

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEKERLEK MOTORLU SERİ HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN  
KONTROL ALGORİTMALARININ GELİŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Ali Ersin BULGU**

**Anabilim Dalı : Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği**

**Programı : Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği**

**EYLÜL 2010**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEKERLEK MOTORLU SERİ HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN  
KONTROL ALGORİTMALARININ GELİŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Ali Ersin BULGU  
(504071101)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Eylül 2010  
Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Eylül 2010**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN (İTÜ)  
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ata MUĞAN (İTÜ)  
Prof. Dr. İbrahim EKSİN (İTÜ)**

**EYLÜL 2010**



*Ayşegül'e,*



## ÖNSÖZ

Bu tezi yazmamda bana yardımcı olan danışmanım Prof. Dr. Metin Gökaşan'a, öğrenciliğim boyunca desteklerini ve sevgilerini esirgemeyen aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim. Ayrıca, öğrenimime verdiği maddi destekten dolayı TÜBİTAK'a da minnettarım.

Eylül 2010

Ali Ersin Bulgu

Kontrol Mühendisi





## İÇİNDEKİLER

**Sayfa**

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Hibrit Araçlara Genel Bakış.....	1
1.2 Hibrit Araçların Tarihi.....	1
1.3 Hibrit Araçların Tasarım Anlayışı.....	3
1.4 Hibrit Elektrikli Araç Mimarileri.....	3
1.4.1 Seri hibrit elektrikli araç.....	4
1.4.2 Paralel hibrit elektrikli araç.....	6
1.4.3 Seri-paralel hibrit elektrikli araç.....	8
<b>2. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN TEMEL BİLEŞENLERİ.....</b>	<b>9</b>
2.1 İTÜ MEAM Hibrit Elektrikli Araç Projesi.....	9
2.1.1 İçten yanmalı motor (ICE).....	10
2.1.2 Generatör.....	10
2.1.3 Elektrik motorları.....	11
2.1.4 Tekerlek motorlar.....	12
2.1.5 Batarya.....	13
2.1.6 Güç kontrol ünitesi.....	14
<b>3. SERİ HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN KONTROL STRATEJİLERİ.....</b>	<b>15</b>
3.1 Max. SOC Kontrol Stratejisi.....	15
3.2 Aç-Kapa Kontrol Stratejisi.....	17
<b>4. TEKERLEK MOTORLU SERİ HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN MODELLENMESİ.....</b>	<b>19</b>
4.1 İçten Yanmalı Motor Modeli.....	20
4.2 Generatör Modeli.....	23
4.3 Motor Modelleri.....	24
4.4 Batarya Modeli.....	26
4.5 Araç Modeli.....	29
4.6 Güç Kontrol Ünitesi Modeli.....	33
4.6.1 Deşarj durumu.....	34
4.6.2 Şarj durumu.....	35
4.7 Sürücü Modeli.....	36
<b>5. SİMÜLASYONLAR.....</b>	<b>39</b>
5.1 Konvansiyonel Durum.....	39

5.1.1 İçten yanmalı motor modeli.....	39
5.1.2 Vites modeli.....	40
5.1.3 Sürüş çevrimleri.....	41
5.2 Tek Çekiş Motorlu Seri Hibrit Elektrikli Araç Durumu .....	42
5.3 Tekerlek Motorlu Seri Hibrit Elektrikli Araç Durumu .....	42
5.4 Simülasyon Sonuçları.....	43
5.4.1 Konvansiyonel durum için simülasyon sonuçları:.....	44
5.4.2 Tek çekiş motorlu seri hibrit araç durumu için simülasyon sonuçları .....	44
5.4.3 Tekerlek motorlu seri hibrit araç durumu için simülasyon sonuçları .....	45
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>47</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>49</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>51</b>

## **KISALTMALAR**

<b>ABD</b>	: Amerika Birleşik Devletleri
<b>ABS</b>	: Anti-lock Braking System
<b>Ah</b>	: Ampere-hour
<b>CAN</b>	: Controller Area Network
<b>DSP</b>	: Digital Signal Processor
<b>HEV</b>	: Hybrid Electric Vehicle
<b>ICE</b>	: Internal Combustion Engine
<b>IPM</b>	: Internal Permanent Magnet
<b>J</b>	: Joule
<b>Kbps</b>	: Kilobits per second
<b>kW</b>	: kiloWatt
<b>MEAM</b>	: Mekatronik Eğitim ve Araştırma Merkezi
<b>Nm</b>	: Newton metre
<b>rpm</b>	: revolutions per minute
<b>SOC</b>	: State Of Charge
<b>SUV</b>	: Sport Utility Vehicle



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>Çizelge 5.1</b> : Temsa Prestij teknik özellikleri .....	43
<b>Çizelge 5.2</b> : Modellenen aracın bileşen değerleri .....	43



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Hibrit elektrikli araçların sınıflandırılması .....	4
Şekil 1.2 : Seri hibrit elektrikli araç mimarisi .....	5
Şekil 1.3 : Paralel hibrit elektrikli araç mimarisi .....	7
Şekil 1.4 : Seri-paralel hibrit elektrikli araç mimarisi .....	8
Şekil 2.1 : Seri hibrit araç projesi taslak bileşenleri .....	9
Şekil 2.2 : Generatör tork/güç-hız karakteristiği [7] .....	11
Şekil 2.3 : Seri hibrit araçta kullanılan motor-generatörler .....	12
Şekil 2.4 : Seri hibrit araçta kullanılan tekerlek motorlar .....	13
Şekil 3.1 : Max. SOC kontrol stratejisinin bir örneği [1]. .....	16
Şekil 3.2 : Aç-kapa kontrol stratejisinin gösterilimi [1]. .....	17
Şekil 4.1 : Tekerlek motorlu seri hibrit araç modelinin genel şeması .....	20
Şekil 4.2 : İçten yanmalı motorun yakıt tüketim grafiği .....	21
Şekil 4.3 : İçten yanmalı motorun verim haritası .....	22
Şekil 4.4 : Generatör verim haritası .....	23
Şekil 4.5 : Generatör Simulink modeli .....	23
Şekil 4.6 : Araçtaki çekiş motorlarının verim haritası .....	25
Şekil 4.7 : Motor Simulink modeli .....	26
Şekil 4.8 : Batarya gerilim-doluluk grafiği .....	27
Şekil 4.9 : Batarya iç direnç-doluluk grafiği .....	27
Şekil 4.10 : Batarya Simulink modeli .....	28
Şekil 4.11 : Araç Simulink modeli .....	30
Şekil 4.12 : Lastik Simulink modeli .....	32
Şekil 4.13 : Aç-kapa kontrol stratejisi .....	34
Şekil 4.14 : Deşarj durumu akış şeması .....	35
Şekil 4.15 : Şarj durumu akış şeması .....	36
Şekil 4.16 : Sürücü Simulink modeli .....	37
Şekil 5.1 : Konvansiyonel araç Simulink genel modeli .....	39
Şekil 5.2 : İçten yanmalı motor Simulink modeli .....	40
Şekil 5.3 : Vites Simulink modeli .....	41
Şekil 5.4 : Düşük güçlü araçlar için NEDC çevrimi .....	42
Şekil A.1 : İçten yanmalı motorun en uygun çalışma noktasının bulunması için yaratılan Simulink modeli .....	52
Şekil A.2 : İçten yanmalı motorun yüksek güçlü çalışma noktasının bulunması için oluşturulan Simulink modeli .....	53
Şekil B.1 : Konvansiyonel araç modelinde araç hızı ve referans hız .....	54
Şekil B.2 : Konvansiyonel araç modelinde araç hızı ve referans hız ( $0 < t < 200$ ) .....	54
Şekil B.3 : Konvansiyonel araç modelinde ICE gücü .....	55
Şekil B.4 : Konvansiyonel araç modelinde ICE torku .....	55
Şekil B.5 : Konvansiyonel araç modelinde ICE verimi .....	55
Şekil B.6 : Konvansiyonel araç modelinde ICE yakıt tüketimi .....	56
Şekil C.1 : Tek motorlu hibrit araç modelinde araç hızı ve referans hız .....	57
Şekil C.2 : Tek motorlu hibrit araç modelinde araç hızı ve motor gücü .....	57

<b>Şekil C.3 :</b> Tek motorlu hibrit araç modelinde motor güç değerleri.....	58
<b>Şekil C.4 :</b> Tek motorlu hibrit araç modelinde bileşenlerin güç değerleri .....	59
<b>Şekil C.5 :</b> Tek motorlu hibrit araç modelinde batarya değerleri .....	60
<b>Şekil C.6 :</b> Tek motorlu hibrit araç modelinde verim değerleri .....	61
<b>Şekil C.7 :</b> Tek motorlu hibrit araç modelinde yakıt tüketimi.....	61
<b>Şekil D.1 :</b> Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde araç hızı ve referans hız.....	62
<b>Şekil D.2 :</b> Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde araç hızı ve toplam motor gücü .....	62
<b>Şekil D.3 :</b> Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde ön ve arka motor güçleri .....	63
<b>Şekil D.4 :</b> Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde toplam motor güç değerleri .....	64
<b>Şekil D.5 :</b> Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde bileşenlerin güç değerleri .....	65
<b>Şekil D.6 :</b> Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde batarya değerleri .....	66
<b>Şekil D.7 :</b> Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde bileşen verimleri .....	67
<b>Şekil D.8 :</b> Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde yakıt tüketimi.....	67
<b>Şekil D.9 :</b> Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde araç hızı ve referans hız (hafif araç durumu) .....	68
<b>Şekil D.10 :</b> Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde araç hızı ve toplam motor gücü (hafif araç durumu) .....	68
<b>Şekil D.11 :</b> Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde toplam motor güç değerleri (hafif araç durumu).....	69
<b>Şekil D.12 :</b> Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde ön ve arka motor güçleri (hafif araç durumu).....	70
<b>Şekil D.13 :</b> Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde bileşenlerin güç değerleri (hafif araç durumu).....	71
<b>Şekil D.14 :</b> Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde batarya değerleri (hafif araç durumu) .....	72
<b>Şekil D.15 :</b> Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde bileşen verimleri (hafif araç durumu) .....	73
<b>Şekil D.16 :</b> Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde yakıt tüketimi (hafif araç durumu) .....	73



## **TEKERLEK MOTORLU SERİ HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN KONTROL ALGORİTMALARININ GELİŞTİRİLMESİ**

### **ÖZET**

Petrol fiyatları ve çevre kirliliği konusundaki endişeler, otomotiv endüstrisinin hibrit elektrikli araçların geliştirilmesini hızlandırmasına sebep olmuştur. Bir hibrit sistem, değişik tipteki enerji kaynakları ve dönüştürücülerinden oluşur. Hibrit elektrikli araçlar genellikle içten yanmalı motor ve elektrik motoru – generatörünün koordine edilmesinden elde edilir. Hibrit elektrikli araçların geliştirilmesindeki en önemli sorun, bu enerji kaynaklarının en verimli bir şekilde organize edildiği kontrolcülerin tasarlanması ve sisteme uygulanmasıdır.

Bu tezde, tekerlek motorların kullanıldığı bir seri hibrit elektrikli araç modeli bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiş ve bu model üzerine aç-kapa kontrol stratejisi uygulanmıştır. Aracın performansı tek çekiş motorlu seri hibrit elektrikli araç ve konvansiyonel araç ile karşılaştırılarak incelenmiştir.

İlk bölümde, hibrit elektrikli araçlar hakkında genel bilgiler verilmiş, hibrit araçların gelişiminden kısaca bahsedilmiştir. Literatürdeki değişik hibrit araç mimarileri ve bunların çalışma prensiplerine değinilmiştir.

İkinci bölümde, üzerinde çalışılacak sistemin genel yapısından bahsedilmiş, araçta kullanılacak bazı bileşenlerin teknik detayları verilmiştir.

Üçüncü bölümde seri hibrit elektrikli araçlar için kullanılabilecek kontrol stratejileri incelenmiştir.

Dördüncü bölümde tekerlek motorlu seri hibrit elektrikli aracın bilgisayar ortamındaki modellenmesinin nasıl gerçekleştirildiğinden bahsedilmiştir.

Beşinci bölümde konvansiyonel aracın ve tek motorlu seri hibrit elektrikli aracın modellenmesi anlatılmış ve benzetim modelindeki detaylar verilmiştir.

Altıncı ve son bölümde ise benzetim sonuçlarının karşılaştırmalı olarak yorumlanması gerçekleştirilmiş ve sistemin kontrolü ve ileriki çalışmalar için öneriler ortaya konmuştur.



# **DEVELOPMENT OF CONTROL ALGORITHMS FOR SERIES HYBRID ELECTRIC VEHICLES WITH WHEEL MOTORS**

## **SUMMARY**

Concerns regarding oil prices and environment pollution have forced the automotive industry to hasten the development of hybrid electric vehicles. A hybrid system is composed of different types of energy sources and converters. Hybrid electric vehicles are generally made up of an internal combustion engine and an electric motor – generator. Main problem with the development of hybrid electric vehicles is the design and application of control algorithms that would ensure efficient organization of these energy sources.

In this thesis, a mathematical model for a series hybrid electric vehicle using wheel motors was developed and thermostat control strategy was applied to it. Vehicle performance was observed with respect to those of conventional vehicle and single traction motor series hybrid electric vehicle.

In the first section, general information about the hybrid electric vehicles was given and development of hybrid electric vehicles was discussed. Different vehicle architectures and their working principles were mentioned.

In the second section, general structure of the subject system was defined and some components of the vehicle were technically detailed.

In the third section, control strategies for series hybrid vehicles were examined.

In the fourth section, modeling of the series hybrid electric vehicle with wheel motors in computer environment was given.

In the fifth section, modeling of the conventional vehicle and single traction motor series hybrid vehicle was explained and details of the simulation model were presented.

In the sixth and final section, comparative analysis of simulation results was performed and some suggestions for the system control were given.



# 1. GİRİŞ

## 1.1 Hibrit Araçlara Genel Bakış

Hibrit araçlar, kavram olarak birden fazla enerji kaynağını kullanan araçlara denir. Bu tezde bahsedilen hibrit araçlar ise, aracın hareketi için gereken kinetik enerjiyi; içten yanmalı motorun yanı sıra, elektrik motorlarından elde eden hibrit elektrikli araçlardır.

Yalnızca içten yanmalı motor (internal combustion engine - ICE) ile çalışan geleneksel araçlar, petrol kaynaklı yakıtların yüksek enerji yoğunluğundan faydalanarak, iyi performans ve uzun çalışma menzili sağlarlar [1]. Ancak bu araçlar, düşük yakıt ekonomisi ve çevre kirliliği gibi dezavantajlar barındırırlar. Bu düşük yakıt ekonomisinin temel sebepleri olarak; motor verimlilik haritalarındaki ideal çalışma noktalarının esas çalışma noktaları ile örtüşmemesi, özellikle şehir trafiğinde frenleme esnasında aracın kinetik enerjisinin harcanması ve günümüz otomobillerindeki hidrolik şanzımanların dur kalk şeklindeki sürüşlerdeki düşük verimi gösterilebilir [2].

Elektrikli araçlar ise, ICE ile tahrik edilen araçlara göre; yüksek enerji verimliliği ve sıfır çevre kirliliği gibi bazı avantajlara sahiptir [3]. Öte yandan, performans açısından, özellikle şarj başına çalışma menzili bakımından ICE'ler ile fazla rekabet edemezler. Bunun sebebi benzinin enerji kapasitesine göre bataryaların kapasitesinin oldukça az olmasıdır [4].

Birincil ve ikincil şeklinde iki enerji kaynağı kullanan hibrit araçlar ise, hem ICE ile çalışan hem de elektrik motorlarıyla çalışan araçların avantajlarına sahiptir ve iki tipin de dezavantajlarını yok edebilir.

## 1.2 Hibrit Araçların Tarihi

Hibrit araçlar bir asırdan fazla süredir tarihte yer almaktadırlar. Hibrit araçların gelişim aşamaları bu bölümde kısaca özetlenmiştir.

1900 yılında Paris fuarında Lohner-Porsche Elektromobil görücüye çıkar. İlk aşamada tamamı elektrikli bir araç olmasına karşın, tasarımcı Ferdinand Porsche ertesini yıl bataryaları şarj etmek amacıyla araca bir içten yanmalı motor ekleyerek ilk hibrit aracı meydana getirmiştir.

1917 yılında Woods firması tarafından 4 silindirli içten yanmalı motora sahip olan bir hibrit araç piyasaya sürülmüştür. Aracın en yüksek hızı saatte 56 kilometreydi. Ancak ticari başarı elde edilememiştir.

1960-70 yılları arasında elektrik mühendisi Victor Wouk, Buick Skylark konvansiyonel aracını hibrit hale getirmiştir. Amerikan hükümetinin aracın daha fazla geliştirilmesini finanse etmemesi sebebiyle Wouk maddi sorunlar yaşamış ve projeyi bırakmıştır.

1968 yılında General Motors firması GM 512 adında, düşük hızlarda elektrik ile, yüksek hızlarda benzin ile çalışan bir deneysel araç geliştirmiştir.

1989 yılında Audi, Audi Duo konsept aracını tanıtmıştır. Araçta 12 beygirgücündeki elektrik motoru ile 139 beygirgücündeki içten yanmalı motor kombine edilmiştir. Takip eden on yıl boyunca Duo'nun daha ileri sürümleri Audi tarafından geliştirilmiştir.

1997 yılında, başkan yardımcısı Akihiro Wadi'nin yakıt verimliliğini artıran araçlar tasarlanması yönündeki talebi üzerine Toyota, Prius modelini tanıtmış ve Japonya'da satışına başlamıştır.

1999 yılında Honda, Insight modelini piyasaya sürdü.

2000 yılında Prius ABD'de piyasaya sürüldü.

2002 yılında hibrit araçlar piyasada görece yaygın hale gelmeye başladı. Honda, Accord Hybrid'i tanıttı. İlerleyen yıllarda birçok hibrit araç bunları takip etti.

2004 yılında Ford ilk hibrit SUV olan 2005 model Ford Escape'i tanıtmıştır.

2004 yılından günümüze kadar hibrit araç teknolojisindeki gelişim oldukça ileri düzeyde olup, satışlarda lider olan Prius modeli, Haziran 2010 itibarı ile dünya çapında toplam 1,8 milyon adet satmıştır [5][6].

### 1.3 Hibrit Araçların Tasarım Anlayışı

Temel olarak herhangi bir aracın:

- Araçtan istenen performansı verebilecek gücü sağlaması,
- Belirtilmiş menzil boyunca araca sağlanacak enerjiyi bulundurması,
- Yüksek verimlilik göstermesi ve
- Az miktarda çevre kirliliği yaratan salınım yapması

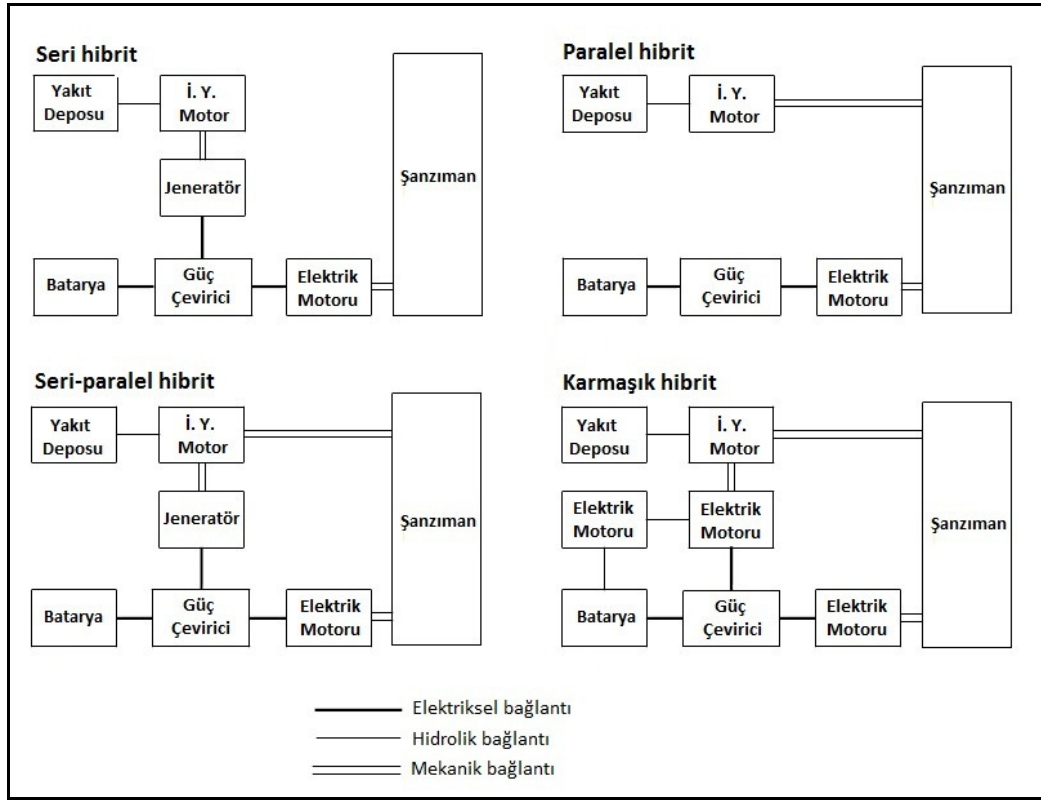
beklenir [7]. Genel olarak; bir aracın birden fazla enerji kaynağı - enerji dönüştürücüsü çifti (güç kaynağı) olabilir. Örnek olarak;

- Benzinli ya da dizel ısı motor sistemi,
- Hidrojen - yakıt hücresi - elektrik motoru sistemi,
- Kimyasal batarya – elektrik motoru sistemi vs.

gösterilebilir. Birden fazla güç kaynağı olan araçlara hibrit araçlar denir. Elektriksel güç kaynağına (aktarma organlarına) sahip bir araca ise hibrit elektrikli araç (hybrid electric vehicle - HEV) denir [8].

### 1.4 Hibrit Elektrikli Araç Mimarileri

Hibrit araçların mimari yapıları, aktarma organlarının birbirine bağlanma şekli ve bunun belirlediği enerjinin nakil yönlerine göre belirlenir. En genel haliyle; seri ve paralel olmak üzere iki çeşit hibrit araç mimarisi vardır. Ancak, geliştirilen yeni araçlar sonucunda literatüre seri-paralel ve karmaşık hibrit mimariler de girmiştir [2]. Bu dört mimari, en genel yapılarıyla Şekil 1.1’de görülebilir. Burada hibrit araçların birincil ve ikincil olmak üzere iki adet güç kaynağı gösterilmiştir. Birincil ve sabit olan güç kaynağı yakıt deposu-içten yanmalı motor, ikincil ve dinamik olanı ise batarya-elektrik motoru çiftidir. Elektriksel güç kaynağının dinamik olma sebebi, frenleme esnasında ortaya çıkan enerjinin tekrar kullanılmak üzere saklanılabilmesi, böylece bu koldaki enerji akışının iki yönlü olmasıdır [4]. Şekil 1.1’de gösterilen ICE başka tip enerji kaynaklarıyla, örneğin yakıt hücreleriyle değiştirilebilir, aynı şekilde bataryalar da ultrakapasitörler ile değiştirebilir.

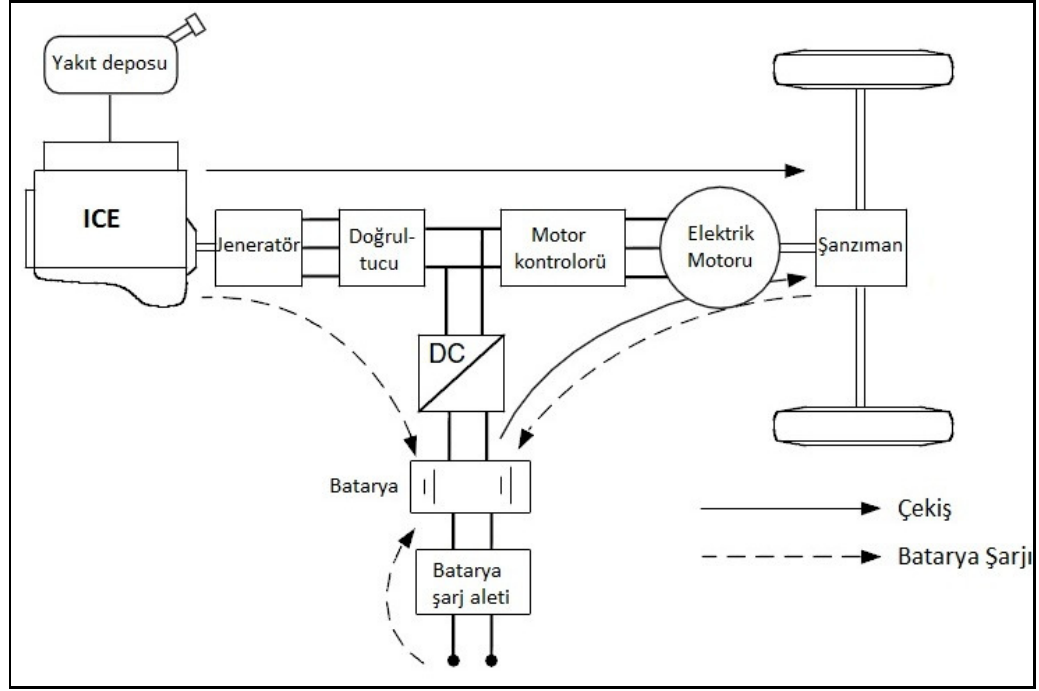


**Şekil 1.1 : Hibrit elektrikli araçların sınıflandırılması**

### 1.4.1 Seri hibrit elektrikli araç

Seri hibrit elektrikli araçlar, elektrik tahrikli sürüş için tasarlanmışlardır. Bunun anlamı, elektrikli araçların görünümünü andırmalarıdır. Aradaki tek fark, gerektiğinde aracı hareket ettiren elektriksel güce katkı veren ve bataryaların dolu olmasını sağlayan içten yanmalı motorun varlığıdır. Bu mimaride, içten yanmalı motor ile tekerlekler arasında mekanik bir bağ yoktur. Böylece ICE elektrik motoruna yol yükünün üstesinden gelmede yardımcı olmaz. Seri hibrit mimarideki ICE bu yükten ayrılmıştır ve istenilen bir sabit çalışma noktasında ya da en yüksek verimliliğe sahip çalışma noktalarında çalıştırılabilir [9]. En genel haliyle seri hibrit araç yapısı Şekil 1.2’de detaylı olarak verilmiştir.





**Şekil 1.2 : Seri hibrit elektrikli araç mimarisi**

Seri hibrit araçların potansiyel olarak aşağıdaki çalışma modları vardır [4]:

- Yalnızca elektrik modu: ICE kapalı konumdadır ve araç yalnızca bataryalar tarafından yürütülür.
- Yalnızca ICE modu: Aracın çekim gücü sadece ICE tarafından sağlanır ve bataryalar sistem ile enerji alışverişinde bulunmazlar.
- Hibrit mod: Çekiş gücü aynı anda ICE ve bataryalar tarafından sağlanır.
- ICE çekiş ve batarya dolma modu: ICE bataryaları doldurmak ve aracı sürmek için güç sağlar.
- Rejeneratif frenleme modu: ICE kapalı konumdadır, elektrik motoru jeneratör modunda çalışır ve üretilen enerji bataryaları doldurur.
- Batarya dolurma modu: Elektrik motoruna güç gitmez ve ICE bataryaları doldurur.
- Hibrit batarya dolurma modu: Hem ICE hem de elektrik motoru jeneratör olarak bataryaları doldurur.

