



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



DOKTORA TEZİ

**MEKANİK SİSTEMLERİN YÜKSEK DERECELİ KAYAN
KİPLİ KONTROLÜ**

Hasan Ömür ÖZER

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Nurkan YAĞIZ

II. Danışman

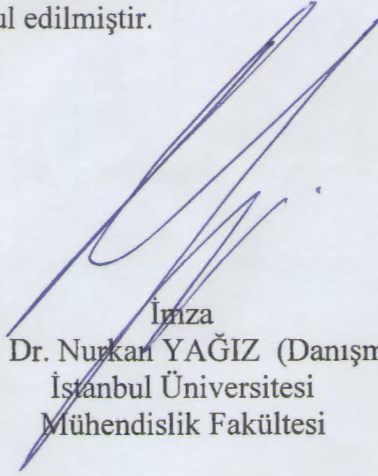
Yrd. Doç. Dr. Yüksel HACIOĞLU

Haziran, 2016

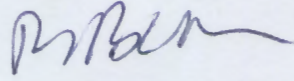
İSTANBUL

Bu çalışma 30/06/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

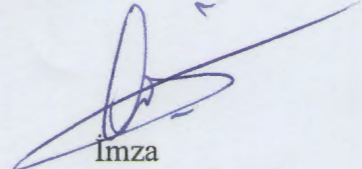
Tez Jürisi:



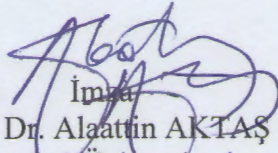
İmza
Prof. Dr. Nurkan YAĞIZ (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



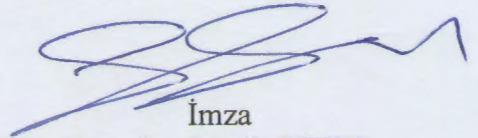
İmza
Prof. Dr. Recep BURKAN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



İmza
Prof. Dr. Rahmi GÜÇLÜ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Makine Fakültesi



İmza
Prof. Dr. Alaattin AKTAŞ
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



İmza
Doç. Dr. Semih SEZER
Yıldız Teknik Üniversitesi
Makine Fakültesi

ÖNSÖZ

Öncelikle, tez çalışmalarım sırasında her türlü desteklerinden dolayı değerli hocalarım Prof. Dr. Nurkan YAĞIZ ve Yrd.Doç. Dr. Yüksel HACIOĞLU'na en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu tezi hazırlarken desteklerinden dolayı her zaman yanımda hissettiğim eşim Ebru TANSEL ÖZER ve kızım Mira ÖZER'e teşekkürleri bir borç bilirim.

Haziran, 2016

Hasan Ömür ÖZER



İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
TABLO LİSTESİ.....	vii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	viii
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	3
3. MALZEME VE YÖNTEM	9
3.1. KARARLILIK ANALİZLERİ.....	9
3.1.1. Lyapunov'un Birinci Yöntemi	9
3.1.2. Lyapunov'un İkinci Yöntemi.....	10
3.2. İDEAL VE GERÇEK KAYMA VE ÇATIRTI	11
3.3. KAYAN KİPLİ KONTROL	12
3.3.1. Birinci Derece (Klasik) Kayan Kipli Kontrol	13
3.4. YÜKSEK DERECELİ KAYAN KİPLİ KONTROL (YDKKK)	15
3.4.1. 2-Kayma Modu Dinamikleri.....	18
3.4.2. Super-Twisting Algoritması (STA)	19
3.5. SUPER-TWISTING YÜKSEK DERECELİ KAYAN KİPLİ KONTROL ALGORİTMASIYLA İLGİLİ KARARLILIK ANALİZİ	19
3.6. SUPER-TWISTING YÜKSEK DERECELİ KAYAN KİPLİ KONTROL ALGORİTMASINDA KESTİRİMLİ EŞDEĞER KONTROL KUVVETİ KULLANIMI İLE İLGİLİ KARARLILIK ANALİZİ	22
3.7. TEZDE KULLANILAN MEKANİK SİSTEMLERİN FİZİKSEL VE MATEMATİKSEL MODELLERİ	25
3.7.1. Çeyrek Taşıt Modeli.....	25
3.7.2. Deneysel Çeyrek Taşıt Modeli (Quanser).....	27
3.7.3. Çift rotorlu sistem modeli	30
3.7.4. Deneysel Çift Rotorlu Sistem Modeli (Quanser).....	32
3.8. SUPER-TWISTING ALGORİTMASI (STA) KAZANÇ KATSAYILARIN GENETİK ALGORİTMA YARDIMIYLA TESPİTİ	34

3.8.1. Taşıt modeli için kazanç fonksiyonları	36
3.8.2. Çift rotorlu sistem modeli için kazanç fonksiyonları.....	37
3.9. KAYMA YÜZEYİ EĞİM PARAMETRELERİNİN BULANIK MANTIK YARDIMIYLA TESPİTİ	39
4. BULGULAR.....	44
4.1. AKTİF SÜSPANSİYONLU ÇEYREK TAŞIT MODELİNİN KONTROLÜ ...	44
4.1.1. KKK ve YDKKK Tasarımları	44
4.1.2. Bilgisayar Benzetimi ve Deneysel Sonuçlar	47
4.2. ÇİFT ROTOR SİSTEMİNİN KONTROLÜ	57
4.2.1. KKK ve YDKKK Tasarımları	57
4.2.2. Bilgisayar Benzetimi ve Deneysel Sonuçlar	61
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	83
KAYNAKLAR	86
ÖZGEÇMİŞ	93

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1: Kararlılık tanımlamaları [21]	10
Şekil 3.2: Kayma yüzeyi modeli [21]	13
Şekil 3.3: Kayma yüzeyinin zamana göre türevlerinin gösterimi.....	17
Şekil 3.4: Çeyrek taşıt aktif süspansiyon modeli.....	26
Şekil 3.5: Deneysel çeyrek taşıt fiziksel modeli.....	28
Şekil 3.6: Deneysel çeyrek taşıt sistemi	29
Şekil 3.7: Çift rotorlu sistem fiziksel modeli.....	30
Şekil 3.8: Konum vektörlerinin gösterimi	31
Şekil 3.9: Deneysel çift rotorlu sistem.....	33
Şekil 3.10: Genetik algoritmanın akış şeması [88].....	36
Şekil 3.11: Çok Amaçlı Genetik Algoritma kullanılan taşıt modeli kontrolcü sisteminin akış şeması	37
Şekil 3.12: Çok Amaçlı Genetik Algoritma kullanılan çift rotorlu sistem modeli kontrolcü sisteminin akış şeması	39
Şekil 3.13: Bulanık mantık akış şeması.....	40
Şekil 3.14: Bulanık mantık için üyelik fonksiyonları.....	41
Şekil 4.1: Yol girişi (bilgisayar benzetimi)	47
Şekil 4.2: Çeyrek taşıt modeli bilgisayar benzetim sonuçları (bozucu etki yok)	48
Şekil 4.3: Çeyrek taşıt modeli bilgisayar benzetimi performans kriterleri (bozucu etki yok).....	49
Şekil 4.4 : Çeyrek taşıt modeli bozucu etki (genlik 1 N, frekans 1 Hz)	49
Şekil 4.5 : Çeyrek taşıt modeli bilgisayar benzetim sonuçları (bozucu etki var)	50
Şekil 4.6 : Çeyrek taşıt modeli bilgisayar benzetimi performans kriterleri (bozucu etki var).....	51
Şekil 4.7 : Yol girişi (deneysel sistem).....	52
Şekil 4.8: Deneysel çeyrek taşıt modeli deney sonuçları (bozucu etki yok)	53
Şekil 4.9: Deneysel çeyrek taşıt modeli performans kriterleri (bozucu etki yok)	54
Şekil 4.10: Deneysel çeyrek taşıt modeli deney sonuçları (bozucu etki var)	55

Şekil 4.11: Deneysel çeyrek taşıt modeli performans kriterleri (bozucu etki var).....	56
Şekil 4.12: Çift rotorlu sistem modeli bilgisayar benzetimi sonuçları (bozucu etki yok)	61
Şekil 4.13: Çift rotorlu sistem modeli bilgisayar benzetimi performans kriterleri (bozucu etki yok).....	62
Şekil 4.14: Bulanık mantıkla bulunan kayma yüzeyi katsayılarının değişimi (bozucu etki yok)	63
Şekil 4.15: Çift rotorlu sistem modeli bulanık mantık eklenmiş bilgisayar benzetimi sonuçları (bozucu etki yok) a) yunuslama hareketi açısai değişim b) uygulanan yunuslama momenti c) sapma hareketi açısai değişim d) uygulanan sapma momenti	65
Şekil 4.16: Çift rotorlu sistem modeli bulanık mantık eklenmiş bilgisayar benzetimi performans kriterleri (bozucu etki yok).....	65
Şekil 4.17 : Çift rotorlu sisteme yunuslama ekseninde (θ) ve sapma ekseninde (ψ) verilen bozucu etkiler	66
Şekil 4.18: Çift rotorlu sistem modeli bilgisayar benzetimi sonuçları (bozucu etki var)	67
Şekil 4.19: Çift rotorlu sistem modeli bilgisayar benzetimi performans kriterleri (bozucu etki var).....	67
Şekil 4.20: Bulanık mantıkla bulunan kayma yüzeyi katsayılarının değişimi (bozucu etki var)	69
Şekil 4.21: Çift rotorlu sistem modeli bulanık mantık eklenmiş bilgisayar benzetimi sonuçları (bozucu etki var) a) yunuslama hareketi açısai değişim b) uygulanan yunuslama momenti c) sapma hareketi açısai değişim d) uygulanan sapma momenti	71
Şekil 4.22: Çift rotorlu sistem modeli bulanık mantık eklenmiş bilgisayar benzetimi performans kriterleri (bozucu etki var).....	71
Şekil 4.23: Deneysel çift rotorlu sistem modeli deney sonuçları (bozucu etki yok)	73
Şekil 4.24: Deneysel çift rotorlu sistem modeli performans kriterleri (bozucu etki yok)	73
Şekil 4.25: Bulanık mantıkla bulunan kayma yüzeyi katsayılarının deneysel değişimi (bozucu etki yok).....	74
Şekil 4.26: Deneysel çift rotorlu sistem modeli bulanık mantık eklenmiş deney sonuçları (bozucu etki yok) a) yunuslama hareketi açısai değişim b) uygulanan yunuslama momenti c) sapma hareketi açısai değişim d) uygulanan sapma momenti	76
Şekil 4.27: Deneysel çift rotorlu sistem modeli bulanık mantık eklenmiş performans kriterleri (bozucu etki yok).....	77
Şekil 4.28: Deneysel çift rotorlu sistem modeli deney sonuçları (bozucu etki var)	77
Şekil 4.29: Deneysel çift rotorlu sistem modeli performans kriterleri (bozucu etki var)	78
Şekil 4.30: Bulanık mantıkla bulunan kayma yüzeyi katsayılarının deneysel değişimi (bozucu etki var).....	79

- Şekil 4.31:** Deneysel çift rotorlu sistem modeli bulanık mantık eklenmiş deney sonuçları (bozucu etki var) a) yunuslama hareketi açısal değişim b) uygulanan yunuslama momenti c) sapma hareketi açısal değişim d) uygulanan sapma momenti.....81
- Şekil 4.32:** Deneysel çift rotorlu sistem modeli bulanık mantık eklenmiş performans kriterleri (bozucu etki var).....81



TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 3.1: Deneysel çeyrek taşıt sistem parametreleri.....	29
Tablo 3.2: Deneysel çift rotorlu sistem parametreleri.....	33
Tablo 3.3: Deneysel çift rotorlu sistem elektriksel parametreler	34
Tablo 3.4: Bulanık mantık kural tablosu [89]	42
Tablo 3.5: Bulanık mantık ölçekleme faktörlerinin değerleri	43
Tablo 4.1: Taşıt modeli KKK katsayıları için Çok Amaçlı Genetik Algoritma taraması sonuçları.....	46
Tablo 4.2: Taşıt modeli YDKKK katsayıları için Çok Amaçlı Genetik Algoritma taraması sonuçları.....	46
Tablo 4.3: Kontrolcü parametreleri.....	46
Tablo 4.4: Çeyrek taşıt modeli bilgisayar benzetimi sonuçları	51
Tablo 4.5: Çeyrek taşıt modeli deneysel sonuçlar	56
Tablo 4.6: Çift rotorlu sistem modeli KKK katsayıları için Çok Amaçlı Genetik Algoritma taraması sonuçları	58
Tablo 4.7: Çift rotorlu sistem modeli YDKKK katsayıları için Çok Amaçlı Genetik Algoritma taraması sonuçları	59
Tablo 4.8: Çift rotorlu sistem modeli kontrolcü parametreleri	59
Tablo 4.9: Çift rotorlu sistem modeli kontrolcü parametreleri	60
Tablo 4.10: Çift rotorlu sistem modeli bilgisayar benzetimi sonuçları.....	72
Tablo 4.11: Çift rotorlu sistem modeli deneysel sonuçlar	82

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
m_i	: Kütle
k_i	: Yay rijitliği
b_i	: Sönüm katsayısı
t	: Zaman
Δt	: Zaman aralığı
y_i	: Doğrusal yer değiştirme değişkenleri
y_{ir}	: Referans değişkenleri
θ, ψ	: Açısal yer değiştirme değişkenleri
d	: Bozucu etki
Δ	: Bozucu etki genliği
σ	: Kayma yüzeyi
a	: Kayma yüzeyi sabiti
$\phi(x)$: Kayma yüzeyi türevi tanımlama fonksiyonu
V	: Lyapunov fonksiyonu
$[\xi]$: Lyapunov fonksiyonu ξ vektörü
$[P]$: Lyapunov fonksiyonu P matrisi
$[\tilde{Q}]$: Lyapunov fonksiyonu Q matrisi
\in	: Elamanıdır
$ \cdot $: Mutlak değer
$\ \cdot\ $: Vektör normu
u	: Kontrol sinyali
u_{dc}	: Süreksiz kontrol sinyali
u_{eq}	: Eşdeğer kontrol sinyali
\hat{u}_{eq}	: Kestirimli eşdeğer kontrol sinyali
v	: Super twisting algortiması kontrolcü bileşeni
ψ_i, β_i	: Kazanç fonksiyonları
k	: Kayan kipli kontrolcü katsayısı
k_1, k_2	: Yüksek dereceli kayan kipli kontrolcü katsayıları
τ, ε	: Alçak geçirgen filtre köşe frekansları
μ_i	: Bulanık mantık üyelik fonksiyonu
$sign(\cdot)$: Signum fonksiyonu

Kısaltmalar

KKK : Kayan kipli kontrol

YDKKK	: Yüksek dereceli kayan kipli kontrol
ÇOGA	: Çok amaçlı genetik algoritma
BMK	: Bulanık mantıklı kontrol
SKG	: Sürüş konforu göstergesi
YTG	: Yul tutuşu göstergesi
KÇG	: Kontrol çabası göstergesi
ÇG	: Çatırtı göstergesi
ITAE	: Hatanın mutlak değeri integral göstergesi



ÖZET

DOKTORA TEZİ

MEKANİK SİSTEMLERİN YÜKSEK DERECELİ KAYAN KIPLI KONTROLÜ

Hasan Ömür ÖZER

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği ABD

Danışman: Prof. Dr. Nurkan YAĞIZ

II. Danışman: Yrd. Doç. Dr. Yüksel HACIOĞLU

Bu tez çalışmasında yeni bir yüksek dereceli kayan kipli kontrolcü geliştirilerek çeşitli mekanik sistemler üzerindeki performansı incelenmiş ve mekanik sistemler için zararlı sonuçlar oluşturabilecek çadırı etkisinin üstesinden gelinmesi sağlanmıştır. Tasarlanan yüksek dereceli kayan kipli kontrolcünün kararlılığı Lyapunov kararlılık analizi metodu kullanılarak ispatlanmıştır. Geliştirilen kontrolcünün kazanç katsayıları, literatürde kabul gören birden fazla kısıt fonksiyonuna göre optimizasyon yapan genetik algoritma tekniğiyle bulunmuştur. Önerilen kontrolcünün performansı, benzetim programı yardımıyla literatürdeki klasik kayan kipli kontrolcü metoduyla kıyaslanmıştır. Tasarlanan yüksek dereceli kayan kipli kontrolcünün uygulamadaki performansını sınamak amacıyla laboratuvar ortamında aktif süspansiyonlu çeyrek taşıt sistemi ve çift rotorlu dinamik sistem üzerinde gerçek zamanlı kontrol deneyleri yapılmıştır. Benzetim programı yardımıyla elde edilen kontrolcünün performansı, gerçek zamanlı deney modeli üzerinde yapılan deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Elde edilen gerçek zamanlı laboratuvar verileri tasarlanan kontrolcünün performansını doğrulamıştır.

Sonuç olarak, tasarlanan yüksek dereceli kestirimli kayan kipli kontrol metodu literatürde sıklıkla kullanılan klasik kayan kipli kontrol metoduna göre kontrol performansı ve çadırının bastırılması açısından üstünlük sağladığı benzetimlerle (simülasyonlarla) ve deneylerle gösterilmiştir.

Haziran 2016, 105 sayfa.

Anahtar kelimeler: Yüksek dereceli kayan kipli kontrol, kestirimli eşdeğer kontrol, çok amaçlı genetik algoritma optimizasyonu, bulanık mantık, çadırı etkisi.

SUMMARY

Ph.D. THESIS

HIGH-ORDER SLIDING MODE CONTROL OF MECHANICAL SYSTEMS

Hasan Ömür ÖZER

Istanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Nurkan YAĞIZ

Co-Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Yüksel HACIOĞLU

In this study, a new high-order sliding mode controller is developed and applied to various mechanical systems, and the chattering problem which is very harmful to the mechanical system is solved. The stability of designed high order sliding mode controller is proved using Lyapunov stability analysis method. The gain parameters of the developed controller are determined with the genetic algorithm optimization technique which is well-known in the literature, and optimizes multiple constraints. The system with the proposed controller and the classical sliding mode controller are simulated and the performances of the controllers are compared. In order to verify the performance of the designed high-order controller in application, the real time control experiments are performed on a quarter vehicle with active suspension system and a dynamic system with twin rotors in the laboratory. The simulation results and experimental results are compared. The results of experiments validated the performance of the new designed controller.

In conclusion, it can be observed from the simulation and experimental results that the proposed high order sliding mode controller with estimation has better control performance with less chattering than the classical sliding mode controller.

June 2016, 105 pages.

Keywords: High order sliding mode control, equivalent control estimation, multi objective genetic algorithm, fuzzy logic, chattering.

1. GİRİŞ

Günümüzde hayatın birçok noktasında kullanılan mekanik sistemler insan hayatını büyük ölçüde kolaylaştırmaktadır. Kullanılan bu sistemlerin istenilen performansta çalışmalarının sağlanması ise bu sistemlerin genellikle kontrol edilmesinden geçmektedir. Bu ihtiyacın ortaya konulması ile kontrolcülerin tasarım süreci de başlamıştır. Geçmiş yıllarda sıklıkla kullanılan oransal ve integral tabanlı kontrolcüler sistemlerin kontrolü konusunda bize yardımcı olmuştur. Öte yandan sistemlerin karmaşıklaşması ve istenilen fonksiyonların artması kontrolcülerin de geliştirilmelerini zorunlu kılmıştır. Geliştirilen yeni kontrolcüler, içerisinde geri beslemenin yer aldığı, sezgisel algoritmalarının kontrol kurallarını belirlediği ve gürbüz karakterli algoritmalarıdır. Bu yeni kontrolcülerin arasında durum geri beslemeli, optimal, sezgisel/akıllı, uyarlamalı ve robust kontrol gibi değişik kontrolcüler yer almaktadır.

Bu tezde, taşıt aktif süspansiyon sistemi ve çift rotorlu sistem gibi değişik mekanik sistemlerin kontrolü için yüksek dereceli kayan kipli kontrol yöntemi kullanılmıştır. Söz konusu kontrolcüde kontrol kuralının belirlenmesinde super twisting algoritması kullanılmaktadır. Sistemler için geliştirilen kontrol kuralının belirlenmesinde Lyapunov kararlılık analizi yapılmış ve kontrolcünün kararlı bölgede kalması sağlanmıştır.

Tezin ikinci bölümünde, literatürde mevcut kontrolcülerin klasik kayan kipli kontrol uygulamaları ve bu konuda daha yeni yöntem olan yüksek dereceli kayan kipli kontrolcülerin çeşitli sistemlere uygulamaları ve teorik alt yapısı hakkında bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde, klasik kayan kipli kontrolcü yöntemi tanıtıldıktan sonra geliştirilecek olan, süper twisting algoritması kullanan, kestirimli yüksek dereceli kayan kipli kontrolcünün Lyapunov kararlılığı sağlandıktan sonra kontrolcünün tasarımı verilmiş ve çeşitli mekanik sistemler için özel kontrol kuralları elde edilmiştir. Geliştirilen kontrolcünün kontrol kazanç katsayılarını elde etmek için tanımlanan kazanç fonksiyonlarının yardımıyla çok amaçlı genetik algoritma uygulaması tasarlanmıştır. Kontrol kazançlarının çok amaçlı genetik algoritma ile sağlanması ve eşdeğer kontrol

kuvvetinin kestirimi metodunun kullanılması ile yeni tipte yüksek dereceli kayan kipli kontrolcü elde edilmiştir. Ardından, bu tezde kullanılacak olan taşıt süspansiyon sistemi ve çift rotorlu sistem modeli tanıtılarak bunlara ait hareket denklemleri verilmiştir.

Dördüncü bölümde, bu tezde tasarlanan yeni çok amaçlı genetik algoritmali eşdeğer kontrol kuvveti kestirimi metodu kullanan yüksek dereceli kayan kipli kontrolcü verilen taşıt süspansiyon sistemi ve çift rotorlu sistem modellerine uygulanarak performansları incelenmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Kontrolcülerin gerçek zamanlı uygulamaları için laboratuvar ortamında deney düzenekleri üzerinde geliştirilen kontrolcüler uygulanmış ve gerçek zamanlı verileri elde edilmiştir. Yapılan deneyler ile bilgisayar benzetimleri karşılaştırılmış ve performansları incelenmiştir.

Tezin son bölümünde, bu tezde elde edilen sonuçlar tartışılmış ve ileriki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur. Bu çalışmada tasarlanan eşdeğer kontrol kuvveti kestirimi metodu kullanan yüksek dereceli kayan kipli kontrolcü ve mevcut kontrolcünün kazanç katsayılarının çok amaçlı genetik algoritma ile hesaplanması tez yazarının bilgisine göre bu tezde getirilen önemli yenilikler olacaktır. Bununla birlikte, geliştirilen kontrolcülerin, taşıt süspansiyon sistemi ve çift rotorlu sistem modellerine üzerinde uygulaması, kontrolcünün uygulama alanı açısından, bu tezde getirilen diğer yenilikler olacaktır.

2. GENEL KISIMLAR

Son yıllarda lineer olmayan sistemlerin kontrolü için birçok araştırma yapılmaktadır. Bunun başlıca nedeni gerçekte çoğu fiziksel sistemin lineer olmayan özellikler içermesidir. Bu nedenle gürbüz kontrol teknikleri dikkate değer şekilde gelişmiştir. Bu kontrol tekniklerine örnek verecek olursak adaptif non-lineer kontrol, geometrik yaklaşım tabanlı kontrol, geri adımlamalı kontrol ve kayan kipli kontroldür. Bu yöntemler, karşılaşılan modelleme hataları ya da parametre belirsizlikleri problemlerinde iyi sonuç vermektedir.

Kayan kipli kontrol belirsizlikler içeren sistemlerin kontrolü için geliştirilmiş gürbüz bir kontrol yöntemidir. Modern kontrol teorisinin en önemli konularından biri, belirsizlikler içeren koşullar altında kontrolün gerçekleştirilmesidir. Kayan kipli kontrol yaklaşımında sistem, seçilmiş ve kısıtlarla belirlenmiş bir bölgede tutulmaktadır, diğer bir deyişle yüksek frekanslı anahtarlama ile kontrol gerçekleştirilmektedir [1-3]. Kayan kipli kontrole, yüksek aktiviteli kontrol ve yüksek frekanslı anahtarlama olmadan oluşan çatırtı [4-6] olarak adlandırılan etki nedeniyle eleştiriler getirilse de yüksek non-lineerlikler içeren karmaşık mühendislik sistemlerinin kontrolünde günümüzde sıkça kullanılmaktadır [7]. Kayan kipli kontrolcüler, lineer özellik göstermeyen kimyasal deneylerin kendi iç dinamiğinden kaynaklanan bozucu etkilerin azaltılması ve modelleme hatalarının giderilmesi [8], deniz altı taşıtlarının uzaktan yönlendirilmesi ve seyir esnasında meydana gelebilecek konum değişimlerinin kontrol altına alınması [9], elektromekanik fren sistemi kullanılan araçların yol tutuşu kabiliyetinin artırılması ve dinamik performanslarının yükseltilmesi [10], insandaki dolaşım sistemi için geliştirilen aort pompasının akış özelliklerinin iyileştirilmesi [11], lineer olmayan yüksek dereceli yakıt hücrelerinin modellenmesi ve verimliliklerinin yükseltilmesi [12] gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır.

Kontrol sistemlerinde gerçek şartlarda oluşan bozucu etkiler, algılayıcı ve eyleyicilerin hesaplanamayan hızdaki iç dinamikleri, sistemin ayırık zamanlı özelliklerden kaynaklanan gecikmeler mekanik sistemlerde tehlikeli titreşimlere sebep olabilmektedir. Kayan kipli kontrol sistemlerinde bu etkiler çatırtı olarak adlandırılmaktadır. Kayan kipli kontrolde görülen çatırtı yüksek, teorik olarak sonsuz, anahtarlama frekansından

kaynaklanmaktadır. Bu yapının doğası gereğince yüksek frekanslı tehlikeli titreşimlerin oluşması sistem açısından zararlıdır. Bu nedenle çatlama oluşumunun doğal olması anlayışı kabul edilemez.

Çatlama olgusu genel olarak, sistem için zararlı ve zararsız oluşum olarak iki grupta incelenmektedir. Mekanik sistemlere sonsuz küçük büyüklükte yüksek frekanslı bileşenlerin etkimesi kaçınılmazdır. Böylesi durumlarda ilk grupta yer alan ve zararsız olarak kabul edilir çatlama oluşur [13]. Mekanik sistemlere ciddi zararlar veren ve tehlikeli olarak kabul edilen diğer çatlama oluşumları için yüksek dereceli kayan kipli kontrol uygulamaları geliştirilmiştir [4-6, 13-20]. Bu uygulamalarda dahi zararlı olan çatlama bileşeni sistemde engellenirken, zararsız olan çatlama bileşeni görülmektedir [13].

Çatlama olarak ifade edilen yüksek frekanslı bileşenlerden korunmak için çeşitli yaklaşımlar ortaya konulmuştur. Bu yaklaşımlara örnek olarak sınırlandırma (saturation) kullanılması [21], kayma bölgesi metodu [22] verilebilir. Bu yaklaşımlarda sistemin dinamiklerinden korunmak için kontrolün gürbüzlüğü ve nihai doğruluğundan bir miktar kayıp olmaktadır.

Yüksek dereceli kayan kipli kontrol (YDKKK) olarak adlandırılan yöntem, kayan kipli kontrol metodundaki sorunları ve kısıtlamaları ortadan kaldırmak, doğruluk ve hassasiyeti arttırmak amacıyla ortaya konulmuştur [23-27]. YDKKK rölatif derecesi arttırılmış sistemlerde kullanılabilen, kontrol kuralındaki problemleri ortadan kaldırıp gürbüzlükten ödün vermemektedir. Yüksek dereceli kayan kipli kontrol (YDKKK) olarak adlandırılan yöntem, kayma yüzeyinin zamana göre yüksek dereceli türevlerini de içerecek şekilde kontrolcü tasarlanması olarak ifade edilebilir. YDKKK, standart yaklaşım olan kayan kipli kontrolün avantajlarını korurken bunun yanında çatlama etkisini önemli ölçüde ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca yüksek dereceli kayma kipi ölçme zaman aralığıyla alakalı olarak hassasiyeti artırır ve belirsiz şartlar altında dahi sistemi kayma yüzeyinde hassas bir şekilde tutmayı sağlar [19]-[24]-[28]. YDKKK ile çok sayıda farklı algoritma geliştirilmiş ve çeşitli sistemler için uygulanmıştır. Örnek olarak, 2-kayma modunun [19, 29, 30] özel bir uygulaması olan süper twisting algoritması [19, 23], sanki sürekli YDKKK [31], homojen olmayan keyfi mertebeden YDKKK [32] verilebilir.

Klasik kayan kipli kontrol metodunda bazı sınırlandırmalar bulunmaktadır. Klasik kayan kipli kontrolde rölafif derece 1 olduğunda, kayma yüzeyi fonksiyonu σ 'nın sıfıra gitmesi eşitliği verildiğinde kullanılabilir. Kontrol işareti açık olarak kayma yüzeyi fonksiyonu σ 'nın zamana göre birinci türevinde görülebilir. Ayrıca çatırtı olarak ifade edilen yüksek frekanslı kontrol anahtarlaması, kontrol edilen sistemlerde zararlı yüksek frekanslı tehlikeli titreşimler oluşturulabilir. Yüksek dereceli kayan kipli modlarda, birinci derece kayma kipiyle sınırlı kalınmamaktadır. Dinamik sistem için tanımlanan kayma kipinin süreksizlik oluşturmayan kümesindeki elemanlarıyla kayma hareketi sağlanabilir.

Tehlikeli olarak kabul edilen çatırtı oluşumlarının yüksek dereceli kayan kipli kontrolcülerin (YDKKK) doğru kullanımı ile ortadan kaldırılabileceği kanıtlanmıştır [13]. Hızlı eyleyiciler ve algılayıcılar YDKKK sistemlerde zararsız olan birinci tipteki çatırtıyı oluştururlar ve uygulamada kayma hareketini etkilemezler. Bununla birlikte yüksek dereceli kayan kipli kontrol (YDKKK) yönteminin uygulamaları oldukça yenidir. Son on yıldaki çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, robot manipülatörlerinin yörünge izleme cevaplarının iyileştirilmesi [33], elektro pnömatik sistemlerin bozucu etkilere ve yüklemekten kaynaklı belirsizliklere karşı verimliliklerin artırılması [34], mekanik algılayıcı barındırmayan indüksiyon motorlarının hız, tork değişimlerinin tahmin edilmesi [35], jeneratörlerin hız ve voltaj değişimlerinin kontrol altına alınması [36], aeroelastik kanat elemanlarında oluşan aerodinamik etkilerinin azaltılması [37], yenilebilir enerji kaynaklarından olan rüzgar türbinlerindeki çatırtının azaltılması [38], tekrar kullanılabilir fırlatma araçlarının uçuş güvenliği ve yörünge kontrolü [39] gibi birçok farklı uygulama alanında YDKKK etkisi görülmektedir.

Kontrolcü tasarımları yapılırken, kontrolcü performanslarının artırılması, kontrolcülerdeki değişkenlerin belli aralıklarda tahmin edilmesi, kazanç katsayılarının tayini gibi uygulamalarda sezgisel, iteratif ve optimizasyon teknikleri kullanılmaktadır. Bu tekniklerden biri olan bulanık mantığın temelleri Zadeh [40] tarafından oluşturulmuştur. Bulanık küme mantığında Zadeh, teorisini geliştirirken insanların konuyla ilgili tecrübelerini oluşturulacak sisteme girebilmelerinden faydalanmıştır. Kesin bir şekilde üye olmayı gerektirmemesi nedeniyle kısmi üyelik kavramını içeren bulanık mantık kümelerinin üyelik özellikleri ile günümüzde farklı kontrolcülerin tasarlanması

mümkün olmaktadır. Bulanık mantıklı kontrolcüler, insan sağlığına ve çevreye zararlı yüklerin aktarımında kullanılan robotların yörünge izleme hatalarının azaltılmasında [41], yapısal elemanların dış kaynaklı titreşimlerden korunması amaçlı kullanılan aktif ayarlı kütle sönümleyicilerin kontrol kuvvetlerinin tayin edilmesinde [42], nükleer tesislerde güç aktarım işlerinin yapıldığı çekirdek gibi hassas bölgelerin mekanik salınımlarının azaltılmasında [43], uzaya gönderilen taşıtlarının yörünge kararlılıklarının sağlanması ve yörünge izleme hataların düşürülmesi [44] gibi birçok mühendislik alanında kullanılmaktadır.

Meta sezgisel optimizasyon tekniklerinden biri olan Genetik Algoritmaların temeli, var olduğu düşünülen doğal seleksiyon kavramıyla uyumlu olarak Rechenberg [45] tarafından ortaya konulmuştur. Goldberg [46] bu konuda yaptığı çalışmalarla genetik algoritmaların çeşitli konularda kullanılabileceğini göstermiştir. John Koza [47] genetik algoritma programlama tekniklerinin çeşitli mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılabileceğini ayrıntılı olarak göstermiştir. Genetik algoritmanın, bulanık mantıklı kontrolcünün sınırlarını belirlediği aktif kontrolcülü araç süspansiyonunun konum ve hız değerlerini azaltmasının yanında uygulanan kontrol voltajını düşürdüğü bilgisayar benzetimiyle gösterilmiştir [48]. Dinamik sistemlerin modellenmesi için sinirsel ağlara eklenen genetik algoritma uygulaması ile gerçek veriler üretilmiştir. Bu sayede optimum dinamik parametrelerin bilgisayar ortamında üretilebilmesi sağlanmıştır. [49]. Genetik algoritmanın kayan kipli kontrolcünün kazanç katsayıları tayin ettiği kontrolcü kullanılarak binalarda, deprem ve dış kaynaklı etkilerin zararlarından korunabileceği yapılan bilgisayar benzetimleriyle saptanmıştır [50].

Bu tez çalışmasında mekanik sistemlerin kontrolü ile ilgili çalışmalar yer almaktadır. Tezde aktif süspansiyon sistemi ve çift rotorlu sistem modelinin kontrolüne yer verilmiştir. Tezde yer alan mekanik sistemler seçilirken, mevcut mekanik sistemlerinin uygulama alanlarının fazla oluşu ve laboratuvar ortamında gerçek sonuçların alınması tercih nedeni olmuştur. Çalışılan sistemler non-lineer terimler içermektedir. Aktif kontrolcülü taşıt süspansiyon sisteminde titreşim kontrolü yapılmış, çift rotorlu sistem modelinde ise referansa bağlı yörünge izleme problemi çalışılmıştır.

