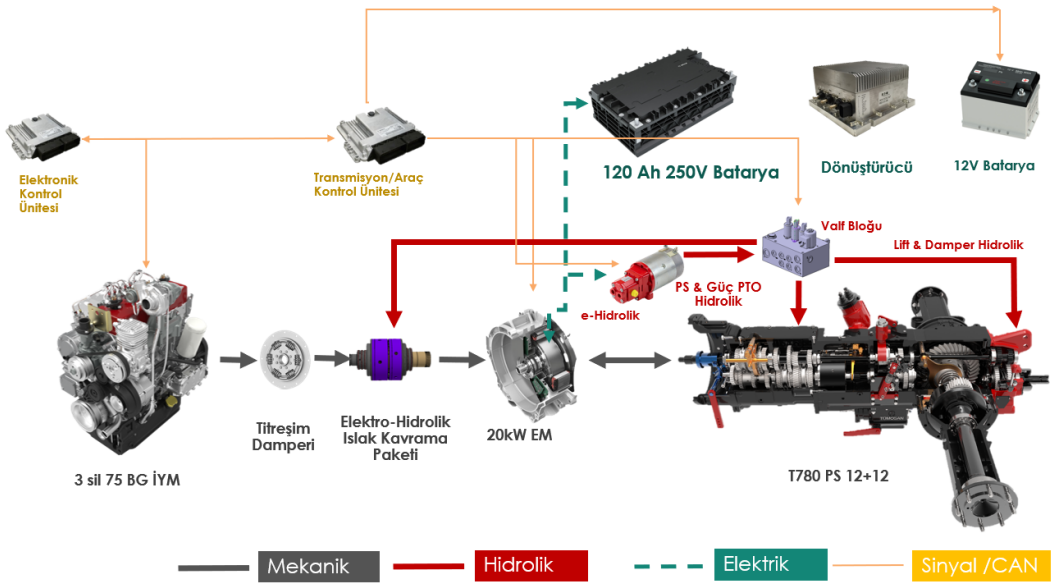
P1 yapı da P0'a benzer şekilde düşük hibritleşme derecesi ve sınırlı çalışma modu esnekliği sunar. Elektrik motoru doğrudan krank miline monte edildiğinden, bağımsız tork sağlama yeteneği düşüktür ve saf elektrikli sürüş imkânı sunmaz. Bu nedenle, P1 yapı da traktör gibi sürekli yüksek tork ve esnek sürüş gerektiren araçlar için ideal bir çözüm değildir.

P3 ve P4 hibrit yapılarında elektrik motoru, şanzımanın çıkışından sonra sisteme entegre edilir. Bu yapı, yüksek güçlü bir elektrik motoru kullanmaya olanak

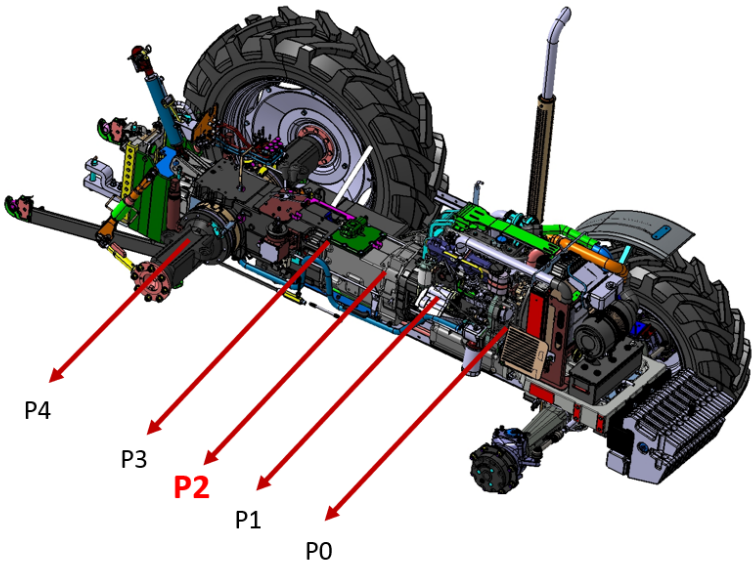
tanıyarak hibritleşme derecesini artırır ve yakıt tüketimini azaltmada önemli bir katkı sağlar. Aynı zamanda, tamamen elektrikle sürüş imkânı sunduğu için çalışma modu esnekliği açısından avantaj sunar. Ancak, traktörlerin yüksek tork gerektiren işlerde çalışması, karmaşık ve yüksek çevrim oranlarına sahip güç aktarma organlarını gerektirir. Bu nedenle, P3 ve P4 yapılar traktörlerde entegrasyon zorluğu ve yüksek sistem maliyeti açısından dezavantaj oluşturmaktadır.

P2 hibrit yapısı, traktör uygulamaları için diğer hibrit konfigürasyonlara kıyasla birçok avantaj sunabilir. Elektrik motorunun, içten yanmalı motorun volan çıkışı ile şanzıman mili girişi arasında konumlandırılması, özellikle sınırlı alana sahip traktörler için entegrasyon kolaylığı sağlar. Bu yapı, daha güçlü bir elektrik motorunun kullanımına imkân tanıyarak P0 ve P1 hibrit sistemlerine kıyasla hibritleşme derecesini artırır ve yakıt verimliliğini optimize eder. Maliyet açısından, P2 yapısı daha az karmaşık mekanik bileşenler gerektirdiğinden, düşük maliyetle yüksek verimlilik sunar; bu da traktörlerde önemli bir avantajdır. Ayrıca, içten yanmalı motorun elektrik motoruyla uyum içinde çalışabilmesi ve gerekirse yalnızca elektrik motorunun aracı tahrik etmesi, P2'yi çalışma modu esnekliği açısından oldukça avantajlı kılar. P2 hibrit yapısı, içten yanmalı motor ve elektrik motorunun entegre ve uyumlu bir şekilde yönetilmesini sağlayarak sistem kontrolünü daha etkili ve kolay hale getirir.

Bu özellikleriyle, P2 hibrit yapısının traktörlerde kullanılması hem performans hem de verimlilik açısından ideal bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de P2 hibrit traktör konsepti şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.7 Hafif Hibrit P2 Konfigürasyonu

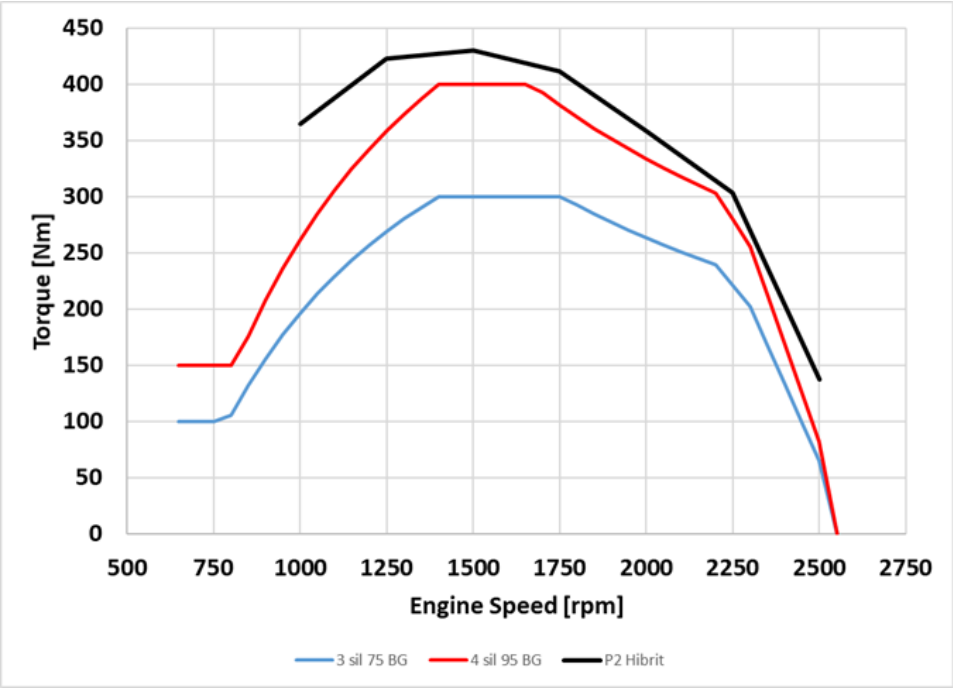


Şekil 6.8 P2 Konfigürasyonunun Motor ve Güç Aktarma Organları Üzerindeki Gösterimi

6.1.5 Elektrik Motoru ve Batarya Seçimi

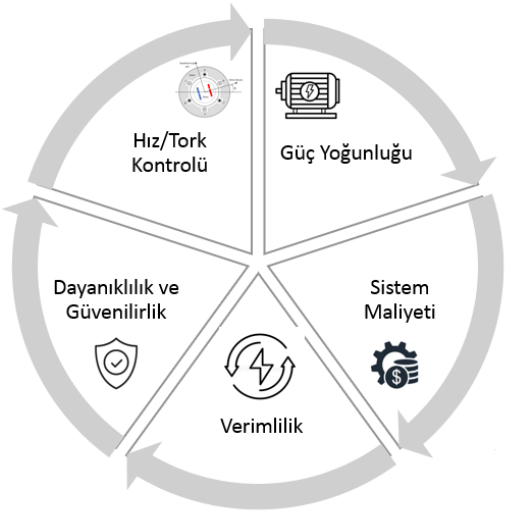
Hibrit konfigürasyonunun P2 olarak belirlenmesinin ardından, sistem verimliliği ve performansını etkileyen bir diğer önemli unsur, elektrik motoru ve batarya seçimidir. Konvansiyonel traktör taşıt modelinde pulluk sürme operasyonu sırasında içten yanmalı motordan talep edilen anlık güç Şekil 5.16'de, operasyon sırasında içten yanmalı motorun çalışma bölgeleri ise Şekil 5.19'de verilmiştir.

