

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HİBRİT ARAÇLARDA KRANK MİLİ MARŞ
JENERATÖRÜ SİSTEMİNİN AKTİF VE PASİF
MODLARDAKİ PERFORMANSININ
SİMÜLASYON VE SAHA VERİLERİYLE
KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

Aysima PIÇAK ADAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK

Haziran, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİBRİT ARAÇLARDA KRANK MİLİ MARŞ JENERATÖRÜ
SİSTEMİNİN AKTİF VE PASİF MODLARDAKİ
PERFORMANSININ SİMÜLASYON VE SAHA
VERİLERİYLE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Aysima PIÇAK ADAŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 19.06.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı **YÜKSEK LISANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Selin ÖZÇİRA ÖZKILIÇ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Evren İŞEN, Üye
Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK sorumluluğunda tarafımda hazırlanan HİBRİT ARAÇLARDA KRANK MİLİ MARŞ JENERATÖRÜ SİSTEMİNİN AKTİF VE PASİF MODLARDAKİ PERFORMANSININ SİMÜLASYON VE SAHA VERİLERİYLE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Aysima PIÇAK ADAŞ

İmza

Cesaret verenlere ve ilham kaynağı olanlara

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında bilgi, deneyim ve yol gösterici desteğiyle beni aydınlatan, sabır ve anlayışıyla rehberlik eden saygıdeğer danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitim hayatım boyunca yanımda olan, sevgisini ve desteğini hiç esirgemeyen başta canım babam Ali PIÇAK ve sevgili annem Selma PIÇAK olmak üzere tüm aileme, varlıklarıyla bana güç verdikleri için sonsuz teşekkür ederim.

Bu zorlu süreçte bana verdiği sonsuz sevgi, sabır ve destekle her daim yanımda olan değerli eşim Muammer ADAŞ'a yürekten teşekkür ederim. Onun varlığı bu başarının en değerli parçasıdır.

Son olarak, tez sürecinde bilgi ve destek veren tüm hocalarıma, Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'ndaki akademik ve idari personele teşekkürlerimi iletirim.

Bu süreçte bana destek olan herkese en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Aysima PIÇAK ADAŞ

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|-------------|
| SİMGE LİSTESİ | viii |
| KISALTIMA LİSTESİ | ix |
| ŞEKİL LİSTESİ | xi |
| TABLO LİSTESİ | xiii |
| ÖZET | xiv |
| ABSTRACT | xvi |
| 1 GİRİŞ | 1 |
| 1.1 Tezin Amacı | 2 |
| 1.2 Literatür Özeti | 2 |
| 2 HİBRİT ARAÇLAR | 3 |
| 2.1 Hibrit Araçların Tarihsel Gelişimi | 3 |
| 2.2 Hibrit Araç Teknolojilerinin Otomotiv Sektöründeki Önemi | 4 |
| 2.3 Hibrit Araç Türleri | 5 |
| 2.3.1 Tam Hibrit (Full Hybrid - FHEV) | 5 |
| 2.3.2 Yarı Hibrit (Mild Hybrid - MHEV) | 5 |
| 2.3.3 Plug-in Hibrit (PHEV) | 6 |
| 2.3.4 Seri Hibrit | 6 |
| 2.3.5 Paralel Hibrit | 7 |
| 2.3.6 Seri-Paralel (Karma) Hibrit | 7 |
| 2.4 Hibrit Sistemlerde Enerji Yönetimi | 7 |
| 2.4.1 Enerji Dağılımı ve Kontrolü | 7 |
| 2.4.2 Frenlemede Enerji Geri Kazanımı | 8 |
| 2.4.3 Elektrik ve Benzin Tüketimi Dengeleme | 8 |
| 2.5 Hibrit Araçların Yenilenemez Enerji Kaynakları Üzerindeki Etkisi ve Avantajları | 8 |
| 2.5.1 Fosil Yakıt Tüketimi ve Enerji Verimliliği | 8 |
| 2.5.2 Elektrikli Motorların Rolü ve Güç Dağılımı Dengesi | 9 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.5.3 | Emisyonlar ve Karbon Salınımı Üzerindeki Etki | 9 |
| 2.5.4 | Ekonomik Katkılar ve Yakıt Maliyeti Azaltımı | 9 |
| 2.5.5 | Politik Teşvikler ve Sürdürülebilir Ulaşım Vizyonu | 10 |
| 3 | KRANK MİLİ MARŞ JENERATÖRÜ (KSG) SİSTEMİ | 12 |
| 3.1 | KSG Sistemine Genel Bakış | 12 |
| 3.1.1 | KSG'nin Tanımı ve Komponentleri | 12 |
| 3.2 | KSG Temel Fonksiyonları | 16 |
| 3.2.1 | Motor Başlatma ve Elektrik Üretimi | 16 |
| 3.3 | KSG Teknolojisinin Hibrit Araçlara Etkisi | 21 |
| 3.3.1 | Yüksek Verimli Marş ve Başlatma İşlemleri | 21 |
| 3.3.2 | Enerji Verimliliği ve Sürüş Performansı | 21 |
| 3.3.3 | Çevresel Etkiler ve Sürdürülebilirlik | 21 |
| 3.3.4 | Otomatik Start-Stop Sayesinde Yakıt Tasarrufu | 21 |
| 4 | KRANK MİLİ MARŞ JENERATÖRÜ (KSG) AKTİF VE PASİF DURUMDA VERİLERİN TOPLANMASI VE ANALİZİ | 22 |
| 4.1 | Test Aracı ve Sistem Özellikleri | 22 |
| 4.2 | Veri Toplama Prosedürü | 23 |
| 4.3 | Test Senaryosu | 23 |
| 4.4 | Veri Kaydı Alma ve Analiz Prosedürü | 25 |
| 4.5 | Verilerin Analizi ve Yorumlanması | 26 |
| 4.5.1 | Veri Analizinde Kullanılacak Parametreler | 26 |
| 4.5.2 | KSG Aktif Modda Veri Analizi | 31 |
| 4.5.3 | KSG Pasif Modda Veri Analizi | 37 |
| 4.5.4 | KSG Aktif ve KSG Pasif Durumlarında Sonuçların Yorumlanması | 42 |
| 4.5.5 | KSG Aktif ve Pasif Modlarda Farklı Parametreler Üzerinden Yorumlanması | 50 |
| 5 | KRANK MİLİ MARŞ JENERATÖRÜ (KSG) SİSTEMİNİN SİMÜLİNK MODELLEMESİ VE SAHA VERİLERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI | 56 |
| 5.1 | Araç Özelliklerinin Simulink Ortamına Tanımlanması | 56 |
| 5.2 | KSG Test Aracına Ait Parametrelerin Modellenmesi | 57 |
| 5.3 | KSG Sistemine Ait Simülasyon Modelinin Bileşen Bazlı Analizi | 59 |
| 5.4 | KSG Destekli Test Aracının Simülasyonu | 61 |
| 5.5 | Saha Verisi ile Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması | 64 |
| 6 | SONUÇ | 69 |

| | |
|--|-----------|
| 6.1 Genel Sonuçlar | 69 |
| 6.2 alışmanın Sınırlılıkları | 69 |
| 6.3 Gelecek alışmalar İçin Öneriler | 70 |
| KAYNAKÇA | 71 |
| TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR | 76 |

SİMGE LİSTESİ

| | |
|----------|-----------------------------|
| ω | Açısal hız |
| v | Araç hızı |
| A | Araç yüzey alanı |
| I | Elektrik akımı |
| E | Enerji |
| V | Gerilim |
| P | Güç |
| ρ | Hava yoğunluğu |
| a | İvme |
| F | Kuvvet |
| m | Kütle |
| d | Mesafe |
| C_d | Sürüklenme katsayısı |
| τ | Tork |
| η | Verimlilik |
| g | Yerçekimi ivmesi |
| C_r | Yuvarlanma direnç katsayısı |
| t | Zaman |

KISALTMA LİSTESİ

| | |
|------|--|
| A | Akım |
| ABS | Kilitlenme Karşıtı Fren Sistemi |
| CAN | Kontrolör Alan Ağı (Araç içi haberleşme protokolü) |
| CRC | Döngüsel Artıklık Kontrolü (Veri doğrulama) |
| DC | Doğru Akım |
| DLC | Veri Uzunluk Kodu (CAN mesajı uzunluğu) |
| ECU | Elektronik Kontrol Ünitesi |
| EV | Elektrikli Araç |
| FD | Esnek Veri Hızı (Gelişmiş CAN protokolü) |
| HEV | Hibrit Elektrikli Araç |
| HVAC | Isıtma, Havalandırma ve Klima Sistemi |
| ICE | İçten Yanmalı Motor |
| KSG | Krank Milli Marş Jeneratörü |
| kWh | Kilowatt-saat |
| MHEV | Yarı Hibrit Elektrikli Araç |
| Nm | Tork Birimi |
| OBD | Araç İçi Arıza Teşhis Sistemi |
| OEM | Orijinal Ürün Üreticisi |
| PHEV | Şarj Edilebilir Hibrit Elektrikli Araç |
| PID | Oransal-İntegral-Türevsel Kontrol Algoritması |
| Rpm | Dakikadaki Devir Sayısı |
| SOC | Batarya Şarj Seviyesi |
| SoH | Batarya Sağlık Durumu |

| | |
|-----|---------------------------|
| TCS | Çekiş Kontrol Sistemi |
| V | Gerilim |
| VSP | Araç Hızı |
| Wh | Watt-saat (Enerji birimi) |

ŞEKİL LİSTESİ

| | | |
|-------------------|--|----|
| Şekil 2.1 | Yarı hibrit araç yapısı [21] | 6 |
| Şekil 2.2 | Plug-in hibrit araç yapısı [21] | 6 |
| Şekil 3.1 | KSG sistemine ait blok diyagramı | 13 |
| Şekil 3.2 | Rejeneratif frenleme (energy recovery during braking) | 18 |
| Şekil 3.3 | ICE tahriki (driving with internal combustion engine – full cap) . . | 18 |
| Şekil 3.4 | ICE destekli kalkış (combustion engine assist – efficient boost) . . | 19 |
| Şekil 3.5 | Şarj modu (charging function) | 19 |
| Şekil 3.6 | Alternatör kombinasyonu ve PS48 takviyesi (combination + top-up) | 20 |
| Şekil 4.1 | Test senaryolarının uygulandığı test pisti kuşbakışı görünümü . . . | 24 |
| Şekil 4.2 | KSG aktif modda zamana bağlı gerçek motor yük grafiği | 31 |
| Şekil 4.3 | KSG aktif modda zamana bağlı maksimum motor yük grafiği . . . | 32 |
| Şekil 4.4 | KSG aktif modda zamana bağlı anlık yakıt tüketim hız grafiği . . . | 32 |
| Şekil 4.5 | KSG aktif modda zamana bağlı anlık yakıt ekonomisinin grafiği . | 33 |
| Şekil 4.6 | KSG aktif modda kat edilen mesafe | 34 |
| Şekil 4.7 | KSG aktif modda zamana bağlı çıkış şaft devir hız grafiği | 34 |
| Şekil 4.8 | KSG aktif modda zamana bağlı anlık araç hız grafiği | 35 |
| Şekil 4.9 | KSG aktif modda zamana bağlı anlık motor tork grafiği | 36 |
| Şekil 4.10 | KSG pasif modda zamana bağlı gerçek motor yük grafiği | 37 |
| Şekil 4.11 | KSG pasif modda zamana bağlı maksimum mevcut motor yük grafiği | 38 |
| Şekil 4.12 | KSG pasif modda zamana bağlı anlık yakıt tüketim hız grafiği . . . | 38 |
| Şekil 4.13 | KSG pasif modda zamana bağlı anlık yakıt ekonomisinin grafiği . | 39 |
| Şekil 4.14 | KSG pasif modda kat edilen mesafe | 39 |
| Şekil 4.15 | KSG pasif modda zamana bağlı çıkış şaft devir hız grafiği | 40 |
| Şekil 4.16 | KSG pasif modda zamana bağlı anlık araç hız grafiği | 41 |
| Şekil 4.17 | KSG pasif modda zamana bağlı anlık motor tork grafiği | 42 |
| Şekil 4.18 | KSG aktif ve pasif modlarında gerçek motor yüklerinin karşılaştırılması | 43 |
| Şekil 4.19 | KSG aktif ve pasif modlarında maksimum mevcut motor tork değerlerinin karşılaştırılması | 43 |
| Şekil 4.20 | KSG aktif ve pasif modlarında anlık yakıt tüketim hızlarının karşılaştırılması | 44 |

| | | |
|-------------------|---|----|
| Şekil 4.21 | KSG aktif ve pasif modlarında anlık yakıt ekonomilerinin karşılaştırılması | 45 |
| Şekil 4.22 | KSG aktif ve pasif modlarında çıkış şaft devir hızlarının karşılaştırılması | 46 |
| Şekil 4.23 | KSG aktif ve pasif modlarında anlık araç hızlarının karşılaştırılması | 47 |
| Şekil 4.24 | KSG aktif ve pasif modlarında anlık tork değerlerinin karşılaştırılması | 50 |
| Şekil 5.1 | KSG sisteminin modellenmesi | 59 |
| Şekil 5.2 | KSG sistemi referans sürüş çevrimi | 60 |
| Şekil 5.3 | KSG elektrik motoru | 60 |
| Şekil 5.4 | KSG batarya sistemi | 60 |
| Şekil 5.5 | Batarya şarj durumu (SoC) gösterimi | 61 |
| Şekil 5.6 | KSG araç teknik değerlerinin Matlab parametresine dönüştürülmesi | 62 |
| Şekil 5.7 | KSG araç dinamiği ve hız kontrolüne ait Simulink modeli yapısı . | 63 |
| Şekil 5.8 | KSG destekli test aracına ait simülasyon modeli üzerinden elde edilen zamana bağlı değerler | 63 |
| Şekil 5.9 | Gerçek sürüş verilerinin Drive Cycle Source blokları ile Simulink modelinde kıyaslanması | 64 |
| Şekil 5.10 | Gerçek sürüş verileri ile simüle edilen motor torku profillerinin karşılaştırılması | 65 |
| Şekil 5.11 | Gerçek sürüş verileri ile simüle edilen anlık şaft hızı profillerinin karşılaştırılması | 66 |
| Şekil 5.12 | Anlık şaft hızına ait yakınlaştırılmış saha ve Simulink verilerinin incelenmesi | 66 |
| Şekil 5.13 | Simülasyon ve saha verisiyle motor çıkış gücünün karşılaştırılması | 67 |
| Şekil 5.14 | Motor çıkış gücüne ait yakınlaştırılmış saha ve Simulink verilerinin incelenmesi | 68 |

TABLO LİSTESİ

| | | |
|------------------|--|----|
| Tablo 2.1 | Hibrit araç türlerinin teknik özellikler açısından karşılaştırılması . | 11 |
| Tablo 3.1 | KSG fazlarının karşılaştırmalı özeti | 20 |
| Tablo 4.1 | KSG aktif ve pasif modda sistem parametreleri | 53 |
| Tablo 4.2 | KSG aktif ve pasif modların detaylı karşılaştırması | 54 |

HİBRİT ARAÇLARDA KRANK MİLİ MARŞ JENERATÖRÜ SİSTEMİNİN AKTİF VE PASİF MODLARDAKİ PERFORMANSININ SİMÜLASYON VE SAHA VERİLERİYLE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Aysima PIÇAK ADAŞ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK

Günümüzde sürdürülebilir ulaşım ve enerji verimliliği hedefleri doğrultusunda hibrit araç teknolojileri, otomotiv sektöründe önemli bir dönüşüm alanı haline gelmiştir. Bu teknolojiler, içten yanmalı motorlar ile elektrikli tahrik sistemlerinin birlikte çalıştığı yapılar sayesinde hem yakıt tüketimini hem de çevresel etkileri azaltma potansiyeli sunmaktadır. Bu bağlamda, hibrit sistemlerde kullanılan Krank Mili Marş Jeneratörü (KSG), araç motoruna ek tork sağlayan, elektrik enerjisi üreten ve motoru çalıştıran çok işlevli bir bileşen olarak öne çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında, KSG sisteminin aktif ve pasif modlardaki performansı, hibrit bir otobüs üzerinde gerçekleştirilen gerçek saha testleri ve araçtan alınan yüksek çözünürlüklü CAN verileri aracılığıyla analiz edilmiştir. İnceleme kapsamında motor yükü, tork rezervi, anlık yakıt tüketimi ve motor verimliliği gibi parametreler dikkate alınmış; elde edilen veriler grafiksel ve istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmiştir. Ayrıca, KSG sistemine ait temel bileşenler (DC/DC dönüştürücü, inverter, ultra kapasitör vb.) detaylı şekilde açıklanmış, sistemin enerji yönetim stratejilerine katkısı teknik olarak ortaya konmuştur.

Çalışma sonuçları, KSG sisteminin aktif modda çalıştığında motor üzerindeki yükü azalttığını, yakıt tüketimini optimize ettiğini ve rejeneratif frenleme ile enerji geri kazanımını sağladığını göstermektedir. Buna ek olarak, Avrupa Birliği ve diğer

lkelerde hibrit araçlara yönelik uygulanan teşvik mekanizmaları incelenmiş; hibrit teknolojilerin gelecekteki enerji politikalarındaki stratejik konumu vurgulanmıştır.

Bu tez, hibrit sistemlerin performansını artırmak için KSG entegrasyonunun teknik etkilerini somut verilerle ortaya koymakta ve akademik literatürde bu alandaki saha verisine dayalı çalışmalara katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hibrit araçlar, KSG, enerji verimliliği, rejeneratif frenleme, performans analizi

ABSTRACT

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ACTIVE AND PASSIVE MODES OF THE CRANKSHAFT STARTER GENERATOR SYSTEM IN HYBRID VEHICLES BASED ON SIMULATION AND FIELD DATA

Aysima PIÇAK ADAŞ

Department of Electrical Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Engin AYÇİÇEK

Hybrid vehicle technologies have become a major area of transformation in the automotive sector, driven by the goals of sustainable mobility and energy efficiency. These systems, which combine internal combustion engines with electric drive units, offer the potential to reduce both fuel consumption and environmental impact. In this context, the Crankshaft Starter Generator (KSG) used in hybrid systems stands out as a multifunctional component that provides additional torque to the engine, generates electrical energy, and enables engine start-up.

In this thesis, the performance of the KSG system in active and passive modes was analyzed through real-world test scenarios on a hybrid bus platform using high-resolution CAN data. Parameters such as engine load, torque reserve, instantaneous fuel consumption, and engine efficiency were evaluated using graphical and statistical methods. Furthermore, the key components of the KSG system (DC/DC converter, inverter, ultracapacitor, etc.) were explained in detail, and their contribution to energy management strategies was technically demonstrated.

The results indicate that when operating in active mode, the KSG system reduces engine load, optimizes fuel consumption, and enables energy recovery through regenerative braking. In addition, governmental incentive mechanisms for hybrid

vehicles in the European Union and other countries were examined, and the strategic role of hybrid technologies in future energy policies was emphasized.

This thesis provides a data-driven evaluation of the technical impact of KSG integration on hybrid vehicle performance and contributes to the academic literature by presenting a rare field-data-based analysis in this area.

Keywords: Hybrid vehicles, KSG, energy efficiency, regenerative braking, performance analysis

1 GİRİŞ

Günümüzde artan çevre kirliliği, fosil yakıt kaynaklarının tükenme riski ve enerji maliyetlerindeki yükseliş, ulaşım sistemlerinde daha verimli ve çevre dostu çözümlerin geliştirilmesini gerektirmektedir. Bu gelişmeler doğrultusunda, otomotiv sektörü içten yanmalı motorlara alternatif olarak, elektrikli ve hibrit teknolojilere yönelmektedir. Hibrit araçlar, içten yanmalı motorlar ile elektrik motorlarını bir arada kullanarak hem enerji verimliliğini artırmakta hem de zararlı emisyonları azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaktadır [1–3].

Son yıllarda, hibrit sistemlerin performansını daha da iyileştirmek amacıyla çeşitli yardımcı güç sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemlerden biri olan Krank Mili Marş Jeneratörü (KSG), hem marş motoru hem de jeneratör görevini üstlenen çift yönlü çalışan bir elektrik makinesidir. KSG sistemleri, hızlanma ve kalkış gibi yüksek tork gereksinimi duyulan durumlarda motora destek vererek motor yükünü azaltır ve yakıt tüketimini optimize eder. Ayrıca, rejeneratif frenleme ile kinetik enerjiyi geri kazandırarak elektrik enerjisi üretmektedir.

Bu çalışmada, hibrit bir otobüste kullanılan KSG sisteminin aktif ve pasif modlardaki performansı, gerçek sürüş verileri temel alınarak karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Çalışmada kullanılan veriler, araç üzerindeki CAN protokolü ile kayıt altına alınmış; motor yükü, anlık yakıt tüketimi, maksimum tork rezervi ve verimlilik gibi temel parametreler üzerinden değerlendirme yapılmıştır. KSG sisteminin aktif çalıştığı durumda, aracın performansına olan etkisi nicel göstergelerle ortaya konmuştur.

Tez kapsamında ilk olarak hibrit araç teknolojilerine genel bir bakış sunulmakta, ardından KSG sisteminin yapısı, çalışma prensipleri ve hibrit araçlardaki rolü ele alınmaktadır. Daha sonra, veri toplama prosedürü, analiz yöntemi ve karşılaştırmalı bulgular detaylandırılmıştır. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmekte ve ileriye dönük öneriler sunulmaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin temel amacı, hibrit bir otobüs üzerinde kullanılan Krank Mili Marş Jeneratörü (KSG) sisteminin aktif ve pasif çalışma modlarının araç performansı üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemektir. Çalışmada, motor yükü, tork rezervi, anlık yakıt tüketimi ve motor verimliliği gibi teknik parametreler üzerinden değerlendirme yapılmaktadır. Analizler, araçtan gerçek sürüş koşullarında toplanan CAN verileri kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, KSG'nin aktif durumda çalışmasının enerji verimliliği ve sürüş konforu üzerindeki katkıları ortaya konmuştur.

Ayrıca, elde edilen saha verileri ışığında KSG sisteminin aktif modda sağladığı performans iyileştirmeleri nicel verilerle desteklenmiş ve pasif mod ile karşılaştırılarak sistemin avantajları detaylandırılmıştır. Hibrit araç teknolojileri içerisinde KSG sisteminin potansiyel katkıları somut şekilde değerlendirilmiştir.

1.2 Literatür Özeti

Son yıllarda hibrit araç teknolojileri üzerine yapılan araştırmalar, enerji verimliliğinin artırılması ve zararlı emisyonların azaltılması hedefleri doğrultusunda yoğunluk kazanmıştır. Hibrit güç sistemlerinin içten yanmalı motorlarla birlikte kullanılması sayesinde özellikle şehir içi sürüşlerde yakıt tüketiminde önemli iyileşmeler sağlandığı birçok çalışmada gösterilmiştir [1, 4].

Krank Mili Marş Jeneratörü (KSG) sistemleri üzerine yapılan araştırmalar, bu sistemlerin sadece motoru çalıştırmakla kalmayıp, aynı zamanda hızlanma anlarında motora ek tork desteği sağladığını ve rejeneratif frenleme yoluyla elektrik enerjisi üretebildiğini ortaya koymuştur [5, 6]. Bazı çalışmalar KSG'nin sürüş konforunu artırdığını ve motorun yüksek verimli çalışma bölgelerinde daha uzun süre kalmasını sağladığını göstermiştir [7]. Ancak, bu sistemlerin gerçek sürüş verilerine dayalı kapsamlı çalışmalar hâlâ sınırlıdır.

Simülasyon temelli çalışmaların çoğu ideal koşullara dayanmakta ve gerçek saha verilerinin dinamik değişkenliğini yansıtamamaktadır. Bu durum, hibrit araçlarda KSG gibi sistemlerin performansını sadece modele dayalı olarak değerlendirme çabalarının pratik doğruluğunu sorgulanabilir hâle getirmektedir [8].

Bu çalışmada, literatürdeki boşluğu doldurmak amacıyla hibrit bir otobüs üzerinde toplanan gerçek CAN verileri kullanılarak, KSG sisteminin aktif ve pasif modlardaki performansı karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

2 HİBRİT ARAÇLAR

Hibrit araçlar, iki veya daha fazla enerji kaynağını bir arada kullanarak hareket eden ulaşım araçlarıdır. Genellikle içten yanmalı bir motor ile elektrikli bir motorun birleşiminden oluşan bu sistemler, yakıt tüketimini azaltmayı, emisyon değerlerini düşürmeyi ve enerji verimliliğini artırmayı hedeflemektedir. Hibrit teknolojiler, özellikle şehir içi trafik koşullarında sağladığı avantajlarla otomotiv sektöründe yaygın olarak tercih edilmektedir [1, 4].

Elektrik motoru düşük hızlarda aracı harekete geçirirken içten yanmalı motor daha yüksek hızlarda devreye girerek sürüşü destekler. Bu sayede her iki motorun da verimli çalışma bölgeleri kullanılarak enerji tasarrufu sağlanır. Ayrıca rejeneratif frenleme sayesinde araç yavaşlarken ortaya çıkan kinetik enerji geri kazanılır ve batarya sistemine yönlendirilerek verimlilik daha da artırılır [1].

Hibrit araçların yaygınlaşmasındaki bir diğer önemli etken, çevresel sürdürülebilirliktir. Karbon salınımının azaltılması, fosil yakıt tüketiminin düşürülmesi ve özellikle düşük hızlarda ve kentsel alanlarda gürültü seviyelerinin düşürülmesine katkıları [9, 10], hibrit sistemlerin çevre dostu ulaşım çözümleri olarak konumlanmasını sağlamaktadır. Bu bağlamda hibrit araçlar, hem enerji politikaları hem de küresel iklim hedefleri açısından stratejik öneme sahiptir [11].

2.1 Hibrit Araçların Tarihsel Gelişimi

Hibrit araç kavramı, otomotiv tarihindeki ilk motorlu taşıtlardan bu yana var olan çok enerji kaynaklı sistem fikirlerine dayanmaktadır. 1900'lü yılların başında Ferdinand Porsche tarafından geliştirilen Lohner-Porsche Mixte adlı araç, tarihteki ilk hibrit araç olarak kabul edilmektedir. Bu araç, içten yanmalı motorun jeneratör olarak kullanıldığı ve elektrik motorlarıyla tekerleklere güç verildiği bir yapıya sahipti [4].

Ancak bu erken dönem girişimlerine rağmen, 20. yüzyıl boyunca fosil

yakıtların yaygın ve ucuz olması nedeniyle hibrit teknolojilere ilgi sınırlı kalmıştır. 1970'lerdeki petrol krizi ile birlikte alternatif enerji kaynaklarına yönelim artmış, bu durum hibrit sistemlere yönelik Ar-Ge faaliyetlerini hızlandırmıştır [4].

1990'lı yıllarda çevresel etkiler, emisyon normları ve enerji verimliliği gibi faktörler nedeniyle hibrit araç teknolojileri tekrar gündeme gelmiş ve ilk ticari başarı örneği 1997 yılında Toyota tarafından piyasaya sürülen Prius modeli ile elde edilmiştir [12]. Takip eden yıllarda Honda, Ford ve General Motors gibi üreticiler de hibrit modeller geliştirmiştir [4].

Günümüzde hibrit teknolojisi, sadece binek araçlarda değil; otobüs, kamyon ve tren gibi ağır taşıtlarda da yaygın olarak kullanılmakta ve 48V mild-hybrid sistemler, plug-in hibritler ve tam hibrit sistemlerle geniş bir yelpazeye ulaşmaktadır. Ayrıca bu gelişmeler, otomotiv endüstrisinin elektrifikasyon sürecinde önemli bir geçiş adımını temsil etmektedir [9].

2.2 Hibrit Araç Teknolojilerinin Otomotiv Sektöründeki Önemi

Otomotiv sektörü, enerji tüketiminin azaltılması ve çevresel etkilerin en aza indirilmesi gibi hedefler doğrultusunda yenilikçi teknolojilere yönelmiştir. Bu bağlamda hibrit araç teknolojileri, hem içten yanmalı motor sistemlerinin sürekliliğini koruyan hem de elektrikli sürüşü entegre eden geçiş teknolojisi olarak büyük önem taşımaktadır [4]. Hibrit sistemler, özellikle şehir içi kullanım senaryolarında düşük hızlarda elektrik motorunu devreye alarak yakıt tüketimini azaltmakta ve karbon salınımını minimum düzeye indirmektedir [13]. Gerçek sürüş verilerine dayalı çalışmalarda, elektrik motorunun düşük hız ve kalkış anlarında içten yanmalı motora destek vererek yakıt tüketiminde önemli iyileşmeler sağladığı gösterilmiştir [14].

Otomotiv üreticileri, hibrit araçları farklı segmentlerde konumlandırarak hem çevre dostu ulaşımı hem de kullanıcı konforunu öncelikli hale getirmiştir. Elektrikli modda sessiz sürüş, daha düşük işletme maliyetleri ve enerji geri kazanımı gibi avantajlar, hibrit araçların müşteri tercihinde öne çıkmasına katkı sağlamaktadır [15]. Ayrıca birçok ülkenin çevre politikaları ve emisyon standartları doğrultusunda hibrit sistemlerin desteklenmesi, bu teknolojilerin yaygınlaşmasını hızlandırmıştır [16, 17].

Günümüzde hibrit teknolojileri, otomotiv sektöründe sadece geçici bir çözüm değil; sürdürülebilir ulaşım vizyonunun önemli bir bileşeni olarak kabul edilmektedir. Özellikle içten yanmalı motorun hâlâ baskın olduğu pazarlarda, hibrit sistemler

elektrikli araçlara geçiş sürecinde önemli bir köprü işlevi görmektedir.

2.3 Hibrit Araç Türleri

2.3.1 Tam Hibrit (Full Hybrid - FHEV)

Tam hibrit araçlar, elektrik motoru ve içten yanmalı motoru birbirinden bağımsız şekilde çalıştırabilen sistemlerdir [1]. Bu araçlarda elektrik motoru, düşük hızlarda aracı tek başına hareket ettirebilirken; daha yüksek hızlarda içten yanmalı motor devreye girer veya her iki motor birlikte çalışarak araca güç sağlar. Toyota Prius, bu sınıfın en bilinen örneklerinden biridir [18].

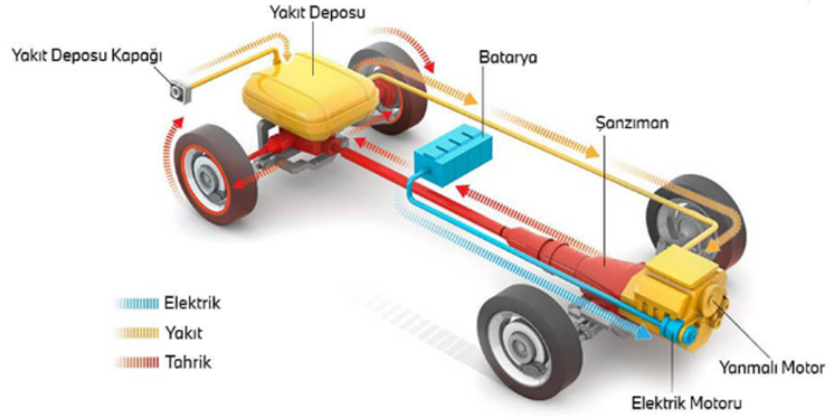
2.3.2 Yarı Hibrit (Mild Hybrid - MHEV)

Mild hibrit (Mild Hybrid Electric Vehicle, MHEV) sistemlerde elektrik motoru, genellikle içten yanmalı motora destek olur ve tek başına aracı tahrik etmez. Bu sistemler, kalkış sırasında tork desteği sağlar, rejeneratif frenleme ile enerji geri kazanımı sunar ve start-stop işlevselliğiyle yakıt verimliliğini artırır. 48 V elektrik mimarisi, bu sistemlerde yaygın olarak tercih edilmektedir [5, 6].