Taşıt süspansiyon sistemleri, yol kaynaklı titreşimleri araç gövdesine en az düzeyde iletilmesini sağlayan, aracın yol tutuşunu sağlayan ve yolcuların konfor gereksinimleri

yerine getiren çok önemli sistemlerdir. Taşıtın ana gövdesi ile aks-tekerlek kütlesi arasına yerleştirilen bir yay ve sönümleyiciden oluşmaktadır. Bu yapıdaki sistemler pasif süspansiyon sistemleridir. Pasif süspansiyon sistemlerin normal çalışma koşullarında yeterlilikleri sınırlıdır. Bu nedenle performans artırma gerekliliklerinden, yarı aktif veya aktif süspansiyon sistemleri tasarlanmaktadır. Performans arttırmak için değişken sönümlü sistemler, ER (Electrorheological) [51] ve MR (Magnetorheological) [52] sönümleyicileri kullanılmaktadır. Bu sistemlerin de yeterlilikleri sınırlı olduğundan aktif süspansiyon tasarımları gerekli olmaktadır. Aktif süspansiyon sistemleri genellikle yay ve amortisör elemanları arasına paralel olarak yerleştirilmiş hidrolik, doğrusal motor vb. eyleyiciler ile sisteme harici enerji sağlama yoluna gidilmektedir. Son yıllarda aktif süspansiyon ile ilgili kapsamlı çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarda farklı kontrolcüler kullanılmıştır. Bulanık mantıklı kontrolcünün çeyrek taşıt modeline uygulanmasıyla oluşturulan aktif kontrolcü ile farklı yol şartlarına karşı iyileşme sağlandığı görülmüştür [53]. Hibrit bir bulanık mantıklı kontrolcü yaklaşımıyla tasarlanan aktif kontrolcülü süspansiyon ile yol kaynaklı titreşimlerinin araç gövdesi ve yolcu koltuğu üzerindeki etkileri azaltılmıştır [54]. Eyleyici zaman gecikmesinin H_∞ kontrolcünün içerdiği aktif kontrolcülü süspansiyon vasıtasıyla zaman ve frekans cevaplarında iyileşme sağlanmaktadır [55]-[56]. Lineer olmayan geri adımlamalı aktif süspansiyon kontrol uygulaması ile yol kalitesine bağlı olarak gelişen süspansiyon hareketinde iyileşme sağlanmıştır [57]. Kayan kipli kontrolcü ile bulanık mantıklı kontrolcünün beraber kullanıldığı aktif süspansiyonlu kontrolcü ile rastgele bir yol profili karşısında yolcu üzerinde oluşan sağlığa zararlı titreşimler azaltılmıştır [58]. Sistematik bir şekilde kararlılığının sağlandığı ve tam taşıt modeli üzerinde bilgisayar benzetimleri yapılan geri adımlamalı aktif kontrolcü kullanımı ile farklı yol profilleri karşısında zaman ve frekans bölgelerinde sürüş konforu arttırıldığı belirtilmiştir [59].

Hava taşıtlarının uçuşlarındaki hareketleri ve manevralarının kontrol edilmesi son yıllarda popülerliği artan araştırma konularından biridir. Hava taşıtlarının dinamikleri, özellikle hareket eksenlerinde oluşan etkilerin birbirlerine olan etkileşimlerinin kontrol edilmesi önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Helikopter gibi hava taşıtlarındaki benzer dinamiklerin birbirlerine etkisi kararsız ve non-lineer etkiler oluşturmaktadır. Tezde çalışılacak sistem çift rotorlu dinamik sistem, helikopterin dinamik özelliklerini önemli ölçüde karşılamaktadır [60]. İki adet rotora sahip

olduğundan dolayı dinamik etkilerin birbirlerine olan kararsız ve karmaşık etkilerini incelemekte öneme sahiptir [61]. Farklı kontrol teknikleri araştırılarak bu etkilerin kontrol edilmesi için birçok araştırmacı bu konuda çalışmıştır. Deneysel verilerle desteklenen ve kayan kipli kontrolcünün kullanıldığı çalışmada [62], iki rotorun birbirleriyle etkileşiminden oluşan çapraz dinamik etkilere karşı gürbüz bir kontrolcü tasarlanmıştır. Adaptif özelliği olan ikinci derece kayan kipli kontrolcü tasarımı ile sistemin kararlılığı sağlanmış ve söz edilen çapraz dinamik etkilerin azaltılması bilgisayar benzetimleri ile gösterilmiştir. [63] Çift rotorlu sistem modelinin yunuslama ve sapma hareketlerinin kontrolü konusunda bulanık mantıklı lineer kuadratik ayarlayıcı ile konum kontrolü yapılmıştır [64]. Hibrit özelliği olan ve içeriğinde bulanık mantık, genetik algoritma ve oransal-integral-türev olan bir kontrolcü ve geliştirilen yazılım vasıtasıyla çift rotorlu sistemin verilen referans değerlerini izlemesi amaçlanmıştır [65]. Bunun yanı sıra sezgisel yöntemlerin kullanıldığı ve deneysel verilerle karşılaştırma yapıldığı bir diğer çalışmada nöral bulanık mantık yardımıyla çift rotorlu sistemin istenen yörünge izlemesi sağlanmıştır [66]. Modelden bağımsız çok giriş ve çok çıkış içeren oransal türev oransal integral bulanık mantıklı kontrolcünün, deneysel bir çift rotorlu sistemin yörünge izlemesinde başarıyla kullanılabileceği gösterilmiştir [67].

Bu tezde geliştirilen eşdeğer kuvvet kestirimli yüksek dereceli kayan kipli kontrol yönteminin, taşıt süspansiyon sistemine ve çift rotorlu sistem modeline uygulanması tez yazarının bilgisine göre, bu tezde uygulama anlamında getirilen yeniliklerdir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. KARARLILIK ANALİZLERİ

3.1.1. Lyapunov'un Birinci Yöntemi

Dinamik sistemler için kararlılık analizinin yapılması sistemin davranışı hakkında fikir sahibi olunmasını sağlar. Geliştirilecek kontrol sistemleri için yapılacak ilk analiz sistemin kararlı olup olmadığının incelenmesidir. Kararlılık analizlerinde lineer olmayan sistemlerde üstünlükler sağlayan Lyapunov [68] metodu kullanılacaktır. Bir dinamik sistem [69],

$$\dot{x} = f(x, t) \quad (3.1)$$

denklemleriyle verilmiş olsun. Bu denklemin çözümü

$$\Phi(t; x_0, t_0) \quad (3.2)$$

şeklinde olacaktır. Başlangıç koşulu,

$$x(t_0) = X_0 = \Phi(t; x_0, t_0) \quad (3.3)$$

$$f(x_e, t) = 0 ; \forall t \geq t_0 \quad (3.4)$$

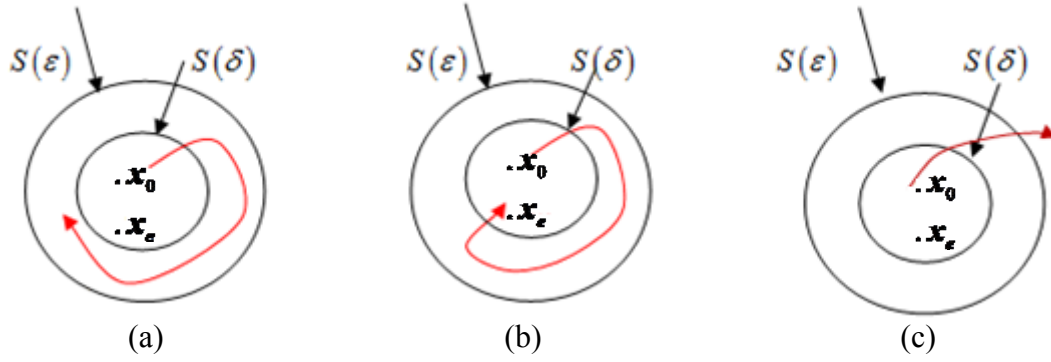
$z = x - x_e$ değişken dönüşümü ile sistemin (3.4) ile tanımlanan x_e denge noktası orijine taşınabilir. Böylece $z = 0$ sistemin denge noktası olur. Denge noktasının bir komşuluğu şöyle tarif edilsin.

$$\|x - x_e\| \leq k \quad (3.5)$$

$$\|x - x_e\| = \left((x_1 - x_{1e})^2 + (x_2 - x_{2e})^2 + \dots + (x_n - x_{ne})^2 \right)^{1/2} \quad (3.6)$$

Tanım

$S(\delta)$ kümesi $\|x - x_e\| \leq \delta$ şartı ile verilen tüm noktaları içeren küme olsun. $S(\varepsilon)$ kümesi $\|\Phi(t; x_0, t_0) - x_e\| \leq \varepsilon ; \forall t \geq t_0$ şartı ile verilen tüm noktaları içeren küme olsun.



Şekil 3.1: Kararlılık tanımlamaları [21]

Eğer her bir $S(\varepsilon)$ için bir $S(\delta)$ bulunabiliyorsa ve $S(\delta)$ içinde başlayan sistem yörüngeleri (çözümleri) zaman büyüdükçe $S(\varepsilon)$ içinde kalıyorsa sistemin x_e denge noktası, Lyapunov'a göre kararlıdır denir (Şekil 3.1-a). Eğer sistem Lyapunov'a göre kararlı ise ve her bir çözüm $S(\delta)$ içinde başlayıp $S(\varepsilon)$ içinde kalarak x_e denge noktasına yakınsıyor ise denge noktası asimptotik kararlıdır denir (Şekil 3.1-b). Aksi durumlarda sistem kararsızdır (Şekil 3.1-c). Lyapunov'un Birinci Yönteminin en önemli dezavantajı sistem denklemlerinin çözümlerini gerektiriyor olmasıdır. Karmaşık non-lineer sistemlerde çözümleri elde etmek çok zor olduğundan bu analiz pratikte çok kullanılmaz.

3.1.2. Lyapunov'un İkinci Yöntemi

Non-lineer sisteme ait diferansiyel denklemlerin çözümlerine gerek kalmadan sistemin kararlılığı hakkında bilgi sahibi olunabilir. Eğer sistem şöyle ifade edilirse [69],

$$\dot{x} = f(x) \quad (3.7)$$

$V(x) > 0$; $\forall x \neq 0$ ve $V(0) = 0$ (pozitif tanımlılık) iken $\dot{V}(x) \leq 0$ (negatif yarı tanımlılık) şeklinde skaler bir fonksiyon varsa sistemin denge noktası düzgün kararlı denir. Bu şartları sağlayan $V(x)$ fonksiyonu, Lyapunov fonksiyonu olarak adlandırılır. Eğer negatif yarı tanımlılık yerine $\dot{V}(x) < 0$; $\forall x \neq 0$ negatif tanımlılık sağlanırsa sistemin denge noktası düzgün asimptotik kararlıdır denir. Ayrıca eğer $\|x\| \rightarrow \infty$; iken $V(x) \rightarrow \infty$ oluyorsa sistemin denge noktası global olarak asimptotik kararlıdır. Bu son şartı sağlayan fonksiyonlar radyal olarak sınırsız fonksiyonlardır.

3.2. İDEAL VE GERÇEK KAYMA VE ÇATIRTI

Gerçek uygulamalarda kontrol sinyalinin sonsuz frekansta değişkenlik sağlaması olası değildir. Kontrol sistemlerinin gerçek şartlardaki örnekleme gürültüleri, bozucu etkiler, algılayıcı ve eyleyicilerin hesaplanamayan hızdaki iç dinamikleri, sistemin ayrık zamanlı özelliklerden kaynaklanan gecikmeler mekanik sistemlerde tehlikeli titreşimlere sebep olabilmektedir.

Kayma modu ile kayma yüzeyi arasındaki komşulukta, kontrol sinyali değişken bir hareket gösterir. Kayma modu üzerindeki komşulukta gerçekleşen ideal ve gerçek kayma olarak tanımlanan bu kayma hareketine sınır bir tabaka yaklaşımı getirilebilir. Kontrol sinyalinin bu komşulukta değişmesi etkisine çatırtı ismi verilmektedir.

Çatırtı olgusu tanımlanırken, sistem için zararlı olup olmadığı incelenmektedir. Mekanik sistemlere kullanım esnasında dış kaynaklı olarak etkiyen çok küçük genlikli yüksek frekanslı bileşenler zararsız olarak kabul edilen çatırtıyı oluşturur [13]. Mekanik sistemler için tehlikeli sonuçlar oluşturulabilecek zararlı çatırtı oluşumları için yüksek dereceli kayan kipli kontrol uygulamaları geliştirilmiştir [4-6, 13-20]. Bu uygulamalarda dahi zararlı olan çatırtı bileşeni sistemde engellenirken, sınırlı büyüklüğe sahip zararsız olan çatırtı bileşeni görülmektedir [13]

Değişken kontrol sistemlerinde çatırtının kayan kipli kontrol uygulamalarına etkileri Utkin [1] tarafından gösterilmiştir. Çatırtıyı azaltmanın yollarından yüksek anahtarlama frekansına sahip olsa da modellenmiş sistem üzerinde gözlemci (observer) kullanmaktır [1]. Bir çeşit hızlı bileşenlerin filtrelemesi olan uygulama ile sisteme yüksek frekanslı bileşen girmesi önlenmiş olur. Bu yaklaşım belirsiz sistemlerde uygulanmıştır [70]. Çatırtı olarak ifade edilen yüksek frekanslı bileşenlerden korunmak için çeşitli yaklaşımlar ortaya konulmuştur. Bu yaklaşımlara örnek olarak sınırlandırma (saturation) kullanılması [21], kayma bölgesi metodu [22] verilebilir. Bu yaklaşımlarda sistemin dinamiklerinden korunmak için kontrolün gürbüzlüğü ve nihai doğruluğundan bir miktar kayıp olmaktadır.

Bartolini süreksiz kontrol sistemlerinde oluşacak çatırtıyı tahmin edip engelleyecek bir metodu geliştirip asenkron bir makinanın hız kontrolünde kullanmıştır [14]. Bartolini ve Ferrara [71] gözlemci kullanmadan çatırtı problemini giderecek ikinci derece kayan kipli kontrol uygulaması ve iki uzuvlu manipülatörde sürekli kuvvet ve pozisyon kontrolü

gerçekleştirecek bir algoritma geliştirmişlerdir. Aynı yazarlar bir diğer uygulamalarında tek girişli değişken yapıli kontrol sisteminde çatırtı problemini optimal kontrol teorisinden etkilenerek elimine etmişlerdir [15].

Bir diğer çok kullanılan yaklaşım sürekli bir fonksiyonu kontrol kuralına eklemektir. Bu yaklaşımın da bazı modellenmemiş ve hassas bileşenlerde kabul edilemez sonuçlar doğuracağı göz ardı edilemez. Bu yaklaşım getirilirken çatırtıdan korunma amacıyla ve modellenmemiş dinamiklerinin etkilerini arasında bir ödünleşme sağlanması gerekir [21].

3.3. KAYAN KIPLI KONTROL

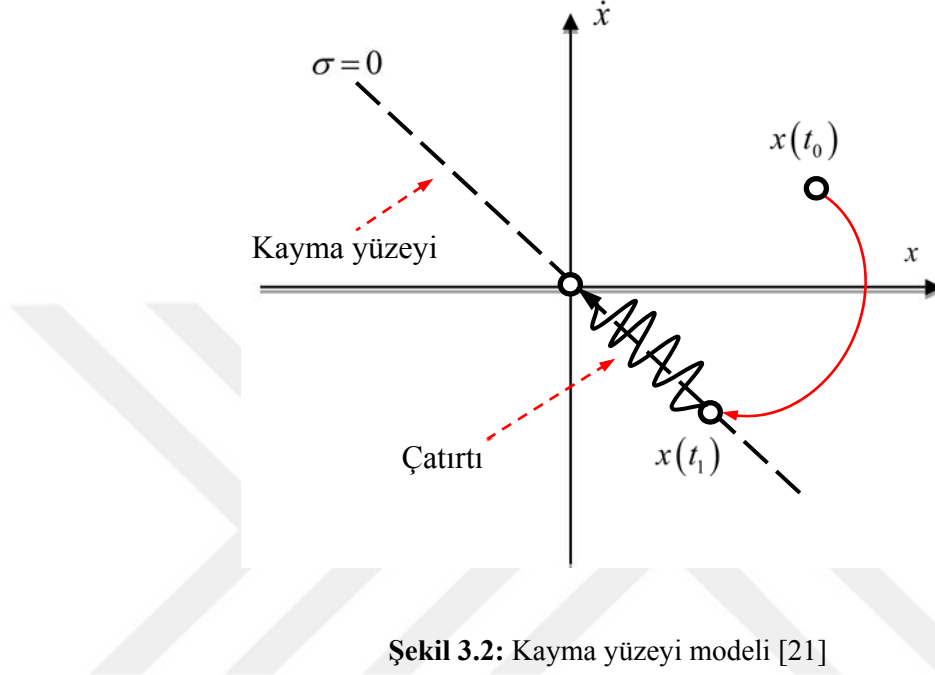
Değişken yapıli kontrol sistemleri (DYKS), kontrol teorisinde çalışılan önemli konulardan biridir. DYKS'in temelleri Rus bilim adamları tarafından 1960'lı yıllarda atılmaya başlanmıştır [72]-[73]. Temelde (DYKS) birden fazla alt sisteminin birleşmesinden oluşan sistemlerdir. Giriş ve çıkış ilişkileriyle birbirlerine bağıli durumdadırlar. Zaman içerisinde anahtarlama yapılabilen yapılardan oluşmaktadırlar.

Modern kontrol teorisinin ana problemlerinden biri belirsiz koşullar altında kontrol sağlamaktır. Tanımlama ve gözlemelele temelli ya da mutlak kararlılık, adaptasyon tabanlı gelişmiş yöntemler olmasına rağmen, en yaygın yaklaşım belirsizliklere karşı gelebilecek bir sınırlama fonksiyonu (kayma yüzeyi) seçmektir.

DYKS, kontrol sistemlerinde süreksiz geri beslemeli sistemlerin uygulaması olarak görülür. DKYS karakter olarak kayma hareketi veya kayma modu davranışı olarak adlandırılan bir davranışa sahiptirler. Başka bir söylemle sistemde bir sapma meydana geldiğinde yeterince çaba sarf ederek sistemi geriye döndürmekten geçer. Bu davranış geometrik bir bakış açısıyla, sistemin yörüngesinin süreksiz bir yüzeye yakınsaması olarak ifade edilebilir. Bu yaklaşımın doğrudan uygulanması Değişken Yapılı Sistemler teorisinde kayma kipi olarak anılmaktadır [1]. Kayan Kipli Kontrol (KKK), bir değişken yapıli kontrol yöntemidir.

Süreksiz bir yüzey üzerinde hareket eden sistem çevresel etkilerden arındırılmış olmaktadır. Kayan Kipli Kontrol olarak adlandırılan kontrol sistemi, sistem parametreleri değişimlerinden ve dış bozucu etkilerden etkilenmemesiyle başarılı bir metottur. Bu sistemlerde kontrol kuralı, kontrol işlemleri sırasında, sistemin durumuna bağıli olarak, daha önceden belirlenen kurallara göre, bilerek değiştirilmektedir. Bunun amacı sistemin

kararlı veya kararsız yörüngeler arasında geçiş yaparak bir kayma yüzeyine ulaşmasını ve bu yüzeyde kayarak orijine ulaşmasını sağlamaktır. İkinci mertebeden bir sisteme ait kayan kip oluşumu Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Kayma yüzeyi modeli [21]

Kayan Kipli Kontrol yönteminin en önemli özelliklerinden birisi gürbüz olmasıdır. Kontrolcünün tasarımı için kullanılan model ile kontrolcünün uygulanacağı sistem arasındaki uyumsuzlıklardan ve parametrelerdeki değişimlerden etkilenmez. Kayan kipli kontrolün diğer önemli bir özelliği ise kararsız sistemlere uygulanabiliyor olmasıdır. Daha önce de belirtildiği üzere, sistem kararlı veya kararsız yörüngeler arasında geçiş yaparak kararlı bir yapı elde edilebilir.

Kayan Kipli Kontrol tasarımında iki aşama uygulanır. Birinci aşamada kayma yüzeyi $\sigma(x,t)=0$ ve sistemi bu yüzeyde tutacak kontrol sinyali belirlenir. İkinci aşamada sistemi kayma yüzeyine getirecek kontrol sinyali (kuralı) belirlenir.

3.3.1. Birinci Derece (Klasik) Kayan Kipli Kontrol

Kontrolcülü bir non lineer dinamik sistem,

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.8)$$

$$\dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + g(x_1, x_2)\bar{u} + \bar{d} \quad (3.9)$$

şeklinde ifade edilsin. Burada x_1 ve x_2 durum değişkenleri, \bar{u} kontrol sinyali, \bar{d} ise sınırlı dış bozucu etkidir. Bozucu etki

$$|\bar{d}| \leq \Delta, \Delta > 0 \quad (3.10)$$

şartını sağlamaktadır. Kayma yüzeyi aşağıdaki gibi seçilsin.

$$\sigma = \alpha(x_{1r} - x_1) + (\dot{x}_{1r} - \dot{x}_1) \quad (3.11)$$

Burada kararlılığın sağlanabilmesi için $\alpha > 0$ olmalıdır. r indisi, referans değerini temsil etmektedir. Lyapunov fonksiyonunun pozitif tanımlı ve zamana göre türevinin negatif yarı tanımlı olması gerekmektedir. Bu şartlar altında Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilir.

$$V(\sigma) = \frac{1}{2} \sigma^2 = \frac{\sigma^T \sigma}{2} > 0 \quad (3.12)$$

$$\frac{dV(\sigma)}{dt} = \frac{\dot{\sigma}^T \sigma}{2} + \frac{\sigma^T \dot{\sigma}}{2} = \sigma^T \dot{\sigma} \quad (3.13)$$

$$\frac{dV(\sigma)}{dt} = \sigma^T \dot{\sigma} \leq 0 \quad (3.14)$$

Lyapunov fonksiyonun türevi olan (3.14) denkleminin limit durumundan faydalanarak, eşdeğer kontrol kuvveti olan \bar{u}_{eq} elde edilir.

$$\bar{u}_{eq} = g^{-1}(x_1, x_2) \{ \alpha(x_{2r} - x_2) + \dot{x}_{2r} - f(x_1, x_2) \} \quad (3.15)$$

Toplam kontrol kuvveti ise aşağıdaki gibi seçilmiştir.

$$\bar{u} = \bar{u}_{eq} + k g^{-1}(x_1, x_2) \text{sign}(\sigma) \quad (3.16)$$

Lyapunov fonksiyonunun türevinden gerekli düzenlemeler yapılırsa:

$$\dot{V} = \sigma \dot{\sigma} \quad (3.17)$$

$$\dot{V} = \sigma \left\{ \alpha (x_{2r} - x_2) + (\dot{x}_{2r} - f(x_1, x_2) - g(x_1, x_2)\bar{u} - \bar{d}) \right\} \quad (3.18)$$

$$\dot{V} = -k\sigma \text{sign}(\sigma) - \sigma \bar{d} \quad (3.19)$$

$$\dot{V} \leq -|\sigma|(k - \Delta) \quad (3.20)$$

Eğer kontrol kazancı k , $k > \Delta$ olarak seçilirse Lyapunov fonksiyonun türevi negatif tanımlı olmaktadır. Bu durumda sistem kayma yüzeyine ulaşmaya zorlanır.

3.4. YÜKSEK DERECELİ KAYAN KIPLİ KONTROL (YDKKK)

En önemli kontrol problemlerinin başında sistemlerin barındırdığı belirsizlikler gelmektedir. Çeşitli gözlemlene ve tanımlama yöntemleri olsa da sistem belirsizlikleri tanımlamada en sık kullanılan yol bu belirsizlikleri bir kayma yüzeyinde sabit tutmaktır. Sistemler bu belirsizliklere kısa sürede yeterli enerjiyle reaksiyon verebilmektedir. Değişken yapıli sistemlerde bu belirsizliklere karşı reaksiyon verme kayma modlarıyla sağlanmaktadır [74]. Söz konusu sistemler bozucu etkilere karşı gürbüz ve kararlı olmalarına rağmen, yüksek frekanslı bileşenlerin oluşturduğu zararlı çattırtı oluşumlarına maruz kalırlar. Çattırtıdan korunmak için bazı yaklaşımlar bulunmaktadır. Ana düşünce sistemin dinamiklerini küçük bir komşulukta ana sistemin özelliklerini değiştirmeyecek şekilde değiştirmek olmaktadır. Bununla beraber sistemin gürbüzlüğünden bir miktar kayıp olmaktadır.

Yüksek dereceli kayan kipli kontrol (YDKKK) genelleştirilmiş bir kayan kipli kontrol uygulamasıdır. Standart kayan kipli kontrol uygulamasında birinci türev terimlerimden oluşan kısıtlamada burada söz konusu değildir. Kayma kipi anlayışı ana özellikleri genelleştirilirken, yüksek dereceli kayan kipli modlarda kısıtlama altında kalınmamaktadır. YDKKK'nın standart yaklaşıma ek olarak avantajlar söyle sıralanabilir. Yüksek dereceli kayma kipi çattırtıyı önemli ölçüde ortadan kaldırmaktadır. Yüksek dereceli kayma kipi, sonlu zaman yakınsaması sağlandığında ölçme zaman adımı ile alakalı olarak hassasiyeti arttırmaktadır. Yüksek derecedeki kayma kipi, rölatif derece 1'i aştığı zamanda dahi bilinmez şartlar altında sistemi kısıt fonksiyonunda hassas bir şekilde tutulmasını sağlar.

Kayan kipli kontrolcüde kayma modülüne herhangi bir noktada sınırlı bir süre içinde ulaşma eğilimi vardır. Bir diğer özelliği de kayma yüzeyindeki hareketlerin süreksiz bir yüzey üzerinde gerçekleşmesidir. Bu durumda anahtarlama frekansının sonsuza gitme eğilimi bulunmaktadır.

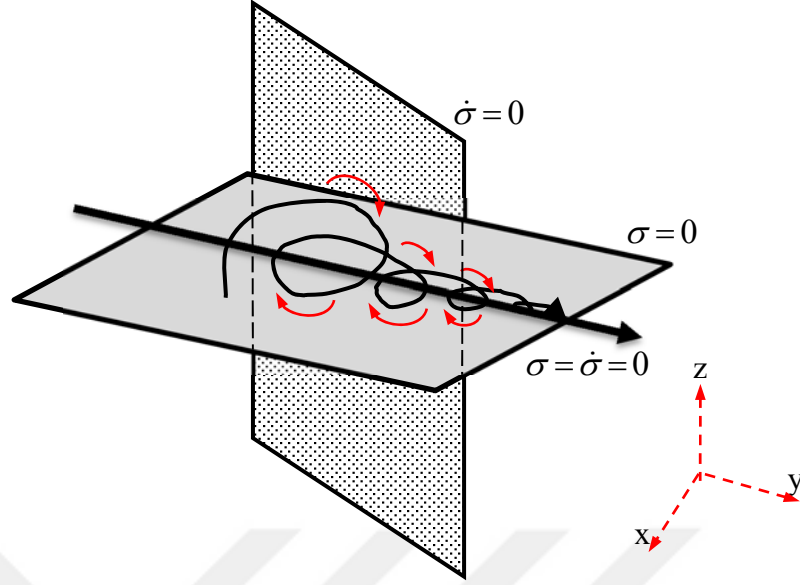
Genel söylemde, dinamik sistemin tanımlanan kayma kipi kümesindeki hareketinden bahsedilmektedir. Bu hareket Filippov [75] yaklaşımıyla tarif edilebilen teorik olarak sonsuz kontrol anahtarlamasıdır. Filippov [75] kuralına göre YDKKK, dinamik bir sistemin süreksiz bir düzlemde hareket etmesidir. Filippov'un [75] Süreksiz diferansiyel denklemlerinde önerdiği

$$\dot{x} = \nu(x) \quad (3.21)$$

$x \in R^n$, ν : yerel sınırlı ölçülebilir (Lebesgue) fonksiyonu, eşdeğeri olan diferansiyel içeren (differential inclusion) durumuna dönüştürülür.

$$\dot{x} \in V(x) \quad (3.22)$$

Özel bölüm olan vektör alanı ν hemen hemen her yerde süreklidir. $y \rightarrow x_1$ giderken gerçekleşebilecek tüm $\nu(y)$ değerleri için $V(x)$ değer kümesi dışbükey kapalıdır. Diferansiyel içermi, eşitliğin tüm çözümlerinin mutlak sürekli $x(t)$ fonksiyonu için tanımlanmasını sağlar [19].



Şekil 3.3: Kayma yüzeyinin zamana göre türevlerinin gösterimi

Kayma yüzeyi fonksiyonu olan σ 'nın yörünge boyunca zamana göre türevi alınırken süreksizlik durumu oluşabilir. Bunun sonucu olarak kayma modu kümesi, süreksizlik oluşmayacak şekilde r . dereceye kadar türevlenebilen $\sigma^{(r)}$ elemanlarının toplamı olarak adlandırılır. Bu küme r . derece kayma modu olarak adlandırılmaktadır [19]-[76]. Kayma derecesi komşuluktaki dinamik pürüzsüzlük derecesini ifade etmektedir. Kayma fonksiyonu σ 'in sıfıra gitmesi için bir sınırlama vermek istersek kayma derecesi kayma modunun komşuluğundaki sürekli türevlerinin sayısıdır. r . derece kayma modu (3.23) eşitliğiyle belirlenir.

$$\sigma = \dot{\sigma} = \ddot{\sigma} = \dots = \sigma^{(r-1)} = 0 \quad (3.23)$$

r . kayma kipi σ kayma yüzeyinin durumuyla ilgilidir. Eğer herhangi bir r . kayma noktası için Filippov vektör kümesinin, kayma moduna teğetinin kesişimi varsa boş küme değildir [28]. 2. dereceden kayma yüzeyi Şekil 3.3'de gösterilmektedir.

r . derecenin 2 ve 3 olduğu durumlar için çok sayıda çalışma yapılmıştır [15, 19, 23, 76-78]. r . derecenin 3'den büyük olması durumu için başarılı bir algoritma için literatürde çalışmalar devam etmektedir. Aşağıda literatürde uygulamaları bulunan bazı algoritmalar verilmiştir. [79]

- Twisting Algoritması [80-82]

- Super-Twisting Algoritması [19]
- Sub-Optimal Algoritması [71]
- Drift Algoritması [78]

YDKKK uygulamasının temel problemi, artan bilgiyi sisteme sağlama durumudur. Kayma yüzeyi fonksiyonu σ 'nın sıfırda tutulmasının sağlanması için herhangi bir YDKKK için $\sigma, \dot{\sigma}, \dots, \sigma^{(r-1)}$ değerlerinin de sağlanması gerekmektedir. Bu koşulun dışında kalan tek durum 2- kayma modu içerisinde yer alan Super Twisting (Süper Büküm) algoritmasıdır [19, 23, 83]. Bu algortmada sadece σ 'nın ölçülmesi yeterli olmaktadır.

3.4.1. 2-Kayma Modu Dinamikleri

Kontrolcülü bir non lineer dinamik sistem ve kayma yüzeyi aşağıdaki gibi tanımlanırsa,

$$\dot{x} = f(t, x, u) \quad (3.24)$$

$$\sigma = \sigma(t, x) \quad (3.25)$$

Rölatif derecesi (r) için aşağıdaki şartlar geçerli olmaktadır.

$$r = 1, \quad \frac{\partial}{\partial u} \dot{\sigma} \neq 0 \quad (3.26)$$

$$r \geq 2, \quad \frac{\partial}{\partial u} \sigma^{(i)} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, r-1), \quad \frac{\partial}{\partial u} \sigma^{(r)} \neq 0 \quad (3.27)$$

Bu verilen forma göre

$$\dot{\sigma} = \frac{\partial}{\partial t} \sigma(t, x) + \frac{\partial}{\partial x} \sigma(t, x) f(t, x, u) \quad (3.28)$$

$$\ddot{\sigma} = \frac{\partial}{\partial t} \dot{\sigma}(t, x, u) + \frac{\partial}{\partial x} \dot{\sigma}(t, x, u) f(t, x, u) + \frac{\partial}{\partial u} \dot{\sigma}(t, x, u) \dot{u}(t) \quad (3.29)$$

2-kayma modu kontrolcü kuralının amacı, kısıt fonksiyonu olan σ 'nın sonlu zamanda sıfırda tutulmasını sağlamaktır.

3.4.2. Super-Twisting Algoritması (STA)

Bu algoritma relatif derecesi 1 olan sistemlerin çatırtı problemini ortadan kaldırmak üzere tasarlanmıştır [83]. Sistemin sürekli kontrol işareti olan $u(t)$ iki terimden oluşmaktadır. Birinci terim süreksiz zaman türevini, diğer terim fonksiyonun sürekli tarafını ifade etmektedir [19].

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t) \quad (3.30)$$

$$\dot{u}_1(t) = \begin{cases} -u & \text{eğer } |u| > 1 \\ -W \operatorname{sign}(\sigma) & \text{eğer } |u| \leq 1 \end{cases} \quad (3.31)$$

$$u_2(t) = \begin{cases} -\lambda |\sigma_0|^\rho \operatorname{sign}(\sigma) & \text{eğer } |\sigma| > \sigma_0 \\ -\lambda |\sigma|^\rho \operatorname{sign}(\sigma) & \text{eğer } |\sigma| \leq \sigma_0 \end{cases} \quad (3.32)$$

Algoritma Yeterli Şartları aşağıdaki denklemler yardımıyla verilmektedir.

$$W > \frac{\Phi}{\Gamma_m} \quad (3.33)$$

$$\lambda^2 > \frac{4\Phi\Gamma_M(W + \Phi)}{\Gamma_m^2\Gamma_m(W - \Phi)} \quad (3.34)$$

$$0 < \rho \leq 0.5 \quad (3.35)$$

Kontrol sistemleri kontrol işaretine lineer bağımlı ise kontrolcü basitleştirilebilir. U sınırlı olmaz ve $\sigma_0 = \infty$ şekline gelir.

$$\begin{aligned} u &= -\lambda |\sigma|^{1/2} \operatorname{sign}(\sigma) + u_1 \\ \dot{u}_1(t) &= -W \operatorname{sign}(\sigma) \end{aligned} \quad (3.36)$$

3.5. SUPER-TWISTING YÜKSEK DERECELİ KAYAN KIPLI KONTROL ALGORİTMASIYLA İLGİLİ KARARLILIK ANALİZİ

Non-linear bir sistem aşağıdaki şekilde ifade edildiğinde

$$\dot{\sigma} = f(t, \sigma) + u \quad (3.37)$$

İfadedeki $f(t, \sigma)$ bilinmeyen sınırlı pertürbasyon terimi aşağıdaki şartı sağlarsa

$$|f(t, \sigma)| \leq \delta |\sigma|^{1/2} \quad \delta > 0 \quad (3.38)$$

Super-Twisting Algoritmasının kontrolcü denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$u = -k_1 |\sigma|^{1/2} \text{sign}(\sigma) + v \quad (3.39)$$

$$\dot{v} = -k_2 \text{sign}(\sigma) \quad (3.40)$$

(3.37) denkleminde (3.39) denklemi yerine yazılırsa

$$\dot{\sigma} = -k_1 |\sigma|^{1/2} \text{sign}(\sigma) + v + f(t, \sigma) \quad (3.41)$$

$$\dot{v} = -k_2 \text{sign}(\sigma) \quad (3.42)$$

elde edilir.

Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilir [84].

$$V = 2k_2 |\sigma| + \frac{1}{2} v^2 + \frac{1}{2} (k_1 |\sigma|^{1/2} \text{sign}(\sigma) - v)^2 \quad (3.43)$$

Seçilen bu Lyapunov fonksiyonu aşağıda verilen ξ ve \mathbf{P} matrisleri yardımıyla kuadratik formda yazılır,

$$V = \xi^T \mathbf{P} \xi \quad (3.44)$$

$$\xi^T = \left[|\sigma|^{1/2} \text{sign}(\sigma) \quad v \right] \quad (3.45)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 2k_2 + \frac{k_1^2}{2} & -\frac{k_1}{2} \\ -\frac{k_1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Bu durumda Lyapunov Fonksiyonunun zamana göre türevi de aşağıdaki şekilde kuadratik formda ifade edilebilir.

