

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HİBRİD TAŞITLARDA SEYİR ÇEVİRİMİNE GÖRE YAKIT TÜKETİMİ VE
EMİSYONLARIN OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa KOCAGÜL

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Programı : Otomotiv

HAZİRAN 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ★FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HİBRİD TAŞITLARDA SEYİR ÇEVİRİMİNE GÖRE YAKIT TÜKETİMİ VE
EMİSYONLARIN OPTİMİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mustafa KOCAGÜL
(503071713)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009
Tezin Savunulduğu Tarih : 05 Haziran 2009**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Metin ERGENEMAN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Cem SORUŞBAY (İTÜ)
Prof. Dr. İrfan YAVAŞLIOL (YTÜ)**

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında beni yönlendiren, bilgi birikimini ve tecrübelerini benimle paylaşan, çalışmanın ilerlemesi için her türlü desteği veren değerli hocam Prof. Dr. Metin Ergeneman'a ve yüksek lisans öğrenimim boyunca bana sağladığı maddi destek için TÜBİTAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tüm eğitim hayatım boyunca benim yanımda olan maddi ve manevi her türlü desteği sağlayan aileme teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Haziran 2009

Mustafa KOCAGÜL
Makine Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Hibrid Elektrikli Taşıtların Gelişimi	2
1.2. Tezin Amacı	3
2. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA YAKIT EKONOMİSİ VE EMİSYONLAR	5
2.1. İçten Yanmalı Motorun Durdurulması	5
2.2. Rejeneratif Frenleme	6
2.3. İçten Yanmalı Motorun Küçültülmesi.....	8
2.4. İçten Yanmalı Motor Verimi	9
2.5. Yardımcı Elemanlar.....	11
3. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞIT TÜRLERİ	15
3.1. Hibridleşme Seviyelerine Göre	15
3.1.1. Mikro hibridler.....	15
3.1.2. Hafif hibridler	15
3.1.3. Tam hibridler	15
3.2. Yapılarına Göre	16
3.2.1. Seri hibrid elektrikli taşıtlar	16
3.2.2. Paralel hibrid elektrikli taşıtlar	16
3.2.3. Seri – paralel hibrid elektrikli taşıtlar	16
3.2.4. Gelişmiş hibrid elektrikli taşıtlar	17
4. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA GÜÇ AKIŞ KONTROLÜ	19
4.1. Seri Hibrid Elektrikli Taşıtların Kontrolü.....	20
4.2. Paralel Hibrid Elektrikli Taşıtların Kontrolü.....	20
4.3. Seri – Paralel Hibrid Elektrikli Taşıtların Kontrolü.....	22
4.4. Gelişmiş Hibrid Elektrikli Taşıtların Kontrolü.....	22
5. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA SİMÜLASYON VE TEST	25
5.1. Simülasyon	25
5.2. Test	26
6. GELİŞMİŞ HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞIT MODELİ	29
6.1. Simülasyon Programı	31
6.1.1. Konvansiyonel aracın simülasyonu	33
6.1.2. Taşıtların yalnızca elektrik motoru ile simülasyonu	35
7. STRATEJİ UYGULAMALARI	37

7.1. İçten Yanmalı Motorun Durdurulması (Dur-Kalk Stratejisi)	38
7.2. Rejeneratif Frenleme Enerjisinin Kullanılması	39
7.3. Kural Tabanlı Kontrol Stratejisi	41
7.4. Dinamik Kontrol Stratejisi:	44
8. SONUÇLAR	57
KAYNAKLAR.....	61
EKLER.....	63
ÖZGEMİŐ.....	73

KISALTMALAR

ADVISOR	: Advanced Vehicle Simulator
ANL	: Argonne National Laboratory
CAFE	: Corporate Average Fuel Economy
EGR	: Egzoz Gazı Resirkülasyonu
EM	: Elektrik Motoru
HET	: Hibrid Elektrikli Taşıt
İYM	: İçten Yanmalı Motor
NREL	: National Renewable Energy Laboratory
PSAT	: Powertrain System Analysis Toolkit
SAE	: Society of Automotive Engineers
SOC	: State of Charge
SUV	: Sport Utility Vehicle
UDDS	: Urban Dynamometer Driving Cycle

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Bir hibrid elektrikli SUV taşıtta yardımcı elemanların yakıt tüketimi ve emisyonlara etkisi.....	12
Çizelge 6.1: Simülasyonu yapılan taşıttın özellikleri	29
Çizelge 6.2: Sürüş çevrimlerinin karşılaştırılması.....	33
Çizelge 6.3: Gerçek test ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	34
Çizelge 6.4: Yalnızca İYM ile çalışan hibrid taşıttın farklı sürüş çevrimlerindeki yakıt tüketimi ve emisyon değerleri	34
Çizelge 6.5: Yalnızca elektirik motoru ile aracın menzili	35
Çizelge 7.1: İYM'un boşta durdurulması sonucu çevrimlere göre yakıt tüketimi ve emisyon değerleri	38
Çizelge 7.2: İYM'un boşta durdurulması ile sağlanan yakıt tüketimi ve emisyon değerlerinin yalnız İYM ile çalışma durumuna göre değişimi	39
Çizelge 7.3: Rejeneratif frenleme enerjisinin kullanılması sonucu çevrimlere göre tüketilen yakıt ve oluşan emisyonlar.....	40
Çizelge 7.4: Rejeneratif frenleme enerjisi ile çevrimlere göre sağlanan yakıt tüketimi ve emisyonlardaki azalmalar	40
Çizelge 7.5: Uygulanan kural tabanlı kontrol stratejisi	41
Çizelge 7.6: Kural tabanlı kontrol stratejisinin uygulanması sonucu çevrimlere göre yakıt tüketimi ve emisyon değerleri.....	43
Çizelge 7.7: Kural tabanlı kontrol stratejisinin uygulanması sonucu yakıt tüketimi ve emisyon değerlerinin değişimi	43
Çizelge 7.8: Kural tabanlı kontrol stratejisinin rejeneratif frenleme enerjisi stratejisine göre yakıt tüketimi ve emisyon değerleri değişimi.....	44
Çizelge 7.9: Stratejiler ve sürüş çevrimlerine göre İYM ve EM ortalama çalışma verimleri	44
Çizelge 7.10: k düzeltme katsayısının şarj durumuna göre değişimi	54
Çizelge 7.11: Çevrimlere göre birim zamanda rejeneratif frenleme ile gerçekleşen şarj durumu değişimi	54
Çizelge 7.12: Dinamik kontrol stratejisi yakıt tüketimi ve emisyon değerleri	54
Çizelge 7.13: Ağırlık faktörlerinin uygulanması ile meydana gelen yakıt tüketimi ve emisyon değerleri.....	55
Çizelge 7.14: Dinamik kontrol stratejisinin uygulanması sonucu yakıt tüketimi ve emisyon değerlerinin değişimi	55
Çizelge 7.15: Dinamik kontrol stratejisinin kural tabanlı kontrol stratejisi ile karşılaştırılması	56
Çizelge 8.1: Uygulanan kontrol stratejilerine ve sürüş çevrimlerine göre yakıt tüketimi ve emisyonlardaki değişimler	58

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Çeşitli stratejilerin yakıt tüketimine etkisi ve enerji gereksinimi.....	6
Şekil 2.2: Elektrik motoru gücü ve yakıt ekonomisi ilişkisi.....	7
Şekil 2.3: İçten yanmalı motor verim haritası	8
Şekil 2.4: Hibrid ve geleneksel tahrikte İYM verimlerinin karşılaştırılması.....	9
Şekil 2.5: İçten yanmalı motorun çalışma bölgesi ($SOC > SOC_{min}$).....	10
Şekil 2.6: İçten yanmalı motorun çalışma bölgesi ($SOC < SOC_{min}$).....	11
Şekil 2.7: UDDS çevriminde İYM tarafından tahrik edilen yardımcı elemanların yük dağılımı (7.2 kw ortalama)	13
Şekil 2.8: UDDS çevriminde elektrik motoru ile tahrik edilen yardımcı elemanların yük dağılımı (2.3 kw ortalama)	13
Şekil 3.1: Hibrid elektrikli taşıt tipleri.....	17
Şekil 4.1: Bir İYM'un yakıt tüketimine göre optimum çalışma çizgisi	19
Şekil 4.2: Seri HET Çalışma Modları.....	21
Şekil 4.3: Paralel HET çalışma modları	21
Şekil 5.1: Yeni Avrupa Birliği Sürüş Çevrimi [11].....	27
Şekil 6.1: Simülasyonu yapılan HET	30
Şekil 6.2: Simülasyon programı akış diyagramı.....	31
Şekil 6.3: Japon 10 - 15 sürüş çevrimi.....	32
Şekil 6.4: FTP 75 sürüş çevrimi	32
Şekil 6.5: Elektrik motorunun NEUDC şehir içi sürüş çevriminde çalışma noktaları.....	36
Şekil 6.6: Jeneratörün NEUDC şehir içi sürüş çevriminde çalışma noktaları.....	36
Şekil 7.1: Dizel motorlarında yakıt tüketimi ve emisyon çelişkisi [6]	45
Şekil 7.2: Örnek İYM aday çalışma noktaları	46
Şekil 7.3: Örnek EM aday çalışma noktaları.....	46
Şekil 7.4: İYM enerji tüketiminin EM momentine göre değişimi.....	47
Şekil 7.5: ΔSOC - EM momenti değişimi	48
Şekil 7.6: Yakıt Enerjisi - ΔSOC değişimi	49
Şekil 7.7: Toplam elektromekanik yakıt enerjisinin bulunması	50
Şekil 7.8: EM Momenti toplam enerji tüketimi değişimi.....	51
Şekil 7.9: NO_x emisyonlarının EM momentine göre değişimi.....	51
Şekil 7.10: Normalizasyon	52
Şekil 7.11: Ağırlık faktörlerinin bulunması.....	53
Şekil 7.12: Değer fonksiyonu ve normalize edilmiş parametreler	53
Şekil 8.1: Uygulanan stratejilerin ortalama yakıt tüketimi ve emisyon değerlerine etkisi.....	60
Şekil 8.2: Farklı stratejilerin araç maliyetine etkisi.....	60
Şekil A.1: İYM ağırlıklı seri – paralel HET çalışma modları.....	63
Şekil A.2: EM ağırlıklı seri – paralel HET çalışma modları	64
Şekil A.3: Çift akstan (ön hibrid arka elektrik) tahrikli gelişmiş HET çalışma modları.....	65

Şekil A.4: Çift akstan (ön elektrik arka hibrid) tahrikli gelişmiş HET çalışma modları.....	66
Şekil B.1: NEUDC yalnızca İYM çalışma noktaları(Verim haritası)	67
Şekil B.2: NEUDC kural tabanlı kontrol stratejisi çalışma noktaları (Verim haritası).....	67
Şekil B.3: NEUDC yalnızca İYM çalışma noktaları (HC haritası)	68
Şekil B.4: NEUDC kural tabanlı kontrol stratejisi çalışma noktaları (HC haritası)	68
Şekil B.5: NEUDC yalnızca İYM çalışma noktaları (CO haritası)	69
Şekil B.6: NEUDC kural tabanlı kontrol stratejisi çalışma noktaları (CO haritası)	69
Şekil B.7: NEUDC yalnızca İYM çalışma noktaları (NO _x haritası)	70
Şekil B.8: NEUDC kural tabanlı kontrol stratejisi çalışma noktaları (NO _x haritası)	70
Şekil B.9: JAPON 10-15 yalnızca İYM çalışma noktaları (Verim haritası)	71
Şekil B.10: JAPON 10-15 kural tabanlı kontrol stratejisi çalışma noktaları (Verim haritası)	71
Şekil B.11: FTP 75 yalnızca İYM çalışma noktaları (Verim haritası)	72
Şekil B.12: FTP 75 kural tabanlı kontrol stratejisi çalışma noktaları (Verim haritası)	72

SEMBOL LİSTESİ

Ah	: Ampersaat
BG	: Beygir gücü
CO	: Karbonmonoksit
d/dk	: Devir/dakika
E	: Enerji (joule)
g	: Gram
s	: Saat
HC	: Hidrokarbon
i	: Çevrim oranı
K	: Ağırlık katsayısı
kj	: kilojoule
km	: kilometre
kW	: kilowatt
kWh	: kilowattsaat
Lt	: Litre
M	: Moment
Nm	: Newton metre
NO_x	: Azotoksit
sn	: saniye
V	: Volt

HİBRİD TAŞITLARDA SEYİR ÇEVİRİMİNE GÖRE YAKIT TÜKETİMİ VE EMİSYONLARIN OPTİMİZASYONU

ÖZET

Küresel ısınma ve çevre kirliliği kaygıları ile sıfır emisyonlu araçlara geçiş zorunlu hale gelmiştir. Bu geçiş aşamasında hibrid elektrikli taşıtlar geliştirilmiştir. Elektrikli taşıtlar ve yakıt hücreli taşıtlar gibi alternatif sistemlere göre daha ucuz olması, mevcut altyapı ile uygulanabilecek en hızlı teknoloji olması ve içten yanmalı motora sahip araçlar ile benzerlik göstermesi sebebiyle bu aşamada en uygun çözüm hibrid elektrikli taşıtlar olmuştur.

Hibrid elektrikli taşıtların en önemli özelliği rejeneratif frenleme ile fren enerjisini, batarya ve elektrik motoru kapasitesi dahilinde, geri kazanmasıdır. Bu sayede yakıt tüketimi % 10 – 20 civarında azaltılabilir. Yakıt tüketiminin azaltılmasında etkili olan diğer bir faktör ise içten yanmalı motor boyutunun küçültülmesidir.

Hibrid yapı bir içten yanmalı motor ve bir jeneratör ikilisi ile basit şekilde oluşturulabileceği gibi, bir veya birden fazla elektrik motoru, bir içten yanmalı motor ile birlikte çalıştırılarak, daha karmaşık sistemler de oluşturulabilir. Hibrid yapı karmaşıklıklaştıkça sistemin tasarımı ve kontrolü güçleşecektir. Bu aşamada sistemin optimizasyonu için simülasyon programları, kontrol stratejileri devreye girmektedir.

Yapılan çalışmada ilk olarak Matlab Simulink ortamında bir hafif ticari hibrid elektrikli taşıt modeli oluşturulmuş ve geriye dönük hesaplama yöntemi esas alınarak aracın simülasyonu yapılmıştır. İçten yanmalı motorun boşa durdurulması ve yalnızca rejeneratif frenleme enerjisinin kullanılması şeklinde iki stratejinin uygulanmasının ardından, temel olarak yakıt tüketimini azaltmayı amaçlayan kural tabanlı kontrol stratejisi geliştirilmiştir. Son olarak uygulanan strateji ise dinamik kontrol stratejisidir. Dinamik kontrol stratejisi, kural tabanlı kontrol stratejisinden farklı olarak, belirlenen hedeflere göre emisyon ve yakıt tüketimi değerlerini ağırlıklandırmakta ve sistem için en uygun çalışma noktasını tespit etmektedir. Daha sonra bu stratejiler Yeni Avrupa Birliği, Japon 10 – 15 ve FTP 75 sürüş çevrimlerinde simüle edilerek yakıt tüketimi ve emisyonlara etkileri araştırılmıştır.

Uygulanan içten yanmalı motorun boşa durdurulması stratejisi, dur-kalkın çok yapıldığı şehir içi sürüş şartlarında etkili olmuştur. Rejeneratif frenleme enerjisinin kullanımı ile en düşük % 11 yakıt tasarrufu sağlanmıştır. Kural tabanlı kontrol stratejisi ile ortalama % 13 oranında yakıt tasarrufu sağlanmıştır. Dinamik kontrol stratejisinin ise özellikle NO_x emisyonlarının azaltılmasında etkili olduğu ve ayrıca kural tabanlı stratejiye göre farklı sürüş şartlarına daha iyi uyum sağladığı görülmüştür. Ayrıca uygulanan stratejiler karmaşıklıklaştıkça sistem maliyeti hızla artmakta olduğu fakat sağlanan yakıt ekonomisinin neredeyse sabit kaldığı görülmüştür.

OPTIMIZATION OF FUEL CONSUMPTION AND EMISSIONS OF HYBRID VEHICLES OVER A DRIVING CYCLE

SUMMARY

With the consideration of global warming and environmental pollution, zero emission vehicles become an obligation. Hybrid electric vehicles developed as a transient solution. At that stage, hybrid electric vehicles are the most practical solution because of inexpensiveness of the technology compared to alternative solutions such as electric and fuel cell vehicles, easy adaptation with current technology and great similarity with the conventional vehicles.

The most important feature of hybrid electric vehicles is that they can recuperate brake energy with regenerative braking, limited by the capacity of battery and electric. Thus, they can reduce fuel consumption up to 20 %. Another method effective on fuel consumption is engine downsizing.

A hybrid vehicle can be manufactured in a simple way by using both internal combustion engine and generator. Vehicle can be made into more complex system by increasing the number of electric motors used with internal combustion engine. Hybrid vehicle design and control will be more difficult as the system gets more complicated. At this stage, simulation programs and control strategies will be needed to optimize the hybrid system.

The first part of this study focuses on modeling of light duty hybrid electric vehicle and simulating the vehicle by using 'backward facing' method. After applying automatic start – stop strategy and regenerative braking energy strategy, rule-based control strategy aiming to minimize fuel consumption was developed. The last strategy used in this study is dynamic control strategy. Unlike rule based control strategy, dynamic control strategy aims to minimize fuel consumption and emission values depending on defined parameters and determines the best engine operation point. These strategies were later simulated in European Union, Japan 10-15 and FTP 75 drive cycles to examine the effect of strategy on fuel consumption and emission factors.

The automatic start – stop strategy applied in the study is effective especially in urban driving conditions. With using regenerative braking energy, fuel consumption is reduced at least 11 %. Rule based control strategy provides an average of 13 % fuel saving. It has been observed that dynamic control strategy is especially effective on reduction of NO_x emissions and more adaptive to different driving conditions compared to rule based control strategy. Furthermore, as the control strategy becomes more complex, system price rises gradually but the fuel economy remains nearly constant.

1. GİRİŞ

Geleneksel içten yanmalı motor ile çalışan araçları yaklaşık yüzyıldan beri kullanmaktayız. Geçen zaman içinde, dünya nüfusunun artması ile birlikte, kişisel kullanıma yönelik motorlu araçlara olan talep hızlı bir artış göstermiştir. Buna paralel olarak yakıt tüketimi de artmıştır. Sınırlı olan petrol rezervleri azaldıkça yakıt fiyatlarının artışı da kaçınılmaz hale gelmiştir.

Yakıtların yanması sonucu açığa çıkan gazların küresel ısınmaya ve çevresel kirlenmeye sebep olduğu bilinen bir gerçektir. Çevresel kaygılar ile hükümetler ve çeşitli kuruluşlar, daha sıkı emisyon sınırları getirmeye başlamıştır. İlk olarak bu emisyon sınırlarına yanmayı iyileştirecek yöntemler, (fakir yanma, yüksek basınçlı ortak yollu püskürme sistemleri, kademeli dolgu, değişken zamanlı valf teknolojisi gibi), egzoz arıtma sistemleri gibi ardıl yöntemler, (partikül filtreleri, oksidasyon katalizörleri, üç yollu katalitik konvertörler) ve alternatif yakıtlar (biyodizel, doğalgaz) ile ulaşılmaya çalışılmıştır. Fakat bu yöntemler günümüzde yetersiz kalmaktadır.

Hedeflenen sıfır emisyonlu araçlara ulaşmak için İYM'lerden farklı bir teknolojiye geçilmesi zorunlu hale gelmiştir. Alternatif olarak ilk akla gelen araç tipi elektrikli taşıtlar olmaktadır. Elektrikli taşıtlar şebeke elektriği ile bir bataryayı şarj eden ve bataryayı elektrik motorlarına enerji sağlamak için kullanan taşıt tipleridir. Fakat yüksek üretim maliyeti, kısa menzil, uzun şarj süresi ve azalan yolcu ve bagaj kapasitesi ile kısa vadede hayata geçirilmesi mümkün değildir. Diğer bir çözüm ise yakıt hücreli taşıtlardır. Yakıt hücreli taşıtlar basit olarak hidrojeni kimyasal reaksiyona sokarak elektrik üretirler ve EM'larına güç sağlarlar. Bu araçlar da yüksek maliyetleri ve hidrojenin elde edilmesi, taşınması ve depolanması gibi sorunlar sebebiyle kullanılamamaktadır. Bu aşamada hibrid elektrikli taşıtlar düşük yakıt tüketimi ve emisyon değerleri, uzun menzil ve diğer alternatiflere göre ucuz olması sebebiyle kısa vadede hızlı bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. [1]

Hibrid taşıtlar temel anlamda en az iki farklı enerji kaynağından güç alarak hareket sağlayan araçlardır. Hibrid Elektrikli Taşıtlar (HET) dizel, benzinli veya alternatif

yakıtlar ile çalışan İYM’u temel güç kaynağı olarak kullanan, EM’nu ise ikincil enerji kaynağı olarak kullanan araç tipleridir. Sistem yapısına göre yalnız elektrik motoru, yalnız İYM veya ikisinin ortak çalışması ile hareket ederler. Burada en önemli hedef enerji kaynaklarının verimli kullanılmasıdır. Bu sebeple güç kaynaklarının boyutlandırılması, tahrik sisteminin ve hibrid araç yapısının belirlenmesi, İYM ve EM’u çalışma sınırlarının en uygun şekilde belirlenmesi önem kazanmaktadır. [2]

1.1. Hibrid Elektrikli Taşıtların Gelişimi

1898 yılında Ferdinand Porsche ilk arabasını (Lohner Elektrikli hafif gezinti arabası) yaptı. Porsche’nin ikinci arabası içten yanmalı motora bağlı bir jeneratörden sağlanan güç ile çalışan, tekerlek içlerine yerleştirilmiş elektrik motorları yardımıyla hareket eden bir hibrid elektrikli taşıttı. Bu araç yalnızca batarya ile yaklaşık 60 kilometre yol alabilmekteydi.

20. yüzyılın ilk yıllarında Amerikan firmaları 1681 buharlı, 1575 elektrikli ve 936 benzinli araç üretmişti. Yine bu dönemde New York’ da düzenlenen ilk Ulusal Otomobil Gösterisi’nde yapılan ankette katılımcıların ilk olarak elektrikli ve ikinci olarak az bir farkla buharlı taşıtları tercih ettikleri ortaya çıkmıştır.

1904 yılında Henry Ford benzin motorlu araçlardan kaynaklanan ses, titreşim, koku gibi sorunların üstesinden geldi. Seri üretim ile içten yanmalı motora sahip daha ucuz ve hafif olan araçların üretimine başladı. Bu gelişmeler sonucunda HET’larda hızlı bir gerileme yaşandı ve 1920’li yıllarda hibrid araç üreten firmaların birçoğu kapandı. Daha sonra 1970’lerde enerji krizi ile birlikte yakıt fiyatlarının çok fazla artması ile HET’lar tekrar gündeme gelmiştir.

Hibrid araçların tamamen hayatımıza girmesi ise 1997 yılında Japonya’da satışa çıkan ilk modern hibrid elektrikli taşıt olan Toyota Prius ile olmuştur. Daha sonra Honda Insight ve Honda Civic piyasaya çıkmıştır. Günümüzde ise birçok HET üretilmiş ve hedeflenen sıfır emisyonlu araçlara doğru büyük mesafe kat edilmiştir. [1]

1.2. Tezin Amacı

Bu çalışmada hibrid elektrikli taşıtların tanıtılması, sınıflandırılması yakıt ekonomisine katkılarının anlatılmasının ardından, bir ticari hibrid elektrikli taşıt modelinin Matlab Simulink ortamında oluşturulmuştur. Daha sonra Oluşturulan modelin belirli bir çevrime göre yakıt ekonomisi ve emisyon değerleri, farklı kontrol stratejileri uygulanarak optimize edilmiştir. İlk olarak kural tabanlı kontrol stratejisi uygulanmıştır. Bu strateji temel olarak yakıt tüketimini azaltmaya yoneliklidir. İkinci olarak dinamik bir kontrol stratejisi uygulanmıştır. Bu strateji yakıt tüketiminin yanında emisyonları da göze alarak bir çalışma noktası seçmektedir.

Tezin amacı uygulanan farklı kontrol stratejilerinin sağladığı yararlar ve maliyetleri açısından karşılaştırılarak uygulanabilecek en uygun kontrol stratejisinin belirlenmesidir.

2. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA YAKIT EKONOMİSİ VE EMİSYONLAR

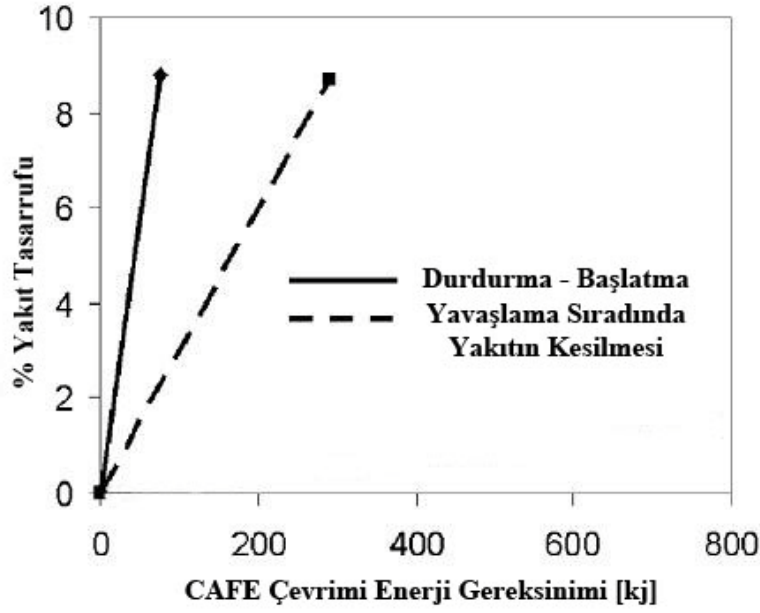
Son otuz yılda yakıt ekonomisini artıracak büyük gelişmeler kaydedilmiş olsa da genel bir sürüş anında bir benzin motorunun ortalama verimi % 15 civarında kalmaktadır. Kalan % 85 ise rüzgar ve tekerlek yuvarlanma direncine, tahrik sistemindeki sürtünmelere harcanmakta, bir kısmı da motor bloğundan ve egzoz sisteminden ısı olarak dışarıya atılmaktadır. İYM' a sahip bir sisteme EM'u ve enerji depolama sistemi eklenmesi ile sistem tasarımına göre farklılık gösteren birçok yoldan, enerji verimliliği artırılabilir. HET'larda yakıt ekonomisini geliştiren ve emisyonların azaltılmasını sağlayan temel prensipler aşağıdaki gibidir.

2.1. İçten Yanmalı Motorun Durdurulması

Normal bir binek taşıt çalışma zamanının yaklaşık % 20'sinde hareket etmez ve rölantide çalışır. Boşta çalışma sırasında İYM'un kapatılması ile yakıt tüketimi % 5 – 8 civarında azaltılabilir. Bu oran yavaşlama sırasında yakıtın kesilmesi ile daha çok artırılabilir.

İYM güçlü bir EM ile geleneksel marş motorundan daha hızlı bir şekilde çalıştırılabilir. 3 – 5 kw'lık bir EM, İYM'u 0.5 saniyeden kısa bir sürede rölanti hızına çıkarabilir. Bu sayede sürücü tarafından hissedilmeden yumuşak ve hızlı bir şekilde motor tekrar çalıştırılır.