Seri hibrit araçlardaki ICE'nin tekerleklere mekanik bağlantısı olmaması nedeniyle, ICE istenilen verim noktasında çalıştırılabilir. Ayrıca geleneksel olmayan içten

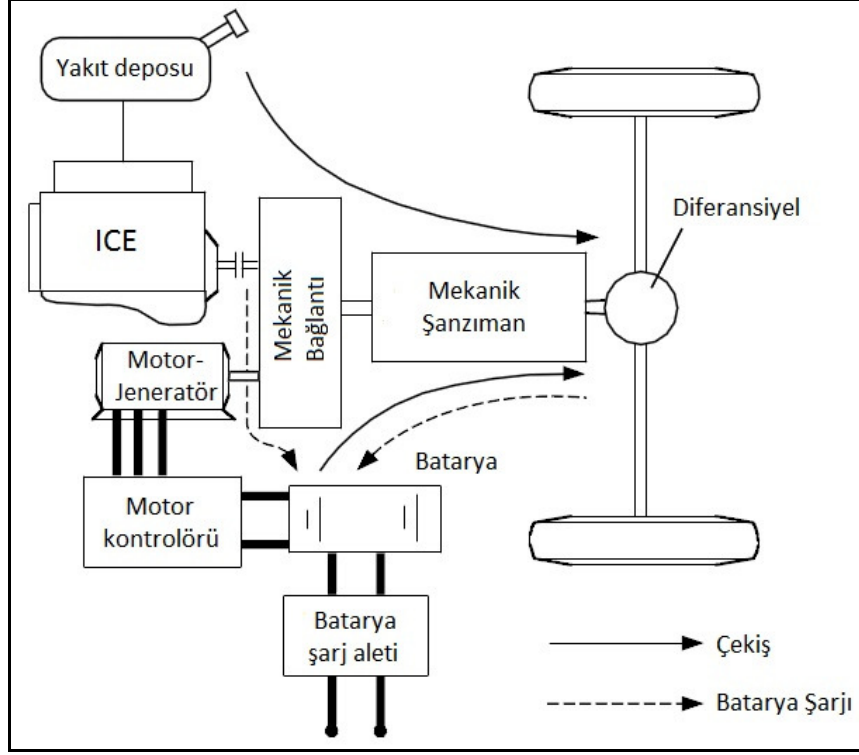
yanmalı motor tipleri kullanılabilir. Elektrik motorlarının ise tork-hız karakteristikleri ideale yakın olduğundan, bu motorların çoklu vites şanzımanlarına ihtiyaçları yoktur. Bu da yapıyı basitleştiren ve maliyeti azaltan bir faktördür. Ayrıca, her biri ayrı tekerleği tahrik eden iki motor kullanılarak, diferansiyel ortadan kaldırılabilir ve çekiş kontrol algoritmaları kolayca uygulanabilir. İdeal olarak, araçtaki dört tekerlek de ayrı motorla tahrik edilerek, 4 çekerli bir araç elde edilip aktarma organlarından ve millerden tasarruf yapılabilir [4].

Öte yandan, seri hibrit araç mimarisindeki önemli bir dezavantaj, ICE'den gelen enerjinin tekerleklere aktarılırken iki kez dönüştürülmek durumunda kalmasıdır. Generatör ve elektrik motorundaki verimsizlikler, tekerleğe gelen kinetik enerjide önemli bir kayba neden olabilir. Şanzımana direk bağlı olmayan ICE'den dolayı sistemde bulunan generatör de, araca fazladan yük ve maliyet getirmektedir. Çekişi tek başına sağlayan elektrik motorunun da, istenilebilecek en fazla gücü sağlayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir [10].

#### **1.4.2 Paralel hibrit elektrikli araç**

Paralel hibrit elektrikli araç, ICE ve elektrik motorunun aynı mil üzerinde tekerleklere doğrudan mekanik bağlantı ile tahrik verdiği sistemdir. Paralel tahrik sistemleri mekanik olarak seri hibrit sistemlere göre daha karmaşıktır. Özellikle iki motoru birbirine bağlayan mekanik bağlantı, kontrol algoritmalarını seri hibrit araçlardakine göre daha karmaşıktır. Bu mekanik bağlantının türüne ve şekline göre değişik paralel hibrit araç konfigürasyonları oluşturulabilir, ancak durum en genel haliyle Şekil 1.3'teki gibidir.

Paralel hibrit elektrikli araçların çalışma modlarından en geneli, aracın düşük hızlarda elektrikli araç gibi davranması, yani sadece elektrik motorunun devrede olması, ICE'nin ise yalnızca yüksek hızlarda devreye girmesidir. Bu strateji, ICE'nin yüksek zararlı gaz salınımı ve verimsiz yakıt kullanımı oluşturan düşük yüklerde çalışmasını engeller [4].



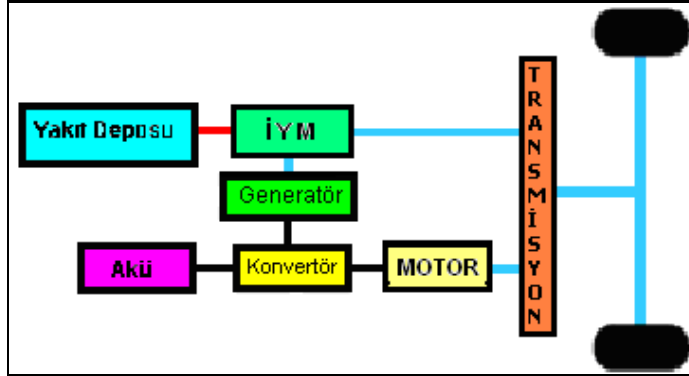
**Şekil 1.3 :** Paralel hibrit elektrikli araç mimarisi

Paralel hibrit elektrikli araçlardaki ICE ve elektrik motorunun mekanik bağlantısının türüne göre değişik düzenler oluşturulabilir. Bu mekanik bağlantı, iki enerji kaynağının torklarının, hızlarının ya da hem tork hem de hızlarının birbirine bağlanmasını sağlayabilir [10].

Seri hibrit sistemde olduğu gibi paralel hibrit sistemde de rejeneratif frenleme ile bataryalar şarj edilebilmektedir. Paralel hibrit sistemde, seri sisteme göre daha küçük kapasiteli bataryalar kullanıldığı için şarj çoğunlukla rejeneratif frenleme sırasında yapılır. Buna ek olarak sürüş esnasında da elektrik motoru generatör gibi davranarak bataryaları şarj edebilmektedir. Daha küçük elektrik motoru ve bataryaların kullanılması paralel hibrit sistemin fiyatını seri hibrit sisteme göre daha düşük kılmaktadır. Burada ICE doğrudan tekerleklere bağlı olduğu için seri hibrit sisteme göre toplam enerji dönüşüm verimi daha yüksektir [4].

### 1.4.3 Seri-paralel hibrit elektrikli araç

Seri-paralel hibrit elektrikli araçlar ise, seri ve paralel HEV lerin yapılarındaki verimliliklerini birleştirir. Ancak yapı olarak daha çok paralel yapıya benzer. ICE doğrudan tekerleklere bağlıdır, aynı zamanda seri hibrit yapıda olduğu gibi generatör ile elektrik motoruna da enerji desteği sağlayabilir. Düşük hızlarda araç seri yapıda çalışırken, yüksek hızlarda ise ICE doğrudan tekerleklere bağlanarak gereken gücü sağlar [9]. Bu yapı genel haliyle Şekil 1.4'te gösterilmiştir.



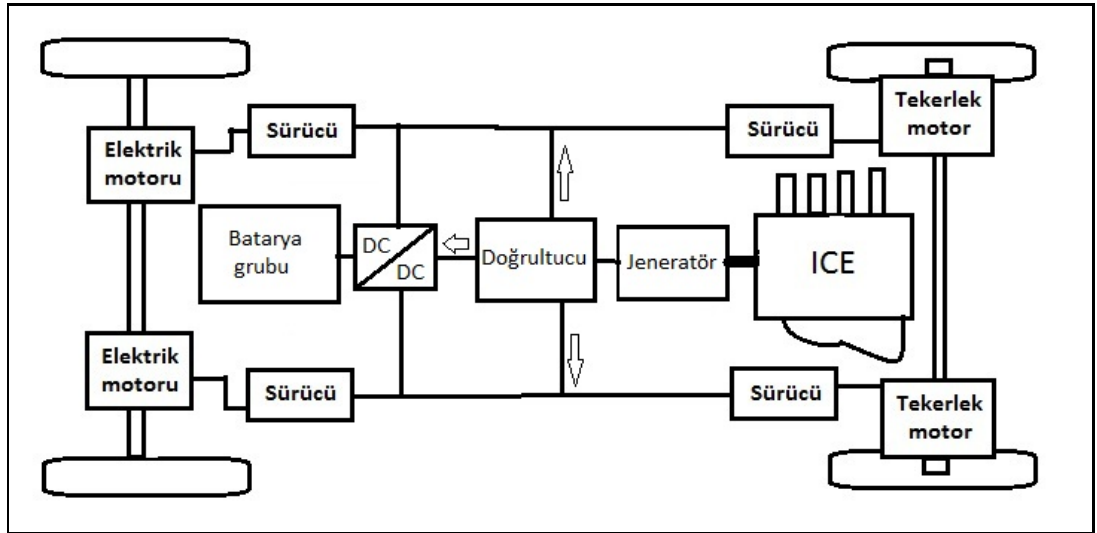
Şekil 1.4 : Seri-paralel hibrit elektrikli araç mimarisi

## 2. HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN TEMEL BİLEŞENLERİ

### 2.1 İTÜ MEAM Hibrit Elektrikli Araç Projesi

İstanbul Teknik Üniversitesi bünyesinde kurulan Mekatronik Eğitim ve Araştırma Merkezi (MEAM) da yürütülen proje kapsamında, Temsa Prestij marka midibüs, hibrit elektrikli araç haline getirilmek istenmiştir.

Projede, midibüse en uygun tasarım olarak seri hibrit yapılandırma uygun bulunmuştur. Bunun sebebi, seri hibrit yapılandırmasının, ICE'nin sürekli verimsiz çalışmak durumunda kaldığı yoğun trafikte çalışan araçlarda uygun olmasıdır [11]. Bir seri hibrit araçta bulunan temel parçalar; içten yanmalı motor, generatör, elektrik motorları ve bataryalardır. Araçta her tekerleğin ayrı motor ile tahrik edilmesi planlanmış, bu kapsamda iki adet tekerlek motor, iki adet de normal elektrik motoru temin edilmiştir. Ayrıca ICE'nin bağlanacağı generatör de ilgili firmalardan temin edilmiştir. Tekerlek motorların sürücüleri motorlar ile birlikte alınmış olup, diğer elektrik motorlarının sürücüleri ise laboratuvar ortamında tasarlanmıştır. Oluşturulacak seri hibrit aracın taslak hali, Şekil 1.5'te verilmiştir. Tekerlek motorlar doğrudan jantlara monte edilirken, diğer motorlar ise bir aktarma organı yardımı ile tekerleklere bağlanacaktır.



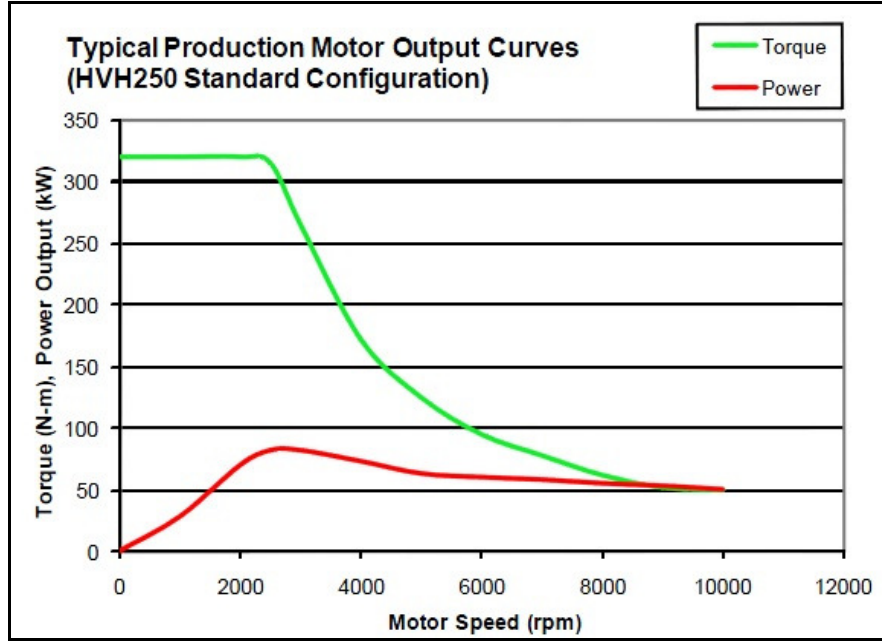
Şekil 2.1 : Seri hibrit araç projesi taslak bileşenleri

### **2.1.1 İçten yanmalı motor (ICE)**

Temsa Prestij aracında bulunan içten yanmalı motor, Mitsubishi marka, 4 silindirli 4 devirli su soğutmalı dizel motordur. Motorun maksimum çıkış gücü 100 kW/2900 rpm olup, üretebileceği en yüksek tork ise 370 Nm/1600 rpm olarak verilmiştir. ICE'nin en yüksek hızı ise 3100 rpm olarak belirtilmiştir. Seri hibrit araçlarda içten yanmalı motorlar sadece bataryaların şarj edilmesi için kullanılmaktadır ve doğrudan çekiş sağlamamaktadır. Bazı durumlarda, daha küçük bir ICE ile de bu şarj işlemi yapılabildiğinden ICE'nin uygun bir şekilde yeniden boyutlandırılması gerekebilir. Böylece daha hafif bir içten yanmalı motor ile istenen güç elde edilebilir ve ayrıca ağırlıktan tasarruf edilmiş olur. Ancak bu projede bu uygulamaya gerek duyulmamıştır.

### **2.1.2 Generatör**

Seri hibrit araçta kullanılan generatör, Remy firmasının ürettiği HVH250 S kalıcı mıknatıslı (internal permanent magnet - IPM) senkron makinadır. Generatör direk olarak ICE'ye bağlı olduğundan, çalışacağı hız ve tork değerleri direk olarak ICE'nin en verimli olduğu çalışma noktaları olacaktır. Bu durumda generatör seçilirken, ICE'nin en verimli olduğu noktalarda olabildiğince verimli olmasına dikkat edilmelidir. Modelleme bölümünde de anlatılacağı üzere, kullanılan generatör, bu noktalarda tatmin edici bir verimliliğe sahiptir. Makinanın üretebileceği anlık güç 82 kW, sürekli güç ise 60 kW'tır. Anlık üretilebilecek tork ise 325 Nm olup, sürekli halde 200 Nm değerindedir. Çalışma gerilimi ise 320 V'tur. Makinanın en verimli olduğu çalışma aralığı ise 2,500 - 10,600 rpm arasında değişmektedir. Generatörün tork-hız ve güç-hız karakteristikleri Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2 : Generatör tork/güç-hız karakteristiği [12]

### 2.1.3 Elektrik motorları

Hibrit aracın arka tekerleklerinde kullanılmak üzere alınan elektrik motorları, Remy firmasının ürettiği HVH250 HT kalıcı mıknatıslı senkron makinalardır. Kalıcı mıknatıslı motorlar, hibrit elektrikli araç uygulamalarında sıkça tercih edilen bir motor türüdür. Bunun sebebi bu motorların özellikle düşük hızlardaki yüksek verimliliği (>%90) ve yüksek güç yoğunluğudur. Bunun anlamı aynı güç değeri için toplam boyutu ve ağırlıklarının diğer motorlara göre daha az olmasıdır. Bu projede kullanılan motorların üretebileceği anlık / sürekli güç 87 / 60 kW olup, elde edilebilecek anlık / sürekli tork değerleri ise 440 / 243 Nm şeklindedir. Motorların çalışma gerilimleri yine 320 V olup, en verimli olduğu çalışma hızı ise 1,400 – 10,600 rpm aralığındadır. Kullanılacak motor ve generatörlerin dış görünüşü Şekil 2.3'te görüldüğü gibidir.



**Şekil 2.3 :** Seri hibrit araçta kullanılan motor-generatörler

#### **2.1.4 Tekerlek motorlar**

Aracın tekerleğinin göbeğine monte edilen ve rotoru direk olarak tekerleği döndüren elektrik motorlarına tekerlek motorlar denir. Bu motorlar yaygın olarak elektrikli bisikletlerde bulunurlar. Ayrıca hibrit araçlarda ve otobüslerde de kullanılırlar. Tek bir elektrik motorunun dört tekerleği de sürmesi, hibrit araçlarda yaygın kullanılan yöntemdir. Buna karşılık iki ya da dört tekerleğin de ayrı tekerlek motorlar tarafından sürülmesi, bazı avantajlar ve dezavantajları getirir. Enerji verimliliğinin artması en önemli avantaj olarak gösterilebilir. Merkezi bir motorun kinetik enerjisi tekerleklere iletilmesi için birçok aktarma organına ihtiyacı varken tekerlek motorlar bu organların yaratacağı kayıplardan kaçınılmasını sağlar. Vites kutusu, diferansiyel ve sürüş millerine ihtiyaç olmaması aracın ağırlığının önemli ölçüde azalmasını sağlar. Ayrıca her motorun birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmesi, çekiş kontrol sistemi gibi algoritmaların daha kolay uygulanabilmesini sağlar. Öte yandan, tekerlek içine yerleştirilecek motorlar tekerleğin ağırlığını arttıracığından, sürüş kolaylığı azalabilir. Bunun önüne geçmek için daha hafif tekerlek motorlar tasarlanmaktadır.

Projede kullanılacak tekerlek motorlar, 3 fazlı fırçasız kalıcı mıknatıslı motorlardır. Motorlar hava soğutmalı olup, üretebilecekleri en yüksek güç 23 kW, sürekli güç ise 10 kW'tır. Motorun içinde bulunan 4.114 oranlı dişli mekanizması ile araç tekerlek hızı 900 rpm'e kadar çıkabilmektedir. Yine dişli mekanizması ile elde edilen en



yüksek ve sürekli tork değerleri 1100 / 620 Nm dir. Tekerlek motorlarının görünüşü Şekil 2.4'teki gibidir.



**Şekil 2.4 :** Seri hibrit araçta kullanılan tekerlek motorlar

Tekerlek motorların içinde gömülü halde ısı ve konum algılayıcıları bulunmaktadır. Motorlarla birlikte sürücüleri de temin edilmiştir. Sürücüler Semikron marka güç kontrol üniteleri ve sayısal işaret işleyicilerden (DSP) oluşmaktadır ve tekerlek motorlar için özel üretilmişlerdir. Sürücüler ile iletişim CAN protokolü ile sağlanmaktadır. CAN haberleşmesi için gerekli dosyalar üretici firma tarafından temin edilmiştir. 500 Kbps hızındaki CAN 2.0b ile, motorların hız ve tork kontrolleri yapılabilmekte, ayrıca algılayıcılar vasıtasıyla motor ve sürücülerin durumu gözlenebilmektedir.

Projede kullanılan elektrik motorları, aracın performans kriterlerini sağlayabilmelidir. Bu kriterler genellikle ivmelenme süresi, son hız değeri ve çıkılabilecek en yüksek eğim değerleridir. Hibritleştirilmek istenen aracın içten yanmalı motoru, en fazla 100 kW'lık bir güç ve 370 Nm lik tork üretebilmektedir. Projede kullanılan elektrik motorlarının değerlerine bakılırsa, bu güç ve tork değerlerine kolaylıkla ulaşılabileceği görülebilir.

### **2.1.5 Batarya**

Hibrit araçlarda kullanılan bataryaların yüksek güç yoğunluklu olması gerekir. Bunun sebebi bataryaların, elektrik motorlarına gereken tahrik gücünü sağlaması

gerekliliğidir [2]. Diğer batarya çeşitlerine göre yüksek güçlü ve kapasiteli olan lityum-iyon ve lityum-polimer bataryalar, hibrit elektrikli araçlarda kullanılabilecek en verimli bataryalar olarak göze arpılmaktadırlar [13].

Projede kullanılacak bataryalar henüz temin edilmemiştir ancak modellemede kullanılmakzere, sisteme uygunluk gösterdiğinden, 70Ah kapasiteli ve 3.7V nominal gerilime sahip KOKAM marka lityum polimer bataryalar tercih edilmiştir. Bu bataryaların şarj olurkenki en yüksek akımları 140A, deşarj durumunda ise sağlayabilecekleri sürekli/anlık akım 350/700A değerlerindedir [14]. Projede kullanılan elektrik motorlarınınretebileceği sürekli g toplamı 140kW'tır. Bu durumda seçilen bataryaların toplam 400V civarında gerilime sahip olması ve belirtilen gerilime ulaşmayı sağlayacak sayıda bataryanın paket halinde araca yerleştirilmesi gerekmektedir. Kokamretilimi bataryalar ondrtl paketler halinde satışa sunulduğundan, bunlardan sekiz adet alındığı takdirde 414.4V gerilime sahip bir batarya paketi elde edilecektir, bu da motorların çekiş gücü için yeterli olacaktır. Bataryanın en yüksek şarj akımının 140A olduğu dikkate alınırsa, en yüksek şarj gücünün seçilen paket için yaklaşık 58kW olduğu hesaplanabilir. Bu durumda generatör gücü ve regeneratif frenleme gücünün bu değerini geçmemesi sağlanmalıdır.

### **2.1.6 G kontrolnitesi**

Bir hibrit araçta bulunan g kontrolnitesi, sürücüden gelen istekleri alarak, araçtaki alt sistemlerin istenilen şekilde çalışmasını sağlar. Bunu yaparken de içerisine dahanceden yüklenmiş kontrol kurallarından ve alt sistemlerdeki algılayıcılardan aldığı bilgilerden faydalanır. Bu tezde anlatılan projede, araçlarda çoğunlukla kullanılan CAN haberleşme sistemi tabanlı kontrolnitesi kullanılacaktır.

### **3. SERİ HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN KONTROL STRATEJİLERİ**

Kontrol stratejisi, araç kontrolöründe mevcut olan ve araçta bulunan her bileşenin çalışmasını belirleyen kontrol kurallarına denir. Araç kontrolörü; sürücüden gelen komutlar ve aktarma organlarından gelen geri beslemeleri alarak, çalışma modlarından hangisinin kullanılacağına dair kararlar verir. Aracın verimliliği, yapılan kontrolün kalitesine bağlı olup, kullanılan kontrol stratejisinin bunda rolü büyüktür [4].

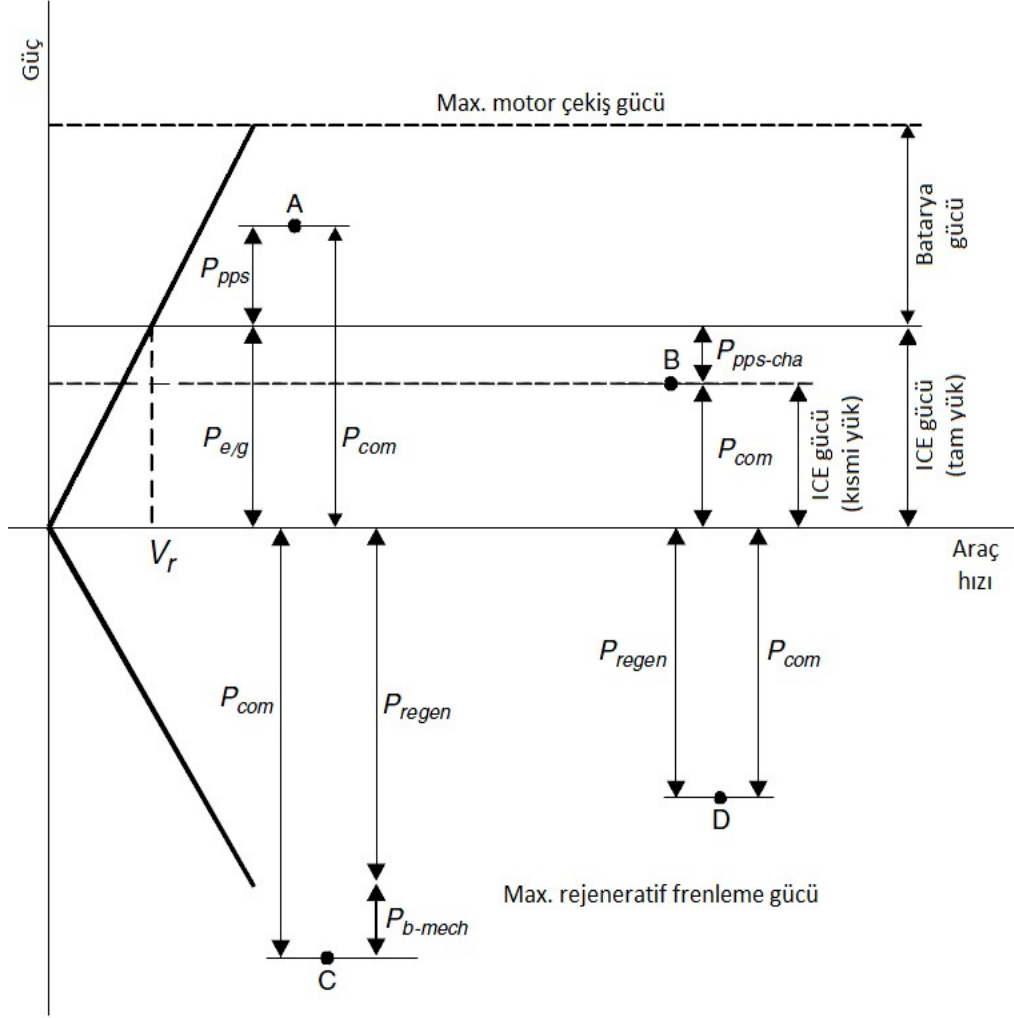
Tipik olarak, seri hibrit elektrikli araçlar için iki adet kontrol stratejisi vardır: batarya takımının en büyük şarj durumu (maksimum state of charge – Max. SOC) ve aç-kapa kontrol stratejileri.

#### **3.1 Max. SOC Kontrol Stratejisi**

Bu stratejinin amacı, sürücünün istediği gücü sağlarken, aynı zamanda bataryaların SOC unu en yüksek seviyede tutmaktır. Bu strateji, sıkça dur-kalk yapan dolayısıyla batarya gücünü sık kullanan araçlarda önemlidir. Bataryaların SOC unun yüksek olması, aracın herhangi bir zamanda verebileceği en yüksek performansı vermesini sağlar [4].

Max. SOC kontrol stratejisi, Şekil 3.1’de resmedilmiştir. Burada örnek olarak sürücünün isteyebileceği A, B, C ve D güç noktaları gösterilmiştir. Bunlardan bazıları (A, B) çekiş gücü isteği iken bazıları (C, D) ise frenleme isteğidir.

A noktasında, istenen çekiş gücünün ICE’nin üretebileceği en yüksek güçten daha fazla olması durumu temsil edilmektedir. Bu durumda aradaki güç farkını bataryalar sağlamalıdır. B noktasında istenen çekiş gücü, ICE’nin optimal çalışma noktasında iken ürettiği güçten daha azdır. Bu durumda eğer batarya şarj durumu (SOC) istenilenden az ise, ICE optimal gücü ile istenilen güç arasındaki fark, bataryaları doldurmada kullanılır. SOC eğer olabileceği en yüksek durumda ise, ICE gücü, istenilen güce eşit olacak şekilde azaltılır ve bataryalar devreden çıkar.



