



**İSKENDERUN TEKNİK**

**ÜNİVERSİTESİ**

**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA  
TEZİ**

**ESNEK SİSTEMLERİN KONTROLÜ İÇİN  
YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ İLE GİRDİ  
ŞEKİLLENDİRİCİ TASARIMI**

**Hasan Hüseyin BİLGİÇ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**HAZİRAN 2018**



**ESNEK SİSTEMLERİN KONTROLÜ İÇİN YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ  
İLE GİRDİ ŞEKİLLENDİRİCİ TASARIMI**

**Hasan Hüseyin BİLGİÇ**

**DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

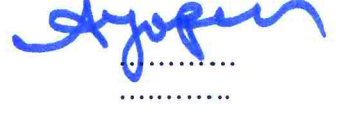
**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2018**

Hasan Hüseyin BİLGİÇ tarafından hazırlanan “ESNEK SİSTEMLERİN KONTROLÜ İÇİN YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ İLE GİRDİ ŞEKİLLENDİRİCİ TASARIMI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Ahmet YAPICI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi  
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum~~.



**İkinci Danışman:** Prof. Dr. Hakan YAVUZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi  
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum~~.



**Başkan:** Prof. Dr. Sadettin KAPUCU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gaziantep Üniversitesi  
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum~~.



**Üye:** Doç. Dr. Selçuk MISTIKOĞLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi  
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum~~.



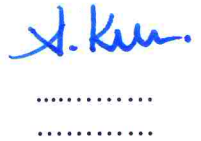
**Üye:** Dr. Öğr. Üyesi Murat FURAT

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi  
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum~~.



**Üye:** Dr. Öğr. Üyesi Ali KILIÇ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gaziantep Üniversitesi  
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum~~.



Tez Savunma Tarihi: 01/06/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.



Doç. Dr. Tolga DEPCİ

Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü V.

## ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

  
İmza

Hasan Hüseyin BİLGİÇ

01/06/2018

ESNEK SİSTEMLERİN KONTROLÜ İÇİN YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ İLE GİRDİ  
ŞEKİLLENDİRİCİ TASARIMI  
(Doktora Tezi)

Hasan Hüseyin BİLGİÇ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2018

ÖZET

Esnek ve hafif sistemlerin kullanımı, rijit ve ağır sistemlerin kullanımı ile karşılaştırıldığında yüksek operasyon hızı, düşük elektrik tüketimi, üretim ve ilk yatırım maliyetlerinde azalma vb. gibi birçok avantajı da beraberinde getirmektedir. Ancak esnek sistemler dinamik sistemlerdir ve hareketleri sonucunda büyük miktarlarda artık titreşim oluşur. Bu artık titreşim genel olarak açık çevrim veya kapalı çevrim kontrol teknikleri ile giderilmeye çalışılır. Tez çalışmaları kapsamında esnek sistemlerde oluşan artık titreşimin azaltılması veya giderilmesi amacı ile açık çevrim denetim sistemlerinden Girdi Şekillendirme teknikleri tasarlanmış ve deneysel uygulamaları yapılmıştır. Ayrıca değişken çalışma koşullarında ortaya çıkan büyük genlikli artık titreşimleri minimize etmek için uygun girdi şekillendirici seçimi amacıyla Bulanık Mantık Tabanlı bir Karar Destek Sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan sisteminin yüksek genlikli artık titreşimlerin minimize edilmesinde başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Açık çevrim uygulamalarının sistem cevabında yetersiz kaldığı durumlar için kapalı çevrim denetim sistemlerinden LQR kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Euler-Lagrange eşitlikleri ile elde edilen matematiksel model yardımı ile sistemin durum uzay modeli MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur. Daha sonra ön tasarımı yapılan LQR kontrolcü kazanç matrisi Arı Algoritması ile optimize edilmiştir. Kontrolcü tasarımında motor pozisyonunun ve esnek uzuv uç açısının minimum sapma ile hareketinin sağlanacağı LQR kontrolcü tasarımı amaçlanmıştır. Önerilen yöntemin başarısını araştırmak amacıyla sistem performansı literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar grafikler halinde sunularak detaylı incelemesi yapılmıştır. Sonuç olarak sunulan yöntemin deneysel doğrulama ile desteklenebildiği görülmüş ve farklı mühendislik sistemleri ve farklı kontrolcü tasarımları için de oldukça iyi bir kontrolcü yaklaşımı olabileceği anlaşılmıştır. Ek olarak, esnek sistemler için açık çevrim ve kapalı çevrim denetim sistemlerinin uygulaması ile denetleyiciler arasındaki farklar ve uygun sisteme göre tercih edilmesi gereken denetleyici seçimi için öneriler de sunulmuştur. Önerilen yöntemlerin başarısı ve gerçek sistemlerde uygulanabilirliği Quanser doğrusal gezer vinç ve esnek uzuv deney cihazları ile doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler : Girdi Şekillendirici, artık titreşim, Bulanık Mantık, Karar Destek Sistemi, LQR, Arı Algoritması,

Sayfa Adedi : 149

Danışman : Prof. Dr. Ahmet YAPICI

İkinci Danışman : Prof. Dr. Hakan YAVUZ

DESIGNING OF INPUT SHAPING USING ARTIFICIAL INTELLIGENT TECHNIQUES  
FOR FLEXIBLE SYSTEMS  
(Ph. D. Thesis)

Hasan Hüseyin BİLGİÇ

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

June 2018

ABSTRACT

In comparison with the use of rigid and heavy systems, the use of flexible and lightweight systems provides advantages such as high operating speeds, reduced electricity consumption and reduced initial investment costs of production as well as many others. However, flexible systems are dynamic systems, and as a result of their movement, there is now a great deal of residual vibration. This residual vibration is generally attempted to be suppressed by open loop or closed loop control techniques. Within the scope of this study, input shaping techniques have been designed and experimental applications have been performed based on open loop control systems aiming at reducing or eliminating residual vibration in such flexible systems. In addition, a Fuzzy Logic based Decision Support System is designed to select the appropriate input shaping technique to minimize the large amplitude residual vibrations in dynamic operating conditions. It has been seen that the designed system has been successful in minimizing the large amplitude vibrations.

For situations where open loop applications are insufficient in system response, an LQR controller design has been made from closed loop control systems. With the help of mathematical model obtained by Euler-Lagrange equations, the state space model of the system is created in MATLAB/Simulink. Then, the pre-design LQR controller gain matrix is optimized with the Bees algorithm. The design of the LQR controller is intended to provide motor position and movements with minimum deviation of the end point of the flexible limb in controller design. In order to investigate the success of the proposed method, the system performance was compared with similar studies in the literature. The results are presented in graphical form and detailed assessment is made. As a result, the proposed method has been confirmed by experimental verification and it is predicted that it can be a useful controller design approach for different engineering systems and different controller designs. In addition, some advises are also provided for the selection of appropriate controllers for flexible system in application of the open loop and closed loop cases as well as selection of control systems. The successful performance of the proposed methods and their applicability in real systems has been verified by the Quanser gantry crane and flexible link systems.

Key Words : Input Shaping, residual vibration, Fuzzy Logic, Decision Support System, LQR, the Bees Algorithm

Page Number : 149

Supervisor : Prof. Dr. Ahmet YAPICI

Second Supervisor : Prof. Dr. Hakan YAVUZ

## TEŞEKKÜR

Doktora sürecim boyunca sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübesi ile çalışmayı yönlendiren ve her türlü yardımı sunan değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Ahmet YAPICI'ya, tez konumun belirlenmesi, araştırılması ve yazımı sırasında değerli bilgilerini ve zamanını benden esirgemeyen ve verdiği bilgilerin akademik hayatıma kattığı değeri asla unutmayacağım ikinci danışmanım Sayın Prof. Dr. Hakan YAVUZ'a ve çalışmalarımın tıkanıdığı, umutsuzluğa kapıldığım anlarda her türlü fedakârlıkta bulunarak çalışmalarımın ilerlemesinde ve başarı ile sonlandırılmasına büyük katkısı bulunan değerli yakın arkadaşım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Çağlar CONKER'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmaların takip edilmesinde değerli katkılarından dolayı Tez İzleme Komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Ahmet YAPICI, Sayın Doç. Dr. Selçuk MISTIKOĞLU ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Murat FURAT'a, tez çalışmalarım sırasında bölüm olanaklarından yararlanmamı sağlayan Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi'ne ve Makine Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na, Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Mete KALYONCU'ya ve Sayın Arş. Gör. Muhammed Arif ŞEN'e, çalışmalarına maddi ve manevi destek veren ve isimlerini burada zikredemediğim ama yardımlarını esirgememiş tüm mesai arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarım sırasında bana olan desteklerini ve güvenlerini her daim hissettiğim, bu hayattaki en büyük şansım olan eşime ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. MATERYAL VE METOT.....	13
2.1. Kontrol Sistemleri ve Özellikleri .....	13
2.2. Deney Düzenekleri.....	21
2.2.1. Doğrusal gezer vinç deney düzeneği.....	21
2.2.2. Esnek uzuv deney düzeneği .....	26
2.3. Girdi Şekillendiriciler.....	31
2.4. Pozitif Girdi Şekillendiriciler .....	35
2.4.1. Sıfır Titreşim (ST) girdi şekillendirici .....	35
2.4.2. Türevsel Sıfır Titreşim (TST) girdi şekillendirici.....	36
2.4.3. Türevsel Türevsel Sıfır Titreşim (TTST) girdi şekillendirici.....	38
2.4.4. Türevsel Türevsel Türevsel Sıfır Titreşim (TTTST) girdi şekillendirici ....	39
2.4.5. Ekstra Duyarsız (ED) girdi şekillendirici.....	41
2.4.6. İki Tepecikli Ekstra Duyarsız (2T-ED) girdi şekillendirici.....	43



2.4.7. Üç Tepecikli Ekstra Duyarsız (3T-ED) girdi şekillendirici .....	45
2.4.8. Modifiye Edilmiş Sıfır Titreşim girdi şekillendiriciler .....	47
2.4.9. Modifiye Edilmiş Türevsel Sıfır Titreşim girdi şekillendiriciler .....	50
2.4.10. Pozitif girdi şekillendiriciler için genel değerlendirme.....	52
2.5 Negatif Girdi Şekillendiriciler.....	55
2.5.1. Negatif Sıfır Titreşim girdi şekillendiriciler .....	56
2.5.2. Negatif Türevsel Sıfır Titreşim girdi şekillendiriciler .....	58
2.5.3. Negatif Ekstra Duyarsız girdi şekillendiriciler .....	60
2.5.4. Negatif girdi şekillendiriciler için genel değerlendirme .....	64
2.6. Sikloid+Rampa Versine+Rampa (CPRPVR) Fonksiyonlu Girdi Şekillendirici .....	65
2.7. Hibrit Girdi Şekillendirici .....	67
2.8. Bulanık Mantık.....	69
2.8.1. Bulanık küme teorisi .....	69
2.9. LQR kontrolcü tasarımı.....	73
2.10. Arı Algoritması .....	75
<b>3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....</b>	<b>81</b>
3.1. Bulanık Mantık Tabanlı Karar Destek Sistemi Tasarımı.....	81
3.1.1. Bulanık mantık tabanlı karar verme yaklaşımı .....	85
3.1.2. Uygun girdi şekillendirici seçimi ve uygulaması.....	88
3.2. Doğrusal Gezer Vinç Sistemi için BM-KDS Deneysel Uygulamaları .....	93
3.3. Arı Algoritması ile LQR Kazanç Matrisinin Optimizasyonu.....	115
<b>4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>125</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>132</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>144</b>

