T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

ÇOKLU MOTOR SENKRONİZASYON KONTROL YÖNTEMLERİNİN SİSTEM TANIMLAMA İLE MODELLENMESİ VE DENEYSEL KARŞILAŞTIRILMASI

Selma Nilay ŞAVKLIYILDIZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

OCAK 2026

ANTALYA

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

ÇOKLU MOTOR SENKRONİZASYON KONTROL YÖNTEMLERİNİN SİSTEM TANIMLAMA İLE MODELLENMESİ VE DENEYSEL KARŞILAŞTIRILMASI

Selma Nilay ŞAVKLIYILDIZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

OCAK 2026

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOKLU MOTOR SENKRONİZASYON KONTROL YÖNTEMLERİNİN SİSTEM TANIMLAMA İLE MODELLENMESİ VE DENEYSEL KARŞILAŞTIRILMASI

Selma Nilay ŞAVKLIYILDIZ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

OCAK 2026

Evrak Tarih ve Sayısı: 03.02.2026-878

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOKLU MOTOR SENKRONİZASYON KONTROL YÖNTEMLERİNİN SİSTEM TANIMLAMA İLE MODELLENMESİ VE DENEYSEL KARŞILAŞTIRILMASI

Selma Nilay ŞAVKLIYILDIZ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Bu tez 30/01/2026 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Övünç POLAT (Danışman)
Prof. Dr. Ömer Halil ÇOLAK
Doç. Dr. Umut TİLKİ
Doç. Dr. Hamza Feza CARLAK
Doç. Dr. Serdar GÜNDOĞDU

Bu belge, güvenli elektronik İmza ile imzalanmıştır.
Evrak sorgulaması https://turkiye.gov.tr/ebd?eK=5543&eD=BSVTLZR2AC&eS=878 adresinden yapılabilir. (PIN:37972)

ÖZET

ÇOKLU MOTOR SENKRONİZASYON KONTROL YÖNTEMLERİNİN SİSTEM TANIMLAMA İLE MODELLENMESİ VE DENEYSEL KARŞILAŞTIRILMASI

Selma Nilay ŞAVKLIYILDIZ

Doktora Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Övünç POLAT

Ocak 2026; 65 sayfa

Endüstriyel otomasyon sistemlerinde yüksek güç yoğunluğu, verimlilik ve hassasiyet gereksinimleri, sabit mıknatıslı senkron motorların (SMSM) kullanımını yaygınlaştırmıştır. Tek bir motorun güç veya tork limitlerinin yetersiz kaldığı sistemlerde, ortak bir yükü süren çoklu motor yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak, motorların ortak bir şafta rijit (esnek olmayan) bir şekilde bağlandığı bu yapılarda; üretim toleransları, elektriksel parametre farklılıkları ve mekanik kısıtlar nedeniyle motorlar arasında yük paylaşımı dengesizlikleri, senkronizasyon problemleri gibi uyumsuzluklar ortaya çıkmaktadır. Bu durum, sistemde aşırı ısınmaya, verim kaybına ve mekanik bileşenlerin ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Literatürde bu problemleri aşmak için sıklıkla başvurulan lider-takipçi gibi geleneksel yöntemler ise, hatanın sistem geneline yayılması ve motorlar arası karşılıklı bilgi paylaşımının eksikliği nedeniyle yetersiz kalabilmektedir. Bu tezin temel amacı, rijit bağlı çoklu motor sistemlerinde tork yarışı problemini bastıran, yük paylaşımını dengeleyen ve yüksek hassasiyetli hız senkronizasyonu sağlayan dağıtık bir kontrol stratejisi geliştirmektir.

Teorik yaklaşımları doğrulamak amacıyla, üç adet SMSM'nin 1:1 dişli oranıyla ortak bir şafta bağlandığı özel bir deney düzeneği geliştirilmiştir. Bu düzenek; motor sürücü ve kontrol kartları, pozisyon sensörü, tork sensörü ve ayarlanabilir yük profilleri oluşturabilen bir fren mekanizmasından oluşmaktadır. Kontrol mimarisi olarak, tek bir merkezi işlemci yerine, her motorun kendi bağımsız sürücüsüne ve yerel kontrolcüsüne sahip olduğu, bu sayede modülerliği artıran ve işlem yükünü dağıtan CAN-BUS haberleşme tabanlı bir yapı tercih edilmiştir. Metot olarak, Alan Yönelimli Kontrol altyapısı üzerine inşa edilen ve motorların birbirlerinin durumunu gözeterek referanslarını güncellediği "Multilateral" (çok taraflı) kontrol yaklaşımı uygulanmıştır. Mekanik şokları önlemek adına S-eğrisi tabanlı yörünge planlaması sisteme entegre edilmiştir. Ayrıca, kontrol algoritmalarının başarısını artırmak ve sistem dinamiklerini doğru analiz edebilmek amacıyla kara kutu yöntemi ile sistem tanımlama çalışmaları gerçekleştirilmiş ve elde edilen matematiksel modeller MATLAB/Simulink simülasyon ortamında doğrulanmıştır.

Tez çalışmasında; Paralel Kontrol, Tork-Takipçi ve önerilen Multilateral Kontrol yöntemleri boşta, yük altında ve farklı hızlarda karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. Deney sonuçları, Paralel Kontrol yönteminin yük paylaşımında yetersiz kaldığını ve ciddi tork dengesizliklerine yol açtığını göstermiştir. Tork-Takipçi yöntemi ile gerçekleştirilen karşılaştırmalı analizlerde, önerilen Multilateral Kontrol yapısının hem yüksek hem de düşük hızlarda, özellikle sabit hız ve yük altında daha kararlı bir hız senkronizasyonu sağladığı belirlenmiştir. Tork senkronizasyonu açısından ise her iki yöntemin birbirine oldukça yakın sonuçlar ürettiği görülmüş ve bu sayede Multilateral yapısının tork dengesinden ödün vermeden hız hatasını minimize edebildiği görülmüştür. Elde edilen bulgular, önerilen dağıtık ve Multilateral kontrol mimarisinin, tork yarışını ve senkronizasyon hatalarını engellemede etkin olduğunu, endüstriyel ölçekli çoklu motor uygulamaları için ölçeklenebilir bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: Alan Yönelimli Kontrol, Birden Fazla Motorun Kontrolü ve Senkronizasyonu, Multilateral Kontrol, Paralel Kontrol, Sabit Mıknatıslı Senkron Motor, Sistem Tanımlama, Ortak Şaftlı Sistemler, Tork-Takipçi Kontrol, Yük Paylaşımı

JÜRİ: Prof. Dr. Övünç POLAT

Prof. Dr. Ömer Halil ÇOLAK

Doç. Dr. Umut TİLKİ

Doç. Dr. Hamza Feza CARLAK

Doç. Dr. Serdar GÜNDOĞDU

ABSTRACT

SYSTEM IDENTIFICATION BASED MODELING AND EXPERIMENTAL COMPARISON OF MULTI-MOTOR SYNCHRONIZATION CONTROL METHOD

Selma Nilay ŞAVKLIYILDIZ

PhD Thesis in Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Övünç POLAT

January 2026; 65 pages

Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM) are widely used in industrial automation due to high requirements for power density, efficiency, and precision. Multi-motor structures driving a common load become essential when the torque or power limits of a single motor are insufficient. However, rigidly coupling motors to a common shaft introduces synchronization problems and load sharing imbalances. These issues arise from manufacturing tolerances, differences in electrical parameters, and mechanical constraints. This condition leads to system overheating, efficiency loss, and reduced service life of mechanical components. While conventional methods, such as Master-Slave, are commonly used to address these issues, they often suffer from error propagation and a lack of mutual feedback. The main objective of this thesis is to develop a distributed control strategy that effectively suppresses torque fighting, balances load sharing, and ensures high-precision speed synchronization in rigidly coupled multi-motor systems.

To validate the theoretical approaches, an experimental setup was designed, consisting of three PMSMs coupled to a common shaft with a 1:1 gear ratio. This setup includes motor drivers, controllers, position sensors, a torque sensor, and a brake mechanism capable of generating adjustable load profiles. Instead of a centralized processor, the control architecture employs a CANBUS communication-based structure where each motor has an independent driver and local controller, thereby increasing modularity and distributing the computational load. As a method, a "Multilateral" control approach, built upon the Field Oriented Control structure, was implemented to allow motors to update their references by monitoring the status of other motors. Additionally, S-curve-based trajectory planning was integrated into the system to prevent mechanical shocks. Furthermore, system identification studies were performed using the black-box method to enhance the performance of control algorithms and accurately analyze system dynamics, and the obtained mathematical models were validated in MATLAB/Simulink simulation environment.

In this study, Parallel Control, Torque Follower (Torque Master-Slave), and the proposed Multilateral Control methods were tested comparatively under no-load, loaded, and varying speed conditions. Experimental results showed that the Parallel Control method was insufficient in load sharing and caused significant torque imbalances. Comparative analyses with the Torque-Follower method revealed that the proposed Multilateral Control structure ensures more stable speed synchronization at both high and

low speeds, particularly under constant speed and load conditions. In terms of torque synchronization, both methods produced highly comparable results, showing that the Multilateral structure is capable of minimizing speed error without compromising torque balance. These findings demonstrate that the proposed distributed multilateral control architecture is effective in preventing torque fighting and synchronization errors, offering a scalable and robust solution for industrial-scale multi-motor applications.

KEYWORDS: Field Oriented Control, Load Sharing, Multi-motor Control and Synchronization, Multilateral Control, Parallel Control, Permanent Magnet Synchronus Motor, Rigidly Coupled Systems, System Identification, Torque Follower Control

COMMITTEE: Prof. Dr. Övünç POLAT

Prof. Dr. Ömer Halil ÇOLAK

Assoc. Dr. Umut TİLKİ

Assoc. Dr. Hamza Feza CARLAK

Assoc. Dr. Serdar GÜNDOĞDU

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, endüstriyel yüksek performans gereksinimlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkan çoklu motor sistemlerindeki kararlılık ve senkronizasyon problemlerine yenilikçi bir çözüm sunmak amacıyla hazırlanmıştır. Geleneksel merkezi kontrol yapılarının yetersiz kaldığı bu tür karmaşık ve rijit bağlı sistemlerde, motorların sadece kendi dinamiklerine değil, eşlenik oldukları diğer motorların yük durumlarına da anlık tepki verebilmesi kritik bir mühendislik problemidir. Bu kapsamda geliştirilen dağıtık kontrol mimarisi hem teorik altyapısı hem de gerçekleştirilen kapsamlı deneysel doğrulamalar ile literatürdeki boşluğu doldurmayı ve endüstriyel uygulamalara ölçeklenebilir, sağlam bir altyapı sunmayı hedeflemektedir.

Çalışmalarım boyunca her aşamada yapıcı yaklaşımıyla bana her daim yol gösteren, konuya dair derin bilgi ve tecrübeleriyle çalışmamın her adımına kıymetli dokunuşlarda bulunan danışmanım Prof. Dr. Övünç POLAT'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Kontrol yöntemleri konusundaki değerli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak akademik vizyonuma katkı sunan Doç. Dr. Ahmet ONAT ve Prof. Sandor MARKON'a şükranlarımı sunarım. Araştırma süreci boyunca fikirleriyle bakış açımı geliştiren ve desteğini her zaman hissettiren eşim Ayhan ŞAVKLIYILDIZ'a; her daim yanımda olan annem Seher TABANLI, babam İbrahim TABANLI ve ablam Evrim FIRAT'a teşekkür ederim. Ayrıca, deney düzeneğinin oluşturulmasındaki destekleri için DESİRD Tasarım Ar-Ge şirketine, sağladığı imkânlar dolayısıyla şirket kurucusu ve CEO'su Ender KAZAN'a ve mekanik ekipten Alper İYİDOĞAN, Suat KORKMAZ ve Apti TAŞDELEN'e teşekkürlerimi borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT iii
ÖNSÖZ v
AKADEMİK BEYAN viii
SİMGELER VE KISALTMALAR ix
ŞEKİLLER DİZİNİ xii
ÇİZELGELER DİZİNİ xiv
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK TARAMASI 4
3. MATERYAL VE METOT 14
3.1. Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Modellemesi ve Vektör Dönüşümleri 14
3.2. Alan Yönelimli Kontrol 15
3.3. Çoklu Motor Kontrol Stratejileri 17
3.3.1. Paralel kontrol 17
3.3.2. Tork-Takipçi kontrol 18
3.3.3. Multilateral kontrol 18
3.4. Test Düzeneği Tasarımı 19
3.4.1. Tork sensörü 22
3.4.2. Elektromanyetik fren 23
3.5. Çoklu Motor Sürüşlerinde Motor Açılarını Hizalama Yöntemi 25
3.6. Sistem Modelleme ve Simülasyon 26
3.6.1. Sistem tanımlamanın temelleri 26
3.6.2. MATLAB sistem tanımlama araç kutusu ve modelleme stratejisi 27
3.6.3. Model oluşturma ve veri işleme yöntemleri 28
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 33
4.1. Motor Akımı ve Torku için Doğrulama Testleri 33
4.2. Elektromanyetik Frenin Doğrulama Testi 34
4.3. Çoklu Motor Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırılması 35
4.4. Sistem Tanımlama ve Simülasyon Sonuçları 45
4.4.1. Modelleme 45
4.4.2. Kapalı çevrim simülasyon sonuçları 49

5. SONUÇLAR 57
6. KAYNAKLAR.....59
ÖZGEÇMİŞ

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum "Çoklu motor senkronizasyon kontrol yöntemlerinin sistem tanımlama ile modellenmesi ve deneysel karşılaştırılması" adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

30/01/2026

Selma Nilay Şavklıyıldız

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

α, β : Clarke dönüşüm eksenleri

d, q : Park dönüşüm eksenleri

i_a, i_b, i_c : Üç faz stator akımları (A)

v_a, v_b, v_c : Üç faz stator gerilimleri (V)

i_d, i_q : d–q eksen akımları (A)

v_d, v_q : d–q eksen gerilimleri (V)

i_α, i_β : α–β eksen akımları

v_α, v_β : α–β eksen gerilimleri (V)

R_s : Stator direnci (Ω)

L_d, L_q : d–q eksen endüktansları (H)

λ_f : Kalıcı mıknatıs akı bağı (Wb)

ψ_d, ψ_q : d–q eksen akı bağları (Wb)

T_e : Elektromanyetik tork (Nm)

T_L : Yük torku (Nm)

ω_m : Mekanik açısal hız (rad/s)

ω_e : Elektriksel açısal hız (rad/s)

θ_m : Mekanik rotor açısı (rad)

θ_e : Elektriksel rotor açısı (rad)

J : Atalet momenti ($kg \cdot m^2$)

B : Viskoz sürtünme katsayısı

θ : Park dönüşüm açısı (rad)

Kısaltmalar

AC : Alternatif Akım

ADC : Analog–Dijital Dönüştürücü

AYK : Alan Yönelimli Kontrol

ARMAX: Dışsal Girişli Otoregresif Kayan Ortalama

ARX : Dışsal Girişli Otoregresif

BLDC : Fırçasız Doğru Akım

CAN : Kontrolör Alan Ağı

CCC : Çapraz Bağlantılı Kontrol

DC : Doğru Akım

DGM : Darbe Genişlik Modülasyonu

EMK : Elektromotor Kuvveti

EVLS : Elektronik Sanal Şaft Kontrolü

GUI : Grafik Kullanıcı Arayüzü

I2C : Entegreler Arası Haberleşme

LPF : Alçak Geçiren Filtre

MCU : Mikrodenetleyici Birimi

MIMO : Çok Giriş Çok Çıkış

MISO : Çok Giriş Tek Çıkış

MSE : Ortalama Karesel Hata

NARX : Doğrusal Olmayan Dışsal Girişli Otoregresif

PC : Kişisel Bilgisayar

PI : Oransal-İntegral Kontrolcü

PID : Oransal-İntegral-Türevsel Kontrolcü

RCC : Bağıl Eksenler Arası Kontrol

SISO : Tek Giriş Tek Çıkış

SMSM : Sabit Mıknatıslı Senkron Motor

SPC : Geleneksel Hız Paralel Kontrolü

SPCD : Geliştirilmiş Hız Paralel Kontrolü

SPI : Seri Çevresel Arayüz

STMSC: Yumuşak Tork Master-Bağımlı Kontrolü

TF : Transfer fonskiyonu

TMSC : Tork Master-Bağımlı Kontrolü

UVDGM: Uzay Vektör Darbe Genişliği Modülasyonu

Tezde ondalık yazımlar mevcuttur ve ondalık yazımlar nokta ayıracı ile kullanılmıştır. (Örn. “32.24”)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Alan Yönelimli Kontrole (AYK) Dayalı SMSM Sürüş Sisteminin Genel Kontrol Yapısı 15

Şekil 3.2. Üçüncü dereceden S-Eğrisi Yörüngesi (Burkhard Alpers, 2021) 17

Şekil 3.3. Paralel, Tork-Takipçi ve Multilateral Kontrol Stratejileri 19

Şekil 3.4. Tasarlanan deney düzeneğinin 3 boyutlu mekanik tasarımı (katı model) ve farklı açılardan görünümleri. 21

Şekil 3.5. Çoklu motor test düzeneği. 22

Şekil 3.6. Mikrodenetleyici ve tork sensörü arası haberleşme 23

Şekil 3.7. Kayan pencere filtresi 23

Şekil 3.8. Elektromanyetik tozlu fren yapısı ve akım-tork ilişkisi 24

Şekil 3.9. Elektromanyetik frenleme sistemi 24

Şekil 3.10. Mikrodenetleyici ve pozisyon sensörü arası haberleşme 26

Şekil 3.11. Sistem Tanımlama ve Doğrulama Adımları 30

Şekil 3.12. Üçlü senkron motor sürüş sistemi için oluşturulan genel simülasyon modeli ve kapalı çevrim kontrol yapısı 31

Şekil 3.13. Tork-Takipçi kontrol mimarisinin blok diyagramı 31

Şekil 3.14. Multilateral kontrol mimarisinin blok diyagramı 31

Şekil 3.15. Senkron motorun elektriksel ve mekanik dinamiklerini giriş gerilimi ve yük torkuna bağlı olarak temsil eden ayrık zamanlı transfer fonksiyonu modeli 32

Şekil 3.16. Üç ayrı motorun hız çıkışlarının mekanik olarak birleştirildiği dişli kutusu ve ortak şaft (mekanik kuplaj) modelinin iç yapısı 32

Şekil 4.1. Elektromanyetik tozlu fren testi düzeneğini önden ve üstten görünümü 34

Şekil 4.2. Yüksüz durumda 21 rad/s'de Paralel, Tork-Takipçi ve Multilateral kontrolün akım izleme performansı 36

Şekil 4.3. Yük altında 5.2 rad/s'de motorların hız, yük torku Iq ve Vq parametrelerinin zaman grafiği 37

Şekil 4.4. Yüksüz boşta 5.2 rad/s'de motorların hız, yük torku Iq ve Vq parametrelerinin zaman grafiği 38

Şekil 4.5. Yük altında 21 rad/s'de motorların hız, yük torku Iq ve Vq parametrelerinin zaman grafiği 39

Şekil 4.6. Yüksüz durumda 21 rad/s'de motorların hız, yük torku Iq ve Vq parametrelerinin zaman grafiği 40

Şekil 4.7. Hız referansı ve gerçek hız parametrelerinde sürüş bölgeleri 41

Şekil 4.8. Üç Motorun Akım ve Hız Referansı Tepkileri 42

Şekil 4.9. Multilateral ve Tork-Takipçi Stratejileri Altında Motorların Hız Hata Tepkileri 43

Şekil 4.10. Multilateral ve Tork-Takipçi Stratejileri Altında Motorların Akım Hata Tepkileri 43

Şekil 4.11. Sistem tanımlama modeli ile elde edilen tahmini çıkışların, yüklü ve yüksüz durumlarda eğitim ve doğrulama veri setleri için gerçek motor hızları ile karşılaştırılması 46

Şekil 4.12. Sistem tanımlama modeli ile Motor1 için elde edilen tahmini çıkışların, yüklü ve yüksüz durumlarda eğitim ve doğrulama veri setleri için gerçek motor hızları ile karşılaştırılması 46

Şekil 4.13. Sistem tanımlama modeli ile Motor2 için elde edilen tahmini çıkışların, yüklü ve yüksüz durumlarda eğitim ve doğrulama veri setleri için gerçek motor hızları ile karşılaştırılması 47

Şekil 4.14. Sistem tanımlama modeli ile Motor3 için elde edilen tahmini çıkışların, yüklü ve yüksüz durumlarda eğitim ve doğrulama veri setleri için gerçek motor hızları ile karşılaştırılması 47

Şekil 4.15. Sistem tanımlama modeli ile elde edilen tahmini çıkışların, yüklü ve yüksüz durumlarda eğitim ve doğrulama veri setleri için gerçek motor akımları ile karşılaştırılması 48

Şekil 4.16. Sistem tanımlama modeli ile elde edilen tahmini çıkışların, yüklü ve yüksüz durumlarda eğitim ve doğrulama veri setleri için gerçek şaft hızı ile karşılaştırılması 49

Şekil 4.17. Multilateral kontrol simülasyonu ile elde edilen akım ve şaft hızı çıkışlarının gerçek değerler ile karşılaştırılması 50

Şekil 4.18. Multilateral kontrol simülasyonu ile elde edilen gerilim ve motor hızı çıkışlarının gerçek değerler ile karşılaştırılması 51

Şekil 4.19. Tork-Takipçi kontrol simülasyonı çıkışında elde edilen akım ve şaft hızı çıkışlarının gerçek motor parametreleri ile karşılaştırılması 52

Şekil 4.20. Tork-Takipçi kontrol simülasyonı çıkışında elde edilen gerilim ve motor hızı çıkışlarının gerçek motor parametreleri ile karşılaştırılması 53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Test düzeneğinde kullanılan SMSM, pozisyon sensörü, tork sensörü ve elektromanyetik frenin teknik özellikleri 20

Çizelge 4.1. Statik Tork Doğrulama Testleri: Sabit Akım ve Sabit Tork 33

Çizelge 4.2. Frenleme Torku Doğrulama Testi 35

Çizelge 4.3. Sürüş Bölgeleri Boyunca Multilateral ve Tork-Takipçi Kontrolde Ortalama Hız ve Akım MSE Değerleri 44

Çizelge 4.4. Farklı Hız ve Yük Koşullarında Multilateral ve Tork-Takipçisi Yöntemlerinin Simülasyon-Gerçek Uyumu (MSE) Karşılaştırması 55

Çizelge 4.5. Yüklü ve boşta çalışma koşullarında hız referans sinyali ile simülasyonda tahmin edilen şaft hızı sinyali arasındaki ortalama karesel hata (MSE) 56

1. GİRİŞ

Günümüzde otomasyon sistemlerinin gereksinimleri hızla artmakta ve bu durum elektrik motor teknolojilerinde sürekli bir gelişimi zorunlu kılmaktadır. Sabit mıknatıslı senkron motorlar, geleneksel doğru akım motorları veya asenkron motorlarla karşılaştırıldığında, yüksek verimleri, yüksek güç yoğunlukları ve kararlı tork üretimleri sayesinde modern endüstrinin birçok alanında temel bileşen haline gelmiştir**.** Özellikle yüksek manyetik akı yoğunluğu sağlayan mıknatıs teknolojilerinin gelişimi, bu motorların boyutlarını küçültürken tork kapasitelerini artırmış, bu da onları hacim ve ağırlık kısıtlaması olan uygulamalar için vazgeçilmez kılmıştır (Dambrauskas vd., 2020; Peter Vas, 1998). Rotor üzerinde yer alan sabit mıknatıslar, manyetik alanın doğrudan üretilmesini sağladığı için uyartım akımına ihtiyaç duyulmaz; bu durum bakır kayıplarını azaltır ve motor hem düşük hızlarda yüksek tork verir hem de hızlı dinamik tepkiler gösterir. Düşük atalet momentine sahip rotor yapıları, sistemin ivmelenme ve yavaşlama taleplerine milisaniyeler mertebesinde cevap verebilmesine olanak tanır. Bu avantajları nedeniyle SMSM'ler robotik sistemlerde, elektrikli araç aktarma organlarında, yüksek hızlı üretim hatlarında, CNC tezgahlarında ve hassas konumlandırma gerektiren savunma sanayi uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu motorlar için kullanılan kontrol yöntemlerinin gelişimi, endüstriyel sistemlerde performans ve kararlılık beklentilerinin artmasıyla birlikte önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir (Calleja vd., 2016; Mohanraj vd., 2022; Peng vd., 2024; Sakunthala vd., 2017; K. Zhang vd., 2021).

Tek motorlu bir sistemde kontrol yapısı, motorun üreteceği torku ve buna karşılık oluşan hız yanıtını doğrudan kontrol etmek için motor akımı ve hız geri beslemelerini kullanır. Bu yapı genellikle kaskat (iç içe) bir kontrol mimarisi şeklinde kurgulanır; en içte akım döngüsü ve dışta hız döngüsü yer alır. Uygulamalara bağlı olarak pozisyon kontrol döngüsü de eklenebilmektedir. Bu geri beslemeler motorun elektromanyetik tork üretimi ile mekanik hareketinin anlık olarak izlenmesini sağlar ve kontrol algoritmasının girişini oluşturur. Vektör kontrolü olarak da bilinen Alan Yönelimli Kontrol (AYK) mimarisinde, üç fazlı alternatif akım büyüklükleri matematiksel dönüşümlerle (Clarke ve Park dönüşümleri) iki eksenli, zamanla değişmeyen bir referans çerçevesine taşınır. Bu çerçevede d-ekseni akısı manyetik alanı, q-ekseni akısı ise motor torkunu belirler; bu yapı akı ve torkun birbirinden bağımsız biçimde kontrol edilmesini sağlar ve motorun tork ile hız tepkileri doğrudan ve kararlı şekilde kontrol edilir. Böylece alternatif akım motoru, fırçalı doğru akım motorunun basit ve lineer kontrol karakteristiğine sahipmiş gibi sürülür hale gelir. AYK üzerine kurulan hız kontrol döngüsü, genellikle PI tabanlı bir regülatör ile referans hızın hassas biçimde izlenmesini sağlar (Carter vd., 2023; O'Rourke vd., 2019).

Tek motorlu yapılarda bu kontrol yapısı yüksek doğruluk sağlarken, birçok endüstriyel uygulamada tek motorun sağlayabileceği tork veya mekanik etki yetersiz kalır. Ağır yüklerin taşınması gereken tünel kazma makineleri, konveyör bantları, rüzgar türbinleri, elektrikli trenler, kağıt ve tekstil işleme makineleri veya bunun gibi büyük ölçekli sistemlerde güç gereksinimi tek bir eyleyicinin limitlerini aşmaktadır (Dai vd., 2021; Kovalchuk ve Baburin, 2018; Mitrovic vd., 2009). Bu nedenle çoklu motorlu yapılara ihtiyaç duyulur. Çoklu motor sistemlerinde birden fazla motor aynı yükü veya platformu birlikte sürer ve toplam tork kapasitesi artar, mekanik gerilme motorlar arasında paylaştırılır, sistem arıza durumlarında çalışmayı sürdürebilecek modüler bir yapıya dönüşür. Ayrıca, yükün tek bir noktadan tahrik edilmesi yerine sisteme dağıtılmış

birden fazla noktadan güç uygulanması, mekanik şaftlardaki burulma etkilerini azaltır ve sistemin ömrünü uzatır (Niu vd., 2023; D. Sun ve Mills, 2002).

Bu fiziksel avantajların yanı sıra, çoklu motorlu yapılar tek motorlu sistemlere göre çok daha karmaşık bir kontrol problemine sahiptir. Motorlar aynı olsalar ve aynı komutu alsalar dahi üretim toleransları, manyetik parametre farklılıkları, akı–tork ilişkileri ve zıt elektromotor kuvvet (zıt EMK) katsayıları nedeniyle aynı hızlanma veya tork üretimini göstermez. Bu durum motorlar arasında yük paylaşımının bozulmasına ve literatürde tork yarışı olarak adlandırılan davranışın ortaya çıkmasına neden olur. Tork yarışı durumunda, motorlardan biri yükü çekerken diğeri frenleme moduna geçer veya motorlar birbirlerine karşı çalışarak enerjiyi sisteme hareket vermek yerine ısıya dönüştürür. Tork yarışı ya da senkronizasyon problemleri titreşim, tork dalgalanması, aşırı akım, verim kaybı ve mekanik zorlanma gibi sonuçlar doğurur (Fan vd., 2025; H.-W. Lee vd., 2025). Sensör gürültüsü, geri besleme hataları, haberleşme gecikmeleri ve kontrolcüler arası zamanlama farkları da senkronizasyon problemlerini artıran diğer etkenlerdir. Özellikle rijit bağlantıya sahip sistemlerde, çok küçük bir hız farkı bile şaft üzerinde yıkıcı tork darbelerine neden olabilir.

Bu tezin motivasyonu, Desird Tasarım AR-GE A.Ş.'de yürütülen lineer motor projelerinde karşılaşılan gerçek saha senkronizasyon problemlerine dayanmaktadır. Lineer motorlarda stator boyunca yer alan çoklu bobin ve mıknatıs yapıları, sistemi doğası gereği çoklu motor yapısına dönüştürmektedir. Ayrıca bu yapılarda sürücü koordinasyonu kritik öneme sahiptir. Birden fazla motorlu bu sistemde motor gruplarının uyumlu çalışmaması doğrudan hareket kalitesini ve konumlama hassasiyetini bozmaktadır. Ortaya çıkan senkronizasyon problemlerini daha kontrollü bir ortamda analiz edebilmek amacıyla üç adet SMSM'nin ortak bir şafta bağlandığı bir deney düzeneği oluşturulmuş ve kontrol stratejileri bu düzenek üzerinde değerlendirilmiştir. Söz konusu düzenek, hem teorik kontrol algoritmalarının test edilmesine olanak tanımakta hem de literatürde kullanılan senkronizasyon yöntemlerinin doğrudan kullanılmasına olanak tanımaktadır.

Bu çalışmada kullanılan deney düzeneği üç motor, bir tork sensörü ve bir fren mekanizmasını ortak bir mil üzerinden birbirine bağlayan bir yapıdan oluşmaktadır. Tork sensörü motor grubu ile fren mekanizması arasında konumlandırılmıştır ve bu yerleşim sayesinde şafttan geçen yük torku doğrudan ölçülür. Fren mekanizması ayarlanabilir bir karşı tork oluşturarak motorların farklı yük seviyeleri altındaki davranışlarının incelenmesini sağlar. Bu yapı, motorların sadece boşta değil, nominal yük ve aşırı yük durumlarında da senkronizasyon performanslarını test etmek için tasarlanmıştır. Motorların mile bağlantısı 1:1 dişli oranına sahiptir; bu nedenle moment iletiminde herhangi bir oran dönüşümü bulunmaz ve motorlar şaft üzerinden doğrudan etkileşim gösterir. Bu doğrudan bağlantı, kontrol algoritmasının başarısını en saf haliyle gözlemlemek için ideal bir ortam sunar. Bu düzenek çoklu motor sistemlerinin gerçek çalışma koşullarını temsil eden bir test yapısı oluşturur.

Bu düzenek üzerinde AYK kontrol mimarisi kullanılmaya devam edilmiş, ancak çoklu motor yapısının gerektirdiği ek senkronizasyon ve bilgi paylaşım mekanizmalarını içerecek biçimde genişletilmiştir. Motorlar arasında hız ve tork bilgisinin paylaşılabilmesi için kontrol yapısı dağıtık bir mimariye göre yeniden düzenlenmiştir. Geleneksel merkezi kontrolcü yaklaşımının aksine, dağıtık yapıda her motorun kendi sürücüsü ve yerel

kontrol döngüsü bulunur, ancak bu sürücüler CAN-BUS gibi yüksek hızlı bir haberleşme hattı üzerinden sürekli veri alışverişinde bulunur (W. Li vd., 2018; Losada vd., 2017). Üst katmanda yörünge kontrolü kullanılmaya devam edilmiştir ve S-eğrisi tabanlı hareket profilleri ortak şaft üzerindeki ivmelenme ve yavaşlama geçişlerinin daha uyumlu gerçekleşmesine olanak tanır (Fang vd., 2020; Kombarov vd., 2019; G. Wu ve Zhang, 2023). Ani hız değişimlerinin yaratacağı mekanik şokları önleyen bu profil, sistemin mekanik ömrünü korurken kontrolcülerin hatayı minimize etmesine zaman tanır. Bu yaklaşım motorlar arasındaki geçici durum hatalarının azalmasına katkı sağlar.

Bu tezin amacı ortak bir şafta bağlı çoklu motorlu yapılarda tork üretiminin dengeli dağıtılmasını, yük paylaşımındaki dengesizliklerin azaltılmasını, tork yarışı davranışının bastırılmasını ve hız senkronizasyonunun düşük hata ile sağlanmasını içeren bir kontrol stratejisi geliştirmektir. Bu doğrultuda AYK tabanlı yapı korunmuş, ancak motorlar arası etkileşimleri hesaba katan multilateral kontrol yaklaşımı ile genişletilmiştir (Z. Chen vd., 2016; Katsura vd., 2007; Zhai ve Xia, 2018). Bu yaklaşım, motorları hiyerarşik bir düzene sokmak yerine, her bir motorun diğerlerinin durumunu gözeterek kendi referansını düzelttiği "eşler arası" bir denetim mekanizması kurar. Dağıtık mimari kontrolcülere gerektiğinde lider veya takipçi rolü üstlenebilme yeteneği kazandırmakta ve yapı hem döner motor sistemlerine hem de lineer motor uygulamalarına uyarlanabilir nitelik taşımaktadır.

