



**6X6 SERİ HİBRİT ELEKTRİKLİ BİR ZIRHLI PERSONEL TAŞIYICININ
MODELLENMESİ**

Ahmet Onur KIYAKLI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2022

ETİK BEYAN

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

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

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

Ahmet Onur KIYAKLI

06/01/2022

6X6 SERİ HİBRİT ELEKTRİKLİ BİR ZIRHLI PERSONEL TAŞIYICININ MODELLENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet Onur KIYAKLI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2022

ÖZET

Otomotiv endüstrisinde konvansiyonel araçların yerini hibrit ve elektrikli araçlara bıraktığı bu dönemde askeri amaçlı kullanılan kara araçlarının bu dönüşüme uzak kaldıkları görülmektedir. Seri hibrit tahrik sisteminin askeri kara araçlarında kullanımının avantaj ve dezavantajlarının belirlenmesi için bu çalışmada 6x6 zırhlı personel taşıyıcının MATLAB/Simulink programında modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Her dingilde tahrik elemanı olarak bir elektrik motorunun bulunduğu güç aktarma sistemi modeli, hızlanma ve yavaşlama durumları için PID kontrolcü modeli oluşturulmuştur. Tahrik kuvvetini sağlayan elektrik motor modeli, içten yanmalı motor modeli ve batarya modelleri oluşturulmuştur. Aracın dinamik şartlarını simule etmek amacıyla direnç kuvvetleri modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin testleri FTP-75 ve askeri sürüş çevrimi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modelleme çalışmasında aracın maksimum hız, menzil, yakıt tüketimi ve eğim tırmanma kabiliyeti değerlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda aracın maksimum 122 km/h hıza ulaşabildiği, FTP-75 çevrimine göre 584 km, askeri sürüş çevrimine göre 641 km menzile sahip olduğu ortaya koyulmuştur. Regeneratif fren sistemi sayesinde FTP-75 çevriminde 5,02 kWh, askeri sürüş çevriminde 2,48 kWh enerjinin geri kazanımı sağlanmıştır. Model FTP-75 çevriminde 35,24 kWh, askeri sürüş çevriminde 14,2 kWh enerji tüketimi gerçekleştirmiştir. %60 eğimde tırmanma simülasyonunda araç durağan halden harekete geçmiş ve 34 km/h hıza ulaşmıştır. Konvansiyonel modeller ile kıyaslandığında performans bakımından aracın yeterli olduğu ancak menzil açısından konvansiyonel modellerin gerisinde kaldığı görülmüştür.

Bilim Kodu : 93006

Anahtar Kelimeler : Askeri araç, Hibrit elektrikli araç, Modelleme, Zırhlı personel taşıyıcı

Sayfa Adedi : 70

Danışman : Prof. Dr. Hamit SOLMAZ

MODELING OF A 6X6 SERIES HYBRID ELECTRIC ARMORED PERSONNEL CARRIER

(M. Sc. Thesis)

Ahmet Onur KIYAKLI

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2022

ABSTRACT

In this period, when conventional vehicles were replaced by hybrid and electric vehicles in the automotive industry, it is observed that land vehicles used for military purposes remained far from this transformation. In this study, 6x6 armored personnel carrier was modeled in MATLAB/Simulink program to determine the advantages and disadvantages of the serial hybrid propulsion system in military land vehicles. A powertrain model with an electric motor as a drive element on each axle, and a PID controller model for acceleration and deceleration situations were created. Electric motor model, internal combustion engine model and battery models providing the driving force were created. A drag force model was created to simulate the dynamic conditions of the vehicle. Tests of the created model were carried out using FTP-75 and military driving cycle. In the modeling study, it is aimed to obtain the vehicle's maximum speed, range, fuel consumption and slope climbing ability values. As a result of the studies, it has been revealed that the vehicle can reach a maximum speed of 122 km/h and has a range of 584 km according to the FTP-75 cycle and 641 km according to the military driving cycle. Thanks to the regenerative braking system, 5.02 kWh of energy was recovered in the FTP-75 cycle and 2.48 kWh in the military driving cycle. The model has realized an energy consumption of 35.24 kWh in the FTP-75 cycle and 14.2 kWh in the military driving cycle. In the 60% slope climbing simulation, the vehicle started from a stationary state and reached a speed of 34 km/h. Compared to conventional models, it has been observed that the vehicle is sufficient in terms of performance but lags conventional models in terms of range.

Science Code : 93006

Key Words : Military vehicle, Hybrid electric vehicle, Modeling, Armored personnel carrier

Page Number : 70

Supervisor : Prof. Dr. Hamit SOLMAZ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve bu çalışmanın fikir aşamasından tamamlanmasına kadar geçen süre boyunca yol gösteren, desteğini ve bilgisini eksik etmeyen saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Hamit SOLMAZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışma boyunca yardımlarını esirgemeyen Öğr. Gör. Tolga KOCAKULAK'a, yüksek lisans eğitimim boyunca sağladığı kolaylık ve anlayış için Asisguard Sistem Entegrasyon Müdürü Can ÖZKENT'e ve modelleme aşamalarında sağlamış olduğu katkılardan dolayı Ahmet Haydar ERDEM'e teşekkür ederim.

Bu çalışmayı yaşantımın her aşamasında destekleri ile arkamda olan aileme ve çalışma esnasında henüz dünyaya gelmemiş olan yeğenim Zeynep Ece KIYAKLI'ya ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. ZIRHLI ASKERİ ARAÇLAR VE HİBRİT ARAÇ TEKNOLOJİSİ	3
2.1. Zırhlı Askeri Kara Araçları	3
2.2. 6x6 Zırhlı Personel Taşıyıcı	4
2.3. Hibrit Elektrikli Araç Teknolojisi	5
2.4. Güç Aktarma Sistem Yapısına Göre Sınıflandırma	7
2.4.1. Seri hibrit elektrikli araçlar (SHEA)	7
2.4.2. Paralel hibrit elektrikli araçlar (PHEA).....	8
2.4.3. Seri paralel hibrit elektrikli araç (SPHEA)	9
2.5. Hibritlik Derecesine Göre Sınıflandırma	9
3. LİTERATÜR ÖZETLERİ.....	13
4. MATERYAL VE METOT.....	17
4.1. Elektrik Motoru.....	17
4.1.1. Fırçalı doğru akım motorları	18
4.1.2. Fırçasız doğru akım motorları.....	19
4.1.3. Asenkron motorlar	19

	Sayfa
4.1.4. Anahtarlama relüktans motorlar.....	20
4.1.5. Sabit mıknatıslı senkron motorlar	21
4.2. İçten Yanmalı Motor	21
4.3. Batarya	23
4.4. Regeneratif Fren Sistemi.....	25
4.5. Direnç Kuvvetleri.....	26
4.5.1. Aerodinamik direnç.....	26
4.5.2. Yuvarlanma direnci.....	27
4.5.3. İvmelenme direnci.....	28
4.5.4. Eğim direnci	29
4.6. Sürüş Çevrimleri.....	29
5. MODELLEME AŞAMALARI	31
5.1. Güç Aktarma Sistemi Modeli.....	31
5.2. Elektrik Motor Modeli	35
5.3. Direnç Kuvvetleri Modeli	36
5.4. Hız Kontrol Modeli-PID	38
5.5. İçten Yanmalı Motor Modeli	38
5.6. Batarya ve Enerji Tüketim Modeli.....	41
5.7. Regeneratif ve Mekanik Fren Modeli	42
5.8. Araç ve Simülasyon Parametreleri.....	44
6. SİMÜLASYON SONUÇLARI	45
6.1. FTP-75 Sürüş Çevrimine Göre Sonuçlar	45
6.2. Askeri Sürüş Çevrimine Göre Sonuçlar	48
6.3. Performans Kriterlerine Göre Sonuçlar	51
6.4. Araç Parametrelerindeki Değişime Göre Sonuçlar	52
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	57

	Sayfa
KAYNAKLAR	59
EKLER.....	65
ÖZGEÇMİŞ	70

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. 6x6 zırhlı personel taşıyıcı modelleri	5
Çizelge 2.2. Hibritlik derecesine göre sınıflandırma	10
Çizelge 3.1. Butler ve diğerleri (1999) simülasyon sonuçları	14
Çizelge 4.1. Batarya çeşitleri ve başlıca özellikleri	24
Çizelge 4.2. Araç tiplerine göre aerodinamik direnç katsayısı	27
Çizelge 4.3. Zemin tiplerine göre yuvarlanma direnç katsayısı.....	28
Çizelge 5.1. Elektrik motoru teknik özellikleri.....	36
Çizelge 5.2. Araç ve simülasyon parametreleri	44
Çizelge 6.1. FTP-75 sürüş çevrimi sonuçları.....	47
Çizelge 6.2. Askeri sürüş çevrimi sonuçları	50
Çizelge 6.3. Redüksiyon oranının maksimum hıza etkisi.....	54

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Elektrikli (yeşil) ve konvansiyonel zırhlı personel taşıyıcı	5
Şekil 2.2. Seri hibrit araç sistem yapısı.....	7
Şekil 2.3. Paralel hibrit elektrikli araç sistem yapısı.....	8
Şekil 2.4. Seri paralel hibrit elektrikli araç sistem yapısı	9
Şekil 4.1. Fırçalı doğru akım motoru tork ve güç karakteristiği	18
Şekil 4.2. Asenkron motor tork karakteristiği	19
Şekil 4.3. Sabit mıknatıslı senkron motor tork karakteristiği	21
Şekil 4.4. İçten yanmalı motorlarda kayıplar	22
Şekil 4.5. Elektrikli bir araçta mekanik ve rejeneratif frenleme kuvvetleri.....	25
Şekil 4.6. 6x6 araca etki eden direnç kuvvetleri	26
Şekil 4.7. FTP-75 sürüş çevrimi	30
Şekil 4.8. Askeri sürüş çevrimi.....	30
Şekil 5.1. Güç aktarma sistem şeması.....	31
Şekil 5.2. Araç dinamik kontrol modeli.....	33
Şekil 5.3. Aktif elektrik motoru belirleme akış şeması.....	34
Şekil 5.4. Elektrik motoru tork grafiği.....	35
Şekil 5.5. Elektrik motoru verim haritası.....	35
Şekil 5.6. Elektrik motoru Simulink modeli	36
Şekil 5.7. Toplam direnç kuvveti.....	37
Şekil 5.8. Direnç kuvvetleri Simulink modeli	37
Şekil 5.9. PID kontrol Simulink modeli.....	38
Şekil 5.10. İçten yanmalı motor tork haritası.....	39
Şekil 5.11. İçten yanmalı motor yakıt tüketim haritası.....	40
Şekil 5.12. İçten yanmalı motor Simulink modeli	40
Şekil 5.13. İçten yanmalı motor kontrol algoritması akış şeması	41

Şekil	Sayfa
Şekil 5.14. Batarya ve enerji tüketim modeli.....	42
Şekil 5.15. Rejeneratif fren kontrol modeli	42
Şekil 5.16. Fren kuvveti hesaplama modeli	43
Şekil 5.17. Rejeneratif frenleme kazanç oranı belirleme algoritması akış şeması.....	43
Şekil 6.1. FTP-75 çevriminde araç hızı	45
Şekil 6.2. FTP-75 çevriminde elektrik motoru hızı	46
Şekil 6.3. FTP-75 çevriminde batarya şarj durumu değişikliği	46
Şekil 6.4. FTP-75 çevriminde gaz/fren pedalı konumları.....	47
Şekil 6.5. Askeri sürüş çevrimi simülasyon sonuçları	48
Şekil 6.6. Elektrik motoru hızı (d/d)	49
Şekil 6.7. Askeri sürüş çevriminde batarya şarj durumu değişikliği	49
Şekil 6.8. Gaz/fren pedalı konumları	50
Şekil 6.9. Maksimum hız grafiği.....	51
Şekil 6.10. %60 eğimde hızlanma grafiği.....	52
Şekil 6.11. Araç ağırlığının enerji tüketimine etkisi	53
Şekil 6.12. Diferansiyel redüksiyon oranının enerji tüketimine etkisi.....	53
Şekil 6.13. Tek elektrik motoru ile sürüş çevrimi ve araç hızı	55

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Mark-I	3
Resim 4.1. Anahtarlamaalı relüktans motora ait rotor(solda) ve stator	20

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

F_a	Aerodinamik direnç kuvveti (N)
F_r	Yuvarlanma direnç kuvveti (N)
F_{st}	Eğim direnç kuvveti (N)
F_i	İvmelenme direnç kuvveti
C_D	Aerodinamik direnç katsayısı
C_R	Yuvarlanma direnç katsayısı
A_f	Ön iz düşüm yüzey alanı (m ²)
V	Araç hızı (km/h)
V_0	Rüzgâr hızı (km/h)
m	Araç kütlesi (kg)
g	Yer çekimi ivmesi (m/s ²)
a	Araç ivmesi (m/s ²)
α	Yol eğimi
ρ	Havanın yoğunluğu (kg/m ³)
$\dot{\omega}_m$	Elektrik motoru açısal ivmesi (rad/s ²)
$\dot{\omega}_a$	Aks açısal ivmesi (rad/s ²)
$\dot{\omega}_w$	Tekerlek açısal ivmesi (rad/s ²)
ω_w	Tekerlek açısal hızı (rad/s)
T_m	Elektrik motoru çıkış torku (Nm)
T_{dg}	Diferansiyel giriş torku (Nm)
T_{dc}	Diferansiyel çıkış torku (Nm)
T_a	Aks torku (Nm)
T_w	Tekerlek torku (Nm)
J_m	Elektrik motoru kütle atalet momenti (kg/m ²)
J_a	Aks kütle atalet momenti (kg/m ²)
J_w	Tekerlek kütle atalet momenti (kg/m ²)

Simgeler**Açıklamalar** x

Aktif elektrik motoru sayısı

 i_d

Diferansiyel redüksiyon oranı

 η_d

Diferansiyel verimi

Kısaltmalar**Açıklamalar****AC**

Alternatif Akım

ASC

Askeri Sürüş Çevrimi

CBD

Merkezi İş Bölgesi Sürüş Çevrimi

CO

Karbon Monoksit

DC

Doğru Akım

ECE

Şehir İçi Sürüş Çevrimi

EGR

Egzoz Gazı Resirkülasyonu

EM

Elektrik Motoru

EUDC

Ekstra Kentsel Sürüş Çevrimi

FTP

Federal Test Prosedürü

HC

Hidrokarbon

İYM

İçten Yanmalı Motor

NEDC

Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi

NO_x

Azot Oksitler

NVH

Ses-Titreşim-Sertlik

PHEA

Paralel Hibrit Elektrikli Araç

PID

Oransal-İntegral-Türevsel Denetleyici

SCR

Seçici Katalitik İndirgeme

SHEA

Seri Hibrit Elektrikli Araç

SOC

Batarya Şarj Durumu

SPHEA

Seri Paralel Hibrit Elektrikli Araç

ZPT

Zırhlı Personel Taşıyıcı

WLTP

Dünya Hafif Hizmet Araçları Sürüş Çevrimi

1. GİRİŞ

Yirminci yüzyıl ile kullanımı katlanarak artan petrol, günümüzde enerji ihtiyacının önemli bir kısmını karşılamaktadır. Petrolün yol açtığı çevre kirliliğinin yanı sıra gelecek dönemlerde rezervlerinin tükenme tehlikesi nedeniyle tüm dünyada daha temiz ve daha verimli enerji kaynaklarına yönelik çalışmalar devam etmektedir.

Ulaşım ve taşımacılık sektöründe kullanılan araçların yaklaşık %95'i fosil yakıtlı içten yanmalı motora sahiptir. Yalnızca içten yanmalı motorun tahrik elemanı olarak kullanıldığı araçlar petrolün sahip olduğu yüksek enerji yoğunluğu sayesinde performans ve menzil gibi önemli avantajlara sahiptir. Ancak fosil yakıtlı bu araçlar, düşük yakıt ekonomisi ve egzoz emisyonlarının sebep olduğu çevre kirliliğini de beraberinde getirmektedir [1]. Kurşun asit bataryaların icadı ile dünyadaki ilk elektrikli araç 1884 yılında Thomas Parker tarafından üretildi. Daha sonrasında birçok firma tarafından elektrikli araçlar üretilmeye devam etmiş olsa da içten yanmalı motor teknolojisindeki gelişmeler, elektrikli araçların o dönem için arka planda kalmasına neden oldu. 1970-1980 yıllarında dünya genelinde yaşanan enerji krizleri, elektrikli araçların tekrar gündeme gelmesini sağladı. Fakat içten yanmalı motorların sağlamış olduğu performans ve uzun menzil, elektrikli araçların o dönem için sonunu getirdi [2]. Tüm dünyada giderek katılan emisyon standartları araç üreticilerini hem içten yanmalı motora hem de elektrik motoruna sahip hibrit araçlar konusunda çalışmalar yapmaya yöneltmiştir. Hem konvansiyonel hem de elektrikli araçların sahip olduğu avantajları tek bir sistemde kullanıcıya sunan hibrit araçların elektrikli araçlara geçiş için bir basamak görevi gördüğü kabul edilmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkan hibrit araçlar günümüzde Avrupa, Asya ve Amerika başta olmak üzere çoğu pazarda satışa sunulmaktadır.

Askeri amaçlı kullanılan araçlar için yakıt ekonomisi göz önünde bulundurulmayan bir kriter olarak değerlendirilmektedir. Ancak operasyon bölgesinde gerçekleştirilecek yakıt ikmal maliyeti, yakıt bedelinin on katına kadar ulaşabilmektedir [3]. Elektrikli sistemlerin askeri sistemlerdeki güvenilirliği hakkındaki endişeler nedeniyle yalnızca batarya paketi ve elektrik motorunun bulunduğu sistemlerin kullanılabilir olmadığı düşünülmektedir. Askeri amaçlı kullanılan bir aracın operasyon bölgesinde şarj işleminin yakıt ikmal kadar kısa sürede tamamlanamayacak olması elektrikli sistemler için en büyük dezavantaj olarak görülmektedir. Ayrıca içten yanmalı motora sahip askeri aracın sağladığı menzile kıyasla

çok daha düşük menzil sunacak olması, batarya sistemlerinin güvensizliği de içten yanmalı motora sahip askeri araçların kullanılmasında başlıca sebepler olarak belirtilmektedir. Bu sebeplere bağlı olarak içten yanmalı motorun askeri araçlardan çıkarılması sağlıklı sonuçlar vermeyecektir. Binek ve ticari araç üreticilerinin de elektrikli araçlara geçiş için bir basamak olarak kullandığı hibrit sistemlerin askeri amaçlı araçlarda kullanılmasının sağlayacağı avantaj ve dezavantajlar başta Amerika olmak üzere birçok ülke tarafından araştırılmaktadır. Günümüzde kullanılan askeri kara araçlarının neredeyse tamamı dizel motora sahiptir. Yüksek tork kapasitesi, dizel yakıtının kolay bulunabilir ve taşınabilir olması nedeniyle dizel motorlar tercih edilmektedir. Elektrik motorlarının da düşük devirlerden itibaren yüksek tork çıkışı sağladığı bilinmektedir. Bu sayede aracın ihtiyaç duyduğu tork değerinin, transmisyon ihtiyacı olmadan, elektrik motoru tarafından sağlanması mümkündür. Yapılan çalışmalar ağır vasıta, askeri araç ve şehir içi kullanım için tasarlanan otobüslerde en verimli çalışan hibrit sistemin seri hibrit elektrikli araç mimarisi olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinin son yıllarda en gözde araştırma ve geliştirme alanlarından biri olan hibrit elektrikli tahrik sistemlerinin, askeri araçlarda kullanımı sonucunda elde edilecek avantaj ve dezavantajların belirlenmesi amaçlanmıştır. Tez çalışmasında, seri hibrit elektrikli sistem mimarisine sahip altı tahrikli (6x6) bir aracın dinamik modellemesi MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Aracın her aksı için bir adet elektrik motoru bulunduğu varsayılarak transfer fonksiyonu çıkarılmıştır. Aracın referans alınan sürüş çevrimlerinde ihtiyacı olan tahrik kuvvetine göre gaz ve fren pedalı konumlarını ayarlayan PID kontrol modeli oluşturulmuştur. Aracın dinamik şartlar altında maruz kaldığı aerodinamik, yuvarlanma, yokuş ve ivmelenme dirençleri için araç direnç kuvvetleri modeli oluşturulmuştur. İçten yanmalı motor ve rejeneratif fren sisteminin kural tabanlı bir algoritma tarafından kontrol edilmesi sağlanmıştır. Lityum-İyon teknolojisine sahip batarya grubu modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan zırhlı personel taşıyıcı araç modelinde kural tabanlı algoritma değerleri, batarya ve yakıt tankı kapasitesi, diferansiyel redüksiyon oranı, kural tabanlı algoritma değerleri gibi parametreler değiştirilerek sürüş çevrimlerine göre menzil ve yakıt tüketimi değerleri hesaplanmıştır. Yapılan simülasyon sonuçlarına göre optimum parametrelerin belirlenmesi sağlanmıştır. Ayrıca ZPT'ler için hızlanma, maksimum hız ve eğim tırmanma kabiliyeti değerleri de simülasyon sonuçlarına göre belirlenmiştir.

2. ZIRHLI ASKERİ ARAÇLAR VE HİBRİT ARAÇ TEKNOLOJİSİ

Zırhlı askeri kara araçları silahlı kuvvetler için özel olarak tasarlanmış nakliye, personel taşıma ve atış desteği görevleri bulunan araçlardır. Görev ve operasyon bölgesine özgü olarak pek çok farklı konfigürasyonda zırhlı askeri kara araçları bulunmaktadır. Bu bölümde tez çalışmasının araştırma konusu olan zırhlı askeri araçlar, 6x6 zırhlı personel taşıyıcılar ve hibrit elektrikli araç teknolojileri incelenecektir.

2.1. Zırhlı Askeri Kara Araçları

Tarih boyunca süregelen savaşlar insanları tahrip gücü yüksek ve karşıdan gelen saldırılardan korunmayı sağlayan savaş araçları geliştirmek için arayışa yönlendirmiştir. 20. yüzyılın başlangıcından itibaren ülkeler içten yanmalı motora sahip, paletli ve zırhlı araçlar geliştirmek için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. 1915 yılına gelindiğinde Amerikan traktör üreticinin geliştirmiş olduğu Holt isimli paletli traktör İngiliz Deniz Kuvvetleri tarafından satın alındı ve askeri amaçlar için kullanıma uygun hale getirildi. Bu sayede “Little Willie” adı verilen ilk tank prototipi ortaya çıkmıştır [4]. Birinci Dünya Savaşı ile birlikte süvari birliklerinin yerini arazide hareket kabiliyeti yüksek, sahip olduğu zırh sayesinde taşıdığı personel ve ekipmanı koruyabilen askeri araçlar üreilmeye ve geliştirilmeye başlanmıştır. 1916 yılında İngiliz ordusu tarafından geliştirilen 8 personel taşıma kapasitesine sahip Mark-I, tarihte savaş ortamında kullanılan ilk tank olarak bilinmektedir. 31 ton ağırlığa sahip olan Mark-I 6 km/h hıza ulaşabilmektedir [5].



Resim 2.1. Mark-I [6]

Birinci Dünya Savaşında engebeli arazide ilerleyebilmek, geçit açmak ve makineli tüfek mevzilerini ortadan kaldırmak amacıyla kullanılan zırhlı araçlar, İkinci Dünya Savaşında kuvvetlerin bir parçası olarak ateş ve manevra kabiliyetleri sayesinde muharebelerin önemli savaş araçlarından biri haline gelmiştir [7]. İlerleyen dönemlerde pek çok ülke zırhlı personel taşıyıcı ve zırhlı muharebe araçları hakkında çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada ele alınan zırhlı personel taşıyıcılar doğrudan savaş alanında bulunmayan yardımcı savaş araçlarıdır. Asıl kullanım amacı personelin ve ekipmanın güvenli bir biçimde operasyon bölgesine taşınmasıdır. Tekerlekli veya paletli çeşitleri bulunan zırhlı personel taşıyıcılar genellikle makineli tüfek ile silahlandırılmışlardır. Ancak bazı araçlarda geri tepmesiz top ya da havan topu kullanılabilir [8].