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Doğrusal gezer vinç deney seti sistem parametreleri .....	23
Çizelge 2.2. Esnek uzuv deney seti sistem parametreleri .....	28
Çizelge 2.3. Deney düzeneği için hesaplanan sistem parametreleri .....	31
Çizelge 2.4. Sayısal olarak hesaplanmış Negatif Sıfır Titreşim girdi şekillendiriciler...	56
Çizelge 2.5. Sayısal olarak hesaplanmış Negatif Türevsel Sıfır Titreşim girdi şekillendiriciler.....	58
Çizelge 2.6. Sayısal olarak hesaplanmış Negatif Ekstra Duyarsız girdi şekillendiriciler.....	60
Çizelge 2.7. Sayısal olarak hesaplanmış Negatif Ekstra Duyarsız girdi şekillendiriciler.....	62
Çizelge 2.8. CPRVPR ve Hibrit girdi şekillendiricileri performansları .....	68
Çizelge 2.9. Örnek kural tablosu.....	72
Çizelge 2.10. Örnek Arı Algoritması parametreleri.....	77
Çizelge 3.1. KDS için seçilen girdi şekillendiriciler ve özellikleri.....	84
Çizelge 3.2. Seyahat süresi ve parametre tahmin hatası dilsel terimler ve ağırlıkları ....	87
Çizelge 3.3 Girdi şekillendirici seçimi için dilsel terimler ve ağırlıkları.....	87
Çizelge 3.4. Kural tablosu.....	88
Çizelge 3.5. Parametre tahmin hatası (benzetim) değerleri için ön değerlendirme sonuçları .....	93
Çizelge 3.6. Parametre tahmin hatası (deneysel) değerleri için ön değerlendirme sonuçları .....	94
Çizelge 3.7. BM-KDS ile elde edilen bazı sayısal sonuçlar .....	111

Çizelge 3.8. Arı Algoritması optimizasyon parametreleri .....	118
Çizelge 3.9. Arı Algoritması parametreleri.....	118
Çizelge 3.10. Farklı durumlar için kontrolcü performansı .....	121



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Basitleştirilmiş kontrol sistemi şematik gösterimi.....	13
Şekil 2.2. Açık çevrim (İleri besleme) kontrol şematik gösterimi.....	14
Şekil 2.3. Kapalı çevrim (Geri Besleme) kontrol şematik gösterimi.....	15
Şekil 2.4. Kütle yay damper sistemi şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.5. İkinci mertebe sönümlü bir sistem için birim basamak giriş cevabı .....	17
Şekil 2.6. İkinci mertebe bir sistem için sönüm oranına göre birim basamak giriş cevabı .....	19
Şekil 2.7. İkinci mertebe bir sistem için kapalı çevrim kontrol blok gösterimi.....	19
Şekil 2.8. İkinci mertebe bir sistem için birim basamak giriş cevabı .....	20
Şekil 2.9. DC motorun yapısı ve bileşenleri .....	23
Şekil 2.10. Doğrusal gezer vinç MATLAB/Simulink modeli .....	25
Şekil 2.11. Doğrusal gezer vinç basamak giriş cevabı a) Benzetim b) Deneysel.....	26
Şekil 2.12. DC motorun yapısı ve bileşenleri .....	29
Şekil 2.13. Esnek uzuv MATLAB/Simulink modeli.....	30
Şekil 2.14. Esnek uzuv basamak giriş cevabı a) Benzetim b) Deneysel.....	31
Şekil 2.15. Girdi şekillendiricilerin uygulanışı.....	32
Şekil 2.16. Şekillendirilmiş girdi için sistem cevabı.....	32
Şekil 2.17. Farklı girdi şekillendiriciler için hassasiyet eğrileri .....	33
Şekil 2.18. Sıfır Titreşim (ST) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	36

Şekil 2.19. Türevsel Sıfır Titreşim (TST) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi .....	37
Şekil 2.20. Türevsel Türevsel Sıfır Titreşim (TTST) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	39
Şekil 2.21. Türevsel Türevsel Türevsel Sıfır Titreşim (TTTST) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	40
Şekil 2.22. %5 Toleranslı Ekstra Duyarsız (ED) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	42
Şekil 2.23. %10 Toleranslı Ekstra Duyarsız (ED) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	42
Şekil 2.24. %5 Toleranslı İki Tepecikli Ekstra Duyarsız (2T-ED) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	44
Şekil 2.25. %10 Toleranslı İki Tepecikli Ekstra Duyarsız (2T-ED) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	44
Şekil 2.26. %5 Toleranslı Üç Tepecikli Ekstra Duyarsız (3T-ED) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	46
Şekil 2.27. %10 Toleranslı Üç Tepecikli Ekstra Duyarsız (3T-ED) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	46
Şekil 2.28. Modifiye edilmiş 2 darbeli Sıfır Titreşim (M-ST2) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	48
Şekil 2.29. Modifiye edilmiş 3 darbeli Sıfır Titreşim (M-ST3) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	48
Şekil 2.30. Modifiye edilmiş 4 darbeli Sıfır Titreşim (M-ST4) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	49
Şekil 2.31. Modifiye edilmiş 5 darbeli Sıfır Titreşim (M-ST5) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	50
Şekil 2.32. Modifiye edilmiş 2x2 Türevsel Sıfır Titreşim (M-TST 2x2) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	51
Şekil 2.33. Modifiye edilmiş 2x3 Türevsel Sıfır Titreşim (M-TST 2x3) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	52
Şekil 2.34. %5 ve %10 artık titreşim için pozitif girdi şekillendirici gürbüzlükleri.....	54

Şekil 2.35. %5 ve %10 artk titreşim için pozitif girdi şekillendirici duyarsızlık oranları .....	54
Şekil 2.36. Pozitif girdi şekillendiriciler için seyahat süreleri .....	54
Şekil 2.37. Negatif girdi şekillendiricilerin uygulanışı .....	55
Şekil 2.37. Parçalı Toplam Sıfır Titreşim (PT-ST) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	57
Şekil 2.38. Birim Genlik Sıfır Titreşim (BG-ST) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	57
Şekil 2.39. Parçalı Toplam Türevsel Sıfır Titreşim (PT-TST) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	59
Şekil 2.40. Birim Genlik Türevsel Sıfır Titreşim (BG-TST) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	59
Şekil 2.41. Parçalı Toplam Ekstra Duyarsız (PT-ED) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	61
Şekil 2.42. Birim Genlik Ekstra Duyarsız (BG-ED) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	61
Şekil 2.43. İki Tepecikli Birim Genlik Ekstra Duyarsız (2T BG-ED) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	63
Şekil 2.44. İki Tepecikli Parçalı Toplam Ekstra Duyarsız (2T PT-ED) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	63
Şekil 2.45. %5 Artk titreşim için negatif girdi şekillendirici gürbüzlükleri .....	64
Şekil 2.46. %5 Artk titreşim için negatif girdi şekillendirici duyarsızlık oranları.....	64
Şekil 2.47. %5 Artk titreşim için negatif girdi şekillendiriciler seyahat süreleri.....	65
Şekil 2.48. Sikloid+Rampa Versine+Rampa (CPRPVR) Fonksiyonlu girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi.....	66
Şekil 2.49. Hibrit girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi .....	68
Şekil 2.50. Bulanık çıkarım birimi blok gösterimi .....	70
Şekil 2.51. Bulanık çıkarım birimi blok gösterimi .....	71

Şekil 2.52. Bulanık mantık tabanlı çıkarım sistemi genel yapısı (Altaş, 1999).....	72
Şekil 2.53. LQR kontrolün sisteme uygulanması .....	75
Şekil 2.54. Arı Algoritması akış şeması (Pham ve diğerleri., 2006) .....	76
Şekil 2.55. n adet arının rastgele arama uzayına gönderimi .....	77
Şekil 2.56. m, araştırma bölgesinin ve e, elit arılar bölgesinin seçimi.....	77
Şekil 2.57. Komşuluk araması araştırması bölge boyutu (ngh) seçimi.....	78
Şekil 2.58. Araştırma bölgesine takipçi arıların gönderimi .....	78
Şekil 2.59. Her bir araştırma bölgesindeki en uygun arıların belirlenmesi .....	79
Şekil 2.60. Kalan arıların rastgele arama uzayına gönderimi .....	79
Şekil 2.61. Yeni popülasyonda araştırma bölgesi ve elit arıların seçimi .....	80
Şekil 2.62. Optimum araştırma bölgesi.....	80
Şekil 3.1. Üyelik fonksiyonları a) Parametre tahmin hatası b) Seyahat süresi c) Girdi şekillendirici seçimi .....	86
Şekil 3.2. Girdi şekillendirici seçimi.....	90
Şekil 3.3. BM-KDS ve uygulaması.....	91
Şekil 3.4. Fis sonucuna göre önerilen girdi şekillendiriciler 1,00 $\omega_n$ modelleme frekans için girdi şekillendirici cevapları.....	95
Şekil 3.5. 1,45 $\omega_n$ modelleme frekansı için 3T-ED ve ST girdi şekillendirici cevabı.....	97
Şekil 3.6. 0,65 $\omega_n$ modelleme frekansı için 2T-ED ve ST girdi şekillendirici cevabı.....	98
Şekil 3.7. 1,20 $\omega_n$ modelleme frekansı için ED ve ST girdi şekillendirici cevabı.....	99
Şekil 3.8. 1,30 $\omega_n$ modelleme frekansı için TTTST ve ST girdi şekillendirici cevabı....	100
Şekil 3.9. 0,75 $\omega_n$ modelleme frekansı için TTST ve ST girdi şekillendirici cevabı.....	102
Şekil 3.10. 0,85 $\omega_n$ modelleme frekansı için TST ve ST girdi şekillendirici cevabı.....	103

Şekil 3.11. 1,15 $\omega_n$ modelleme frekansı için M-TST 2x3 ve ST girdi şekillendirici cevabı .....	104
Şekil 3.12. 0,85 $\omega_n$ modelleme frekansı için Hibrit ve ST girdi şekillendirici cevabı.....	105
Şekil 3.13. 1,05 $\omega_n$ modelleme frekansı için M-ST5 ve ST girdi şekillendirici cevabı...	106
Şekil 3.14. 1,05 $\omega_n$ modelleme frekansı için M-ST4 ve ST girdi şekillendirici cevabı...	107
Şekil 3.15. 0,95 $\omega_n$ modelleme frekansı için M-ST3 ve ST girdi şekillendirici cevabı...	109
Şekil 3.16. 1,00 $\omega_n$ modelleme frekansı için CPRVPR ve ST girdi şekillendirici cevabı .....	110
Şekil 3.17. Farklı normalize frekans değerleri için uç sapmaları .....	111
Şekil 3.17. (Devam) Farklı normalize frekans değerleri için uç sapmaları .....	112
Şekil 3.18. ST, TST, TTST ve TTTST girdi şekillendiriciler için hassasiyet eğrileri....	113
Şekil 3.19. Ekstra Duyarsız (%5) girdi şekillendiriciler için hassasiyet eğrileri .....	114
Şekil 3.20. Modifiye, CPRVPR ve Hibrit girdi şekillendiriciler için hassasiyet eğrileri .....	115
Şekil 3.21. Arı Algoritması tabanlı LQR kontrol blok şeması .....	116
Şekil 3.22. Arı Algoritması optimizasyonu yakınsama grafiği.....	118
Şekil 3.23. Farklı durumlar için a) Motor pozisyonunun zamana bağlı değişimi b)Esnek uzuv uç konumunun zamana bağlı değişimi.....	119
Şekil 3.24. Farklı durumlar için a) Motor pozisyon hatası b) Esnek uzuv uç konumunun pozisyon hatası c) Motora uygulanan gerilim.....	120
Şekil 3.25. a) Motor pozisyonunun zamana bağlı değişimi b) Esnek uzuv uç konumunun zamana bağlı değişimi.....	121
Şekil 3.26. $\theta = 60^\circ$ için a) Motor pozisyon hatası b) Esnek uzuv uç konumunun pozisyon hatası c) Motora uygulanan gerilim.....	122
Şekil 3.27. a) Motor pozisyonunun zamana bağlı değişimi b) Esnek uzuv uç konumunun zamana bağlı değişimi.....	123



Şekil 3.28.  $\theta=120^\circ$  için a) Motor pozisyon hatası b) Esnek uzuv uç konumunun pozisyon hatası c) Motora uygulanan gerilim..... 123



**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 2.1. Doğrusal gezer vinç deney düzeneği ve bileşenleri.....	22
Resim 2.2. Doğrusal gezer vinç deney düzeneği ve şematik gösterimi.....	24
Resim 2.3. Esnek uzuv deney düzeneği ve bileşenleri .....	27
Resim 2.4. Esnek uzuv deney düzeneği ve şematik gösterimi .....	29