Ayrıca çoklu motor sistemlerinde yüksek hassasiyetli kontrol sağlayabilmek için sistem parametrelerinin doğru bilinmesi kritik öneme sahiptir. Ancak teorik olarak hesaplanan motor parametreleri; sıcaklık, manyetik doygunluk ve değişken yük koşulları gibi çevresel faktörler nedeniyle pratik uygulamalarda farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle, çalışmanın güvenilirliğini artırmak amacıyla sistem tanımlama yöntemlerine başvurulmuştur. Sistemin giriş ve çıkış verileri kullanılarak 'Kara Kutu' yaklaşımıyla oluşturulan gerçekçi matematiksel modeller, önerilen kontrol algoritmalarının deneysel aşamaya geçilmeden önce simülasyon ortamında doğrulanmasına olanak sağlayacaktır.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde Paralel kontrol, Tork-Takipçi kontrol ve Multilateral kontrol yaklaşımları karşılaştırılmıştır. Paralel kontrol, her motorun birbirinden habersiz bir şekilde sadece kendi hız referansını takip etmeye çalıştığı en temel yöntemdir. Paralel kontrol yaklaşımında motorların bağımsız çalışması özellikle yük altında senkronizasyon açısından uygun bir çözüm oluşturmamış ve tork paylaşımında belirgin dengesizliklere yol açmıştır. Tork-Takipçi kontrol ile yapılan karşılaştırmalarda Multilateral kontrolün sabit hız ve uygulanan yük altında daha iyi hız senkronizasyonu sağladığı görülmüştür. Tork hatasının ise çalışma bölgesine bağlı olarak değiştiği, bazı durumlarda Multilateral kontrolün daha düşük hata ürettiği, bazı durumlarda ise Tork-Takipçi yapının daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Bu tez, teorik altyapısı ve deneysel doğrulamalarıyla, endüstriyel çoklu motor uygulamalarında karşılaşılan senkronizasyon problemlerine ölçeklenebilir ve sağlam bir çözüm önerisi getirmektedir.

2. KAYNAK TARAMASI

Çoklu motor tahrik sistemleri, ortak bir yükü taşıyan veya aynı mekanik sistem içinde eş zamanlı hareket etmesi gereken motorlarda kararlı ve güvenilir bir performans elde edebilmek için gelişmiş kontrol stratejilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistemlerde senkronizasyon hataları yalnızca hareket doğruluğunu değil, aynı zamanda tork paylaşımı, mekanik gerilmeler ve genel sistem verimini de doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle literatürde hem motor yapılarının hem de senkronizasyon kontrol yöntemlerinin ayrıntılı olarak incelendiği geniş bir araştırma birikimi oluşmuştur. Bu bölümde önce çoklu motor uygulamalarında sık kullanılan sabit mıknatıslı senkron motorların temel özellikleri sunulacak, ardından çoklu motor senkronizasyonu için kullanılan kontrol stratejilerine ilişkin literatür çalışmaları değerlendirilecektir.

Sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM), sabit bir manyetik alan oluşturmak için rotora gömülü veya rotora takılı kalıcı mıknatıslar kullanan bir elektrik motorudur. Alternatif akım (AC) ile çalışan stator, rotorun manyetik alanı ile etkileşime giren dönen bir manyetik alan oluşturur ve rotorun stator alanı ile senkronize olarak dönmesini sağlar. SMSM'ler, verimlilikleri ve hassas kontrolleri nedeniyle endüstriyel, otomotiv ve yüksek performanslı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Ullah vd., 2022; Wang vd., 2022). Bu motorların yapısı; özellikle stator, rotor ve mıknatıs düzenlemeleri, motorun temel performans özelliklerini, tork kapasitesini, enerji kayıplarını ve termal kararlılığını doğrudan etkiler. Bu sebeple yüksek verimlilik, güç yoğunluğu ve hassas kontrol yetenekleri nedeniyle modern endüstride yaygın olarak kullanılan bu motorların tasarımındaki optimizasyon çalışmaları oldukça önemlidir (He ve Wu, 2019).

SMSM'ler, elektrikli ve hibrit araçlarda oldukça kullanılan bir motor tipidir ve yüksek tork-ağırlık oranı, enerji verimliliği ve düşük emisyon sunar. Binek otomobillerde, yüksek hızlı trenlerde ve hatta gemiler için deniz tahrik sistemlerinde kullanılırlar. Bu sistemlerde düşük gürültü ve termal kararlılık çok önemlidir. Bununla ilgili yapılan bir çalışmada (Rajesh ve Sebasthirani, 2025), elektrikli araçlarda kullanılan SMSM'ler için geliştirilen kontrol yöntemleri, motorun dinamik davranışını farklı çalışma koşullarında kararlı tutmayı amaçlar. Son yıllarda, model tabanlı yaklaşımlar ve gelişmiş optimizasyon teknikleri, daha hızlı tepki ve daha düşük hata değerleri elde etmeye yönelmiştir. Çalışmalarda, motorun d–q eksen modeli üzerinden tanımlanan gerilim, akım ve tork etkileşimleri esas alınmakta; kontrol algoritmaları bu modele göre ayarlanmaktadır. Ayrıca, genetik algoritma tabanlı veya hibrit yöntemlerle yapılan parametre iyileştirmeleri, özellikle hız değişimlerinde ve yük dalgalanmalarında daha kararlı bir sürüş davranışı sağlamaktadır. Böylece SMSM'ler, elektrikli araç uygulamalarında enerji verimliliği ve kontrol doğruluğu açısından daha işlevsel hale gelmektedir.

Park ve arkdaşlarının (2024) çalışmalarında, denizcilik uygulamalarında pod tahrik sistemleri için tasarlanan SMSM'lerde, tork üretiminin yanı sıra su altı gürültüsünün azaltılması ve termal kararlılığın sağlanması temel tasarım kriterleridir. Bu kapsamda çalışmalar, boşluk/kutup kombinasyonu, stator titreşim modu, elektromanyetik kuvvet dağılımı gibi parametrelerin motor davranışını nasıl değiştirdiğini ayrıntılı olarak incelemektedir. Ayrıca, akustik ve titreşim temelli analizler ile kullanıldığı değerlendirmeler, motorun uzun süreli çalışmada karşılaşacağı ısıl yükleri daha doğru biçimde öngörmektedir. Bu yaklaşım, deniz ortamında düşük radyal kuvvet, düşük

akustik iz ve yeterli ısıl dayanım gerektiren tahrik sistemleri için SMSM'lerin uygunluğunu göstermektedir.

Torrent ve arkadaşlarının (2018) çalışmalarında, yüksek hızlı trenlerde indüksiyon motorlarının yerine SMSM kullanımına yönelik çalışmaların, özellikle rotor yapısının verim ve güç yoğunluğu üzerindeki etkisini ele almaktadır. Yüzey mıknatıslı ve gömülü mıknatıslı rotor seçenekleri, tork üretimi, kayıplar, manyetik akı dağılımı ve mekanik kararlılık açısından karşılaştırılmakta; tren tahrik sistemlerinde gereksinim duyulan yüksek verim ve düşük bakım ihtiyacı göz önünde bulundurulmaktadır. Analizler, SMSM'lerin rotor bakır kayıplarının ortadan kalkması ve manyetik akının daha etkin kullanımı sayesinde enerji tüketimini azalttığını göstermektedir. Bu nedenle SMSM tabanlı tahrik yapıları, mevcut indüksiyon motorlarına kıyasla yüksek hızlı trenlerde daha uygun bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

Mercorelli'nin, (2023) çalışmasında ise, SMSM motorlarının endüstride yaygın kullanımından dolayı güvenilirliğini sağlamak amacıyla, en yaygın hatalardan biri olan sargılar arası kısa devre problemini ve teşhisini incelenmiştir. Çalışmalar, bu tip hataları başarıyla tespit etmek ve problem yerini ve şiddetini belirlemek için K-En Yakın Komşu gibi makine öğrenimi tekniklerinin yanı sıra, Parçacık Sürü Optimizasyonu, Evrimsel Algoritmalar gibi sezgisel optimizasyon algoritmalarına dayanan çeşitli hata teşhis yöntemlerini incelemiştir. Sonuç olarak, bu algoritmaların, PMSM sistemlerinin arıza teşhisinde ve genel güvenilirliğinde kritik rol oynadığı belirtilmiştir.

SMSM kontrolünde yaygın olarak tercih edilen AYK stratejisine odaklanılan bir diğer çalışmada (Nippatla ve Mandava, 2025), AYK yapısı içindeki PID/PI kontrolörlerinin doğru bir şekilde ayarlanmasının, PMSM tahrik sisteminin verimli çalışması için en kritik faktörlerden biri olduğunu vurgulamıştır. Bu çalışmada, farklı PI/PID parametrelerini, motorun hız tepkisini optimize etmek için kullanmış ve farklılıklarını göstermiştir. Örneğin, kontrolörünün hassas ayarı sayesinde, motorun hız tepkisinde tepe aşımı %5.2'den %3.1'e düşürülmüş, oturma süresi 0.24 saniyeden 0.18 saniyeye düşürülmüş ve kararlı durum hatası büyük ölçüde azaltılarak dinamik performans önemli ölçüde iyileştirilmiştir.

Rafaq ve Jung (2020) çalışmalarında, motor parametrelerinin (örneğin; stator direnci, stator indüktansı ve manyetik akı) sıcaklık, yük ve üretim toleransları gibi faktörler nedeniyle operasyon sırasında değişebilmesi sorununu ele almaktadır. Makale, problemi tanımladıktan sonra, güncel literatürü sistematik olarak çevrimdışı ve çevrimiçi parametre tahmin teknikleri olarak sınıflandırmakta ve kapsamlı bir değerlendirmesini sunmaktadır. Yapılan bazı önemli testler şu şekilde özetlenebilir; çevrimdışı zaman alanı tabanlı bir yöntem olan Tork Testi, doğru akım (DC) beslemesi kullanarak tork sabiti, indüktans gibi parametreleri tahmin etmek için bir tork sensörü ile motor torkunun ölçülmesini gerektirir. Yük Testi, sabit mıknatıslı senkron motorların parametrelerini belirlemek için kullanılan önemli bir çevrimdışı zaman alanı tabanlı bir yöntemdir. Bu test, motor sabit hızda çalıştırılırken yükün değiştirilmesiyle gerçekleştirilir ve özellikle motorun manyetik modelinin doğru tahmin edilmesini sağlayarak akı parametresinin belirlenmesi için kısa devre ve açık devre testlerine göre daha üstün sonuçlar sunar.

Bir başka çalışma (Ba vd., 2022), sabit mıknatıslı senkron motorların eşdeğer devre modellerinin geliştirilmesini incelemektedir. Yüksek hız ve frekanslarda artan güç

yoğunluğu talepleri, çekirdek kaybı da dahil olmak üzere toplam güç kaybının modellenmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Geleneksel eşdeğer devre modelleri genellikle çekirdek kaybını ihmal eder, bu da motor performansı analizi, tasarımı ve kontrol stratejileri için yetersiz doğrulukla sonuçlanır. Bu sebeple hem yüksüz hem de yüklü koşullarda çekirdek kaybı tahmin doğruluğu için yüksüz eşdeğer çekirdek kaybı direncini hızın bir fonksiyonu, yük eşdeğer direncini ise sabit bir değer olarak tanımlama yöntemlerini sunmuştur.

Birden fazla motorun birlikte çalıştığı tahrik sistemlerinin kullanıldığı uygulamalara yönelik literatür çalışmaları ise bu yapıların senkronizasyon gereksinimleri, performans sınırlamaları ve kullanılan kontrol yöntemleri üzerine yoğunlaşmaktadır. Koordineli bir sürücüde iki veya daha fazla motor kullanan çoklu motor sistemleri, performans, esneklik ve güvenilirlik açısından sunduğu potansiyel nedeniyle elektrikli araçlarda, endüstriyel otomasyonda ve robotikte giderek daha fazla kullanılmaktadır. Ancak bu sistemler, dikkatle yönetilmesi gereken yeni teknik zorlukları da beraberinde getirmektedir.

Çoklu motor konfigürasyonlarının, tek motorlu sistemlere kıyasla daha yüksek güç çıkışı, daha iyi enerji verimliliği ve daha iyi dinamik performans sağladığı literatürde anlatmıştır (Kwon vd., 2025; Popescu vd., 2021). Örneğin, iki motorlu elektrikli araç sistemleri, tek motorlu sistemlere kıyasla %11,7 daha iyi enerji tüketimi ve %14,1 daha hızlı hızlanma göstermiştir. Çoklu elektrik motoru kullanımı, her tekerlek için bağımsız tork ve hız kontrolü sağlayarak mekanik diferansiyel ihtiyacını ortadan kaldırdığını; bu durumun aracın hızlanma, frenleme ve viraj alma gibi dinamik performansını artırırken enerji verimliliğini optimize ettiğini ifade etmiştir.

Çok fazlı veya çok motorlu sürücüler, sistemlere hata toleransı vermektedir. Bir motor veya faz arızalansa bile sistem çalışmaya devam edebilmektedir. Bu endüstriyel uygulamalarda güvenlik açısından çok önemlidir. Gong ve arkadaşlarının (2024) çalışmasında tek motorlu ve çok motorlu sürücü sistemlerini işlev, yapı, kontrol ve karşılaşılan zorluklar açısından karşılaştırmalı bir bütünlük içinde ele almaktadır. İşlevsel açıdan tek motorlu sistemler, düşük karmaşıklık, kolay kontrol ve kompakt yapılarıyla öne çıkarken; çok motorlu sistemler yüksek güç, yüksek tork ve en önemlisi bir motor arızalansa dahi sistemin çalışmasını sağlayan "yedeklilik" avantajı sunmaktadır. Yapısal olarak tek motor basit bir invertör bağlantısına sahipken, çoklu motorlar paralel, kaskat veya hibrit gibi daha esnek ve karmaşık konfigürasyonlara olanak tanır. Kontrol tarafında ise çoklu motorların yüksek dinamik performans, düşük gürültü ve yüksek verimlilik sağlayabilmesi, motorların koordine bir şekilde çalışmasına bağlıdır.

Birden fazla motorun senkronizasyonu, özellikle değişken yükler veya dış bozulmalar altında, yörünge izleme ve senkronizasyon hatalarını en aza indirmek için gelişmiş kontrol algoritmalarını zorunlu kılar. Bu gereklilik, doğal olarak sistem karmaşıklığını ve hesaplama ihtiyacını önemli ölçüde artırır.

Çoklu-motor kontrol topolojilerinin yapıları ve özellikleri Niu'nun (2023) çalışmasında şu şekilde anlatılmıştır; Master komutlu kontrol yapısı, çoklu motorlara aynı referans komutunun uygulanmasına dayanır. Motorlar arasında herhangi bir bilgi paylaşımı olmadığı için senkronizasyon, yalnızca her motorun kendi hız, konum veya akım döngüsündeki izleme başarımına bağlıdır. Herhangi bir motordaki dış bozucu etki

diğer motorlara iletilmediğinden, sistem bozuculara karşı duyarlı olup hassas senkronizasyon gerektiren uygulamalarda sınırlı bir performans sergiler. Basit topolojisi sayesinde çok sayıda motora ölçeklenebilir olsa da, senkronizasyonun tamamen bireysel kontrol performansına bağımlı olması önemli bir dezavantajdır (Niu vd., 2023).

Master–slave yapıda master motorun çıkışı, slave motorlar için referans sinyali olarak kullanılır. Bu yaklaşım tek yönlü bir bilgi akışı kurarak senkronizasyonu master komutlu kontrol yapısına göre iyileştirir; çünkü slave motorlar, master motor üzerindeki değişikliklere yanıt verebilir. Ancak tek yönlü bilgi akışı, slave motorlarda oluşan bozucu etkilerin master motora yansımamasına yol açar. Ayrıca dinamik gecikmeler, özellikle çok motorlu zincir yapılarında, senkronizasyon ve izleme doğruluğunu olumsuz etkiler. Master'ın hız ve ivme bilgilerinin kullanılmasına yönelik iyileştirmeler gecikmeyi azaltabilse de, yapı hala bozuculara karşı sınırlı dayanım sunar (G. Sun vd., 2020).

Çapraz bağlantılı kontrol yöntemi (CCC: Cross Coupling Control), motorlar arasındaki senkronizasyon hatasının hesaplanarak her iki kontrolöre geri beslenmesiyle çift yönlü bir iletişim kurar. Bu yapı, özellikle iki motorlu sistemlerde başlangıç ve kararlı durum boyunca yüksek senkronizasyon performansı sunar. Senkronizasyon hatası kazançlarla büyütülerek bozuculara hızlı tepki verilmesi sağlanır. Ancak motor sayısı arttıkça senkronizasyon hatalarının kombinasyonları katlanarak çoğaldığı için hesaplama karmaşıklığı artar. Bu nedenle klasik çapraz bağlantılı kontrol yöntemi üç veya daha fazla motorlu sistemlerde uygulanabilirliğini kaybeder; komşu motorlar arasında bağlaşımı esas alan "yakın çapraz bağlantılı kontrol yöntemi" gibi iyileştirmeler bu problemi hafifletir (Chen ve Chen, 2012; D. Zhao vd., 2009; Kwon vd., 2011; Huang vd., 2019).

Bağıl eksenler arası kontrol yöntemi (RCC: Relative Cross Coupling), çapraz bağlantılı kontrol yapısının genişletilmiş bir formudur ve her motorun kontrol komutunun, tüm diğer motorlarla arasındaki ağırlıklı çıkış farklarıyla düzeltilmesini sağlar. Ağırlıklandırmada genellikle motor atalet değerleri kullanılır. Bu model, motor sayısı arttığında hesaplama yükünün kontrol edilebilir düzeyde kalması sayesinde çok motorlu sistemler için uygundur. Motorlar arasında iki yönlü bilgi akışının kurulması, yük değişimlerinde senkronizasyon kararlılığını artırır. Ancak izleme kontrolü ile senkronizasyon kontrolünün aynı döngüde işlenmesi, iki performans kriteri arasında zorluk oluşturur; bu nedenle yapının geliştirilmiş versiyonları senkronizasyon denetleyicisini bağımsızlaştırarak bu karmaşıklığı azaltmayı amaçlar. (Cao Ling-zhi vd., 2008; Perez-Pinal vd., 2003; Li vd., 2019)

Sanal şaft kontrol yapısı, fiziksel bir şaftın rijitlik ve sönüm özelliklerini matematiksel bir model aracılığıyla taklit eder. Motorlar aynı sanal şaft modeline bağlanmış gibi davranır ve her motorun ürettiği tork bu şaft modeline geri beslenir. Bu sayede motorlar arasında doğal bir bağlantı oluşur ve dış bozucuların senkronizasyon üzerindeki etkisi azalır. Sanal şaft parametrelerinin yazılımsal olarak ayarlanabilir olması, mekanik sisteme müdahale etmeden senkronizasyon performansının optimize edilmesini sağlar. Yapı, özellikle yüksek tork doğruluğu gerektiren uygulamalarda ve yük dalgalanmalarına duyarlı ortamlarda kullanılmaktadır (Yang vd., 2021; Ting vd., 2017).

Bir diğer kaynakta ise, en çok kullanılan çoklu-motor kontrol topolojilerinin temel güçlü ve zayıf yönleri incelenmiş ve özetlenmiştir (Perez-Pinal vd., 2004);

Master–slave yapı, çoklu motor senkronizasyonu için en basit yaklaşımı sunmasına rağmen, çok motorlu sistemlerde istenen senkronizasyon başarımını tam olarak sağlayamamaktadır. Çapraz bağlantılı kontrol yöntemi, hız senkronizasyonu açısından başarılı sonuçlar vermekte ve elektronik sanal şaft (EVLS: Electronic Virtual Line Shafting) ile bağıl eksenler arası kontrol yöntemlerine kıyasla daha kolay uygulanmaktadır. Ancak performansı büyük ölçüde göreli açıya bağlı olduğu için bazı çalışma koşullarında sınırlı kalabilir. EVLS yaklaşımının özgün formunda master motora en yüksek ataletin verilmesi ve tork geri tepkileri, yöntemin uygulama yapısını basit tutsa da tam işlevsellik elde edilmesini engeller. Bağıl eksenler arası kontrol yöntemi, senkronizasyon performansı açısından en iyi sonuçları sunan yapı olmasına karşın, sistem tasarım ve uygulama karmaşıklığı en yüksek olan yöntemdir.

Motorlar arası bilgi paylaşımına dayanan bu yöntemler, özellikle dağıtık kontrol mimarileri ile daha güvenilir yük paylaşımı ve kararlı senkronizasyon sağlamaktadır (Y. Wu vd., 2020). Gerçek zamanlı haberleşme çoğunlukla CAN gibi veri yolu tabanlı ağlarla gerçekleştirilmekte olup, bazı çalışmalarda mikrodenetleyiciler ve FPGA tabanlı hızlandırıcılar bir arada kullanılarak çok eksenli kontrolün gerçek zamanlı performansı artırılmıştır (Gou vd., 2024).

Endüstride paketleme hatları, konveyörler gibi uygulamalarda Master–Slave, Çapraz Bağlantı ve Bağıl eksenler arası kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin her biri yük koşullarına ve sistem özelliklerine göre avantajlar sunmaktadır. Son yıllarda bağıl hata temelli kontrol stratejileri de dikkat çekmiş; hız ve tork senkronizasyonunu aynı anda iyileştiren gelişmiş sapma dengeleme yöntemleri veya bulanık çıkarım mekanizmasına dayalı komşuluk temelli kontrol stratejileri önerilerek sistem dayanıklılığı artırılmıştır (Jiang vd., 2025).

Bir başka çalışmada (M. Zhao vd., 2022), çok motorlu sistemde motorlar, fıçı tipi yapıların inşası için tasarlanan yeni bir inşaat platformunu yukarı doğru kaldırmak amacıyla kullanılmaktadır. Platformun güvenli bir şekilde yükseltilmesi ve burkulma veya merkez kayması yaşanmaması için, bu çoklu SMSM'lerin hızlarının yüksek hassasiyet ve hızlı tepki ile senkronize edilmesi kritik öneme sahiptir. Bu amaçla, sistemin tüm motorlar arasındaki hatayı küresel olarak dengelemesini sağlamak için ortalama-birleştirmeli kontrol yapısı seçilmiştir. Ayrıca, kontrol hassasiyetini ve bozucu yeteneğini artırmak amacıyla, geleneksel PID kontrolörünün parametrelerini gerçek zamanlı olarak uyarlamak için yapay sinir ağı kullanılmıştır.

Madencilik, metalurji ve tarım gibi endüstrilerde yaygın olarak kullanılan vibrasyonlu makinelere dahil olan iki uyarıcıyı çalıştırmak için birden fazla motorlu sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır (Kong vd., 2016). Bu uyarıcılar, sistemin titreşim hareketini oluşturmak için gereklidir. Makale, uyarıcıların kendi kendine senkronizasyon limitlerini aşmak amacıyla , iki özdeş olmayan indüksiyon motorun senkronizasyonunu sağlamak için “Kontrollü Senkronizasyon” yöntemini önermektedir. Bu kontrol için master-slave kontrol stratejisi temel alınmış, burada ana motorun hız kontrolü ve bağımlı motorun faz farkı kontrolü için kayma modu kontrolü uygulanmıştır. Ayrıca, indüksiyon motorların hızlı tepki vermesini sağlamak için her motorun elektromanyetik sistemine Rotor Akı Yönelimli Kontrol stratejisi ve Oransal-İntegral (PI) kontrol yöntemi entegre edilmiştir.

Önerilen kontrol yöntemi olan multilateral kontrolün temeli ise haptik kontrol ve bilateral kontrol metotlarına dayanmaktadır. Haptik kontrol, dokunsal geribildirimin kullanıldığı bir kontrol yöntemidir. Bu kontrol yöntemi, kullanıcının hareketleri veya dokunuşlarına tepki veren ve kullanıcıya geribildirim sağlayan bir sistemdir. Haptik kontrol, bir kişinin fiziksel temas veya dokunuş yoluyla bir cihazı veya sistemi kontrol etmesine olanak tanır. Haptik kontrol, bir dizi dokunsal geribildirim mekanizması aracılığıyla çalışır. Bu mekanizmalar, kullanıcıya hissedilebilir titreşimler, basınç, kavrama veya dokunsal tepkiler gibi dokunsal duyumlar sağlar. Kullanıcının el veya parmak hareketleri, basınç uygulaması veya hareket algılayıcıları aracılığıyla algılanır ve bu bilgiler geri bildirim mekanizmalarına iletilir. Multilateral kontrol ise birden fazla motorun bağımsız olarak çalıştığı bir kontrol sistemidir. Her motor, kendine özgü bir kontrol sinyali veya komut alır ve bu komutlara bağlı olarak hareketini gerçekleştirir. Bu tür kontrol sistemleri, karmaşık ve bağımsız hareketlerin gerçekleştirilmesi gereken durumlarda kullanılır. Multilateral kontrolde sistem gerekliliklerine göre, master-slave sayısı değiştirilebilmekte 1xN, Nx1 ya da NxN master-slave yapıları kullanılmaktadır (Shahbazi vd., 2018).

Multilateral ya da bilateral kontrol master-slave tanımlamaları ile özdeşleşmiş bir kavramdır. İlk master-slave kontrolü, 1940'lı yıllarda R. C. Goertz'in tehlikeli maddelerin güvenli bir şekilde taşınması için yaptığı çalışma ile literatürde ortaya çıkmıştır. Daha sonra, ay ve ötesindeki uzaktan operasyonlar için tasarlanmaya 1960'lı yıllarda başlamıştır. İnsan operatör bir "master" kolu kontrol ederken, bir "slave" kol hareketini kopyalar ve bilgisayar aracılığıyla uzaktaki bir başka bilgisayara ileterek hareketin uzaktan yapılmasına olanak sağlamıştır (Ferrell ve Sheridan, 1967). Daha sonra ise Kosuge ve meslektaşları 1990'da bir göreve yönelik tek master, çoklu slave'e sahip bir sistemi tanıttı. Sistem, operatörü yardımcı kolların koordinasyonundan kurtararak işine odaklanmasına olanak tanımaktaydı. Ancak test sistemlerinin tam olarak bilateral bir işlevi bulunmuyordu (Kosuge vd., 1990)**.** Günümüzde yapılan son çalışmalar, teknolojik ilerlemelerle birlikte daha hassas hesaplamalara ve özelleştirilmiş modellemelere odaklanarak, önceki çalışmalardan farklı olarak haptik kontrol ve bilateral kontrol gibi konuları ele almaktadır(Katsura vd., 2004). Bu gelişmeler, master-slave sistemleri için daha gelişmiş işlevsellik ve optimize edilmiş performans sunmaktadır. Başka bir çalışmada ise, bilateral kontrol, bozucu gözlemcisi yöntemini temel alarak analiz edilmiş ve tasarlanmıştır. Bu metot, bozucu torkunu tahmin etme ve gürbüz ivme kontrolü elde etme amacını taşır. Yayın, dört kanallı bir kontrolörün, pozisyon kontrolü ve kuvvet kontrolünün ivme boyutunda birleştiği ve ortak ve farklı modlara ayrıldığı şeklinde bir tasarımı göstermektedir. Multilateral kontrol ise bilateral kontrolün genişletilmiş bir versiyonudur. Bilateral kontrol metodu, bir master robot kolunun hareketlerini bir slave robot koluna aktarırken, aynı zamanda geri bildirim alır. Bu metot, cerrahi robotik sistemlerde, rehabilitasyon robotlarında, sanal gerçeklik uygulamalarında ve diğer haptik sistemlerde kullanılabilir. Multilateral kontrol metodu ise bilateral kontrolün genişletilmiş bir versiyonudur ve çoklu eklemlerde haptik yeteneği olan robotlarda kullanılabilir. Bu metot, daha karmaşık ve çoklu dokunma noktaları gerektiren uygulamalarda kullanılabilir. Örneğin, çoklu dokunma noktaları gerektiren sanal gerçeklik oyunları veya karmaşık cerrahi prosedürler gibi uygulamalarda kullanılabilir. Verilen yayında, bilateral kontrol metodu modal ayrışma prensibiyle ortak mod ve farklı modlar olarak tasarlanmıştır. Ortak mod, bilateral kontrol sisteminin bir parçasıdır ve pozisyon kontrolü ve kuvvet kontrolünü içerir. Bu mod, bilateral kontrol sisteminin genel

davranışını temsil eder. Farklı mod ise bilateral kontrol sisteminin diğer bir parçasıdır ve farklılık gösteren özellikleri içerir. Algoritmanın testleri gerçek deney düzeneğinde 2 motor kullanılarak yapılmıştır.

Bilateral kontrol ve multilateral kontrol konularını inceleyen başka bir çalışmada (Suzuyama vd., 2006), öncelikle ivme kontrolüne dayalı bilateral sistem tartışılmaktadır. Bu çalışmada kimlik oranı tanıtılmaktadır. Bu durum, ortak moddaki her bir girişin oranını gösterir. Slave robot birçok master tarafından kontrol edilse de her bir master kimlik oranı kullanarak gerçek ortamı hisseder. Algoritmanın testleri gerçek deney düzeneğinde ve simülasyon ile yapılmıştır. 2 Master 1 slave yapısı kullanılmıştır.

Ayrıca literatürde kullanılacak test platformuna benzer yapılar ve bu yapılarda kullanılan yöntemler incelenmiştir. Örneğin bir çalışmada (Wei vd., 2013), motorlar tünel açma makinelerinde kesici kafayı döndürmek için kullanılır ve platformun güvenilirliğini sağlamak amacıyla tahrik sistemindeki çoklu pinyonlar aracılığıyla halkalı dişliye güç iletirler. Çalışma, motorların asenkron çalışması ve dalgalı tünel açma yükü altında dişlilerde meydana gelen arızaları ve tork dağılımı dengesizliğini çözmeyi hedeflemiştir. Bu amaçla, sürücü mekanizması ve kesici kafanın ataletini ve eğilme-burulma kuplajını dikkate alan bir dinamik model oluşturulmuş ve yük paylaşım katsayısının 1.2-1.3 gibi yüksek değerlere ulaştığı doğrulanmıştır. Dengesizliği gidermek için ise, mevcut tork ana-bağımlı kontrol yöntemine kıyasla tork senkronizasyon hatalarını bitişik motorlar arasında telafi eden yeni bir döngü kuplaj kontrol yöntemi önerilmiş ve bu sayede yük paylaşım katsayısı 1.051'e düşürülmüştür.

(Liu vd., 2021) çalışması ise, motorlar arasındaki kaçınılmaz parametre sapmaları (dişli boşluğu, motor parametreleri vb.) nedeniyle ortaya çıkan şiddetli titreşim, tork dengesizliği ve sistem kararsızlığı sorunlarını çözmeyi amaçlamıştır. Bu amaçla, üç farklı senkron kontrol yöntemi karşılaştırılmıştır: her motorun ayrı ayrı kontrol edildiği Geleneksel Hız Paralel Kontrolü (SPC), SPC'nin tork senkronizasyonunu iyileştirmek için yük torkuna göre hedef hızı ayarlayan bir kontrol eklenmiş versiyonu (SPCD) ve bir motorun master, diğerlerinin takipçi olduğu ve daha düşük dinamik tepki pahasına titreşimi elimine etmek için yumuşak kontrol parametreleri kullanan Yumuşak Tork Master-Bağımlı Kontrolü (STMSC). Simülasyon ve deney sonuçları, SPC' nin hız takibinde en iyi performansı gösterdiğini ancak tork dengesizliği yaşadığını; SPCD'nin kabul edilebilir hız doğruluğu kaybıyla yük paylaşımını ve sistem kararlılığını iyileştirdiğini ve STMSC' nin ise en yüksek sistem titreşimi pahasına anlık torkları kesinlikle tutarlı hale getirdiğini göstermiştir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, çoklu motor sistemlerinin kontrolünde kullanılan topolojilerin senkronizasyon performansı ve uygulama karmaşıklığı arasında bir denge kurulmaya çalışıldığı görülmektedir. Geleneksel yöntemlerden Paralel Kontrol, her motorun bağımsız sürülmesi prensibine dayandığından, uygulaması çoklu motor kontrol yapılarına göre basit olmasına rağmen yük dengesizliklerinde motorlar arası koordinasyonu sağlamada yetersiz kalmaktadır. Benzer şekilde endüstride sıkça tercih edilen Tork-Takipçi gibi yapılar, basit ve uygulanabilir olmalarına rağmen, tek yönlü bilgi akışı nedeniyle bağımlı motorlarda oluşan bozucu etkilerin ana motora iletilememesi ve dinamik gecikmeler gibi sorunlar barındırmaktadır. Gelişmiş yöntemlerden olan Çapraz Bağlantı ise motor sayısı arttıkça hesaplama yükünü aşırı artırmakta bu da uygulamalara bağlı olarak sorun yaratabilmektedir. Mevcut yöntemlerdeki bu kısıtları

aşmak amacıyla, bu tez çalışmasında Multilateral Kontrol yöntemi önerilmiştir. Önerilen bu yapı, hız ve tork bilgilerinin kontrolcüler arasında çift yönlü akışını sağlayarak, sistemin hem hız senkronizasyonunu hem de yük paylaşımını eş zamanlı olarak iyileştirmeyi hedeflemektedir. Çalışma kapsamında; endüstriyel standart kabul edilen Paralel Kontrol ve Tork-Takipçi Kontrol yöntemleri ile önerilen Multilateral Kontrol yapısı aynı test platformu üzerinde karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Elektrik motorlarının kontrol sistemleri tasarımında, sistem dinamiklerinin doğru modellenmesi kontrolcü performansını doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda sistem modellemesi ile ilgili olarak Fırçasız Doğru Akım, Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor ve Doğru Akım motorları üzerine yapılan modelleme çalışmaları da incelenmiştir.

Fırçalı/fırçasız DC motorlar, servo, step ve indüksiyon motorları gibi farklı elektrik makineleri üzerinde uygulanan sistem tanımlama yöntemlerini kapsamlı bir şekilde incelendiği bir çalışmada, motorun fiziksel denklemlerinin karmaşık veya parametrelerin belirsiz olduğu durumlarda, sistemin giriş-çıkış davranışını temsil eden transfer fonksiyonu tabanlı 'Kara Kutu' modellerin sıklıkla tercih edildiğini belirtmişlerdir. Yapılan taramada, bu modellerin oluşturulmasında En Küçük Kareler ve Yinelemeli En Küçük Kareler gibi klasik parametrik yöntemlerin yanı sıra, Yapay Sinir Ağları ve Genetik Algoritmalar gibi yapay zeka tabanlı yaklaşımların da yaygın olarak kullanıldığı raporlanmıştır (Arifin vd., 2021).

Karmaşık dinamiklere sahip sistemlerde matematiksel modellerin analitik yollarla türetilmesindeki zorlukları aşmak amacıyla, veriye dayalı kontrol yaklaşımları ve sistem tanımlama süreçleri literatürde önemli bir yer tutmaktadır. Bu kapsamda, fiziksel bir DC motorun davranışları Simscape ortamında modellenerek, elde edilen giriş-çıkış verileri üzerinden sistemin doğrusal olmayan otoregresif yapay sinir ağı modelleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda, kullanılan yapay sinir ağı yapısının sistemin doğrusal olmayan dinamiklerini yüksek bir doğrulukla temsil ettiği belirlenmiş ve sistem tanımlama süreciyle elde edilen bu model üzerinden tasarlanan PID kontrolör ile referans hız takibinin kararlı bir şekilde gerçekleştirildiği gösterilmiştir (Naung vd., 2018).