Elektrik motoru desteğinin sağlanacak olması, daha küçük bir İYM kullanımını mümkün kılarken, İYM' nin küçültülmesi de elektrik motorunun entegrasyonunu kolaylaştıracaktır. Bu kapsamda, hibrit traktör konseptinde 4 silindirli, 95 BG gücünde bir İYM yerine, 3 silindirli, 75 BG gücünde İYM tercih edilmiştir. Elektrik motoru seçimi yapılırken, hibrit traktörün konvansiyonel traktörle aynı performans seviyesine ulaşması hedeflenmiştir. 4 silindirli 95 BG motorun tam yük eğrisi, 3 silindirli 75 BG motorun tam yük eğrisi ve seçilen elektrik motoru ile elde edilen hibrit sistemin güç eğrisi Şekil 6.9'de paylaşılmıştır. Görüleceği üzere, hibrit yapı ile 4 silindirli 95 BG konvansiyonel motor ile tüm çalışma devir aralığında aynı performans değeri elde edilebilmektedir.



Şekil 6.9 Konvansiyonel ve Hibrit Traktörün Performans Açısından Karşılaştırılması

Hibrit sistemde kullanılacak elektrik motoru olarak, 20 kW değerinde, sabit mıknatıslı ve 250 V değerinde bir elektrik motoru seçilmiştir. Elektrik motoru 3000 d/dk motor hızına ulaşabilmekte ve 170 Nm tork verebilmektedir. Taşıtlarda da kullanılabilen tipte, hava ve sıvı soğutmalı türü olan bir örnek elektrik motoru seçilmiştir. Elektrik motoru seçilirken dikkat edilen parametler Şekil 6.10'da gösterilmiş olup, elektrik motorlarının teknik olarak birbiriyle kıyaslanması Tablo 6.3'te gösterilmiştir.

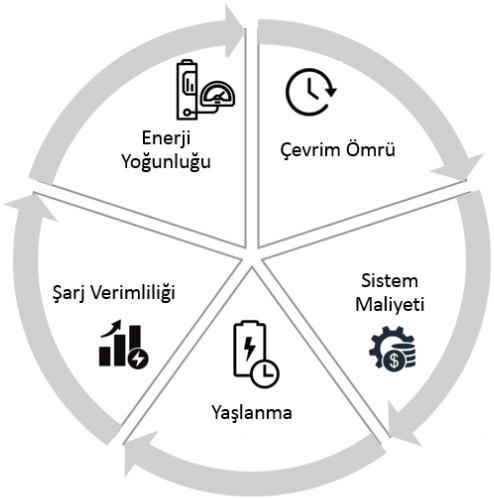


Şekil 6.10 Elektrik Motoru Seçilirken Dikkat Edilen Parametreler

Tablo 6.3 Elektrik Motorlarının Kıyaslanması

	Hız-Tork Kontrolü	**Güç Yoğunluğu (kW/kg)**	**Dayanıklılık ve Güvenilirlik**	**Verimlilik (%)**	**Sistem Maliyeti**
DC Motor	Orta	Düşük (0.3-1)	Düşük	80-85	Düşük
Asenkron Motor	İyi	Orta (1-2.5)	Yüksek	85-90	Orta
PMSM	Çok iyi	Yüksek (2.5-5)	Yüksek	92-97	Yüksek
BLDC	Çok iyi	Orta-Yüksek (1.5-3.5)	Orta-Yüksek	85-95	Orta-Yüksek
SRM	Orta	Orta (1-2.5)	Çok Yüksek	85-92	Düşük-Orta

Diğer taraftan, batarya olarak, 120 Ah akım değerinde, 250 VDC gerilimde bir NMC batarya paketi seçilmiştir. Batarya seçilirken dikkat edilen parametler Şekil 6.11'de gösterilmiş olup, bataryaların teknik olarak birbiriyle kıyaslanması Tablo 6.4'te gösterilmiştir.



Şekil 6.11 Batarya Seçilirken Dikkat Edilen Parametreler

Tablo 6.4 Bataryaların Kıyaslanması

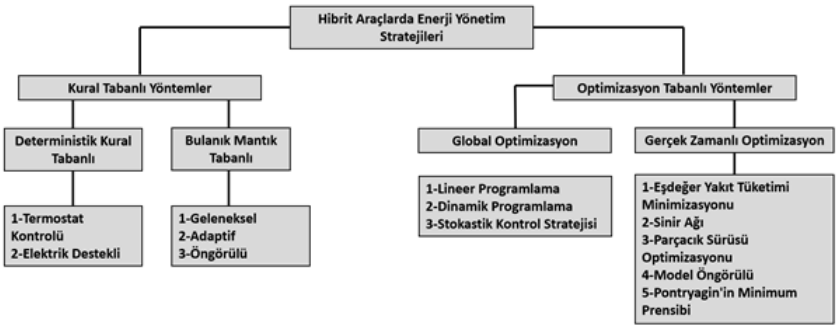
		Nominal Voltaj (V)	**Enerji Yoğun-luğu (Wh/kg)**	**Çevrim Ömrü**	**Şarj Ver-imliliği**	**Sistem Maliyeti**	**Yaşlanma**
Lityum Kobalt Oksit	LCO	3.6	150-200	500-1000	Yüksek	Yüksek	Orta
Lityum Polimer	LiPo	3.7	150-158	300-500	Yüksek	Yüksek	Orta
Lityum Manganez	LMO	3.7	100-150	300-700	Yüksek	Orta	Orta
Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit	NMC	3.6	150-220	1000-2000	Yüksek	Orta	Düşük
Lityum Demir Fosfat	LFP	3.2	90-120	2000+	Yüksek	Düşük	Düşük
Lityum Ti-tanat	LTO	2.2	35-90	3000-7000	Yüksek	Yüksek	Çok Düşük
Kurşun Asit	PbA	2	30-50	300-500	Orta	Düşük	Yüksek
Nikel Demir	NiFe	1.2	30-50	2000-3000	Düşük	Orta	Düşük
Nikel Kad-miyum	NiCd	1.2	40-60	1000-1500	Orta	Orta	Orta
Nikel Metal Hidrür	NiMH	1.2	60-120	500-1000	Orta	Yüksek	Orta

Seçilen 30 kWh enerji değerindeki batarya grubunda, kısa devre koruma, akım koruma gibi sistemler olmakla beraber, akıllı BMS ile dengeli bir şekilde batarya yönetimi sağlanabilmektedir.

7
HİBRİT TRAKTÖR ENERJİ YÖNETİM STRATEJİSİNİN BELİRLENMESİ

Hibrit araçlar, geleneksel içten yanmalı motorların elektrik motorları ile entegre edilmesi sonucu oluşan ve her iki güç kaynağının avantajlarını bir araya getiren sistemleridir. İki farklı güç kaynağının bir arada bulunması, güç akışının etkin bir şekilde yönetilmesini ve bu doğrultuda gelişmiş kontrol stratejilerinin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu stratejiler, her iki güç kaynağını optimum çalışma koşullarında çalıştırmayı hedefleyerek yakıt tüketimini azaltmayı ve emisyon salımını minimize etmeyi amaçlamaktadır.

Enerji yönetim stratejileri, kural tabanlı ve optimizasyon tabanlı olmak üzere iki temel kategori altında incelenebilmektedir. Şekil 7.1'de hibrit araçlarda kullanılan enerji yönetim stratejileri gösterilmiştir [48] [49]. Kural tabanlı stratejiler, insan deneyimine ve matematiksel modellere dayalı olarak geliştirilir ve genellikle belirli sürüş senaryolarına göre önceden tanımlanmış kurallar çerçevesinde çalışır. Bu stratejiler, deterministik ve bulanık mantık tabanlı yaklaşımları içerir ve uygulanması basit olmasına rağmen genellikle optimal sonuçlar sağlamaz. Öte yandan, optimizasyon tabanlı stratejiler, enerji tüketimi veya maliyet gibi hedefleri minimize etmeyi amaçlayan matematiksel optimizasyon tekniklerine dayanır. Bu stratejiler, gerçek zamanlı ve küresel optimizasyon yöntemleri ile daha yüksek verimlilik sunar, ancak uygulama karmaşıklığı ve hesaplama maliyetleri daha yüksektir.



Şekil 7.1 Hibrit Araçlarda Enerji Yönetim Stratejilerine Genel Bakış

Hibrit traktörlerde kullanılan enerji yönetim stratejileri için literatür incelendiğinde, basit yapıları, uygulama kolaylıkları ve önceden tanımlı kurallar üzerinden çalıştıkları için güvenilir çözümler sunan kural tabanlı stratejiler tercih edildiği görülmüştür [50]. Traktörlerin büyük bir kısmı tarımsal operasyonlarda kullanılmaktadır. Bu sebeple, enerji yönetimi stratejisi belirlenirken bu durum göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle pulluk sürme operasyonunda, toprak özelliklerinin mevsime ve bölgeye göre değişkenlik göstermesi, hatta aynı tarla içerisinde toprak sertliğinin anlık olarak değişebilmesi, traktörün çalışma koşullarında anlık değişikliğe neden olmaktadır. Bu tür dinamik koşullar, enerji yönetimi için daha esnek ve adaptif stratejilere ihtiyaç duyulmasına yol açmaktadır.

Optimizasyon tabanlı stratejilerden biri olan dinamik programlama, teorik olarak en optimal çözümü sunabilse de pratik uygulamada bazı sınırlamalar nedeniyle tercih edilmemiştir. Bu strateji, çevrim bilgisine önceden ihtiyaç duyması sebebiyle gerçek zamanlı enerji yönetiminde esnek bir çözüm sunamamaktadır. Ayrıca, yüksek hesaplama maliyeti, özellikle tarımsal operasyonlarda değişken koşullar altında çalışan hibrit traktörler için önemli bir dezavantajdır.

Eşdeğer yakıt tüketim minimizasyonu stratejisi ise bu eksiklikleri gideren daha esnek bir yaklaşımdır. Bu strateji, traktörün gerçek zamanlı güç ihtiyacını ve çalışma koşullarını göz önüne alarak hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoru arasında güç paylaşımını dinamik olarak optimize eder. Strateji, toplam enerji tüketimini ve emisyonları minimize etmeyi hedefleyen matematiksel bir optimizasyon sürecine dayanır. Bu, sistemin her iki güç kaynağını da en verimli şekilde kullanmasını sağlayarak hem yakıt tasarrufu hem de çevresel fayda sağlar.

Bu nedenlerle, bu çalışmada eşdeğer yakıt tüketim minimizasyonu stratejisi tercih edilmiştir. Bu strateji, gerçek zamanlı çalışma koşullarına uyum sağlayarak güç akışını etkili bir şekilde optimize etmekte; böylece yakıt tüketiminin azaltılmasını ve emisyon salımının kontrol altında tutulmasını mümkün kılmaktadır.