Otomatik durdurma başlatma sistemine sahip bir aracın elektrik enerjisi ihtiyacı artacaktır. Bu durumda enerji depolama sistemi geleneksel kurşun – asit bataryalardan daha uzun ömre sahip olmalıdır. Az da olsa EM'u yardımıyla rejeneratif frenleme imkanı da olacağından şarj – deşarj çevrimi geleneksel bataryadan daha fazla olmalıdır.



Şekil 2.1: Çeşitli stratejilerin yakıt tüketimine etkisi ve enerji gereksinimi

Şekil 2.1’de otomatik durdurma - başlatma stratejisine ve yavaşlama sırasında yakıtın kesilmesine bağlı olarak sağlanan yakıt tasarrufu yüzde olarak görülmektedir. Her iki yöntemle % 8 – 9 civarında yakıt tasarrufu sağlandığı görülmektedir. Bu oranlar her iki yöntemin ayrı ayrı etkisini göstermektedir. Toplam etki % 10 – 12 civarında olacaktır. Ayrıca şekilde, uygulanan yöntemlere bağlı olarak gerekli olan enerji miktarları da görülmektedir. [3]

2.2. Rejeneratif Frenleme

Sürüş sırasında büyük miktarda enerji frenleme ve aracın yavaşlaması ile sürtünme şeklinde fren disklerinde harcanır. Bir jeneratör ile kaybolan enerjinin bir kısmını geri kazanmamız mümkündür. Frenleme sırasında aracın ataleti ile jeneratörün çalıştırılması ve elektrik üretmesi sağlanır. Üretilen elektrik enerjisi daha sonra EM tahrikinde kullanılmak üzere bataryalarda depolanır. Bu sürece rejeneratif frenleme denir.

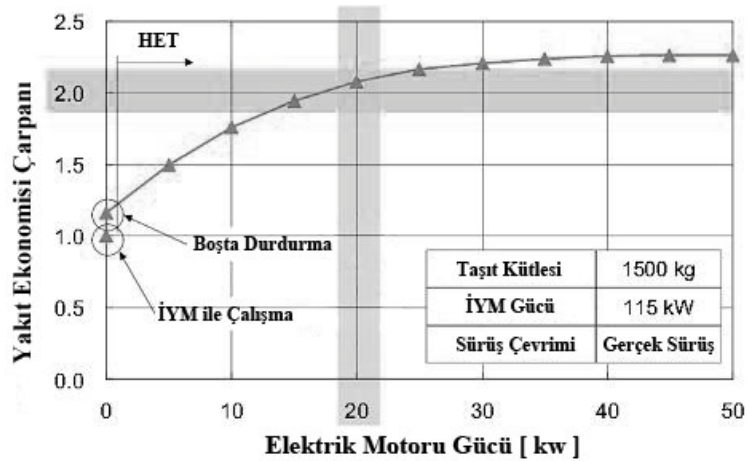
Rejeneratif frenlemenin yakıt ekonomisine etkisi EM gücü ve bataryanın kapasitesi ile orantılıdır. Büyük güçte bir EM yüksek ivmeler ile yavaşlamalardaki enerjinin geri kazanılmasına olanak sağlar. Benzer şekilde büyük kapasiteye sahip batarya ile yüksek ivmeler ile veya uzun süreli yavaşlamalarda geri kazanılan enerjinin depolanmasına olanak sağlar.

Fakat bu ilişki doğrusal değildir. Birçok frenleme yumuşak veya kısa sürelidir. Araç boyutuna bağlı olarak genellikle 10 – 20 kW. gücünde bir EM rejeneratif frenleme enerjisinin büyük bir bölümünü geri kazanmak için yeterlidir. Daha büyük EM daha fazla rejeneratif frenleme potansiyeli sağlar, fakat göreceli olarak sağladığı avantaj daha azdır. Ayrıca rejeneratif frenleme ile oluşan kuvvet sürtümlü fren ile oluşan kuvvet ile koordinasyon içinde olmalıdır. Büyük EM’unda bu durum daha önemlidir. Rejeneratif frenleme kuvvetleri ile araç kontrollü olarak yavaşlatılmalıdır. Beklenenden daha fazla veya az frenleme kuvveti uygulanır ise sürücü yanıltılabilir.

Büyük rejeneratif frenleme enerjisini depolamak için büyük kapasiteli bataryaya ihtiyaç vardır. Fakat enerji depolama sisteminin maliyeti, kapasitesine bağlı olarak artarken, sağladığı yarar daha az olmaktadır. [4]

Şekil 2.2 ideal bir HET’in gerçek sürüş şartlarında EM gücü ile yakıt ekonomisi ilişkisini göstermektedir. (ideal taşıt; mekanik ve elektriksel kayıpların olmadığı rejeneratif frenlemenin tamamen depolandığı sistem) Baz alınan 1 noktası sıfır EM gücüne karşılık gelen sadece İYM’a sahip aracı göstermektedir. Yakıt ekonomisi çarpanı HET yakıt ekonomisinin konvansiyonel aracın yakıt ekonomisine oranını göstermektedir. Yine sıfır EM gücüne sahip ikinci nokta İYM’un boştaki durdurulması ile sağlanan tasarrufu göstermektedir.

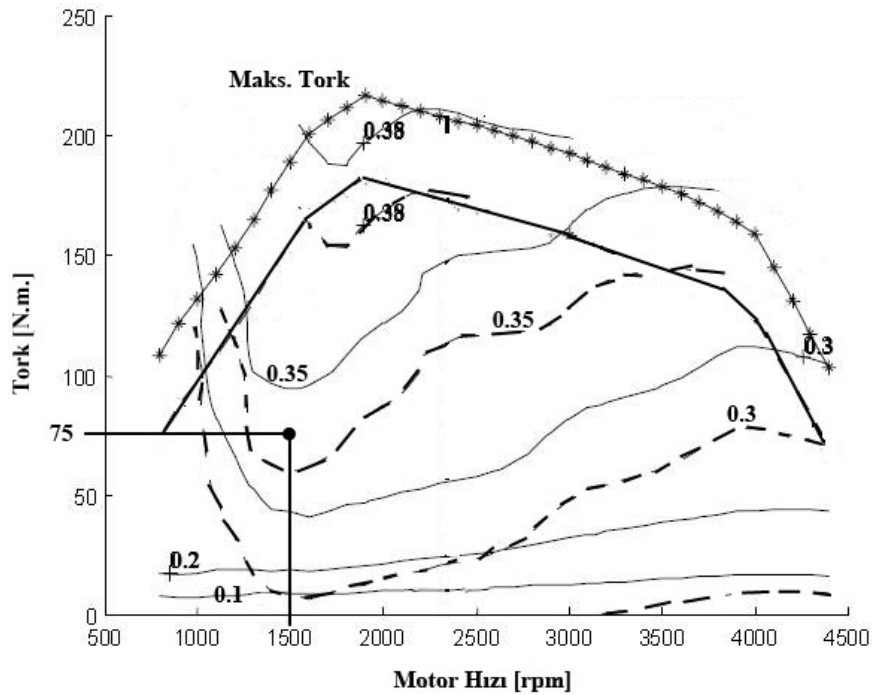
Şekilden EM’nun gücünün artması ile yakıt ekonomisinin arttığı açık şekilde görülmektedir. Bu araç için gerçek sürüş şartlarında ideal EM gücü 20 kW. olarak görülmektedir. Görüldüğü gibi EM gücünün 50 kW. olarak seçilmesi hemen hemen aynı seviyede yakıt ekonomisi artışı sağlamaktadır. Bunun sebebi bu kadar büyük kapasite gerektirecek rejeneratif frenleme durumlarının çok az olmasıdır. [5]



Şekil 2.2: Elektrik motoru gücü ve yakıt ekonomisi ilişkisi

2.3. İçten Yanmalı Motorun Küçültülmesi

Taşıtlar maksimum hız gibi en fazla gücün talep edildiği durumlara göre tasarlanmaktadır. Fakat bu maksimum güce sürüş sırasında nadiren ihtiyaç duyarız. Düz bir yolda taşıtın sabit hızla gitmesini sağlayacak olan güç, toplam motor gücünün küçük bir kısmıdır. HET'larda gerektiği anda elektrik motoru ile destek sağlanabileceğinden performansa etki etmeden daha küçük güçte İYM kullanılabilir. Taşıtın diğer özellikleri aynı bırakılarak, daha küçük güçte bir İYM kullanılması ile belli bir yük için çalışma noktası daha yüksek verimli bir bölgeye taşınabilir. Şekil 2.3' de 1500d./dk. – 75 N.m. örnek çalışma noktası ele alınmıştır. Büyük güçteki motorda verim 0.34 civarındadır. Aynı çalışma noktası için kesik çizgi ile gösterilen küçük güçteki motorda 0.35 – 0.36 arasında bir verime sahip olacaktır. Ayrıca küçük İYM' da sürtünme kayıpları, ısı kayıpları ve pompalama kayıpları daha az olacaktır. Daha küçük İYM kullanılması ile araç kütlesinin de azalması sağlanacaktır.



Şekil 2.3: İçten yanmalı motor verim haritası

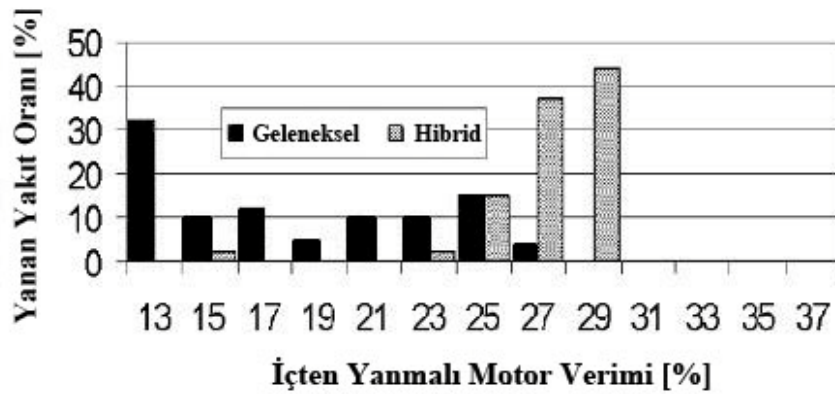
İYM'un küçültülmesi kabaca EM gücü ve batarya kapasitesi ile orantılıdır. Daha büyük EM ve daha fazla batarya kapasitesi ile daha küçük İYM kullanılabilir. 10 – 20 kW.'lık bir EM'na ve yeterli batarya kapasitesine sahip bir sistemde boşta çalışma sırasında motorun durdurulması ve rejeneratif frenleme ile % 25 civarında yakıt ekonomisi sağlanabilir. Buna ek olarak İYM' un küçültülmesi ile % 5 – 10 civarında

daha yakıt ekonomisi sağlanabilir. Bu oran toplamda ise % 30 – 40' a ulaşır. Fakat İYM boyutu küçüldükçe yokuş çıkma veya yük taşıma gibi maksimum güce gereksinim duyulduğu anlarda bataryanın boşalma ihtimali fazladır. Sistemin EM' undan yararlanma oranı artıkça, bataryanın boşalması ile daha fazla performans düşüşü meydana gelecektir.

Diğer taraftan HET'larda İYM' un küçültülmesi zorunlu değildir. EM'unun eklenmesi ile İYM küçültülmeden, özellikle EM'unun yüksek momente sahip olduğu düşük devirlerde, iyi bir performans artışı sağlanabilir. Aracın hibrid hale gelmesi sayesinde hem yakıt ekonomisi hem de performans artışı bir arada sağlanır. Bu performans artışı da birçok kullanıcının ilgisini çekecek ve HET'ların hayatımıza daha hızlı girmesine katkıda bulunacaktır.

2.4. İçten Yanmalı Motor Verimi

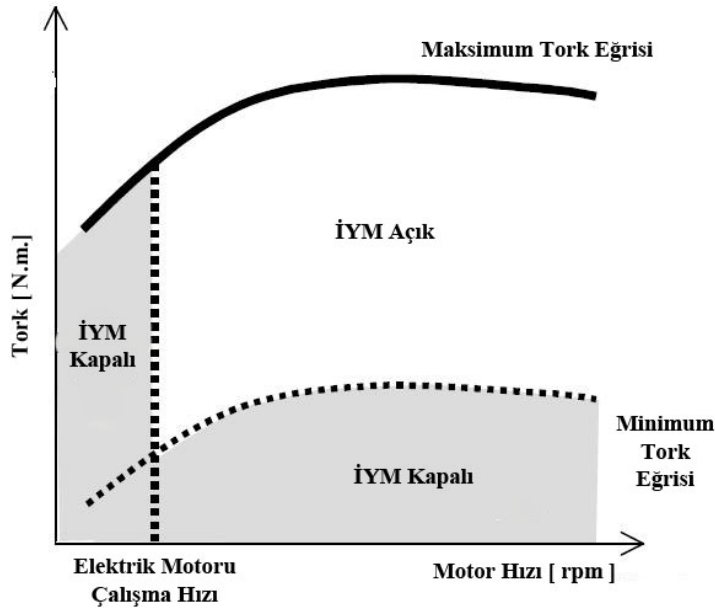
İYM'lar düşük yüklerde ve devir sayılarında en düşük verim ile çalışırlar. Bir hibrid sistemde İYM'un yüksek yüklerde çalışması ve bu sayede verimli bölgede kalması sağlanabilir. Bu amaçla düşük hız ve yüklerde EM ile tahrik sağlanarak İYM kapatılabilir ya da düşük yük ile çalışılan bölgede jeneratör devreye sokularak İYM'un yüksek verimli bölgede çalışması sağlanır. Şekil 2.4.'de geleneksel ve hibrid tahrik sistemine sahip iki sistemin karşılaştırılması görülmektedir. Burada hibrid sistemin yanmayı ağırlıklı olarak verimli bölgelerde gerçekleştirdiği görülmektedir. İYM'un küçültülmesi de burada büyük etkiye sahiptir. [3]



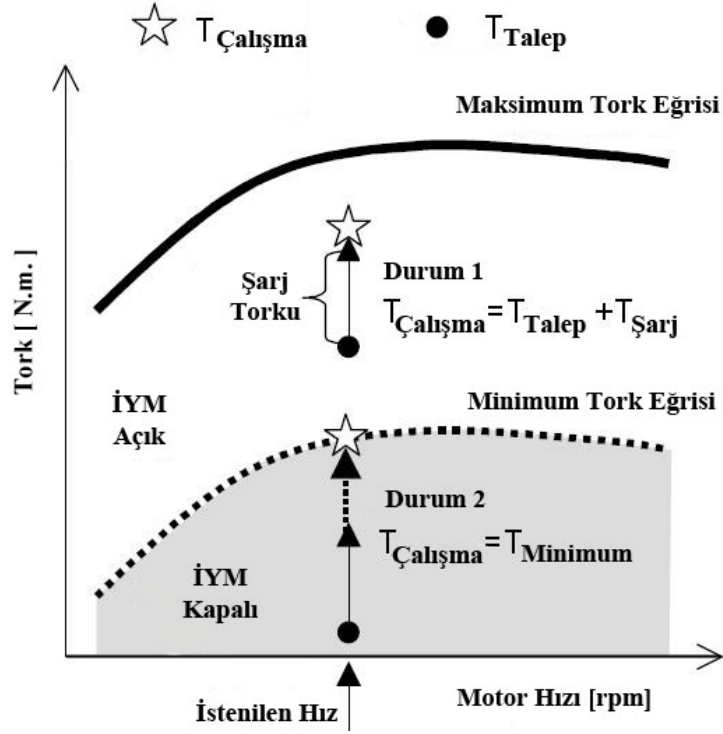
Şekil 2.4: Hibrid ve geleneksel tahrikte İYM verimlerinin karşılaştırılması

Şekil 2.5’de ise bir hibrid sistemde İYM’un çalışma bölgesi görülmektedir. Burada İYM’un kapalı olduğu bölgeler tahrikin EM ile sağlandığı bölgelerdir. Fakat bu durum batarya şarj seviyesinin yeterli olduğu zaman geçerlidir. Şekil 2.6’da ise batarya şarj durumunun belli bir seviyenin altında olduğu durum görülmektedir. Şekilde gösterilen bir numaralı durumda talep edilen moment, minimum moment değerinden büyüktür. Bu durumda jeneratör devreye alınarak İYM’un daha verimli çalıştığı bir üst noktaya taşınır. İkinci durumda ise talep edilen moment minimum moment değerinden azdır. Aynı şekilde jeneratör devreye alınır ve İYM daha yüksek verimli bir bölgeye, minimum moment çizgisi sınırına taşınır. [6]

Fakat enerji verimliliğini sağlayan her ek sistemin bir bedeli vardır. İYM’un kapatılıp yalnızca elektrik motoru ile tahrikin sağlanması, EM gücünün ve batarya kapasitesinin artırılmasını gerektirecektir. Buna bağlı olarak maliyet ve ağırlık artacaktır.



Şekil 2.5: İYMenin çalışma bölgesi ($SOC > SOC_{min}$)



Şekil 2.6: İçten yanmalı motorun çalışma bölgesi ($SOC < SOC_{min}$)

2.5. Yardımcı Elemanlar

Motor yakıt tüketimini azaltmanın yollarından bir tanesi de yardımcı elemanların çalışma zamanlarını ve performanslarını düzenlemektir. Bu yöntem yardımcı elemanların motordan ayrılarak dışarıdan tahrik edilmesi ile uygulanabilir. Bu sayede yardımcı elemanlar kullanılmadığı durumlarda kapatılabilir.

Motor tarafından tahrik edilen yardımcı elemanlar ağır araçlarda 50 kW. bir minivanda ise 8 kW. kadar güç tüketebilirler. Yardımcı elemanların motordan ayrı tahrik edilmesi durumunda güç tüketimi bir minivanda 1kw. bir kamyonunda ise 5kw. kadardır. Güç tüketiminin azalması aksesuarların güç ihtiyacının elektriksel elemanlar ile karşılanması ve kontrol stratejilerinin uygulanması ile sağlanmaktadır.

Elektriksel tahrik ile yardımcı elemanların İYM hızından bağımsız şekilde kontrolü mümkündür. Bu sayede daha verimli çalıştırılabilirler. Ayrıca kayış veya zincir ile tahrikte meydana gelen sürtünme kayıpları da ortadan kaldırılır.

Ayrıca motora yardımcı elemanların motordan ayrı tahrik edilmesi ile yardımcı elemanlar motorun ön kısmından kaldırılıp farklı yerlere yerleştirilebilir. Bu sayede araca daha aerodinamik bir yapı kazandırmak mümkündür. Yağ pompası ile bir ön yağlama sağlanabilir ve bu sayede sürtünmeler azaltılabilir. Su pompasının kontrolü

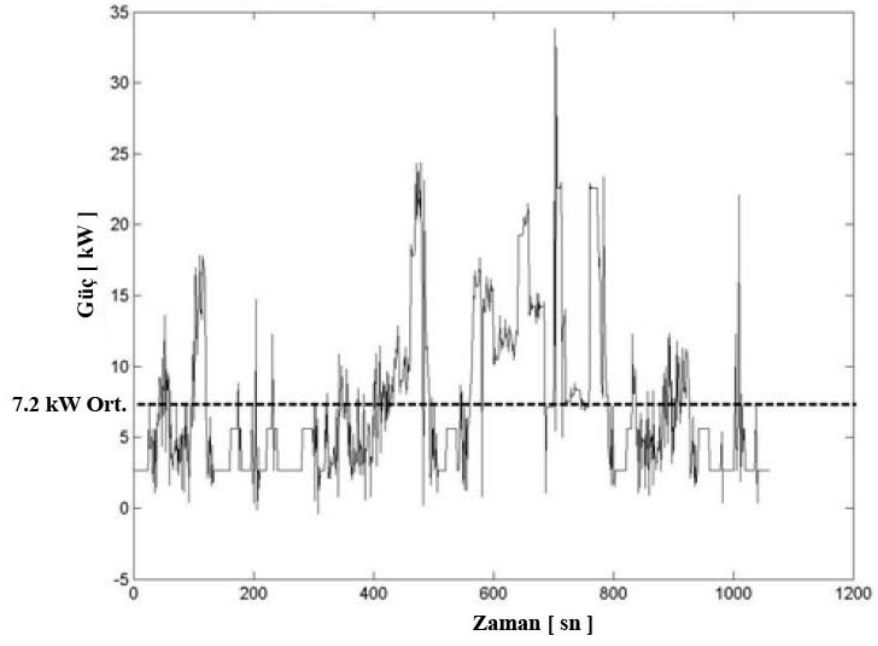
ile motorun ilk çalışma anında daha hızlı ısınması sağlanabilir. Fan kontrolü ile hava akışı daha verimli hale getirilebilir. Tek bir fan yerine küçük birden fazla fan kullanılabilir.

Şekil 2.7 ve şekil 2.8’de bir minivan için İYM tarafından ve İYM’den ayrı tahrik edilen yardımcı elemanların güç tüketimleri görülmektedir. İYM çalışma koşullarına göre veya ihtiyacına göre çalıştırılan yardımcı elemanların güç ihtiyacı UDDS çevriminde % 70 oranında azalma göstermiştir.

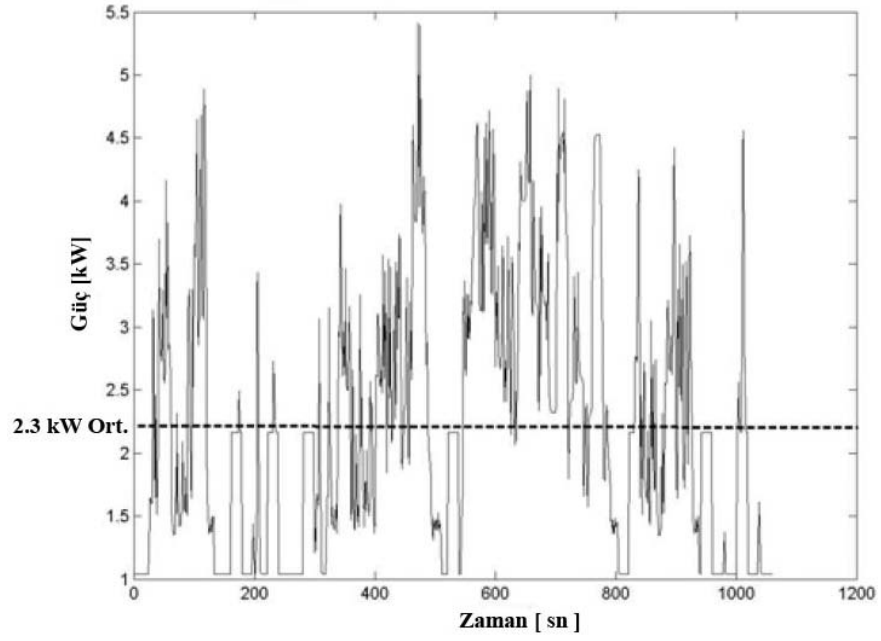
Çizelge 2.1’de bir hibrid elektrikli SUV taşıtta yardımcı elemanların EM tahrikli olarak çalıştırılması sonucu yakıt ekonomisi ve emisyonların değişimi görülmektedir. Araçta su pompası ve soğutma fanı kayış tahrikliken, elektrik tahrikli hale getirilmiştir. Aracın Yeni Avrupa Birliği Çevriminde koşturulması sonucu yakıt tüketiminin % 1.5 azaldığı görülmüştür. [7]

Çizelge 2.1: Bir hibrid elektrikli SUV taşıtta yardımcı elemanların yakıt tüketimi ve emisyonlara etkisi

	İYM Tahrikli Yardımcı Elemanlar	EM Tahrikli Yardımcı Elemanlar
Yakıt (Lt/100km)	5.58	5.5
PM (g/km)	0.0467	0.0461
CO (g/km)	0.584	0.581
NO _x (g/km)	0.403	0.394
HC (g/km)	0.0446	0.0443



Şekil 2.7: UDDS çevriminde İYM tarafından tahrik edilen yardımcı elemanların yük dağılımı (7.2 kW ortalama)



Şekil 2.8: UDDS çevriminde elektrik motoru ile tahrik edilen yardımcı elemanların yük dağılımı (2.3 kW ortalama)

3. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞIT TÜRLERİ

3.1. Hibridleşme Seviyelerine Göre

HET'lar elektriksel güce ve EM'nun işlevine göre mikro hibridler, hafif hibridler ve tam hibridler olarak sınıflandırılabilirler.

3.1.1. Mikro hibridler

Mikro hibrid bir sedan taşıt için yaklaşık EM gücü 2.5 kW. civarındadır. İYM'a sahip bir araca starter-alternatör ünitesinin bağlanmasından meydana gelmiştir. EM'nun temel görevi İYM'u otomatik olarak hızlı bir şekilde durdurup başlatmak ve bu sayede yakıt tasarrufu sağlamaktır. Duruş ve kalkışların sık olduğu şehir içi sürüş şartlarında % 5 – 10 civarında enerji tasarrufu sağlanabilir. Yapının basit olması ve EM'nun küçük olması sayesinde mikro hibrid taşıtlar en ucuza mal olan hibrid taşıt tipidir. Örnek olarak Valeo motor sistemini kullanan Citroen C3 verilebilir.

3.1.2. Hafif hibridler

Hafif hibrid bir sedan taşıt için EM gücü 10 – 20 kW. civarındadır. Bu tipteki araçlarda EM ve İYM doğrudan birleştirilmiştir. Büyük yarıçapı dolayısıyla büyük ataletle sahip bir EM volan yerini de alabilir. İYM ile EM gerekli tahrik kuvvetini ortak sağlarlar. Genel olarak % 20 – 30 civarında enerji tasarrufu sağlanabilir. Fakat maliyette % 20 – 30 civarında artar. Bu tipteki araçlara örnek olarak ise Honda Civic ve Honda Insight verilebilir.