Kapalı çevrim çalışan dinamik sistemlerin modellenmesinde giriş sinyali ile gürültü arasındaki korelasyon nedeniyle geleneksel yöntemlerde yanlılık (bias) sorunu ortaya çıkmaktadır. Özellikle açık çevrim veri toplamanın pratik olmadığı geri beslemeli sistemlerde bu durum modelleme sürecini zorlaştırmaktadır. Bu kısıtı aşmak amacıyla, alt uzay destekli kapalı çevrim sistem tanımlama yöntemi önerilmiş ve bu yöntem pratik bir DC motor düzeneği üzerinde doğrulanmıştır. Çalışma sonucunda, önerilen algoritmanın, Temel Bileşenler Analizine dayalı diğer alt uzay yöntemlerine kıyasla, motorun dinamik parametrelerini ve kutup noktalarını kapalı çevrim çalışma koşullarında çok daha yüksek bir doğrulukla ve yansız (unbiased) olarak kestirebildiği gösterilmiştir (K. Li vd., 2020).

(Rahman ve Yahya, 2022) yaptığı çalışmada ise matematiksel modellemenin doğruluğu, model tabanlı kontrol stratejilerinin başarısını doğrudan etkilediğinden, bir DC motorun matematiksel modelini oluşturmak için kutup-sıfır tabanlı bir tanımlama yaklaşımı kullanılmış ve bu model üzerinde Cohen-Coon ayar metoduna sahip bir PI-PD kontrolör tasarlanmıştır. Çalışma, sistem tanımlama süreciyle elde edilen parametrelerin kullanıldığı durumun, kullanılmayan duruma göre motorun hız kontrol performansını

belirgin şekilde artırdığını simülasyon verileriyle ortaya koymuştur.

Modern sürücü sistemlerinde, motorun sadece yüksüz durumdaki dinamiklerinin değil, aynı zamanda yük altındaki enerji verimliliğinin de analiz edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, BLDC (Fırçasız DC) motorlar için sistem tanımlama, model doğrulama ve yük testlerini içeren bütünleşik bir deneysel çerçeve önerilmiştir. Araştırmacılar, 1 Nm ile 4 Nm arasında değişen sabit yük torkları altında motorun hız tepkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, artan yük torkunun sistem verimliliğini belirli bir noktaya kadar (3 Nm) iyileştirdiği, ancak batarya akım tüketimini ve gerilim düşümünü de doğrusal olmayan bir şekilde etkilediği raporlanmıştır (Abouseda vd., 2025).

Sistemlerin içerdiği sürtünme ve doygunluk gibi doğrusal olmayan etkilerin modellenmesi, kontrol performansını doğrudan etkilemektedir. MATLAB Sistem Tanımlama Araç Kutusu kullanılarak BLDC motor verileri üzerinde ARX, ARMAX, Çıkış-Hatası ve Box-Jenkins gibi doğrusal modeller ile NARX ve Hammerstein-Wiener gibi doğrusal olmayan modelleri kapsamlı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, motorun dinamik davranışını temsil etmede doğrusal olmayan modellerin, doğrusal modellere kıyasla çok daha yüksek bir başarı (%98 üzeri uyum) gösterdiği belirlenmiştir (Khan vd., 2025).

Başka bir çalışmada, SMSM hız servo sistemlerinde karşılaşılan parametrik belirsizlikleri ve yapısal olmayan dinamikleri tanımlamak amacıyla sistem durumlarına dayalı bir sistem tanımlama süreci yürütülmüştür. Çalışmada, yapay sinir ağları kullanılarak oluşturulan durum kestiricisi sayesinde, sistemin tüm dinamik bilgisi sabit bir ağ yapısı içerisinde saklanabilir hale getirilmiştir. Gerçekleştirilen veriye dayalı analizler sonucunda, önerilen yöntemin dinamik davranışları öğrenme kapasitesinin geleneksel yöntemlere kıyasla daha etkili olduğu raporlanmıştır (Yu vd., 2020).

Yüksek performanslı servo uygulamalarında SMSM'lerin hızlı ve kararlı bir hız cevabı üretmesi hedeflenmektedir. SMSM hız kontrolünde kullanılan PI kontrolörlerin parametrelerinin (Kp, Ki) belirlenmesi, sistemin geçici hal performansını doğrudan etkilemektedir. MATLAB/Simulink ortamında modellenen Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor için transfer fonksiyonu tabanlı bir tasarım metodolojisi izlenmiştir. Çalışmada, Tek Giriş-Tek Çıkış (SISO) tasarım araçları kullanılarak optimize edilen PI katsayılarının, motorun yük altındaki ve yüksüz durumdaki dinamik davranışlarını istenen referans değerlerine başarıyla oturttuğu raporlanmıştır (Mishra vd., 2017).

Bir diğer çalışmada, bir sıvı akış sistemi için sistem tanımlama tekniklerini kullanılarak en uygun model yapısının belirlenmesi amaçlanmıştır. Farklı derecelerdeki parametrik modellerin karşılaştırıldığı çalışmada, “En iyi uyum” kriteri baz alınarak seçilen transfer fonksiyonunun, sistemin kararlı hal ve geçici durum tepkilerini diğer modellere kıyasla daha az hatayla modellediği raporlanmıştır (Araydah vd., 2017).

Endüstriyel motor sürücülerinin iç kontrol parametrelerinin kullanıcıya kapalı olduğu durumlarda, tüm sistemi kapsayan bir modelin çıkarılması kontrolcü tasarımı için zorunlu hale gelmektedir. Bir elektrikli tren simülatöründe kullanılan ve SMSM sürücülerle tahrik edilen sistem üzerinde donanım tabanlı bir sistem tanımlama çalışması gerçekleştirilmiştir. dSPACE ve MATLAB/Simulink ortamlarının entegre edildiği çalışmada, sistemin açık çevrim basamak tepkisi verileri kullanılarak transfer fonksiyonu

elde edilmiş ve bu model sayesinde hız senkronizasyonu için gerekli PI kontrolör parametreleri hassas bir şekilde ayarlanabilmiştir (Ismail vd., 2023).

Bu doğrultuda, bu tez çalışmasında sistemin giriş-çıkış davranışını modellemek amacıyla MATLAB Sistem Tanımlama Araç Kutusu kullanılarak "Transfer Fonksiyonu" yaklaşımı tercih edilmiştir. Bu modellemenin amacı ise sistemin giriş-çıkış ilişkisini açık ve yorumlanabilir bir biçimde tanımlaması, farklı çalışma senaryoları için sistem davranışının öngörülmesine olanak sağlaması ve deneysel testler ile tanılama çalışmalarında kullanılabilir olmasıdır. Ayrıca, modelin sunduğu bu öngörü yeteneği sayesinde sistemin hangi çalışma koşullarında ve hangi uygulama alanlarında etkin şekilde kullanılabileceği, farklı projelere ve kullanım senaryolarına olan uygunluğu hakkında da değerlendirme yapılabilmektedir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Modellemesi ve Vektör Dönüşümleri

Çoklu motor kontrol stratejilerini tam olarak kavrayabilmek için, bu yaklaşımların temelini oluşturan tek motor modellemesinin iyi anlaşılması gerekmektedir. Yüksek performanslı sürüş gereken sistemlerde yaygın olarak tercih edilen sabit mıknatıslı senkron motorların modellenmesi, Clarke ve Park dönüşümleri temel alınarak gerçekleştirilir. Özellikle alan yönlendirmeli kontrol ve güç elektroniği sistemlerinde kullanılan bu matematiksel yöntemlerin temel amacı; üç fazlı ve zamanla değişen AC sinyalleri, iki eksenli sabit DC sinyallere dönüştürmektir. Bu sayede karmaşık AC motor yapısı, kontrol açısından bir DC motor basitliğine indirgenerek daha anlaşılır ve yönetilebilir hale gelir (P. Vas, 1990)**.** Üç fazlı büyüklüklerin αβ ve ardından dq referans çerçevesine dönüştürülmesi, Denklem 3.1, 3.2 ve 3.3'te verilen Clarke-Park dönüşümleri kullanılarak gerçekleştirilir.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ 0 & 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{3} \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

Stator gerilimlerini hesaplamak için kullanılan denklemler Denklem 3.4 ve 3.5'te verilmiştir.

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + n_p \omega_r \lambda_d \tag{3.4}$$

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - n_p \omega_r \lambda_q \tag{3.5}$$

Bu denklemlerde, u_d ve u_q, d ve q eksenlerindeki stator gerilimlerini ifade eder; benzer şekilde, i_d ve i_q, d ve q eksenlerindeki stator akımlarını temsil eder ve her bir λ akı bileşenlerini temsil eder. Rs stator direnci, n_p kutup çifti sayısı ve ω_r elektriksel rotor hızıdır.

$$\lambda_q = L_q i_q \tag{3.6}$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \theta_e \tag{3.7}$$

Bir SMSM'nin elektromanyetik torku Denklem (3.8) ile ifade edilir; burada k_t tork sabitini, i_q ise q-ekseni akımını temsil eder. Bu ilişki, id ≈ 0 varsayımı altında i_q akımını düzenleyerek AYK ile tork kontrolünü mümkün kılar. Geleneksel olarak, deneysel torkla ilgili yorumlar, ölçülen i_q değerlerine dayanır. Buna göre, deneysel sonuçlarda gözlemlenen tork davranışı, ölçülen i_q değerleri aracılığıyla yorumlanır.

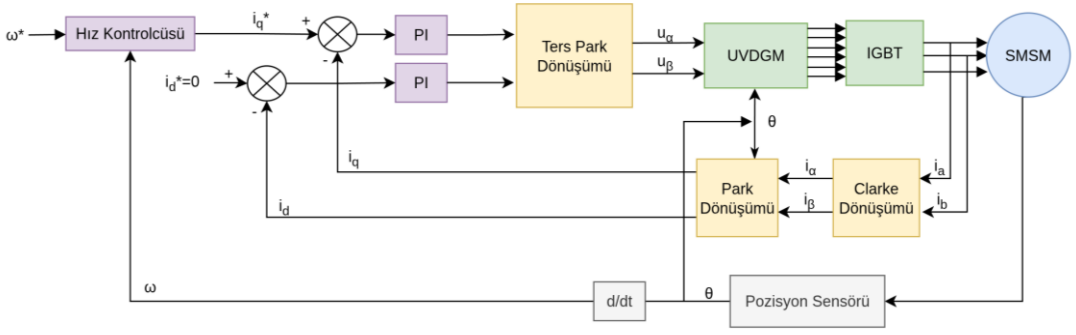
$$T = \frac{3}{2} k_t i_q = \frac{3}{2} k_t i_{pk} \tag{3.8}$$

$$k_t = n_p \theta_e \tag{3.9}$$

Tork sabiti k_t, faz akımı başına üretilen maksimum torku temsil eder ve her ikisi de SI birimlerinde ifade edildiğinde ($k_t = n_p.\phi_e = k_e$) sayısal olarak zıt EMK sabiti k_e ile aynıdır.

3.2. Alan Yönelimli Kontrol

Alan Yönelimli Kontrol yöntemi, alternatif akım motorlarının (SMSM veya Asenkron) tork ve akı bileşenlerinin birbirinden bağımsız olarak kontrol edilmesini sağlayarak, bir DC motor gibi basit ancak yüksek dinamik performansla kontrol edilmesine olanak tanır. Sistemin matematiksel modelini basitleştiren ve kontrol döngüsünü oluşturan temel blok diyagramı Şekil 3.1'de sunulmaktadır. Kontrol süreci, motor fazlarından alınan üç fazlı akım verilerinin (i_a, i_b, i_c) ölçülmesiyle başlar ve bu veriler Clarke dönüşümü kullanılarak iki fazlı eksen takımına (αβ) indirgenir. Ardından, rotor pozisyon bilgisi kullanılarak uygulanan Park dönüşümü ile bu büyüklükler döner eksen takımına (dq) taşınır; böylece zamanla değişen AC büyüklükler, kontrolü daha kolay olan DC büyüklüklere dönüştürülmüş olur. Elde edilen d ekseni akımı manyetik akıyı, q ekseni akımı ise torku temsil eder ve bu değerler referans akım değerleri ile karşılaştırılarak hata sinyalleri oluşturulur. PI (Oransal-İntegral) denetleyicilerden geçirilen hata sinyalleri, ters Park dönüşümü ve Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (UVDGM) algoritmaları aracılığıyla inverter anahtarlama sinyallerine dönüştürülerek motorun istenen hız ve tork değerlerinde sürülmesi sağlanır (Cordeiro vd., 2020).



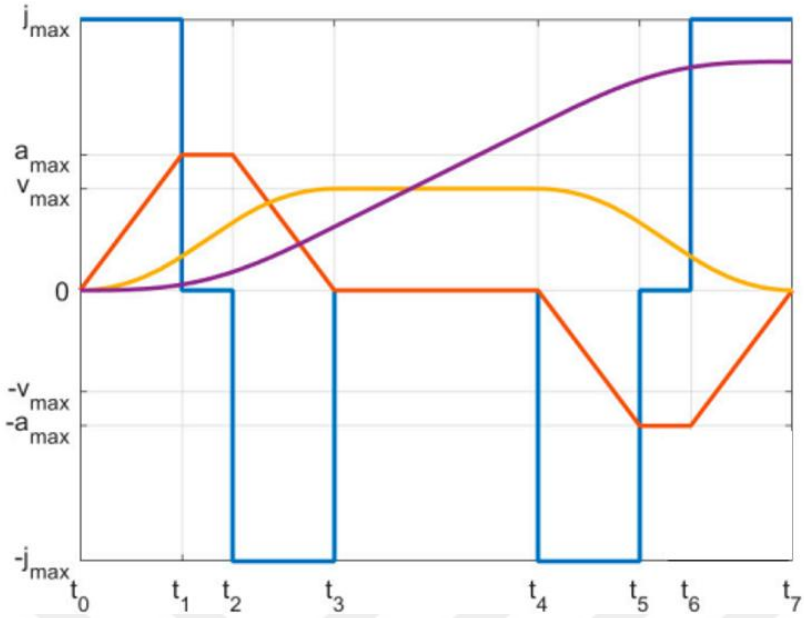
Şekil 3.1. Alan Yönelimli Kontrole (AYK) Dayalı SMSM Sürüş Sisteminin Genel Kontrol Yapısı

AYK uygulamalarında iki farklı açı değeri bulunur; mekanik açı ve elektrik açısı. Elektrik açısı, motorun rotor üzerindeki manyetik kutupların (N-S) stator sargılarına göre o anki manyetik pozisyonunu ifade eder ve kontrol algoritmaları için asıl kritik olan parametredir. Mekanik açı, motor milinin fiziksel olarak bir tam tur (360 derece) dönmesini temsil ederken, elektrik açısı bu dönüş sırasında manyetik alanın kaç tam çevrim (bir kuzey ve bir güney kutbu geçişi) tamamladığını gösterir. Bu bağlamda, motor miline entegre edilen pozisyon sensörü sayesinde konum sensörlerinden okunan ham veri, doğrudan milin fiziksel pozisyonunu, yani mekanik açıyı verir. Ancak AYK algoritması için bu mekanik verinin, motorun kutup çifti sayısı ile çarpılarak elektrik açısına dönüştürülmesi şarttır; çünkü stator sargılarına uygulanacak gerilim vektörlerinin zamanlaması ve yönü, fiziksel konuma göre değil, manyetik akının anlık pozisyonuna göre belirlenir. Elde edilen bu elektrik açısı (θ_e), Park ve Ters Park dönüşümlerinde kullanılarak, üç fazlı alternatif akım büyüklüklerinin (a,b,c), rotorla senkron dönen d-q eksen takımına indirgenmesini sağlar.

AYK algoritmalarında hız bilgisi genellikle doğrudan bir sensörden okunmaz; bunun yerine, periyodik olarak örneklenen iki konum verisi kullanılarak hesaplanmaktadır. Ancak, enkoder gibi dijital sensörlerden gelen konum verisi kesikli (basamaklı) bir yapıya sahip olduğundan, bu türev alma işlemi gürültülere neden olabilir. Gerçekte motor hızı sabit olsa bile, hesaplanan hız sinyali bu sebeple gürültülü gelmektedir. Bu noktada, ham hız verisini temizlemek ve kontrol döngüsünün kararlılığını korumak için Alçak Geçiren Filtre (LPF) kullanılır. LPF, yüksek frekanslı gürültü bileşenlerini filtreleyerek daha pürüzsüz bir hız bilgisi elde edilmesini sağlar; ancak bu filtreleme işlemi, sistemin tepki süresinde kaçınılmaz bir gecikmeye yol açar, bu nedenle filtre katsayılarının dinamik performansı düşürmeyecek hassaslıkta ayarlanması gerekir.

Hız referansı oluştururken üçüncü dereceden S-Eğrisi şeklinde yörünge kullanılmıştır. Pozisyon, hız, ivme ve sarsıntı parametrelerinin zamana göre değişimi r Şekil 3.2.'de verilmiştir. S-Eğrisi, bir motorun veya mekanik sistemin bir noktadan diğerine giderken hızlanma ve yavaşlama süreçlerini yumuşatan bir yörünge planlama yöntemidir. Standart "Trapez" hız profillerinde ivme aniden sıfırdan maksimuma çıkar. Bu ani değişim, teorik olarak sonsuz bir sarsıma neden olur. S-Eğrisi ise ivmenin sabit değil, doğrusal olarak artıp azaldığı bir profildir. Hız grafiğinin köşeleri keskin değil, "S" harfine benzer şekilde yumuşak olduğu için bu ismi alır. Bu yöntemin avantajları ise;

Ani ivme değişimleri (trapez profildeki gibi) mekanik sistemde şok etkisi yaratır ve gövdede kalıcı titreşimlere yol açar. S-Eğrisi, ivmeyi yavaşça artırıp azalttığı için bu şoku sönümler, hata takibini iyileştirir ve mekanik ömrü uzatır. Dişliler, kayışlar ve rulmanlar üzerindeki ani stres yükünü kaldırır. Kontrolcü (PID vb.), ani değişimler yerine yumuşak değişimleri çok daha düşük hatayla takip eder.



Şekil 3.2. Üçüncü dereceden S-Eğrisi Yörüngesi (Burkhard Alpers, 2021)

Profilin üçüncü derece olarak adlandırılmasının temel nedeni, konumun zamana göre değişiminin kübik (t^3) bir polinom ile ifade edilmesidir. Yöntem, ivmenin değişim hızı olan sarsımı sınırlı tutarak sistemin ani mekanik darbelere ve titreşimlere maruz kalmasını engeller. SMSM kontrolünde bu profilin kullanılması, özellikle ani referans değişimlerinde oluşabilecek aşımı önleyerek sistem kararlılığını artırır. Sonuç olarak bu yörünge tipi, hassas konumlandırma gerektiren uygulamalarda hem mekanik donanımın ömrünü uzatır hem de kontrolörün referans takip hatasını minimize eder.

3.3. Çoklu Motor Kontrol Stratejileri

Çoklu motor sistemleri, birden fazla motorun ortak bir mekanik yükü tahrik ettiği sistemlerde senkronizasyonu sağlamak için kullanılmaktadır. Kontrol stratejileri, referans üretimi, geri besleme kullanımı ve motorlar arasındaki koordinasyon açısından farklılık göstermektedir. Paralel ve Tork-Takipçi kontrol stratejileri, bu yaklaşımların temel örnekleridir. Bu çalışmada önerilen Multilateral kontrol yöntemi ise çoklu motor kontrol mimarilerine bir alternatif sunmaktadır (Niu vd., 2023).

3.3.1. Paralel kontrol

Paralel kontrol stratejisinde, her motor kendi hız referans sinyallerine göre diğer motorlardan ve kontrolcülerden tamamen bağımsız olarak çalışır. Tüm motorlar, aralarında herhangi bir bilgi alışverişi olmaksızın, hız ve alan yönelimli kontrolden (tork ve akı kontrolü) oluşan kademeli kontrol döngüleri yürütür. İncelenen sistemde, üç sabit mıknatıslı senkron motor kendine özel bir kontrolör-sürücü ünitesi ile eşleştirilir ve yalnızca kendi geri beslemesini kullanarak tam yerel kontrol gerçekleştirir. Bu yapı modülerlik, uygulama kolaylığı ve donanım esnekliği sağlasa da, aynı yüke mekanik olarak bağlı motorlar arasındaki dinamik etkileşimleri hesaba katmaz (Jiang vd., 2025; Zhang vd., 2024).

3.3.2. Tork-Takipçi kontrol

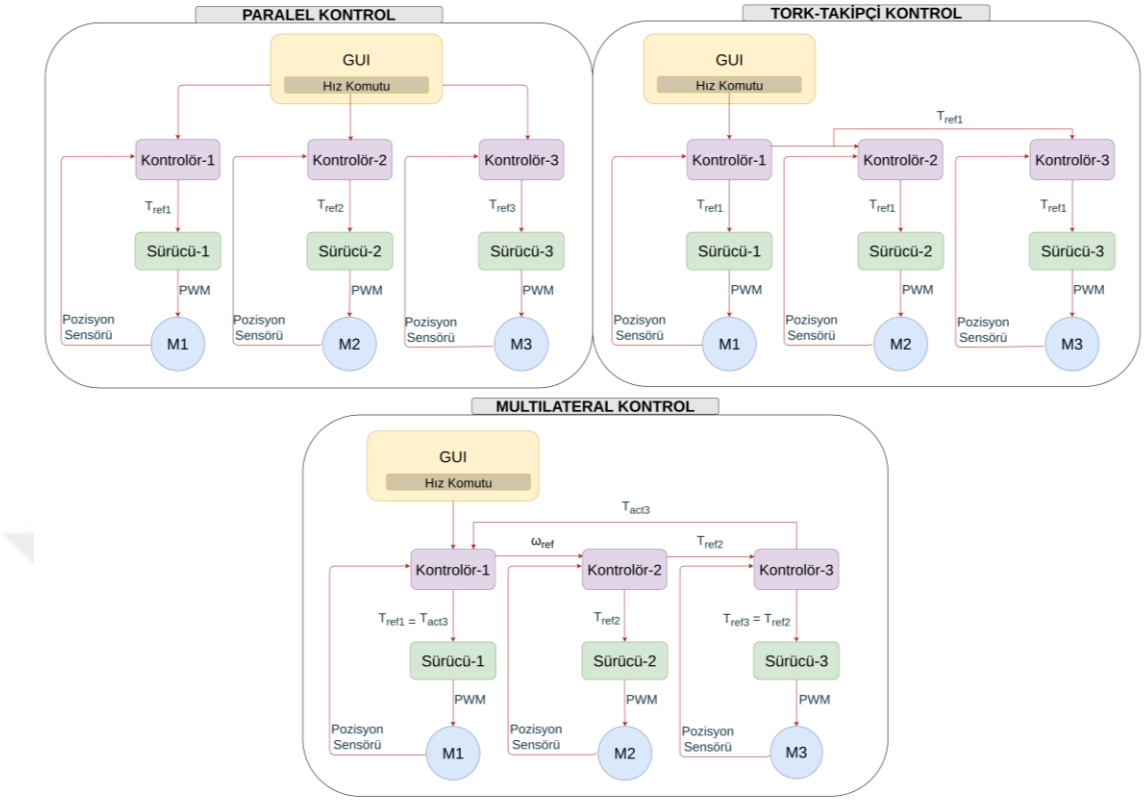
Tork-Takipçi kontrol yaklaşımında, bir motorun master motor, diğerlerinin ise slave motorlar veya takipçiler olarak atandığı hiyerarşik bir mimari oluşturulur (H.-J. Lee ve Oh, 2017). Master motor, hız ve tork kontrolü dahil olmak üzere bütün kontrol döngülerini yürütür ve bir tork referansı üretir. Bu referans, kendi Alan Yönelimli Kontrol (AYK) döngülerini kullanarak yalnızca tork kontrolünü gerçekleştiren takipçi motorlara yayınlanır. Sonuç olarak, tüm motorlar aynı tork komutunu uygular ve yerel hız kontrolü gerçekleştirmeden senkronize olarak çalışabilirler. Bu strateji, dengeli ve istikrarlı çalışma koşulları altında temel koordinasyonu sağlamak ve uygulamak için kullanılmaktadır. Ancak slave motorların tork ve hız tepkileri master'a iletilmez ve master tek yönlü iletişime sahip olduğu için bu durumlardan bilgi sahibi değildir.

3.3.3. Multilateral kontrol

Bu çalışmada "Multilateral" terimi, her motorun yalnızca yerel geri bildirim almakla kalmayıp, aynı zamanda diğer motorların gerçek zamanlı hareket referansı ve tork çıkışına göre kontrol eylemini dinamik olarak ayarladığı bir kontrol yapısını ifade eder.

Merkezi veya master-izleyici yaklaşımlarında koordinasyon tek yönlü veya hiyerarşik bir yapı içinde yapılırken, önerilen yöntem tüm motor kontrolörleri arasında karşılıklı etkileşimli, tamamen dağıtılmış bir geri besleme döngüsü oluşturur. Bu, paylaşılan yük farkındalığı ve koordinasyon yoluyla senkronize çalışmayı amaçlamaktadır (Kebude vd., 2014; Kitamura vd., 2009). Bu yöntemde koordinasyon, kontrolörler arasında hareket referanslarının ve tork geri bildirimlerinin karşılıklı değiş tokuşu yoluyla sağlanır ve tüm motorların ortak yükün gerçek zamanlı farkındalığıyla çalışması sağlanır. Mevcut sistemde hareket referansı hız komutu olarak tanımlanmıştır; ancak, uygulama gereksinimlerine bağlı olarak konum referansı da kullanılabilir.

Önerilen Multilateral kontrol stratejisinde, üç kontrolör bir halka topolojisinde birbirine bağlanmıştır ve birimler arasında gerçek zamanlı tork geri bildirimi sağlar. Kontrolör 1, PC'den hız komutlarını alır ve üçüncü dereceden yörünge oluşturma şemasına dayalı olarak karşılık gelen hız referanslarını hesaplar. Ayrıca, Kontrolör 3'ten aldığı gerçek tork değerini referans alarak tork kontrolü gerçekleştirir. Kontrolör 2, Kontrolör 1'den gelen hız ve tork referansları kullanarak tam kademeli kontrol (hız ve tork) gerçekleştirir. Kontrolör 3, tork referansını doğrudan Kontrolör 2 tarafından üretilen tork referansından alarak yalnızca tork kontrolü gerçekleştirir. Bu kapalı döngü halka topolojisi, tüm denetleyiciler arasında karşılıklı tork etkisi, uyarlanabilir yük paylaşımı ve değişen yük koşulları altında iyileştirilmiş senkronizasyon performansı sağlamayı amaçlamaktadır. Bu stratejiler Şekil 3.3'de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Paralel, Tork-Takipçi ve Multilateral Kontrol Stratejileri

3.4. Test Düzeneği Tasarımı

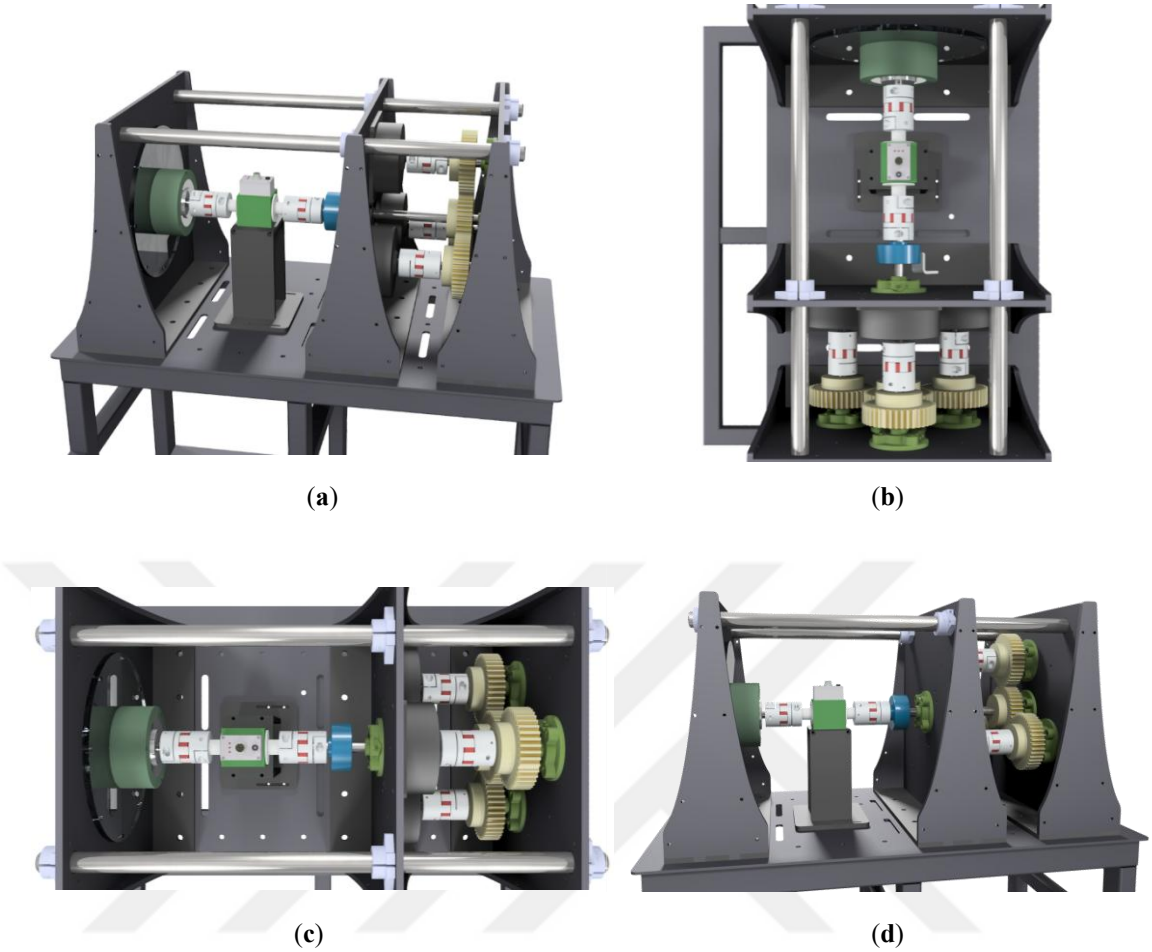
Test platformu, her biri bağımsız bir kontrolör-sürücü kartı tarafından sürülen üç adet 24 V, 5 Nm sabit mıknatıslı senkron motor içerir. Her kontrolör–sürücü kartı, kontrol ve iletişim görevlerinden sorumlu bir mikrodenetleyici biriminden (MCU) oluşur. Her motor, hassas konum ve hız geri bildirimi için kendi yüksek çözünürlüklü pozisyon sensörüne sahiptir. Faz akımları, düşük dirençli şönt dirençler kullanılarak ölçülmüş ve sabit bir örnekleme hızında 12 bitlik bir ADC ile dijitalleştirilmiştir. Sistem ayrıca, motorları birbirine bağlayan ortak şafta monte edilmiş merkezi bir tork sensörü de içermektedir. Motorların dahili sensöründen bağımsız olarak, sistemin nihai çıkışındaki (ana yük mili) anlık hız ve konumu yüksek hassasiyetle tespit etmek için sisteme şaft konum sensörü entegre edilmiştir. Geleneksel milli enkoderlerin montajında zorunlu olan esnek kaplin kullanımı, sistemde zamanla mekanik boşluk ve eksenel kaçıklık gibi ölçüm hatalarına yol açabilmektedir. Bu nedenle çalışmada, harici bir aktarma organına ihtiyaç duymadan doğrudan mile yataklanabilen ve söz konusu mekanik hataları elimine ederek yüksek ölçüm güvenilirliği sağlayan oyuk milli enkoder tercih edilmiştir. Test sırasında kontrol edilebilir yük koşulları uygulamak için bir elektromanyetik fren entegre edilmiştir. SMSM, konum sensörü, tork sensörü, şaft konum sensörü ve elektromanyetik frenin ayrıntılı özellikleri, test donanımının nominal gücü, akımı, ataleti ve algılama özellikleri Çizelge 3.1'de özetlenmiştir. Denetleyici ve sürücü kartları, CAN Bus (1 Mbit/s) iletişim ağı üzerinden haberleşmektedir ve dağıtılmış bir kontrol mimarisi kullanmaktadır. Ana bilgisayardaki Grafik Kullanıcı Arayüzü (GUI), Ethernet (100

Mbit/s) üzerinden denetleyici ile iletişim kurarak sürüşü başlatma/durdurma eylemlerini, yörünge parametrelerinin (hız komutu) gönderilmesini ve veri kaydını sağlar.

Haberleşme protokolü olarak CANBUS protokolü tercih edilmesinin nedeni; geleneksel sorgu-cevap tabanlı protokollerin aksine, CANBUS'ın çoklu yönetici altyapısına sahip olması, sistemdeki her bir kontrolör ya da sürücünün sabit bir hiyerarşiye bağlı kalmaksızın hem veri yayınlayan bir yönetici (master) hem de hattı dinleyen bir takipçi (slave) olarak dinamik bir şekilde davranmasına olanak tanımasıdır (Spencer vd., 2021). Mimari esnekliğin yanı sıra, CANBUS'ın fiziksel katman özellikleri, motor sürücülerinin yüksek frekanslı anahtarlama (DGM) kaynaklı yoğun elektromanyetik girişim oluşturduğu endüstriyel ortamlar için idealdir. İletişim hattında kullanılan diferansiyel sinyal yapısı, kablo üzerine inen ortak mod gürültülerini sönümleyerek verinin dış bozuculardan etkilenmeden iletilmesini sağlar. Buna ek olarak, protokolün veri bağlantı katmanında yer alan "Döngüsel Artıklık Denetimi" mekanizması, hat üzerinde oluşabilecek olası bit hatalarını donanımsal seviyede tespit ederek veri bütünlüğünü garanti altına alır.