Bu çalışmada verileri toplanan test aracı, 48 V mild hibrit sistem ile donatılmıştır. Bu sistemde Krank Mili Marş Jeneratörü (KSG) yapılandırması kullanılarak hem marş motoru hem de alternatör işlevi birleştirilmiştir. 48 V mild hibrit sistemler, geleneksel hibrit sistemlere göre daha hafif, daha ekonomik ve kurulum açısından daha basittir. Özellikle şehir içi toplu taşımada, sık dur-kalk yapılan çevrimlerde enerji geri kazanımı açısından avantaj sunar.

Saha verisi alınan test aracında kullanılan KSG sistemi, hızlanma ve kalkış anlarında motora tork desteği sağlamakta, rejeneratif frenleme ile kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek enerji verimliliğine katkıda bulunmaktadır. Bu yapı, MAN EfficientHybrid sistemi gibi sektörde yaygın kullanılan ticari örneklerle benzerlik göstermektedir. MAN'ın Lion's City ve Lion's Intercity LE modellerinde kullanılan EfficientHybrid sisteminde, yaklaşık 12 kW gücünde bir elektrik motoru ve ultrakapasitör temelli bir enerji depolama ünitesi yer almaktadır [19].

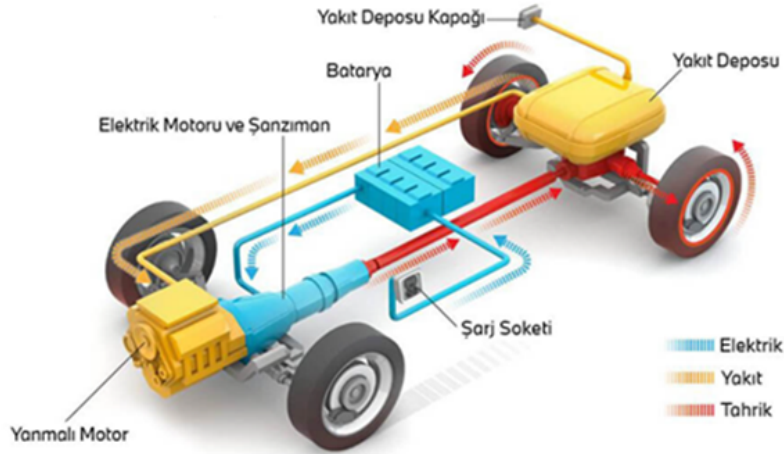
Benzer şekilde, Mercedes-Benz Citaro Mild Hybrid modeli de 48 V elektrik sistemine sahip olup, yaklaşık 14 kW gücündeki bir elektrik motoru aracılığıyla frenleme enerjisini geri kazanmakta ve motor destek fonksiyonu ile yakıt tüketimini optimize etmektedir [20].



Şekil 2.1 Yarı hibrit araç yapısı [21]

2.3.3 Plug-in Hibrit (PHEV)

Plug-in hibrit araçlar, harici bir güç kaynağından şarj edilebilen daha büyük kapasiteli bataryalara sahiptir. Bu sayede tamamen elektrik modunda uzun menzilli sürüşe olanak tanır. Elektrik enerjisi tükendiğinde içten yanmalı motor devreye girer. Bu hibrit tipi, tamamen elektrikli araçlara geçişte önemli bir ara basamak olarak görülmektedir [9, 13].



Şekil 2.2 Plug-in hibrit araç yapısı [21]

2.3.4 Seri Hibrit

Seri hibrit sistemlerde içten yanmalı motor yalnızca elektrik üretmek amacıyla kullanılır; aracı hareket ettiren tek kaynak elektrik motorudur. Bu yapı, enerji yönetimi açısından daha esnek bir yapı sunar ancak verimlilik, dönüşüm kayıpları nedeniyle diğer sistemlere göre daha düşüktür [1, 22].

2.3.5 Paralel Hibrit

Paralel hibrit sistemlerde hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoru tekerleklere doğrudan güç iletebilir. Bu sistemler, verimlilik ve performans dengesini sağlamak adına özellikle otoyol kullanımı için uygundur. Mild hibrit araçların çoğu bu yapıdadır [1, 23].

2.3.6 Seri-Paralel (Karma) Hibrit

Seri ve paralel yapıların kombinasyonudur. Araç, sürüş koşullarına bağlı olarak seri, paralel veya her iki modda çalışabilir. Bu sistemler genellikle yüksek verimlilik sağlamak üzere tasarlanır ve gelişmiş kontrol algoritmaları içerir [1, 24].

Hibrit araç teknolojileri temel olarak üç ana kategoride incelenmektedir: Tam hibrit (FHEV), yarı hibrit (MHEV) ve plug-in hibrit (PHEV). Bu sistemler arasındaki temel farklılıklar, elektrik motorunun gücü, batarya kapasitesi ve şarj gereksinimi gibi kriterlere dayanmaktadır [1, 4] (Tablo 2.1).

2.4 Hibrit Sistemlerde Enerji Yönetimi

Hibrit araçlarda enerji yönetimi, farklı enerji kaynaklarının uyumlu ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayan karmaşık bir süreçtir. İçten yanmalı motor ile elektrik motorunun birlikte çalıştığı bu sistemlerde, enerji üretimi, depolanması ve kullanımı arasında optimum bir denge kurulması hedeflenir. Bu yönetim, yakıt tüketimini azaltmak, emisyonları düşürmek ve batarya ömrünü uzatmak gibi çeşitli hedefler doğrultusunda şekillenir [23, 24]. Bu kapsamda, sürüş profili, hız, eğim, batarya doluluk oranı ve tork ihtiyacı gibi parametrelerin gerçek zamanlı olarak değerlendirilmesi; enerji kullanım verimliliğinin artırılmasında kritik bir rol oynamaktadır [25, 26]. Gelişmiş kontrol stratejileri sayesinde, hibrit sistemler bu parametrelere dayalı olarak optimum enerji dağılımı gerçekleştirebilir.

2.4.1 Enerji Dağılımı ve Kontrolü

Hibrit araçlarda enerji dağılımı, sürüş koşullarına göre elektrik motoru ve içten yanmalı motor arasında dinamik şekilde gerçekleştirilir. Elektronik kontrol ünitesi (ECU), hız, yük, eğim ve batarya durumu gibi birçok parametreyi göz önünde bulundurarak hangi enerji kaynağının ne zaman devreye gireceğini belirler. Bu dağılım sayesinde hem verimlilik artırılır hem de sürüş konforu sağlanır [1, 24, 25].

2.4.2 Frenlemede Enerji Geri Kazanımı

Rejeneratif frenleme sistemi, hibrit araçlarda yavaşlama ve frenleme anlarında ortaya çıkan kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek bataryada depolar. Bu sistem, geleneksel fren sistemleriyle birlikte çalışarak hem enerji tasarrufu sağlar hem de fren sisteminin aşınmasını azaltır. Rejeneratif frenleme, özellikle şehir içi trafiğinde sık dur-kalk yapan araçlarda önemli miktarda enerji geri kazanımı sağlar [27].

2.4.3 Elektrik ve Benzin Tüketimi Dengeleme

Hibrit sistemlerde yakıt tüketimini azaltmak ve batarya kapasitesini verimli kullanmak amacıyla enerji kaynakları arasında sürekli bir dengeleme yapılır. Bu dengeleme, batarya doluluğu, aracın mevcut hızı, sürüş profili ve çevresel koşullar gibi faktörlere göre değişiklik gösterir. Optimum tüketim noktalarını hedefleyen bu strateji, hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemlidir [25].

2.5 Hibrit Araçların Yenilenemez Enerji Kaynakları Üzerindeki Etkisi ve Avantajları

2.5.1 Fosil Yakıt Tüketimi ve Enerji Verimliliği

2.5.1.1 Fosil Yakıtların Tükenme Süreci ve Kriz Riski

Günümüzde dünya genelindeki enerji ihtiyacının büyük bir bölümü hâlâ fosil yakıt kaynaklarına dayanmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) World Energy Outlook 2024 raporuna göre, ulaşım sektörü küresel petrol tüketiminin yaklaşık %55'ini oluşturmaktadır ve bu durum, hem ekonomik hem de çevresel krizlerin tetikleyicisi olarak değerlendirilmektedir [28].

2.5.1.2 Hibrit Sistemlerin Enerji Verimliliğiyle Tüketimi Azaltması

Hibrit araçlar, içten yanmalı motorların yüksek verimli çalışma aralıklarında kullanılmasına olanak sağlayarak toplam enerji tüketimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Özellikle şehir içi sürüş koşullarında elektrikli motorun katkısı ile düşük hızlarda yakıt tüketimi minimize edilir. Bu sayede fosil yakıtlara olan bağımlılık doğrudan azaltılmış olur [1, 4].

2.5.2 Elektrikli Motorların Rolü ve Güç Dağılımı Dengesi

2.5.2.1 İçten Yanmalı Motor Yükünün Azaltılması

Hibrit araçlarda elektrik motoru, içten yanmalı motorun yükünü azaltarak daha az yakıtla daha fazla iş yapılmasını sağlar. Bu durum hem motor ömrünü uzatır hem de daha düşük motor devrinde sürüş imkânı sunar. Özellikle kalkış ve hızlanma anlarında elektrik motorunun devreye girmesi ile enerji optimizasyonu sağlanır [1, 23].

2.5.2.2 Rejeneratif Frenleme ve Enerji Geri Kazanımı

Rejeneratif frenleme teknolojisi sayesinde, araç yavaşlarken ortaya çıkan kinetik enerji elektrik enerjisine dönüştürülerek bataryada depolanır. Bu yöntem, yalnızca enerji verimliliğini artırmakla kalmaz; aynı zamanda fren sistemindeki aşınmayı da azaltır [27].

2.5.3 Emisyonlar ve Karbon Salınımı Üzerindeki Etki

2.5.3.1 Sera Gazı Emisyonlarının Azaltılması

Hibrit araçlar, geleneksel benzinli ve dizel araçlara kıyasla daha düşük CO₂ ve NO_x emisyonlarına sahiptir [2, 9]. Avrupa Çevre Ajansı (EEA), hibrit araç kullanımının veya daha genel olarak karayolu taşımacılığında elektrifikasyonun artmasının özellikle kent içi bölgelerde hava kalitesini iyileştirme ve karbon ayak izini küçültme potansiyeline sahip olduğunu vurgulamaktadır [29].

2.5.3.2 Hava Kalitesi ve Çevresel Sürdürülebilirlik

Hava kirliliğinin azaltılması, özellikle büyük şehirlerde halk sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır. Elektrikli motorla çalışan hibrit araçlar ise, egzoz emisyonlarını önemli ölçüde azaltarak kent içi hava kalitesinin iyileştirilmesine anlamlı bir katkı sağlamaktadır [30].

2.5.4 Ekonomik Katkıları ve Yakıt Maliyeti Azaltımı

2.5.4.1 Yakıt Ekonomisi ve Bakım Maliyetlerindeki Azalma

Elektrik motorunun desteğiyle yakıt tüketimi önemli ölçüde azalmakta ve bu da hibrit araç kullanıcılarına ekonomik avantajlar sağlamaktadır [30, 31]. Ayrıca, rejeneratif frenleme sistemi sayesinde fren balatalarının aşınması azaldığından, bu durum bakım maliyetlerinin de düşmesine katkı sağlamaktadır [32].

2.5.4.2 Toplam Sahip Olma Maliyetinin Azaltılması (TCO)

Araçların yalnızca satın alma değil; yakıt, bakım, vergi ve teşvik gibi tüm yaşam döngüsü maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda, hibrit araçların toplam sahip olma maliyeti birçok geleneksel modele göre daha avantajlıdır [2, 33].

2.5.5 Politik Teşvikler ve Sürdürülebilir Ulaşım Vizyonu

2.5.5.1 AB ve Diğer Ülkelerde Hibrit Araçlara Sağlanan Teşvikler

Hibrit araçların pazarda yaygınlaşmasında sadece teknolojik yeterlilik değil, devlet destekleri ve düzenleyici teşvikler de büyük rol oynamaktadır. Avrupa Birliği ülkelerinde hibrit ve elektrikli araçlara yönelik vergi indirimleri, şehir içi erişim ayrıcalıkları ve alım sübvansiyonları gibi çeşitli politikalar uygulanmaktadır. Örneğin:

- Almanya, Umweltbonus kapsamındaki doğrudan alım teşviklerini 17 Aralık 2023'te sonlandırarak politikalarını; BEV'ler için 31 Aralık 2025'e kadar 10 yıllık araç vergisi muafiyeti ve 95 g CO₂/km altındaki düşük emisyonlu araçlar (özellikle PHEV'ler) için beş yıllık vergi muafiyeti gibi genel destekler ile şirketlere yönelik Benefit-in-Kind (BIK) vergi indirimleri (80 km menzil veya 50 g CO₂/km kriterli PHEV'ler için) ve özel amortisman kuralları gibi özel teşviklere kaydırmıştır [34].
- Fransa, düşük emisyonlu araçlara 5.000€'ya kadar bonus verirken yüksek emisyonlu araçlara cezai vergi uygulamaktadır (bonus-malus sistemi) [35]
- Hollanda'da, şarj edilebilir hibrit araçlara (PHEV) yönelik motorlu taşıtlar vergisinde (MRB) 2025 yılında %25 oranında bir indirim sağlanmaktadır [36].
- Çin, hibrit ve elektrikli araçlara özel plaka önceliği, vergi muafiyeti ve sübvansiyon sunarak bu alandaki en agresif destek politikalarından birini yürütmektedir [37].
- Japonya ise uzun süredir hibrit araçlara düşük araç vergisi ve çevreci araç sertifikası ile ayrıcalık sağlamaktadır [38].
- Türkiye'de de belirli dönemlerde hibrit araçlar için ÖTV indirimleri, yerli üretim hibrit sistemlerine destek ve şehir içi ulaşımda teşvik planları gündeme gelmiştir [39, 40].

2.5.5.2 Hibrit Araçların Gelecek Enerji Politikalarındaki Yeri

Hibrit sistemler, tam elektrikli mobiliteye geçiş sürecinde geçiş teknolojisi olarak önemli bir köprü işlevi görmektedir. Birçok ülkenin 2030–2050 arası hedeflediği karbon-nötr ulaşım vizyonu kapsamında hibrit sistemler, hem altyapı geçiş sürecine katkı sağlamak hem de fosil yakıtlara bağımlılığı aşamalı olarak azaltmaktadır [3]. Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında 2035 yılı itibarıyla sıfır emisyonlu yeni araç satışına geçilmesi hedeflenmektedir [11]. Bu bağlamda hibrit araçlar, geçiş sürecinin ekonomik ve teknolojik olarak yönetilebilir kılınmasında stratejik rol üstlenmektedir [3]. Ayrıca hibrit teknolojileri, enerji arz güvenliği, emisyon azaltımı, yenilenebilir enerjiyle entegrasyon ve şehir içi sürdürülebilir ulaşım politikalarının tamamlayıcısı olarak görülmektedir. Özellikle plug-in hibrit sistemler, hem bireysel tüketici hem de kamu taşımacılığı açısından esnek ve uygulanabilir bir çözüm olarak değerlendirilmektedir [3].

Tablo 2.1 Hibrit araç türlerinin teknik özellikler açısından karşılaştırılması

| Özellik | Tam Hibrit (FHEV) | Yarı Hibrit (MHEV) | Plug-in Hibrit (PHEV) |
|------------------------------|-------------------|---------------------------|------------------------------|
| Elektrik motoruyla tam sürüş | Evet | Hayır | Evet |
| Şarj Gereksinimi | Gerekmez | Gerekmez | Harici şarj gerekir |
| Rejeneratif frenleme | Evet | Evet | Evet |
| Elektrik motoru gücü | Yüksek | Düşük (genellikle <15 kW) | Orta-yüksek |
| Batarya kapasitesi | Orta | Düşük | Yüksek |
| Tipik kullanım | Karma sürüş | Şehir içi-destekleyici | Elektrikli modda uzun menzil |

3

KRANK MİLİ MARŞ JENERATÖRÜ (KSG) SİSTEMİ

Krank mili marş jeneratörü (KSG), hibrit araçlarda içten yanmalı motorla entegre şekilde çalışan, hem marş motoru hem de jeneratör işlevi görebilen çift yönlü bir elektrikli tahrik elemanıdır [6, 7]. KSG sistemleri, düşük voltajlı hibrit çözümler kapsamında özellikle yakıt ekonomisini artırmak, motorun verimli çalışma aralıklarında tutulmasını sağlamak ve start-stop işlevini daha etkin biçimde yürütmek amacıyla geliştirilmiştir [5, 7]. Bu sistemler aynı zamanda, rejeneratif frenleme yoluyla frenleme sırasında ortaya çıkan kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek bataryada depolama yeteneğine sahiptir. Böylece hem enerji geri kazanımı sağlanmakta hem de motor üzerindeki mekanik yük hafifletilmektedir [1].

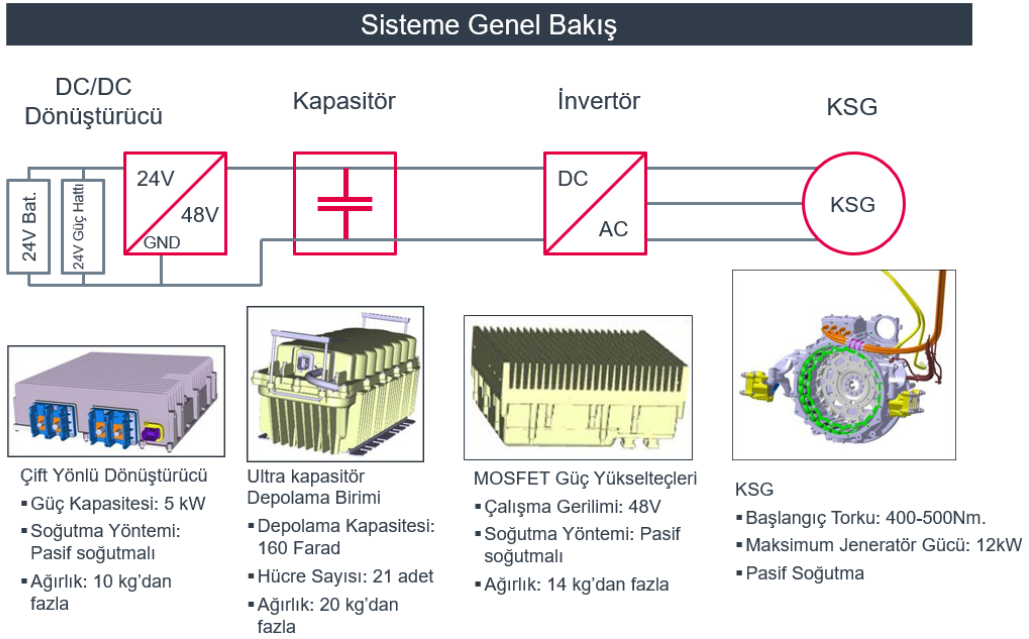
48 V mild hibrit yapılar içinde yaygın şekilde kullanılan KSG, kompakt tasarımı ve çift işlevli yapısı sayesinde geleneksel marş alternatör sistemlerinin yerini alarak enerji yönetimini daha etkin hale getirir [6, 7]. Özellikle şehir içi sürüş koşullarında sık dur-kalk yapan araçlarda, elektrik motorunun desteği sayesinde içten yanmalı motorun daha düşük frekansta çalışması sağlanmakta; bu durum hem yakıt tüketimini hem de karbon salımını azaltmaktadır [23, 26]. Bu bölümde KSG sisteminin temel bileşenleri ve fonksiyonel yapısı detaylı biçimde ele alınarak, sistemin hibrit araçlardaki rolü teknik düzeyde analiz edilecektir.

3.1 KSG Sistemine Genel Bakış

3.1.1 KSG'nin Tanımı ve Komponentleri

Krank mili marş jeneratörü (KSG), hibrit araçlarda içten yanmalı motor ile doğrudan bağlantılı çalışan ve hem motorun ilk hareketini sağlayan hem de frenleme sırasında enerji geri kazanımı yapan çift yönlü bir elektrik makinesidir. Bu sistem, klasik marş motoru ve alternatör işlevlerini tek bir entegre ünite üzerinden gerçekleştirerek hem yapısal sadeleşme hem de enerji verimliliği sağlar. KSG, sürüş

sırasında tork destekleyici olarak çalışabildiği gibi, rejeneratif frenleme yoluyla elektrik üretimi de gerçekleştirebilir. Özellikle 48 V mild hibrit platformlarında yaygın olarak kullanılan bu yapı, start-stop fonksiyonunun hızlı ve sessiz biçimde yürütülmesini mümkün kılarken, düşük voltajlı sistemlerde fren enerjisi geri kazanımı ve kısa süreli tahrik desteği gibi temel hibrit işlevlerin yönetiminde merkezi bir rol oynar [1, 6]. Bu sistemin işlevlerini yerine getirebilmesi için birden fazla elektriksel ve mekanik bileşenin entegre şekilde çalışması gerekmektedir. Şekil 3.1’de KSG sistemini oluşturan ana bileşenler teknik açıdan detaylandırılmıştır.



Şekil 3.1 KSG sisteme ait blok diyagramı

Şekil 3.1’de 48 V mild hibrit yapıda kullanılan KSG sisteminin temel bileşenleri ve enerji akış yönü şematik olarak gösterilmektedir. DC/DC dönüştürücü, enerji seviyesini 24 V ve 48 V hatları arasında düzenlerken, kapasitör enerji depolama görevini üstlenmektedir. DC/DC dönüştürücü (inverter) ise enerjyi alternatif akıma çevirerek KSG’ye iletir. KSG ünitesi bu akım aracılığıyla tork üretimi, start-stop fonksiyonu ve rejeneratif enerji kazanımı işlevlerini yerine getirir. Şemanın alt kısmında her bir bileşenin fiziksel donanım karşılıkları gösterilmektedir.

3.1.1.1 DC/DC Dönüştürücü (DC48)

KSG sisteminde yer alan temel bileşenlerden biri olan DC/DC dönüştürücü (DC48), farklı voltaj seviyelerine sahip alt sistemler arasında enerji aktarımını yönetir. Özellikle 48 V mild hibrit sistemlerde kullanılan bu modül, yüksek gerilimli enerji hattından 24V’luk geleneksel araç sistemlerine kararlı bir enerji aktarımı sağlar.

Bu yapı sayesinde elektronik kontrol üniteleri (ECU), aydınlatma donanımları ve multimedya sistemleri gibi düşük voltajla çalışan bileşenler kesintisiz şekilde beslenebilir. Ayrıca rejeneratif frenleme sırasında geri kazanılan enerji, DC/DC dönüştürücü üzerinden bataryaya aktarılmadan önce uygun gerilim seviyesine regüle edilir. Bu modül, hem batarya yönetimi hem de yük dengelemesi açısından sistemin enerji kararlılığını destekleyen önemli bir güç elektroniği elemanıdır [1, 6].

3.1.1.2 DC/AC Dönüştürücü (Inverter – CSAI)

KSG sisteminde yer alan bir diğer temel bileşen olan DC/AC dönüştürücü (Inverter – CSAI), doğru akımı alternatif akıma çevirerek KSG motorunun çalışmasını mümkün kılar. Bu bileşen, KSG'nin elektrik motoru olarak işlev göreceği modlarda, batarya veya kapasitörden gelen doğru akımı üç fazlı alternatif akıma dönüştürerek elektromekanik tork üretimini sağlar. Ters yönde çalıştığında, rejeneratif frenleme sırasında KSG tarafından üretilen AC enerji, inverter aracılığıyla DC'ye çevrilerek bataryaya yönlendirilir. Böylece inverter, hem motora güç sağlamak hem de enerji geri kazanımı süreçlerinde aktif rol oynayan çift yönlü bir dönüştürücü görevi üstlenir.

Inverter modülü, genellikle yüksek frekanslı anahtarlama elemanlarıyla (örneğin, MOSFET veya IGBT) donatılmıştır ve çıkışında üç fazlı, senkronize PWM (Pulse Width Modulation) sinyalleri üretir. Bu sinyaller, KSG motorunun rotor konumuna göre kontrol edilir ve sistem verimliliğini artırmak üzere optimize edilir. Örneğin, araç düşük hızda kalkış yaparken inverter, kapasitörde depolanan doğru akımı üç fazlı alternatif akıma çevirerek KSG'ye motor tahriki sağlar. Benzer şekilde, frenleme anında KSG tarafından üretilen üç fazlı AC sinyal, inverter tarafından DC forma dönüştürülerek batarya sistemine aktarılır. KSG sisteminde kullanılan inverter modülü, hem tahrik hem de enerji geri kazanımı senaryolarında yüksek verimli çalışmayı destekleyen temel bir yapı taşıdır [1, 23].

3.1.1.3 Ultrakapasitör (PS48)

KSG sisteminde kullanılan enerji depolama birimlerinden biri olan ultrakapasitör (PS48), kısa süreli enerji akışlarını karşılamak amacıyla tasarlanmış yüksek güç yoğunluklu bir bileşendir. Geleneksel bataryalara kıyasla çok daha hızlı şarj ve deşarj olabilen bu yapı, özellikle rejeneratif frenleme anlarında KSG tarafından üretilen enerjinin ani ve verimli biçimde depolanmasını sağlar. Start-stop fonksiyonu, ani kalkışlar ve düşük hızdaki tork destekleri gibi kısa süreli ancak yüksek güçlü enerji taleplerinde ultrakapasitör doğrudan devreye girerek sistemin

tepki süresini iyileştirir. PS48 modülü, 48 V hat üzerinde konumlandırılır ve inverter ile birlikte çalışarak enerji dengesini regüle eder. Yüksek çevrim ömrü, geniş sıcaklık aralığında çalışma kapasitesi ve düşük iç direnç gibi özellikleri sayesinde ultrakapasitörler, hibrit sistemlerde batarya ömrünü destekleyici ve tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir [1, 23].

3.1.1.4 İçten Yanmalı Motor (ICE)

KSG sisteminin entegre biçimde çalıştığı en kritik bileşenlerden biri, içten yanmalı motordur (ICE). 48 V mild hibrit sistemlerde ICE, birincil tahrik kaynağı olarak görev yaparken; KSG modülü aracılığıyla hem ilk çalıştırma işlemini gerçekleştirmekte hem de rejeneratif enerji geri kazanım süreçlerine destek vermektedir. Bu entegrasyon sayesinde ICE, daha düşük devirlerde ve daha az termal yük altında çalışabilir hale gelmekte, bu da hem yakıt ekonomisine hem de motor ömrüne doğrudan katkı sağlamaktadır. Özellikle start-stop sistemlerinde, ICE'nin dur-kalk döngüsünde yeniden ve hızlı biçimde devreye alınabilmesi KSG'nin sunduğu yüksek kalkış torku sayesinde mümkün olmaktadır [5]. Ayrıca hibrit sistem kontrol algoritmaları, sürüş koşullarına bağlı olarak ICE'yi sadece ihtiyaç duyulan noktalarda devreye sokarak emisyon salımını azaltmakta ve sistemin genel verimliliğini artırmaktadır.

3.1.1.5 24 V Batarya

KSG sisteminde yer alan destekleyici enerji birimlerinden biri de 24 V batarya sistemidir. Bu batarya, aracın geleneksel alçak gerilimli sistemlerini (aydınlatma, gösterge paneli, kontrol üniteleri vb.) beslemekle birlikte; start-stop fonksiyonunun güvenilir biçimde çalışması için de gerekli olan gerilimi sağlar. 48 V mild hibrit sistemlerde, ana enerji hattı yüksek güçlü bileşenleri desteklerken, 24 V batarya düşük voltajlı yüklerin sürekliliğini temin eder. Ayrıca sistemin durduğu veya rejeneratif enerji beslemesinin kesildiği durumlarda 24 V batarya geçici bir tampon enerji kaynağı olarak devreye girer. Otobüs ve ağır vasıta uygulamalarında, bu batarya aynı zamanda yardımcı sistemlerin (örneğin kompresörler, kapı mekanizmaları, havalandırma kontrolü) güvenli çalışması açısından da kritik rol oynar. Özellikle KSG'nin start-stop döngüsünde ICE'yi tekrar başlatmak için enerjiye ihtiyaç duyduğu anda, 24 V sistemin kararlılığı güç sisteminin genel dengesini doğrudan etkiler [41].

3.2 KSG Temel Fonksiyonları

3.2.1 Motor Başlatma ve Elektrik Üretimi

KSG modülü, hibrit araçlardaki marş alternatör sistemlerinin yerini alarak motorun ilk hareketini sağlamak ve aynı zamanda enerji geri kazanımı gerçekleştirmek üzere çift işlevli tasarlanmıştır. Bu sistem, aracın kontak çevrilmesinden itibaren inverter tarafından kontrol edilen senkron üç fazlı alternatif akımı krank miline uygulayarak ICE'yi sessiz ve titreşimsiz biçimde devreye alır. Yüksek kalkış torku sayesinde, özellikle start-stop donanımlı araçlarda sık tekrar eden dur-kalk senaryolarında motorun hızlı ve konforlu biçimde çalıştırılmasına olanak tanır [5, 6].

ICE devredeyken, KSG bu kez ters yönde çalışarak jeneratör fonksiyonu üstlenir. Bu aşamada KSG'nin rotorundaki hareket, elektriksel enerjiye dönüştürülerek inverter aracılığıyla 48V enerji hattına aktarılır. Üretilen enerji, sistemin o andaki talebine göre ultrakapasitör veya batarya biriminde depolanır. KSG'nin bu çift yönlü geçişi, sadece mekanik verimlilik değil; inverter kontrol algoritmaları aracılığıyla enerji dönüşüm sürelerinin minimuma indirilmesi açısından da önem taşır [1, 23]. Güncel ticari uygulamalarda, bu yapı hem yakıt ekonomisini hem de sürüş konforunu aynı anda hedefleyen bir optimizasyon sunmaktadır. Örneğin, Mercedes-Benz Citaro Mild Hybrid veya MAN Lion's City EfficientHybrid gibi modellerde KSG sistemleri, ICE'nin her yeniden başlatılmasında enerji tüketimini düşürürken araç içi titreşim ve ses düzeyini de hissedilir biçimde azaltmaktadır [19, 20].