- A — Hibrit çekiş modu
  - $P_{com}$  — İstenen güç
  - $P_{pps}$  — bataryaların gücü
  - $P_{e/g}$  — ICE nin gücü
- B — Yalnızca ICE çekiş modu ya da batarya dolum modu
  - $P_{pps-cha}$  — Batarya dolum gücü
- C — Hibrit frenleme modu
  - $P_{regen}$  — Rejeneratif frenleme gücü
  - $P_{b-mech}$  — Mekanik frenleme gücü
- D — Rejeneratif frenleme modu

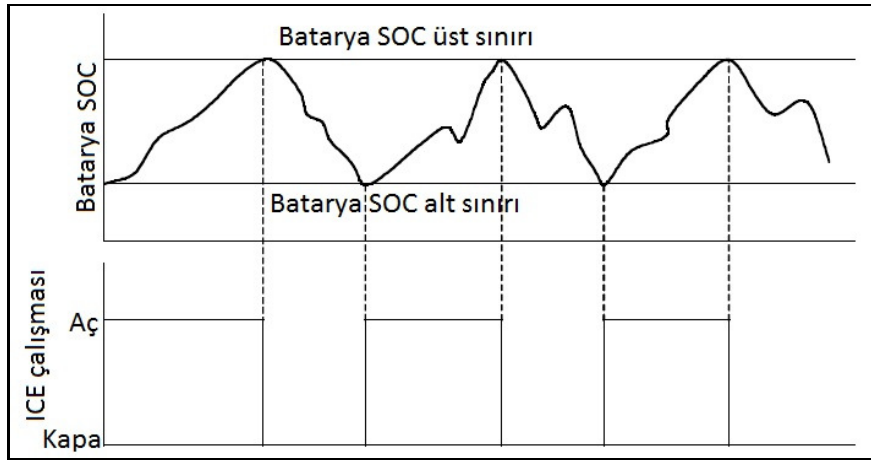
Şekil 3.1 : Max. SOC kontrol stratejisinin bir örneği [4].

C noktasında, istenilen frenleme gücü, elektrik motorunun üretebileceği en yüksek rejeneratif frenleme gücünden fazladır. Bu durumda hibrit frenleme modu devreye girer ve elektrik motorunun sağlayamadığı güç, mekanik frenleme ile tamamlanır.

D noktasında ise, istenilen frenleme gücü, elektrik motorunun üretebileceği kadardır. Bu durumda sadece rejeneratif frenleme modu devreye girer.

### 3.2 Aç-Kapa Kontrol Stratejisi

Max. SOC kontrol stratejisinde ana hedef, bataryaların doluluk oranını mümkün olan en yüksek seviyede tutmaktır. Ancak bazı sürüş koşullarında, örneğin bir otobanda sabit hızla giderken, bataryalar kolayca en yüksek doluluk oranına ulaştırılabilir ve (Max.SOC stratejisindeki B noktası gibi) ICE en uygun güçten daha düşük ve verimsiz olarak çalıştırılmak durumunda kalınabilir. Bu durumda, ICE'nin aç-kapa kontrolü daha uygun olur [4]. Bu kontrol stratejisi Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Buna göre, ICE'nin çalışıp çalışmaması tamamen bataryaların doluluk durumuna bağlıdır. SOC daha önceden belirlenen en yüksek noktasına ulaştığında ICE kapatılır ve araç sadece bataryalar ile yürütülür ve SOC azalmaya başlar. SOC yine daha önceden belirlenmiş bir seviyenin altına düştüğünde ise ICE tekrar çalıştırılır ve bataryalar şarj edilmeye başlar. Bu şekilde, ICE her zaman en verimli olduğu çalışma bölgesinde çalıştırılmış olur.



Şekil 3.2 : Aç-kapa kontrol stratejisinin gösterilimi [4].

Bu kontrol stratejilerine ek olarak, adaptif ve bulanık kontrol metotları da seri hibrit araçlar için uyarlanabilir.

Bu tezde modellenen araçta, aç-kapa kontrol stratejisinin bir türevi uygulanacaktır.



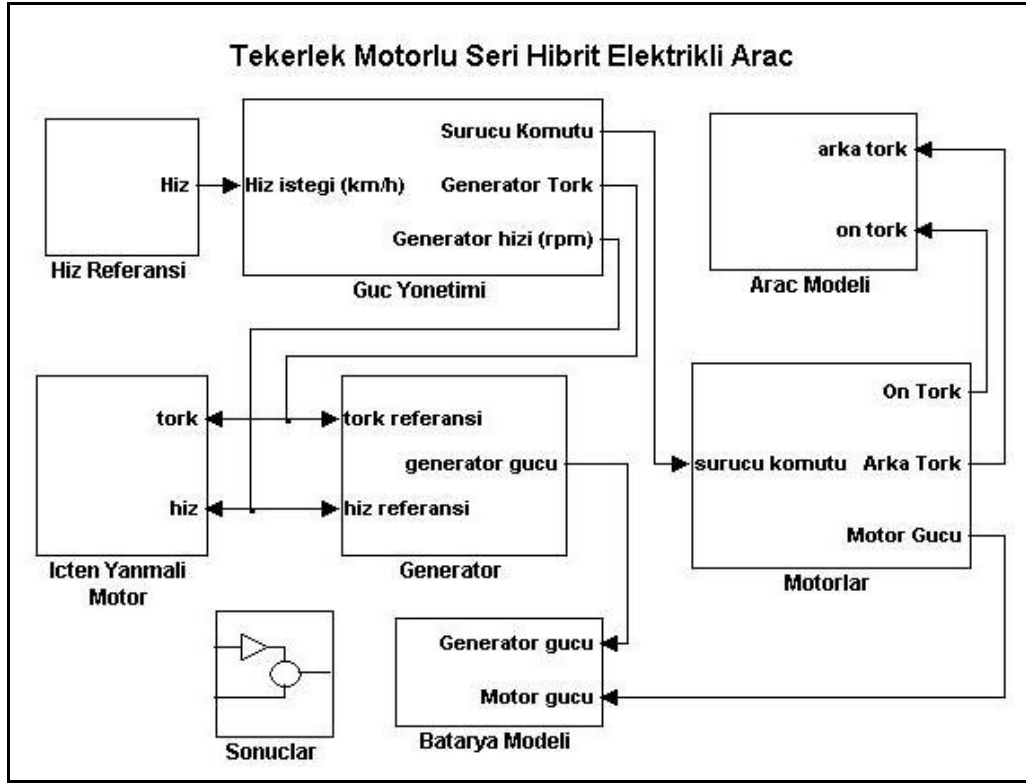
#### **4. TEKERLEK MOTORLU SERİ HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN MODELLENMESİ**

Seri hibrit elektrikli araç modellerinde genel olarak modelin girişi bir hız çevrimidir. Sistemden gözlenen değerler ise araç hızı, yakıt tüketimi, bataryaların şarj durumu, elektrik makinalarının performans değerleri gibi tasarım ölçütleridir.

Seri hibrit araç modelinde bulunan temel elemanlar şu şekilde listelenebilir:

- İçten yanmalı motor modeli,
- Generatör modeli,
- Motor modelleri,
- Batarya modeli,
- Araç modeli,
- Güç kontrol ünitesi modeli.

Tek elektrik motoru ile çekiş yapılan seri hibrit araç sistemlerinde vites kutusu ve diferansiyel de modellenmelidir. Ancak tekerlek motorlu seri hibrit araçlarda bu aktarma organları mevcut değildir ve bunların yarattığı kayıplar söz konusu değildir. Tekerlek motorlu seri hibrit elektrikli aracın genel modeli Şekil 4.1’de görülebilir.



**Şekil 4.1 :** Tekerlek motorlu seri hibrit araç modelinin genel şeması

#### 4.1 İçten Yanmalı Motor Modeli

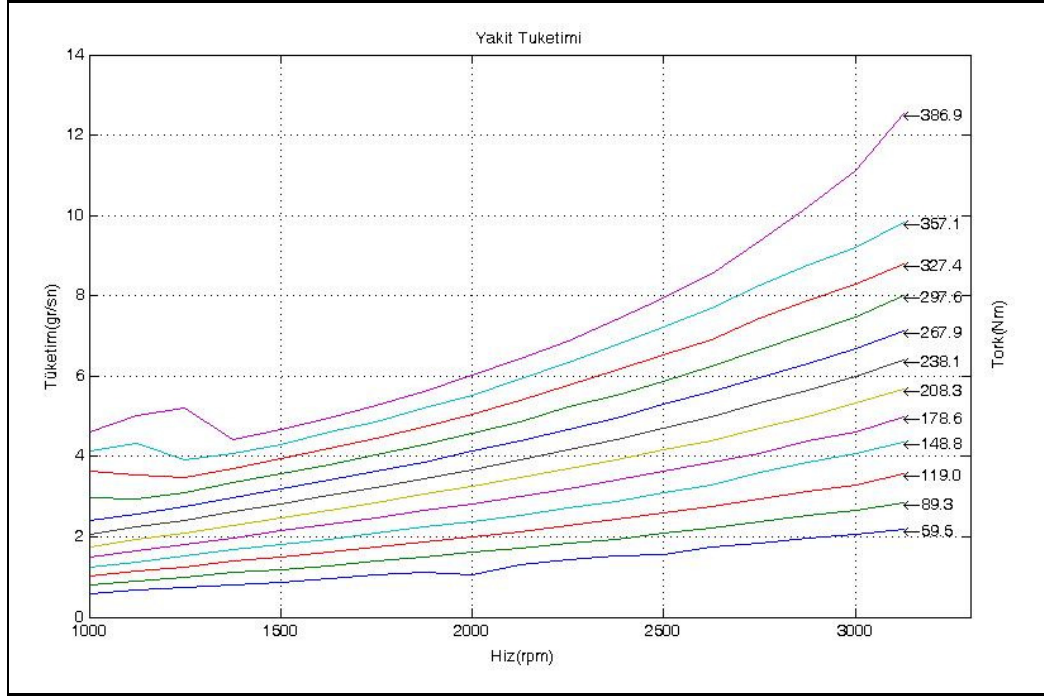
Tez kapsamında oluşturulan içten yanmalı motor modeli, statik haritalardan oluşmaktadır. Gerçekte, motorun dinamik davranışları da dikkate alınmalıdır ancak modelin karmaşıklığının azaltılması amacıyla ve araç boylamsal dinamiklerinin yanında bu dinamiklerin göz ardı edilebilir konumda olması nedeniyle statik durum tercih edilmiştir.

Oluşturulan modelde benzetim süresince içten yanmalı motor aç-kapa kontrol ile açılıp kapatılacaktır. Motor çalıştığı esnada yalnızca daha önceden hesaplanmış olan yüksek verim noktasında çalışacaktır. Bu çalışma noktasının nasıl belirlendiği daha sonra anlatılacaktır.

İçten yanmalı motorun çalışma noktası belli olduğundan, motorun referans geldiği anda bu değerleri takip ettiği varsayılmaktadır. Bu durumda modelde hesaplanması gereken oluşan yakıt tüketimidir. Model iki girişi olup, bunlar içten yanmalı motorun en verimli olduğu hız ve tork çiftidir.



Yakıt tüketimi hesabında, içten yanmalı motorun hız ve tork değerlerine göre oluşan yakıt tüketimini veren tablodan faydalanılmıştır. Bu tablonun grafik gösterimi Şekil 4.2'deki gibidir.



**Şekil 4.2 :** İçten yanmalı motorun yakıt tüketim grafiği

Yakıt tüketimini hesaplamak için, tablodan bulunan değerlerin benzetim süresince integrali alınır. Böylece kaç gram yakıt tüketildiği bulunur. Bu değer dizel yakıtın yoğunluğuna bölüldüğünde mililitre cinsinden yakıt tüketimi hesaplanabilir.

$$tüketim(mL) = \frac{\int c(w, T)}{yogunluk} \quad (4.1)$$

Yakıt tüketimi hesabında, eşdeğer yakıt tüketiminin hesaplanması önemlidir. Eşdeğer yakıt tüketimi, içten yanmalı motorun yanı sıra, bataryaların harcadığı enerjinin yakıt olarak karşılığının da toplam tüketime eklenmesidir. Örneğin benzetim sonucundaki bataryaların doluluk durumu (SOC) ilk duruma göre daha az ise, eşdeğer yakıt tüketimi içten yanmalı motorun yakıt tüketiminden daha fazladır. Tersi durum da geçerlidir.

Eşdeğer yakıt tüketimini hesaplamak için (4.2) de verilen formül kullanılmıştır.

$$ek\_tüketim = \frac{|SOC - SOC_{ilk}| \times cap \times 3600}{I_{bat}} \times tüketim \times \frac{1}{yogunluk} \times sign(SOC - SOC_{ilk}) \quad (4.2)$$

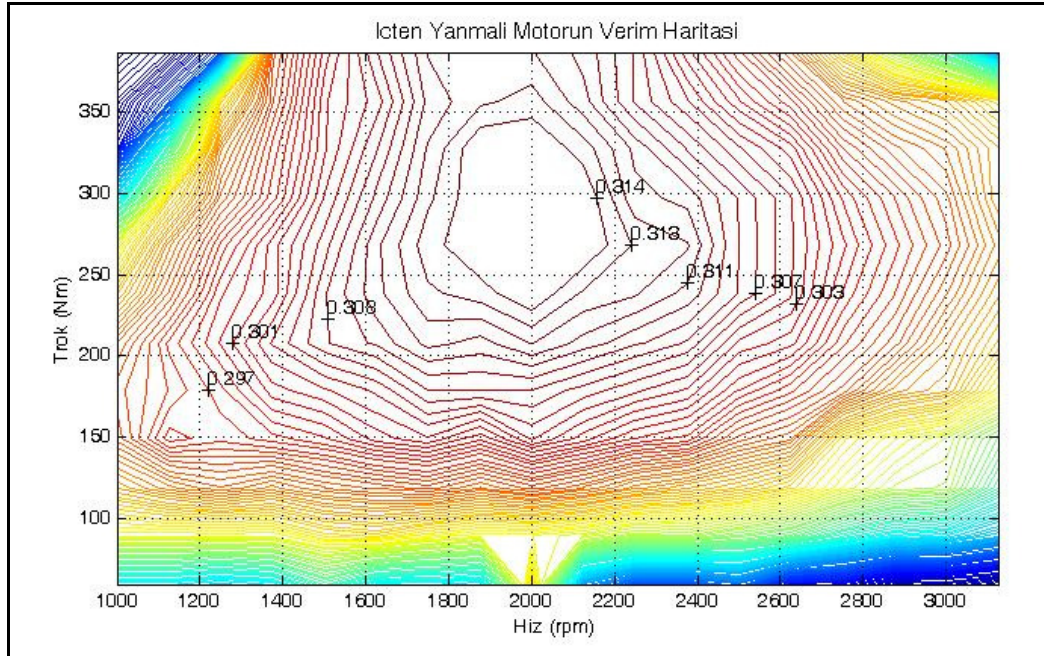
Burada  $cap$  Ah cinsinden batarya kapasitesi,  $tüketim$  içten yanmalı motorun en verimli olduğu noktadaki yakıt tüketimi,  $yogunluk$  yakıt yoğunluğu,  $I_{bat}$  ise istenen güce karşılık gelen batarya akımıdır. Yakıt tüketimine ek olarak, 100 kilometre için oluşacak yakıt tüketimini hesaplamak için (4.3) denklemi kullanılmıştır.

$$tüketim @ 100km = \frac{tüketim(mL)}{\int arac\_hizi(m/s)} \times 100 \quad (4.3)$$

Son olarak içten yanmalı motorun verim hesabı için kullanılan eşitlik (4.4) denkleminde verilmiştir.

$$verim = \frac{w(rad/s) \times T(Nm)}{tüketim \times Hlhv} \quad (4.4)$$

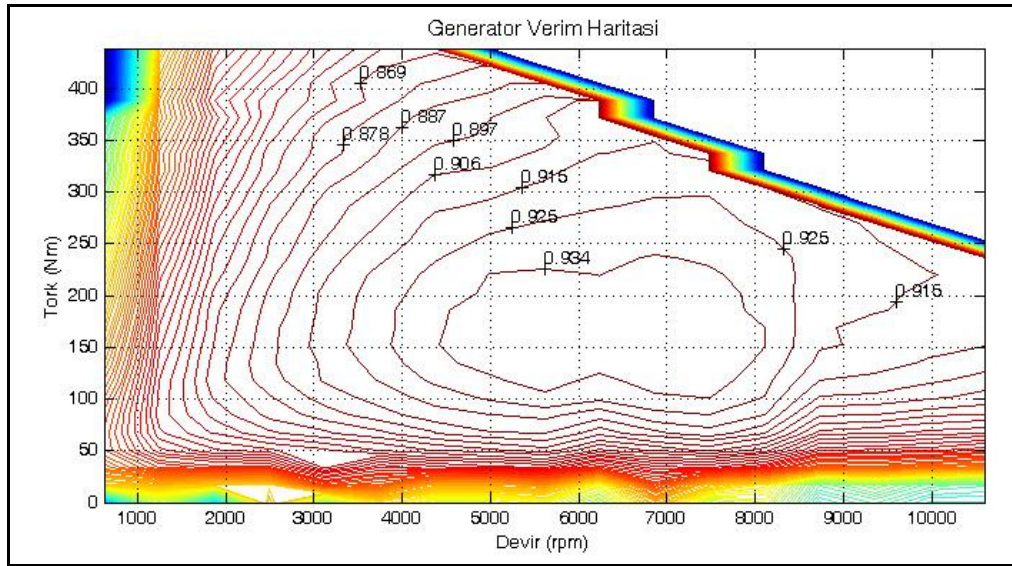
Burada  $w$  motor mili açısal hızı,  $T$  motor torku,  $tüketim$  g/sn cinsinden yakıt tüketimi,  $Hlhv$  ise dizel yakıtın alt ısı değeridir. Yakıt tüketim değerlerine bağlı olarak oluşan içten yanmalı motorun verim haritası Şekil 4.3'te verilmiştir.



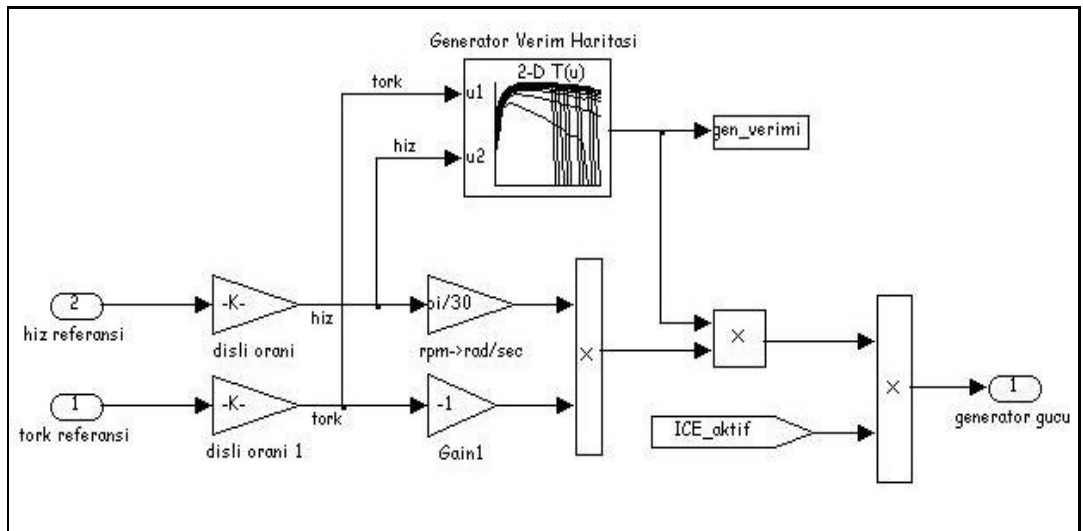
Şekil 4.3 : İçten yanmalı motorun verim haritası

## 4.2 Generatör Modeli

Seri hibrit elektrikli araçlarda generatörlerin görevi, bağlı olduğu içten yanmalı motorun ürettiği gücü bataryalara aktarmaktır. Bu iletim esnasında generatörün kayıpları olacaktır. Bu kayıplar generatör verim haritasına göre belirlenebilir. Generatör modeli oluşturulurken bu verim haritasından faydalanılmıştır ve dinamik bir model kullanılmamıştır. Modelin girişleri içten yanmalı motorun hızı ve torku iken, çıkışı generatör gücüdür. Model oluşturulurken kullanılan verim haritası Şekil 4.4'te, Simulink modeli Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.4 : Generatör verim haritası



Şekil 4.5 : Generatör Simulink modeli

Generatör ile içten yanmalı motorun verim haritaları karşılaştırıldığında, içten yanmalı motorun en verimli noktasının generatörün verim haritasında en verimli bölgeye rastlamadığı görülebilir. Bu iki makina seri hibrit sistemde birlikte çalıştığından, ikisinin toplam veriminin iyileştirilmesi gerekir. Bu amaçla içten yanmalı motor ve generatör arasına 1/2 oranlı bir dişli yerleştirilmiştir. Böylece hem içten yanmalı motor hem de generatör en verimli bölgelerinde çalıştırılabilir.

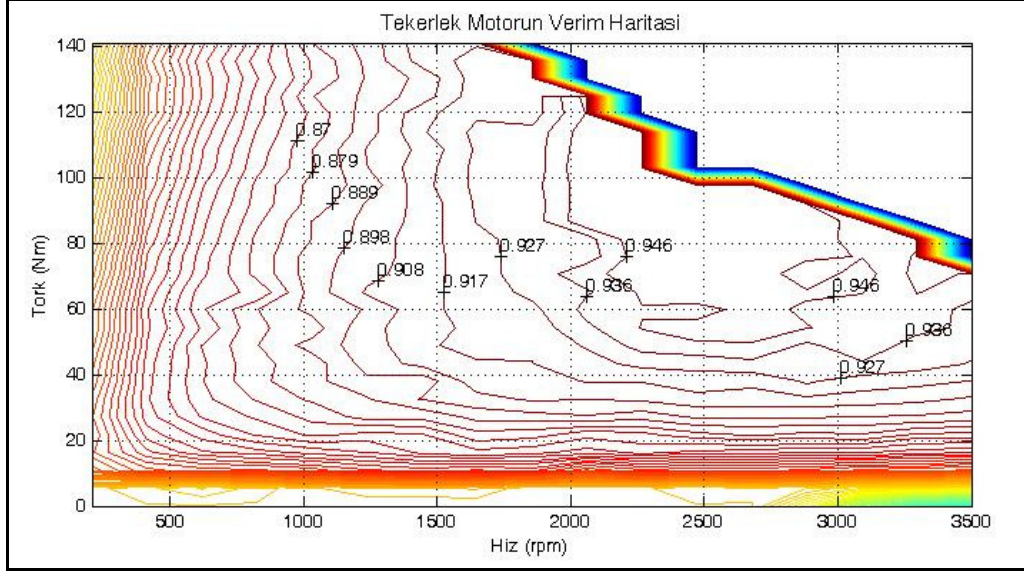
### **4.3 Motor Modelleri**

Bu tezde modeli anlatılan araçta her biri bir tekerleği tahrik etmek üzere, 4 adet çekiş motoru kullanılacaktır. Bunlardan ikisi tekerlek motor, kalan ikisi ise normal elektrik motorudur. Bu motorların teknik özelliklerinden daha önce bahsedilmiştir. Araçta 4 ayrı motor bulunması, güç aktarma organlarından tasarrufu sağlar. Vites, diferansiyel gibi mekanizmaların modellenmesine gerek yoktur. Ancak, tekerlek motorların kendi içinde 4.114 oranında bir dişli mekanizması bulunmaktadır. Böylece doğrudan araca monte edilen bu motorlar, tekerlekleri 0-900 rpm hız aralığında döndürebilmektedir.

Tekerlek olmayan motorların da bağlı oldukları tekerlekleri bu hız aralığında yüksek verim ile çevirebilmesi için araca bir dişli mekanizması eklenmelidir. Bu motorların ulaşabileceği en yüksek devrin 10.600 rpm olduğu daha önce belirtilmişti. Buna göre yaklaşık 11.78 oranında bir dişli ile tekerleklerde istenilen devir elde edilebilir. Ancak arka aksa monte edilmiş motorların daha verimli çalışmaları için bu oran 8.5 değerine çekilmiştir.

Tekerlek motorların güç kapasiteleri araçtaki diğer çekiş motorlarına göre daha az olduğundan, tekerlek motorların ön tekerleklerde bulunması daha uygun bulunmuştur. Böylece aracın orijinal durumunda olduğu gibi arkadan çekişli olması sağlanmıştır.

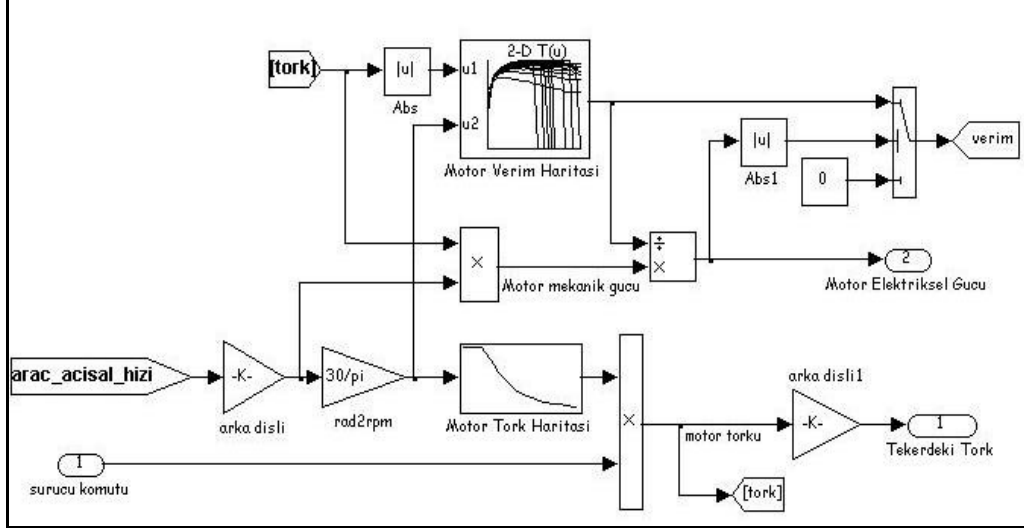
Araçtaki tüm motorların modellenme şekli aynıdır. Kolaylık amacıyla, motorların dinamik davranışları göz ardı edilmiş, motorların hız tork karakteristikleri ve verim haritaları ile modeller oluşturulmuştur. Bu verim haritaları Şekil 4.6'da verilmiştir.



**Şekil 4.6 :** Araçtaki çekiş motorlarının verim haritası

Motor modellerinin girişi sürücü komutu iken, çıkışta motor torku, motor gücü ve motor verimi gözlenmektedir. Sürücü komutu pozitif bir değer ise hızlanma, negatif bir değer ise frenleme isteği anlamına gelir. Sürücü komutu, mutlak olarak [0-1] aralığındadır ve o anki hesaplanan motor devrine karşılık gelen en yüksek tork değerinin ne kadarının kullanılacağını belirler. Motor devri ve tork değeri bilindiğine göre, motor mekanik gücü hesaplanabilir. Bulunulan çalışma noktası için elde edilen verim değeri ile bataryadan ne kadar güç çekilmesi gerektiği de hesaplanır. Bataryadan çekilebilecek en yüksek güç değeri, bataryanın kapasitesi ile sınırlanmıştır. Regeneratif frenleme gücü de bataryanın en yüksek dolun gücü ile sınırlanmıştır. Motor torku ise, dişli aracılığı ile tekerleğe çekiş ya da frenleme torku olarak yansır. Araç modelinde kullanılacak tork değerleri de motor modelinde toplanmaktadır.