Çizelge 3.1. Test düzeneğinde kullanılan SMSM, pozisyon sensörü, tork sensörü ve elektromanyetik frenin teknik özellikleri

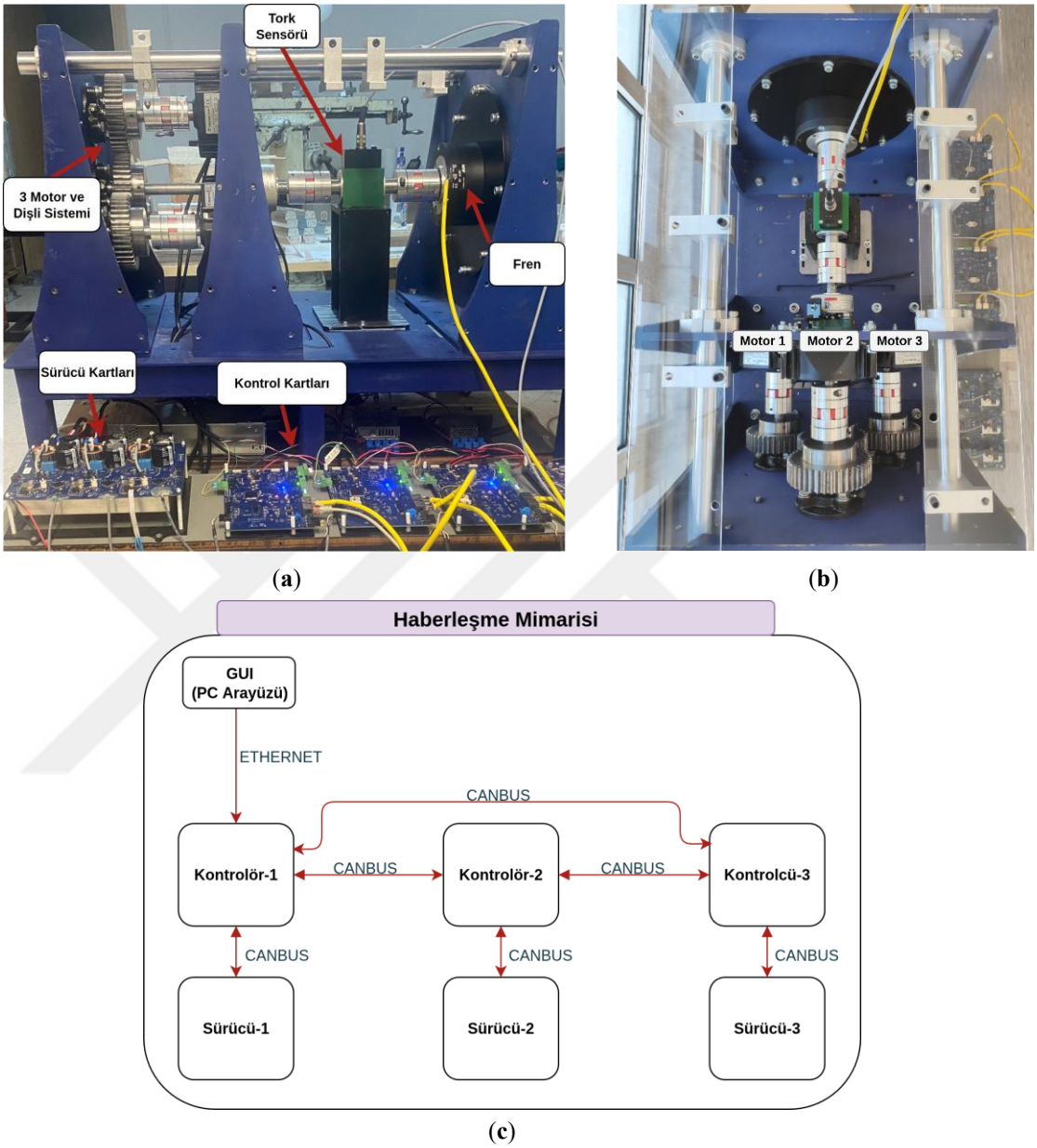
Cihazlar	Özellikleri	Açıklamaları
Motor	**Model**	TAPIN 140TAST-01T4M44K
	Nominal Voltaj	24 V
	Nominal Güç	157 W
	Nominal Tork	5.0 Nm
	Nominal Hız	300 rpm
	Nominal Akım	8.0 A
	Atalet Momenti	28.7 $x10^{-4}kg.m^2$
	Kutup Sayısı	20
Pozisyon Sensörü	**Model**	14-bit manyetik döner enkoder
	Arayüz	ABI arttırımsal çıkış / SPI
	Çözünürlük	4096 adım/tur
	Maksimum Dönme Hızı	28 krpm'e kadar ölçüm
Tork Sensörü	**Model**	Burster 8661-5050 Tork Sensörü
	Ölçüm Aralığı	±50 Nm
	Data Yenileme Hızı	2000 ölçüm/s
	Lineer Sapma Miktarı	$\leq \pm 0.05\%$
Ana şaft mili konum Sensörü	**Model**	Delik Milli, Optik
	Arayüz	ABI arttırımsal çıkış
	Çözünürlük	1024 darbe/tur (PPR)
Fren	**Model**	EMF ABTF-03
	Maksimum Akım/Voltaj	1 A, 24 V
	Maksimum Frenleme Torku	35 Nm Elektromanyetik Tozlu Fren



Şekil 3.4. Tasarlanan deney düzeneğinin 3 boyutlu mekanik tasarımı (katı model) ve farklı açılardan görünümleri. a) İzometrik perspektif görünüş; b) Üstten perspektif görünüş; c) Üstten tam görünüş; d) Yandan görünüş

Sistemde kullanılacak SMSM motorlar eş olacak şekilde seçilmiştir. Motorların bağlantısı dişliler yardımı ile yapılmıştır. Bütün dişlilerin çevrim oranı 1:1 olacak şekilde seçilmiştir. Sistemde 5Nm'lik motorlar kullanılmıştır. 3 adet motorun üretebileceği toplam tork değeri 15Nm'dir. Bu sebeple fren 35Nm olarak belirlenmiştir. Ancak daha sonra motor sayısı ya da yük arttırılmak istenebileceği için tork sensörü toleranslı olarak seçilmiştir ve 50Nm' ye kadar ölçüm yapabilmektedir. Motorlar ve enkoderler M1, M2, M3, E1, E2, E3 olarak numaralandırılmış ve etiketlenmiştir. Her bir elektronik kartın kendi ID değeri bulunmaktadır. Bu değerler EEPROM kullanılarak tutulmuştur. Bu sayede her bir kartın kimlik bilgileri kalıcı olarak tutulmaktadır.

Dağıtılmış kontrol platformunun genel mimarisi ve tasarlanan deney düzeneği **Şekil 3.5**' de gösterilmektedir.



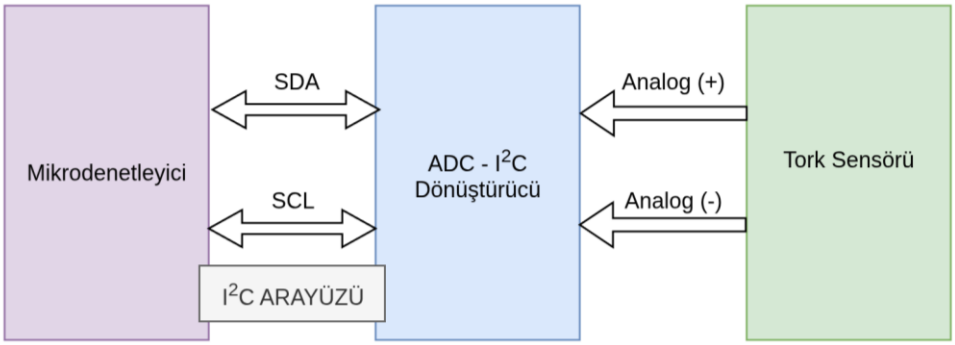
Şekil 3.5. Çoklu motor test düzeneği. a) Motor, sürücü, denetleyiciler, tork sensörü ve frenin önden görünüşü; b) Üç motorlu dişli bağlantı mekanizmasının üstten görünüşü; c) Sistem haberleşme mimarisi

3.4.1. Tork sensörü

Motor miline bağlanacak olan tork sensörünün dinamik ve şaft tipi olmasına karar verilmiştir ve sistemde, yüksek hassasiyetli, döner tip bir tork ölçüm sensörü kullanılmıştır. ±50 Nm ölçüm aralığına sahip olan bu sensör analog çıkış üretmektedir. Sensör, hareketli sistemlerde torkun doğru ve kararlı bir şekilde ölçülmesine olanak tanıyan bir ölçüm mekanizmasına sahiptir. Sensörden elde edilen analog veriler, 16-bit

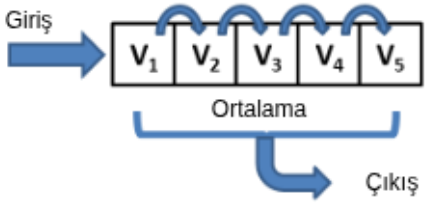
çözünürlükte, düşük güç tüketimli, I²C arabirimli ADC (Analog-Dijital Dönüştürücü) kullanılarak dijitalleştirilmiştir. Dahili referans ve osilatöre sahip olup, maksimum 860 örnek/saniye örnekleme hızında çalışabilmektedir.

Tork sensörünün analog çıkışı, ADC - I²C entegresi aracılığıyla STM32F4 mikrodenetleyiciye I²C protokolü üzerinden dijital olarak aktarılmıştır (Bkz. Şekil 3.6). Bu sayede sensör verisi doğrudan işlemci tarafından okunabilir hale getirilmiştir ve dijitalleştirme ile analog veriyi gürültüyü minimize edecek bir şekilde işlemciye sahip karta ulaştırabilmektir (Chen ve Huang, 2023; Holliday vd., 2022)



Şekil 3.6. Mikrodenetleyici ve tork sensörü arası haberleşme

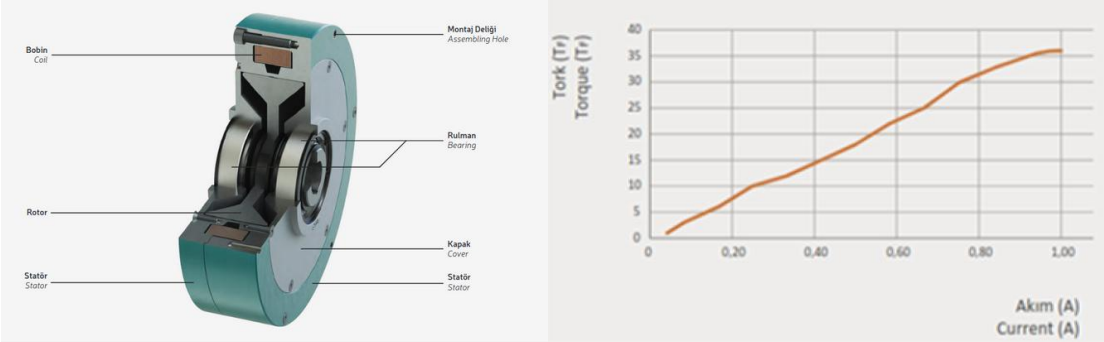
Okunan ham tork verilerinin gürültülü olduğu gözlemlenmiş ve yüksek frekanslı dalgalanmalar görülmüştür. Bu nedenle, Şekil 3.7'de gösterildiği gibi veri seti üzerinde yazılımsal bir alçak geçiren filtre (LPF) uygulanmıştır. 20 örnekli bir kayan pencere filtre yöntemi uygulanmıştır. Bu filtre, her zaman adımında en güncel 20 örneğin ortalamasını alarak ani değişimlerin etkisini azaltır.



Şekil 3.7. Kayan pencere filtresi

3.4.2. Elektromanyetik fren

Sistemde manyetik tozlu fren kullanılmıştır. Yataklanmış rotor parçası ve sabit olarak bulunan stator parçası arasındaki boşluğa metal tozunun, elektromanyetik kuvvet ile manyetize olup bu boşluğa dolması prensibiyle oluşan sürtünme kuvveti manyetik tozlu fren sisteminin ana tork kaynağını oluşturmaktadır. Bu sayede, 0-24 V DC aralığında uygulanan gerilime bağlı olarak, ihtiyaca göre kontrol edilebilen, lineer artan veya azalan tork kuvveti elde edilmiş olur. Frenleme torku ve akım arasındaki ilişki Şekil 3.8'de verilmiştir.

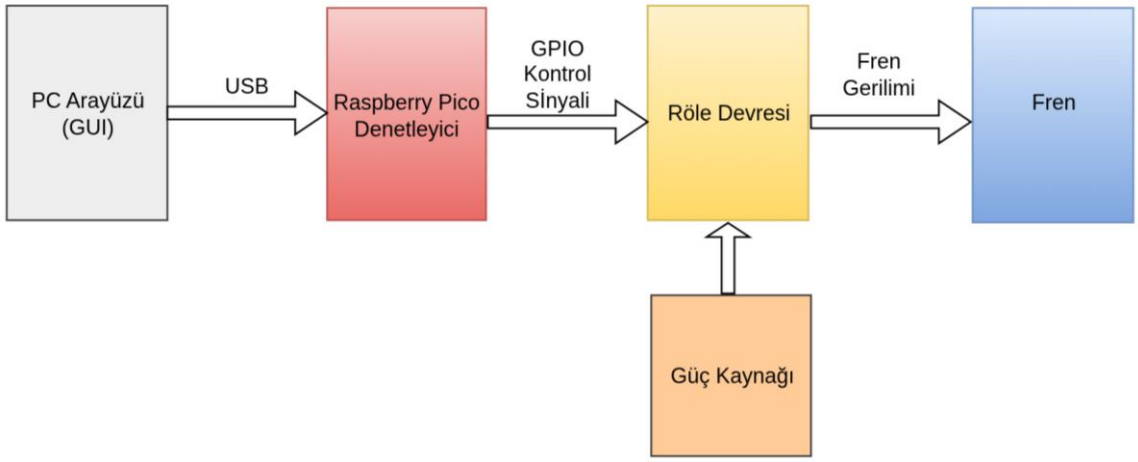


Şekil 3.8. Elektromanyetik tozlu fren yapısı ve akım-tork ilişkisi

Bu çalışmada, önerilen çoklu motor kontrol yöntemlerinin (Multilateral, Tork-Takipçi) performansını doğrulamak amacıyla, sisteme dahil edilen yük torkunun zamanlamasını hassas bir şekilde kontrol eden bir deney düzeneği geliştirilmiştir. Sistemde yük olarak bir elektromekanik fren mekanizması kullanılmıştır. Bu mekanizma, Raspberry Pi Pico 2W mikrodenetleyicisinin dijital çıkış portu üzerinden tetiklenen bir röle modülü anahtarlaması ile kontrol edilmektedir (Şekil 3.9).

Deneysel verilerin tutarlılığını sağlamak amacıyla, motor sürücü arayüzü ile yük (fren) kontrol ünitesi arasında tam zamanlı bir senkronizasyon algoritması kurgulanmıştır. Geliştirilen Python tabanlı arayüz yazılımı, motorların tahrik edilmeye başlandığı anı (t=0) referans alarak çalışmaktadır. Kullanıcı, motor kontrol arayüzü üzerinden testi başlattığında, yük kontrol yazılımı bu tetiklemeyi algılayarak önceden belirlenen gecikme süresi sonunda röle üzerinden freni devreye sokar.

Bu yapı parametrik olacak şekilde ayarlanmıştır, test senaryosuna göre frenin (yükün) devreye giriş zamanının 0. saniye (kalkış anı) veya sürüş başladıktan sonraki ileri bir zaman dilimi (örneğin 5. saniye) olarak ayarlanmasına olanak tanır. Böylece, motor kontrolcüsünün farklı dinamik koşullar altındaki kararlılığı test edilebilmektedir.



Şekil 3.9. Elektromanyetik frenleme sistemi

3.5. Çoklu Motor Sürüşlerinde Motor Açılarını Hizalama Yöntemi

SMSM motorların vektörel kontrolünde, özellikle Alan Yönelimli Kontrol (AYK) algoritmaları uygulanmadan önce, elektrik açısı ile mekanik açı ilişkisi düzgün ayarlanmalıdır. Bu işleme hizalama denir ve motorun doğru bir şekilde kalkış yapabilmesi için gereklidir. Bunun yapılmasının amacı rotorun manyetik kutuplarını, kontrol algoritmasının referans eksenine hizalamak ve ilk rotor pozisyonunu sabit bir açıya getirerek, pozisyon sensörü için doğru başlangıç koşullarını sağlamaktır (Kuruppu, 2021).

SMSM motorlarda referans çerçevesi olan d-q eksenleri ile rotorun manyetik ekseninin hizalanması tüm sürüşü etkilemektedir. Tek motorlu uygulamalarda, hizalama işlemi için açı genellikle d eksenine hizalandırılır. Uygulanan adımlar aşağıdaki sırayla gerçekleştirilmiştir.

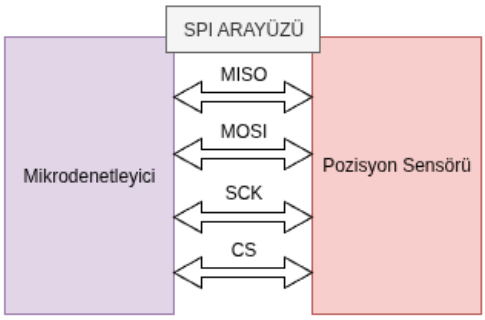
1. Vd=0, Vq>0 olacak şekilde, yalnızca q ekseninde gerilim uygulanır.
2. Bu durum, stator alanını rotor manyetik alanına dik (90°) olacak şekilde oluşturur.
3. Gerilim vektörünün yönü, motorun elektromanyetik alanını rotor kutuplarını çekerek -90° elektriksel açıya yerleştirilir.
4. Bu pozisyon, rotorun d eksenine hizalanmış hali olarak kabul edilir ve kontrol algoritmasının başlangıç noktası olarak kaydedilir.

Bu sayede; rotor pozisyonu tanımlı hale gelir. Başlangıçta rotorun yönü belirsiz bir şekilde kalmaz; bu da stabil kalkış ve doğru moment üretimi sağlar. Tek motorlu uygulamalarda hizalama metodu yukarıda anlatılan ve kullanılan şekilde uygulanmaktaydı. Ancak bu çalışmada, üç adet SMSM motorun aynı şaftta (mekanik olarak bağlı) kullanılması nedeniyle, klasik hizalama yaklaşımı doğrudan uygulanamamaktadır. Bunun temel nedeni, her bir motorun aynı anda bağımsız bir şekilde rotor hizalama işlemi gerçekleştirmesinin mümkün olmamasıdır. Bunun sebebi; aynı şafta bağlı motorlar aynı anda döndürülemez; birinin uyguladığı tork, diğerini etkiler. Farklı motorların aynı anda -90°'ye yönlenmeye çalışması, sistemde mekanik kilitlenme, tork çakışması veya senkronizasyon hatalarına yol açabilir.

Bu çalışmada, üç SMSM motorun aynı şafta bağlı olması nedeniyle klasik hizalama yöntemiyle her bir motorun rotor pozisyonunun bağımsız olarak hizalanması mümkün olmamıştır. Bu nedenle, rotorların başlangıç pozisyonlarının hassas bir şekilde belirlenebilmesi için her motorun içerisinde bulunan manyetik pozisyon sensörü kullanılmıştır. Motorların içinde bulunan manyetik sensör 14-bit çözünürlükte mutlak açısal pozisyon ölçümü yapabilen (SPI), ayrıca 12-bit artımlı çıkış (AB) sağlayabilen yüksek hızlı bir sensördür. Pozisyon ölçümü için başlangıçta arttırımsal çıkış yeterli olsa da 0° hizalaması için mutlak çıkış olan SPI arayüzünün kullanılması gerekmektedir.

Sensör ile mikrodenetleyici arasındaki veri iletişimi, SPI haberleşme protokolü ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.10 ile SPI arayüzü haberleşme yapısı gösterilmiştir. SPI, bir ana cihaz (master, bu sistem için STM32F4 mikrodenetleyici) ile bir veya birden fazla çevresel cihaz (slave, bu sistemde sensör) arasında senkron seri iletişimi sağlayan bir

haberleşme protokolüdür (Chen ve Huang, 2023; Holliday vd., 2022). SPI haberleşmesi sayesinde sensörden yüksek hızlı ve düşük gecikmeli veri alınması mümkün olmuştur.



Şekil 3.10. Mikrodenetleyici ve pozisyon sensörü arası haberleşme

STM32 mikrodenetleyici üzerinde SPI haberleşmesini gerçekleştirmek amacıyla haberleşme kodları yazılmış ve pozisyon sensöründen okunan pozisyon verileri sisteme entegre edilmiştir. Elde edilen bu mutlak rotor pozisyon bilgisi, motorun elektriksel sapma açı değeri olarak tanımlanmış ve hizalama işlemi yerine başlangıç rotor konumunun belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu sayede her motor, sisteme entegre haldeyken doğru rotor pozisyonuyla başlatılmış ve çoklu motor sisteminde senkron çalışma başarıyla sağlanmıştır. Bu adımdan sonra sadece tek motor sürülmüş ve çekilen akım değeri gözlemlenmiştir. Daha sonra üç motor aynı anda sürülmüş ve her bir motorun çektiği akım değerinin tek motorlu sürüşteki akımın üçte biri olduğu görülmüştür. Algoritma bu şekilde doğrulanmıştır.

3.6. Sistem Modelleme ve Simülasyon

3.6.1. Sistem tanımlamanın temelleri

Sistem tanımlama; dinamik bir sistemin giriş ve çıkış sinyallerini kullanarak, sistemin davranışını temsil eden matematiksel modellerin (doğrusal sistemlerde genellikle transfer fonksiyonları veya durum uzay modelleri ile) oluşturulması sürecidir. Özellikle motor kontrol uygulamalarında, sistemin fiziksel parametrelerinin (sargı direnci, endüktans, atalet momenti vb.) doğrudan ölçülmesinin zor olduğu veya bu parametrelerin sıcaklık ve yük gibi çevresel faktörlerle zamanla değiştiği durumlarda, sistem tanımlama yöntemleri kritik bir öneme sahiptir (Isermann ve Münchhof, 2011; Simpkins, 2012).

Motor kontrolü literatüründe modelleme yaklaşımları, sistem hakkında sahip olunan ön bilgiye göre üç ana kategoride incelenir:

Beyaz Kutu Modelleme: Sistemin fiziksel denklemlerinin tamamen bilindiği ve tüm parametrelerin teorik olarak hesaplanabildiği durumdur.

Gri Kutu Modelleme: Sistemin matematiksel model çatısının bilindiği, ancak denklemdeki bazı fiziksel katsayıların (örneğin; sürtünme katsayısı veya bilinmeyen yük ataleti) deneysel veriler kullanılarak kestirildiği hibrit yaklaşımdır.

Kara Kutu Modelleme: Sistemin iç fiziksel yapısının bilinmediği bunun yerine sadece sisteme uygulanan giriş ve sistemden alınan çıkış verilerine dayalı istatistiksel modellerin oluşturulduğu yaklaşımdır.

Bu çalışmada, motorun ve sürücü sisteminin dinamiklerini en yüksek doğrulukla yansıtmak amacıyla Kara Kutu yaklaşımı temel alınmış ve modelleme sürecinde "MATLAB Sistem Tanımlama Araç Kutusu" kullanılmıştır.

3.6.2. Sistem tanımlama araç kutusu ve modelleme stratejisi

Sistem Tanımlama Araç Kutusu, zaman ve frekans bölgelerindeki giriş-çıkış verilerini işleyerek dinamik sistemlerin matematiksel karakteristiğini ortaya çıkarmak için kullanılan bir MATLAB araç kutusudur (Ljung, 1988). Bu araç kutusu, veri ön işleme, model yapısı belirleme gibi karmaşık süreçleri yöneten özellikler de barındırır. Genellikle grafik arayüzü ile kullanılması daha kolay olmasına rağmen, bu çalışmada modelleme süreci GUI üzerinden manuel olarak değil, geliştirilen yazılım ile yürütülmüştür. GUI yerine kod tabanlı bir yaklaşımın tercih edilmesindeki temel amaç, insan hatasını minimize etmek ve en uygun model derecesini iteratif bir optimizasyon süreciyle belirlemektir. Manuel denemelerde gözden kaçabilecek optimum parametre setleri, geliştirilen döngüsel algoritma sayesinde sistematik olarak taranmıştır. Geliştirilen algoritma, en yüksek başarı değerini sağlayan transfer fonksiyonunu elde etmek için aşağıdaki parametre aralıklarında geniş kapsamlı bir tarama yapar:

- Kutuplar: Model derecesini belirlemek üzere 1 ile 4 arasında,
- Sıfırlar: Dinamik tepkiyi şekillendirmek üzere 1 ile 4 arasında,
- Sistem Gecikmesi (n_k): Fiziksel ölü zamanı modellemek üzere 0 ile 3 örneklem arasında,
- Parametrik Olmayan Gecikme ($n_{\{pad\}}$): Veri senkronizasyonu için 0 ile 50 örneklem arasında değiştirilmiştir.

Algoritma, bu aralıklardaki tüm kombinasyonları dener ve her bir modelin başarısını Doğrulama veri seti üzerindeki uyum yüzdesine göre puanlar. Optimizasyon sonucunda, validasyon başarısı en yüksek olan parametre seti nihai sistem modeli olarak seçilir.

Transfer fonksiyonu oluşturma sürecinde, modelin başarısını doğrudan etkileyen bir diğer kritik faktör "Başlangıç Koşulları"nın ele alınış biçimidir. Algoritma, varsayılan ayar olan "Auto" (Otomatik) seçeneğinde kullanıldığında, veri setinin başlangıcındaki geçici hal tepkisini minimize etmek amacıyla sisteme yapay başlangıç değerleri atar. Bu yaklaşım, matematiksel olarak eğitim başarısını yapay bir şekilde yükselterek %100'e yakın uyum değerleri verebilmektedir. Ancak bu yüksek başarılar, sistemin gerçek dinamiklerini temsil etmekten ziyade, algoritmanın o anki veri setine özgü başlangıç hatasını sıfırlama çabasından kaynaklanır ve yanıltıcıdır. Elde edilen model Simulink gibi simülasyon ortamlarına aktarıldığında, hesaplanan başlangıç değerleri transfer fonksiyonu bloğuna taşınmamalıdır ve simülasyon sıfır başlangıç koşuluyla başlatılmalıdır. Bunun sebebi, model başlangıç koşulları ile kullanıldığında o anki verilere aşırı uyum göstermesi ve bu nedenle yeni veri setleri üzerindeki başarımının düşmesidir. Sonuç olarak, çok yüksek başarıya sahip görünen model, simülasyon

ortamında gerçek veriden tamamen farklı ve hatalı sonuçlar üretir. Bu çalışmada, modelin sadece veri setindeki anlık başlangıç durumunu değil, sistemin genel dinamik karakteristiğini öğrenmesini sağlamak amacıyla başlangıç koşulları "Zero" (Sıfır) olarak sabitlenmiştir.

3.6.3. Model oluşturma ve veri işleme yöntemleri

Sistem tanımlama sürecinin güvenilirliğini artırmak ve elde edilen modelin başarısını doğru yorumlamak adına çalışmada kullanılan temel kavramlar ve veri işleme teknikleri aşağıda açıklanmıştır:

Modelin ezberleme yapmasını önlemek için elde edilen deneysel veriler ikiye ayrılmıştır:

- Eğitim Verisi: Modelin katsayılarını hesaplamak için kullanılan ana veri setidir. Algoritma, bu veriye bakarak matematiksel denklemi kurar.
- Doğrulama Verisi: Modelin oluşturulma aşamasında hiç görmediği, sadece test amaçlı ayrılan veri setidir. Seçilen modelin başarısı, eğitim verisindeki performansa göre değil, bu doğrulama verisindeki tahmin yeteneğine göre belirlenir.

Sistemin giriş-çıkış ilişkisi düzeyine göre modelleme üç farklı yapıda ele alınabilir:

- SISO (Tek Giriş - Tek Çıkış): Sistemin tek bir kontrol girişine karşılık tek bir çıkış ürettiği temel yapıdır. Genellikle sistemin diğer etkenlerden izole edildiği veya diğer etkenlerin ihmal edildiği durumlarda kullanılır.
- MISO (Çok Giriş - Tek Çıkış): Sistemin tek bir çıkış üretirken, birden fazla giriş değişkeninden (kontrol işareti ve bozucu etkiler gibi) etkilendiği yapıdır.
- MIMO (Çok Giriş - Çok Çıkış): Sistemin birden fazla girişe ve birden fazla çıkışa sahip olduğu, girişler ve çıkışlar arasında çapraz etkileşimlerin bulunduğu en genel yapıdır.

Modelleme sürecinde MISO model yapısı tercih edilmiştir. Bunun temel nedeni, sistem çıkışını (örneğin hız veya akım) etkileyen ana kontrol sinyalinin yanı sıra, yük torku gibi dış etkenlerin de modele dahil edilme zorunluluğudur.Sistemin dinamik davranışını geniş bir çalışma aralığında yüksek doğrulukla temsil edebilmek amacıyla, farklı deneysel veri kümelerinin veya bunlardan elde edilen modellerin bütünleşik bir yapıda değerlendirilmesi gerekmektedir. Literatürde bu amaçla kullanılan iki temel yaklaşım bulunmaktadır:

- **Model Birleştirme:** Farklı veri setlerinden veya çalışma noktalarından ayrı ayrı yerel modeller elde edildikten sonra, bu modellerin matematiksel yöntemlerle tek bir model altında sentezlenmesidir.
- **Deney Birleştirme:** Farklı zamanlarda kaydedilen birden fazla deney verisinin, modelleme işleminden önce tek bir veri nesnesi (iddata) altında ham olarak

birleştirilmesidir. Bu sayede model, yerel bir veri setine sıkışmak yerine daha geniş bir veri havuzundan öğrenme imkanı bulur.

Bu çalışmada, veri bütünlüğünü korumak ve tüm çalışma koşullarını kapsayan tek bir global model oluşturabilmek amacıyla deney birleştirme yöntemi daha uygun görülmüştür. Farklı çalışma koşullarında ve zamanlarında elde edilen deneysel verilerin modelleme sürecinde bütüncül olarak değerlendirilebilmesi amacıyla, MATLAB Sistem Tanımlama Araç Kutusu'nda bulunan merge fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyon, veri setlerini zaman ekseninde art arda ekleyerek yapay bir süreklilik oluşturmak yerine, her bir seti bağımsız birer deney olarak tek bir iddata nesnesi altında yapılandırır. Tanımlama algoritmaları bu çoklu yapıyı işlerken, maliyet fonksiyonunu her bir deney seti için ayrı ayrı hesaplamakta, ancak tüm veri setlerini en iyi şekilde temsil eden ortak ve tek bir parametrik model kestirimi gerçekleştirmektedir.

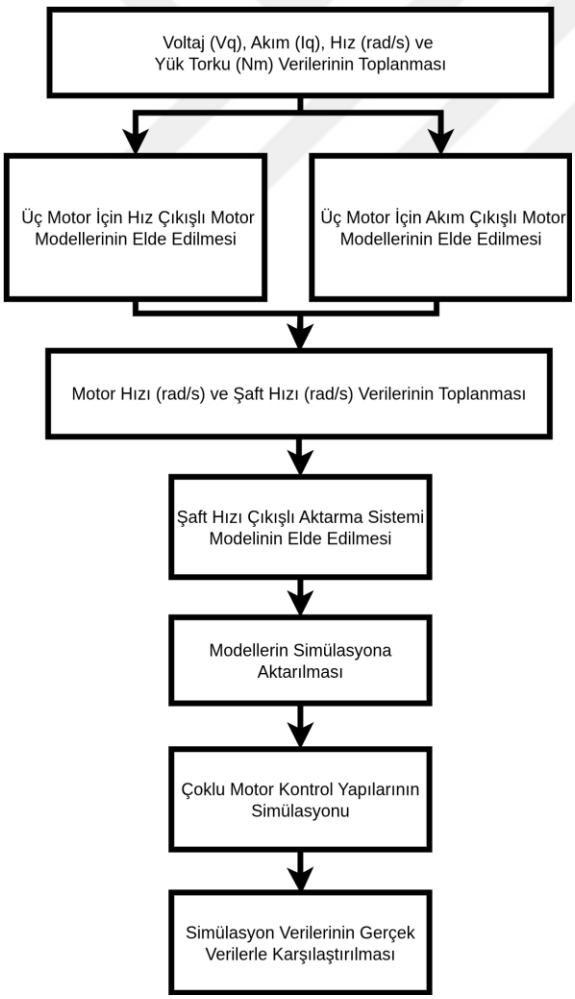
Deneysel verilerin hazırlanması ve işlenmesi aşamasında, sistemin tüm çalışma aralığını temsil etmek üzere; yaklaşık 5.24 rad/s, 10.47 rad/s, 13.09 rad/s ve 20.94 rad/s açısal hızlarında hem yüklü hem de yüksüz koşulları içeren toplam dört farklı test senaryosu gerçekleştirilmiştir. Bunun sebebi sistem kısıtlamalarından dolayı motorun maksimum hızının 20.94 minimum hızının ise 5.24 rad/s olarak belirlenmesidir. Veri toplama sürecinde, üç adet tahrik motorunun voltaj, akım ve hız verileri ile milde konumlandırılmış harici enkoderden alınan şaft hızı verisi kaydedilmiş ve modelleme öncesinde tüm sinyaller zaman ekseninde senkronize edilerek veri bütünlüğü sağlanmıştır. Çalışma aralığının alt ve üst sınırlarını oluşturan 5.24 rad/s ve 20.94 rad/s hızlarındaki veriler "eğitim" seti olarak modelin parametrelerini belirlemek için kullanılırken, modelin daha önce hiç görmediği ara çalışma noktaları olan 10.47 rad/s ve 13.09 rad/s hızlarındaki veriler ise "doğrulama" (test) seti olarak sınıflandırılmıştır.