3.1.3. Tam hibridler

Tam hibrid bir sedan taşıt için EM gücü 50 kW. civarındadır. Genellikle EM, jeneratör ve İYM'dan oluşur ve bunların bağlanma şekillerine göre seri, paralel veya kompleks yapıya sahiptirler. Planet dişli mekanizması gibi güç akışını EM, İYM, jeneratör ve batarya arasında en uygun şekilde gerçekleştiren bir sistem ile maksimum yakıt ekonomisi ve minimum emisyon değerleri sağlanır. Tahrik, kalkış sırasında EM ile sabit hızlı sürüş sırasında İYM ile güç talebinin fazla olduğu

yerlerde İYM – EM ile ortak sağlanabilir. Güç talebin az olduğu İYM optimum çalışma bölgesinden uzak çalıştığı durumlarda ise jeneratör ile İYM yüklenerek çalışma noktası optimum bölgeye taşınır. Bir tam hibrid taşıt şehir içi sürüş şartlarında % 30 – 40 civarında yakıt tasarrufu sağlayabilir. Fakat maliyette aynı oranda artış gösterir. Örnek olarak Toyota Prius ve Toyota Highlander verilebilir. [1]

3.2. Yapılarına Göre

3.2.1. Seri hibrid elektrikli taşıtlar

HET'ların en basit tipidir. İYM'dan sağlanan mekanik enerji jeneratör yardımı ile elektriksel enerjiye dönüştürülür. Üretilen elektrik enerjisi bataryada depolanır veya EM ile tekerleklerin tahrikinde kullanılır. Temel olarak menzili uzatmak için İYM tarafından desteklenen elektrikli taşıt olarak çalışmaktadır. Mekanik elemanlar üzerinde kavrama olmadığı için İYM ve jeneratör çiftini araç üzerinde istediğimiz yere yerleştirebiliriz. Tahrik sistemini bu şekilde basitleştirebilmemize rağmen EM, İYM ve jeneratör olarak üç farklı tahrik elemanı gerekmektedir. Bu sistemin diğer bir dezavantajı ise tahrik elemanlarının maksimum güce göre boyutlandırılmasının gerekli olmasıdır. (Şekil 3.1)

3.2.2. Paralel hibrid elektrikli taşıtlar

Seri HET'lardan farklı olarak paralel HET'larda İYM ve EM birlikte tekerleklerin tahrikinde kullanılabilirler. Temel olarak emisyon ve yakıt ekonomisini düşürmek amacıyla EM tarafından desteklenen geleneksel İYM'lu araç şeklinde çalışmaktadır. EM rejeneratif frenleme ile veya İYM ile bataryayı şarj etmek için jeneratör olarak kullanılabilir. Seri HET'lardan farklı olarak ayrıca jeneratöre ihtiyaç duymazlar. Diğer bir avantajı ise İYM ve EM daha küçük boyutlarda kullanılabilir. Uzun yolculuklar için bile yalnızca İYM maksimum güce göre tasarlanır. EM talep edilen maksimum gücün yarısı kadar güce sahip olması yeterlidir. (Şekil 3.1)

3.2.3. Seri – paralel hibrid elektrikli taşıtlar

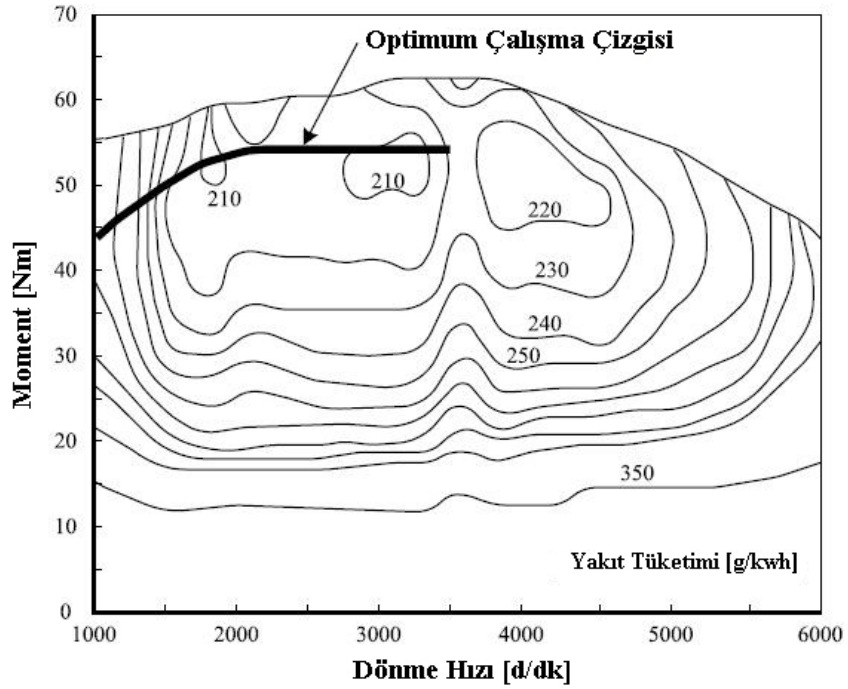
Seri – Paralel HET'lar yukarıda bahsedilen her iki yapının da özelliklerini içerirler. Seri sisteme göre fazladan bir mekanik bağlantı, paralel sisteme göre ise fazladan bir jeneratör bulunmaktadır. Her iki sisteminde avantajlarından yararlanmalarına rağmen

4. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA GÜÇ AKIŞ KONTROLÜ

Hibrid elektrikli taşıtların yapıları farklılık gösterdikçe elemanların kendi arasındaki güç akışını düzenleyen kontrol stratejileri de farklılık gösterir. Kontrol stratejisinin amacı ise maksimum yakıt ekonomisi, minimum emisyon, minimum sistem maliyeti ve iyi sürüş performansı olarak sıralanabilir.

Bir kontrol stratejisi belirlenirken göz önüne alınan şartlar ise aşağıdaki gibidir.

Optimum İYM çalışma noktası: İYM moment – dönme hızı düzleminde maksimum yakıt ekonomisi, minimum emisyon veya ikisini ortak olduğu çalışma duruma göre seçilir. Eğer İYM'un farklı güç seviyelerinde çalışması gerekli ise, karşılık gelen noktaların birleştirilmesi ile optimum çalışma çizgisi oluşturulabilir. Aynı şekilde yanma veriminin belli bir seviyede kaldığı optimum çalışma bölgesi oluşturulabilir. Şekil 4.1'de minimum yakıt tüketimine göre oluşturulmuş optimum çalışma çizgisi görülmektedir.



Şekil 4.1: Bir İYM'un yakıt tüketimine göre optimum çalışma çizgisi

Minimum motor hızı: İYM'lar belli devir sayısının altında çok düşük verimde çalışırlar. Bu yüzden belirli bir limit hızın altında İYM durdurulur.

Minimum motor çalıştırma süresi: İYM'u çok sık durdurup başlatmak istenilenin aksine yakıt tüketimini ve emisyonları artırabilir. Ayrıca İYM'u başlatma süresi mümkün olduğunca kısaltılmadır.

Batarya şarj durumu: Batarya şarj seviyesi (SOC) belli bir seviyede tutulmalıdır ki, bu sayede hızlanma sırasında yeterli gücü sağlayabilmeli ve frenleme veya yokuş inme sırasında rejeneratif frenlemeden gelen güç depolanabilmelidir

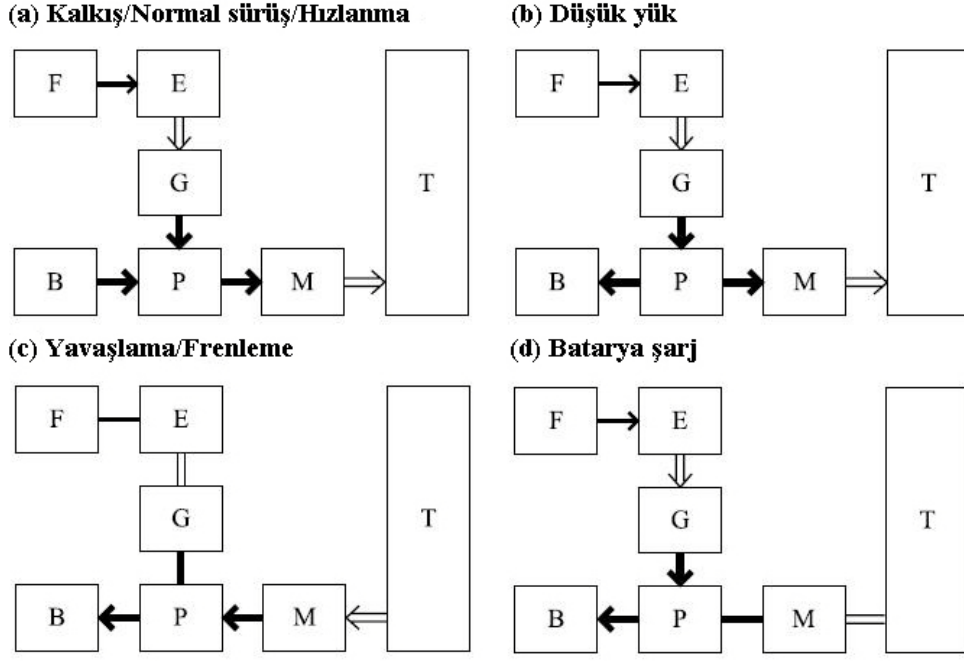
Güç dağılımı: Sürüş sırasında istenilen performans ve yakıt tüketimini sağlayacak şekilde İYM ve batarya arasındaki güç dağılımı en uygun şekilde yapılmadır.

4.1. Seri Hibrid Elektrikli Taşıt Kontrolü

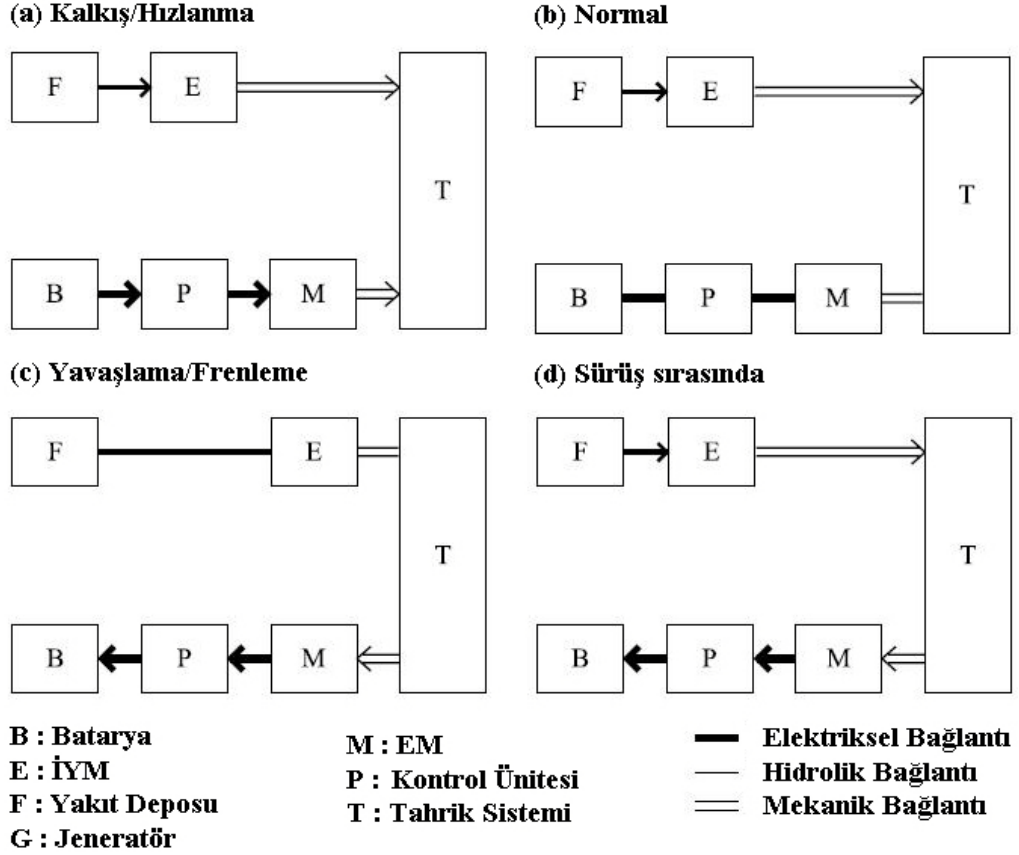
Seri hibrid sistemlerde güç akışı şekil 4.2'de gösterilen dört çalışma modu ile açıklanabilir. Kalkışta, normal sürüşte veya hızlanma sırasında jeneratör aracılığı ile İYM ve batarya EM'una güç sağlar ve araç hareket ettirilir. Düşük yüklerde İYM aracın tahriki için gerekli olan güçten daha fazla güçte çalıştırılır. SOC belli bir seviyenin altında ise jeneratörde üretilen fazla güç bataryanın şarjı için kullanılır. Frenleme veya yavaşlama sırasında EM jeneratör şeklinde çalışarak kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür ve bataryaları şarj eder. Araç tamamen durduğu zamanda İYM bataryayı şarj edebilir. Toyota Coaster bu sisteme örnek olarak gösterilebilir.

4.2. Paralel Hibrid Elektrikli Taşıt Kontrolü

Şekil 4.3'de paralel hibrid taşıtların dört çalışma modu görülmektedir. Kalkış sırasında veya hızlanma sırasında, tahrik kuvveti İYM ve EM arasında belli bir oranda paylaşılır. Genel olarak İYM ve EM arasındaki kuvvet dağılımı sırasıyla %80 - % 20 şeklinde olmaktadır. Normal sürüş sırasında aracı hareket ettirmek için gerekli olan kuvvet yalnızca İYM'dan karşılanır. Frenleme veya yavaşlama sırasında EM jeneratör şeklinde çalışarak bataryayı şarj eder. EM ve İYM aynı tahrik mili üzerine bağlandığında sürüş sırasında düşük yüklerde de EM yardımıyla batarya şarj edilebilir. Paralel sisteme örnek olarak Honda Insight verilebilir.



Şekil 4.2: Seri HET Çalışma Modları



Şekil 4.3: Paralel HET çalışma modları

4.3. Seri – Paralel Hibrid Elektrikli Taşıt Kontrolü

Seri – paralel hibrid sistemler de güç akışını kontrol etmenin birçok yolu vardır. Temel olarak İYM ağırlıklı ve EM ağırlıklı olmak üzere ikiye ayrılabilir. İYM ağırlıklı sistem İYM'un daha aktif olduğu, EM ağırlıklı sistem ise EM'unun daha aktif olduğu sistemlerdir. Şekil A.1.'de görüldüğü gibi İYM ağırlıklı sistemlerde altı çalışma modu bulunmaktadır. Kalkış sırasında aracı hareket ettirmek için gerekli olan gücü tek başına batarya karşılamaktadır. Hızlanma sırasında talep edilen güç EM ve İYM arasında belli bir oranda paylaşılmaktadır. Normal sürüş şartlarında ise İYM tek başına talep edilen gücü sağlamaktadır. Frenleme veya yavaşlama sırasında ise EM bataryayı şarj etmektedir. Sürüş sırasında İYM gerekli ise jeneratörü de hareket ettirerek bataryanın şarj olmasını sağlamaktadır. Araç durduğu sırada İYM jeneratör yardımı ile bataryayı şarj edebilmektedir. Sisteme örnek olarak Nissan Tino verilebilir.

Elektrik ağırlıklı sistem ise şekil A.2'de görülmektedir. Altı çalışma modu bulunmaktadır. İYM ağırlıklı sistemden farklı olarak hızlanma sırasında hem batarya hem de jeneratörden ve normal sürüş şartlarında jeneratörü kullanarak EM'una da güç sağlamasıdır. İYM ile aracı ve jeneratörü tahrik etmek için güç aktarımı genellikle bir planet dişli mekanizması ile sağlanır. Diğer sistemlerde olduğu gibi yavaşlama veya frenleme sırasında jeneratör yardımı ile batarya şarj edilir. Sürüş sırasında bataryanın şarj edilmesi ise İYM'un aracı ve jeneratörü aynı anda tahrik etmesi ile sağlanmaktadır. Araç durduğu sırada da İYM jeneratörü çalıştırarak bataryanın şarj edebilir. Bu sisteme örnek olarak Toyota Prius verilebilir.

4.4. Gelişmiş Hibrid Elektrikli Taşıt Kontrolü

Gelişmiş sistemde ön aks ile arka aks birbirinden bağımsız şekilde tahrik edilmektedir. Ön ve arka aks arasında herhangi bir aktarma organı bulunmadığı için daha hafif bir sistem tasarımına ve paketleme esnekliğine olanak verir. Aynı zamanda her iki akstan da rejeneratif frenleme yapılabilmesi yakıt ekonomisine katkıda bulunacaktır.

Şekil A.3.'de ön akstan hibrid sistem arka akstan ise EM ile tahrik edilen bir araç görülmektedir. Altı çalışma modu bulunmaktadır. Kalkış sırasında batarya arka ve ön aksta bulunana EM'larına güç sağlar ve İYM devreye sokulmadan araç harekete

geçer. Hızlanma sırasın ön aksta İYM ve EM arka aksta ise diğere EM gerekli tahrik kuvvetini sağlar. Normal sürüşte ve / veya batarya şarj durumunda İYM ön aksı ve jeneratör şeklinde çalışan EM'nu tahrik etmek için kullanılır. Ön aksı, EM ve İYM bir arada çalıştırmak için genellikle planet dişli mekanizması kullanılır. Düşük yüklerde bataryanın yalnızca ön akstaki EM'na enerji sağlaması ile aracın hareketi sağlanır. Frenleme veya yavaşlama sırasında her iki EM'da rejeneratif frenleme yaparak bataryayı şarj eder. Sistemin diğere bir özelliğı aks dengeleme yapabilmesidir. Örneğın ön tekerleklerin kayması durumunda ön EM jeneratör şeklinde çalışarak İYM'dan tekerleklere giden gücü azaltır ve bu sayede kayma önlenir. Toyota Post – Prius bu sisteme örnek olarak verilebilir. [7]

5. HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA SİMÜLASYON VE TEST

5.1. Simülasyon

Üretilmesi planlanan bir taşıtın çeşitli simülasyon araçları ile incelenmesi iş gücünün ve enerjinin verimli kullanımı açısından büyük önem taşımaktadır. Bu şekilde ürün geliştirme süreci kısaltmakta ve aynı zamanda istenilen performans değerlerine yönelik daha iyi bir optimizasyon yapılabilmektedir. Ayrıca bilgisayar ortamında yapılan çalışmalar araştırma – geliştirme maliyetlerini oldukça azaltmaktadır.

Özellikle HET’lar gibi karmaşık yapıya sahip olan ve iyi bir optimizasyon gerektiren sistemlerde simülasyon araçları daha çok önem kazanmaktadır. Simülasyon araçları ile farklı hibrid yapıların değerlendirilmesi hızlı ve güvenilir bir şekilde yapılabilmektedir.

HET’ların analizinde kullanılan simülasyon programları geriye dönük veya ileriye dönük olmak üzere iki farklı prensibe göre çalışmaktadır. Geriye dönük simülasyon yönteminde aracın istenen sürüş çevrimini takip edebildiği kabul edilir ve sürüş çevrimine göre gidilmesi gereken hıza ulaşmak için her bir tahrik elemanına gelen kuvvet tekerlekten başlayarak geriye doğru hesaplanır. Hızlı bir simülasyon yöntemidir. İleriye dönük simülasyon yönteminde ise gaz pedalından yola çıkılarak istenilen hıza ulaşmak için ne kadar moment üretilmesi gerektiği hesaplanır. Daha gerçekçi bir sürücü davranışı izlenir. Fakat işlem süresi uzundur.

HET simülasyonu için kullanılan birçok program vardır. Bunlardan en yaygınları PSAT (Powertrain System Analysis Toolkit) ve ADVISOR(Advanced Vehicle Simulator)’dır. PSAT Argonne Ulusal Laboratuar’larında (ANL) geliştirilen ileriye dönük hesaplama yöntemi ile çalışan bir programdır. Yakıt tüketimi, egzoz emisyonları ve araç performansı gibi hesaplamaların yapılmasına olanak sağlar. ADVISOR ise Ulusal Yenilebilir Enerji Laboratuar’larında (NREL) geliştirilmiştir. İleriye dönük ve geriye dönük hesaplama yöntemlerinin birleşiminden oluşan karma bir yöntem kullanmaktadır. Bu şekilde hızlı hesaplama yapabilmekte ve aracın istenilen performans değerlerini karşılayıp karşılamadığını kontrol etmektedir.

Bunlara ek olarak çeşitli üniversite ve kuruluşların geliştirmiş olduğu birçok program vardır. Bunlardan bazıları HVEC, CSM HEV, V-elph, SIMPLEV ve MARVEL olarak sıralanabilir. [9,10]

5.2. Test

Ülkemizde emisyon testleri Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomi Komisyonu'nun belirlediği 14 Haziran 2005 tarihli E/ECE/324, E/ECE/TRANS/505 kodlu, Regülasyon 83'e göre yapılmaktadır. Bu regülasyon taşıtların soğuk çalıştırma sonrası oluşan egzoz emisyonları, buharlaşma emisyonları, karter gazları emisyonları, egzoz emisyonları filtre ünitelerinin dayanımı ve yerleşik kontrol sistemlerinin dayanımı konularını kapsamaktadır. Bu regülasyona ağırlığı 3500 kg. mı aşmayan dizel ve benzinli otomobiller, ticari taşıtların yanı sıra hibrid taşıtlarda dahildir. Taşıtlar, regülasyonda belirtilen dahil oldukları kategori testlerine tabi tutulurlar ve yine regülasyonda belirtilen kriterlere uygunlukları onaylandığı takdirde taşıtın üretimine ve pazarda satışına izin verilir.

Regülasyonda HET'lar taşıtın dışarıdan şarj edilebilir olmasına veya taşıtın farklı modlarda çalıştırma seçeneği olmasına göre dört farklı kategoride test edilmektedir.

- I. Dışarıdan şarj edilebilen ve farklı modlarda çalıştırma seçeneği olmayan
- II. Dışarıdan şarj edilebilen ve farklı modlarda çalıştırma seçeneği olan
- III. Dışarıdan şarj edilemeyen ve farklı modlarda çalıştırma seçeneği olmayan
- IV. Dışarıdan şarj edilemeyen ve farklı modlarda çalıştırma seçeneği olan

Buna göre I. ve II. kategorideki araçlar için;

A: Testin taşıtın elektrik / enerji kaynağı maksimum şarjlı durumda iken yapılması,

B: Testin taşıtın elektrik / enerji kaynağı minimum şarjlı durumda iken yapılması,

durumlarına göre araçlar iki defa teste tabi tutulmaktadır. A ve B durumlarında elde edilen test verilerinin ağırlıklı ortalaması alınarak her iki tip için araçların test sonuçları elde edilir ve emisyon limitleri ile karşılaştırılır.

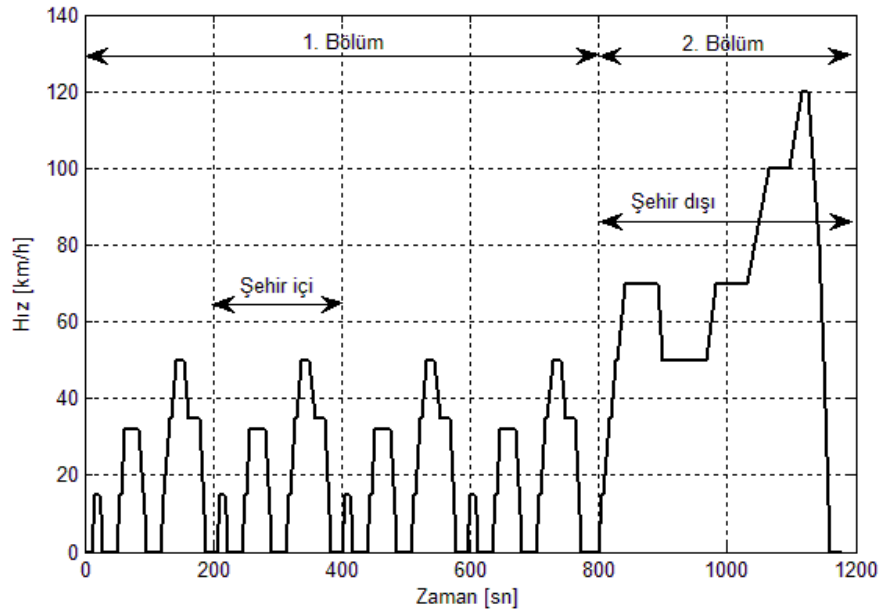
III. ve IV. Kategorideki taşıtlar ise dışarıdan şarj edilemedikleri için tek enerji kaynakları sıvı yakıtlar olmaktadır. Bu özelliklerinden yola çıkarak bu kategorideki araçlar konvansiyonel araçlar gibi test edilmektedir. IV. kategorideki araçlarda

çalışma modu seçilebilmesi nedeniyle araç çalıştığında otomatik olarak hangi moda geçiriliyorsa o modda testlere tabi tutulmaktadır.

Regülasyonda testler Yeni Avrupa Birliği çevrime göre yapılmaktadır. Bu çevrimin birinci bölümü Avrupa Birliği Şehir İçi, ikinci bölümü ise Avrupa Birliği Şehir Dışı çevriminden oluşmakta ve toplamda 19 dakika 40 saniye sürmektedir. Çevrimdeki ilk dört bölüm şehir içini, yüksek hızlara çıkan son bölüm ise şehir dışını temsil etmektedir.

Şehir içi çevrimi 195 saniye sürmekte ve taşıtların şehir içindeki davranışlarını örneklemeyi amaçlamaktadır. Test fazları rölantide çalışma, hızlanma, sabit hızda ilerleme, yavaşlama, vites değiştirme gibi bölümlerden oluşmaktadır. Bu fazların standartta belirtilen sürede ve hızda toleranslar dahilinde tamamlanması gerekmektedir. Şehir içi trafiğini temsil ettiğinden küçük viteslerde sürekli dur kalk şeklinde bir çevrimdir. Rölanti süresi 60 saniye, Ortalama hız 19 km/h, maksimum hız 50 km/h, kat edilen mesafe ise 1.013 km.dir.

Şehir dışı çevrimi ise 400 saniye sürmektedir. Şehir dışı sürüşü temsil ettiğinden yüksek hızlarda sabit hızla ve az vites değişikliği ile ilerlenmektedir. Aynı şekilde standartta istenen hızlarda ve toleranslar dahilinde tamamlanması gerekmektedir. Rölanti süresi 20 saniye, Ortalama hız 62.6 km/h, maksimum hız 120 km/h, kat edilen mesafe 6.955 km.'dir. [10]



Şekil 5.1: Yeni Avrupa Birliği Sürüş Çevrimi [11]

6. GELİŞMİŞ HİBRİD ELEKTRİKLİ TAŞIT MODELİ

Çalışmada kullanılan taşıt, parametreleri belirli olan, motorları ve batarya sistemi önceden seçilmiş bir hibrid elektrikli taşıttır. Bu bölümde kullanılan taşıt ve uygulanan hibrid yapı tanıtılacaktır.

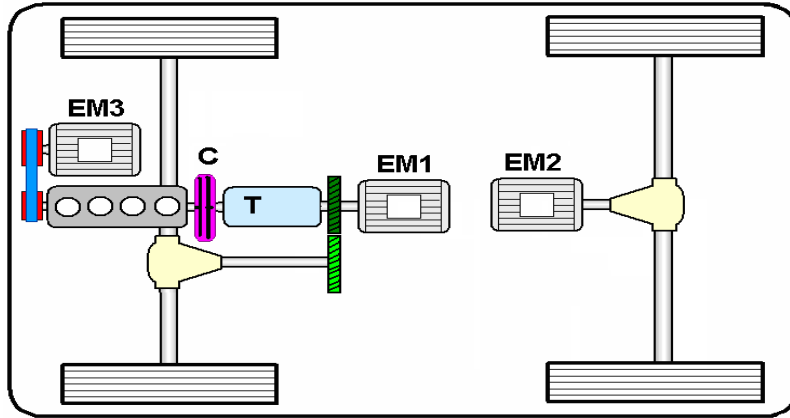
Simülasyonu yapılan taşıt dört silindirli dizel motora sahip van tipi bir ticari taşıttır. Araç hibrid yapıya dönüştürüldükten sonra, bataryanın, elektrik motorlarının ve elektrik sistemlerinin eklenmesi ile ağırlığında % 15'lik (300 kilogram) bir artış meydana gelmiştir. Ticari bir taşıt olması sebebiyle bu artış yalnızca yük taşıma kapasitesine etkileyecektir. Ayrıca taşıtın hibrid hale getirilmesi ile sağlanan yarar azalacaktır.

Çizelge 6.1: Simülasyonu yapılan taşıtın özellikleri

		Konvansiyonel	Hibrid
Taşıt	Tipi	Ticari Van	
	Boş ağırlık	2000 kg.	2300 kg.
	Yüklü Ağırlık	3300 kg.	
İYM	Tipi	Dizel	
	Hacim	2.2 Lt.	
	Maks. Güç	130BG@4000 d/dk	
	Maks. Moment	310 Nm@ 1500-2500 d/dk	
EM	Tipi	-	Fırçasız Sürekli Mıknatıslı Motor/jeneratör Ünitesi
	Maks. Güç	-	100 BG (75 kW)
	Sürekli Güç	-	40 BG (30 kW)
	Maks. Moment	-	240 Nm
	Sürekli Moment	-	150 Nm
	Çalışma Gerilimi	-	250-400 VDC
Batarya	Ağırlık	-	40 kg.
	Tipi	-	Lityum-iyon
	Nominal Voltaj	-	320 V
	Kapasite	-	45 Ah
	Şarj/Deşarj akımı	-	90 A
	Maks. Şarj/Deşarj Akımı	-	270 A
SOC Çalışma Aralığı	-	% 60 ± 20	

Şekil 6.1’deki hibrid yapıya baktığımızda, üçüncü bölümde bahsedilen önden çekişli gelişmiş hibrid elektrikli taşıta benzemektedir. Farklı olarak İYM’a seri bağlı bir EM bulunmaktadır. Önden çekişli olan konvansiyonel araç, arkaya da EM eklenmesi ile dört çeker hale getirilmiştir. Tahrik ön aksta İYM ve EM ile birlikte sağlamaktadır. Öndeki EM vites kutusu ile diferansiyel arasından bir dişli yardımı ile tahrik sistemine bağlanmıştır. Bu yapının tercih edilmesinin sebebi mevcut olan konvansiyonel taşıtın en az maliyetle ve en basit şekilde hibrid hale getirilmek istenmesidir.