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler

### Açıklamalar

$\omega_n$	Doğal frekans
$\omega_d$	Sönümlü sistem frekans
$\omega_{maks}$	Maksimum motor hızı
$\alpha$	Uç sapması
$\theta$	Motor mili pozisyonu
$\zeta$	Sönüm oranı
$\phi$	Faz farkı
$\delta$	Logaritmik azalma oranı
$\eta_m$	Motor verimi
$\mu_A(x)$	x'in üyelik fonksiyonu
$\tau_i$	Motor milinde oluşan tork
$A_i$	Girdi şekillendirici i. darbe
$B_{eq}$	Eşdeğer viskoz sönüm oranı
$b$	Sönüm katsayısı
$f_{maks}$	Maksimum motor voltaj frekansı
$g$	Yerçekimi ivmesi
$I$	Sarkaç atalet momenti
$I_{maks}$	Maksimum motor giriş akımı
$J_{m,rotor}$	Rotor atalet momenti
$k$	Yay sabiti
$K_{ec}$	Sarkaç arabası enkoder hassasiyeti
$K_{enc}$	Enkoder hassasiyeti
$K_{ep}$	Sarkaç enkoder hassasiyeti

$K_{tach}$	Takometre hassasiyeti
$K_g$	Planet dişli kutusu dişli oranı
$k_m$	Zıt emk sabiti
$k_t$	Tork sabiti
$L_m$	Motor armatür indüktansı
$m_l$	Esnek uzuv ağırlığı
$M$	Sarkaç arabasının ağırlığı
$s$	s domeni
$T_d$	Sönümlü sistem periyodu
$t_d$	Gecikme zamanı
$t_p$	Tepe zamanı
$t_r$	Yükselme zamanı
$t_s$	Yerleşme zamanı
$R_m$	Motor armatür direnci

### Kısaltmalar

AA  
 BG  
 BG-ED  
 BG-ST  
 BG-TST  
 BM-KDS  
 CPRVPR  
 ED  
 LQR  
 M-ST2  
 M-ST3  
 M-ST4  
 M-ST-5  
 M-TST 2x2  
 M-TST 2x3  
 PT  
 PT-ED

### Açıklamalar

Arı Algoritması  
 Birim Genlik  
 Birim Genlik Ekstra Duyarsız  
 Birim Genlik Sıfır Titreşim  
 Birim Genlik Türevsel Sıfır Titreşim  
 Bulanık mantık tabanlı karar destek sistemi  
 Sikloid+Rampa Versine+Rampa  
 Ekstra Duyarsız  
 Doğrusal kuadratik düzenleyici  
 2 Darbeli Modifiye Sıfır Titreşim  
 3 Darbeli Modifiye Sıfır Titreşim  
 4 Darbeli Modifiye Sıfır Titreşim  
 5 Darbeli Modifiye Sıfır Titreşim  
 4 Darbeli Modifiye Türevsel Sıfır Titreşim  
 6 Darbeli Modifiye Türevsel Sıfır Titreşim  
 Parçalı Toplam  
 Parçalı Toplam Ekstra Duyarsız

<b>PT-ST</b>	Parçalı Toplam Sıfır Titreşim
<b>PT-TST</b>	Parçalı Toplam Türevsel Sıfır Titreşim
<b>ST</b>	Sıfır Titreşim
<b>TST</b>	Türevsel Sıfır Titreşim
<b>TTST</b>	Türevsel Türevsel Sıfır Titreşim
<b>TTTST</b>	Türevsel Türevsel Türevsel Sıfır Titreşim
<b>V</b>	Yüzde artık titreşim
<b>V<sub>tol</sub></b>	Tolere edilebilir titreşim
<b>2T BG-ED</b>	2 Tepecikli Birim Genlik Ekstra Duyarsız
<b>2T PT-ED</b>	2 Tepecikli Parçalı Toplam Ekstra Duyarsız
<b>2T-ED</b>	2 Tepecikli Ekstra Duyarsız
<b>3T-ED</b>	3 Tepecikli Ekstra Duyarsız

## 1. GİRİŞ

İnsanoğlu tekerleğin icadı ile birlikte hızlı bir gelişim sürecine girmiştir. Sanayi devrimine kadar üretim hattında bulunan insanoğlu günümüzde yerini hızla makinalara bırakmaktadır. Endüstri 4.0'ın benimsenmesi ile insan gücüne bağımlı olan işler büyük oranda yerini makinalara bırakacaktır. Hali hazırda dünyada ve ülkemizde birçok üretim hattında elektromekanik sistemler etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle hassas konumlandırma işlemlerinde kullanılan bu sistemler; konum hassasiyetinin sağlanması için rijit makina elemanları kullanılarak tasarlanmaktadır ve bu rijitlik oldukça ağır ve büyük hacimli tasarımlarla sağlanabilmektedir. Dolayısıyla bu sistemlerin hareketi için yüksek kapasiteli motorların kullanımı gerekmektedir. Sonuç olarak yüksek elektrik tüketimi ve düşük çalışma hızları ile verimsiz tasarımlar ortaya çıkmaktadır. Elektromekanik sistemlerin hafif ve esnek makina elemanları ile tasarlanması düşük kapasiteli motorların kullanımını ve düşük elektrik tüketimini mümkün kılmaktadır. Bu durum maliyetlerin düşürülmesi, yüksek operasyon hızları, daha geniş çalışma alanı gibi birçok avantajı da beraberinde getirmektedir. Teknolojinin gelişmesi ile sistemlerin esnek tasarımı ve imalatı da mümkün hale gelmiştir. Fakat esnek sistemlerin yapısı bu sistemlerin kontrolünü ve kullanımını zorlaştırmaktadır. Bu duruma örnek olarak esnek bağlantılı bir gezer vinç ile yük taşıma işlemi incelenebilir. Eğer sistem hızlı bir şekilde kontrol edilmek istenirse hareket sonunda istenmeyen salınımlar oluşacak ve bu salınımların geçmesi için bir süre beklemek gerekecektir. Ayrıca bu salınımlar liman vinçleri gibi uygulamalarda ciddi güvenlik problemlerine neden olabilmektedir. Diğer taraftan; sistem çok yavaş hareket ettirilerek de salınımsız hareket elde edilebilir. Bu durumda ise sistem cevabında gecikmeler olacaktır. Ele alınan örnek; mühendislik sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan bir teknik çelişki örneğidir. Hareket hızı ile hassas konum kontrolü arasında optimum dengenin sağlanması gereklidir. Hassas konumlandırma işlemi gerektiren esnek robot kol kontrolü gibi uygulamalar düşünüldüğünde; araştırmacılar esnek sistemlerin kullanımının getirdiği bu zorlukların üstesinden gelmek için etkili denetim sistemleri arayışına girmişlerdir.

Esnek mekanik sistemlerin hareket kontrolü için denetim sistemleri temel olarak; ileri besleme (açık çevrim) ve geri besleme (kapalı çevrim) kontrol olarak sınıflandırılır. Geri beslemeli kontrol sistemleri, hassas hareket kontrolü için fiziksel sistemin durum

tahminlerini ve ölçüm sonuçlarını kullanır. Bu kontrol tekniğinde ölçüm sonuçlarının alınması ve değerlendirilmesi gerektiğinden dolayı uygulama zor ve maliyetli olabilmektedir. Dahası, geri beslemeli kontrol sistemleri önemli ölçüde işlem gücü gerektirebilir ve kararsız sistem davranışı olasılığını yükseltebilir (Vaughan, Yano ve Singhose, 2008). İleri besleme kontrol teknikleri, artık titreşimleri önlemek için sistemin doğal frekans ve sönüm oranı gibi parametrelerini dikkate alarak kontrol sinyali üretir. Bu yöntemde herhangi bir ek sensöre ihtiyaç duyulmaz ve bir kez girdi geliştirildikten sonra sistemdeki değişiklikler hesaba katılmaz (Shan, Liu ve Sun, 2005). Ancak ileri besleme kontrol sistemleri bozucu girişlere karşı oldukça duyarlıdır.

### Tezin gerekçesi

Mühendislik sistemlerinde hareket sonucu oluşan artık titreşimlerin eliminasyonunda kullanılan klasik yöntem; rijit ve dolayısıyla ağır ekipman kullanımınıdır. Bu yöntem ile artık titreşim problemi çözülmekte ancak sistemin ağırlığı ve atalet kuvvetleri arttığından dolayı yüksek kapasiteli motorların kullanımını gerektirmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın verilerine göre dünya çapında üretilen toplam elektrik enerjisinin yaklaşık %45-50'si endüstride kullanılan elektrik motoru ve sürücü ekipmanları tarafından tüketilmektedir (Uluslararası Enerji Ajansı [İEA], 2018: 05). Hafif ve esnek makina elemanlarının seçimi ile enerji tüketimi önemli ölçüde azaltılabilir. Ancak bu durumda da fiziksel sistemin kontrol edilmesi için uygun denetleyicinin tasarlanması gerekmektedir.

Esnek fiziksel sistemlerin modellenmesi ve kontrolü oldukça yaygın ve önemli bir çalışma konusudur. Kontrol edilen sistemlerde temel beklenti; sistemi istenilen referans konuma en kısa zamanda ve en doğru şekilde getirmektir. Bu tip fiziksel sistemler genelde açık çevrim ve kapalı çevrim uygulamaları ile kontrol edilmektedir. Kapalı çevrim uygulamasında sistem çıktıları belirli bir zaman aralığı (örnekleme zamanı) ile gözlemlenerek girdi sürekli güncellenir. Burada fiziksel sistem çıktıları, üzerine yerleştirilmiş sensörler vasıtasıyla gözlemlenir. Sistem çıktılarının sürekli olarak değerlendirilmesi ile elde edilen kapalı çevrim uygulamaları oldukça hızlı ve doğru sonuçlar vermektedir. Bunun yanında bu tip kontrol uygulamaları bazı olumsuzlukları da beraberinde getirmektedir. Kapalı çevrim uygulamalarında örnekleme zamanının seçimi başlı başına bir optimizasyon problemidir. Örnekleme zamanının fazla seçilmesi sistem cevabında gecikmelere sebep olurken çok küçük seçilmesi elektromekanik sistemlerin kendi içerisindeki gecikmelerden (mekanik

zaman sabiti, elektrik zaman sabiti) dolayı istenmeyen salınımlara sebep olmaktadır. Buna ek olarak kontrol edilecek sistemin ve kontrol edilecek parametrelerin ayarlanması ve ölçüm elemanların bu sistemlerle uyumlu bir şekilde çalışması diğer bir karmaşık süreçtir. Bunun yanında kontrol edilen sistemler, gezer vinç sistemleri gibi, geniş çalışma aralığında çalışabilir. Ayrıca endüstriyel ortamlardaki gürültü ve kirleticiler (toz, yağ vb.) sensörlerden alınan ve işlenen bilginin güvenilirliğini etkilemektedir (Gürleyük, 2015:117). Kapalı çevrim kontrol uygulamalarının getirdiği zorluklardan dolayı araştırmacılar açık çevrim kontrol uygulamalarına yönelmişlerdir. Açık çevrim uygulamalarda denetlenecek sisteme ait temel parametreler belirlenir ve bu sayede fiziksel sisteme uygulanacak girişe karşılık cevap hesaplanabilir. Bu yöntemde herhangi bir geri besleme elemanına veya sensöre ihtiyaç yoktur. Ancak sistem parametrelerinin analitik hesaplamalar ve sayısal analizlerle belirlenmesi gerekmektedir. Doğru hesaplamalar ile sistemden istenen çıkışa göre uygun girdi üretilerek denetlenen sistem doğru ve hassas bir şekilde kontrol edilebilmektedir. Fakat bu durumda fiziksel sistemdeki değişkenlikler sistem parametrelerini değiştireceğinden kontrolcü başarısı da etkilenecektir.

İleri besleme ve geri besleme denetim sistemleri ile ilgili tüm bu çekinceler ve üstünlükler uygun durum için uygun kontrol yönteminin seçilmesini gerektirmektedir. Çoğu durumda kontrol yönteminin seçilmesi de yeterli faydayı sağlamayacağından uygun sistem için uygun metodun da seçilmesi gerekebilmektedir.