Tanımlanan veri setleri üzerinden sistemin elektriksel ve mekanik karakteristiğini çözümlemek adına üç farklı MISO (Çok Giriş - Tek Çıkış) model yapısı geliştirilmiştir. İlk model olan hız dinamiği modelinde, V_q gerilimi ve T_{load} yük torku giriş olarak kullanılarak her bir motorun açısal hız çıkışı modellenmiş; ikinci yapı olan akım dinamiği modelinde ise aynı giriş değişkenleri (V_q, T_{load}) ile I_q akım çıkışı modellenmiştir. Bu çalışmada, motorun dinamik davranışlarını en yüksek doğrulukla temsil edebilmek amacıyla tek bir genel model yerine; 'yüklü' ve 'yüksüz' çalışma koşulları için iki ayrı sistem modeli geliştirilmiştir. (Tutunji ve Saleem, 2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda da vurgulandığı üzere, yük değişimlerinin motor parametreleri üzerindeki etkileri, tek bir model yapısı ile ifade edildiğinde modelin tahmin başarısını düşürebilmektedir. Nitekim bu tez kapsamında gerçekleştirilen ön analizlerde, her iki durumu kapsayan tek bir model denendiğinde, model doğruluk oranlarının beklenen seviyenin altında kaldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, deneysel verilerle model çıktısı arasındaki uyumu maksimize etmek adına, yüklü ve yüksüz durumlar için özelleştirilmiş ayrı modellerin kullanılması tercih edilmiştir.

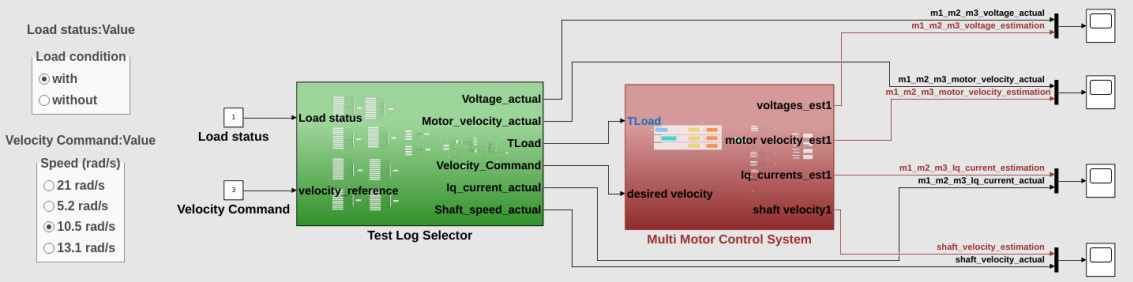
Bu çalışmada "yüksüz" çalışma durumu, elektromanyetik frenin devre dışı olduğu; ancak sistemden kaynaklanan kalıcı bir yük torkunun (sürtünme, yatak kayıpları vb.) bulunduğu koşul olarak tanımlanmıştır. Deneysel ölçümler, mil üzerinde yaklaşık 0.4 Nm seviyesinde bir yük torkunun mevcut olduğunu göstermiştir. Bu nedenle sistem tanımlama aşamasında "yüksüz" modelde de T_{load} girdisi kullanılmıştır; aksi takdirde model, şafta bağlı gerçek sistemi temsil etmekten uzaklaşacak ve neredeyse serbest dönen

bir motoru ifade eden bir yapıya indirgenmiş olacaktır.

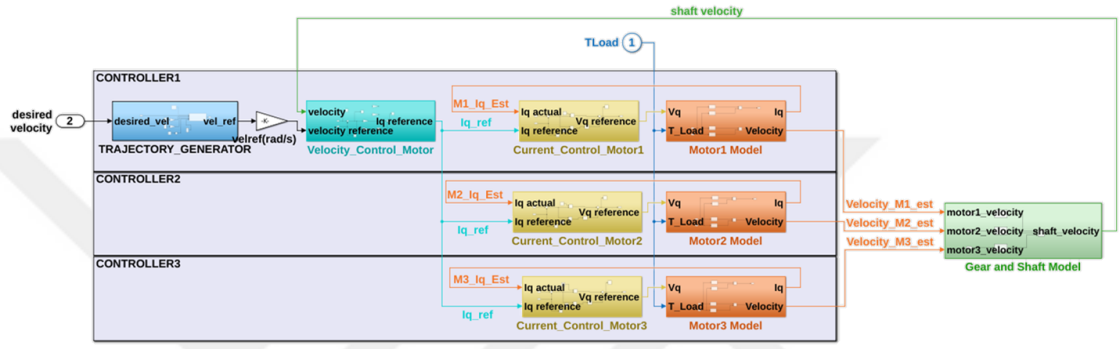
Son olarak, çoklu motor sürüş sistemindeki mekanik etkileşimi ve aktarım karakteristiğini analiz etmek üzere oluşturulan üçüncü modelde, sisteme tahrik sağlayan üç ayrı motorun hız verileri giriş değişkeni olarak tanımlanmış, bu motorların birleşik etkisiyle oluşan hareket ise mildeki enkoderden bağımsız olarak toplanan şaft hızı verisi üzerinden sistem çıkışı olarak modellenmiştir. Bu giriş-çıkış yapısı sayesinde, her bir motorun ana mil üzerindeki bireysel sürüş etkisi ve motorlar ile şaft arasındaki dişli gruplarının yarattığı mekanik dinamikler (aktarım karakteristiği, dişli boşlukları vb.) matematiksel modele kapsayıcı bir şekilde dahil edilmiştir. Simülasyon aşamasında, gerçek sistemdeki motorların dişli kutusu aracılığıyla mekanik olarak birbirine kilitli olması ve fiziksel zorunluluk gereği eş hızlarda dönmesi gerekmektedir. Bu mekanik kuplajı temsil etmek amacıyla 'ortak şaft mili çıkış hızı' bilgisine ihtiyaç duyulmuştur. Deneysel uygulama aşamasında; kontrolcülerin eyleyiciler üzerindeki doğrudan hakimiyetini sürdürmek ve sürüş kararlılığını artırmak amacıyla geri besleme, her bir motorun kendi dahili sensörleri üzerinden sağlanmıştır. Ana mil üzerine konumlandırılan harici enkoder ise kontrol döngüsüne dahil edilmeyip, geliştirilen algoritmaların gerçek yük üzerindeki başarısını bağımsız olarak doğrulamak ve simülasyon sonuçlarıyla deneysel verileri kıyaslamak amacıyla referans ölçüm aracı olarak kullanılmıştır



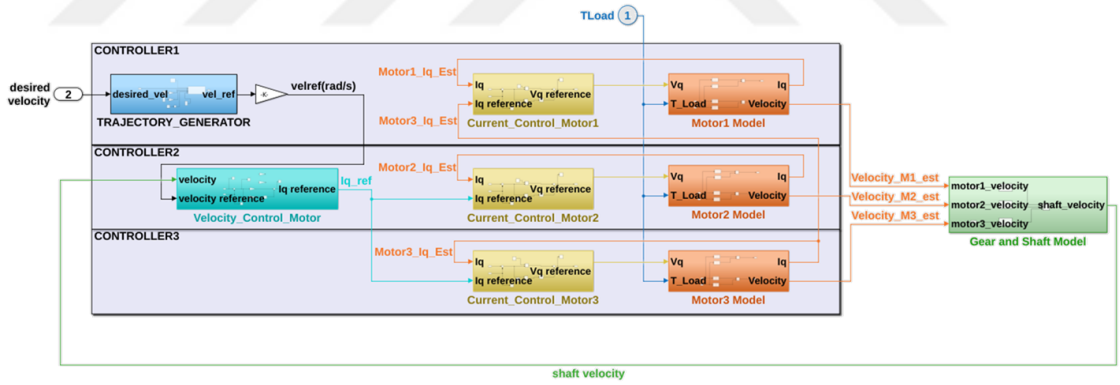
Şekil 3.11. Sistem Tanımlama ve Doğrulama Adımları



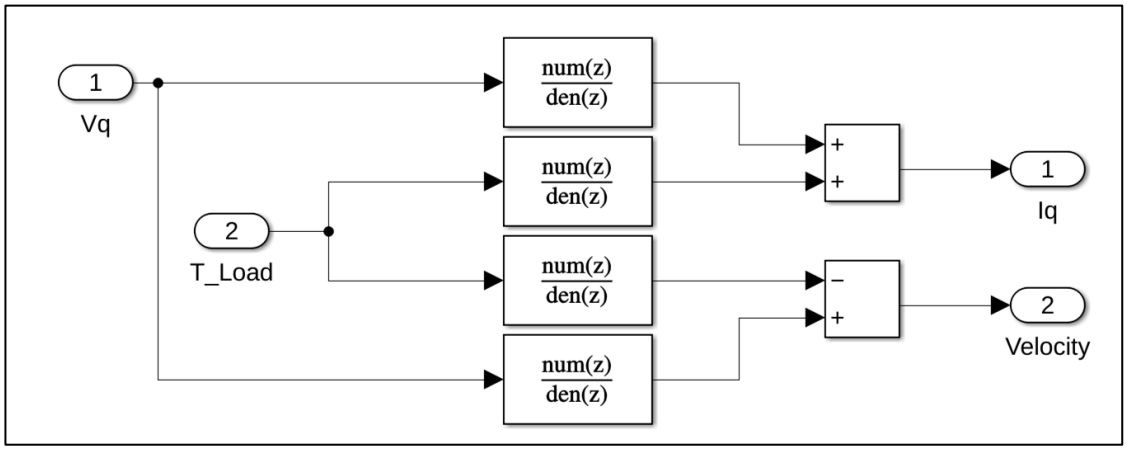
Şekil 3.12. Üçlü senkron motor sürüş sistemi için oluşturulan genel simülasyon modeli ve kapalı çevrim kontrol yapısı



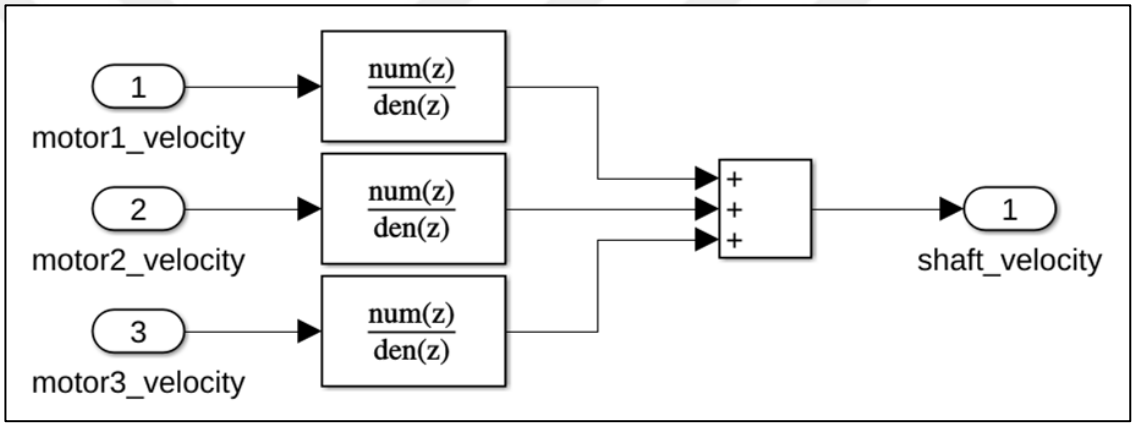
Şekil 3.13. Tork-Takipçi kontrol mimarisinin blok diyagramı



Şekil 3.14. Multilateral kontrol mimarisinin blok diyagramı



Şekil 3.15. Senkron motorun elektriksel ve mekanik dinamiklerini giriş gerilimi ve yük torkuna bağlı olarak temsil eden ayrık zamanlı transfer fonksiyonu modeli



Şekil 3.16. Üç ayrı motorun hız çıkışlarının mekanik olarak birleştirildiği dişli kutusu ve ortak şaft (mekanik kuplaj) modelinin iç yapısı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalar, sistemin güvenilirliğini ve ölçüm doğruluğunu garanti altına almak amacıyla üç aşamalı hiyerarşik bir yapıda gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, motorların akım-tork karakteristiği statik koşullarda test edilerek sürücü, motor parametreleri ve yazılım doğrulanmıştır. İkinci aşamada, dinamik testlerde sisteme yük momenti uygulayacak olan elektromanyetik fren sisteminin doğruluğu test edilmiştir. Son aşamada ise, doğrulanan bu deneysel altyapı üzerinde; Paralel, Tork-Takipçi ve önerilen Multilateral kontrol yöntemlerinin performansları, farklı senaryolar altında karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

4.1. Motor Akımı ve Torku için Doğrulama Testleri

İlk olarak akım ve tork arasındaki lineer ilişkinin doğrulanması incelenmiştir. Bu durum SMSM tahrik sisteminin belirlenmesinde gerekli bir adımdır. Q ekseni akımı iq ile üretilen motor torku arasındaki ilişkiyi doğrulamak için, tork sensörü kullanılarak statik bir test gerçekleştirilmiştir. Her bir durum için beklenen tork, Denklem (3.8)'de verilen akım ve SMSM' nin tork sabiti hesabı temel alınarak hesaplanmıştır. Testler, ortak şafta bir, iki ve üç motor bağlanarak sırayla geliştirilmiştir. Tamamen statik koşulları sağlamak için, elektromanyetik fren, motorların toplam kapasitesinden daha yüksek bir fren torku seviyesine ayarlanarak şaftın dönmesi engellenmiştir. Bu kurulum hem donanım hem de kontrol yazılımının işlevselliğinin aynı anda doğrulanmasına olanak tanır. Bu yüzden çoklu motor algoritmalarına geçilmeden yapılması gerekmiştir.

Tork tahmin doğruluğunu ve tork paylaşımını değerlendirmek için iki tamamlayıcı statik testi gerçekleştirilmiştir. Sabit Akım Testinde, aktif motorların sayısı değiştirilirken sabit bir akım değeri komut hedef olarak ayarlanmış ve ölçülen tork değerleri teorik değerlerle karşılaştırılmış ve Çizelge 4.1'de verilmiştir. Sabit Tork Testinde ise, aktif motorların sayısına göre motor başına düşecek akım değeri ayarlanarak toplam torkun sabit tutulması amaçlanmıştır. Buna göre referans akım değerleri değiştirilmiştir. Her iki test de kontrol sisteminin torku motorlara eşit olarak dağıttığını ve akım - tork ilişkisinin farklı test koşullarında tutarlı kaldığını doğrulanmıştır.

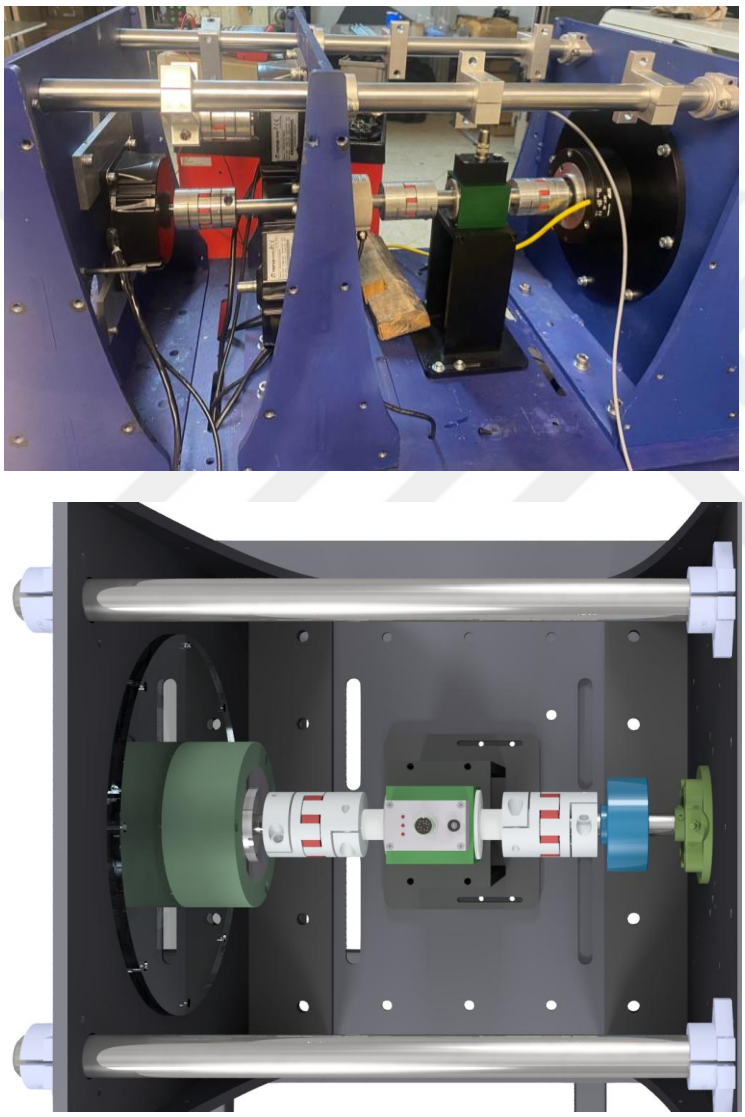
Çizelge 4.1. Statik Tork Doğrulama Testleri: Sabit Akım ve Sabit Tork

Test	*Motor Sayısı*	*Motor Akımı (A)*	*Motor Torku (Nm)*	*Tork Sensörü (Nm)*
Sabit Akım Testi	1	5.00	2.15	2.15
	2	5.00	4.30	4.30
	3	5.00	6.45	6.50
Sabit Tork Testi-1	1	5.00	2.15	2.15
	2	2.50	2.15	2.10
	3	1.67	2.15	1.90
Sabit Tork Testi-2	1	7.00	3.01	3.00
	2	3.5	3.01	2.80
	3	2.33	3.01	2.90

Frenleme Akımı: 0.5 (A); Frenleme Torku: 17.50 (Nm)

4.2. Elektromanyetik Frenin Doğrulama Testi

Bir sonraki adımda fren testi yapılmıştır. Bu adımın da çoklu motor sürüşlerine geçilmeden yapılması kritik önem taşımaktadır. Frenin katalog verilerinin doğrulanması için sisteme tek bir motor bağlanmıştır (Şekil 4.1). Bunun sebebi sistemi basit tutmak, olası mekanik etkileri azaltmaktır. Bu yüzden dişli bağlantılarından oluşan üç motorlu sistem yerine tek bir motor kullanılmıştır. Motor sabit hız ile dönerken frenleme torku ölçülmüş ve her bir testte frenleme torku arttırılarak fren karakteristiği incelenmiştir. Motor-fren arasındaki tork değeri tork sensöründen ölçülerek doğrulaması yapılmıştır.



Şekil 4.1. Elektromanyetik tozlu fren testi düzeneğini önden ve üstten görünümü

İlk önce fren kapalı olarak teste başlanmıştır. Motor sabit hız bölgesine girdikten sonra fren aktif edilmiştir. Frenleme torku adım adım arttırılarak aşağıdaki Çizelge 4.2 oluşturulmuştur. Bununla beraber motor 5Nm'lik olduğu için doğrulamalar bu adıma kadar yapılmıştır.

Çizelge 4.2. Frenleme Torku Doğrulama Testi

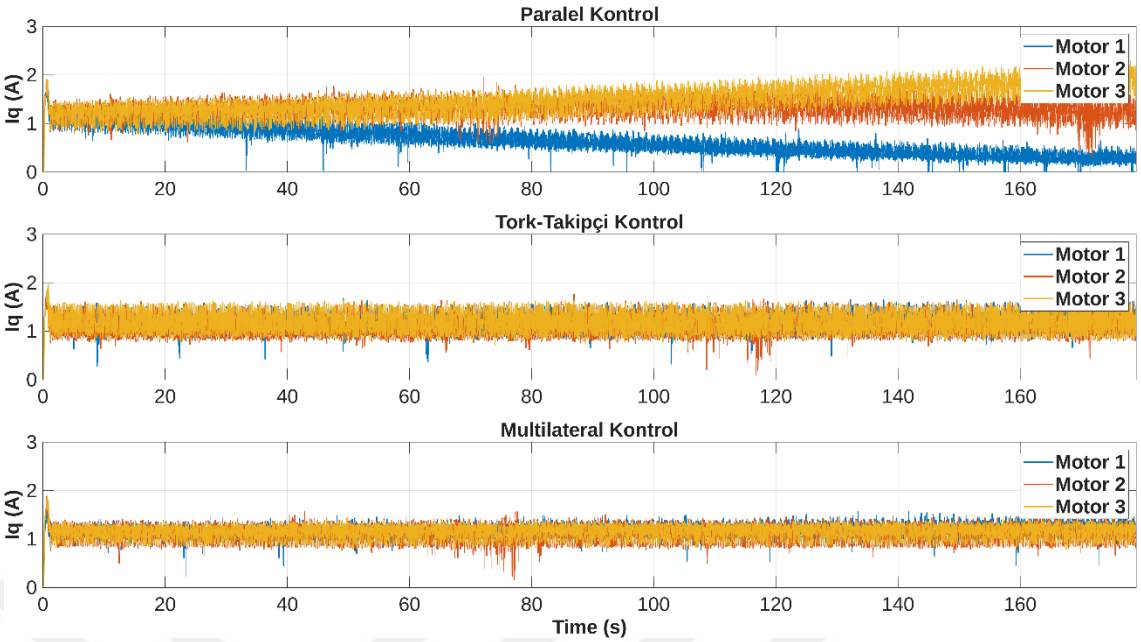
Frenleme Testleri (Nm)	Fren		Tork Sensörü		Hata (Nm)
	Akım (A)	Tork (Nm)	Voltaj (V)	Tork (Nm)	
0.500	0.014	0.500	0.160	0.800	-0.30
1.000	0.029	1.000	0.220	1.100	-0.10
1.500	0.043	1.500	0.260	1.300	0.20
2.000	0.057	2.000	0.350	1.750	0.25
2.500	0.071	2.500	0.430	2.150	0.35
3.000	0.086	3.000	0.560	2.800	0.20
3.500	0.100	3.500	0.710	3.550	-0.05
4.000	0.114	4.000	0.790	3.950	0.05
4.500	0.129	4.500	0.940	4.700	-0.20
5.000	0.143	5.000	1.060	5.300	-0.30
5.500	0.157	5.500	1.240	6.200	-0.50

4.3. Çoklu Motor Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Sunulan kontrol stratejilerinin gerçek zamanlı deney düzeneği üzerindeki performansları, deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. Çalışmanın temel odağı; Paralel, Tork-Takipçi ve önerilen Multilateral kontrol yöntemlerinin kararlılık, senkronizasyon başarısı ve yük paylaşımı kriterleri açısından karşılaştırmalı analizidir. Test süreci, yöntemlerin uygulanabilirliğinin sorgulanmasıyla başlamış ve sistemin dinamik tepkilerinin incelenmesiyle derinleştirilmiştir.

Paralel kontrol yönteminin, uzun süreli kararlı durum koşullarında akım veya tork dağılımı ve senkronize çalışmadaki güvenilirliğini ve performansını doğrulamak için öncelikle bu yöntem incelenmiştir. Buna göre harici frenleme yükü olmadan 21 rad/s sabit hız referansı uygulanmıştır. Beklenen ise; faz akımlarının kararlı çalışması yani sabit bir değerde kalmasıdır.

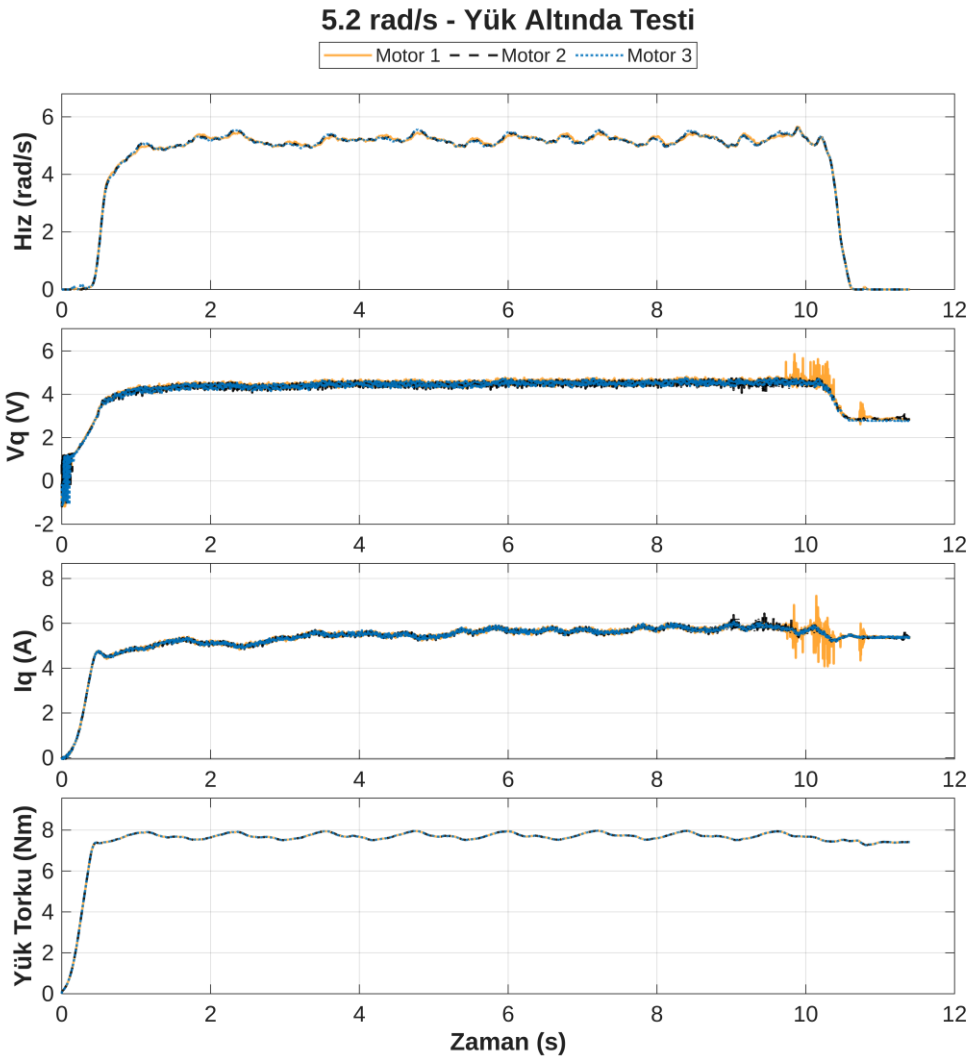
Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, Paralel kontrol stratejisi kullanıldığında, akım tepkileri giderek artan bir dengesizlik göstermiştir: Motor 1'deki akım zamanla kademeli olarak azalırken, Motor 3'teki akım zamanla artmıştır, Motor 2 ise sabit kalmıştır. Buna karşılık, Multilateral ve Tork-Takipçi stratejileri, aynı test koşulları altında tüm motorlarda sabit akımı korumuştur. Paralel konfigürasyondaki bu dengesizlik, motorlar arasında eşit olmayan tork üretimi ve bu yaklaşımın sürekli çalışmada sınırlı olduğunu göstermektedir. Grafikte görüldüğü gibi yaklaşık 20 saniyeden sonra belirgin derece akımda farklılıklar oluşmaya başlamıştır. Gözlemleri doğrulamak amacıyla, testler birden fazla kez tekrarlanmış ve yeniden üretilmiştir. Sonuçlar tutarlı geldiği görülmüştür. İki motorlu konfigürasyonlarla (ör. M1–M3 ve M2–M3 çiftleri) yapılan ek testler, Paralel kontrol altında benzer dengesiz yük dağılımlarını ortaya koymuştur. Sonuç olarak, Paralel kontrol bir temel kontrol stratejisi olarak kullanılırken, akım sapması ve dengesiz tork paylaşımı nedeniyle rijit bir şekilde birbirine bağlı çoklu motor sistem uygulamaları için uygun olmadığı görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar neticesinde, Paralel kontrol yöntemi sonraki karşılaştırmalı analiz aşamalarına dahil edilmemiştir.



Şekil 4.2. Yüksüz durumda 21 rad/s'de Paralel, Tork-Takipçi ve Multilateral kontrolün akım izleme performansı

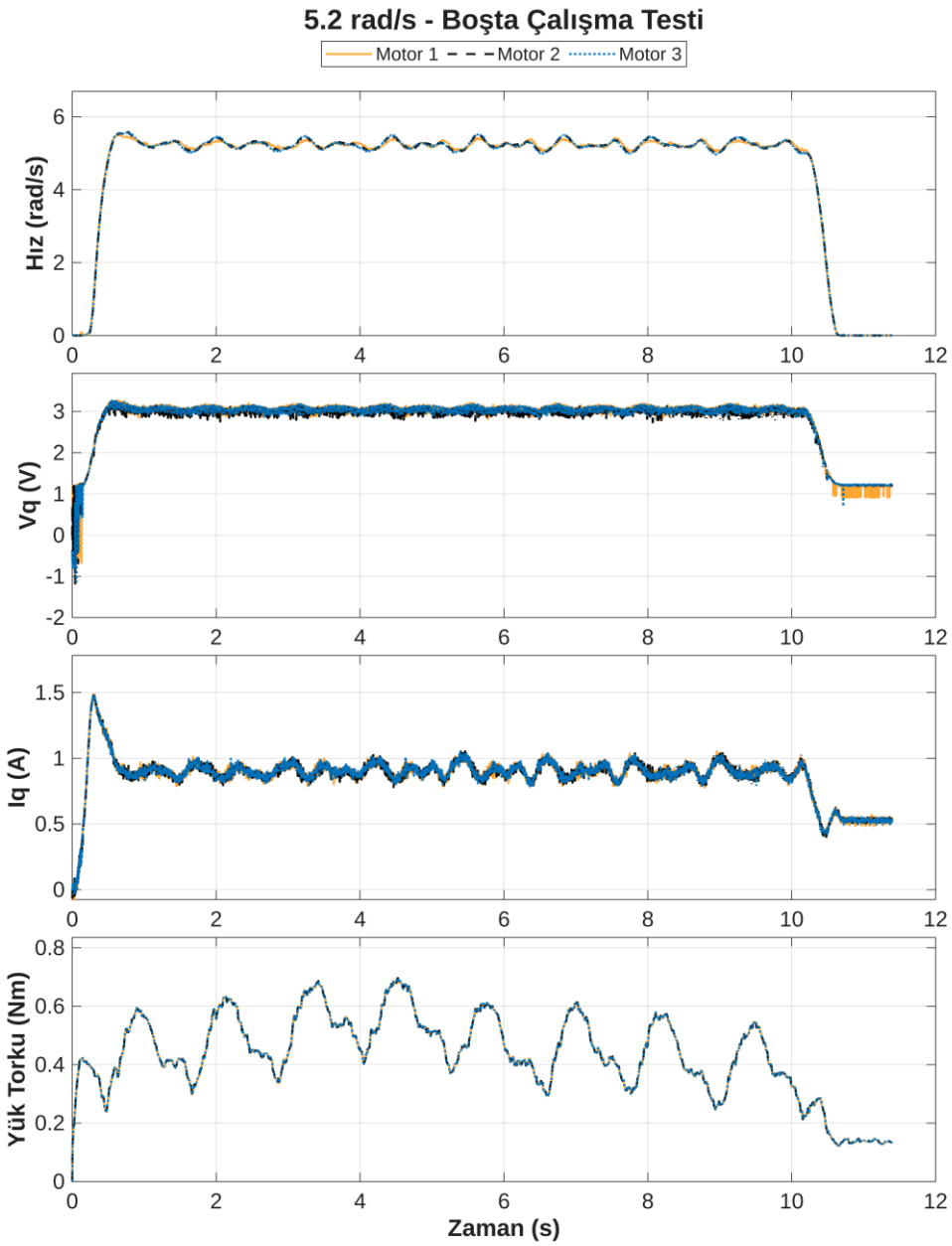
Daha sonra Multilateral ve Tork-Takipçi stratejilerinin değerlendirmesi için, deney düzeneği önceden tanımlanmış bir test profiline göre çalıştırılmasına karar verilmiştir. Ancak bu adıma geçmeden önce sistemin tepkisini görebilmek için yük altında iki farklı hız için ayrı ayrı testler yapılmış ve sonuçlar gözlemlenmiştir. Bu aşamada Multilateral kontrol yöntemi kullanılmıştır.

Yaklaşık 5.2 rad/s hızda yapılan %50 yüklü testte üç motorun hızları tamamen senkron olarak ilerlemekte ve hız profilinde sadece düşük seviyeli dalgalanmalar gözlenmektedir. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 ile farklı yük durumlarınlarında motorların hız, yük torku Iq ve Vq parametrelerinin zaman grafikleri verilmiştir. Motorlara uygulanan V_q gerilimi genel olarak stabildir ve üç motor arasında belirgin bir fark oluşmamıştır. Bu durum, sürücünün gerilim dağılımını başarılı şekilde paylaştırdığını göstermektedir. I_q akımı yük altında yaklaşık 5–6 A seviyesinde sabit kalmakta ve üç motorun akım paylaşımı neredeyse birebir aynı gerçekleşmektedir. Yük torku ise 7–8 Nm civarında stabil olup yalnızca düşük genlikli titreşimler içermektedir. Genel olarak düşük hız-yük kombinasyonunda sistem oldukça kararlı ve üç motor senkron şekilde çalışmaktadır.