Fakat bu yapıyı uygulanmasının bazı dezavantajları vardır. EM’nun vites çevrim oranlarından yararlanamayacak olması sebebiyle geniş bir hız aralığında sabit güç ve düşük hızlarda yüksek moment sağlayabilmesi gerekmektedir. Ayrıca EM’ları kullanılmadıkları durumlarda sürtünme momenti oluşturarak kayıplara sebep olacaktır. Bu durum ek bir kavrama ile EM unun kullanılmadığı durumlarda tahrik sisteminden ayrılması ile önlenabilir.



Şekil 6.1: Simülasyonu yapılan HET

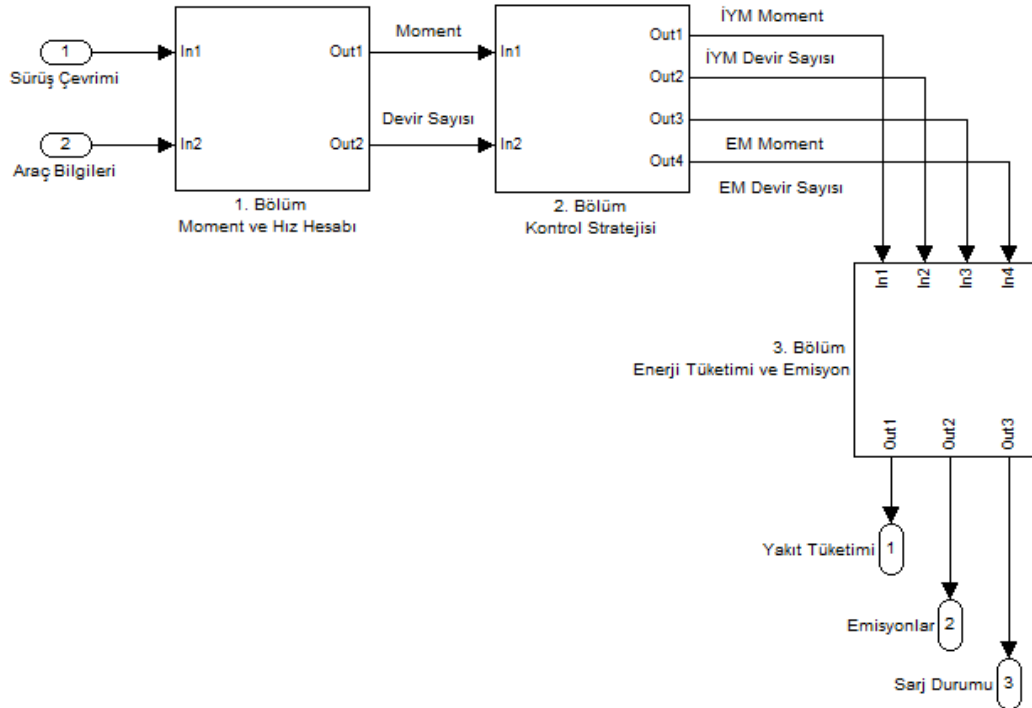
Konvansiyonel araçta bulunan İYM’un kullanılması ile performans artışı sağlanması kaçınılmazdır. Dört çekerli hale gelen taşıtın çıkabileceği maksimum yokuş, 0-100 km/s hızlanma gibi performans değerleri artış gösterecektir. Burada maksimum yüklü ağırlık aks taşıma kapasitesi ile sınırlı olduğundan aynı kalmıştır. Daha küçük İYM kullanılması durumunda, batarya seviyesi azaldığı anda EM devre dışı kalacak ve bu da performans düşüşüne sebep olacaktır. Aracın ticari bir taşıt olması yüklü durumda daha fazla kullanılacağı ve yüksek güçlere ihtiyaç duyacağı anlamına gelir. Bu durumda performans düşüşü istenmeyecek bir durumdur.

6.1. Simülasyon Programı

Çalışmada kullanılan program geriye dönük hesaplama yöntemi esas alınarak Matlab Simulink ortamında oluşturulmuştur. Buna göre ilk olarak araç bilgileri, tahrik sistemi bilgileri, İYM yakıt ve emisyon haritaları ve EM verim haritaları Matlab ortamına aktarılmıştır.

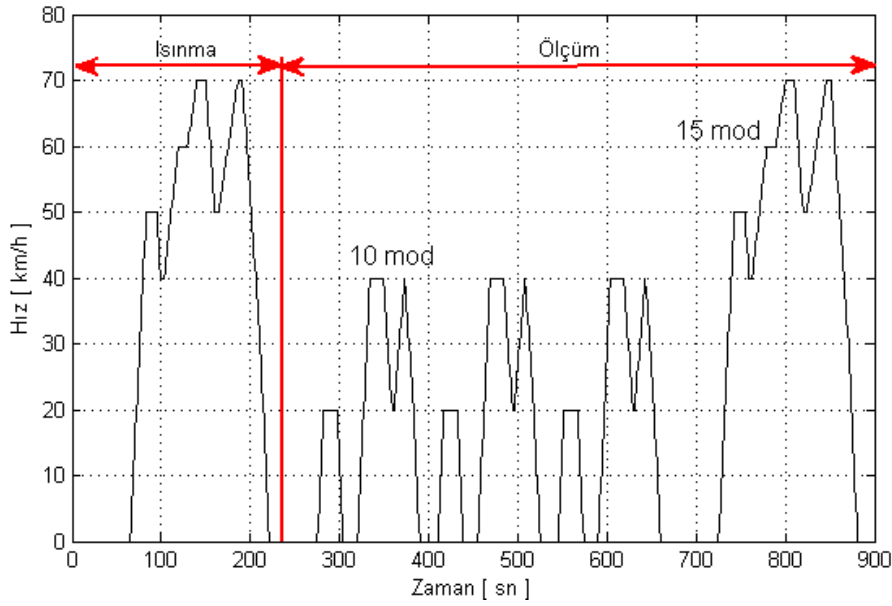
Buna göre program ilk olarak çevrim ve araç bilgilerine ihtiyaç duymaktadır. (Şekil 6.2) Birinci bölümde rüzgar, yuvarlanma ve ivmelenme dirençleri hesaplanarak talep edilen tekerlek momenti bulunur. Çalışılan vites kademesi ve aktarma organları verimleri göz önüne alınarak EM ve/veya İYM tarafından karşılanması gereken momentler hesaplanır. Çevrim hızına bağlı olarak ise tekerlek devir sayısı ve buradan da çalışılan vites kademesine göre, karşılık gelen İYM ve EM dönme hızları bulunur.

Hesaplanan moment ve devir sayısı kontrol stratejisi bölümde EM ve İYM arasında hız, şarj durumu ve EM limitleri göz önüne alınarak paylaşılır. Son bölümde ise İYM ve EM çalışma noktalarına karşılık gelen enerji tüketimi ve emisyon değerleri motor haritaları üzerinden okunur.

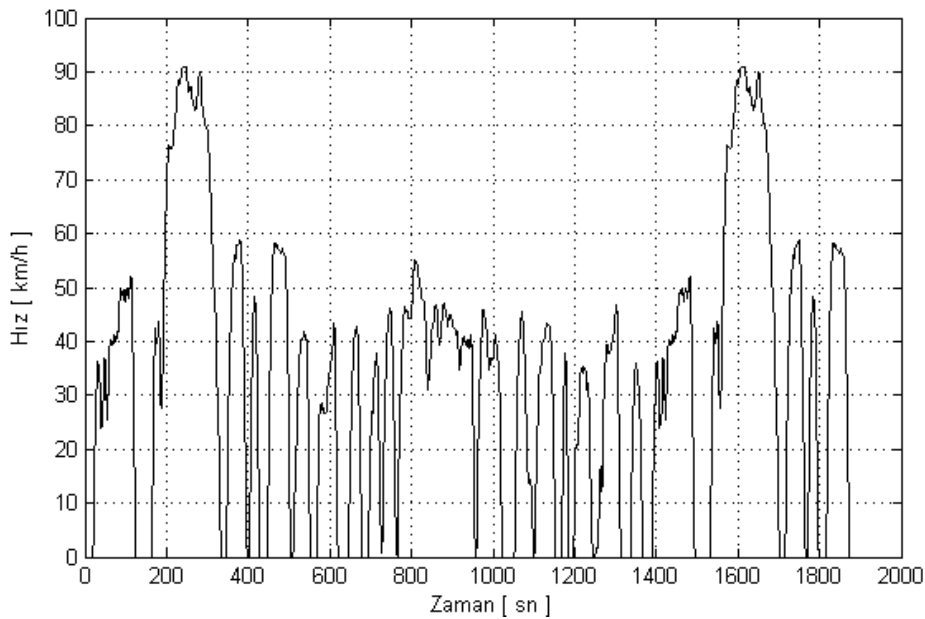


Şekil 6.2: Simülasyon programı akış diyagramı

Simülasyonlarda Yeni Avrupa Birliği sürüş çevrimine ek olarak, Japon 10 – 15 ve FTP 75 sürüş çevrimleri de kullanılmıştır. Şekil 6.3’de Japon 10 – 15 sürüş çevrimi görülmektedir. Çevrimde 10 mod olarak adlandırılan bölüm şehir içi, 15 mod ise şehir dışı sürüşü temsil etmektedir. Teste başlamadan önce ilk olarak koşturulan 15 mod ısınma amaçlıdır. Emisyon ve yakıt tüketimi ölçümleri bu kısımdan sonra başlamaktadır. Şekil 6.4’de ise FTP 75 sürüş çevrimi görülmektedir. Diğer iki çevrimden farklı olarak dinamik bir çevrimdir ve gerçek sürüş şartlarını daha iyi temsil etmektedir.



Şekil 6.3: Japon 10 - 15 sürüş çevrimi



Şekil 6.4: FTP 75 sürüş çevrimi

Çizelge 6.2: Sürüş çevrimlerinin karşılaştırılması

	NEUDC	JAPON 10-15	FTP 75
Ortalama Hız [km/s]	24.5	22.7	34
Maksimum Hız [km/s]	120	70	91
Süre [sn]	1180	660	1874
Mesafe [km]	11	4.2	18
Durma süresi [sn]	80	215	359
Durma Oranı [%]	24	33	19

Hesaplamalar sırasında yuvarlanma direnci ve aerodinamik sürtünme katsayısının hıza göre değişmediği kabul edilmiştir. Ayrıca tekerlek kayması da ihmal edilmiştir. Vites değişimlerinin aracın hızı değişmeyecek kadar hızlı gerçekleştiği kabul edilmiştir. Soğuk İYM testleri bulunmadığından sıcak ve dengeye gelmiş İYM üzerinden yapılan test sonuçları kullanılmıştır. Bu durumda İYM'un denge sıcaklığına ulaşmaya kadar meydana gelen yakıt tüketimi ve emisyon farkları hesaba katılmamıştır. Ayrıca verimi sıcaklık ile değişen katalitik dönüştürücünün ilk çalışma anından itibaren maksimum verimde çalıştığı varsayılmıştır. Üzerinden çekilen akıma, şarj durumuna ve sıcaklığa göre farklı iç dirençlere sahip olan bataryanın da sabit verimde çalıştığı varsayılmıştır.

6.1.1. Konvansiyonel aracın simülasyonu

Bir önceki bölümde bahsedilen kabullere göre konvansiyonel aracın simülasyonu yapılmış ve gerçek test sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Yeni Avrupa Birliği sürüş çevrimine göre yapılan simülasyon sonuçları, test sonuçları ile karşılaştırıldığında yakıt tüketimine göre ortalama % 8 hata olduğu görülmüştür. Bu hata gerçek test şartlarından farklı olarak, simülasyon programında yapılan kabuller sebebiyle oluşmuştur. Gerçek test şartlarında aracın soğuk motor ile teste başladığı ve İYM sıcaklığının ancak ikinci şehir içi çevrimi koşulduktan sonra dengeye ulaştığı düşünüldüğünde en fazla % 12'lik hata kabul edilebilir bir değerdir.

Çizelge 6.3: Gerçek test ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

NEUDC M = 2000 kg.		Yakıt [Lt/100km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NO _x [g/km]
Simülasyon	Şehir içi	11.19	0.3167	0.0814	0.4361
	Şehir dışı	8.26	0.1015	0.02	0.4808
	Karma	9.34	0.181	0.0426	0.4643
Test Sonuçları	Şehir içi	12.6	-	-	-
	Şehir dışı	8.6	-	-	-
	Karma	10.1	0.455	0.05	0.387

Emisyonlardaki farklar gerçek test şartlarında motorun soğuk olması ve katalitik dönüştürücü veriminin çalışma sırasında farklılık göstermesi sebebiyle meydana gelmiştir. Katalitik konvertörün etkili olduğu CO emisyonlarında % 60 varan hata görülmüştür. NO_x emisyonlarından ise hata % 20'dir. Yakıt tüketimindeki % 9'luk farkta düşünüldüğünde emisyonlardaki hata kabul edilebilir sınırlardadır.(Çizelge6.2)

Aracın hibrid hale gelmesi ile ağırlığında meydana gelen artış, taşıma kapasitesinin azalması ile karşılanmıştır. Taşıt ticari bir araç olması sebebiyle çalışma zamanının büyük bir kısmında yüklü olacaktır. Bu sebeple değerlendirmeler hibrid taşıtın % 50 yüklü olduğu durum için (m = 2800 kg.) yapılmıştır. Üç çevrime göre hibrid taşıtın yalnızca İYM ile çalıştırılması durumunda meydana yakıt tüketimleri çizelge 6.3'te görülmektedir. Burada fikir vermesi amacıyla yalnızca NEUDC çevriminde şehir içi ve şehir dışı yakıt tüketimi ve emisyon değerleri hesaplanmıştır. Diğer çevrimler ile karşılaştırmalar karma durum için yapılacaktır. Çizelge 6.2'de görülen sürüş çevrimleri özelliklerine göre dinamik bir çevrim olan FTP 75 çevriminde en yüksek yakıt tüketimi gerçekleşmiştir. Aynı zamanda en yüksek ortalama hıza sahip olan bu çevrim beklendiği gibi en yüksek NO_x emisyonu değerine sahiptir.

Çizelge 6.4: Yalnızca İYM ile çalışan hibrid taşıtın farklı sürüş çevrimlerindeki yakıt tüketimi ve emisyon değerleri

		Yakıt [Lt/100km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NO _x [g/km]
NEUDC	Şehir içi	12.75	0.2946	0.0720	0.5539
	Şehir dışı	9.56	0.0921	0.0169	0.6795
	Karma	10.74	0.1669	0.0372	0.6331
Japon 10-15	Karma	10.26	0.1357	0.0300	0.5476
FTP 75	Karma	11.35	0.1606	0.0335	0.8410

6.1.2. Taşıtın yalnızca elektrik motoru ile simülasyonu

Elektrik taşıtı olarak simülasyon Yeni Avrupa Birliği Şehir içi Çevrimine göre yapılmıştır. Taşıt kütlesi aracın % 50 dolu olduğu durum için 2800 kg. alınmıştır. İki elektrik motoru da aynı çevrim oranına sahiptir. Tahrik kuvveti dağılımı eşit olarak yapılmıştır. Her iki EM'da rejeneratif frenleme yapmaktadır. Fren kuvvetlerinin dağılımı eşittir.

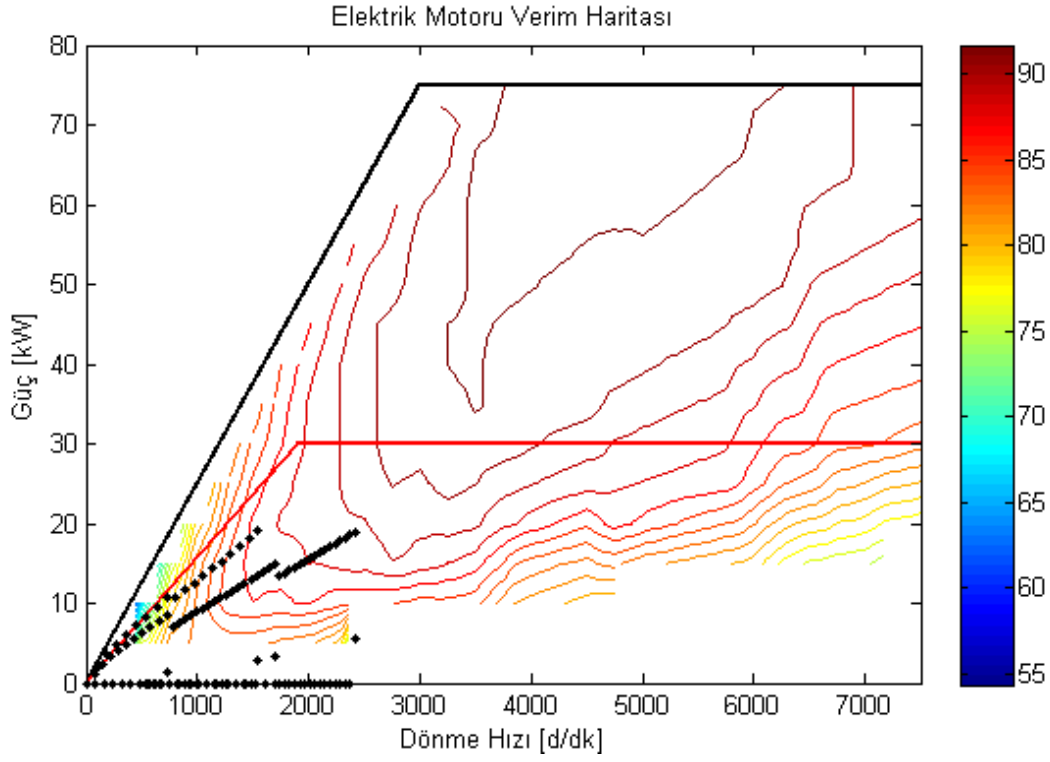
Şehir içinde rejeneratif frenleme oranının daha fazla olması ve yüksek hızlara çıkılmaması elektrikli taşıt olarak çalışmak için uygundur. Aracın elektrikli taşıt olarak kullanımı daha çok şehir içinde olacaktır. Bu sebeple değerlendirme Yeni Avrupa Birliği Şehir içi çevrimine göre yapılmıştır. Şehir içi çevriminde tam dolu batarya ile aracın menzili yaklaşık 45 km. olacaktır. Batarya optimum çalışma sınırları düşünüldüğünde ise menzil 20 km. olarak hesaplanmıştır. Optimum sınırlarda sabit 50 km/s hızda gidilmesi durumunda menzil 23 km. olacaktır.

Çizelge 6.5: Yalnızca elektrikli motoru ile aracın menzili

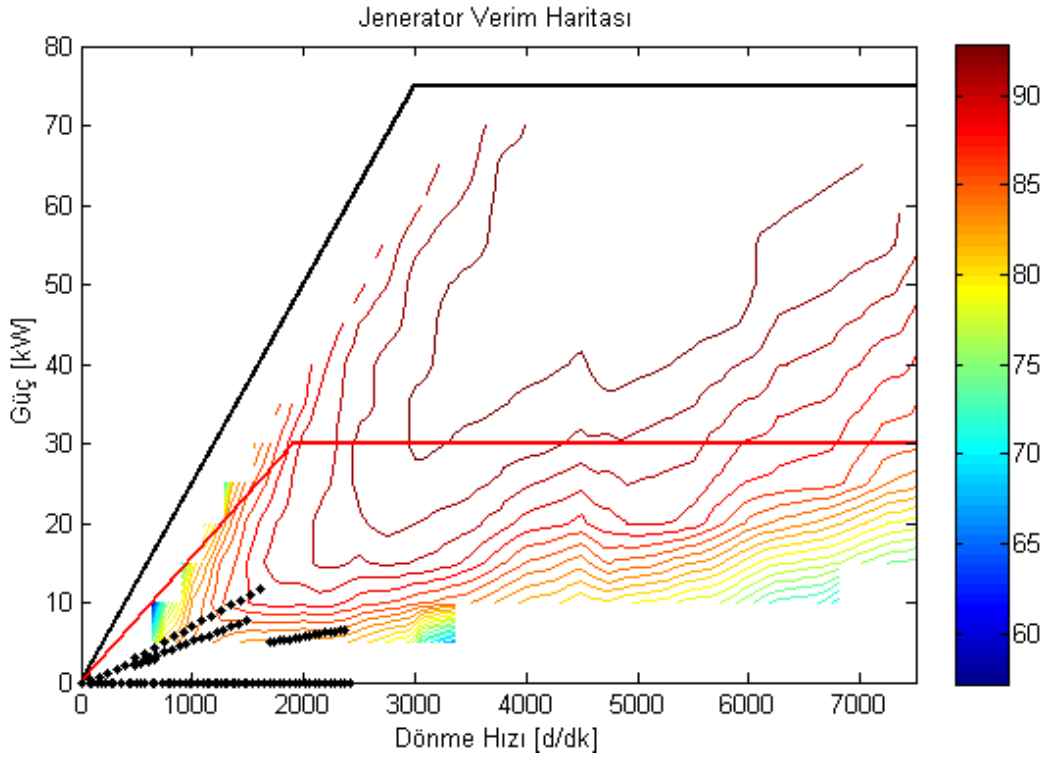
M = 2800 kg.	NEUDC - UC	Sabit 50 km/s
SOC \cong 0.99	45 km.	52 km.
SOC \cong 0.8 – 0.6	20 km.	23 km.

Şekil 6.5'de EM, Şekil 6.6'da jeneratör verim haritası ve şehir içi çevrimi çalışma noktaları görülmektedir. Kırmızı çizgi sürekli EM gücü sınırlarını göstermektedir. İlk kalkış anında yüksek moment talebiyle düşük verimli noktalarda çalışılmıştır. Çevrim boyunca ortalama verim % 80 civarındadır.

EM tarafında sağlanan rejeneratif frenleme kuvveti aracı durdurmak için yeterli olmaktadır. Ön ve arka aksta iki ayrı EM bulunması aracın rejeneratif frenleme kabiliyetini artırmaktadır. Jeneratör çalışma bölgesi yaklaşık % 80 ortalama verime karşılık gelmektedir.



Şekil 6.5: Elektrik motorunun NEUDC şehir içi sürüş çevriminde çalışma noktaları



Şekil 6.6: Jeneratörün NEUDC şehir içi sürüş çevriminde çalışma noktaları

7. STRATEJİ UYGULAMALARI

Yalnızca İYM'a sahip bir araçta aracı hızlandırmak istediğimizde gaz pedalına yavaşlatmak istediğimizde ise fren pedalına basarız. Pozitif moment yalnızca İYM, negatif moment ise yalnızca fren sistemi tarafından karşılandığından aracın kontrolü kolaydır. Bir paralel HET'da ise başka bir moment kaynağı daha bulunmaktadır. EM ile bataryadan güç alarak aracı hızlandırmak veya rejeneratif frenleme ile bataryaya güç sağlamak ve aracı yavaşlatmak mümkündür. Kontrol stratejileri bu durumda devreye girmektedir. Sürücü tarafından talep edilen moment değeri kontrol stratejisine bağlı olarak İYM, EM ve fren sistemi arasında dağıtılmaktadır.

Negatif moment talepleri için jeneratör şeklinde çalışan EM ve fren sistemi momentleri toplamı sürücünün talebine eşit olmalıdır. Pozitif moment taleplerinde ise İYM ve EM momentleri toplamı sürücü talebini karşılamalıdır. (Denklem 7.1 ve 7.2)

$$T_{\text{talep,negatif}} = T_{\text{EM}} + T_{\text{Fren}} \quad (7.1.)$$

$$T_{\text{talep,pozitif}} = T_{\text{İYM}} + T_{\text{EM}} \quad (7.2)$$

Genel olarak fren kuvveti kontrolü tahrik kuvveti kontrolüne göre daha kolaydır. Rejeneratif frenleme enerjisinin EM ve batarya kapasitesi ile sınırlı olan kısmı bataryaya aktarılır. Kalan enerji ise fren sistemi desteği ile tüketilir. Bu şekilde mümkün olan maksimum rejeneratif frenleme enerjisi depolanmış olacaktır.

Tahrik kuvvetinin kontrolü ise bu kadar basit değildir. Sürücünün moment ihtiyacına karşılık gelen birçok EM ve İYM çalışma noktası bulunacaktır. Kontrol stratejisi ile bu aday çalışma noktalarından en az yakıt tüketimi ve emisyon değerlerini sağlayan nokta seçilmelidir. Moment dağılımı yapılırken çalışma noktalarına karşılık gelen İYM yanma verimi, emisyon değerleri, batarya şarj durumu, EM verimi gibi değerlerde göz önüne alınmalıdır.

Hedeflenen performans değerlerinin sağlanabilmesi için hibrid taşıtı oluşturan EM, batarya gibi bileşenlerin sistem ihtiyaçlarına uygun şekilde kapasitelerinin belirlenmesi ve optimize edilmesinin yanında, sisteme uygun kontrol stratejisinin

geliştirilmesi de taşıt performansı üzerinde önemli bir etkidir. Kontrol stratejisinin yanlış uygulanması istenilenin aksine sonuçlar verebilir.

Uygulamada ilk olarak otomatik durdurma başlatma stratejisi uygulanacaktır. Daha sonra rejeneratif frenleme enerjisini, EM'larını belirli bir hıza kadar çalıştırmak için kullanan ikinci strateji uygulanacaktır. Üçüncü strateji ise sabit parametrelere sahip olan, İYM verimi, batarya şarj durumu ve EM kapasitesi göz önüne alınarak çevrime göre optimize edilen kural tabanlı kontrol stratejisi olacaktır. Dördüncü ve son strateji ise İYM verimi, batarya şarj durumu ve EM kapasitesinin yanında emisyonları da göz önüne alan dinamik kontrol stratejisidir.

7.1. İçten Yanmalı Motorun Durdurulması (Dur-Kalk Stratejisi)

Uygulanabilecek en basit kural tabanlı kontrol stratejisi İYM' un yüksüz olduğu (rölantide çalıştığı) durumlarda durdurulmasıdır. Mevcut araç üzerinde bulunan seri bağlı EM ile otomatik durdurma başlatma gerçekleştirilebilir. Temel olarak otomatik durdurma başlatma yapılabilmesi için konvansiyonel araçta bulunan marş motorundan daha güçlü olan, bu sayede yüksek devirlere çıkabilen, hızlı bir başlatma sağlayabilen bir marş motoru ve daha uzun ömürlü bir batarya yeterlidir.

Araç ağırlığı 2800 kg. olarak alınmıştır. Rejeneratif frenleme kabiliyetinin hiç olmadığı varsayılmıştır. Buna göre elde edilen yakıt tüketimi ve emisyon değerleri çizelge 7.1'de görüldüğü gibidir. Çizelge 7.2'deki karşılaştırmalar aracın hibrid aracın yarı yarıya dolu olduğu 2800 kg.'lık taşıt ile yapılmıştır.