Motor model bloğunun Simulink şeması Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7 : Motor Simulink modeli

#### 4.4 Batarya Modeli

Batarya sistemi, hibrit elektrikli araçların en temel bileşenlerinden biridir. Bir batarya modelinin girişinde bataryadan istenen güç bulunurken, çıkış olarak batarya akımı, gerilimi, verimi ve doluluk oranı gözlenebilir. Batarya modeli oluşturulurken kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir [9].

$$I_{bat} = \frac{P_{bat}}{V_{bat}} \quad (4.5)$$

$$V_{bat} = V_{oc}(SOC) + I_{bat} \times R_{i\check{c}} \quad (4.6)$$

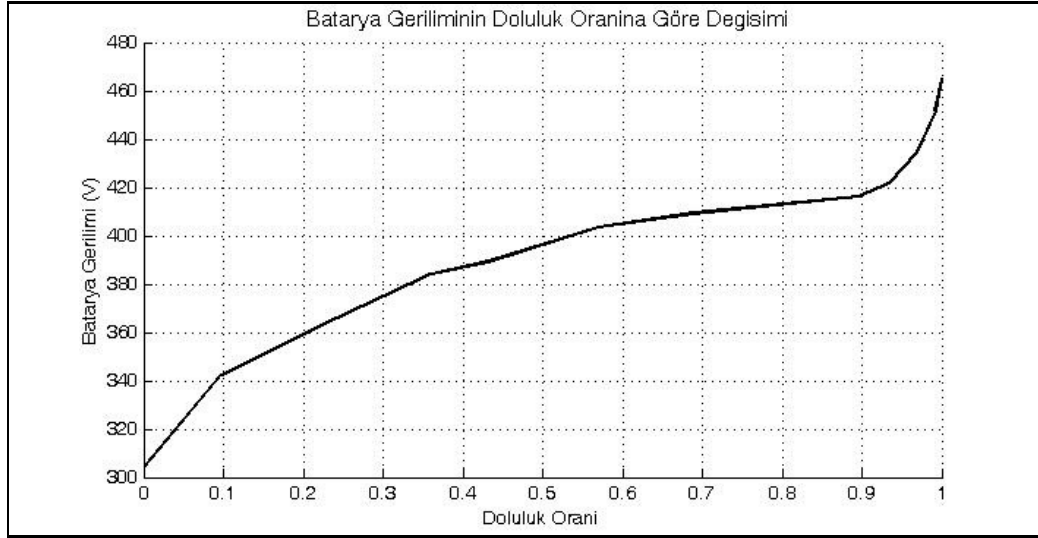
$$R_{i\check{c}} = \begin{cases} R_c(SOC) - eger - I_{bat} < 0 \\ R_d(SOC) - eger - I_{bat} \geq 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

$$SOC = SOC_{ilk} + \Delta SOC \quad (4.8)$$

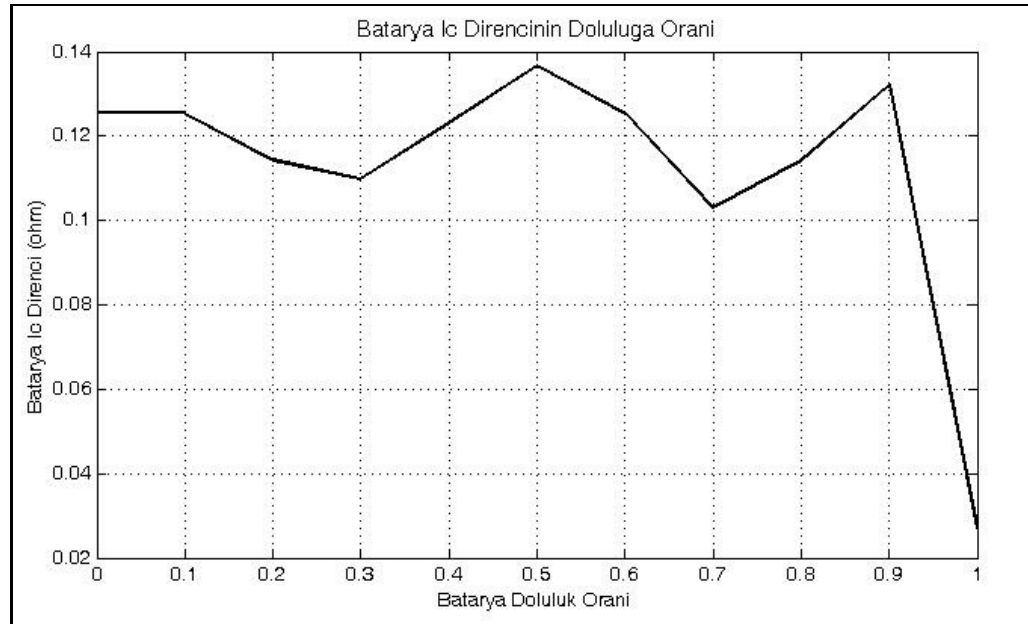
$$\Delta SOC = \frac{\int_{t_0}^{t_1} I_{bat}}{cap \times 3600} \quad (4.9)$$

Bu tezde kullanılacak olan aç-kapa kontrol stratejisi için en önemli ölçüm değeri, bataryanın şarj durumudur. (4.8) ve (4.9) denklemlerinde gösterildiği gibi, SOC hesaplamak için batarya kapasitesi  $cap$  (Ah), ilk durum  $SOC_{ilk}$  ve batarya akımı  $I_{bat}$  bilinmelidir. Bu üç veriden sadece batarya akımı değişkendir. Batarya akımı hesabı

için ise bataryadan istenen güç bilinmelidir. Bu değer pozitif ise deşarj, negatif ise şarj durumu söz konusudur. Batarya gerilimi ise statik haritalar ile belirlenir. (4.6) denkleminde  $V_{oc}(SOC)$  SOC'a göre değişen batarya gerilimini,  $R_{iç}$  ise bataryanın iç direncini belirtir. İç direnç değeri de bataryanın doluluk oranına göre değişim göstermektedir. Modellemede kullanılan bataryanın geriliminin ve iç direncinin SOC'a göre değişim grafikleri Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.8 : Batarya gerilim-doluluk grafiği

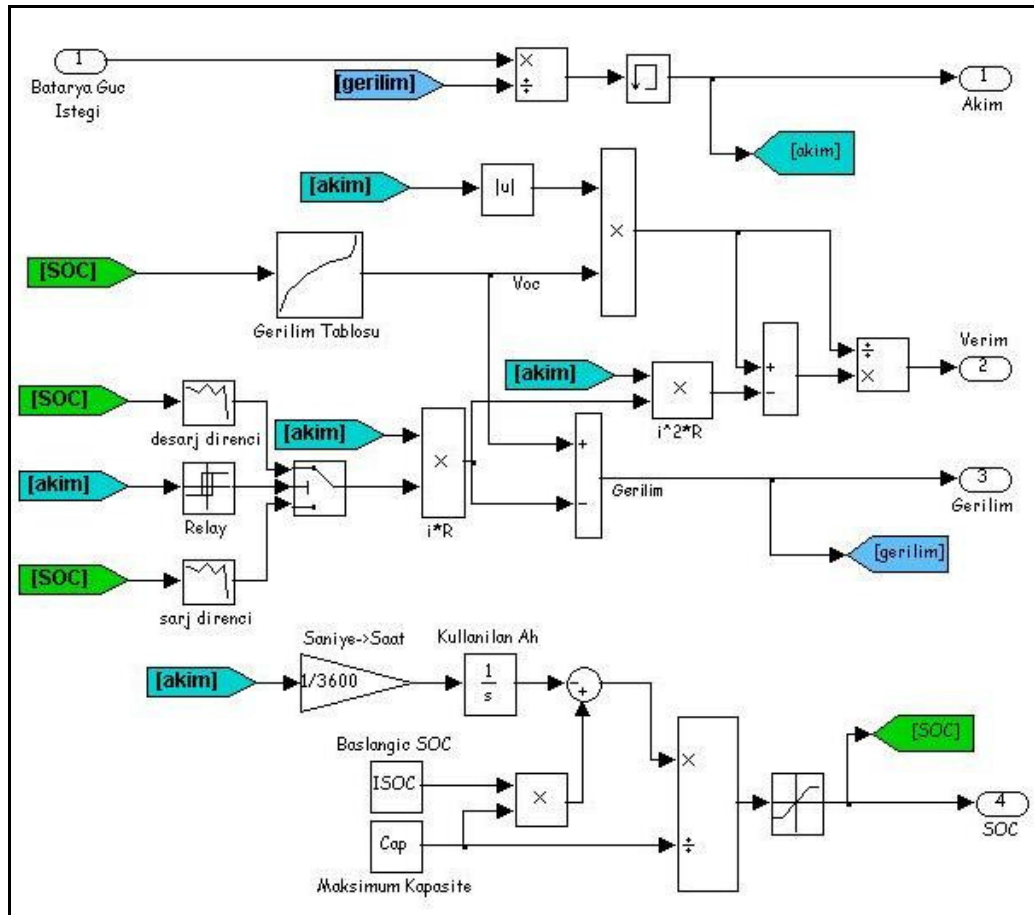


Şekil 4.9 : Batarya iç direnç-doluluk grafiği

Bataryanın iç direncinin düşük olması, batarya devresinden daha fazla akım akması ve aynı güç girişi ile daha fazla şarj-deşarj yapılabilmesi anlamına gelir. Bu durum göz önüne alındığında, bu çalışmada kullanılan bataryanın ideal doluluk oranı %70 olarak görülmektedir. Bunun sebebi bataryanın tam doluluk sınırında çalıştırılmasından kaçınılması gerekliliğidir.

Batarya verimi ise, (4.10) denkleminde verildiği gibi, batarya çıkış gerilimi batarya giriş gerilimine oranlanarak bulunur. Çalışmada kullanılan batarya, Simulink'te Şekil 4.10'da görüldüğü gibi modellenmiştir.

$$\eta_{bat} = \frac{V_{oc} \times |I_{bat}| - I_{bat}^2 \times R_{iç}}{V_{oc} \times |I_{bat}|} \quad (4.10)$$



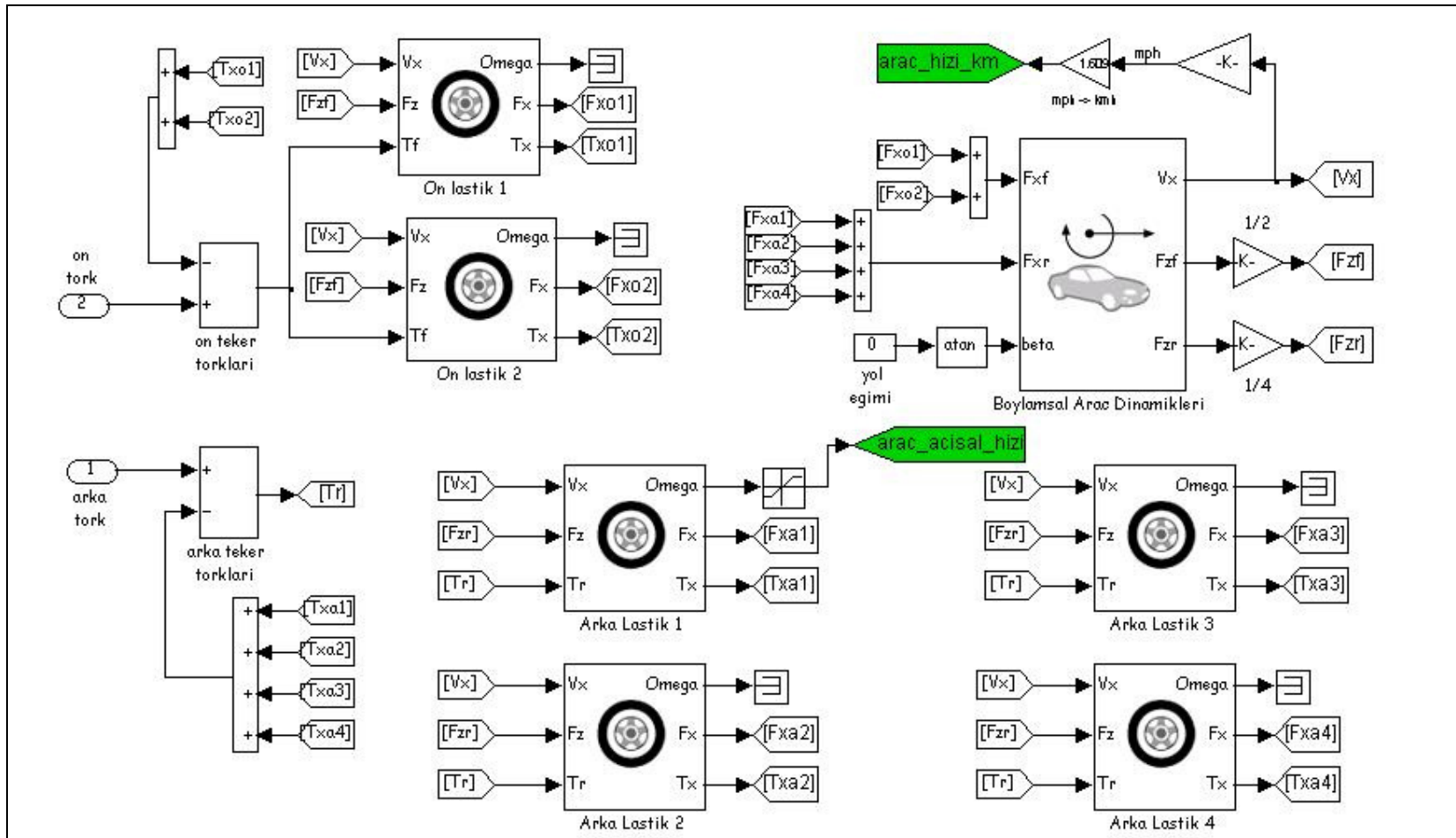
Şekil 4.10 : Batarya Simulink modeli



#### 4.5 Araç Modeli

Modellemede kullanılan araç modeli, aracın boylamsal dinamikleri ve lastik modellerinden oluşmaktadır. Boylamsal araç modelinde giriş akslardaki toplam boylamsal kuvvetler ve yol eğim açısı iken çıkış araç hızı ve lastiklere etkiyen kuvvetlerdir [15]. Lastiklerin yola aktardıkları kuvveti hesaplamak için ise lastik modelinden yararlanılmaktadır. Bu modelin girişinde lastiğe uygulanan normal kuvvet, aksa uygulanan tork ve araç hızı bulunurken, çıkışta ise lastiğin açısal hızı ve yola uygulanan tork ve kuvvet elde edilir.

Araç modelinin Simulink ortamındaki genel görünümü Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11 : Araç Simulink modeli

Boylamsal araç dinamiklerinin modellenmesinde Newton'un ikinci yasasından faydalanılır.

$$F_{top} = F_{xf} + F_{xr} - F_r - F_{aero} - mg \sin(\theta) = m \times a \quad (4.11)$$

Burada  $F_{xf}$  ve  $F_{xr}$  ön ve arka lastiklerdeki toplam itici kuvvet,  $F_r$  araçtaki toplam yuvarlanma direnci,  $F_{aero}$  aerodinamik direnç kuvveti,  $g$  yerçekimi ivmesi,  $m$  aracın kütlesi,  $\theta$  yol eğimi,  $a$  ise aracın ivmesidir.

Yuvarlanma direnci kuvvetinin denklemi (4.12) de verilmiştir:

$$F_r = fr \times F_z \times \cos(\theta) \quad (4.12)$$

Burada  $fr$  yuvarlanma direnci katsayısı,  $F_z$  lastiklere etkiyen toplam normal kuvvettir. Aerodinamik direnç kuvveti hesabı, (4.13) denklemine göre yapılır:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho v^2 c_d A \quad (4.13)$$

Bu eşitlikte  $\rho$  hava yoğunluğu,  $v$  araç hızı,  $c_d$  direnç katsayısı,  $A$  ise aracın ön yüzey alanıdır.

Lastik modelinde giriş olarak kullanılacak olan normal kuvvetlerin hesaplanmasında; yol eğim açısı, ivme ve aerodinamik direnç kuvvetinden faydalanılır. Ön ve arka lastiklere uygulanacak normal kuvvetler (4.14) denklemlerine göre hesaplanır.

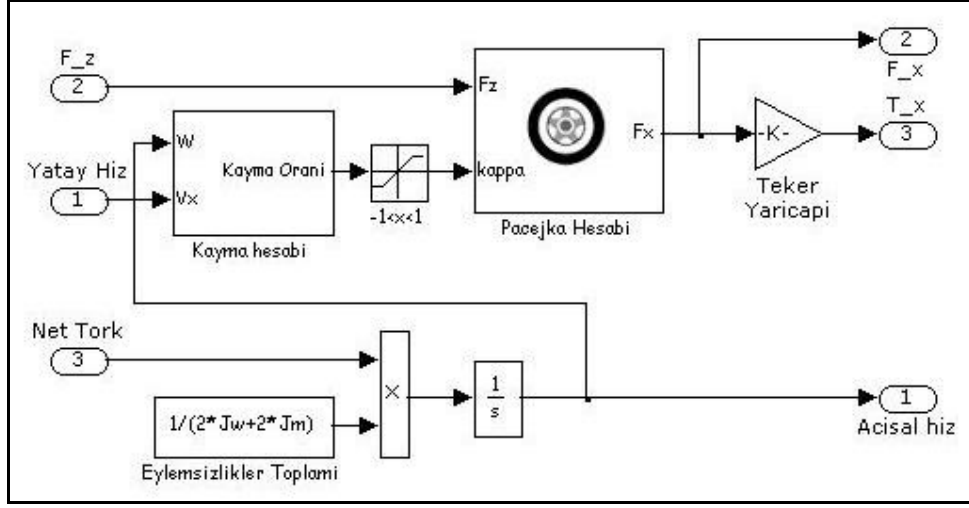
$$\begin{aligned} F_{xf} &= \frac{h}{a+b} \left( \frac{mg \cos(\theta)b}{h} - F_{aero} - mg \sin(\theta) - ma \right) \\ F_{xr} &= \frac{h}{a+b} \left( \frac{mg \cos(\theta)a}{h} + F_{aero} + mg \sin(\theta) + ma \right) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Burada kullanılan sembollerin anlamları şöyledir:

- **h:** ağırlık merkezinin yerden yüksekliği [m]
- **a:** ağırlık merkezinin ön aksa olan yatay uzaklığı [m]
- **b:** ağırlık merkezinin arka aksa olan yatay uzaklığı [m]

Aracın ön aksına iki, arka aksına ise dört adet tekerlek bağlıdır. Bu durumda lastiklere uygulanan normal kuvvetler uygun şekilde bölünmelidir. Lastiklerin

Simulink ortamında tasarlanan genel modeli Şekil 4.12'deki gibidir. Örnek olarak, ön lastiğin modeli verilmiştir.



Şekil 4.12 : Lastik Simulink modeli

Her iki aks için de modelleme yapılır iken, lastik modelinin girişine uygulanan tork değerinden tekerleklerin açısız dönüş hızı hesaplanmalıdır. Bunun denklemi ise (4.15) te verildiği gibidir.

$$w = \int \frac{T}{J} dt \quad (4.15)$$

Burada  $J$ , aracın aksına etkiyen döner eylemsizlik momentlerinin toplamıdır. Ön aksa iki adet tekerleğin ve iki adet tekerlek motorun eylemsizlikleri etkinken, arka aksa eylemsizlik uygulayan tekerlek sayısı dördür.

Lastik modelinde sonraki aşamada kayma oranı hesaplanır. Kayma oranı, tekerleğin hızı ile aracın hızının arasındaki fark kullanılarak hesaplanır.

$$kayma\_orani = \frac{v - w \times r}{v} \times 100 \quad (4.16)$$

Bu denklemde  $v$  araç hızı,  $w$  tekerlek açısız hızı ve  $r$  tekerlek yarıçapıdır.

Lastiklere uygulanan normal kuvvet ve kayma oranı bilindiğine göre, Pacejka formülüne göre boylamsal kuvvet değerleri hesaplanabilir [16]. Modelde uygulanan boylamsal Pacejka formülü aşağıda verilmiştir.

$$F_x = D \sin(C \arctan(Bs - E(Bs - \arctan(Bs)))) \quad (4.17)$$

$$C = a_0 \quad (4.18)$$

$$D = a_1 F_z^2 + a_2 F_z \quad (4.19)$$

$$B = \frac{a_3 F_z^2 + a_4 F_z}{e^{a_5 F_z} CD} \quad (4.20)$$

$$E = a_6 F_z^2 + a_7 F_z + a_8 \quad (4.21)$$

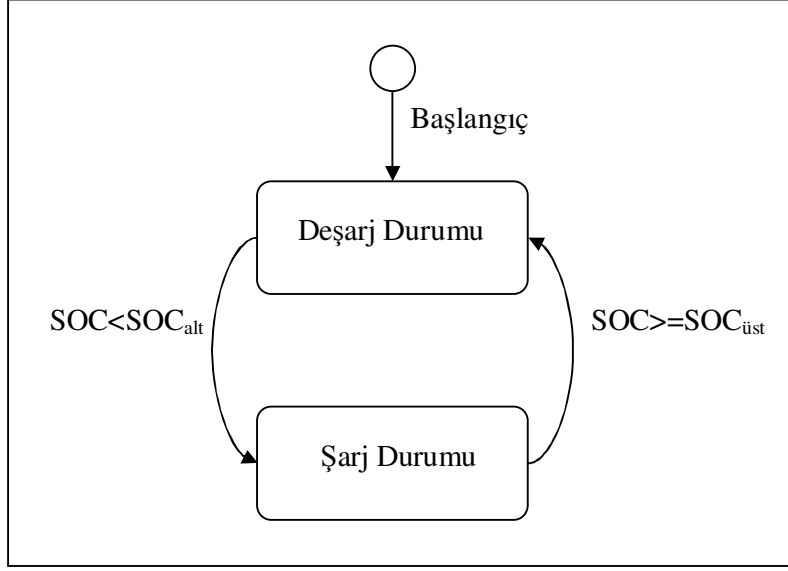
Burada  $a_x$  değişkenleri Pacejka katsayıları olup, sabit değerlerdir.  $F_z$  lastiğe uygulanan normal kuvvet,  $F_x$  boylamsal kuvvettir,  $s$  de kayma oranıdır.

#### 4.6 Güç Kontrol Ünitesi Modeli

Üzerinde çalışılan seri hibrit araç modelinde amaç, bataryaların şarj durumunu belli bir seviyede tutarak yakıt tüketimini mümkün olan en düşük seviyeye çekmektir. Bu amaçla, aç-kapa kontrol stratejisinin bir türevi uygulanmıştır. Aç-kapa kontrol stratejisini uygularken öncelikle içten yanmalı motor çalıştığında en verimli olacağı nokta bulunmalıdır. Bu noktanın bulunması amacıyla, girişe uygulanan devir ve tork değerleri için iki makinanın da verimini hesaplayan bir model oluşturulmuş ve generatör ve içten yanmalı motorun çalışabileceği aralıklardaki hız ve tork değerleri için bu model koşturulmuştur. Bu optimizasyon için oluşturulan model Şekil A.1’de, arama algoritması ise Ek A’da verilmiştir. Algoritma sonucunda elde edilen en uygun devir değeri 2375 rpm, tork değeri ise 212 Nm olmuştur.

Bataryanın doluluk oranı belirlenen alt seviyenin altına düştüğünde, içten yanmalı motor hesaplanan en uygun hız ve tork değerleri ile çalıştırılır. Doluluk seviyesi belirlenen üst seviyeye ulaştığında ise içten yanmalı motor kapatılır. Bu açma kapama durumunun çok sık olmasının engellenmesi gerekmektedir. Bunun sebebi, her ne kadar içten yanmalı motorun geçici hal dinamikleri modellenmese de, pratikte yüksek frekansta açma kapama işleminin gerçekleşmesinin olanaksız olmasıdır. Bu amaçla durum akış grafiğinde küçük bir değişiklik yapılması gerekir.

Aç-kapa kontrol stratejisinin temel şeması Şekil 4.13’te verilmiştir.

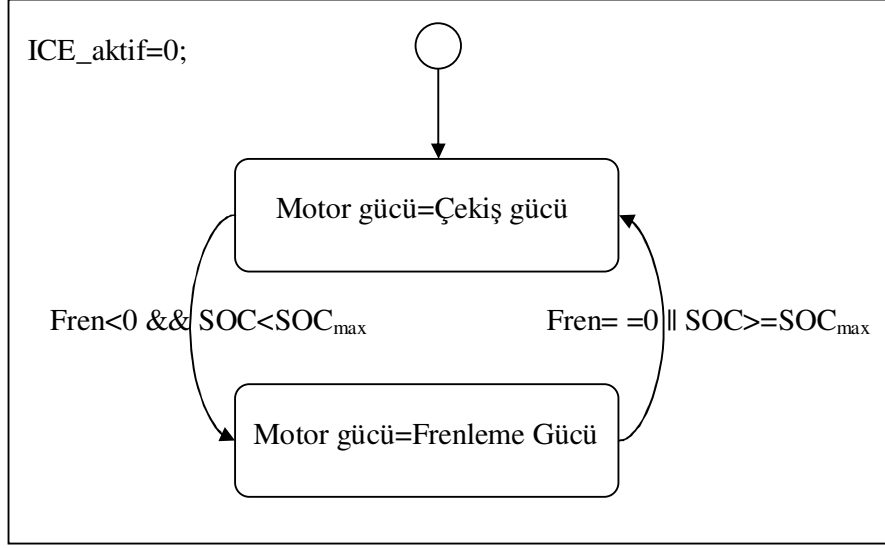


**Şekil 4.13 :** Aç-kapa kontrol stratejisi

#### 4.6.1 Deşarj durumu

Bataryaların deşarj durumuna geçmesi için şarj durumunun üst limite ulaşması gerekmektedir. Deşarj durumunda içten yanmalı motor dolayısıyla da generatör kapalı konumdadır. Motorlar ise çekiş kuvvetini istenen ölçüde sağlar. Sürücüden fren isteği gelmesi halinde akışta kesme olur ve motorlar regeneratif frenleme yaparak bataryaları şarj ederler. Regeneratif frenlemenin aktif olması için bataryaların güvenlik üst limitine ulaşmaması gerekmektedir. Bu limit, regeneratif frenlemenin aşırı miktarda olması durumunda bataryaların istenilenden fazla dolmasını engellemek amacıyla belirlenmiştir. Fren isteği kesildiğinde ya da batarya doluluğu güvenlik üst limitine ulaştığında frenleme kesmesi sona erer.

Deşarj durumu aynı zamanda akış diyagramında başlangıç durumudur. Şekil 4.14'te deşarj durumunun akış diyagramı verilmiştir.