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \dot{\xi}^T \mathbf{P} \xi + \xi^T \mathbf{P} \dot{\xi} \\ &= \dot{\sigma} \text{sign}(\sigma) \left(2k_2 + \frac{1}{2} k_1^2 \right) - k_1 \dot{\nu} |\sigma|^{1/2} \text{sign}(\sigma) - \frac{k_1 \nu \dot{\sigma}}{2 |\sigma|^{1/2}} + 2 \dot{\nu} \nu\end{aligned}\quad (3.47)$$

Lyapunov fonksiyonun zamana göre türevinde (3.41) ve (3.42) kontrolcü denklemleri yerine yazılırsa Lyapunov fonksiyonun türevi

$$\dot{V} = -\frac{1}{|\sigma|^{1/2}} \xi^T \mathbf{Q} \xi + \frac{f(t, \sigma)}{|\sigma|^{1/2}} q_1^T \xi \quad (3.48)$$

şeklinde olur [84]. İfadedeki matrisler aşağıda verilmiştir.

$$\mathbf{Q} = \frac{k_1}{2} \begin{bmatrix} 2k_2 + k_1^2 & -k_1 \\ -k_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

$$q_1^T = \begin{bmatrix} 2k_2 + \frac{1}{2} k_1^2 & -\frac{1}{2} k_1 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Sınırlı pertürbasyon terimi içeren Lyapunov fonksiyonun türevi (3.48) ifadesi aşağıda verilen form ile ifade edilmiştir [85].

$$\dot{V} = -\frac{k_1}{2 |\sigma|^{1/2}} \xi^T \tilde{\mathbf{Q}} \xi \quad (3.51)$$

(3.51)'de kullanılan $\tilde{\mathbf{Q}}$ matrisi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\tilde{\mathbf{Q}} = \begin{bmatrix} 2k_2 + k_1^2 - \left(\frac{4k_2}{k_1} + k_1 \right) \delta & -k_1 + \frac{\delta}{2} \\ -k_1 + \frac{\delta}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

Sonuç olarak $f(t, \sigma)$ bilinmeyen sınırlı pertürbasyon terimi $|f(t, \sigma)| \leq \delta |\sigma|^{1/2}$, $\delta > 0$ şartını sağlarsa Lyapunov fonksiyonun türevi (3.47) aşağıdaki şartı sağlamaktadır ve

$$\dot{V} \leq -\frac{k_1}{2|\sigma|^{1/2}} \xi^T \tilde{\mathbf{Q}} \xi \text{ formunda yazılabilir.}$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\left(k_1 k_2 + \frac{k_1^3}{2}\right) |\sigma|^{1/2} + k_1^2 \nu \text{sign}(\sigma) - \frac{k_1 \nu^2}{2|\sigma|^{1/2}} + f(t, \sigma) \left(2k_2 + \frac{1}{2} k_1^2\right) \text{sign}(\sigma) - \frac{k_1 \nu}{2} \frac{|f(t, \sigma)|}{|\sigma|^{1/2}} \\ &\leq -\left(k_1 k_2 + \frac{k_1^3}{2}\right) |\sigma|^{1/2} + k_1^2 \nu \text{sign}(\sigma) - \frac{k_1 \nu^2}{2|\sigma|^{1/2}} + \delta |\sigma|^{1/2} \left(2k_2 + \frac{1}{2} k_1^2\right) - \frac{k_1 \nu}{2} \delta \text{sign}(\sigma) \end{aligned} \quad (3.53)$$

$\tilde{\mathbf{Q}} > 0$ şartını sağlaması durumunda Lyapunov fonksiyonun türevi negatif tanımlıdır.

$\tilde{\mathbf{Q}}$ Matrisinin Sylvester kriterine göre analizi sonucunda kontrolcü katsayıları için aşağıdaki kriterlere ulaşılır.

$$2k_2 + k_1^2 - \left(\frac{4k_2}{k_1} + k_1\right) \delta > 0 \quad (3.54)$$

$$\left(2k_2 + k_1^2 - \left(\frac{4k_2}{k_1} + k_1\right) \delta\right) - \left(-k_1 + \frac{\delta}{2}\right)^2 > 0 \quad (3.55)$$

$$k_2 > \frac{\delta^2 k_1}{8(k_1 - 2\delta)} \quad (3.56)$$

$$k_1 > 2\delta \quad (3.57)$$

3.6. SUPER-TWISTING YÜKSEK DERECELİ KAYAN KIPLI KONTROL ALGORİTMASINDA KESTİRİMLİ EŞDEĞER KONTROL KUVVETİ KULLANIMI İLE İLGİLİ KARARLILIK ANALİZİ

Non-linear bir sistem aşağıdaki şekilde ifade edildiğinde;

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.58)$$

$$\dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + g(x_1, x_2) \bar{u} + \bar{d} \quad (3.59)$$

Kayma yüzeyi aşağıda gibi seçilsin,

$$\sigma = \alpha(x_{1r} - x_1) + (\dot{x}_{1r} - \dot{x}_1) \quad (3.60)$$

Kayma yüzeyinin zamana göre türevi,

$$\dot{\sigma} = \alpha(x_{2r} - x_2) + \dot{x}_{2r} - f(x_1, x_2) - g(x_1, x_2)\bar{u} - \bar{d} \quad (3.61)$$

(3.61) denklemini için değişkenler aşağıda verilen şekilde yeniden tanımlanırsa,

$$\phi(x) = \alpha(x_{2r} - x_2) + \dot{x}_{2r} - f(x_1, x_2) \quad (3.62)$$

$$u = -g(x_1, x_2)\bar{u} \quad (3.63)$$

$$d = -\bar{d} \quad (3.64)$$

Kayma yüzeyinin türevi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{\sigma} = \phi(x_1, x_2) + u + d \quad (3.65)$$

Kayma yüzeyinin türevi olan (3.65) denkleminin limit durumu $\dot{\sigma} = 0$, sistemin eşdeğer kontrolcü kuvveti u_{eq} 'yi verecektir. Burada bozucu etki d , $|d| \leq \Delta |\sigma|^{1/2}$, $\Delta > 0$ şeklinde sınırlıdır. Nominal sistem $d = 0$ olması durumunda eşdeğer kontrol kuvveti:

$$u_{eq} = -\phi(x_1, x_2) \quad (3.66)$$

olarak hesaplanır. Super-Twisting Algoritmasının kontrolcü denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$u_{dc} = -k_1 |\sigma|^{1/2} \text{sign}(\sigma) + v \quad (3.67)$$

$$\dot{v} = -k_2 \text{sign}(\sigma) \quad (3.68)$$

Bu durumda kullanılacak olan kontrolcü kuvveti, eşdeğer kontrolcü kuvvetinin de eklenmesi ile,

$$u = u_{eq} + u_{dc} \quad (3.69)$$

haline gelir. Önerilen (3.65) formunda elde edilen (3.69) kontrolcü ifadesi yerine yazılırsa,

$$\dot{\sigma} = \phi(x) - k_1 |\sigma|^{1/2} \text{sign}(\sigma) + \int -k_2 \text{sign}(\sigma) - \phi(x) + d(\sigma, t) \quad (3.70)$$

$$\dot{\sigma} = -k_1 |\sigma|^{1/2} \text{sign}(\sigma) + \int -k_2 \text{sign}(\sigma) + d(\sigma, t) \quad (3.71)$$

denkleminde ulaşılır. Bu ifade sonucunda (3.37) denkleminde belirtilen $\dot{\sigma} = f(t, \sigma) + u$ durumuna benzer ifadeye ulaşılır. İfadedeki $f(t, \sigma)$ terimi yerine, bozucu etki $d(\sigma, t)$ terimi gelmektedir. Sonuç olarak $d(\sigma, t)$ bozucu etki terimi $|d(t, \sigma)| \leq \Delta |\sigma|^{1/2}$ şartını sağlarsa Lyapunov fonksiyonunun türevi (3.47) aşağıdaki şartı sağlamaktadır.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\left(k_1 k_2 + \frac{k_1^3}{2}\right) |\sigma|^{1/2} + k_1^2 v \text{sign}(\sigma) - \frac{k_1 v^2}{2 |\sigma|^{1/2}} + d(t, \sigma) \left[\left(2k_2 + \frac{1}{2} k_1^2\right) \text{sign}(\sigma) - \frac{k_1 v}{2 |\sigma|^{1/2}} \right] \\ &\leq -\left(k_1 k_2 + \frac{k_1^3}{2}\right) |\sigma|^{1/2} + k_1^2 v \text{sign}(\sigma) - \frac{k_1 v^2}{2 |\sigma|^{1/2}} + \Delta \left(2k_2 + \frac{1}{2} k_1^2\right) |\sigma|^{1/2} - \frac{k_1 v}{2} \Delta \text{sign}(\sigma) \end{aligned} \quad (3.72)$$

Bu durumda $\dot{V} \leq -\frac{k_1}{2 |\sigma|^{1/2}} \xi^T \tilde{\mathbf{Q}} \xi$ formunda yazılabilir. Bu form ile daha önce kullanılan

$\tilde{\mathbf{Q}}$ matrisine benzer (3.73) matrisi ile katsayılar belirlenmiştir.

$$\tilde{\mathbf{Q}} = \begin{bmatrix} 2k_2 + k_1^2 - \left(\frac{4k_2}{k_1} + k_1\right) \Delta & -k_1 + \frac{\Delta}{2} \\ -k_1 + \frac{\Delta}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

$\tilde{\mathbf{Q}}$ matrisin Sylvester Kriterine göre incelenmesi sonucunda aşağıdaki ifadelere ulaşılır.

$$2k_2 + k_1^2 - \left(\frac{4k_2}{k_1} + k_1\right) \Delta > 0 \quad (3.74)$$

$$\left(2k_2 + k_1^2 - \left(\frac{4k_2}{k_1} + k_1\right)\Delta\right) - \left(-k_1 + \frac{\Delta}{2}\right)^2 > 0 \quad (3.75)$$

$$k_2 > \frac{\Delta^2 k_1}{8(k_1 - 2\Delta)} \rightarrow k_1 > 2\Delta \quad (3.76)$$

Eşdeğer kontrol kuvvetinin analitik olarak hesaplanmasının mümkün olmaması durumu için, eşdeğer kontrolcü kuvvetinin toplam kontrol kuvvetinin içindeki bir bileşen olduğu kabulü [86] yapılarak kestirimi yapılması yoluna gidilmesi düşünülmektedir. Bu nedenle toplam kontrolcü kuvveti, alçak geçirimli bir filtreden geçilerek eşdeğer kontrol kuvvetinin kestirimi yapılmaktadır.

$$\hat{u}_{eq} = \frac{\tau}{s + \tau} u \quad (3.77)$$

Böylece nihai kontrol kuralı şöyle yazılabilir.

$$\bar{u} = -g^{-1}(x_1, x_2) u \quad (3.78)$$

$$u = \hat{u}_{eq} + u_{dc} \quad (3.79)$$

$$u = \hat{u}_{eq} - k_1 |\sigma|^{1/2} \text{sign}(\sigma) + v \quad (3.80)$$

$$\dot{v} = -k_2 \text{sign}(\sigma) \quad (3.81)$$

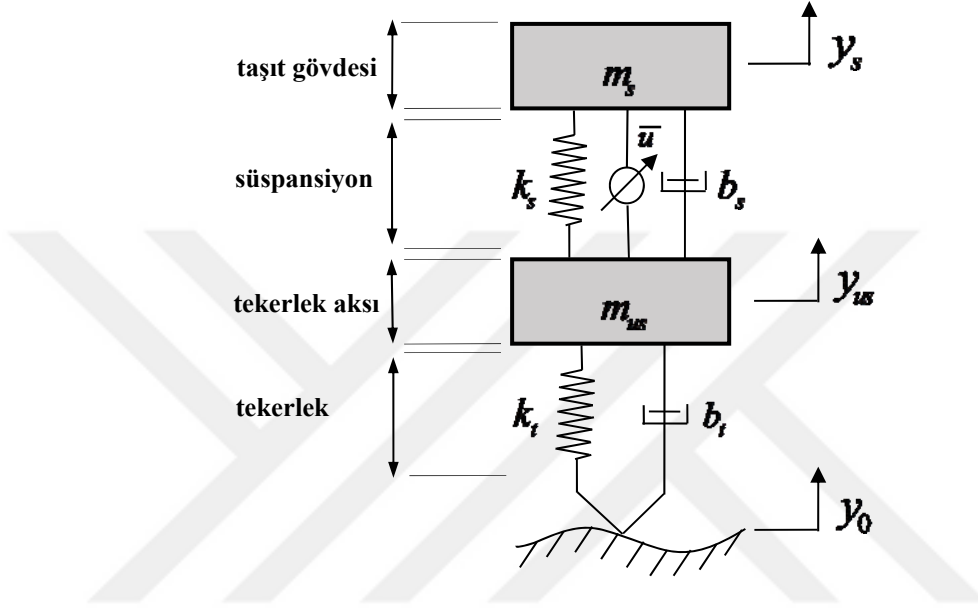
$$\dot{\hat{u}}_{eq} = \tau (u - \hat{u}_{eq}) \quad (3.82)$$

3.7. TEZDE KULLANILAN MEKANİK SİSTEMLERİN FİZİKSEL VE MATEMATİKSEL MODELLERİ

3.7.1. Çeyrek Taşıt Modeli

Bilgisayar benzetimlerinde, çalışmada kullanılacak çeyrek taşıt modeli gerçek aktif kontrolcülü süspansiyon sistem davranışını çok iyi bir şekilde modellemektedir. Çeyrek taşıt aktif süspansiyon modeli Şekil 3.4'de gösterilmektedir. Mekanik sistem modeli üzerinde Lagrange yöntemi yardımıyla hareket denklemleri elde edilecektir. Kayma yüzeyi tercih edilerek, sistemin kontrolü için kontrolcü tasarımı yapılacaktır. Fiziksel

modelde görülen m_s ve m_{us} sırasıyla taşıt kütlesi ve aks kütlesini; k_t ve k_s tekerlek ve süspansiyonun yay katsayılarını; b_t ve b_s tekerlek ve süspansiyonun sönüm katsayılarını ifade etmektedir. Sisteme uygulanan yol girişi y_0 ; taşıt kütlesi ve aks kütlesinin düşey yöndeki yer değiştirmelerini ise y_s ve y_{us} göstermektedir.



Şekil 3.4: Çeyrek taşıt aktif süspansiyon modeli

Sistemin serbestlik derecesi 2'dir. Genelleştirilmiş koordinatlar; y_s , y_{us} olarak seçilmiştir. Sistemin hareket denklemleri aşağıda gösterildiği gibidir.

1. hareket denklemi;

$$m_{us}\ddot{y}_{us} + b_t(\dot{y}_{us} - \dot{y}_0) - b_s(\dot{y}_s - \dot{y}_{us}) + k_t(y_{us} - y_0) - k_s(y_s - y_{us}) = -\bar{u} - \tilde{d} \quad (3.83)$$

2. hareket Denklemi;

$$m_s\ddot{y}_s + b_s(\dot{y}_s - \dot{y}_{us}) + k_s(y_s - y_{us}) = \bar{u} + \tilde{d} \quad (3.84)$$

Kontrolcülü dinamik sistemin, durum denklemlerini elde etmek için gerekli dönüşümler yapılırsa,

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} y_s & \dot{y}_s & y_{us} & \dot{y}_{us} \end{bmatrix}^T \quad (3.85)$$

aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.86)$$

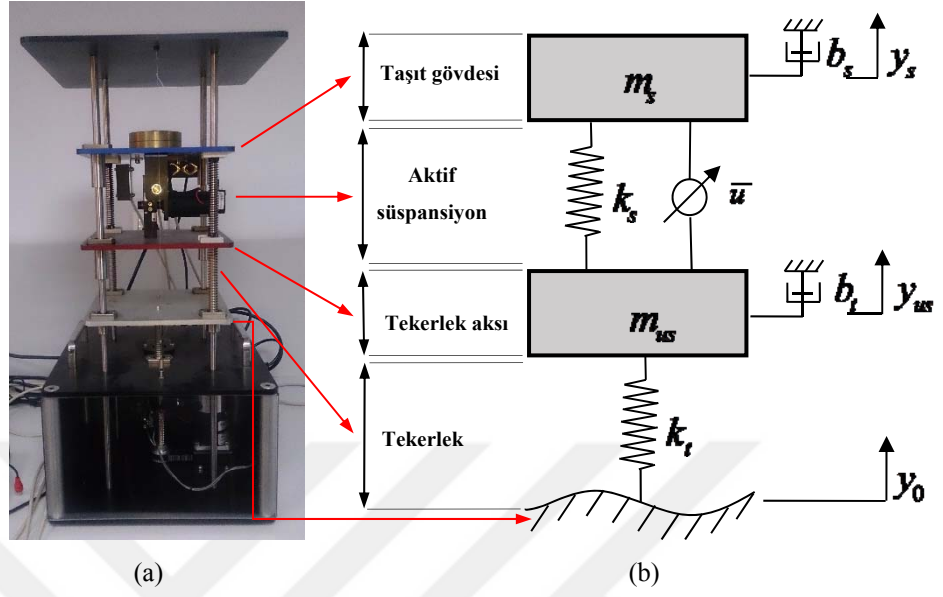
$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{m_s} \left[b_s (x_2 - x_4) + k_s (x_1 - x_3) \right] + \frac{1}{m_s} \bar{u} + \bar{d} \quad (3.87)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \quad (3.88)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{m_{us}} \left[b_s (x_2 - x_4) - b_t (x_4) - k_t (x_3) + k_s (x_1 - x_3) + b_t \dot{y}_0 + k_t y_0 \right] - \frac{1}{m_{us}} \bar{u} - \bar{d} \quad (3.89)$$

3.7.2. Deneysel Çeyrek Taşıt Modeli (Quanser)

Bu bölümde laboratuvar ortamında bulunan aktif süspansiyonlu deneysel çeyrek taşıt modeli tanıtılacaktır. Sistemin fiziksel modeli Şekil 3.5’de, deneysel sistemin kurulumu Şekil 3.6’da verilmektedir. Deneysel sistem aktif süspansiyonlu çeyrek taşıt modeli (Quanser), yükseltici (amplifikatör), veri toplama kartı ve bilgisayardan oluşmaktadır. En üstte yer alan plaka taşıt ana kütlesi m_s , ortada yer alan plaka aks kütlesi m_{us} , en altta yer alan plaka ise yol girişini sağlayan ve DC motorla tahrik edilen yol giriş plakasıdır. Tekerlek ve süspansiyonun yay katsayıları sırasıyla k_t ve k_s ile gösterilmektedir. Sönümlenme lineer olarak hareket eden yataklama elemanlarından sağlanmaktadır ve sönüm katsayıları b_s ve b_t ile gösterilmektedir. Bir ivmeölçer ile ana gövdenin ivmesi ölçülmektedir. Yol girişi (y_0), süspansiyon açıklığı ($y_s - y_{us}$) ve taşıt gövdesi yer değiştirmesi (y_s) üç adet enkoder ile ölçülmektedir. Taşıt kütlesi plakası ve aks kütlesi plakası arasında bulunan bir DC motor titreşimlerinin azaltılması için gerekli kuvveti (\bar{u}) üretmektedir. Gerçek zamanlı Quarc yazılımı ile örnekleme zamanı 0.001 s olacak şekilde sistem kontrol edilebilmektedir. Deneysel taşıt modelinin parametreleri Tablo 3.1’de verilmektedir.

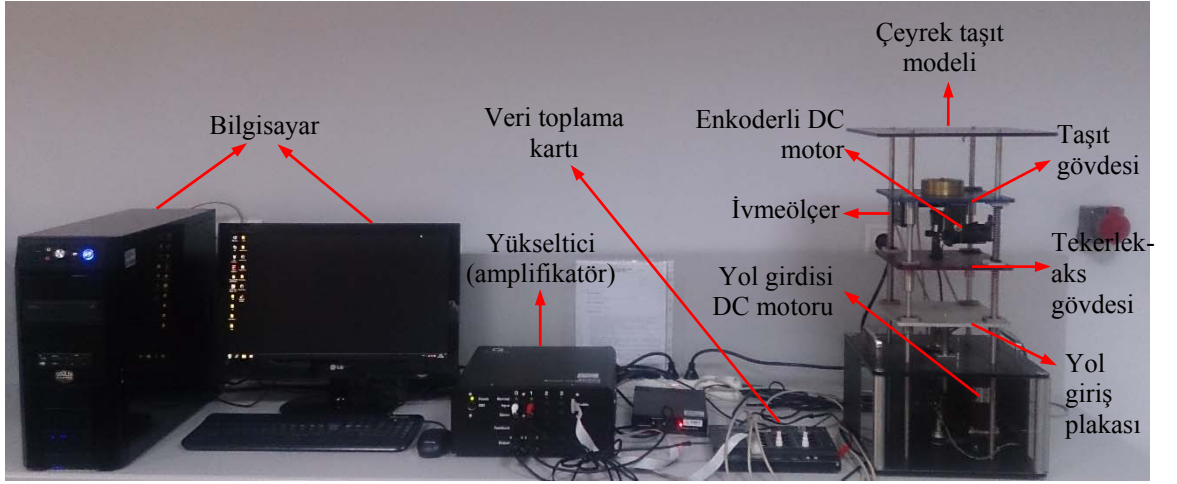


Şekil 3.5: Deneysel çeyrek taşıt fiziksel modeli

Lagrange yöntemiyle bulunan deneysel sistemin hareket denklemleri aşağıda verilmektedir. Sistemde sönümlenme lineer elemanla sağlanmakta olduğundan hareket denklemlerinde değişiklik görülmektedir. Fakat kontrolcü terimlerinde herhangi bir değişiklik olmamaktadır.

$$m_{us}\ddot{y}_{us} + b_t(\dot{y}_{us}) - b_s(\dot{y}_s) + k_t(y_{us} - y_0) - k_s(y_s - y_{us}) = -\bar{u} - \tilde{d} \quad (3.90)$$

$$m_s\ddot{y}_s + b_s(\dot{y}_s) + k_s(y_s - y_{us}) = \bar{u} + \tilde{d} \quad (3.91)$$



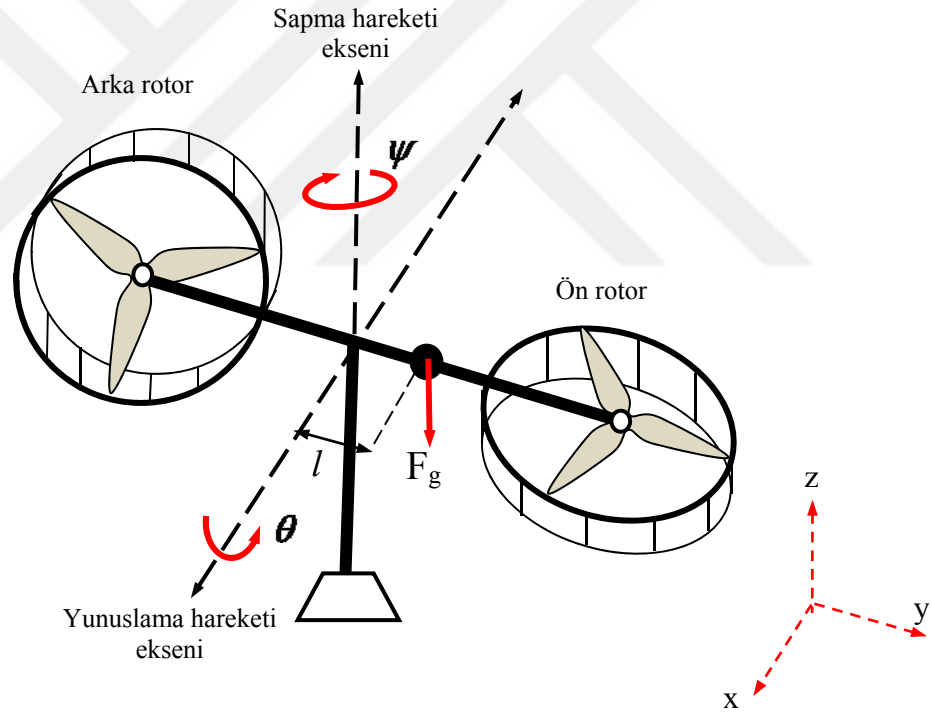
Şekil 3.6: Deneysel çeyrek taşıt sistemi

Tablo 3.1: Deneysel çeyrek taşıt sistem parametreleri

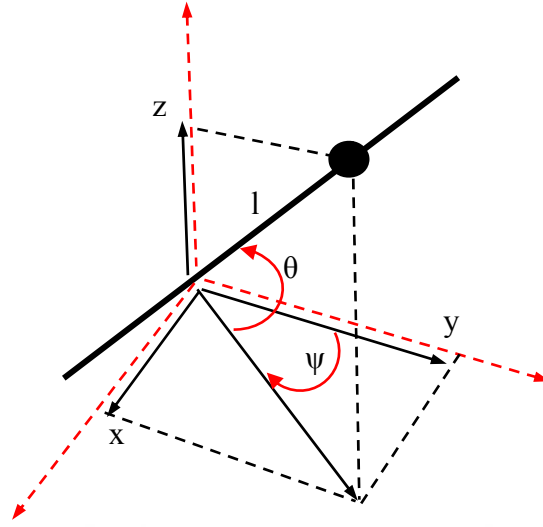
Parametre	Sembol	Değer	Birim
Tekerlek kütlesi	m_{ts}	1	kg
Araç gövdesi kütlesi	m_s	2.45	kg
Tekerlek yay katsayısı	k_t	2500	N/m
Süspansiyon yay katsayısı	k_s	900	N/m
Tekerlek sönüm katsayısı	b_t	5	Ns/m
Süspansiyon sönüm katsayısı	b_s	7.50	Ns/m

3.7.3. Çift rotorlu sistem modeli

Bu bölümde aktif kontrolcülü çift rotorlu sistem modeli tanıtılacaktır. Sistemin fiziksel modeli Şekil 3.7'de gösterilmektedir. Çalışmada kullanılacak sistem çift rotorlu bir modeldir. Bu model hava taşıtlarında oluşacak çapraz dinamik etkileri laboratuvar ortamında önemli ölçüde yansıtabilmektedir. Mekanik sistem modeli üzerinde Lagrange yöntemiyle hareket denklemleri elde edilecektir. Kayma yüzeyi tercih edilerek, sistemin kontrolü için kontrolcü tasarımı yapılacaktır. Fiziksel modelde görülen θ ve ψ sırasıyla yunuslama (pitch) ve sapma (yaw) eksenlerinde oluşan açısal değişimi, l ağırlık merkezinin eksen takımının orijininden olan mesafesini, F_g ağırlık kuvvetini göstermektedir.



Şekil 3.7: Çift rotorlu sistem fiziksel modeli



Şekil 3.8: Konum vektörlerinin gösterimi

Koordinat Dönüşümü Şekil 3.8'e göre yapılır.

$$x = l \sin(\psi) \cos(\theta) \quad (3.92)$$

$$y = l \cos(\psi) \cos(\theta) \quad (3.93)$$

$$z = l \sin(\theta) \quad (3.94)$$

Sistemin serbestlik derecesi 2'dir. Genel koordinatlar θ , ψ olarak seçilmiştir.

Sistemin 1. hareket denklemi;

$$m_{hel} l^2 \ddot{\theta} + I_{pitch} \ddot{\theta} + m_{hel} l^2 \dot{\psi}^2 \cos(\theta) \sin(\theta) + B_{pitch} \dot{\theta} + m_{hel} g l \cos(\theta) = \bar{\tau}_{\theta} + \tilde{d}_{\theta} \quad (3.95)$$

Sistemin 2. hareket denklemi;

$$m_{hel} l^2 \ddot{\psi} \cos^2(\theta) - 2m_{hel} l^2 \dot{\theta} \dot{\psi} \cos(\theta) \sin(\theta) + I_{yaw} \ddot{\psi} + B_{yaw} \dot{\psi} = \bar{\tau}_{\psi} + \tilde{d}_{\psi} \quad (3.96)$$

Kontrolcülü non-lineer dinamik sistemin, durum denklemleri

$$[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [\theta \ \dot{\theta} \ \psi \ \dot{\psi}]^T \quad (3.97)$$

dönüşümü kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.98)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{-m_{hel}l^2(x_4)^2 \cos(x_1) \sin(x_1) - B_{pitch}(x_2) - m_{hel}gl \cos(x_1)}{(m_{hel}l^2 + I_{pitch})} + \frac{\bar{\tau}_\theta}{(m_{hel}l^2 + I_{pitch})} + \bar{d}_\theta \quad (3.99)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \quad (3.100)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{2m_{hel}l^2(x_2)(x_4) \cos(x_1) \sin(x_1) - B_{yaw}(x_4)}{m_{hel}l^2 \cos^2(x_1) + I_{yaw}} + \frac{\bar{\tau}_\psi}{m_{hel}l^2 \cos^2(x_1) + I_{yaw}} + \bar{d}_\psi \quad (3.101)$$

Kontrolcü terimlerinin voltaj sinyallerine dönüştürülmesi aşağıdaki denklemler yardımıyla yapılmaktadır.

$$\bar{\tau}_\theta = K_{pp}V_{mp} + K_{py}V_{my} \quad (3.102)$$

$$\bar{\tau}_\psi = K_{yp}V_{mp} + K_{yy}V_{my} \quad (3.103)$$

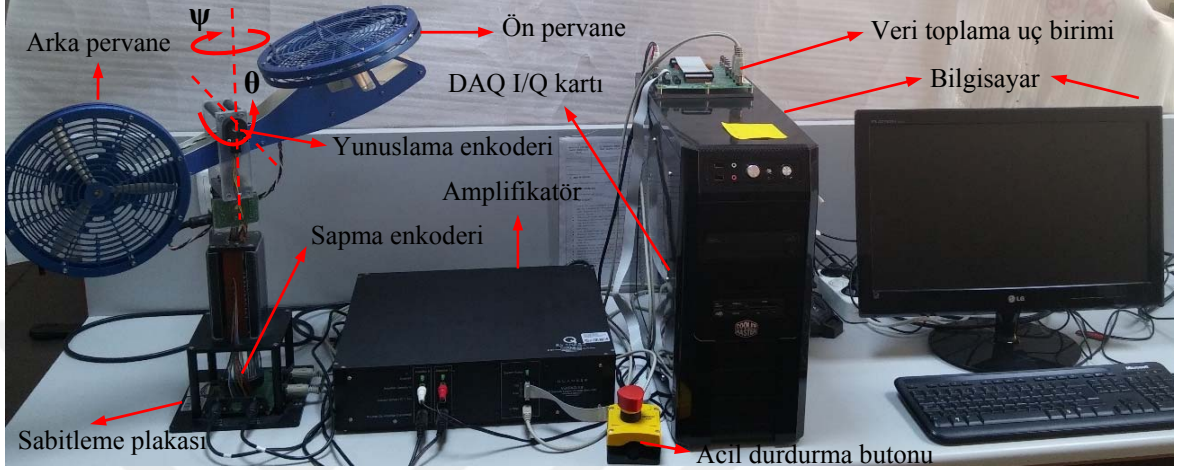
$$V_{mp} = \frac{K_{py}\bar{\tau}_\psi - K_{yy}\bar{\tau}_\theta}{K_{yp}K_{py} - K_{yy}K_{pp}} \quad (3.104)$$

$$V_{my} = \frac{K_{pp}\bar{\tau}_\psi - K_{yp}\bar{\tau}_\theta}{K_{pp}K_{yy} - K_{yp}K_{py}} \quad (3.105)$$

3.7.4. Deneysel Çift Rotorlu Sistem Modeli (Quanser)

Bu bölümde laboratuvar ortamında bulunan deneysel çift rotorlu sistem modeli tanıtılacaktır. Deneysel sistemin kurulumu Şekil 3.9'de verilmektedir. Deneysel çift rotorlu sistem modeli (Quanser), yükseltici (amplifikatör), veri toplama kartı, veri toplama uç birimi, sapma ve yunuslama hareketlerini sağlayan motorlar, enkoderler ve bilgisayardan oluşmaktadır. İki adet DC motorla tahrik edilen pervaneler, modeldeki sapma ve yunuslama hareketleri kontrol etmek için kuvvet üretmektedir. Yunuslama hareketi (θ), sapma hareketi (ψ) iki adet enkoder ile ölçülmektedir. Gerçek zamanlı

Quarc yazılımı ile örnekleme zamanı 0.001 s olarak ayarlanmıştır. Deneysel sisteme ait parametreler Tablo 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.9: Deneysel çift rotorlu sistem

Tablo 3.2: Deneysel çift rotorlu sistem parametreleri

Model Parametreleri	Sembol	Değer	Birim
Helikopter kütlesi	m_{hel}	1.3872	kg
Helikopter gövdesi uzunluğu	l	0.186	m
Yunuslama hareketi sönüm katsayısı	b_{pit}	0.8	N/V
Sapma hareketi sönüm katsayısı	b_{yaw}	0.318	N/V
Yunuslama hareketi atalet momenti	I_{pit}	0.0384	kgm ²
Sapma hareketi atalet momenti	I_{yaw}	0.0432	kgm ²
θ başlangıç değeri	θ_{bas}	-40.3	°
ψ başlangıç değeri	ψ_{bas}	0	°

Tablo 3.3: Deneysel çift rotorlu sistem elektriksel parametreler

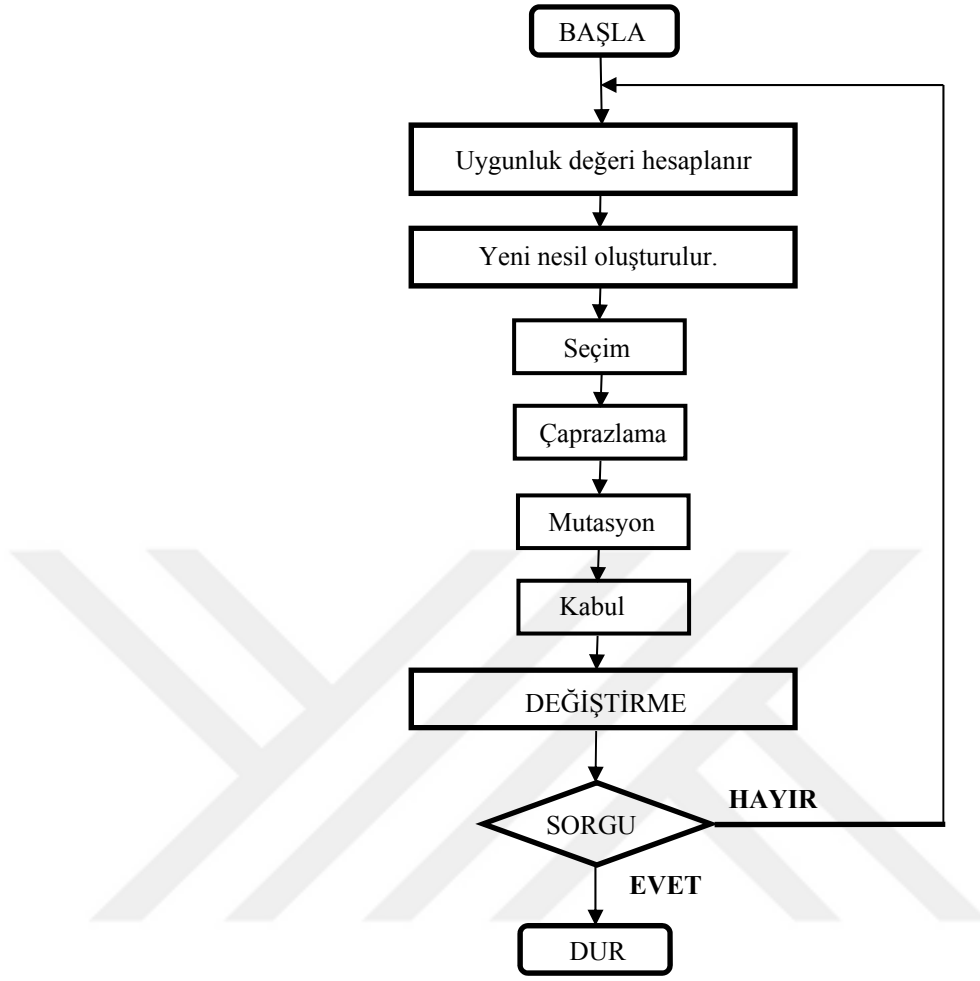
Elektriksel Motor Parametreleri	Sembol	Değer	Birim
Yunuslama motor direnci	K_{pp}	0.204	Nm/V
Sapma motor direnci	K_{py}	0.0068	Nm/V
Yunuslama motor direnci	K_{yp}	0.0219	Nm/V
Sapma motor direnci	K_{yy}	0.072	Nm/V
Yunuslama motor maksimum voltaj	V_{mp}	± 24	V
Sapma motor maksimum voltaj	V_{my}	± 24	V

3.8. SUPER-TWİSTİNG ALGORİTMASI (STA) KAZANÇ KATSAYILARIN GENETİK ALGORİTMA YARDIMIYLA TESPİTİ

Doğadaki doğal seleksiyon teorisine uygun olarak tasarlanmış bir optimizasyon tekniği olan Genetik algoritmalar ilk olarak 1973 yılında Rechenberg [45] tarafından “Evrin Stratejileri” kitabında görülmektedir. Holland [87] evrim sürecini bir bilgisayar yardımıyla kullanarak genetik algoritmaları oluşturmuştur. Goldberg [46] bu konuda yaptığı çalışmalarla genetik algoritmaların çeşitli konularda kullanılabileceğini göstermiştir. Eserinde birçok farklı bilgisayar programlama dilinde genetik algoritma tabanlı uygulamalar sunmuştur. Koza [47] genetik algoritma programlama tekniklerinin çeşitli mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılabileceğini ayrıntılı olarak göstermiştir.