7.1 Eşdeğer Yakıt Tüketim Minimizasyonu Stratejisi

Bu bölümde, gerçek zamanlı optimizasyona dayalı bir enerji yönetim stratejisi tasarlanmış ve açıklanmıştır. Kontrol algoritması stratejisine göre, enerji yönetim sistemi Denklem 7.1'de verilen eşdeğer yakıt tüketim $m_{eqv}(t)$ değerini minimize etmeyi amaçlamaktadır.

$$m_{eqv}(t) = m_f(t) + m_{batt}(t) \tag{7.1}$$

$$m_{eqv}(t) = m_f(t) + \frac{s(t)}{Q_{lhv}} P_{batt}(t) p(SOC) \tag{7.2}$$

Ceza fonksiyonu p(SOC), SOC ne kadar uzaklaştığını hesaba katar ve Denklem 7.3'teki gibi tanımlanır.

$$p(SOC) = 1 - \frac{SOC_{(t)} - SOC_{(0)}}{(SOC_{(max)} - SOC_{(min)})/2} \tag{7.3}$$

Bu çalışmada, ceza fonksiyonunun kullanımı, konvansiyonel traktör ile hibrit traktörün aynı test çevriminde yakıt tüketimi açısından doğru bir şekilde kıyaslanabilmek içindir. Ceza fonksiyonu, SOC başlangıç ve bitiş noktalarının aynı seviyede olmasını sağlayarak, enerji depolama sisteminin tüketim üzerindeki etkisini dengelemekte ve farklı güç kaynaklarının katkısını eşit koşullar altında değerlendirme imkânı sunmaktadır. Bu yaklaşım, konvansiyonel ve hibrit traktör tipi için doğru bir karşılaştırma yapılmasını mümkün kılarken, hibrit sistemin sağladığı potansiyel yakıt tasarrufunu daha net bir şekilde analiz etmeyi sağlamaktadır.

Sistemin fiziksel ve operasyonel sınırlarını dikkate alarak gerçekçi ve uygulanabilir bir enerji yönetim stratejisi geliştirebilmek için modele bazı limitlerin tanımlanması gerekmektedir. Elektrik motoru ve içten yanmalı motorun tork ve hız değerleri gibi bileşen limitleri hem güvenli çalışma koşullarını sağlamak hem de enerji yönetim algoritmasının bu sınırlar içinde optimize edilmesini mümkün kılmak için belirlenmiştir.

$$0 \leq \omega_{motor} \leq 2550$$

$$0 \leq \omega_{engine} \leq 2550$$

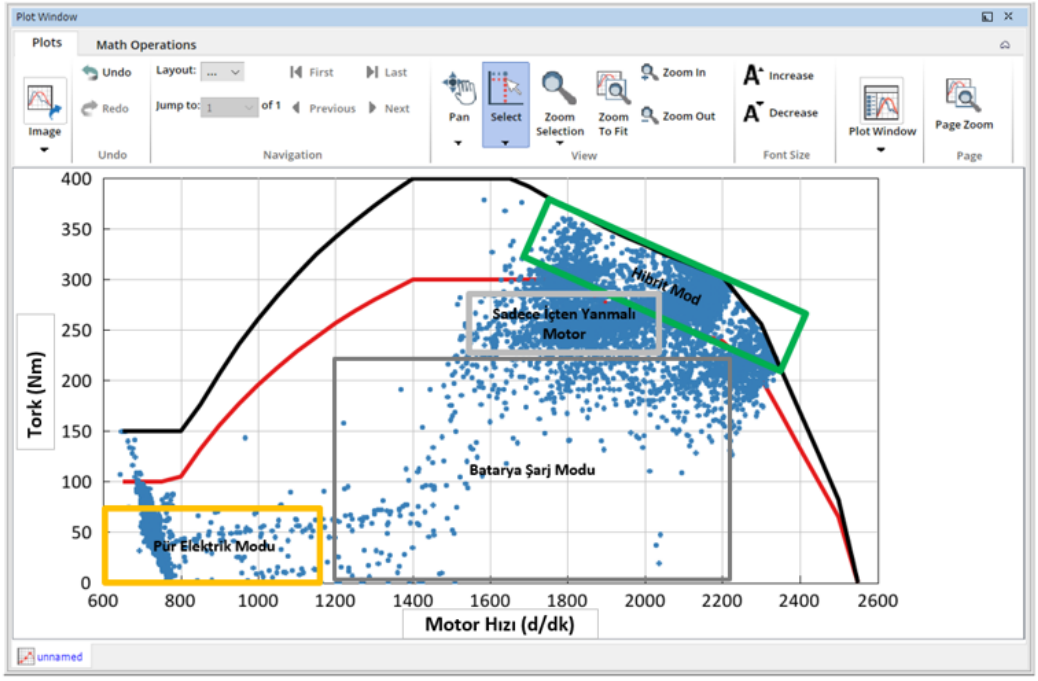
$$T_{motor,min} \leq T_{motor} \leq T_{motor,max}$$

$$T_{engine,min} \leq T_{engine} \leq T_{engine,max}$$

$$0.4 \leq (SOC) \leq 0.6$$

7.2 Kontrol Stratejisinin Belirlenmesi

Hibrit kontrol sistemi, anlık güç talebine ve SOC değerine bağlı olarak hibrit, İYM ya da sadece elektrikli modu aktif hale getirir. Eğer SOC minimum değerin üzerinde ise araç çalıştırıldığında tamamen elektrikli mod seçilir. Ancak, batarya doluluk oranı maksimum SOC değerinin altındaysa şarj modu devreye girer. EYTMY dikkate alarak, seyir döngüsünün başında ve sonunda SOC'nin aynı olması sağlanacak şekilde, Eşdeğerlik Faktörü s(t) ayarlanarak eşdeğer yakıt tüketimi hesaplanmıştır. Diğer kısmi yük sürüş koşullarında, araç hibrit modda çalışır.



Şekil 7.2 Kontrol Stratejisi

Bununla birlikte, Şekil 7.2'de belirtilen kırmızı eğri 3 silindirli 75 beygir gücündeki motorun tam yük eğrisini, siyah eğri ise 4 silindirli 95 beygir gücündeki motorun tam yük eğrisini temsil etmektedir [51]. Hibrit modda, traktörün çalışma noktaları kırmızı eğrinin üzerine çıktığında, elektrik motorunun sağladığı tork desteği sayesinde toplam sistem performansı siyah tam yük eğrisine ulaşmaktadır.

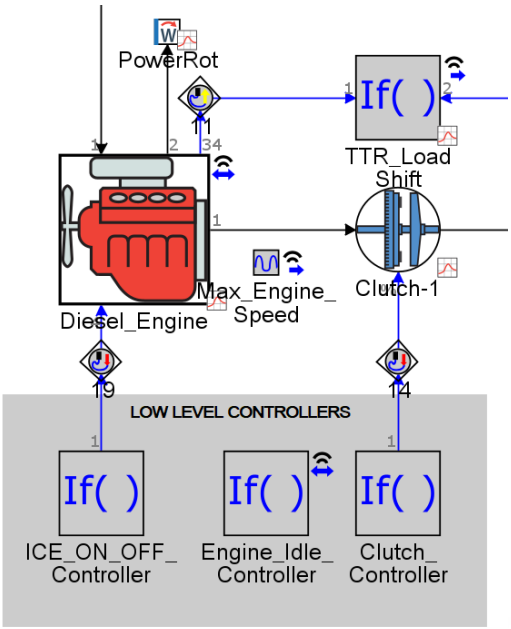
Bu durum, hibrit araç kontrol stratejisinin, daha düşük güçlü bir içten yanmalı motorun elektrik motoruyla entegre edilerek daha yüksek güçlü bir sistemin performans gerekliliklerini karşılayabildiğini göstermektedir. Bu strateji ile birlikte, içten yanmalı motoru en verimli bölgelerde çalıştırarak, yakıt tüketiminde iyileşme sağlanması hedeflenmiştir.

8
HİBRİT TRAKTÖR TAŞIT MODELİNİN OLUŞTURULMASI

GT-SUITE yazılımında, konvansiyonel taşıt modelinin yanı sıra, aynı çevrimde yakıt tüketimi ve emisyon salımını kıyaslamak amacıyla hibrit taşıt modeli oluşturulmuştur. Konvansiyonel modelde kullanılan 4 silindirli 95 beygir gücündeki motor yerine, hibrit modelde 3 silindirli 75 beygir gücünde motor kullanılmış ve bu motorun performans verileri modele entegre edilmiştir. Motor aksesuar grubu, şanzıman ve taşıtın diğer tüm detayları konvansiyonel traktör modelinden alınmıştır. Hibrit taşıt modeline elektrik motoru ve batarya özellikleri detaylı bir şekilde tanımlanmış, enerji yönetim stratejisi olarak EYTMY uygulanmıştır.

8.1 İçten Yanmalı Motorun Modellenmesi

Hibrit modelde, konvansiyonel modelde olduğu gibi İYM, harita tabanlı bir motor modeli kullanılarak temsil edilmiştir. Motorun rölanti hızını kontrol etmek amacıyla bir kontrolör tasarlanmış ve modele entegre edilmiştir. Kontrol stratejisinde belirtilen farklı çalışma modlarını uyarlamak için içten yanmalı motora aç-kapa (on-off) fonksiyonu eklenmiştir. Bu sayede, taşıtın gerektiğinde tamamen elektrikli modda çalışmasını sağlayarak hibrit sistemin esnekliğini ve enerji verimliliğinin arttırılması hedeflemiştir.