**Şekil 4.14** : Deşarj durumu akış şeması

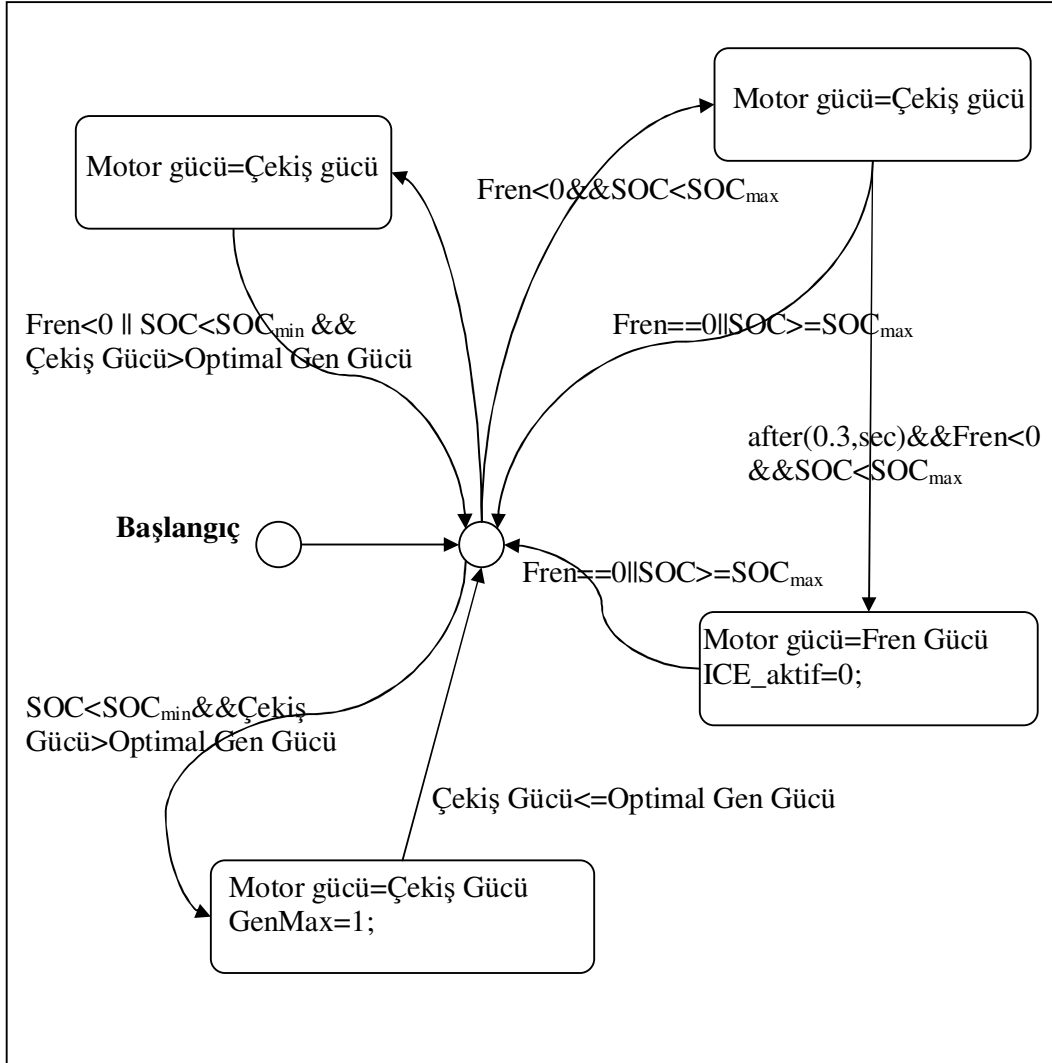
#### 4.6.2 Şarj durumu

Batarya şarj durumu alt limite ulaştığında şarj durumuna geçilir. Fren kesmesi haricinde, şarj durumu boyunca içten yanmalı motor ve generatör çalışır durumdadır. Çekiş motorları yine kendilerinden istenen gücü bataryadan alırlar. Bataryadan istenen güç, generatörün sağladığı güçten büyük olursa, batarya boşalmaya devam eder. Buna belli bir süre tolerans gösterilebilir ancak bataryanın alt güvenlik sınırına ulaşırsa bir önlem almak gereklidir. Bataryanın aşırı miktarda boşalmasını engellemek için, şarj gücünün artırılması gerekir. Bu durumda kullanılmak üzere, içten yanmalı motor ve generatör çifti için yüksek güçlü bir çalışma noktası belirlenmelidir. Bu nokta belirlenirken içten yanmalı motorun yakıt tüketimi de olabildiğince dikkate alınmıştır. Bu optimizasyon için kullanılan Simulink modeli ve arama algoritması Ek A'da verilmiştir. Arama sonucuna göre, bataryanın güvenlik alt sınırına ulaşması halinde içten yanmalı motorun çalışacağı hız 2100 rpm, tork ise 360 Nm'dir.

Bataryadan istenen çekiş gücü optimal generatör gücünden az duruma gelirse içten yanmalı motor yeniden optimal noktasında çalışmaya devam eder.

Sürücüden fren isteği gelmesi halinde bataryalar da üst güvenlik limitinden daha az dolu ise frenleme kesmesi uygulanır. Frenleme durumunda içten yanmalı motor kapatılır ve motorlar regeneratif frenleme yaparlar. Frenleme kesildiğinde içten yanmalı motor tekrar çalıştırılır ve motorlar çekiş gücünü sağlarlar. Frenleme

kesmesi durumunda içten yanmalı motorun sık açılıp kapanmasını engellemek için, frenleme isteği geldikten sonra kısa bir süre bekleme durumuna geçilmesi, daha sonra frenleme sürüyorsa kesme durumuna geçilmesi sağlanmıştır. Böylece benzetim kaynaklı çok kısa süreli frenlemelerin içten yanmalı motoru açıp kapatmasının önüne geçilmiştir. Şarj durumunun akış diyagramı Şekil 4.15'te görüldüğü gibidir.



Şekil 4.15 : Şarj durumu akış şeması

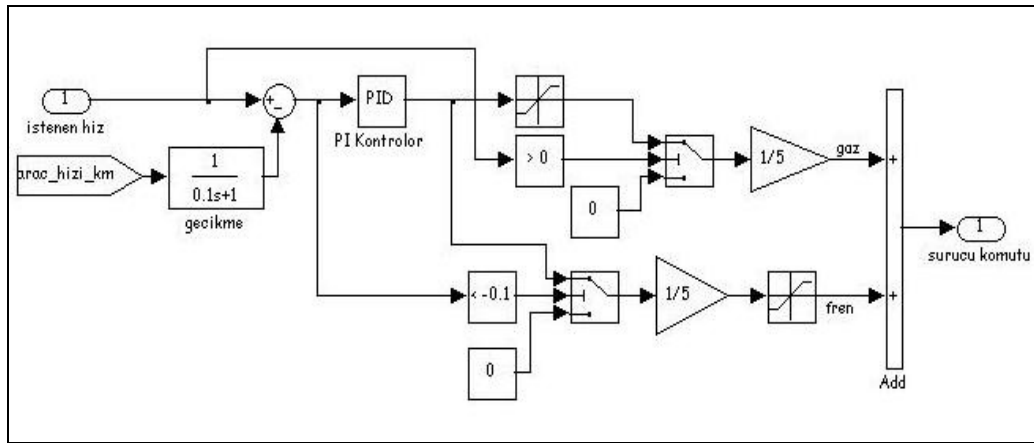
#### 4.7 Sürücü Modeli

Modellemede kullanılan sürücü modelinin görevi, referans hız değeri ile aracın hız değerini karşılaştırarak gaz ya da fren işareti üretmesidir. Bu çalışmada sürücü, basit bir PI kontrolör ile modellenmiştir. Böylece araç hızı sürekli hal hatası olmadan referans hız değerini izleyebilir [17].



Sürücüden istenen referans değer eğer sıfırdan büyük ise gaz pedalı girişi mevcut olacaktır. Gaz isteğinin olması için ayrıca referans değerinin mevcut hız değerinden de büyük olması gerekmektedir. Bu durumda [0,1] aralığına ölçeklenen bir gaz isteği üretilir.

Referans değerinin araç hız değerinden küçük olması durumunda frenleme yapılması gerekir ancak frenleme kesmesindeki daha önce anlatılan problem bilindiğinden, bu hız farkının bir eşikten fazla olması durumunda frenleme isteği üretilmektedir. Fren isteği de [-1,0] aralığında ölçeklendirilip motor modeline iletilir. Sürücü modelinin Simulink şeması Şekil 4.16'da görüldüğü gibidir.



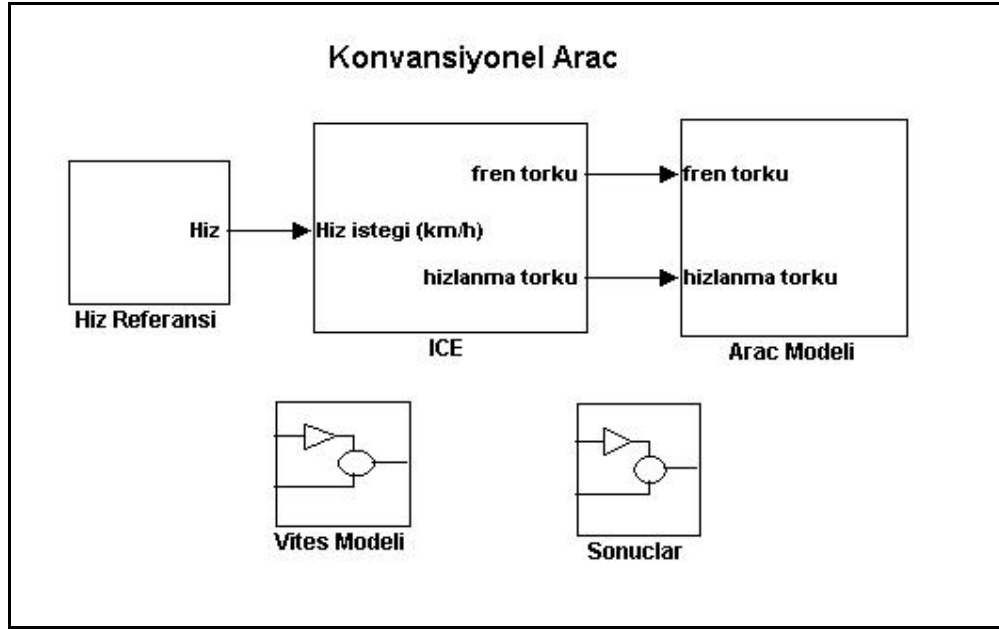
Şekil 4.16 : Sürücü Simulink modeli



## 5. SİMÜLASYONLAR

### 5.1 Konvansiyonel Durum

Modellenen aracın performansını test etmek ve yakıt tüketimindeki iyileştirmeleri gözleyebilmek için bir konvansiyonel araç modeli oluşturulmuştur. Konvansiyonel araç modeli sürücü modeli, içten yanmalı motor modeli, vites kutusu modeli ve araç dinamikleri modelinden oluşmaktadır. Bu sayılanlardan, seri hibrit araçta bulunmayan modeller içten yanmalı motor ve vites kutusu modelidir. Konvansiyonel araç modelinin genel görünümü Şekil 5.1’de verilmiştir.



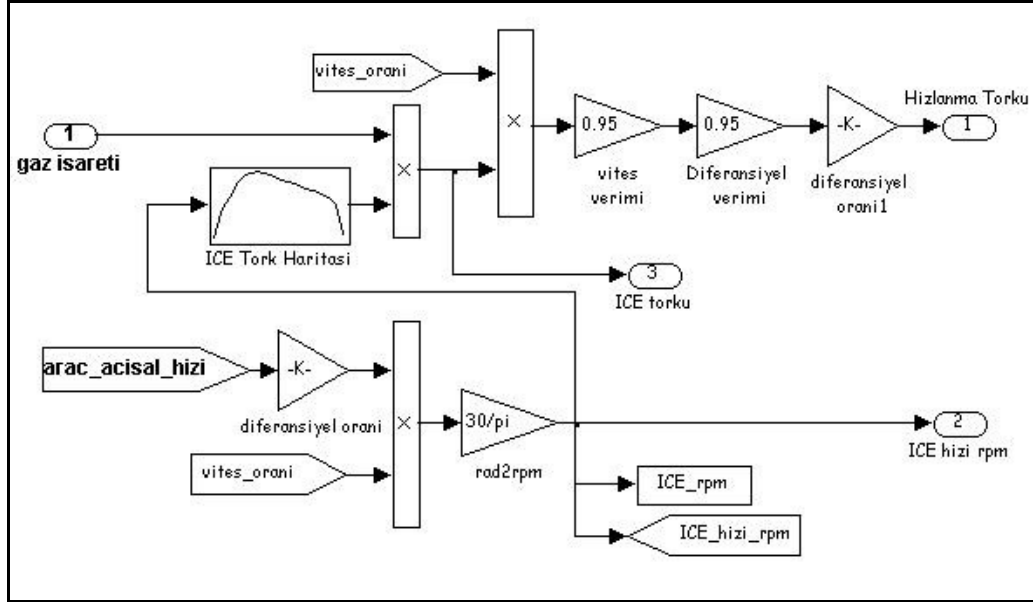
Şekil 5.1 : Konvansiyonel araç Simulink genel modeli

Bu modelde, araca gerekli olan tüm tork içten yanmalı motor tarafından sağlanmakta olup, mekanik frenleme ile de negatif tork istekleri karşılanmaktadır.

#### 5.1.1 İçten yanmalı motor modeli

Konvansiyonel araç için oluşturulan içten yanmalı motor modelinin çalışma prensibi, Şekil 5.2’de görüldüğü gibi, seri hibrit modeldeki çekiş motorları ile aynıdır. Önemli fark, sistemdeki diferansiyel ve vites kutusunun getirdiği kayıplardır. Modele giren

gaz sinyali, o anki verilebilecek en yüksek torkun hangi oranda araca verileceğini belirler. Burada içten yanmalı motor, statik tork hız haritası ile modellenmiştir. Yakıt tüketim hesapları yine seri hibrit araçta yapıldığı gibidir.



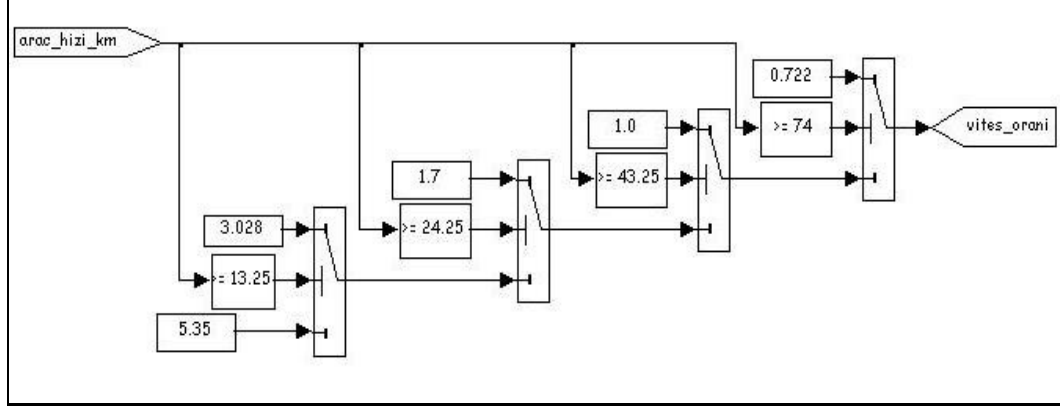
Şekil 5.2 : İçten yanmalı motor Simulink modeli

Konvansiyonel araç modelinde frenleme mekaniktir. Araca uygulanacak fren torkunun hesaplanmasında oransal ifadeler kullanılmıştır. Kontrol işaretinin uygun oranda kuvvetlendirilmesi ile frenleme torku hesaplanabilir [18].

### 5.1.2 Vites modeli

Tekerlek motorlu seri hibrit araçlarda mevcut olmayan vites kutusu ve diferansiyel gibi aktarma organları konvansiyonel araçlarda bulunmaktadır. Diferansiyelin sisteme etkisi içten yanmalı motor modelinde kazanç ve kayıp bloklarıyla temsil edilmiştir. Vites kutusu ise yine bir ortalama kayıp bloğu ve bir akış diyagramı ile modellenmiştir.

Vites değiştirme işleminin içten yanmalı motorun en yüksek güç noktasında yapılması gerekir [11]. Böylece araç daha verimli çalışmış olur. İçten yanmalı motorun vites değiştirme noktalarını hesaplamak için konvansiyonel araç modeline bir basamak giriş uygulanmıştır ve motorun en yüksek güce ulaştığı noktadaki araç hızında vites artırılması tasarlanmıştır. Buna göre elde edilen vites değiştirme hızları ve vites oranlarının görülebileceği model diyagramı Şekil 5.3'teki gibidir.



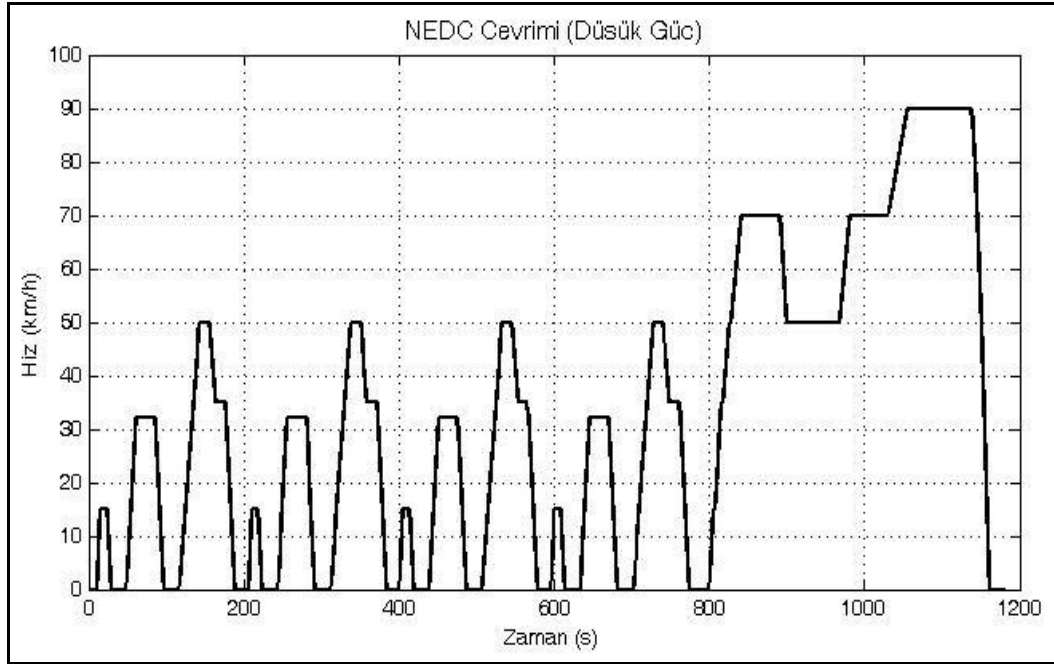
Şekil 5.3 : Vites Simulink modeli

### 5.1.3 Sürüş çevrimleri

Araçların performansını belirlemek için uluslararası kullanımı olan çevrimler oluşturulmuştur. Zamana bağlı hız profili şeklinde olan bu çevrimler takip edilirken gösterilen performans, araçların tasarım aşamasında yardımcı olmaktadır.

Literatürde birçok çevrim mevcuttur. Örneğin; Federal Test Prosedürü (FTP-75) Amerika Birleşik Devletleri'nde sık kullanılan bir çevrimken Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi (NEDC) Avrupa'da yaygın olarak kullanılan bir çevrimdir.

Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi'nin ilk 780 saniyelik kısmı sık dur kalk yapılan şehir içi trafiği benzetimi için uygunken, sonraki kısım yüksek hızda seyir benzetimi için tasarlanmıştır. Bu tezde modellenmesi yapılan minibüs daha çok şehir içi kullanım için tasarlandığından, ECE-15 adı verilen bu çevrimin ilk kısmı benzetimlerde kullanılmıştır.



**Şekil 5.4 :** Düşük güçlü araçlar için NEDC çevrimi

NEDC çevriminin ikinci bölümünün düşük güçteki araçlar için olan sürümü Şekil 5.4'te gösterilmiştir.

## 5.2 Tek Çekiş Motorlu Seri Hibrit Elektrikli Araç Durumu

Simülasyonların ikinci bölümünde, performans karşılaştırmasının daha iyi yapılabilmesi amacıyla, tek çekiş motorlu seri hibrit araç modelinin benzetimi yapılmıştır. Performans karşılaştırmasının daha sağlıklı yapılabilmesi için, tekerlek motorların toplam gücüne eşdeğer bir motor çekiş motoru olarak seçilmiştir. Simülasyon sonucunda yakıt tüketim değerleri, araç bileşenlerinin dinamikleri ve verimleri gözlenmiştir. Seri hibrit araç benzetiminde kullanılan model, Şekil 4.1'de daha önce verilmiş olan tekerlek motorlu model ile aynı genel görünüme sahiptir.

## 5.3 Tekerlek Motorlu Seri Hibrit Elektrikli Araç Durumu

Simülasyonların üçüncü ve son bölümünde tekerlek motorlu seri hibrit aracın belirtilen sürüş çevrimi için benzetimi yapılmıştır. Aracın performans değerleri, motorların çalışma biçimleri, bileşen verimleri ve yakıt tüketimi gözlenmiştir.

#### 5.4 Simülasyon Sonuçları

Simülasyonlarda kullanılan Temsa Prestij marka midibüsün teknik özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Çizelge 5.2’de ise araçta kullanılan bazı bileşenlerin değerleri verilmiştir.

**Çizelge 5.1 : Temsa Prestij teknik özellikleri**

<b><u>Parametre</u></b>	<b><u>Değer</u></b>	<b><u>Birim</u></b>
Araç kütlesi (m)	7135	kg
Ön yüzey alanı (A)	6.216	m <sup>2</sup>
Tekerlek yarıçapı (Re)	0.391	m
Ağırlık merkezinin yerden yüksekliği (h)	1.096	m
Ağırlık merkezinin ön aksa olan yatay uzaklığı (a)	2.112	m
Ağırlık merkezinin arka aksa olan yatay uzaklığı (b)	1.308	m
Diferansiyel oranı	5.714	

**Çizelge 5.2 : Modellenen aracın bileşen değerleri**

<b><u>Parametre</u></b>	<b><u>Değer</u></b>	<b><u>Birim</u></b>
Hava sürüklenme katsayısı (Cd)	0.7	
Yuvarlanma direnci (fr)	0.016	
Alt ısı değeri (Hlhv)	43100	J/g
Yakıt yoğunluğu (dFuel)	0.832	g/cm <sup>3</sup>
İçten yanmalı motor döner eylemsizliği (Je)	0.028	kg.m <sup>2</sup>
Tekerleklerin döner eylemsizliği (Jw)	1	kg.m <sup>2</sup>
Çekiş motorlarının döner eylemsizliği (Jm)	0.1	kg.m <sup>2</sup>
Diferansiyelin döner eylemsizliği (Jd)	0.03	kg.m <sup>2</sup>
Tekerlek motorların iç dişli oranı	4.114	
Arka motorların dişli oranı	8.5	
Generatör dişli oranı	2	

Konvansiyonel araçların hibritleştirilmesi işleminde araca eklenen bataryalar, aracın toplam kütlesini artıracaktır. Örneğin bu tezde kullanılan batarya paketi yaklaşık olarak 225 kg ekstra ağırlık anlamına gelmektedir [14]. Ayrıca sürüş çevrimine eklenen generatör ve motorlar da sonradan eklenen ağırlığı artırmaktadır. Araç şasisi fabrikada tasarlanırken toplam ağırlığın belli sınırları geçmeyeceği varsayılır. Bu

durumda bataryaların ve elektrik makinalarının getirdiği ağırlığın dengelenmesi için hibritleştirilen aracın içerisindeki koltuk gibi aksesuarlar kaldırılarak araç hafifletilir.

Bu tez çalışmasında, tek çekiş motorlu seri hibrit elektrikli araca eklenen ve araçtan çıkarılan ağırlıkların birbirini dengelediği varsayılmıştır. Ancak tekerlek motorlu seri hibrit elektrikli araçlarda diferansiyel, vites kutusu, ön ve arka aks gibi aktarma organlarına ihtiyaç duyulmadığından bunlar sürüş sisteminden kaldırıldığında aracın ağırlığında önemli miktarda azalma meydana gelecektir. Öte yandan, tek çekiş motoru ve motor sürücüsüne göre dört adet motor-sürücü çifti, sistemin toplam ağırlığını artıracaktır. Ancak midibüs çapındaki bir araç göz önüne alındığında, bu farkın aktarma organlarının ağırlığına göre çok az olduğu söylenebilir.

Tüm bu anlatılanlar ışığında, tekerlek motor mimarisine sahip seri hibrit elektrikli araç modelindeki araç kütlesi ortalama bir rakam ile 500 kg daha hafif olacaktır. Ancak sadece diferansiyel ve vites kutusu kayıplarının etkisinin de gözlenmesi için aracın ağırlığının değişmediği varsayılarak da benzetim yapılacaktır.

Konvansiyonel araç, seri hibrit araç ve tekerlek motorlu seri hibrit araç için yapılan benzetim sonuçları sırasıyla Ek B, Ek C ve Ek D’de verilmiştir.

#### **5.4.1 Konvansiyonel durum için simülasyon sonuçları:**

Konvansiyonel durumda, aracın tüm tork gereksinimi içten yanmalı motor tarafından sağlanmaktadır. Batarya gibi ikincil bir enerji kaynağı bulunmadığından enerji tasarrufu ve depolanması söz konusu değildir.

Şekil B.1-5’ten görüldüğü gibi, içten yanmalı motorun verimliliği oldukça değişkendir ve ideal durumdan uzaktır. Yakıt tüketim değeri 1088mL’dir ve batarya doluluk oranı bu durumda değişim göstermez.

#### **5.4.2 Tek çekiş motorlu seri hibrit araç durumu için simülasyon sonuçları**

Bu durumda; aracın çekişini tek bir motor sağlamaktadır ve enerji kaynağı dizel yakıt ve batarya enerjisidir. Batarya doluluk oranının değişim grafiği ve yakıt tüketim grafiği sırasıyla Şekil C.5 ve Şekil C.7’den gözlenebilir. İçten yanmalı motor en uygun noktasında çalıştırıldığından verim değeri en yüksek seviyededir.

Tek çekiş motoru ile sürülen seri hibrit araçlarda aktarma organları ve bunların verimsizlikleri söz konusu olduğundan elektrik motorunun harcayacağı güç daha



fazla olacaktır. Araç bileşenlerinin verimleri Şekil C.6'da zaman bölgesinde verilmiştir.

Toplam yakıt tüketimi bu durum için 930.5 mL değerindedir.

#### **5.4.3 Tekerlek motorlu seri hibrit araç durumu için simülasyon sonuçları**

Tekerlek motorlu seri hibrit araçlarda vites kutusu ve diferansiyel gibi aktarma organlarından tasarruf edildiğinden, aracın dinamikleri ve bileşen davranışları tek çekiş motorlu seri hibrit araca göre değişim gösterir.

ECE sürüş çevrimi ve iki farklı araç kütle değerleri için elde edilen batarya doluluk oranı değişim grafiği ve bileşen dinamikleri Şekil D.1-16'da verilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre toplam yakıt tüketimi ağır araç için 896.6mL, hafif araç için ise 848.9mL'dir. Bu sonuçlara göre, doğrudan tekerleklere monte edilen çekiş motorlarının sistem verimliliğini artırdığı görülmektedir.

İçten yanmalı motor bu modelde de en verimli noktasında çalışmıştır.



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tekerlek motorlu seri hibrit elektrikli araçların kontrolü konulu bu tez çalışmasında, öncelikle hibrit araç kavramı ve hibrit araçların çeşitlerinden bahsedilmiş, hibrit araçların bileşenlerinden bahsedilmiştir.

İstanbul Teknik Üniversitesi Mekatronik Eğitim ve Araştırma Merkezi kapsamında yürütülen tekerlek motorlu seri hibrit elektrikli araç projesi tanıtılmış, projede kullanılmak istenen bileşenler detaylandırılarak anlatılmıştır.

Sonraki aşamada, seri hibrit elektrikli araçlar için kontrol stratejilerine iki adet örnek verilmiştir. Bunlardan aç-kapa kontrol stratejisinin sisteme uygunluğundan bahsedilmiştir.

Tekerlek motorların seri hibrit araca getirdiği değişiklikleri gözlemek amacıyla konvansiyonel araç, seri hibrit elektrikli araç ve tekerlek motorlu seri hibrit elektrikli aracın modellemesi MATLAB Simulink ortamında yapılmıştır.