Günümüzde kullanılan zırhlı personel taşıyıcıların neredeyse tamamı dizel motora sahiptir. Dizel motorun düşük devirlerde sağladığı yüksek tork, dizel yakıtının kolay bulunabilir ve depolanabilir olması tercih sebeplerinin başında gelmektedir. Ayrıca dizel yakıtının benzin gibi kolay tutuşmaması, aracın maruz kalacağı bir saldırı sonucunda infilak etme ihtimalini ortadan kaldırmaktadır. Zırhlı personel taşıyıcılar genellikle 4x4 güç aktarma yapısına sahip olarak üretilseler de 6x6, 8x8 ve paletli konfigürasyonları da mevcuttur. Silah sistemi, zırh ve görev koşullarına bağlı olarak değişim göstermekle birlikte 20 personele kadar taşıma kapasitesine sahip olabilirler. Asıl kullanım maksadı muharebe olmadığı için zırh ve silah sistemleri tank ve zırhlı muharebe araçları kadar gelişmiş değildir. Günümüzde üretilen zırhlı personel taşıyıcılar ortalama olarak 100 km/h maksimum hıza ulaşabilmekte ve %60 eğimde tırmanma gerçekleştirebilmektedir. Genellikle yol dışı engebeli arazide kullanılmak için tasarlanmaktadır. Bu nedenle çoğu araç tüm tekerleklerden yönlendirmeyi sağlayan taktik tekerlekli olarak üretilmektedir.

2.2. 6x6 Zırhlı Personel Taşıyıcı

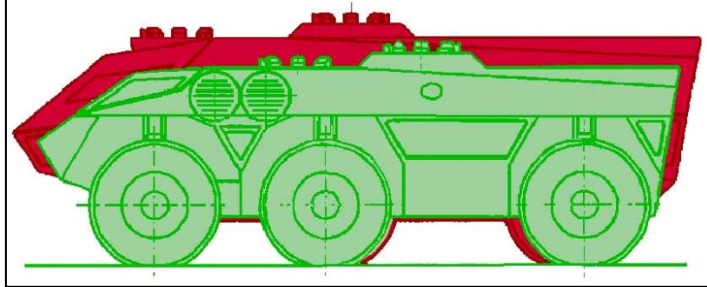
Her bir dingil üzerinde en az iki tekerlek bulunan, üç dingilden oluşan tüm tekerleklerden çekişli araç konfigürasyonuna 6x6 ya da altı tahrikli araç denilmektedir. Büyük ölçüde arazi araçları, askeri araçlar ve ağır hizmet tipi taşıyıcılarda kullanılmaktadır. Sürekli değişen görev koşulları ve operasyon alanları, askeri araçların farklı konfigürasyonlarda üretilmelerini sağlamıştır. Arazi koşullarında bulunan engebelerin aşılması, daha iyi yol tutuşu, dik engel ve hendek geçme özellikleri 4x4 araçlara göre daha üstün olan 6x6 araçlar üretilmeye ve kullanılmaya başlamıştır. Günümüzde pek çok ülke ve firma tarafından 6x6

zırhlı personel taşıyıcılar geliştirilmektedir. Aşağıdaki çizelgede 6x6 zırhlı personel taşıyıcı modelleri ve başlıca özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. 6x6 zırhlı personel taşıyıcı modelleri

Araç	Motor Gücü (kw)	Maksimum Hız (km/h)	Menzil (km)	Yüklü Ağırlık (kg)	Tırmanma Kabiliyeti	Personel Kapasitesi
BMC Kirpi 6x6 [9]	275	105	800	26 000	%60	15
FNSS Pars 6x6 [10]	375	100	800+	25 000	%60	9
Otokar Arma 6x6 [11]	335	105+	700	23 000	%60	10
MBOMBE 6x6 [12]	335	110	1000	22 500	%60	11
Patria 6x6 [13]	294	100+	700+	24 000	%60	12

Konvansiyonel ve elektrikli 6x6 zırhlı personel taşıyıcıların boyutları Şekil 2.1’de görülmektedir. Neredeyse aynı dingil açıklıklarına sahip olan modellerden elektrikli modelin daha küçük olduğu görülmektedir. Bu sayede hibrit ve elektrikli zırhlı personel taşıyıcılarda gelişmiş silah ve koruma sistemlerinin kullanılmasına imkân sağlanmaktadır.



Şekil 2.1. Elektrikli (yeşil) ve konvansiyonel zırhlı personel taşıyıcı [14]

2.3. Hibrit Elektrikli Araç Teknolojisi

İçten yanmalı motora sahip konvansiyonel araçlardan elektrikli araçlara geçiş için bir basamak olarak kullanılan hem içten yanmalı motora hem de elektrik motoruna sahip oldukları için hibrit(melez) elektrikli araç olarak isimlendirilmektedir. Elektrikli araçların sunduğu düşük menzil ve uzun şarj süresi gibi dezavantajların sistemde bulunan içten yanmalı motor sayesinde minimuma indirilmesi amaçlanmaktadır. Aynı zamanda içten yanmalı motorun çalışmadığı durumlarda elektrik motoru ile aracın hareketine devam etmesi egzoz emisyonlarının düşürülmesini ve yakıt ekonomisinin iyileşmesini sağlamaktadır.

20. yüzyılın başlarında başlayan hibrit elektrikli araç üretimi dünyada ilk olarak kabul edilmektedir. 1920'li yılların ortasına kadar pek çok firma tarafından hibrit elektrikli araç ile ilgili araştırma ve üretim süreçleri devam ettirilmiştir. Ancak içten yanmalı motora sahip araçların seri üretime geçmesi, hibrit elektrikli araçlara göre daha iyi performans ve daha uzun menzil sunmaları hibrit elektrikli araçlara olan ilginin azalmasına ve o dönem için unutulmalarına yol açmıştır [15].

1990'lı yıllardan itibaren Avrupa başta olmak üzere çevre kirliliği ile mücadele kapsamında ortaya çıkarılan emisyon standartları araç üreticilerini hibrit elektrikli araçlar konusunda çalışmalar yapmaya yöneltmiştir. Bu kapsamda birçok firma hibrit elektrikli araçlar üzerinde araştırma ve geliştirme faaliyetleri yapmaktadır. 2021 yılı itibariyle ülkemizde faaliyet gösteren neredeyse her bir binek araç üreticisinin hibrit elektrikli bir modeli satışa sunulmaktadır. Söz konusu hibrit elektrikli araç modellerinin kullanıcılar tarafından tercih edilmesini sağlayan avantajlar aşağıdaki gibidir;

- Elektrik motoru ve batarya sisteminin yüksek verimliliği sayesinde düşük yakıt tüketimi,
- Aracın yavaşlama durumunda devreye giren rejeneratif frenleme sistemi sayesinde aracın sahip olduğu kinetik enerji geri kazanılarak bataryanın şarj edilmesi,
- Bekleme veya düşük hız durumlarında içten yanmalı motorun devreden çıkması sonucu egzoz ve gürültü emisyonlarının azaltılması,
- Hibrit elektrikli araçlar, elektrikli araçlara göre daha uzun menzil sunmaktadır.

Hibrit elektrikli araçlar, sahip oldukları avantajların yansırı birtakım dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Bu dezavantajlar;

- Aracın ilk alım maliyetinin yüksek olması,
- Konvansiyonel bir araca göre daha az güç ve performans sağlaması,
- Bakım ve onarım gerektiren durumlarda masrafların fazlalığı,
- Kontrol mekanizmalarının karmaşık olmasıdır.

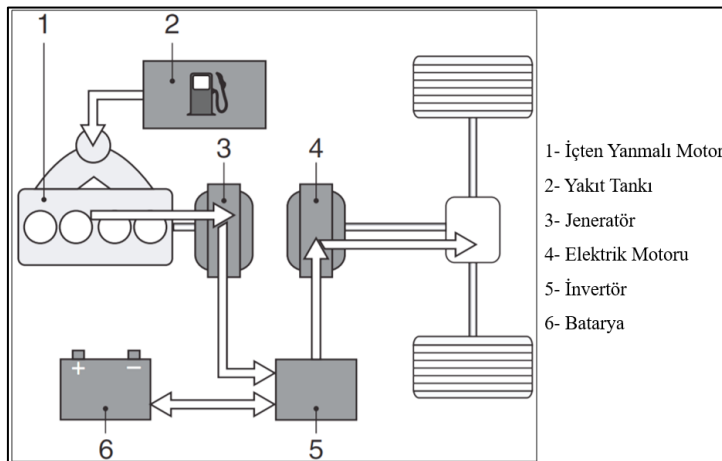
Hibrit elektrikli araçlar yıllar içerisinde pek çok farklı konfigürasyonda üretilmiştir. Bu nedenle hibrit elektrikli araçlar için bir sınıflandırma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Hibrit elektrikli araçlarda güç aktarma sistem yapısına göre ve hibritlik derecesine göre olmak üzere 2 farklı sınıflandırma oluşturulmuştur.

2.4. Güç Aktarma Sistem Yapısına Göre Sınıflandırma

Hibrit elektrikli araçların güç aktarma sistem yapıları, tahrik elemanlarının (İYM ve EM) enerji transferi ve tahrik yöntemlerine göre farklılık göstermektedir. Güç aktarma sistem yapısına göre hibrit elektrikli araçlar seri hibrit elektrikli araçlar, paralel hibrit elektrikli araçlar, seri-paralel hibrit elektrikli araçlar olmak üzere 3 grup altında incelenmektedir.

2.4.1. Seri hibrit elektrikli araçlar (SHEA)

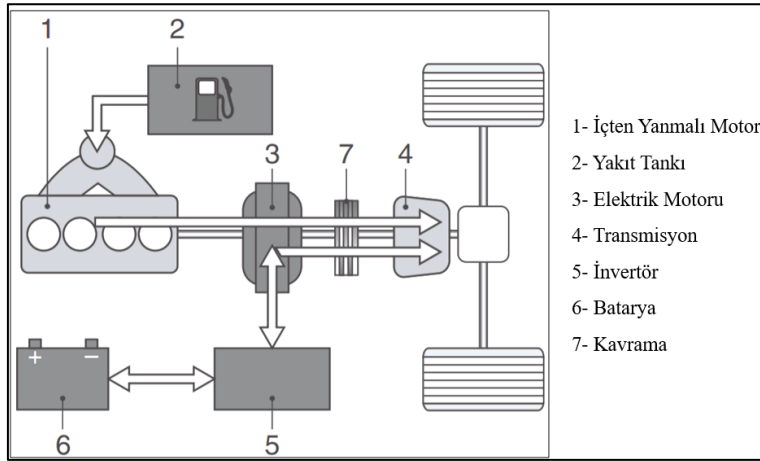
Seri hibrit elektrikli araçlarda tahrik kuvveti yalnızca elektrik motorundan alınmaktadır. İçten yanmalı motorun güç aktarma organlarına mekanik bir bağlantısı bulunmamaktadır. Bundan dolayı seri hibrit elektrikli araçlar, tam elektrikli araçlara en yakın hibrit araç çeşididir. Araç tahrik kuvvetini yalnızca elektrik motorundan aldığı için elektrik motorunun diğer hibrit yapılarda kullanılan elektrik motorlarından daha güçlü olması gerekmektedir. İçten yanmalı motor, elektrik motorunun güç talebine bağlı olarak gücü jeneratörden elektrik motoruna, bataryaya veya her ikisine birden yönlendirebilir. Batarya şarj durumu belirli bir değerin altına indiği zaman içten yanmalı motor maksimum verimlilikte çalışacak şekilde sabit bir güç çıkışı sağlamaktadır. Bu nedenle konvansiyonel araçlar ile kıyaslandığında yakıt ekonomisi büyük ölçüde iyileşmektedir [16]. Seri hibrit elektrikli araca ait sistem mimarisi Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Seri hibrit araç sistem yapısı

2.4.2. Paralel hibrit elektrikli araçlar (PHEA)

Aracın tahrik kuvvetini içten yanmalı motor, elektrik motoru veya her iki motordan da alabildiği hibrit sistem mimarisidir. İçten yanmalı motor ve elektrik motoru transmisyon sistemine mekanik olarak bağlıdır. PHEA için en yaygın kontrol algoritmalarından biri içten yanmalı motorun her zaman açık ve maksimum verimlilik noktasında çalıştığı durumda, kullanıcının güç talebi İYM güç çıkışından fazla ise elektrik motoru devreye girer ve güç farkının kapatılmasını sağlar. Ancak kullanıcının performans talebi İYM güç çıkışından daha düşük olduğu durumlarda elektrik motoru jeneratör görevi görerek İYM’de üretilen fazla güç bataryayı şarj etmek için kullanılacaktır. Duraklama, düşük hız ve güç gerektirmeyen durumlarda İYM devreden çıkar ve araç yalnızca elektrik motorundan tahrik alabilir [17]. PHEA mimarisi Şekil 2.3’te gösterilmektedir.



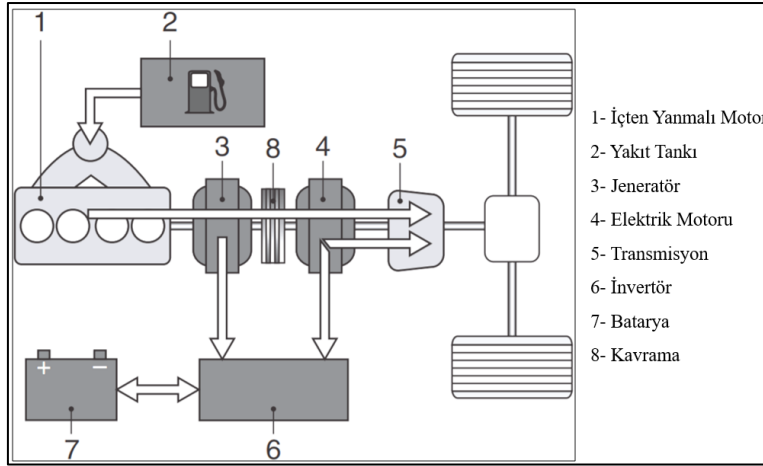
Şekil 2.3. Paralel hibrit elektrikli araç sistem yapısı

Paralel hibrit elektrikli araçların başlıca özellikleri aşağıda verilmiştir;

- SHEA mimarisinden farklı olarak jeneratör ihtiyacı bulunmamaktadır.
- PHEA her iki motordan da tahrik alabildiği için SHEA’ya göre daha küçük elektrik motoruna ve batarya grubuna ihtiyaç duymaktadır.
- SHEA mimarisine göre daha karmaşık kontrol algoritmasına sahiptir.

2.4.3. Seri paralel hibrit elektrikli araç (SPHEA)

Hem seri hem de paralel hibrit elektrikli araçların özelliklerini barındıran hibrit sistem mimarisi Seri Paralel Hibrit (Kombine Hibrit) olarak isimlendirilmektedir. İçten yanmalı motor, elektrik motoru ve jeneratör güç kuplörü adı verilen bir güç ayırma cihazına bağlıdır. İçten yanmalı motor, elektrik motoru ve jeneratörden gelen güç, kuplör vasıtasıyla hem mekanik hem de elektriksel bir yol ile birleştirilebilmektedir. Aracın hem seri hem de paralel hibrit sistem mimarisinde çalışabilmesi sağlanmaktadır. Bu sayede diğer hibrit sistemlere oranla daha esnek güç yönetim seçeneklerine sahiptir [18]. Birden farklı seri paralel hibrit sistem mimarisi bulunmaktadır. Örnek bir seri paralel hibrit sistem mimarisi Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Seri paralel hibrit elektrikli araç sistem yapısı

Seri paralel hibrit elektrikli araçların genel özellikleri aşağıdaki gibidir;

- Kontrol algoritması en karmaşık hibrit sistem mimarisidir.
- İçten yanmalı motor diğer sistem mimarilerine göre daha verimli çalışmaktadır.
- En yüksek maliyetli hibrit mimarisidir.

2.5. Hibritlik Derecesine Göre Sınıflandırma

Elektrik motoru tarafından sağlanan gücün, aracın toplam gücüne oranlanmasıyla aracın hibritlik derecesi elde edilmektedir. Hibritlik derecesi Eş. 2.1'de görülen formül ile hesaplanmaktadır.

$$\text{Hibritlik Derecesi} = \frac{\text{Elektrik Motor Gücü}}{\text{İçten Yanmalı Motor Gücü} + \text{Elektrik Motor Gücü}} * 100 \quad (2.1)$$

Hibritlik derecesine göre hibrit elektrikli araçlar 4 grup altında incelenmektedir.

- Hibritlik derecesi %5'in altında olan araçlar, mikro hibrit olarak isimlendirilmektedir. Mikro hibrit sistemlerde bulunan elektrik motoru rölanti durumunda iken içten yanmalı motoru durdurmak ve başlatmak için kullanılmaktadır. Elektrik motoru araca herhangi bir tork katkısında bulunmaz. Mikro hibrit sistemler, konvansiyonel sistemlere göre ortalama olarak %5 ile %10 arasında yakıt ekonomisine katkı sağlamaktadır [19].
- Hibritlik derecesi %10 ile %25'e kadar olan hibrit sistemler hafif hibrit olarak isimlendirilmektedir. Mikro hibrit sistemlerden farklı olarak bir batarya grubu bulunmaktadır. Kalkış anında içten yanmalı motora destek vermektedir. Ayrıca hafif hibrit sistemlerde bulunan rejeneratif fren sistemi ile yavaşlama anında aracın sahip olduğu kinetik enerji, batarya grubunu şarj etmektedir. Konvansiyonel araçlara göre %30'a kadar yakıt ekonomisinde iyileşme görülmektedir [20].
- Hibritlik derecesi %25 ile %75 arasında değişen sistemler tam hibrit sistemler olarak bilinmektedir. Düşük hızlarda ve fazla güç gerektirmeyen durumlarda içten yanmalı motor devreye girmez, araç elektrik motorundan aldığı tahrik ile hareketini devam ettirir. Yakıt ekonomisi bakımından en iyi hibrit sistem olarak bilinmektedir. Konvansiyonel modellere göre %50 oranında daha tasarruflu sistemlerdir. Günümüzde satışa sunulan hibrit elektrikli araçların büyük bir kısmı tam hibrit sisteme sahiptir.
- Tam hibrit sistemlerin dışarıdan şarj edilebilen versiyonlarına Plug-İn hibrit sistem denilmektedir. Plug-İn araçlar elektrikli araçlara geçiş için bir köprü görevi görmektedir.

Çizelge 2.2. Hibritlik derecesine göre sınıflandırma

Hibrit Sistem	Mikro	Hafif	Tam	Plug-In
Hibritlik Derecesi (%)	5	10-25	25-75	25-75
Rejeneratif Fren Sistemi	Yok	Var	Var	Var
Yakıt Ekonomisi (~%)	5-10	30	50	50
Şarj Edilebilme	Yok	Yok	Yok	Var

Askeri amaçlı kullanılan araçlar üretilmeye başlandığı ilk günden beri içten yanmalı motor araçların en önemli unsurlarından biri olarak bilinmektedir. Bu nedenle içten yanmalı motorun kötü yakıt ekonomisi ve emisyon değerleri göz önünde bulundurulmamaktadır. Teorik olarak %40 verimle çalıştığı bilinen dizel motorlar, askeri araçların ağır çalışma koşulları altında daha düşük verimle çalışmakta ve emisyon salınımı artmaktadır. Operasyon bölgesinde bulunan bir aracın yakıt ikmali, yakıt bedelinin onlarca katına ulaşabilmektedir. Bu nedenle ülkeler, hibrit sistemlerin askeri araçlarda kullanımı için araştırma ve üretim faaliyetleri yürütmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda seri üretime geçmiş hibrit elektrikli askeri araç modelleri mevcuttur.

Elektrik motorlarının düşük devirlerden itibaren sağladığı yüksek tork, içten yanmalı motorlara göre daha az bakım gerektirmesi ve %90'ın üzerindeki verimliliği askeri araçlarda kullanılabileceğini gösteren başlıca özelliklerdir. Tamamen elektrikli bir aracın şarj süresi, konvansiyonel bir aracın yakıt ikmaline oranla çok fazladır. Dolayısıyla mevcut batarya teknolojileri ile tamamen elektrikli bir askeri aracın kullanılabilir olmadığı düşünülmektedir. Yapılan çalışmalarda askeri araçlara göre en uygun hibrit sistemin seri hibrit mimarisi olduğu belirtilmektedir. Seri hibrit mimarisine sahip askeri bir araç birden fazla elektrik motoru ile her aksın veya her tekerleğin bağımsız olarak kontrol edilebilmesine imkân sağlamaktadır. İçten yanmalı motor doğrudan tahrik elemanı olarak kullanılmadığı için daha basit bir kontrol stratejisine sahiptir ve güç aktarma organlarına olan ihtiyaç ortadan kaldırılmaktadır. Birden fazla elektrik motorunun tahrik elemanı olarak kullanılması, aracın yol ve yük koşullarına göre ihtiyaç duyulmayan elektrik motorlarını devreden çıkarmasına olanak sağlamaktadır. Bu özelliklerin yanı sıra elektrikli tahrik sistemlerinin askeri araçlara sağlayacağı faydaların başında sessiz hareket imkânı ve düşük termal silüet gelmektedir. Hibrit araçlarda konvansiyonel araçlara göre daha düşük hacimli bir içten yanmalı motor kullanılmaktadır. Dolayısıyla bu motorun soğutma ihtiyacı ve egzoz gazı salınımı da daha düşük seviyede olacaktır. Ayrıca elektrik motorlarının dizel motorlara göre çok sessiz yapısı sayesinde araç, oldukça sessiz bir şekilde hareket edebilmektedir [21].

3. LİTERATÜR ÖZETLERİ

Mikaelsson (2010), seri hibrit güç aktarma sistemine sahip altı tekerlekten tahrik edilen bir araç modeli oluşturmuştur. 2 adet dizel motor, 6 adet hub motor kullanarak SEP 6x6 platformunu referans alan optimizasyon çalışması gerçekleştirmiştir. Yakıt tüketiminin azaltılması için aynı aks üzerinde bulunan motor çiftlerinin ve her bir motorun ayrı ayrı kontrol etmeye yönelik çalışmalar yapmıştır. Ayrıca yakıt tüketimi ve pil kapasitesi arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Çalışmalar sonucunda aynı aksta bulunan motor çiftlerinin birlikte kontrol edilmesi, bireysel motor kontrolüne oranla yakıt ekonomisinin iyileştiğini göstermiştir. Pil kapasitesi arttıkça, kapasite artışının sağladığı kazancın azaldığını ortaya koymuştur [22].

Rizzo ve Parker (2013), hibrit elektrikli askeri bir araç modeli oluşturmuştur. Belirledikleri görev çevrimi boyunca batarya şarj durumunun (SOC) optimize edilmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Batarya şarj durumunun sabit bir değerde kalması yerine yol ve görev girdilerine göre değişken batarya şarj durumunun değişken tutulmaktadır. Fren enerjisinin geri kazanımının da dâhil edildiği model sonucunda bir sürüş çevrimi boyunca batarya optimizasyonu ile %2,5 oranında yakıt ekonomisinin iyileştiğini ortaya koymuşlardır [23].

Jonasson (2005) doktora tez çalışmasında iki adet elektrik motoru ve bir adet dizel motor kullanarak paralel hibrit bir araç modelini MATLAB/Simulink programını kullanarak oluşturmuştur. Oluşturulan modelde içten yanmalı motor, elektrik motoru, batarya türü ve kapasitesi, şarj stratejisi ve sürücü davranışları gibi yakıt tüketimine etkisi olan parametreler değiştirilebilmektedir. ECE ve EUDC çevrimleri referans alınarak yapılan simülasyonda içten yanmalı motor kontrol algoritmasında değişiklik yapılarak %21 oranında yakıt ekonomisinin iyileşeceğini göstermiştir. Ayrıca EGR ve SCR kullanılarak oluşturulan modelin EURO 5 standartlarında NO_x emisyon değerlerinin altında kalacağını ortaya koymuştur [24].