Genetik algoritmaların çalışma prensibi Şekil 3.10’da gösterilmektedir. Genetik algoritmaların çalışma karakteristiğinde aşamalar bulunmaktadır. Bunlar uygunluk (kazanç) fonksiyonu değerinin hesaplanması, yeni nesillerin oluşturma, nesillerin değiştirilmesi ve fonksiyonun sorgulanması aşamalarıdır. Genetik algoritma kullanılarak çözüme ulaştırılmak istenen durum için belli bir sayıda bireyden oluşturulan bir popülasyon oluşturulur. Bireyler ikili sayı [0-1] dizilerinden oluşan kromozomlar şeklinde şifrelenerek ifade edilmektedir. Mevcut popülasyondaki bireylerin her biri için

uygunluk (kazanç) fonksiyonu değerleri hesaplanır. Ardından uygunlukları hesaplanmış bireylerin seleksiyon aşamasında iki adedi çaprazlanmak amacıyla seçilir. Seçilme işlemi farklı metotlar kullanılarak yapılabilir. Rastgele seçim yapılabildiği gibi rulet, turnuva ve deterministik metotlar da tercih edilebilmektedir. Seçilen bireylerin ata bireyler olacağı öngörülmektedir. Çaprazlama evresinde ata bireylerden yeni bireyler oluşturulur. Diğer bir evre olan mutasyon evresinde bireylerin gen dizilerinde değişiklikler yapılarak popülasyon üzerinde değişiklikler yapılır. Bu süreçler en iyi uygunluk değerine sahip bireyler oluşana kadar devam edilir. Belirlenen uygunluk şartına sahip bireyler elde edilince algoritma son bulur. Çok amaçlı genetik algoritmalarda ise yukarıda sözü edilen uygunluk(kazanç) fonksiyonu sayısı birden fazla olmaktadır. Farklı uygunluk fonksiyonların istenilen değerlerde olması kabulü yapılarak çözüm yapılır. Tüm uygunluk fonksiyonların en iyi değerlere ulaşması beklenirken, bir kısmından problemin özelliğine göre ödünleşme yapılabilir. Problemin, hedeflenen şartlara uygun çözümü bu sayede bulunmuş olur.



Şekil 3.10: Genetik algoritmanın akış şeması [88]

3.8.1. Taşıt modeli için kazanç fonksiyonları

Taşıt modeli için kullanılan kazanç fonksiyonları aşağıda gösterilmektedir. ψ_1 ile ifade edilen kazanç fonksiyonu ana kütlelin verilen referansı takip etmesindeki başarısını, ψ_2 kontrol sinyalindeki çaptırtı oluşumunu, ψ_3 ana kütlede oluşan ivme değerinin referans ekseninden kaç defa geçtiğini, ψ_4 kontrol sinyalinin ortalama değerini ve ψ_5 ivme değerinin ortalama değerini genetik algortmada kullanılmak üzere hesaplamaktadır.

$$\psi_1 = \sum_{i=1}^n |y_{sri} - y_{si}| \quad (3.106)$$

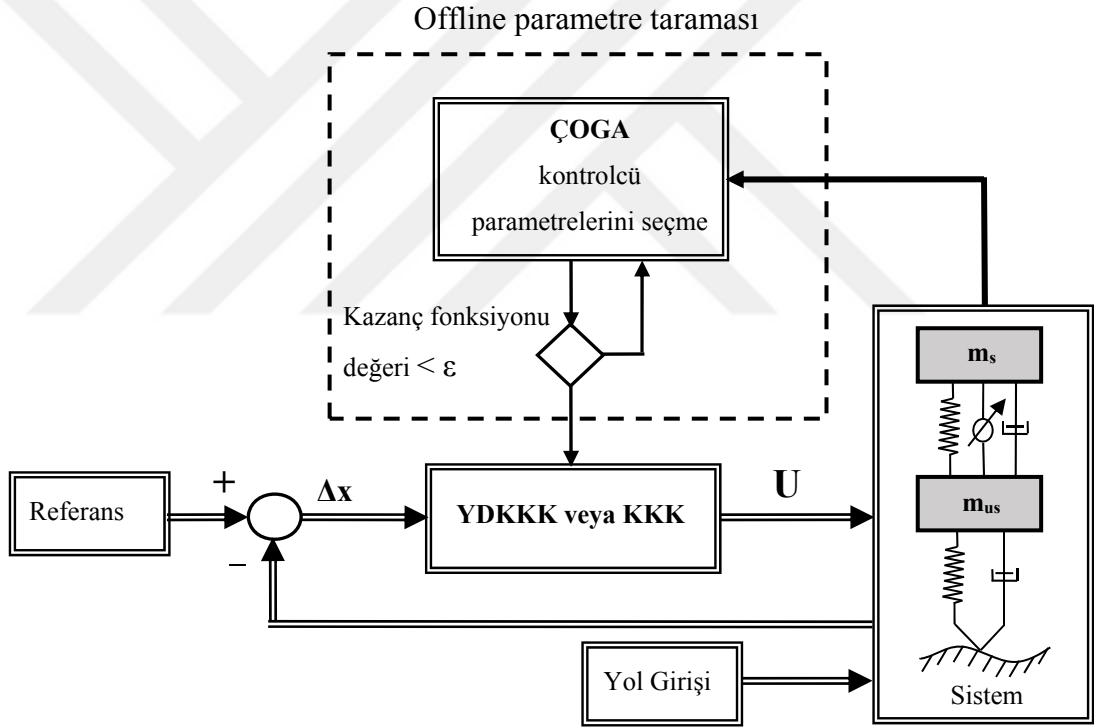
$$\psi_2 = \frac{1}{\sqrt{n}} \left[\sum_{i=1}^n (u_i)^2 \right]^{1/2} \quad (3.107)$$

$$\psi_3 = \text{boyut} \left[\ddot{y}_{si} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \ddot{y}_{si} < 0 \text{ ve } \ddot{y}_{si-1} > 0 \\ \ddot{y}_{si} > 0 \text{ ve } \ddot{y}_{si-1} < 0 \end{array} \right\} \right] \quad (3.108)$$

$$\psi_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |u_i| - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |u_i| \quad (3.109)$$

$$\psi_5 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\ddot{y}_{si}| - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\ddot{y}_{si}| \quad (3.110)$$

Sistemin kontrolcü katsayılarında belirlemekte kullanılan akış diyagramını Şekil 3.11'de gösterilmektedir.



Şekil 3.11: Çok Amaçlı Genetik Algoritma kullanılan taşıt modeli kontrolcü sisteminin akış şeması

3.8.2. Çift rotorlu sistem modeli için kazanç fonksiyonları

Çift rotorlu sistem modeli için kullanılan kazanç fonksiyonları aşağıda gösterilmektedir.

β_1, β_2 ile ifade edilen kazanç fonksiyonları yunuslama ve sapma eksenlerindeki yörünge izleme başarısını, β_3, β_4 kontrol sinyallerindeki çattırtı oluşumlarını, β_5, β_6 söz konusu

eksenlerinde oluşan ivme değerlerinin referans eksenlerinden kaç defa geçtiğini, β_7, β_8 kontrol sinyallerinin ortalama değerlerini ve β_9, β_{10} ivme değerlerinin ortalama değerlerini genetik algorithmada kullanılmak üzere hesaplamaktadır.

$$\beta_1 = \sum_{i=1}^n |\theta_{refi} - \theta_i| \quad (3.111)$$

$$\beta_2 = \sum_{i=1}^n |\psi_{refi} - \psi_i| \quad (3.112)$$

$$\beta_3 = \frac{1}{\sqrt{n}} \left[\sum_{i=1}^n (\dot{u}_{\theta_i})^2 \right]^{1/2} \quad (3.113)$$

$$\beta_4 = \frac{1}{\sqrt{n}} \left[\sum_{i=1}^n (\dot{u}_{\psi_i})^2 \right]^{1/2} \quad (3.114)$$

$$\beta_5 = \text{boyut} \left[\ddot{\theta}_i \rightarrow \left\{ \begin{array}{ll} \ddot{\theta}_i < 0 & \text{ve } \ddot{\theta}_{i-1} > 0 \\ \ddot{\theta}_i > 0 & \text{ve } \ddot{\theta}_{i-1} < 0 \end{array} \right\} \right] \quad (3.115)$$

$$\beta_6 = \text{boyut} \left[\ddot{\psi}_i \rightarrow \left\{ \begin{array}{ll} \ddot{\psi}_i < 0 & \text{ve } \ddot{\psi}_{i-1} > 0 \\ \ddot{\psi}_i > 0 & \text{ve } \ddot{\psi}_{i-1} < 0 \end{array} \right\} \right] \quad (3.116)$$

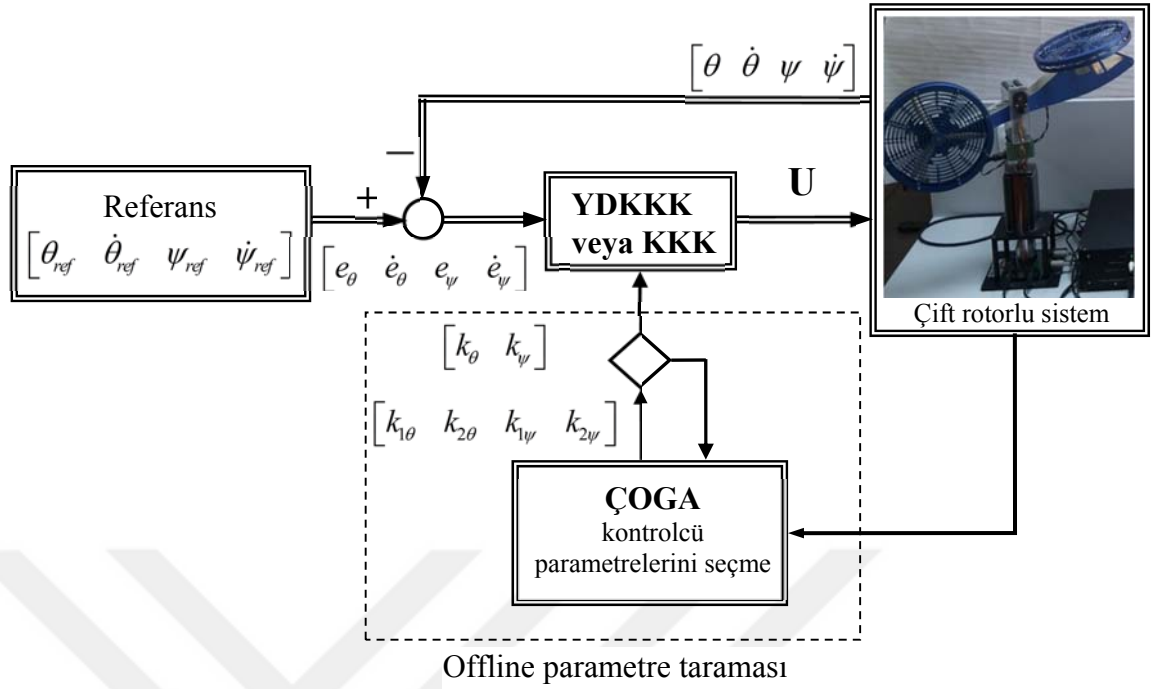
$$\beta_7 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |u_{\theta_i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |u_{\theta_i}| \quad (3.117)$$

$$\beta_8 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |u_{\psi_i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |u_{\psi_i}| \quad (3.118)$$

$$\beta_9 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\ddot{\theta}_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\ddot{\theta}_i| \quad (3.119)$$

$$\beta_{10} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\ddot{\psi}_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\ddot{\psi}_i| \quad (3.120)$$

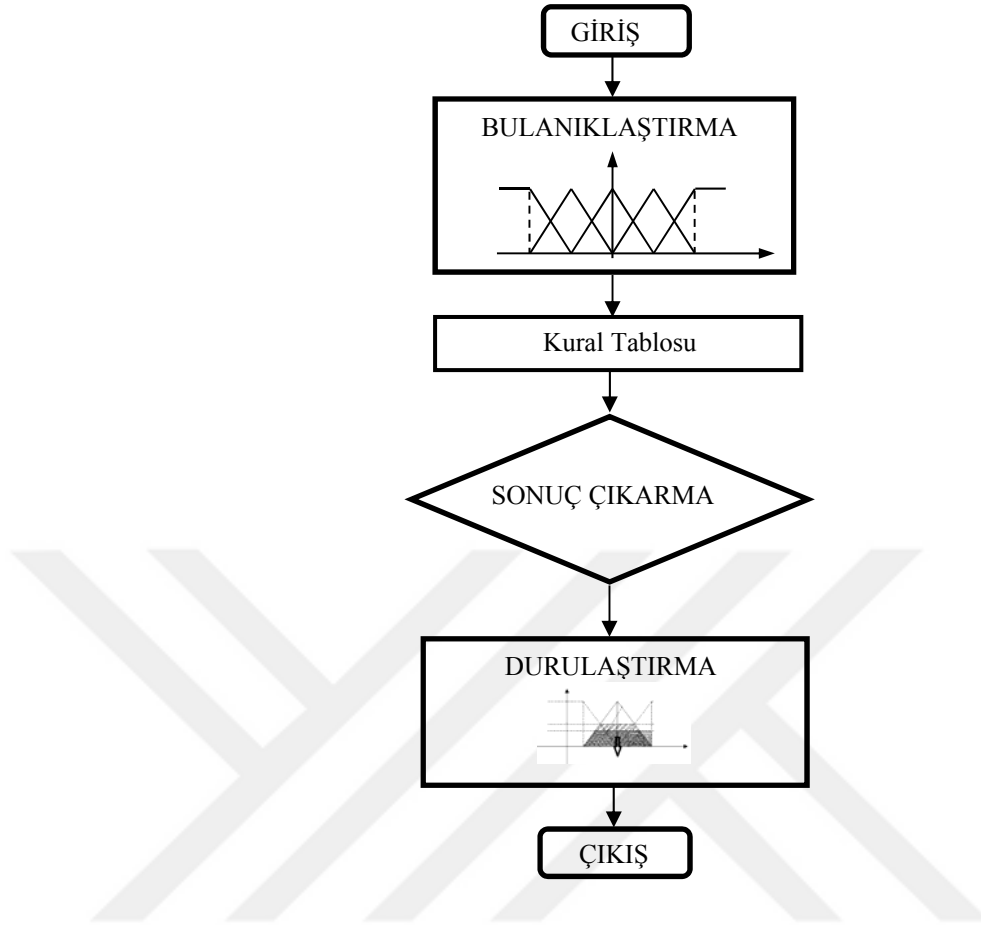
Sistemin kontrolcü katsayılarında belirlemekte kullanılan akış diyagramı Şekil 3.12'de gösterilmektedir.



Şekil 3.12: Çok Amaçlı Genetik Algoritma kullanılan çift rotorlu sistem modeli kontrolcü sisteminin akış şeması

3.9. KAYMA YÜZEYİ EĞİM PARAMETRELERİNİN BULANIK MANTIK YARDIMIYLA TESPİTİ

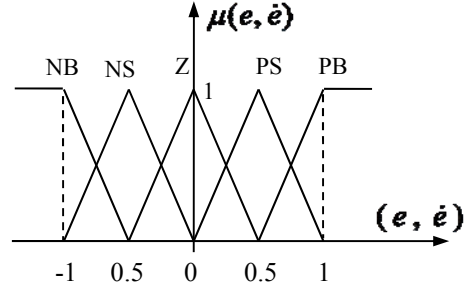
Bulanık mantık kavramı Zadeh [40], tarafından veri işleme aracı olarak tasarlanmış bir kontrol metodudur. Bulanık mantık kümelerinin üyelik özellikleri, kesin bir şekilde üye olmayı gerektirmemesi nedeniyle kısmi üyelik kavramını mümkün kılmaktadır. Tam üyeliğin 1, üye olmama durumunun 0 olduğunun kabul edildiği klasik küme mantığının aksine bulanık mantık kümelerinde üyelik [0-1] aralığında herhangi bir sayı ile tanımlanabilmektedir. Bulanık küme mantığında Zadeh, teorisini geliştirirken insanların bilgisayarlar gibi hassas hesaplama yapamamasına rağmen adaptif düşünme yeteneklerinin olmasından faydalanmıştır. Kısmi üyelik yaklaşımı bu şekilde tasarlanmıştır. 1970'li yıllara kadar kontrolcü tasarımlarında ilgi görmeyen bulanık mantıklı kontrolcüler, günümüzde farklı kontrolcülerin tasarlanmasında faydalı olmaktadır. Tercih edilme nedeni kesin bir matematiksel modele ihtiyaç duymaması ve konu hakkında tecrübe sahibi kişilerin kontrolcüyü kolaylıkla tasarlamasıdır. Bulanık mantık sırasıyla bulanıklaştırma, sonuca karar verme ve durulaştırma aşamaların gerçekleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Şekil 3.13'de bulanık mantıklı kontrolcünün akış şeması gösterilmektedir.



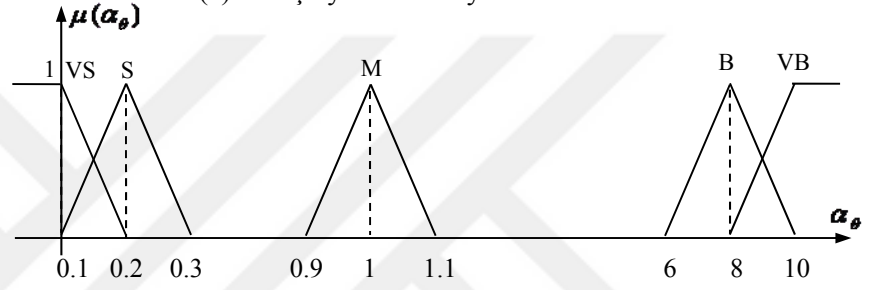
Şekil 3.13: Bulanık mantık akış şeması

Bu bölümde çift rotorlu sistem modelinin kayma yüzeyi parametreleri olan α_θ , α_ψ 'ya bulanık mantık yardımıyla karar verilmesi düşünülmektedir. Şekil 3.14'de bulanıklaştırma için kullanılacak üçgen üyelik fonksiyonları gösterilmektedir. Üyelik fonksiyonları olarak kullanılan NB, NS, Z, PS, PB değerleri sırasıyla negatif büyük, negatif küçük, sıfır, pozitif küçük ve pozitif büyük değerlerini ifade etmektedir. Kural tablosu Tablo 3.4'de verilmektedir [89]. Kural tablosuna göre hata değeri $e = x_r - x$ 'nin "NB" üyelik fonksiyonunda olması durumunda, hatanın zamana göre türev değeri $\dot{e} = \dot{x}_r - \dot{x}$ "NB" ise, çıkışın üyelik fonksiyonu "M" olmaktadır. Diğer tüm kurallar tabloda verildiği gibi yorumlanabilir. Tüm üyelik fonksiyonlarında sınırlar işlem esnasında ölçekleme faktörleri ile ölçeklendirilmiştir. α_θ değerini tayin etmek üzere giriş üyelik fonksiyonları için $s_{1\theta}$ ve $s_{2\theta}$, çıkış için $s_{3\theta}$ ölçekleme faktörleri kullanılır. Benzer şekilde α_ψ değerini tayin etmek üzere giriş üyelik fonksiyonları için $s_{1\psi}$ ve $s_{2\psi}$, çıkış için

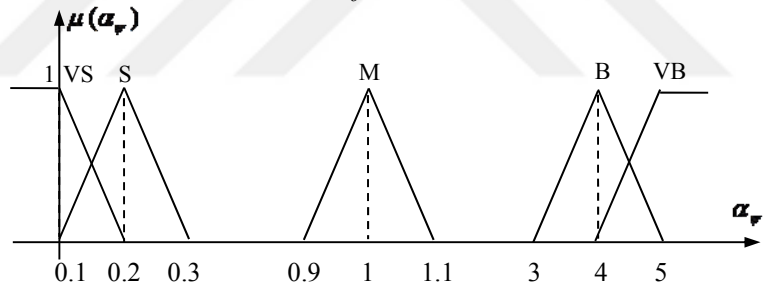
$s_{3\psi}$ ölçekleme faktörleri kullanılır. Ölçekleme faktörlerinin değerleri Tablo 3.5'de verilmektedir.



(a) Giriş üyelik fonksiyonları



(b) Çıkış α_θ üyelik fonksiyonu



(c) Çıkış α_ψ üyelik fonksiyonu

Şekil 3.14: Bulanık mantık için üyelik fonksiyonları

Tablo 3.4: Bulanık mantık kural tablosu [89]

	\dot{e}	NB	NS	Z	PS	PB
e						
NB		M	S	VS	S	M
NS		B	M	S	M	B
Z		VB	B	M	B	VB
PS		B	M	S	M	B
PB		M	S	VS	S	M

Kural tablosu incelendiğinde hata değeri e 'nin negatif olarak büyük değer alması “NB” üyelik fonksiyonunda olması, hatanın zamana göre türev değeri \dot{e} 'nin negatif olarak büyük değer alması “NB” üyelik fonksiyonunda olması ile, sistemin hata değerinin yüksek olduğu ve buna karşı kayma yüzeyinin eğiminin orta büyüklükte olması gerektiği sonucuna varılır. Böylece çıkış olan kayma yüzeyi parametreleri α_θ ve α_ψ , orta büyüklükte değerler olarak üyelik fonksiyonları “M” olacaktır. Buna karşılık hata değerinin küçük olacağını gösteren “PS” değerini alırken, hatanın türevi de en yüksek değeri alırsa “PB” , kayma yüzeyi duruma daha iyi tepki göstermek için büyük olan “B” değerini almaktadır. Hatanın yüksek olduğu “PB” değerini almasıyla beraber hatanın değişimi olan türev değerinin küçük değer alması durumunda “NS”, kayma yüzeyinin çok fazla tepki göstermesi beklenmez. Bu durumda kayma yüzeyinin değeri küçük değer olan “S” almaktadır. Ayrıca α_θ ve α_ψ değerlerinin pozitif tanımlı olmasından dolayı kayma yüzeyi hareketi ikinci ve dördüncü bölgede gerçekleşmektedir.

Tablo 3.5: Bulanık mantık ölçekleme faktörlerinin değerleri

KKK ve YDKKK	
Ölçekleme faktörü	Değer
$s_{1\theta}$	1
$s_{2\theta}$	0.01
$s_{3\theta}$	1
$s_{1\psi}$	1
$s_{2\psi}$	0.01
$s_{3\psi}$	1

4. BULGULAR

Bu bölümde ilk olarak çeşitli mekanik sistemler üzerinde klasik kayan kipli kontrol metodu ardından tasarlanan yüksek dereceli kayan kipli kontrolcünün uygulaması yapılacak ve performansı karşılaştırmalı olarak incelenecektir.

4.1. AKTİF SÜSPANSİYONLU ÇEYREK TAŞIT MODELİNİN KONTROLÜ

4.1.1. KKK ve YDKKK Tasarımları

Taşıt ana gövdesine ait hareket denklemleri (3.86)-(3.87) ile KKK için verilen (3.15)-(3.16) denklemleri kullanılırsa KKK için kontrol sinyalleri eşdeğer kontrol sinyalinin kestiriminin alçak geçirgen filtre ile yapıldığı durum için şöyle elde edilir.

$$\dot{\hat{u}}_{eq} = \tau (\bar{u} - \hat{u}_{eq}) \quad (4.1)$$

$$\bar{u} = \hat{u}_{eq} + k m_s \text{sign} \{ (\alpha (x_{1r} - x_1) + \dot{x}_{1r} - x_2) \} \quad (4.2)$$

Benzer şekilde taşıt ana gövdesine ait hareket denklemleri (3.86)-(3.87) ve önerilen YDKKK için verilen (3.78)-(3.82) denklemleri kullanılırsa YDKKK için kontrol sinyalleri şöyle bulunur.

$$\bar{u} = -m_s u \quad (4.3)$$

$$u = \hat{u}_{eq} - k_1 |\alpha (x_{1r} - x_1) + \dot{x}_{1r} - x_2|^{1/2} \text{sign} (\alpha (x_{1r} - x_1) + \dot{x}_{1r} - x_2) + v \quad (4.4)$$

$$\dot{v} = -k_2 \{ \text{sign} (\alpha (x_{1r} - x_1) + \dot{x}_{1r} - x_2) \} \quad (4.5)$$

$$\dot{\hat{u}}_{eq} = \tau (u - \hat{u}_{eq}) \quad (4.6)$$

Sonuçların karşılaştırılmasında kullanılacak performans göstergeleri aşağıda sıralanmıştır.

Sürüş konforu göstergesi:

$$SKG = \frac{1}{\sqrt{n}} \left[\sum_{i=1}^n (\ddot{y}_{si})^2 \right]^{1/2} \quad (4.7)$$

Yol tutuşu göstergesi:

$$YTG = \frac{1}{\sqrt{n}} \left[\sum_{i=1}^n (k_i (y_{usi} - y_{0i}))^2 \right]^{1/2} \quad (4.8)$$

Kontrol çabası göstergesi:

$$KÇG = \frac{1}{\sqrt{n}} \left[\sum_{i=1}^n (u_i)^2 \right]^{1/2} \quad (4.9)$$

Çatırtı göstergesi:

$$ÇG = \frac{1}{\sqrt{n}} \left[\sum_{i=1}^n (\dot{u}_i)^2 \right]^{1/2} \quad (4.10)$$

Tablo 4.1: Taşıt modeli KKK katsayıları için Çok Amaçlı Genetik Algoritma taraması sonuçları

Sıra No	ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4	ψ_5	k_s
9	0.270	38.326	18	1.325	0.518	0.466

Taşıt modeli KKK uygulaması için Çok Amaçlı Genetik Algoritma tarama sonuçları Tablo 4.1’de verilmiştir. Taramada iterasyon sayısı 112’dir.

Tablo 4.2: Taşıt modeli YDKKK katsayıları için Çok Amaçlı Genetik Algoritma taraması sonuçları

Sıra No	ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4	ψ_5	k_1	k_2
28	0.263	6.468	10	0.474	0.148	3.105	0.399

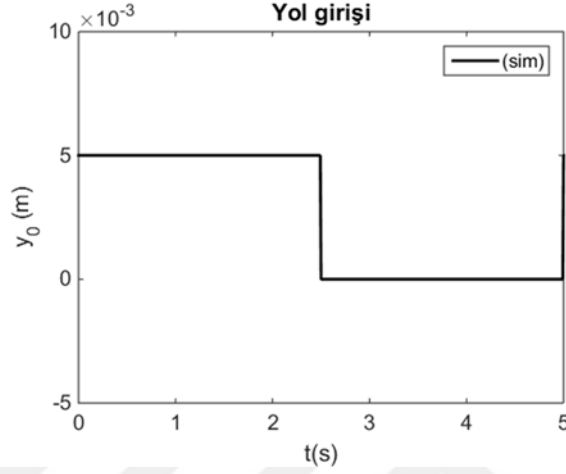
Taşıt modeli YDKKK uygulaması Çok Amaçlı Genetik Algoritma tarama sonuçları Tablo 4.2’de verilmiştir. Taramada iterasyon sayısı 113’dür. Kontrolcülere ait parametrelerin sayısal değerleri Tablo 4.3’de toplu halde verilmiştir.

Tablo 4.3: Kontrolcü parametreleri

Kontrolcü	Parametre	Değer
	α	1.00
	τ	0.10
KKK	k_s	0.466
YDKKK	k_1	3.105
	k_2	0.399

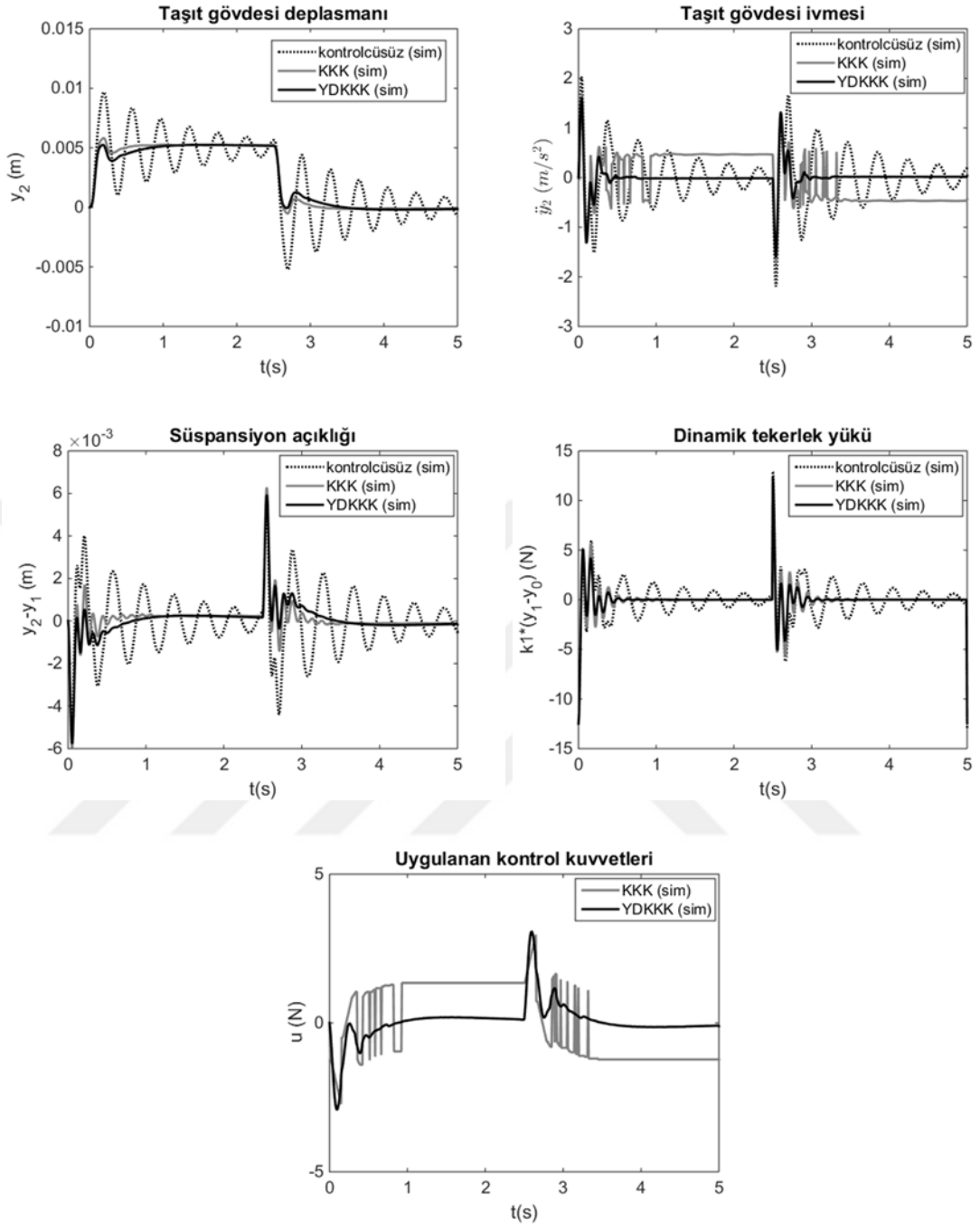
4.1.2. Bilgisayar Benzetimi ve Deneysel Sonuçlar

Tasarlanan kontrolcünün bilgisayar benzetim sonuçları bu bölümde verilmektedir. Sonuçlar verilirken standart KKK ile tasarımı yapılmış YDKKK'in kıyaslaması yapılmaktadır. Taşıt modeline verilen yol girişi Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1: Yol girişi (bilgisayar benzetimi)

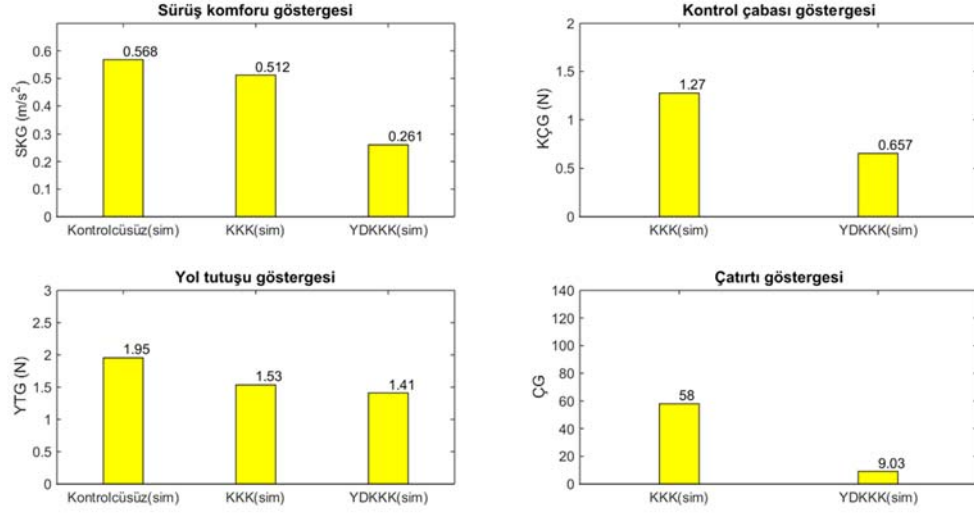
Bilgisayar benzetimi yapılan modelin zaman cevapları Şekil 4.2'de verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere KKK ve YDKKK'nın her ikisi de, taşıt kütlesinin yer değiştirme ve ivme genliklerini azaltmaktadır. İvme değerinin genliğinin azalması sürüş konforunu arttırmaktadır. Ayrıca zaman cevaplarından dinamik tekerlek yükü ve süspansiyon açıklıkları değerlerinin kontrolcü uygulaması ile arttırılmadığı gözlemlenmektedir. Kontrol sinyalinin zaman cevapları incelendiğinde KKK'de görülen yüksek çatırtı bileşenleri, YDKKK tasarımı sayesinde etkili olamamaktadır.