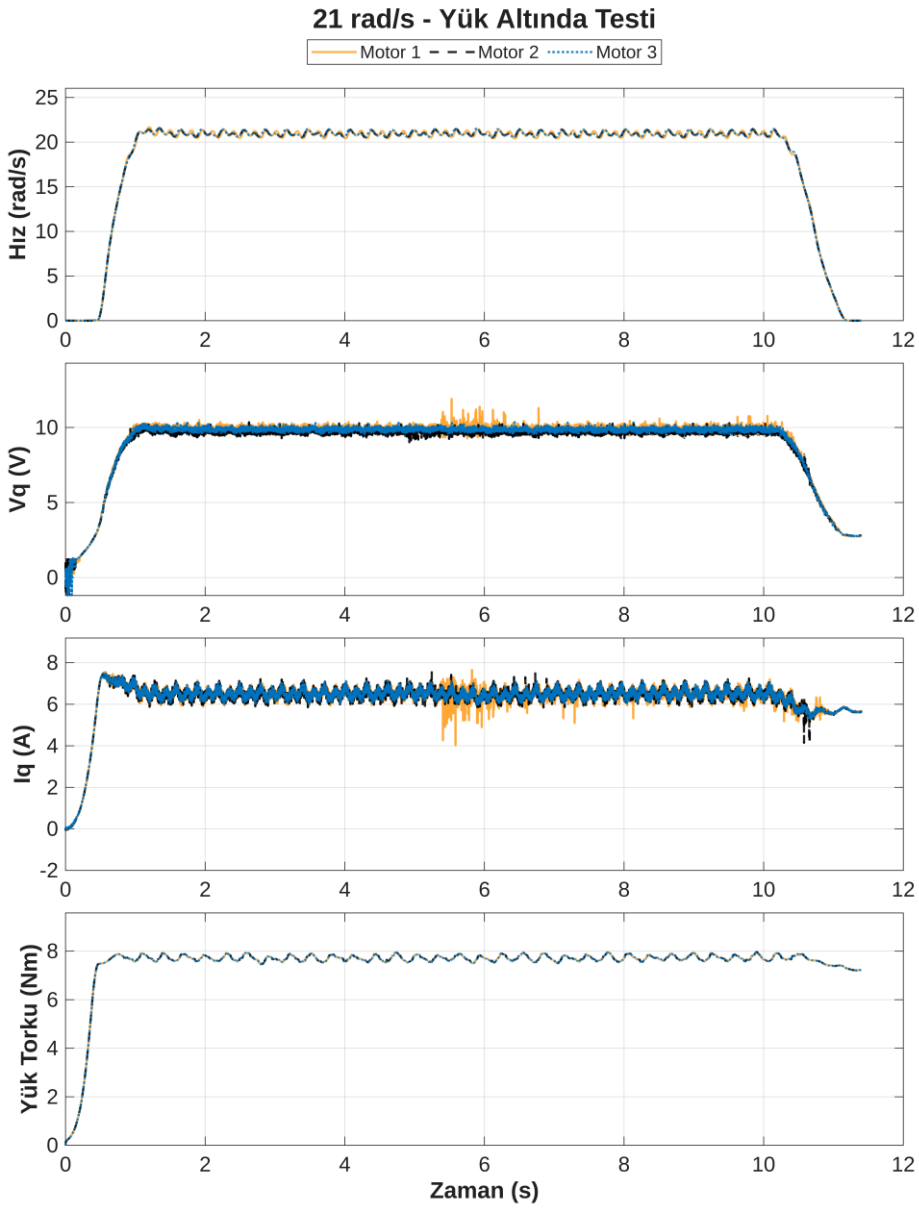
Şekil 4.3. Yük altında 5.2 rad/s'de motorların hız, yük torku Iq ve Vq parametrelerinin zaman grafiği

Yüksüz koşullarda akım talebi belirgin şekilde düşmekte ve I_q akımı 1 A seviyelerine inmektedir. Hız profili, yük altındaki tepkisine kıyasla daha düzgün olup motorların mekanik olarak daha serbest çalışması sebebiyle sistem daha az zorlanmaktadır. T_{load} sinyalinde 0.2–0.7 Nm aralığında küçük dalgalanmalar oluşmaktadır. Bu durum, mekanik sistemdeki doğal titreşimlerin belirginleşmesinden kaynaklanmaktadır. Genel olarak yüksüz test sonuçları beklenen şekilde olup, herhangi bir dengesizlik veya senkronizasyon kaybı görülmemektedir.



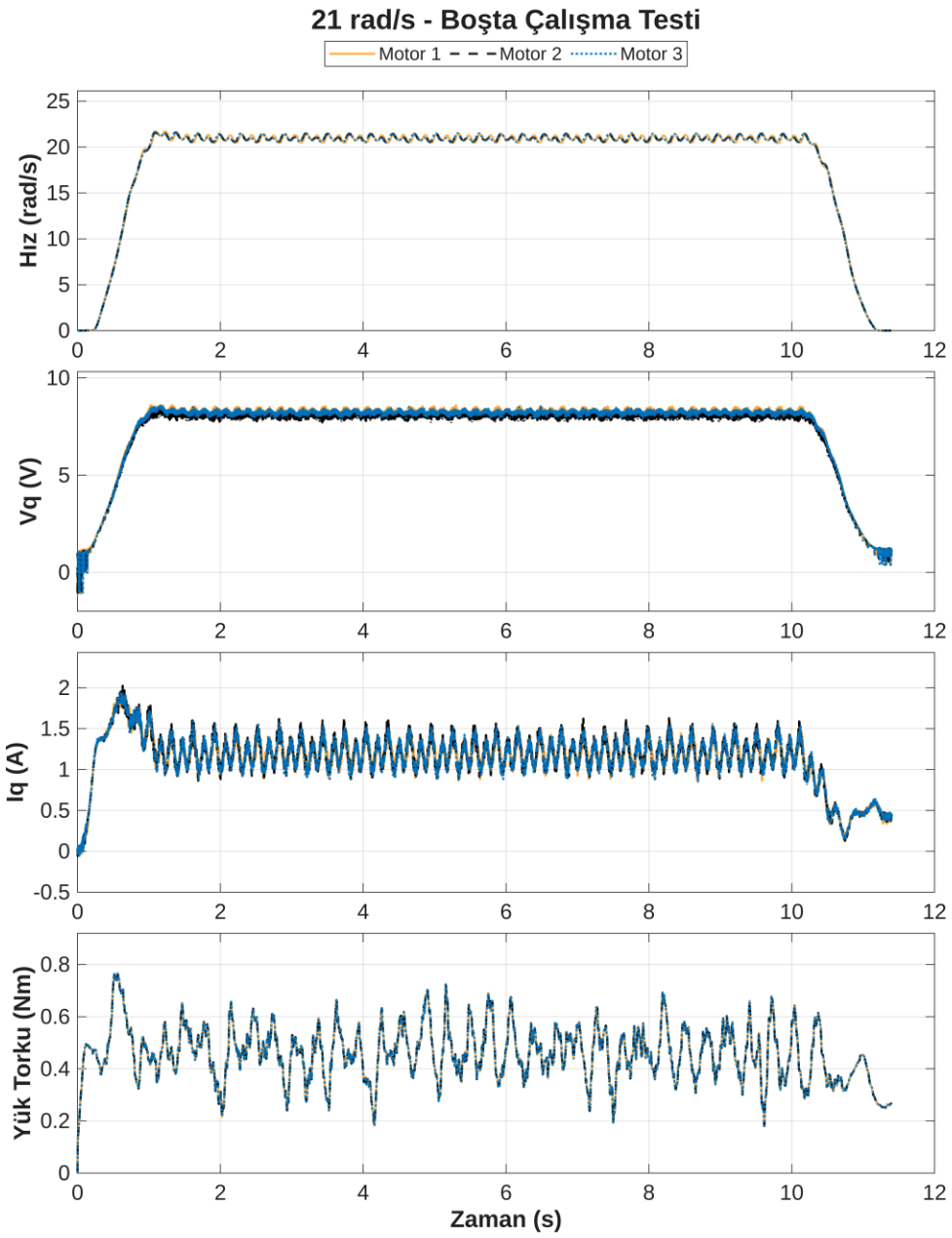
Şekil 4.4. Yüksüz boşta 5.2 rad/s'de motorların hız, yük torku Iq ve Vq parametrelerinin zaman grafiği

Yaklaşık 21 rad/s hızda yapılan yüklü testte üç motorun hız profili yüksek hızın etkisiyle daha belirgin bir dalgalanma içermektedir. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 ile farklı yük durumlarınlarında motorların hız, yük torku Iq ve Vq parametrelerinin zaman grafikleri verilmiştir. Bu durum SMSM motorların yüksek hızdaki davranışı için doğal bir sonuçtur. V_q gerilimi yük altında ortalama 10 V seviyesinde olup motorlar arasında dengeli bir dağılım göstermektedir. Bazı anlık dalgalanmalar gözlense de bunlar sistematik bir kararsızlığı işaret etmeden, daha çok akım ölçümü veya örnekleme kaynaklı kısa süreli darbeler şeklindedir. I_q akımı yük altında 6–7 A seviyesinde sabit kalmış ve motorlar arasındaki akım paylaşımı yüksek hızda bile oldukça başarılıdır. Yük torku bu hızda daha stabil görünmekte ve düşük hız testlerine kıyasla daha az dalgalanma barındırmaktadır.



Şekil 4.5. Yük altında 21 rad/s'de motorların hız, yük torku Iq ve Vq parametrelerinin zaman grafiği

Yüksek hızda yüksüz testte sistem minimal akım ile çalışmakta ve I_q akımı 1.18 A aralığında seyretmektedir. Bu testte tork sinyali düşük seviyelerde olsa da hafif osilasyonlar içerir, çünkü yüksek hızda küçük kontrol hamleleri bile tork ölçümünde daha belirgin görünmektedir. Motorlar arasında hız ve akım açısından herhangi bir kayma veya bozulma bulunmamaktadır. Dolayısıyla yüksek hız-yüksüz koşulunda da sistem düzgün şekilde çalışmakta, üç motor senkron bir şekilde aynı şafta bağlıymış gibi akışkan hareket etmektedir.



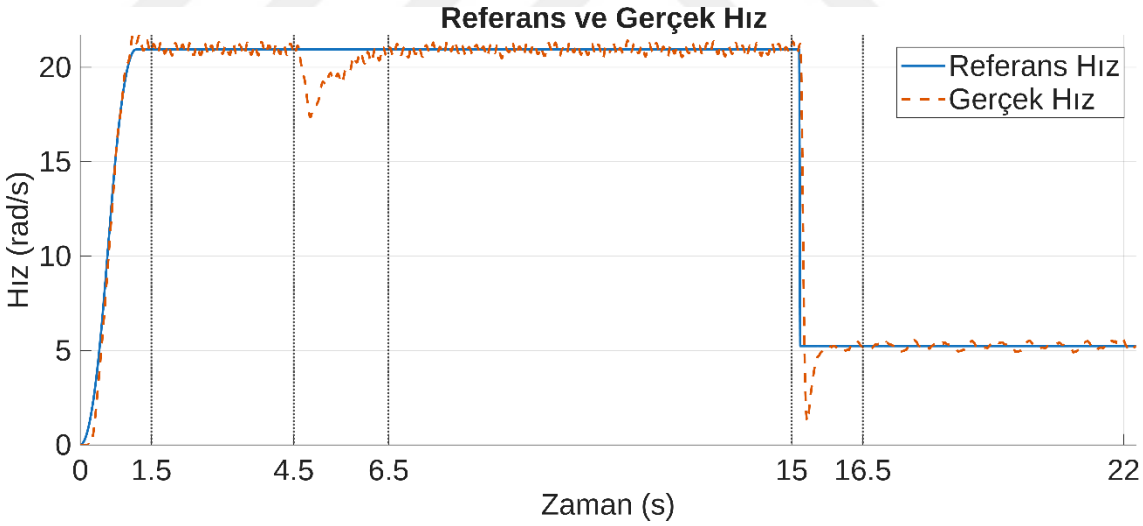
Şekil 4.6. Yüksüz durumda 21 rad/s'de motorların hız, yük torku Iq ve Vq parametrelerinin zaman grafiği

Tüm testler birlikte değerlendirildiğinde, üç SMSM motorunun hem düşük hem yüksek hızlarda ve hem yüklü hem de yüksüz koşullarda birbirleriyle başarılı şekilde senkronize çalıştığı görülmüştür. Hız profilleri her durumda birbiriyle uyumlu, akım paylaşımı ise son derece dengelidir. V_q gerilimi motorlar arasında belirgin bir fark oluşturmadan dağıtılmaktadır. Yük torku hem düşük hem yüksek hızlarda beklenen seviyelerde seyretmekte, yalnızca mekanik sistem ve ölçüm hassasiyetine bağlı doğal küçük salınımlar gözlenmektedir. Genel olarak sistemin dinamik kararlılığı yüksek olup, üçlü motor sürüş yapısının hem kontrol hem de mekanik açıdan sağlıklı ve senkron çalıştığı sonucuna varılmıştır.

Sistemin operasyonel kapasitesini ve çalışma aralığını belirleyen donanımsal alt ve üst sınırlar, kullanılan bileşenlerin fiziksel karakteristikleriyle doğrudan ilişkilidir. Sistemin üst tork ve güç sınırlarını, motorların nominal akım değerleri (8.0 A) ve buna bağlı olarak üretebilecekleri maksimum tork kapasitesi (5.0 Nm) tayin etmektedir. Öte yandan, sistemin alt sınırlarını ve kararlılığını ise elektronik kartların düşük voltaj değerlerine ve elektriksel gürültüye olan hassasiyeti belirlemektedir. Özellikle motor sürücülerinin yüksek frekanslı anahtarlaması (PWM) sonucu meydana gelen elektromanyetik girişimler, düşük voltajlı sinyal hatlarında bozulmalara yol açarak senkronizasyon hatalarını tetikleyebilmektedir.

Bu elektriksel kısıtlar ve kararlılık parametreleri doğrultusunda, sistemin operasyonel hız aralığı optimize edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda, sinyal-gürültü oranının kritik olduğu düşük hız bölgelerinde, yüklü durumda ancak 5 rad/s ve üzerindeki hızlarda başarılı bir kontrol takibi sağlandığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle kararlı bir çalışma aralığı elde etmek adına minimum hız 5 rad/s olarak seçilmiştir. Üst sınırda ise motorun 8.0 A olan nominal akım limitine yaklaşılması durumunda sistemin tam kapasiteye geçmesini önlemek ve kontrol rezervini koruyarak motoru elektriksel zorlanmalardan kaçındırmak amacıyla maksimum hız 21 rad/s olarak belirlenmiştir.

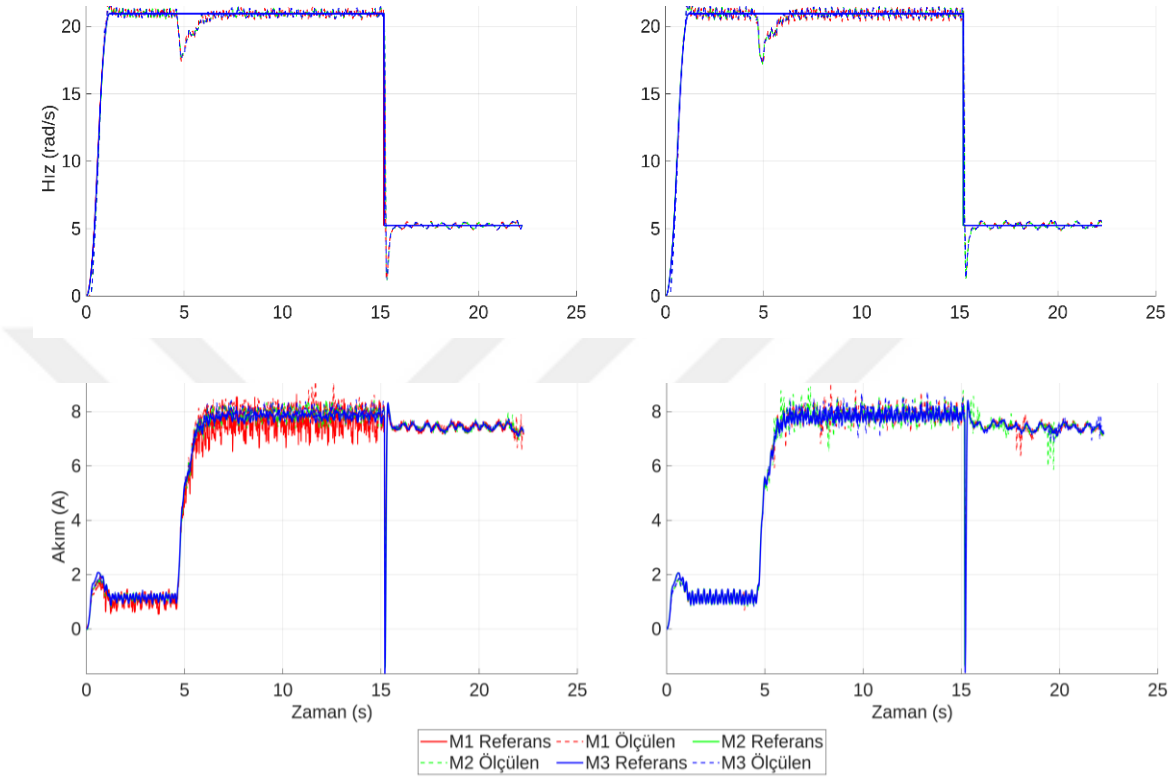
Farklı çalışma koşulları altında sistem performansını değerlendirmek için sürüş bölgeleri önceden tanımlanmış bölgelere ayrılmıştır: İvmelenme, yüksüz sabit hız, yük uygulanması, yüklü sabit hız, hız değişimi ve yüklü düşük sabit hız. Bölgeler aşağıdaki grafikte belirtilmiştir.



Şekil 4.7. Hız referansı ve gerçek hız parametrelerinde sürüş bölgeleri

Motorlar önce 21 rad/s'lik sabit hıza hızlandırılmıştır. Bu aşamada yük devreye alınmamıştır. Daha sonra t=5 s'de 7,5 Nm fren yükü uygulanmıştır ve testin sonuna kadar bu yük korunarak devam edilmiştir. t=15 s'de referans hız 21 rad/s'den 5.2 rad/s'ye düşürülmüş ve sistem tepkisi gözlemlenmiştir. Uygulanan toplam 7,5 Nm yük, üç motor arasında eşit olarak dağıtılması ve motor başına yaklaşık 2,5 Nm (motor nominal torkunun %50'si) elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu durumlara bakarak frenleme torkunun değeri seçilmiştir.

Şekil 4.8'de, Multilateral ve Tork-Takipçi kontrolü altında üç motorun hız ve akım tepkileri karşılaştırması verilmiştir. Grafikler, tahrik sisteminin hız ve akım referans profillerini ve gerçek değerlerini göstermektedir. Bu grafiklerden iki stratejinin senkronizasyon performansını doğrudan değerlendirmek zordur. Bu nedenle, karşılaştırmalar, senkronizasyon ve yük paylaşımı performansını daha net bir şekilde gösteren hata sinyalleri ve ortalama karesel hata (MSE) değerleri ile yapılmıştır.

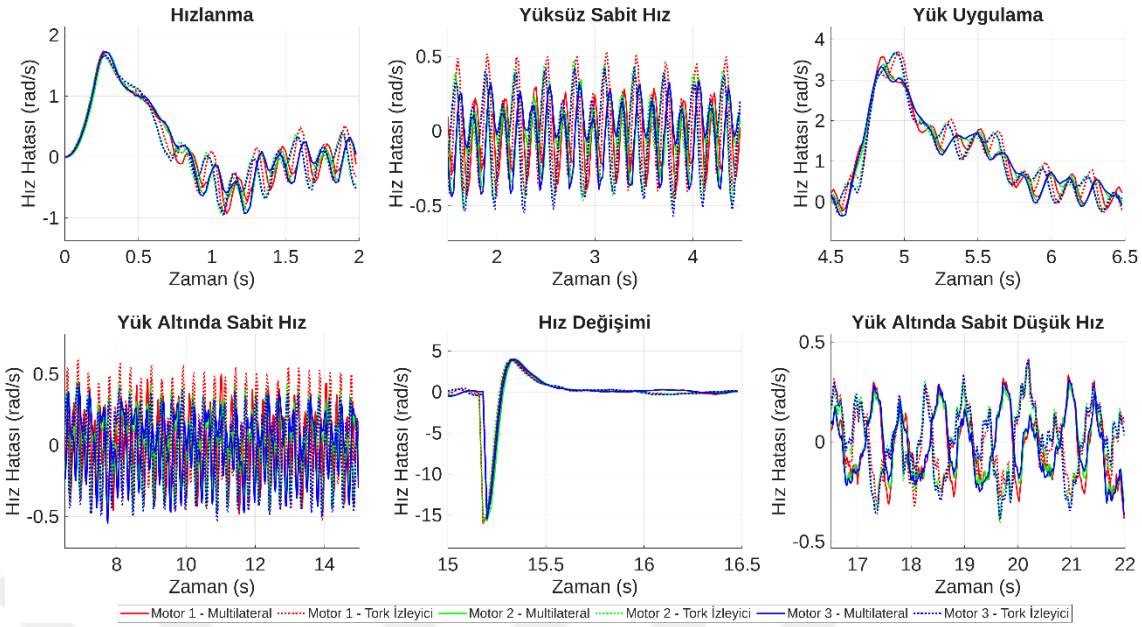


Şekil 4.8. Üç Motorun Akım ve Hız Referansı Tepkileri

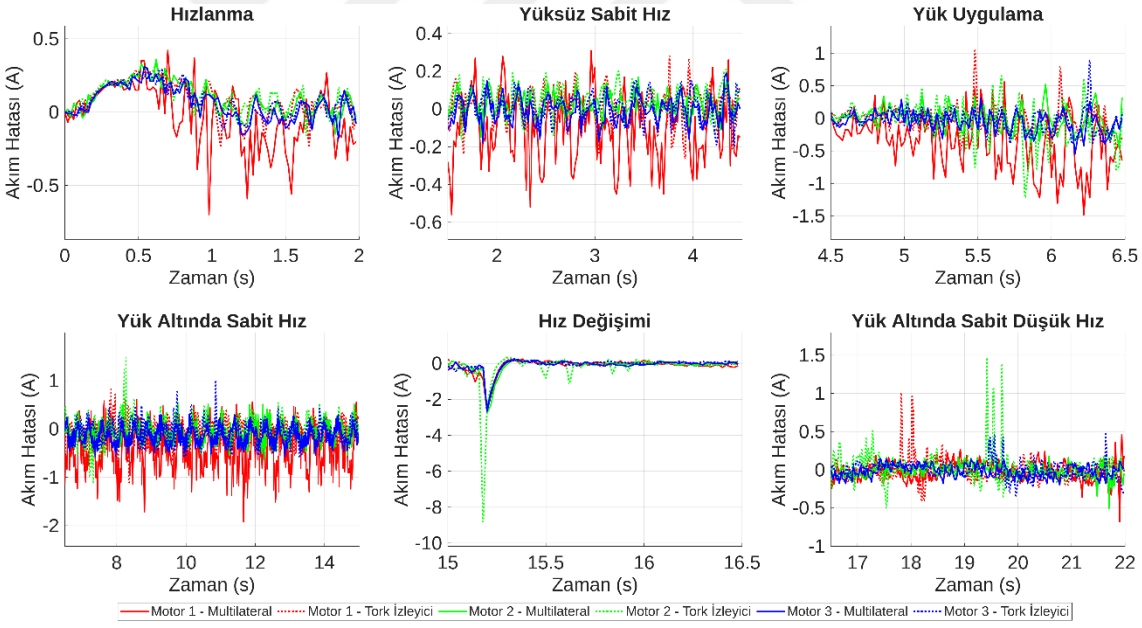
Hız ve akım için referans değeri izleme hataları, hem anlık hata sinyalleri (Bkz. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10) hem de ortalama karesel hata (MSE) değerleri Denklem (3.10) kullanılarak iki aşamada incelenmiştir. Hız hatası, $\omega_{ref} - \omega_{actual}$ olarak tanımlanır; burada ω_{ref} yörünge referansı olarak üretilir ve ω_{actual} enkoder ölçümlerinden elde edilir. Akım hatası, $i_{qref} - i_{q_actual}$ olarak tanımlanır; burada i_{q_actual} motor faz akımlarından ölçülür. i_{qref} ise hız kontrol döngüsünün çıkışından gelmektedir. AYK içinde, elektromanyetik tork Denklem (3.8) ile ifade edilir. Akım hatası tork sabiti çarpanı ile çarpıldığında tork hatası elde edildiği için bu analizler yapılmıştır.

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - x_i)^2 \tag{4.1}$$

Bölge bazlı karşılaştırmada, Multilateral kontrol, yüksüz sabit hız, yüklü sabit düşük hız ve yük uygulanan bölgelerde tüm motorlarda daha iyi performans göstererek Tork-Takipçi yönteminden daha düşük hız hataları vermektedir. Ancak, hız değişim bölgelerinde Motor 2, Multilateral ile daha iyi sonuçlar elde ederken, Tork-Takipçi Motor 1 ve Motor 3'te daha düşük hız hataları vermektedir.



Şekil 4.9. Multilateral ve Tork-Takipçi Stratejileri Altında Motorların Hız Hata Tepkileri



Şekil 4.10. Multilateral ve Tork-Takipçi Stratejileri Altında Motorların Akım Hata Tepkileri

Akım/tork hataları dikkate alındığında, Motor 2 ve Motor 3 çoğu bölgede Multilateral kontrol ile daha iyi performans göstermiş ve daha düşük hata değerleri sergilemiştir. Ancak, Tork-Takipçi Motor 1 için daha düşük akım hataları gösterir, bu sonuç tork referansının Motor 3'ün gerçek torkundan türetilmiş olması ve sonuçlara ölçüme bağlı bir sapma getirmesi ile ilgilidir.

Üç ardışık test gerçekleştirilmiştir ve kontrol stratejilerinin karşılaştırılması için ortalama karesel hata (MSE) değerleri kullanılmıştır, Çizelge 4.3'teki bu değerler yapılan ardışık testlerin ortalaması olarak hesaplanmıştır. Çizelgede en düşük değerler renklendirilmiştir.

Çizelge 4.3. Sürüş Bölgeleri Boyunca Multilateral ve Tork-Takipçi Kontrolde Ortalama Hız ve Akım MSE Değerleri

	Bölge	Hız Hatası		Akım Hatası	
		Multilateral	**Tork-Takipçi**	**Multilateral**	**Tork-Takipçi**
Motor #1	İvmelenme	0.652027	0.576514	0.036196	0.025921
	Yüksüz Sabit Hız	0.043920	0.083313	0.019601	0.008000
	Yük Uygulanması	2.296792	2.356323	0.162499	0.036732
	Yüklü Sabit Hız	0.046555	0.082676	0.177080	0.071448
	Hız Değişimi	9.454445	7.017653	0.230518	0.168186
	Yüklü Düşük Sabit Hız	0.024967	0.026824	0.017138	0.014052
Motor #2	İvmelenme	0.621854	0.582056	0.028680	0.025555
	Yüksüz Sabit Hız	0.037769	0.067928	0.009451	0.006729
	Yük Uygulanması	2.288399	2.340192	0.063717	0.056130
	Yüklü Sabit Hız	0.030104	0.059416	0.053166	0.057045
	Hız Değişimi	8.393957	8.750877	0.536160	1.243575
	Yüklü Düşük Sabit Hız	0.021975	0.029859	0.010183	0.015714
Motor #3	İvmelenme	0.645571	0.585451	0.022371	0.021312
	Yüksüz Sabit Hız	0.044890	0.075691	0.004100	0.006452
	Yük Uygulanması	2.292786	2.349705	0.024444	0.027163
	Yüklü Sabit Hız	0.038831	0.069290	0.046747	0.047182
	Hız Değişimi	8.569537	6.129741	0.345427	0.152790
	Yüklü Düşük Sabit Hız	0.023228	0.032768	0.005767	0.007265

Karşılaştırma, Tork-Takipçi yönteminin belirli hız değişim koşullarında ve Motor 1'in akım tepkisinde daha düşük hatalar elde ettiğini göstermektedir. Bununla birlikte, Multilateral kontrol, çoğu çalışma bölgesinde, özellikle sabit durum ve yük koşullarında daha iyi performans gösterdiğini; bu koşullarda daha düşük hız ve akım hataları elde ettiğini ve motorlar arasında daha dengeli bir tork dağılımı sağladığını göstermiştir.

4.4. Sistem Tanımlama ve Simülasyon Sonuçları

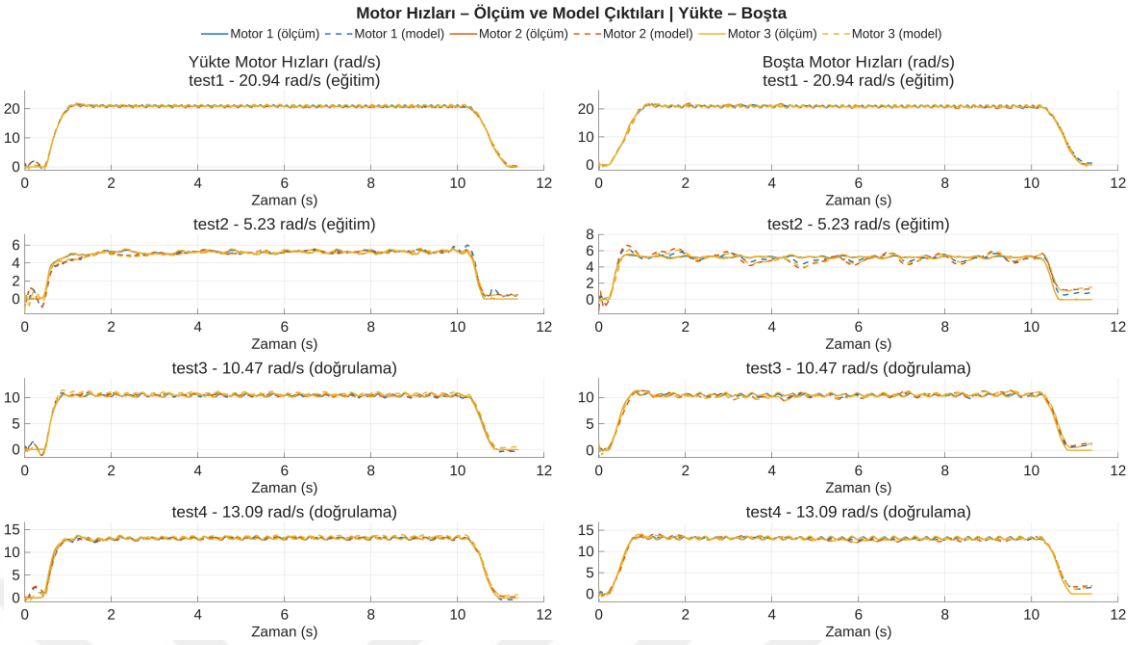
4.4.1. Modelleme

Sistemin matematiksel modelinin fiziksel gerçekliğe yüksek doğrulukla uyum sağlaması, kontrolcü tasarımının gürbüz bir yapıda oluşturulabilmesi ve sistem davranışlarının önceden tahmin edilebilir hale gelmesi amacıyla sistem tanımlama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, sistemin tüm çalışma aralığını temsil edecek şekilde dört farklı referans hız kademesinde hem yüklü hem de yüksüz koşullar altında toplanan deneysel veriler kullanılmıştır. Gerçekleştirilen parametre kestirim analizleri sonucunda, sistem dinamiklerini en yüksek doğrulukla ifade eden matematiksel yapının 3 kutup ve 2 sıfır derecesine sahip transfer fonksiyonu olduğu tespit edilmiştir. Modellerin kararlılık analizleri yapılmıştır. Aşağıdaki grafiklerde, kapalı çevrim kontrol algoritmaları devreye alınmadan önceki, açık çevrim model çıktısı ile gerçek ölçüm verilerinin karşılaştırmalı doğrulama sonuçları sunulmuştur.

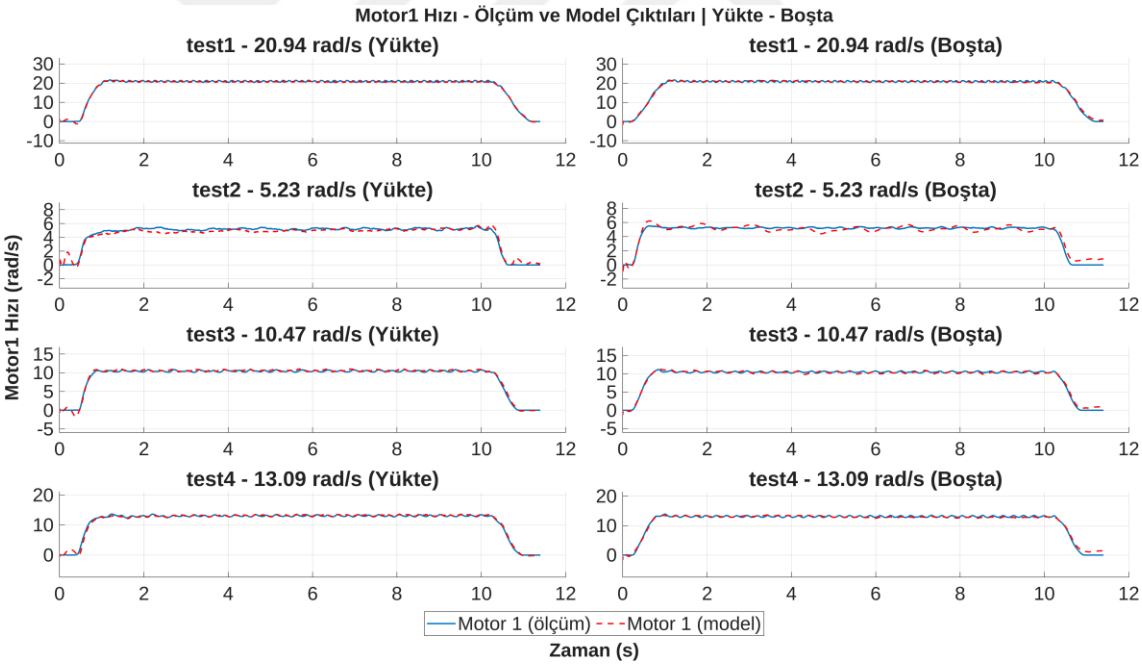
Şekil 4.11'de, eğitim (Test 1-2) ve doğrulama (Test 3-4) veri setleri için, gerçek motor hızları ile matematiksel model çıktıları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde, elde edilen modelin sistemin yükselme zamanını, oturma davranışını ve genel dinamik karakteristiğini yüksek bir başarıyla temsil ettiği görülmektedir.