3.2.1.1 KSG'nin Enerji Verimliliğine Etkisi

Krank mili marş jeneratörü (KSG), hibrit sistemin sadece motor başlatma ve enerji üretimi süreçlerinde değil, genel enerji verimliliği üzerinde de önemli etkiler yaratmaktadır. KSG, ICE üzerindeki ani yük değişimlerini dengeleyerek motorun yüksek verim aralığında daha uzun süre kalmasını sağlar. Özellikle düşük hızda ve düşük tork gereksiniminde, KSG tarafından sağlanan destek torku sayesinde ICE'nin kısmi yükte çalışma süresi azalır ve böylece termal verimliliği artar [24, 42]. Ayrıca KSG, elektrik motoru olarak görev yaptığı sürüş modlarında, batarya veya kapasitör gibi enerji depolama birimlerinden aldığı gücü doğrudan mekanik enerjiye dönüştürerek ICE'nin tahrik yükünü paylaşır. Bu, hem yakıt tüketimini hem de motorun mekanik yıpranmasını azaltır. KSG'nin aktif olduğu bu senaryolar, özellikle şehir içi kullanım gibi sık hızlanma ve yavaşlamanın yaşandığı sürüş profillerinde toplam enerji ihtiyacını düşürmektedir [6, 19]. Start-stop sisteminin verimli çalışması da KSG'nin enerji yönetimindeki katkılarından biridir. KSG'nin hızlı yanıt verebilme özelliği sayesinde, ICE yalnızca ihtiyaç anında devreye girer

ve bu durum, boşta çalışmanın (idling) nne geçerek önemli miktarda enerji tasarrufu sağlar.

3.2.1.2 Rejeneratif Frenleme ve Batarya şarjı

Rejeneratif frenleme, hibrit araçlardaki enerji verimliliğini artıran en önemli mekanizmalardan biridir. KSG bu süreçte, araç yavaşlarken veya frenleme gerçekleştiğinde, krank milinden aldığı mekanik enerjiyi ters yönde çalışarak elektrik enerjisine dönüştürür. Bu işlev, sistemin elektrik üretimi yönünde çalışmasıyla inverter üzerinden doğru akıma çevrilen enerjinin batarya veya ultrakapasitör gibi enerji depolama birimlerine aktarılmasıyla gerçekleşir [23, 27].

Geleneksel frenleme sistemlerinde kinetik enerji tamamen ısıya dönüşerek kaybedilirken, KSG ile çalışan rejeneratif sistemlerde bu enerji önemli lde geri kazanılır. Özellikle Şehir içi sık dur-kalk sürüş senaryolarında ve yokuş aşağı inişlerde KSG aktif hale gelerek kısa süreli enerji üretimi sağlar. Ultrakapasitör kullanımı, anlık enerji taleplerini karşılamak ve bataryaya yk bindirmemek açısından tercih edilmektedir. Bu yapı, batarya ömrünün uzatılmasına ve şarj-deşarj döngüsünün dengelenmesine katkı sağlar [1, 6].

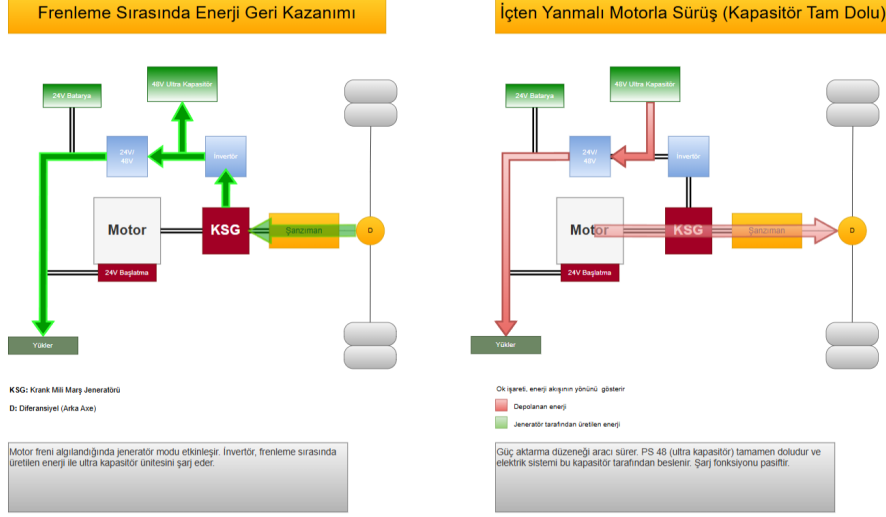
Kontrol algoritmaları, frenleme şiddetine ve araç hızına göre KSG'nin ne zaman devreye gireceğini belirler. Bazı gelişmiş sistemlerde, rejeneratif frenleme sırasında mekanik frenleme sistemleriyle senkronize çalışılarak maksimum enerji geri kazanımı sağlanmaktadır. Literatürde yapılan karşılaştırmalı çalışmalarda, rejeneratif sistemlerin toplam enerji ihtiyacının %10 ila %25'ini karşılayabildiği gösterilmiştir [24, 27].

3.2.1.3 KSG Sisteminin Enerji Akışının Farklı Fazlarda İncelenmesi

KSG (Krank Mili Marş Jeneratörü) sistemleri, hibrit araçlarda enerji akışının yönünü ve bileşenlerin aktifliğini sürüş koşullarına göre dinamik biçimde değiştirebilen yapılardır. Bu bölümde, sistemin farklı sürüş ve durma senaryolarında nasıl çalıştığı beş ayrı faz üzerinden incelenmiştir. Her bir faz, belirli bir enerji akışı tipini, aktif komponentleri ve enerji yönetimi stratejisini temsil etmektedir.

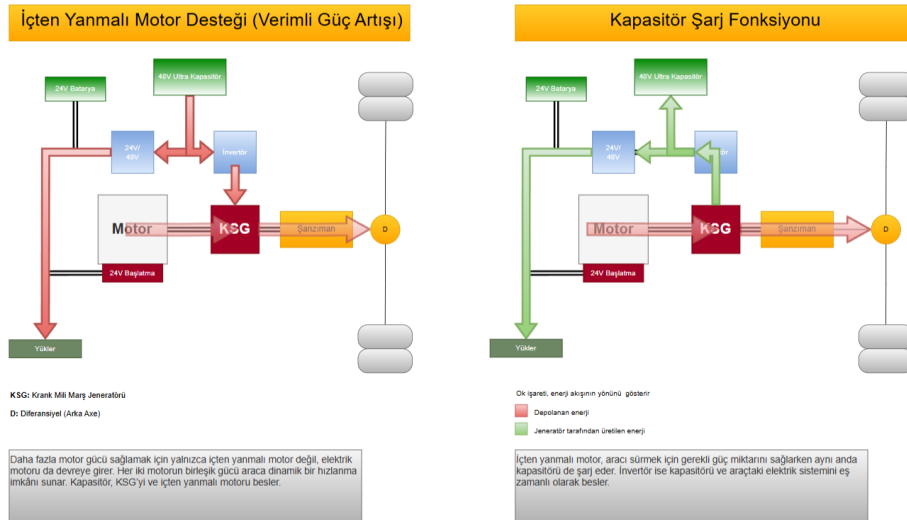
şekil 3.2'de gösterilen fazda, araç yavaşlarken ortaya çıkan kinetik enerji, içten yanmalı motor (ICE) ve şanzıman aracılığıyla KSG'ye iletilir. KSG jeneratör moduna geçerek bu mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Üretilen enerji, inverter üzerinden yönlendirilerek 48V enerji hattı aracılığıyla PS48

(ultrakapasitör) ünitesine aktarılır. Bu süreç, klasik fren sistemlerinde ısı olarak kaybedilen enerjinin büyük ölçüde geri kazanılmasını sağlar. Özellikle şehir içi trafikte sık frenleme yapılan koşullarda bu fazın katkısı önemli hale gelir.



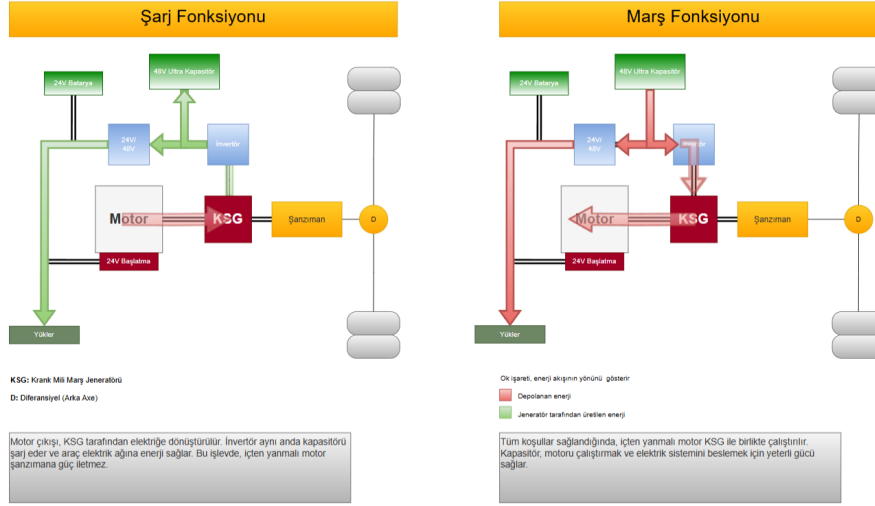
Şekil 3.2 Rejeneratif frenleme (energy recovery during braking)

Şekil 3.3'de ICE doğrudan tahrik modundadır ve araç sürüşünü sağlar. PS48 tamamen dolu olduğunda, şarj döngüsü devre dışı kalır. Bu fazda elektrik sistemleri (aydınlatma, HVAC, kontrol modülleri) PS48 üzerinden beslenir. Bu, özellikle dur-kalk trafikte şarj kaynaklarının sürekli aktif kalmasının önüne geçerek enerji yönetimini optimize eder. KSG bu fazda genellikle pasiftir veya ICE'ye küçük tork desteği sağlar.



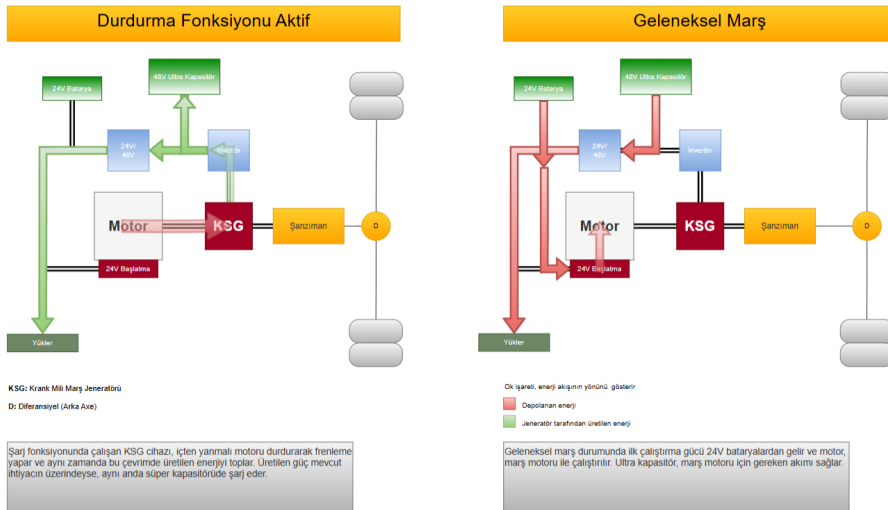
Şekil 3.3 ICE tahriki (driving with internal combustion engine – full cap)

Şekil 3.4’de gösterilen faz, ICE’nin yetersiz kaldığı dinamik kalkış veya ani hızlanma anlarında devreye girer. PS48’te depolanan enerji inverter aracılığıyla KSG’ye iletilir. KSG bu kez motor olarak çalışarak ICE’ye paralel şekilde şanzımana tork iletir. Böylece kalkış sırasında performans artarken ICE’nin ani yüklenmesinin de önüne geçilir. Bu mod, yakıt tüketimini azaltırken sürüş konforunu artırır.



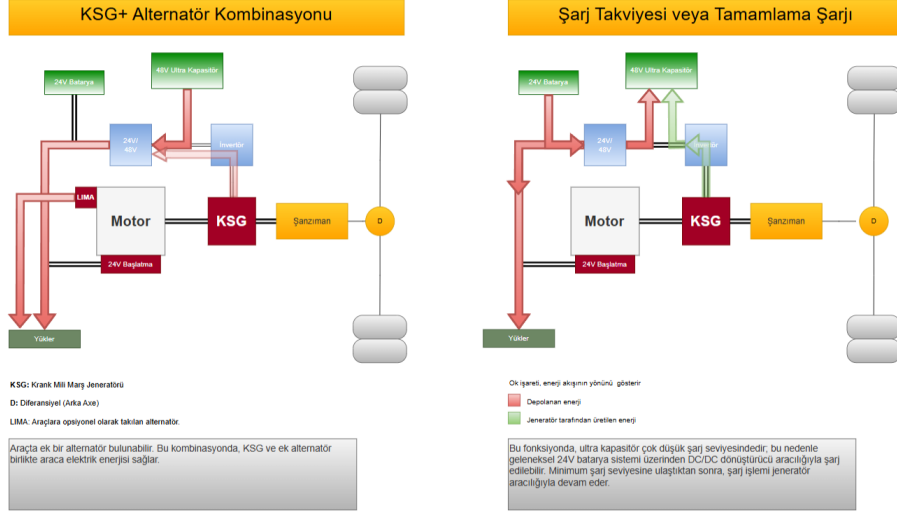
Şekil 3.4 ICE destekli kalkış (combustion engine assist – efficient boost)

Şekil 3.5 modunda ICE çalışır ancak aracı tahrik etmez. KSG jeneratör olarak görev yapar. ICE’den aldığı mekanik enerjini elektrik enerjisine çevirerek inverter üzerinden PS48’i şarj eder. Bu mod genellikle PS48’in enerji seviyesi kritik düzeye indiğinde ya da sistem pasif kullanımda iken tetiklenir.



Şekil 3.5 Şarj modu (charging function)

Şekil 3.6'da gösterilen durumlarda PS48'in enerji seviyesi tek başına yeterli değildir. Bu durumda sistemde bulunan 24V batarya veya opsiyonel alternatör devreye girer. Alternatör (LIMA) destek sağlar; KSG yine jeneratör modundadır. Bu mod, sistemin enerji dengesi kritik alt seviyedeysen güvenlik ve süreklilik sağlar.



Şekil 3.6 Alternatör kombinasyonu ve PS48 takviyesi (combination + top-up)

Tablo 3.1 KSG fazlarının karşılaştırmalı özeti

| Faz | KSG Rolü | ICE Durumu | Tekerlek Tahriki | Enerji Kaynağı | Açıklama |
|-------|-------------------------|------------|------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Faz 1 | Jeneratör | Frenleme | Pasif | Kinetik enerji → PS48 | Rejeneratif enerji kazanımı |
| Faz 2 | Pasif veya destekleyici | Aktif | Aktif | ICE | PS48 dolu, doğrudan sürüş |
| Faz 3 | Motor | Aktif | Aktif | PS48 + ICE | Çift motorlu kalkış |
| Faz 4 | Jeneratör | Aktif | Pasif | ICE → PS48 | ICE sadece şarj üretir |
| Faz 5 | Jeneratör | Durmuş | Pasif | LIMA/24 V Batarya | Yedek kaynak desteği |

Not: Enerji Kaynağı sütununda, çıkan okların PS48'den çıkması gerekmektedir

3.3 KSG Teknolojisinin Hibrit Araçlara Etkisi

3.3.1 Yüksek Verimli Marş ve Başlatma İşlemleri

KSG sistemleri, içten yanmalı motorun çalıştırılması sürecinde geleneksel marş motorlarına göre daha yüksek tork üretebilme kapasitesine sahiptir. Bu sayede motor daha kısa sürede, daha sessiz ve sarsıntısız şekilde çalıştırılabilmekte, bu da sürüş konforunu artırmaktadır. Özellikle düşük sıcaklıkta çalıştırma ve sık dur-kalk gerektiren şehir içi senaryolarında, KSG'nin marş işlevi motorun termal dengesini ve yakıt püskürtme optimizasyonunu doğrudan olumlu yönde etkilemektedir [5, 7].

3.3.2 Enerji Verimliliği ve Sürüş Performansı

KSG, enerji üretiminde ve geri kazanımında çift yönlü çalışabildiği için hibrit araçların genel verimliliğine doğrudan katkı sağlar. Özellikle kalkış ve hızlanma fazlarında ICE ile eşzamanlı çalışarak sürüş performansını iyileştirir. Aynı zamanda rejeneratif frenleme aracılığıyla depolanan enerjinin verimli kullanımı, batarya döngüsünü dengede tutar ve enerji yoğunluğunu sistem genelinde optimize eder [23, 24, 27].

3.3.3 Çevresel Etkiler ve Sürdürülebilirlik

KSG sistemlerinin kullanımı, egzoz emisyonlarını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda motorun düşük devirde ve ideal çalışma aralıklarında tutulmasını sağlar. Bu durum NO_x ve CO₂ salımlarını azaltırken yakıt tüketimini de düşürmektedir. Avrupa Çevre Ajansı (EEA) verilerine göre, bu tür hibrit sistemler özellikle kent içi uygulamalarda hava kalitesi açısından önemli faydalar sağlamaktadır [43]. Ayrıca enerji geri kazanımı ve kısa süreli elektrikli sürüş katkısı, karbon ayak izinin küçültülmesinde önemli rol oynamaktadır [24].

3.3.4 Otomatik Start-Stop Sayesinde Yakıt Tasarrufu

Start-stop sistemi, aracın trafik ışıkları gibi durma anlarında ICE'yi otomatik olarak kapatarak boşa çalışma kayıplarını önler. KSG'nin hızlı ve yüksek torklu marş kabiliyeti sayesinde, ICE yeniden devreye alınırken klasik sistemlere göre %50'ye varan daha hızlı başlatma süresi sağlanabilir [7]. Bu sistemin aktif olduğu araçlarda özellikle şehir içi kullanımda %5-7 arasında yakıt tasarrufu sağlandığı rapor edilmiştir [44].

4

KRANK MİLİ MARŞ JENERATÖRÜ (KSG) AKTİF VE PASİF DURUMDA VERİLERİN TOPLANMASI VE ANALİZİ

Bu bölümde, aynı test aracı üzerinde KSG fonksiyonunun hem aktif hem de pasif modda çalıştığı iki farklı sürüş çevrimine ait veriler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Her iki senaryoda da sürüş süresi, hız profili ve çevresel koşullar sabit tutularak, KSG sisteminin motor yükü, tork üretimi, yakıt tüketimi ve verimlilik üzerindeki etkisi nesnel biçimde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, 48 V mild hibrit sistemin araç dinamiği ve enerji yönetimi üzerindeki performans katkılarını sayısal olarak ortaya koymayı amaçlamıştır.

4.1 Test Aracı ve Sistem Özellikleri

Deneysel çalışmada, MAN firmasına ait Lion's City model hibrit otobüs tercih edilmiştir. Araç, şehir içi toplu taşıma uygulamaları için geliştirilmiş olup 12 m uzunluğa ve yüksek yolcu taşıma kapasitesine sahiptir. Test aracı üzerinde yer alan MAN D15 kodlu dokuz litrelik dizel motor, 206 kW – 265 kW (280 PS – 360 PS) aralığında güç üretme kapasitesine sahip olup maksimum 1.420 N m tork sağlamaktadır. Bu güç, tek kavramalı otomatik şanzıman üzerinden tekerleklere iletilmektedir.

Krank mili marş-jeneratör (KSG) görevini üstlenen elektrikli modül, 12 kW nominal güç ve 1.420 N m tork üretme kapasitesine sahiptir. KSG sistemi, mild hibrit mimari kapsamında, özellikle düşük hızlarda ve kalkış anlarında motora elektrikselsel destek sağlayarak hem yakıt tüketimini azaltmayı hem de motorun yükünü dengelemeyi amaçlamaktadır [19].

Enerji depolama ünitesi, 48 V nominal gerilimle çalışan ve 40 Wh kapasiteli ultrakapasitörlerden oluşmaktadır. Bu yapı, hızlı şarj-deşarj karakteristiği sayesinde

ani enerji taleplerine cevap verebilme yeteneğine sahiptir. Ultrakapasitör grubunun toplam ağırlığı yaklaşık 170 kg civarındadır.

Test aracının toplam kütlesi 17.820 kg olup, bu değer hem araç gövdesi hem de ortalama yolcu yükünü içerecek şekilde alınmıştır. Tekerlek yarıçapı ise 0,48 m olarak belirlenmiş olup, bu ölçü, şehir içi otobüslerde yaygın olarak kullanılan jant ve lastik kombinasyonuna karşılık gelmektedir. Bu fiziksel özellikler, motor çıkış torkunun tekerleklere iletme davranışını ve sürüş direncini doğrudan etkileyen temel parametreler arasında yer almaktadır.

4.2 Veri Toplama Prosedürü

Veri toplama süreci, test aracında yer alan kontrol ünitelerinden yayılan CAN (Controller Area Network) verilerinin yüksek çözünürlükte ve senkronize şekilde kaydedilmesini esas almıştır. Kayıt işlemi sırasında elde edilen zaman damgaları, test aracının takograf sistemine entegre edilmiş olan GNSS tabanlı zaman sunucusuyla eşzamanlı hale getirilmiş ve böylece tüm sinyallerin ortak bir zaman referansına göre hizalanması sağlanmıştır. Bu yöntem, hem çoklu sinyal kaynaklarının doğrulukla eşleştirilmesini hem de ileri düzey analizlerde zaman tabanlı karşılaştırmalar yapılabilmesini olanaklı kılmıştır.

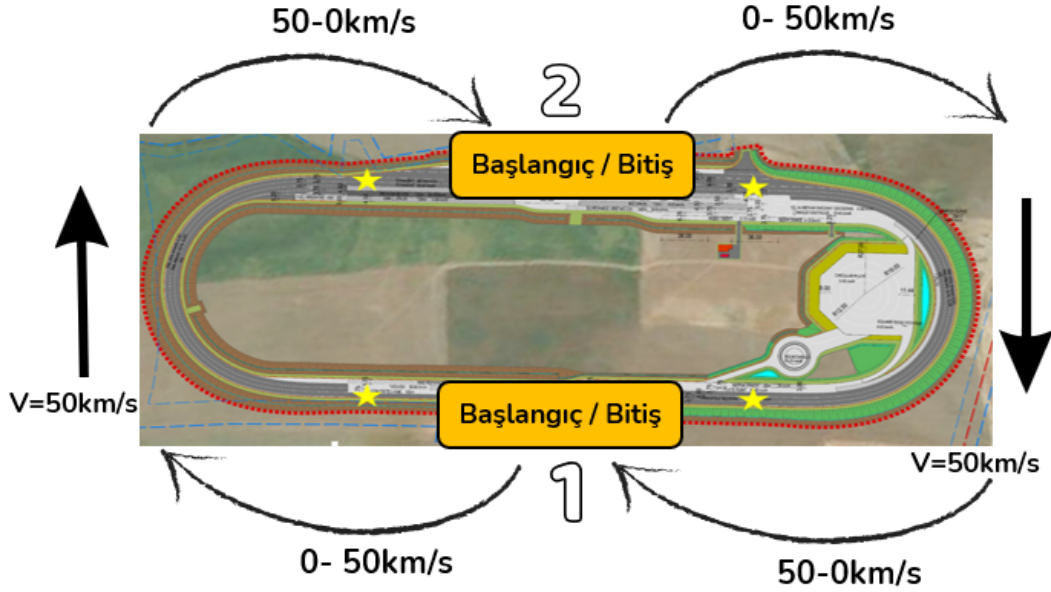
Veri bütünlüğünü sağlamak amacıyla, veri kayıt oturumları saha koşullarında kesintisiz biçimde gerçekleştirilmiş ve her oturum sonunda veriler senkronizasyon kontrollerinden geçirilerek dışa aktarılmıştır. Bu süreçte, herhangi bir zaman sapması, eksik örnekleme veya sinyal uyuşmazlığı tespit edilmemiştir. Toplanan veriler daha sonra analiz ortamlarına aktarılarak değerlendirme aşamasına geçilmiştir.

4.3 Test Senaryosu

Bu çalışmada kullanılan test aracı, D15 motorlu, 12 m uzunluğunda dizel otobüstür. Araç üzerindeki değerlendirmeler, dış etkenlerden izole edilmiş ve eğimsiz bir test pisti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 1 km uzunluğundaki kapalı oval pist, düz zemin yapısı sayesinde araç dinamiği üzerinde topografik etkilerin en aza indirilmesini sağlamıştır. Bu sayede test koşulları tekrarlanabilir hale getirilmiş ve farklı sürüş modlarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi mümkün kılınmıştır.

Test süreci boyunca, aracın sıfır hızdan başlayarak belirli mesafelerde kontrollü biçimde hızlanması ve maksimum 50 km/h hıza ulaşması hedeflenmiştir. Test senaryosunda, aracın belirli noktalarda tamamen durdurulması ve yeniden

harekete geçirilmesi sağlanarak şehir içi toplu taşıma koşullarına benzer bir sürüş profili oluşturulmuştur. Bu bağlamda, düşük hız, sık dur-kalk ve orta seviyede ivmelenmenin hâkim olduğu bir sürüş karakteristiği elde edilmiştir. Test senaryosunun gerçekleştirildiği test merkezinin görünümü ve başlangıç/bitiş noktaları olarak belirlenen noktaları aşağıda şekil 4.1 de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Test senaryolarının uygulandığı test pisti kuşbakışı görünümü

Çalışma kapsamında, aynı test aracı üzerinde iki farklı sürüş çevrimi gerçekleştirilmiştir. Bu çevrimlerden ilki, KSG (Kurbelwellen-Startergenerator) sistemi aktif durumdayken; diğeri ise KSG sistemi devre dışı (pasif) durumdayken uygulanmıştır. Her iki çevrimde de test süresi sabit tutulmuş ve hız profili mümkün olduğunca benzer şekilde sürdürülmüştür. Böylece KSG sisteminin tork üretimi, motor yükü ve yakıt tüketimi üzerindeki etkisi aynı koşullar altında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Testlerin tamamı boyunca CAN verileri yüksek örnekleme hassasiyetiyle kaydedilmiş ve araç üzerindeki çalışma dinamikleri detaylı biçimde izlenmiştir. Bu kontrollü ve eş koşullu test senaryosu, hibrit sistemin operasyonel avantajlarının nicel olarak analiz edilmesine olanak tanımıştır.

4.4 Veri Kaydı Alma ve Analiz Prosedürü

Bu çalışmada, test aracına entegre edilen veri kayıt sistemleri aracılığıyla motor performansı ve araç dinamiğine ilişkin çeşitli parametreler, yaklaşık 710 saniyelik bir sürüş süresi boyunca kaydedilmiştir. Ölçümler, araç üzerindeki kontrol ünitelerinden alınan CAN (Controller Area Network) mesajları aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve analiz edilmek üzere vSignalyzer yazılımı ile Excel formatında dışa aktarılmıştır.

Veri toplama süreci kapsamında, motorun o anki yük yüzdesini ifade eden “ActualEngPercentTorque”, o anda motor tarafından erişilebilecek maksimum tork oranını gösteren “ActMaxAvailableEngPercentTorque”, motorun L/h cinsinden anlık yakıt tüketimini gösteren “EngFuelRate” ve kilometre başına litre cinsinden anlık yakıt ekonomisini veren “EngInstantaneousFuelEconomy” gibi sinyaller dikkate alınmıştır. Bunun yanı sıra, test süresince tüketilen toplam yakıt miktarını gösteren “EngTotalFuelUsed”, aracın kat ettiği mesafenin yüksek çözünürlükte ölçümünü sağlayan “HghRsolutionTotalVehicleDistance”, motor çıkış milinin dönüş hızını ifade eden “TachographOutputShaftSpeed” ve aracın anlık hız bilgisini içeren “TachographVehicleSpeed” sinyalleri de kaydedilerek analiz sürecine dahil edilmiştir.

Veriler, vSignalyzer yazılımı üzerinden zaman ekseninde senkronize edilmiş ve Excel formatında dışa aktarılmış ve bu ortamda analiz edilmiştir. Bu ortamda, “ActualEngPercentTorque” sinyali kullanılarak, 1.420 Nm nominal motor torku varsayımı altında her bir örnekleme anı için motorun üretmiş olduğu gerçek tork değeri hesaplanmıştır. Benzer şekilde, “EngFuelRate” ile “TachographVehicleSpeed” sinyalleri birlikte değerlendirilerek anlık yakıt ekonomisi doğrulanmış; “EngTotalFuelUsed” ve “HghRsolutionTotalVehicleDistance” verileriyle toplam yakıt tüketimi ve kat edilen mesafe hesaplanmıştır.

Bu analiz yöntemi sayesinde, starter-jeneratör KSG destekli 48V mild hibrit sistemin içten yanmalı motor üzerindeki yükü nasıl azalttığı, yakıt ekonomisine etkisi ve tork üretimi üzerindeki katkısı detaylı biçimde değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler grafiksel olarak görselleştirilmiş ve sistemin performans karakteristiği hem zamana bağlı hem de karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Böylelikle KSG sisteminin araç dinamiği ve enerji verimliliği üzerindeki etkileri somut biçimde ortaya konmuştur.

4.5 Verilerin Analizi ve Yorumlanması

KSG sistemi bulunan test aracının sistemin aktif ve pasif modları devredeyken aynı sürüş çevriminde kaydedilen gerçek motor yükü, yakıt tüketimi, maksimum mevcut motor yükü, hız ve verimlilik gibi temel performans parametreleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Her iki konfigürasyon için de yaklaşık 12 dakikalık sürüş verileri alınmış olup, araçtan alınan yüksek çözünürlüklü CAN sinyalleri vSignalyzer programı üzerinden açılmıştır. KSG aktif ve pasif modunda alınan veriler vSignalyzer programı aracılığıyla Excel verisine dönüştürülerek grafiksel olarak kıyaslanmıştır. Bu sayede, KSG sisteminin etkisi nicel olarak değerlendirilmiştir.

4.5.1 Veri Analizinde Kullanılacak Parametreler

Bu çalışmada sunulan temel parametreler, otobüsün sürüş dinamikleri ve enerji tüketim profillerini bütüncül bir bakış açısıyla ortaya koymak üzere seçilmiştir. Zaman referans çerçevesi tüm sinyallerin eşzamanlı işlenmesini garanti ederken, gerçek motor yükü ve maksimum mevcut motor yükü tahrik biriminin anlık tork taleplerine tepkisini ve motor kumanda biriminin (ECU) koruma mekanizmalarının değerlendirilmesini sağlar. Anlık yakıt tüketim hızı ve toplam yakıt tüketimi, motorun anlık ve kümülatif yakıt kullanım karakteristiklerini ölçerken; spesifik yakıt tüketimi, farklı test koşullarında karşılaştırmalı performans değerlendirmesi sağlar. Toplam kat edilen mesafe ve anlık araç hızı, sürüş profilinin hız bazlı karşılaştırılabilirliğine imkân tanırken; çıkış şaft devir hızı ve ortalama motor gücü, mekanik güç üretiminin sayısal ifadesi olarak tahrik sistemi verimliliği analizlerine temel teşkil eder. Gerçek motor yükü verilerinden hesaplanan anlık tork değerleri ise, motorun farklı sürüş koşullarında hangi yük seviyelerinde çalıştığını ortaya koyarak, KSG sisteminin motor üzerindeki tork destek etkisinin belirlenmesine ve yüksek tork gereksinimi anlarında sistemin katkısının karşılaştırmalı olarak analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Bu parametreler ile KSG aktif ve pasif modlarının birbirine göre avantajlarını ve potansiyel dezavantajlarını net biçimde ortaya koymaktadır.