Şekil 8.1 3 silindir 75 BG Motor Modeli

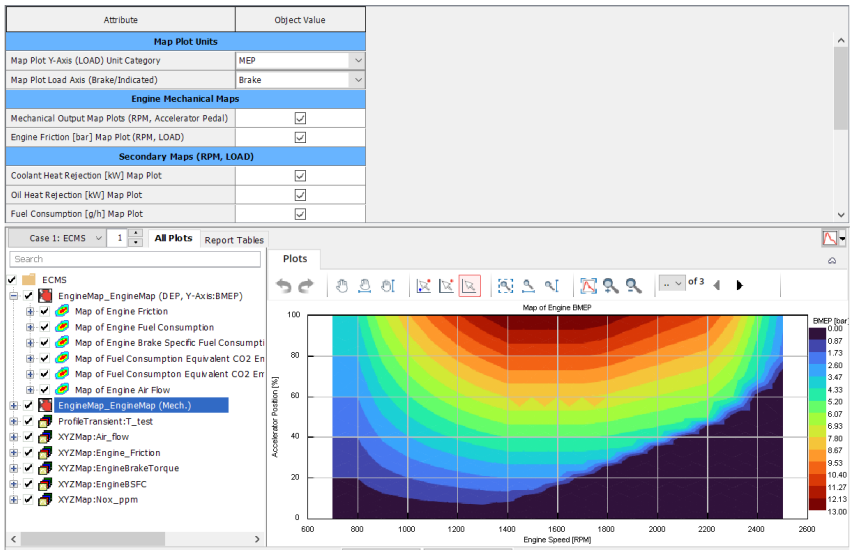
Motorun toplam hacmi ve atalet momenti bilgileri tanımlanmıştır. Konvansiyonel modelde kullanılan motor modeline kıyasla, hibrit taşıtta kullanılan motor modelinde, motor sürtünme torku değerleri de tanımlanmıştır.

Main | Fuel | Secondary Maps | Thermal Behavior | Map Plots | Advanced

Attribute	Unit	Object Value
Engine Displacement	cm^3	2900
Engine Inertia	See Case S...	[engine_inertia]
Initial Speed	RPM	750
Output Request		
Percentage Load Request	%	0
Engine BMEP	bar	
Engine Brake Torque	N-m	5
Engine Mechanical Outputs		
Engine Mechanical Output Map Units		N-m
Engine Mechanical Output Map		EngineBrakeTorque
Engine Friction Map		Engine_Friction
Fuel and Secondary Map Dependency		
Fuel and Secondary Map Load Dependency		Brake

Şekil 8.2 3 silindirli 75 BG Motorun Toplam Motor Hacmi ve Atalet Momentinin Tanımlanması

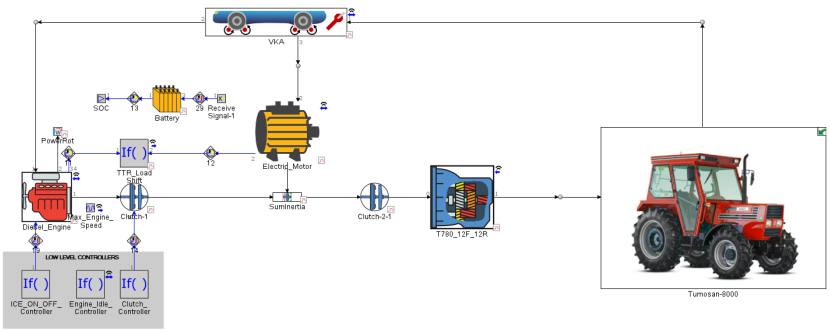
İçten yanmalı motor dinamometre testlerinden elde edilen verilere dayalı olarak, farklı motor hızları ve yük koşulları için tork ve yakıt tüketim haritaları modele entegre edilmiştir.



Şekil 8.3 3 silindirli 75 BG Motorun Tork ve Yakıt Tüketim Haritalarının Modele Tanımlanması

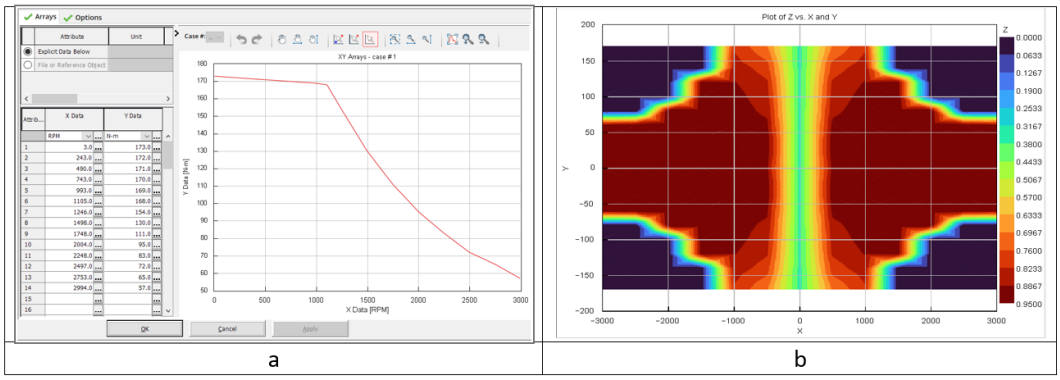
8.2 Elektrik Motoru ve Hibrit Taşıtın Modellenmesi

P2 hibrit yapısına uygun olarak, elektrik motoru, içten yanmalı motorun volan çıkışı ile şanzıman girişi arasına yerleştirilmiş ve modlar arasında geçişi sağlamak amacıyla ön ve arka tarafına iki kavrama mekanizması entegre edilmiştir. Konvansiyonel modda, taşıtın tahriki yalnızca içten yanmalı motor tarafından sağlanırken, tam elektrik modunda 1. kavrama açık konumda olup taşıtın tahriki yalnızca elektrik motoruyla gerçekleştirilmektedir. Hibrit modda ise her iki kavrama kapalı konumda çalışmakta ve taşıtın tahriki içten yanmalı motor ile elektrik motorunun eşzamanlı katkısıyla sağlanmaktadır.



Şekil 8.4 P2 Hibrit Yapısında Elektrik Motorunun Konumlandırılması

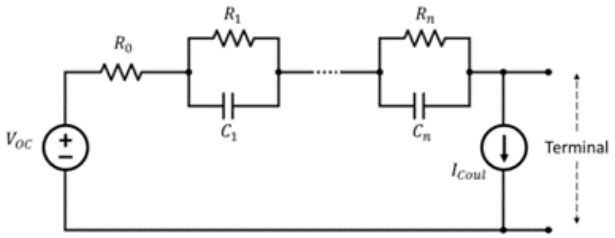
Elektrik motorunun tork ve verim eğrileri modele entegre edilmiştir. Maksimum tork kapasitesi 173 Nm olan elektrik motoru, %95'e ulaşan maksimum verimlilik ile çalışabilmektedir.



Şekil 8.5 a-) Elektrik Motoru Tork Eğrisi b-) Elektrik Motoru Verim Haritası

8.3 Bataryanın Modellenmesi

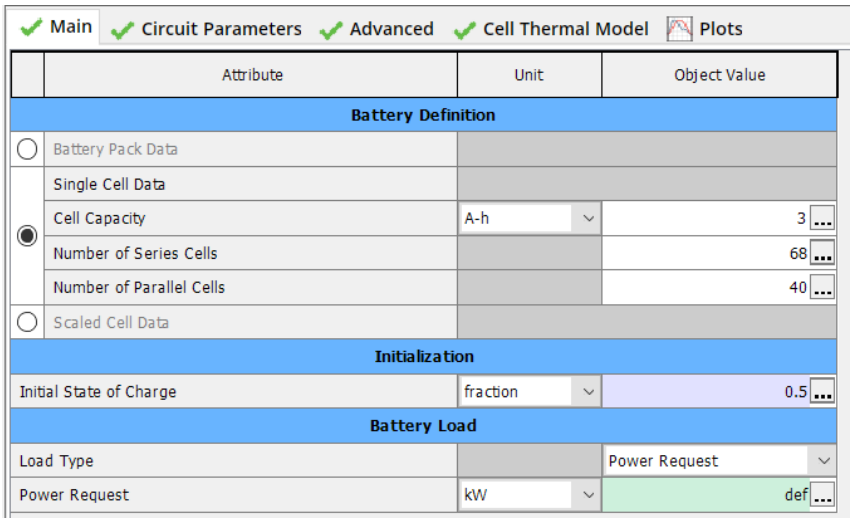
Hibrit sistemde, enerji yönetimi ve simülasyon süreçlerinde, pillerin farklı çalışma koşullarındaki dinamik davranışını temsil etmek amacıyla, yaygın olarak kullanılan Thevenin Elektriksel Eşdeğer Pil Model'i tercih edilmiştir.



Şekil 8.6 Thevenin Elektriksel Eşdeğer Pil Modeli

Bu model, pilin açık devre voltajı (Voc); iç direnci (Ro) ve dinamik davranışını temsil eden direnç-kapasitör (R-C) kombinasyonlarından oluşan devre yapısını temel alır. Bu model SOC, sıcaklık ve terminal akımı gibi değişkenlerin fonksiyonu olarak parametrelerin tanımlanmasını sağlar. Ayrıca, pilden geçen akımın zamana göre entegre edilmesiyle şarj durumunu belirlemek için Coulomb Sayımı yöntemini kullanır. Coulomb verimliliği de dikkate alınarak, terminal akımının pili şarj etmediği senaryolar hesaplamalara dahil edilir.

Pil, tek hücre verisi seçeneği ile oluşturulmuştur. Pil modeli oluşturulurken kullanılan ölçekleme ilişkileri aşağıda detaylı açıklanmaktadır.



Şekil 8.7 Tek Hücre Verisi ile Batarya Modelinin Oluşturulması

Batarya paketi kapasitesi, paralel hücre sayısı (Np) ile tek hücrenin kapasitesinin (Cap,Cell) çarpımı ile hesaplanır.

$$Cap, BatteryPack = Np * Cap, Cell \tag{8.1}$$

Batarya paketinin açık devre voltajı, seri hücre sayısı (Ns) ile hücrenin açık devre voltajının (V_{oc},Cell) çarpımına eşittir.

$$V_{OC}, BatteryPack = Ns * V_{OC}, Cell \tag{8.2}$$

Batarya paketi toplam direnci, seri hücre sayısının (Ns) paralel hücre sayısına (Np) oranı ile bir hücre direncinin (R,cell) çarpımına eşittir.

$$R, BatteryPack = Ns/Np * R, cell \tag{8.3}$$

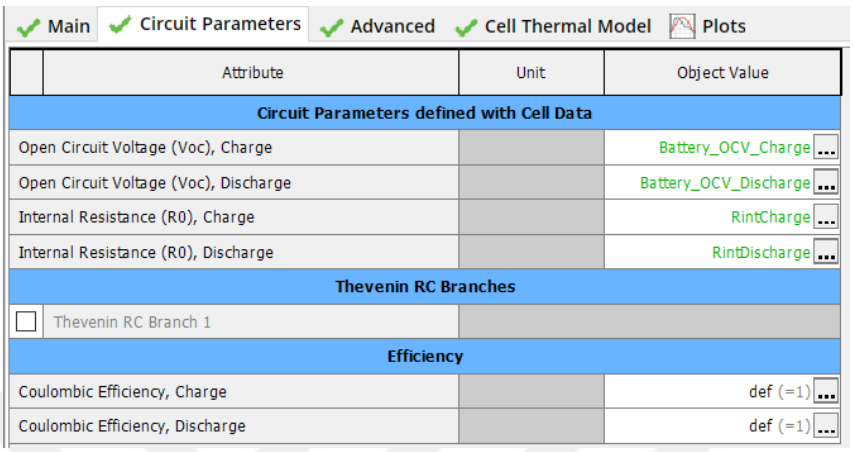
Batarya paketi zaman sabitleri, tek bir hücrenin zaman sabitine (T,cell) eşittir.

$$T, BatteryPack = T, cell \tag{8.4}$$

Batarya paketi toplam kapasitansı, paralel hücre sayısının (Np) seri hücre sayısına (Ns) oranı ile bir hücrenin kapasitansının (C,cell) çarpımıdır.

$$C, BatteryPack = Np/Ns * C, cell \tag{8.5}$$

Batarya paketinin açık devre voltajı ve iç dirençleri, pil sıcaklığı ve SOC' ye bağlı olarak hem şarj hem de deşarj durumları için ayrı ayrı tanımlanmıştır.