### Tezin amaç ve kapsamı

Bu tezde; öncelikle esnek sistemlerin davranışını etkileyen parametreler incelenmiştir. Ardından bu parametrelerin kesin olarak belirlenemediği veya hatalı tahmin edildiği durumlarda uygun kontrol sinyalini üretecek denetleyicilerin tasarlanması ve geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu kapsamda sistem kontrolü için açık çevrim ve kapalı çevrim denetleyiciler tasarlanmış ve kontrolcülerin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları belirlenmiştir. Açık çevrim kontrol uygulaması olarak girdi (komut) şekillendirici yöntemi belirlenmiştir. Girdi şekillendiricilerin tasarım aşamasında, gerekli hesaplamaları yapmak için sistemin doğal frekansı ve sönüm oranının tahmini değerleri gereklidir. Bununla birlikte, gerçek sistemler tam olarak modellenemezken, şekillendiricinin hatalarına karşı gürbüzlüğü önemli bir



tasarım ölçütüdür. Literatürde birçok gürbüz girdi şekillendirici tasarlanmıştır. Gürbüz girdi şekillendiricilerin tipik olarak, yavaş sistem cevabına yol açtığı ve daha uzun seyahat sürelerine sahip oldukları gözlemlenmiştir. Fakat yöntemlerin seyahat süreleri ve gürbüzlükleri arasındaki oranın sabit olmadığı, yöntemden yönteme değiştiği görülmüştür. Bu sebeple, komut girdi şekillendirme yöntemlerinin detaylı incelemesi ve pozitif, negatif ve kontrol işaretinin yumuşak geçişli olarak üretildiği girdi şekillendiriciler ile ilgili detaylı bir literatür taraması yapılmıştır. Tartışılan tüm metotlar için MATLAB programı ile benzetim çalışmaları yapılmıştır. Aynı zamanda Quanser firması tarafından üretilen doğrusal gezer vinç ve esnek uzuv deney sistemleri ile tartışılan metotlar için deneysel doğrulamalar yapılmıştır. Bu sayede metotların gerçek sistemlere uygulanabilirliği belirlenirken hangi tip sistem için hangi metodun kullanılabileceği belirlenmiştir.

Buna göre bir sistem için parametrelerin doğru tahmin edilip edilmediği, seyahat süresinin ne kadar olması gerektiği, ortam şartları ve bozucu girişlerin etkisi vb. gibi durumlarda hangi metodun kullanılması gerektiği belirlenmiştir. Buradan yola çıkarak yeni bir metottan ziyade değişen şartlarda seçilmesi gereken metodun belirlenmesi için bir karar destek sistemine ihtiyaç duyulduğu görülmüştür. Bunun için bulanık mantık tabanlı bir karar destek sistemi tasarlanmıştır. Bu sayede değişken şartlar için gereksinimlere hızlı bir şekilde cevap verebilen bir karar destek sistemi önerilmiştir.

Açık çevrim kontrolcülerin yetersiz olduğu durumlar için kapalı çevrim uygulaması olarak LQR kontrolcü tasarımı amaçlanmıştır. Çok giriş çok çıkışlı sistemlerde daha çok tercih edilen LQR kontrol için temel problem, uygun kazanç matrisinin belirlenmesidir. Kazanç matrisinin optimum değerinin sezgisel arama algoritmalarından olan Arı Algoritması ile belirlenmiştir.

Mevcut sezgisel algoritmaları çeşitlendirmek ve sistem cevaplarını iyileştirmek için Arı Algoritması tabanlı LQR kontrolcü tasarımı önerildiği çalışmanın ana hedefi, Arı Algoritmasının LQR kontrolcü optimizasyonunda kullanılabilirliğini incelemenin yanı sıra Arı Algoritması parametrelerinin sistem cevabı üzerindeki etkisini de araştırırken sistem performansını da en iyi düzeye çıkarmaktır. Aynı zamanda farklı sistemler ve farklı kontrolcü tasarımları için de model olabileceği öngörülen Arı Algoritması tabanlı bir LQR kontrolcü önerilmiştir.

## Tezin yapısı

Tez dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde;

- Esnek sistemlerin kullanım gereksinimleri, uygulama alanları, avantaj ve dezavantajları ile ilgili genel bir giriş yapılmıştır.
- Ardından tezin gerekçesi, amaç ve kapsamı detaylı bir şekilde ortaya konulmuştur.
- Daha sonra esnek sistemlerin kontrolü için açık çevrim ve kapalı çevrim denetim sistemi ile ilgili yapılan çalışmalar detaylı bir şekilde incelenerek uygulama alanları sunulmuştur.

Materyal ve metot bölümünde;

- Kontrol sistemi, elemanları ve kontrol tipleri ile ikinci mertebeden bir sistemin yapısı, sistem parametreleri ve sistem parametrelerinin belirlenmesine ilişkin teorik bilgiler verilmiştir. Ayrıca incelenen parametrelerin sistem cevabı üzerinde etkileri de tartışılmıştır.
- Daha sonra doğrusal gezer vinç ve esnek uzuv deney cihazları tanıtılmış ve sistem modeli MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur. Birim basamak giriş için elde edilen benzetim sonuçları; deneysel sonuçlarla doğrulanarak her iki deney seti için karakteristik sistem parametreleri belirlenmiştir.
- Daha sonra girdi şekillendiricilerin tasarımı, kısıtlamaları ve performans ölçütleri gibi teorik bilgiler ile incelenen girdi şekillendiriciler için benzetim sonuçları sunulmuştur.
- Devamında LQR kontrol yapısı ve dinamikleri ile ilgili teorik bilgiler verilmiştir. Ayrıca LQR kontrol optimizasyonu için kullanılan Arı Algoritması ile ilgili teorik bilgiler de sunulmuştur.
- Son olarak girdi şekillendiriciler için önerilen bulanık mantık tabanlı karar destek sistemi tasarımında kullanılan bulanık mantık yapısı ile ilgili teorik bilgiler sunulmuştur.

Araştırma bulguları ve tartışma bölümünde;

- Önerilen karar destek sistemi, yapısı ve tasarım aşamaları detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Sistem performansı deney cihazları üzerinde doğrulanarak sistemin başarısı ölçülmüştür.
- Ardından esnek uzuv sistemi için LQR kontrolcü tasarımı, Arı Algoritması ile optimizasyon aşamaları ve benzetim çalışmaları yapılmıştır. Benzetim çalışmaları deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.
- İncelenen ve tartışılan tüm metotlar için deneysel sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur.

Sonuç ve öneriler bölümünde;

- Tez kapsamında tartışılan, incelenen ve önerilen yöntemler için kısa bir değerlendirilme yapılarak elde edilen sonuçlar sunulmuştur.
- Ayrıca tez çalışmalarının daha da ilerletilmesi için bundan sonra yapılabilecek çalışmalar hakkında kısa bir değerlendirme yapılmıştır.

### Önceki çalışmalar

Esnek ve hafif sistemler robotik uygulamalardan cerrahi uygulamalara, inşaat sektöründen uzay ve havacılık sektörüne kadar birçok alanda artan bir ivme ile kullanılmaktadır (Balas, 1982; Sallaberger ve Forces, 1997; Resta, Ripamonti, Cazzulani ve Ferrari, 2010; Shang, Payne, Clark, Noonan ve diğerleri, 2012; Boeren, Bruijnen, Dijk ve Oomen, 2014; Khaled, 2017; Tromme, Sonnevile, Guest ve Brüls, 2018). Bu sistemlerin kontrolü için temel olarak kapalı çevrim (geri besleme) ve açık çevrim (ileri besleme) kontrol olmak üzere iki farklı denetim sistemi kullanılmaktadır (Kuo, Hosein ve Farmanborda, 2013; Chen ve Sun, 2014; Newman ve Vaughan, 2017).

Tez kapsamında açık çevrim uygulaması olarak girdi şekillendirici, kapalı çevrim uygulaması olarak LQR kontrolcü tasarımı ve optimizasyonu üzerine denetleyici tasarımları yapıldığı için daha çok bu konular üzerine yapılan çalışmalar derlenmiştir.

Kapalı çevrim kontrol sistemleri, hareket sonucu oluşabilecek artık titreşimleri ortadan kaldırmak için sistem durumlarının ölçümlerini ve tahminlerini kullanır. Çoğunlukla, geri besleme kontrol sistemlerinin, sensörler ve algılayıcılarla donatılmasını gerektirdiği için

pahalı ve uygulanması zor olabilir. Ayrıca, önemli bir hesaplama gücü gerektirebilir ve kararsız sistem davranışı olasılığını artırabilirler (Vaughan ve diğerleri, 2008). Geri besleme veya kapalı çevrim olarak isimlendirilen bu tür denetleyiciler arasında klasik denetim sistemlerinden Kutup yerleştirme, PID, LQR, Kayan Kipli Kontrol v.b. denetleyicilerin kullanıldığı çok fazla çalışma vardır (Lou, Liao, Wei, Yang ve Li, 2017; Utkin, Guldner ve Shi, 2009; Saini, Sharma, Bhandari ve Satija, 2012; Ahmad, 2008). Yapay zeka tekniklerinin endüstriyel uygulamalarda kullanıma başlamasıyla birlikte klasik denetim sistemlerinin yanında bilgiye dayalı denetim sistemleri olarak da bilinen yapay sinir ağları, bulanık mantık ve çeşitli arama algoritmaları ile tasarlanan birçok denetim sistemi geliştirilmiş ve gerçek sistemlerde uygulanmıştır (Kuo ve Lin, 2002; Tian ve Collins, 2004; Alam ve Tokhi, 2008). Aynı zamanda klasik denetleyicilerin ve yapay zeka tekniklerinin birlikte kullanıldığı hibrit denetim sistemleri de literatürde önemli bir yere sahiptir (Ertuğrul ve Kaynak, 2000; Pham ve Kalyoncu, 2009; Liu, Liu ve He, 2017).

Green ve Sasiadek (2004) iki uzuvlu esnek manipülatörün rijit ve esnek matematik modelini ters dinamik modelleme ile elde etmişler ve elde edilen modeller için ayrı ayrı bulanık mantık ve LQR kontrolcü tasarımı yapmışlardır. Jnifene (2007) çalışmalarında tek uzuvlu esnek robot manipülatör için zamanda ötelenmiş kontrol işareti ile LQR kontrolcü tabanlı bir denetleyici tasarımı yapmışlardır. Farklı kontrolcü kazançları ve zaman gecikmeleri için sistemin kararlı durum davranışlarının incelendiği çalışmalar yapmışlardır. Pham ve Kalyoncu (2009) çalışmalarında tek uzuvlu esnek manipülatör için bulanık mantık tabanlı bir kontrolcü tasarımı yapmışlardır. Kontrolcü tasarımında üyelik fonksiyonlarının ağırlıklarını Arı Algoritması ile optimize etmişlerdir. Nanos ve Papadopoulos (2015) yedi serbestlik dereceli esnek bağlantılı uzaysal manipülatörün matematik modeline; dinamik tekilliklerinden kaçınmak için Lagrange yaklaşımı ile bir model önermişler ve sistemin uç nokta kontrolü için statik geri beslemeli doğrusallaştırma ve PID denetleyiciler ile kontrol edildiği çalışmalar yapmışlardır. Daha yakın tarihli çalışmalarda; Tahir, Hasan, Mohamed ve Ibrahim (2017) tek serbestlik dereceli esnek robot kol için girdi şekillendirici tabanlı LQR ve PID kontrol uygulamasını uç nokta ve shaft açısının kontrolü için gerçekleştirmişlerdir. Geleneksel girdi şekillendiriciden farklı olarak çıktı temelli şekillendirici tasarımı yapmışlar ve sistemin dinamik çıktıları şekillendirici tasarımı için kullanmışlardır. Böylece sistem parametrelerindeki belirsizliklerin etkilerinin azaltılması amaçlanmıştır. Deneysel olarak doğruladıkları çalışmalarında LQR tabanlı kontrolcünün uç nokta konumu ve shaft açısı için yerleşme

zamanı, oturma zamanı, maksimum aşma değeri için daha iyi sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir. Cambera ve Feliu-Batlle (2017) çalışmalarında esnek uzuvlu robot kolun uç nokta kontrolünü durum geri beslemeli kontrol ile sağlamışlar ve sistemin matematik modelini çıkarırken yerçekimi kuvvetlerini ve esnek bağlantılardaki sürtünme kuvvetini de dikkate alarak modelleme yapmışlardır. Modellemede yaptıkları çalışma geleneksel durum geri beslemeli kontrol çalışmaları ile karşılaştırıldığında; yerleşme zamanı, maksimum aşma ve artık titreşim kriterlerinin daha iyi olduğu bir kontrolcü önermişlerdir. Yaptıkları çalışmalarında benzetim sonuçlarını, deneysel olarak doğrulamışlardır. Cao ve Liu (2017) çalışmalarında iki uzuvlu katı-esnek manipülatörün uç nokta kontrolünü adaptif tekrarlı öğrenme algoritması kullanarak PD kontrolcü ile sağlamışlardır. Sistemi modellerken Hamilton prensibi ile adi diferansiyel denklemler ve kısmi diferansiyel denklemler kullanmışlardır. Böylece sistem parametrelerindeki belirsizlikleri minimize etmeye amaçlamışlardır. İki uzuvlu esnek manipülatörler üzerine yapılan bir diğer çalışmada; Liu, Yang, Chen, Wang ve Su (2018) yapay sinir ağı tabanlı bir gözlemci ile sistem modeli çıkarılarak, matematik modeli bilinmeyen sistemler için dinamik yüzey tabanlı bir kontrolcü önerisinde bulunmuşlardır. Esnek bağlantılı ve esnek uzuvlu sistemlerin kontrolü ve dinamik analizi için daha detaylı incelemelere Dwivedy ve Eberhard (2006) ile Ozgoli ve Taghirad'ın (2008) çalışmalarından ulaşılabilir.