4.5.1.1 Zaman Referans Çerçevesi (t/s)

Zaman referans çerçevesi, tüm sinyallerin ortak bir koordinat sisteminde senkronize edilmesini sağlayan temel parametredir. Bu çerçeve: veri kümesinin başlangıç ve bitiş zamanlarını, örnekleme periyodunu ve eş zamanlılık ilişkilerini tanımlar. Farklı frekanslarda kaydedilen tork, hız ve debi sinyallerinin tek bir eksende hizalanması ve hem uzun dönem eğilim analizlerine hem de kısa süreli pik

olaylarının doğru tespitine imkân vermektedir.

4.5.1.2 Gerçek Motor Yüğü

Gerçek motor yüğü, içten yanmalı motorun anlık tork çıkışının motor kumanda birimi (ECU) tarafından belirlenen maksimum izin verilen tork değerine oranlanarak yüzde cinsinden ifade eden parametredir. Analiz kapsamında motorun genel çalışma yoğunluğunu yansıtmak üzere ortalama yük seviyesi hesaplanmıştır. Tork dalgalanma genliğı, yük değışimlerinin büyüklüğünü ortaya koymak amacıyla belirlenmiştir. KSG aktif modda elde edilen motor yüğü verileri, pasif modla karşılaştırılarak KSG sisteminin motor üzerindeki yük azaltma performansının doğrudan değerlendirilmesini sağlar.

4.5.1.3 Maksimum Mevcut Motor Yüğü

Maksimum mevcut motor yüğü, motor kontrol ünitesinin termal, mekanik ve emniyet limitlerini dikkate alarak o anda izin verdiği en yüksek tork oranının yüzde cinsinden ifadesidir. Bu parametre, ECU'nun aşırı ısınma ve mekanik aşınma risklerini minimize etmek amacıyla dinamik olarak uyguladığı tork rezervi sınırlarını yansıtır. Anlık tork talebinin zirve yaptığı durumlarda kontrol ünitesi, güvenlik alt sınırlarını korumak için tork çıkışını sınırlayarak "ActMaxAvailableEngPercentTorque" sinyali üzerinden ilgili değeri bildirir. Dinamik tork sınırlama stratejilerinin analizi, motorun yüksek yük koşullarına karşı tepkisini ve kumanda biriminin koruyucu mekanizmalarını ortaya koymak açısından kritik öneme sahiptir. Maksimum mevcut motor yüğü verisi, tork yönetimi performansının değerlendirilmesinde ve tahrik sisteminin dayanıklılık öngörülerinde temel bir referans noktası olarak kullanılmaktadır.

4.5.1.4 Anlık Yakıt Tüketim Hızı (L/h)

Anlık yakıt tüketimi, içten yanmalı motorun her bir zaman örneklemeğinde harcadığı yakıt hacmini litre/saat birimiyle gösteren bir ölçüttür. Bu parametre, sürüş sırasında motorun ne kadar hızlı yakıt çektiğini nitelendirir ve hem kümülatif yakıt tüketiminin doğru hesaplanmasına hem de yük-tüketim dinamiklerinin incelenmesine imkân tanır. Analiz sürecinde, anlık yakıt tüketim hızı ile motor torku ve şaft devri arasındaki istatistiksel ilişkiler değerlendirilecek; böylece motorun farklı çalışma senaryolarında sergilediğı tüketim karakteristikleri kapsamlı biçimde belirlenecektir. Ayrıca, bu veri seti üzerinden entegrasyon yapılarak elde edilen toplam yakıt tüketimi, spesifik tüketim (L/100 km) ve ortalama tüketim hızı hesaplamalarının temelini oluşturur. Bu veriler, özellikle KSG aktif modda

gerçekleşen enerji geri kazanımı ve buna bağlı tüketim düşüşlerinin niceliksel olarak değerlendirilmesi için kullanılmıştır.

4.5.1.5 Anlık Yakıt Ekonomisi (km/L)

Anlık yakıt ekonomisi, araç hızının (km/h) o anki yakıt akış hızına (L/h) bölünmesiyle elde edilen kilometre başına düşen yakıt verimliliğini ifade eden bir ölçüttür. Bu parametre, sürüş esnasındaki hız-tüketim ilişkisinin kısa periyotlardaki değişimlerini yakalayarak dur-kalk döngülerinde, ivmelenme ve sabit hız rejimlerinde motorun ne ölçüde verimli çalıştığını nitelendirir.

4.5.1.6 Toplam Kat Edilen Mesafe (km)

Toplam kat edilen mesafe, aracın tekerlek hız sensörlerinden ve dijital takograf sisteminden alınan yüksek çözünürlüklü mesafe sinyalinin test sürecinin başlangıcındaki ve bitişindeki değer farkı alınarak hesaplanmaktadır. Bu sinyal, doğrudan aracın CAN ağı üzerinden okunmakta olup, zaman serisi boyunca sürekli artan bir karakteristik göstermektedir. Bu özelliği sayesinde, test segmentine ait gerçek uzunluk, herhangi bir entegrasyon işlemine gerek kalmaksızın doğrulukla belirlenebilmektedir. Bu hesaplama, aşağıdaki formülasyon ile ifade edilmektedir:

$$\text{TotalDistance} = \text{Distance}_{\text{final}} - \text{Distance}_{\text{initial}} \quad (4.1)$$

Bu formül, test süresince aracın kat ettiği toplam mesafeyi belirlemek için kullanılan basit ancak oldukça güvenilir bir diferansiyel hesaplama yöntemidir. Burada, $\text{Distance}_{\text{initial}}$, testin başlama anında dijital takograf sisteminden elde edilen toplam mesafe değerini; $\text{Distance}_{\text{final}}$ ise testin sona erdiği andaki toplam mesafeyi temsil etmektedir. Her iki değer kilometre cinsinden ölçülür.

Bu iki ölçüm arasındaki fark, test çevrimi boyunca aracın fiilen kat ettiği toplam mesafeyi verir. Yüksek çözünürlüklü mesafe verilerinin doğrudan farkına dayalı bu yöntem, zaman entegrasyonuna dayalı dolaylı hesaplamalara kıyasla daha az hata içerir ve pratikte daha kararlı sonuçlar sunar. Özellikle sabit örnekleme frekansı ve senkronize zaman damgası kullanılan veri setlerinde, bu yöntem hem hesaplama sadeliği hem de veri güvenilirliği açısından tercih edilmektedir.

4.5.1.7 Çıkış Şaft Devir Hızı (rpm)

Çıkış şaft devir hızı, takograf sisteminden elde edilen ve motor tahrik ünitesinden tekerleklere aktarılan mekanik enerjinin dönüş hızını ifade eden parametredir. Bu sinyal, tahrik şaftının dakika başına gerçekleştirdiği dönüş sayısını (rpm) yüksek örnekleme frekansıyla bildirerek, özellikle vites geçişleri ve ivmelenme anlarında güç aktarım dinamiklerinin izlenmesini mümkün kılmaktadır. Gerçek motor torku verisi ile eşzamanlı olarak değerlendirildiğinde, bu parametre anlık mekanik güç hesaplamaları için doğrudan giriş olarak kullanılmaktadır. Çıkış şaft devir hızındaki ani artış ya da düşüşler, tork dağılımı, hızlanma davranışları ve sürüş paternlerindeki değişimleri yansıtarak tahrik sisteminin verimlilik, titreşim ve mekanik dengeleme performansının analiz edilmesine katkı sağlamaktadır.

4.5.1.8 Anlık Araç Hızı (km/h)

Anlık araç hızı, dijital takograf sisteminden alınan tekerlek dönüş verilerinin dişli oranları ve aks çevrim katsayıları üzerinden dönüştürülmesiyle elde edilen, gerçek zamanlı hız bilgisidir. Bu parametre, sürüş esnasındaki dur-kalk döngülerinden sabit hız rejimlerine kadar tüm hız profilinin ayrıntılı şekilde izlenmesini sağlar. Takograf verileri, yüksek çözünürlükte kayıt imkânı sunduğundan, araç hızı verisiyle birlikte değerlendirilen motor yükü, tork ve yakıt tüketimi gibi sinyallerle eşzamanlı analiz yapılmasına olanak tanır. Bu kapsamda anlık hız, hem enerji verimliliği hem de motor performansı üzerindeki sürüş kaynaklı etkilerin değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır.

4.5.1.9 Toplam Yakıt Tüketimi

Toplam yakıt tüketimi, analiz edilen sürüş segmenti boyunca motor kontrol ünitesinden elde edilen kümülatif yakıt sayaç sinyalinin “EngTotalFuelUsed” başlangıç ve bitiş değerleri arasındaki fark olarak litre cinsinden ifade edilir.

Bu parametre, debi sinyalinin entegrasyonu ile elde edilen teorik tüketim değerleri ile sayaç bazlı ölçümün tutarlılığını karşılaştırmaya ve veri setinin bütünlüğünü teyit etmeye imkân tanır. Ancak, “EngTotalFuelUsed” sinyalinin örnekleme çözünürlüğü, yakıt tüketiminin yalnızca 0,50 L artışlarla kaydedilmesine olanak tanımaktadır. Bu nedenle, ölçülen değerler 0,5L, 1,0L gibi tam ve yarım litre kademeleriyle ifade edilmektedir.

4.5.1.10 Spesifik Yakıt Tüketimi (L/100km)

Spesifik yakıt tüketimi, test segmenti boyunca kat edilen mesafeye karşılık gelen toplam yakıt hacminin litre/100 km biriminde ifadesidir. Hesaplama, “EngTotalFuelUsed” parametresinin toplam kat edilen mesafeye bölünerek 100 km ölçeğine dönüştürülmesiyle gerçekleştirilir. Bu metrik, uluslararası literatürde ve filo değerlendirme yöntemlerinde yaygın biçimde kullanılan standart bir performans göstergesidir; farklı araç konfigürasyonları, sürüş profilleri veya regülasyon gereksinimleri arasında anlamlı karşılaştırmalar yapılabilmesine olanak tanır.

$$SFC = \left(\frac{\text{TotalFuelUsed (L)}}{\text{TotalDistance (km)}} \right) \times 100 \quad (4.2)$$

4.5.1.11 Ortalama Motor Gücü (kW)

Ortalama motor gücü, gerçek motor yükü “ActualEngPercentTorque” ve çıkış şaft devir hızı (ω) verilerinin birleşik kullanımıyla hesaplanan mekanik güç değerlerinin zaman ağırlıklı ortalamasıdır.

$$P_{\text{motor}}(\text{kW}) = \frac{\tau(\text{N m}) \times \omega(\text{rpm})}{9550} \quad (4.3)$$

Burada 9550, (rpm)’den rad/s’ye dönüşüm ve güç biriminin kW’a çevrilmesi için kullanılan sabittir.

Burada kullanılan tork (τ), yüzde cinsinden motor yükünün, motorun maksimum tork kapasitesi ile çarpılmasıyla elde edilen Nm cinsinden tork değeridir. Bu değer, aktif ve pasif modların karşılaştırmasında motorun mekanik güç üretimindeki değişimlerin doğrudan görülmesini sağlar. Sürüş segmentinin enerji talebini özetleyen bu parametre, soğutma sistemi, güç aktarım bileşenleri ve batarya boyutlandırması gibi tasarım kararlarına temel teşkil edecek kritik bir gösterge sunar.

4.5.1.12 Anlık Motor Tork Değeri (N m)

Anlık motor torku, içten yanmalı motorun belirli bir zaman aralığında üretmiş olduğu efektif torkun Newton-metre (N m) cinsinden ifadesidir. Bu parametre, “ActualEngPercentTorque” sinyalinden gelen yüzde değerinin 100’e bölünmesiyle elde edilen oranın, test aracının nominal motor tork kapasitesi olan 1.420 N m ile çarpılmasıyla hesaplanır. Elde edilen değerler, sürüş boyunca motorun hangi anlarda aktif olarak tork ürettiğini, hangi anlarda rejeneratif veya rölanti modunda çalıştığını ve tork üretiminde oluşan ani değişimleri göstermektedir.

$$\tau(\text{Nm}) = \left(\frac{\text{ActualEngPercentTorque}}{100} \right) \times (1420) \quad (4.4)$$

Bu analiz ile KSG sisteminin aktif olduğu ve devre dışı bırakıldığı modlar arasında motorun maruz kaldığı yük değişimlerini karşılaştırmaya imkân sunmaktadır. Bu parametre hibrit sistemin enerji yönetimi üzerindeki etkisinin somut biçimde ortaya konmasına katkı sağlamaktadır.

4.5.2 KSG Aktif Modda Veri Analizi

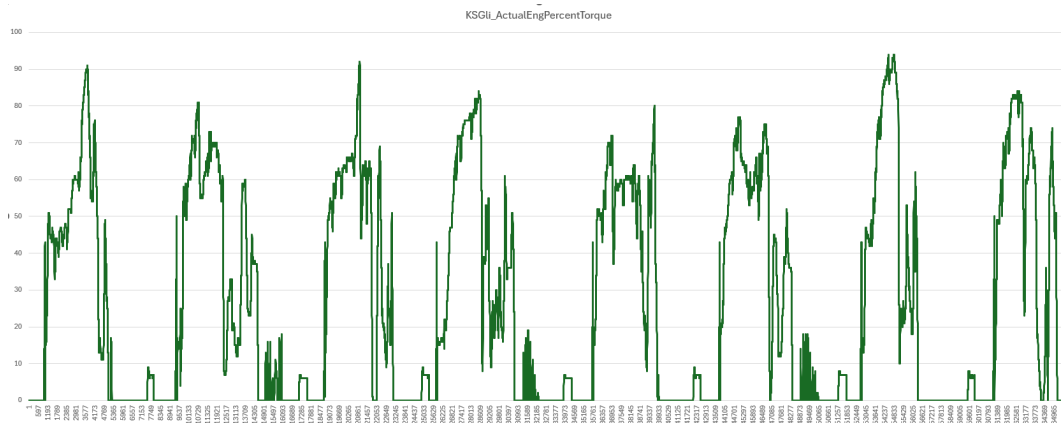
KSG sistemi aktif konumdayken yürütülen testler önceden belirlenmiş referans güzergâh üzerinde gerçekleştirilmiştir.

4.5.2.1 Zaman Referans Çerçevesi

KSG Aktif Mod verileri, araç takografından 11.480,01 s (3 saat 11 dk 20,04 s) ile 12.190,51 s (3 saat 23 dk 10,5 s) zaman damgaları arasında kaydedilmiş olup, bu aralık 710,50 s (\approx 11 dk 50 s) sürmektedir.

4.5.2.2 Gerçek Motor Yüğü

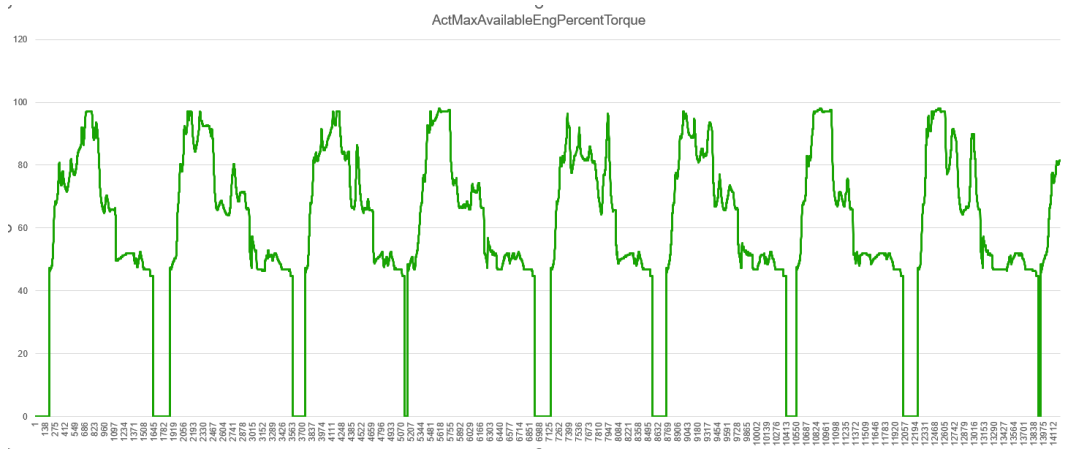
Gerçek motor yükü “ActualEngPercentTorque” ortalaması elde edilen verilerden %26,7 olarak hesaplanmıştır. Motorun %80’in üstünde yük altında çalıştığı zaman payı yalnızca %3,9’dur. Motorun %80’in üzerinde yük altında çalıştığı süre oldukça kısıtlıdır. KSG aktif modda gerçek motor yükünün zamana bağlı değişimi Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.2 KSG aktif modda zamana bağlı gerçek motor yük grafiği

4.5.2.3 Maksimum Mevcut Motor Yüğü

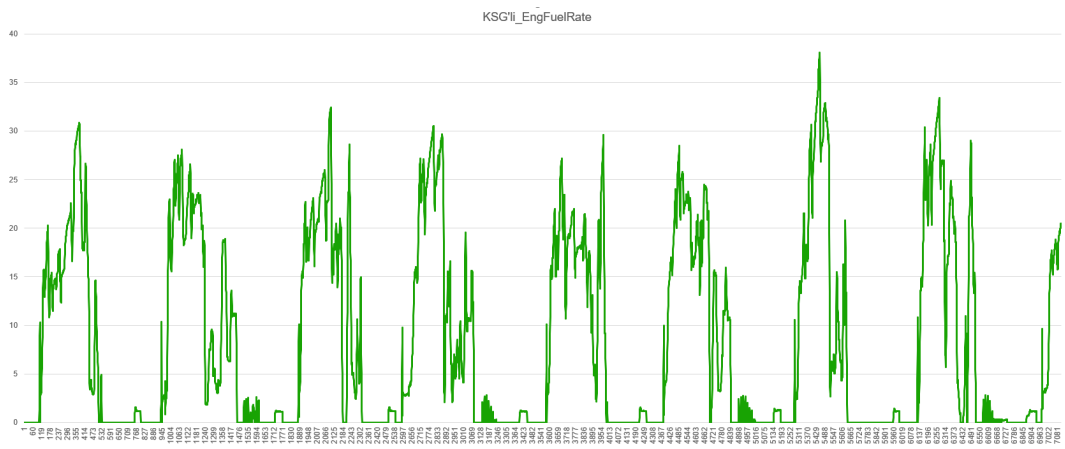
ECU tarafından bildirilen “ActMaxAvailableEngPercentTorque” sinyalinin ortalaması %59,6 seviyesinde gerçekleşmiş ve maksimum değeri %98 olarak kaydedilmiştir. KSG sisteminin dinamik tork yönetimi ile motoru termal ve mekanik limitlerden uzak tutarak güvenli çalışma koşullarını sağladığını ortaya koymaktadır. KSG aktif modda maksimum mevcut motor yükünün zamana bağlı değişimi Şekil 4.3’de gösterilmektedir.



Şekil 4.3 KSG aktif modda zamana bağlı maksimum motor yük grafiğı

4.5.2.4 Anlık Yakıt Tüketim Hızı

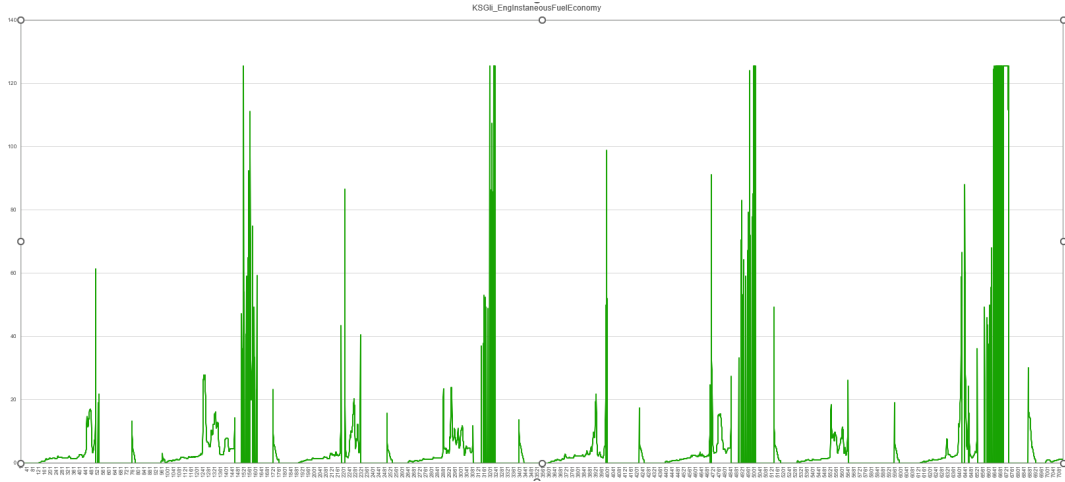
Anlık yakıt çekiş hızı ortalaması 8,19 L/h, tepe değeri 38,1 L/h olarak ölçülmüştür. Toplam yakıt tüketimi “EngTotalFuelUsed”, süre boyunca debi verisinin entegrasyonu sonucunda yaklaşık 1,62 L olarak hesaplanmıştır. KSG aktif modda anlık yakıt tüketim hızının zamana bağlı değişimi Şekil 4.4’de gösterilmektedir.



Şekil 4.4 KSG aktif modda zamana bağlı anlık yakıt tüketim hız grafiğı

4.5.2.5 Anlık Yakıt Ekonomisi

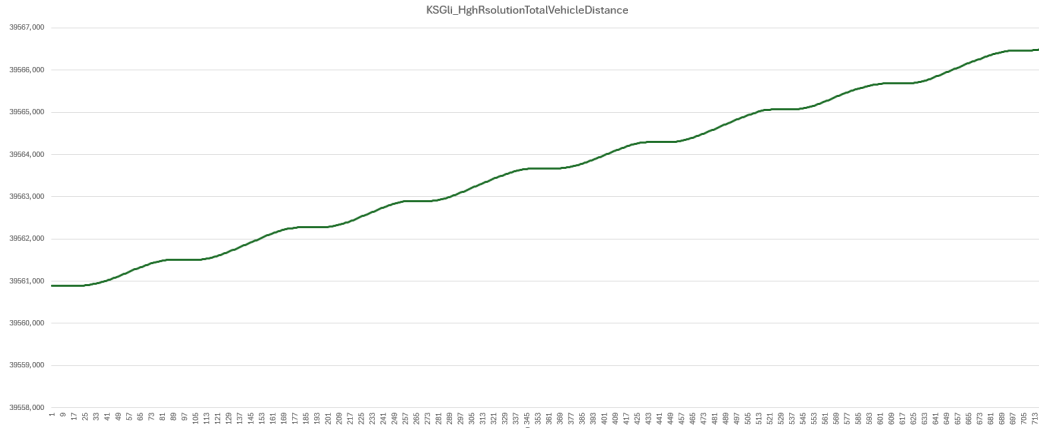
Anlık yakıt ekonomisi (km/L), araç hızının anlık yakıt tüketim oranına bölünmesiyle hesaplanmıştır ve test boyunca ortalama 4,49 km/L olarak ölçülmüş olup, minimum ekonomi değeri 0,18 km/L civarındadır. Bu ortalama değer, KSG sisteminin ekonomik sürüş koşullarını desteklediğini ve yakıt verimliliğini artırdığını göstermektedir. Her bir veri örneklemede aracın o anki kilometre başına kat ettiği mesafeyi litre cinsinden ifade eder. KSG aktif modda anlık yakıt ekonomisinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.5 KSG aktif modda zamana bağlı anlık yakıt ekonomisinin grafiği

4.5.2.6 Toplam Kat Edilen Mesafe

Yüksek çözünürlüklü dijital takograf verileri arasındaki mesafe farkı, $Distance_{final}$ dijital takograf sisteminde testin sona erdiğinde kaydedilen toplam mesafe değerinden, $Distance_{initial}$ testin başlama anında elde edilen toplam mesafe değerinin çıkarılması ile KSG aktif modda 5,61 km değeri kaydedilmiştir. Ölçüm hassasiyeti, kalkış-duruş döngülerini dahi ayrıntılı biçimde yakalayarak analizlerin güvenilirliğini artırmıştır. KSG aktif modda test aracının toplam kat edilen mesafesinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.6'da gösterilmektedir.

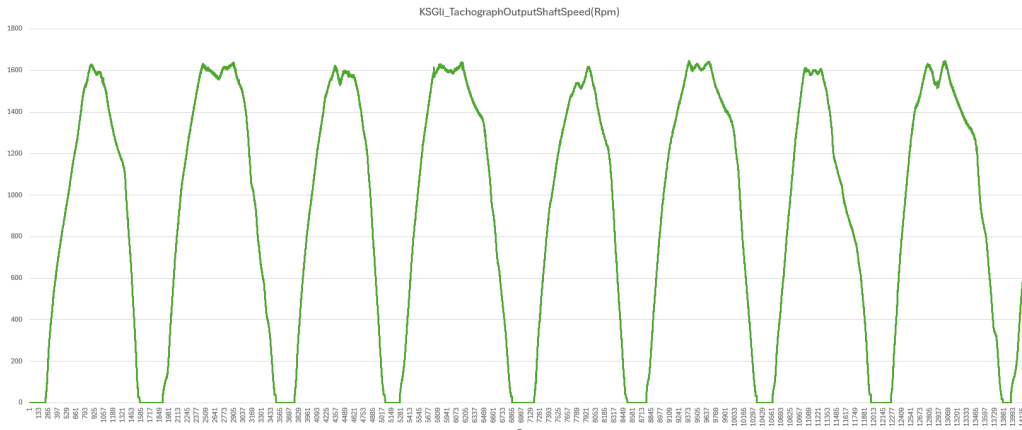


Şekil 4.6 KSG aktif modda kat edilen mesafe

4.5.2.7 Çıkış Şaft Devir Hızı

Çıkış şaft devir hızı, dijital takograf sistemi üzerinden elde edilen verilere dayanarak hesaplanmış olup, test süresi boyunca ortalama 916 rpm, maksimum ise 1.646 rpm olarak kaydedilmiştir. KSG aktif test aracının çıkış şaft devir hız grafiği Şekil 4.7’de görülmektedir. Grafikselsel analiz, devir hızının belirli periyotlarla sıfıra kadar düştüğünü ve ardından yeniden yükseldiği görülmektedir.

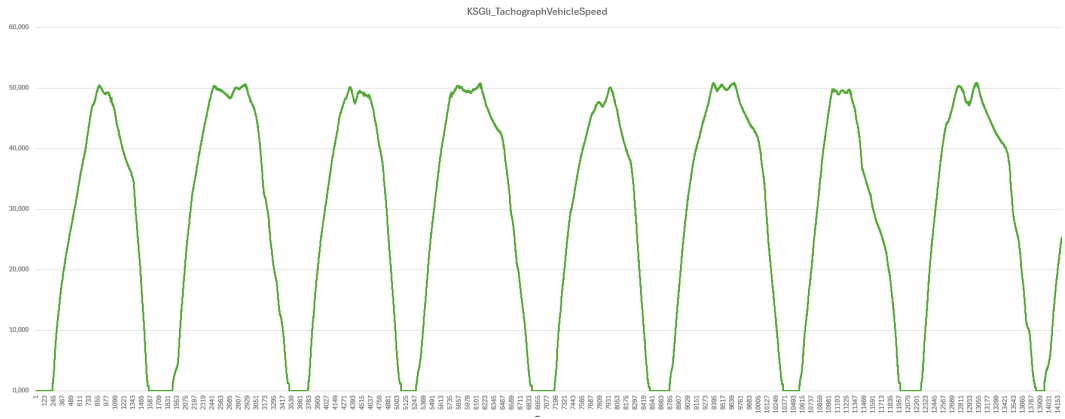
Devir hızındaki bu tekrarlayan dalgalanmalar, aracın ivmelenme ve yavaşlama fazlarını açıkça temsil etmekte; bu yönüyle tork üretimi ve yakıt tüketimi ile eşzamanlı analizlerde bağlamsal anlam taşımaktadır. Özellikle düşük ve orta hızlarda gerçekleşen ivmelenme aralıkları, hibrit destek ünitesinin devreye giriş zamanlarının analiz edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu sinyal, anlık mekanik güç üretiminin doğrudan izlenebilmesi açısından kritik öneme sahip olup, KSG sisteminin içten yanmalı motor üzerindeki yükü hangi oranlarda azalttığına zamana bağlı incelenmesine katkı sunmaktadır. KSG aktif modda test aracı çıkış şaft devir hızının zamana bağlı değişimi Şekil 4.7’de gösterilmektedir.



Şekil 4.7 KSG aktif modda zamana bağlı çıkış şaft devir hız grafiği

4.5.2.8 Anlık Araç Hızı

Tekerlek dönüş verilerinden, dijital takograf aracılığıyla hesaplanan araç hızı verilerine göre, test süresi boyunca ortalama hız 28,4 km/h, maksimum hız ise 51 km/h olarak kaydedilmiştir. Hız profilinin zamana göre değişimi incelendiğinde, aracın test boyunca birçok kez tamamen durduğu ve ardından tekrar maksimum hız seviyelerine ulaştığı görülmektedir. Bu durum, sık dur-kalk içeren ve düşük hız aralıklarında gerçekleşen bir sürüş çevrimini yansıtarak, şehir içi toplu taşıma koşullarına benzer bir karakteristik sergilemektedir. KSG aktif modda araç hız grafiğinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.8’de gösterilmektedir.



Şekil 4.8 KSG aktif modda zamana bağlı anlık araç hız grafiği

4.5.2.9 Toplam Yakıt Tüketimi

Test süresi boyunca toplam yakıt tüketimi, dijital sayaç sinyalinden okunan 1,50 L değeriyle belirlenmiştir. Bu kümülatif ölçüm, debi entegrasyonundan türetilen 1,62 L ile %7,3'lük bir uyum sergileyerek veri tutarlılığını teyit etmiştir.

4.5.2.10 Spesifik Yakıt Tüketimi

Spesifik yakıt tüketimi, sürüş segmenti boyunca toplam yakıt tüketimi ve mesafeye bağlı olarak yaklaşık 26,7 L/100km olarak hesaplanmıştır (1,5 L / 5,61 km × 100). Bu değer, aracın sürüş koşulları ve test döngüsünün dur-kalk karakteristiğini yansıtmaktadır.