Modelin başarısını kanıtlayan en önemli gösterge, modelin eğitiminde kullanılmayan doğrulama veri setlerindeki (Test 3 - 10.5 rad/s ve Test 4 - 13.1 rad/s) yüksek uyumudur. Model, görmediği bu çalışma noktalarında dahi gerçek sistemi neredeyse birebir takip etmektedir. Bu genel başarının yanında, modelleme sürecinin doğası gereği bazı bölgesel sapmalar da mevcuttur. Örneğin, düşük hız bölgesini (Test 2 - 5.2 rad/s) temsil eden eğitim verisinde, model ile gerçek veri arasında sınırlı bir genlik farkı oluşmuştur; ancak bu fark sistemin kararlı hal davranışını bozacak nitelikte değildir. Benzer şekilde, yüklü kalkış anlarında model çıktısında gözlemlenen geçici dalgalanma, sistem referans değere oturduğunda tamamen sönümlenmektedir. Sonuç olarak; düşük hızdaki minör ayrıntılar dışında, özellikle yüksek hızlardaki (Test 1 - 21 rad/s) ve doğrulama setlerindeki üstün performans, modelin sistem dinamiklerini doğru öğrendiğini ve kontrolcü tasarımı için güvenilir bir zemin oluşturduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

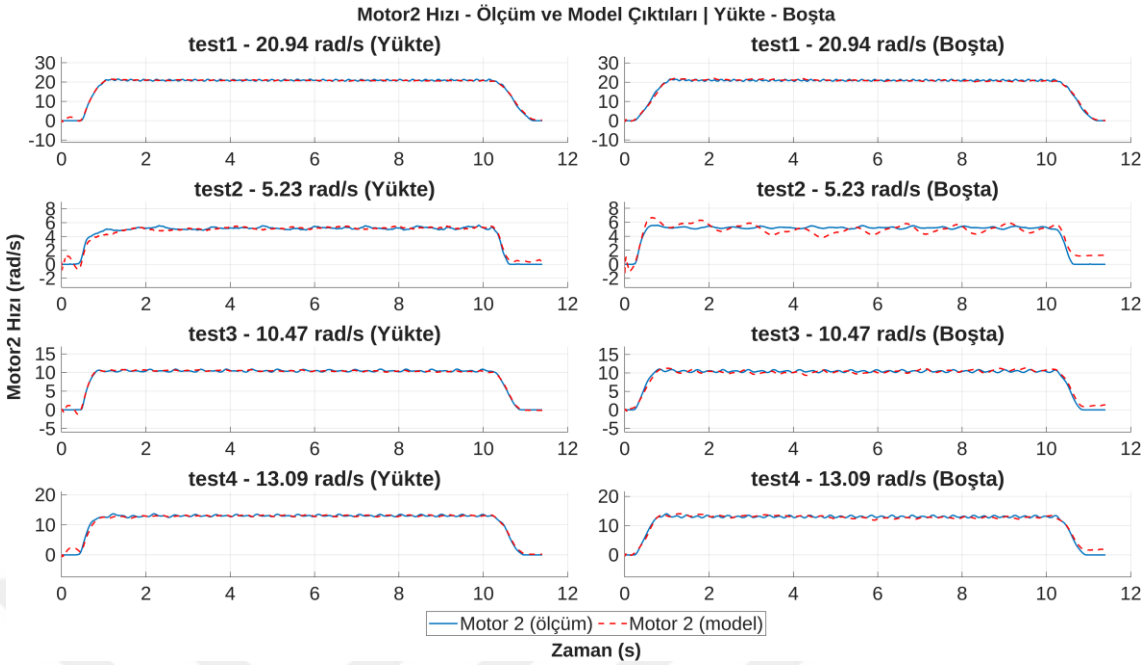
Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14, her bir motor için ayrı ayrı elde edilen karakteristik verileri içermektedir. Mevcut veri setinin yoğunluğu nedeniyle, bu şekiller genel eğilimi yansıtmak amacıyla temsili örnekler olarak sunulmuştur. Şekil 4.11 ise, ayrı ayrı sunulan bu verilerin tek bir grafik düzleminde birleştirilmiş halini göstermektedir. Takip eden bölümlerde, motorlar arasındaki performans farklarını ve senkronizasyon başarısını daha net gözlemleyebilmek adına Motor 1, 2 ve 3'e ait veriler aynı grafik düzlemi üzerinde karşılaştırmalı olarak sunulacaktır.



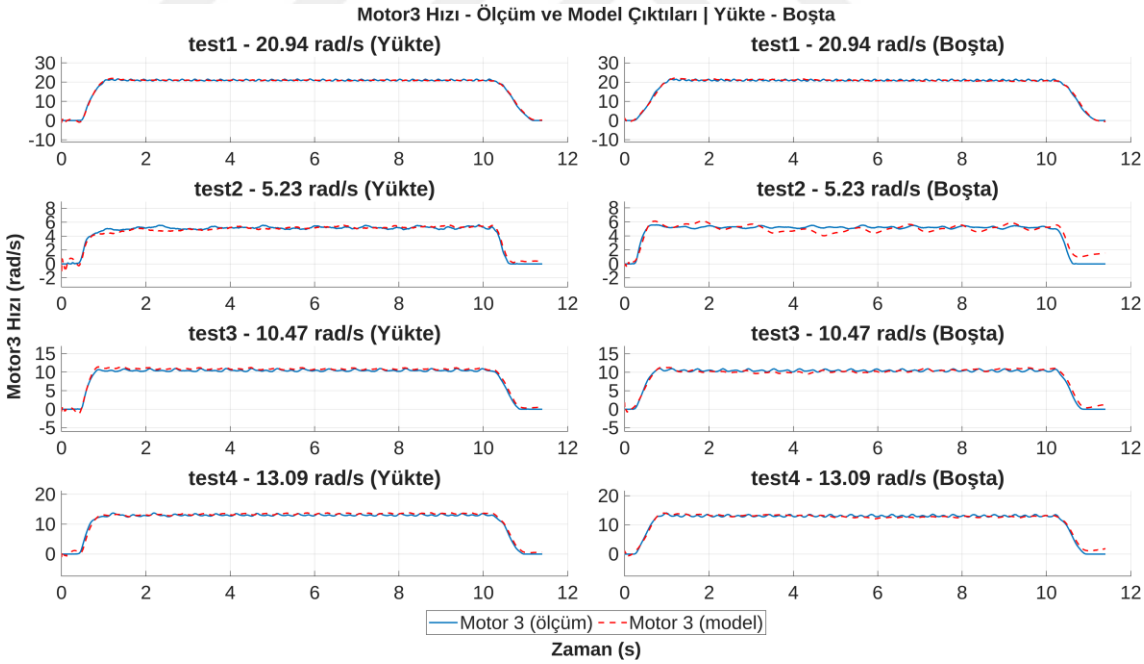
Şekil 4.11. Sistem tanımlama modeli ile elde edilen tahmini çıkışların, yüklü ve yüksüz durumlarda eğitim ve doğrulama veri setleri için gerçek motor hızları ile karşılaştırılması



Şekil 4.12. Sistem tanımlama modeli ile Motor1 için elde edilen tahmini çıkışların, yüklü ve yüksüz durumlarda eğitim ve doğrulama veri setleri için gerçek motor hızları ile karşılaştırılması



Şekil 4.13. Sistem tanımlama modeli ile Motor2 için elde edilen tahmini çıkışların, yüklü ve yüksüz durumlarda eğitim ve doğrulama veri setleri için gerçek motor hızları ile karşılaştırılması

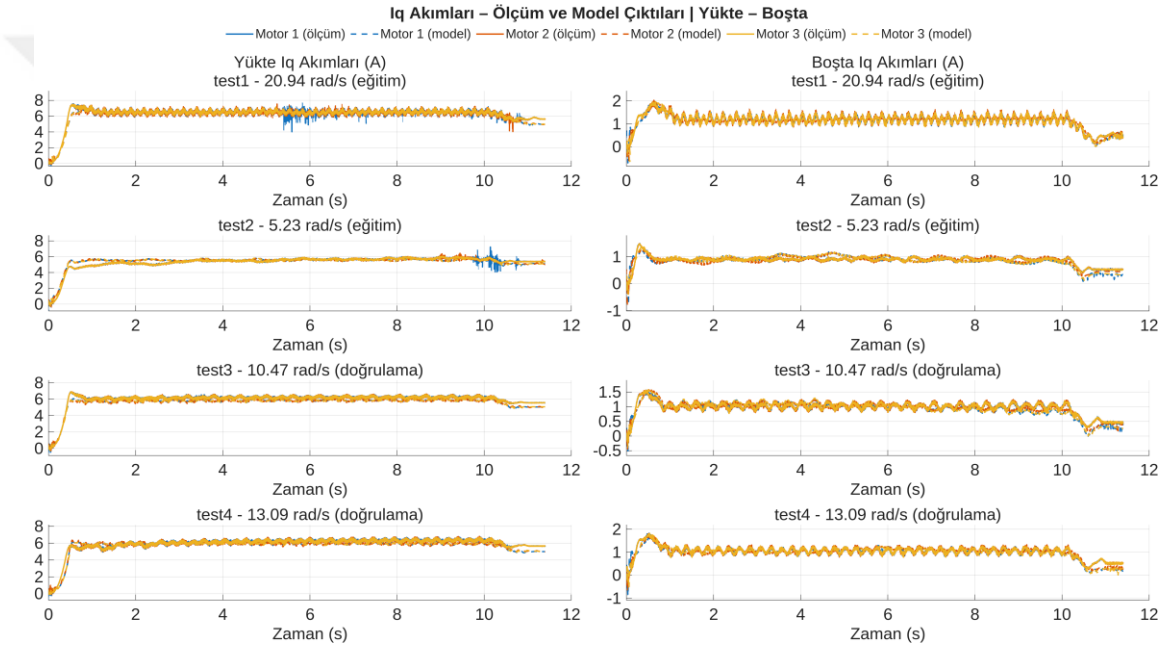


Şekil 4.14. Sistem tanımlama modeli ile Motor3 için elde edilen tahmini çıkışların, yüklü ve yüksüz durumlarda eğitim ve doğrulama veri setleri için gerçek motor hızları ile karşılaştırılması

Şekil 4.15'de, tork üretiminden doğrudan sorumlu olan I_q akımının gerçek ölçüm değerleri ile model tarafından üretilen tahmini değerleri karşılaştırılmıştır. Grafikler genel

çerçevede değerlendirildiğinde, matematiksel modelin farklı yük ve hız profillerinde sistemin çektiği akım seviyelerini ve genel eğilimini doğru bir şekilde takip ettiği görülmektedir.

Grafiklerde ilk bakışta dikkat çeken en belirgin durum, ölçüm ve model sinyalleri arasındaki yapısal farktır. Gerçek ölçüm verileri, sistemdeki akım sensörlerinin hassasiyeti ve sürücü devresinin anahtarlama etkileri nedeniyle yüksek frekanslı bir gürültü bileşeni içermektedir. Buna karşın model çıktıları, bu elektriksel gürültülerden arındırılmış ideal davranışı temsil etmektedir. Buradaki kritik nokta, model çıktısının bu gürültülü sinyalin ortalama değerini birebir yakalıyor olmasıdır. Yani model, anlık parazitleri yok sayarak motorun üretmesi gereken asıl tork bileşenini başarıyla hesaplamaktadır. Elde edilen grafikler detaylı incelendiğinde, sistemin genel çalışma aralığında kararlı olduğu görülmekle birlikte, başlangıç ve bitiş rampalarında gerçek değer ile arasında minimal farklılıklar gözlemlenmiştir.

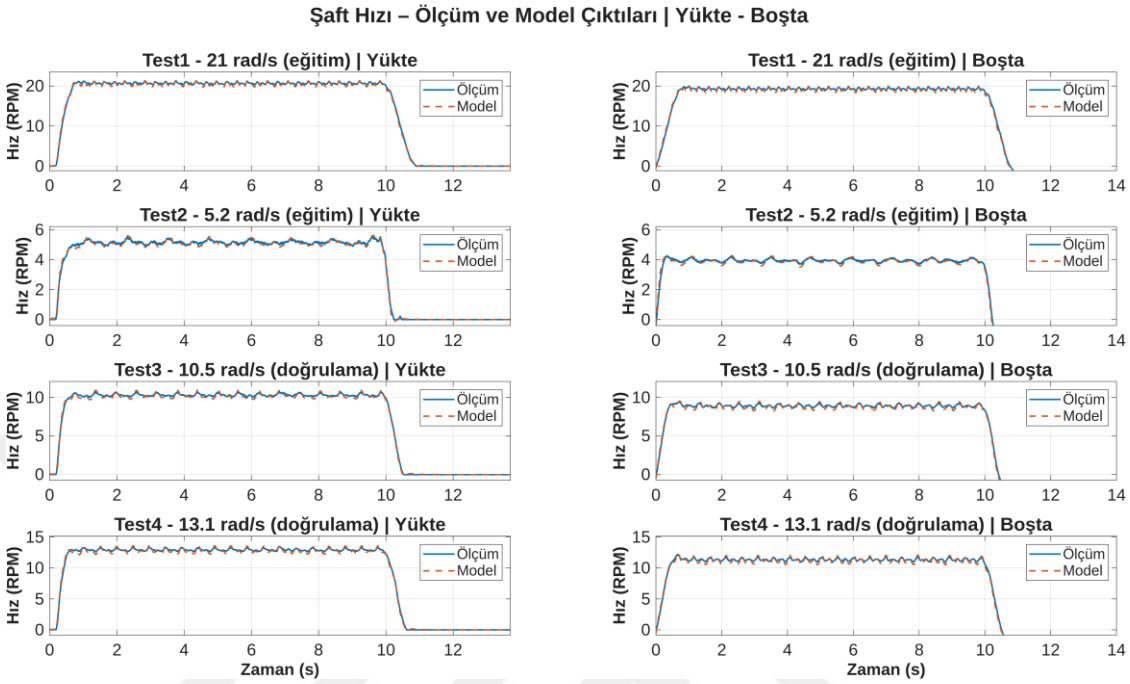


Şekil 4.15. Sistem tanımlama modeli ile elde edilen tahmini çıkışların, yüklü ve yüksüz durumlarda eğitim ve doğrulama veri setleri için gerçek motor akımları ile karşılaştırılması

Ayrıca testin tamamlanmasına rağmen sürüş kesilmediğinden, motorun frenleme/tutma modunda kalması istenmiştir. Bu sebeple, ölçülen Iq akımları sıfıra inmek yerine, motor hareketsiz kalacak (motoru sabit tutacak) şekilde gereken akım değerine oturarak süreklilik göstermiştir. Bu davranışların sistem performansı üzerindeki etkisini somutlaştıran hata analizleri ve detaylı incelemeler ise MSE tablosunda verilmiştir.

Şekil 4.16'te, üç adet motor hızı girişine karşılık ana mil şaft hızı çıkışını tahmin eden MISO sistem modelinin zaman düzlemindeki cevabı sunulmuştur. Modelin performansı; düşük (5.2 rad/s), orta ve yüksek (21 rad/s) hız kademelerinde hem yüklü hem de yüksüz (boşta) çalışma koşulları altında test edilmiştir. Grafikler incelendiğinde, model çıktısının, gerçek sistemden alınan ölçüm verilerini yüksek bir hassasiyetle takip

ettiği görülmektedir. Model, sadece kararlı hal durumunu değil, kalkış rampası ve sistemin mekanik yapısından kaynaklanan hız salınımları gibi dinamik karakteristikleri de başarıyla temsil etmektedir.

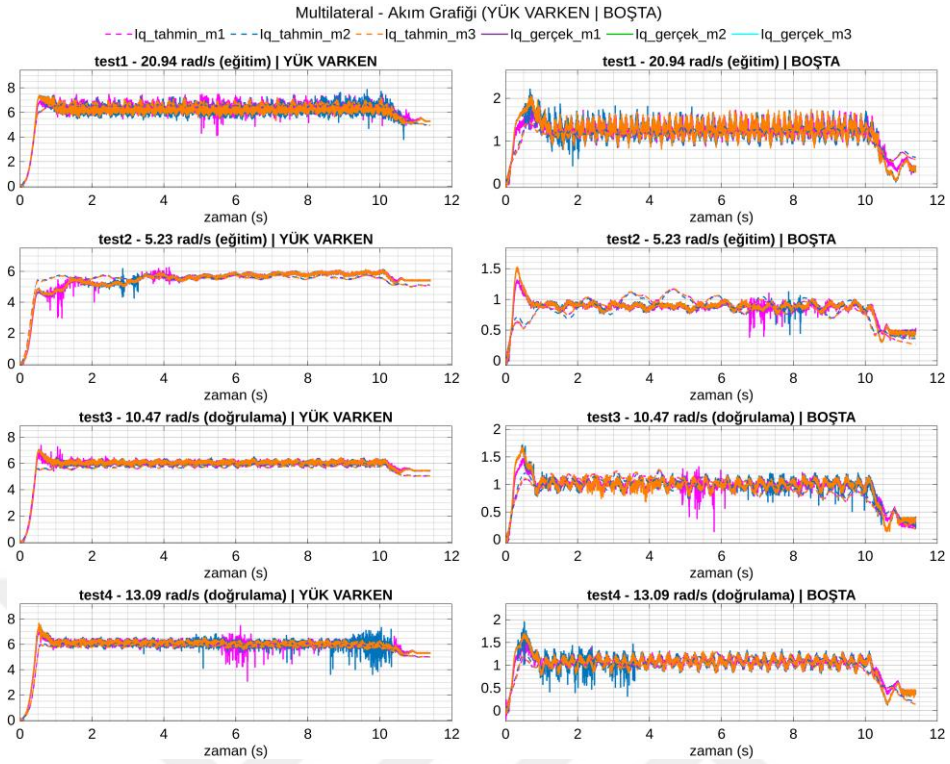


Şekil 4.16. Sistem tanımlama modeli ile elde edilen tahmini çıkışların, yüklü ve yüksüz durumlarda eğitim ve doğrulama veri setleri için gerçek şaft hızı ile karşılaştırılması

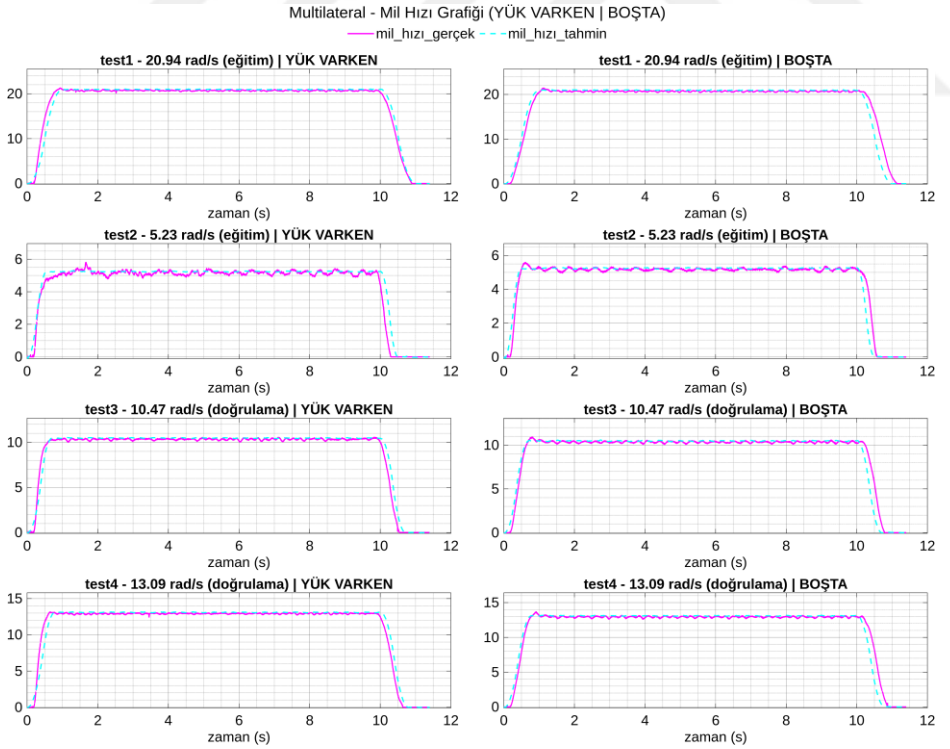
4.4.2. Kapalı çevrim simülasyon sonuçları

Öncelikle önerilen çoklu motor kontrol yapısının ve oluşturulan modellerin, MATLAB/SIMULINK üzerinde simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Sistem tanımlama metodu ile oluşturulan modellerin geçerliliğini ve fiziksel sisteme uygunluğunu ortaya koymak amacıyla; simülasyon ortamından elde edilen veriler ile fiziksel deney düzeneğinden ölçülen gerçek veriler, farklı çalışma koşulları altında analiz edilmiştir. Testler; yüklü ve boşta çalışma durumlarını kapsayacak şekilde, dört farklı hız referansında (20.94, 5.23, 10.47 ve 13.09 rad/s) gerçekleştirilmiştir. Grafiklerde sunulan sonuçlar incelendiğinde, simülasyon modelinin ürettiği dinamik davranışın, gerçek sistemden alınan ölçümlerle yüksek bir uyum gösterdiği görülmektedir. Özellikle akım (I_q) ve gerilim (V_q) grafiklerinde, deneysel ortamın doğası gereği oluşan fiziksel gürültü ve ölçüm sapmalarına rağmen, simülasyon modelinin sistemin ana karakteristiğini ve trendini başarıyla takip ettiği, dolayısıyla kurulan modelin gerçek sistemi yüksek hassasiyetle temsil ettiği kanıtlanmıştır. (Şekil 4.17 ve Şekil 4.18)

Daha sonra Tork-Takipçisi tabanlı kontrol mimarisi, MATLAB/SIMULINK ortamında gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ve fiziksel deney düzeneğinden elde edilen gerçek zamanlı ölçüm verilerinin karşılaştırılmasıyla doğrulanmıştır (Şekil 4.19, Şekil 4.20).

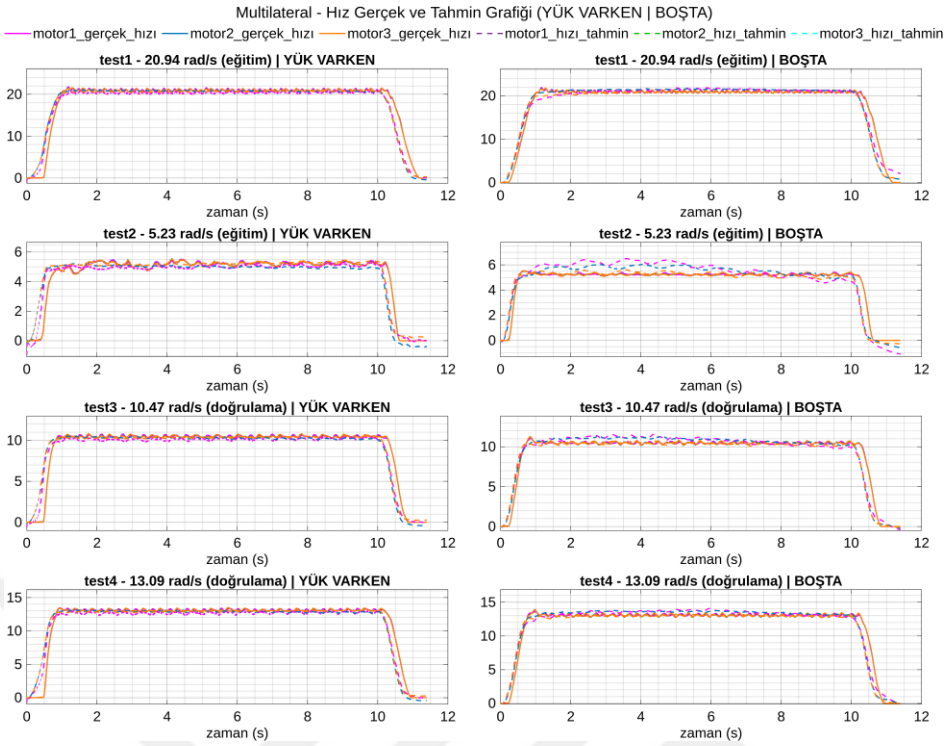


(a)

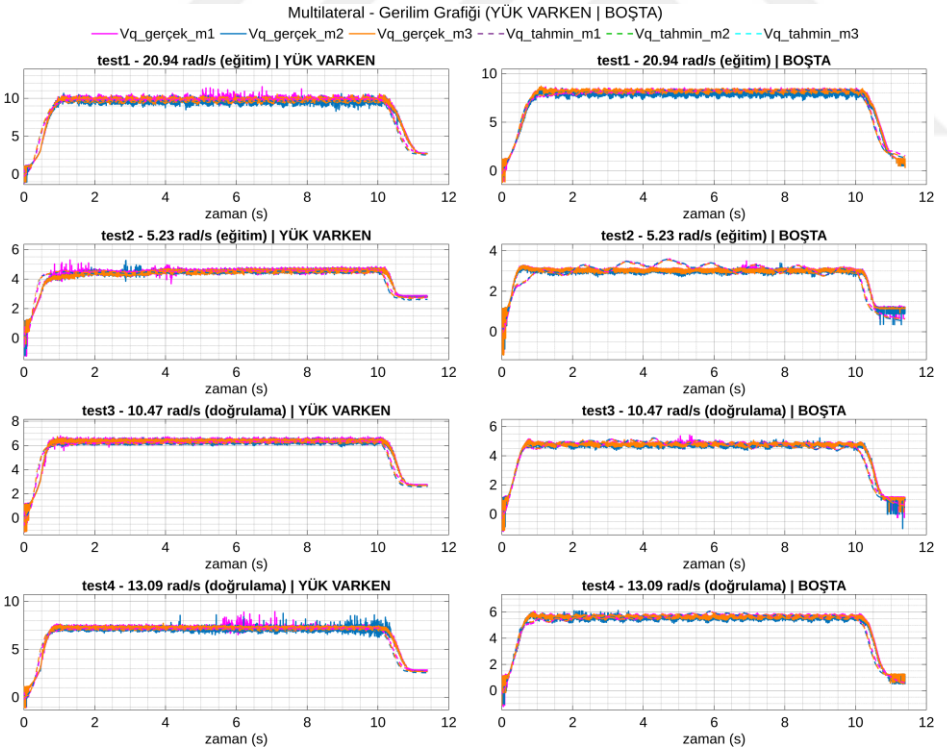


(b)

Şekil 4.17. Multilateral kontrol simülasyonu ile elde edilen akım ve şaft hızı çıkışlarının gerçek değerler ile karşılaştırılması a) I_q akımı grafiği; b) Mil hızı grafiği

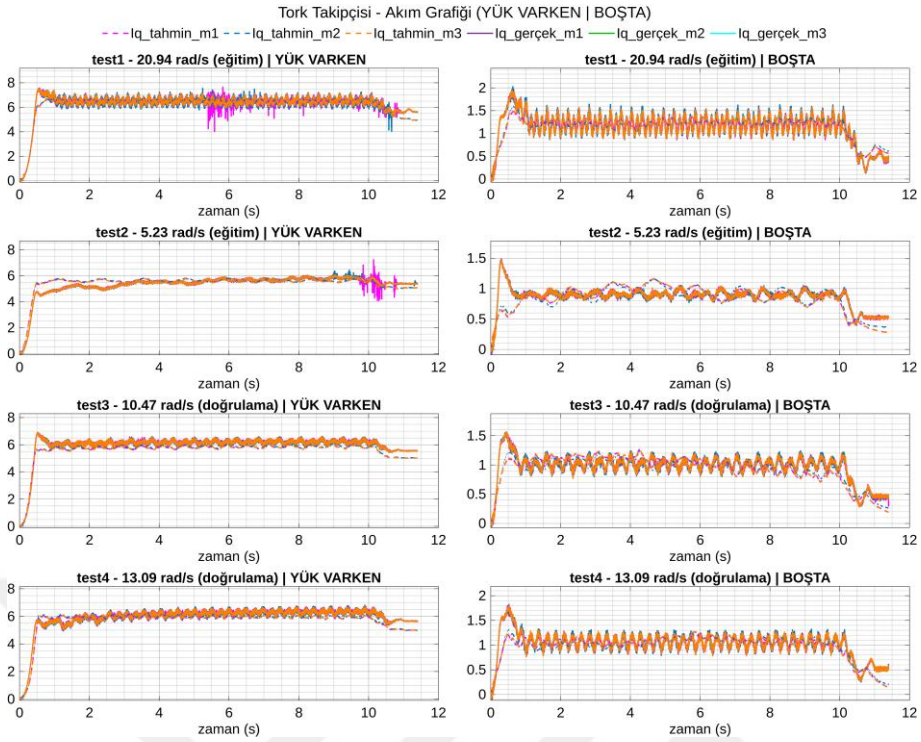


(a)

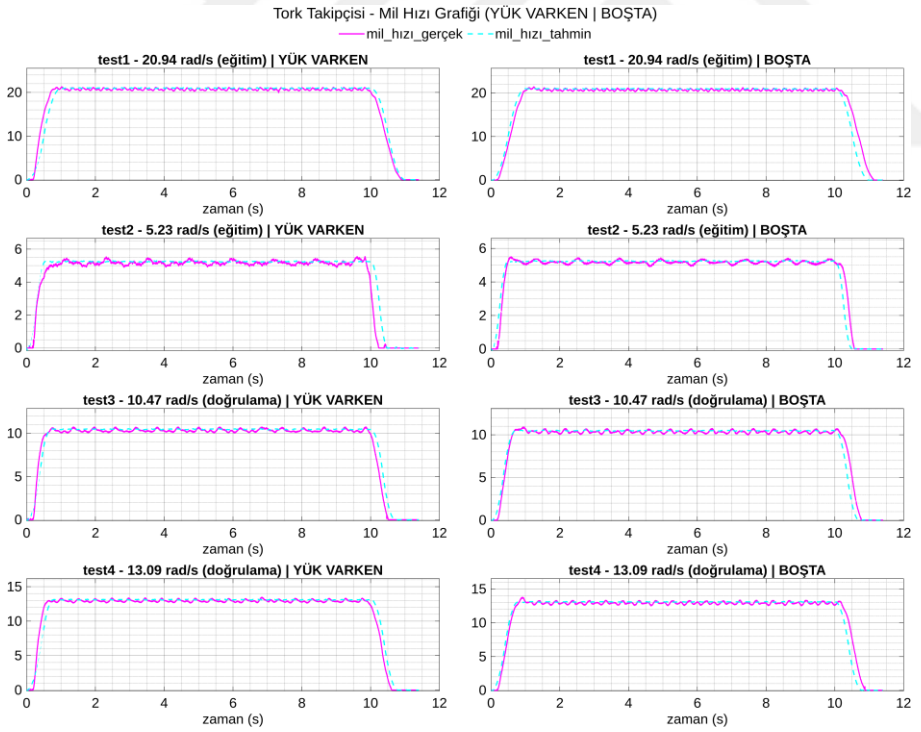


(b)

Şekil 4.18. Multilateral kontrol simülasyonu ile elde edilen gerilim ve motor hızı çıkışlarının gerçek değerler ile karşılaştırılması a) 3 motorun hızlarının grafiği; b) V_q gerilimi grafiği

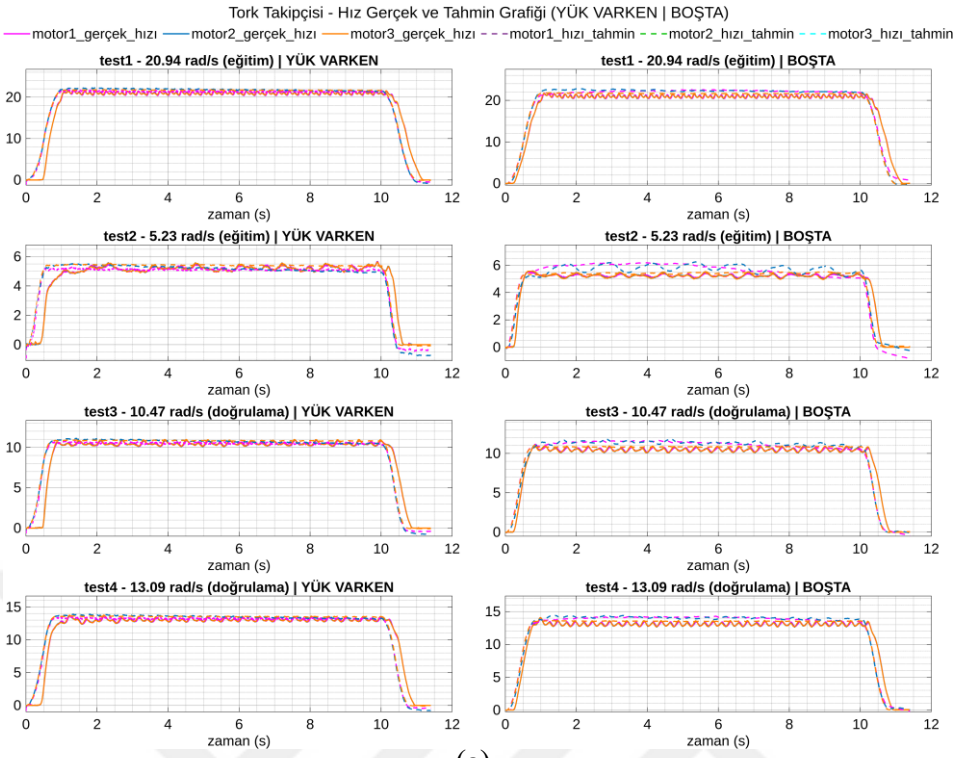


(a)

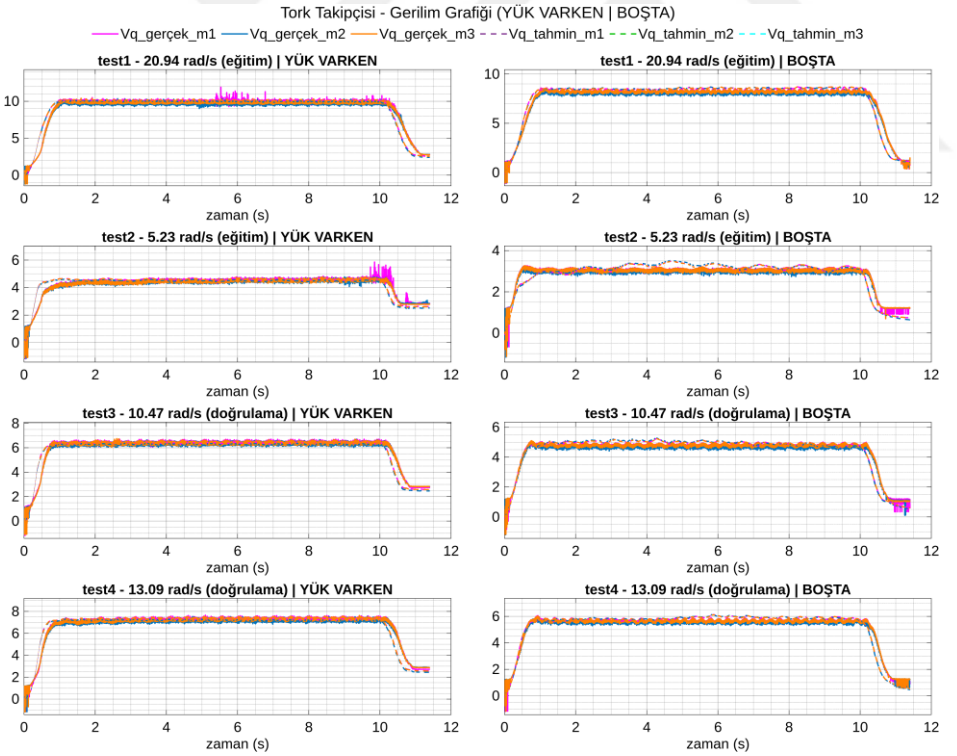


(b)

Şekil 4.19. Tork-Takipçi kontrol simülasyonı çıkışında elde edilen akım ve şaft hızı çıkışlarının gerçek motor parametreleri ile karşılaştırılması a) I_q akımı grafiği; b) Mil hızı grafiği



(a)



(b)

Şekil 4.20. Tork-Takipçi kontrol simülasyonı çıkışında elde edilen gerilim ve motor hızı çıkışlarının gerçek motor parametreleri ile karşılaştırılması a) 3 motorun hızlarının grafiği; b) V_q gerilimi grafiği

Elde edilen bulgular, Tork-Takipçisi kontrolcüsünün de gerçek sinyalleri Multilateral yapıya eşdeğer bir başarımla takip ettiğini göstermektedir. Görsel olarak sunulan bu uyumun detaylı analizi, MSE değerleri üzerinden karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.Çizelge 4.4'te sunulan Hata Kareler Ortalaması (MSE) değerleri, MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan matematiksel modellerin, fiziksel deney düzeneğini ne derece hassasiyetle temsil ettiğini göstermektedir. Analiz sonuçları incelendiğinde; Multilateral kontrol yapısına ait simülasyon verileri ile gerçek deney verileri arasındaki sapmanın, Tork Takipçi yapısına kıyasla belirgin şekilde daha düşük olduğu görülmektedir.