Artık titreşimleri bastırmak için kapalı çevrim (geri besleme) denetleyicilerden farklı olarak ileri besleme kontrol teknikleri; sistemin fiziksel ve karakteristik özelliklerini dikkate alarak kontrol sinyali üretir. Bu yöntem herhangi bir ek sensör veya algılayıcı gerektirmez ve girdi üretildikten sonra sistemdeki değişiklikler hesaba katılmaz (Shan ve diğerleri, 2005). Sonuç olarak sisteme herhangi bir sensör, geri besleme elemanı dahil edilmeden kontrolcü tasarımı yapılabilir. Bu kontrolcülerin kullanılmasının en önemli sebebi tasarımlarının kolay ve uygulamalarının basit olmasıdır.

Literatürde elektromekanik sistemlerin artık titreşim kontrolü için açık çevrim denetleyicilerin kullanıldığı çok fazla çalışma vardır. Bu yöntemler arasında; komut ön şekillendirme veya girdi şekillendirme temelli yöntemler birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir (Singhose ve Pao, 1997; Singhose, Porter ve Singer, 2000; Dharne ve Jayasuriya, 2007; Gürleyük ve Cinal, 2007; Blackburn, Singhose, Kitchen, Patrangenaru, Lawrence ve diğerleri, 2010; Kim ve Singhose, 2010; Chu ve Hu, 2016; Khaled, 2017; Wilbanks, Adams ve leamy, 2018; Abdullahi, Mohamed, Selamat, Pota Abidin ve diğerleri, 2018). Komut ön

şekillendirme veya girdi şekillendirme yöntemi girdinin işaretine göre pozitif girdi şekillendiriciler ve negatif girdi şekillendiriciler olmak üzere iki kısımda incelenmiştir.

Pozitif yönlendirme kontrolü ilk kez Smith (1957) tarafından “posicast” kontrolü olarak tanımlanmış ve kullanılmıştır. Bu teknik, bir basamak girdisini zaman içinde geciken iki küçük basamak halinde bölerek uygulamaktadır. Basamak cevaplarının süper pozisyonu, titreşimlerin birbirlerini sönmlemesini sağlar. Ancak bu yöntem sistemin doğal frekans ve sönm oranının tam olarak bilinmesiyle başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir. Sistem parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesinde karşılaşılan zorluklardan dolayı bu yöntem değişken koşullar için fazla tercih edilmez. Bu problemi çözmek için, Singer ve Seering (1988) artık titreşimleri sönmlemeye yönelik yeni bir girdi şekillendirme yöntemi önermişlerdir. Çalışmaları gürbüzlüğü dikkate alan girdi şekillendirme uygulamalarının yelpazesini önemli ölçüde genişletmiştir.

Singer ve Seering (1990) çalışmalarında titreşim denklemlerinin doğal frekansa göre türevini ve artık titreşim genlik oranını sıfıra ayarlayarak çözdüğü üç basamak girdili Türevsel Sıfır Titreşim (TST) girdi şekillendirme yaklaşımını önermişlerdir. TST girdi şekillendirici çok daha gürbüzdür; fakat şekillendirici uygulama zamanı daha uzundur. Sıfır Titreşim (ST) girdi şekillendiricinin zaman gecikmesi, sistem titreşimin periyodunun yarısı kadar, TST girdi şekillendirici bir tam titreşim periyodu kadardır. Benzer şekilde çalışmalarında titreşim denklemlerinin doğal frekansa göre ikinci kez türevi alınarak ve artık titreşim genlik oranının sıfıra ayarlanarak çözüldüğü dört basamak girdili Türevsel Türevsel Sıfır Titreşim (TTST) girdi şekillendirme yaklaşımını önermişlerdir. Şekillendiricinin gürbüzlüğü bir miktar daha artarken, zaman gecikmesi TST şekillendiriciye göre sistem periyodunun yarısı kadar artmaktadır.

Artık titreşim genliğini mutlak sıfıra düşürmek çok zordur. Aslında, gerçek uygulamalarda böyle katı bir gereksinim nadiren uygulanmaktadır. Artık titreşim genliği belli bir tolerans değere ayarlanabilirse, sistemin gürbüzlüğü önemli ölçüde arttırılabilir. Bu fikre dayanarak, Singhose, Seering ve Singer (1994), Ekstra Duyarsız (ED) girdi şekillendirme yaklaşımını önermişlerdir. Aynı zaman gecikmesine sahip olmalarına rağmen, ED girdi şekillendiricinin gürbüzlüğü TST girdi şekillendiriciye kıyasla önemli ölçüde geliştirilmiştir. Ayrıca, ED girdi şekillendirici, belirli uygulamalar için modelleme hatalarına karşı çok daha etkili titreşim eliminasyon performansı sunacaktır. Buna

dayanarak, Singhose, Warren ve Singer (1996); Özelleştirilmiş Duyarsız girdi şekillendirme yaklaşımı önermişlerdir. Gürbüzlük sınırlaması Özelleştirilmiş Duyarsız girdi şekillendirme yönteminde önemli bir nokta olduğundan, girdi şekillendirici sistem gürbüzlüğü performansına göre etkin bir şekilde tasarlanabilir. Pozitif girdi şekillendirme teknikleri için detaylı performans karşılaştırmaları Singhose ve diğerleri (1994), Vaughan ve diğerleri (2008), Singhose (2009) ve Conker, Yavuz ve Bilgiç (2016) tarafından sunulmuştur. İncelenen çalışmalarda görüldüğü üzere; şekillendirici gürbüzlüğünün artması ile seyahat süresi de genellikle artar. Bu durum sistem cevabını önemli ölçüde etkiler. Şekillendirici gürbüzlüğü ve seyahat süresi arasında bir ilişki olduğu açıktır. Mükemmel yakın bir yaklaşım elde etmek için, şekillendirici parametreleri dikkatli bir şekilde seçilmelidir.

Pozitif darbe genliklerinin değerini belirlemek için sıklıkla kısıtlama denklemleri kullanılmıştır. Ancak hareket süresi, şekillendiricinin negatif darbeler içermesiyle önemli ölçüde azaltılabilir. Pozitif girdi şekillendiricilerin aksine, negatif şekillendiriciler zamanın küçük periyotları için şekillenmemiş komut büyüklüğünü aşan komut profillerine sebep olabilir. Bu genlik aşmaları, çoğu uygulama için sorun değildir, çünkü yükselticiler ve motorlar müsaade edilen sabit durum seviyesinden daha fazla tepe akımına sahiptirler (Pao ve Singhose, 1996).

Girdi şekillendiricilerin negatif darbe içerebileceği fikrini ilk olarak Tallman ve Smith (1958) ortaya atmıştır. Rappole, Singer ve Seering (1993) negatif darbe dizileri kullanarak esnek sistemlerde oluşan artık titreşimi sönmülemişlerdir. Pao ve Singhose (1996) esnek lineer sistemler için optimal zamanlı komutlar üreten negatif girdi şekillendiriciler geliştirmiştir. Tuttle ve Seering (1994) negatif şekillendiricilerin performansını artırmak için girdi şekillendirme tekniğinde sıfır-yerleştirme algoritması kullanmıştır. Negatif girdi şekillendiriciler tavan vinçleri, (Singer, Singhose ve Kriikku, 1997) endüstriyel robotlar (Meckl ve Seering 1990), uzay taşıtları (Tuttle ve Seering 1995) vb. gibi birçok sistemde kullanılmaktadır. Ayrıca negatif girdi şekillendiriciler yörünge izleyici sistemler için de kullanılmıştır (Singhose ve Singer 1996). Pao ve Singhose (1996) çoklu aktüatör içeren sistemler için girdi şekillendirici tasarımını gerçekleştirmiştir. Negatif şekillendiricilerin bazı tipleri esnek sistemlerin optimal zaman kontrolünü sağlamak için kullanılmıştır (Pao ve Singhose, 1995).

Pozitif ve negatif girdi şekillendiricilerin yanında girdi işaretinin daha yumuşak geçişli olduğu şekillendiriciler de vardır. Geleneksel girdi şekillendiricilere nispeten seyahat süresi ve gürbüzlükleri bakımından sistem cevabını iyileştirdikleri görülen bu girdi şekillendiricilerden önemli görülenler incelenmiştir. Aspinwall (1980), çalışmasında şekillendirmeyi komuta etmek için yeni bir yaklaşım geliştirmiştir. Yöntem, bir sistemin kalan yanıtını azaltmak için kısa, sonlu bir Fourier serisi ile dikdörtgen veya ‘bang-bang’ zorlama işlevinin şekillendirilmesini içerir. Meckl ve Seering (1990), rampa sinüzoidleri veya sınıma fonksiyonlarından gelen giriş sinyalinin uygulanmasını önermişlerdir. Yöntem ile, eski yöntemlere benzer bir şekilde zaman optimal dikdörtgen giriş fonksiyonu elde edilir. Bununla birlikte, bu yöntemde, dikdörtgen fonksiyonun şekilli sinyal yaklaşımı sayesinde hareket daha kısa bir sürede tamamlanmaktadır. Daha yeni bir teknik, girdi sinyalini üretmek için istenen bir polinom fonksiyonu öneren ve bunu bang-bang ve diğer dürtü ile kıyaslayan Piazzini ve Visioli (2000) tarafından bildirilen ters dinamik analizle girdi sinyalini şekillendirme temeline dayanır. Ancak önerilen girdi fonksiyonu, hareketi kontrol etmek için uç noktada başka bir işleve değiştirilmelidir. Bu, bu noktada hızlanmada ani bir adım değişikliğine neden olur. Daha hızlı hareket durumlarında, bu etki uyarımlara ve titreşimlere neden olur. Öte yandan, Şahinkaya (2001; 2004), ters dinamiği kullanarak girdi sinyalini şekillendirmek için çıkış hareketinin üçüncü dereceden üstel fonksiyonunu önermektedir. Fakat ters dinamik analiz, hesaplaması karmaşık ve fazla zamanı gerektirir. Alıcı, Kapucu ve Bayseç (2000), yukarıda bahsedilen girdi şekillendirme yöntemiyle karşılaştırmak için bir sikloid üzerine bindirilmiş bir rampa fonksiyonu önermişlerdir. Kapucu, Alıcı ve Bayseç (2001) ise, iki darbe sekansı ile bir sikloid artı rampa fonksiyonunun katlanması içeren bir hibrit girdi şekillendirme yöntemini önermişlerdir. Yavuz, Mıstıkoğlu ve Kapucu (2012), iki modlu diziler tarafından oluşturulan, tüm modların sırası ile sikloid fonksiyonu ile rampa edilmiş rampa-rampa fonksiyonunun önceden şekilli girdisini çevreleyerek çok modlu sistemin artık titreşimini ortadan kaldırmak için bir hibrit girdi şekillendirme yöntemini önermişlerdir. Conker, Kılıç, Mıstıkoğlu, Kapucu ve Yavuz (2014), esnek uzuvlu manipülatöründeki artık titreşimlerin ortadan kaldırılması için hibrit girdi şekillendirme yöntemi ile geliştirilmiş bir kontrol tekniği önermişlerdir. Li, Luo ve Huang (2016) iki esnek uzuvlu manipülatör ve altı bacaklı aktif manipülatör için girdi şekillendirici ve adaptif geri beslemeli denetleyicinin kullanıldığı hibrit bir denetim sistemi önermişlerdir. Sistemin hareketi için girdi şekillendirici kullandıkları çalışmalarında oluşan artık titreşimi adaptif kontrolcü ile sönmülemişlerdir. Masoud ve Alhazza (2017) çalışmalarında çok modlu sistemler için