Main | Circuit Parameters | Advanced | Cell Thermal Model | Plots

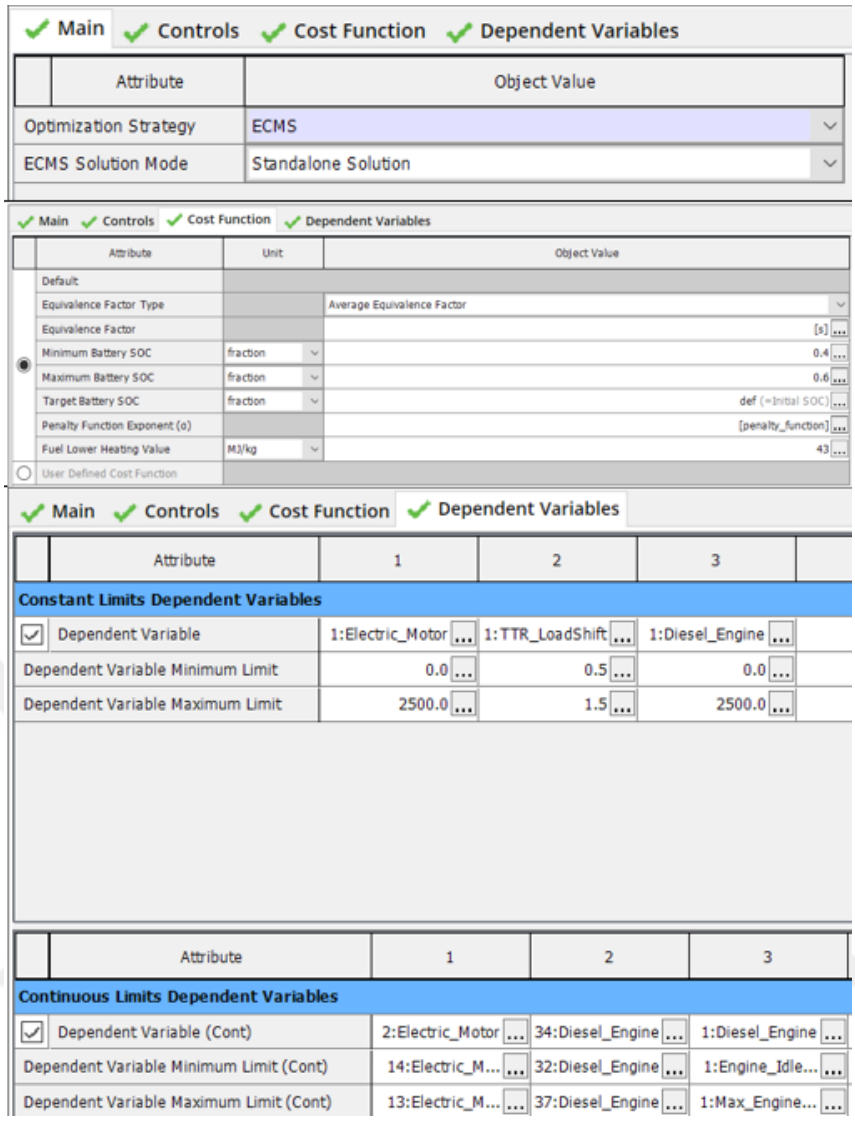
Attribute	Unit	Object Value
Circuit Parameters defined with Cell Data		
Open Circuit Voltage (Voc), Charge		Battery_OCV_Charge
Open Circuit Voltage (Voc), Discharge		Battery_OCV_Discharge
Internal Resistance (R0), Charge		RintCharge
Internal Resistance (R0), Discharge		RintDischarge
Thevenin RC Branches		
Thevenin RC Branch 1		
Efficiency		
Coulombic Efficiency, Charge		def (=1)
Coulombic Efficiency, Discharge		def (=1)

Şekil 8.8 Batarya Paketinin Açık Devre Voltajı ve İç Direncinin Modellenmesi

Bu çalışmada, batarya paketinin toplam kapasitesi, paralel hücre sayısı 40 ile tek bir hücrenin kapasitesi olan 3 Ah'nin çarpımı sonucu hesaplanmış olup, 120 Ah olarak belirlenmiştir. Pil paketinin nominal voltajı ise, tek bir hücrenin nominal voltajı 3.7 V ile 68 adet seri hücre sayısının çarpımı olarak 250 V olarak hesaplanmıştır.

8.4 Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyonu Metodunun Modele Eklenmesi

Hibrit taşıt modeli oluşturulduktan sonra, EYS olarak EYTMY uygulanmış ve gerekli ayarlamalar yapılarak sisteme entegre edilmiştir. Bu kapsamda, minimum ve maksimum batarya şarj durumu, hedef batarya şarj durumu, eşdeğerlilik faktörü ile içten yanmalı motor ve elektrik motoru için hız ve kontrol limitleri tanımlanmıştır. Bu tanımlamalar ile sistemin optimal enerji yönetimini sağlanması amaçlanmıştır.



Main | Controls | Cost Function | Dependent Variables

Attribute	Object Value
Optimization Strategy	ECMS
ECMS Solution Mode	Standalone Solution

Main | Controls | Cost Function | Dependent Variables

Attribute	Unit	Object Value
Default		
Equivalence Factor Type		Average Equivalence Factor
Equivalence Factor		[s]
Minimum Battery SOC	fraction	0.4
Maximum Battery SOC	fraction	0.6
Target Battery SOC	fraction	def (=Initial SOC)
Penalty Function Exponent (α)		[penalty_function]
Fuel Lower Heating Value	MJ/kg	43
User Defined Cost Function		

Main | Controls | Cost Function | Dependent Variables

Attribute	1	2	3
Constant Limits Dependent Variables			
Dependent Variable	1:Electric_Motor	1:TTR_LoadShift	1:Diesel_Engine
Dependent Variable Minimum Limit	0.0	0.5	0.0
Dependent Variable Maximum Limit	2500.0	1.5	2500.0

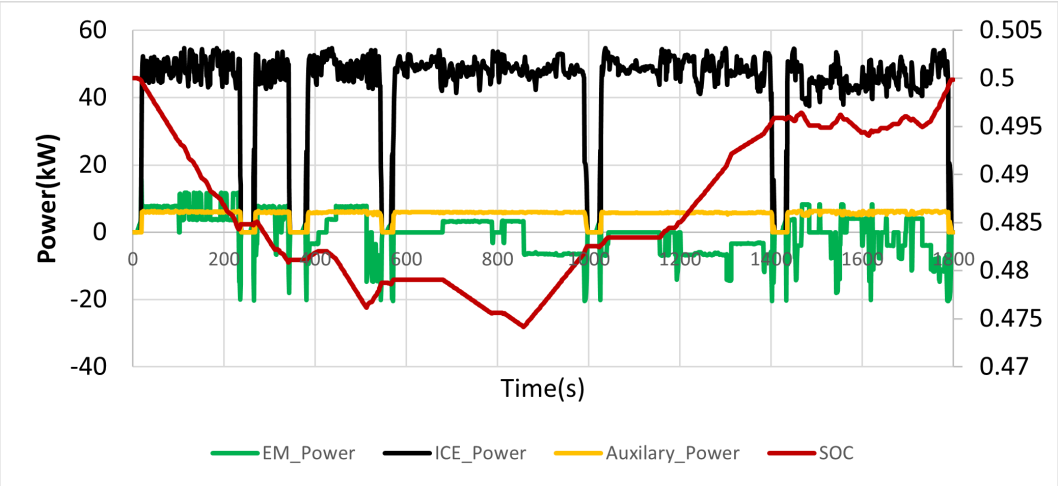
Attribute	1	2	3
Continuous Limits Dependent Variables			
Dependent Variable (Cont)	2:Electric_Motor	34:Diesel_Engine	1:Diesel_Engine
Dependent Variable Minimum Limit (Cont)	14:Electric_M...	32:Diesel_Engine	1:Engine_Idle...
Dependent Variable Maximum Limit (Cont)	13:Electric_M...	37:Diesel_Engine	1:Max_Engine...