Şekil 4.2: Çeyrek taşıt modeli bilgisayar benzetim sonuçları (bozucu etki yok)

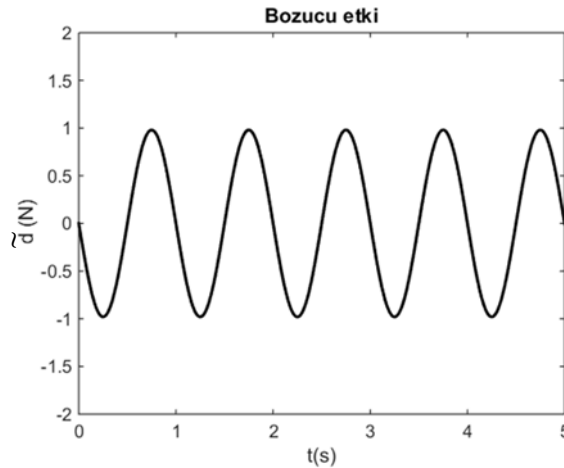
Zaman cevaplarının, performans kriterleriyle incelenmesi Şekil 4.3’de verilmektedir. Kontrolcüsüz (pasif) duruma göre sürüş konforu her iki kontrolcü yardımıyla arttırılmaktadır. YDKKK’nın sürüş konforuna etkisi daha yüksek olmaktadır. YDKKK’nın kontrolcü çabası daha düşük olmakla beraber, çatırtı göstergesi değeri de daha düşüktür. YDKKK uygulaması ile kontrol çabası KKK’ya göre % 48 oranında

azaltılmaktadır. Bunun yanı sıra çatırtı göstergesinde KKK'ya göre % 84 oranında azalma görülmektedir.



Şekil 4.3: Çeyrek taşıt modeli bilgisayar benzetimi performans kriterleri (bozucu etki yok)

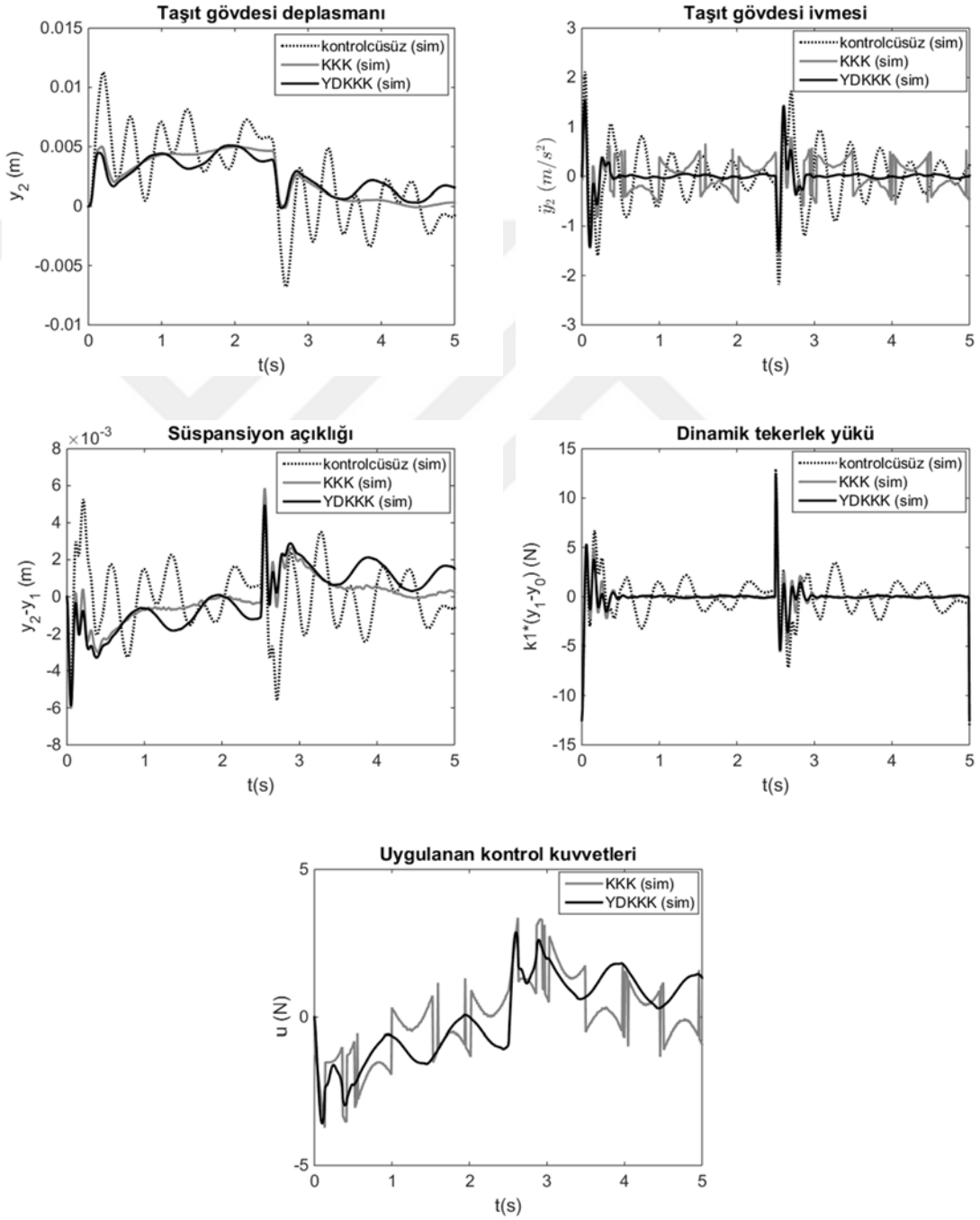
Bu bölümde kontrolcünün performansı dış bozucu etki karşısında incelenmektedir. Sistemin kontrolcü sinyaline dışarıdan tatbik edilen bozucu etki, 1 Hz frekansında ve 1 N genliğine sahip sinüzoidal bir kuvvettir. Bozucu etkinin zamanla değişimi Şekil 4.4'da verilmektedir.



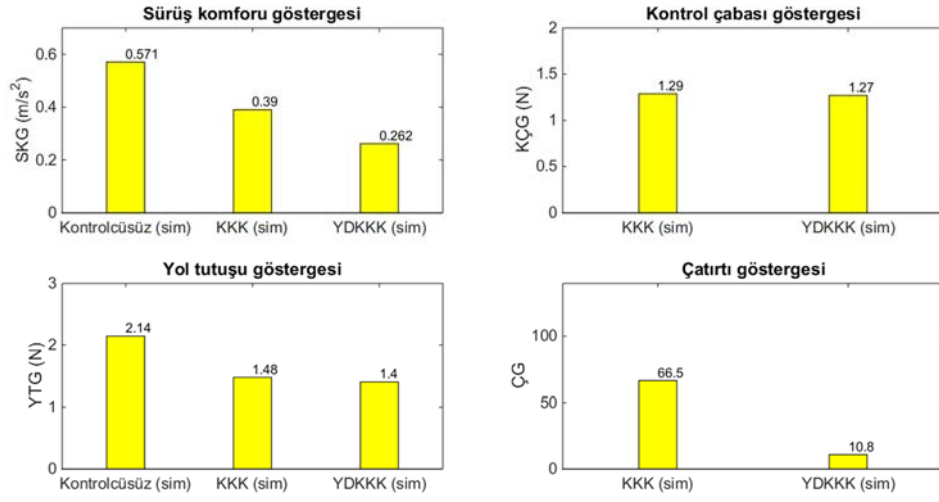
Şekil 4.4 : Çeyrek taşıt modeli bozucu etki (genlik 1 N, frekans 1 Hz)

Bozucu etki eklenmiş bilgisayar benzetimlerinin zaman cevapları Şekil 4.5'da verilmektedir. İlgili durumun performans kriterleri ise Şekil 4.6'de verilmektedir. Bozucu etki eklenmesiyle de YDKKK, sürüş konforu, yol tutuşu ve çatırtının giderilmesi

hususlarında KKK'ya göre üstünlük sağlamaktadır. YDKKK uygulaması ile kontrol çabası, KKK'ya göre yaklaşık olarak aynı oranda kalırken bunun yanı sıra çatırtı göstergesinde KKK'ya göre % 84 oranında azalma görülmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda bozucu etki sistemin kontrol performansını etkilememekte, kontrolcünün dış bozucu etkilere karşı gürbüz olduğu bilgisayar benzetimleriyle gösterilmektedir.



Şekil 4.5 : Çeyrek taşıt modeli bilgisayar benzetim sonuçları (bozucu etki var)

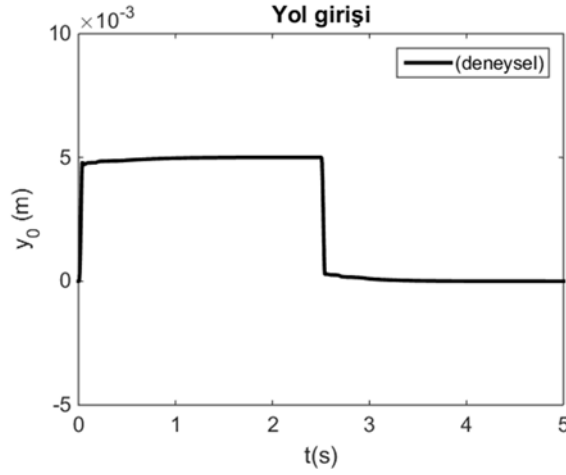


Şekil 4.6 : Çeyrek taşıt modeli bilgisayar benzetimi performans kriterleri (bozucu etki var)

Tablo 4.4: Çeyrek taşıt modeli bilgisayar benzetimi sonuçları

	Kontrolcüsüz		KKK		YDKKK	
	Bozucu etki yok	Bozucu etki var	Bozucu etki yok	Bozucu etki var	Bozucu etki yok	Bozucu etki var
SKG (m/s ²)	0.568	0.571	0.512	0.39	0.261	0.262
KÇG (N)	-----	-----	1.27	1.29	0.657	1.27
YTG (N)	1.95	2.14	1.53	1.48	1.41	1.4
ÇG	-----	-----	58	66.5	9.03	10.8

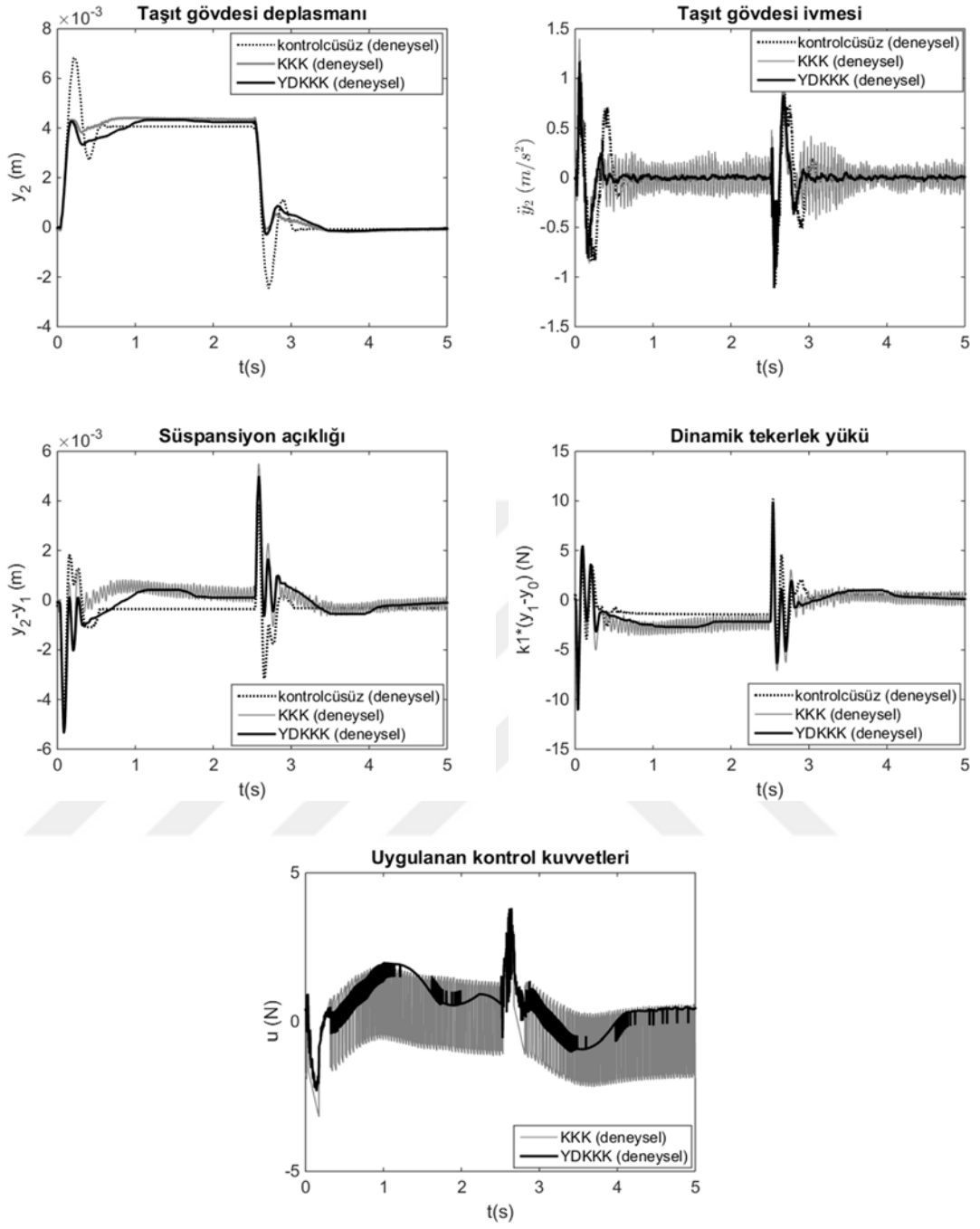
Tablo 4.4’de benzetim sonuçları için performans göstergeleri toplu halde verilmiştir. YDKKK’nın başarısı burada da çok iyi görülmektedir.



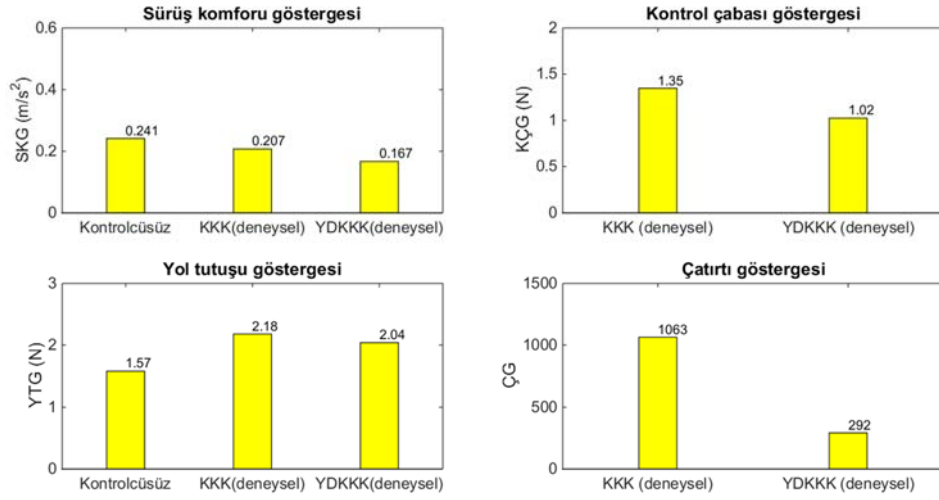
Şekil 4.7 : Yol girişi (deneysel sistem)

Deneysel sisteme verilen yol girişi Şekil 4.7’de verilmektedir. Deneysel sistemden alınan zaman cevapları Şekil 4.8’de verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi taşıt ana kütesinin yer değiştirme ve ivme zaman cevaplarında klasik KKK ve tasarlanan YDKKK gelişme göstermiştir. YDKKK, KKK’ya göre hissedilir biçimde üstünlük sağlamıştır. Bu gelişme sağlanırken süspansiyon açıklıkları ve dinamik tekerlek yükü, kontrolcüsüz durumla kıyaslandığında kötüleşmemektedir. Yol tutuşundan kayıp vermeden sürüş konforu arttırılmaktadır. Bir diğer önemli üstünlük olan çatırtının engellenmesi YDKKK’da açıkça gözlemlenmektedir.

Kontrolcülerin eklenmesiyle oluşturulan deneysel performans kriterleri Şekil 4.9’da verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere YDKKK’nın sürüş konforu KKK’ya göre üstündür. Ayrıca yol tutuşu da kontrolcüsüz duruma göre azalsa da, YDKKK’nın performansı KKK’dan üstün olmaktadır. Çatırtı göstergesinde YDKKK’nın üstünlüğü açıkça görülmektedir. YDKKK uygulaması ile kontrol çabası KKK’ya göre % 24 oranında azaltılmaktadır. Bunun yanı sıra çatırtı göstergesinde KKK’ya göre % 73 oranında azalma görülmektedir. Sonuçlar tasarlanan YDKKK’nın üstün bir performans gösterdiği doğrulamaktadır.



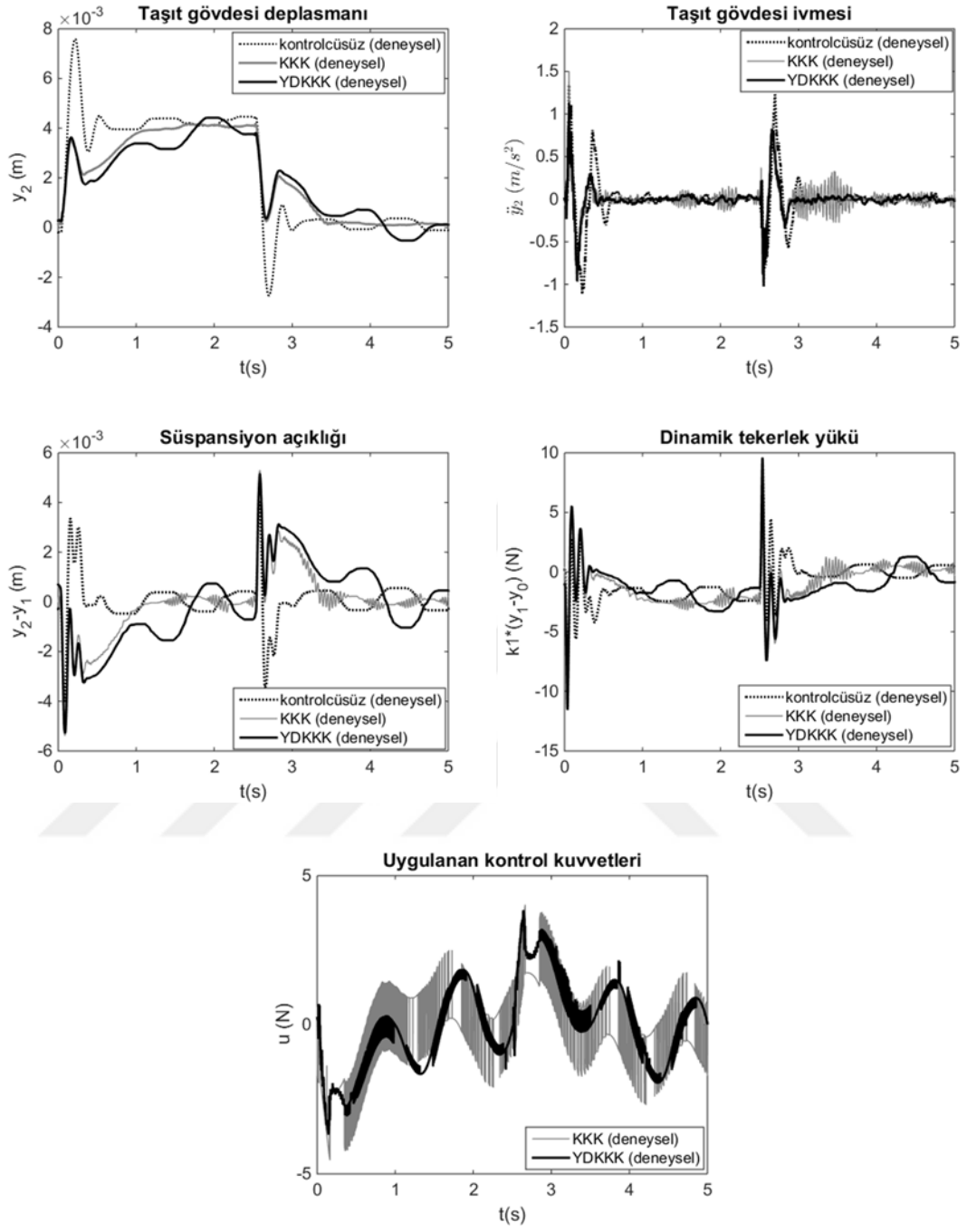
Şekil 4.8: Deneysel çeyrek taşıt modeli deney sonuçları (bozucu etki yok)



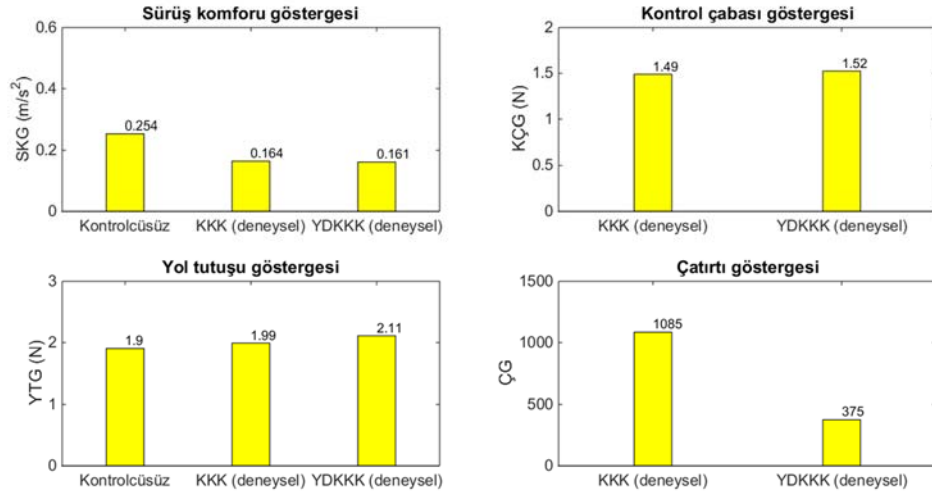
Şekil 4.9: Deneysel çeyrek taşıt modeli performans kriterleri (bozucu etki yok)

Sisteme dışarıdan verilen bozucu etkinin (Şekil 4.4) sonucunda elde edilen zaman cevapları Şekil 4.10'de verilmektedir. Bozucu etki sisteme etki eden kontrol sinyaline eklenmiştir. Sonuçlara göre yer değiştirme ve ivme zaman cevaplarının genlikleri bozucu etki eklenmiş durumda da azaltılmaktadır. Ayrıca çatırtı bileşeninde azalma da bozucu etkiye rağmen tasarlanan YDKKK ile sağlanmaktadır.

Bozucu etki eklenmiş durumda elde edilen performans kriterleri Şekil 4.11'da verilmektedir. Elde edilen en iyi sürüş konforu değeri tasarlanan YDKKK ile sağlanmaktadır. Buna ek olarak çatırtı durumunun azaltılmasında en iyi performansı YDKKK sağlamaktadır. Hem çatırtının azaltılması hem de daha az kontrol çabası YDKKK tasarımında görülmektedir. YDKKK uygulaması ile kontrol çabası, KKK'ya göre yaklaşık olarak aynı oranda kalırken bunun yanı sıra çatırtı göstergesinde KKK'ya göre % 65 oranında azalma görülmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda bozucu etki sistemin kontrol performansını etkilememekte, kontrolcünün dış bozucu etkilere karşı gürbüz olduğu deneysel olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.10: Deneysel çeyrek taşıt modeli deney sonuçları (bozucu etki var)



Şekil 4.11: Deneysel çeyrek taşıt modeli performans kriterleri (bozucu etki var)

Tablo 4.5’de deneysel sonuçlar için performans göstergeleri toplu halde verilmiştir. YDKKK’nın başarısı deneysel olarak doğrulanmaktadır.

Tablo 4.5: Çeyrek taşıt modeli deneysel sonuçlar

	Kontrolcüsüz		KKK		YDKKK	
	Bozucu etki yok	Bozucu etki var	Bozucu etki yok	Bozucu etki var	Bozucu etki yok	Bozucu etki var
SKG (m/s^2)	0.241	0.254	0.207	0.164	0.167	0.161
KÇG (N)	-----	-----	1.35	1.52	1.02	1.52
YTG (N)	1.57	1.9	2.18	1.99	2.04	2.11
ÇG	-----	-----	1063	1085	292	375

4.2. ÇİFT ROTOR SİSTEMİNİN KONTROLÜ

4.2.1. KKK ve YDKKK Tasarımları

Çift rotor sistemine ait hareket denklemleri (3.98)-(3.101) ile KKK için verilen (3.15)-(3.16) denklemleri kullanılırsa KKK için kontrol sinyalleri eşdeğer kontrol sinyalinin kestiriminin alçak geçiren filtre ile yapıldığı durum için şöyle elde edilir.

$$\dot{\hat{\tau}}_{eq\theta} = \varepsilon \left(\bar{\tau}_\theta - \hat{\tau}_{eq\theta} \right) \quad (4.11)$$

$$\bar{\tau}_\theta = \hat{\tau}_{eq\theta} + k_\theta \left(m_{hel} l^2 + I_{pitch} \right) \text{sign} \left\{ \left(\alpha_\theta (x_{1r} - x_1) + \dot{x}_{1r} - x_2 \right) \right\} \quad (4.12)$$

$$\dot{\hat{\tau}}_{eq\psi} = \varepsilon \left(\bar{\tau}_\psi - \hat{\tau}_{eq\psi} \right) \quad (4.13)$$

$$\bar{\tau}_\psi = \hat{\tau}_{eq\psi} + k_\psi \left(m_{hel} l^2 \cos^2(x_1) + I_{yaw} \right) \text{sign} \left\{ \left(\alpha_\psi (x_{3r} - x_3) + \dot{x}_{3r} - x_4 \right) \right\} \quad (4.14)$$

Benzer şekilde çift rotor sistemine ait hareket denklemleri (3.98)-(3.101) ve önerilen YDKKK için verilen (3.78)-(3.82) denklemleri kullanılırsa YDKKK için kontrol sinyalleri şöyle bulunur.

$$\bar{\tau}_\theta = - \left(m_{hel} l^2 + I_{pitch} \right) \tau_\theta \quad (4.15)$$

$$\tau_\theta = \hat{\tau}_{\theta eq} - k_{1\theta} \left| \alpha_\theta (x_{1r} - x_1) + \dot{x}_{1r} - x_2 \right|^{1/2} \text{sign} \left(\alpha_\theta (x_{1r} - x_1) + \dot{x}_{1r} - x_2 \right) + \nu_\theta \quad (4.16)$$

$$\dot{\nu}_\theta = -k_{2\theta} \left\{ \text{sign} \left(\alpha_\theta (x_{1r} - x_1) + \dot{x}_{1r} - x_2 \right) \right\} \quad (4.17)$$

$$\dot{\hat{\tau}}_{eq\theta} = \varepsilon \left(\tau_\theta - \hat{\tau}_{eq\theta} \right) \quad (4.18)$$

$$\bar{\tau}_\psi = - \left(m_{hel} l^2 \cos^2(x_1) + I_{yaw} \right) \tau_\psi \quad (4.19)$$

$$\tau_\psi = \hat{\tau}_{\psi eq} - k_{1\psi} \left| \alpha_\psi (x_{3r} - x_3) + \dot{x}_{3r} - x_4 \right|^{1/2} \text{sign} \left(\alpha_\psi (x_{3r} - x_3) + \dot{x}_{3r} - x_4 \right) + \nu_\psi \quad (4.20)$$

$$\dot{v}_\psi = -k_{2\psi} \left\{ \text{sign}(\alpha_\psi (x_{3r} - x_3) + \dot{x}_{3r} - x_4) \right\} \quad (4.21)$$

$$\dot{\hat{\tau}}_{eq\psi} = \varepsilon (\tau_\psi - \hat{\tau}_{eq\psi}) \quad (4.22)$$

Sonuçların karşılaştırılmasında kullanılacak performans göstergeleri aşağıda sıralanmıştır.

ITAE göstergesi:

$$ITAE = \int_0^t |x_{ref} - x| dt \quad (4.23)$$

Kontrol çabası göstergesi:

$$K\zeta G = \frac{1}{\sqrt{n}} \left[\sum_{i=1}^n (u_i)^2 \right]^{1/2} \quad (4.24)$$

Çatırtı göstergesi:

$$\zeta G = \frac{1}{\sqrt{n}} \left[\sum_{i=1}^n (\dot{u}_i)^2 \right]^{1/2} \quad (4.25)$$

Tablo 4.6: Çift rotorlu sistem modeli KKK katsayıları için Çok Amaçlı Genetik Algoritma taraması sonuçları

Katsayı	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
Değer	179.23	117.47	129.38	174.58	85.00	78.00
Katsayı	β_7	β_8	β_9	β_{10}	k_θ	k_ψ
Değer	2.79	7.37	5.97	3.13	6.37	3.20

Tablo 4.7: Çift rotorlu sistem modeli YDKKK katsayıları için Çok Amaçlı Genetik Algoritma taraması sonuçları

Katsayı	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7
Değer	166.3	121.3	63.3	99.3	7	7	0.81
Katsayı	β_8	β_9	β_{10}	$k_{1\theta}$	$k_{2\theta}$	$k_{1\psi}$	$k_{2\psi}$
Değer	6.83	0.32	0.11	5.80	0.68	3.83	0.15

Çift rotorlu sistem modeli için Çok Amaçlı Genetik Algoritma taraması sonuçları KKK için Tablo 4.6’de, YDKKK için Tablo 4.7’de verilmiştir. Her iki taramada iterasyon sayısı 5’dir. Kontrolcülere ait parametreler Tablo 4.8 ve Tablo 4.9’da toplu halde verilmiştir.

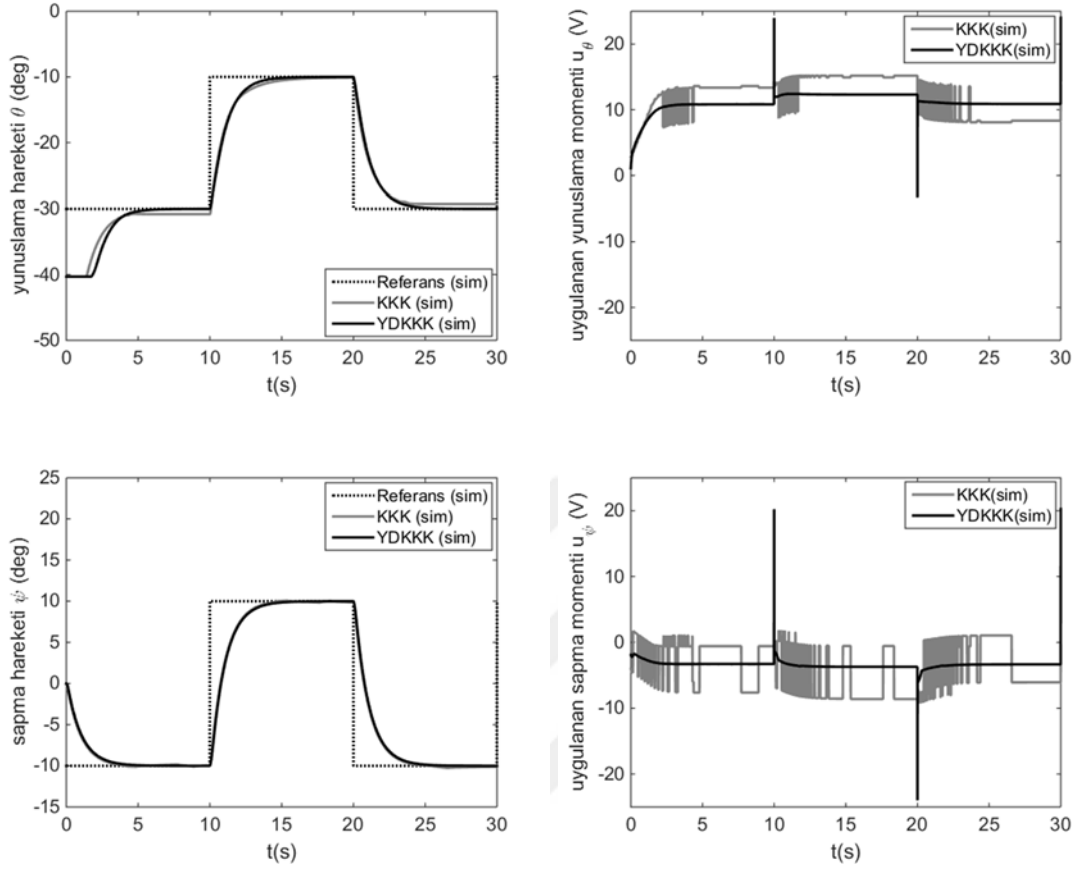
Tablo 4.8: Çift rotorlu sistem modeli kontrolcü parametreleri

Sembol	Sembol	Değer
Yunuslama hareketi için kayma yüzeyi parametresi	α_θ	1
Sapma hareketi için kayma yüzeyi parametresi	α_ψ	1
Alçak geçiren filtre köşe frekansı	ε	2

Tablo 4.9: Çift rotorlu sistem modeli kontrolcü parametreleri

Kontrolcü	Parametre	Değer
KKK	k_{θ}	6.37
	k_{ψ}	3.20
YDKKK	$k_{1\theta}$	5.80
	$k_{2\theta}$	0.68
	$k_{1\psi}$	3.83
	$k_{2\psi}$	0.15

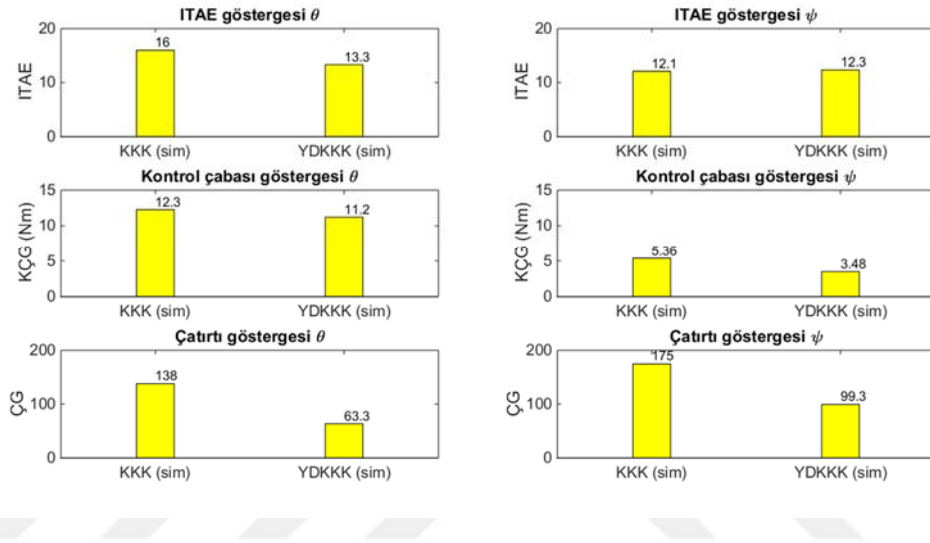
4.2.2. Bilgisayar Benzetimi ve Deneysel Sonuçlar



Şekil 4.12: Çift rotorlu sistem modeli bilgisayar benzetimi sonuçları (bozucu etki yok)

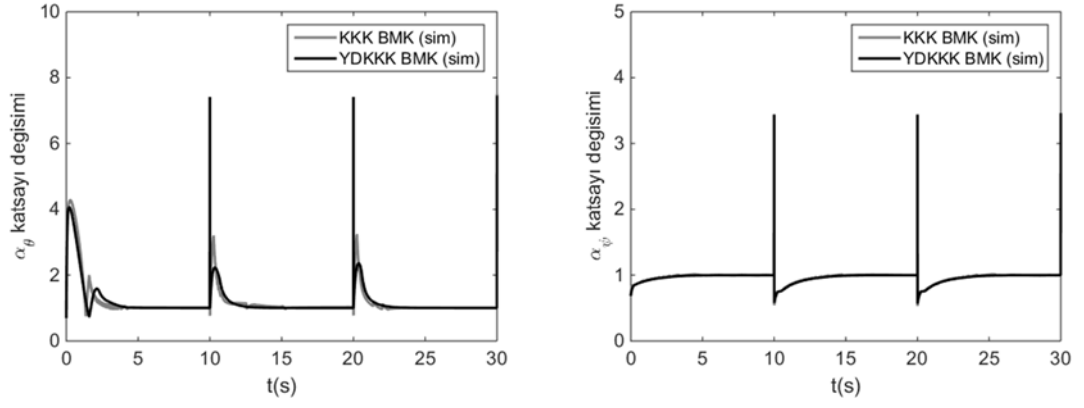
Tasarlanan kontrolcünün çift rotorlu sistem modeli üzerindeki bilgisayar benzetim sonuçları bu bölümde verilmektedir. Sonuçlar verilirken standart KKK ile tasarımı yapılmış YDKKK'in kıyaslaması yapılmaktadır. Çift rotorlu sistem modelinin verilen referans değerini izlemesi beklenmektedir. Bu yönüyle modelin izleme hatasının düşürülmesi hedeflenmektedir. Bilgisayar benzetimi yapılan modelin zaman cevapları Şekil 4.12'de verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere KKK ve YDKKK'nın her ikisi de, çift rotorlu sistem modelinin yunuslama ve sapma hareketleri değerlerini referans değerine yaklaştırdıkları görülmektedir. Kontrol voltajı değerinin zamanla değişimi incelendiğinde her iki eksendeki hareketlerde KKK'de görülen yüksek çarptı bileşenleri, YDKKK tasarımı sayesinde etkili olamamaktadır. YDKKK tasarımının çarptı oluşumuna engel olduğu gözlemlenmektedir. Referans değerinin ani değişim gösterdiği anlarda YDKKK'nın voltaj değerleri en yüksek değerlerini almaktadır. Zaman cevaplarının, başta verilen performans kriterleriyle incelenmesi Şekil 4.13'da verilmektedir. İzleme

hatalarının değerlendirildiği ITAE kriterine göre YDKKK, yunuslama hareketinde etkili olmakta, sapma hareketinde KKK ile yaklaşık aynı tepkiyi vermektedir. Kontrol çabası göstergesinde her iki eksendeki harekette YDKKK'nın etkisi görülmektedir. Çatırtı göstergesi ile her iki kontrolcünün arasındaki çatırtı bileşenin etkisi gösterilmektedir. YDDKK'nın çatırtıyı gidermede ki başarısı KKK'ya göre yunuslama hareketi için % 54, sapma hareketi için % 43 oranında azalma olarak görülmektedir.