girdi şekillendirici tasarımı yapmışlar ve sinüsoid fonksiyonla girdi profili üretmişlerdir. Benzetim sonuçlarını deneysel sonuçlarla destekledikleri çalışmalarında, ayarlanabilir manevra zamanı ile sisteminin modlarının elimine edileceğini, geleneksel girdi şekillendiricilerle kıyaslandığında modelleme hatalarına karşı çok daha gürbüz bir kontrolcü tasarlandığını bildirmişlerdir. Abdullahi ve diğerleri (2018) sistem çıkışını göz önünde bulunduran adaptif bir girdi şekillendirici yöntemi önermişlerdir. Değişen sistem durumlarında adaptif olarak doğal frekans ve sönüm oranının belirlenmesiyle girdi profilinin üretildiği kontrolcü için benzetim çalışmalarını uzaysal vinç sistemi ile doğrulamışlardır. Ramli, Mohamed ve Jaafar (2018) çalışmalarında uzaysal vinç sistemi için yapay sinir ağı tabanlı bir kontrolcü tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Farklı uç kütleleri ve sarkaç uzunluklarını tasarladıkları Birim Genlik Sıfır Titreşim girdi şekillendirici için darbelerin uygulama zamanlarını ağın eğitimi için kullanmışlardır. Ayrıca ağı eğitimi için parçacık sürüsü optimizasyonunu kullanmışlar ve sonuçları geleneksel girdi şekillendiricilerden Türevsel Sıfır Titreşim girdi şekillendirici cevapları ile karşılaştırmışlardır.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Kontrol Sistemleri ve Özellikleri

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte insan gücüne dayanan işler yerini artan bir ivme ile makinalara devretmektedir. Bu süreç insan gücü ihtiyacını azalttığı gibi işletme maliyetlerinin azalması, iş kazalarının ve sürelerinin azalması vb. gibi birçok avantajı da beraberinde getirmektedir. Fakat tüm bu avantajlara rağmen insanın yerini alacak sistemlerin ve ekipmanlarının tasarlanması ve birbirleri arasında uyum içerisinde çalışması kontrol alanında çalışan araştırmacıların çözmesi gereken bir sorun olarak ortaya çıkmıştır. Bu sebeple araştırmacılar sistemlerin denetimi için çeşitli kontrol teknikleri geliştirmişlerdir. Kontrol sistemlerine geçmeden önce sistemin tanımını yapmak gerekirse; bir iş için bir araya gelmiş mekanik ve/veya elektronik ekipmanların belirli bir mantıksal düzen içerisinde bir araya gelmiş hali sistem olarak tanımlanabilir. Şekil 2.1'de basitleştirilmiş kontrol sistemi genel yapısı görülmektedir.



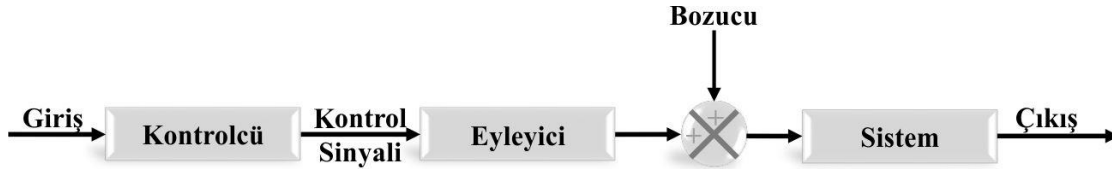
Şekil 2.1. Basitleştirilmiş kontrol sistemi şematik gösterimi

Burada girişler; sistemden elde edilmek istenen çıktıları, çıkışlar ise sistemin verdiği cevabı ifade etmektedir. Denetim sistemlerinin amacı sistemden istenen girdiye uygun çıktıların en kısa sürede arzu edilen değerlere ulaşması ve/veya değişen şartlar altında da istenen durumu korumasıdır. Bu amaçla açık çevrim (ileri besleme) ve kapalı çevrim (kapalı çevrim) olmak üzere iki farklı denetim sistemi geliştirilmiştir.

#### Açık çevrim (ileri besleme) kontrol

Açık çevrim veya ileri besleme kontrol; sistem girişinin çıkıştan bağımsız olarak üretildiği denetim sistemi olarak tanımlanabilir. Yani girdi üretilirken sistem cevabı dikkate alınmaz. Bu tür sistemler denetlenen sistemin tam olarak modellenemediği ve bozucu giriş etkilerinin az veya hiç olmadığı olduğu durumlarda daha çok kullanılır. Açık çevrim kontrolcülerin tasarımları basittir ve sistem için herhangi bir ek sensöre ihtiyaç duyulmaz.

Fakat değişken durumlara ve bozucu girişlere karşı denetleyici performansı zayıftır. Şekil 2.2’de basitleştirilmiş bir açık çevrim kontrol sistemin şematik gösterimi sunulmaktadır.

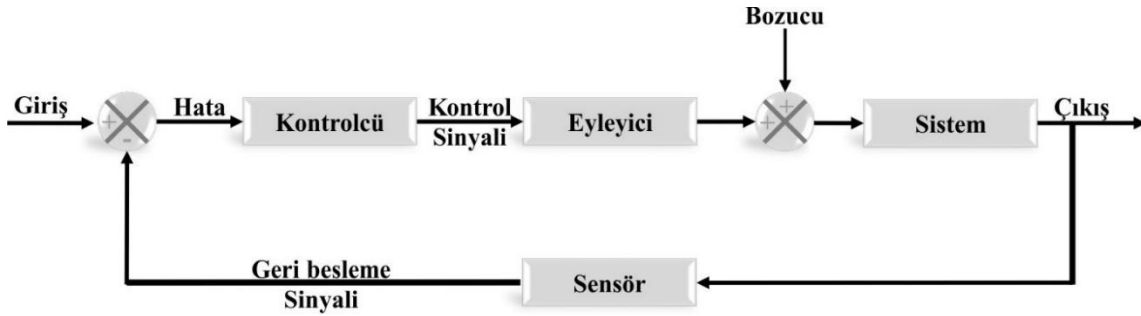


Şekil 2.2. Açık çevrim (İleri besleme) kontrol şematik gösterimi

Burada giriş; çıkışta elde edilmek istenen durumu ifade etmektedir. Kontrolcü; giriş işaretini eyleyici için uygun kontrol sinyaline dönüştürmektedir. Hareket üretici olarak da isimlendirilen eyleyici sistemden çıkış elde etmek için sisteme daha çok fiziksel hareket sağlayan birimdir. Bozucu giriş ise ortamdaki gürültü, titreşim vb. gibi sistemden istenen çıkışı olumsuz olarak etkileyen dış ortamdan kaynaklı girdiler olarak tanımlanabilir.

### Kapalı çevrim (geri besleme) kontrol

Kapalı çevrim veya geri besleme kontrol; sistem cevabının sensör, algılayıcı vb. gibi geri besleme elemanı ile ölçülerek girdi işaretinin belirli zaman aralıkları ile yeniden üretildiği denetim sistemi olarak tanımlanabilir. Yani sistem cevabı tasarımcı tarafından belirlenen, örnekleme zamanı olarak isimlendirdiğimiz belirli zaman aralıkları ile karşılaştırma elamanında değerlendirilerek girdi yeniden üretilir. Bu tür sistemler değişken çalışma koşullarına sahip veya bozucu girişlerin etkilerinin fazla olduğu sistemlerde daha çok kullanılır. Çıkış değişkenleri sürekli ölçülerek kontrol sinyali üretildiği için değişken durumlara ve bozucu girişlere karşı denetleyici performansı açık çevrim kontrolcülere göre daha başarılıdır. Fakat tasarımları karmaşıktır ve çıkış durumlarını ölçmek için ek sensörlere ihtiyaç duyulur ve dolayısıyla daha maliyetlidirler. Ayrıca geri besleme kontrolde sistem cevabı belirli bir örnekleme zamanı ile ölçülerek sisteme gönderilir. Bu durumda uygun örnekleme zamanının seçimi de oldukça önemlidir. Eğer örnekleme zamanının süresi uzun seçilirse sistem cevabında gecikmeler olacağı gibi bu sürenin kısa seçilmesi de dinamik sistem davranışında kararsızlığa sebep olacaktır. Bu nedenle kapalı çevrim kontrolde çözülmesi gereken diğer bir sorun da örnekleme zamanının seçimidir. Şekil 2.3’de basitleştirilmiş bir kapalı çevrim kontrol sistemin şematik gösterimi sunulmaktadır.



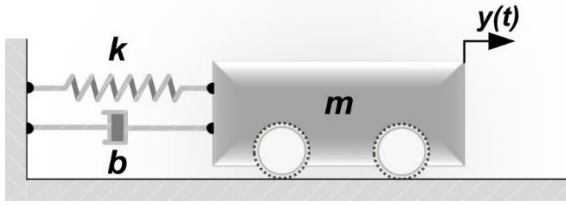
Şekil 2.3. Kapalı çevrim (Geri Besleme) kontrol şematik gösterimi

Burada giriş; çıkışta elde edilmek istenen durumu göstermektedir. Kontrolcü; giriş işaretini eyleyici için uygun kontrol sinyaline dönüştürür. Hareket üretici olarak da isimlendirilen eyleyici sistemden çıkış elde etmek için sisteme daha çok fiziksel bir hareket sağlar. Bozucu giriş ise ortamdaki gürültü, sarsıntı vb. gibi sistem cevabını olumsuz olarak etkileyen dış ortamdaki kaynaklı girdiler olarak tanımlanabilir. Sensör veya geri besleme elemanı sistem cevabını ölçerek karşılaştırma elemanına gönderir ve hata değeri hesaplanır. Daha sonra kontrolcü oluşan hata durumuna göre yeniden kontrol sinyali üretir ve çevrim belirli aralıklarla tekrarlanır.

### İkinci mertebeli sistemler ve özellikleri

Mühendislik sistemlerinin çoğu dışarıdan etkiyen kuvvetlerin etkisi ile hareket eden birbirine bağlı kütlelerden oluşmaktadır. Bu tür sistemler ikinci mertebeli diferansiyel denklemlerle modellenenlerdir (Kapucu ve Kaplan, 2005). Gerçek uygulamalarda daha yüksek mertebeli sistemler yaklaşık olarak ikinci mertebeli bir sistem gibi modellenerek denetleyici tasarımı yapılır. Bu sebeple çalışmanın bu kısmında ikinci mertebeli bir sistemin matematik modelinin oluşturulması, birim basamak girişine verilen cevap, temel sistem parametreleri ve bu parametrelerdeki değişime karşı sistem cevabındaki değişimler incelenecektir.

İkinci mertebeli sistemlere en temel örnek olarak kütle yay damper sistemi verilebilir. Tez kapsamında geliştirilen denetleyicilerin performanslarının değerlendirilmesinde, temel sistem parametrelerinin elde edilmesinde ve ikinci mertebeli sistemlerin davranışlarının incelenmesinde kütle yay damper sistemi model alınarak analizlerin yapılmasının nedeni tüm sistemlerin eşdeğer elemanlarının hesaplanarak tek bir kütle yay damper sistemi gibi ifade edilebilmesidir. Şekil 2.4'de ikinci mertebeli tek serbestlik dereceli bir sistem olan kütle yay damper sisteminin şematik gösterimi sunulmuştur.