Şekil 8.9 Eşdeğer Yakıt Tüketimi Minimizasyonu Yöntemi İçin Sisteme Tanımlanan Limitler

8.5 Hibrit Traktör ile Pulluk Sürme Simülasyonu

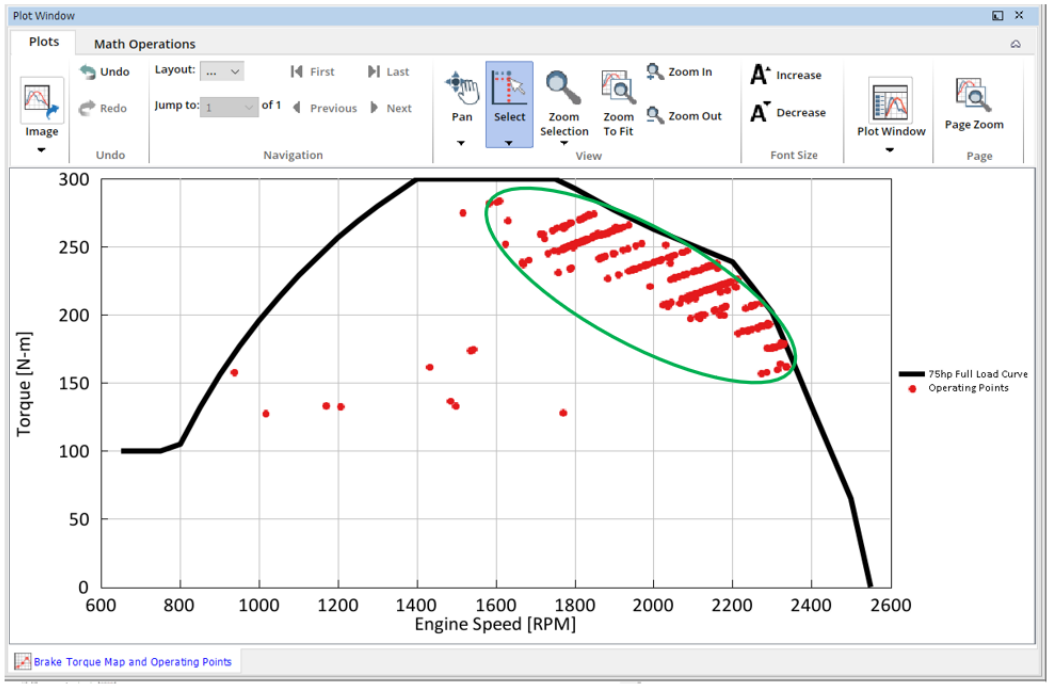
Elektrik motoru, batarya özellikleri ve enerji yönetim stratejisi modele tanımlandıktan sonra hibrit taşıt modeli oluşturulmuştur. Ardından, konvansiyonel traktörde uygulanan tarla çevrimi hibrit traktör için de uyarlanmış ve bu bağlamda ilgili analizler gerçekleştirilmiştir.

Şekil 8.10' de görüldüğü üzere, SOC, eşdeğerlilik faktörü kullanılarak optimize edilmiş ve çevrim sonunda başlangıçtaki değerine ulaşmıştır. EYTMY sayesinde, içten yanmalı motor ile elektrik motoru arasında güç dağılımı sağlanmış ve her iki motor, verimli çalışma bölgelerinde çalıştırılmıştır. İhtiyaç duyulduğunda ise içten yanmalı motor devre dışı bırakılmıştır.



Şekil 8.10 Hibrit Traktör Modelinde Pulluk Operasyonu Sırasında İYM, EM ve SOC'nin Zamana Bağlı Değişimi

Şekil 8.11'de hibrit traktörde pulluk operasyonu sırasında içten yanmalı motorun (İYM) çalışma noktaları gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde, EYTMY sayesinde İYM'nin çevrim boyunca en verimli çalışma bölgelerinde işletildiği görülmektedir. Bu strateji, motorun düşük verimli alanlarda çalışmasını engelleyerek yakıt tüketiminde belirgin bir iyileşme sağlamıştır.



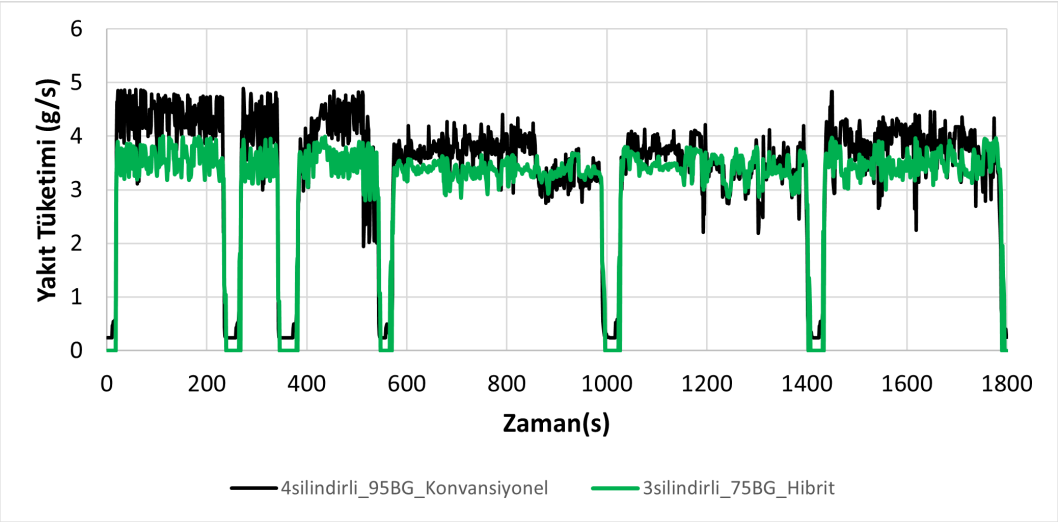
Şekil 8.11 Hibrit Traktör Modelinde Pulluk Operasyonu Sırasında İYM'nin Çalışma Noktaları

9
SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, hibrit taşıt modeli oluşturulduktan sonra, pulluk sürme operasyonu için konvansiyonel traktöre uygulanan çevrim, hibrit traktör modeline de entegre edilmiştir. Enerji yönetim stratejisi olarak EYTMY kullanılmış ve taşıtın ihtiyaç duyduğu güç, içten yanmalı motor ile elektrik motoru arasında optimize edilerek dağıtılmıştır. Bu süreçte, çevrim başlangıcındaki ve bitişindeki SOC aynı olması, eşdeğerlilik faktörü ile sağlanmıştır. Böylece, konvansiyonel ve hibrit traktörler arasında yakıt tüketimi ve emisyon salımı açısından tutarlı ve karşılaştırılabilir bir değerlendirme yapılması hedeflenmiştir.

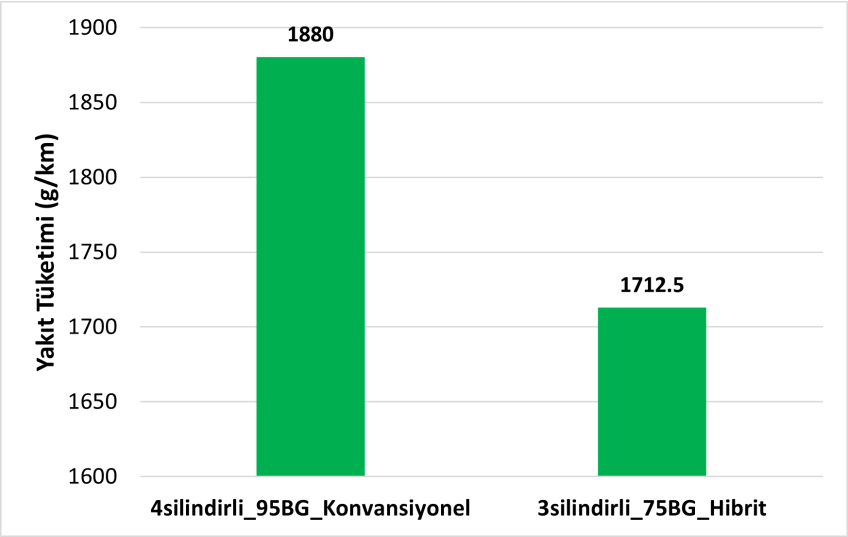
9.1 Konvansiyonel ve Hibrit Traktörler için Yakıt Tüketimi Kıyaslanması

Şekil 9.1, konvansiyonel ve hibrit traktörlerin anlık yakıt tüketimi değerlerinin karşılaştırmasını sunmaktadır. Grafik incelendiğinde, konvansiyonel traktörde kaydedilen maksimum anlık yakıt tüketiminin 4.88 g/s olduğu, hibrit traktörde ise bu değerin 4 g/s'ye düştüğü görülmüştür. Çevrim sonunda tüketilen kümülatif yakıt miktarı incelendiğinde, konvansiyonel traktörde bu değer 6123 g, hibrit traktörde ise 5575 g olarak kaydedilmiştir.



Şekil 9.1 Konvansiyonel ve Hibrit Traktör Anlık Yakıt Tüketimi Karşılaştırılması

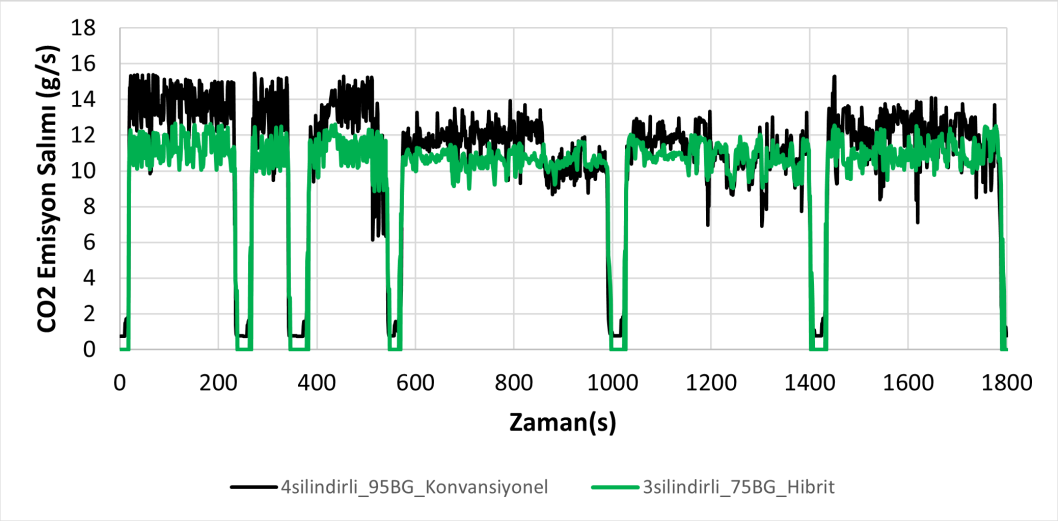
Şekil 9.2, konvansiyonel ve hibrit traktörlerin çevrim boyunca toplam yakıt tüketim değerlerini g/km olarak göstermektedir. Konvansiyonel traktörde toplam yakıt tüketimi 1880 g/km olarak ölçülürken, hibrit traktörde bu değer 1712.5 g/km olarak kaydedilmiştir. Bu iyileşme üç temel faktörle açıklanabilir. İlk olarak, 4 silindirli 95 BG motordan 3 silindirli 75 BG motora geçiş, motorun termal verimini artırmış ve özgül yakıt tüketimini iyileştirmiştir. İkinci olarak, eşdeğer yakıt tüketimi minimizasyonu yöntemi ile 3 silindirli 75 BG motorun çevrim boyunca motor haritasının daha verimli bölgelerinde çalıştırılması etkili olmuştur. Üçüncü olarak, taşıtın manevra ve belirli hız değerinin altındaki bölgelerde içten yanmalı motorun kapalı duruma geçmesi ve kalkışlarda elektrik motoru desteğinden faydalanması etkili olmuştur. Böylece, yakıt tüketiminde %9 oranında bir iyileşme elde edilmiştir.