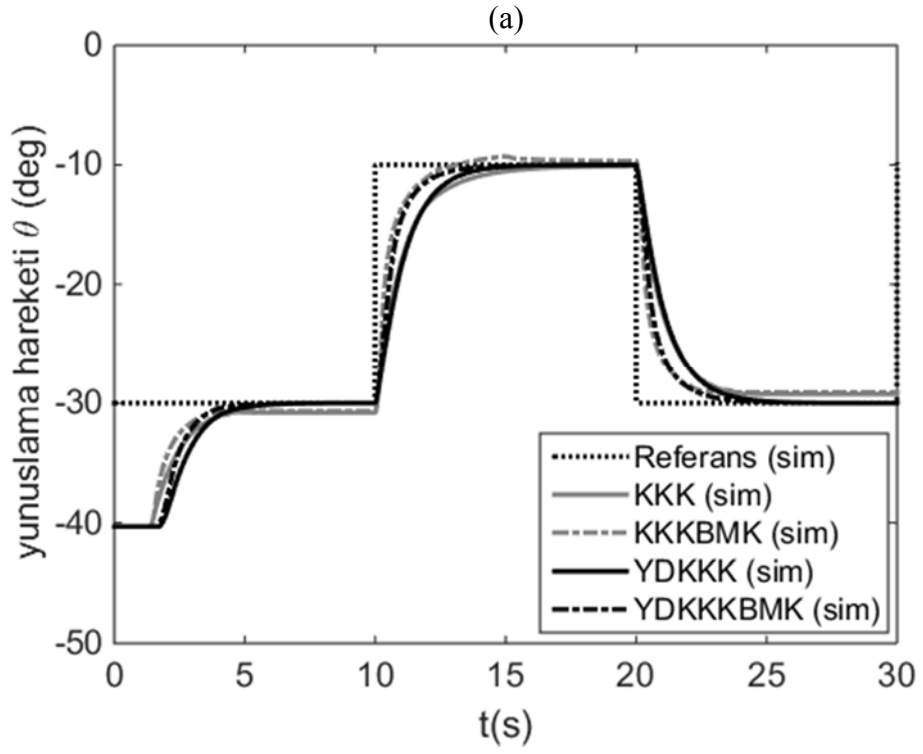


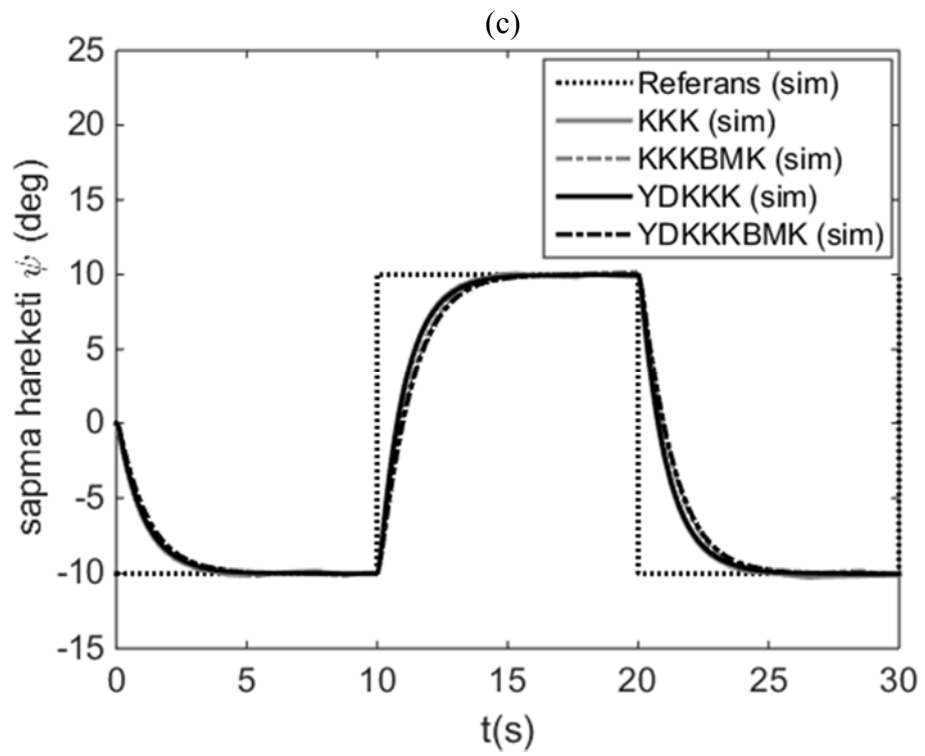
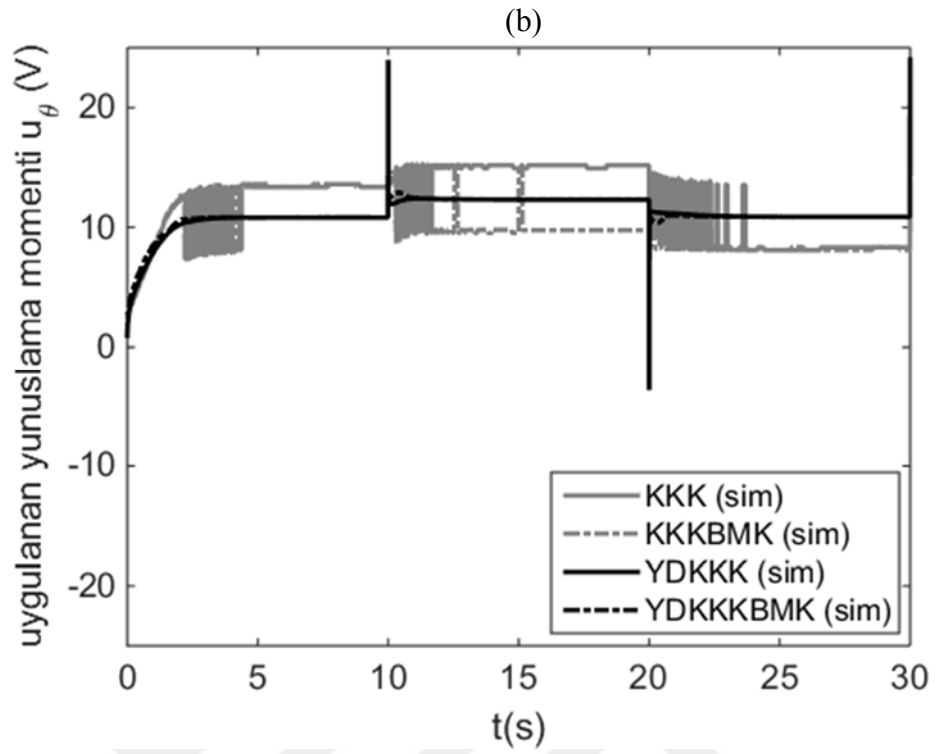
Şekil 4.13: Çift rotorlu sistem modeli bilgisayar benzetimi performans kriterleri (bozucu etki yok)

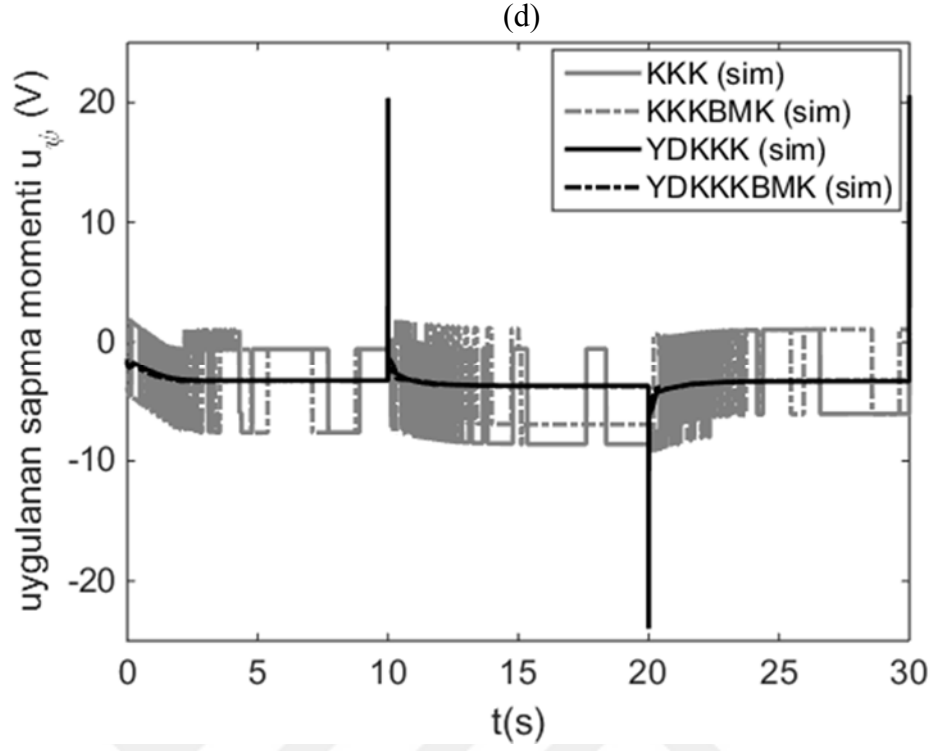
Bir önceki bilgisayar benzetim sonuçlarında tasarlanan kontrolcünün kazanç katsayıları çok amaçlı genetik algoritma ile belirlenmiştir. Bu bölümde kayma yüzeyi parametreleri her iki eksendeki hareket için bulanık mantık yardımıyla tayin edilmiştir. Kayma yüzeyi parametrelerinin zamanla değişimi Şekil 4.14'de verilmektedir. Böylece izleme hatasının daha da düşürülmesi hedeflenmektedir. Bilgisayar benzetimi yapılan modelin zaman cevapları Şekil 4.15'de verilmektedir. Bulanık mantığın kullanılması ile şekilden görüleceği üzere KKK ve YDKKK değerleri referansa yaklaşmaktadır. Zaman cevaplarının, başta verilen performans kriterleriyle incelenmesi Şekil 4.16'de verilmektedir. İzleme hatalarının değerlendirildiği ITAE kriterine göre bulanık mantığın eklenmesi ile her iki kontrolcüde yunuslama hareketinde azalma görülmektedir. Azalma değerleri KKK için %28 ve YDKKK için %33'tür. Bulanık mantığın ITAE değerini azaltması, sapma hareketinde her iki kontrolcü için görülmemektedir.



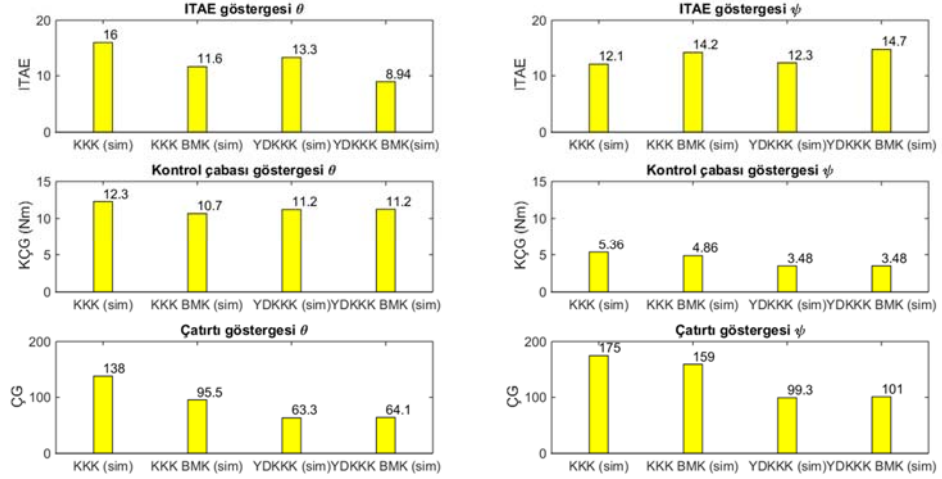
Şekil 4.14: Bulanık mantıkla bulunan kayma yüzeyi katsayılarının değişimi (bozucu etki yok)





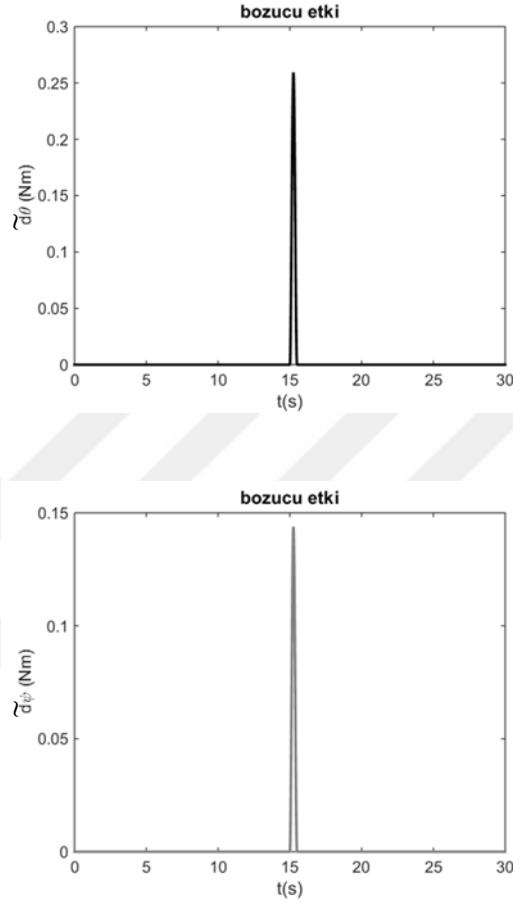


Şekil 4.15: Çift rotorlu sistem modeli bulanık mantık eklenmiş bilgisayar benzetimi sonuçları (bozucu etki yok) a) yunuslama hareketi açısıl değişim b) uygulanan yunuslama momenti c) sapma hareketi açısıl değişim d) uygulanan sapma momenti

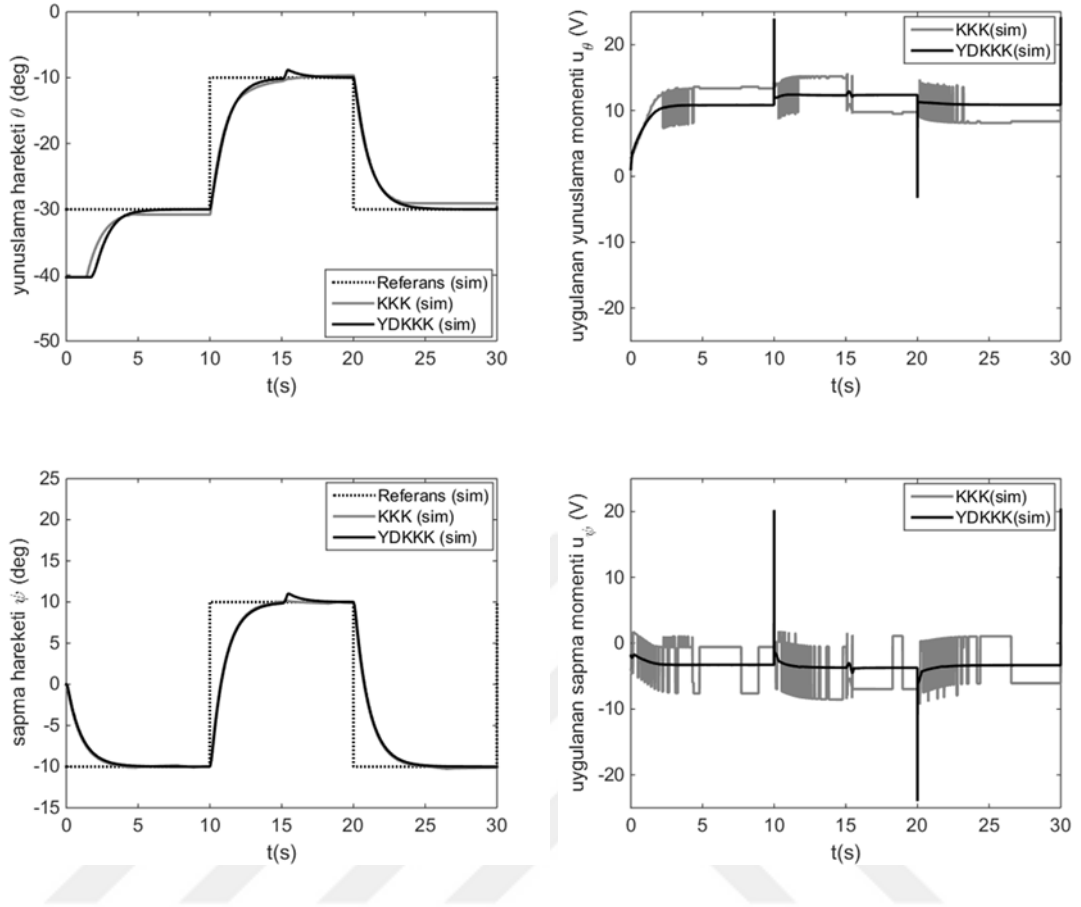


Şekil 4.16: Çift rotorlu sistem modeli bulanık mantık eklenmiş bilgisayar benzetimi performans kriterleri (bozucu etki yok)

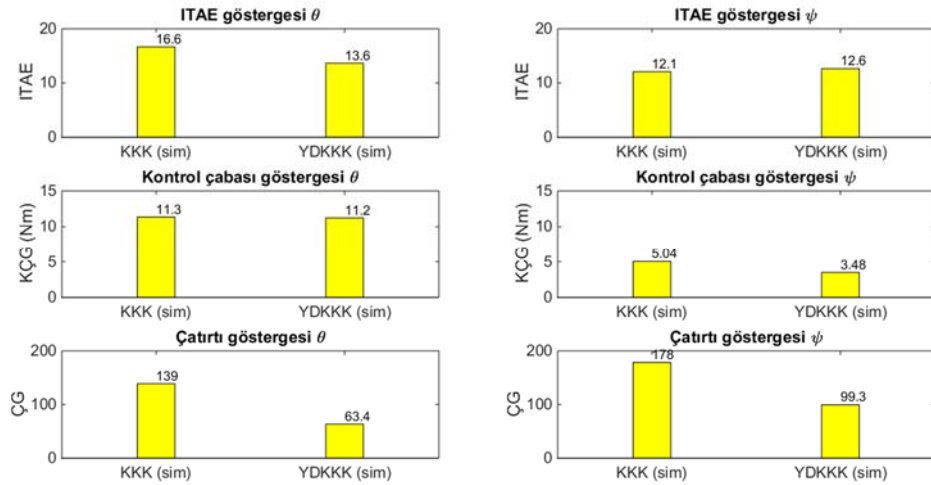
Bozucu etki eklenmiş bilgisayar benzetim sonuçları bu bölümde verilmektedir. Sisteme verilen bozucu etkinin zamanla değişimi yunuslama hareketi ve sapma hareketi için Şekil 4.17’de gösterilmektedir.



Şekil 4.17 : Çift rotorlu sisteme yunuslama ekseninde (θ) ve sapma ekseninde (ψ) verilen bozucu etkiler



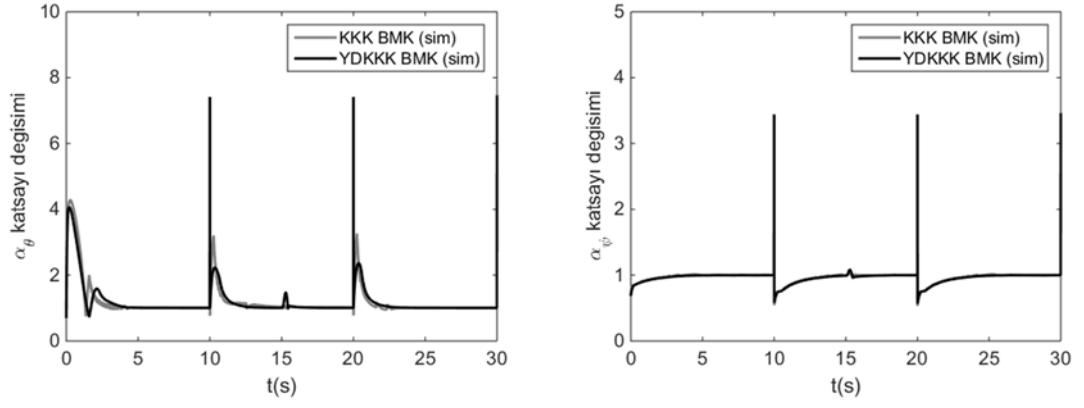
Şekil 4.18: Çift rotorlu sistem modeli bilgisayar benzetimi sonuçları (bozucu etki var)



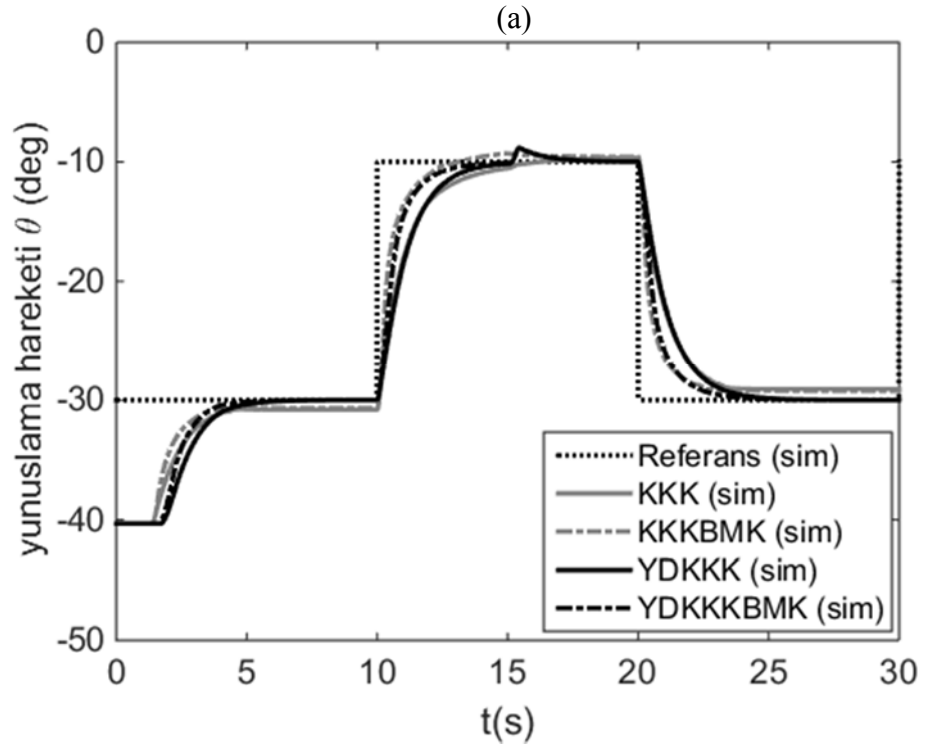
Şekil 4.19: Çift rotorlu sistem modeli bilgisayar benzetimi performans kriterleri (bozucu etki var)

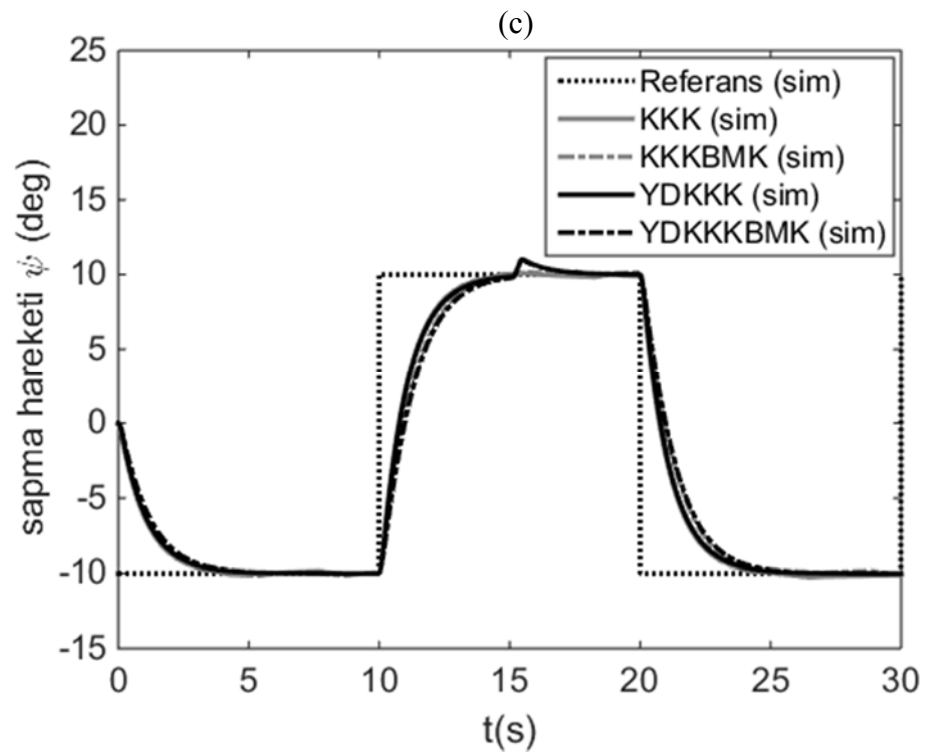
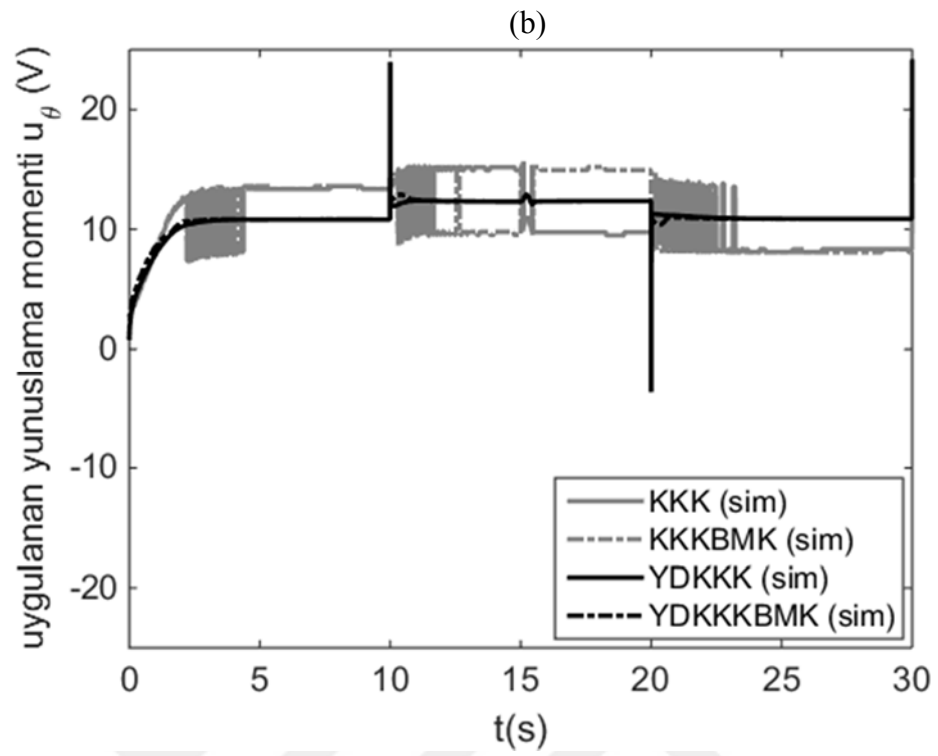
Bilgisayar benzetimi yapılan modelin zaman cevapları Şekil 4.18’de verilmektedir. KKK ve YDKKK’nın her ikisi de, yunuslama ve sapma hareketleri değerlerini referans değerine yaklaştırdıkları görülmektedir. Bozucu etki, devreye girerek kontrolcü performansına etki edememektedir. Kontrol voltajı değerinin zamanla değişimi incelendiğinde her iki eksenindeki hareketlerde KKK’de görülen yüksek çattırtı bileşenleri, YDKKK tasarımı sayesinde etkili olamamaktadır. Zaman cevapları için hesaplanan performans kriterleri Şekil 4.19’de verilmektedir. Bozucu etkinin olmadığı duruma benzer şekilde, izleme hatalarının değerlendirildiği ITAE kriterine göre YDKKK, yunuslama hareketinde etkili olmakta, sapma hareketinde KKK ile yaklaşık aynı tepkiyi vermektedir. Kontrol çabası göstergesinde sapma eksenindeki harekette YDKKK’nın etkisi görülmektedir. YDDKK’nın çattırtıyı gidermede ki başarısı KKK’ya göre yunuslama hareketi için % 54, sapma hareketi için % 44 oranında azalma olarak görülmektedir. Bu sonuçlarla bozucu etki olmayan durumla aynı değerler elde edilmiştir. Tasarlanan kontrolcünün dış kaynaklı bozucu etkilere karşı duyarsız olması sonucu doğrulanmaktadır.

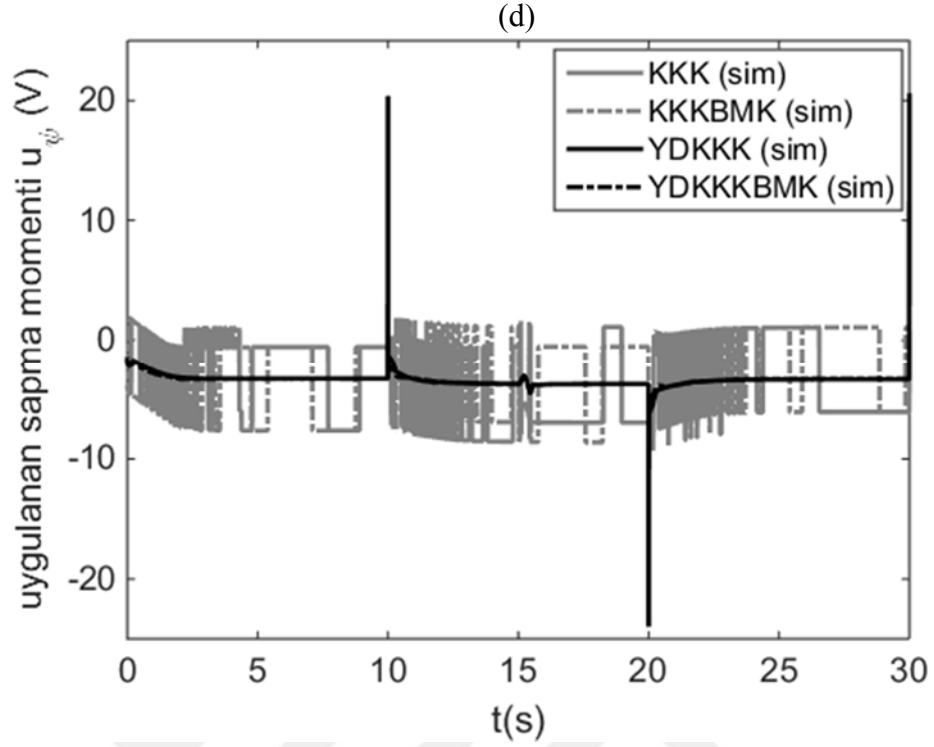
Kayma yüzeyi parametrelerinin zamanla değişimi Şekil 4.20’de verilmektedir. Bulanık mantık eklenmiş kayma yüzeyi içeren durumun bozucu etkiye karşı zaman cevapları Şekil 4.21’de verilmektedir. Bozucu etkinin olması durumunda dahi KKK ve YDKKK değerleri referansa yaklaşmaktadır. Zaman cevaplarının, performans kriterleriyle incelenmesi Şekil 4.22’de verilmektedir. İzleme hatalarının değerlendirildiği ITAE kriterine göre bulanık mantığın eklenmesi ile her iki kontrolcüde yunuslama hareketinde azalma görülmektedir. Azalma değerleri KKK için %31 ve YDKKK için %32’tür. Bu değerlerin bozucu etki olmayan durumla benzerliği, bozucu etkilere karşı duyarsız bir kontrolcü sonucunu doğrulamaktadır. Bulanık mantığın ITAE değerini azaltması, sapma hareketinde her iki kontrolcü için görülmemektedir.