Özellikle I_q akımı ve V_q gerilimi gibi elektriksel parametrelerde, MSE değerlerinin büyük çoğunluğunun 0.5'in altında olması, modelin sistemin elektriksel karakteristiğini ve sürücü dinamiklerini yüksek hassasiyetle yansıttığını kanıtlamaktadır. Gerçek deney ortamındaki sensör gürültüleri ve çevresel bozuculara rağmen hatanın bu denli düşük seviyelerde tutulabilmesi, kurulan matematiksel modelin geçerliliğini güçlendirmektedir. Mekanik tarafta ise, motor hızı ve mil hızı kestirimlerinde ortaya çıkan hata değerleri, sistemin çalışma aralığı (örneğin 20.94 rad/s) ile oranlandığında kabul edilebilir sınırlar içerisindedir. Sonuç olarak hem elektriksel hem de mekanik büyüklüklerde elde edilen bu düşük hata oranları; simülasyon ortamında tasarlanan kontrolcünün ve sistem modelinin, gerçek dünya koşullarıyla örtüştüğünü ve çalışmanın güvenilir bir temele dayandığını ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.5'te şaft hızının gerçek ve referans sinyalleri ile simülasyonda tahmin ve referans sinyalleri arasındaki hatalar incelenmiş, bu hatalara dayalı MSE değerleri değerlendirme ölçütü olarak kullanılmıştır. Simülasyon ve deneysel çalışmalardan elde edilen tüm veriler kapsamlı bir şekilde değerlendirildiğinde, önerilen Multilateral kontrol yapısı ile Tork Takipçi (TT) mimarisi karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar (MSE) detaylı incelendiğinde; bazı spesifik çalışma noktalarında ve özellikle yüksüz (boşta) test koşullarında, Tork Takipçi yönteminin rekabetçi bir performans sergilediği, hatta kısıtlı durumlarda referans sinyaline uyum konusunda Multilateral yapıdan daha düşük hata değerlerine ulaşabildiği görülmüştür. Ancak, sistemin geneli ve özellikle yük altındaki zorlayıcı dinamik davranışı dikkate alındığında; Multilateral kontrol yapısının performansının üstünlüğü görülmektedir. Sonuç olarak geliştirilen Multilateral yöntem, değişken yük ve hız koşullarına karşı sergilediği gürbüzlük sayesinde, çoklu motor senkronizasyonu için Tork Takipçi yöntemine kıyasla genel anlamda daha güvenilir ve hassas bir çözüm sunmaktadır.

Çizelge 4.4. Farklı Hız ve Yük Koşullarında Multilateral ve Tork-Takipçisi Yöntemlerinin Simülasyon-Gerçek Uyumu (MSE) Karşılaştırması

Durum	Hız (rad/s)	Ölçüm Yeri	MSE							
			Vq		Iq		Hız		Mil Hızı	
			(Multi)	(TT)	(Multi)	(TT)	(Multi)	(TT)	(Multi)	(TT)
YÜKLÜ	5.23	M1	**0.0743**	0.1031	0.1500	**0.1289**	**0.3876**	0.6014	-	-
YÜKLÜ	5.23	M2	**0.0758**	0.0964	0.1402	**0.1309**	**0.4463**	0.5703	-	-
YÜKLÜ	5.23	M3	**0.0819**	0.1012	0.1293	**0.1230**	**0.4860**	0.6166	-	-
YÜKLÜ	5.23	Shaft	-	-	-	-	-	-	**0.6610**	0.9423
YÜKLÜ	10.47	M1	**0.1244**	0.1532	**0.1229**	0.1915	**1.1676**	1.6997	-	-
YÜKLÜ	10.47	M2	**0.1457**	0.1477	**0.1445**	0.1921	**1.2598**	1.7031	-	-
YÜKLÜ	10.47	M3	0.1664	0.**1567**	**0.1409**	0.1845	**1.3646**	1.6894	-	-
YÜKLÜ	10.47	Shaft	-	-	-	-	-	-	**0.1712**	0.2823
YÜKLÜ	13.09	M1	**0.1396**	0.1746	**0.1141**	0.1650	**1.4409**	1.8925	-	-
YÜKLÜ	13.09	M2	**0.1754**	0.1865	**0.1533**	0.1625	**1.5568**	1.9684	-	-
YÜKLÜ	13.09	M3	0.1756	**0.1795**	**0.1214**	0.1637	**1.7213**	1.9034	-	-
YÜKLÜ	13.09	Shaft	-	-	-	-	-	-	**0.2082**	0.2872
YÜKLÜ	20.94	M1	**0.2651**	0.3886	**0.1114**	0.1158	**3.2441**	4.4532	-	-
YÜKLÜ	20.94	M2	**0.3154**	0.4512	0.2054	**0.1128**	**3.2905**	4.6697	-	-
YÜKLÜ	20.94	M3	**0.3067**	0.3899	0.1313	**0.0987**	**3.4244**	4.2343	-	-
YÜKLÜ	20.94	Shaft	-	-	-	-	-	-	**0.3684**	0.4264
BOŞTA	5.23	M1	0.1627	**0.0906**	**0.0317**	0.0345	0.6978	**0.6298**	-	-
BOŞTA	5.23	M2	0.1196	**0.1107**	0.0316	**0.0297**	**0.3546**	0.4290	-	-
BOŞTA	5.23	M3	0.1041	**0.0886**	0.0354	**0.0345**	0.2959	**0.2540**	-	-
BOŞTA	5.23	Shaft	-	-	-	-	-	-	**1.6994**	1.8164
BOŞTA	10.47	M1	0.1414	**0.1163**	**0.0261**	0.0337	**1.0048**	1.2265	-	-
BOŞTA	10.47	M2	**0.1179**	0.1609	0.0263	**0.0263**	**0.7452**	1.2649	-	-
BOŞTA	10.47	M3	**0.0942**	0.1113	**0.0335**	0.0343	**0.6664**	0.7949	-	-
BOŞTA	10.47	Shaft	-	-	-	-	-	-	**0.1676**	0.1705
BOŞTA	13.09	M1	0.1705	**0.1291**	**0.0217**	0.0340	**1.1112**	1.5643	-	-
BOŞTA	13.09	M2	**0.1273**	0.1839	**0.0318**	0.0341	**0.9405**	1.7746	-	-
BOŞTA	13.09	M3	**0.1123**	0.1325	**0.0297**	0.0363	**0.9253**	1.1541	-	-
BOŞTA	13.09	Shaft	-	-	-	-	-	-	0.4849	**0.4207**
BOŞTA	20.94	M1	**0.2511**	0.2558	0.0325	**0.0305**	**2.1243**	3.1504	-	-
BOŞTA	20.94	M2	**0.2493**	0.4043	0.0578	**0.0369**	**1.9392**	4.1806	-	-
BOŞTA	20.94	M3	**0.1845**	0.2668	0.0483	**0.0330**	**2.1308**	2.8765	-	-
BOŞTA	20.94	Shaft	-	-	-	-	-	-	0.7119	**0.6592**

Çizelge 4.5. Yüklü ve boşta çalışma koşullarında hız referans sinyali ile simülasyonda tahmin edilen ve gerçek şaft hızı sinyali arasındaki ortalama karesel hata (MSE)

	Çalışma Durumu	Hız (rad/s)	MSE (rad^2/s^2) Multilateral	MSE (rad^2/s^2) Tork-Takipçi
Simülasyon	YÜKLÜ	5.23	**0.00846444**	0.00869849
	YÜKLÜ	10.47	**0.01295026**	0.01324346
	YÜKLÜ	13.09	**0.01525277**	0.01544857
	YÜKLÜ	20.94	0.02070742	**0.0199175**
	BOŞTA	5.23	0.00189983	**0.00162475**
	BOŞTA	10.47	0.00405626	**0.00383208**
	BOŞTA	13.09	**0.00436189**	0.00459664
	BOŞTA	20.94	**0.00694257**	0.00793274
Gerçekleme	YÜKLÜ	5.23	**0.171177**	0.282344
	YÜKLÜ	10.47	**0.208179**	0.287187
	YÜKLÜ	13.09	**0.36843**	0.426387
	YÜKLÜ	20.94	**0.660984**	0.94228
	BOŞTA	5.23	**0.167587**	0.170482
	BOŞTA	10.47	0.484854	**0.420704**
	BOŞTA	13.09	0.71194	**0.659206**
	BOŞTA	20.94	**1.6994**	1.81643

5. SONUÇLAR

Endüstriyel otomasyon sistemlerinde yüksek güç ve hassasiyet gerektiren uygulamalar, çoklu motor sürüş tekniklerinin önemini her geçen gün artırmaktadır. Bu bağlamda tez çalışması, senkronizasyon ve yük paylaşımı problemlerine yenilikçi bir çözüm sunmuş ve rijit bağlı senkron motorlar için dağıtık bir kontrol mimarisi önermiştir. Geliştirilen Multilateral kontrol stratejisinin performansı, literatürde yaygın olarak kullanılan Paralel ve Tork-Takipçi yöntemleriyle karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında, geliştirilen deneysel düzenek üzerinde kapsamlı performans testleri gerçekleştirilmiş ve sistemin davranışı; hızlanma, sabit hız, yavaşlama ve yön değişimi gibi dinamikleri içeren 6 farklı çalışma bölgesi üzerinden detaylı olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde; Paralel kontrol yönteminin rijit bağlı sistemlerde ciddi kısıtlar içerdiği gözlemlenmiştir. Bu yetersizliğin temelinde sadece motor iç parametrelerindeki (direnç, indüktans, manyetik akı) varyasyonlar değil; sürücü devrelerindeki anahtarlama karakteristiği farklılıkları, haberleşme kartlarındaki zamanlama sapmaları ve kablolama empedansları gibi donanımsal asimetrilerin bütünleşik etkisi yatmaktadır. Bu faktörler, ortak hızda dönmeye zorlanan motorlar arasında tork ve akım dengesizliklerine yol açmış; bazı motorlar yükü taşımaya çalışırken diğerlerinin sisteme direnç göstererek birer yük gibi davrandığı tespit edilmiştir. Bu durumun ise motorlarda ısınmaya ve sistem genelinde verimlilik kayıplarına yol açtığı belirlenmiştir.

Tork-Takipçi ve Multilateral yöntemlerin karşılaştırmalı analizinde, 6 farklı bölge için hesaplanan Ortalama Karesel Hata (MSE) kriterleri belirleyici olmuştur. Analiz sonuçları, Tork-Takipçi yapısının İvmelenme rampalarında ve özellikle Motor 1'in akım hatası minimizasyonunda daha başarılı olduğunu göstermiştir. Ancak sistemin kararlılık ve yük tepkisi gerektiren; "Yüksüz Sabit Hız", "Yük Uygulanması", "Yüklü Sabit Hız" ve "Yüklü Düşük Sabit Hız" bölgelerinde önerilen Multilateral kontrol stratejisinin hız hatalarını belirgin şekilde düşürdüğü tespit edilmiştir. Akım hatası performansları incelendiğinde ise iki yöntemin birbirine oldukça yakın değerler ürettiği görülmüş; bu durum, Multilateral yapının akım dengesinden ödün vermeden, operasyonun genelini kapsayan bu kritik bölgelerde daha hassas bir hız ve senkronizasyon kontrolü sağladığını ortaya koymuştur.

Deneysel olarak elde edilen bu bulguları teorik bir zemine oturtmak amacıyla, Sistem Tanımlama yöntemi kullanılarak sistemin matematiksel modeli oluşturulmuş ve simülasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Modelleme adımının deneysel kurulumdan sonra gerçekleştirilmesinin nedeni, model için gerekli verinin ancak test edilmiş ve çalışan kontrol algoritmaları üzerinden toplanabilmesidir. Simülasyonun ardından gerçekleştirilen simülasyon verileriyle gerçek veriler karşılaştırılmıştır. Bu doğrulama testlerinde de benzer bir trend gözlemlenmiştir. Simülasyon çıkışı olan hız takip performansının değerlendirildiği Ortalama Karesel Hata (MSE) analizleri, önerilen Multilateral Kontrol yapısının özellikle yüklü çalışma koşullarında Tork-Takipçi yöntemine kıyasla daha düşük hata değerleri ürettiğini göstermiştir. Hem simülasyon hem de deneysel uygulama sonuçları, sistem yük altına girdiğinde Multilateral yapının referans hızı takip etmede daha kararlı ve başarılı olduğunu doğrulamaktadır. Boşta çalışma durumlarında yöntemler birbirine yakın performanslar sergilese de yük altındaki belirgin üstünlüğü nedeniyle Multilateral yapının hız hatasını minimize etmede daha etkin

olduğu tespit edilmiştir.

Karşılaştırmalı performans sonuçlarının haricinde, önerilen mimarinin yapısal avantajlarını da vurgulamak önemlidir. Geliştirilen mimari, ortak bir mekanik yük üzerinde çalışılmasına rağmen motorların fiziksel olarak yan yana konumlandırılması zorunluluğunu ortadan kaldırmaktadır. Bu sayede sistem; uzun konveyör hatları, modüler üretim bantları veya koordineli kaldırma platformları gibi motorların mekanik olarak dağıtıldığı farklı topolojilere kolaylıkla uyarlanabilir. Sistemin benimsediği tamamen dağıtılmış donanım tasarımı ve CAN-BUS haberleşme altyapısı, her motorun kendi sürücü ve kontrol ünitesine sahip olduğu ölçeklenebilir bir yapı sunar. Bu merkezi olmayan yaklaşım, ana işlem yükünü azaltarak ve kablolama karmaşasını engelleyerek; sistemin geri kalanını etkilemeden bağımsız bakım, test ve parça değişimi imkânı sağlar. Mevcut kontrol altyapısı bozulmadan sisteme yeni motor bloklarının eklenmesi de bu yapı sayesinde mümkündür.

Sonuç olarak, bu tez çalışması ile ortaya konulan dağıtılmış kontrol mimarisi ve Multilateral kontrol stratejisi; çoklu motor sistemlerinde karşılaşılan senkronizasyon ve yük paylaşımı problemlerine karşı gürbüz, esnek ve yüksek performanslı bir çözüm getirmiştir. Simülasyon analizleriyle teorik tutarlılığını, deneysel testlerle ise pratik uygulanabilirliğini kanıtlayan bu yöntem hem teorik altyapısı hem de kanıtlanmış deneysel başarımı ile endüstriyel uygulamalarda verimliliği artırma potansiyeline sahip olup, bu alanda yapılacak gelecek akademik çalışmalara güçlü bir zemin oluşturacak niteliktedir.

6. KAYNAKLAR

Abouseda, A. I., Doruk, R., Emin, A., Akdeniz, O. 2025. "Modeling, Dynamic Characterization, and Performance Analysis of a 2.2 kW BLDC Motor Under Fixed Load Torque Levels and Variable Speed Inputs: An Experimental Study". Actuators, *14*(8), 400.

Araydah, W., Tutunji, T. A., Al-Naimi, I. 2017. "System identification for a liquid flow process". İçinde *2017 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT)* (ss. 1-6).

Arifin, B., Nugroho, A. A., Suprapto, B., Prasetyowati, S. A. D., Nawawi, Z. 2021. "Review of Method for System Identification on Motors". İçinde *2021 8th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)* (ss. 257-262).

Ba, X., Gong, Z., Guo, Y., Zhang, C., Zhu, J. 2022. "Development of Equivalent Circuit Models of Permanent Magnet Synchronous Motors Considering Core Loss". Energies, *15*(6), 1995.

Burkhard Alpers. 2021. "On Fast Jerk–, Acceleration– and Velocity–Restricted Motion Functions for Online Trajectory Generation". Robotics, *10*(1), 25.

Calleja, C., Heredia, A., Gaztañaga, H., Aldasoro, L., Nieva, T. 2016. "Validation of a Modified Direct-Self-Control Strategy for PMSM in Railway-Traction Applications". IEEE Transactions on Industrial Electronics, *63*, 5143-5155.

Carter, S. B. R., Praveen, P., Varadhan, N. S. V., Kowshik, S., Gopinath, G., G, J. 2023. "Field-Oriented Control (FOC) for Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM) In Electric Vehicle". 2023 International Conference on Next Generation Electronics (NEleX), 1-5.

Chen, C.-S., Chen, L.-Y. 2012. "Robust Cross-Coupling Synchronous Control by Shaping Position Commands in Multiaxes System". IEEE Transactions on Industrial Electronics, *59*(12), 4761-4773.

Chen, J., Huang, S. 2023. "Analysis and Comparison of UART, SPI and I2C". İçinde *2023 IEEE 2nd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA)* (ss. 272-276).

Chen, Z., Pan, Y., Gu, J. 2016. "Integrated adaptive robust control for multilateral teleoperation systems under arbitrary time delays". International Journal of Robust and Nonlinear Control, *26*, 2708-2728.

Cordeiro, A., Manuel, J. F. M., Pires, V. F. 2020. "Performance of synchronized master-slave closed-loop control of AC electric drives using real time motion over ethernet (RTMoE)". Mechatronics, *69*, 102400.

Dai, J., He, T., Li, M., Long, X. 2021. "Performance study of multi-source driving yaw system for aiding yaw control of wind turbines". Renewable Energy, *163*, 154-171.

Dambrauskas, K., Vanagas, J., Zimnickas, T., Kalvaitis, A., Ažubalis, M. 2020. "A Method for Efficiency Determination of Permanent Magnet Synchronous Motor". Energies.

Fan, B., Zhou, H., Zhao, Y., Wang, J., Sun, L. 2025. "Synchronization and tracking control method for multi-motor driving systems based on states mean deviation coupling". Nonlinear Dynamics.

Fang, S., Cao, J., Zhang, Z., Zhang, Q., Cheng, W.-D. 2020. "Study on High-Speed and Smooth Transfer of Robot Motion Trajectory Based on Modified S-Shaped Acceleration/Deceleration Algorithm". IEEE Access, *8*, 199747-199758.

Ferrell, W. R., Sheridan, T. B. 1967. "Supervisory control of remote manipulation". IEEE Spectrum, *4*(10), 81-88.

Gong, C., Li, Y. R., Zargari, N. R. 2024. "An Overview of Advancements in Multimotor Drives: Structural Diversity, Advanced Control, Specific Technical Challenges, and Solutions". Proceedings of the IEEE, *112*(3), 184-209.

Gou, M., Wang, B., Zhang, X. 2024. "Development of Multi-Motor Servo Control System Based on Heterogeneous Embedded Platforms". Electronics, *13*(15).

He, C., Wu, T. 2019. "Analysis and design of surface permanent magnet synchronous motor and generator". CES Transactions on Electrical Machines and Systems.

Holliday, M., Manchester, Z., Senesky, D. G. 2022. "On-Orbit Implementation of Discrete Isolation Schemes for Improved Reliability of Serial Communication Buses". IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, *58*(4), 2973-2982.

Huang, Z., Li, Y., Song, G., Zhang, X., Zhang, Z. 2019. "Speed and Phase Adjacent Cross-Coupling Synchronous Control of Multi-Exciters in Vibration System Considering Material Influence". IEEE Access, *7*, 63204-63216.

Isermann, R., Münchhof, M. 2011. "*Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications*". Springer Berlin Heidelberg. Geliş tarihi gönderen https://books.google.com.tr/books?id=uRN4oAEACAAJ

Ismail, K., Suwarno, Rachmildha, T. D., Rijanto, E., Haroen, Y. 2023. "System Identification of a Roller Rig with Factory Default PMSM Drives for Speed Controller Tuning in Speed Synchronized Tractions of an Electric Train Simulator". İçinde *2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)* (ss. 550-554).

Jiang, C., Fan, B., Hong, Q., Dong, J., Sun, L. 2025. "Synchronization and coordination control based on enhanced deviation coupling for multi-motor rigid connection systems". Engineering Research Express, *7*(1), 015340.

Katsura, S., Matsumoto, Y., K. Ohnishi. 2004. "Realization of “law of action and reaction” by multilateral control". İçinde *The 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 2004. AMC ’04.* (ss. 469-474).

Katsura, S., Suzuyama, T., Ohishi, K. 2007. "A Realization of Multilateral Force Feedback Control for Cooperative Motion". IEEE Transactions on Industrial Electronics, *54*(6), 3298-3306.

Kebude, D., Morimitsu, H., Katsura, S., Sabanovic, A. 2014. "Multilateral control-based motion copying system for haptic training". İçinde *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)* (ss. 2250-2255).

Khan, M. A., Baig, D.-Z., Ali, H., Albogamy, F. R. 2025. "Optimized System Identification (SI) of Brushless DC (BLDC) motor using Data-Driven Modeling Methods". Scientific Reports, *15*(1), 8497.

Kitamura, K., Yashiro, D., Ohnishi, K. 2009. "Estimation and share of environmental impedance using multiple robots for haptic broadcasting". İçinde *2009 IEEE International Conference on Industrial Technology* (ss. 1-6).

Kombarov, V., Sorokin, V., Fojtů, O., Aksonov, Ye., Kryzhyvets, Ye. 2019. "S-CURVE ALGORITHM OF ACCELERATION/DECELERATION WITH SMOOTHLY-LIMITED JERK IN HIGH-SPEED EQUIPMENT CONTROL TASKS". MM Science Journal.

Kong, X., Chen, X., Dou, J., Zhang, X., Wen, B. 2016. "Controlled Synchronization of Two Nonidentical Homodromy Coupling Exciters Driven by Inductor Motors in a Vibratory System". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science, *230*(17), 3040-3054.

Kosuge, K., Ishikawa, J., Furuta, K., Sakai, M. 1990. "Control of single-master multi-slave manipulator system using VIM". İçinde *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation* (ss. 1172-1177 c.2).

Kovalchuk, M. S., Baburin, S. V. 2018. "Modelling and control system of multi motor conveyor". IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, *327*(2), 022065.

Kuruppu, S. S. 2021. "Open-Loop Self-Calibration of Position Sensor Offset in SM-PMSM Drive Systems". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, *70*, 1-7.

Kwon, K., Kim, D.-M., Cha, K.-S., Jo, J., Lim, M., Min, S. 2025. "Multiobjective Optimization of Two-Motor and Two-Speed System for Electric Vehicles Considering Motor Characteristics". IEEE Transactions on Transportation Electrification, *11*, 2076-2087.

Kwon, O.-S., Choe, S.-H., Heo, H. 2011. "A study on the dual-servo system using improved cross-coupling control method". İçinde *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering* (ss. 1-4).

Lee, H.-J., Oh, K.-K. 2017. "Comparison study of parallel operation of motor drives". İçinde *2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)* (ss. 123-128).

Lee, H.-W., Nam, G.-J., Lee, K.-B. 2025. "Simple Speed Control Strategy for a Mono-Inverter Dual Parallel Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System". IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, *13*, 2580-2589.

Li, C., Wang, C., Pan, J., Niu, S., Fu, P., He, L. 2019. "Improved Relative Coupling Control with Second-Order Consensus Compensation for Multi-PMSMs". İçinde *2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* (ss. 1-6).

Li, K., Luo, H., Yang, C., Yin, S. 2020. "Subspace-Aided Closed-Loop System Identification With Application to DC Motor System". IEEE Transactions on Industrial Electronics, *67*(3), 2304-2313.

Li, W., Zhu, X., Ju, J.-Y. 2018. "Hierarchical Braking Torque Control of In-Wheel-Motor-Driven Electric Vehicles Over CAN". IEEE Access, *6*, 65189-65198.

Ling-zhi, C., Chun-wen, L., Hua-ying, C., Guang-zhao, C. 2008. "Backstepping control of position synchronization system in crane lifter". İçinde *2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics* (ss. 2282-2285).

Liu, T., Chen, C., Ye, B., Chen, Y. 2021. "Comparative study of the synchronous control for rigidly coupled electro-motors". Journal of Physics: Conference Series, *1983*(1), 012065.

Ljung, L. 1988. "System Identification Toolbox : For use with MATLAB". Geliş tarihi gönderen https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-100570

Losada, D., Fernández, J., Domonte, E., Sanz, R. 2017. "Distributed and Modular CAN-Based Architecture for Hardware Control and Sensor Data Integration". Sensors (Basel, Switzerland), *17*.

Mercorelli, P. 2023. "Control of Permanent Magnet Synchronous Motors for Track Applications". Electronics.

Mishra, A. K., Gangwal, A., Singh, R., Trivedi, R., Rajpurohit, B. S., Kumar, R. 2017. "Design and comparison analysis of speed controllers for PMSM". İçinde *TENCON 2017 - 2017 IEEE Region 10 Conference* (ss. 1772-1777).

Mitrovic, N., Kostić, V., Petronijevic, M., Jeftenic, B. 2009. "Multi-Motor Drives for Crane Application". Advances in Electrical and Computer Engineering, *9*.

Mohanraj, D., Gopalakrishnan, J., Chokkalingam, B., Mihet-Popa, L. 2022. "Critical Aspects of Electric Motor Drive Controllers and Mitigation of Torque Ripple—Review". IEEE Access, *10*, 73635-73674.

Naung, Y., Schagin, A., Oo, H. L., Ye, K. Z., Khaing, Z. M. 2018. "Implementation of data driven control system of DC motor by using system identification process". İçinde *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)* (ss. 1801-1804).

Nippatla, V. R., Mandava, S. 2025. "Performance analysis of permanent magnet synchronous motor based on transfer function model using PID controller tuned by Ziegler-Nichols method". Results in Engineering, *26*, 105460.

Niu, F., Sun, K., Huang, S., Hu, Y., Liang, D., Fang, Y. 2023. "A Review on Multimotor Synchronous Control Methods". IEEE Transactions on Transportation Electrification, *9*(1), 22-33.

O'Rourke, C. J., Qasim, M. M., Overlin, M. R., Kirtley, J. L. 2019. "A Geometric Interpretation of Reference Frames and Transformations: dq0, Clarke, and Park". IEEE Transactions on Energy Conversion, *34*(4), 2070-2083.

Park, J.-H., Jeong, Y.-H., Hong, D.-K. 2024. "Design and Comprehensive Multiphysics Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor for Podded Propulsion in

Marine Applications". IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, *5*, 1011-1028.

Peng, Y., Chen, F., Chen, F., Wu, C., Wang, Q., He, Z., Lu, S. 2024. "Energy-Efficient Train Control: A Comparative Study Based on Permanent Magnet Synchronous Motor and Induction Motor". IEEE Transactions on Vehicular Technology, *73*, 16148-16159.

Perez-Pinal, C. Nunez, R. Alvarez, I. Cervantes. 2004. "Comparison of multi-motor synchronization techniques". İçinde *30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004* (C. 2, ss. 1670-1675 Vol. 2).

Perez-Pinal, F. J., Calderon, G., Araujo-Vargas, I. 2003. "Relative coupling strategy". İçinde *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03.* (C. 2, ss. 1162-1166 c.2).

Popescu, L., Dumitran, L., Stănescu, A. 2021. "Multi-motor solutions for electric vehicles". 2021 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), 1-6.

Rafaq, M. S., Jung, J.-W. 2020. "A Comprehensive Review of State-of-the-Art Parameter Estimation Techniques for Permanent Magnet Synchronous Motors in Wide Speed Range". IEEE Transactions on Industrial Informatics, *16*(7), 4747-4758.

Rahman, N. N. A., Yahya, N. M. 2022. "System Identification for a Mathematical Model of DC Motor System". İçinde *2022 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)* (ss. 30-35).

Rajesh, G., Sebasthirani, K. 2025. "Modeling and Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based Electric Vehicle". Advances in Mechanical Engineering, *17*.

Sakunthala, S., Kiranmayi, R., Mandadi, P. 2017. "A study on industrial motor drives: Comparison and applications of PMSM and BLDC motor drives". 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS), 537-540.

Shahbazi, M., Atashzar, S. F., Patel, R. V. 2018. "A Systematic Review of Multilateral Teleoperation Systems". IEEE Transactions on Haptics, *11*(3), 338-356.

Simpkins, A. 2012. "System Identification: Theory for the User, 2nd Edition (Ljung, L.; 1999) [On the Shelf]". IEEE Robotics & Automation Magazine, *19*(2), 95-96.

Sun, D., Mills, J. K. 2002. "Adaptive synchronized control for coordination of multirobot assembly tasks". IEEE Transactions on Robotics and Automation, *18*(4), 498-510.

Sun, G., Mao, Y., Li, X., Ni, Y. 2020. "Dual-motor Master-slave Cross-coupling Synchronization Control of Winch Considering Parameters Variations". İçinde *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (ss. 199-204).

Suzuyama, T., Katsura, S., Ohishi, K. 2006. "Decoupled haptic transmission by multilateral control". İçinde *9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 2006.* (ss. 334-339).

Ting, Z., Hong, L., Wei, F., He, L., Qi, L., Yifan, X. 2017. "Research on dual drive synchronization performance based on virtual shaft control strategy". İçinde *2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE)* (ss. 254-258).

Torrent, M., Perat, J. I., Jiménez, J. A. 2018. "Permanent Magnet Synchronous Motor with Different Rotor Structures for Traction Motor in High Speed Trains". Energies, *11*(6), 1549.

Tutunji, T. A., Saleem, A. 2018. "Weighted parametric model identification of induction motors with variable loads using FNN structure and NN2TF algorithm". Transactions of the Institute of Measurement and Control, *40*(5), 1645-1658.

Ullah, K., Guzinski, J., Mirza, A. 2022. "Critical Review on Robust Speed Control Techniques for Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) Speed Regulation". Energies.

Vas, P. 1990. "Vector control of AC machines". Geliş tarihi gönderen https://consensus.app/papers/vector-control-of-ac-machines-vas/bb51a6419a4a5408a887cffb79e03956/

Vas, Peter. 1998. "*Sensorless vector and direct torque control*". Oxford university press.

Wang, S.-C., Nien, Y.-C., Huang, S.-M. 2022. "Multi-Objective Optimization Design and Analysis of V-Shape Permanent Magnet Synchronous Motor". Energies.

Wei, J., Sun, Q., Sun, W., Ding, X., Tu, W., Wang, Q. 2013. "Load-sharing characteristic of multiple pinions driving in tunneling boring machine". Chinese Journal of Mechanical Engineering, *26*(3), 532-540.

Wu, G., Zhang, N. 2023. "Kinematically Constrained Jerk–Continuous S-Curve Trajectory Planning in Joint Space for Industrial Robots". Electronics.

Wu, Y., Cheng, Y., Wang, Y. 2020. "Research on a Multi-Motor Coordinated Control Strategy Based on Fuzzy Ring Network Control". Ieee Access, *8*, 39375-39388.

Yang, G., Wang, W., Yan, J., Zhi, P., Ge, H., Zhu, Z. 2021. "Improved Multi-Motor Synchronization Control of Underwater Robot Based on Virtual Shaft". İçinde *2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC)* (ss. 4652-4657).

Yu, W., Liang, H., Dong, X., Luo, Y. 2020. "Modeling and Identification of Permanent Magnet Synchronous Motor via Deterministic Learning". IEEE Access, *8*, 168516-168525.

Zhai, D., Xia, Y. 2018. "Multilateral Telecoordinated Control of Multiple Robots With Uncertain Kinematics". IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, *29*, 2808-2822.

Zhang, K., Wang, L., Fang, X. 2021. "Feedback Linearization Adaptive Dynamic Sliding Mode Control of Linear Synchronous Motor for CNC Machine Tools". Journal of Electrical Engineering & Technology, *17*, 1309-1317.

Zhang, X., Hu, H., Wang, H., Wang, Z. 2024. "Overview of position synchronous control technology for multi-motor system". Systems Science & Control Engineering, *12*(1), 2427074.

Zhao, D., Li, C., Ren, J. 2009. "Speed synchronization of multiple induction motors with adjacent cross coupling control". İçinde *Proceedings of the 48h IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference* (ss. 6805-6810).

Zhao, M., Wang, Q., Wang, Y., Dong, Q. 2022. "Multi-Motor Cooperative Control Strategy for Speed Synchronous Control of Construction Platform". Electronics, *11*(24), 4162.

ÖZGEÇMİŞ

Selma Nilay ŞAVKLIYILDIZ

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora 2019 - 2026	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans 2016 - 2019	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2012-2015	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir
Lisans 2010-2012	Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gaziantep

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Uzman Arge Mühendisi 2018-2025	Desird Tasarım Arge Anonim Lti.

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

Şavklıyıldız N, Polat Ö (2025), Implementation and Comparison of Multi-motor Synchronization Control Strategies with a Distributed Topology. International Journal of Engineering and Applied Sciences 17 4 197–212. https://dx.doi.org/10.24107/ijeas.1774094

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1- Şavklıyıldız N., İrim Y. (2023), "Effect of vector control algorithms on different motor types". The 6th Mediterranean International Conference of Pure & Applied Mathematics and Related Areas (MICOPAM 2023), Paris, Fransa, 23 - 27 Ağustos 2023

2- Tabanli N., User Y., (2017), "Development of induction motor torque control algorithm for electric vehicles on inclined roads", SIELMEN International Conference, IEEE, Kasım