Şekil 2.4. Kütle yay damper sistemi şematik gösterimi

Burada  $m$  (kg) toplam ağırlık,  $k$  (N/m) yay sabiti ve  $b$  (Ns/m) ise sönüm sabitidir.  $y$  (m) ise kütledeki konumunu göstermektedir. Serbest titreşim durumunda kütle yay damper sisteminin hareket denklemi Eş. 2.1 ile sunulduğu gibidir.

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = 0 \quad (2.1)$$

Sistemin hareket denkleminin genel gösterimi ile karakteristik sistem parametreleri Eş. 2.2, 2.3 ve 2.4 ile sunulduğu gibidir.

$$\ddot{x} + 2\omega_n\zeta\dot{x} + \omega_n^2x = 0 \quad (2.2)$$

$$\omega_n = \frac{k}{m} \quad (2.3)$$

$$\zeta = \frac{b}{2\sqrt{k.m}} \quad (2.4)$$

Burada  $\omega_n$  sistemin doğal frekansı ve  $\zeta$  sönüm oranıdır. Eş. 2.2 ile ifade edilen gösterime matematiksel gösterim veya matematik model denir.

Bir sistemin matematik modeli sisteme verilen girişe karşılık elde edilen çıkış arasındaki ilişkiye göre hesaplanabildiği gibi, sistemdeki mekanik ve elektronik tüm elemanların matematiksel modelleri kullanılarak hesaplanması ile de elde edilebilir. Sistemin girişi ve çıkışı arasındaki ilişkiye göre elde edilen matematiksel denklemler veya model sistemin transfer fonksiyonu olarak adlandırılır. Transfer fonksiyonu matematiksel hesaplamalarla elde edilebildiği gibi deneysel olarak; sistem girdisi ve cevabı arasındaki ilişkiden de elde edilebilir. Karakteristik sistemin parametreleri olan sönüm oranı,  $\zeta$  ve doğal frekans,  $\omega_n$  değerleri matematik modelden elde edilebilir. Sönümlü bir sistemin birim basamak cevabı incelendiğinde maksimum genliklerin değişimi sistemin sönüm oranı hakkında bilgi

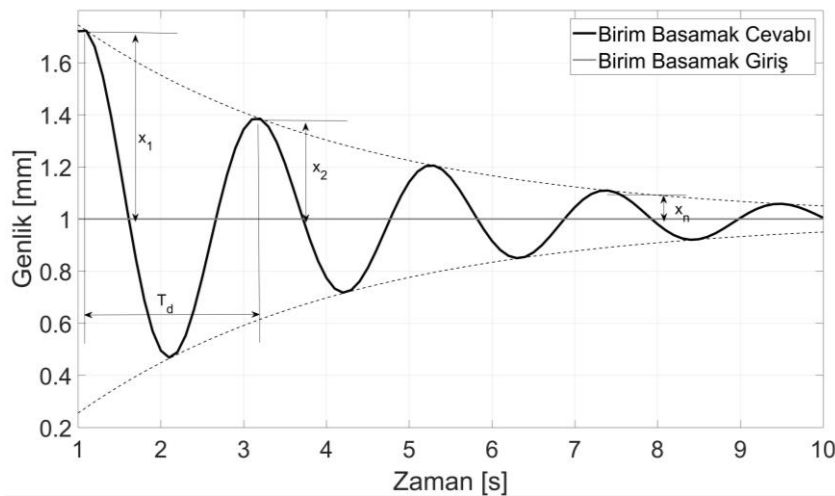
verecektir. Fiziksel bir sistemin sönüm oranı matematiksel yöntemlerle hesaplanabilmektedir. Bunun için sıklıkla kullanılan yöntemlerden birisi logaritmik azalma metodudur (Thomson, 1996). Bu yöntem ile sistemdeki titreşim genliklerinin azalma oranları ölçülerek hesaplama yapılmaktadır.

Sistem cevabına bakarak bu oran yaklaşık olarak tahmin edilebilir. Bu oranın sıfır olması sistemde sönüm olmadığı anlamına gelir ve sistem cevabı sabit genlikte harmonik bir salınım gösterir. Bu durumda sistem sönümsüz ( $\zeta = 0$ ) olarak nitelendirilir.

Bu oranın “1” değerine kadar artması sistem cevabında genlikleri küçültürken sönüm oranı değerinin büyüklüğü ile ters orantılı olarak yerleşme süresi azalır. Yani sistem cevabı sönüm oranının büyüklüğü belirli bir oran ile azalarak denge konumuna ulaşır. Sönüm oranının sıfır ile bir arasında olması kritik üstü ( $0 < \zeta < 1$ ) sönüm olarak adlandırılır.

Sönüm oranı bire eşit olduğunda ise sistem kritik ( $\zeta = 1$ ) sönümlü olarak adlandırılır ve sistem cevabı herhangi bir aşım yapmadan en hızlı şekilde referans değere ulaşır.

Sönüm oranının değeri birden büyükse sistem kritik üstü ( $\zeta > 1$ ) sönümlü olarak adlandırılır. Sistem cevabı çok yavaştır ve aşım yapmadan referans değere ulaşır. Şekil 2.5’de ikinci mertebe kritik altı ( $\zeta < 1$ ) sönüme sahip bir sistem için birim basamak cevabı görülmektedir.



Şekil 2.5. İkinci mertebe sönümlü bir sistem için birim basamak giriş cevabı

Burada  $T_d$ , sönümlü sistem periyodu,  $x_1, x_2 \dots x_n$  sırası ile maksimum genlikleri göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi maksimum genlik eksponansiyel olarak azalmaktadır. Sistem cevabı incelendiğinde; sönüm oranı logaritmik azalma denkleminde elde edilmektedir. Şekildeki gibi sönümlü bir sistem için zamana göre sistem cevabı Eş. 2.5 ile sunulmaktadır.

$$y(t) = Ae^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi) \quad (2.5)$$

Burada  $A$  (başlangıç konumu),  $\phi$  (faz farkı) ve  $\omega_d$  (sönümlü sistem frekansı) olarak ifade edilir. Bu durumda  $x_1$  ve  $x_2$  genliklerinin oranı eşitlik 2.6 ile sunulmaktadır.

$$\frac{x_1}{x_2} = e^{\zeta\omega_n(t_2-t_1)} \quad (2.6)$$

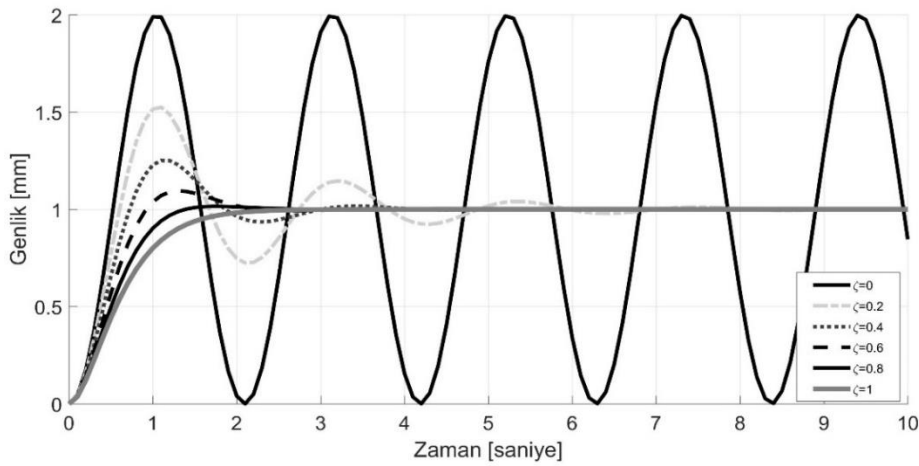
Burada  $t_2-t_1$  sönümlü sistem periyodudur. Dolayısıyla  $\omega_d = 2\pi/T_d$  olarak gösterilirse yeni durumda genliklerdeki değişim Eş. 2.7 ile sunulmaktadır.

$$\frac{x_1}{x_2} = e^{\zeta\omega_n(2\pi/\omega_d)} = e^{2\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.7)$$

Bu oran logaritmik azalma olarak isimlendirilir ve Eş. 2.8'deki gibi  $\delta$  simgesi ile tanımlanır.

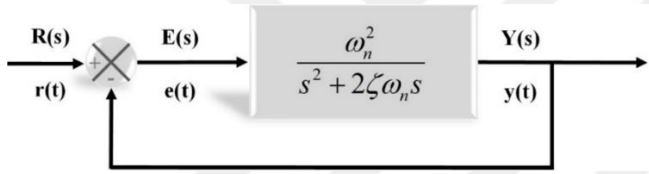
$$\ln\left(\frac{x_1}{x_2}\right) = 2\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2} = \delta \quad (2.8)$$

Sönüm sabiti  $b = 2\zeta\sqrt{k.m}$  olduğu için birbirini takip eden genlikler bilindiğinde sönüm oranı ve sönüm sabiti hesaplanabilir. Şekil 2.6'da farklı sönüm oranları için sistem cevapları gösterilmektedir.



Şekil 2.6. İkinci mertebe bir sistem için sönüm oranına göre birim basamak giriş cevabı

Şekil 2.7'de ikinci mertebe bir sistem için geri besleme (kapalı bir çevrim) kontrol blok gösterimi sunulmaktadır.



Şekil 2.7. İkinci mertebe bir sistem için kapalı çevrim kontrol blok gösterimi

İkinci mertebe bir sistem için açık çevrim transfer fonksiyonunun s domeninde gösterimi Eş. 2.9 ile sunulmaktadır.

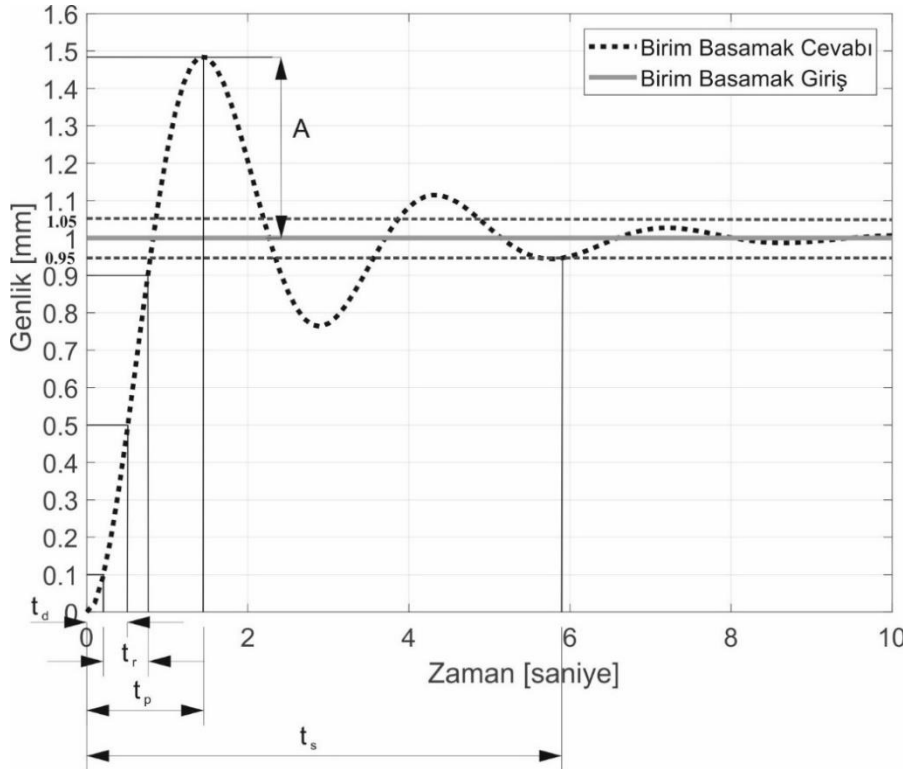
$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s} \quad (2.9)$$

Kapalı çevrim transfer fonksiyonu ise Eş. 2.10 ile sunulmaktadır.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.10)$$

Elde edilen transfer fonksiyonuna  $\omega_n = \sqrt{5}$ ,  $\zeta = \sqrt{5}/10$  değerleri için birim basamak giriş uygulandığında Şekil 2.8'de sunulan grafik elde edilir. Sistem cevabına bakıldığında kritik altı sönüme sahip ikinci mertebeden bir sistem davranışı olduğu görünmektedir. Sistem cevabı salınımlı ve zamanla referans değere ulaşan bir karaktere sahiptir.