Şekil 9.2 Konvansiyonel ve Hibrit Traktör Toplam Yakıt Tüketimi Karşılaştırılması

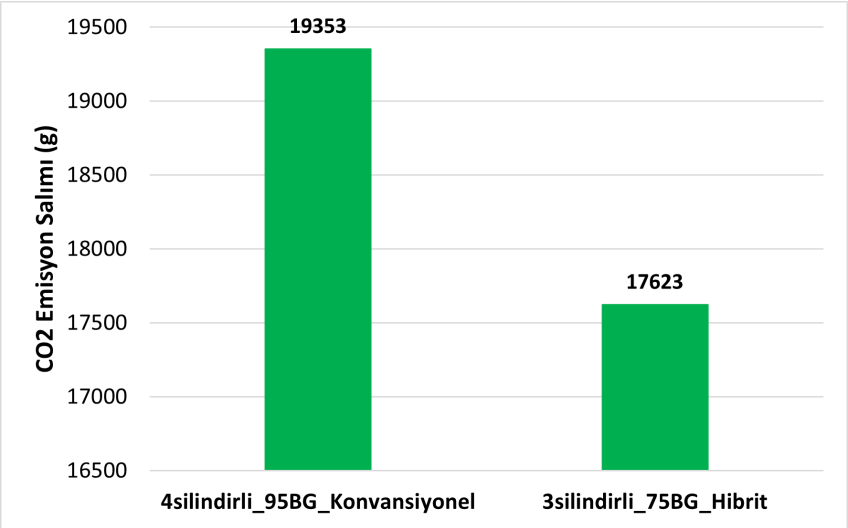
9.2 Konvansiyonel ve Hibrit Traktörler için Emisyon Salımı Kıyaslanması

Şekil 9.3, konvansiyonel ve hibrit traktörlerin anlık CO_2 emisyon salımı değerlerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Grafik incelendiğinde, konvansiyonel traktörde kaydedilen maksimum anlık CO_2 emisyon salımının 15.45 g/s olduğu, hibrit traktörde ise bu değerin 12.64 g/s'ye düştüğü görülmüştür.



Şekil 9.3 Konvansiyonel ve Hibrit Traktör Anlık CO_2 Emisyon Salımı Karşılaştırılması

Şekil 9.4, konvansiyonel ve hibrit traktörlerin sürüş çevrimi boyunca çevreye saldığı toplam CO_2 emisyon değerlerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Elde edilen verilere göre, konvansiyonel traktörün toplam CO_2 emisyonu 19.353 g olarak kaydedilirken, hibrit traktör için bu değer 17.623 g olarak ölçülmüştür. Hibrit traktör kullanımında CO2 emisyon salımında yaklaşık %9 azalma olmuştur. CO_2 emisyonlarındaki bu azalma, çeşitli etmenlerin bir araya gelmesiyle mümkün olmuştur. Öncelikle, üç silindirli motora geçişle sağlanan termal verimlilik artışı önemli bir katkı sağlamaktadır. Ayrıca, hibrit enerji yönetim stratejisi, içten yanmalı motorun verimli çalışma bölgelerinde çalıştırılmasına olanak tanımaktadır. P2 hibrit yapısının sunduğu tamamen elektrik modunda çalışma esnekliği, özellikle dur-kalk senaryolarında içten yanmalı motorun kapatılarak elektrik motorunun devreye girmesini mümkün kılmıştır. Bu kombinasyon, yakıt tüketiminde olduğu gibi CO_2 emisyonlarında da belirgin bir iyileşme sağlamıştır.



Şekil 9.4 Konvansiyonel ve Hibrit Traktör Toplam CO_2 Emisyon Salımı Karşılaştırılması

9.3 Çalışmanın Çıktıları

- Çalışmada konvansiyonel ve hibrit traktörlerin yakıt tüketimi ve emisyon salımı açısından kıyaslayabilmek için simülasyon ortamında taşıt modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan taşıt modelinde sürücü tepkileri, lastiğin ve pulluk ekipmanının toprak ile ilişkisi modellenerek test sonuçları ile doğrulanmıştır. Bu model sayesinde, farklı toprak türlerinde, farklı sürüş senaryosu ve sürücü karakteristikleri için detaylı simülasyonlar yapılabilir ve çalışma kapsamı genişletilebilir.

- Çalışma 20 kW Elektrik Motoru ve 30 kWh Batarya Paketi ile oluşturulan P2 hibrit yapı için yapılmıştır. Oluşturulan hibrit traktör taşıt modeli sayesinde, farklı elektrik motoru ve batarya çifti ile diğer hibrit konfigürasyonları için çalışma kapsamı genişletilebilir.

- Hafif hibrit traktör konsepti çerçevesinde, İYM olarak 4 silindirli, 95 beygir gücündeki motor yerine 3 silindirli, 75 beygir gücünde bir motorun tercih edilmesi, konvansiyonel traktörde kullanılan SCR ünitesinin çıkarılmasına olanak tanımıştır. Bu değişiklik, SCR sisteminin ağırlık ve hacim gereksiniminden tasarruf sağlarken, elektrik motoru ve batarya paketi için yerleşim avantajı sunmuştur. Bu yaklaşım, hibrit sistemin entegrasyonu açısından hem tasarım hem de fonksiyonel verimlilik sağlamaktadır.

- Hibrit traktörler üzerine yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde, içten yanmalı motorların yakıt tüketim haritaları için genellikle bazı kabuller yapıldığı veya benzer motorlardan elde edilen tahmini verilerin kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu

çalışmada, motor test dinamometre testleri ile motorun gerçek yakıt tüketim verileri elde edilmiştir. Ayrıca, tarla operasyonlarına ilişkin traktör hız verilerinin de sıklıkla kabuller üzerinden değerlendirildiği belirlenmiştir. Özellikle, pulluk sürme gibi tarla operasyonlarında hızın sabit olarak kabul edilmesi, sonuçlar üzerindeki hata oranını önemli ölçüde artırmaktadır. Örnek olarak, traktör hızının 5,5 ile 6,5 km/h arasında değiştiği bir çevrim için bir hesaplama yapılmıştır . Traktörler tarla operasyonlarında genellikle düşük vites kademesinde, yüksek çevrim oranlarında çalışırlar. Bu çevrim oranı 120 ile 250 arasında değişebilir. Böyle bir durumda, traktör hızındaki yalnızca 1 km/h'lik bir değişim, motor devrinde yaklaşık 500 d/dk'lık bir farka yol açabilir. Dolayısıyla, hızın sabit bir değer, örneğin 6 km/h olarak alınması, motorun gerçek çalışma noktasını doğru şekilde temsil etmemektedir. Bu tür etkilerin analiz sonuçları üzerindeki hata payını en aza indirmek amacıyla, sahadan elde edilen traktör hız verileri bu konu dikkate alınarak filtrelenmiş ve böylece daha güvenilir bir analiz yöntemi geliştirilmiştir.

9.4 Sonuç ve Tartışma

Elde edilen sonuçlardan, hafif hibrit traktör tahrik sistemlerinin tarımda kullanılmasının yakıt maaliyetlerini düşürmede ve emisyonları düşürmede önemli miktarda katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Bu kapsamda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- Hafif hibrit tahrik sisteminin traktörde kullanılmasıyla, 4 silindirli motor yerine 3 silindirli motor kullanılarak hemen hemen aynı maksimum güç eğrilerinin elde edilebileceği ve dolayısıyla motor boyutlarında küçülmeye (downsized) gidilerek, İYM' nin daha verimli bölgede çalışması sağlanabileceği ve sonuçlarda yakıt tüketimi ve emisyonlarda iyileşme sağlanabileceği görülmüştür.

- Enerji yönetim stratejisi olarak EYTMY kullanılarak ve taşıtın ihtiyaç duyduğu güç, İYM ile EM arasında optimize edilerek dağıtılmış, böylece çevrim başlangıcındaki ve bitişindeki SOC aynı olması, eşdeğerlilik faktörü ile sağlanmış ve Böylece, konvansiyonel ve hibrit traktörler arasında yakıt tüketimi ve emisyon salınımı karşılaştırılabilmiştir. Diğer taraftan, gerçek şartlarda da kolaylıkla EYTMY kullanılabileceği ve yakıt tüketimi ve emisyonlarda iyileşme sağlanabileceği öngörülmüştür.

- Hafif hibrit tahrik sisteminin ağır yük çalışma şartlarında traktör kullanılmasıyla yakıt tüketiminde %9 mertebesinde iyileşme gerçekleştirilmiştir. Bu durum, pulluk gibi traktörle tarlada ağır çalışma şartlarındaki seyir çevriminde önemli miktarda yakıt tüketiminde iyileşme gerçekleştirilebileceği öngörülmüştür.

- Dünyada traktörlerde Stage 5 emisyon regülasyonlarının getirildiği de göz önünde bulundurulduğunda, hibrit çalışma şartlarında yüksek emisyon regülasyonlarının daha rahat bir şekilde sağlanabileceği ve km'deki CO_2 salınımında iyileşme sağlanabileceği öngörülmüştür.

- Sınırda karbonun gündemde olduğu günümüz global dünya pazarında emisyon değerlerinde iyileşme sağlanabilecek her tür sisteme yakın gelecekte tarım sektöründe de ihtiyaç duyulabilecektir. Bu durumda, başta CO_2 olmak üzere ziraat kaynaklı emisyonları düşürecek hibrit tahrik sistemlerine ihtiyaç duyulabileceği öngörülmektedir.

Sonuç olarak, traktörlerde hafif hibrit tahrik sistemi kullanılmasının, batarya teknolojisinin enerji / ağırlık oranının hala gelişmesi gerektiği şu günlerde, taşıtlarda elektrifikasyona geçişte bir köprü vazifesi görebileceği ve yakıt tüketimi ve emisyonlar açısından faydalı olacağı kanaati oluşmuştur.