Çizelge 7.1: İYM'un boşta durdurulması sonucu çevrimlere göre yakıt tüketimi ve emisyon değerleri

		Yakıt [Lt/100km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NOx [g/km]
NEUDC	Şehir içi	11.55	0.2782	0.0677	0.5364
	Şehir dışı	9.44	0.0905	0.0165	0.6778
	Karma	10.22	0.1598	0.0354	0.6256
Japon 10-15	Karma	9.29	0.1219	0.0264	0.5326
FTP 75	Karma	10.96	0.1553	0.0321	0.8354

Çizelge 7.2: İYM'un boшта durdurulması ile sağlanan yakıt tüketimi ve emisyon değerlerinin yalnız İYM ile çalışma durumuna göre değişimi

		Yakıt [%]	CO [%]	HC [%]	NOx [%]
NEUDC	Şehir içi	-9.4	-5.6	-6.0	-3.2
	Şehir dışı	-1.2	-1.7	-2.4	-0.3
	Karma	-4.8	-4.3	-4.8	-1.2
Japon 10-15	Karma	-9.5	-10.2	-12.0	-2.7
FTP 75	Karma	-3.4	-3.3	-4.2	-0.7

Yeni Avrupa Birliği Şehir içi Çevrimi'nin yaklaşık % 30'u şehir dışı çevriminin ise yaklaşık % 5'i boшта çalışmadan meydana gelmektedir. Buna göre beklendiği gibi en fazla yakıt tasarrufunun % 9.4 ile şehir içinde sağlanmıştır. Şehir dışında boшта çalışmanın az olması sebebiyle yakıt tasarrufu % 1.2 civarındadır.

Çevrimlere göre karşılaştırdığımızda durma oranının en fazla olduğu Japon 10-15 çevriminde % 9.5 oranında yakıt tasarrufu sağlanmıştır. Emisyonlara baktığımızda HC ve CO emisyonlarının Japon 10-15 çevriminde % 12.0 ve % 10.2 oranında değiştiğini görmekteyiz. CO ve HC emisyonları rölanti durumunda hava fazlalık katsayısının azalması sebebiyle NOx emisyonlarına göre daha çok oluşmaktadır. Buna bağlı olarak İYM'un boшта durdurulması ile daha büyük oranda azalma göstermişlerdir.

Burada dikkat edilmesi gereken gerçek çalışma şartlarında durumun daha farklı olacağıdır. Motorun ilk çalıştırılması sırasında marş motoru tarafında talep edilen elektriksel güç ve İYM'un normal çalışma şartlarından farklı olarak ilk çalıştırma anındaki yakıt tüketimi önem kazanmaktadır. İYM'un çok sık durdurulup başlatılması istenilenin aksine sonuçlar verebilir. Diğer bir durum ise İYM durdurulduğu anda ona bağlı olarak çalışan tüm sistemlerin de duracak olmasıdır.

7.2. Rejeneratif Frenleme Enerjisinin Kullanılması

Hibrid elektrikli taşıtlarda yakıt ekonomisine en büyük katkı rejeneratif frenleme ile geri kazanılan enerji ile sağlanmaktadır. Simülasyonu yapılan taşıtta ön aksa bağlı olan EM (EM1) ve arka aksa bağlı olan EM (EM2) ile rejeneratif frenleme gerçekleştirilmektedir.

Bu aşamada taşıt ağırlığı 2800 kg. alınmıştır. Takip edilecek olan strateji ise rejeneratif frenleme ile geri kazanılan enerjinin aracın bir limit hıza kadar EM ile çalışması şeklinde olacaktır. Limit hız çevrim sonunda başlangıç şarj seviyesine dönülecek şekilde ayarlanmıştır. Bu sebeple her çevrimin limit hızı farklıdır. NEUDC şehir içi, şehir dışı ve karma çevrimleri içinde farklı limit hızlar seçilmiştir.

Bu aşamada karşılaştırmalar çizelge 6.3'deki değerler ile yapılmaktadır. NEUDC çevrimine bakıldığında beklendiği gibi en fazla yakıt tasarrufu % 15 oranında şehir içinde yapılmıştır. Kalkış sırasında EM'lerinin kullanılması sebebiyle özellikle CO ve HC emisyonlarının azaldığı görülmüştür. Çevrimlere bakıldığında en fazla tasarruf dinamik bir çevrim olan ve bu sebeple rejeneratif frenleme enerjisinin fazla olduğu FTP 75 çevriminde gerçekleşmiştir. (Çizelge 7.3 ve 7.4)

Çizelge 7.3: Rejeneratif frenleme enerjisinin kullanılması sonucu çevrimlere göre tüketilen yakıt ve oluşan emisyonlar

		Yakıt [Lt/100km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NOx [g/km]
NEUDC	Şehir içi	10.87	0.2424	0.0591	0.4511
	Şehir dışı	8.71	0.0716	0.0125	0.6394
	Karma	9.56	0.1431	0.0318	0.5703
Japon 10-15	Karma	8.82	0.0962	0.0191	0.4543
FTP 75	Karma	9.70	0.1445	0.0304	0.6995

Çizelge 7.4: Rejeneratif frenleme enerjisi ile çevrimlere göre sağlanan yakıt tüketimi ve emisyonlardaki azalmalar

		Yakıt [%]	CO [%]	HC [%]	NOx [%]
NEUDC	Şehir içi	-14.8	-17.7	-17.9	-18.6
	Şehir dışı	-8.9	-22.3	-26.0	-5.9
	Karma	-11.0	-14.3	-14.5	-9.9
Japon 10-15	Karma	-14.1	-29.1	-36.3	-17.0
FTP 75	Karma	-14.5	-10.0	-9.3	-20.4

Uygulanacak olan bir sonraki stratejide çalışma noktaları yakıt tüketimi açısından iyileştirilmeye çalışılacaktır. Bu amaçla düşük hızlarda şarj durumu yeterli ise EM ile çalışılmaya devam edilecek, yeterli değil ise belli bir şarj momentini eklenerek çalışma noktasını yüksek verimli bölgeler taşınması amaçlanmaktadır. Buna göre rejeneratif

frenleme ile sağlanan yakıt ekonomisine ek olarak motor veriminin artması ile de yakıt ekonomisi sağlamak amaçlanmaktadır.

7.3. Kural Tabanlı Kontrol Stratejisi

Kural tabanlı kontrol stratejisinde temel olarak enerji verimliliğini artırmak amaçlanmaktadır. Bu amaçla aracın çalışması sırasında uyulmak üzere, İYM ve EM'nun çalışma bölgelerini ve çalışma durumlarını belirleyen kurallar oluşturulur. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Maksimum batarya şarj seviyesi (SOC_{maks})
- Minimum batarya şarj seviyesi (SOC_{min})
- Aracın sıfır emisyonlu araç olarak çalışacağı hız limiti (V_{limit})
- İYM'un çalışacağı minimum moment eğrisi
- Şarj momenti

Çizelge 7.5: Uygulanan kural tabanlı kontrol stratejisi

$M_{Tekerlek} > 0$				$M_{Tekerlek} < 0$			
$V < 50$ km/h		$V > 50$ km/h		$SOC < 0.95$		$SOC > 0.95$	
$SOC < 0.6$		$SOC > 0.6$		$M_{em,maks} < M_{em,maks}$		$M_{em,maks} > M_{em,maks}$	
$M_{iym} < M_{min}$	$M_{iym} > M_{min}$	$M < M_{em,maks}$	$M > M_{em,maks}$	İYM + EM _{şarj}	İYM	Rejen.	Rejen. + Normal Fren
İYM + EM _{şarj}	İYM	EM	İYM				
N. Fren							

Çizelge 7.5'de gösterilen örnek kontrol stratejisinde ilk olarak tekerlek momentinden aracın tahrik veya frenleme durumlarından hangisinde olduğu belirlenmektedir. Araç tahrik durumunda ise ($M_{tekerlek} > 0$), daha sonra hız kontrolü yapılmaktadır. Buna göre hız sıfır emisyon ile gidilmesi istenen hız değerinden küçük olduğu durumda ($V < 50$ km/s), şarj seviyesi yeterli ise ($SOC > 0.6$) ve talep momenti EM kapasitesi dahilinde ise ($M < M_{em,maks}$) yalnızca EM ile tahrik sağlanmakta, talep momenti EM

kapasitesinden fazla ise ($M > M_{em,maks}$) yalnızca İYM ile tahrik sağlanmaktadır. Şarj seviyesi yeterli değil ise ($SOC < 0.6$), talep momenti minimum moment değerinden az olduğu durumda ($M_{iyM} < M_{min}$) jeneratör yardımı ile batarya şarj edilmekte, talep momenti minimum moment değerinden fazla ise ($M_{iyM} > M_{min}$) yalnızca İYM ile tahrik sağlanmaktadır. Taşıt hızı belli bir hız limitinden büyük ise ($V > 50$ km/s), çalışma momenti ve şarj durumu kontrol edilmektedir. Buna göre şarj seviyesi belli bir sınır değerden küçük ve moment talebi bir sınır değerden küçük ise ($M_{iyM} < M_{min}$ ve $SOC < 0.8$), jeneratör devreye alınarak batarya şarj edilmektedir. Diğer durumda ise ($M_{iyM} > M_{min}$ veya $SOC > 0.8$) yalnızca İYM ile tahrik sağlanmaktadır.

Araç frenleme durumunda ($M_{tekerlek} < 0$) ve batarya doluluk oranı belli bir maksimum değer altındadır ise ($SOC < SOC_{maks}$), rejeneratif frenleme yapılarak batarya şarj edilmektedir. Fren momenti EM'nun karşılayabileceğinden fazla ($M > M_{em,maks}$) ise normal frenler devreye girmektedir. Şarj durumu maksimum değer üzerinde ise ($SOC > SOC_{maks}$) frenleme kuvvetinin tamamı normal frenler ile sağlanmaktadır.

Stratejinin uygulanmasında tüm çevrimler için limit hız değeri 50km/s olarak alınmıştır. Batarya seviyeleri de tüm çevrimler için aynıdır. Yalnızca M_{min} olarak gösterilen İYM minimum çalışma momenti çevrime göre farklılık göstermektedir. Buna göre NEUDC için $M_{min} = 70$ Nm, Japon 10-15 için $M_{min} = 50$ Nm ve FTP 75 için $M_{min} = 40$ Nm'dir.

Çizelge 7.6'da kural tabanlı kontrol stratejisinin uygulanması sonucu yakıt tüketimi ve emisyon değerleri görülmektedir. Beklendiği gibi yine en yüksek yakıt tüketimi 9.80 Lt/100km. ile FTP 75 çevriminde meydana gelmiştir. Bunun yanında NOx oluşumu da en fazla bu çevrimde meydana gelmiştir. Çalışma noktalarının minimum moment noktasına taşınması ile HC ve CO emisyonlarında % 70'e varan azalmalar meydana gelmiştir. Şekil B.3 ve Şekil B.4'de İYM çalışma noktaları görülmektedir. Burada çalışma noktalarının 60 g/h gibi değerlerden 20 g/h gibi değerlere geçtiği görülmektedir. CO emisyonları içinde benzer bir durum geçerlidir.

Burada seçilen minimum moment değerine göre emisyonlar ve yakıt tüketimi farklılık göstermektedir. M_{min} değeri arttıkça NOx emisyonları da artış göstermektedir. Çalışma momentinin yükselmesi ile İYM yükü artmakta ve fakir karışım ile çalışan sistemde NOx emisyonu oluşumu artmaktadır. Yakıt tüketimi açısından da bir optimum minimum çalışma momenti mevcuttur. M_{min} değerinin

artırılması verim değerini artıracaktır. Bu durumda jeneratör ve EM çalışma verimleri önem kazanacaktır. Jeneratörün düşük verimde çalıştırılması istenilenin aksine yakıt tüketiminin artmasına sebep olabilir. Bu duruma bağlı olarak farklı çevrimlerde farklı minimum moment değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 7.6: Kural tabanlı kontrol stratejisinin uygulanması sonucu çevrimlere göre yakıt tüketimi ve emisyon değerleri

NEUDC		Yakıt [Lt/100km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NOx [g/km]
	Şehir içi	10.68	0.1155	0.0210	0.4452
Şehir dışı	8.79	0.0586	0.0090	0.6442	
Karma	9.38	0.0830	0.0141	0.6177	
Japon 10-15	Karma	8.90	0.0995	0.0189	0.4415
FTP 75	Karma	9.80	0.0465	0.0097	0.6693

Çizelge 7.7: Kural tabanlı kontrol stratejisinin uygulanması sonucu yakıt tüketimi ve emisyon değerlerinin değişimi

NEUDC		Yakıt [%]	CO [%]	HC [%]	NOx [%]
	Şehir içi	-16.2	-60.7	-70.8	-19.6
Şehir dışı	-8.0	-36.3	-46.8	-5.2	
Karma	-12.6	-50.3	-62.1	-2.4	
Japon 10-15	Karma	-13.3	-26.7	-37.0	-19.4
FTP 75	Karma	-13.7	-71.1	-71.0	-20.4

Rejeneratif frenleme enerjisi stratejisine göre yakıt tüketimi ve emisyon değerlerinin değişimi çizelge 7.8’de görülmektedir. Uygulanan strateji ile yalnızca NEUDC çevriminde yakıt tasarrufu sağlandığı görülmektedir. İYM’un jeneratör yardımı ile daha verimli bölgede çalıştırılması Japon 10-15 ve FTP 75 çevrimlerinde yakıt tasarrufu sağlamamıştır. Bu sebeple uygulanan stratejilere ve çevrimlere bağlı olarak İYM, EM ve jeneratör verimleri hesaplanmıştır. Çizelge 7.9’a göre NEUDC ve FTP 75 çevrimlerinde rejeneratif frenleme enerjisi kullanımı ile İYM verimi hemen hemen aynı kalmıştır. Japon 10-15 çevriminde ise İYM verimi % 13 artış göstermiştir. Kural tabanlı kontrol stratejisinin uygulanması ile Japon 10-15 çevriminde İYM verimi neredeyse aynı kalırken, NEUDC % 25 ve FTP 75 ise % 12 artış göstermiştir. Sistemde elektrik enerjisi kullanımı ile meydana gelen batarya EM ve jeneratör kayıpları yalnızca NEUDC çevriminde karşılanabilmiştir. Bu sebeple yalnızca NEUDC çevriminde yakıt ekonomisi artırılabilmiştir.

Verim artışının emisyonlara etkisi çizelge 7.8’de görülmektedir. Yüksek M_{min} değerine sahip NEUDC çevriminde beklendiği gibi NOx emisyonları % 8.3 oranında artmıştır. CO ve HC emisyonlarına bakıldığında NEUDC ve FTP 75 çevrimlerinde % 70’e varan iyileşme görülmektedir. Japon 10-15 çevriminde ise jeneratörün şarj durumunda olduğu noktaların azlığı nedeniyle emisyonlar, rejeneratif frenleme stratejisine göre hemen hemen aynı kalmıştır. Bu durum Şekil B.9’da gösterilen Japon 10-15 İYM çalışma noktalarından görülebilir.

Çizelge 7.8: Kural tabanlı kontrol stratejisinin rejeneratif frenleme enerjisi stratejisine göre yakıt tüketimi ve emisyon değerleri değişimi

		Yakıt [%]	CO [%]	HC [%]	NOx [%]
NEUDC	Şehir içi	-1.7	-52.4	-64.5	-1.3
	Şehir dışı	1.0	-18.2	-28.0	0.8
	Karma	-1.9	-42.0	-55.7	8.3
Japon 10-15	Karma	0.9	3.4	-1.1	-2.8
FTP 75	Karma	1.0	-67.8	-68.1	-0.1

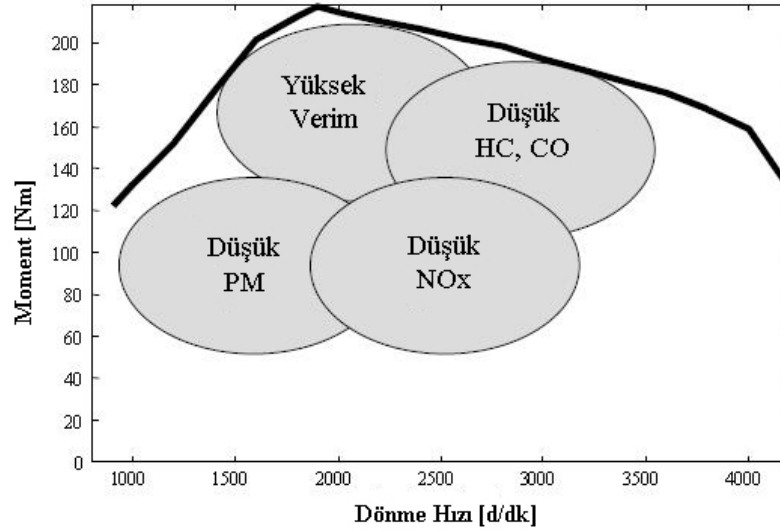
Çizelge 7.9: Stratejiler ve sürüş çevrimlerine göre İYM ve EM ortalama çalışma verimleri

		NEUDC	Japon 10-15	FTP 75
Yalnızca İYM	İYM	0.246	0.261	0.247
	İYM	0.250	0.297	0.243
Rejeneratif Frenleme	EM1 – EM2	0.761	0.768	0.740
	GEN1	0.770	0.779	0.766
	GEN2	0.770	0.779	0.766
	İYM	0.311	0.306	0.272
Kural Tabanlı Kontrol Stratejisi	EM1 – EM2	0.792	0.796	0.805
	GEN1	0.793	0.781	0.776
	GEN2	0.770	0.779	0.766
	İYM	0.311	0.306	0.272

7.4. Dinamik Kontrol Stratejisi:

Dinamik kontrol stratejisi kural tabanlı kontrol stratejisinden farklı olarak, son araç hareketlerini, şarj durumunu, yakıt tüketimini ve emisyonları göz önüne alarak bir optimizasyon yapar ve bunun sonucuna göre bir çalışma noktası belirler. Kural tabanlı kontrol stratejisinde verim açısından seçilen optimum çalışma noktası emisyonlar açısından istenen değerleri vermeyebilir. Şekil 7.1’de görüldüğü gibi

dizel motorlarında yakıt tüketiminin en az olduğu bölge özellikle NO_x emisyonları açısından kötü bir çalışma bölgesidir. Uygulanan dinamik kontrol stratejisi ile enerji tüketimi ve emisyonlar arasında optimizasyon yapılarak ikisi için de uygun olan çalışma noktası belirlenebilir.[6]



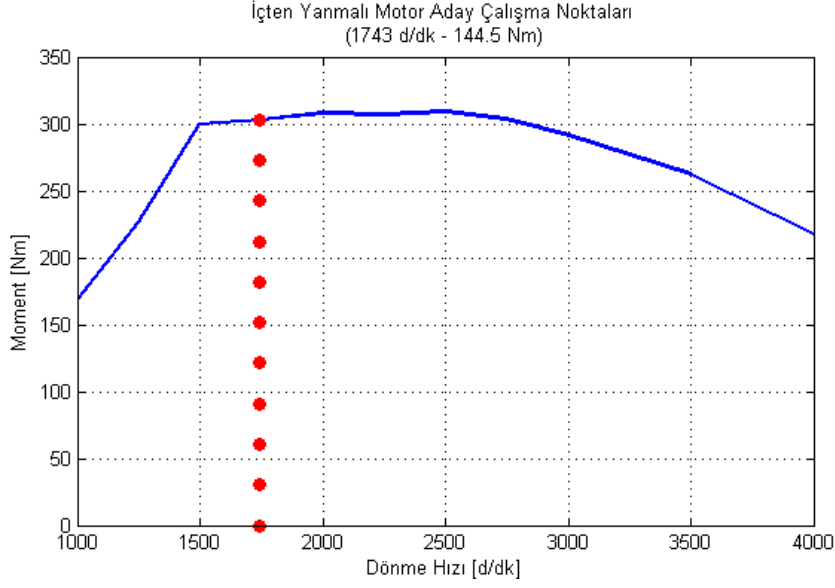
Şekil 7.1: Dizel motorlarında yakıt tüketimi ve emisyon çelişkisi [6]

Uygulanacak olan dinamik kontrol stratejisinde ilk olarak gidilen hızdaki moment talebini karşılayacak EM – İYM moment çiftleri belirlenecektir. Sonra belirlenen tüm aday çalışma noktalarının toplam yakıt tüketimi ve emisyonlar üzerindeki etkilerini tanımlayan bir değer fonksiyonu tanımlanacaktır. Bulunan değer fonksiyonunun minimumunu tüm parametreler için en uygun çalışma noktasına karşılık gelir. Burada seçilen parametreler batarya şarj durumu, yakıt tüketimi, karbonmonoksit, hidrokarbon, azotoksit ve is emisyonları, İYM sıcaklığı ve katalitik konvertör verimi gibi birçok değişken olabilir. Değer fonksiyonu oluşturulurken ağırlık faktörleri kullanılarak parametrelerin birbirlerine göre önemi belirlenecektir. Uygulanacak olan stratejide takip edilen adımlar aşağıdaki gibidir.

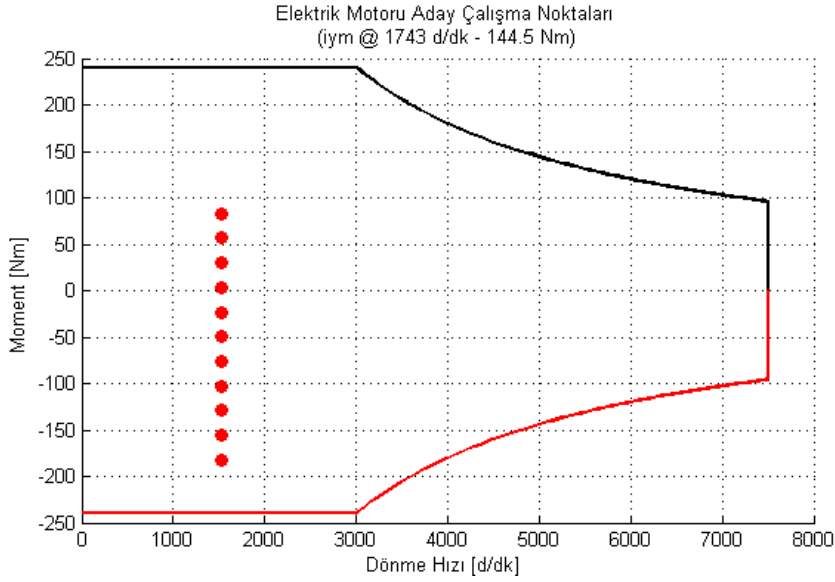
1. İYM ve EM çalışma noktalarının belirlenmesi

Bu aşamada sürücünün talebini karşılayacak olan İYM ve EM momentleri belirlenir. Belirli bir hızda İYM ve EM farklı moment değerlerinde çalışabilir. Sürücü talebine eşdeğer olan moment değerleri ile olası çalışma noktaları belirlenir. İYM, EM ve talep edilen moment arasındaki ilişki denklem 7.3’de görülmektedir. Buradaki i EM çevrim oranına karşılık gelmektedir.

$$T_{İYM} = T_{Talep} + i * T_{EM} \quad (7.3)$$



Şekil 7.2: Örnek İYM aday çalışma noktaları



Şekil 7.3: Örnek EM aday çalışma noktaları

Çalışma noktalarını belirleyen sınırlardan bir tanesi EM ile sağlanacak olan en büyük pozitif moment değeridir. Bu değer aşağıdaki üç sınır değerinin minimumu ile belirlenir:

- Sürücünün moment talebi
- Gidilen hızda sağlanabilecek olan en büyük EM momentini
- Batarya şarj seviyesine göre sağlanabilecek en büyük EM momentini

İkinci bir sınır olan en büyük negatif EM momentini ise aşağıdaki üç değerinin maksimumu ile belirlenir.

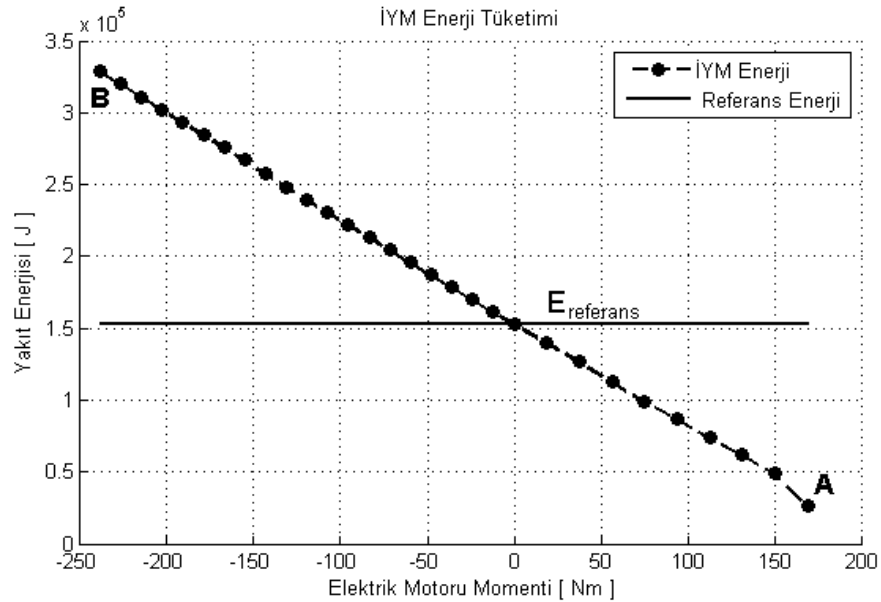
- İYM tarafından sağlanabilecek en büyük moment ile moment talebi arasındaki fark
- EM tarafından sağlanabilecek en büyük negatif moment
- Batarya şarj seviyesine göre çıkılabilecek en büyük EM momentini

2. Her bir aday çalışma noktası için bileşenlerin hesaplanması

Uygulanan stratejinin temel amacı en az enerji tüketimi ve en az emisyon oluşumunu sağlayan çalışma noktasının bulunmasıdır. Bu amaçla farklı İYM – EM moment kombinasyonlarına karşılık gelen toplam enerji tüketimi ve emisyon değerleri hesaplanır.

2a. İYM tarafından tüketilecek olan enerjinin hesaplanması

Bu kısımda istenilen hızda sağlanabilecek momentlere göre İYM'un yakıt tüketimi bulunmakta ve buna karşılık gelen enerji miktarı hesaplanmaktadır. Uygulanacak olan her EM momentine göre yakıt tüketimi değişiklik gösterecektir. Buna göre Şekil 7.4'de görülen eğriye benzer bir dağılım elde edilecektir. $E_{referans}$ EM momentinin sıfır olduğu yalnızca İYM'un devrede olduğu noktayı temsil etmektedir. A noktası ise tüm moment talebinin EM tarafından karşılandığı ve İYM'un hiç enerji tüketmediği anlamına gelir. B noktası ise mümkün olan en büyük şarj momentinin uygulanması ile tüketilecek enerji miktarına karşılık gelmektedir.