Butler ve diğerleri (1999) yapmış oldukları çalışmada MATLAB/Simulink altyapısını kullanan V-Elph 2.01 programında içten yanmalı motora sahip, seri hibrit, paralel hibrit ve elektrikli araç modeli olmak üzere 4 adet araç modeli oluşturmuştur. Oluşturdukları araç modellerinin yakıt tüketimi ve egzoz gazı emisyonlarına göre kıyaslamışlardır. FTP-75 sürüş

çevrimine göre yapılan simülasyonlarda hibrit araçların yakıt ekonomisi bakımından içten yanmalı motora sahip araca göre oldukça verimli oldukları görülmüştür. Egzoz gazı emisyonlarını içeren kıyaslamada hibrit araçların NO_x, CO ve HC emisyonlarında paralel hibrit aracın seri hibrit araca göre daha düşük seviyede NO_x ve CO salınım yapmasına rağmen HC emisyonlarında daha fazla salınım yapmaktadır. Simülasyonlarda elde edilen sonuçlar Çizelge 3.1’de görülmektedir [25].

Çizelge 3.1. Butler ve diğerleri (1999) simülasyon sonuçları

Parametreler	Konvansiyonel Araç	S-HEA	P-HEA	Elektrikli Araç
Araç Kütlesi (kg)	1700	1908	1838	2008
NO _x (g/km)	1,314	1,516	0,3268	-
CO (g/km)	1,994	0,6489	0,4926	-
HC (g/km)	0,08234	0,01095	0,04289	-
Yakıt Tüketimi (km/l)	5,808	19,68	21,18	-
Harcanan Enerji (MJ)	-	2,82	0,258	5,57

Antoniou ve diğerleri (2005) yapmış oldukları çalışmada yüksek mobiliteye sahip çok amaçlı tekerlekli araçlarda hibrit araç teknolojilerinin araç performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. ADVISOR programını kullanarak seri hibrit ve paralel hibrit araç modelleri oluşturmuşlardır. Çalışmada aracın sahip olduğu toplam güç sabit tutularak içten yanmalı motorun ve elektrik motorunun gücü değiştirilerek sürüş çevrimine en uygun hibridizasyon faktörü elde edilmiştir. Yapılan simülasyon sonuçlarına göre karma çevrimde %70 hibridizasyon oranına sahip araçlardan seri hibrit araç yaklaşık %50, paralel hibrit araç yaklaşık olarak %26 oranında konvansiyonel araca göre yakıt ekonomisinde iyileşme göstermiştir [26].

Nennelli (2001) yüksek lisans tez çalışmasında seri hibrit bir toplu taşıma otobüs modelini ADVISOR programında modellemiştir. Modelde elektrik motoru, batarya ve aktarma organları verimlilikleri dikkate alınarak aracın güç ihtiyacı hesaplanmıştır. Yapılan simülasyon sonucunda CBD çevriminde hibrit elektrikli model konvansiyonel modele göre %18,5, Manhattan çevrimine göre %11 oranında daha az yakıt tükettiği ortaya konulmuştur [27].

Dereli (2021) MATLAB/Simulink programında seri hibrit elektrikli bir binek aracın modelini oluşturmuştur. Aracın sahip olduğu içten yanmalı motor ve batarya kapasitesinin maksimum verimde kullanılmasına yönelik kontrol stratejilerini uygulamıştır. Kural bazlı optimizasyon ve dinamik programlama yöntemlerini kullanarak batarya şarj durumu %60 seviyesinde olduğunda bataryanın mevcut şarjını koruma moduna geçmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Değiştirilen SOC ve dinamik programlama yöntemi kullanılarak NEDC çevrimine göre %1,45, USA City II çevrimine göre %1,78 oranında yakıt ekonomisinde iyileşme olduğunu ortaya koymuştur [28].

Kocakulak (2019) yüksek lisans tez çalışmasında konvansiyonel, seri hibrit, ön iletimli paralel hibrit ve arka iletimli paralel hibrit araçların dinamik modellerini MATLAB/Simulink programında oluşturmuştur. Tüm araçlar için transfer fonksiyonları çıkarılmış ve programda modellenmiştir. Bulanık mantık yöntemi ile hibrit araçların kontrolünü gerçekleştirmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda ön iletimli paralel hibrit araç yapısının en düşük yakıt tüketimine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Rejeneratif fren kullanımının en yüksek düzeyde olduğu ECE15 sürüş çevriminde seri, ön iletimli paralel ve son iletimli paralel hibrit araç modellerinin sırasıyla konvansiyonel araç modeline göre %14,22, %11,5 ve %9,95 oranında yakıt ekonomisinde iyileşme sağladığı sonuçlarını elde etmiştir [29].

Rizzo (2014) doktora tezinde hibrit elektrikli askeri bir aracın MATLAB kullanarak modellemesini gerçekleştirmiştir. Sayısal optimizasyon yönteminin ile yakıt ekonomisine katkısını incelemek üzere çalışma yapmıştır. “Askeri Görev Çevrimi” adı verilen sürüş çevrimini kullanarak, yapmış olduğu modelleme çalışmasında aracın yakıt tüketiminin %18,7 oranında azalacağını ortaya koymuştur [30].

Hodgson ve diğerleri (2002) yaptıkları çalışmada düşük üretim maliyetine sahip askeri amaçlı kullanılan bir 4x4 araç modeli oluşturmuşlardır. Aracın standart özelliklerini korumak ve düşük üretim maliyeti hedefine uygun olarak paralel hibrit sistem mimarisini kullanmışlardır. Konvansiyonel modelde kullanılan 6,2 litre hacme sahip dizel motor (115 kW) yerine 1,9 litre hacme sahip dizel motor (75 kW maksimum güç) ve 100 kW güce sahip elektrik motoru kullanmışlardır. Yapılan simülasyonlar sonucunda hibrit modelin konvansiyonel modele göre 9 saniye daha kısa sürede 50 mph hıza ulaştığı sonucuna varmışlardır. Araçların tam yüklü olduğu ve %5 eğim tırmandığı senaryoda konvansiyonel

modelin 7 mph hızla hareket ederken hibrit modelin 10 mph hızla hareket edebildiğini göstermişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre bir paralel hibrit askeri araç modelinin performans, yakıt ekonomisi ve maliyet hedeflerine ulaştığını ortaya koymuşlardır [31].

Özkan (2019) yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında konvansiyonel bir aracın seri hibrit mimarisine sahip bir modelini AVL Cruise programında oluşturmuştur. Menzil arttırıcı olarak 2 silindirli benzinli ve Wankel motoru olmak üzere 2 farklı içten yanmalı motor kullanmıştır. WLTP çevrimi referans alınarak yapılan simülasyonlarda batarya şarj durumu %80 ve %55 olduğu durumlarda, rejeneratif frenleme sistemi ile birlikte, batarya şarj durumlarının sırasıyla %72 ve %47 olduğu görülmüştür. Menzil arttırıcının yalnızca batarya şarj durumu %30'un altına düştüğü durumlarda devreye girdiği modelde bir çevrim boyunca iki silindirli benzinli motor 18,66 kW, Wankel motoru 22,3 kW güç üreterek bataryayı şarj etmiştir. Yapılan çalışma sonucunda menzil arttırıcı olarak Wankel motorunun kullanılmasının uygun olduğunu ortaya koymuştur [32].

Viswanath ve diğerleri (2017) seri hibrit mimarisine sahip paletli bir askeri araçta dizel motor optimizasyonuna yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. 300 bg güç, 1000 Nm tork kapasitesine sahip bir dizel motorun seri hibrit elektrikli bir sistemde kullanılabilmesi için krank-biyel dinamik modeli üzerinden motorun dinamik modelini oluşturmuştur. Daha sonrasında dizel motorun en verimli çalışma noktaları için silindir içi sıcaklık ve basınç değerlerini termodinamik eşitlikleri kullanarak elde etmiştir. 4 farklı çalışma modu için 1200 rpm ve 2500 rpm motor hızlarında yakıt tüketimi optimizasyonu çalışması gerçekleştirmiştir. Yapılan simülasyon dizel motor ve jeneratör optimizasyonu ile yakıt ekonomisi için farklı çalışma modlarına göre dizel motorun çalışma noktalarının belirlenebileceğini ortaya koymuştur [33].

4. MATERİYAL VE METOT

Hibrit elektrikli araçlar, iki ana sistemi tek bir sistemde birleştiren araçlardır. Hem konvansiyonel hem de elektrikli araçların sahip olduğu bileşenlerin neredeyse tamamına sahiptir. Bu bölümde seri hibrit elektrikli bir aracın sahip olduğu sistemler ile birlikte modelleme aşamalarında kullanılacak olan direnç kuvvetleri, sürüş çevrimi, rejeneratif fren ve simülasyon parametreleri detaylandırılacaktır.

4.1. Elektrik Motoru

Elektrik motoru sabit bir stator ve kendi çevresinde dönen rotordan oluşan, elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren aygıttır. Hibrit araçlarda elektrik motoru, elektrik enerjisini bataryadan ya da dolaylı olarak içten yanmalı motordan almaktadır. Elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirerek aracın diğer tahrik organlarına iletmektedir.

Hibrit ve elektrikli araçlarda kullanılacak olan elektrik motoru seçiminde üç faktör üzerinden değerlendirme yapılmaktadır. Bu faktörler kullanıcı beklentileri, araç kaynaklı kısıtlar ve enerji kaynaklarıdır. Kullanıcı beklentileri motorun aracın hızlanma karakteristiği, maksimum hız, tırmanma ve frenleme kabiliyetidir.

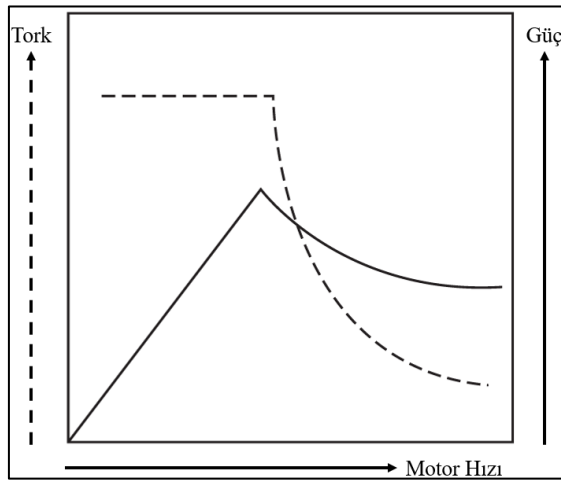
Seri hibrit elektrikli araçların tek tahrik kaynağı elektrik motorudur. Sistemde bir veya birden fazla elektrik motoru bulunabilir. Birden fazla elektrik motorunun kullanıldığı sistemlerde, yol ve yük durumlarına göre motorlar devreden çıkarılabilir. Seri hibrit elektrikli araçlarda bulunan elektrik motoru, rejeneratif frenleme durumunda jeneratör olarak çalışmakta ve kazanılan enerji ile bataryayı şarj etmektedir. Elektrik motorlarının içten yanmalı motorlara göre sahip olduğu avantajlar, hibrit ve elektrikli araçların tercih edilmesini sağlamaktadır. Bu avantajlar aşağıda listelenmiştir;

- Düşük devirlerden itibaren yüksek tork çıkışı,
- Yüksek verimli çalışma ve rejeneratif fren,
- Minimum boyut, hacim ve ağırlık,
- Düşük çalışma gürültüsü,
- Düşük bakım ve onarım maliyeti.

Hibrit ve elektrikli araçların ana tahrik kaynağı olan elektrik motorları, alternatif akım (AC) ve doğru akım (DC) motorları olmak üzere iki ana başlıkta toplanmaktadır. Hibrit ve elektrikli araçlarda kullanılan başlıca motor tipleri fırçalı ve fırçasız doğru akım motorları, asenkron motorlar, anahtarlamalı relüktans motorlar ve sabit mıknatıslı senkron motorlardır.

4.1.1. Fırçalı doğru akım motorları

Doğru akımla beslenen motorlara verilen genel isimdir. Günümüzde fırçalı ve fırçasız olmak üzere çeşitleri bulunmaktadır. Doğru akım motorları bir aracın ihtiyaç duyduğu çekiş kuvveti için yeterli torka sahiptir ve bu özelliğinden dolayı uzun yıllar tahrik sisteminin ana elemanı olarak kullanılmışlardır [34]. Düşük devirlerde sağladığı yüksek tork sayesinde mikro hibrit araçlarda marş motoru ve hafif hibrit araçlarda da içten yanmalı motora destek sağlayan elektrik motoru, doğru akım motorlarıdır. Doğru akım motorlarının, motor hızına bağlı güç ve tork grafiği Şekil 4.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Fırçalı doğru akım motoru tork ve güç karakteristiği [35]

Fırçalı doğru akım motorları düşük devirlerde yüksek tork ve lineer olarak artan güç sağlamasına rağmen yüksek devirlerde motordan elde edilen tork ve güç değerleri oldukça azalmaktadır. Bu nedenle fırçalı DC motorlar düşük güç yoğunluğuna sahip motorlar olarak bilinmektedir. Fırçalı DC motorların kolay kontrol edilebilme, uygun maliyet gibi avantajları olmasına rağmen düşük güç yoğunluğu, yüksek bakım/onarım maliyetleri ve gürültülü çalışma gibi dezavantajları mevcuttur. Bu nedenle hibrit araç üreticileri tarafından fırçalı doğru akım motorları tercih edilmemektedir.

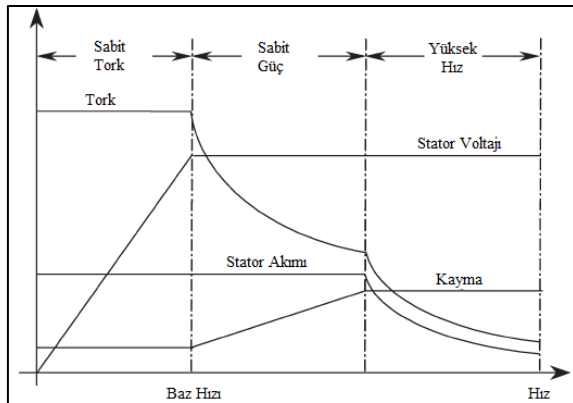
4.1.2. Fırçasız doğru akım motorları

Fırçasız doğru akım motorları, yapısında fırça bulundurmayan bir senkron motordur. Rotor üzerinde sürekli mıknatıslar, statorunda ise alan sargıları mevcuttur. Yapısı itibariyle sürekli mıknatıslı senkron motorlara benzemektedir. Ancak performans bakımından fırçalı doğru akım motorlarına ait özellikleri barındırmaktadır [36]. Yapısında fırça bulundurmaması sayesinde zaman içerisinde aşınan ve değişim gerektiren parçalar mevcut değildir. Bu nedenle fırçalı doğru akım motorları gibi bakım/onarım maliyetleri bulunmamaktadır. Ayrıca fırçasız yapı, motorun yüksek devirlerde çalışmasına ve yüksek tork çıkışı vermesine imkân sağlamaktadır.

Hibrit ve elektrikli araçlarda en çok tercih edilen motor tiplerinin başında fırçasız doğru akım motorları gelmektedir. Dayanıklı yapısı, %90'a varan verimli çalışması, basit kontrol yöntemi ve küçük boyutları sayesinde hibrit ve elektrikli araçlarda tercih edilmektedir.

4.1.3. Asenkron motorlar

Alternatif akım motorlarından biri olan asenkron motorlar endüstride, hibrit ve elektrikli araçlarda en çok tercih edilen motor türüdür. Asenkron (eşzamanlı olmayan) kavramı, stator manyetik alan devir hızı ile rotor hızı arasında fark oluşması, farklı devirlerde dönmeleri nedeniyle kullanılmaktadır. Bu fark asenkron motorlarda kayma olarak isimlendirilmektedir. Asenkron motorların tork-hız karakteristiği Şekil 4.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Asenkron motor tork karakteristiği [37]

Asenkron motorların otomotiv endüstrisinde kullanılmasını sağlayan önemli avantajları mevcuttur. Bu avantajlar aşağıdaki gibidir;

- Motor hızının yüke bağlı değişimi azdır.
- DC motorlara kıyasla daha yüksek güç yoğunluğuna sahiptir.
- %85 ile %97 arasında değişen yüksek verimle çalışmaktadır.
- Basit yapısı sayesinde düşük üretim maliyetine sahiptir.

4.1.4. Anahtarlamalı relüktans motorlar

Anahtarlamalı relüktans motorlar stator ve rotorunda çıkık kutuplar bulunduran, rotorunda sürekli mıknatıs ya da sargı bulundurmeyen yalnızca statorda sargı bulunduran elektrik motorlarıdır. Rotorunda mıknatıs veya sargı bulundurmaması motorun yüksek hızlara çıkabilmesine olanak sağlamaktadır [38]. Ancak rotorun manyetik olmaması nedeniyle jeneratör olarak iyi çalışmamaktadır.

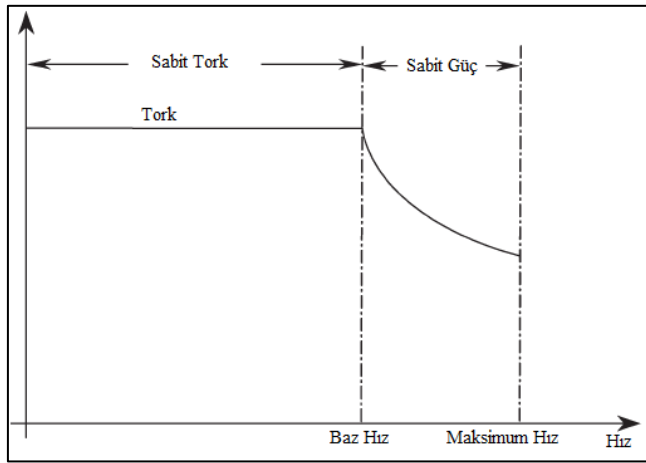
Düşük üretim maliyeti, yapısının basitliği, sağlam yapısı ve geniş hız aralığı sunmaları nedeniyle hibrit ve elektrikli araçlar için önemli bir motor alternatifidir. Ancak karmaşık kontrol yapısı, tasarım zorluğu ve akustik gürültü oluşturması nedeniyle hibrit ve elektrikli araçlarda tercih edilmemektedir. Anahtarlamalı relüktans motora ait rotor ve stator görüntüsü Resim 4.1.'de gösterilmektedir.



Resim 4.1. Anahtarlamalı relüktans motora ait rotor(solda) ve stator [39]

4.1.5. Sabit mıknatıslı senkron motorlar

Motorun rotorunda bulunan sabit mıknatıslar sayesinde manyetik alan oluşturulan elektrik motoruna sabit mıknatıslı senkron motor denilmektedir. Donanımları aynı olmasına rağmen AC akım ile besleniyorsa sabit mıknatıslı senkron motor, DC akım ile besleniyorsa fırçasız doğru akım motoru adı verilmektedir. Akım türüne göre kontrol stratejisi de değişiklik göstermektedir [40]. Yüksek tork ve güç yoğunluğu, düşük ağırlık ve boyut, yüksek verimlilik ve sessiz çalışma gibi avantajları sayesinde hibrit ve elektrikli araçlarda asenkron motorlar ile birlikte en çok tercih edilen motor çeşididir. Sabit mıknatıslı senkron motora ait tork ve hız karakteristik grafiği Şekil 4.3.'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Sabit mıknatıslı senkron motor tork karakteristiği [41]

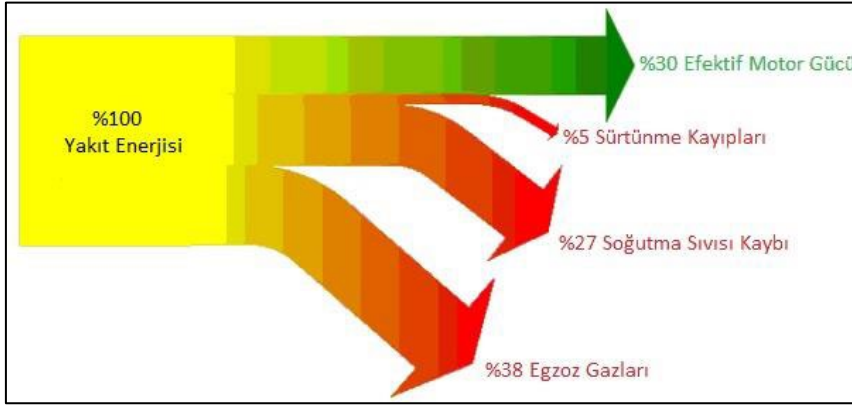
Tork ve hız karakteristiği grafiğinden de görülebildiği üzere sabit mıknatıslı senkron motorların sabit güç bölgesi yüksek devirlerde sağlanmaktadır ve sabit tork bölgesine göre kısa sürmektedir. Yüksek motor hızlarında asenkron motorlara göre verim düşmektedir. Ayrıca yüksek motor hızlarında rotorda bulunan mıknatısların bozulma riski mevcuttur.

4.2. İçten Yanmalı Motor

İçten yanmalı motor, hibrit elektrikli aracın hibrit kavramını oluşturan iki güç kaynağından biridir. Hibrit sistem mimarisine göre işlevi değişmekle birlikte bataryayı şarj edebilir, araca tahrik kuvveti sağlayabilir veya her iki görevi birden yerine getirebilir. Otomotiv endüstrisinde genellikle buji ile ateşlemeli (benzinli) motor ve sıkıştırma ile ateşlemeli (dizel) motor olmak üzere iki ana tip motor kullanılmaktadır. Dizel motora göre hafif yapısı,

sessiz çalışması, daha az emisyon salınımı ve elektrik motoru ile uyumlu çalışmasından dolayı hibrit elektrikli binek araçlarda genellikle benzinli motor tercih edilmektedir.

İçten yanmalı motorlar elektrik motorlarına göre oldukça verimsiz makinelerdir. Dizel motor yüksek yakıt verimliliği ile bilinir ancak maksimum %40 verime ulaşabilmektedir. İçten yanmalı motorlarda bulunan parçalar arası sürtünme kayıpları, yakıtın tam olarak yakılamaması, termal kayıplar başlıca verimi düşüren durumlardır. Ortalama olarak bir içten yanmalı motorun %15 ile %35 verim ile çalıştığı kabul edilmektedir. Bir içten yanmalı motorda gerçekleşen enerji kayıpları Şekil 4.4.'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4. İçten yanmalı motorlarda kayıplar [42]

Hibrit elektrikli araçlarda kullanılacak olan içten yanmalı motor seçimini etkileyen pek çok kriter bulunmaktadır. İncelenmesi gereken başlıca kriterler aşağıdaki gibidir;

Güç Gereksinimi: Hibrit elektrikli bir sistemde kullanılacak olan içten yanmalı motorun güç gereksinimi öncelikle şarj stratejisine bağlı olarak belirlenmelidir. Bütün çalışma koşulları altında elektrik motorundan kaynaklanan güç kaybını önlemek için içten yanmalı motorun gücü elektrik motorunun gücüne eşit olmalıdır. Ancak bu şekilde içten yanmalı motorun ağırlığı, hacmi ve maliyeti artacaktır. Bundan dolayı batarya kapasitesi ve içten yanmalı motorun şarj stratejisinin optimize edilmesi gerekmektedir.

Ağırlık ve Hacim: İçten yanmalı motorun ağırlığının artması, aracın da ağırlığını artırmakta ve dolaylı olarak tüketimin artmasına neden olmaktadır. Binek bir araçta hem elektrikli hem de içten yanmalı motorun bulunması, yan sistemler ile yerleşim ve hacim için önemli bir

kriterdir. Üreticiler araçlarda daha hafif ve küçük hacme sahip içten yanmalı motorları kullanmaya önem vermektedir.