KAYNAKÇA

[1] S. Gorjian, O. Fakhraei, A. Gorjian, A. Sharafkhani, A. Aziznejad, "Sustainable food and agriculture: Employment of renewable energy technologies," *Current Robotics Reports*, vol. 3, no. 3, pp. 153–163, 2022.

[2] E. Scolaro, M. Beligoj, M. P. Estevez, L. Alberti, M. Renzi, M. Mattetti, "Electrification of agricultural machinery: A review," *Ieee Access*, vol. 9, pp. 164 520–164 541, 2021.

[3] M. Gonzalez-de-Soto, L. Emmi, C. Benavides, I. Garcia, P. Gonzalez-de-Santos, "Reducing air pollution with hybrid-powered robotic tractors for precision agriculture," *Biosystems Engineering*, vol. 143, pp. 79–94, 2016.

[4] H. Dou, H. Wei, Q. Ai, Y. Zhang, "Optimal energy management strategy for dual-power coupling tractor based on the adaptive control technology," *Plos one*, vol. 18, no. 11, e0292510, 2023.

[5] J. Li, X. Wu, X. Zhang, Z. Song, W. Li, "Design of distributed hybrid electric tractor based on axiomatic design and extenics," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 54, p. 101 765, 2022.

[6] F. Mocera, V. Martini, "Numerical performance investigation of a hybrid ecvt specialized agricultural tractor," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 5, p. 2438, 2022.

[7] M. A. Baba, M. Labbadi, M. Cherkaoui, M. Maaroufi, "Fuel cell electric vehicles: A review of current power electronic converters topologies and technical challenges," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, vol. 785, 2021, p. 012 011.

[8] J. J. Jui, M. A. Ahmad, M. I. Molla, M. I. M. Rashid, "Optimal energy management strategies for hybrid electric vehicles: A recent survey of machine learning approaches," *Journal of Engineering Research*, 2024.

[9] Y. Cao, M. Yao, X. Sun, "An overview of modelling and energy management strategies for hybrid electric vehicles," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 10, p. 5947, 2023.

[10] M. Liu, Y. Li, L. Xu, Y. Wang, J. Zhao, "General modeling and energy management optimization for the fuel cell electric tractor with mechanical shunt type," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 213, p. 108 178, 2023.

[11] R. Guo, X. Xue, Z. Sun, Z. Hong, "Clustered energy management strategy of plug-in hybrid electric logistics vehicle based on gaussian mixture model and stochastic dynamic programming," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 9, no. 2, pp. 3177–3191, 2022.

[12] F. Yue, Q. Liu, Y. Kong, J. Zhang, N. Xu, "A predictive energy management strategy for multi-energy source vehicles based on full-factor trip information," *Sensors*, vol. 22, no. 1, p. 23, 2021.

[13] Y. Liu, J. Liu, Y. Zhang, Y. Wu, Z. Chen, M. Ye, "Rule learning based energy management strategy of fuel cell hybrid vehicles considering multi-objective optimization," *Energy*, vol. 207, p. 118 212, 2020.

[14] C. Yang, M. Zha, W. Wang, K. Liu, C. Xiang, "Efficient energy management strategy for hybrid electric vehicles/plug-in hybrid electric vehicles: Review and recent advances under intelligent transportation system," *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 14, no. 7, pp. 702–711, 2020.

[15] Z. Zhu, L. Zeng, L. Chen, R. Zou, Y. Cai, "Fuzzy adaptive energy management strategy for a hybrid agricultural tractor equipped with hmcvt," *Agriculture*, vol. 12, no. 12, p. 1986, 2022.

[16] L. J. Zhu, "Experiment for a parallel hydraulic hybrid terminal tractor," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 543, pp. 211–214, 2014.

[17] S. Xie, X. Hu, S. Qi, K. Lang, "An artificial neural network-enhanced energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles," *Energy*, vol. 163, pp. 837–848, 2018.

[18] C. Jia, W. Qiao, L. Qu, "Numerical methods for optimal control of hybrid electric agricultural tractors," in *2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, IEEE, 2019, pp. 1–6.

[19] J. Han, A. Khalatbarisoltani, Y. Yang, X. Hu, "Energy management in plug-in hybrid electric vehicles: Preheating the battery packs in low-temperature driving scenarios," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023.

[20] J. Han, W. Liu, Y. Zheng, A. Khalatbarisoltani, Y. Yang, X. Hu, "Health-conscious predictive energy management strategy with hybrid speed predictor for plug-in hybrid electric vehicles: Investigating the impact of battery electro-thermal-aging models," *Applied Energy*, vol. 352, p. 121 986, 2023.

[21] Love, O. Tractors, *Brief history of tractors:from steam power to precision farming*, `https://www.loveandothertractors.com/post/brief-history-of-tractors`, 2024.

[22] L. Adrian, *A tilmeline of tractors*, `https://www.crestcapital.com/tax/timeline_of_tractors`.

[23] *The history of tractors in agriculture*, `https://www.volocars.com/blog/history-of-tractors-in-agriculture`, 2024.

[24] WikiUpload, *Grace's guide to britsh industrial history*, `https://www.gracesguide.co.uk/File:Im1861EnV11-p120.jpg`, 2013.

[25] S. D. S. University, *1915 j.i. case steam engine 65 hp*, `https://www.sdstate.edu/outh-dakota-agricultural-heritage-museum/1915-j-i-case-steam-engine-65-hp`.

[26] W. Juliusde, *Ransomes,sims and jefferies 4 nhp*, `https://modelengineeringwebsite.com/Ransomes_1.html`.

[27] B. M. Staff, *John froelich and the evolution of the tractor*, https://www.brightmaize.com/john-froelich-evolution-of-tractor/, 2024.

[28] D. MacMillan, *John deere model d*, https://en.wikipedia.org/wiki/John_Deere_Model_D, 2020.

[29] L. G. Vasquez, *Meet the fordson f tractor*, https://www.lhf.org/2015/06/meet-the-fordson-f-tractor/, 2015.

[30] D. B. AG, *Benz-sendling*, https://www.otmv.nl/wp-content/uploads/2020/04/Benz-Sendling-Schlepper.pdf, 2015.

[31] K. T. Renius, *Fundamentals of tractor design*. Springer, 2020.

[32] F. Stefano, B. Alessandro, H. Nicholas, S. Paul, P. Francesca, *Electric tractor perspectives*, https://www.clubofbologna.org/en/, 2019.

[33] T. Deplume, *Case ih shows diesel hybrid tractor prototype*, https://www.greencarcongress.com/2005/11/case_ih_shows_d.html, 2005.

[34] A. Onshus, *John deere 7530 e premium*, https://www.gardsdrift.no/maskiner-nyttig-studentoppgaver/john-deere-7530-e-premium/135901, 2008.

[35] P. Team, *Exclusive driving impression:belarus 3023 prototype*, https://www.profi.co.uk/test-centre/belarus-3023/, 2018.

[36] *Rigitrac ewd 120-diesel electric*, https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/int/ast_alt/ressourcen/dateien/forschung/files/Datenblatt_Rigitrac.pdf?lang=en.

[37] *Fendt hat die zukunft fest im visier*, https://www.fendt.com/de/technologien-innovationen/innovationen/fendt-x-concept.

[38] *Technical innovation 2018*, https://www.eima.it/en/eima-technical-innovation-2018.php, 2018.

[39] Ü. Yalçın, "Türkiye'de tarımsal mekanizasyon düzeyi, sorunları ve çözüm önerileri," *Tarım ve Orman Bakanlığı*, 2021.

[40] M. İleri, *Tarmakbir sektör istatiksel raporu*, https://tarmakbir.org/wp-content/uploads/2024/07/tarmekstat072024.pdf, 2024.

[41] "Agricultural machinery management data," *ASAE D497.4*, 1999.

[42] TUBS, *Konya in turkey.svg*, https://tr.m.wikipedia.org/wiki/Dosya:Konya_in_Turkey.svg, 2011.

[43] G. Technologies, *From concept design to detailed system analysis*, https://www.gtisoft.com/gt-suite-overview/, 2014.

[44] Q. Xue, X. Zhang, T. Teng, J. Zhang, Z. Feng, Q. Lv, "A comprehensive review on classification, energy management strategy, and control algorithm for hybrid electric vehicles," *Energies*, vol. 13, no. 20, p. 5355, 2020.

[45] C. Kwasi-Effaha, U. Igbekab, B. Atamanc, A. Emenimed, F. Max-Eguakune, "Static and dynamic analysis of a ufaa-19 series hybrid electric vehicle," in *book of proceedings*, 2021, p. 241.

[46] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, K. Ebrahimi, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*. CRC press, 2018.

[47] W. Liu, *Hybrid electric vehicle system modeling and control*. John Wiley & Sons, 2017.

[48] A. Panday, H. O. Bansal, "A review of optimal energy management strategies for hybrid electric vehicle," *International Journal of Vehicular Technology*, vol. 2014, no. 1, p. 160 510, 2014.

[49] E. Kural, "Hibrid elektrikli araçlar için enerji yönetim sistemleri," Ph.D. dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü.

[50] D. Troncon, L. Alberti, "Case of study of the electrification of a tractor: Electric motor performance requirements and design," *Energies*, vol. 13, no. 9, p. 2197, 2020.

[51] M. Ozturk, T. Sandalci, C. Buyuk, M. Guclu, Y. Karagoz, "The effect of converting a conventional tractor into a hybrid drive tractor using the ecms method on fuel consumption and emissions," *International Journal of Energy Research*, vol. 2024, no. 1, p. 8 832 086, 2024.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makale

1. M. Öztürk, T. Sandalcı, C. Büyük, M. Güçlü, Y. Karagöz "The Effect of Converting a Conventional Tractor into a Hybrid Drive Tractor Using the ECMS Method on Fuel Consumption and Emissions," International Journal of Energy Research, vol. 2024, p. 8832086, 2024

Konferans Bildirisi

1. Öztürk M., Sandalcı T., "Hafif Hibrit Traktörlerde Düşük Yakıt Tüketimi ve Emisyon Salımı İçin Hibrit Modların Analizi," 13. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, İstanbul, Türkiye, pp.678, 08-09 Haziran 2024.