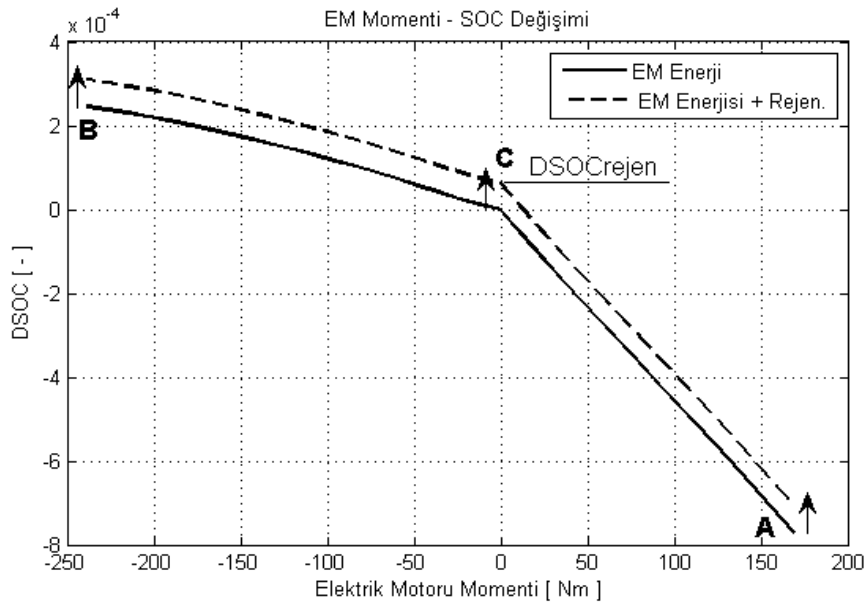
Şekil 7.4: İYM enerji tüketiminin EM momentine göre değişimi

2b. EM tarafından tüketilecek olan enerjinin hesaplanması

Bazı test prosedürlerinde kullanılan elektrik enerjisine eş değer, yakıt enerjisi olarak sabit bir değer tanımlanmaktadır. (Örneğin SAE J1711 test prosedürüne göre benzin için 10 kWh/Lt) Fakat batarya her zaman yakıt kullanılarak şarj edilmez. Kullanılan enerjinin geri dönüşünde rejeneratif frenleme de etkindir. Bu aşamada bataryadan çekilen enerjinin yakıt enerjisi eşdeğeri hesaplanacaktır.

I. EM momentine göre SOC değişiminin hesabı

Bu adımda EM çalışma noktalarına karşılık gelen ΔSOC değerleri rejeneratif frenleme enerjisi de göz önüne alınarak hesaplanacaktır. Bu değişim EM verim haritasının doğrusal olmaması ve batarya şarj – deşarj dirençlerinin farklı olması sebebiyle doğrusal olmayacaktır. (Şekil 7.6)



Şekil 7.5: ΔSOC - EM momentini değişimi

EM'ndan talep edilen en yüksek moment A noktasındadır. Bu sebeple bu noktada bataryadan çekilen elektrik enerjisi maksimum olacaktır. SOC azalacağından değişimde negatif olacaktır ($\Delta SOC < 0$). B noktasında ise tam tersi bir durum söz konusudur. Bu noktada EM jeneratör olarak çalışacağından batarya şarj seviyesi artacaktır ($\Delta SOC > 0$).

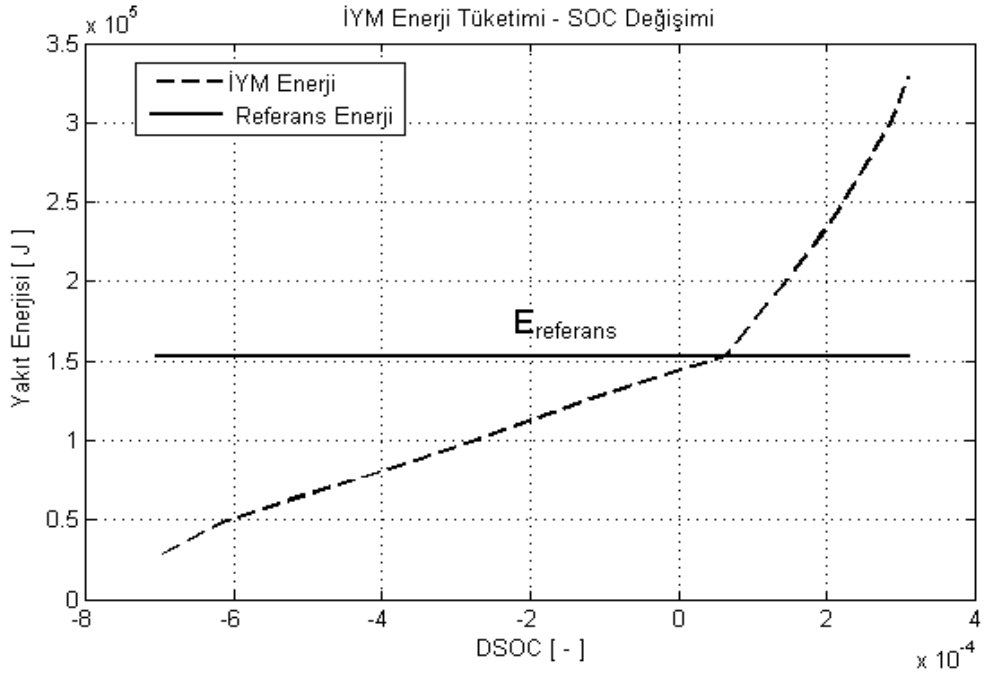
Bataryaya rejeneratif frenleme ile geri dönen elektrik enerjisi yakıt tüketimi gerektirmez. Bu enerji karşılıksız olarak kazanılır. Bu aşamada ΔSOC_{rejen} olarak adlandırılan rejeneratif frenleme ile geri kazanılan enerji hesaba katılacaktır. ΔSOC_{rejen} aracın geçmiş davranışlarından yola çıkılarak elde edilen rejeneratif enerji

miktarının ortalaması şeklinde tanımlanır. ΔSOC_{rejen} çevrime göre, yani sürüş koşullarına göre farklılık gösterecektir.

Uygulanan stratejide hesaplanan ΔSOC_{rejen} Şekil 7.5’de görüldüğü gibi şarj seviyesi ΔSOC – EM momenti eğrisinin rejeneratif enerji miktarı kadar ötelenmesi ile göz önüne alınmaktadır. EM’nun hiç kullanılmaması durumunda batarya şarj durumunun C noktası ile gösterilen noktaya çıkacağı görülmektedir.

II. Yakıt enerjisinin batarya seviyesine göre değişiminin hesaplanması

Bu adımda EM momentine göre yakıt enerjisi değişimi ve EM momentine göre şarj seviyesinin değişimi eğrileri bir araya getirilerek, şarj seviyesine göre yakıt enerjisi değişimi eğrileri oluşturulur.



Şekil 7.6: Yakıt Enerjisi - ΔSOC değişimi

Şekil 7.6’ya göre $\Delta SOC > 0$ olduğunda yani şarj durumunda yakıt tüketiminin arttığı, $\Delta SOC < 0$ olduğunda ise yakıt tüketiminin azaldığı görülmektedir.

III. Elektrik enerjisine karşılık gelen eşdeğer yakıt enerjisinin bulunması

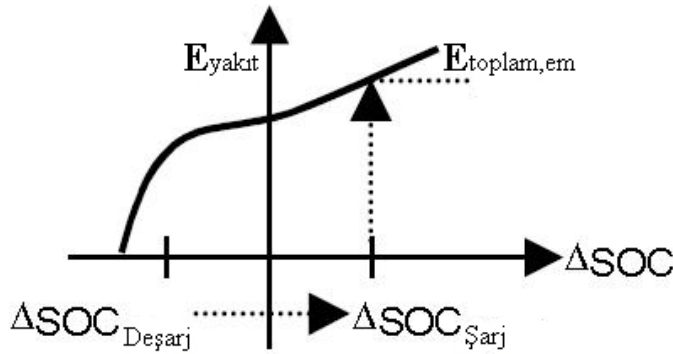
Aracın bir çevrim boyunca hareket etmesi sonucunda batarya başlangıç ve son şarj seviyesi birbirine eşit olmalıdır. Ancak bu şekilde net yakıt tüketimi hesaplanabilir.

EM tarafından tüketilen elektrik enerjisi çevrim sonuna kadar bataryaya geri iade edilmelidir. Bu mantık ile kullanılan elektrik enerjisi $\Delta SOC_{Deşarj}$, bataryaya geri dönmesi gereken enerji $\Delta SOC_{Şarj}$ ise;

$$\Delta SOC_{Deşarj} = -\Delta SOC_{Şarj} \quad (7.4)$$

olmalıdır. Şekil 7.9'da görülen yakıt enerjisi - ΔSOC değişimi eğrisi üzerinden toplam elektromekanik enerji ($E_{toplam,em}$) hesaplanabilir. Fakat burada hesaplanan $E_{toplam,em}$ bataryayı şarj etmek ve aracı hareket ettirmek için kullanılan enerjilerin toplamıdır. Bu durumda referans enerjisi toplam enerjiden çıkarılarak şarj enerjisi bulunur. (Denklem 7.5)

$$E_{Şarj} = E_{Toplam,em} - E_{referans} \quad (7.5)$$



Şekil 7.7: Toplam elektromekanik yakıt enerjisinin bulunması

IV. SOC düzeltme katsayısının uygulanması

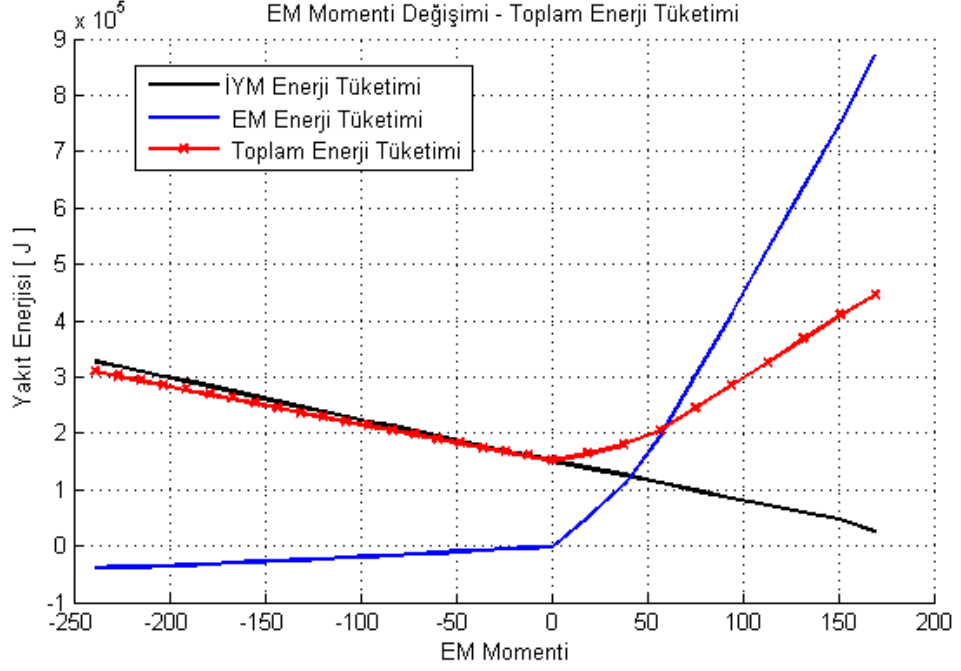
Normal olarak belli sürüş şartlarında batarya şarj seviyesi kendi kendine düzenlenecektir. Diğer bir deyişle çalışma noktasının verimine göre EM kullanılacak ve batarya şarj veya deşarj olacaktır. Sonuç olarak batarya şarj durumu belli bir seviyede sabit kalacaktır. Fakat batarya şarj seviyesini optimum çalışma bölgesine göre belli sınırlarda tutmak isteriz. Bu sebeple hesaplanan şarj enerjisi ($E_{şarj}$) için bir düzeltme katsayısı kullanılmaktadır. (Denklem 7.6)

$$E_{şarj,k} = k * E_{şarj} \quad (7.6)$$

Buradaki k katsayısı bataryanın optimum çalışma sınırlarına göre değişen bir katsayı olacaktır. Buna göre yüksek şarj seviyelerinde katsayı küçülerek geri dönecek enerji miktarı azaltılır. Şarj seviyesi düştükçe katsayı artar ve geriye dönecek olan enerji miktarı artar, yani EM kullanmak dezavantajlı duruma gelir.

2c. Toplam enerjinin hesaplanması

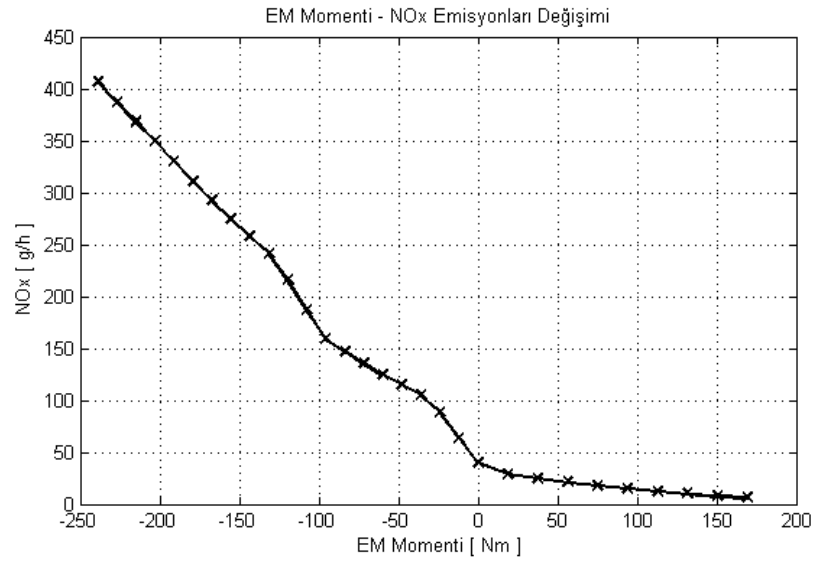
Bu aşamada önceki adımlarda hesaplanan İYM tarafından tüketilen enerji ve EM tarafından tüketilen eşdeğer enerji toplanarak taşıtın toplam enerji ihtiyacı bulunur.



Şekil 7.8: EM Momenti toplam enerji tüketimi değişimi

2d. Emisyonların hesaplanması

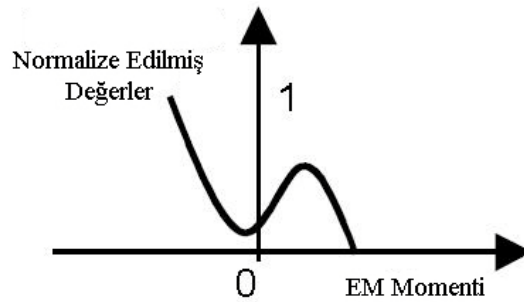
Bu aşamada yakıt tüketimi hesabına benzer bir hesaplama emisyonlar için yapılmaktadır. Emisyon haritaları üzerinden çalışılan hıza ve momentlere karşılık gelen değerler okunur ve emisyonların EM momentine göre değişimleri çizilir.



Şekil 7.9: NOx emisyonlarının EM momentine göre değişimi

3. Bileşenlerin normalize edilmesi

Çalışma noktasına karşılık gelen yakıt tüketimi ve emisyon değerlerinin bazı durumlarda çelişebileceğinden bahsetmiştik. Bu durum emisyon ve enerji miktarlarının belirlenen hedef değerlerine uzaklıklarına göre ağırlıklandırılmasını gerektirir. Ağırlıklandırma işlemi dördüncü ve beşinci adımlarda anlatılacaktır. Fakat farklı birimlere sahip olan enerji tüketiminin (J/s) ve emisyon değerlerinin (g/s) doğrudan karşılaştırılması ve ağırlıklandırılması mümkün değildir. Bu nedenle her bir aday çalışma noktasına karşılık gelen bileşen normalize edilerek 0 – 1 arasında dağıtılır. 0 minimum 1 ise maksimum değere karşılık gelmektedir. (Şekil 7.10)



Şekil 7.10: Normalizasyon

4. Ağırlık faktörlerinin hesaplanması (K_{hedef})

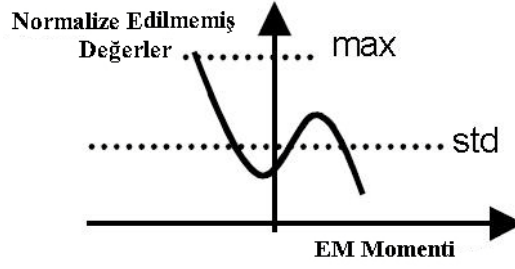
Ağırlık faktörleri göz önüne alınan parametrelerin (örneğin yakıt tüketimi, CO, HC, NOx emisyonları) birbirlerine göre önem sırasını belirler. Ulaşılması istenen hedef değerler standartlara göre belirlenebilir. Örneğin Euro 5 değerleri emisyonlar için bir hedef olarak seçilebilir. Bizim için ulaşılması daha önemli olan parametrelerin limit değerleri daha düşük alınarak ağırlık faktörleri artırılabilir.

Stratejinin uygulanması sırasında anlık enerji tüketimi ve anlık emisyon hedeflerinin belirlenmesi için belli bir zaman aralığında (Örneğin son 5 saniyedeki) ortalama hız değeri hesaplanacaktır. Yeni hedeflerin hesaplanması denklem 7.7' ye göre yapılacaktır.

$$\text{Anlık Hedef} \frac{[g]}{[s]} = \text{Hedef} \frac{[g]}{[km]} \times \text{Vort.} \frac{[km]}{[h]} \times \frac{1}{3600} \quad (7.7)$$

Hedef ağırlık faktörü ise belirlenen moment aralığında, parametrenin en büyük değerinin anlık hedefe oranı şeklinde hesaplanır. (Denklem 7.8 ve şekil 7.11)

$$K_{\text{Hedef}} = \frac{\text{Bileşenin Maksimum Değeri}}{\text{Anlık Hedef}} \quad (7.8)$$



Şekil 7.11: Ağırlık faktörlerinin bulunması

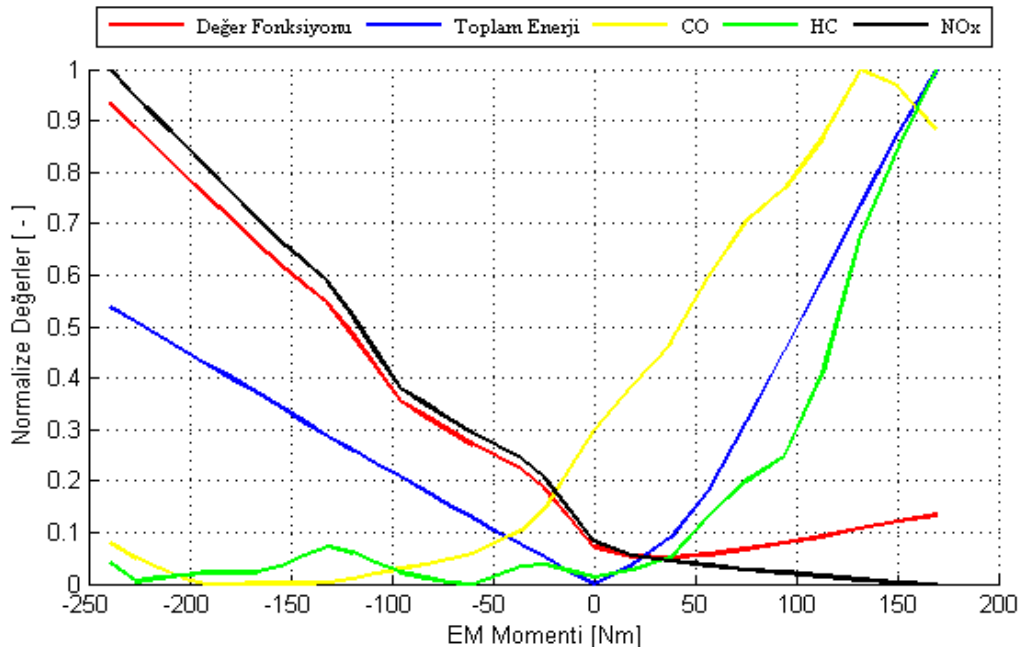
Örneğin 10km/s ortalama hız için olası çalışma noktalarında meydana gelen en büyük enerji tüketimi 120000 J/s ve hedef değer ise 8 Lt/100km (3000j/km) olması durumunda hedef ağırlık faktörü 4 olacaktır. Buna göre aday çalışma noktaları arasında en çok yakıt tüketimine karşılık gelen nokta seçilir ve bu şekilde devam edilir ise hedef değerden 4 kat daha fazla yani 32 Lt/100km yakıt tüketilecektir.

5. Değer fonksiyonunun hesaplanması

Son adımda ise ağırlıklandırılmış emisyon ve yakıt tüketimi değerlerini içeren değer fonksiyonu oluşturulur. (Denklemler 7.9)

$$Değer = \frac{\sum(K_{hedef} \times Normalize\ Edilmiş\ Değerler)}{\sum K_{hedef}} \quad (7.9)$$

Buna göre oluşturulan fonksiyonun minimum değeri tüm parametreler için optimum çalışma noktasını verecektir. (Şekil 7.12)



Şekil 7.12: Değer fonksiyonu ve normalize edilmiş parametreler

Dinamik kontrol stratejisinin uygulamasında tüm çevrimler için emisyon hedefleri Euro IV olarak alınmıştır (CO = 0.74 g/km HC = 0.07 g/km NO_x= 0.4 g/km). Yakıt tüketimi için ise hedef 8 Lt/100km olarak belirlenmiştir. SOC = 0.6 olacak şekilde k düzeltme katsayısı belirlenmiştir(Çizelge 7.10). ΔSOC_{rejen} ise çevrimler için daha önceden bilindiği için sabit değerler alınmıştır (Çizelge 7.11). Ağırlık faktörlerinin hesaplanması için son 10 saniyedeki ortalama hız değeri hesaplanmıştır. Bu zamanın artması FTP 75 gibi dinamik bir çevrimde stratejinin sürüş şartlarına uyum sağlama zamanını artıracaktır.

Çizelge 7.10: k düzeltme katsayısının şarj durumuna göre değişimi

SOC	0.1	0.5	0.55	0.60	0.65	1
K	1000	10	1	0.5	0.01	0.001

Çizelge 7.11: Çevrimlere göre birim zamanda rejeneratif frenleme ile gerçekleşen şarj durumu değişimi

	ΔSOC_{rejen}
NEUDC	6.44×10^{-5}
JAPON 10-15	6.4×10^{-5}
FTP 75	8.5×10^{-5}

İlk olarak yapılan simülasyonun sonuçları çizelge 7.12’de görülmektedir. Sonuçlara bakıldığında yakıt tüketimi değerlerinin beklenen değerlerden yüksek olduğu görülmektedir. HC ve CO emisyonlarına bakıldığında istenen hedef değerleri büyük oranda sağladığı görülmektedir. NO_x emisyonları ise hedef değerleri aşmaktadır. Buna göre yakıt tüketimine hedef ağırlık faktörleri yanında kullanıcı ağırlık faktörü uygulanacaktır. Yakıt tüketimine uygulanan ağırlık faktörü ardından NO_x emisyonların artışı kaçınılmazdır. Bu sebeple NO_x emisyonlarına da ağırlık faktörü uygulanacaktır.

Çizelge 7.12: Dinamik kontrol stratejisi yakıt tüketimi ve emisyon değerleri

		Yakıt [Lt/100km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NO _x [g/km]
NEUDC	Şehir içi	10.55	0.3023	0.0760	0.4935
	Şehir dışı	9.05	0.0884	0.0142	0.5647
	Karma	9.71	0.1667	0.0360	0.5354
Japon 10-15	Karma	9.09	0.1426	0.0309	0.3893
FTP 75	Karma	10.44	0.1627	0.0306	0.5927

Buna göre $K_{\text{yakıt}} = 4$ $K_{\text{HC}} = 1$ $K_{\text{CO}} = 1$ $K_{\text{NOx}} = 4$ olarak belirlenmiştir ve simülasyonu yapılmıştır. Çizelge 7.13'deki sonuçlara göre diğer stratejilerde olduğu gibi yakıt tüketimi FTP 75 çevriminde en fazladır. Yakıt tüketimi yalnızca İYM ile çalışma durumuna göre ortalama % 13 oranında azaltılmıştır. Bunun yanında NOx emisyonları da % 23 oranında azaltılmıştır. CO ve HC emisyonlarındaki artışa rağmen sınır değerleri hala aşmamışlardır.

Çizelge 7.13: Ağırlık faktörlerinin uygulanması ile meydana gelen yakıt tüketimi ve emisyon değerleri

		Yakıt [Lt/100km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NOx [g/km]
NEUDC	Şehir içi	9.85	0.3125	0.0892	0.4866
	Şehir dışı	8.91	0.0953	0.0173	0.5618
	Karma	9.23	0.1778	0.0442	0.5369
Japon 10-15	Karma	8.99	0.1437	0.0335	0.3927
FTP 75	Karma	9.92	0.1729	0.0399	0.6329

Çizelge 7.14: Dinamik kontrol stratejisinin uygulanması sonucu yakıt tüketimi ve emisyon değerlerinin değişimi

		Yakıt [%]	CO [%]	HC [%]	NOx [%]
NEUDC	Şehir içi	-22.8	6.1	23.9	-12.2
	Şehir dışı	-6.74	3.5	2.37	-17.3
	Karma	-14.0	6.5	18.8	-15.2
Japon 10-15	Karma	-12.4	5.9	11.7	-28.29
FTP 75	Karma	-12.6	7.7	19.1	-24.7

Çizelge 7.15'de dinamik kontrol stratejisinin kural tabanlı kontrol stratejisi ile karşılaştırılması görülmektedir. Buna göre yakıt tüketiminde NEUDC çevriminde % 1.6 azalma meydana gelirken, Japon 10-15 ve FTP 75 çevriminde % 1 civarında artış meydana gelmiştir. Buna karşılık NOx emisyonları ise ortalama % 10 oranında azalmıştır. Ağırlık faktörlerinin NOx emisyonlarına ve yakıt tüketimine uygulanması sonucunda CO ve HC emisyonları kural tabanlı kontrol stratejisine göre büyük oranda artış göstermiştir. Bu artışa rağmen sınır değerleri hala sağladığı görülmüştür.

Çizelge 7.15: Dinamik kontrol stratejisinin kural tabanlı kontrol stratejisi ile karşılaştırılması

		Yakıt [%]	CO [%]	HC [%]	NOx [%]
NEUDC	Şehir içi	-7.8	170.6	324.8	9.3
	Şehir dışı	1.4	62.6	92.2	-12.8
	Karma	-1.6	114.2	213.5	-13.1
Japon 10-15	Karma	1.1	44.4	77.3	-11.1
FTP 75	Karma	1.22	271.8	83	-5.4

8. SONUÇLAR

Günümüzde İYM teknolojisinde büyük gelişmeler kaydedilmiş olsada, emisyonlar ve yakıt tüketimi konusunda istediğimiz noktaya ulaşamamış bulunmaktayız. Bu aşamada HET'lar, İYM'a sahip sistemler ile benzerlik göstermeleri, istediğimiz yakıt ekonomisi ve emisyon sınırlarına daha yakın olmaları sebebiyle, sıfır emisyonlu araçlara geçiş teknolojisi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Çalışma kapsamında ilk olarak Matlab Simulink ortamında hazırlanan program yardımıyla konvansiyonel aracın simülasyonu yapılmıştır. Yalnızca İYM'a sahip aracın simülasyon sonuçları, gerçek test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sırasında sıcak motor haritaları kullanılmış ve katalitik dönüştürücünün maksimum verimde çalıştığı kabul edilmiştir. Fakat test şartlarında İYM ısınması ve katalitik dönüştürücünün tam verimle çalışması ancak ikinci şehir içi çevriminin sonunda meydana gelmektedir. Bu nedenle şehir içi yakıt tüketiminde %12, CO emisyonlarında %60 civarında hata olduğu görülmüştür. Daha iyi bir karşılaştırma İYM sıcaklığının dengeye geldiği şehir dışı çevrimi ve oksidasyon katalizöründe dönüşüme uğramayan veya çok az dönüşüme uğrayan NO_x emisyonları ile yapılabilir. Şehir dışı çevrimi yakıt tüketiminde %4, NO_x emisyonlarında ise % 20 oranında hata olduğu görülmüştür.