Bu çalışmada tekerlek motorların seri hibrit elektrikli araçların mimarisine getirdiği değişikliklerin araç performansına etkileri ortaya konmuştur ve benzetimi yapılan mimariler için yakıt tüketim değerleri karşılaştırılmıştır. Aktarma organlarının verimsizliğinin yakıt tüketimine etkisi gözlemlenmiştir.

İçten yanmalı motorun en uygun çalışma noktası bulunurken, yakıt tüketiminin yanı sıra çevreye zararlı gazların salınımının da en aza indirilmesi bir tasarım ölçütü olabilir. Öte yandan, salınımların azaltılması yakıt tüketiminin artmasına neden olabilir.

Ayrıca, sürücü modelinde kullanılan kontrolör daha karmaşık ve gerçek hayattaki durumları yansıtan şekilde geliştirilerek tasarlanabilir. Güç kontrol ünitesi bloğu, araç bileşenlerinin daha verimli çalışmasını sağlayacak şekilde yeniden yapılandırılabilir.

İleride yapılacak çalışmalar, tekerlek motorlu seri hibrit araçların iki eksenli çalışması ve bu çalışmalar sırasında çekiş kontrol, ABS ve fren dengesi gibi uygulamaların geliştirilmesi ekseninde olmalıdır.



## KAYNAKLAR

- [1] **Emadi, A., Ehsani, M., Miller, J. M.,** 2004. *Vehicular Electric Power Systems—Land, Air, and Space Vehicles*, Marcel Dekker, New York.
- [2] **Chan, C. C., Wong, Y. S.,** 2004. Electric vehicles charge forward, *IEEE Power Energy Mag.*, **Vol.2**, No.6, pp.24-33.
- [3] **Chan, C. C.,** 1993. An overview of electric vehicle technology, *Proc. of the IEEE*, **Vol.81**, No.9, pp.1202-1213.
- [4] **Ehsani M., Gao Y., Gay S., Emadi A.,** *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design.* : CRC Press, 2005
- [5] **Loveday, E.,** (2010). Toyota's hybrid sales eclipse 2.5M mark, now climbing at 2,000 per day, AutoBlogGreen, Amerika Birleşik Devletleri. <http://green.autoblog.com/2010/07/02/toyotas-hybrid-sales-eclipse-2-5m-mark-now-climbing-at-2-000-p/>, alındığı tarih 10.09.2010.
- [6] **Url-1** <<http://www.historyofhybridcars.com/>>, alındığı tarih 08.09.2010.
- [7] **Chan, C. C., Chau, K. T.,** 2001. *Modern Electric Vehicle Technology*, Oxford Univ. Press, Londra, U.K.
- [8] **Emadi, A.,** 2005. *Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives*, CRC, Boca Raton, FL.
- [9] **Sezer, V.,** 2008. Paralel hibrit elektrikli aracın modellenmesi ve optimal kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [10] **Salmasi, R.,** 2007. Control strategies for hybrid electric vehicles: evolution, classification, comparison and future trends, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **Vol.56**, No.5, pp. 2393-2404.
- [11] **Çimen, M. A.,** 2010. Elektrikli ve seri hibrit elektrikli araçlarda simülasyon kullanarak kalıcı mıknatıslı senkron tahrik motoru kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [12] **Url-2** <<http://www.remyinc.com/docs/HVH250R4.pdf>>, alındığı tarih 11.09.2010.
- [13] **Url-3** <[http://www.dolcera.com/wiki/index.php?title=Hybrid\\_Electric\\_Vehicle\\_Battery\\_System](http://www.dolcera.com/wiki/index.php?title=Hybrid_Electric_Vehicle_Battery_System)>, alındığı tarih 20.06.2010.
- [14] **Url-4** <[http://www.dowkokam.com/resources/PL\\_301\\_SLPB60460330H\\_70Ah\\_Grade.pdf](http://www.dowkokam.com/resources/PL_301_SLPB60460330H_70Ah_Grade.pdf)>, alındığı tarih 23.06.2010.
- [15] **Rajamani, R.,** 2006. *Vehicle Dynamics and Control*, Springer-Verlag, Berlin, Almanya.
- [16] **Pacejka, E., Lidner, H., Bakker, L.,** 1989. A new tire model with application in vehicle dynamic studies, *Society of Automotive Engineers*, **No. 890087**, pp. 101-103.

- [17] **Kuo, B. C.**, 1982. *Automatic Control Systems*, Prentice-Hall, New Jersey, ABD.
- [18] **Biliroğlu, A. Ö.**, 2009. Seri hibrit elektrikli araçların modellenmesi ve kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

## **EKLER**

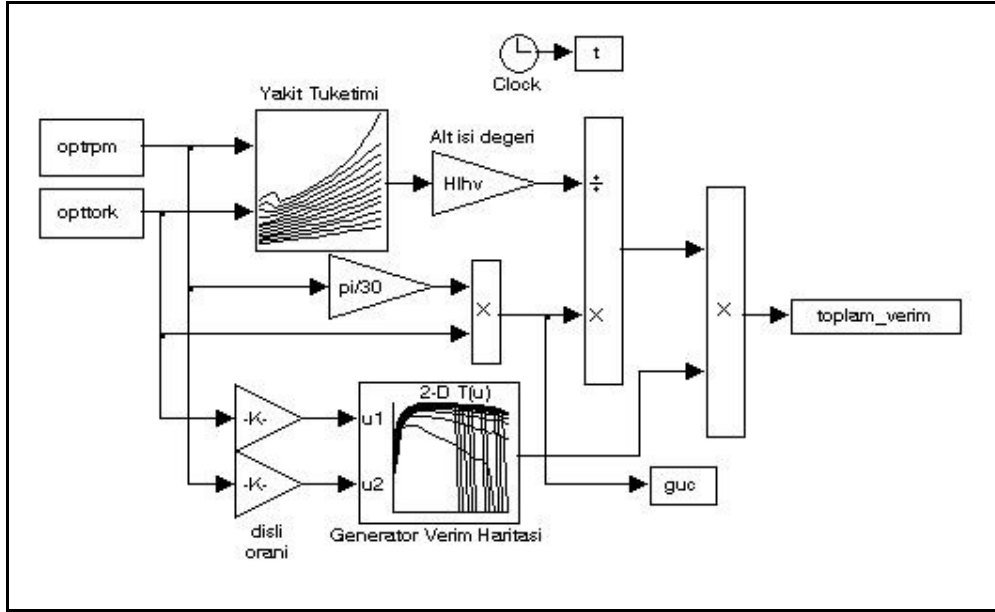
**EK A :** İçten yanmalı motorun en uygun çalışma noktalarının bulunmasında kullanılan model ve program kodları

**EK B :** Konvansiyonel araç modeli benzetim sonuçları

**EK C :** Tek çekiş motorlu seri hibrit elektrikli araç modeli benzetim sonuçları

**EK D :** Tekerlek motorlu seri hibrit elektrikli araç modeli benzetim sonuçları

## EK A



**Şekil A.1 :** İçten yanmalı motorun en uygun çalışma noktasının bulunması için yaratılan Simulink modeli

En uygun çalışma noktası hesabı için yazılan program kodu:

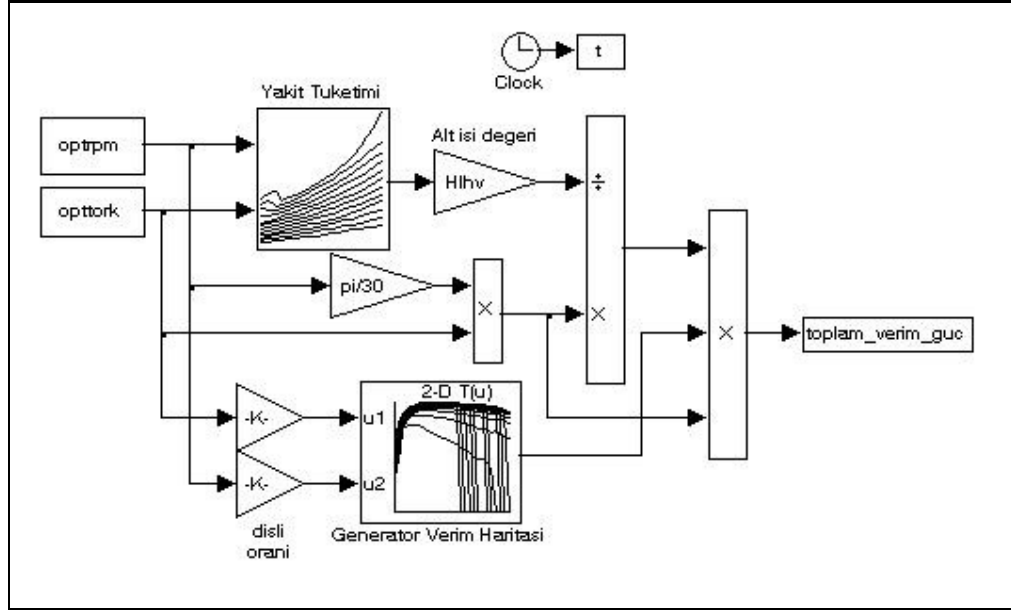
```
optrpm = 1000;  
opttork = 60;
```

```
sim('verim');
```

```
bestrpm = optrpm;  
besttork = opttork;  
bestverim = toplam_verim;
```

```
for opttork = 62:2:344  
for optrpm = 1010:10:3120  
sim('verim');  
if guc < 56000  
if toplam_verim > bestverim  
bestverim = toplam_verim;  
bestrpm = optrpm;  
besttork = opttork;  
end  
end  
end  
end
```





**Şekil A.2 :** İçten yanmalı motorun yüksek güçlü çalışma noktasının bulunması için oluşturulan Simulink modeli

En uygun yüksek güçlü çalışma noktası hesabı için yazılan program kodu:

```

optrpm = 1000;
opttork = 60;

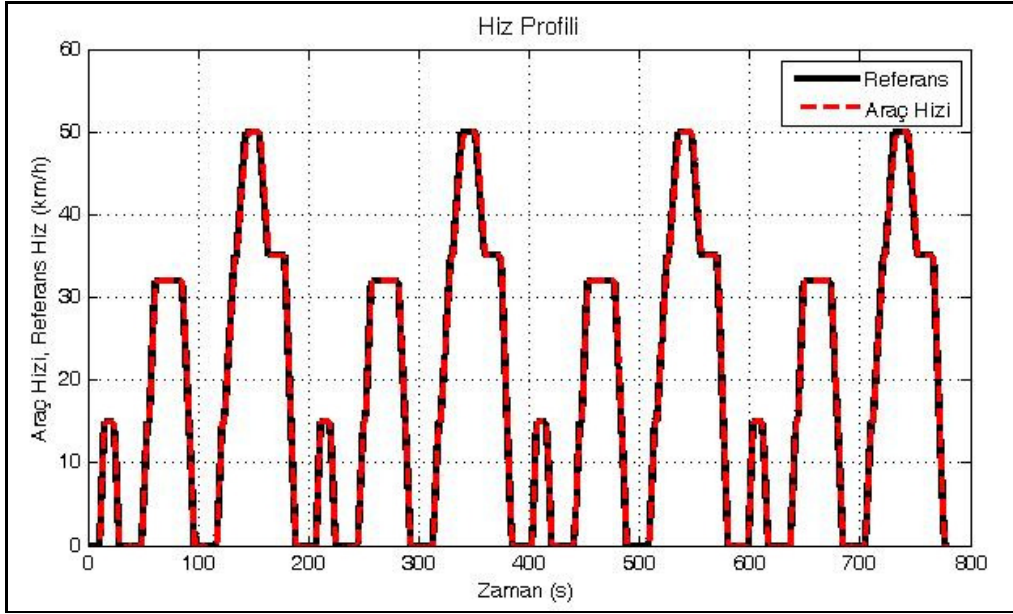
sim('verim');

bestrpm = optrpm;
besttork = opttork;
bestverim = toplam_verim_guc;

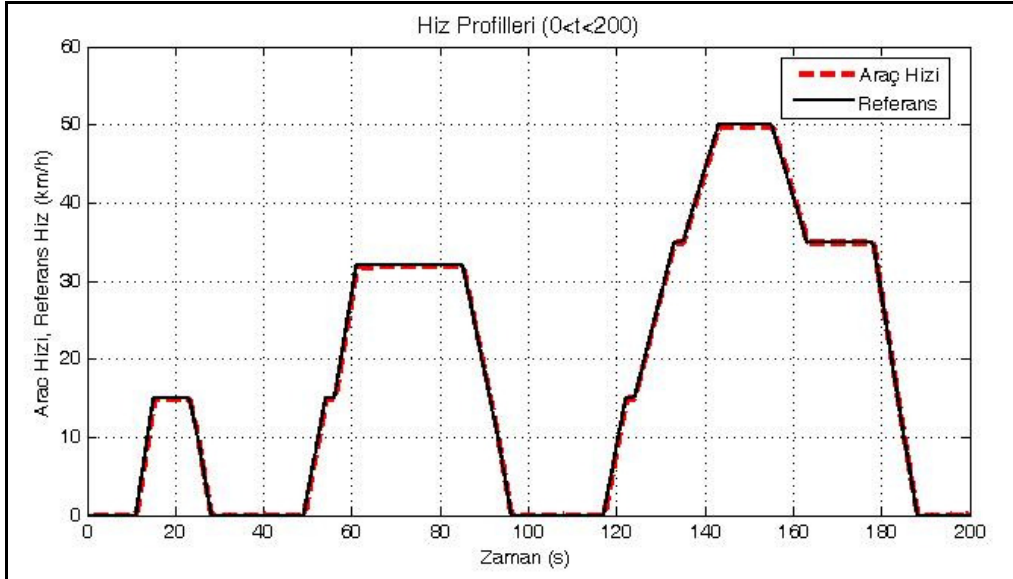
for opttork = 62:2:344
for optrpm = 1010:10:3120
sim('verim');
if guc < 80000;
if toplam_verim_guc > bestverim
bestverim = toplam_verim_guc;
bestrpm = optrpm;
besttork = opttork;
end
end
end
end

```

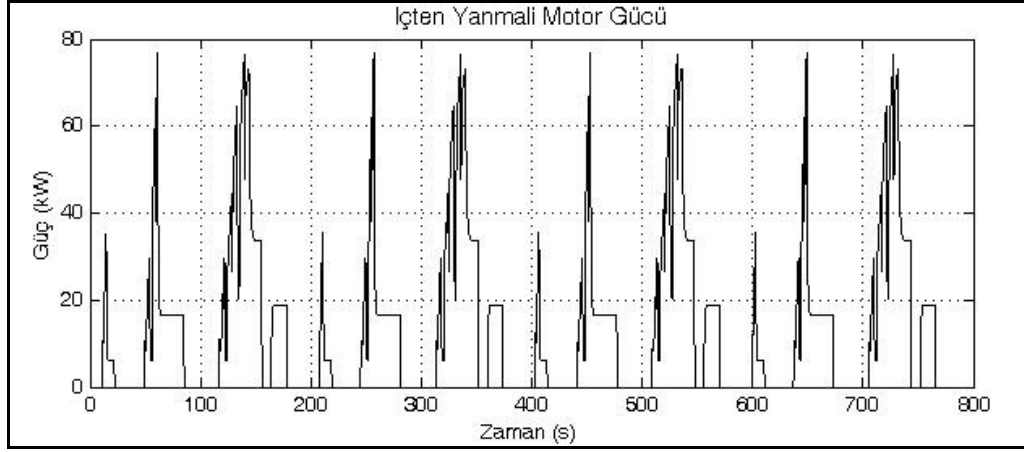
## EK B



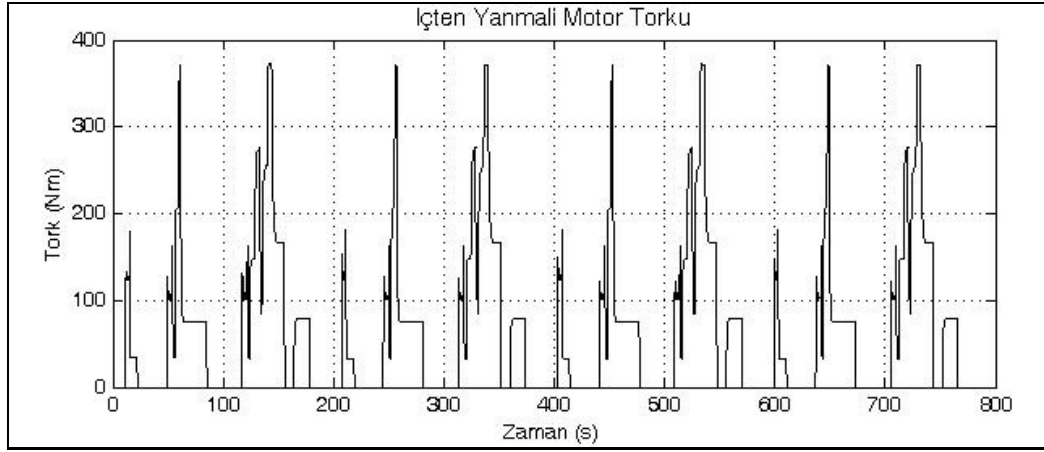
Şekil B.1 : Konvansiyonel araç modelinde araç hızı ve referans hız



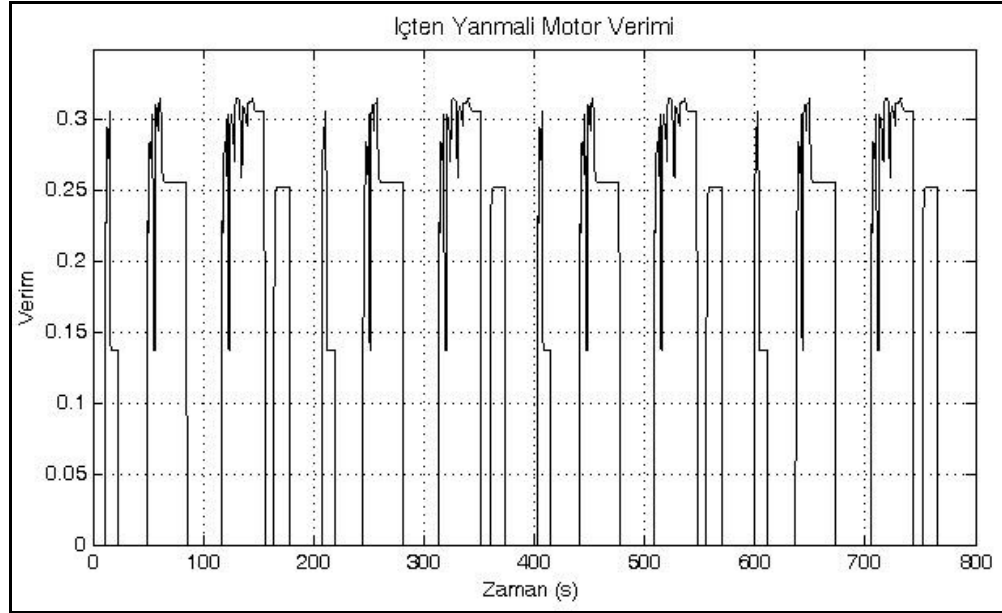
Şekil B.2 : Konvansiyonel araç modelinde araç hızı ve referans hız (0<t<200)



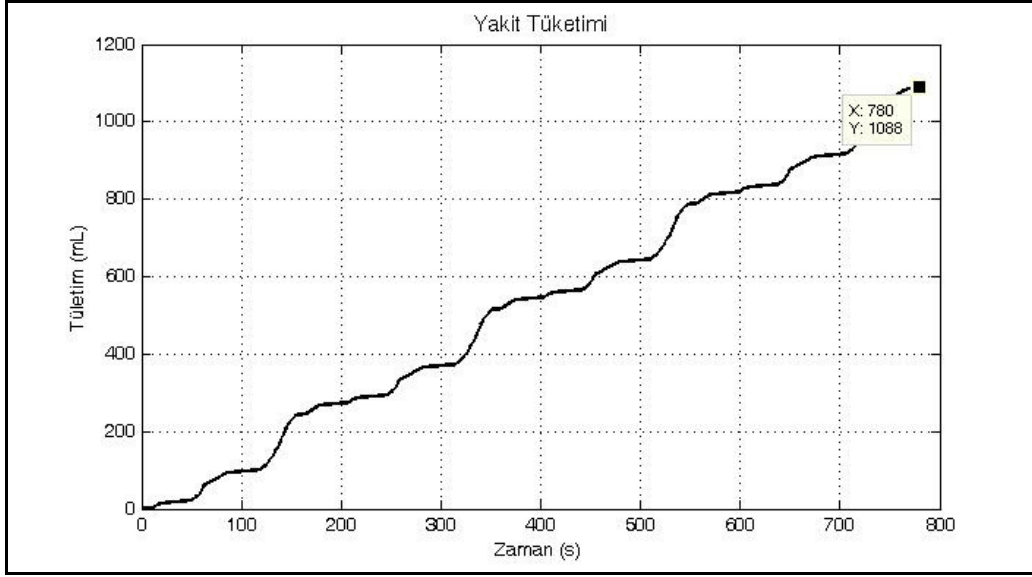
Şekil B.3 : Konvansiyonel araç modelinde ICE gücü



Şekil B.4 : Konvansiyonel araç modelinde ICE torku

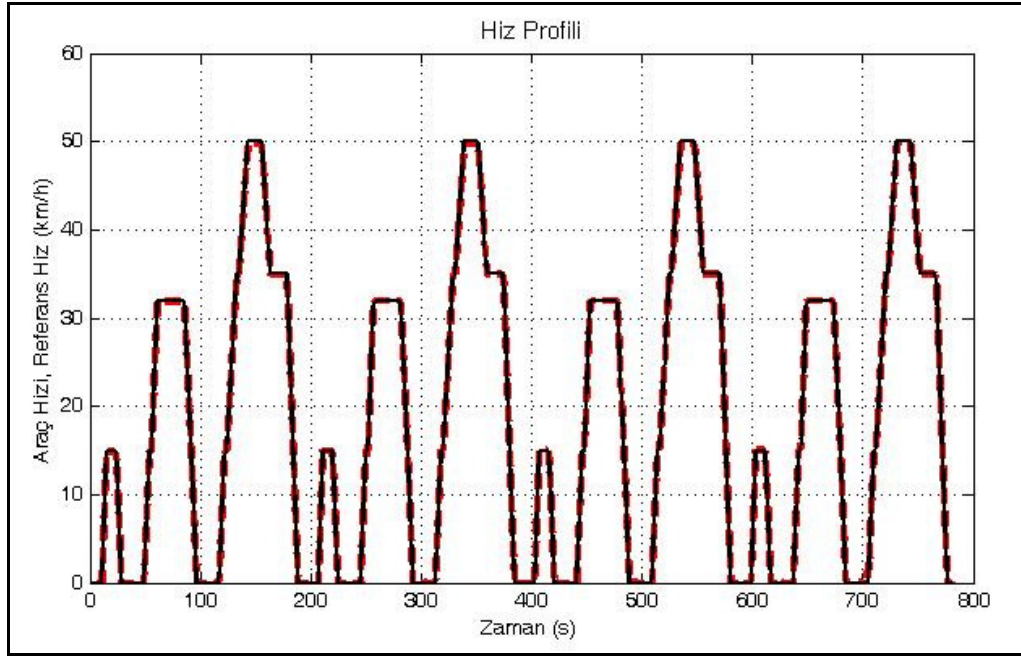


Şekil B.5 : Konvansiyonel araç modelinde ICE verimi

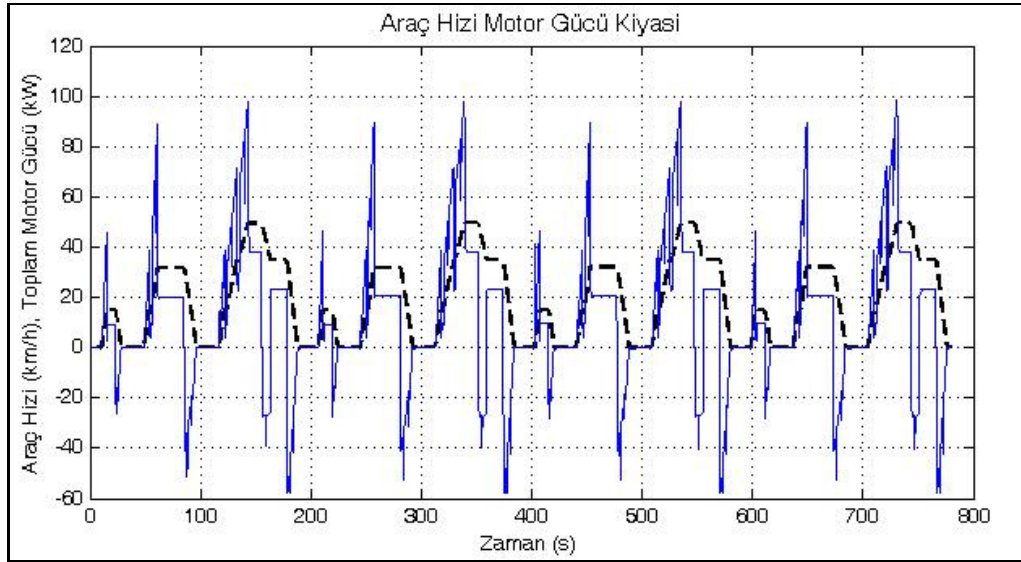


**Şekil B.6 :** Konvansiyonel araç modelinde ICE yakıt tüketimi

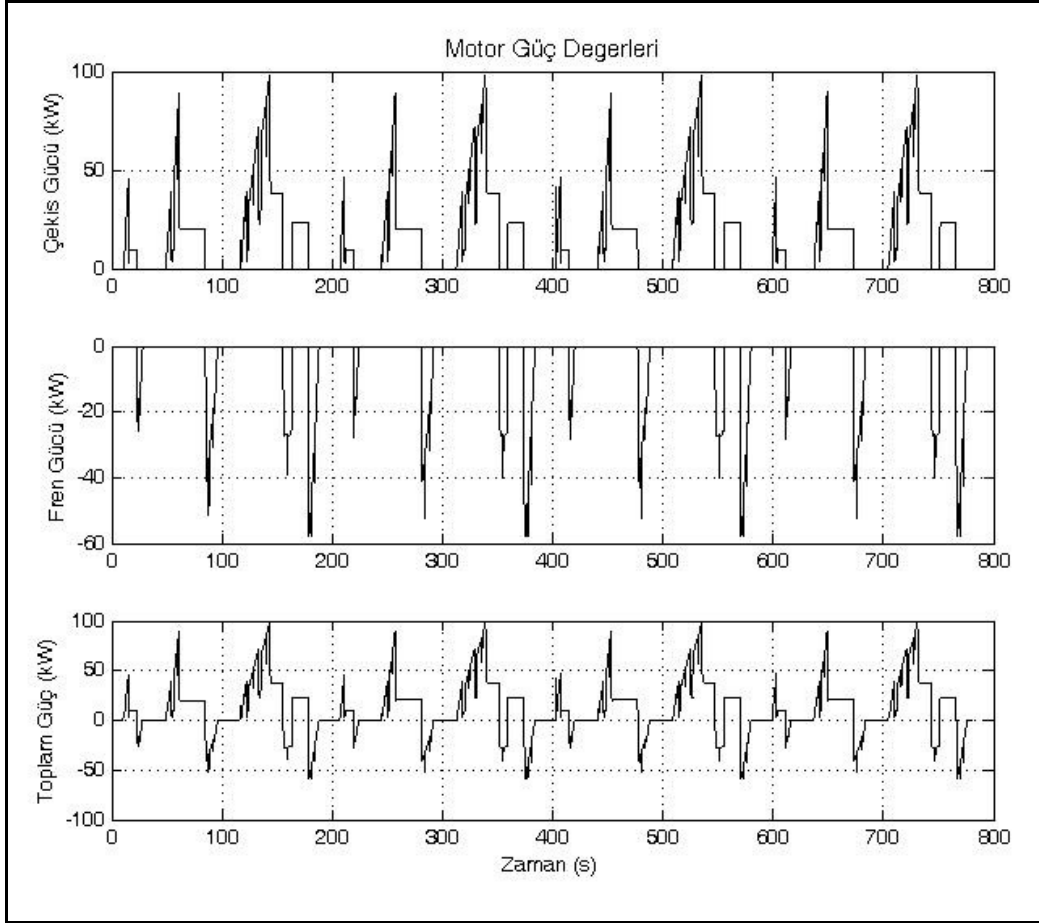
## EK C



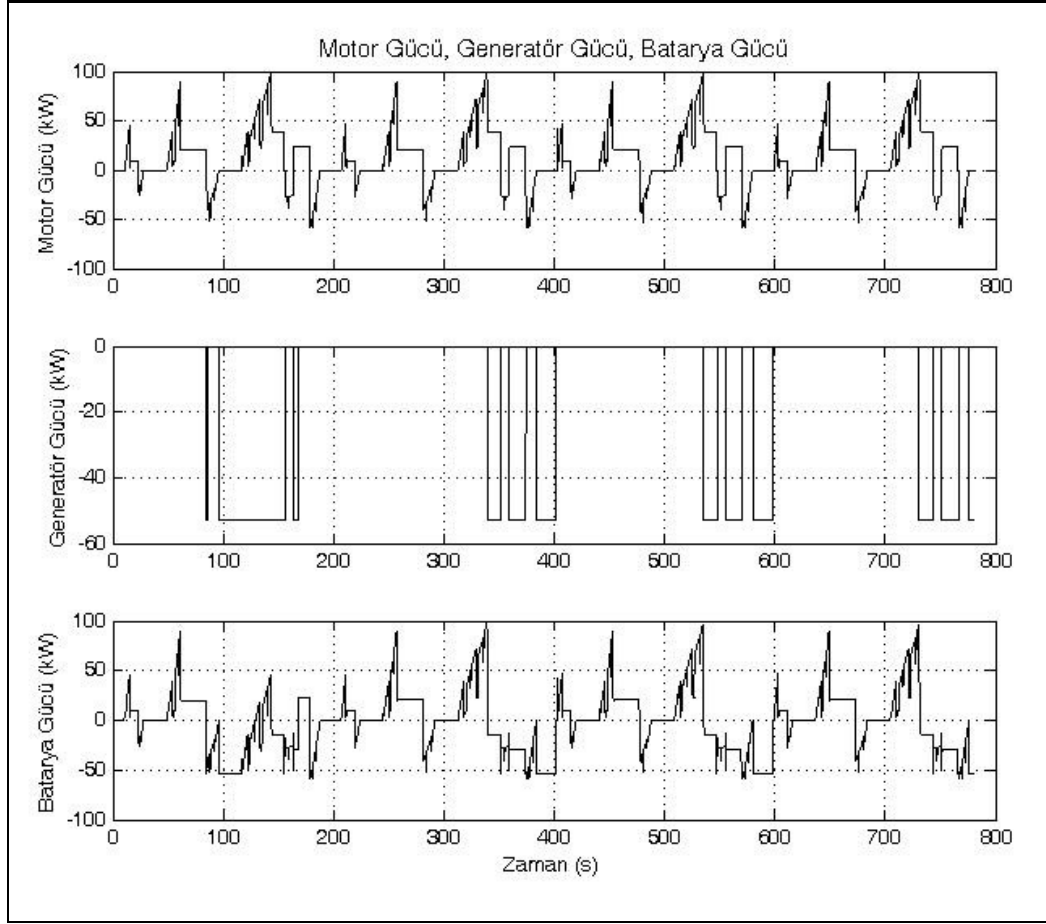
Şekil C.1 : Tek motorlu hibrit araç modelinde araç hızı ve referans hız