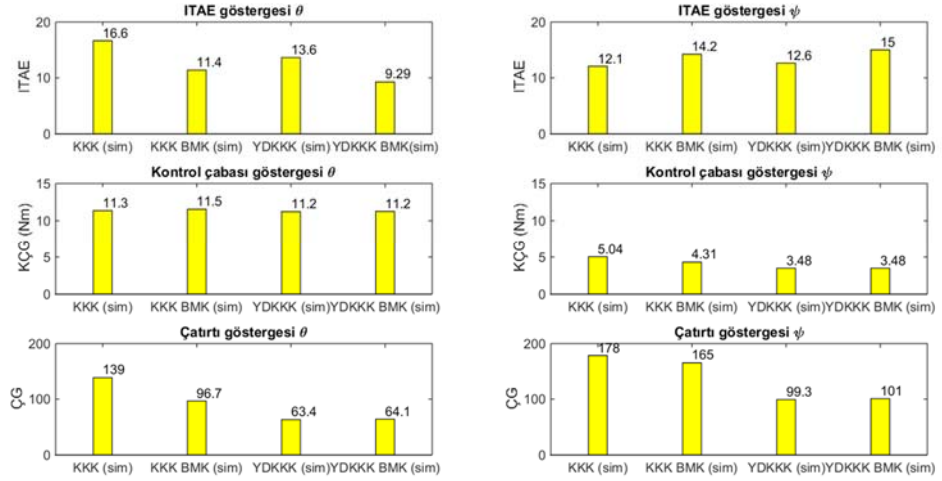
Şekil 4.20: Bulanık mantıkla bulunan kayma yüzeyi katsayılarının değişimi (bozucu etki var)







Şekil 4.21: Çift rotorlu sistem modeli bulanık mantık eklenmiş bilgisayar benzetimi sonuçları (bozucu etki var) a) yunuslama hareketi açısıl değişim b) uygulanan yunuslama momenti c) sapma hareketi açısıl değişim d) uygulanan sapma momenti

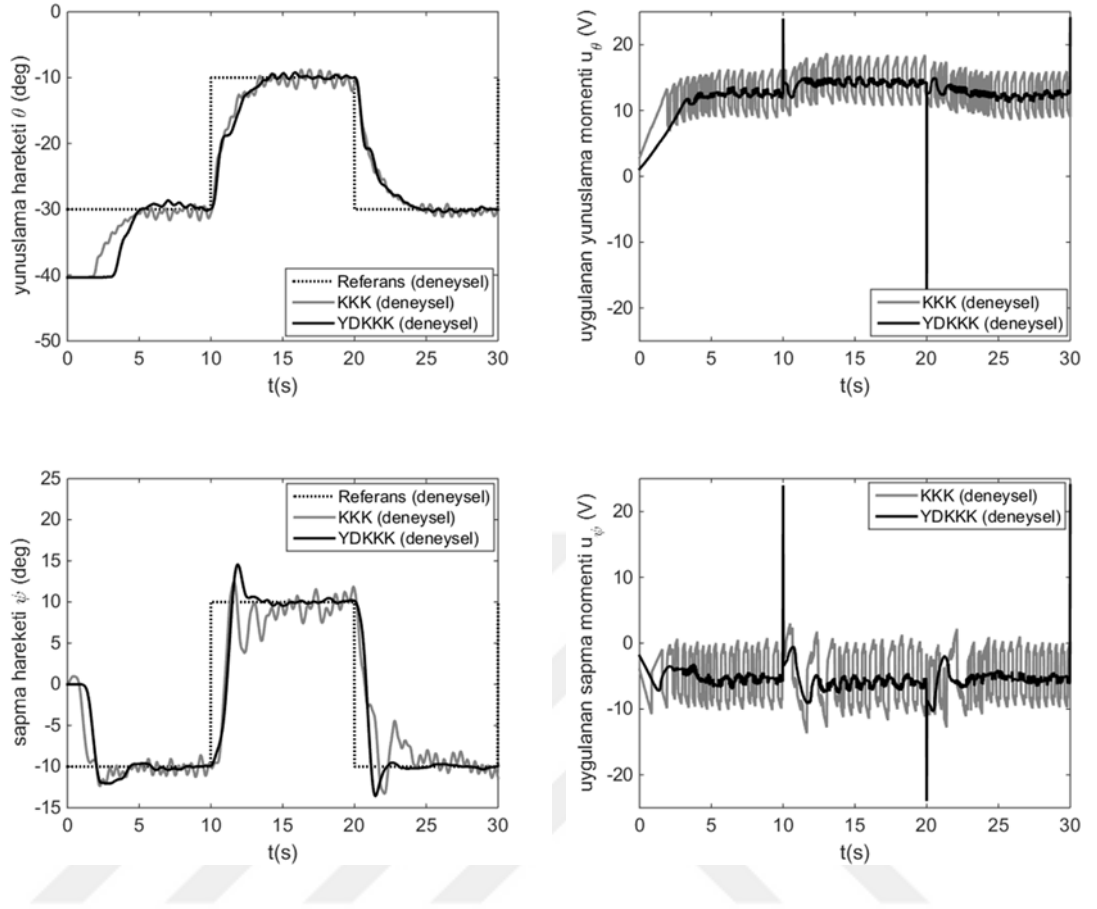


Şekil 4.22: Çift rotorlu sistem modeli bulanık mantık eklenmiş bilgisayar benzetimi performans kriterleri (bozucu etki var)

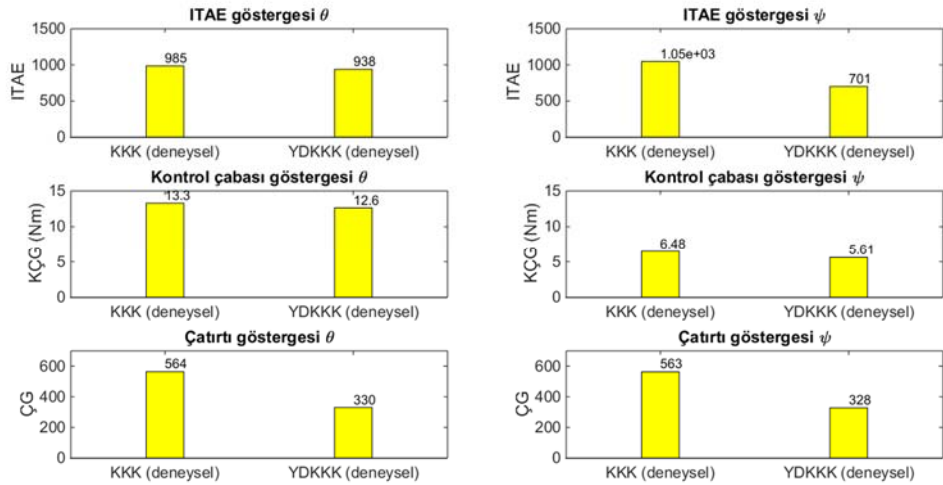
Tablo 4.10: Çift rotorlu sistem modeli bilgisayar benzetimi sonuçları

	KKK				KKK BMK				YDKKK				YDKKK BMK			
	θ		ψ		θ		ψ		θ		ψ		θ		ψ	
	Bozucu etki yok	Bozucu etki var	Bozucu etki yok	Bozucu etki var	Bozucu etki yok	Bozucu etki var	Bozucu etki yok	Bozucu etki var	Bozucu etki yok	Bozucu etki var	Bozucu etki yok	Bozucu etki var	Bozucu etki yok	Bozucu etki var	Bozucu etki yok	Bozucu etki var
ITAE	16	16.6	12.1	12.1	11.6	11.4	14.2	14.2	13.3	13.6	12.3	12.6	8.94	9.29	14.7	15
KÇG (Nm)	12.3	11.3	5.36	5.04	10.7	11.5	4.86	4.31	11.2	11.2	3.48	3.48	11.2	11.2	3.48	3.48
ÇG	138	139	175	178	95.5	96.7	159	165	63.3	63.4	99.3	99.3	64.1	64.1	101	101

Laboratuvar ortamında çift rotorlu sistem modeli için yapılan deneysel çalışmaların zaman cevapları Şekil 4.23’de verilmektedir. Deneysel verilerle performansı araştırılan kontrolcünün referansı izlemeye çalıştığı görülmektedir. Kontrol voltajı sinyali KKK’da ciddi oranda çatırtıyı barındırırken YDKKK ile bu bileşen sistemden arındırılmaktadır. Zaman cevaplarının, başta verilen performans kriterleriyle incelenmesi Şekil 4.24’da verilmektedir. İzleme hatalarının değerlendirildiği ITAE kriterine göre YDKKK, sapma hareketinde etkili olmakta, yunuslama hareketinde KKK ile yaklaşık aynı tepkiyi vermektedir. Kontrol çabası göstergesine göre YDKKK her iki eksenindeki harekette KKK’ya göre daha az kontrolcü kuvvetine ihtiyaç duymaktadır. Çatırtı göstergesi ile her iki kontrolcünün arasındaki çatırtı bileşenin etkisi gösterilmektedir. YDDKK’nın çatırtıyı gidermede ki başarısı KKK’ya göre yunuslama hareketi için % 41, sapma hareketi için % 42 oranında azalma olarak görülmektedir.

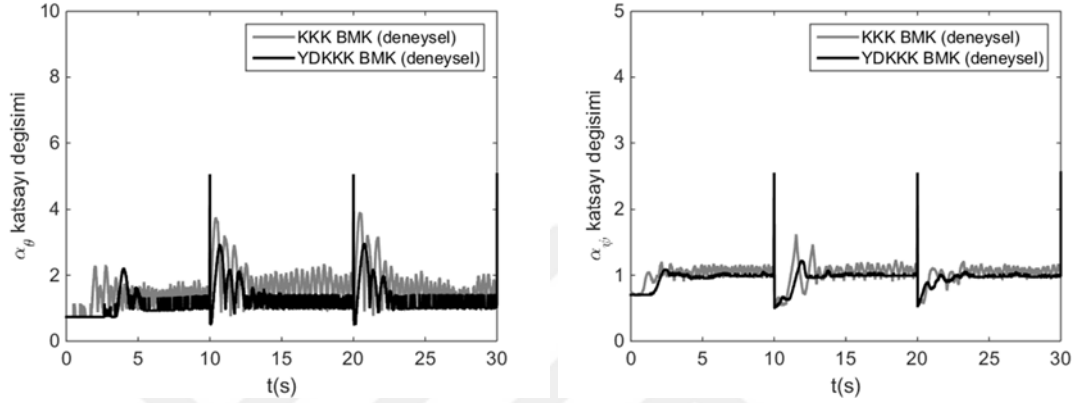


Şekil 4.23: Deneyel çift rotorlu sistem modeli deney sonuçları (bozucu etki yok)



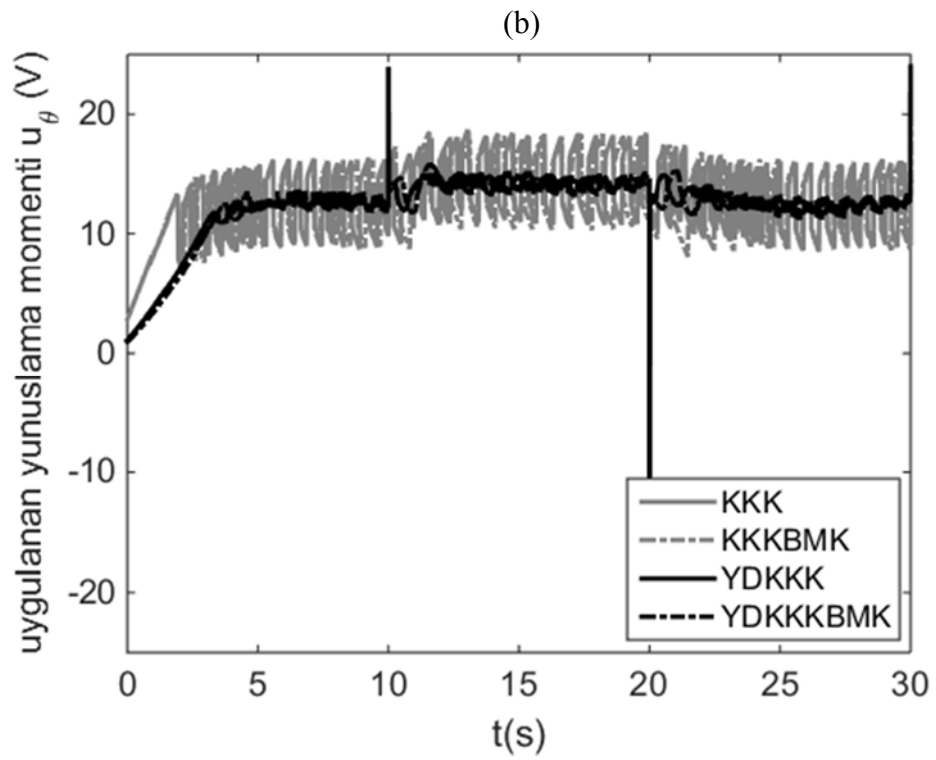
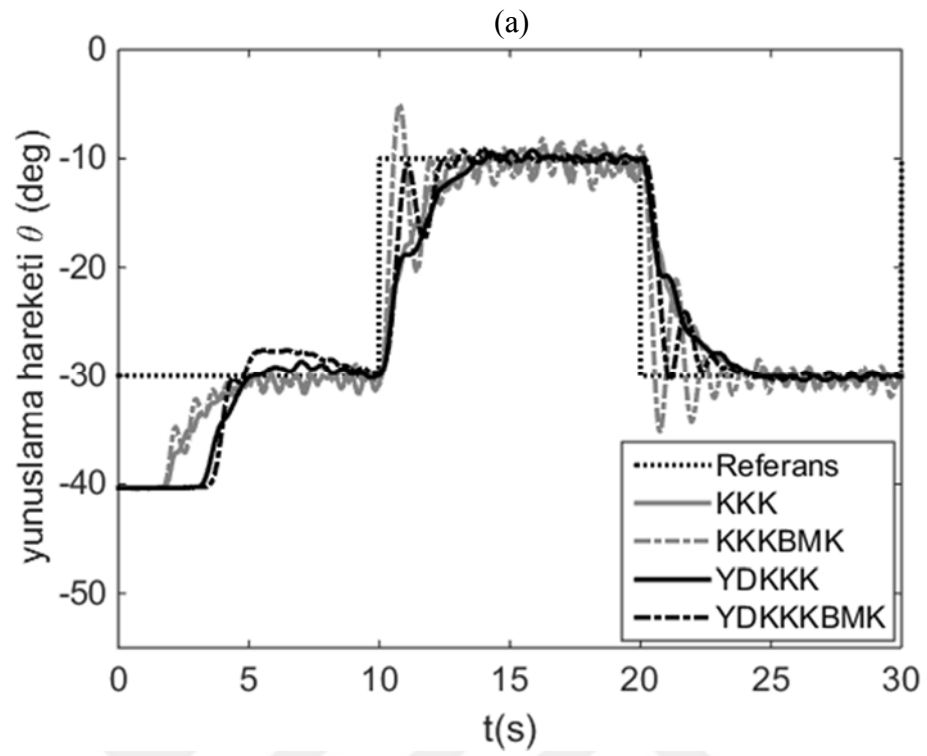
Şekil 4.24: Deneyel çift rotorlu sistem modeli performans kriterleri (bozucu etki yok)

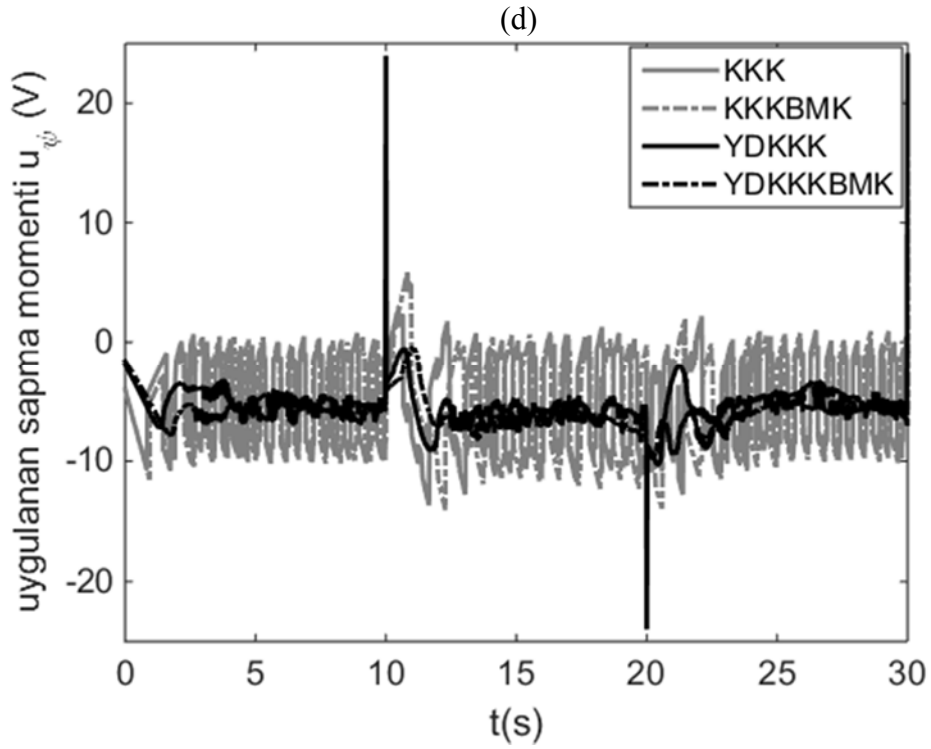
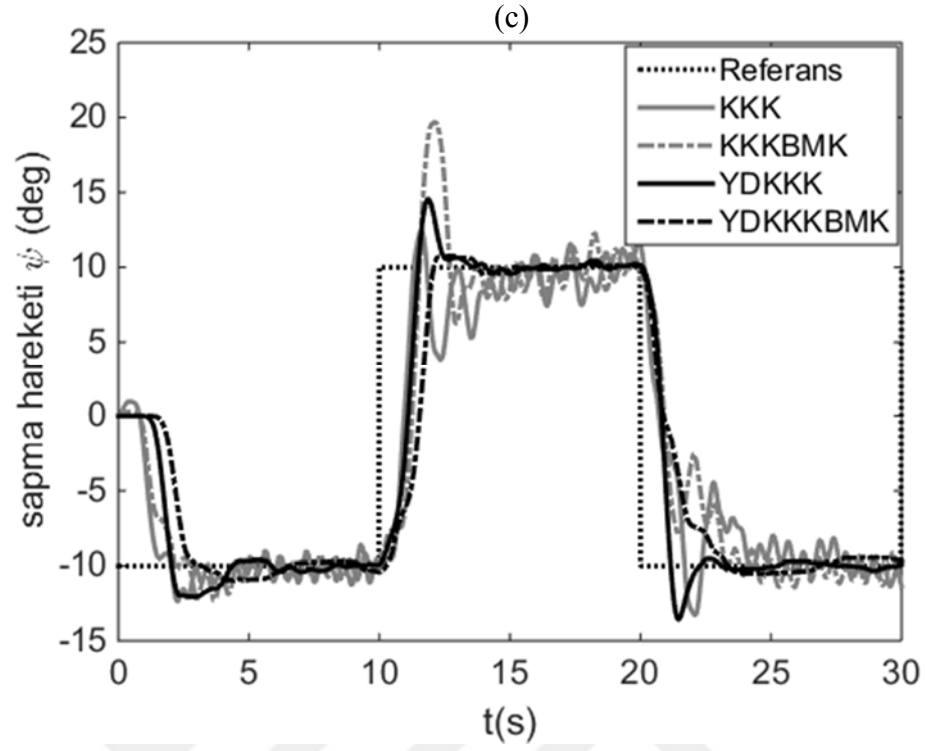
Bir önceki bölümde verilen deneysel sonuçlarında tasarlanan kontrolcünün kazanç katsayıları çok amaçlı genetik algoritma ile belirlenmiştir. Bu bölümde kayma yüzeyi parametreleri her iki eksendeki hareket için bulanık mantık yardımıyla tayin edilmiştir. Deneysel olarak kayma yüzeyi parametrelerinin zamanla değişimi Şekil 4.25’de verilmektedir.



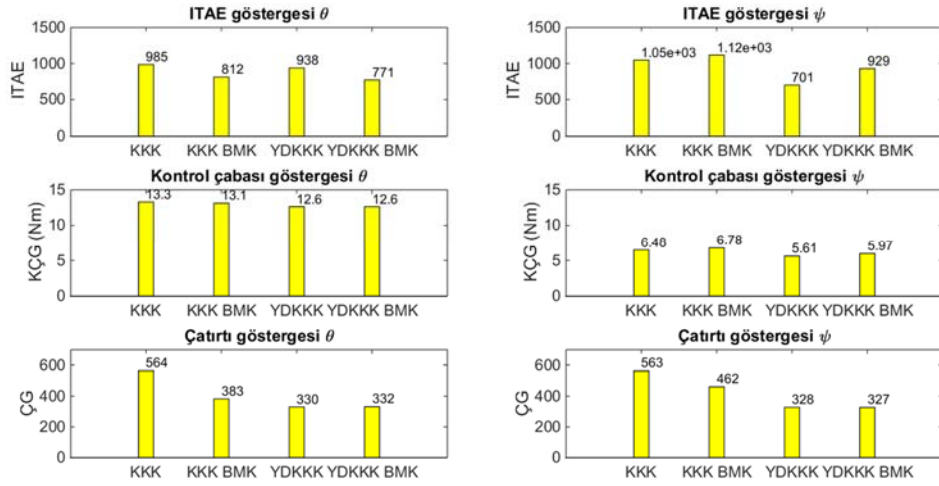
Şekil 4.25: Bulanık mantıkla bulunan kayma yüzeyi katsayılarının deneysel değişimi (bozucu etki yok)

Deneysel sistemin zaman cevapları Şekil 4.26’da verilmektedir. Bulanık mantığın kayma yüzeyine eklenmesi ile şekilden görüleceği üzere KKK’da referans değerini aşma (overshoot) görülmektedir. YDKKK’da bu durum oluşmamaktadır. Zaman cevaplarının, başta verilen performans kriterleriyle incelenmesi Şekil 4.27’de verilmektedir. İzleme hatalarının değerlendirildiği ITAE kriterine göre bulanık mantığın eklenmesi ile KKK ve YDKKK için, yunuslama hareketinde %18 azalma görülmektedir. Kontrol çabasında artış görülmemesi ile kontrolcünün performansının artırılmış olduğu söylenebilir. Bulanık mantık kullanımı, sapma hareketinde her iki kontrolcü için ITAE değerini arttırmıştır.

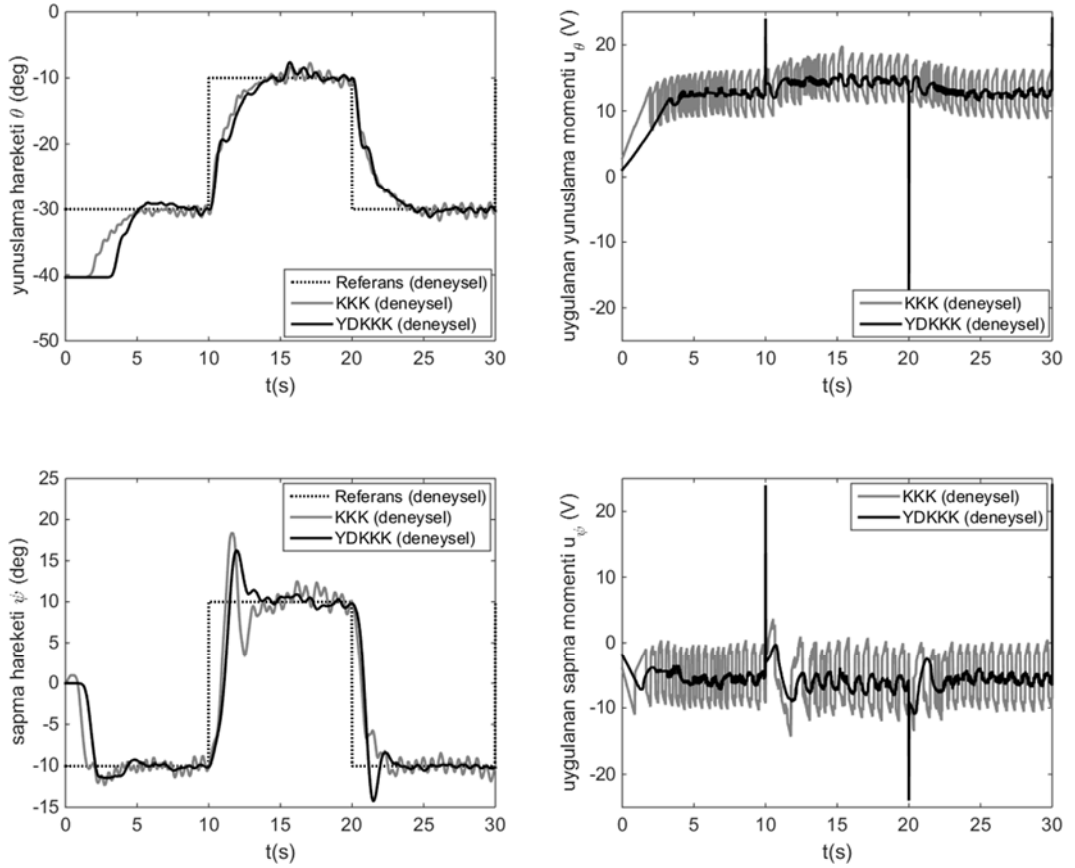




Şekil 4.26: Deneysel çift rotorlu sistem modeli bulanık mantık eklenmiş deney sonuçları (bozucu etki yok) a) yunuslama hareketi açısal değişim b) uygulanan yunuslama momenti c) sapma hareketi açısal değişim d) uygulanan sapma momenti

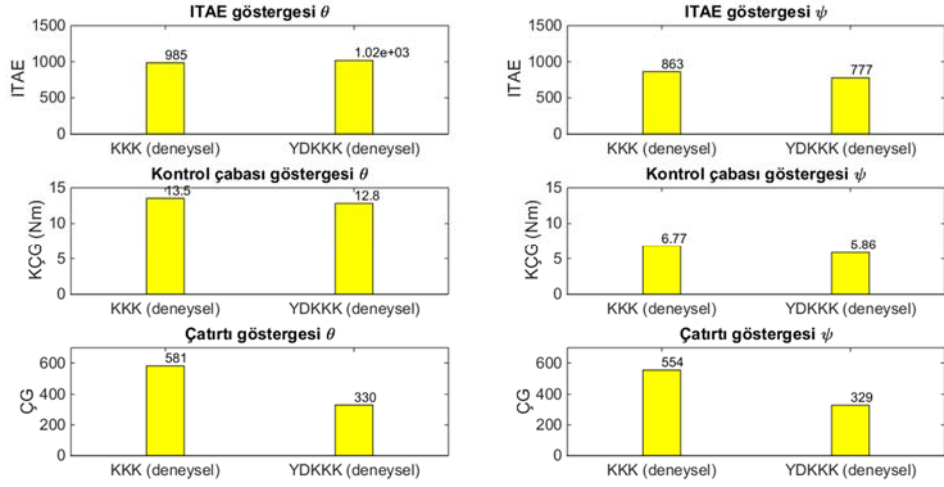


Şekil 4.27: Deneysel çift rotorlu sistem modeli bulanık mantık eklenmiş performans kriterleri (bozucu etki yok)

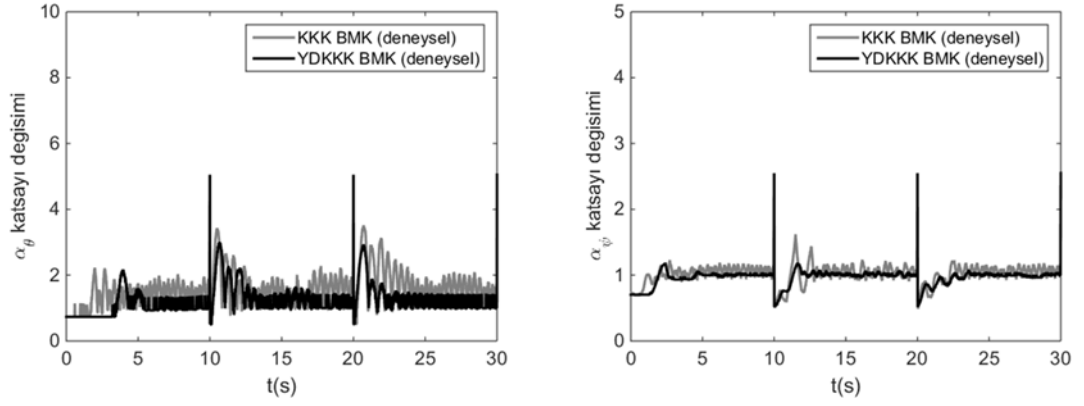


Şekil 4.28: Deneysel çift rotorlu sistem modeli deney sonuçları (bozucu etki var)

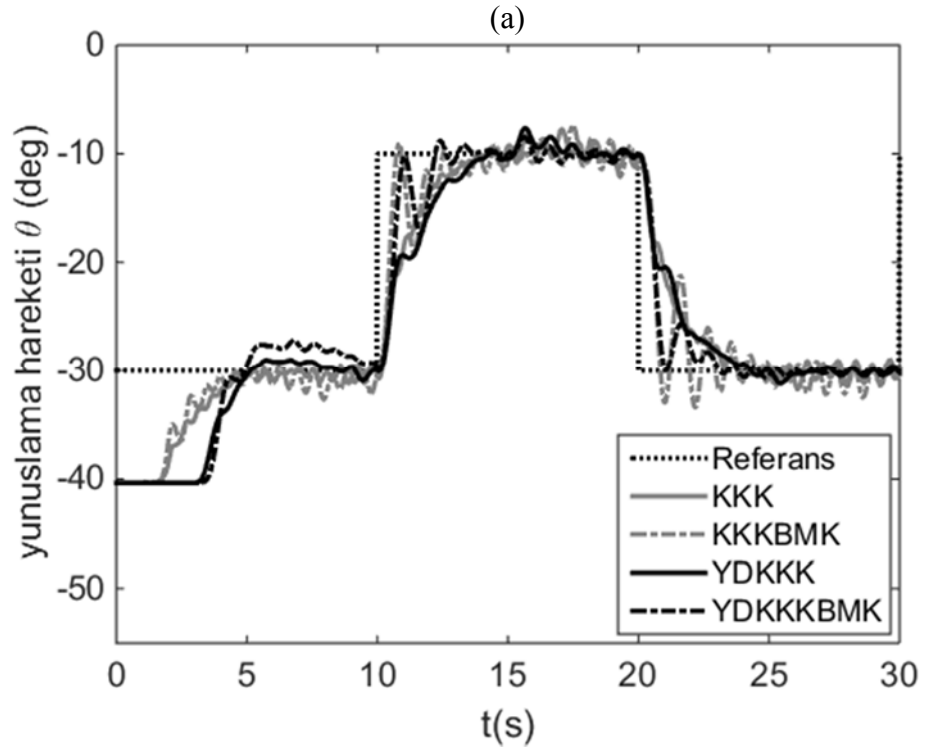
Bozucu etki eklenmiş deneysel sonuçların zaman cevapları Şekil 4.28’de verilmektedir. Deneysel verilerle performansı araştırılan kontrolcünün referansı izlemeye çalıştığı görülmektedir. Kontrol voltajı değerinin zamanla değişimi incelendiğinde her iki eksendeki hareketlerde KKK’de görülen yüksek çadırta bileşenleri, YDKKK tasarımı sayesinde etkili olamamaktadır. Zaman cevaplarının, performans kriterleriyle incelenmesi Şekil 4.29’de verilmektedir. İzleme hatalarının değerlendirildiği ITAE kriterine göre YDKKK, sapma hareketinde etkili olmakta, yunuslama hareketinde aynı performansı gösterememektedir. Kontrol çabası göstergesinde her iki eksen hareketinde de YDKKK’nın etkisi görülmektedir. YDDKK’nın çadırtaı gidermede ki başarısı KKK’ya göre yunuslama hareketi için % 43, sapma hareketi için % 41 oranında azalma olarak görülmektedir. Sonuçların bozucu etki olmayan durumla benzerliği, tasarlanan kontrolcünün dış kaynaklı bozucu etkilere karşı duyarsız olması sonucunu doğrulanmaktadır.