4.5.2.11 Ortalama Motor Gücü

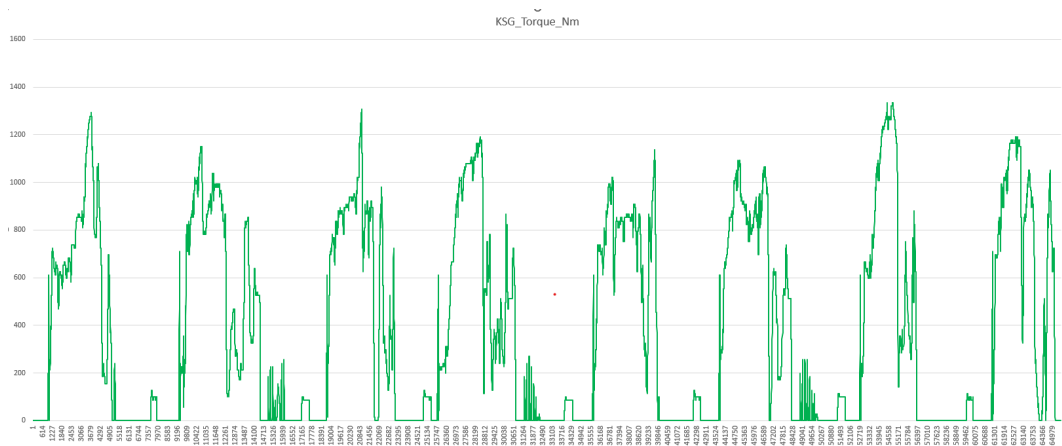
Gerçek tork (Nm) ve çıkış şaftı devir hızı (rpm) verilerinin zaman eşlemeli birleşimiyle elde edilen mekanik güç profiline göre, KSG'li araçta ortalama motor gücü yaklaşık 41 kW, anlık tepe (maksimum) motor gücü ise 205 kW olarak hesaplanmıştır.

Bu güç profili, sistemin kısa süreli yüksek tork ihtiyaçlarıyla birlikte çoğunlukla düşük ve orta yük aralığında çalıştığını ortaya koymaktadır. Özellikle 205 kW düzeyindeki tepe güç, araç kalkışı, yokuş tırmanma veya hızlanma gibi yüksek dinamik taleplerin karşılandığı sınırlı zaman aralıklarını temsil ederken; 41 kW'lık ortalama değer, sistemin termal tasarımı, soğutma kapasitesi, inverter dayanımı ve şanzıman ömrü gibi birçok mühendislik kararında temel belirleyici parametre olarak kullanılır.

4.5.2.12 Anlık Motor Tork Değeri

KSG sisteminin aktif olduğu sürüş segmentinde motorun anlık tork üretimi analiz edilmiştir. Bu analizde, araçtan elde edilen “ActualEngPercentTorque” sinyali kullanılarak motorun her bir zaman anındaki tork değeri Newton-metre (Nm) cinsinden hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Excel ortamına aktarılarak analiz edilmiş ve istatistiksel dağılımı incelenmiştir.

Yapılan analiz sonucunda, motorun anlık olarak ulaştığı maksimum tork 1.334,8 Nm olarak belirlenmiş, ortalama tork değeri ise 379,2 Nm olarak hesaplanmıştır. Medyan tork değeri 198,8 Nm seviyesindedir. Medyanın ortalamanın altında kalması, verilerin ağırlıklı olarak düşük tork bölgelerinde yoğunlaştığını ve bazı yüksek tork anlarının ortalamayı yukarı çektiğini göstermektedir. Bu dağılım, KSG sistemi sayesinde motorun düşük ve orta yük bölgelerinde daha verimli çalıştığını ortaya koymaktadır. KSG'nin devreye girdiği kalkış ve hızlanma anlarında sağladığı ek tork desteği, motorun yüksek tork üretme ihtiyacını azaltmakta ve böylece içten yanmalı motorun üzerindeki yükü dengelemektedir. KSG aktif modda test aracının anlık motor tork grafiğinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.9'da gösterilmektedir.



Şekil 4.9 KSG aktif modda zamana bağlı anlık motor tork grafiği

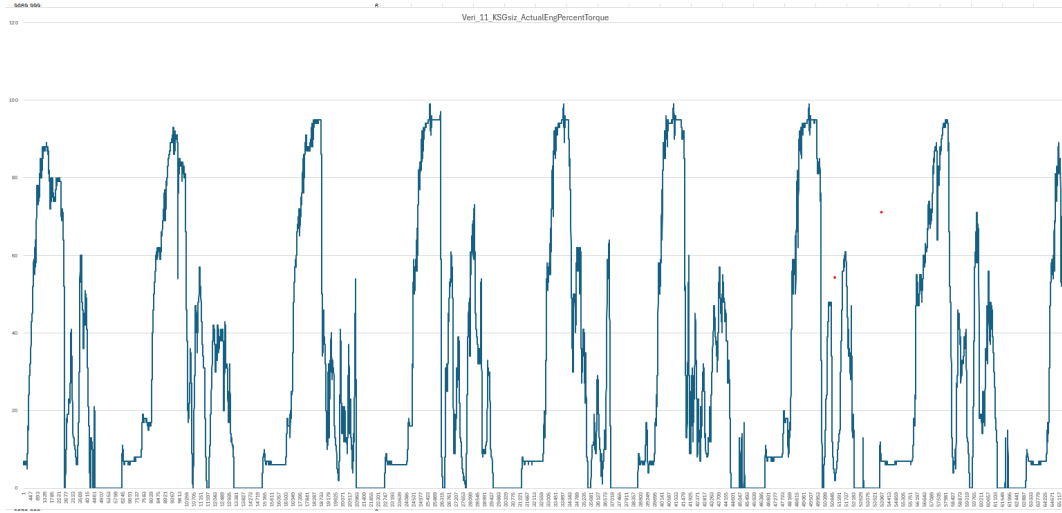
4.5.3 KSG Pasif Modda Veri Analizi

4.5.3.1 Zaman Referans Çerçevesi (t, s)

Pasif mod verileri, araç takografından 9.869,34 s (2 saat 44 dk 29,34 sn) ile 10.579,98 s (2 saat 56 dk 19,98 sn) zaman damgaları arasında kaydedilmiş olup, bu aralık 710,64 s (\approx 11 min 50 s) sürmektedir.

4.5.3.2 Gerçek Motor Yüğü

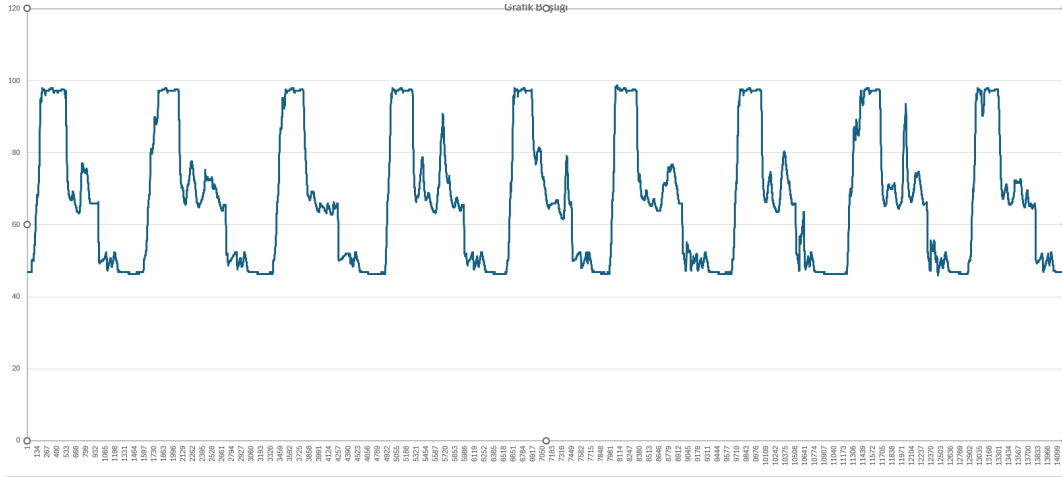
Gerçek motor yüğü, içten yanmalı motorun ECU tarafından sağlanan maksimum mevcut motor torkuna oranla gerçekleşen anlık tork talebini gösterir. KSG pasif modunda, bu parametrenin ortalama değeri %30,1 maksimum değeri %100 olarak ölçülmüştür. KSG pasif modda gerçek motor yükünün zamana bağlı değişimi Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.10 KSG pasif modda zamana bağlı gerçek motor yük grafiğı

4.5.3.3 Maksimum Mevcut Motor Yüğü

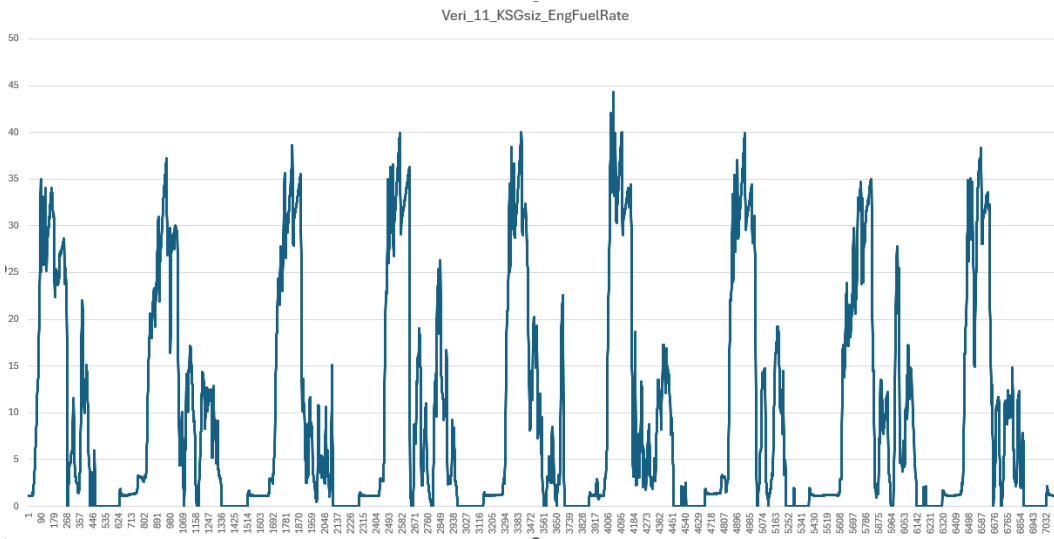
Maksimum mevcut motor yüğü, ECU'nun motor koruması amacıyla izin verdiği maksimum tork değeridir. Pasif modda ortalama tork rezervi %66,7 olarak ölçülürken, genellikle üst sınıra (%95-100 aralığı) ulaşılmıştır. Bu durum motorun koruma limitlerini zorlayan yüksek yük altında çalıştığını göstermektedir. KSG pasif modda maksimum mevcut motor yük grafiğinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.11'de gösterilmektedir.



Şekil 4.11 KSG pasif modda zamana bağlı maksimum mevcut motor yük grafiği

4.5.3.4 Anlık Yakıt Tüketim Hızı

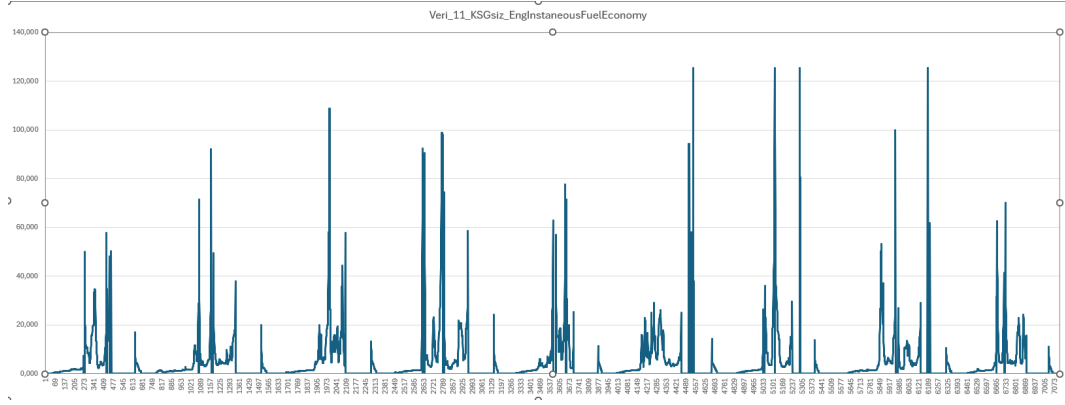
Anlık yakıt tüketim hızı, içten yanmalı motorun her bir zaman örneklemede litre/saat biriminde tükettiği yakıt hacmini ifade eder. KSG pasif mod verilerinde ortalama akış hızı 9,75 L/h olarak kaydedilmiş; en yüksek tüketim anında akış hızı 39,0 L/h'ye ulaşmıştır. Bu değerler, motorun yüksek tork taleplerini doğrudan karşılamak üzere pasif konfigürasyonda sürekli olarak maksimum yakıt beslemesi ile çalıştığını göstermektedir. Ani ivmelenme ve dur-kalk döngülerinde gözlenen tepe değerler, yakıt akış hızının motor yüküne doğrudan karşılık verdiğini ve geri besleme destek mekanizmalarının devre dışı olduğunu ortaya koyar. KSG pasif modda anlık yakıt tüketim hızının zamana bağlı değişimi Şekil 4.12'de gösterilmektedir.



Şekil 4.12 KSG pasif modda zamana bağlı anlık yakıt tüketim hız grafiği

4.5.3.5 Anlık Yakıt Ekonomisi

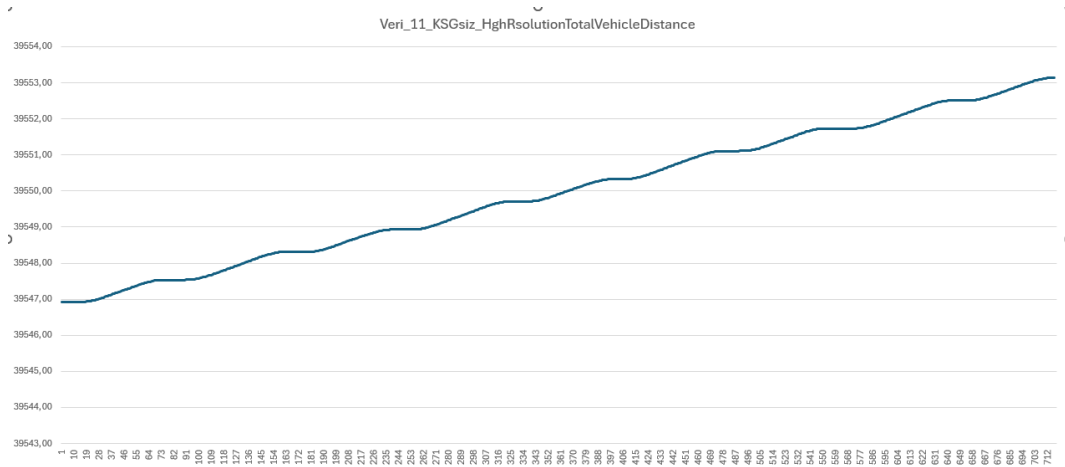
Anlık yakıt ekonomisi, araç hızının yakıt akış hızına oranı olarak tanımlanır ve kısa süreli verimlilik değişimlerini gösterir. KSG pasif modda bu metrik ortalama 4,21 km/L olarak belirlenmiştir. Verimlilik dağılımının %75'lik diliminde 3,8 km/L – 4,5 km/L aralığı gözlenmiştir; düşük hızla dur-kalk döngülerinde anlık ekonomi 3,2 km/L'ye kadar gerilemiştir. KSG pasif modda anlık yakıt ekonomisinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.13'de gösterilmektedir.



Şekil 4.13 KSG pasif modda zamana bağlı anlık yakıt ekonomisinin grafiği

4.5.3.6 Toplam Kat Edilen Mesafe

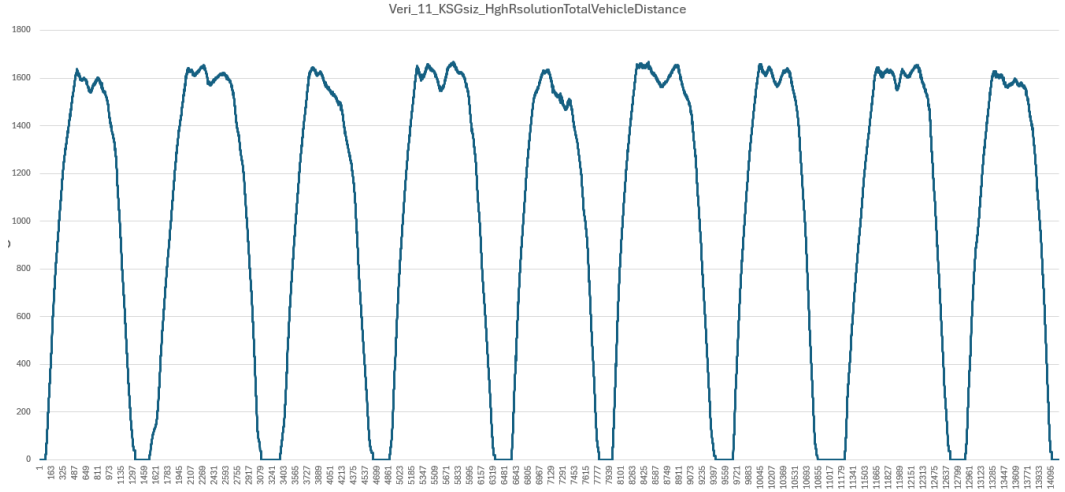
Yüksek çözünürlüklü dijital takograf verileri arasındaki mesafe farkı, $Distance_{final}$ dijital takograf sisteminde testin sona erdiğinde kaydedilen toplam mesafe değerinden, $Distance_{initial}$ testin başlama anında elde edilen toplam mesafe değerinin çıkarılması ile KSG Pasif mod ölçümlerinde bu mesafe 6,21 km olarak kaydedilmiştir. KSG pasif modda test aracının toplam kat edilen mesafesinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.14'te gösterilmektedir.



Şekil 4.14 KSG pasif modda kat edilen mesafe

4.5.3.7 Çıkış Şaft Devir Hızı

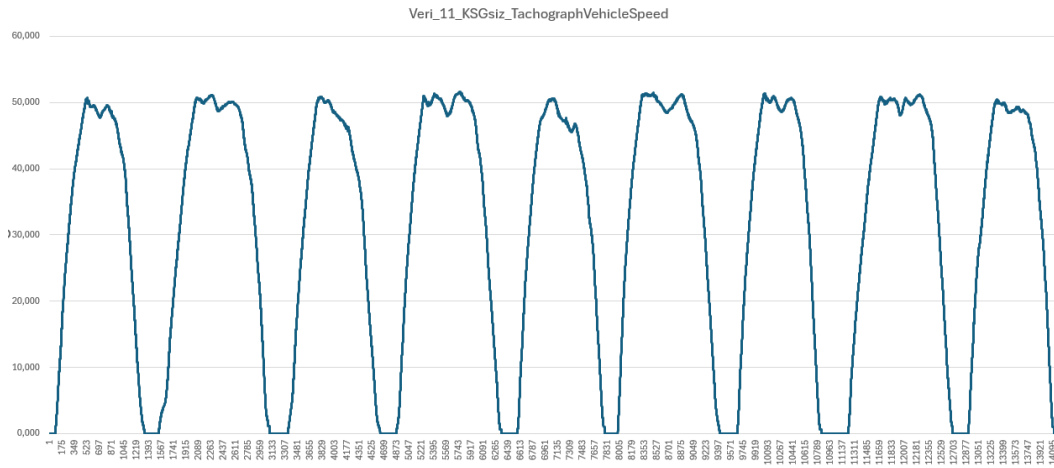
Çıkış şaft devir hızı, tahrik şaftının dakika başına dönüş sayısını bildirir ve mekanik güç hesabı için zorunlu girdidir. Pasif modda ortalama şaft hızı 1.013 rpm, maksimum 1.669 rpm olarak kaydedilmiştir. Bu devir seviyeleri, motorun pasif sürüşte sürekli yüksek devirlere zorlandığını ve tork dalgalanmalarının şaft devrine doğrudan yansıdığını göstermektedir. KSG pasif modda test aracı çıkış şaft devir hızının zamana bağlı değişimi Şekil 4.15’te gösterilmektedir.



Şekil 4.15 KSG pasif modda zamana bağlı çıkış şaft devir hız grafiği

4.5.3.8 Anlık Araç Hızı

Anlık araç hızı, tekerlek dönüş verilerinin dişli oranları ile dönüştürülerek km/h cinsinden ifade edilen gerçek zamanlı hız bilgisidir. Pasif mod verilerinde ortalama hız 31,4 km/h, maksimum hız 51 km/h olarak ölçülmüştür. Bu hız profili, pasif sürüş konfigürasyonunun dur-kalk döngülerinde daha yüksek hız dalgalanmaları içerdiğini ve bu dalgalanmaların yakıt tüketimi üzerinde belirgin etkisi olduğunu ortaya koyar. KSG pasif modda araç hız grafiğinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.16’da gösterilmektedir.



Şekil 4.16 KSG pasif modda zamana bağlı anlık araç hız grafiği

4.5.3.9 Toplam Yakıt Tüketimi

Toplam yakıt tüketimi, test başlangıç-bitiş kümülatif sayaç değerleri arasındaki farktır. Pasif mod verilerinde bu değer 2,00 L olarak ölçülmüştür. Bu kümülatif tüketim, pasif modun yaklaşık 6,21 km'lik şehir içi sürüş segmentinde içten yanmalı motorun tüm yük taleplerini tek başına karşıladığını ve yakıt kullanımının en yüksek seviyeye çıktığını göstermektedir. Bu kümülatif ölçüm, debi entegrasyonundan türetilen 1,92 L ile %4,1'lik bir uyum sergileyerek veri tutarlılığını teyit etmiştir.

4.5.3.10 Spesifik Yakıt Tüketimi

KSG pasif modunda 32,21 L/100km olarak hesaplanan bu parametre (2,00 L / 6,21 km × 100), içten yanmalı motorun verim eğrisinden saparak yüksek miktarda yakıt harcadığını ve enerji dönüşüm etkinliğinin düşük kaldığını göstermektedir.

4.5.3.11 Ortalama Motor Gücü (kW)

Gerçek tork (Nm) ve çıkış şaftı devir hızı (rpm) verilerinin zaman eşlemeli birleşimi kullanılarak elde edilen mekanik güç profiline göre, KSG sisteminin devre dışı (pasif) olduğu test konfigürasyonunda ortalama motor gücü 58,90 kW, tepe (maksimum) motor gücü ise 235,56 kW olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, test aracının şehir içi kullanım senaryosunda yoğun dur-kalk ve hızlanma karakteristiği gösterdiğini ve bu yük profiline tamamen içten yanmalı motor tarafından karşılandığını ortaya koymaktadır.

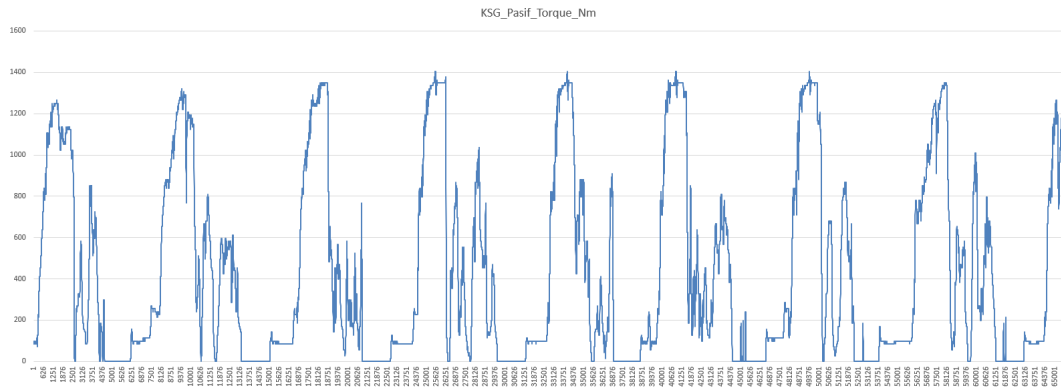
Söz konusu 58,90 kW'lık ortalama güç değeri, şehir içi hizmet veren konvansiyonel dizel otobüslerde gözlemlenen tipik ortalama motor güç aralığına (55 kW – 70 kW) karşılık gelmektedir [23]. Bu durum, krank mili marş jeneratörü (KSG) devre dışı

kaldığında, motorun hibrit destekten yoksun olarak daha uzun süre orta ve yüksek yük aralıklarında çalıştığını göstermektedir. Böylece motorun, hızlanma ve eğimli yol koşullarında ihtiyaç duyulan momenti tek başına üretmesi gerekmiş; bu da hem yakıt tüketiminin artmasına hem de ısıl yük ve mekanik zorlanmaların yükselmesine neden olmuştur.

4.5.3.12 Anlık Motor Tork Değeri (N m)

KSG sisteminin devre dışı olduğu sürüş segmentinde motorun anlık tork üretimi analiz edilmiştir. Bu analizde, araçtan alınan “ActualEngPercentTorque” sinyali kullanılmış ve yukarıdaki bölümde açıklanan formül doğrultusunda, anlık motor torku değerleri Newton-metre (N m) cinsine dönüştürülmüştür. Hesaplanan veriler Excel ortamına aktarılmış ve istatistiksel dağılımları değerlendirilmiştir.

Yapılan analiz sonucunda motorun ulaştığı maksimum anlık tork değeri 1.405,8 N m olarak belirlenmiştir. Ortalama tork değeri 426,9 N m, medyan tork ise 213,0 N m olarak hesaplanmıştır. Ortalama değer medyandan yüksek olması, verilerin çoğunlukla düşük tork seviyelerinde yoğunlaştığını, ancak bazı yüksek tork anlarının ortalamayı yukarı çektiğini göstermektedir. KSG pasif modda test aracının anlık motor tork grafiğinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.17’de gösterilmektedir.



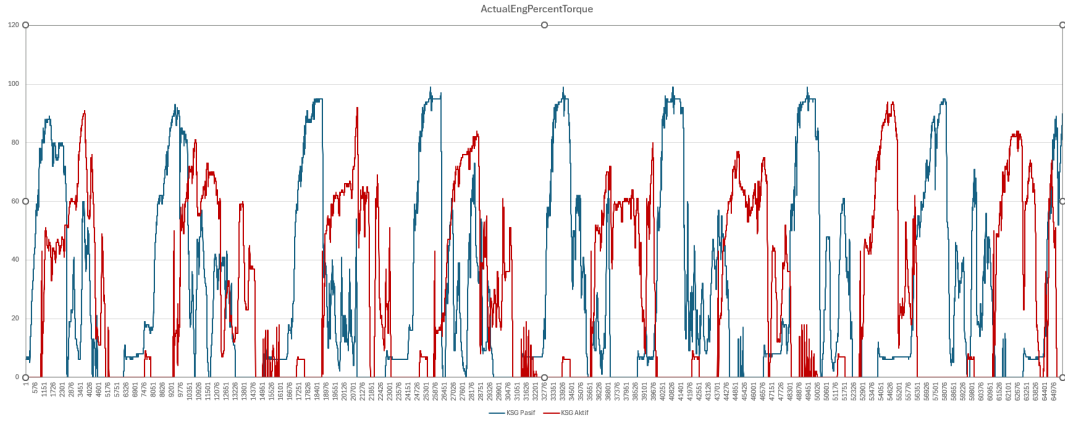
Şekil 4.17 KSG pasif modda zamana bağlı anlık motor tork grafiği

4.5.4 KSG Aktif ve KSG Pasif Durumlarında Sonuçların Yorumlanması

4.5.4.1 Gerçek Motor Yükünün Karşılaştırılması

KSG Pasif Modda ortalama motor yükü %30,1 olarak ölçülmüşken, KSG aktif modda %26,7'ye gerilemiştir. Yükün %80'in üzerindeki bandı kapsayan süre KSG Pasif Modda %13,9; KSG Aktif Modda %3,9'dur. Bu, KSG entegrasyonunun motoru daha düşük yük bandında çalıştırarak mekanik aşınma ve termal stresi

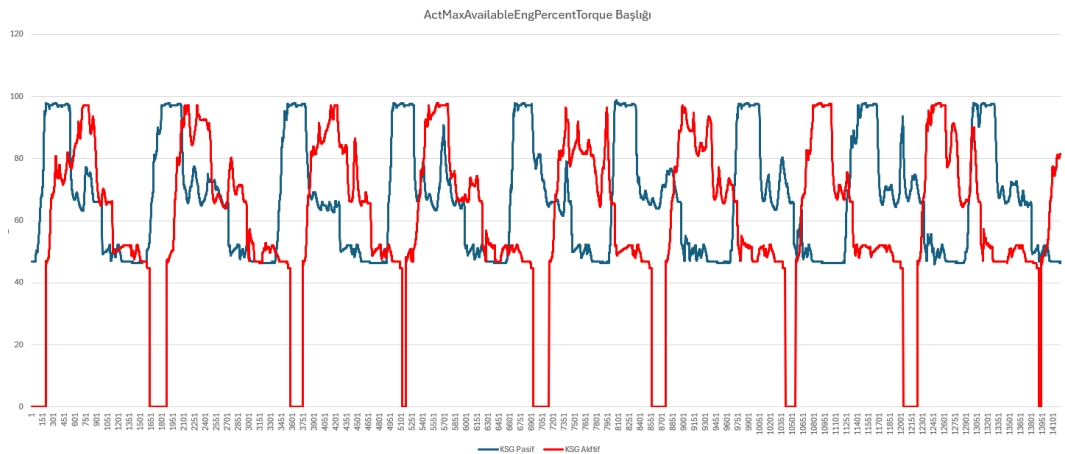
azalttığını göstermektedir. KSG aktif ve pasif modlarda test aracının gerçek motor yük grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 4.18’de gösterilmektedir.



Şekil 4.18 KSG aktif ve pasif modlarında gerçek motor yüklerinin karşılaştırılması

4.5.4.2 Maksimum Mevcut Motor Torku

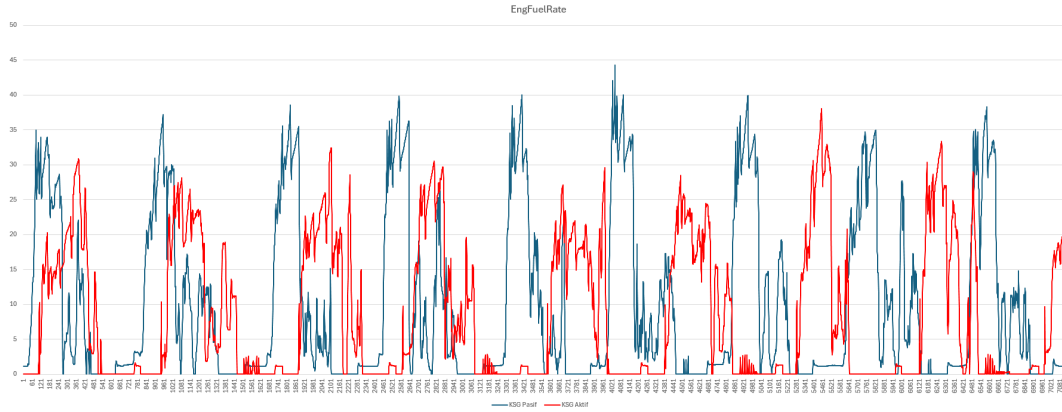
KSG Pasif Modda ortalama tork rezervi %66,7 olarak ölçülürken, KSG Aktif Modda bu değer %59,6’ya düşmüştür. Her iki modda da maksimum izin verilen tork yaklaşık %98 seviyesindedir. KSG Aktif Modunda ortalama ‘Maksimum Mevcut Motor Torku’ (ActMaxAvailableEngPercentTorque) değerinin daha düşük olması, ECU’nun, KSG ile koordineli bir tork stratejisi uygulayarak içten yanmalı motorun torkunu sınırladığını gösterir. Bu yaklaşım, motoru aşırı yüklerden koruyarak sistem dayanıklılığını artırmaya yöneliktir. KSG aktif ve pasif modlarda test aracının maksimum mevcut motor tork grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 4.19’da gösterilmektedir.