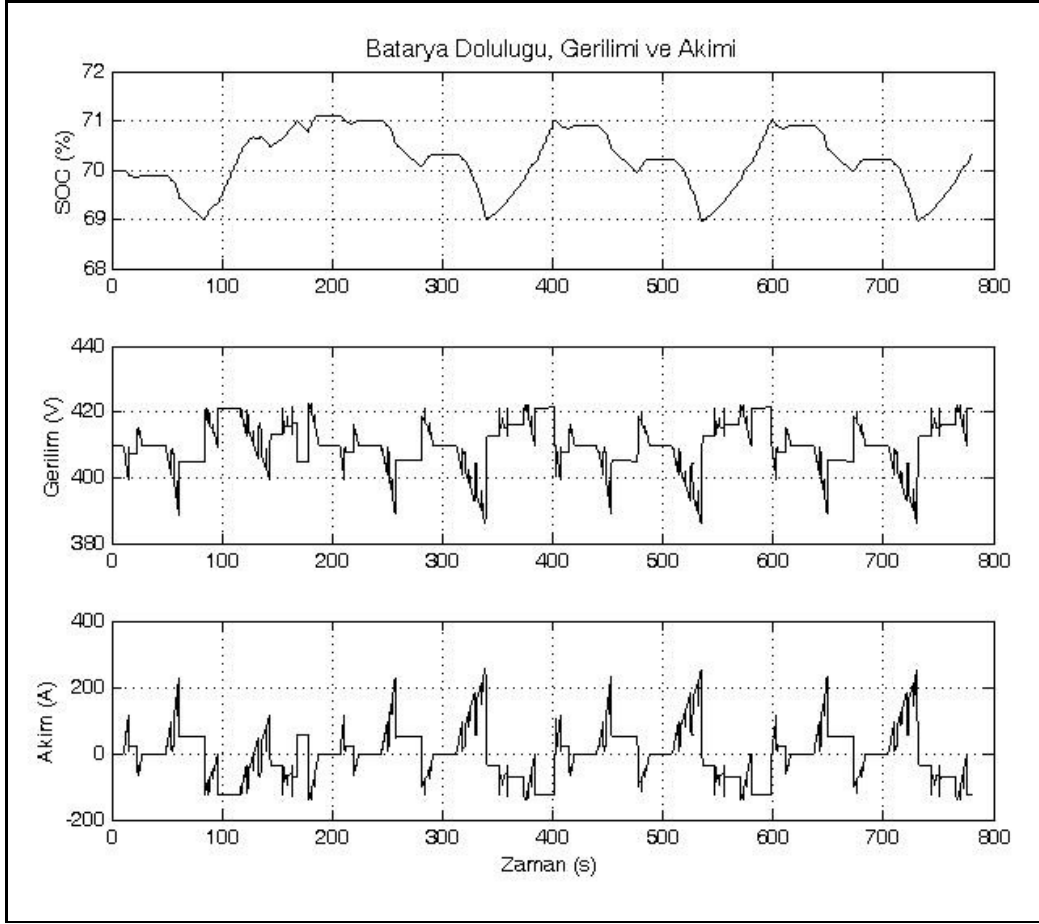
Şekil C.2 : Tek motorlu hibrit araç modelinde araç hızı ve motor gücü



**Şekil C.3 :** Tek motorlu hibrit araç modelinde motor güç değerleri

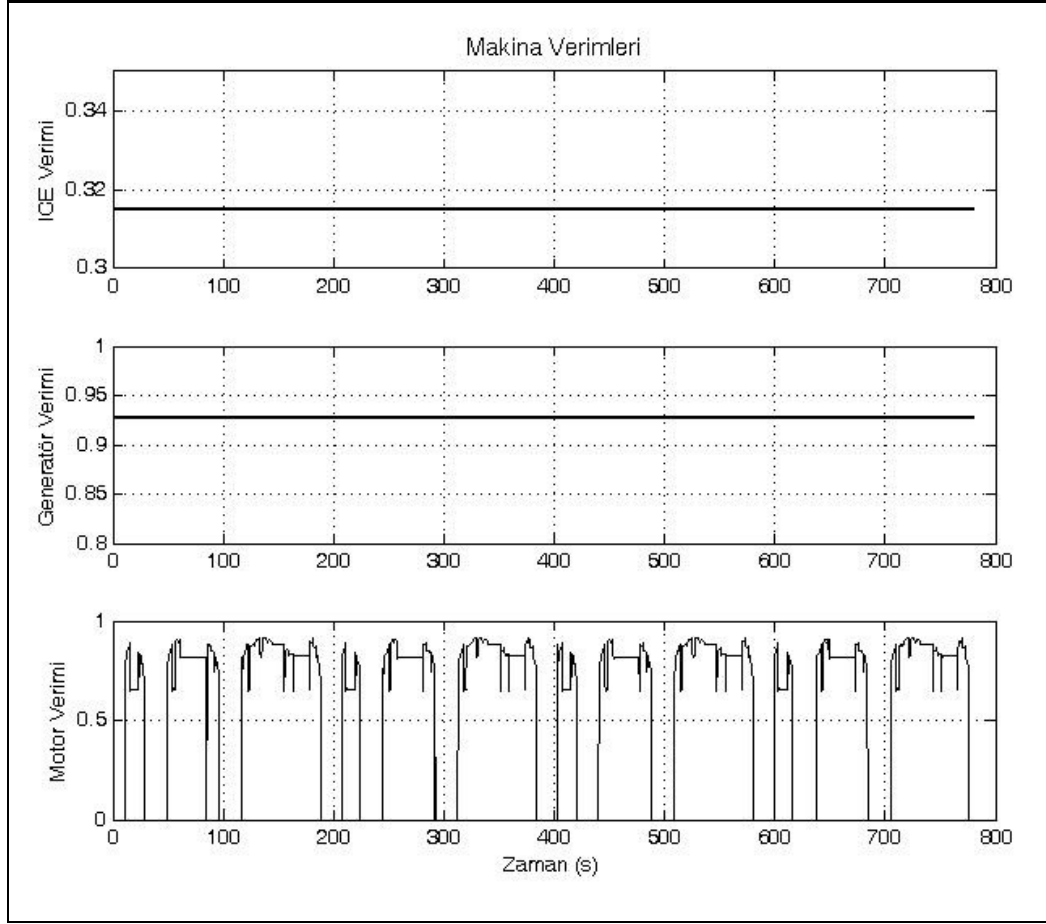


**Şekil C.4 :** Tek motorlu hibrit araç modelinde bileşenlerin güç değerleri

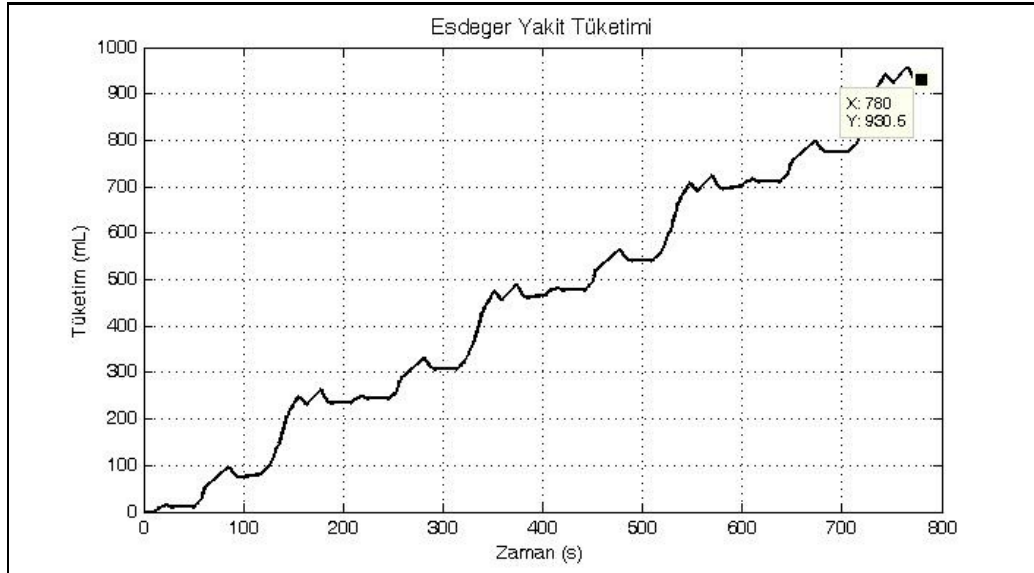


**Şekil C.5 :** Tek motorlu hibrit araç modelinde batarya değerleri



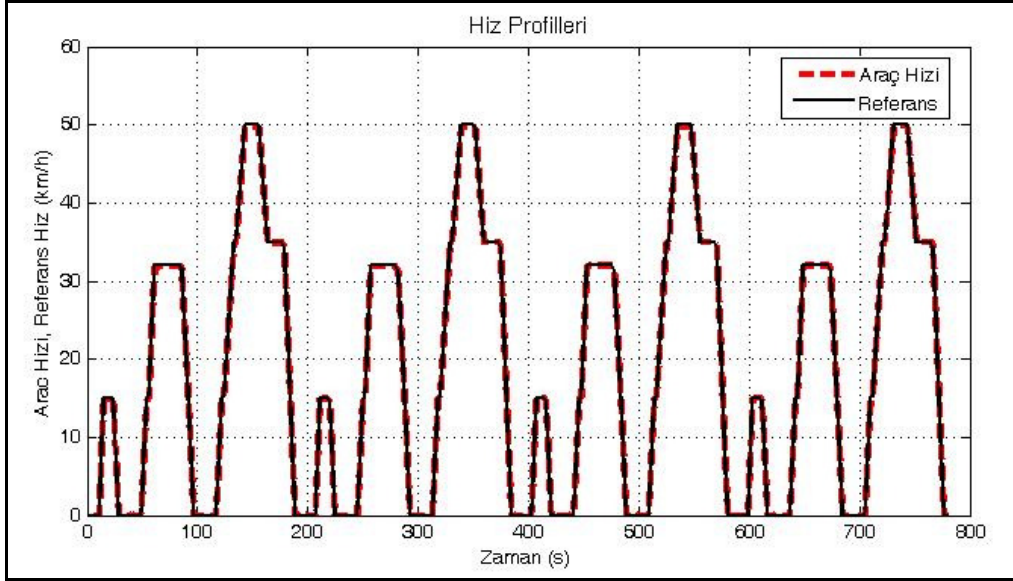


**Şekil C.6 :** Tek motorlu hibrit araç modelinde verim değerleri

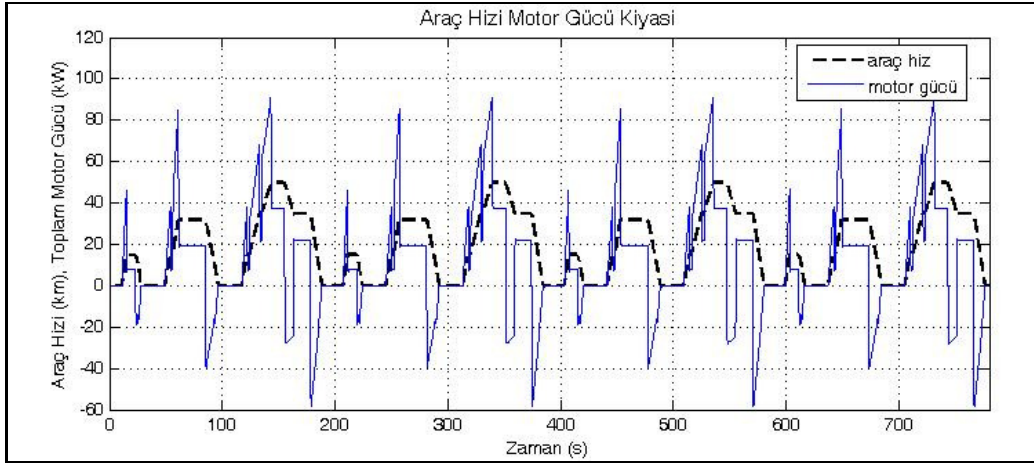


**Şekil C.7 :** Tek motorlu hibrit araç modelinde yakıt tüketimi

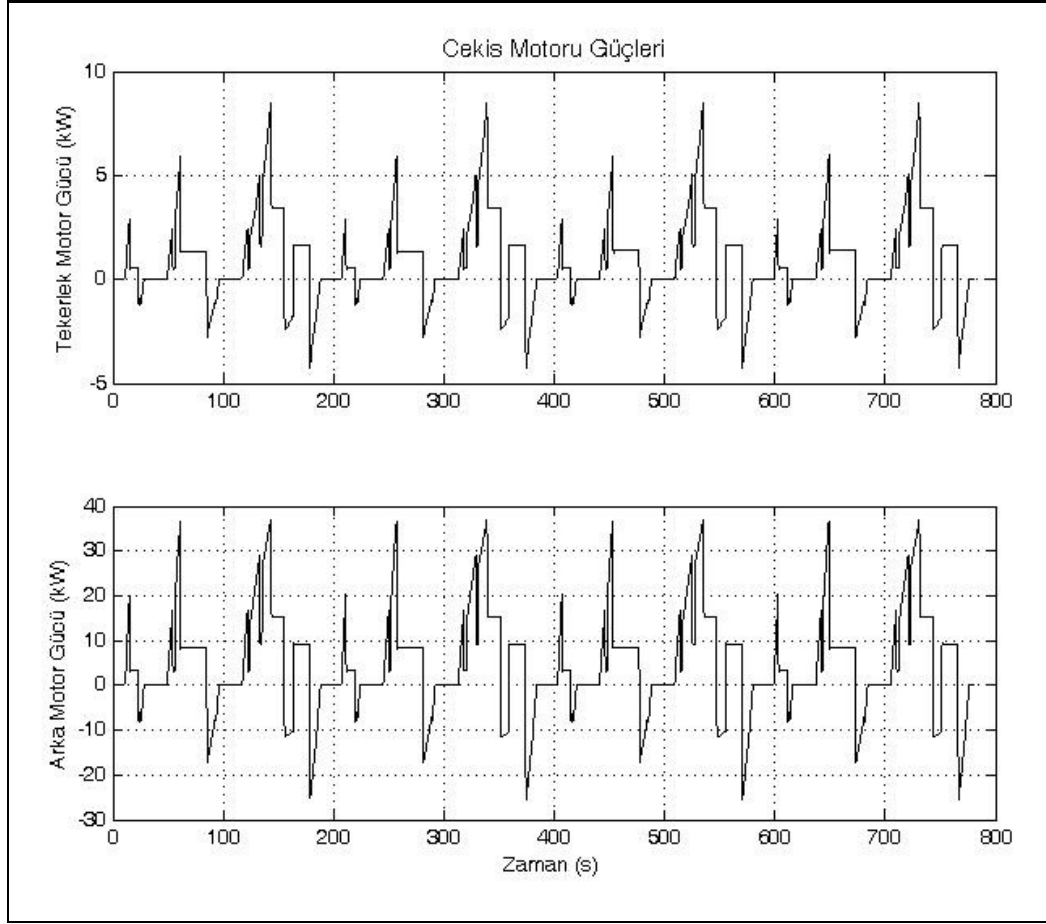
## EK D



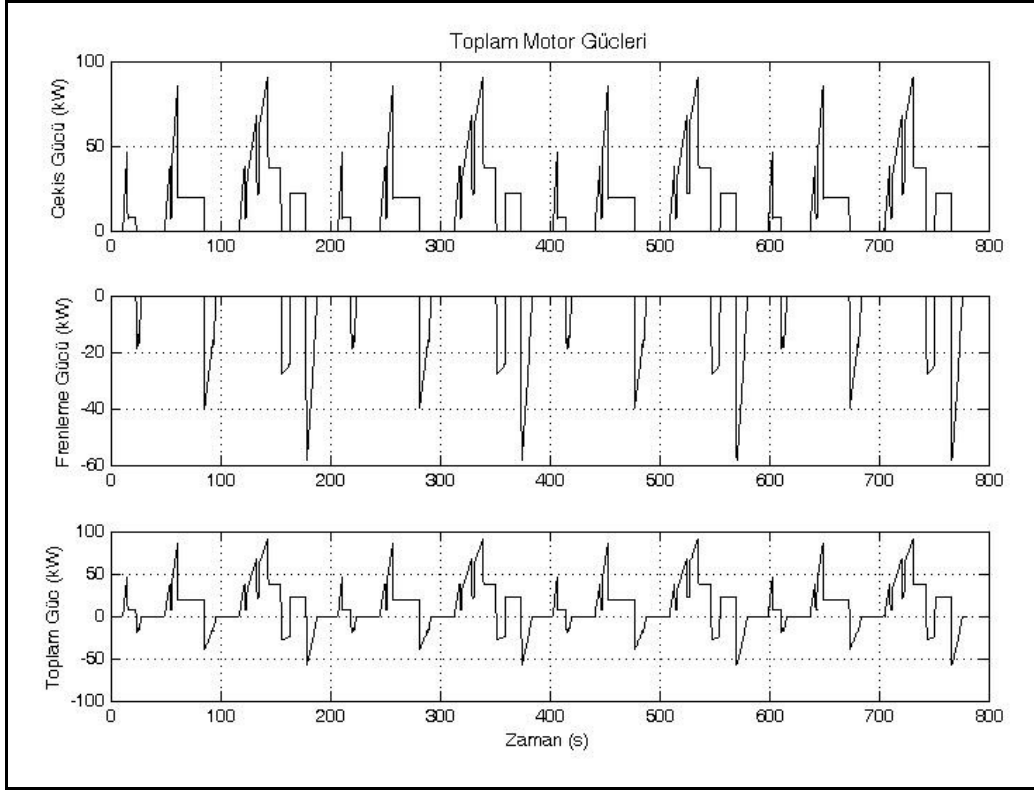
Şekil D.1 : Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde araç hızı ve referans hız



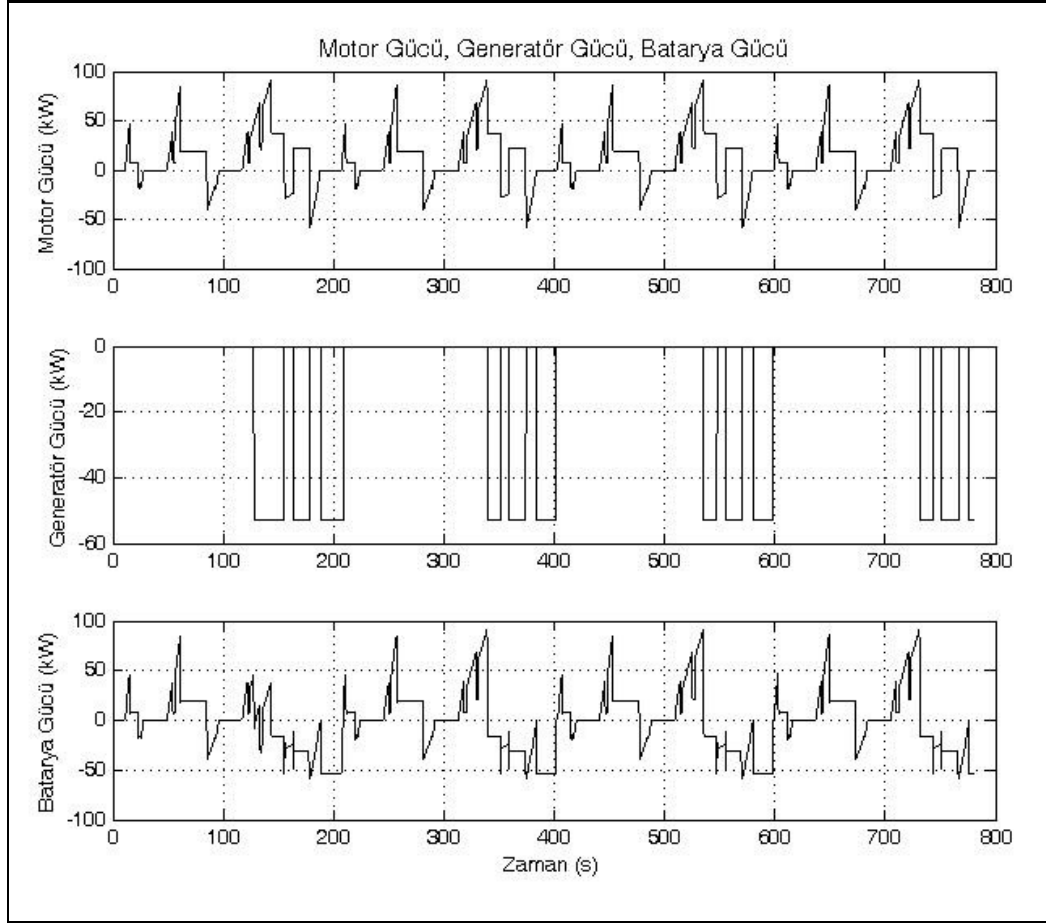
Şekil D.2 : Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde araç hızı ve toplam motor gücü



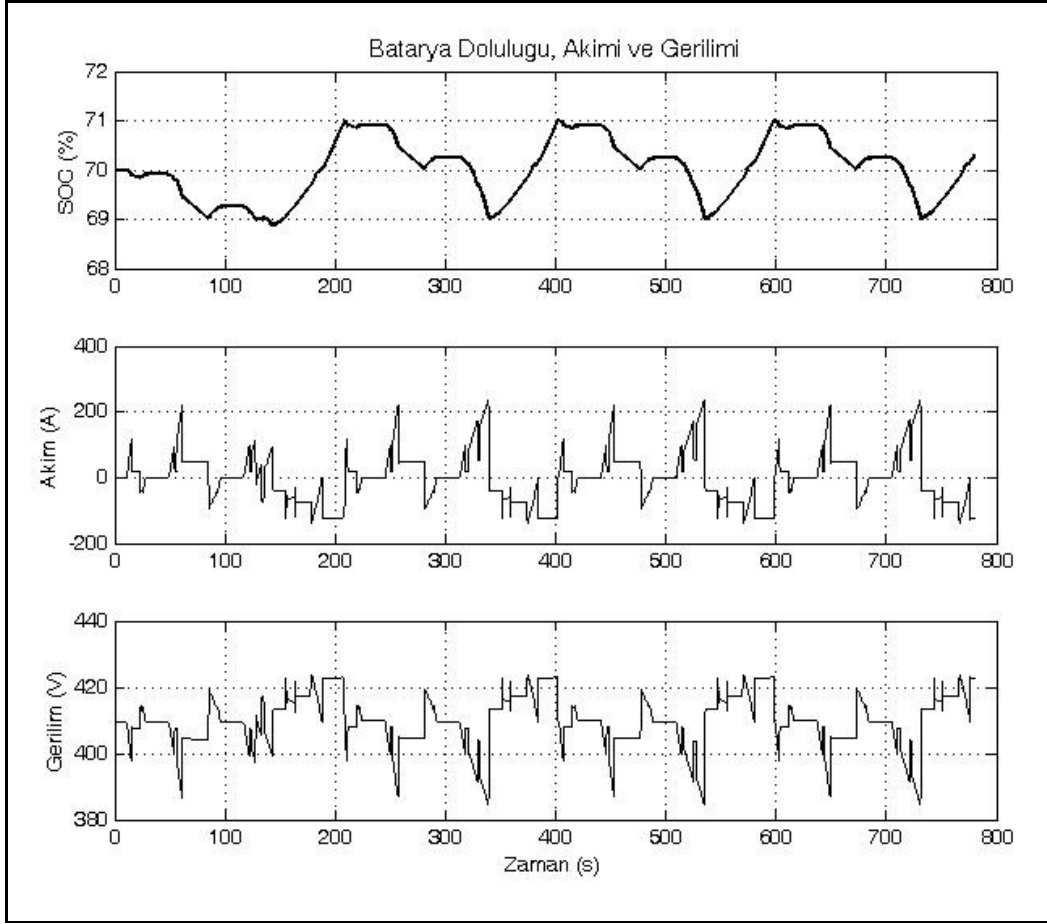
**Şekil D.3 :** Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde ön ve arka motor güçleri