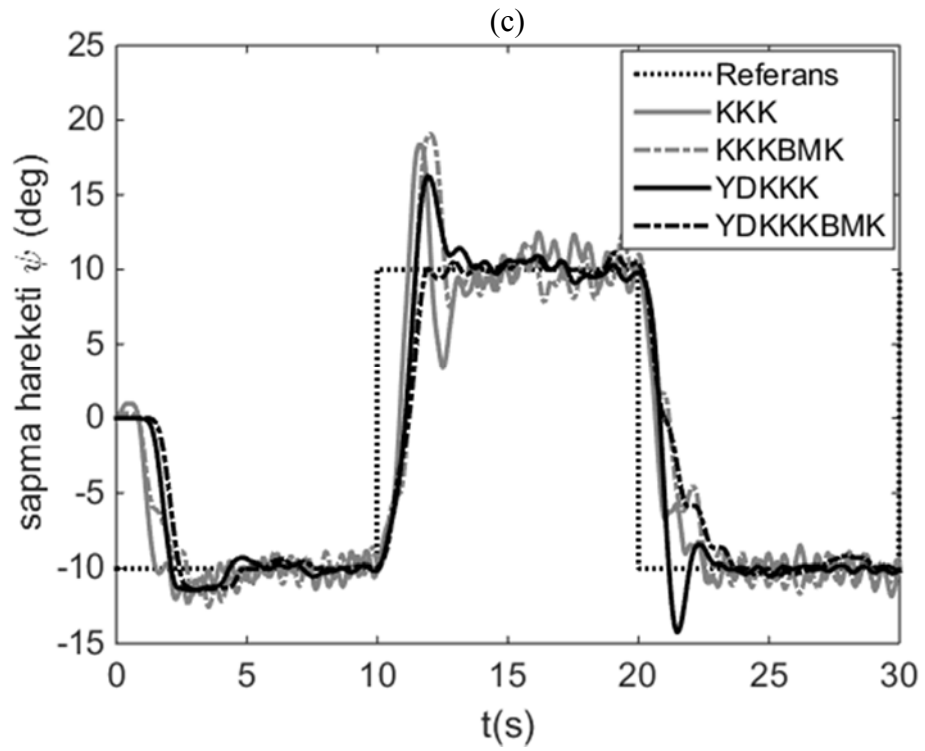
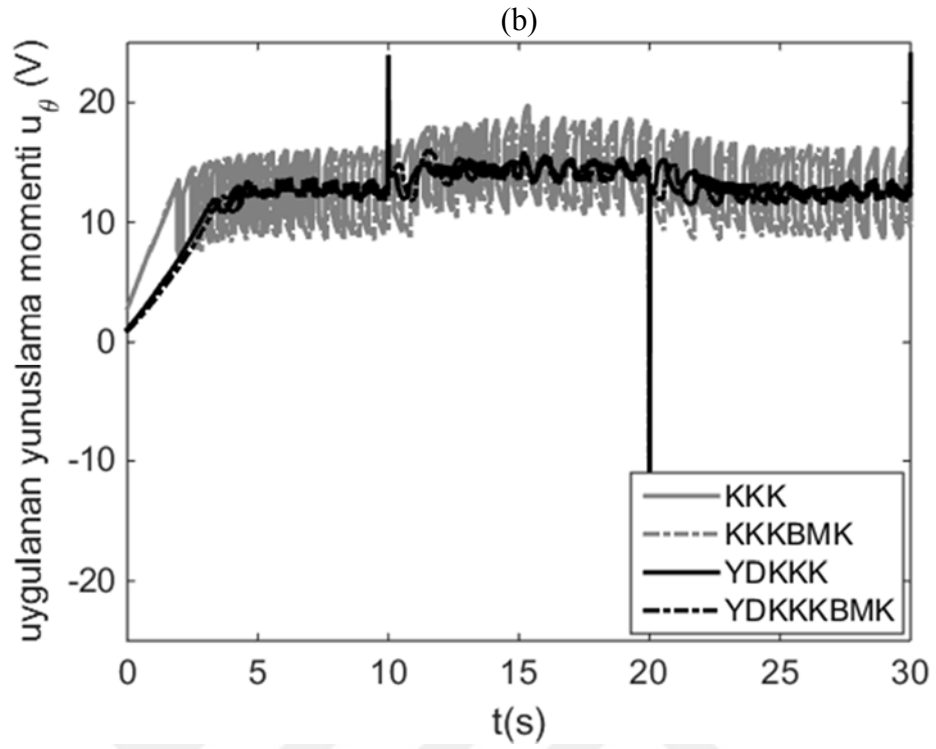


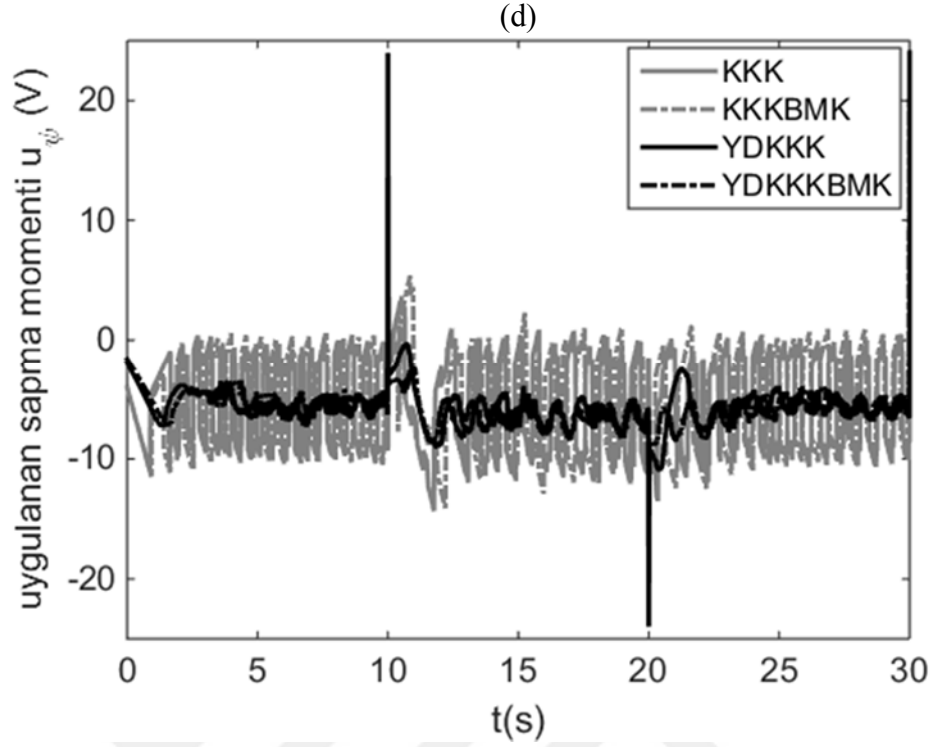
Şekil 4.29: Deneysel çift rotorlu sistem modeli performans kriterleri (bozucu etki var)



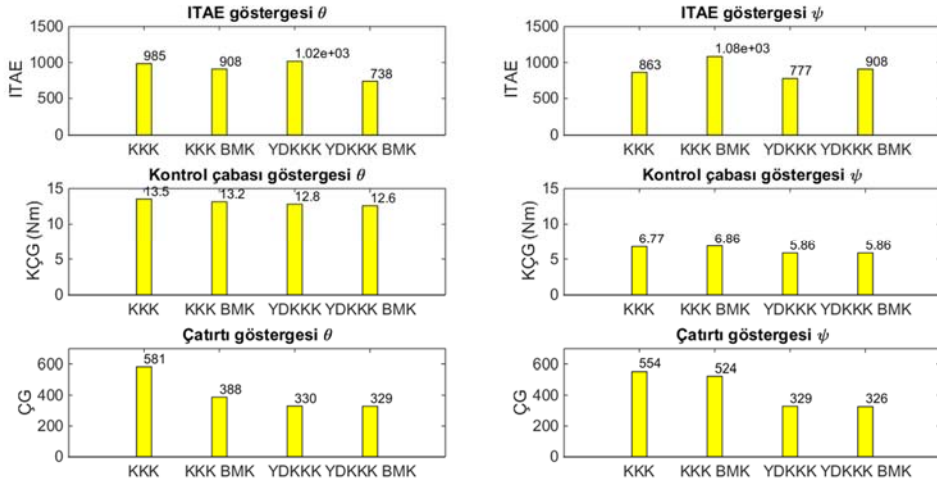
Şekil 4.30: Bulanık mantıkla bulunan kayma yüzeyi katsayılarının deneysel değişimi (bozucu etki var)







Şekil 4.31: Deneysel çift rotorlu sistem modeli bulanık mantık eklenmiş deney sonuçları (bozucu etki var) a) yunuslama hareketi açısıl değişim b) uygulanan yunuslama momenti c) sapma hareketi açısıl değişim d) uygulanan sapma momenti



Şekil 4.32: Deneysel çift rotorlu sistem modeli bulanık mantık eklenmiş performans kriterleri (bozucu etki var)

Kayma yüzeyi parametrelerinin zamanla değişimi Şekil 4.30'da verilmektedir. Kayma yüzeyi parametreleri her iki eksendeki hareket için bulanık mantık yardımıyla tayin edilen deneysel sistemin zaman cevapları Şekil 4.31'de verilmektedir. Bulanık mantığın kayma yüzeyine eklenmesi ile şekilden görüleceği üzere sapma hareketinde KKK'da referans değerini aşım görülmektedir. YDKKK'da bulanık mantığın eklenmesi ile aşım problemi ortadan kaldırılmıştır. Zaman cevaplarının, başta verilen performans kriterleriyle incelenmesi Şekil 4.32'de verilmektedir. İzleme hatalarının değerlendirildiği ITAE kriterine göre bulanık mantığın eklenmesi ile YDKKK için, yunuslama hareketinde %28 azalma görülmektedir. Bozucu etki bu değerlere göre kontrolcü üzerinde etkisi yoktur. Kontrol çabasında artış görülmemesi ile kontrolcünün performansının artırılmış olduğu söylenebilir. Bulanık mantık kullanımı, sapma hareketinde her iki kontrolcü için ITAE değerini arttırmıştır.

Tablo 4.11: Çift rotorlu sistem modeli deneysel sonuçlar

	KKK				KKK BMK				YDKKK				YDKKK BMK			
	θ		ψ		θ		ψ		θ		ψ		θ		ψ	
	Bozucu etki yok	Bozucu etki var	Bozucu etki yok	Bozucu etki var	Bozucu etki yok	Bozucu etki var	Bozucu etki yok	Bozucu etki var	Bozucu etki yok	Bozucu etki var	Bozucu etki yok	Bozucu etki var	Bozucu etki yok	Bozucu etki var	Bozucu etki yok	Bozucu etki var
ITAE	985	985	1050	863	812	908	1120	1080	938	1020	701	777	771	738	929	908
KÇG (Nm)	13.3	13.5	6.48	6.77	13.1	13.2	6.78	6.86	12.6	12.8	5.61	5.86	12.6	12.6	5.97	5.86
ÇG	564	581	563	554	383	388	462	524	330	330	328	329	332	329	327	326

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tezde, yeni kestirimli eşdeğer kontrolü kullanan yüksek dereceli kayan kipli kontrol (YDKKK) yöntemleri geliştirilerek aktif süspansiyonlu çeyrek taşıt ve çift rotorlu sistem gibi mekanik sistemlerine uygulanmıştır.

Kontrol sistemlerine gerçek uygulamalarda etkiyen bozucu etkiler ve bu sistemlerde kullanılan ekipmanlardan kaynaklanan faktörler tehlikeli titreşimlere sebep olabilmektedir. Klasik kayan kipli kontrolcü tasarımlarıyla, çatırtı adı verilen bu oluşumlarının ortadan kaldırılması sınırlı olduğundan son yıllarda tercih edilen YDKKK tasarlanması yoluna gidilmiştir. Ayrıca bu tez çalışmasında YDKKK sistemlerine eşdeğer kontrol kuvvetinin kestirimi de eklenerek kontrolcü tasarımında yenilik getirilmesi hedeflenmiştir. Rölatif derecenin 1 olduğu durumlarda YDKKK tasarlanabilmesini sağlayan süper twisting algoritması da tezde kontrolcü tasarımında kullanılan bir metottur. Tasarlanan kontrolcünün kazanç katsayılarının tayin edilmesinde son yıllarda önemi artan optimizasyon metotlarından olan Çok Amaçlı Genetik Algoritma (ÇOGA) kullanılmıştır. Bu metodun kullanılmasıyla kazanç katsayıları iyileştirilerek kontrolcü performansı arttırılmaktadır. Kayan kipli kontrolcü katsayıların tayin edilmesinde kullanılan optimizasyon tekniklerinin YDKKK tasarımına eklenmesi yazarın bilgisine göre bu konuda yeniliktir.

Söz konusu kontrolcünün performansı aktif süspansiyonlu çeyrek taşıt modelinde ve çift rotorlu dinamik sistem modeli üzerinde incelenmiştir. Aktif süspansiyonlu çeyrek taşıt modelinde kontrolcü katsayılarının ÇOGA ile belirlendiği kestirimli eşdeğer kuvvet kullanılan YDKKK uygulanmıştır. Çift rotorlu sitem modelinde ise kayma yüzeyinin eğiminin bulanık mantıkla tayin edildiği ve diğer kontrolcü katsayılarının ÇOGA ile belirlendiği kestirimli eşdeğer kuvvet kullanılan YDKKK uygulanmıştır. Uygulanan kontrolcülerin performansı zaman cevapları ve tanımlanan kriterler doğrultusunda bilgisayar benzetimleri ile gösterilmiştir. Bilgisayar benzetimlerinde yapılan kabullerin ve modellemenin tamamen gerçek ortamı yansıtmadığı düşünülürse tasarlanan kontrolcülerin gerçek durumlarda nasıl cevap vereceğine laboratuvar ortamında yapılan deneylerle yanıt aranmıştır. Her iki mekanik sistemin de laboratuvar ortamında bulunan

deneysel modelleri ile tasarlanan kontrolcülerin gerçek zamanlı deneyleri yapılmış ve sonuçlar incelenmiştir.

Aktif süspansiyonlu çeyrek taşıt modelinde yapılan bilgisayar benzetimleri ile tasarlanan YDKKK'nın taşıt ana kütlelerinin yer değiştirme, ivme genliklerini azalttığı bu sonuç doğrultusunda da konforunu arttırdığı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak dinamik tekerlek yükü ve süspansiyon açıklıkları değerlerinin kontrolcü uygulaması ile arttırılmadığı gözlemlenmektedir. Kontrol sinyalinin zaman cevapları incelendiğinde KKK'de görülen yüksek çatırtı bileşenleri, YDKKK tasarımı sayesinde etkili olamamaktadır. Çatırtının engellenmesi YDKKK ile aynı kontrolcü kuvvetleriyle mümkün olmaktadır.

Aktif kontrolcülü çeyrek taşıt modelinin deneysel sonuçlarından taşıt ana kütlelerinin y ve ivme zaman cevaplarında tasarlanan YDKKK ile iyileşme sağlanmıştır. Bu gelişme sağlanırken süspansiyon açıklıkları ve dinamik tekerlek yükü, kontrolcüsüz durumla kıyaslandığında kötüleşmemektedir. Yol tutuşundan kayıp vermeden sürüş konforu arttırılmaktadır. Bir diğer önemli üstünlük olan çatırtının engellenmesi deneysel sonuçlarda YDKKK'da açıkça gözlemlenmektedir.

Aktif kontrolcülü çeyrek taşıt modeline verilen dış bozucu etkinin eklenmesiyle tasarlanan kontrolcünün bu durumlara tepkisi incelenmiştir. Bilgisayar benzetimleri ve deneysel sonuçlara göre bozucu etkinin eklenmesi ile kontrolcü performansı azalmamakta ve dış etkilere karşı gürbüz olmasını sonucunu doğrulamaktadır.

Çift rotorlu sistem modeli üzerindeki bilgisayar benzetim sonuçları sistemin verilen referans değerini izlediğini göstermektedir. Tasarlanan YDKKK'nın yunuslama ve sapma hareketleri değerlerini referans değerine yaklaştırdıkları görülmektedir. Kontrol voltajı değerinin zamanla değişimi incelendiğinde her iki eksendeki hareketlerdeki çatırtı bileşenleri, YDKKK tasarımı sayesinde etkili olamamaktadır.

Çift rotorlu sistem modeli üzerindeki deneysel sonuçları tasarlanan kontrolcünün referansı izlemeye çalıştığı görülmektedir. Kontrol voltajı sinyalinde görülen çatırtı YDKKK ile sistemden arındırılmaktadır. Kontrol çabası göstergesine göre YDKKK her iki eksendeki harekette KKK'ya göre daha az kontrolcü kuvvetine ihtiyaç duymaktadır.

Çift rotorlu sistem modelinin kayma yüzeyi parametreleri her iki eksenindeki hareket için bulanık mantık yardımıyla tayin edilmiştir. Böylece izleme hatasının iyileştirilmesinin arttırılması hedeflenmiştir. Bilgisayar benzetimi ve deneysel sonuçlara göre kayma yüzeyinin eğimine bulanık mantıkla karar verilmesi ile yunuslama hareketinin izleme hatasını ve aşım değerleri iyileştirilmiştir. Bu iyileşme elde edilirken kontrol çabasının arttırılmaması ise kontrol performansını arttırmaktadır.

Çift rotorlu sistem modelinde yukarıda anlatılan çalışmalara ek olarak sisteme verilen dış bozucu etkiyle tasarlanan kontrolcünün bu duruma tepkisi incelenmiştir. Bilgisayar benzetimleri ve deneysel sonuçlara göre bozucu etkinin eklenmesi ile kontrolcü performansı azalmamakta ve dış etkilere karşı gürbüz olmasını sonucunu doğrulamaktadır.

Sonuç olarak, bu tezde geliştirilen kazanç katsayılarının ÇOGA ile tayin edildiği eşdeğer kuvvet kestirimli YDKKKK literatüre getirilen yenilikler olmuştur. Tasarlanan ve yenilik içeren YDKKKK aktif süspansiyonlu çeyrek taşıt modeli ve çift rotorlu sistem modeline başarıyla uygulanmıştır. Tasarlanan kontrolcünün performansının deneysel sistem modellerinde laboratuvar ortamında gerçek zamanlı verilerle doğrulanması bu tezde uygulama anlamında getirilen önemli yeniliklerdir. Tasarlanan kontrolcülerin farklı mekanik sistemlere uygulanması gelecekte yapılacak çalışmalar olarak hedeflenmektedir. Tasarlanan kontrolcünün mühendislik sistemlerinin kontrolünde ve yeni kontrolcü tasarımlarına ışık tutacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1]. Utkin, V.I., 1992, *Sliding Modes in Control and Optimization*, Springer Verlag.
- [2]. Zinober, A.S.I., 2014, *Variable Structure and Lyapunov Control*, Springer.
- [3]. Edwards, C., Spurgeon, S., 1998, *Sliding Mode Control: Theory And Applications*, Taylor & Francis.
- [4]. Fridman, L.M., 2001, An averaging approach to chattering, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 46(8), 1260-1265.
- [5]. Fridman, L.M., 2003, Chattering analysis in sliding mode systems with inertial sensors, *International Journal of Control*, 76(9-10), 906-912.
- [6]. Boiko, I., Fridman, L., 2005, Analysis of chattering in continuous sliding-mode controllers, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 50(9), 1442-1446.
- [7]. Young, K.D., Utkin, V.I., Ozguner, U., 1996, A control engineer's guide to sliding mode control, *1996 IEEE International Workshop on Variable Structure Systems - VSS '96, Proceedings*, 1-14.
- [8]. Camacho, O., Rojas, R., 2000, A general sliding mode controller for nonlinear chemical processes, *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the Asme*, 122(4), 650-655.
- [9]. Guo, J., Chiu, F.C., Huang, C.C., 2003, Design of a sliding mode fuzzy controller for the guidance and control of an autonomous underwater vehicle, *Ocean Engineering*, 30(16), 2137-2155.
- [10]. Song, J., 2005, Performance evaluation of a hybrid electric brake system with a sliding mode controller, *Mechatronics*, 15(3), 339-358.
- [11]. Chang, Y., Gao, B., 2010, A Global Sliding Mode Controller Design for an Intra-Aorta Pump, *Asaio Journal*, 56(6), 510-516.
- [12]. Park, G., Gajic, Z., 2014, A Simple Sliding Mode Controller of a Fifth-Order Nonlinear PEM Fuel Cell Model, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 29(1), 65-71.
- [13]. Levant, A., 2010, Chattering Analysis, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 55(6), 1380-1389.
- [14]. Bartolini, G., 1989, Chattering Phenomena in Discontinuous Control-Systems, *International Journal of Systems Science*, 20(12), 2471-2481.

- [15]. Bartolini, G., Ferrara, A., Usai, E., 1998, Chattering avoidance by second-order sliding mode control, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 43(2), 241-246.
- [16]. Bartolini, G., Ferrara, A., Usai, E., Utkin, V.I., 2000, On multi-input chattering-free second-order sliding mode control, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45(9), 1711-1717.
- [17]. Boiko, I., 2003, Frequency domain analysis of fast and slow motions in sliding modes, *Asian Journal of Control*, 5(4), 445-453.
- [18]. Boiko, I., Fridman, L., Pisano, A., Usai, E., 2007, Analysis of chattering in systems with second-order sliding modes, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52(11), 2085-2102.
- [19]. Levant, A., 1993, Sliding Order and Sliding Accuracy in Sliding Mode Control, *International Journal of Control*, 58(6), 1247-1263.
- [20]. Levant, A., Fridman, L.M., 2010, Accuracy of Homogeneous Sliding Modes in the Presence of Fast Actuators, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 55(3), 810-814.
- [21]. Slotine, J.J.E., Li, W., 1991, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall.
- [22]. Furuta, K., Pan, Y., 2000, Variable structure control with sliding sector, *Automatica*, 36(2), 211-228.
- [23]. Levant, A., 1998, Robust exact differentiation via sliding mode technique, *Automatica*, 34(3), 379-384.
- [24]. Levant, A., 2003, Higher-order sliding modes, differentiation and output-feedback control, *International Journal of Control*, 76(9-10), 924-941.
- [25]. Floquet, T., Barbot, J.P., Perruquetti, W., 2003, Higher-order sliding mode stabilization for a class of nonholonomic perturbed systems, *Automatica*, 39(6), 1077-1083.
- [26]. Davila, J., Fridman, L., Levant, A., 2005, Second-order sliding-mode observer for mechanical systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 50(11), 1785-1789.
- [27]. Orlov, Y., 2005, Finite Time Stability and Robust Control Synthesis of Uncertain Switched Systems, *Siam Journal on Control and Optimization*, 43(4), 1253-1271.
- [28]. Levant, A., 1998, Arbitrary-order sliding modes with finite time convergence, *Proc. of the 6th IEEE Mediterranean Conference on Control and Systems*.
- [29]. Emelianov, S.V., Korovin, S.K., Levantovskii, L.V., 1986, Higher-Order Sliding Modes in Nonlinear Control-Systems, *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 287(6), 1338-1342.

- [30]. Emelyanov, S.V., Korovin, S.K., Levant, A., 1993, Higher-Order Sliding Modes in Control-Systems, *Differential Equations*, 29(11), 1627-1647.
- [31]. Levant, A., 2005, Quasi-continuous high-order sliding-mode controllers, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 50(11), 1812-1816.
- [32]. Levant, A., Michael, A., 2009, Adjustment of high-order sliding-mode controllers, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 19(15), 1657-1672.
- [33]. Mien, V., Kang, H.J., Shin, K.S., 2014, Adaptive fuzzy quasi-continuous high-order sliding mode controller for output feedback tracking control of robot manipulators, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C- Journal of Mechanical Engineering Science*, 228(1), 90-107.
- [34]. Smaoui, M., Brun, X., Thomasset, D., 2008, High-order sliding mode for an electropneumatic system: A robust differentiator-controller design, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 18(4-5), 481-501.
- [35]. Traore, D., Plestan, F., Glumineau, A., De Leon, J., 2008, Sensorless Induction Motor: High-Order Sliding-Mode Controller and Adaptive Interconnected Observer, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(11), 3818-3827.
- [36]. Loukianov, A.G., Canedo, J.M., Fridman, L.M., Soto-Cota, A., 2011, High-Order Block Sliding-Mode Controller for a Synchronous Generator With an Exciter System, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 337-347.
- [37]. Chen, C.L., Peng, C.C., Yau, H.T., 2012, High-order sliding mode controller with backstepping design for aeroelastic systems, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 17(4), 1813-1823.
- [38]. Huangfu, Y.G., Ma, R.Q., Miraoui, A., 2012, Avoidance High-Frequency Chattering Second-Order Sliding Mode Controller Design: Buck Converter in Wind Power System, *International Journal of Antennas and Propagation*.
- [39]. Tian, B.L., Zong, Q., Wang, J., Wang, F., 2013, Quasi-continuous high-order sliding mode controller design for reusable launch vehicles in reentry phase, *Aerospace Science and Technology*, 28(1), 198-207.
- [40]. Zadeh, L.A., 1965, Fuzzy sets, *Information and Control*, 8(3), 338-353.
- [41]. Hacioglu, Y., Arslan, Y.Z., Yagiz, N., 2011, MIMO fuzzy sliding mode controlled dual arm robot in load transportation, *Journal of the Franklin Institute-Engineering and Applied Mathematics*, 348(8), 1886-1902.
- [42]. Ozer, H.O., Hacioglu, Y., Yagiz, N., 2015, Suppression of structural vibrations using PDPI + PI type fuzzy logic controlled active dynamic absorber, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 1-11, Doi: 10.1007/s40430-015-0462-x

- [43]. Londhe, P.S., Patre, B.M., Tiwari, A.P., 2014, Design of Single-Input Fuzzy Logic Controller for Spatial Control of Advanced Heavy Water Reactor, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 61(2), 901-911.
- [44]. Liu, Y.B., Yao, K.M., Lu, Y.P., 2014, Research on fuzzy logic control methods for Mars airplane, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 86(5), 415-422.
- [45]. Rechenberg, I., 1973, *Evolutionstrategie (Evolution Strategy)*, Stuttgart, Frommann-Holzboog.
- [46]. Goldberg, D.A., 1989, *Genetic Algorithms in Search, Optimisation and Machine Learning*, Reading, Addison- Wesley.
- [47]. Koza, J.R., 1992, *Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection*, Cambridge, MA, USA, MIT Press.
- [48]. Chiou, J.S., Liu, M.T., 2009, Using Fuzzy Logic Controller and Evolutionary Genetic Algorithm for Automotive Active Suspension System, *International Journal of Automotive Technology*, 10(6), 703-710.
- [49]. Loghmanian, S.M.R., Jamaluddin, H., Ahmad, R., Yusof, R., Khalid, M., 2012, Structure optimization of neural network for dynamic system modeling using multi-objective genetic algorithm, *Neural Computing & Applications*, 21(6), 1281-1295.
- [50]. Ozer, H.O., Sayin, A., Korkmaz, N., Yagiz, N., 2016, Sliding Mode Control Optimized by Genetic Algorithm for Building Model, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 4(1), 13-19.
- [51]. Choi, S.B., Han, S.S., 2003, H-infinity control of electrorheological suspension system subjected to parameter uncertainties, *Mechatronics*, 13(7), 639-657.
- [52]. Lai, C.Y., Liao, W.H., 2002, Vibration control of a suspension system via a magnetorheological fluid damper, *Journal of Vibration and Control*, 8(4), 527-547.
- [53]. Taskin, Y., Hacıoglu, Y., Yagiz, N., 2007, The use of fuzzy-logic control to improve the ride comfort of vehicles, *Strojniski Vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 53(4), 233-240.
- [54]. Demir, O., Keskin, I., Cetin, S., 2012, Modeling and control of a nonlinear half-vehicle suspension system: a hybrid fuzzy logic approach, *Nonlinear Dynamics*, 67(3), 2139-2151.
- [55]. Li, H.Y., Liu, H.H., Hand, S., Hilton, C., 2012, Multi-objective H-infinity control for vehicle active suspension systems with random actuator delay, *International Journal of Systems Science*, 43(12), 2214-2227.

- [56]. Kong, Y.S., Zhao, D.X., Yang, B., Han, C.H., Han, K., 2014, Non-fragile multi-objective static output feedback control of vehicle active suspension with time-delay, *Vehicle System Dynamics*, 52(7), 948-968.
- [57]. Lin, J.S., Kanellakopoulos, I., 1997, Nonlinear design of active suspensions, *IEEE Control Systems Magazine*, 17(3), 45-59.
- [58]. Arslan, Y.Z., Sezgin, A., Yagiz, N., 2015, Improving the ride comfort of vehicle passenger using fuzzy sliding mode controller, *Journal of Vibration and Control*, 21(9), 1667-1679.
- [59]. Yagiz, N., Hacıoglu, Y., 2008, Backstepping control of a vehicle with active suspensions, *Control Engineering Practice*, 16(12), 1457-1467.
- [60]. Wen, P., Lu, T.W., 2008, Decoupling control of a twin rotor MIMO system using robust deadbeat control technique, *IET Control Theory and Applications*, 2(11), 999-1007.
- [61]. Tao, C.W., Taur, J.S., Chang, Y.H., Chang, C.W., 2010, A Novel Fuzzy-Sliding and Fuzzy-Integral-Sliding Controller for the Twin-Rotor Multi-Input-Multi-Output System, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 18(5), 893-905.
- [62]. Ahmed, Q., Bhatti, A.I., Iqbal, S., 2009, Nonlinear robust decoupling control design for twin rotor system, in *Asian Control Conference, 2009. ASCC 2009. 7th*.
- [63]. Mondal, S., Mahanta, C., 2012, Adaptive second-order sliding mode controller for a twin rotor multi-input-multi-output system, *IET Control Theory and Applications*, 6(14), 2157-2167.
- [64]. Tao, C.W., Taur, J.S., Chen, Y.C., 2010, Design of a parallel distributed fuzzy LQR controller for the twin rotor multi-input multi-output system, *Fuzzy Sets and Systems*, 161(15), 2081-2103.
- [65]. Juang, J.G., Liu, W.K., Lin, R.W., 2011, A hybrid intelligent controller for a twin rotor MIMO system and its hardware implementation, *ISA Transactions*, 50(4), 609-619.
- [66]. Aras, A.C., Kaynak, O., 2014, Interval Type-2 Fuzzy Neural System Based Control with Recursive Fuzzy C-Means Clustering, *International Journal of Fuzzy Systems*, 16(3), 317-326.
- [67]. Hacıoglu, Y., 2015, Multiple-input multiple-output proportional-integral-proportional-derivative type fuzzy logic controller design for a twin rotor system, *Journal of Vibroengineering*, 17(6), 3104-3110.
- [68]. Lyapunov, A.M., 1992, The general problem of the stability of motion, *International Journal of Control*, 55(3), 531-534.
- [69]. Khalil, H.K., 2002, *Nonlinear Systems*, Prentice Hall.

- [70]. Bartolini, G., Pydynowski, P., 1996, An improved, chattering free, VSC scheme for uncertain dynamical systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 41(8), 1220-1226.
- [71]. Bartolini, G., Ferrara, A., Usai, E., 1997, Applications of a sub-optimal discontinuous control algorithm for uncertain second order systems, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 7(4), 299-319.
- [72]. Emelyanov, S.V., 1967, *Variable Structure Control Systems*, Nauka.
- [73]. Emelyanov, S.V., 1970, *Theory of Variable Structure Systems*, Nauka.
- [74]. Perruquetti, W.B., J. P. , 2002, *Sliding Mode Control In Engineering*, New-York, USA, Marcel Dekker Inc.
- [75]. Filippov, A.F., 1988, *Differential Equations with Discontinuous Right-Hand Side*, Dordrecht, the Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- [76]. Fridman, L., Levant, A., 1996, *Higher order sliding modes as a natural phenomenon in control theory*, in *Robust Control via Variable Structure and Lyapunov Techniques*, Garofalo, F. ,Glielmo, L., Editors, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, p. 107-133.
- [77]. Bartolini, G., Ferrara, A., Levant, F., Usai, E., 1999, On second order sliding mode controllers, *Variable Structure Systems, Sliding Mode and Nonlinear Control*, 247, 329-350.
- [78]. Emelyanov, S.V., Korovin, S.K., Levantovskiy, L.V., 1986, A Drift Algorithm in Control of Uncertain Processes, *Problems of Control and Information Theory- Problemy Upravleniya I Teorii Informatsii*, 15(6), 425-438.
- [79]. Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L., Levant, A., 2014, *Sliding Mode Control and Observation*, ed. Levine, W.S., New York, Springer Heidelberg.
- [80]. Levantovsky, L., 1985, Second order sliding algorithms: their realization, *Dynamics of Heterogeneous Systems*, 32-43.
- [81]. Emalyanov, S., Korovin, S., Levantovsky, L., 1986, Higher order sliding modes in the binary control system, in *Soviet Physics, Doklady*.
- [82]. Emelyanov, S., Korovin, S., Levantovsky, L., 1986, Second order sliding modes in controlling uncertain systems, *Soviet Journal of Computer and System Science*, 24(4), 63-68.
- [83]. Fridman, L., Levant, A., 2002, *Higher order sliding modes*, in *Sliding Mode Control In Engineering*, Perruquetti, W.B., J. P. , Editor, Marcel Dekker Inc.: New-York, USA, p. 53-102.

- [84]. Moreno, J.A., Osorio, M., 2008, A Lyapunov approach to second-order sliding mode controllers and observers, *47th IEEE Conference on Decision and Control, 2008 (Cdc 2008)*, 2856-2861.
- [85]. Rivera, J.G., L. ; Mora, C. ; Raygoza, J. J. ; Ortega S., 2011, *Super-Twisting Sliding Mode in Motion Control Systems*, in *Sliding Mode Control*, Bartoszewicz, P.A., Editor, InTech China: China, p. 237-254.
- [86]. Utkin, V.I.G., J.; Shi, J. , 1999, *Sliding mode in control in electromechanical systems*, London, Taylor & Francis.
- [87]. Holland, J.H., 1975, *Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*, Ann Arbor, University of Michigan Press.
- [88]. Bolat, B.E., K. O.; Imrak, C. E., 2004, Genetic algorithms in engineering applications and the function of operators *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences* 4, 264-271.
- [89]. Yagiz, N., Hacioglu, Y., 2005, Fuzzy sliding modes with moving surface for the robust control of a planar robot, *Journal of Vibration and Control*, 11(7), 903-922.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler



Adı Soyadı	HASAN ÖMÜR ÖZER
Uyruğu	TC
Doğum tarihi, Yeri	03/01/1983, İSTANBUL
Telefon	0 212 473 70 70 – 18552
E-mail	omurozer@istanbul.edu.tr
Web adres	

Eğitim

Derece	Kurum/Anabilim Dalı/Programı	Yılı
Doktora	İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü/Makine Mühendisliği ABD	2016
Yüksek Lisans	İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü/Makine Mühendisliği ABD	2008
Lisans	İstanbul Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	2005
Lisans	İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü	2004
Lise	Pertevniyal Lisesi	2000

Makaleler / Bildiriler

BİLİMSEL ATIF İNDEKSİNE GİREN HAKEMLİ DERGİLERDEKİ YAYINLAR

- [1] Ozer H. O., Hacıoglu Y., Yagiz N., 2015, Suppression of structural vibrations using PDPI + PI type fuzzy logic controlled active dynamic absorber, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 1-11, Doi: 10.1007/s40430-015-0462-x

- [2] Ozer H. O., Sayin A., Korkmaz N., Yagiz N., 2016, Sliding Mode Control Optimized By Genetic Algorithm For Building Model, *Journal of Vibration Engineering and Technologies*, 4(1), 13-19.

HAKEMLİ DERGİLERDEKİ YAYINLAR

- [1] Ozer H. O., Sayin A., Korkmaz N., Yagiz N., 2015, Sliding Mode Control Tuned by Multi Objective Genetic Algorithm for a Half Vehicle, *International Journal of Scientific and Technological Research*, 1(9), 42-54.

ULUSLARARASI KONGRE YAYINLARI

- [1] Ozer H. O., Yagiz N., 2011, Reducing Vibration Effects on the Two Storey Building Model Using Dynamic Absorber, *Second International Conference on Advances in Mechanical Engineering - AME 2011, Noida, Hindistan.*

- [2] Ozer H. O., Yagiz N., 2012, Dynamic Absorber Design for Experimental Two Storey Building Model, *10th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics -ICNAAM 2012, Kos, Yunanistan*, 1911-1914,

- [3] Ozer H. O., Sayin A., Korkmaz N., Yagiz N., 2013, Sliding Mode Control Optimized By Genetic Algorithm For Building Model, *11th International Conference on Vibration Problems -ICOVP-2013, Lizbon, Portekiz*, 1-10,

- [4] Ozer H. O., Sayin A., Korkmaz N., Yagiz N., 2014, Genetic Algorithm Integrated Sliding Mode Control of a Vehicle, *11th World Congress on Computational Mechanics -WCCM XI, 5th European Conference on Computational Mechanics-ECCM V, Barcelona, İspanya*, 3857-3868.

- [5] Ozer H. O., Hacıoglu Y., Yagiz N., 2015, High Order Sliding Mode Control of a Pendulum, *2nd International Conference on Electrical, Computer, Mechanical and Mechatronics Engineering (ICE2015), İstanbul, Türkiye*, 52-52.

- [6] Ozer H. O., Yagiz N., Hacıoglu Y., 2015, Suppression of Structural Vibrations Using Dynamic Absorber, *International Conference on Engineering Vibration (ICOEV 2015), Ljubljana, Slovenya*, 897-907,

- [7] Sayin A., Ozer H. O., 2015, Controlling of the Full Vehicle Model Using Sliding Model Control Optimized by Genetic Algorithm, *International Conference on Engineering Vibration (ICOEV2015), Ljubljana, Slovenya*, 886-896.

ULUSAL KONGRE YAYINLARI

- [1] Özer H. Ö., Yağız N., 2011, Bir Bina Modelinin Titreşimlerinin Deneysel Analizi , *15. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, Niğde*, 559-565.