NVH (Noise-Vibration-Harshness): NVH, otomotiv endüstrisinde özel bir çalışma alanıdır. İçten yanmalı motorun çalışma esnasında çıkardığı ses, oluşturduğu titreşim ve aracın kullanım sertliğini ifade etmektedir. Elektrik motorunun sessiz ve titreşimsiz yapısına uygun olarak içten yanmalı motorun da mümkün olduğunca sessiz ve titreşimsiz çalışması, konfor açısından önemli bir kriterdir [32].

4.3. Batarya

Elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depolayarak elektrik enerjisinin depolanmasını ve taşınmasını sağlayan birimlere batarya denilmektedir. Batarya modüllerden, modüller hücrelerden, hücreler ise bir negatif elektrot, bir pozitif elektrot ve elektrolit bulunan bir yapıdan oluşmaktadır [43]. Basit olarak bir batarya, istenen çıkış voltajını ve kapasitesini elde edebilmek için seri, paralel veya hem seri hem de paralel olarak bağlanmış hücre veya hücrelerden meydana gelmektedir. Bataryanın karakteristik özellikleri de kullanılan hücrelerin türü, sayısı, bağlantı yapısı ve batarya dışındaki donanımlar tarafından belirlenmektedir [44].

Bataryalar 100 yılı aşkın bir süredir araçlarda kullanılmaktadır. Konvansiyonel araçlarda motorun çalıştırılması, ateşleme ve aydınlatma için gerekli olan elektrik enerjisi bataryalardan sağlanmaktadır. Konvansiyonel araçlarda kurşun-asit bataryalar, diğer batarya türlerine oranla uygun maliyeti, düşük self-deşarj oranı ve kolay bakım avantajları sayesinde tercih edilmektedir. Batarya teknolojilerindeki gelişmelere rağmen konvansiyonel araçlarda kurşun-asit bataryaların kullanımının devam edeceği öngörülmektedir [45].

Elektrikli araçların konvansiyonel araçlara göre en büyük dezavantajları olan menzil ve şarj süresini etkileyen en kritik bileşen bataryadır. Bu nedenle hibrit ve elektrikli araçlarda batarya seçimi büyük öneme sahiptir. Hibrit ve elektrikli araçlarda kullanılacak bataryalardan beklenen özellikler aşağıdaki gibidir [46];

- Yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip olmalıdır.
- Hızlı şarj ve derin deşarj kabiliyetine sahip olmalıdır.

- Çevrim ve servis ömrü yüksek olmalıdır.
- Güvenli, ekonomik ve çevreci bir enerji kaynağı olmalıdır.

Hibrit ve elektrikli araçlarda farklı karakteristiklere sahip bataryalar kullanılmaktadır. Yaygın olarak tercih edilen batarya çeşitleri NiCD, NiMH, Li-ion, LiPo ve Li-S bataryalardır. Çizelge 4.1.'de batarya çeşitleri ve başlıca özellikleri verilmiştir.

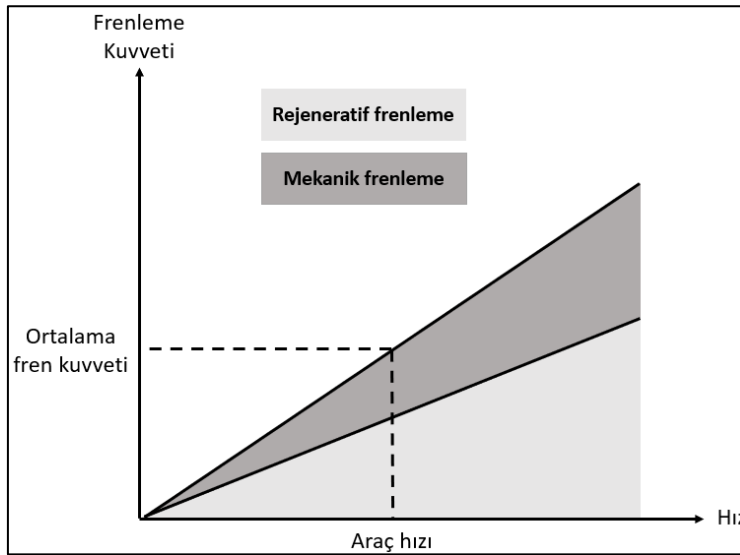
Çizelge 4.1. Batarya çeşitleri ve başlıca özellikleri [47]

Batarya Çeşidi	Nominal Gerilim (V)	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Çevrim Ömrü	Hafıza Etkisi	Çalışma Sıcaklığı (°C)
Kurşun-Asit	2	35	1000	Yok	-15/+50
NiCd	1,2	50-80	2000	Var	-20/+50
NiMH	1,2	70-95	3000	Nadir	-20/+60
Li-ion	3,6	118-250	2000	Yok	-20/+60
LiPo	3,7	130-225	1200	Yok	-20/+60

Kurşun asit bataryalar sağladığı yüksek deşarj akımı, hafıza etkisine sahip olmaması ve düşük maliyet gibi önemli avantajlara sahiptir. Düşük enerji yoğunluğu ve düşük nominal gerilim diğer batarya çeşitlerine göre yetersiz kalmaktadır. Nikel kadmiyum (NiCD) bataryalar uzun ömürlü olmaları çevrim başına fiyat kategorisine göre en ekonomik batarya çeşididir. Ancak düşük enerji yoğunluğu ve hafıza etkisine sahip olması en büyük dezavantajdır [48]. Hafıza etkisi bir bataryanın deşarj olduktan sonra şarj edildikçe maksimum kapasitesinin düşmesi durumuna denilmektedir. Nikel metal hidrit bataryalar (NiMH) yapısında kurşun ve cıva gibi zararlı maddeler bulundurmadığı için kurşun-asit ve NiCD bataryalara göre daha çevreci bir yapıdadır. Ancak enerji yoğunluğu diğer batarya çeşitlerine göre düşüktür. Lityum-İyon bataryalar hibrit ve elektrikli araçların yanı sıra cep telefonu ve dizüstü bilgisayar gibi taşınabilir cihazlarda oldukça yaygın şekilde kullanılmaktadır. Yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek depolama verimliliğine sahiptir. Li-ion batarya hücresi yaklaşık olarak 4V'luk bir çıkış gerilimine sahiptir. Bu gerilim batarya çeşitleri arasında en yüksek çıkış gerilimlerinden biridir. Bunun yanı sıra self-deşarj özelliğinin olmaması, yüksek çevrim ömrü gibi başlıca özellikler Li-ion bataryaları öne çıkarmaktadır [49].

4.4. Rejeneratif Fren Sistemi

Hibrit ve elektrikli araçlarda kullanıcı gaz pedalından ayağını çektiği durumlarda aracın sahip olduğu kinetik enerji, elektrik motorunun jeneratör görevi görmesi sayesinde sisteme geri kazandırılmakta ve bataryanın şarj edilmesi sağlanmaktadır. Konvansiyonel araçlarda ise balata ve disk arasındaki sürtünme ile araç yavaşlatılmaktadır. Sürtünme sonucu ısı enerjisi açığa çıkmaktadır ve herhangi bir şekilde araçlar bu enerjiden faydalanamamaktadır. Hibrit ve elektrikli araçlarda özellikle şehir içi gibi sık yavaşlama içeren koşullarda frenlemenin büyük bir kısmı rejeneratif olarak yapılmaktadır. Bu sayede hem aracın kinetik enerjisinden fayda sağlanmakta hem de fren sistemi elemanlarında yıpranmanın önüne geçilmektedir. Şekil 4.5.'te bir elektrikli bir aracın frenleme kuvvetinin rejeneratif frenlemeyle kıyaslanması görülmektedir.

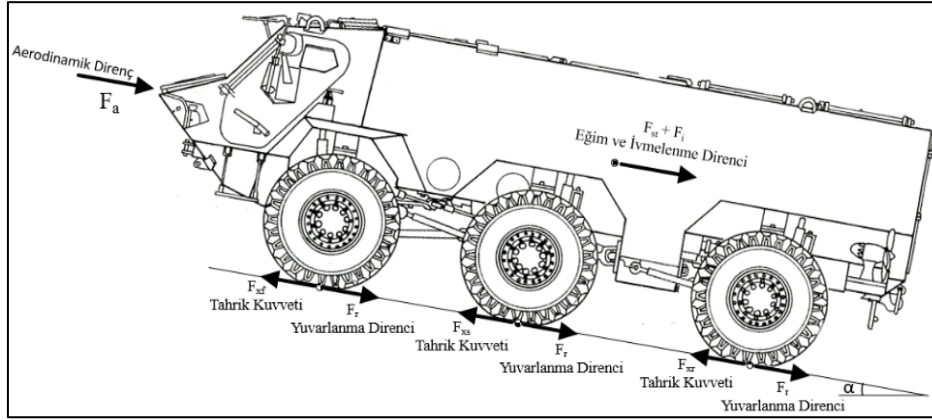


Şekil 4.5. Elektrikli bir araçta mekanik ve rejeneratif frenleme kuvvetleri

Araç hızının artması rejeneratif frenlemenin kullanım oranını artıracak ve geri kazanılan enerji miktarının artması sağlanacaktır. Ancak rejeneratif frenleme sistemi birtakım parametreler çerçevesinde kurallara bağlı olarak çalışmaktadır. Bu parametreler fren pedalına basma hızı, araç hızı ve fren pedalı konumudur. Araç hızının ortalama olarak 20 km/h'nin altında olduğu durumlarda elektrik motoru jeneratör moduna geçemeyeceği için rejeneratif frenleme devreye girmemektedir. Ayrıca fren pedalına basma ivmesi ve fren konumu da kontrol edilerek kullanıcının frenleme ihtiyacına uygun olarak mekanik fren ve rejeneratif fren kullanım oranları değiştirilmektedir.

4.5. Direnç Kuvvetleri

Araçlar hareketleri esnasında hareketlerine zıt yönde bir takım direnç kuvvetlerine maruz kalmaktadır. Aracın fiziksel yapısı ve yol şartları gibi faktörlere bağlı olan bu direnç kuvvetlerinin azaltılması hibrit elektrikli araçlarda yakıt ekonomisinde iyileşme ve menzilin artışı sağlayacaktır. 6x6 zırhlı bir personel taşıyıcının hareketi esnasında maruz kaldığı direnç kuvvetleri Şekil 4.6.'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6. 6x6 araca etki eden direnç kuvvetleri

Direnç kuvvetleri aerodinamik direnç, yuvarlanma direnci, yokuş direnci ve ivmelenme direnci olarak 4 başlık altında incelenmektedir.

4.5.1. Aerodinamik direnç

Akışkan içerisinde hareket eden cisimler, hareketlerine zıt yönde kuvvetlere maruz kalırlar. Dolayısıyla hava içerisinde hareket eden bir araca hareketine zıt yönde bir direnç kuvveti etki etmektedir. Bu direnç kuvveti aerodinamik direnç olarak isimlendirilmektedir. Hareket halindeki bir araca etkiyen aerodinamik direnç 3 başlıkta incelenmektedir;

- Aracın hareketi esnasında arka kısmında boşalttığı alanda meydana gelen türbülans, toplam aerodinamik direncin %80'i kadardır. Bu direnç, başta aracın arka kısmı olmak üzere gövdenin biçimine bağlıdır.
- Aracın yüzeyindeki hava akışı yüzey sürtünmesine neden olmaktadır. Bu sürtünmenin temel nedeni kayma gerilmesidir. Akışa dik yüzeyde sürtünme kuvveti sıfır, akışa paralel yüzeyde sürtünme kuvveti maksimum seviyededir. Bu durumda sürtünme kuvveti kayma

kuvvetine eşit olacaktır [50]. Yüzey sürtünmesi toplam aerodinamik direnç kuvvetinin %10'u kadardır.

c) Soğutma ve havalandırma fonksiyonlarını yerine getirebilmek için aracın radyatör sisteminden ve iç kısımlarından geçen hava, toplam aerodinamik direncin %10'unu oluşturmaktadır. Bu bileşen aracın akış kanalları ve iç tasarımına bağlı olarak değişmektedir.

Hareket halindeki bir araca etki eden toplam aerodinamik direnç Eş. 4.1 ile hesaplanmaktadır;

$$F_a = 0.5 \rho C_D A_F (V+V_0)^2 \quad (4.1)$$

C_D ile ifade edilen aerodinamik direnç katsayısı, bir cismin şekline bağlı olarak akışkan içerisinde oluşturduğu süreksizlik ve girdap gibi akış bozulmalarının etkisini ifade eden bir katsayıdır. Bu katsayının azaltılması araçlarda yakıt ekonomisinde iyileşme, yol tutuş performansında ve konfor seviyesini artış sağlayacaktır [51]. Deneyler ile farklı tipteki araçlar için belirlenmiş aerodinamik direnç katsayıları Çizelge 4.2.'de bulunmaktadır [52].

Çizelge 4.2. Araç tiplerine göre aerodinamik direnç katsayısı

Araç Tipi	Aerodinamik Direnç Katsayısı (C_D)
Optimum Tasarım	0,15-0,20
Otomobil	0,3-0,4
Cabrio	0,5-0,7
Motosiklet	0,6-0,7
Otobüs	0,6-0,7
Kamyon	0,8-1,5

4.5.2. Yuvarlanma direnci

Lastiğin elastik yapısından dolayı tekerlek merkezinin ön kısmında dönme hareketine karşı koyan bir direnç kuvveti oluşmaktadır. Oluşan bu dirence yuvarlanma direnci denilmekte ve katsayısı C_R ile sembolize edilmektedir. Araç lastikleri ve yol yüzeyi, aracın hareketi esnasında sürekli olarak deformasyona maruz kalmaktadır. Bu deformasyonun oluşması için enerjiye ihtiyaç vardır. Bu enerji lastik ve yol yüzeyinin sönümlemesinden dolayı temas bitince geri kazanılamaz. Dolayısıyla yuvarlanma direnci lastik yapısında, temas alanında

ve yol yüzeyinde meydana gelen deformasyon süreçlerinin bir sonucudur [53]. Yuvarlanma direnci Eş. 4.2 ile hesaplanmaktadır.

$$F_r = m g C_R \cos\alpha \quad (4.2)$$

Yuvarlanma direnç katsayısı zemin şartlarına göre değişim göstermektedir. Farklı zemin şartları için yuvarlanma direnç katsayıları Çizelge 4.3.'te gösterilmektedir [54].

Çizelge 4.3. Zemin tiplerine göre yuvarlanma direnç katsayısı

Zemin	Yuvarlanma Direnç Katsayısı (C_R)
Düzgün asfalt, beton	0,015
Küçük taş döşenmiş zemin	0,015
İri taş döşenmiş zemin	0,015
Şose yol	0,02
Çamurlu yol	0,05
Gevşek toprak, kum	0,1-0,35

4.5.3. İvmelenme direnci

Newton'un II. hareket kanununa göre cisimler bulunduğu durumu koruma isteğindedir. Bu durum eylemsizlik olarak isimlendirilmektedir. Bir aracın pozitif veya negatif olarak ivmelenmesi esnasında, ivmenin zıt yönünde bir atalet kuvveti oluşmaktadır. Bu kuvvete ivme direnci adı verilmektedir. İvme direnci Eş. 4.3 ile hesaplanmaktadır.

$$F_i = m.a \quad (4.3)$$

Hareket halindeki bir aracın ivmelenme direnci dönme hareketi yapan motor, aktarma organları ve tekerleklerin atalet kuvvetleri ile doğrusal hareket halindeki kütlelerin atalet momentinden oluşmaktadır [55].

4.5.4. Eğim direnci

Eğim direnci, eğimli yolda seyir halindeki bir aracın yolun eğimi ve ağırlığından dolayı maruz kaldığı direnç kuvvetidir. Eğim direnci Eş. 4.4 ile hesaplanmaktadır [56].

$$F_{st} = m g \sin \alpha \quad (4.4)$$

α yolun açi cinsinden eğimini ifade etmektedir.

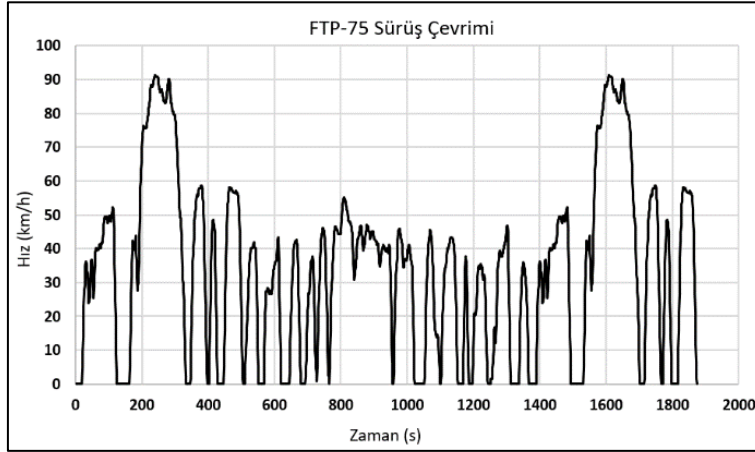
Ülkemizde otoyollarda %10, şehir içi yollarda %15, kırsal arazide %20 maksimum eğimli yol bulunmaktadır. Yüzde ile ifade edilen değer, 100 metre ilerlemeye karşılık gelen yükselme değeridir.

4.6. Sürüş Çevrimleri

Otomotiv endüstrisinde araçların yakıt ekonomisi, menzil ve egzoz gazı emisyonlarının hesaplanması için oluşturulan hız-zaman grafiklerine sürüş çevrimi denilmektedir. Sürüş çevrimi, belirli bir süre boyunca araç tipi ve bölge için gerçek sürüş koşullarını yansıtmalıdır. Çevrimler standart ve standart dışı olmak üzere 2 sınıfta incelenmektedir. Avrupa’da binek araçlar için NEDC, Amerika’da şehir içi kullanıma yönelik olarak geliştirilen FTP-75, Japonya’da 10-15 Mod sürüş çevrimleri standart sürüş çevrimleridir. Standart dışı olan sürüş çevrimleri genellikle gerçek sürüş koşulları ile elde edilmiş bir araç veya bölge için özel olarak oluşturulmuş çevrimlerdir. Çok farklı hız, ivme ve duraklama periyotlarını içermektedir. Hong Kong sürüş çevrimi, ülkemizde Konya ve İstanbul sürüş çevrimleri standart dışı sürüş çevrimleridir. Literatürde askeri araçlara yönelik geliştirilmiş standart bir sürüş çevrimi bulunmamaktadır. Standart dışı çevrimlerden biri olan “askeri sürüş çevrimi” ve FTP-75 standart çevrimi modelin referans hız profillerini oluşturmaktadır. Yapılan yakıt ekonomisi ve menzil hesapları bu çevrimler için gerçekleştirilmiştir.

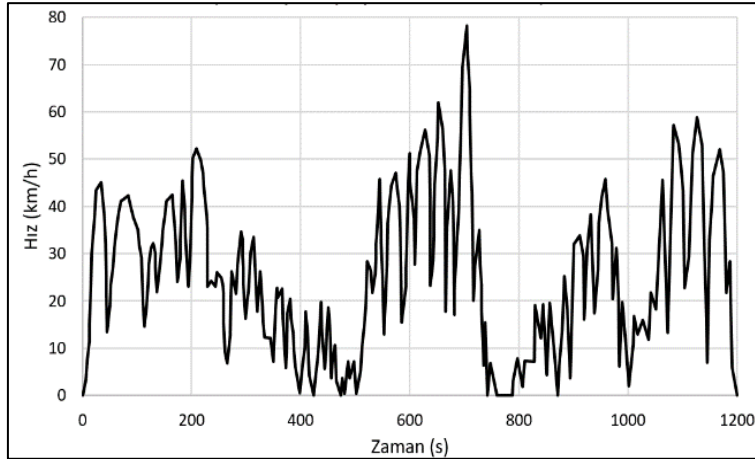
FTP-75 Federal Test Prosedürü, Amerika’da binek ve hafif araçlar için kullanılan bir standart sürüş çevrimlerinden biridir. Sürüş çevrimi 1874 saniye sürmektedir ve 17750 metre uzunluğa sahiptir. Kullanım amacı binek araçlar olmasına rağmen zırhlı personel taşıyıcıların maksimum 100 km/h hızlara ulaşmasından dolayı FTP-75 sürüş çevrimi

modelde kullanılmaktadır. FTP-75 çevriminin hız-zaman grafiği Şekil 4.7.'de görülmektedir.



Şekil 4.7. FTP-75 sürüş çevrimi

Literatürde bulunan çalışmalarda kullanılmış standart dışı bir çevrim olan askeri sürüş çevrimi modelin enerji tüketimi, yakıt tüketimi ve menzil hesaplamalarının yapılmasında kullanılacaktır. Sürüş çevrimi 1200 saniye sürmektedir ve 8500 metre uzunluğa sahiptir. Askeri sürüş çevrimine ait hız-zaman grafiği Şekil 4.8.'de görülmektedir.



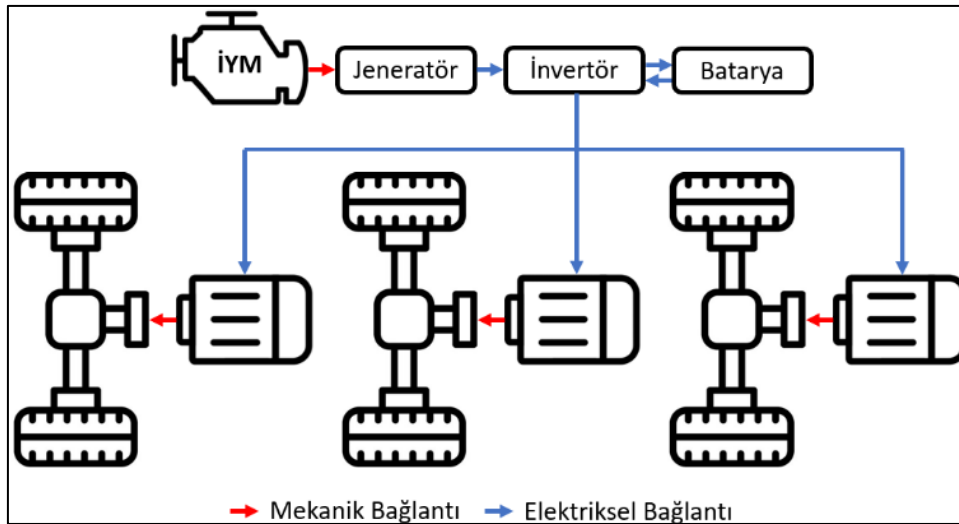
Şekil 4.8. Askeri sürüş çevrimi

5. MODELLEME AŞAMALARI

Bu bölümde seri hibrit güç aktarma yapısına sahip 6x6 zırhlı personel taşıyıcının MATLAB/Simulink programı kullanılarak yapılan modelleme aşamaları, oluşturulan sistem ve alt sistemler detaylandırılacaktır.