Şekil 4.19 KSG aktif ve pasif modlarında maksimum mevcut motor tork değerlerinin karşılaştırılması

4.5.4.3 Anlık Yakıt Tüketim Hızı

KSG Pasif Modda ortalama yakıt akışı 9,75L/h iken, KSG Aktif Modda 8,19L/h'ye inmiştir. Bu %16'lık düşüş, KSG'nin frenleme ve kalkış desteğinin yakıt tüketimini makro ölçekte azaltıcı etkisini ortaya koymakta ve KSG Aktif Modun anlık ve kümülatif tasarruf avantajı sunduğunu göstermektedir. KSG aktif ve pasif modlarda test aracının yakıt tüketim hız grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 4.20'de gösterilmektedir.



Şekil 4.20 KSG aktif ve pasif modlarında anlık yakıt tüketim hızlarının karşılaştırılması

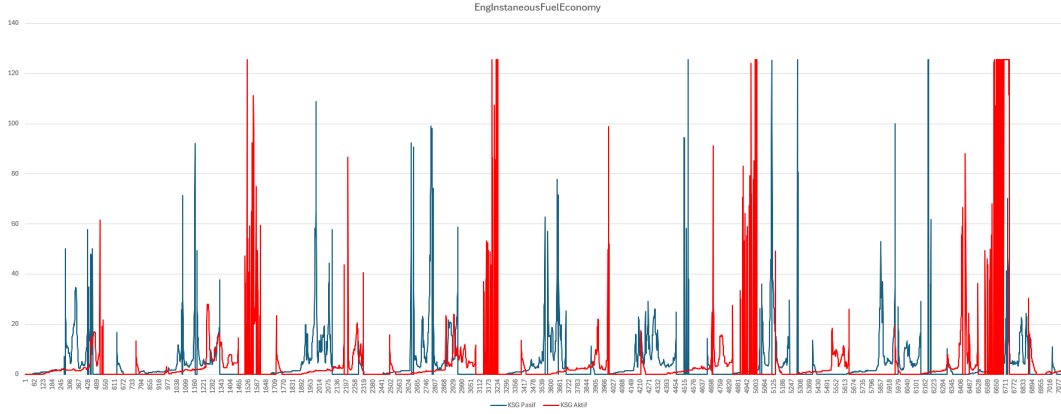
4.5.4.4 Anlık Yakıt Ekonomisi

KSG Pasif Modda ortalama anlık yakıt ekonomisi 4,21 km/L olarak ölçülürken, KSG Aktif Modda bu değer 4,49 km/L'ye yükselmiştir. Elde edilen %6,7'lik artış, KSG sisteminin dinamik sürüş koşullarında enerji kullanım verimliliğini artırdığını göstermektedir.

Grafiksel analiz incelendiğinde, KSG aktif modda (kırmızı çizgi) anlık yakıt ekonomisinin belirli periyotlarda 60 km/L – 120 km/L seviyelerine kadar ulaştığı ve bu değerlerin kısa süreli de olsa sık tekrarlandığı gözlemlenmektedir. Bu sıçramalar, genellikle araç hızının sabit kaldığı ancak yakıt tüketiminin minimuma indiği dönemlere denk gelmektedir. Bu tür rejeneratif frenleme ve motor freni senaryoları, içten yanmalı motorun yakıt akışının önemli ölçüde azaldığı veya kesildiği (fuel cut-off) ve KSG modülünün enerji geri kazanımı yaptığı durumlarda ortaya çıkmaktadır.

Öte yandan, pasif moddaki (mavi çizgi) verimlilik değerleri daha durağan seyretmekte; ani sıçramalar daha nadir ve düşük seviyelerde gözlenmektedir. Bu durum, içten yanmalı motorun KSG desteği olmaksızın her an yakıt tüketecek şekilde çalıştığını ve rejeneratif etkilerin devrede olmadığını göstermektedir.

KSG sistemi sayesinde, özellikle dur-kalk döngülerinde ve düşük hız aralıklarında motorun yükü azalmakta, bunun sonucunda hem anlık yakıt tüketimi düşmekte hem de kat edilen kilometre başına harcanan yakıt miktarı azalmaktadır. Dolayısıyla, KSG aktif modda elde edilen yüksek verimlilik değerleri, sadece motor-mekanik etkileşimlerinin değil, aynı zamanda akıllı enerji yönetimi stratejilerinin bir sonucudur. KSG aktif ve pasif modlarda test aracının anlık yakıt ekonomi grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 4.21’de gösterilmektedir.



Şekil 4.21 KSG aktif ve pasif modlarında anlık yakıt ekonomilerinin karşılaştırılması

4.5.4.5 Toplam Kat Edilen Mesafe

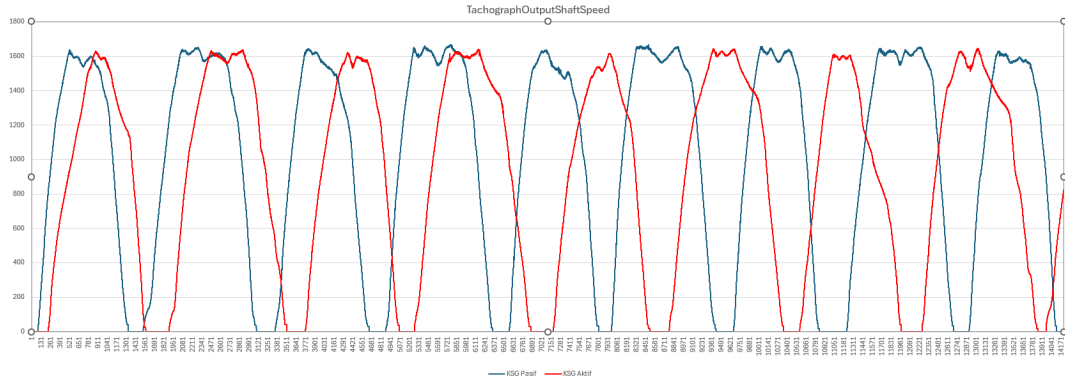
KSG Pasif Modda toplam 6,21 km, KSG Aktif Modda ise 5,61 km’lik bir mesafe kat edilmiştir. Her iki sürüş çevriminde test süresi, hız profili ve sürüş senaryosu sabit tutulmuş olup; bu nedenle mesafeler arasında gözlenen fark, test koşullarındaki operasyonel varyasyonlardan kaynaklanmakta ve analiz sonuçlarını doğrudan etkilememektedir. Rota dışı sapma veya test senaryosu ihlali anlamına gelmemektedir. Her iki durumda da sürüş süresi eşit ve çevrim karakteristiği tutarlı olduğundan, analiz karşılaştırmaları için kullanılan mesafe verileri güvenilir kabul edilmiştir. Özellikle spesifik yakıt tüketimi (L/100 km) gibi normalize edilmiş metrikler üzerinden yapılan analizlerde bu mesafe farkı etkisiz hale getirilmiş; KSG sisteminin enerji verimliliği üzerindeki katkısı daha net biçimde ortaya konmuştur.

4.5.4.6 Çıkış Şaft Devir Hızı

Test sonuçlarına göre, KSG Pasif Modda ortalama çıkış şaft devir hızı 1.013 rpm, maksimum değer ise 1.669 rpm olarak ölçülmüştür. KSG Aktif Modda ise bu değerler sırasıyla 916 rpm ortalama ve 1.646 rpm maksimum olarak kaydedilmiştir. Her iki sürüş çevrimi benzer zaman aralıklarında, eşdeğer dur-kalk döngüleri

ve hızlanma karakteristiğiyle gerçekleştirilmiş olup; böylece karşılaştırmanın doğruluğu korunmuştur.

Grafiksel inceleme, her iki modda da düzenli ve simetrik devir döngülerinin yaşandığını, ancak KSG aktif modda motorun daha düşük devir aralıklarında çalıştığını ortaya koymaktadır. Bu durum, içten yanmalı motorun daha düşük yük altında işletildiğini ve elektriksel destek biriminin tahrik sistemine katkı sağladığını göstermektedir. KSG aktif ve pasif modlarda test aracının çıkış şaft devir hız grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 4.22'de gösterilmektedir.

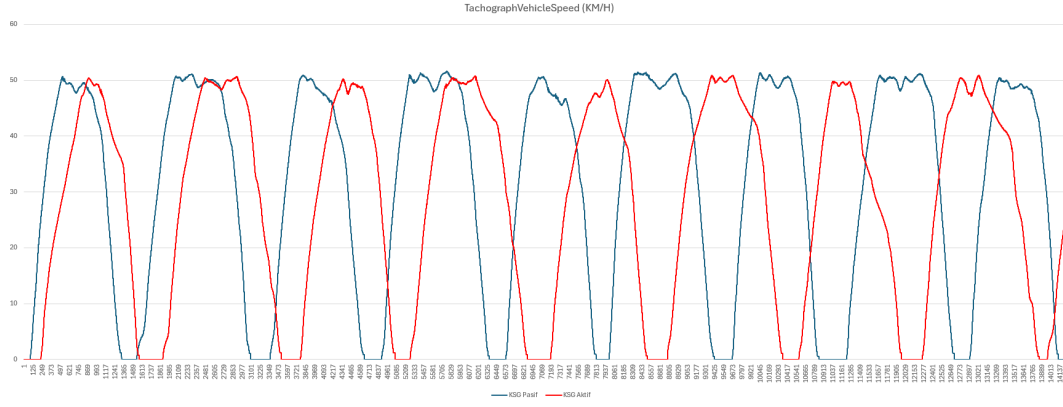


Şekil 4.22 KSG aktif ve pasif modlarında çıkış şaft devir hızlarının karşılaştırılması

4.5.4.7 Anlık Araç Hızı

KSG Pasif Modda test süresince ortalama araç hızı 31,4 km/h, KSG Aktif Modda ise 28,4 km/h olarak hesaplanmıştır. Her iki modda da maksimum hız değeri 51 km/h ile sınırlandırılmış olup, sürüş çevrimleri benzer dur-kalk karakteristiğiyle gerçekleştirilmiştir.

Ortalama hız farkı, KSG aktif modda elektriksel destekle birlikte daha dengeli hızlanma ve yavaşlama stratejilerinin uygulanmasından kaynaklanmaktadır. KSG sistemi, düşük hız bölgelerinde içten yanmalı motorun üzerindeki yükü azaltarak ani tork taleplerini dengelemekte ve aracın daha uzun süre düşük hız aralıklarında kalmasını sağlamaktadır. Bu durum, hem rejeneratif frenleme etkisinin daha sık devreye girmesine hem de genel enerji tüketiminin düşmesine katkı sunmaktadır. KSG aktif ve pasif modlarda test aracının anlık araç hız grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 4.23'de gösterilmektedir.



Şekil 4.23 KSG aktif ve pasif modlarında anlık araç hızlarının karşılaştırılması

4.5.4.8 Toplam Yakıt Tüketimi

Test çevrimi süresince, KSG Pasif Modda toplam 2,00 L, KSG Aktif Modda ise 1,50 L yakıt tüketilmiştir. Bu veriler, motor kontrol ünitesinden alınan ve zaman içinde kümülatif olarak artan "EngTotalFuelUsed" sinyali kullanılarak doğrudan okunmuştur. Sayaç temelli bu yaklaşım, yakıt enjeksiyon sisteminin tüm test boyunca gerçekleştirdiği toplam tüketimi yüksek doğrulukla yansıtmaktadır.

Yakıt tüketim değerleri, ilgili modlara ait toplam kat edilen mesafelerle birlikte değerlendirildiğinde daha anlamlı bir çerçeve sunmaktadır. KSG Pasif Modda araç 6,21 km yol kat etmişken, KSG Aktif Modda bu mesafe 5,61 km olarak kaydedilmiştir. Her iki modda da sürüş süresi, çevrim yapısı ve test güzergâhı sabit tutulmuş; bu nedenle mesafeler arası fark, araçların hızlanma karakteristikleri ve enerji kullanım eğilimlerinden kaynaklanmaktadır.

Normalizasyon amacıyla her iki konfigürasyonun aynı çevrimde 6,21 km'lik eşit mesafeyi katettiği varsayımı altında yapılan hesaplamalarda, KSG Aktif Modun bu mesafeyi yalnızca 1,66 L yakıtla tamamlayabileceği görülmektedir. Oysa KSG Pasif Modda bu mesafe 2,00 L ile tamamlanmıştır. Bu durumda, aktif konfigürasyonun aynı koşullar altında yaklaşık %17 oranında yakıt tasarrufu sağladığı tespit edilmiştir.

4.5.4.9 Spesifik Yakıt Tüketimi

Spesifik yakıt tüketimi, KSG Pasif Modda 32,21 L/100km, KSG Aktif Modda ise 26,7 L/100km olarak hesaplanmıştır. Bu yaklaşık %17.1 oranındaki iyileşme, hibrit destek sisteminin sürüş süresince enerji dönüşüm verimliliğini anlamlı ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır.

Bu farkın temel nedeni, KSG sisteminin özellikle kalkış ve hızlanma anlarında içten yanmalı motoru destekleyerek yüksek tork ihtiyacını doğrudan karşılaması ve böylece motora binen yükü azaltmasıdır. Daha düşük motor yükü, doğrudan daha az yakıt tüketimiyle sonuçlanmakta; bu da kat edilen kilometre başına düşen yakıt miktarını minimize etmektedir. Ayrıca, yavaşlama ve rölanti anlarında yakıt kesme (overrun-fuel-cut) gibi stratejilerin devreye girmesiyle birlikte, KSG aktif modda enerji yönetimi daha dengeli yürütülmektedir.

Grafiksel veriler ve senkronize sinyallerle yapılan karşılaştırmalı analizler, bu tüketim farkının sadece test koşullarına özgü bir durum olmadığını, aksine sistematik olarak tekrarlanan bir avantajı temsil ettiğini göstermektedir. Spesifik yakıt tüketimi, aynı sürüş çevriminde uygulandığı için normalize edilmiş bir metrik olarak iki konfigürasyonun doğrudan karşılaştırılmasına olanak tanımakta ve KSG destekli yapının daha verimli çalıştığını somut biçimde ortaya koymaktadır.

Bu kazanım sadece teknik performans açısından değil, şehir içi otobüs taşımacılığı gibi yüksek kilometreli filo uygulamalarında, uzun vadeli işletme maliyetlerinin azaltılması açısından da stratejik bir avantaj sunmaktadır. KSG sistemli araçların düşük L/100km değeriyle çalışması, toplam yakıt tüketimini azaltarak hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine doğrudan katkı sağlamaktadır.

4.5.4.10 Ortalama Motor Güçleri

Krank mili marş jeneratörü (KSG) sisteminin aktif ve pasif durumda olduğu test konfigürasyonları için yapılan analiz sonucunda, motorun mekanik güç üretimine ilişkin anlamlı farklılıklar gözlemlenmiştir. Gerçek tork (N m) ve shaft çıkış hızı (rpm) verileri esas alınarak hesaplanan güç profiline göre, KSG sisteminin aktif olduğu konfigürasyonda ortalama motor gücü 40,99 kW, maksimum (tepe) güç ise 205,32 kW olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık, sistemin hibrit destek sunmadığı pasif konfigürasyonda ortalama güç 58,90 kW'a, maksimum güç ise 235,56 kW'a kadar yükselmiştir.

Elde edilen bu veriler, hibrit destek sunulmayan durumda içten yanmalı motorun hem daha yüksek anlık talepleri karşılamak zorunda kaldığını hem de tüm sürüş döngüsü boyunca ortalama olarak daha yüksek bir güç çıkışıyla çalıştığını göstermektedir. Bu fark, KSG sisteminin aktif olduğu durumda kalkış ve düşük hız senaryolarında motora elektriksel tork desteği sağlaması sayesinde, içten yanmalı motorun üzerindeki yükün belirli oranlarda devralındığını ve dolayısıyla motorun daha verimli çalışma bölgelerinde tutulabildiğini göstermektedir.

Söz konusu bulgu, hibrit sistemlerin enerji paylaşımı yoluyla motor üzerindeki ortalama yükü azalttığına dair literatürde yer alan gözlemlerle de örtüşmektedir. Mangun ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda, hibrit sistemlerin etkin kullanımı sayesinde içten yanmalı motorun ortalama güç üretiminin %30,5 oranında azaltılabildiği ifade edilmiştir [45]. Ayrıca, NREL tarafından yayımlanan SunLine Transit Agency Fuel Cell Bus Evaluation raporunda [46], yakıt hücreli hibrit otobüslerin geleneksel CNG otobüslerine kıyasla benzer sürüş profillerinde iki kata yakın enerji verimliliği sağladığı, bunun da motorun daha düşük ortalama güç düzeylerinde çalışması ile mümkün olduğu vurgulanmıştır.

Bu bağlamda, KSG sisteminin aktif olduğu konfigürasyonda elde edilen %30 civarındaki ortalama güç azalması, yalnızca yakıt tüketimi ve enerji verimliliği açısından değil, aynı zamanda motor, inverter, şanzıman ve soğutma sistemleri gibi temel bileşenlerin termal ve yapısal boyutlandırması açısından da önemli avantajlar sunmaktadır. Sistem tasarımı açısından ortalama motor gücü, sürekli yük altında çalışan bileşenlerin uzun dönemli dayanıklılığı ve enerji yönetimi stratejilerinin başarımları açısından belirleyici bir parametredir. Bu nedenle elde edilen sonuçlar, KSG sisteminin aktif kullanımının hem performans hem de sürdürülebilirlik açısından olumlu katkılar sunduğunu ortaya koymaktadır.

4.5.4.11 Anlık Tork Değerleri

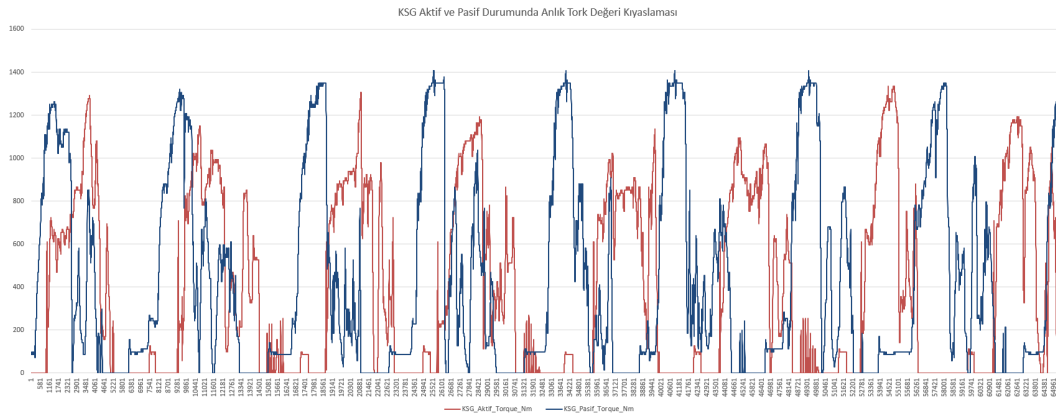
KSG sisteminin aktif ve pasif olduğu sürüş segmentlerinde motorun anlık tork üretimi karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Her iki durumda da araçtan alınan “ActualEngPercentTorque” sinyali kullanılmış ve yukarıda belirtilen yöntemle, nominal maksimum tork değeri olan 1.420 N m üzerinden anlık motor torku değerleri hesaplanmıştır.

KSG sisteminin aktif olduğu araçta elde edilen veriler, motorun daha düşük yük seviyelerinde çalıştığını göstermektedir. Bu konfigürasyonda motorun ortalama tork değeri 379,2 N m, medyan tork değeri ise 198,8 N m olarak belirlenmiştir. Maksimum anlık tork 1.334,8 N m seviyesinde gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, KSG desteği sayesinde motorun özellikle kalkış ve hızlanma anlarında ek tork yardımı olarak daha dengeli ve verimli bir yük dağılımında çalıştığını göstermektedir.

KSG’siz araçta ise motorun ortalama tork değeri 426,9 N m, medyan tork değeri 213,0 N m ve maksimum anlık tork değeri 1.405,8 N m olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, KSG’siz konfigürasyonda motorun daha sık yüksek tork taleplerine maruz kaldığını ve dolayısıyla daha geniş bir yük aralığında çalıştığını göstermektedir.

Özellikle yüksek tork bölgelerindeki veri yoğunluğu, motorun daha fazla zorlandığını ve bu durumun yakıt tüketimi ve mekanik aşınma üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceğini işaret etmektedir.

Sonuç olarak, KSG sistemi aktifken motor daha düşük ortalama tork seviyelerinde çalışmakta, bu da motorun hem verimlilik hem de dayanım açısından daha uygun koşullarda işletildiğini göstermektedir. KSG'siz durumda ise yüksek tork taleplerinin daha sık yaşandığı gözlenmiş ve bu durum sistemin genel yüklenmesini artırmıştır. KSG aktif ve pasif modlarda test aracının anlık tork değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.24'te gösterilmektedir.



Şekil 4.24 KSG aktif ve pasif modlarında anlık tork değerlerinin karşılaştırılması

4.5.5 KSG Aktif ve Pasif Modlarda Farklı Parametreler Üzerinden Yorumlanması

4.5.5.1 Yakıt Verimliliğinin Yorumlanması

Karşılaştırmalı yakıt verimliliği analizi hem bütünsel tüketim davranışını hem de sürüş içi ani değişimleri yakalayacak şekilde üç temel değerlendirme ölçütü üzerinden gerçekleştirilmiştir. Birinci değerlendirme ölçütü olan kümülatif yakıt tüketimi, test segmenti boyunca harcanan toplam yakıt hacmini ölçerek uzun dönemli maliyet ve enerji dengesi değerlendirmelerine imkân tanımaktadır. İkinci değerlendirme ölçütü spesifik yakıt tüketimi (L/100 km), kat edilen mesafeye oranlanmış yakıt tüketimini standartlaştırarak farklı sürüş profilleri veya araç konfigürasyonları arasında doğrudan karşılaştırmaya imkân sağlar. Üçüncü değerlendirme ölçütü anlık yakıt ekonomisi (km/L) ise araç hızı ve yakıt akış hızının oranlanmasıyla elde edilerek, dur-kalk döngüleri, ivmelenme ve sabit hız dönemlerindeki mikro ölçekli verimlilik dalgalanmalarını ortaya koyar. Bu üç boyutlu yaklaşım hem toplu performans hem de dinamik sürüş koşullarındaki verimlilik kazanımlarını ayrıntılı ve bütüncül bir biçimde ortaya koyar.

Kümülatif tüketim incelendiğinde, her iki araç benzer coğrafi profilde ve aynı süre ölçeğinde 11 min 50 s olarak test edilmiştir. KSG pasif modda toplam 6,21 km mesafe için 2,00 L yakıt kullanılırken; KSG aktif modda 5,61 km'de yalnızca 1,50 L harcanmıştır. Mesafe farkı normalize edildiğinde (L/100 km metriğine dönüştürme), pasif modun 32,21 L/100km'ye karşılık aktif modun 26,7 L/100km değerine ulaşması, aktif modun %17.1'e varan daha düşük spesifik tüketim sunduğunu göstermektedir. Böylece KSG aktif modda daha ekonomik ve daha verimli çalıştığını ortaya koymaktadır.

Anlık ekonomi verileri de benzer yönde bir iyileşme sunmaktadır. KSG pasif modda ortalama anlık verimlilik 4,21 km/L iken, KSG aktif modda bu değer 4,49 km/L'ye yükselmiştir.

Verimlilik dalgalanmalarının pasif modda 3,2 km/L'ye kadar düşmesine karşın; aktif modda frenleme esnasında overrun-fuel-cut uygulaması ve tork desteği sayesinde bu düşüşler daha sınırlı kalmış, sabit hız periyotlarında ise 5,2 km/L'ye kadar çıkmıştır.

KSG aktif olan araçta hem ortalama hem de pik merkezli yakıt akış hızlarında anlamlı düşüşler tespit edilmiştir. Bu sayede içten yanmalı motor, verim eğrisi üzerinde daha uzun süreli ve yüksek verimli bir işletim bandında çalışabilmiştir. Dolayısıyla, KSG destekli sistem pasif konfigürasyona kıyasla hem kümülatif hem de anlık ölçekte yakıt tüketimini istatistiksel olarak anlamlı düzeyde azaltmakta; bu kazanım, filo işletme maliyetlerinin düşürülmesinin yanı sıra, egzoz emisyonlarının kontrolü ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılması açısından kritik bir katkı sunmaktadır.

4.5.5.2 Tork-Hız Etkileşiminin İncelenmesi

Anlık motor torku ile araç hızı arasındaki ilişki, güç aktarım sisteminin sürüş koşullarına tepkisini değerlendirmek açısından önemlidir. Bu kapsamda yapılan analizde, KSG aktif ve pasif modlar için anlık tork değerleri zaman serisine göre karşılaştırılmıştır.

KSG Pasif Modda motorun ortalama tork seviyesi 426,9 N m, KSG Aktif Modda ise bu değer 379,2 N m olarak hesaplanmıştır. Ancak yalnızca ortalama değerler değil, tork dağılımının zaman içindeki davranışı da önemli farklılıklar göstermektedir. Pasif modda motor, uzun süre boyunca yüksek tork üretmiş; bu da içten yanmalı motorun daha geniş yük aralığında çalıştığını ortaya koymuştur. Buna karşın, aktif modda belirli zaman aralıklarında motor tork talebi sıfıra kadar inmiş, bu da KSG sisteminin ivmelenme ve kalkış anlarında devreye girerek motora doğrudan destek

sağladığını göstermektedir.

Araç hızının zaman içindeki eğilimiyle birlikte değerlendirildiğinde, pasif modda yüksek hız değerlerine ulaşmak için daha fazla tork üretildiği; aktif modda ise hibrit destek sayesinde benzer hız profiline daha düşük motor yüküyle ulaşıldığı görülmektedir. Özellikle KSG aktif modda motorun düşük yük aralıklarında daha sık çalışması hem yakıt tüketimini hem de termal ve mekanik zorlanmaları azaltıcı bir rol üstlenmiştir.

Bu analiz, hibrit destek sistemlerinin sürüş dinamiği üzerindeki etkisini doğrudan ortaya koymakta ve enerji verimliliği ile motor koruma stratejilerinin entegrasyonunun ne ölçüde başarılılabildiğini göstermektedir.

4.5.5.3 Motor Çalışma Aralığının Tork-Devir Etkileşimi Üzerinden İncelenmesi

KSG sisteminin motorun çalışma karakteristiği üzerindeki etkisini daha bütüncül bir şekilde değerlendirebilmek amacıyla, içten yanmalı motorun farklı devir ve tork aralıklarında ne ölçüde çalıştığı analiz edilmiştir. Bu analizde, anlık motor torku ile çıkış şaftı devir hızları eşzamanlı olarak değerlendirilmiş; elde edilen değerler motorun hangi yük-devir bölgelerinde daha yoğun çalıştığını ortaya koymuştur.

KSG Pasif Modda motor, daha yüksek ortalama tork (426,9 N m) ve devir 1.013 rpm aralığında çalışmakta; bu da motorun daha geniş bir çalışma bandında ve daha yoğun yük altında işletildiğini göstermektedir. KSG Aktif Modda ise ortalama değerler belirgin şekilde düşmüş; motorun ortalama 379,2 N m tork ve 916 rpm gibi daha düşük bir devir-tork bölgesine çekildiği tespit edilmiştir.

Bu fark, KSG sisteminin özellikle yüksek tork ihtiyacı doğan kalkış, ivmelenme ve rölanti dışı sabit hız durumlarında içten yanmalı motoru destekleyerek tahrik yükünü üzerine aldığını göstermektedir. Böylece motorun yüksek yük ve yüksek devir bölgelerinde çalışmak zorunda kalması engellenmiş; bunun yerine düşük devirde yüksek verimliliğe sahip çalışma zonlarında işletilmesi mümkün olmuştur.

Grafiksel analizlerde KSG aktif modda motorun daha kısa süreli tork salınımlarıyla çalıştığı, devir aralığının daha dar ve dengeli olduğu gözlemlenmiştir. Bu da sistemin optimum çalışma bölgesinde motoru tutma eğilimi ile uyumludur. Pasif modda ise motor geniş bir devir-tork bandına yayılmış, bu da hem pompalama kayıplarını hem de mekanik stresleri artırabilecek bir kullanım senaryosuna işaret etmektedir.

Bu değerlendirme sonucunda, KSG sistemi ile donatılmış bir yapının motorun termal ve mekanik yükünü düşürerek sadece anlık performans değil, aynı zamanda bileşen ömrü, bakım döngüleri ve enerji verimliliği hedefleri açısından da önemli avantajlar sağladığı anlaşılmaktadır. Özellikle filo araçlarında, KSG sisteminin sağladığı çalışma aralığı kontrolü, bakım aralıklarının uzaması ve işletme maliyetlerinin düşmesi açısından önemli bir avantaj olarak değerlendirilebilir. KSG aktif ve pasif durumlarındaki sayısal karşılaştırma tablosu tablo 4.1 de gösterilmiştir. KSG aktif ve pasif durumlardaki sayısal karşılaştırmalarla açıklamaları ise tablo 4.2 de gösterilmektedir.