Daha sonra HET modeli üç farklı sürüş çevrimi ve farklı kontrol stratejileri uygulanarak simüle edilmiştir. Aracın hafif ticari bir hibrid taşıt olması sebebiyle simülasyonlar % 50 yüklü durum için yapılmıştır. Çizelge 8.1'de uygulanan stratejilere ve sürüş çevrimlerine bağlı olarak hesaplanan yakıt tüketimi ve emisyon değerlerinin, yalnız İYM ile çalışma durumunda elde edilen yakıt tüketimi ve emisyon değerlerine oranı görülmektedir. Çizelgede her bir stratejinin etkisi ayrı ayrı gösterilmiştir. Sonuçlara göre İYM'un boшта durdurulması stratejisi ile durma oranının en fazla olduğu Japon 10-15 çevriminde % 9.5 civarında yakıt tasarrufu sağlanmıştır. Ortalama yakıt tasarrufu ise % 6 civarındadır. Bu stratejinin özellikle NO_x emisyonları üzerindeki etkisi yok denecek kadar azdır. CO ve HC

emisyollarında ise sırası ile ortalama % 6 ve 7 oranında azalma görülmüştür. İkinci olarak yakıt ekonomisine rejeneratif frenleme enerjisinin etkisi incelenmiştir. Bu stratejide her çevrim için başlangıç ve bitiş şarj seviyesi eşit olacak şekilde bir limit hız belirlenmiş ve aracın bu limit hıza kadar yalnız EM ile hareket etmesi sağlanmıştır. Rejeneratif frenleme enerjisinin kullanılması ile yakıt tüketimi ortalama % 13 azaltılmıştır. Üçüncü olarak İYM çalışma verimi ve şarj durumu göze alarak bir çalışma noktası belirleyen kural tabanlı kontrol stratejisinin uygulanması ile yakıt tüketiminde ortalama % 13 azalma sağlanmıştır. Fakat rejeneratif frenleme enerjisinin kullanıldığı ikinci strateji ile karşılaştırıldığında yalnızca NEUDC çevriminde yakıt tasarrufu sağlandığı görülmektedir. Bu durumda EM, jeneratör ve İYM çalışma verimleri incelenmiştir. İYM çalışma verimi Japon 10-15 çevriminde neredeyse aynı kaldığı, FTP 75 çevriminde % 12, NEUDC çevriminde % 25 oranında artış gösterdiği görülmüştür. Buna göre elektriksel sistemlerden kaynaklanan kayıplar yalnızca NEUDC çevriminde karşılanabilmiştir. Emisyollara bakıldığında düşük yüklerde daha fazla oluşan CO ve HC emisyonlarının sırası ile % 50 ve % 54 oranında azaldığı görülmüştür. NO_x emisyonlarında ise daha yüksek minimum çalışma momentine sahip olan NEUDC çevriminde % 2, Japon 10 – 15 çevriminde % 19.4 ve FTP 75 çevriminde % 20.4 oranında azalma olduğu görülmüştür.

Çizelge 8.1: Uygulanan kontrol stratejilerine ve sürüş çevrimlerine göre yakıt tüketimi ve emisyonlardaki değişimler

		Yakıt Tük. [%]	CO [%]	HC [%]	NO _x [%]
İYM Durdurulması	NEUDC	-4.8	-4.3	-4.8	-1.2
	JAPON 10-15	-9.5	-10.2	-12.0	-2.7
	FTP 75	-3.4	-3.3	-4.2	-0.7
Rejeneratif Frenleme Enerjisi	NEUDC	-11.0	-14.3	-14.5	-9.9
	JAPON 10-15	-14.1	-29.1	-36.3	-17.0
	FTP 75	-14.5	-10.0	-9.3	-20.4
Kural Tabanlı Kontrol Str.	NEUDC	-12.6	-50.3	-62.1	-2.4
	JAPON 10-15	-13.3	-26.7	-37.0	-19.4
	FTP 75	-13.7	-71.0	-71.0	-20.4
Dinamik Kontrol Stratejisi	NEUDC	-14.0	6.5	18.8	-15.2
	JAPON 10-15	-12.6	7.7	19.1	-24.7
	FTP 75	-12.4	5.9	11.7	-28.3

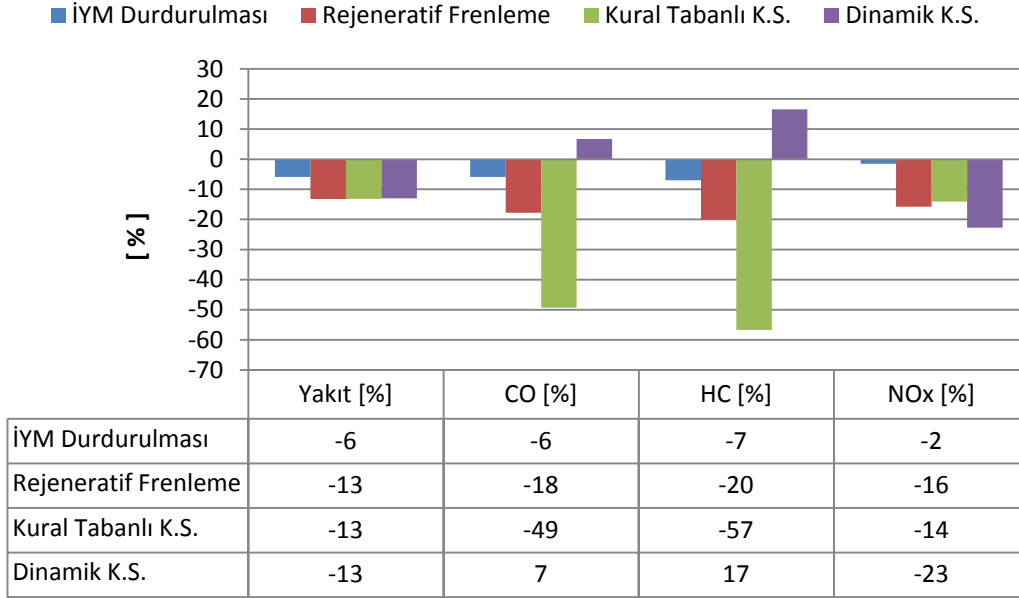
Her bir çevrimde yakıt tüketimi ve NO_x emisyonları açısından en uygun minimum çalışma momenti (M_{min}) farklılık göstermektedir. Minimum çalışma momentinin artması ile İYM ortalama çalışma verimi artmaktadır. Fakat bu durumda EM ve jeneratörün çalışma noktaları önem kazanmaktadır. Ayrıca İYM çalışma verimi moment ile doğrusal olarak değişmemektedir. Bu durum şekil B.1’de görülebilir. Bu sebeple belirli bir moment değerinden yukarıya çıkıldıkça istenilenin aksine yakıt tüketimi artmıştır. Ayrıca çalışma momentinin artması ile NO_x emisyonları da hızlı bir artış göstermiştir.

Uygulanan son strateji ise yakıt tüketimi ve emisyon hedefleri açısından en uygun çalışma noktasının seçildiği dinamik kontrol stratejisidir. En fazla yakıt tasarrufunun sağlanabilmesi için yakıt tüketimi ağırlık faktörü $K_{ykt}=4$ olarak alınmıştır. İYM çalışma veriminin artması ile NO_x emisyonlarının artışı kaçınılmazdır, bu sebeple $K_{NOx}=4$ alınmıştır. Uygulanan strateji ile yakıt tüketiminde ortalama % 13 tasarruf sağlanmıştır. Kural tabanlı kontrol stratejisinde NO_x emisyonları ortalama % 13 azalırken, dinamik kontrol stratejisinde ortalama % 22 oranında azalmıştır. HC ve CO emisyonları artmasına rağmen hala istenen sınırlar içindedir. Ayrıca kural tabanlı kontrol stratejisi her bir çevrim için ayrıca optimize edilmelidir. Dinamik kontrol stratejisinin ise farklı sürüş çevrimleri için ayrıca optimize edilmesi gerekli değildir. Stratejinin sürüş şartlarına uyum sağlayabildiği görülmüştür.

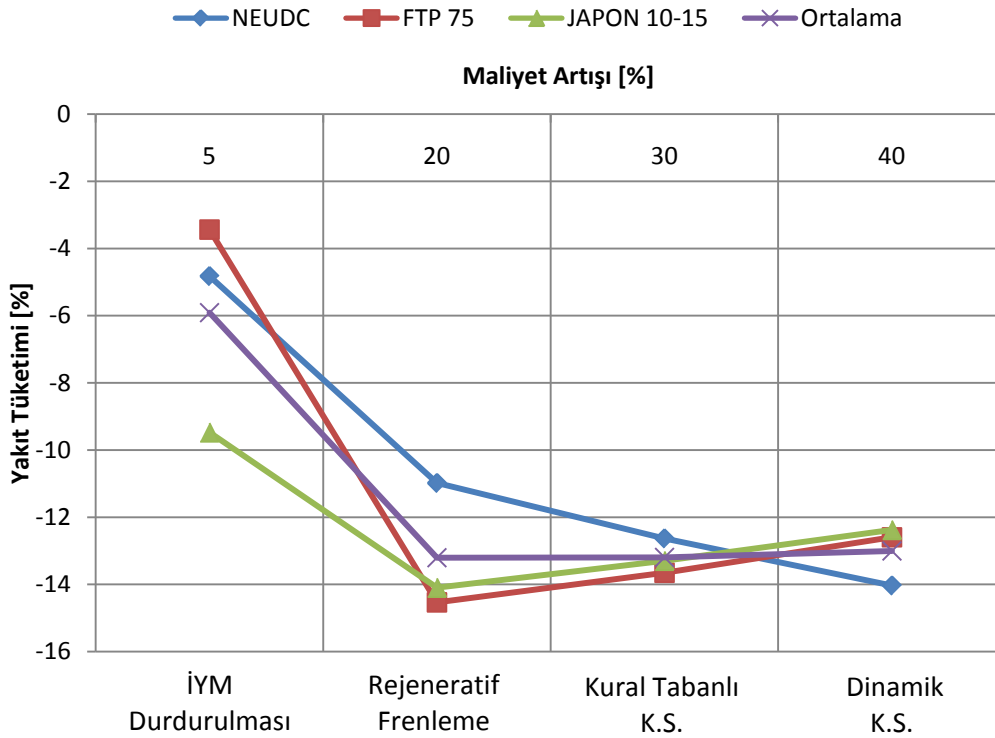
Şekil 8.1’de kontrol stratejilerinin ortalama yakıt tüketimi ve emisyonlara etkileri görülmektedir. Karşılaştırma hibrid aracın yalnızca İYM ile çalışması sonucu elde edilen değerler ile yapılmıştır. Ortalama değerler ise üç farklı çevrimin koşturulması sonucu elde edilen değerlerin ortalamasıdır. Burada stratejilerin gelişmesi ile birlikte yakıt tüketimi değerlerinin hemen hemen aynı kaldığı görülmektedir. Fakat buna karşılık dinamik kontrol stratejisi NO_x emisyonlarında % 23 azalma sağlamıştır. Dinamik kontrol stratejisinde ağırlık katsayıları değiştirilerek daha fazla yakıt tasarrufu sağlamak mümkündür. Burada seçilen katsayılar yakıt tüketimi ve NO_x emisyonları arasında bir denge oluşturacak şekilde seçilmiştir.

Uygulanan stratejilere bakıldığında, kontrol sistemleri karmaşık hale geldikçe, maliyet hızlı bir şekilde artmakta fakat buna karşılık yakıt tüketiminde görülen fark gittikçe azalmaktadır. Şekil 8.2’de simülasyonu yapılan sistemde stratejilere bağlı olarak sağlanan yakıt tasarrufu ve buna karşılık gelen tahmini maliyet artışı görülmektedir. Burada yalnızca NEUDC çevriminde yakıt tasarrufu sürekli artış

göstermektedir. Üç çevrimin ortalaması alındığında ise yakıt tasarrufunun hemen hemen sabit kaldığı görülmektedir. Sistemde uygulanacak olan kontrol stratejisi maliyet artışı da göz önüne alınarak belirlenmelidir. Burada hedef kitle, istenen yakıt tüketimi ve sağlanması gereken emisyon değerleri önem kazanmaktadır.



Şekil 8.1: Uygulanan stratejilerin ortalama yakıt tüketimi ve emisyonlara etkisi



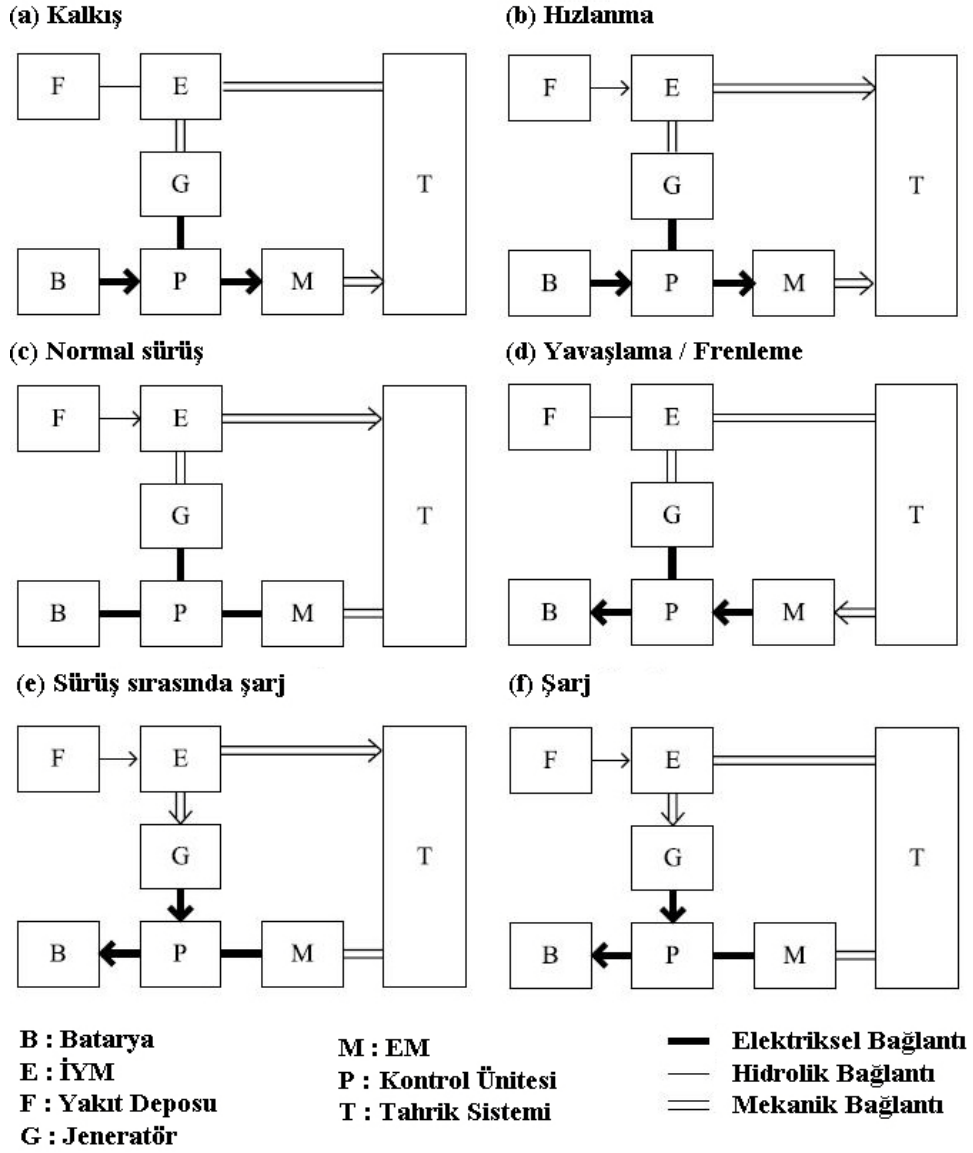
Şekil 8.2: Farklı stratejilerin araç maliyetine etkisi

KAYNAKLAR

- [1]Chan, C. C., 2007. The State of The Art of Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 95, No. 4
- [2]Erbeyler, S. A., 2007. Hibrid Elektrikli Hafif Ticari Araçta Dizel Motoru Azot oksit (NO_x) Emisyonlarının Optimizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [3]Shahed, S. M., 2006. An Analysis of Asisted Turbocharging with Light Hybrid Powertrain, *SAE Technical Paper Series*, 2006-01-0019
- [4]German, M. J., 2003, Hybrid Powered Vehicles, Sayfa 21-26,*SAE International*
- [5]Hanyu, T., Iwano, H., Ooba, H., Kamada, S., Kosaka, Y., Komiyama, S., ve Takeda, K., 2006. A Study of the Power Transfer Systems For HEVs, *SAE Technical Paper Series*, 2006-01-0668
- [6]Johnson, V. H., Wipke, K. B. ve Rausen D. J., 2000. HEV Control Strategy for Real-Time Optimization of Fuel Economy and Emissions, *SAE Technical Paper Series*, 2000-01-1543
- [7]Simic, D., Giuliani, H., Kral, C., ve Pirker, F., 2006. Simulation of Conventional and Hybrid Vehicle Including Auxiliaries with Respect to Fuel Consumption and Exhaust Emissions, *SAE Technical Paper Series*, 2006-01-0444
- [8]Chau, K. T. and Wong, Y. S., 2001. Overview of Powermanagement in Hybrid Electric Vehicles, *Energy Conversion and Management*, 25 Nisan
- [9]Senger, D. R., 1997. Validation of ADVISOR as a Simulation Tool for a Series Hybrid Electric Vehicle Using the Virginia Tech Future Car Lumina, Master Thesis, *Virginia Polytechnic Institute and StateUniversity*, Blacksburg, Virginia, September 18
- [10]Rousseau, A., and Pasquier, 2001. M., Validation of a Hybrid Modeling Software (PSAT) Using Extension for Prototyping (PSAT-PRO), *Global Powertrain Congress*
- [11]United Nations, 2005, Regulation No. 83

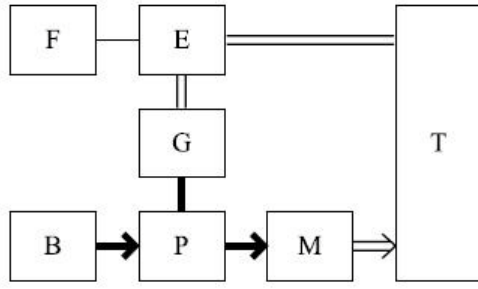
EKLER

EK A Seri – paralel ve gelişmiş HET’larda çalışma modları

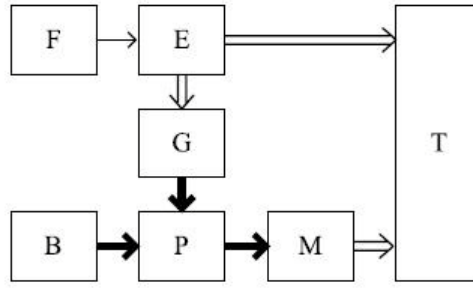


Şekil A.1: İYM ağırlıklı Seri – Paralel HET çalışma modları

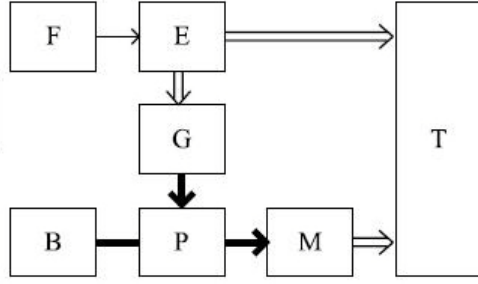
(a) Kalkış / Düşük yük



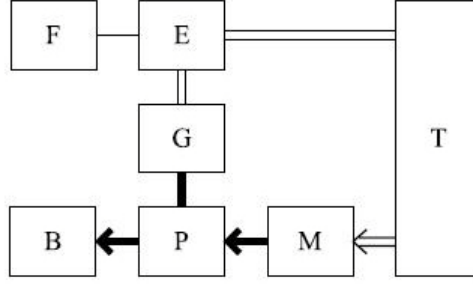
(b) Hızlanma



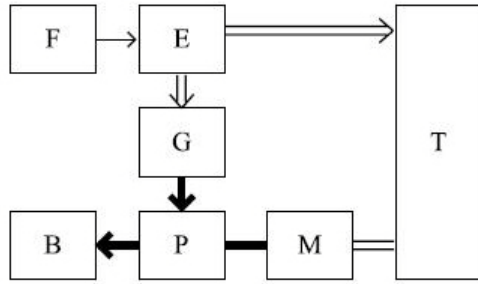
(c) Normal sürüş



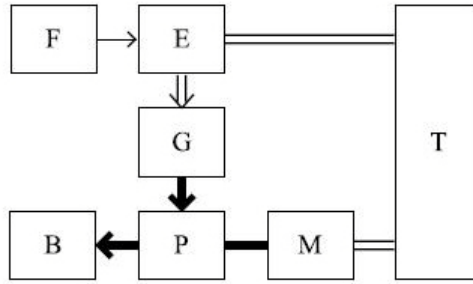
(d) Yavaşlama / Frenleme



(e) Sürüş sırasında şarj



(f) Şarj

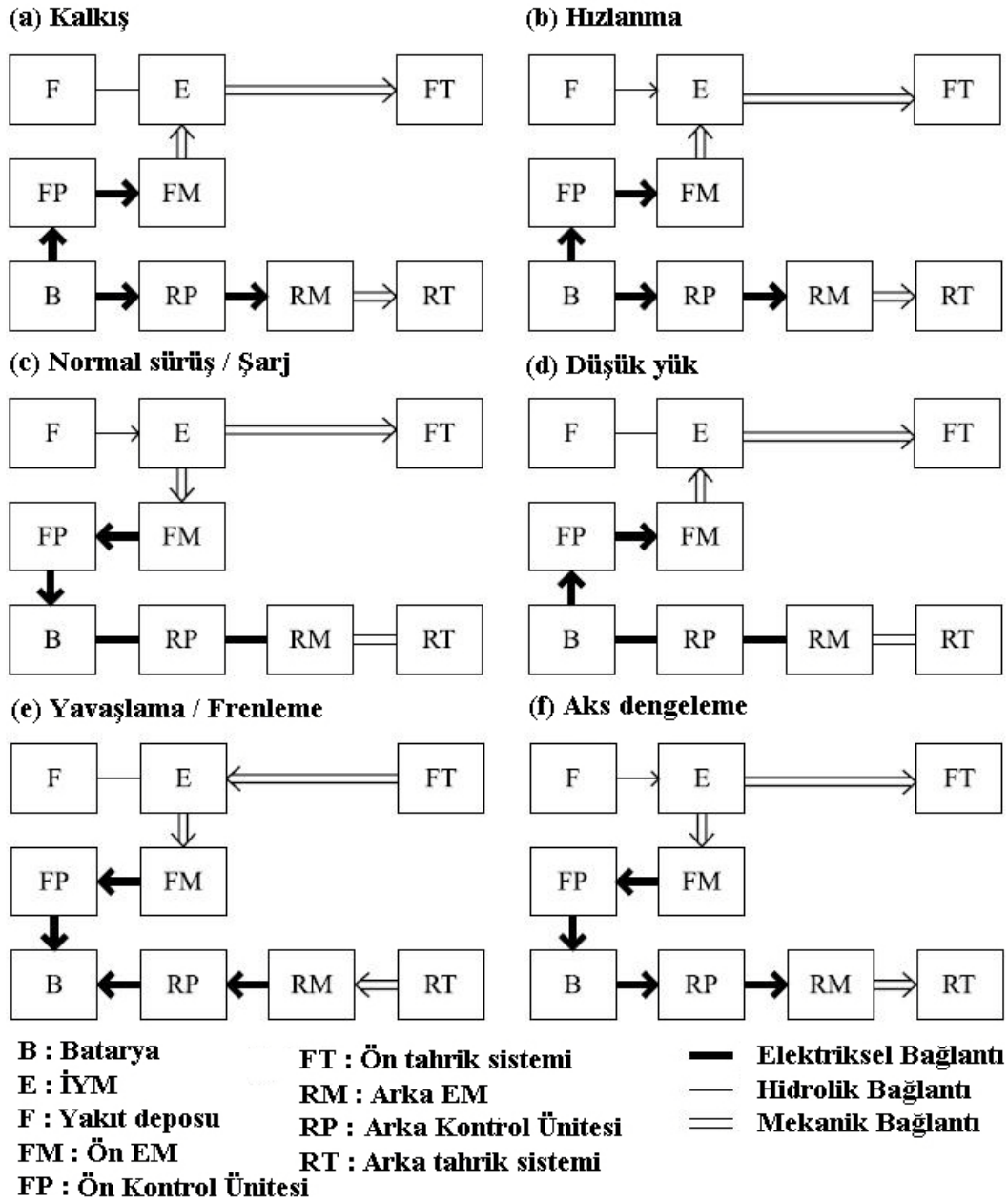


B : Batarya
E : İYM
F : Yakıt Deposu
G : Jeneratör

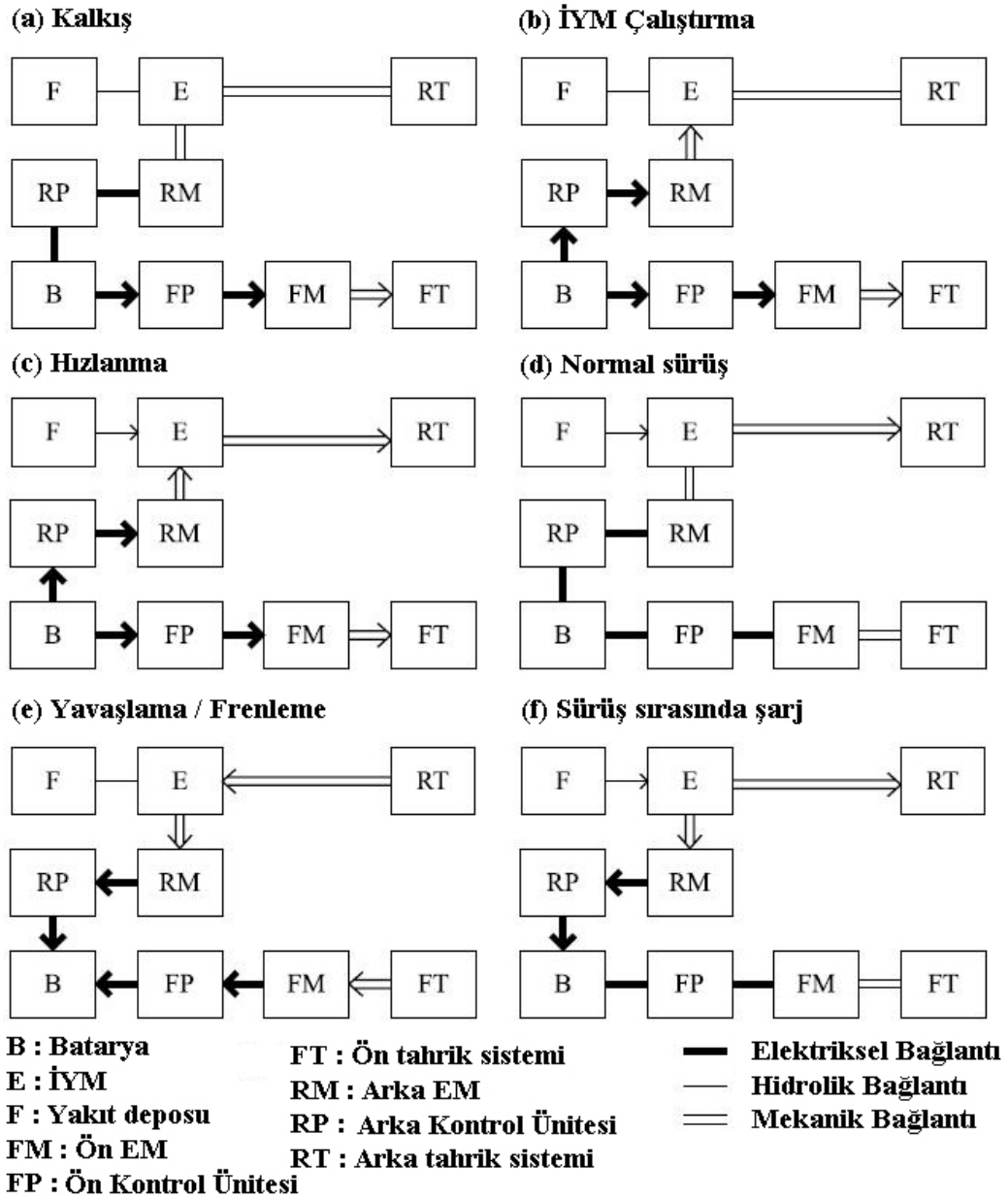
M : EM
P : Kontrol Ünitesi
T : Tahrik Sistemi