5.1. Güç Aktarma Sistemi Modeli

Aracın tahrik elemanlarından elde edilen torkun tekerleklere iletilmesini sağlayan sistem güç aktarma sistemi olarak adlandırılmaktadır. 6x6 SHE ZPT modelinde her aks için 1 adet elektrik motoru olmak üzere toplamda 3 adet elektrik motoru bulunmaktadır. Elektrik motorunun düşük devirlerden itibaren sağladığı yüksek tork modelde transmisyon ihtiyacını ortadan kaldırmıştır. Her aks üzerinde bulunan 1 adet diferansiyel aynı aks üzerinde bulunan tekerleklere hareketin iletilmesini sağlamaktadır. Ayrıca diferansiyelin sahip olduğu redüksiyon ile sabit oranda tork artışı sağlanmaktadır. Modelin güç aktarma sistem şeması Şekil 5.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Güç aktarma sistem şeması

Güç aktarma sistem şemasına göre modelin transfer fonksiyonu oluşturulmuştur. Bir milin açısal ivmesi mile etkiyen torkun milin kütle atalet momentine bölünmesiyle elde edilmektedir.

$$\dot{\omega}_m = \frac{T_m}{J_m} \quad (5.1)$$

Elektrik motorundan alınan torkun diferansiyele iletilmesi sonucu

$$T_{dg} = (T_m - J_m \dot{\omega}_m) \quad (5.2)$$

eşitliği ile diferansiyel giriş torku hesaplanmaktadır. Diferansiyelin sahip olduğu redüksiyon ve verim hesaba dahil edilerek diferansiyel çıkış torku

$$T_{dg} = (T_m - J_m \dot{\omega}_m) i_d \eta_d \quad (5.3)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Diferansiyel çıkışından tekerleklere torku ileten 2 adet aks mevcuttur. Aksların kütle atalet momentleri ve açısal ivmeleri hesaplamaya dahil edildiğinde

$$T_a = (T_m - J_m \dot{\omega}_m) i_d \eta_d - 2x J_a \dot{\omega}_a \quad (5.4)$$

eşitliği elde edilmektedir. Akslardan tekerleklere iletilen tork hesaplanırken tekerleklerin sahip olduğu kütle atalet momentleri ve açısal ivmesi dahil edilerek

$$T_w = T_a - 2x J_w \dot{\omega}_w \quad (5.5)$$

eşitliği ile tekerleklere iletilen tork elde edilmektedir. Eş. 5.4 yerine Eş. 5.5'te yerine yazıldığında

$$T_w = x(T_m - J_m \dot{\omega}_m) i_d \eta_d - 2x J_a \dot{\omega}_a - 2x J_w \dot{\omega}_w \quad (5.6)$$

eşitliği elde edilmektedir. Motordan tekerleklere kadar açısal ivme redüksiyon oranı ile değiştirildiği için

$$\dot{\omega}_m = \dot{\omega}_a i_d = \dot{\omega}_w i_d \quad (5.7)$$

olduğu bilinmektedir. Eş. 5.7 yerine yazıldığında

$$T_w = x(T_m - J_m \dot{\omega}_w i_d) i_d \eta_d - 2x J_a \dot{\omega}_w - 2x J_w \dot{\omega}_w \quad (5.8)$$

eşitliği elde edilmektedir. Sadeleştirme ve düzenlemelerin ardından eşitlik

$$T_w = xT_m i_d \eta_d - \dot{\omega}_w (J_m i_d^2 \eta_d - 2xJ_a - 2xJ_w) \quad (5.9)$$

halini almaktadır. Tekerleklerin açısal hızı yalnız bırakıldığında

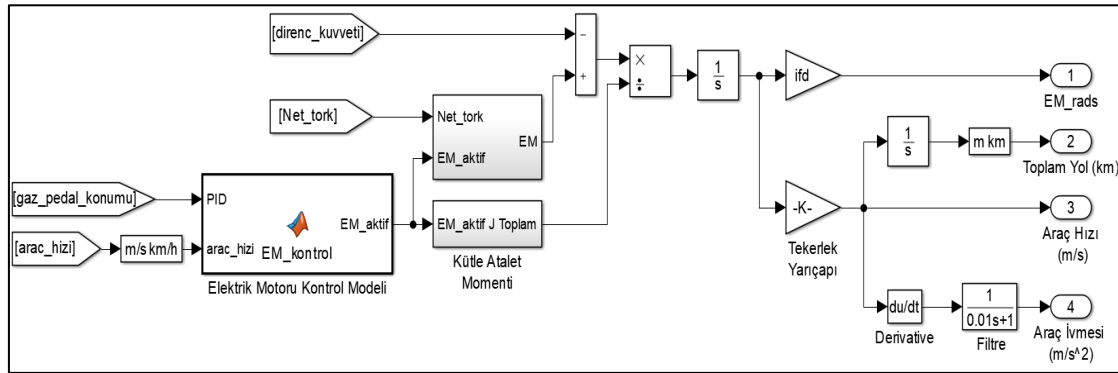
$$\dot{\omega}_w = \frac{xT_m i_d \eta_d - T_w}{x[J_m i_d^2 \eta_d - 2(J_a + J_w)]} \quad (5.10)$$

eşitliği elde edilmektedir. Açısal ivmenin integrali alınarak

$$\omega_w = \int \frac{xT_m i_d \eta_d - T_w}{x[J_m i_d^2 \eta_d - 2(J_a + J_w)]} dt \quad (5.11)$$

tekerleklerin açısal hızının hesaplanması sağlayan transfer fonksiyonu elde edilmektedir.

Elde edilen transfer fonksiyonunun Simulink modeli Şekil 5.2.'de gösterilmektedir.

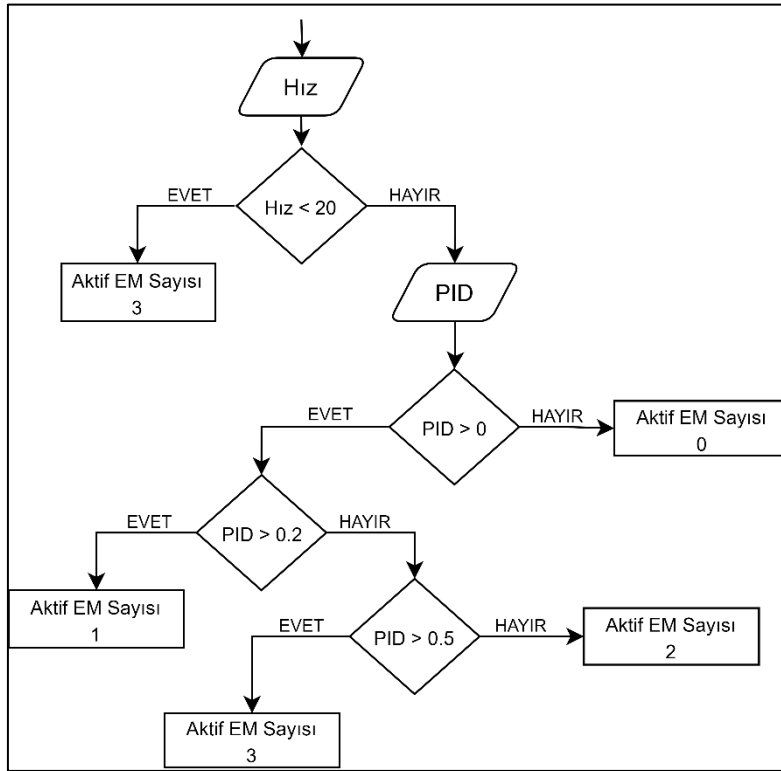


Şekil 5.2. Araç dinamik kontrol modeli

PID kontrolcünden alınan gaz pedalı konumu, aktif elektrik motor sayısı ve elektrik motoru çıkış torkunun çarpımı sistemin tahrik torkunu oluşturmaktadır. Sistem tahrik torkundan direnç kuvvetleri çıkartılarak net tahrik torku elde edilmektedir. Aktif elektrik motoru sayısına bağlı olarak hesaplanan motor, aks ve tekerleklerin kütle atalet momentleri net tahrik torkuna bölünerek tekerleklerin açısal ivmesinin hesaplanması sağlanmaktadır. Tekerlek açısal ivmesinin integrali alındıktan sonra redüksiyon oranı ile çarpımı rad/s biriminden motorun açısal hızının sisteme girişi sağlanmaktadır. Tekerlek açısal hızı,

tekerlek yarıçapı ile çarpılarak araç hızı, integrali alınarak kat edilen mesafe, türevi alınarak aracın anlık ivmesi hesaplanmaktadır.

Aracın mevcut hızı ve gaz pedalı konumuna göre sistemde bulunan elektrik motorlarını devreye alan elektrik motoru kontrol modeli ile araca 6x2, 6x4 veya 6x6 olarak hareket imkânı sağlanmaktadır. Bu sayede aracın hızına ve kullanıcının gaz tepkisine uygun sayıda elektrik motoru devreye alınarak elektrik motorlarının yüksek verimlilik ile çalışması sağlanmaktadır. Çevrim esnasında aktif elektrik motorlarının sayısını hesaplayan algoritmanın akış şeması Şekil 5.3.'te gösterilmektedir.

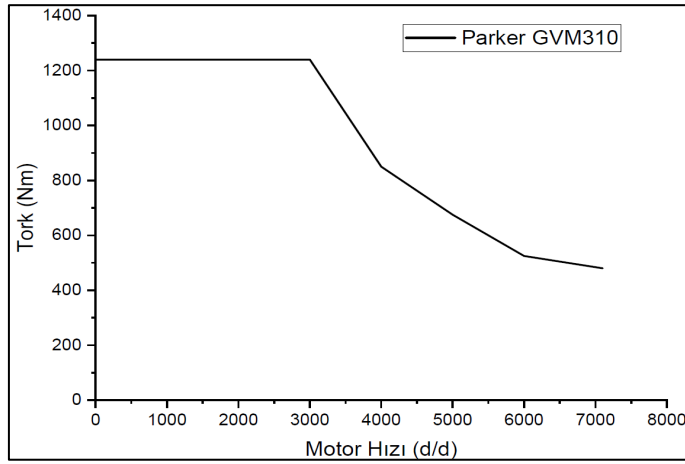


Şekil 5.3. Aktif elektrik motoru belirleme akış şeması

Araç hızı 20 km/h'den düşük olduğu durumlarda ve aracın ilk hareketi esnasında tüm elektrik motorları devreye alınmaktadır. Araç hızının 20 km/h'den büyük olduğu durumlarda ise gaz pedalı konumuna göre elektrik motorları kademeli olarak devreye alınmaktadır. Araç hızı 60 km/h'den büyük olduğu durumlarda elektrik motorlarının verimsiz olduğu noktalarda çalışmasını engellemek için tüm elektrik motorları devreye alınmaktadır.

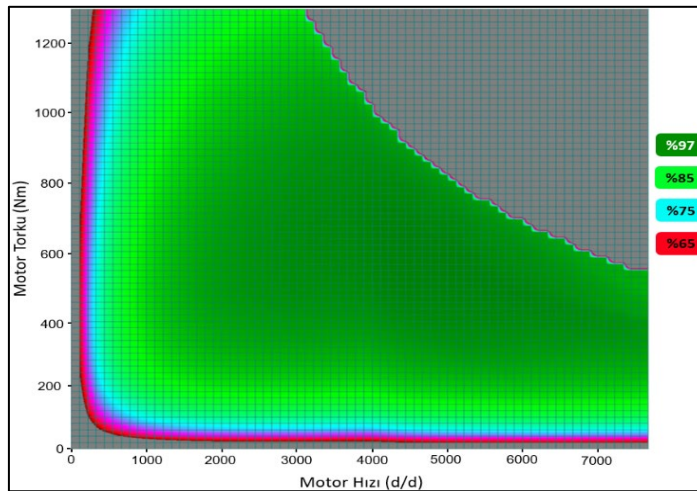
5.2. Elektrik Motor Modeli

Seri hibrit elektrikli bir zırhlı personel taşıyıcının ihtiyaç duyduğu tahrik kuvvetinin tamamı elektrik motorlarından karşılanmaktadır. Bu nedenle aracın ağırlığı ve görev şartları göz önüne alındığında yüksek tork çıkışı sağlayan elektrik motoruna ihtiyaç duyulmaktadır. Modelde Parker markasına ait “GVM310-250MW1-W” modeli elektrik motoru kullanılmaktadır. Elektrik motoruna ait tork grafiği Şekil 5.4.’te görülmektedir.



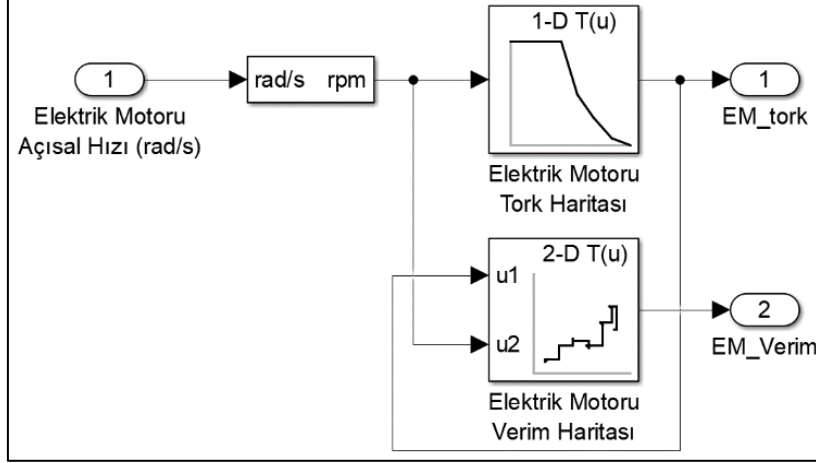
Şekil 5.4. Elektrik motoru tork grafiği

Elektrik motorunun verim haritası da modele dahil edilerek elde edilen sonuçların gerçek verilere daha yakın olması amaçlanmıştır. Elektrik motoruna ait verim haritası Şekil 5.5.’te görülmektedir.



Şekil 5.5. Elektrik motoru verim haritası

Elektrik motorunun teknik dokümanından elde edilen tork 1 boyutlu ve verim haritası 2 boyutlu “Look Up Table” kullanılarak elektrik motoru Simulink modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan Simulink modeli Şekil 5.6.’da görülmektedir.



Şekil 5.6. Elektrik motoru Simulink modeli

Enerji tüketimini etkileyen faktörlerin başında elektrik motorunun verimi gelmektedir. Yüksek veya düşük motor hızlarında elektrik motorunun çalıştırılması motorun verimliliğini düşürecek ve enerji tüketimini artıracaktır. Elektrik motoruna ait teknik veriler aşağıdaki tabloda verilmektedir.

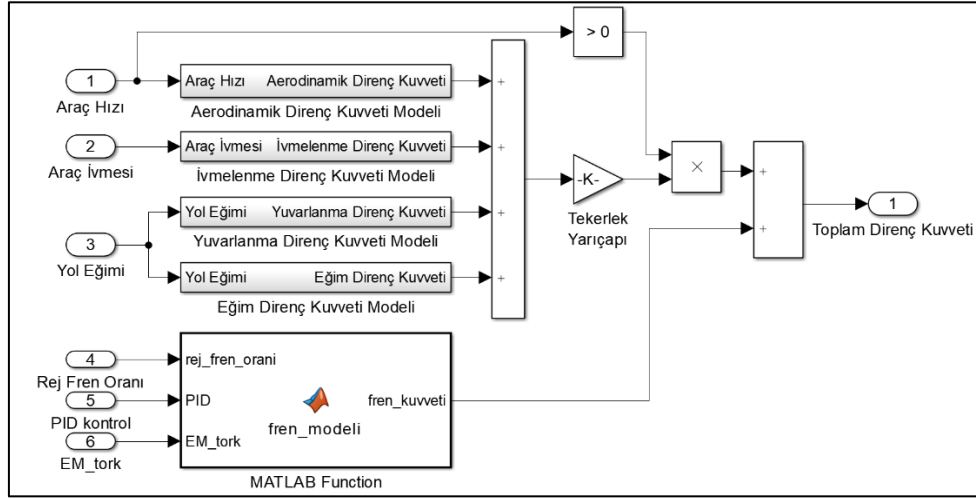
Çizelge 5.1. Elektrik motoru teknik özellikleri

Çalışma Voltajı (V)	650
Maksimum Tork (Nm)	1240 (0-3000 d/d)
Maksimum Güç (kW)	350 (4000 d/d)
Maksimum Motor Hızı (d/d)	7100
Maksimum Verim (%)	96.9
Ağırlık (kg)	158

5.3. Direnç Kuvvetleri Modeli

Modelden alınan verilerin gerçek sürüş koşullarına uygun olması için aerodinamik, yuvarlanma, ivme ve eğim dirençlerini içeren direnç kuvvetleri modeli oluşturulmuştur. Bunun yanı sıra PID kontrolcünden alınan pedal konumuna elde edilen fren kuvveti de direnç

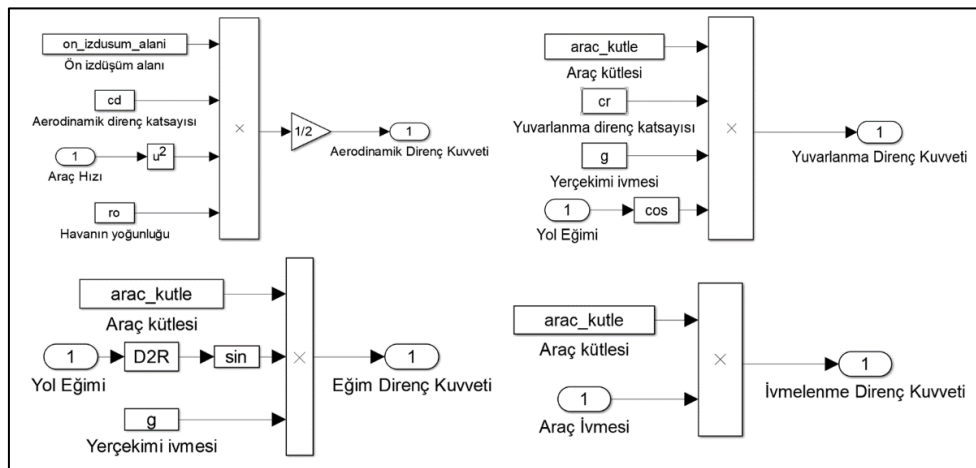
kuvvetleri modeline eklenmiştir. Direnç kuvvetleri Simulink modeli Şekil 5.7.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.7. Toplam direnç kuvveti

Dinamik modelden elde edilen araç hızı ve araç ivmesi de direnç kuvvetleri modeline girdi olarak sağlanmaktadır. Fren modelinde rejeneratif fren oranı, PID kontrolcünden alınan fren pedalı konumu ve elektrik motorunun tork değeri algoritmaya giriş verileridir.

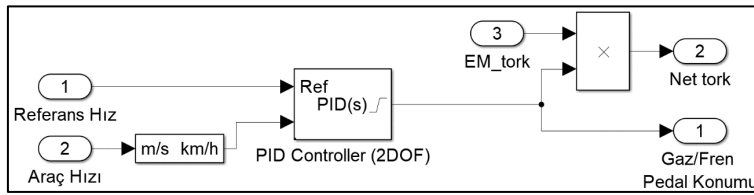
Direnç kuvvetlerinin hesaplanmasında kullanılan eşitlikler ile oluşturulmuş Simulink modelleri Şekil 5.8.'de verilmiştir.



Şekil 5.8. Direnç kuvvetleri Simulink modeli

5.4. Hız Kontrol Modeli-PID

Modelde araç hızı için referans alınan sürüş çevrimlerinde aracın mevcut hızını referans hıza eşitleyebilmek için gaz ve fren pedalını kontrol eden PID kontrol modeli oluşturulmuştur. 1 ve -1 değerleri arasında çıkış sağlayan PID modeli sayesinde 1 ile 0 arası konumlar gaz pedalı, 0 ile -1 arasındaki konumlar fren pedalı konumunu belirlemektedir. Gaz ve fren pedalı konumlarının bilinmesi araç dinamik modelinde ve rejeneratif frenleme modelinde kullanılmaktadır. Oluşturulan PID kontrol Simulink modeli Şekil 5.9.'da gösterilmektedir.

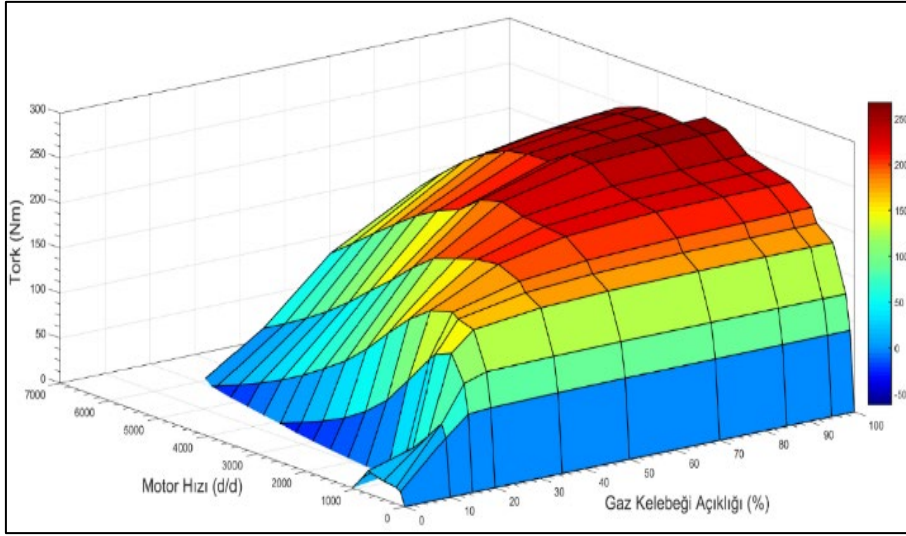


Şekil 5.9. PID kontrol Simulink modeli

PID kontrolcü katsayıları sistemin cevaplarına ve referans sürüş çevrimine araç hızının oturma süresine bakılarak deneme-yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. P için 1, I için 1 ve D için 0.05 olmak üzere katsayılar belirlenmiştir.

5.5. İçten Yanmalı Motor Modeli

Bu çalışmada bataryanın şarj edilmesi, gaz pedalı konumuna ve araç hızına bağlı olarak elektrik motorlarına gereken enerjinin sağlanması ya da her iki görevi birden üstlenen dizel motor 150 kW güç ve 267 Nm tork kapasitesine sahiptir. Motorun motor hızı ve gaz kelebeği açıklığına bağlı tork haritası Şekil 5.10.'da verilmiştir.

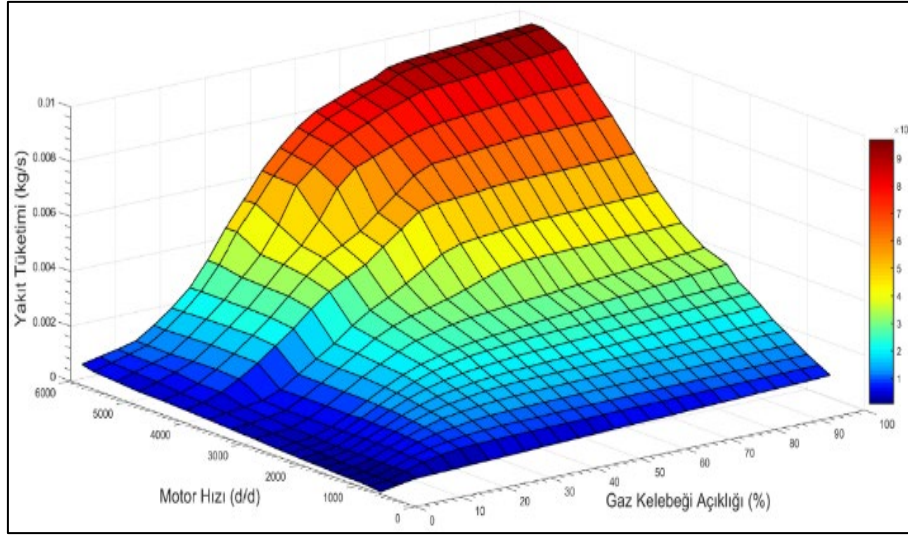


Şekil 5.10. İçten yanmalı motor tork haritası

İçten yanmalı motor için belirlenen hız ve gaz kelebeği açıklığı;

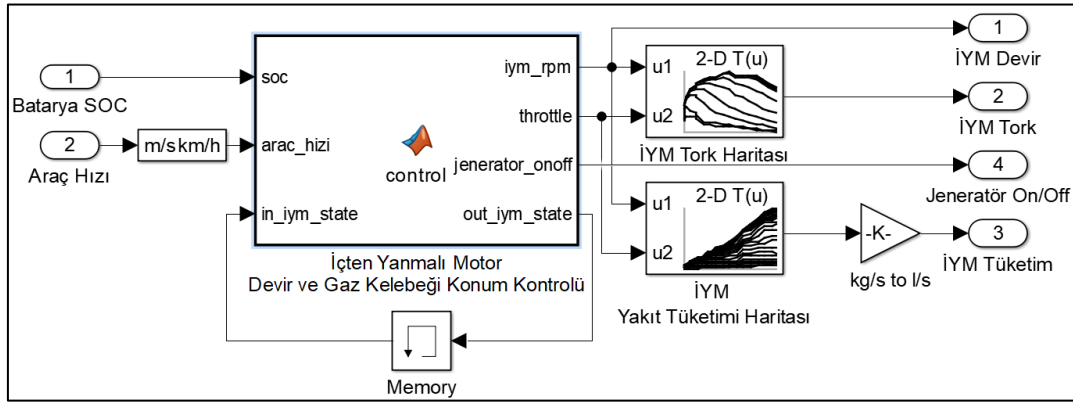
- Sadece bataryayı şarj ediyor ise 2600 d/d, %30 gaz kelebeği açıklığı,
- Sadece elektrik motoru için gerekli enerjisi sağlıyor ise 2800 d/d, %50 gaz kelebeği açıklığı,
- Her iki görevi de gerçekleştiriyor ise 3000 d/d, %80 gaz kelebeği açıklığı konumunda çalıştırılmaktadır.