Tablo 4.1 KSG aktif ve pasif modda sistem parametreleri

| Parametreler/Sistemler | KSG Aktif Modda | KSG Pasif Modda |
|-------------------------------|------------------------|------------------------|
| Zaman Referans Çerçevesi | 710,50 s | 710,64 s |
| Gerçek Motor Yüğü | % 26,7 | % 30,1 |
| Maksimum Mevcut Motor Yüğü | % 59,6 | % 66,7 |
| Anlık Yakıt Tüketim Hızı | 8,19 L/h | 9,75 L/h |
| Anlık Yakıt Ekonomisi | 4,49 km/L | 4,21 km/L |
| Toplam Kat Edilen Mesafe | 5,61 km | 6,21 km |
| Çıkış Şaft Devir Hızı | 916 rpm | 1.013 rpm |
| Anlık Araç Hızı | 28,4 km/h | 31,4 km/h |
| Spesifik Yakıt Tüketimi | 26,7 L/100km | 32,21 L/100km |
| Ortalama Motor Gücü | 40,99 kW | 58,90 kW |
| Anlık Motor Tork Değeri | 379,2 N m | 426,9 N m |

Tablo 4.2 KSG aktif ve pasif modların detaylı karşılaştırması

| Parametreler/Sistemler | KSG Aktif Modda | KSG Pasif Modda | Açıklama | Avantajlı Mod |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|--|-----------------------|
| Zaman Referans Çerçevesi | 710,50s | 710,64s | İki test senaryosu, birbirlerine çok yakın süre ile test edilmiştir. | Yorum Yapılmaz |
| Gerçek Motor Yüğü | %26,7 | %30,1 | Motorun mevcut koşullarda maksimum gücüne göre ne kadar yüklendiğini gösterir. Aktif modda yük daha düşüktür, bu da motor üzerindeki zorlanmayı azaltır. | Aktif Mod |
| Maksimum Mevcut Motor Yüğü | %59,6 | %66,7 | Anlık motorun içinde bulunduğu anlık koşullarda üretilebileceği en yüksek motor gücüne veya tork oranla, motorun kullanım kapasitesini temsil eder. Aktif modda %59,6'lık motor yüğü kullanıldığı ve %40,4 lük motor yükünün daha kullanılabileceği anlamına gelir. Pasif modda %66,7'lik motor yüğü kullanıldığı ve %33,3'lük motor yükünün daha kullanılabileceği anlamına gelir. Pasif modda motor, zorlanma veya ekstra güç gerektiren durumlara aktif modda kıyasla daha kısıtlı ve geç cevap verebilir. Bu sebepten aktif mod daha avantajlıdır. | Aktif Mod |
| Anlık Yakıt Tüketim Hızı | 8,19 L/h | 9,75 L/h | Motorun anlık olarak tükettiği yakıt miktarıdır. Aktif modda ortalama tüketim daha düşüktür. | Aktif Mod |
| Anlık Yakıt Ekonomisi | 4,49 km/L | 4,21 km/L | Bir litre yakıtla kaç km yol gidilebileceği gösterir. Aktif modda değer daha yüksektir ve yakıt verimliliği artmıştır. | Aktif Mod |
| Toplam Kat Edilen Mesafe | 5,61 km | 6,21 km | KSG Pasif Modda daha yüksek ortalama hızında olduğundan daha fazla mesafe kat etmiştir. | Yorum Yapılmaz |
| Çıkış Şaft Devir Hızı | 916 rpm | 1.013 rpm | Test araç şaftının ortalama dönüş hızıdır. Aktif modda daha düşük devirle çalışılmıştır, bu da motorun daha az zorlandığını ve daha verimli çalıştığını gösterir. | Aktif Mod |

Tablo 4.2 KSG Aktif ve Pasif Modların Detaylı Karşılaştırması (devamı)

| Parametreler/Sistemler | KSG Aktif Modda | KSG Pasif Modda | Açıklama | Avantajlı Mod |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|---|-----------------------|
| Anlık Araç Hızı | 28,4 km/h | 31,4 km/h | Pasif modda araç ortalama daha yüksek hızda gitmiştir. Bu, daha fazla yakıt tüketimi ile ilişkilidir. | Yorum Yapılmaz |
| Spesifik Yakıt Tüketimi | 26,7 L/100km | 32,21 L/100km | 100 km başına tüketilen yakıt miktarıdır. Aktif modda daha düşük tüketim vardır. | Aktif Mod |
| Ortalama Motor Gücü | 41 kW | 58,90 kW | Pasif modda motor daha fazla güç kullanmıştır, bu da daha fazla yakıt tüketimi ve daha fazla mekanik yük anlamına gelir. | Aktif Mod |
| Anlık Motor Tork Değeri | 379,2 N m | 426,9 N m | Motor tarafından üretilen tork değeridir. Aktif modda daha düşük tork ile araç hareket edebilmiştir, bu da KSG'nin desteği sayesinde gerçekleşmiştir. | Aktif Mod |

5

KRANK MİLİ MARŞ JENERATÖRÜ (KSG) SİSTEMİNİN SIMULİNK MODELLEMESİ VE SAHA VERİLERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI

KSG sistemlerinin performans değerlendirmesinde yalnızca saha verileri değil, aynı zamanda bu verilerin matematiksel olarak temsil edilebildiği sayısal modeller de oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Bu doğrultuda, çalışmanın bu bölümünde Krank Mili Marş Jeneratörü (KSG) destekli mild hibrit otobüs sisteminin MATLAB/Simulink ortamında modellenmesi gerçekleştirilmiş, ardından bu modelden elde edilen simülasyon verileri ile gerçek saha verileri karşılaştırılmıştır [47].

Modelleme sürecinde otobüsün fiziksel karakteristikleri, yol şartları ve sürüş profili dikkate alınarak sistemin dinamik tepkileri simüle edilmiştir. Simulink modelinde kullanılan hız ve ivme verileri, gerçek sürüş döngüsünden elde edilen ve zamana bağlı değişimi temsil eden referans sinyalleri (RefSpd ve RefAcc) üzerinden sisteme tanıtılmıştır. Modelin alt bileşenlerinde motor torku, devir hızı ve mekanik güç üretimi gibi temel parametrelerin hesaplanmasında hem kuvvet denklemleri hem de enerji dönüşüm prensipleri temel alınmıştır.

KSG destekli aracın Simulink tabanlı modelinden elde edilen çıkış verileri (motor torku, motor gücü, shaft devri, toplam mesafe vb.) ile vSignalyzer üzerinden kaydedilen saha verileri zaman ekseninde karşılaştırılmış, sistem doğrulama ve model güvenilirliği değerlendirilmiştir.

5.1 Araç Özelliklerinin Simulink Ortamına Tanımlanması

Simulink ortamında oluşturulan modelin fiziksel gerçekliğe uygunluğu, kullanılan araç parametrelerinin doğruluğu ile doğrudan ilişkilidir. Bu kapsamda, modellemeye ait temel araç karakteristikleri MATLAB üzerinden tanımlanmıştır. Test aracına ait tanımlanan parametreler ve değerleri aşağıda özetlenmiştir:

- Tekerlek yarıçapı: 0,48 m
- Araç kütlesi: 17.820 kg
- Atalet momenti: 1,02 kgm²
- Yuvarlanma direnç katsayısı: 0,01
- Aerodinamik sürüklenme katsayısı: 0,6

- Ön projeksiyon alanı: 8 m²
- Transmisyon oranı: 5,85
- Hava yoğunluğu: 1,2 kg/m³
- Yerçekimi ivmesi: 9,81 m/s²

Bu parametreler, dinamik analizlerin fiziksel gerçekliğe uygun yürütülebilmesi adına modelde sabit değişkenler olarak tanımlanmış ve ilgili Simulink bloklarına entegre edilmiştir. Özellikle sürüş sırasında karşılaşılan aerodinamik direnç, yuvarlanma kayıpları ve ivmelenme ihtiyacı bu değerler üzerinden hesaplanmıştır.

KSG aktif modunda CAN kaydı örnekleme frekansı 20 Hz olup her bir parametreden 14206 adet veri alınmıştır. Bu sebepten modelin çalışması süresince tanımlanan “drive_time” değişkeni 710,3 s sürüş çevrimi çalıştırılmıştır.

Bu çevrimde hız ve gerçek motor yükü parametreleri Microsoft Excel formatındaki dış veri dosyalarından alınarak modele beslenmiştir.

5.2 KSG Test Aracına Ait Parametrelerin Modellenmesi

KSG destekli yarı hibrit otobüs sistemine ait hız, tork ve güç dinamiklerinin zamana bağlı olarak analiz edilebilmesi amacıyla Simulink ortamında geliştirilen modelin simülasyon süreci detaylandırılmaktadır. Simülasyon yapısı, taşıt dinamiğine ilişkin temel fiziksel ilkeler dikkate alınarak oluşturulmuş ve referans sürüş çevrimine bağlı olarak test aracının anlık işletim parametreleri hesaplanmıştır.

Modelin giriş verisi, gerçek sürüş senaryosunu temsil eden motor yükü ve araç hızından oluşmaktadır. Bu veriler, saha testleri sırasında toplanan CAN sinyalleri kullanılarak oluşturulmuş ve MATLAB ortamına Microsoft Excel formatında aktarılmıştır. Simulink modeli içerisinde bu veriler, “Drive Cycle Source” bloğu aracılığıyla sisteme entegre edilmiş olup, modelin gerçek kullanım koşullarına uygun şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Böylece test aracının zamana bağlı performans karakteristikleri, gerçek ölçümlere dayalı olarak modellenebilir hale getirilmiştir.

Simülasyon yapısında, aracın ihtiyaç duyduğu tahrik kuvvetini F_{traction} olarak tanımlanmıştır. F_{traction} kuvveti yuvarlanma direnci, aerodinamik direnç ve ivmelenme kuvveti bileşenlerinin toplamı şeklinde hesaplanmaktadır:

$$F_{\text{traction}} = f \cdot m \cdot g + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 + 1,02 \cdot m \cdot \frac{dv}{dt} \quad (5.1)$$

Burada; f yuvarlanma direnç katsayısı, m araç kütlesi, g yerçekimi ivmesi, ρ_{air} hava yoğunluğu, C_d aerodinamik sürüklenme katsayısı ve A projeksiyon alanını ifade etmektedir. Araç üzerindeki toplam çekiş kuvveti bu parametreler kullanılarak hesaplanmakta, ardından transmisyon oranı ve tekerlek yarıçapı dikkate alınarak krank mili üzerindeki tork ihtiyacına dönüştürülmektedir.

Motor torku (τ) ve devir hızı (rpm) kullanılarak mekanik çıkış gücü (P_{motor}) aşağıdaki denklem ile modellenmiştir:

$$P_{\text{motor}}(\text{kW}) = \frac{\tau(\text{N m}) \times \omega_{\text{dönme}}(\text{rpm})}{9550} \quad (5.2)$$

Araç üzerindeki tekerleklerin dönme hızı, doğrusal hız (V) ile tekerlek yarıçapı (r) arasındaki ilişkiye dayanılarak hesaplanır. Tekerlek çevresel hızı, tekerleğin her bir tam dönüşte aldığı yol ile ilgilidir. Bu dönüş hızı, radyan cinsinden saniyede hesaplandıktan sonra dakikadaki devir sayısına (rpm) dönüştürülür.

$$\text{Wheel Rotational RPM} = \frac{V}{2\pi r} \cdot 60 = \frac{30V}{\pi r} \quad (5.3)$$

Burada:

- V : araç hızı (m/s)
- r : tekerlek yarıçapı (m)
- π : pi sayısı

Elde edilen tekerlek devir hızı, transmisyon oranı ile çarpılarak motorun krank milindeki devir sayısı hesaplanır:

$$\text{MotorRPM} = \text{WheelRPM} \cdot \text{Transmission} \quad (5.4)$$

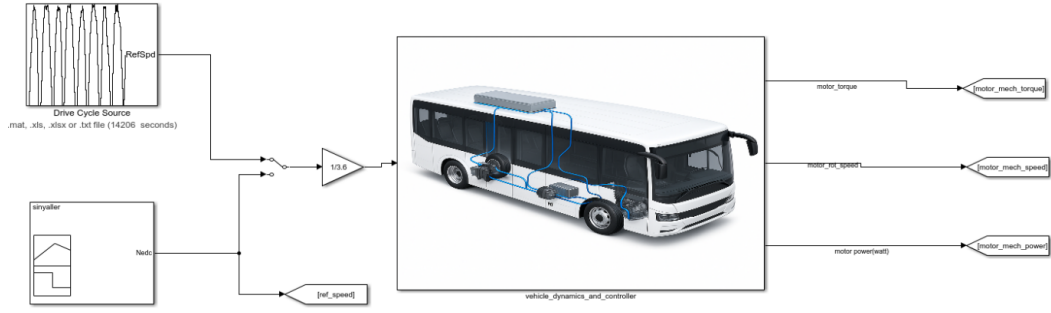
Bu formül, aracın şaft hızını ya da motor devrini, sadece araç hızı ve mekanik oranlar üzerinden tahmin etmeyi sağlamaktadır. Simülasyon modellerinde bu dönüşüm, motor gücü ve tork hesaplamalarının temel girdilerini oluşturmaktadır.

Simülasyonun çıkış portları aracılığıyla sistemden elde edilen temel performans göstergeleri aşağıda sıralanmıştır:

- Motorun anlık torku (N m)
- Motorun devir çıkış hızı (RPM)
- Motorun mekanik güç çıktısı (W)
- Aracın hızı (km/h)
- Toplam mesafe (km)

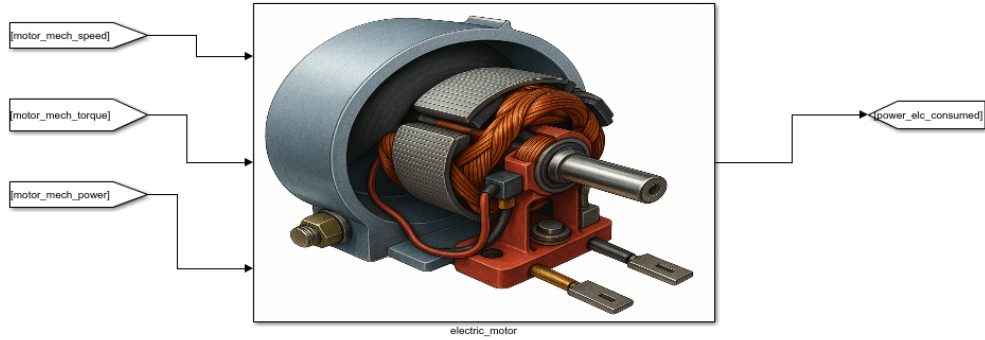
Bu parametrelerin her biri, modelin farklı bloklarında hesaplanan alt değişkenlerin zamana bağlı çözümleri sonucunda elde edilmiştir. Özellikle tork ve devir bilgileri kullanılarak motor gücü hesaplanmış; aynı zamanda hız bilgisinin integrasyonu yoluyla konum verisi elde edilmiştir.

Simülasyon süresi, kullanılan referans sürüş çevrimi ile uyumlu olacak şekilde 710,3 s olarak belirlenmiştir. Tüm çıkış değişkenleri, bu zaman aralığında örnekleme adımıyla sürekli olarak kaydedilmiş ve sonrasında saha verileri ile doğrudan karşılaştırılabilecek biçimde yapılandırılmıştır. Bu yapı, modelin geçerliliğinin test edilmesine ve gerçek sürüş koşullarına ne ölçüde yakınsama sağladığının değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.



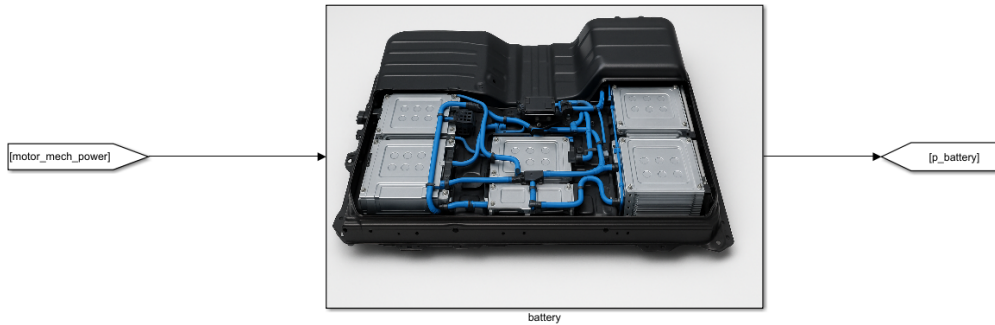
Şekil 5.2 KSG sistemi referans sürüş çevrimi

Şekil 5.3’de gösterilen elektrik motoru bloğu, mekanik hız (rpm) ve tork (N m) değerlerini temel olarak güç üretimini simüle etmekte; bu bloktan elde edilen çıkış verileri aynı zamanda elektrik tüketimi ve sistem verimliliğinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Motor verimliliği, belirli tork ve devir aralıklarına karşılık gelen bir verimlilik haritası (Efficiency Map) kullanılarak tanımlanmıştır. Bu harita, MATLAB ortamında oluşturulan bir matris üzerinden Simulink modeline aktarılmış ve motor davranışını enerji dönüşümü açısından gerçekçi biçimde modellemiştir.



Şekil 5.3 KSG elektrik motoru

Şekil 5.4’te gösterilen batarya sistemi, elektrik motorunun talep ettiği güce karşılık enerji sağlamaktadır.



Şekil 5.4 KSG batarya sistemi

Motor çıkış gücü, batarya modülüne aktarılmakta ve batarya çıkış gücüne göre enerji tüketimi belirlenmektedir. Bu tüketim değeri, bataryanın toplam kapasitesiyle ilişkilendirilerek anlık şarj durumu (State of Charge - SoC) hesaplanmaktadır. Böylece enerji yönetim sistemi, batarya durumunu dinamik olarak izleyebilmekte ve tüketim verilerine dayalı analizler yapılabilmektedir. Bu blok Şekil 5.5'te gösterilmiştir.

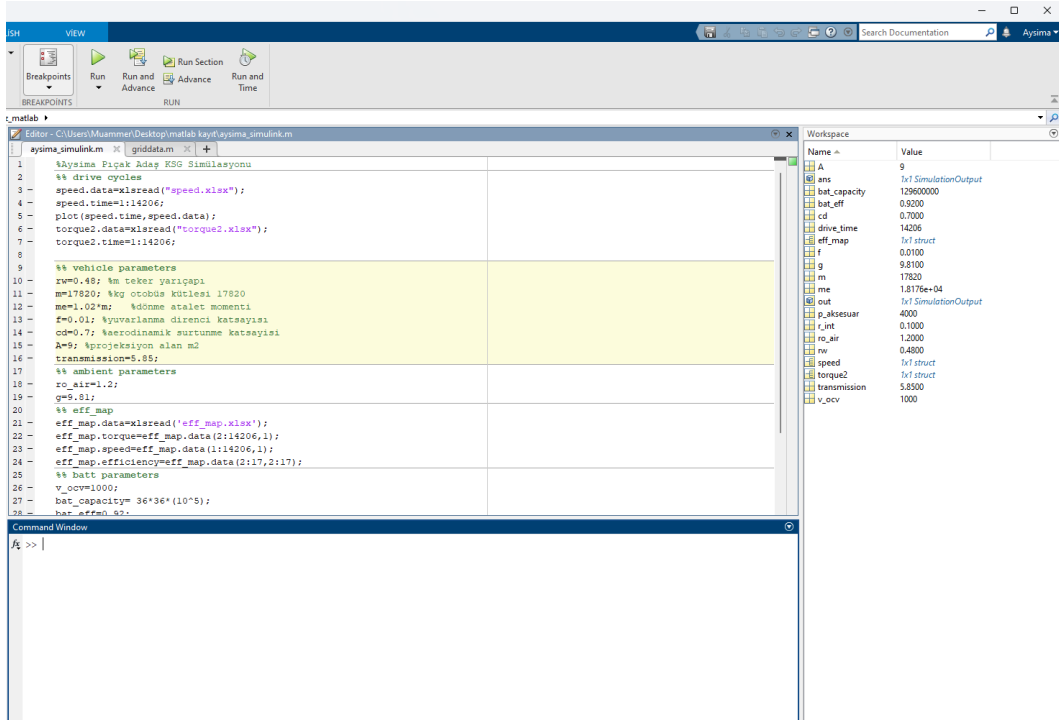


Şekil 5.5 Batarya şarj durumu (SoC) gösterimi

Tüm bu bileşenler görsel olarak temsil edilerek modelin yapısal bütünlüğü artırılmış, enerji akışı kolay anlaşılır hale getirilmiştir. Görsellerde motor torku, motor devri ve güç bilgileri ile batarya modülünün iç bağlantıları ve SoC seviyeleri şematik olarak gösterilmiştir. Bu yaklaşım, hem mühendislik açısından sistemin fonksiyonel bütünlüğünü sağlamakta hem de akademik düzeyde analiz edilebilirliği artırmaktadır.

5.4 KSG Destekli Test Aracının Simülasyonu

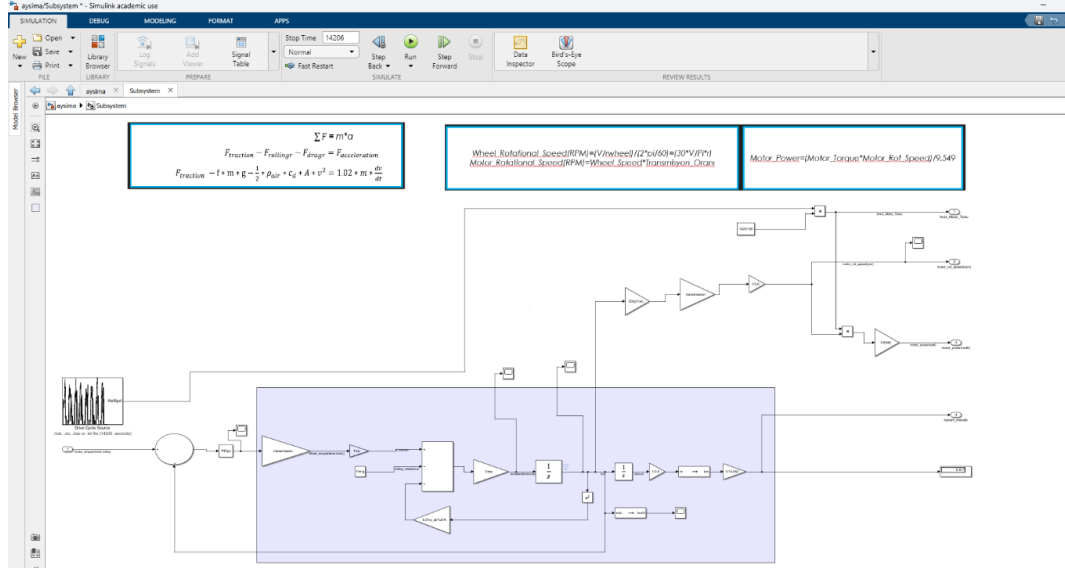
KSG destekli yarı hibrit test aracının enerji yönetimi ve dinamik performansının değerlendirilmesi amacıyla oluşturulan Simulink modeli, batarya güç tüketimini ve sürüş süresince oluşan temel performans parametrelerini eş zamanlı olarak hesaplayacak şekilde Şekil 5.6'da görüldüğü gibi yapılandırılmıştır.



Şekil 5.6 KSG araç teknik değerlerinin Matlab parametresine dönüştürülmesi

Modelin batarya hesaplama bloğunda, motor ve aksesuar yüklerinden kaynaklanan toplam elektriksel güç talebi dikkate alınarak batarya çıkış gücü hesaplanmaktadır. Bu blok, batarya iç direnci ve açık devre gerilimi gibi parametreleri göz önünde bulundurarak batarya akımını belirlemede, ardından bu akım bilgisi ile batarya gücü dinamik olarak elde edilmektedir. Bu yapı, batarya tüketim profilinin zamana bağlı olarak gerçekçi bir şekilde izlenebilmesine olanak tanımaktadır.

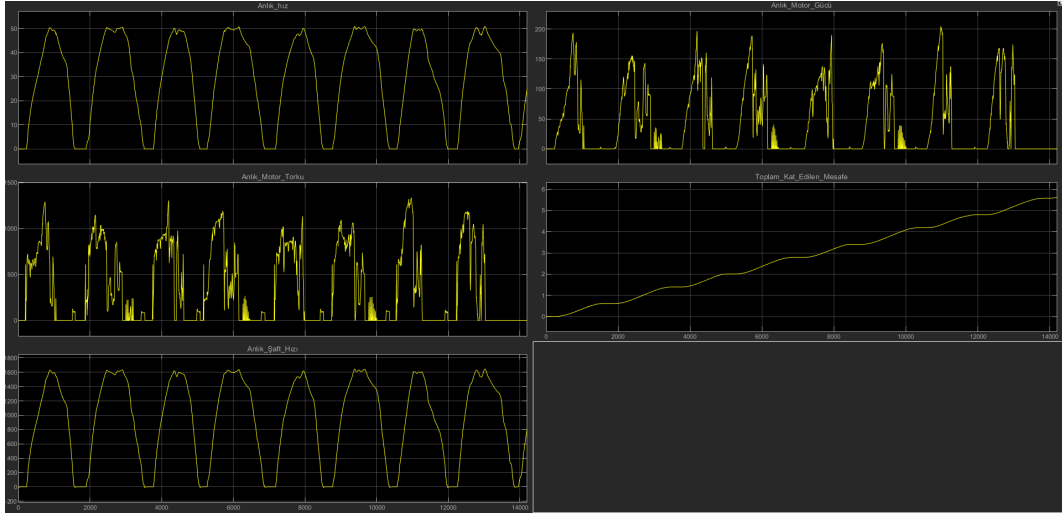
Simülasyon çıktılarının elde edildiği blok yapısı ise motor torku, motor hızı, mekanik güç, araç hızı ve toplam kat edilen mesafe gibi performans göstergelerini zamana bağlı olarak üretmektedir. Gerçek sürüş çevrimini temsil eden hız profili modele giriş olarak verilmiş, bu profil doğrultusunda motor torku ve devir sayısı gibi parametreler fiziksel ilkeler çerçevesinde hesaplanmıştır. Bu veriler sayesinde aracın anlık işletim durumu yüksek zaman çözünürlüğü ile gözlemlenmiş ve sistemin sürüş dinamiklerine verdiği tepkiler analiz edilmiştir. KSG araç dinamik model yapısı Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 KSG araç dinamiği ve hız kontrolüne ait Simulink modeli yapısı

Gerçekleştirilen bu modelleme ve simülasyon süreci sayesinde, KSG sistemine sahip bir aracın sürüş süresince sergilediği enerji tüketim profili ile dinamik tepkileri aynı anda değerlendirme imkânı sağlanmış; modelin doğrulanması ve saha verileri ile uyumluluğu sonraki adımlarda karşılaştırmalı olarak ele alınmak üzere hazırlanmıştır.

Simülasyon çalıştırıldığında elde edilen çıktılar, modelin zamana bağlı performans parametrelerini başarıyla yansıttığını göstermektedir. Yukarıda yer alan grafiklerde; anlık hız (km/h), motor torku (N m), motor gücü (Watt), şaft devri (rpm) ve toplam kat edilen mesafe (km) değişkenlerinin zaman serisi boyunca nasıl şekillendiği Şekil 5.8’de açıkça gözlemlenmektedir.



Şekil 5.8 KSG destekli test aracına ait simülasyon modeli üzerinden elde edilen zamana bağlı değerler

Anlık hız grafiği, referans sürüş çevrimini doğrular nitelikte düzenli artış ve azalış eğilimleri göstermektedir. Bu durum, modelin hız kontrol yapısının doğru çalıştığını ve belirlenen hız profiline başarılı şekilde karşılık verdiğini göstermektedir. Anlık motor torku eğrisi, taşıtın ivmelenme ihtiyacına paralel olarak yüksek dalgalanma göstermekte ve özellikle kalkış ile yokuş çıkışlarında belir-

gin artışlar sergilemektedir. Bu durum, kontrol algoritmasının tork gereksinimlerine duyarlı biçimde çalıştığını ortaya koymaktadır.

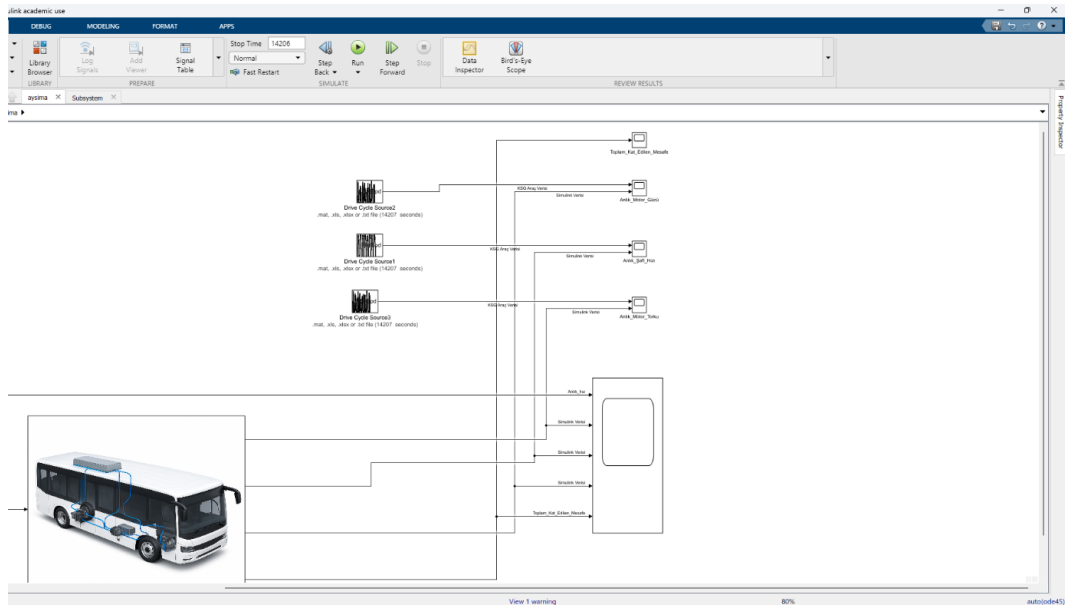
Motor gücü grafiğinde, tork ve devir hızının bileşimi sonucunda oluşan güç talebi zamana bağlı olarak hesaplanmış ve sürüş çevriminin farklı yüklenme bölgelerinde keskin artışlar göstermiştir. Özellikle ivmelenme anlarında kısa süreli yüksek güç taleplerinin olduğu net biçimde izlenmektedir.

Şaft hızı (rpm) eğrisi ise araç hız profilini doğrudan yansıtmakta, motorun dönüş hızı ve transmisyon oranına bağlı olarak tutarlı bir biçimde şekillenmektedir. Bu parametre, mekanik sistemin çalışma frekansını ortaya koymakta ve motor torku ile verimlilik analizine temel teşkil etmektedir.

Toplam kat edilen mesafe verisi ise integral temelli hesaplamayla elde edilmiş ve referans sürüş döngüsünün sonunda yaklaşık 5,6 km bir yolun tamamlandığını göstermektedir. Bu doğrusal artış eğrisi, modelin mesafe entegrasyon yapısının doğru çalıştığını ve fiziksel ölçümlere uygun sonuçlar verdiğini kanıtlamaktadır.

5.5 Saha Verisi ile Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

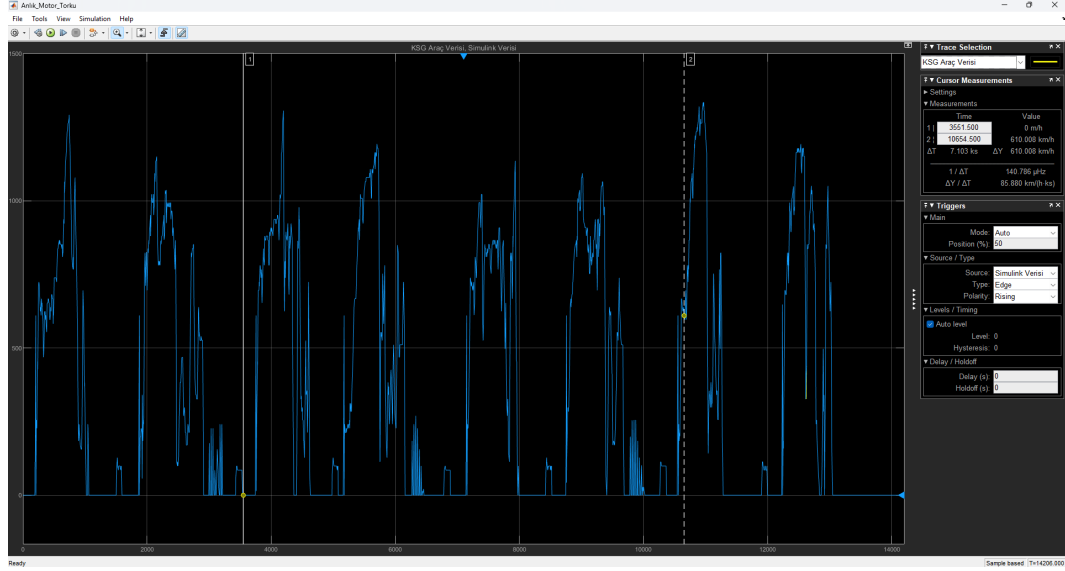
Modelin geçerliliğini test etmek ve sahada ölçülen verilerle tutarlılığını değerlendirmek amacıyla, gerçek sürüş testlerinden elde edilen CAN temelli veri setleri MATLAB ortamına aktarılmış ve "Drive Cycle Source" Şekil 5.9'da görülen bloklar ile Simulink modeline entegre edilmiştir. Bu veri seti, test aracının gerçek sürüş çevriminde kaydedilen motor torku, devir hızı (rpm) ve anlık güç gibi performans parametrelerini zamana bağlı olarak içermektedir.