— Elektriksel Bağlantı
— Hidrolik Bağlantı
= Mekanik Bağlantı

Şekil A.2: EM ağırlıklı seri – paralel HET çalışma modları

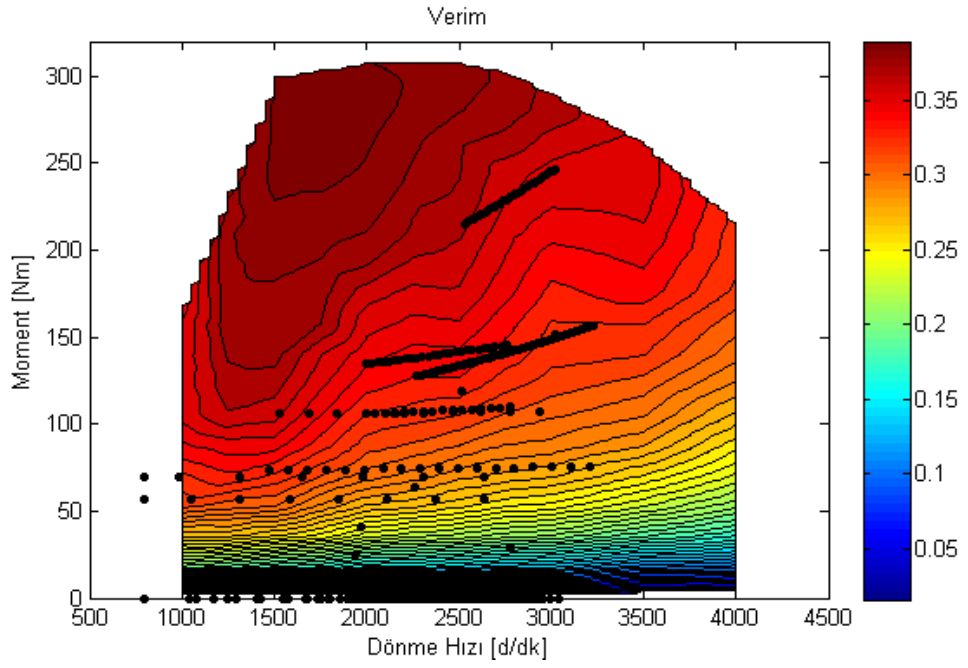


Şekil A.3: Çift akstan (ön hibrid arka elektrik) tahrikli gelişmiş HET çalışma modları

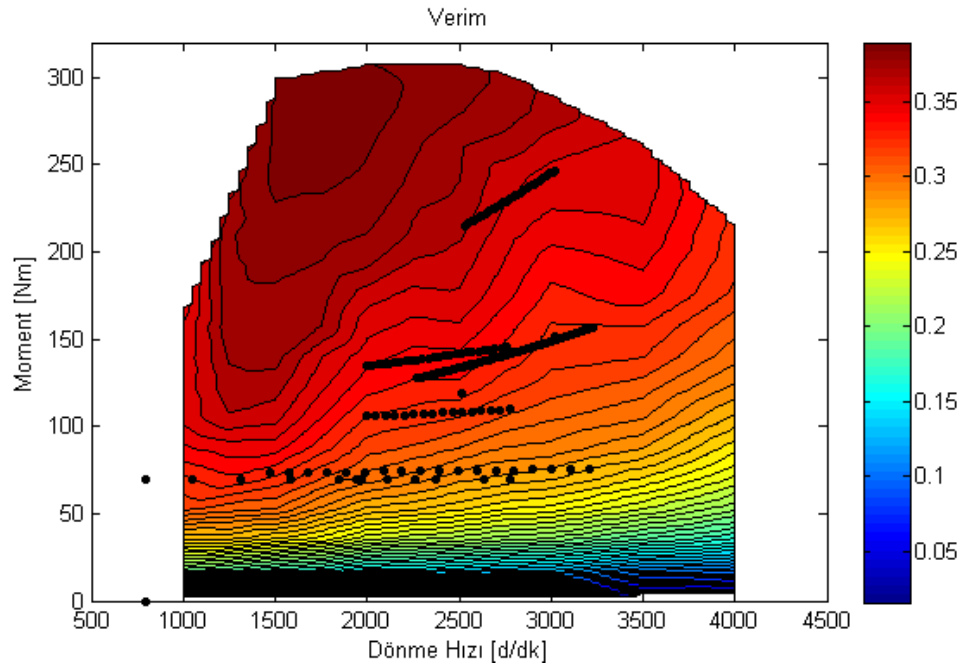


Şekil A.4: Çift akstan (ön elektrik arka hibrid) tahrikli gelişmiş HET çalışma modları

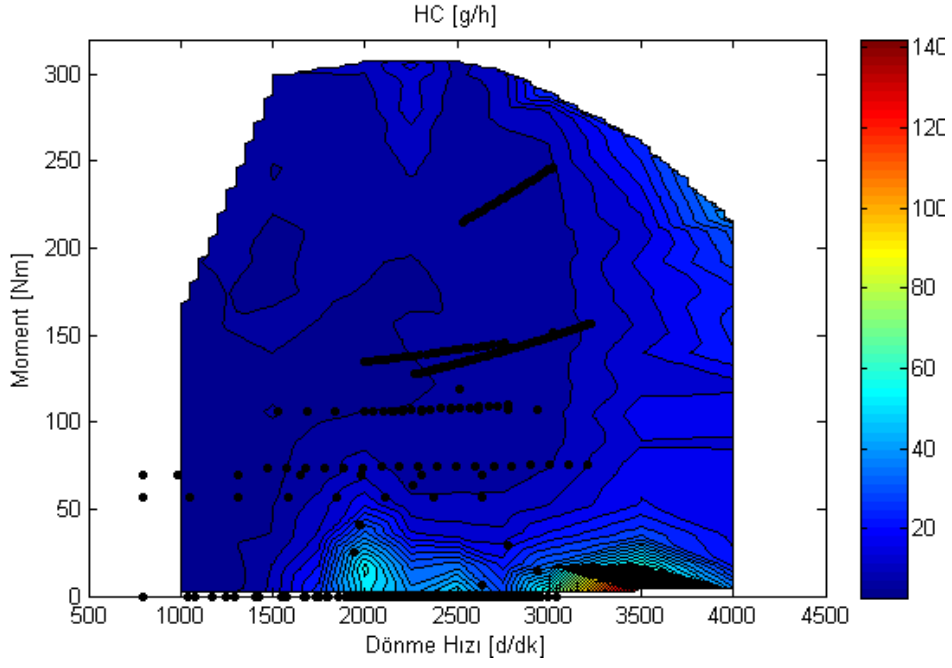
Ek B Farklı çevrimlere göre İYM çalışma noktaları



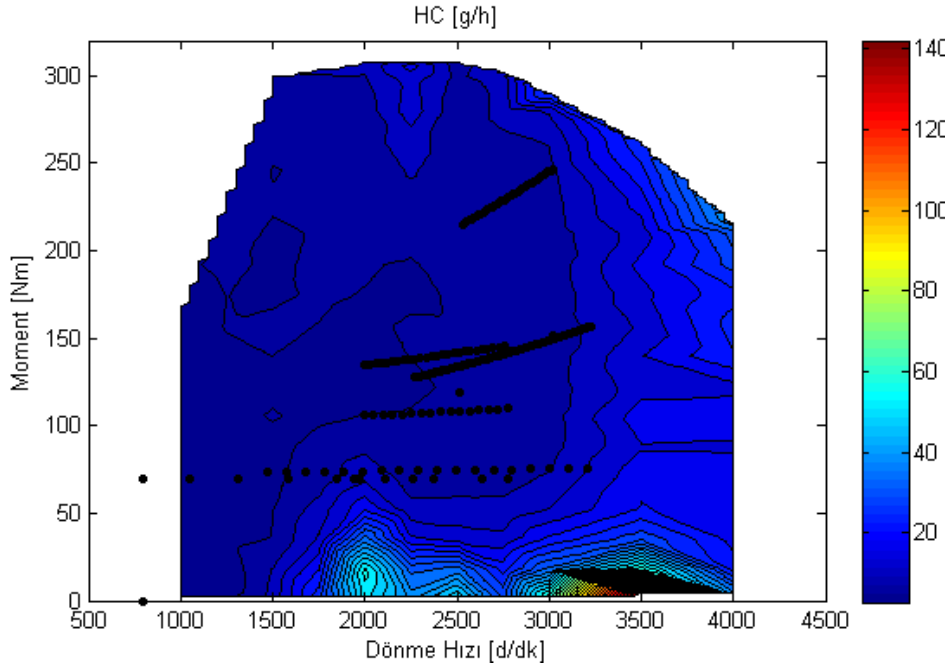
Şekil B.1: NEUDC yalnızca İYM çalışma noktaları(Verim haritası)



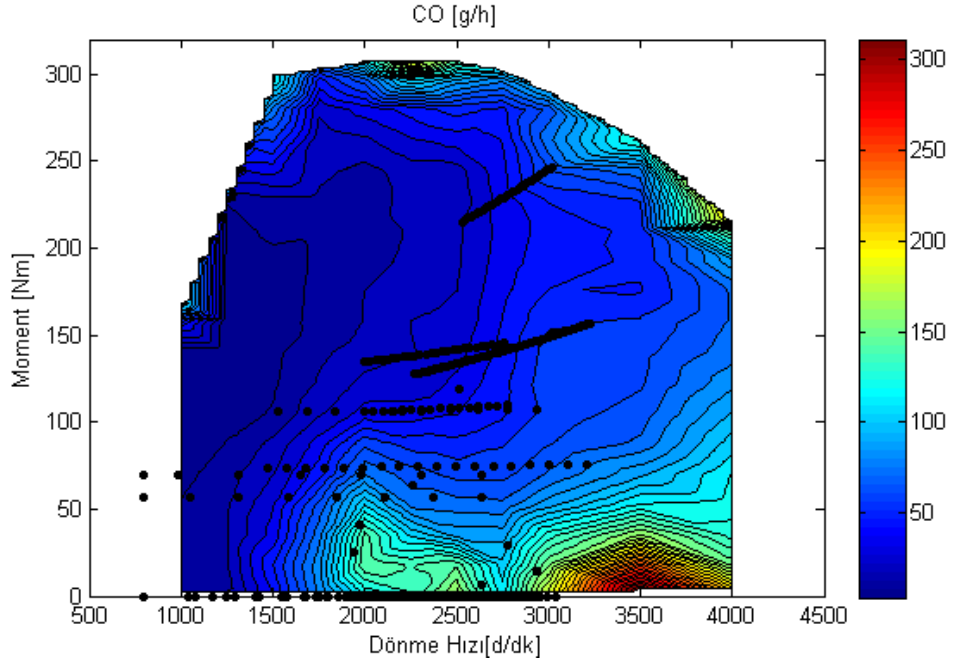
Şekil B.2: NEUDC kural tabanlı kontrol stratejisi çalışma noktaları(Verim haritası)



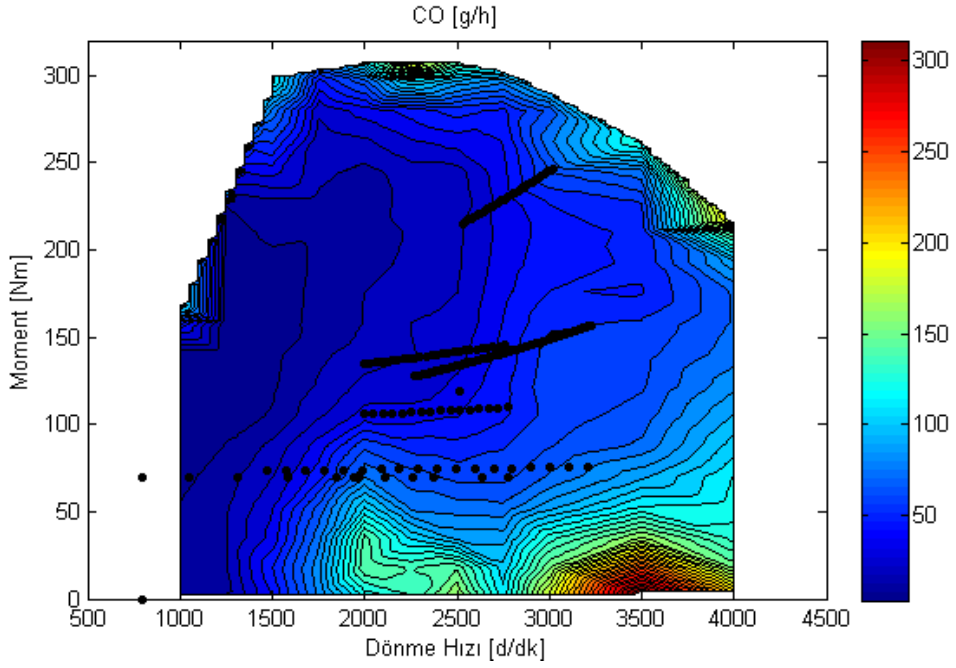
Şekil B.3: NEUDC yalnızca İYM çalışma noktaları (HC haritası)



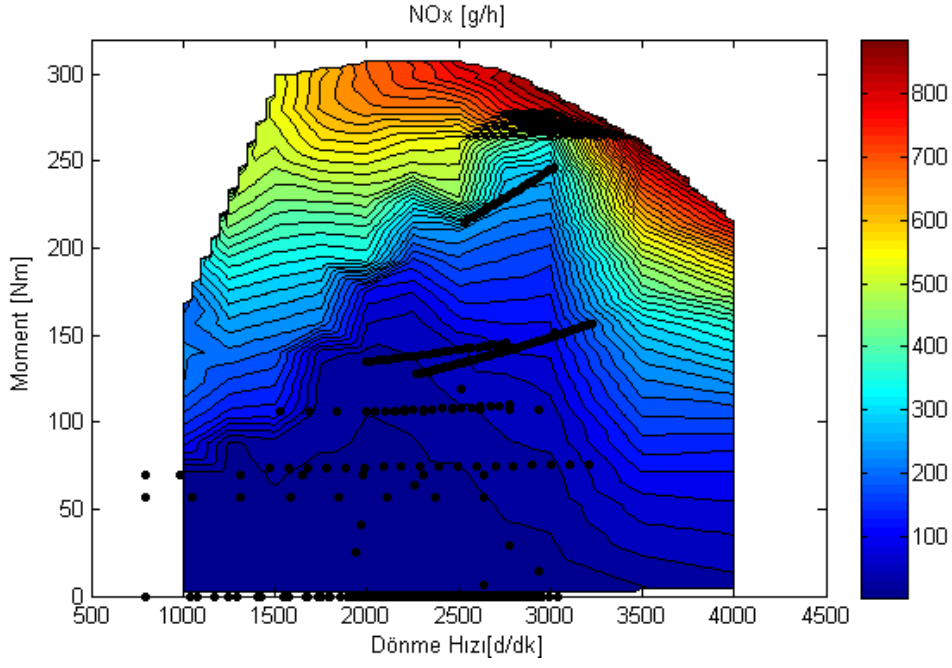
Şekil B.4: NEUDC kural tabanlı kontrol stratejisi çalışma noktaları(HC haritası)



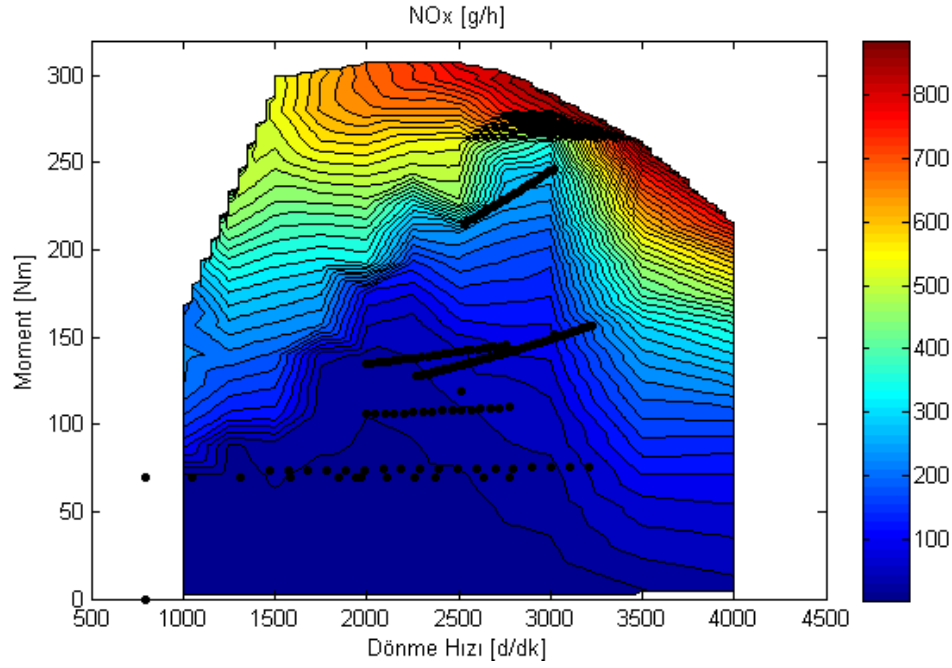
Şekil B.5: NEUDC yalnızca İYM çalışma noktaları (CO haritası)



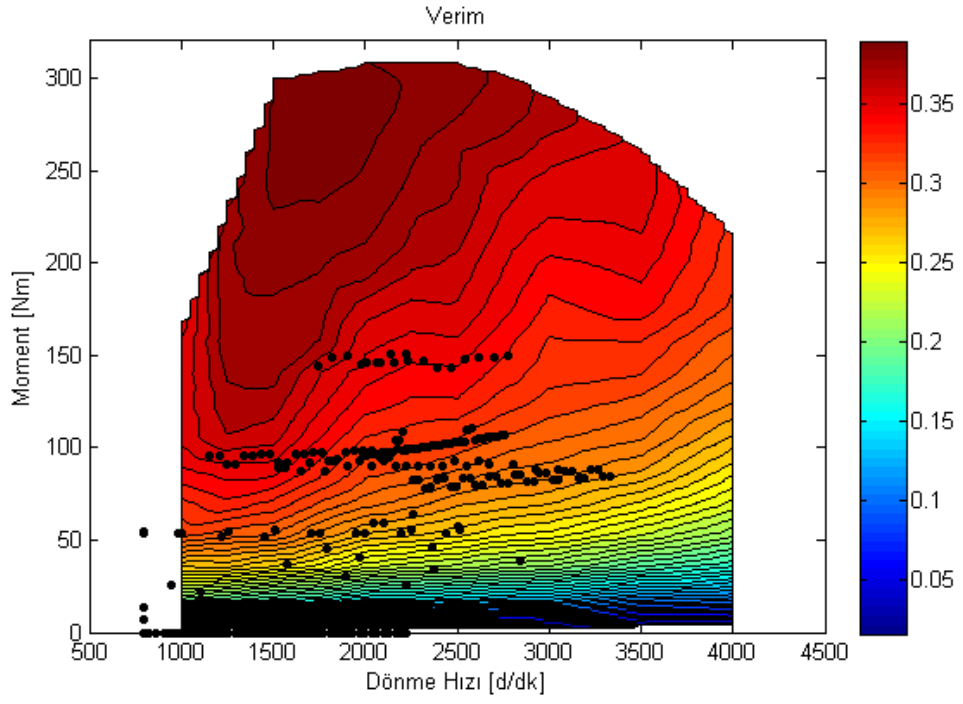
Şekil B.6: NEUDC kural tabanlı kontrol stratejisi çalışma noktaları(CO haritası)



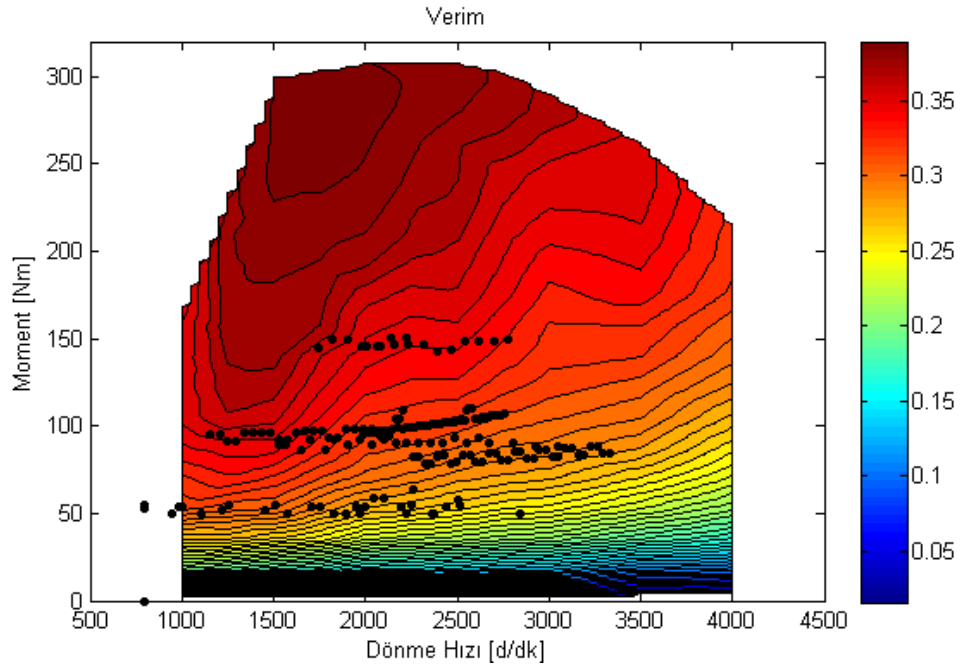
Şekil B.7: NEUDC yalnızca İYM çalışma noktaları (NO_x haritası)



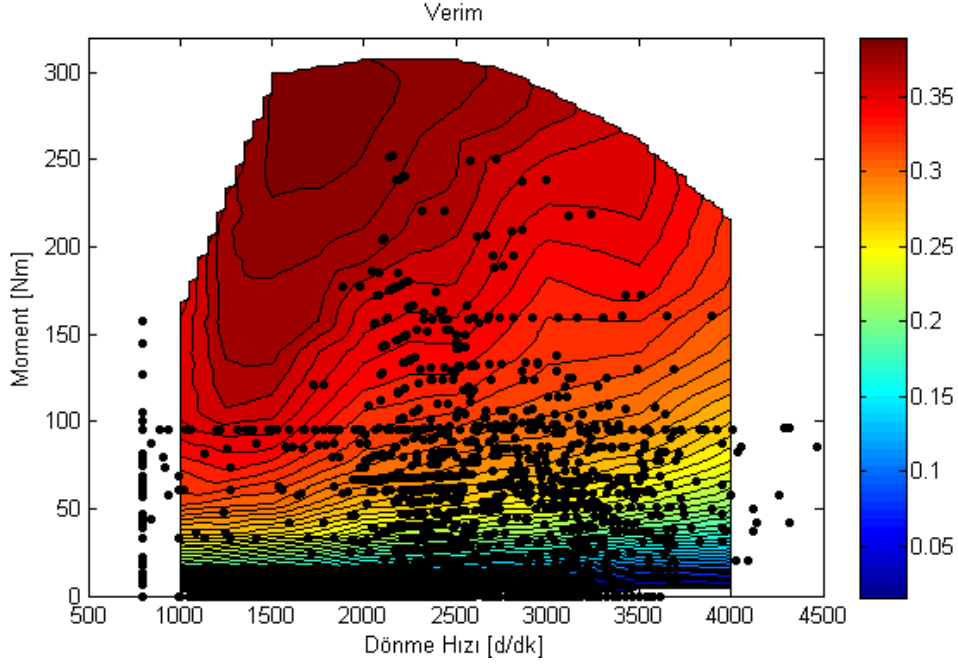
Şekil B.8: NEUDC kural tabanlı kontrol stratejisi çalışma noktaları(NO_x haritası)



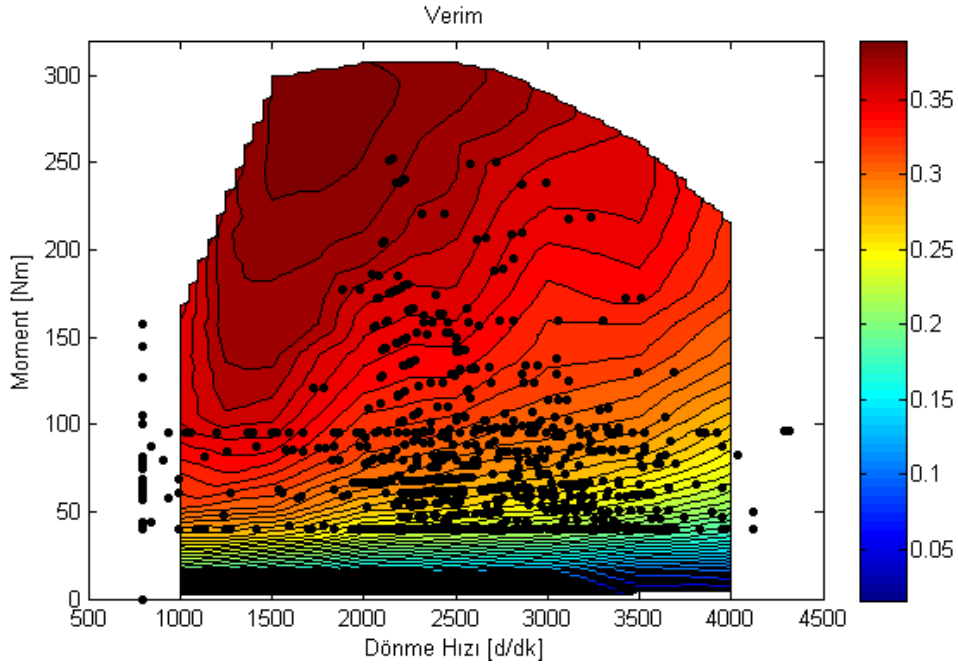
Şekil B.9: JAPON 10-15 yalnızca İYM çalışma noktaları (Verim haritası)



Şekil B.10: JAPON 10-15 kural tabanlı kontrol stratejisi çalışma noktaları (Verim haritası)



Şekil B.11: FTP 75 yalnızca İYM çalışma noktaları (Verim haritası)



Şekil B.12: FTP 75 kural tabanlı kontrol stratejisi çalışma noktaları(Verim haritası)

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa KOCAGÜL 1985 yılında İzmir’de doğdu. Ortaokul ve lise döneminde öğrenim gördüğü Turgutlu Anadolu Lisesi’nden 2003 yılında mezun oldu ve aynı yıl İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümünde yüksek öğrenim hayatına başladı. Lisans eğitimini iyi bir derecede tamamladıktan sonra 2007 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Otomotiv Programında yüksek lisans yapmaya hak kazandı.