İçten yanmalı motorun yakıt tüketimi aracın menzilini etkileyen faktörlerin başında gelmektedir. İçten yanmalı motorun çalıştığı hız ve gaz kelebeği açıklığı yapılan çalışmalar sonucunda en uygun devirlerin belirlenmesi ile elde edilmiştir. Motorun yakıt tüketimi ve sağlayacağı tork bu noktaların seçilmesi için başlıca unsurlardır. Modelde kullanılan içten yanmalı motorun yakıt tüketim haritası Şekil 5.11.'de gösterilmektedir.



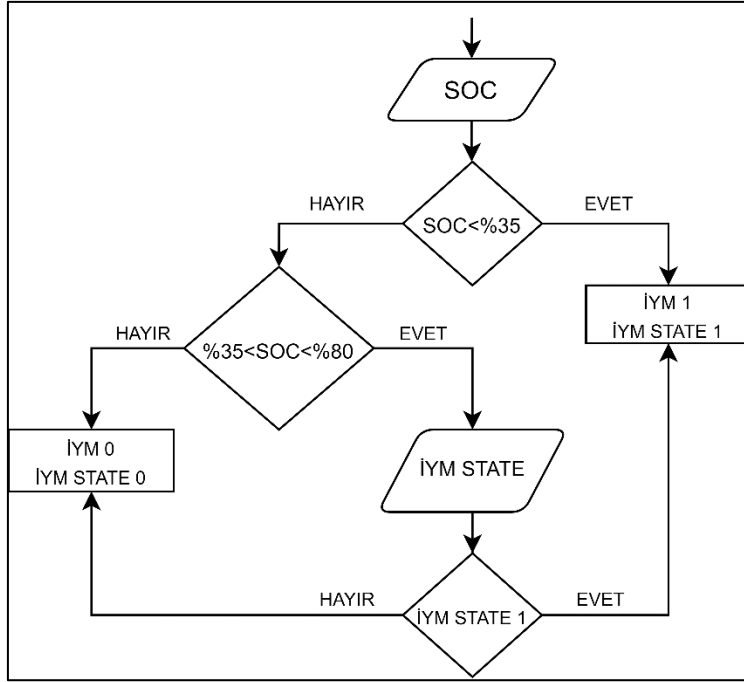
Şekil 5.11. İçten yanmalı motor yakıt tüketim haritası

İçten yanmalı motorun belirlenen noktalarda çalışması için batarya şarj durumu ve araç hızı bilgileri kullanılarak algoritma oluşturulmuştur. İçten yanmalı motor için oluşturulan Simulink modeli Şekil 5.12.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.12. İçten yanmalı motor Simulink modeli

İçten yanmalı motor batarya şarj durumu ve araç hızını kontrol eden algoritma tarafından devreye alınması sağlanmaktadır. Algoritmanın akış şeması Şekil 5.13.'te gösterilmektedir.

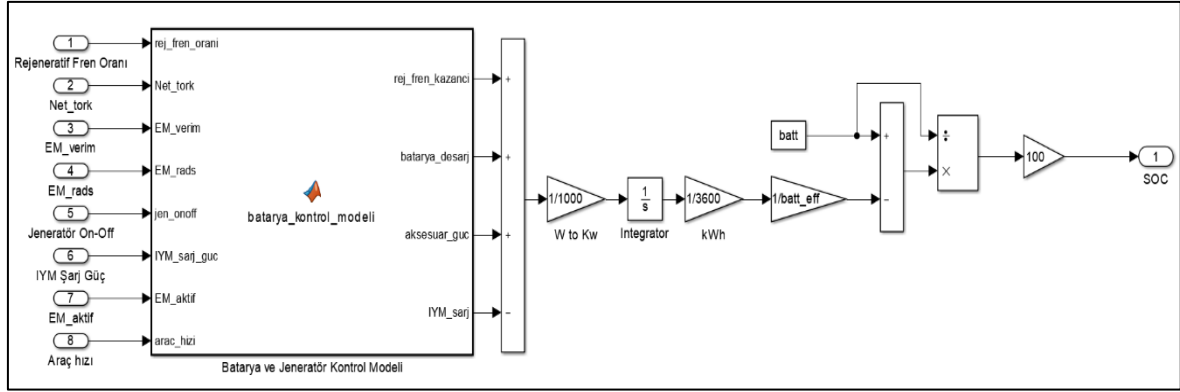


Şekil 5.13. İçten yanmalı motor kontrol algoritması akış şeması

Batarya şarj durumu %35'in altına düştüğü durumlarda bataryanın %80 şarj düzeyine ulaşmaya kadar içten yanmalı motor çalıştırılmaktadır. Batarya şarj işlemi başlatıldıktan sonra şarj durumu %35'in üzerine çıktığı durumlarda şarj işleminin kesilmemesi için İYM çalışma durumu algoritma tarafından kontrol edilmektedir. Batarya şarj durumu %80'in üzerinde ise batarya yalnızca rejeneratif frenleme ile şarj edilmektedir.

5.6. Batarya ve Enerji Tüketim Modeli

Bir çevrim sırasında harcanan ve üretilen enerjinin hesaplanması gerekmektedir. Elde edilen hesaplamalara göre batarya şarj durumunda meydana gelecek değişiklik jeneratör ve diğer sistemlerin çalışmasını etkilemektedir. Bu nedenle batarya ve enerji tüketim modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan Simulink modeli Şekil 5.14.'te gösterilmektedir.

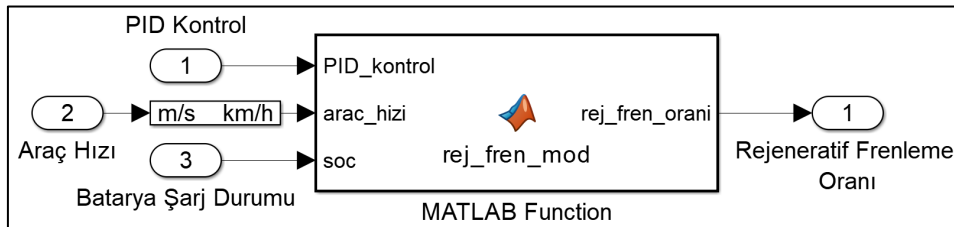


Şekil 5.14. Batarya ve enerji tüketim modeli

Rejeneratif frenleme oranı, jeneratör çalışma durumu ve net tahrik torku girdi olarak alınarak batarya ve enerji tüketim modeli için “MATLAB Function” algoritması oluşturulmuştur. Oluşturulan algoritma ile aracın tahrik, bekleme veya frenleme durumları için enerji tüketim/kazanç hesaplamaları yapılmaktadır.

5.7. Rejeneratif ve Mekanik Fren Modeli

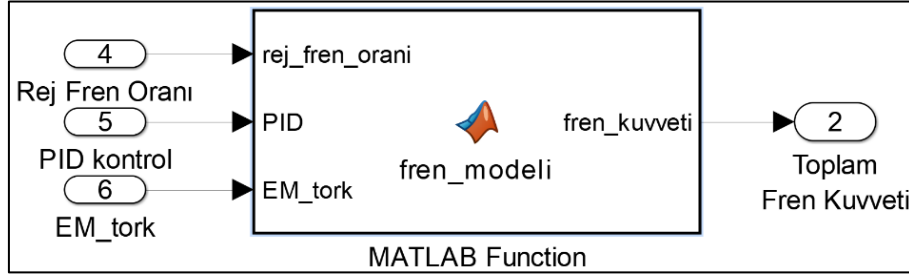
Hibrit ve elektrikli araçlarda yavaşlama için gerekli frenleme kuvveti rejeneratif ve mekanik fren kullanılarak sağlanmaktadır. Ancak rejeneratif frenin araç hızı, fren pedalı konumu ve batarya şarj durumuna göre belirlenen bir katsayıya sahip olması gerekmektedir. Belirlenecek bu katsayı ile hareket halindeki bir aracın dinamik dengesini bozmayacak, güvenli ve konforlu bir frenleme yapılmasını sağlamalıdır. Araç hızı, fren pedalı konumu ve batarya şarj durumuna göre rejeneratif fren katsayısını belirleyen algoritma oluşturulmuş ve “MATLAB Function” bloğu kullanılarak modellenmiştir. Rejeneratif fren katsayısının belirlendiği Simulink modeli Şekil 5.15.’te gösterilmektedir.



Şekil 5.15. Rejeneratif fren kontrol modeli

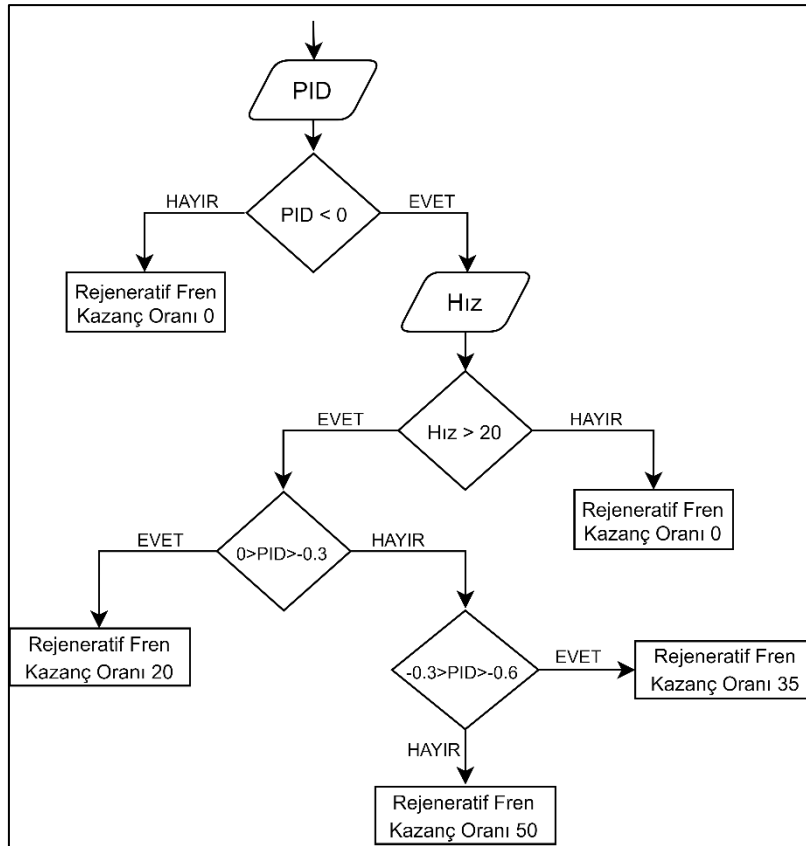
Aracın frenlemeye ihtiyaç duyduğu anlarda mekanik ve rejeneratif frenleme tek başına veya birlikte frenleme kuvveti oluşturabilir. Bu frenleme esnasında rejeneratif ve mekanik

frenlemenin hangi oranlarda etkili olacağını belirleyen fren modeli algoritması “MATLAB Function” bloğu kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan Simulink modeli Şekil 5.16.’da gösterilmektedir.



Şekil 5.16. Fren kuvveti hesaplama modeli

Rejeneratif frenleme kazanç oranı, araç hızı ve PID kontrolcünden alınan pedal bilgisine göre bir algoritma tarafından belirlenmektedir. Kazanç oranı belirleme algoritmasına ait akış şeması Şekil 5.17.’de gösterilmektedir.



Şekil 5.17. Rejeneratif frenleme kazanç oranı belirleme algoritması akış şeması

5.8. Araç ve Simülasyon Parametreleri

Modelleme aşamalarında araç ve simülasyon parametreleri için birtakım kabuller yapılmıştır. Araç ile ilgili parametreler için konvansiyonel modellere ait teknik dokümanlar incelenmiş ve aracın yapısı göz önünde bulundurularak parametrelerin belirlenmesi sağlanmıştır. Simülasyon parametrelerinde ise çevresel şartlar ve sabit değerler kullanılmıştır. Araç ve simülasyon parametreleri Tablo 5.2.'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.2. Araç ve simülasyon parametreleri

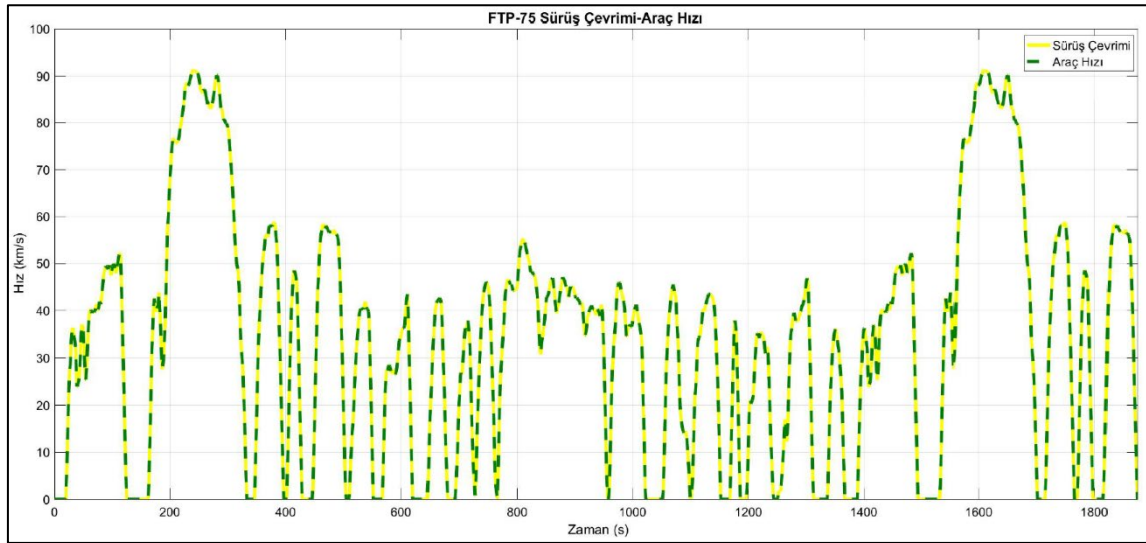
Araç Kütlesi (kg)	22000
Ön İzdüşüm Alanı (m ²)	8,5
Tekerlek Yarıçapı (m)	0,55
Diferansiyel Redüksiyon Oranı	12
Aerodinamik Direnç Katsayısı	0,8
Yuvarlanma Direnç Katsayısı	0,02
Yakıt Tankı Kapasitesi (l)	80
Batarya Kapasitesi (kWh)	200
Batarya Verimi	%95
Tekerlek Kütle Atalet Momenti (kg/m ²)	1,4
Aks Kütle Atalet Momenti (kg/m ²)	0,8
Elektrik Motoru Kütle Atalet Momenti (kg/m ²)	0,62
Diferansiyel Verimi	%90
Inverter Verimi	%90
Konverter Verimi	%90
Havanın Yoğunluğu (kg/m ³)	1,225
Yerçekimi İvmesi (m/s ²)	9,81
Alçak Gerilim Aksesuarlarının Harcadığı Güç (kWh)	2500

6. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu çalışma kapsamında 6x6 seri hibrit güç aktarma yapısına sahip zırhlı personel taşıyıcı modeli MATLAB/Simulink programında oluşturulmuştur. FTP-75 sürüş çevrimi, askeri sürüş çevrimi, performans kriterleri ve araç parametrelerine göre olmak üzere 4 başlık altında yapılan simülasyon sonuçları incelenecektir.

6.1. FTP-75 Sürüş Çevrimine Göre Sonuçlar

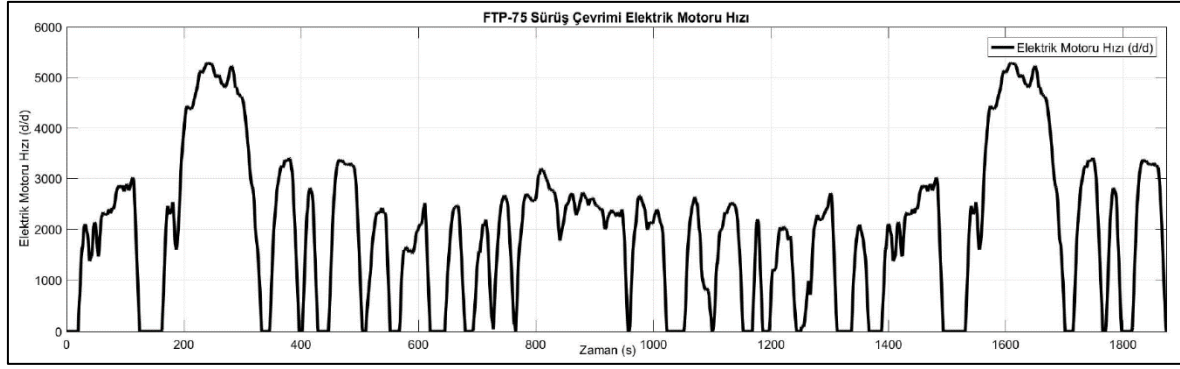
Federal Test Prosedürü bilinen olarak ABD tarafından şehir içi taşıtları için oluşturulan sürüş çevrimi düşük hız profili ve hızlanma/yavaşlama durumlarının sıklığı sebebi ile bu çalışmada standart sürüş çevrimi olarak kullanılmaktadır. FTP-75 sürüş çevrimi referans alınarak yapılan simülasyon grafiği Şekil 6.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 6.1. FTP-75 çevriminde araç hızı

Modelin sürüş çevrimini yüksek doğrulukla takip ettiği görülmektedir. Bu sayede elde edilen verilerin sürüş çevrimine uygun olduğu değerlendirilmektedir.

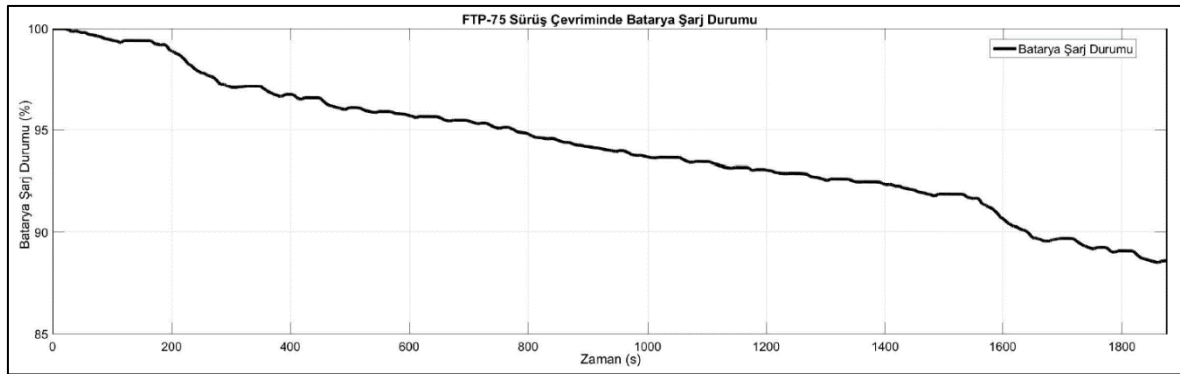
Modelde transmisyon kullanılmaması nedeniyle yüksek hız içeren sürüş çevrimlerinde elektrik motoru hızının limitli olmasından dolayı model doğru sonuç vermeyecektir. Ancak FTP-75 çevriminde elektrik motoru çevrimin yüksek hızlarına ulaşabilmektedir. Bir çevrim boyunca elde edilen elektrik motoru hızı Şekil 6.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 6.2. FTP-75 çevriminde elektrik motoru hızı

Güç aktarma sisteminde diferansiyel haricinde redüksiyon oranı barındıran eleman olmaması nedeniyle elektrik motoru hızını içeren grafiğin ana hatları sürüş çevrimi ile benzerlik göstermektedir.

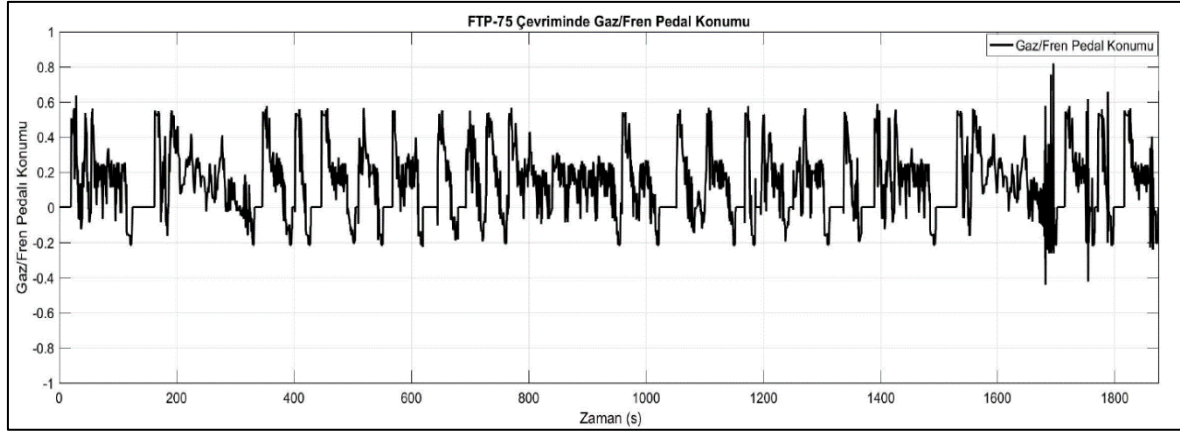
FTP-75 çevrimi referans alınarak yapılan bir simülasyon sonucunda batarya şarj durumunda meydana gelen değişim Şekil 6.3.'te gösterilmektedir.



Şekil 6.3. FTP-75 çevriminde batarya şarj durumu değişikliği

Simülasyon sonucuna göre bir çevrim %11,42 batarya şarj durumunda değişikliğe yol açan 34,2 kWh enerji tüketimi gerçekleştirmektedir. Çevrimin sık hızlanma ve yavaşlama içermesi, yüksek hız bölgelerinin askeri sürüş çevriminden fazla olması ve 17,7 km uzunluğu nedeniyle çevrim başına düşen enerji tüketimi yüksek görünmektedir.

Gaz ve fren pedalı konumlarını kontrol eden PID modelin, bir çevrim boyunca modele sağladığı çıkışlar Şekil 6.4.'te gösterilmektedir.



Şekil 6.4. FTP-75 çevriminde gaz/fren pedalı konumları

Çevrim sonuçlarına göre modelin çevrim boyunca tam gaz veya tam fren konumlarında çalışmadığı gözlemlenmektedir. Bu sayede elektrik motorlarını devreye alan sistemin elektrik motorlarını yüksek devirlerde çalıştırmayarak verimliliklerinin yükseldiği ortaya koyulmaktadır.

FTP-75 çevrimi referans alınarak yapılan simülasyona göre elde edilen sonuçlar Çizelge 6.1.'de paylaşılmıştır.