Şekil 5.9 Gerçek sürüş verilerinin Drive Cycle Source blokları ile Simulink modelinde kıyaslanması

Simülasyon süreci, saha verilerinden alınan referans hız ve yük sinyallerine göre yeniden çalıştırılmış; modelin ürettiği çıktılar ile saha testlerinden elde edilen karşılıkları aynı zaman ekseninde grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Simulink modeli ile saha verisinin anlık motor torku, motor şaft devri ve motor çıkış gücü gibi temel dinamik tepkilerinin uyumu incelenmiştir.

Motor torku verilerinin karşılaştırmalı analizi, Simulink modelinden elde edilen simülasyon sonuçları ile sahadan alınan CAN tabanlı veriler arasında yüksek düzeyde bir benzeşimin mevcut olduğunu ortaya koymaktadır. Grafikte mavi renkle gösterilen Simulink verisi ile sarı renkle temsil edilen gerçek saha ölçüm verisi, neredeyse birebir örtüşmektedir. Bu durum, modelin motor yük değişimlerine gösterdiği dinamik tepkilerin sahadaki ölçümlerle uyumlu olduğunu Şekil 5.10'da açıkça göstermektedir.

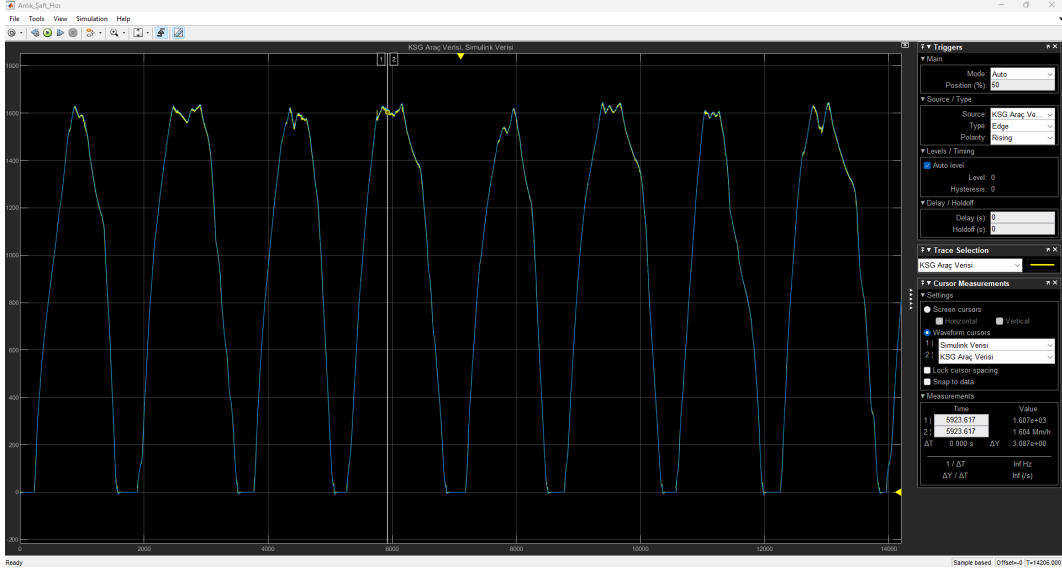


Şekil 5.10 Gerçek sürüş verileri ile simüle edilen motor torku profillerinin karşılaştırılması

Torkun sıfır olduğu rejeneratif fazlar ve yüklenme anlarındaki geçişler dahil olmak üzere tüm zaman aralığında hem eğim hem de tepe noktalarında fark edilebilir bir ayrışma gözlenmemektedir. Simulink modeli, gerçek aracın davranışını yalnızca genel eğilim düzeyinde değil, aynı zamanda anlık ve yüksek frekanslı değişimleri de kapsayacak şekilde doğru şekilde yansıtmaktadır.

Bu sonuç, sistem modellemesinde kullanılan fiziksel parametrelerin ve hesaplama yöntemlerinin doğruluğunu desteklemekte, modelin ileri düzey tahminleme ve analiz senaryolarında kullanılabilirliğini teyit etmektedir.

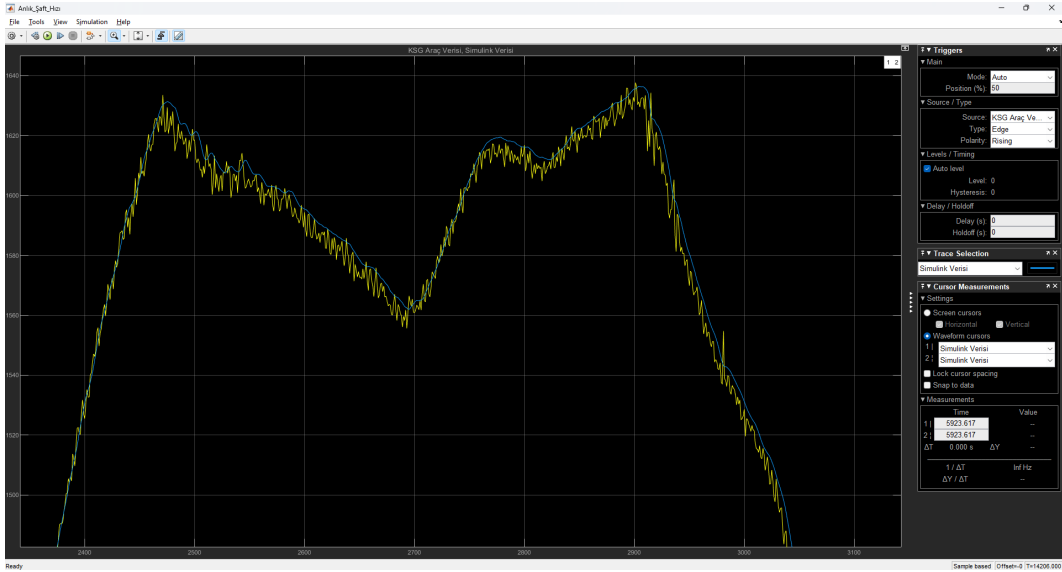
Şaft devri (motor çıkış devir hızı) karşılaştırması, Simulink modeli ile sahadan alınan gerçek CAN verisinin büyük ölçüde üst düzey uyum içinde olduğu Şekil 5.11'de ortaya koyulmuştur. Simülasyon verisi (mavi) ile saha ölçüm verisi (sarı) neredeyse tüm zaman serisi boyunca birebir çakışmakta, yalnızca milisaniyelik geçici sapmalar dışında dikkate değer bir fark gözlemlenmemektedir.



Şekil 5.11 Gerçek sürüş verileri ile simüle edilen anlık şaft hızı profillerinin karşılaştırılması

Bu yakınsama, modelde kullanılan tekerlek yarıçapı, transmisyon oranı ve motor-geometri parametrelerinin hem değer hem de fonksiyonel ilişkiler açısından doğru biçimde tanımlandığını göstermektedir. Özellikle hız artış ve azalış fazlarında, eğimlerin birebir örtüşmesi; modelin ivmelenme ve yavaşlama senaryolarında gerçek araca benzer durumda tepki verdiği Şekil 5.12’de görülmektedir.

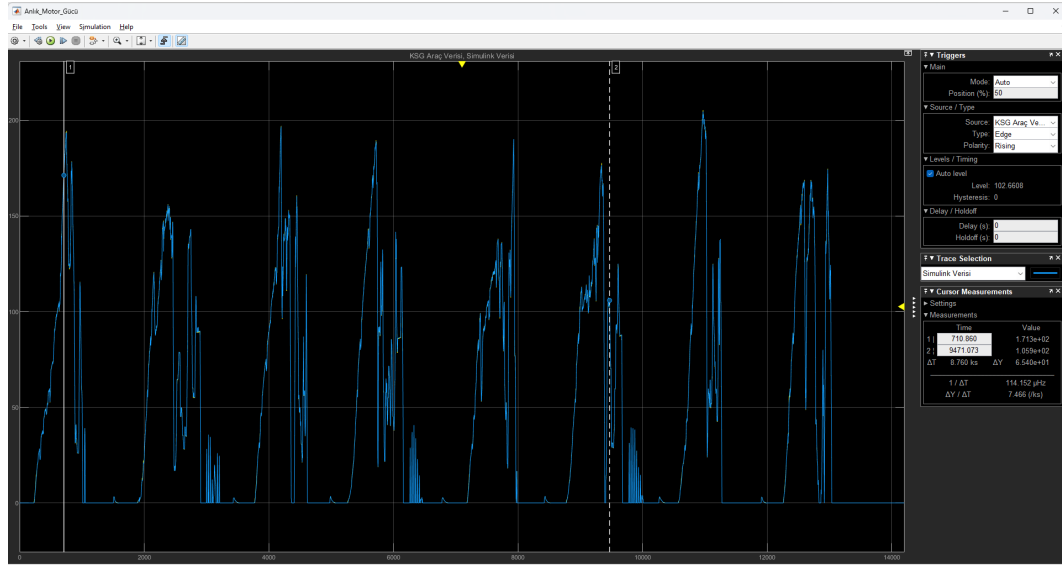
Ayrıca, her iki veri setinde de şaft devrinin tepe ve taban noktaları, belirgin faz geçişleri ile aynı anlara denk gelmektedir. Bu durum, modelin sadece ortalama eğilimleri değil, yüksek frekanslı dinamik salınımları da başarıyla takip edebildiğini göstermektedir. Simulink modelinin bu düzeyde tutarlılık göstermesi, şaft devrine bağlı tüm enerji ve tork hesaplamalarının güvenilirliği açısından büyük önem arz etmektedir.



Şekil 5.12 Anlık şaft hızına ait yakınlaştırılmış saha ve Simulink verilerinin incelenmesi

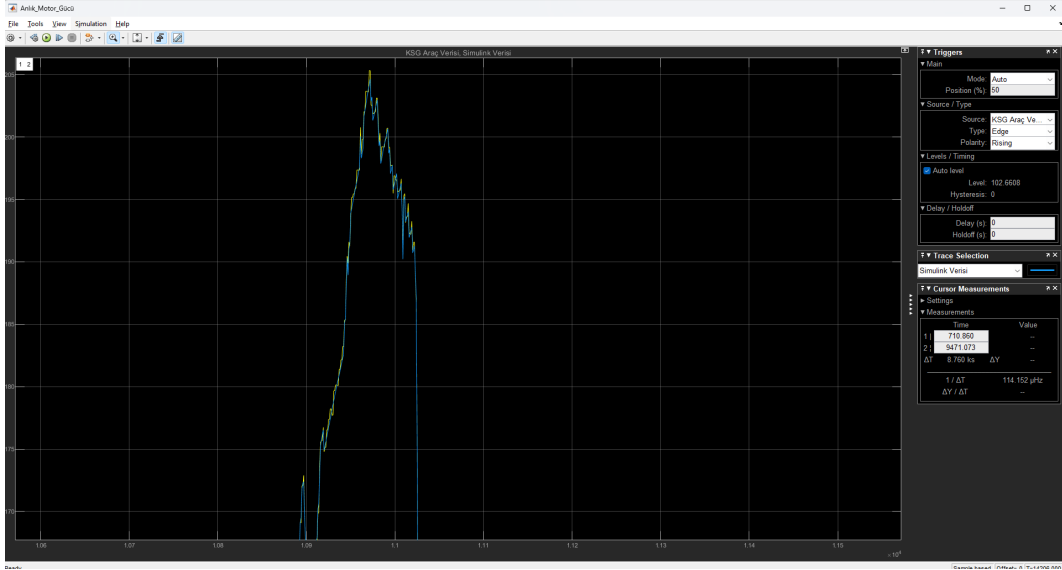
Bu bağlamda, şaft devri karşılaştırması, geliştirilen modelin fiziksel gerçekliği yüksek düzeyde temsil ettiğini ve simülasyon ortamında güvenle kullanılabileceğini doğrulamaktadır.

Motor çıkış gücü karşılaştırmasına ilişkin analizlerde, Simulink modelinden elde edilen hesaplamalı güç değerleri ile sahada gerçekleştirilen testlerden toplanan gerçek motor gücü verileri arasında yüksek düzeyde bir eğilim benzerliği gözlemlenmiştir. Zaman serisi boyunca elde edilen veriler incelendiğinde, mavi renkle temsil edilen Simulink çıktıları ile sarı renkle gösterilen saha ölçümleri özellikle ivmelenme ve yavaşlama fazlarında birbirine oldukça yakın tepkiler sergilemektedir. Bu durum, modelin motor güç üretimindeki dinamik davranışları gerçek sistemle uyumlu şekilde simüle edebildiği Şekil 5.13'te görülmektedir.



Şekil 5.13 Simülasyon ve saha verisiyle motor çıkış gücünün karşılaştırılması

Bununla birlikte, bazı kısa süreli zaman dilimlerinde Simulink verileri ile saha verileri arasında kısmi sapmalar meydana gelmiştir. Bu farkların olası nedenleri arasında batarya iç direnci kaynaklı gerilim düşüşleri, sıcaklık gibi çevresel değişkenlerin sistem yanıtına etkisi ve CAN tabanlı veri kayıt sisteminin örnekleme frekansı yer almaktadır. Gerçek yol koşullarında gözlenen mikro salınımlar, ani yük değişimleri ve elektriksel kayıplar gibi parametreler, saha verisinin daha dalgalı bir profil sergilemesine neden olurken; Simulink modeli, varsayımsal ideal koşullar altında çalıştığı için daha düzgün ve keskin geçişli bir güç eğrisi üretmektedir. Bu eğrilerin keskinliğini görebilmek için grafik yakınlaştırılmış ve Şekil 5.14'te görülmektedir.



Şekil 5.14 Motor çıkış gücüne ait yakınlştırılmış saha ve Simulink verilerinin incelenmesi

Tüm bu farklılıklara karşın hem mutlak değerler hem de zamana bağlı değişim karakteristikleri açısından eğrilerin formu, eğim geçişleri ve maksimum güç noktalarının büyük ölçüde örtüştüğü görülmektedir. Bu benzerlik, motor çıkış gücünün temel belirleyicileri olan tork ve motor devir hızı gibi parametrelerin Simulink ortamında doğru şekilde modellenmiş olduğunun bir göstergesidir.

Gerçekleştirilen bu karşılaştırma çalışması sonucunda, geliştirilen Simulink modelinin yalnızca temel veriler düzeyinde değil; aynı zamanda bu verilerden türetilen motor çıkış gücü gibi türevsel performans parametrelerinde de yüksek doğrulukla sonuç üretebildiği ortaya konmuştur. Elde edilen bu yapısal ve sayısal uyum, modelin gelecekteki kontrol algoritması testleri, senaryo değerlendirmeleri ve optimizasyon çalışmaları için güvenilir bir dijital ikiz olarak kullanılabilceğini teyit etmektedir.

6.1 Genel Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, krank mili marş jeneratörü (KSG) sisteminin hibrit otobüslerdeki performansı, hem gerçek sürüş verilerine dayanan saha ölçümleri, hem de Simulink tabanlı sayısal modelleme yaklaşımları ile kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen modelleme sürecinde, araç üzerindeki motor torku, şaft devri, çıkış gücü ve kat edilen mesafe gibi performans göstergeleri zamana bağlı olarak hem simülasyon ortamında, hem de sahadan elde edilen CAN verileri üzerinden analiz edilmiştir. Böylece KSG sisteminin aktif ve pasif modlardaki işleyişi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Elde edilen bulgular, KSG sisteminin aktif modda çalıştığı durumlarda özellikle düşük hızlarda enerji geri kazanımı sağladığını ve buna bağlı olarak yakıt tüketiminde kayda değer bir iyileşme meydana geldiğini ortaya koymuştur. Şaft devri ve motor torku çıktılarında gözlenen yüksek uyum, Simulink modelinin fiziksel sistemin dinamik davranışlarını başarıyla temsil ettiğini ortaya koymaktadır.

Genel olarak, KSG sisteminin şehir içi toplu taşıma uygulamalarında enerji verimliliği, emisyon azaltımı ve işletme maliyetleri açısından önemli kazanımlar sunduğu görülmüştür. Simulink modeli aracılığıyla gerçekleştirilen bu analiz, hibrit sistemlerin gerçek koşullar altında modellenebilirliğini ortaya koymakta; ayrıca gelecekteki kontrol algoritmalarının geliştirilmesi için sağlam bir temel oluşturmaktadır.

6.2 Çalışmanın Sınırlılıkları

Bu çalışmada geliştirilen Simulink modeli, gerçek sürüş verilerine mümkün olduğunca yakınsayan bir yapıyla oluşturulmuş olsa da bazı sınırlamalara sahiptir. İlk olarak, modelde kullanılan fiziksel parametreler sabit kabul edilmiş ve çevresel koşulların (örneğin sıcaklık, batarya yaşlanması, yol eğimi ve yük profili gibi) etkileri dikkate alınmamıştır. Bu durum, modelin her koşul altında geçerliliğini kısıtlayabilir.

Ayrıca, sahadan alınan CAN verilerinin sınırlı örnekleme frekansı ve senkronizasyon hassasiyeti nedeniyle, ani yük geçişleri veya kısa süreli salınımların modellenmesinde bazı sınırlamalar ortaya çıkmıştır. Kontrol algoritması temel mantık kurallarına dayanmakta olup, gerçek araçlarda kullanılan uryarlanabilir, arıza toleranslı ya da sıcaklığa duyarlı stratejiler bu çalışmaya dahil edilmemiştir.

Buna ek olarak, model yalnızca belirli bir sürüş çevrimine göre kalibre edilmiştir. Farklı yol türleri, trafik yoğunluğu veya mevsimsel koşullar gibi faktörler göz önünde bulundurulmamıştır. Batarya sistemine ilişkin olarak ise detaylı bir termal modelleme veya degradasyon etkisi modellenmemiştir. Bu durum, uzun süreli performans analizlerinin yapılmasını ve enerji verimliliğinin zamanla değişimini değerlendirmeyi sınırlandırmaktadır.

6.3 Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Bu çalışma doğrultusunda gerçekleştirilebilecek gelecekteki araştırma alanları aşağıda özetlenmiştir:

- Batarya sisteminin termal ve yaşlanma (degradasyon) etkilerini içeren çoklu fiziksel (*multi-physics*) detaylı bir model ile yeniden yapılandırılması.
- Gerçek yol koşullarını daha iyi temsil eden WLTP, SORT veya özel şehir içi sürüş çevrimleriyle modelin genellenebilirliğinin test edilmesi.
- KSG sisteminin farklı hibrit konfigürasyonlar (paralel hibrit, seri hibrit, *plug-in* hibrit vb.) ile karşılaştırmalı performans analizlerinin yapılması.
- Simülasyon yapısının genişletilerek, gerçek zamanlı veri işleme ve arıza tespiti gibi çevrim içi uygulamalarda kullanılması.

Bu önerilerin hayata geçirilmesi hem modelin doğruluk seviyesini hem de hibrit araç teknolojileri alanında yapılan sistem analizlerinin kapsamını önemli ölçüde arttıracaktır.

- [1] M. Ehsani, Y. Gao A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*. CRC Press, 2009.
- [2] M. Weiss, A. Zerfass E. Helmers, “Fully electric and plug-in hybrid cars - An analysis of learning rates, user costs, and costs for mitigating CO2 and air pollutant emissions,” *Journal of Cleaner Production*, c. 212, ss. 1478–1489, 2019. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.019. erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.019>.
- [3] BloombergNEF, “Electric Vehicle Outlook 2024,” BloombergNEF, tek. rap., 2024. erişim adresi: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/> (erişim tarihi 01/01/2025).
- [4] C. C. Chan, “The state of the art of electric and hybrid vehicles,” *Proceedings of the IEEE*, c. 90, no. 2, ss. 247–275, 2002.
- [5] W. Zhu Y. Chen, “Research on the Start-Stop Control Strategy of the 48V BSG Hybrid System,” *SAE Technical Paper Series*, no. 2021-01-0886, 2021. doi: 10.4271/2021-01-0886.
- [6] B. H. Lee, S. W. Lee H. J. Kim, “Design and Control of a 48V Mild Hybrid Powertrain with Crankshaft ISG,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, c. 69, no. 9, ss. 9876–9887, 2020.
- [7] M. Schünemann M. Büchner, “Development of a 48V Mild Hybrid Powertrain Architecture for Fuel Efficiency,” *MTZ Worldwide*, c. 79, no. 9, ss. 46–51, 2018.
- [8] A. Boyalı, “Hibrit Elektrikli Yol Taşıtlarının Modellenmesi ve Kontrolü,” Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2008.
- [9] International Energy Agency, “Global EV Outlook 2023: Catching up with climate ambitions,” International Energy Agency (IEA), tek. rap., Nis. 2023. erişim adresi: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>.
- [10] European Environment Agency, “Environmental noise in Europe — 2020,” European Environment Agency, Copenhagen, tek. rap. EEA Report No 22/2019, 2020. doi: 10.2800/686249. (erişim tarihi 01/01/2025).
- [11] European Commission, “The European Green Deal,” European Commission, Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions COM(2019) 640 final, 2019. erişim adresi: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN> (erişim tarihi 01/01/2025).

- [12] Toyota Motor Corporation, *Toyota Launches the Revolutionary PRIUS Hybrid Passenger Vehicle: Satisfying Both the Driver and the Environment for the Twenty-First Century*, Basın Bülteni, Ekim 1997. erişim adresi: <https://global.toyota/en/detail/7905316> (erişim tarihi 01/01/2025).
- [13] Alternative Fuels Data Center, *Plug-In Hybrid Electric Vehicle Basics*, U.S. Department of Energy. erişim adresi: <https://afdc.energy.gov/vehicles/electric-basics-phev> (erişim tarihi 01/01/2025).
- [14] M. R. Cuddy K. B. Wipke, “Analysis of the fuel economy benefit of driveline electrification using GPS data,” *SAE Technical Paper Series*, no. 970290, 1997. doi: 10.4271/970290.
- [15] A. Pamidimukkala, S. Kermanshachi, J. M. Rosenberger G. Hladik, “Barriers and motivators to the adoption of electric vehicles: A global review,” *Green Energy and Intelligent Transportation*, c. 3, 100153, 2024, Available online 6 January 2024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geits.2024.100153>.
- [16] B. Kumar, “The Role of Government Policies in Promoting Electric Vehicle Adoption: A Global Perspective,” *Shodh Sagar Journal of Electric Vehicles*, c. 1, no. 3, ss. 18–23, 2024.
- [17] International Energy Agency, “Global EV Outlook 2021: Policies to promote electric vehicle deployment,” International Energy Agency, Paris, tek. rap., May. 2021. erişim adresi: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021/policies-to-promote-electric-vehicle-deployment>.
- [18] I. F. Fileru, “Toyota Prius—A Successful Pioneering in Hybrid Vehicle World,” *Applied Mechanics and Materials*, c. 809-810, ss. 1139–1144, 2015. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.1139>.
- [19] MAN Truck & Bus, *City bus with a view: MAN Lion’s Intercity LE now also comes in a City version with MAN EfficientHybrid*, Basın Bülteni, Eyl. 2022. erişim adresi: <https://press.mantruckandbus.com/corporate/download/1269090/man-pcbus2022-new-lions-intercity-le-city-en.pdf> (erişim tarihi 01/01/2025).
- [20] *CITARO HYBRID*, Mercedes-Benz Bus, 2025. erişim adresi: https://www.mercedes-benz-bus.com/en_GB/models/citaro/citaro-hybrid.html (erişim tarihi 01/01/2025).
- [21] BMW Türkiye, *Elektrikli Otomobil Türleri*. erişim adresi: <https://www.bmw.com.tr/tr/bmw-i-ve-e-mobilite/elektrikli-otomobil-turleri.html>.
- [22] A. E. Bulgu, “Tekerlek Motorlu Seri Hibrit Elektrikli Araçlar için Kontrol Algoritmalarının Geliştirilmesi,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2010.
- [23] C. Mi, M. A. Masrur D. W. Gao, *Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives*. Wiley, 2011.

- [24] H. Zhang, H. Chen S. Li, “Energy management strategies of hybrid electric vehicles: A review,” *Energy Conversion and Management*, c. 1, ss. 1273–1287, 2018.
- [25] J. Liu, H. Chen L. Wang, “Energy optimization and control strategy for hybrid electric vehicles,” *Energy Reports*, c. 6, ss. 243–250, 2020.
- [26] C. Musardo B. Staccia, “Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles,” Master’s Thesis, Politecnico Di Milano, Milano, 2003.
- [27] P. Pisu G. Rizzoni, “A comparative study of supervisory control strategies for hybrid electric vehicles,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, c. 15, no. 3, ss. 506–518, 2007.
- [28] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2024*. Paris: International Energy Agency, Ekim 2024. erişim adresi: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>.
- [29] European Environment Agency, “Transport and environment report 2021: Decarbonising road transport — the role of vehicles, fuels and transport demand,” European Environment Agency, Copenhagen, EEA Report No 02/2022, 2022. doi: 10.2800/68902.
- [30] U.S. Department of Energy, *Electric Vehicle Benefits and Considerations*, U.S. Department of Energy. erişim adresi: https://afdc.energy.gov/fuels/electricity_benefits.html (erişim tarihi 01/01/2025).
- [31] E. V. Kiseleva, N. S. Kaminskiy V. A. Presnykov, “Study of Fuel Efficiency of Hybrid Vehicles,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, c. 459, no. 2, s. 022 086, 2020. doi: 10.1088/1755-1315/459/2/022086.
- [32] G. Wager, J. Whale T. Bräunl, “Performance evaluation of regenerative braking systems,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, c. 232, no. 10, ss. 1339–1351, 2018. doi: 10.1177/0954407017728651.
- [33] M. Woodward ve diğ., “Electric vehicles: Setting a course for 2030,” Deloitte Insights, tek. rap., Tem. 2020. erişim adresi: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/future-of-mobility/electric-vehicle-trends-2030.html> (erişim tarihi 01/01/2025).
- [34] European Alternative Fuels Observatory. “Germany – Incentives and Legislation.” (Nis. 2025), erişim adresi: <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/germany/incentives-legislations> (erişim tarihi 25/04/2025).
- [35] European Alternative Fuels Observatory (EAFO). “France - Incentives and Legislation.” (Nis. 2025), erişim adresi: <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/france/incentives-legislations> (erişim tarihi 25/04/2025).

- [36] Rijksoverheid. “Belastingvoordelen voor schone en zuinige auto’s en motoren.” (2025), erişim adresi: <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/belastingen-op-auto-en-motor/belastingvoordelen-klimaat>.
- [37] A. Hove, C. H. Springer L. Jiaming, “Electric Vehicles,” içinde *Guide to Chinese Climate Policy*, Oxford Institute for Energy Studies, 2024, böl. Part II, Section 16.C: Domestic Policies - Vehicles - Electric Vehicles. erişim adresi: <https://chineseclimatepolicy.oxfordenergy.org/book-content/domestic-policies/vehicles/electric-vehicles/> (erişim tarihi 01/01/2025).
- [38] Ministry of the Environment, Japan, *Taxation as an Environmental Measure Related to Vehicles*. erişim adresi: <https://www.env.go.jp/en/policy/tax/auto/ch3.html> (erişim tarihi 01/01/2025).
- [39] T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, *İKLİM VE EKONOMİ: SÜRDÜRÜLEBİLİR MOBİLİTE ARAÇ VE TEKNOLOJİLERİ ZİRVESİ*, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Resmî Web Sitesi, Medya Haberleri, May. 2025. erişim adresi: <https://www.sanayi.gov.tr/medya/haber/iklim-ve-ekonomi-surdurulebilir-mobilite-arac-ve-teknolojileri-zirvesi>.
- [40] Türkiye Büyük Millet Meclisi (TBMM), *Kanun No. 7521: Bazı Kanun ve Kanun Hükmünde Kararnamelerde Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun*, T.C. Resmî Gazete, Özellikle Madde 11’e bakınız., Tem. 2024. erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2024/07/20240726-2.htm>.
- [41] H. Tischer R. Müller, “Low Voltage Systems in Commercial Vehicles: 12V and 24V in Hybrid Architectures,” *SAE Technical Paper Series*, no. 2021-01-0775, 2021. doi: 10.4271/2021-01-0775.
- [42] M. W. T. Koot, “Energy Management for Vehicular Electric Power Systems,” PhD Thesis, Eindhoven Technical University, Eindhoven, 2006.
- [43] European Environment Agency, “Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives — TERM 2018,” European Environment Agency, Copenhagen, tek. rap. EEA Report No 13/2018, 2018. doi: 10.2800/77428. (erişim tarihi 01/01/2025).
- [44] *AAA’s Tests Reveal Real-World Benefits of Automatic Stop-Start Technology: Research yields up to seven percent mpg improvement and CO2 reduction*, American Automobile Association (AAA), Tem. 2014. erişim adresi: <https://newsroom.aaa.com/2014/07/aaas-tests-reveal-real-world-benefits-automatic-stop-start-technology/> (erişim tarihi 01/01/2025).
- [45] F. Mangun, M. Idres K. Abdullah, “Design Optimization of a Hybrid Electric Vehicle Powertrain,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, c. 184, no. 1, s. 012024, 2017. doi: 10.1088/1757-899X/184/1/012024.

- [46] E. Collins M. Post, “SunLine Transit Agency Fuel Cell Electric Bus Progress Report: Data Period Focus: Jan. 2020 through Dec. 2021,” National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, tek. rap. NREL/TP-5700-83559, Tem. 2022. erişim adresi: <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/83559.pdf>.
- [47] S. Turan, O. Ö. Mengi H. Adatepe, “Seri ve Paralel Elektrikli Hibrit Araçların Sayısal Simülasyon ile Karşılaştırılması,” *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, c. 10, no. 2, ss. 302–314, 2020. doi: 10.31466/kfbd.737921.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirisi

1. A. P. Adaş and E. Ayçiçek, “Simulink-based performance analysis of crankshaft starter generator (CSG) functionality states in hybrid vehicles,” in *Proc. 21st Int. Istanbul Sci. Res. Congr. on Life, Eng., Archit., and Math. Sci.*, Istanbul, Turkey, May 23–25, 2025.