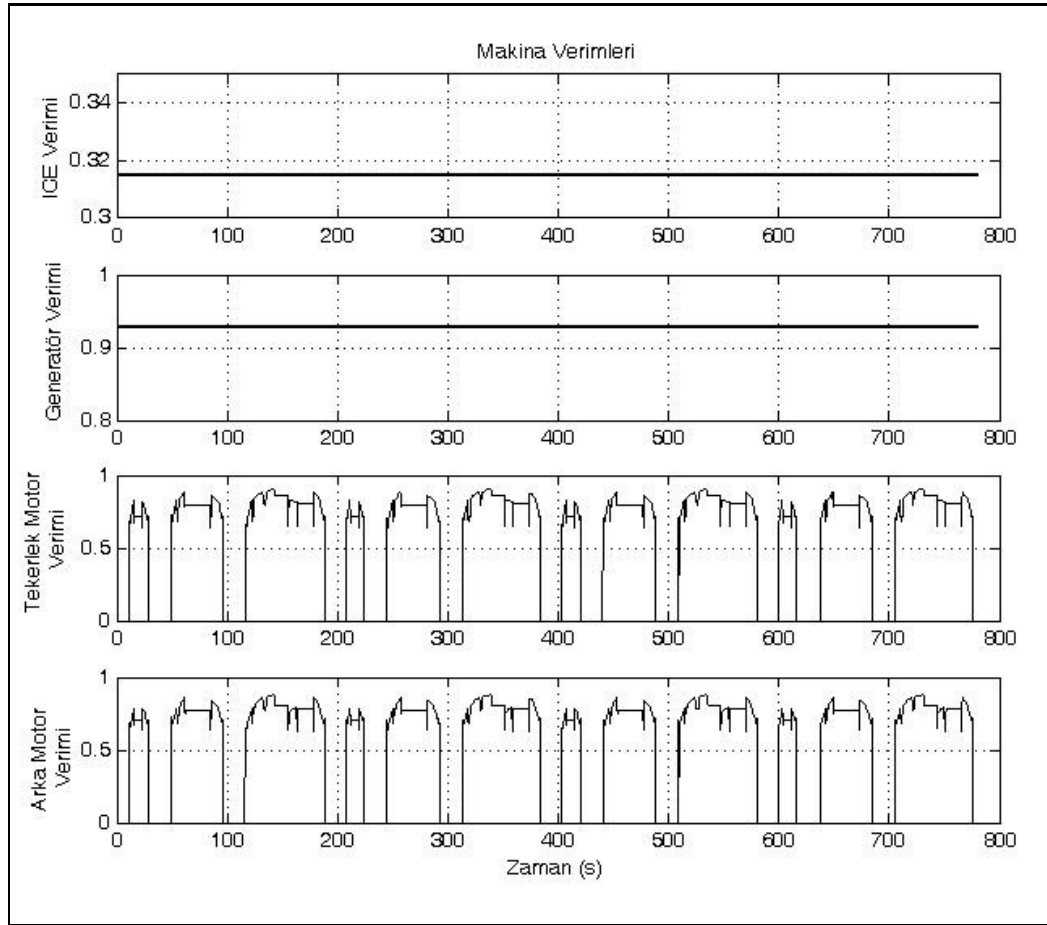
**Şekil D.4 :** Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde toplam motor güç değerleri



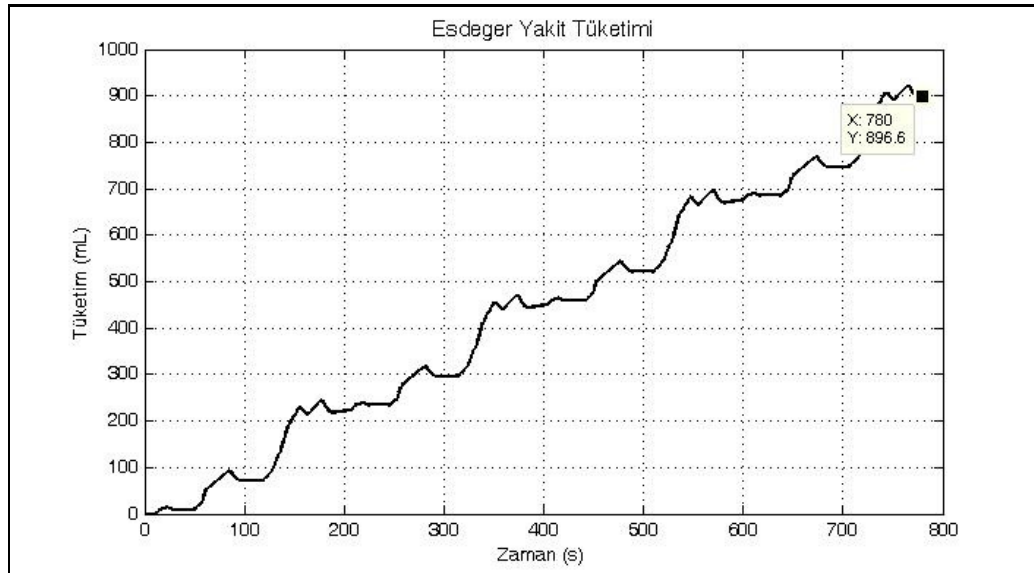
**Şekil D.5 :** Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde bileşenlerin güç değerleri



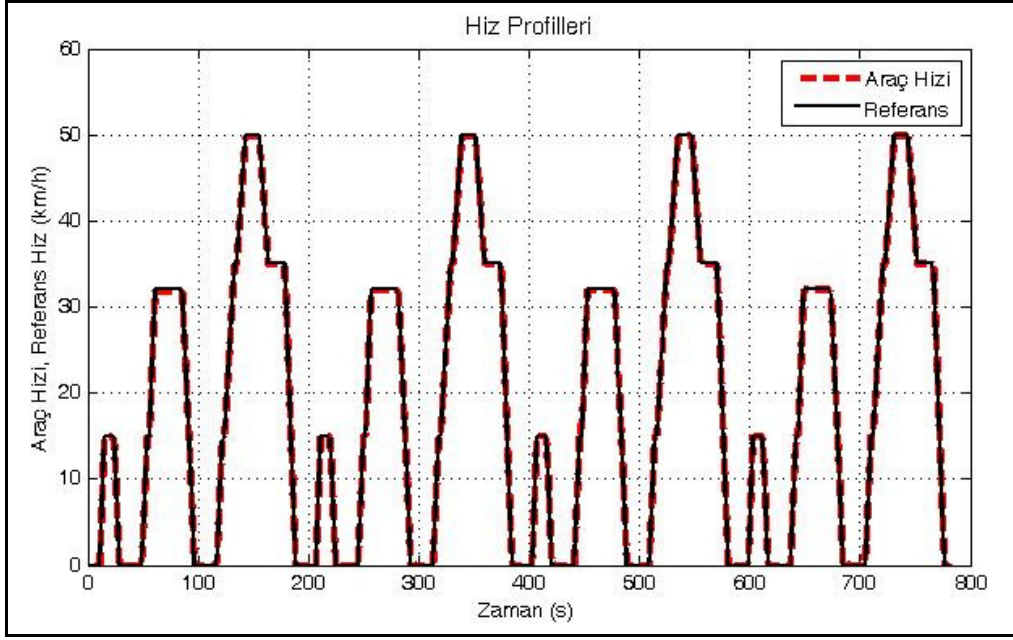
**Şekil D.6 :** Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde batarya değerleri



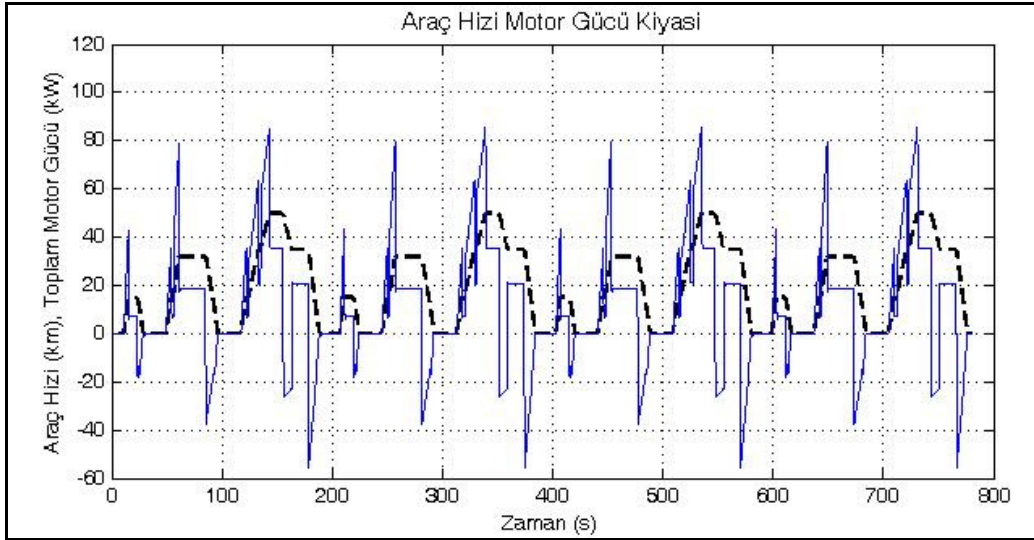
Şekil D.7 : Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde bileşen verimleri



Şekil D.8 : Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde yakıt tüketimi

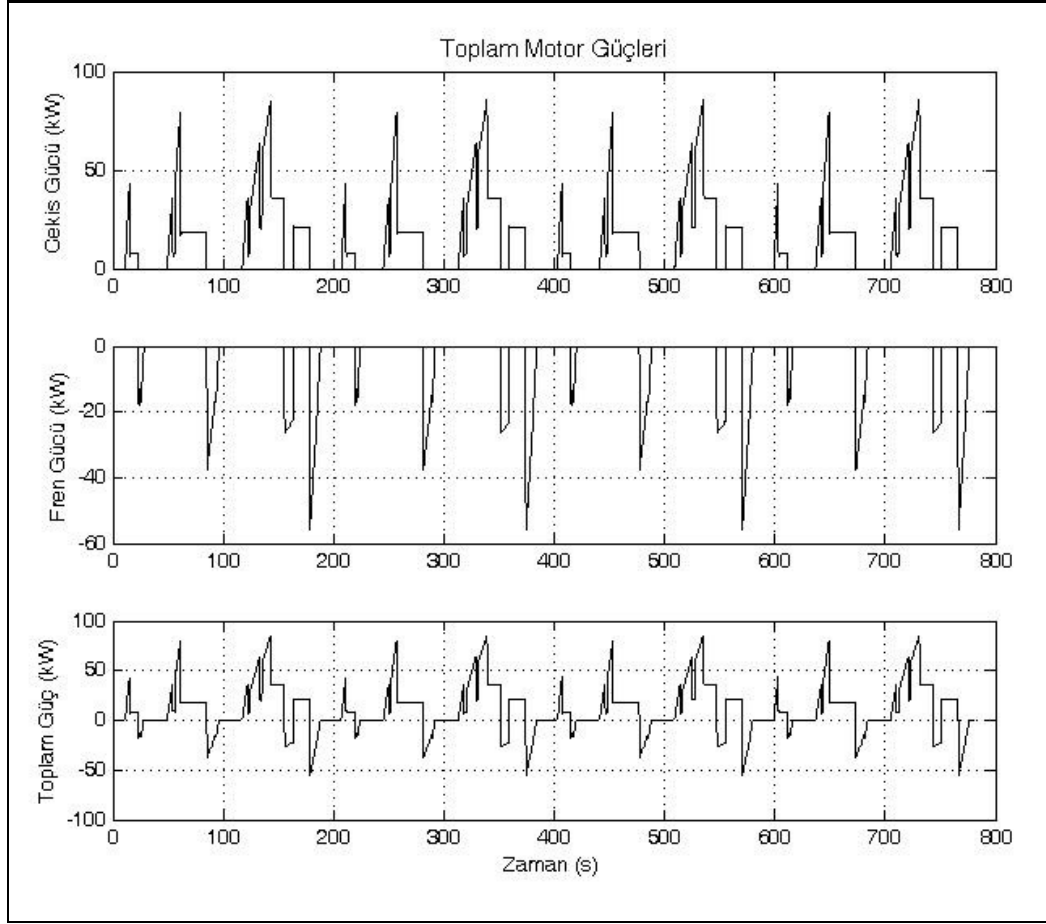


**Şekil D.9 :** Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde araç hızı ve referans hız (hafif araç durumu)

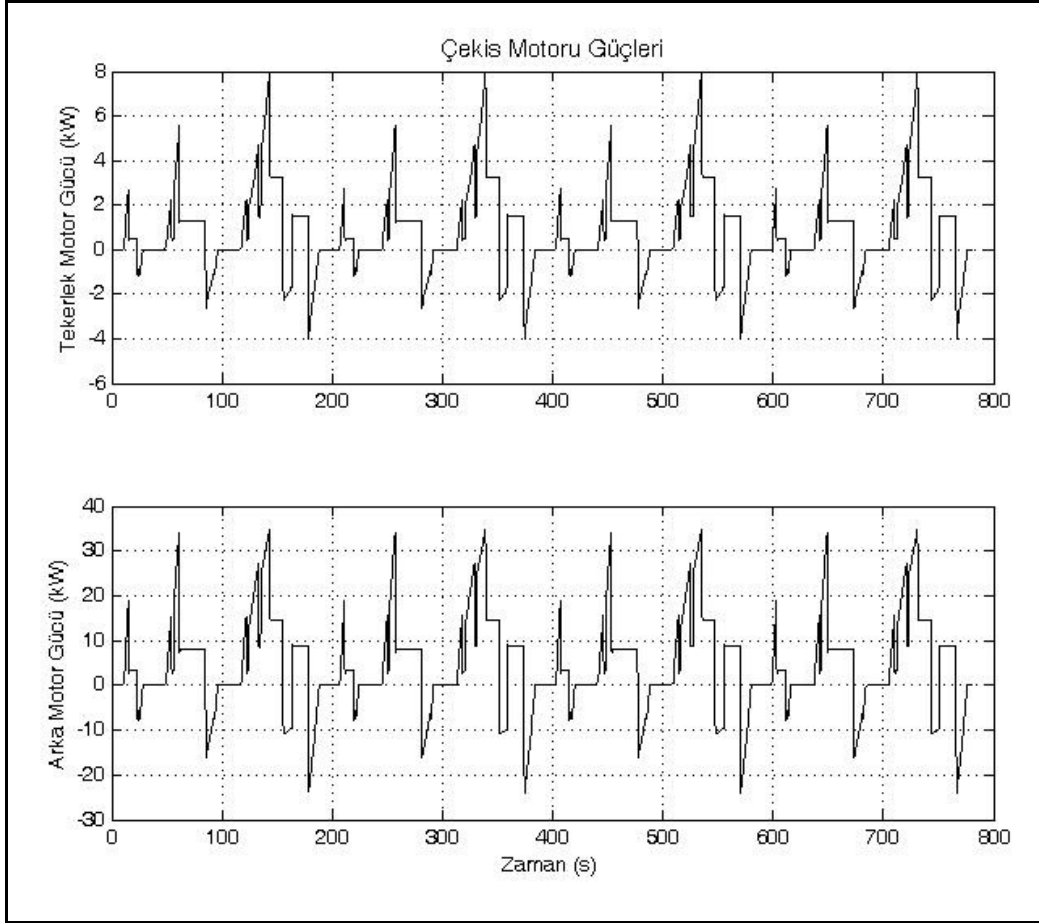


**Şekil D.10 :** Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde araç hızı ve toplam motor gücü (hafif araç durumu)

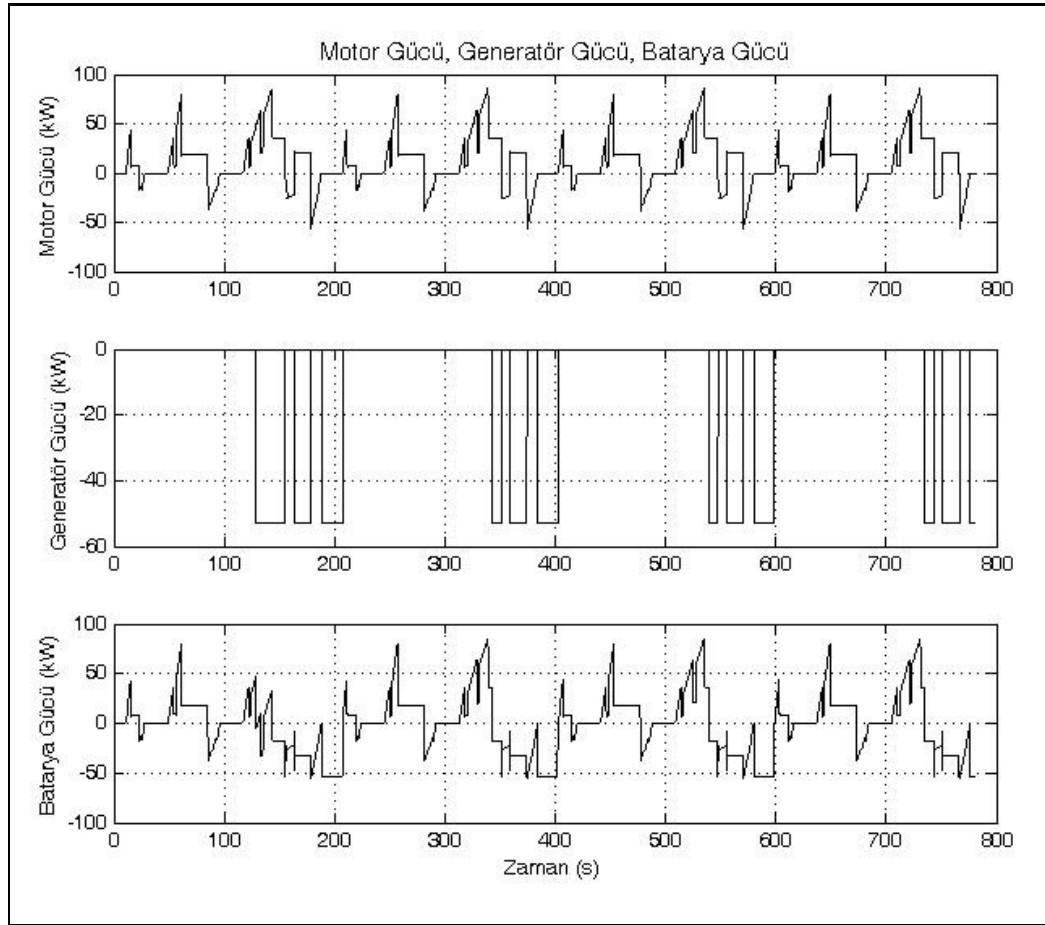




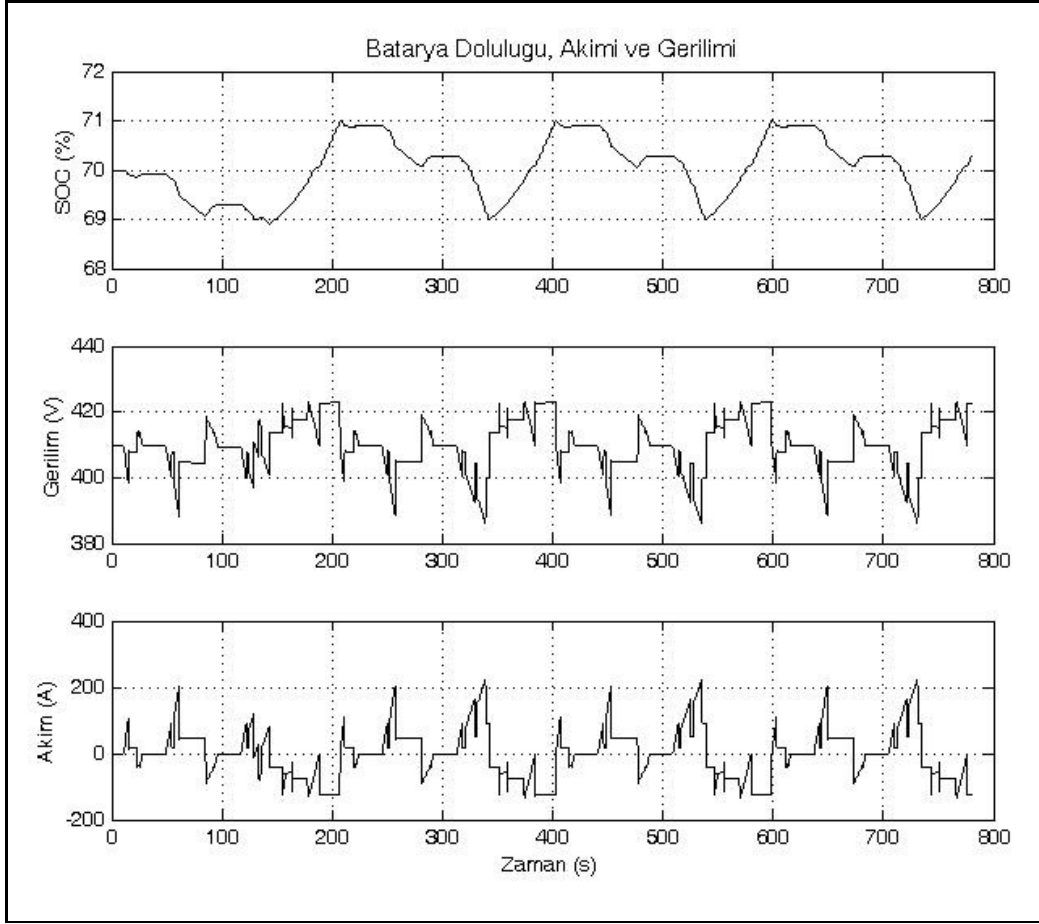
**Şekil D.11 :** Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde toplam motor güç değerleri (hafif araç durumu)



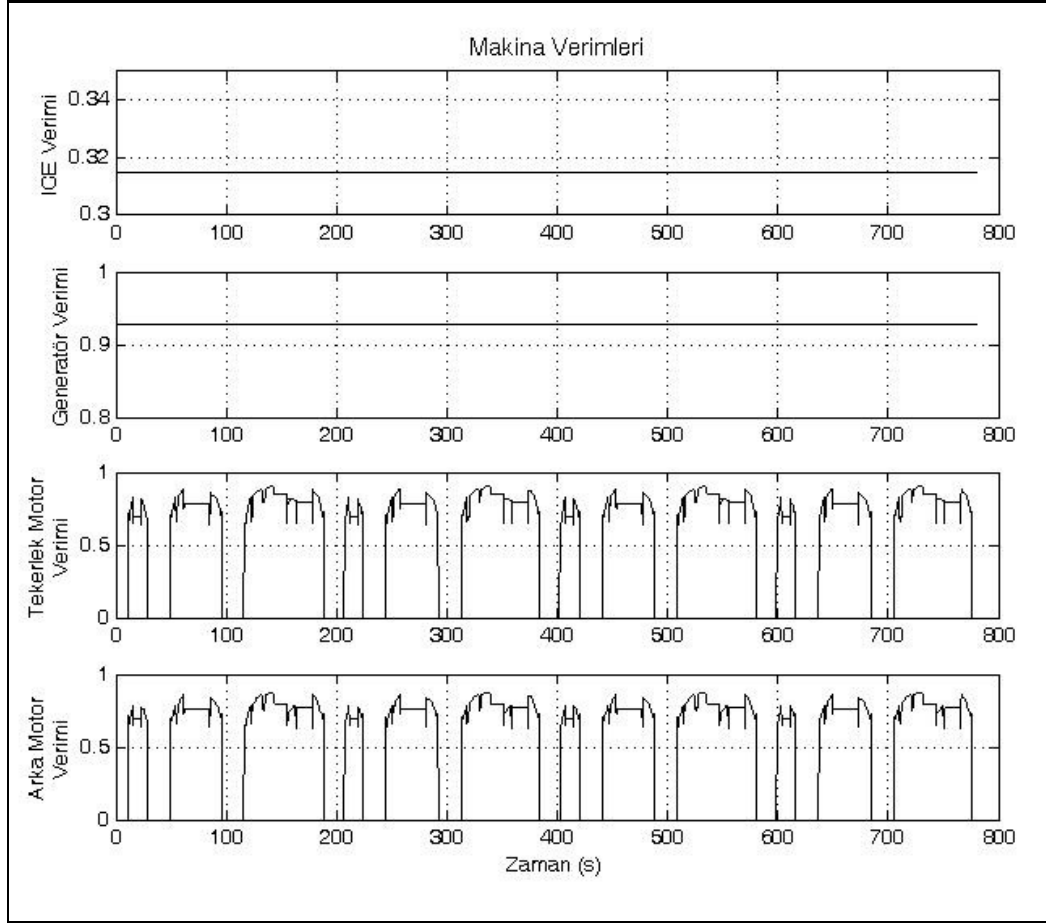
**Şekil D.12 :** Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde ön ve arka motor güçleri (hafif araç durumu)



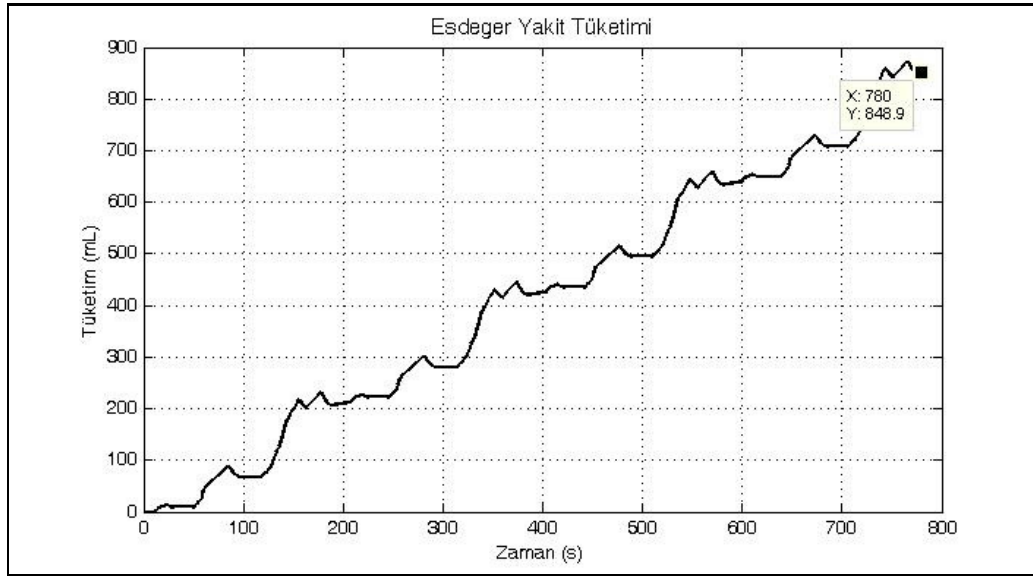
**Şekil D.13 :** Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde bileşenlerin güç değerleri (hafif araç durumu)



**Şekil D.14 :** Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde batarya değerleri (hafif araç durumu)



**Şekil D.15 :** Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde bileşen verimleri (hafif araç durumu)



**Şekil D.16 :** Tekerlek motorlu hibrit araç modelinde yakıt tüketimi (hafif araç durumu)



## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad:** Ali Ersin Bulgu  
**Doğum Yeri ve Tarihi:** İstanbul – 27.10.1985  
**Lisans Üniversite:** İstanbul Teknik Üniversitesi Kontrol Mühendisliği