Çizelge 6.1. FTP-75 sürüş çevrimi sonuçları

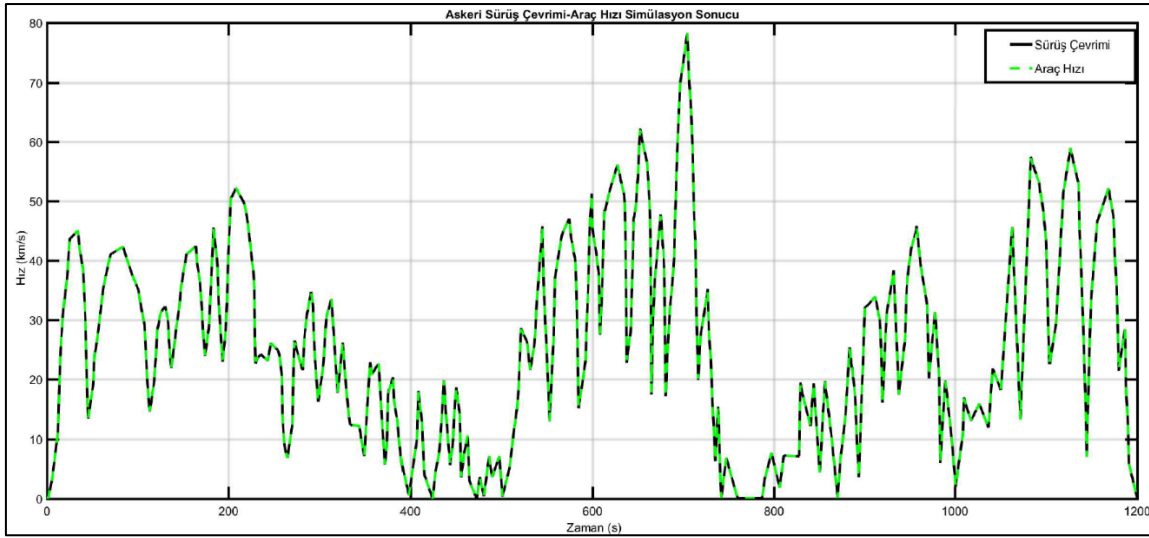
Menzil (km)	584
Enerji Tüketimi (kWh)	35,24
Batarya Şarj Durumu (%)	88,26
Rejeneratif Frenleme Kazancı (kWh)	5,02
Alınan Yol (km)	17,7
Kalan Menzil (km)	548,76
100 km'de Tüketilen Yakıt (l) (Batarya şarj durumu %80'in üstünde olduğu durumda)	4
100 km'de Tüketilen Yakıt (l) (Batarya şarj durumu %35'in altında olduğu durumda)	28

İçten yanmalı motorun hem bataryayı şarj ettiği hem de elektrik motorlarına jeneratör aracılığı ile enerji sağladığı için jeneratörün açık olduğu durumda 100 km'de yakıt tüketimi fazla görünmektedir. Ancak hem bataryayı şarj etmek hem de elektrik motorlarına enerji

sağlamak amacıyla içten yanmalı motor 3000 d/d, %80 gaz kelebeği açıklığında çalıştırılmaktadır. Bu nedenle 100 km'de 28 litre yakıt tüketimi olağandır.

6.2. Askeri Sürüş Çevrimine Göre Sonuçlar

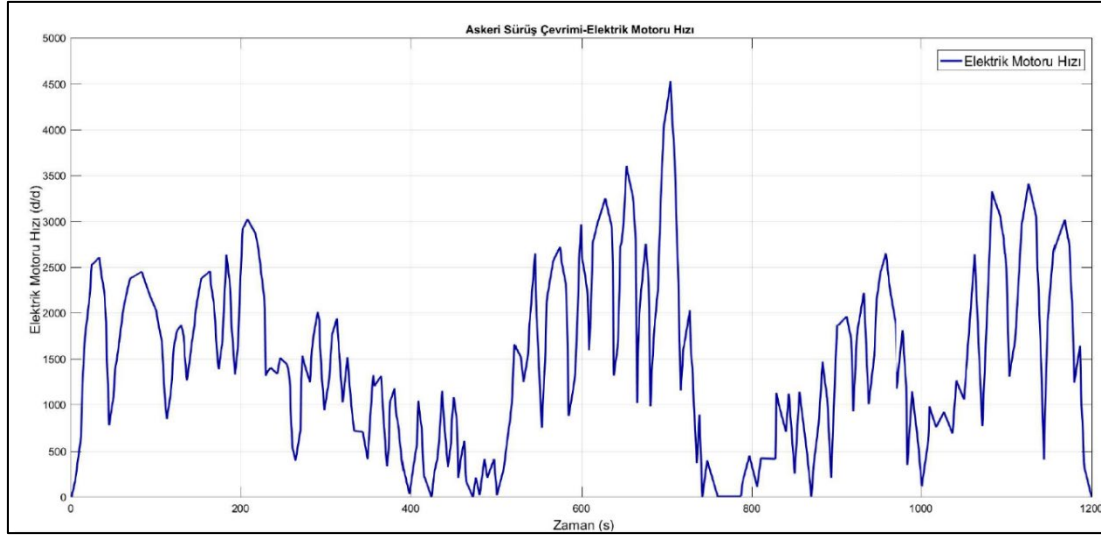
Modelde kullanılan standart dışı çevrim olan askeri sürüş çevrimi 8550 metre uzunluğa sahiptir ve 1200 saniye sürmektedir. Sık hızlanma ve yavaşlamaların olduğu çevrimde araç maksimum 78 km/h hıza ulaşmaktadır. Seri üretimde bulunan konvansiyonel zırhlı personel taşıyıcıların maksimum hızı 100-110 km/h arasında olduğu için askeri sürüş çevriminden alınan sonuçların gerçek kullanım sonuçlarına yakın olacağı düşünülmektedir. Oluşturulan modelin askeri sürüş çevrimi referans alınarak çalıştırılması sonucu elde edilen hız-zaman grafiği Şekil 6.5.'te gösterilmektedir.



Şekil 6.5. Askeri sürüş çevrimi simülasyon sonuçları

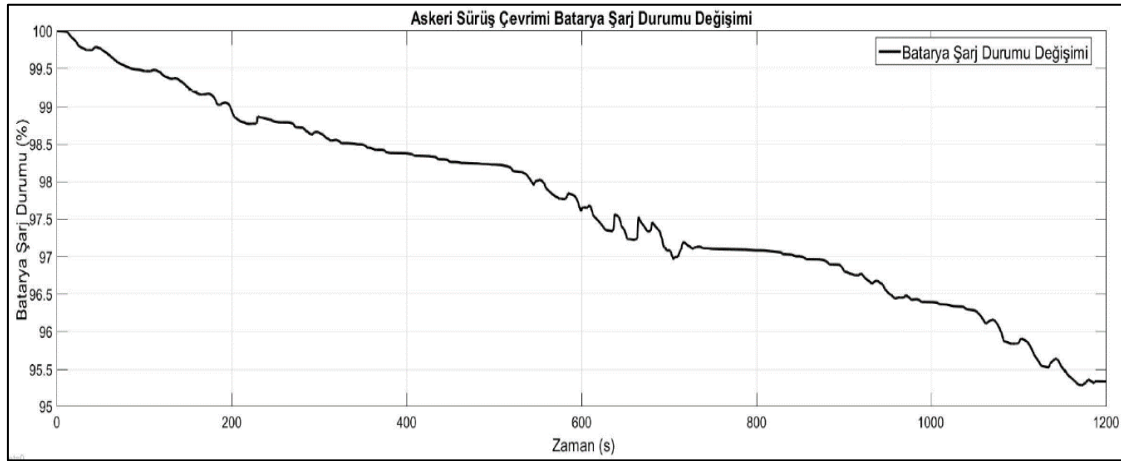
Oluşturulan model sürüş çevrimini yüksek doğrulukla takip etmektedir. Bu sonuç modelden elde edilen verilerin sürüş çevrimine göre doğruluğunu ortaya koymaktadır.

Bir çevrim süresince elektrik motoru hızları Şekil 6.6.'da gösterilmektedir. Güç aktarma sisteminde diferansiyel haricinde redüksiyon oranı kullanılmaması elektrik motoru hızı ana hatlarının sürüş çevrimi ana hatlarıyla benzer olmasına yol açmıştır.



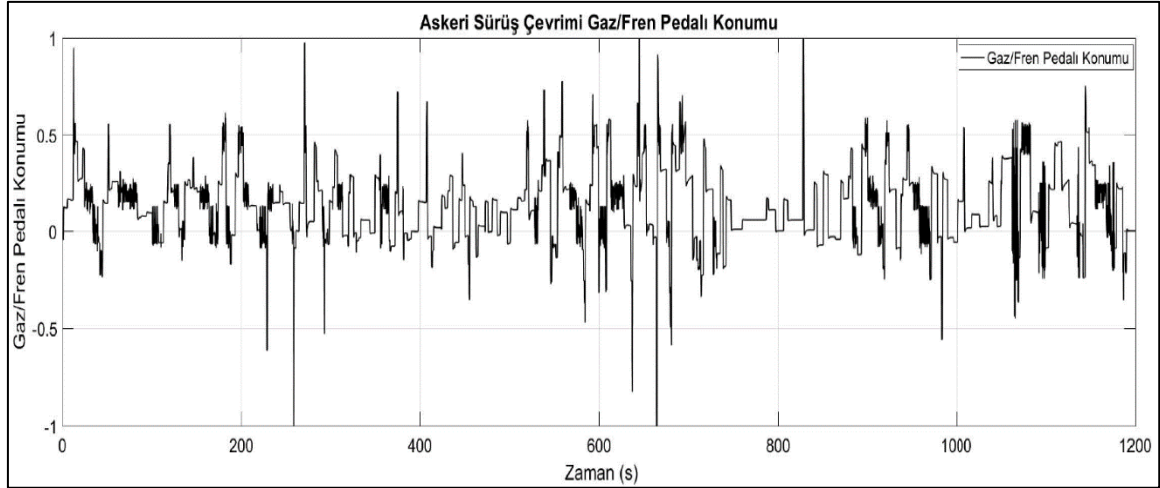
Şekil 6.6. Elektrik motoru hızı (d/d)

Batarya doluluk oranı %100 olarak yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda aracın bir çevrim sonucunda batarya doluluk oranının %95,3 olduğu görülmektedir. Ortalama olarak 25,6 km/h hıza sahip olan sürüş çevriminde araç 14,2 kWh enerji tüketimi gerçekleştirmiştir. Bir çevrim sonucunda batarya doluluk oranı Şekil 6.7.'de gösterilmektedir.



Şekil 6.7. Askeri sürüş çevriminde batarya şarj durumu değişikliği

Modelin hızlanma ve yavaşlama durumları için karar mekanizması olarak kullanılan PID kontrolcünün bir çevrim süresince sağladığı çıkışlar Şekil 6.8.'de gösterilmektedir.



Şekil 6.8. Gaz/fren pedalı konumları

PID kontrolcü grafiğinden anlaşılabileceği üzere ani hızlanma ve yavaşlama gerektiren tam gaz ve tam fren konumları mevcuttur. Genel olarak ortalamanın altında bulunan gaz ve fren pedalı konumu, elektrik motorlarının ve frenleme elemanlarının araç için uygun olduğunu ortaya koymaktadır.

Askeri sürüş çevrimi referans alınarak yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 6.2.'de paylaşılmıştır.

Çizelge 6.2. Askeri sürüş çevrimi sonuçları

Menzil (km)	641
Enerji Tüketimi (kWh)	14,2
Batarya Şarj Durumu (%)	95.3
Rejeneratif Frenleme Kazancı (kWh)	2,48
Alınan Yol (km)	8,55
Kalan Menzil (km)	626,8
100 km'de Tüketilen Yakıt (l) (Batarya şarj durumu %80'in üstünde olduğu durumda)	1,2
100 km'de Tüketilen Yakıt (l) (Batarya şarj durumu %35'in altında olduğu durumda)	32

Batarya doluluk oranı %100 olarak başlanılan testlerde 100 km sonucunda batarya şarj durumu %35'in altına düşmediği için jeneratör devreye girmemiştir. Yalnızca yüksek güç gerektiren durumlarda bataryayı şarj etmeden elektrik motorlarına enerji sağlamıştır.

Batarya şarj durumu %35,6 olarak başlanılan testlerde batarya şarj durumu %35'in altına düştüğü durumda içten yanmalı motorun jeneratör modunda devreye girmesi ile batarya şarj durumu %42,2 seviyesine ulaşmaktadır. İçten yanmalı motorun bu şekilde çalıştırılması durumunda 100 km'de 32 litre yakıt tüketeceği ortaya koyulmaktadır ancak yaklaşık olarak 55 km'lik çevrim sonunda batarya şarj durumu %80'in üzerine çıkacağı için elde edilen değer gerçekçi bir değer olmamaktadır.

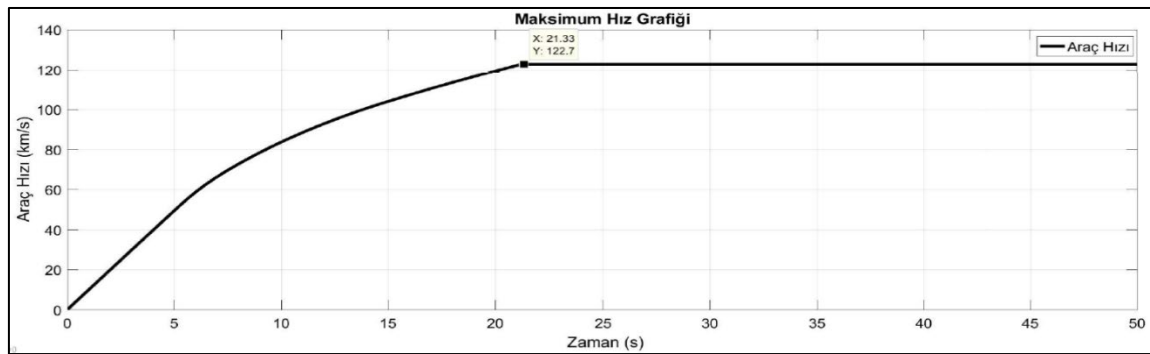
6.3. Performans Kriterlerine Göre Sonuçlar

Zırhlı personel taşıyıcılara ait NATO standartları ve seri üretimde bulunan konvansiyonel 6x6 ZPT modelleri incelendiğinde araçların belirli performans kriterlerine sahip oldukları görülmektedir. Bu kriterler;

- Yaklaşık olarak 110 km/h maksimum hıza ulaşabilmelidir.
- %60 eğimli bir yolda durağan halden başlayarak hareket edebilmelidir.

Söz konusu kriterlerin sağlanabilmesi için PID kontrolcü devre dışı bırakılarak tam gaz konumunu ifade eden sabit 1 değeri modele sağlanmaktadır.

Tam gaz konumunda durağan halden başlayan aracın hızlanma grafiği Şekil 6.9.'da sunulmuştur.

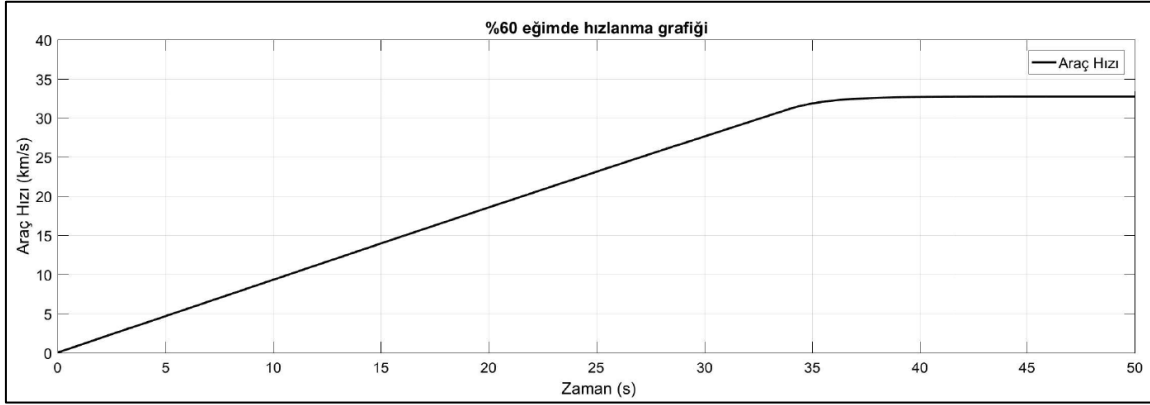


Şekil 6.9. Maksimum hız grafiği

Simülasyon sonucuna göre tam gaz konumunda durağan halden harekete geçen araç 21,3 saniyede 122,7 km/h hıza ulaşmaktadır. Elektrik motorlarının başlangıç devirlerinden itibaren sağladığı yüksek tork aracın maksimum hıza ulaşma süresini kısaltmaktadır. Seri üretimde bulunan araç modelleri ile kıyaslandığında ortalama olarak 110 km/h maksimum

hıza ulaşan modellere göre oluşturulan model daha yüksek hıza daha kısa sürede ulaşabilmektedir.

Seri üretimde bulunan tüm 6x6 ZPT'lerin %60 eğimde tırmanma kabiliyetine sahip olduğu görülmektedir. Modelin %60 eğimde hızlanma grafiğini Şekil 6.10.'da sunulmuştur.



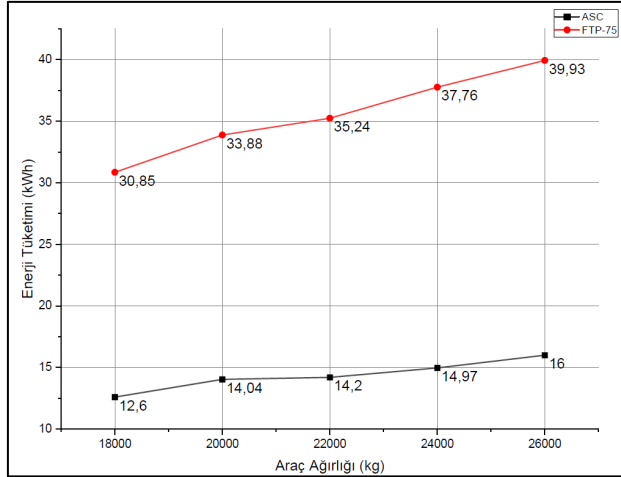
Şekil 6.10. %60 eğimde hızlanma grafiği

Elektrik motorlarının sağladığı yüksek tork sayesinde araç %60 eğimli yolda harekete geçebilmekte ve 33 km/h hıza ulaşabilmektedir.

6.4. Araç Parametrelerindeki Değişime Göre Sonuçlar

Modelleme aşamasında araç ağırlığı ve redüksiyon oranı için araştırmalara göre ortalama değerler kabul edilmiştir. Ayrıca modelde simülasyon esnasında çalışacak elektrik motoru sayısı algoritma tarafından belirlenmektedir. Aracın tek ve çift motor ile çevrimdeki davranışları ve kabul edilen parametrelerin değişimine göre aracın çevrimlerdeki enerji tüketimi ve hızlanma karakteristikleri incelenecektir.

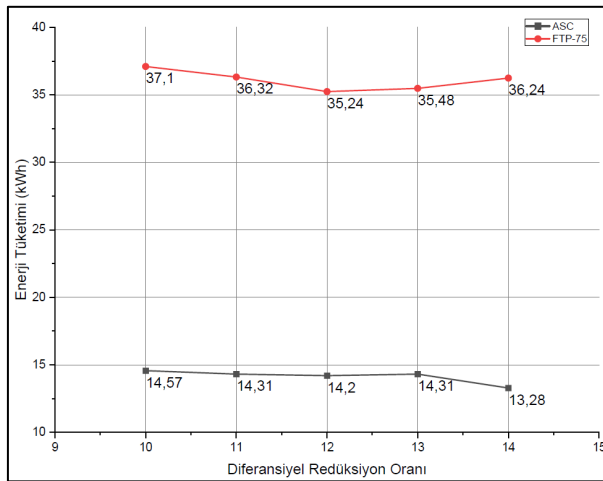
Zırhlı personel taşıyıcıların sahip oldukları zırh, silah sistemi, güç aktarma organları ve benzeri pek çok sistemden dolayı yüklü ağırlıkları 26 tona kadar ulaşabilmektedir. Modelde güç aktarma organları, içten yanmalı motor ve benzeri donanımların bulunmaması nedeniyle yüklü ağırlık 22 ton olarak kabul edilmiştir. Araç ağırlığının değişimine göre de enerji tüketiminde değişim meydana gelmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre araç ağırlığının sürüş çevrimlerine göre enerji tüketimi Şekil 6.11.'de sunulmuştur.



Şekil 6.11. Araç ağırlığının enerji tüketimine etkisi

Yapılan simülasyonlarda araç ağırlığının artmasına rağmen model sürüş çevrimlerini yüksek doğrulukla takip edebilmektedir. Bu sayede simülasyon sonuçlarının kullanılabilir olduğu ortaya koyulmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre araç 2 ton azaltılması her iki çevrimde de %10'a yakın enerji tüketiminde iyileşme sağlamaktadır.

Oluşturulan modelde elektrik motorunun yüksek verimli çalışması ve düşük devirlerden itibaren sağlamış olduğu yüksek tork sayesinde transmisyon kullanım ihtiyacı ortadan kaldırılmıştır. Modelde yalnızca aynı aksta bulunan tekerleklere hareket iletimi için diferansiyel kullanılmaktadır. Diferansiyel redüksiyon oranındaki değişiminin sürüş çevrimlerine göre enerji tüketimine etkisi Şekil 6.12.'de gösterilmektedir.



Şekil 6.12. Diferansiyel redüksiyon oranının enerji tüketimine etkisi

Askeri sürüş çevriminden elde edilen sonuçlara göre diferansiyel redüksiyon oranı artırıldıkça enerji tüketiminde düşme meydana gelmektedir ancak FTP-75 çevrimine göre elde edilen sonuçlarda 12 redüksiyon oranına sahip aracın en az yakıt tüketimi sağladığı görülmektedir.

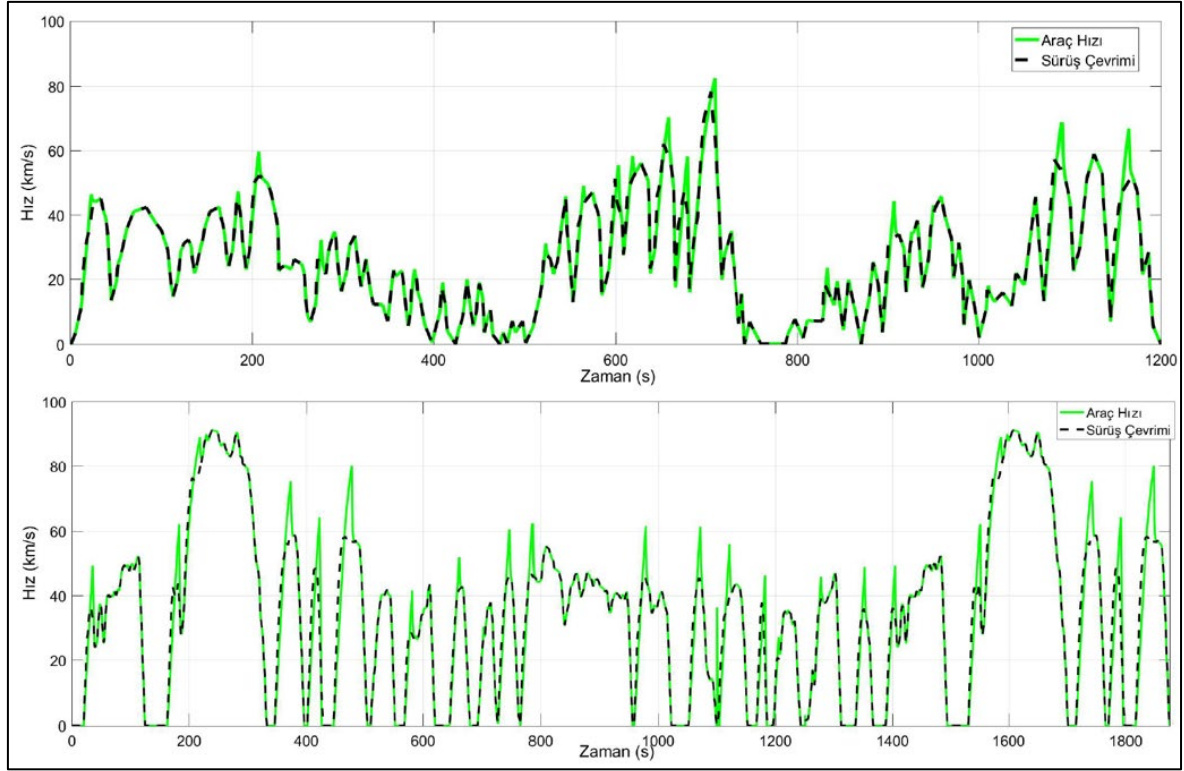
Redüksiyon oranı modelin maksimum hızını ve maksimum hıza ulaşma süresini doğrudan etkilemektedir. Redüksiyon oranının maksimum hıza ve maksimum hıza ulaşma süresine etkisi Çizelge 6.3.'te görülmektedir.

Çizelge 6.3. Redüksiyon oranının maksimum hıza etkisi

Redüksiyon Oranı	Maksimum Hız (km/h)	Maksimum Hıza Ulaşma Süresi (s)
10	147,2	30,6
11	133,8	23,8
12	122,7	19,3
13	113,3	16,1
14	105,1	13,6

Redüksiyon oranının düşmesi aracın maksimum hızını artırmaktadır ancak redüksiyon oranı ile sağlanan tork artışı düştüğü için aracın maksimum hıza ulaşma süresi uzamaktadır. Redüksiyon oranının 13 ve 14 olduğu durumlarda ise modellenen araç seri üretimde bulunan modellere kıyasla daha düşük maksimum hıza sahip olmaktadır.

Modelde her aks için 1 tane olmak üzere toplamda 3 adet elektrik motoru bulunmaktadır ve simülasyon süresince aktif olacak elektrik motor sayısı algoritma tarafından belirlenmektedir. Modelde tek elektrik motoru bulunduğu durumda çevrimlerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.13.'te gösterilmektedir.



Şekil 6.13. Tek elektrik motoru ile sürüş çevrimi ve araç hızı

Tek elektrik motorunun aktif olduğu simülasyon sonuçlarına göre hızlanma gerektiren durumlarda elektrik motorunun sağladığı tork yeterli olmadığı için araç sürüş çevriminde ihtiyaç duyulan ivme değerini yakalayamamaktadır. Daha sonrasında ise PID kontrolcünden alınan tam gaz sinyali araç hızının sürüş çevrimini aşmasına neden olmaktadır.

Çift elektrik motorunun kullanıldığı simülasyonlarda araç sürüş çevriminde ihtiyaç duyulan ivme değerini sağlayabildiği için hızlanma açısından herhangi bir uygunsuzluk bulunmamaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen verilerin değerlendirilmesi ve çalışmanın geliştirilmesi ile elde edilebilecek sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Modellenen 6x6 zırhlı personel taşıyıcının FTP-75 sürüş çevrimine göre 584 km, askeri sürüş çevrimine göre 641 km menzile sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar, halihazırda seri üretimdeki 6x6 ZPT'ler ile kıyaslandığında menzilin düşük kaldığı ortaya çıkmaktadır. Modelin batarya kapasitesinin artırılması araç menzilini artıracaktır ancak günümüz teknolojisine ve araç boyutlarına uygun olarak kapasitenin artırılması uygun görülmemektedir.
- Tamamen elektrikli bir ZPT'nin menzili, aracın ağırlığı ve görev şartları göz önüne alındığında 200 km'nin de altında kalacaktır. Ayrıca uzun şarj süresi de aracın şarj süresi boyunca kullanım dışı kalmasına neden olacaktır. Konvansiyonel modellere göre daha kısa bir menzile sahip olsa da seri hibrit güç aktarma yapısına sahip ZPT'nin mevcut durumda kullanılabileceği ortaya koyulmuştur.
- Aracın referans olarak kullandığı iki çevrimi de yüksek doğrulukla takip ettiği ortaya koyulmuştur. Bu sayede aracın görev şartlarına uygun olarak kullanılabileceği, ani hızlanma ve yavaşlama durumlarına cevap verebildiği değerlendirilmektedir. Elde edilen sonuçlar modellenen aracın üretilmiş modeller ile rekabet edebilecek performans ve kabiliyette olduğunu göstermektedir.
- Konvansiyonel 6x6'ların yaklaşık olarak 110 km/h hıza ulaşabildikleri bilinmektedir. Modellenen aracın yaklaşık olarak 127 km/h hıza ulaşabildiği görülmüştür. Konvansiyonel modellere göre daha yüksek hıza daha kısa sürede ulaşabildiği ortaya koyulmuştur.
- Konvansiyonel modeller için performans kriterlerinden biri olan %60 eğimde kalkış yapabilme yeteneği için yapılan simülasyonda aracın %60 eğimde kalkış yapabildiği ve 33 km/h hıza ulaştığı görülmüştür.
- Aracın sahip olduğu elektrik motorlarından birinin arızalanması ya da kullanım dışı kalması durumunda geriye kalan 2 elektrik motoru sürüş çevrimlerini yüksek doğrulukla takip edebilmektedir. Ancak tek elektrik motorunun kullanıldığı durumlarda araç gerekli performans kriterlerini karşılamayacaktır.

- Güç aktarma sisteminde transmisyon ve merkez diferansiyel gibi elemanlarının bulunmaması aracın hem ağırlık hem de boyutsal anlamda daha kompakt bir yapıya sahip olmasına imkân tanımaktadır. Kompakt yapının askeri amaçlı kullanılan araçlara avantaj sağlayacağı düşünülmektedir.
- Aracın hızlanma ve enerji tüketim kabiliyetine uygun olarak redüksiyon oranı belirlenmiştir. Yapılacak bir optimizasyon çalışması ile en uygun redüksiyon oranı belirlenmelidir.
- Modelleme aşamalarında, batarya için birtakım kabuller yapılmıştır. Kapsamlı bir batarya modelinin oluşturulması çalışmaya değer katacaktır.
- Bataryalarda, şarj durumunun düşmesiyle birlikte hücre gerilimleri de düşmektedir. Bu durumdan aracın performansı doğrudan etkilenmektedir. Batarya teknolojisinin geliştirilmesi, güç yoğunluğunun artırılması, ağırlığının azaltılması için çalışmalar yapılmaktadır. Bu gelişmeler sağlanırsa hibrit ve elektrikli araçların yaygınlaşmasının önü açılacaktır.
- Petrol kaynaklarında büyük oranda dışa bağımlı olan ülkemizde, hibrit ve elektrikli araçların yaygınlaşması bu dışa bağımlılığı büyük oranda azaltacaktır. Ayrıca elektrik üretiminin yenilenebilir kaynaklardan sağlanması da çevresel kaygıları önleyecektir.

KAYNAKLAR

1. Chan, C. C., Wong Y. S., (2004). Electric Vehicles Charge Forward, *IEEE Power&Energy Magazine*, 2, 24-33.
2. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S. and Ebrahimi, K. (2005). *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles*. (3 Ed.). Florida: CRC Press, 14.
3. İnternet: Rosenthal, E., (2010). “US Military Orders Less Dependence on Fossil Fuels”. *New York Times*, Web: https://urbanpolicy.net/wpcontent/uploads/2012/11/101004_Rosenthal_NYT_U.S.Military-Orders-Less-Dependence-on-Fossil-Fuels.pdf, Son Erişim Tarihi: 13.12.2021.
4. Fletcher, D. (2012). *British Mark-I Tank 1916*. New York: Osprey Publishing, 3-5.
5. İnternet: Mark-I Tarihi ve Teknik Bilgileri. Web: <https://tankmuseum.org/tank-nuts/tank-collection/mark-i> Son Erişim Tarihi: 13.12.2021.
6. Engin, T., (2007). *Türk Ordusunda Zırhlı Birlikler*. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kırıkkale.
7. İnternet: Zırhlı Personel Taşıyıcı. Web: tr.wikipedia.org/wiki/Zırhlı_personel_tasıyıcı Son Erişim Tarihi: 13.12.2021.
8. İnternet: BMC Kirpi 6x6 Teknik Özellikler. Web: <https://www.bmc.com.tr/savunma-sanayi/kirpi/teknik-ozellikler> Son Erişim Tarihi: 13.12.2021.
9. İnternet: FNSS Pars III 6x6 Teknik Özellikler. Web: <https://www.fnss.com.tr/tr/urunler/pars-iii-6x6-taktik-tekerlekli-zirhli-arac/pars-iii-6x6-teknik-ozellikler> Son Erişim Tarihi: 13.12.2021.
10. İnternet: Otokar Arma 6x6 Broşürü. Web: [https://defense.otokar.com.tr/OtokarSavunma/media/Otokar-Savunma/arac-brosur/ARMA-6X6-TR-BR-2021-\(AZ65TH-21\)-onizleme.pdf](https://defense.otokar.com.tr/OtokarSavunma/media/Otokar-Savunma/arac-brosur/ARMA-6X6-TR-BR-2021-(AZ65TH-21)-onizleme.pdf) Son Erişim Tarihi: 13.12.2021.
11. İnternet: Mbombe 6 Teknik Özellikleri. Web: <http://www.paramountgroup.com/capabilities/land/mbombe-6/>, Son Erişim Tarihi: 13.12.2021.
12. İnternet: Patria AMV 6x6 Teknik Özellikleri. Web: <https://www.patriagroup.com/download/patria6x62021engpdf> Son Erişim Tarihi: 13.12.2021
13. NATO (2004), *All Electric Combat Vehicles (AECV) for Future Application*, RTO Technial Report, Web: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA426538.pdf> Son Erişim Tarihi: 13.12.2021.

14. Kerem A., (2014). Elektrikli Araç Teknolojisinin Gelişimi ve Gelecek Beklentileri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Sayı: 5(1), 1-13.
15. Zhang, F., Wang, L., Coskun, S., Pang, H., Cui, Y., and Xi, J. (2020)., Energy management strategies for hybrid electric vehicles: Review, classification, comparison, and Outlook. *Energies*, 13(13), 3352.
16. Bulgu, A.E. (2010). *Tekerlek Motorlu Seri Hibrit Elektrikli Araçlar İçin Kontrol Algoritmalarının Geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
17. Arabacı, E. (2018). Seri-Paralel Hibrit Elektrikli Taşıtlardaki Güç Dağıtıcı (Power Split) Mekanizmasının Motor Hızı Değişimine Bağlı İncelenmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 394-404.
18. Opila, D. F., Wang, X., McGee, R., Cook, J. A., Grizzle, J. W. (2009). Performance Comparison Of Hybrid Vehicle Energy Management Controllers on Real-World Drive Cycle Data. *IEEE American Control Conference*, St. Louis, 4618-4625.
19. Keskin, A. (2009). Hibrid Taşıt Teknolojileri ve Uygulamaları. *Mühendis ve Makina*, 50(597), 12-20.
20. Khalil, G. (2009). Challenges of Hybrid Electric Vehicles for Military Applications. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Michigan, 1-3.
21. Mikaelsson, P. (2010). *Fuel Consumption Optimization Study For The SEP 6x6 Diesel-Electric Power Train*. Yüksek Lisans Tezi, Lulea Teknoloji Üniversitesi, Lulea.
22. Rizzo, D. M., Parker, G. G. (2013). *State Of Charge Optimization For Military Hybrid Vehicle Microgrids*. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, Washington, 1-6.
23. Karin, J. (2005). *Control Of Hybrid Electric Vehicles With Diesel Engines*. Doktora Tezi, Lund Üniversitesi, Lund.
24. Butler, K. L., Ehsani, M. and Kamath, P. (1999). A Matlab-Based Modeling And Simulation Package For Electric And Hybrid Electric Vehicle Design. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 48(6), 1770-1778.
25. Antoniou, A., Komyathy, J., Bench, J., and Emadi, A. (2005). Modeling And Simulation of Various Hybrid Electric Configurations of The High-Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle (HMMWV). *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Chicago, 507-514.
26. Nennelli, A. D. (2001). *Simulation Of Heavy-Duty Hybrid Electric Vehicles*. Yüksek Lisans Tezi, West Virginia Üniversitesi, Batı Virginia.

27. Dereli, E. (2021). *Seri Hibrit Elektrikli Bir Binek Aracın Enerji Yönetimi Kontrol Stratejileri Uygulanarak Yakıt Sarfiyatı Optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 48-50.
28. Kocakulak T. (2019). *Paralel Hibrit Bir Aracın Bulanık Mantık Yöntemi ile Kontrolü ve Diğer Güç Sistemleri ile Karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 119.
29. Rizzo, D. M. (2014). *Military Vehicle Optimization and Control*. Doktora Tezi, Michigan Teknoloji Üniversitesi, Michigan.
30. Hodgson, J. W., Hamel, W. R., Rutherford, C. B., & Armfield, J. S. (1998). Design of a low production cost hybrid HMMWV. *17th Digital Avionics Systems Conference*, Washington, I46-1-I46-8.
31. Özkan A. (2019). *Seri Hibrit Taşıt Tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
32. Viswanath, H., Kumaraswamy, A., and Sivakumar, P. (2017). Optimisation of Diesel Engine for Hybrid Military Tracked Vehicles Using Matlab-Simulink. *Defence Science Journal*, Delhi, 67(4), 360.
33. Aslan, E., Bilgin, M. Z., ve Erfidan, T. (2017). Hibrit Elektrikli Araçlar için Güzergâh Bilgisi Kullanılarak Akıllı Enerji Yönetim Sistemi. *International Conference on Energy Systems Engineering*, Karabük, 1, 140-144.
34. Denton, T. (2020). *Electric and Hybrid Vehicles*. Londra: Routledge, 197-198.
35. Tanç G. (2014). *Elektrikli Bisikletler için Fırçasız Doğru Akım Motoru Tasarımı ve Üretimi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
36. Hashemnia, N., Asaei, B. (2008). Comparative Study of Using Different Electric Motors in the Electric Vehicles, *International Conference on Electrical Machines*, Vilamoura, 9(3), 866-872.
37. Durak, B., Yeksan, A. Y., ve Ergene L. T. (2014). Anahtarlama Relüktans Motorlarda Sürücü Devrelerinin Karşılaştırılması. *Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, 282-287.
38. İnternet: Anahtarlama relüktans motor. Web: <http://kaskod.ee/technology/switched-meluctance-motor-generator-technology/>, Son Erişim Tarihi: 13.12.2021.
39. Yılmaz, M., Özdemir S. (2020). Review of Motors used in Commercial Electric Vehicles, *International Mediterranean Science and Engineering Congress*, Antalya, 5, 585-591.

40. Zeraoulia, M., Benbouzid, M. E. H., & Diallo, D. (2006). Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: a Comparative Study. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Florida, 55(6), 1756-1764.
41. Lasankute, S. V., Wankhade, S. P., Darokar, S. G., Dabhade, R. R., ve Parihar, V. R. (2018). Power Generation from Exhaust Gases of Diesel Engines: An Overview and an Approach. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, Chennai, 5(9), 66-74.
42. Cairns, E. J., Albertus, P. (2010). Batteries For Electric And Hybrid-Electric Vehicles. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, San Mateo, 1, 299-320.
43. Çetin, M. S., Karakaya, B., ve Gençoğlu, M. (2021), Elektrikli Araçlar İçin Lityum İyon Bataryaların Modellenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Elâzığ, 33(2), 755-763.
44. Erdinç, O., Uzunoğlu, M. ve Vural, B. (2011). Hibrit Alternatif Enerji Sistemlerinde Kullanılan Enerji Depolama Üniteleri. *TMMOB Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, Bursa, 116-121.
45. Gökçe, C. (2005). *Modeling And Simulation Of A Series Parallel Hybrid Electrical Vehicle*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
46. Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M., ve Mithulananthan, N. (2015). A Review On The State-Of-The-Art Technologies Of Electric Vehicle, Its Impacts And Prospects. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, Selangor, 9, 365-385.
47. Kurşunoğlu S. (2010). *Atık Çinko-Karbon ve Alkali Pillerden Çinko ve Mangan Geri Kazanılması*. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
48. Larminie J., Lowry J. (2012). *Electric Vehicle Technology Explained*. Sussex: Wiley, 2, 41-42.
49. Solmaz H., (2010). *Değişik Araç Modellerinin Rüzgâr Direnç Katsayılarının Bir Rüzgâr Tünelinde Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
50. Boyalı A., Güvenç L. (2010). Hibrid Elektrikli Araçların Modellenmesi ve Kural Tabanlı Kontrolü. *İTÜ Dergisi*, İstanbul, 9(2), 83-94.
51. Kumaş, H., Gencer, C. ve Maraş, H. (2012). Ağır araçlar için yol eğimi ve viraj yarıçapı dikkate alınarak en hızlı güzergâhın belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Ankara, 27(2), 385-395.

52. Juhala, M. (2014). *Improving Vehicle Rolling Resistance and Aerodynamics in Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*, Sawston: Woodhead Publishing, 462-475.
53. Çetinkaya, S. (2005). *Taşıt Mekaniği*. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım, 185-186.
54. Gupta, P., Kumar, A., ve Deb, S. (2014). Regenerative Braking Systems (RBS) (Future of Braking Systems). *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, Delhi, 2(5), 75-78.
55. Çetin, S. (2012). *Seyir Çevrimlerinin Oluşturulmasında Yokuş Direnci Etkisinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
56. Kutlar O. A., Ergeneman M., Arslan H. Ve Mutlu M., (1998). *Taşıt Egzozundan Kaynaklanan Kirleticiler*. İstanbul: Birsen Yayınevi, 5.

EKLER

EK-1. Elektrik motoru kontrol modeli MATLAB Function kodu

```
function EM_aktif = EM_kontrol(PID, arac_hizi)

EM_aktif = 0;

if arac_hizi <= 20
    EM_aktif = 3;
elseif PID <= 0
    EM_aktif = 3;
else
    if arac_hizi >20 && arac_hizi <= 60
        if PID > 0 && PID <= 0.2
            EM_aktif = 1;
        elseif PID > 0.2 && PID <= 0.5
            EM_aktif = 2;
        elseif PID > 0.5
            EM_aktif = 3;
        end
    elseif arac_hizi > 60
        EM_aktif = 3;
    end
end
end
```

EK-2. Fren kontrol modeli MATLAB Function kodu

```
function fren_kuvveti = fren_modeli(rej_fren_orani, PID, EM_tork)

fren_kuvveti = 0;
rej_fren_kuvveti = 0;
mek_fren_kuvveti = 0;
max_mek_fren = -70000;

if PID >= 0;
    fren_kuvveti = 0;
else
    rej_fren_kuvveti = rej_fren_orani * EM_tork;
    mek_fren_kuvveti = max_mek_fren * PID;
end

fren_kuvveti = (rej_fren_kuvveti + mek_fren_kuvveti)/2;
end
```

EK-3. İçten yanmalı motor kontrol modeli MATLAB Function kodu

```

function [iym_rpm, throttle, jenerator_onoff, out_iym_state] =
control(soc, arac_hizi, in_iym_state)
    out_iym_state = 0;
    throttle = 0;
    iym_rpm = 0;
    jenerator_onoff = 0;
    if soc < 35
        in_iym_state = 1;
        if arac_hizi >= 60
            iym_rpm=3000;
            throttle=80;
            jenerator_onoff = 1;
        elseif arac_hizi < 60
            iym_rpm=2600;
            throttle=30;
            jenerator_onoff = 1;
        end
    elseif soc >= 35 && soc < 80
        if in_iym_state == 1
            if arac_hizi>=60
                iym_rpm=3000;
                throttle=80;
                jenerator_onoff = 1;
            elseif arac_hizi<60
                iym_rpm=2600;
                throttle=30;
                jenerator_onoff = 1;
            end
        else
            if arac_hizi>=60
                iym_rpm=2800;
                throttle=50;
                jenerator_onoff = 0;
            elseif arac_hizi<60
                iym_rpm=0;
                throttle=0;
                in_iym_state=0;
                jenerator_onoff = 0;
            end
        end
    elseif soc >= 80 && soc <= 100
        in_iym_state=0;
        if arac_hizi>=60
            iym_rpm=2800;
            throttle=50;
            jenerator_onoff = 0;
        elseif arac_hizi<60
            iym_rpm=0;
            throttle=0;
            jenerator_onoff = 0;
        end
    end
    out_iym_state = in_iym_state;
end

```

EK-4. Jeneratör şarj gücü hesaplama MATLAB Function kodu

```
function IYM_sarjgucu = IYM_batarya_sarj (jen_onoff, IYM_rpm, IYM_tork)

IYM_sarjgucu = 0;
IYM_rads = IYM_rpm * 2 * pi /60;

if jen_onoff == 1;
    if IYM_rpm == 3000
        IYM_sarjgucu = IYM_rads * IYM_tork;
    elseif IYM_rpm == 2800
        IYM_sarjgucu = 0;
    elseif IYM_rpm == 2600
        IYM_sarjgucu = IYM_rads * IYM_tork;
    else
        IYM_sarjgucu = 0;
    end
end
end
```

EK-5. Rejeneratif fren kazanç oranı hesaplama MATLAB Function kodu

```
function rej_fren_orani= rej_fren_mod( PID_kontrol, arac_hizi, soc)
    rej_fren_orani = 0;

    if PID_kontrol >= 0 || arac_hizi < 20;
        rej_fren_orani = 0;
    else
        if arac_hizi >= 20 && arac_hizi < 60
            if PID_kontrol > -0.3
                rej_fren_orani = 20;
            elseif PID_kontrol <= -0.3 && PID_kontrol > -0.6
                rej_fren_orani = 35;
            elseif PID_kontrol <= -0.6
                rej_fren_orani = 50;
            end
        elseif arac_hizi >= 60
            if PID_kontrol > -0.3
                rej_fren_orani = 25;
            elseif PID_kontrol <= -0.3 && PID_kontrol > -0.6
                rej_fren_orani = 40;
            elseif PID_kontrol <= -0.6
                rej_fren_orani = 55;
            end
        end
    end
    if soc <= 10 || soc >= 90
        rej_fren_orani = rej_fren_orani / 3;
    end
end
```

EK-6. Batarya ve enerji tüketim hesaplama MATLAB Function kodu

```
function [rej_fren_kazanci, batarya_desarj, aksesuar_guc, IYM_sarj] =
batarya_kontrol_modeli(rej_fren_orani, Net_tork, EM_verim, EM_rads,
jen_onoff, IYM_sarj_guc, EM_aktif, arac_hizi)

rej_fren_kazanci = 0;
batarya_desarj = 0;
aksesuar_guc = 0;
IYM_sarj = 0;
eff_inverter = 0.9;
lowacc = 2500;
eff_konverter = 0.9;

    if rej_fren_orani > 0
        rej_fren_kazanci = rej_fren_orani * Net_tork * EM_rads * EM_verim *
eff_inverter;
    else
        rej_fren_kazanci = 0;
        if jen_onoff == 1
            batarya_desarj = 0;
        elseif Net_tork > 0
            batarya_desarj = ((Net_tork * EM_rads * EM_verim * EM_aktif)) /
eff_inverter;
        else
            batarya_desarj = 0;
        end
    end

aksesuar_guc = lowacc * eff_konverter ;

    if jen_onoff == 1
        IYM_sarj = IYM_sarj_guc * eff_inverter ;
    else
        IYM_sarj = 0;
    end

    if arac_hizi <= 0
        rej_fren_kazanci = 0;
    else
        rej_fren_kazanci = rej_fren_kazanci;
    end
end
```



GAZİ GELECEKTİR..