Şekil 2.8. İkinci merteye bir sistem için birim basamak giriş cevabı

Tasarımlanan sistem modellenip uygun kontrolcü ile cevabı incelendiğinde; kontrolcü performansının değerlendirilmesi gerekmektedir. Bunun için sisteme uygulanan basamak giriş cevabının analiz edilmesi ve çeşitli performans kriterlerinin sistem cevabı üzerinde belirlenebilmesi gerekmektedir. Şekil 2.8'de temel performans kriterlerinden gecikme zamanı ( $t_d$ ), yükselme zamanı ( $t_r$ ), tepe zamanı ( $t_p$ ), yerleşme zamanı ( $t_s$ ), maksimum aşım ( $A$ ) kriterleri belirtilmiş ve aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Gecikme zamanı ( $t_d$ ): Sistem çıkışının referans değerinin yarısına ulaştığı ana kadar geçen süreye gecikme zamanı denir.  $t_d$  ile gösterilir.

Yükselme zamanı ( $t_r$ ): Sistem çıkışının referans değerinin %10'una geldikten sonra %90'ına ulaşana kadar geçen süredir.  $t_r$  ile gösterilir.

Tepe zamanı ( $t_p$ ): Sistem çıkışının referans değeri geçip ilk maksimum genlik değerine ulaştığı ana kadar geçen süredir.  $t_p$  ile gösterilir.

Yerleşme zamanı ( $t_s$ ): Sistem çıkışının referans değerinin %5 altına ve üzerine ilk girdiği ve bir daha bu değeri aşmadığı ana kadar geçen süredir.  $t_s$  ile gösterilir.

Maksimum aşım ( $A$ ): Çıkışın en yüksek değeri ile denge durumundaki değer arasındaki farktır.

## 2.2. Deney Düzenekleri

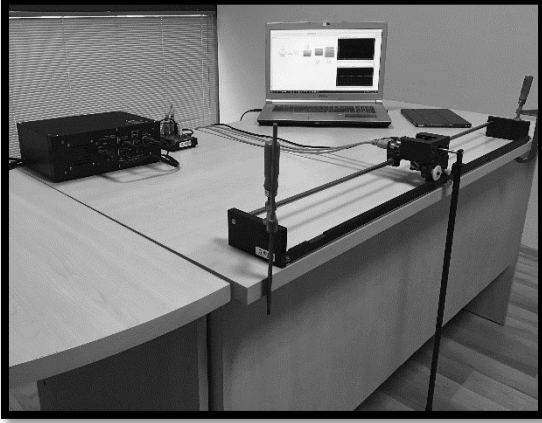
Deney düzenekleri, tasarlanan yöntemlerin performans analizi için kullanılmıştır. Tasarlanan kontrolcüler önce MATLAB/Simulink ortamında simule edilerek benzetim sonuçları elde edilmiştir. Benzetim sonuçları deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Bu kısımda deney düzenekleri ve sistem dinamikleri detayları ile paylaşılmıştır.

Sistemin dinamik modeli kontrol sistemi tasarımında oldukça önemlidir. Ayrıca kontrolcü başarısı dinamik modelin doğruluğu ile orantılıdır. Dinamik sistemlerin modeli; Newton-Euler, Virtüel iş, Lagrange-Euler, Gibbs-Appel, Hamilton prensibi vb. gibi birçok yöntem ile elde edilebilmektedir (Dwivedy ve Eberhard, 2006; Ozgoli ve Taghirad, 2008). Deney düzenekleri için sistem modeli Lagrange-Euler yöntemi ile elde edilmiş ve deneysel sonuçlarla sistem modelinin başarısı doğrulanmıştır. Son olarak deneysel sonuçlardan girdi şekillendirici tasarımında gerekli olan temel sistem parametreleri doğal frekans ( $\omega_n$ ) ve sönüm oranı ( $\zeta$ ) değerleri de elde edilmiştir.

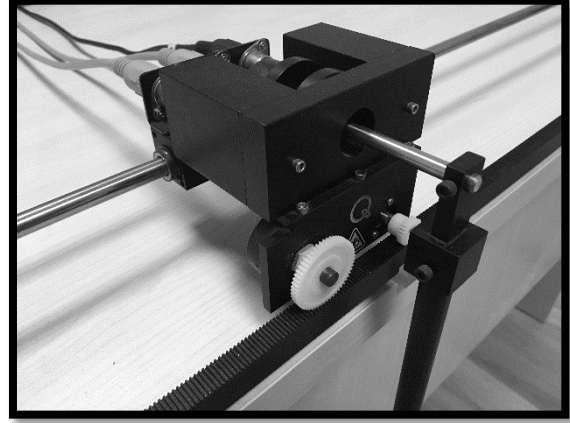
### 2.2.1. Doğrusal gezer vinç deney düzeneği

Doğrusal gezer vinç deney düzeneği; bir araba ve arabaya bağlı yatay olarak hareket etmesine müsaade edilen bir sarkaçtan oluşur. Arabanın doğrusal hareketi DC servo motorun miline bağlanmış düz dişlinin dairesel hareketini kramyer dişliye aktarması ile sağlanır. Sarkacın açısal konumu ve arabanın doğrusal konumu artımlı enkoderler ile ölçülmektedir. Resim 2.1’de deney cihazının genel görüntüsü ve bileşenleri sunulmuştur.

a) Genel görünüm



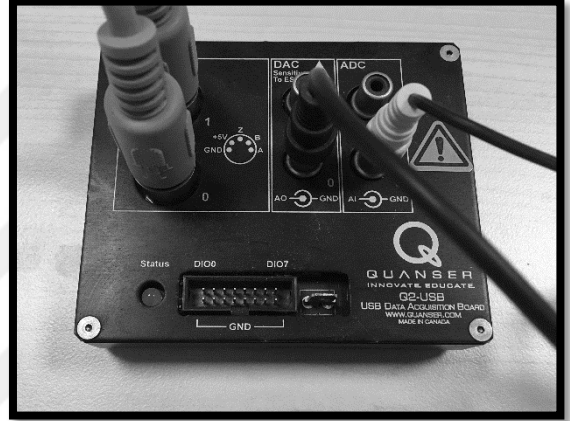
b) Araba ve sarkaç



c) Güç kaynağı



d) Kontrol kartı



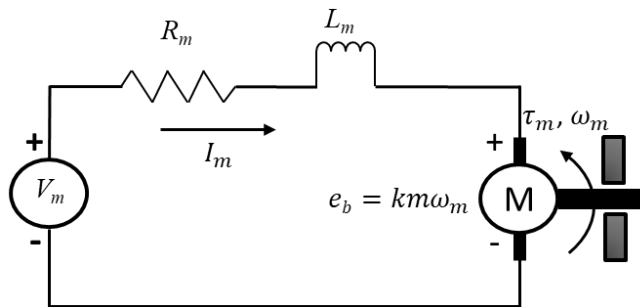
Resim 2.1. Doğrusal gezer vinç deney düzeneği ve bileşenleri

Doğrusal Gezer Vinç Deney Düzeneği Quanser firması tarafından üretilen bir deney düzeneğidir. Dolayısıyla tüm bileşenler ve ilgili detaylar üretici tarafından sağlanmaktadır (Quanser, 2012a). Çizelge 2.1’de doğrusal gezer vinç deney setine ait sistem parametreleri sunulmaktadır.

Çizelge 2.1. Doğrusal gezer vinç deney seti sistem parametreleri

Parametre	Açıklama	Değer	Birim
$g$	Yer çekimi sabiti	9,81	$m/sn^2$
$R_m$	Motor armatür direnci	2,6	$ohm$
$L_m$	Motor armatür indüktansı	0,18	$mH$
$k_t$	Motor tork sabiti	$7,68 \cdot 10^3$	$N m/A$
$k_m$	Zıt emk sabiti	$7,68 \cdot 10^3$	$V(rad/s)$
$\eta_m$	Motor verimi	0,68	-
$J_{m,rotor}$	Rotor atalet momenti	$3,9 \cdot 10^7$	$kg m^2$
$K_g$	Planet dişli kutusu dişli oranı	3,71	-
$B_{eq}$	Eşdeğer viskoz sönüm oranı	5,4	$N m s/rad$
$r_{mp}$	Motor pinyon dişli radüsü	$6,35 \cdot 10^3$	$m$
$M$	Sarkaç arabasının arabanın ağırlığı	0,75	$kg$
$m$	Sarkacın ağırlığı	0,230	$kg$
$I$	Sarkacın atalet momenti	$7,88 \cdot 10^{-3}$	$kgm^2$
$l$	Sarkacın uzunluğu	0,643	$m$
$K_{ep}$	Sarkaç enkoder hassasiyeti	$2,275 \cdot 10^{-5}$	-
$K_{ec}$	Araba enkoder hassasiyeti	0,0015	$rad/dev$
$f_{maks}$	Maksimum motor giriş voltaj frekansı	50	$Hz$
$I_{maks}$	Maksimum motor giriş akımı	1	$A$
$\omega_{maks}$	Maksimum motor hızı	628,3	$rad/sn$

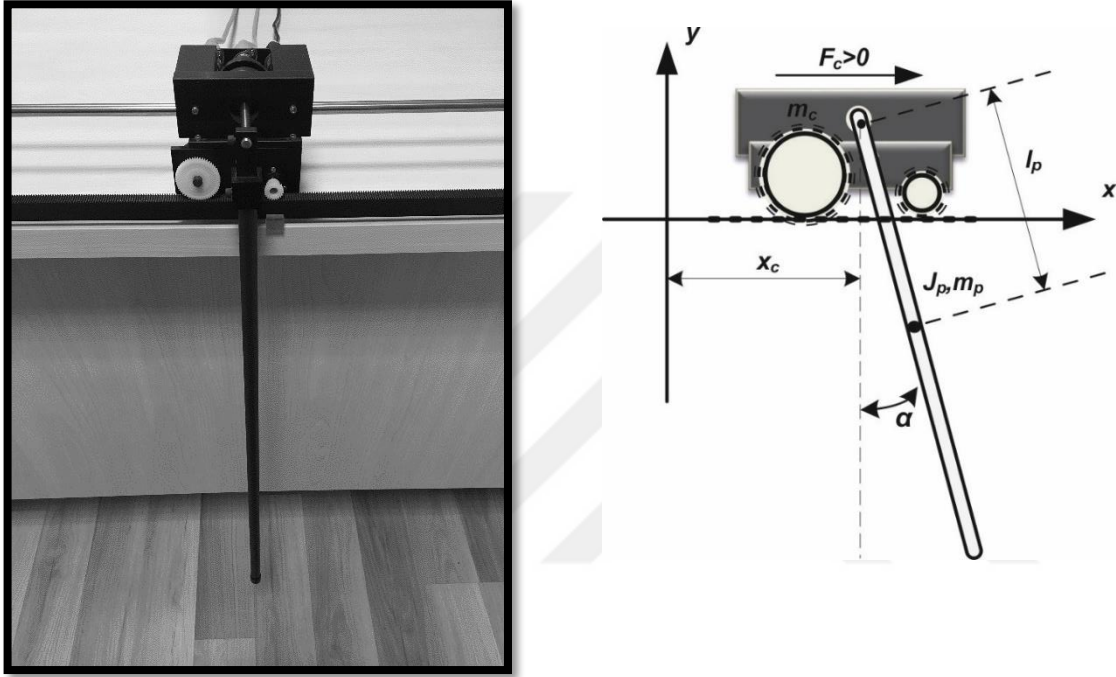
Sistemin hareketini sağlayan kuvvet; DC servo motora uygulanan gerilim ( $V_m$ ) sonucu motor milinde oluşan tork ile hesaplanmaktadır. DC motorun şematik gösterimi Şekil 2.9'da sunulmaktadır.



Şekil 2.9. DC motorun yapısı ve bileşenleri

Sisteme etkiyen  $F_c$  kuvvetinin hesaplamaları Newton'un hareket kanunları ve kapalı devreye Kirchhoff Voltage yasasına göre düzenlendiğinde  $F_c$  kuvveti Eş. 2.11 ile sunulduğu gibi elde edilir.

$$F_c(t) = \frac{\eta_g K_g \eta_m k_t (V_m(t) r_{mp} - k_m K_g \dot{x}_c(t))}{r_{mp}^2 R_m} \quad (2.11)$$



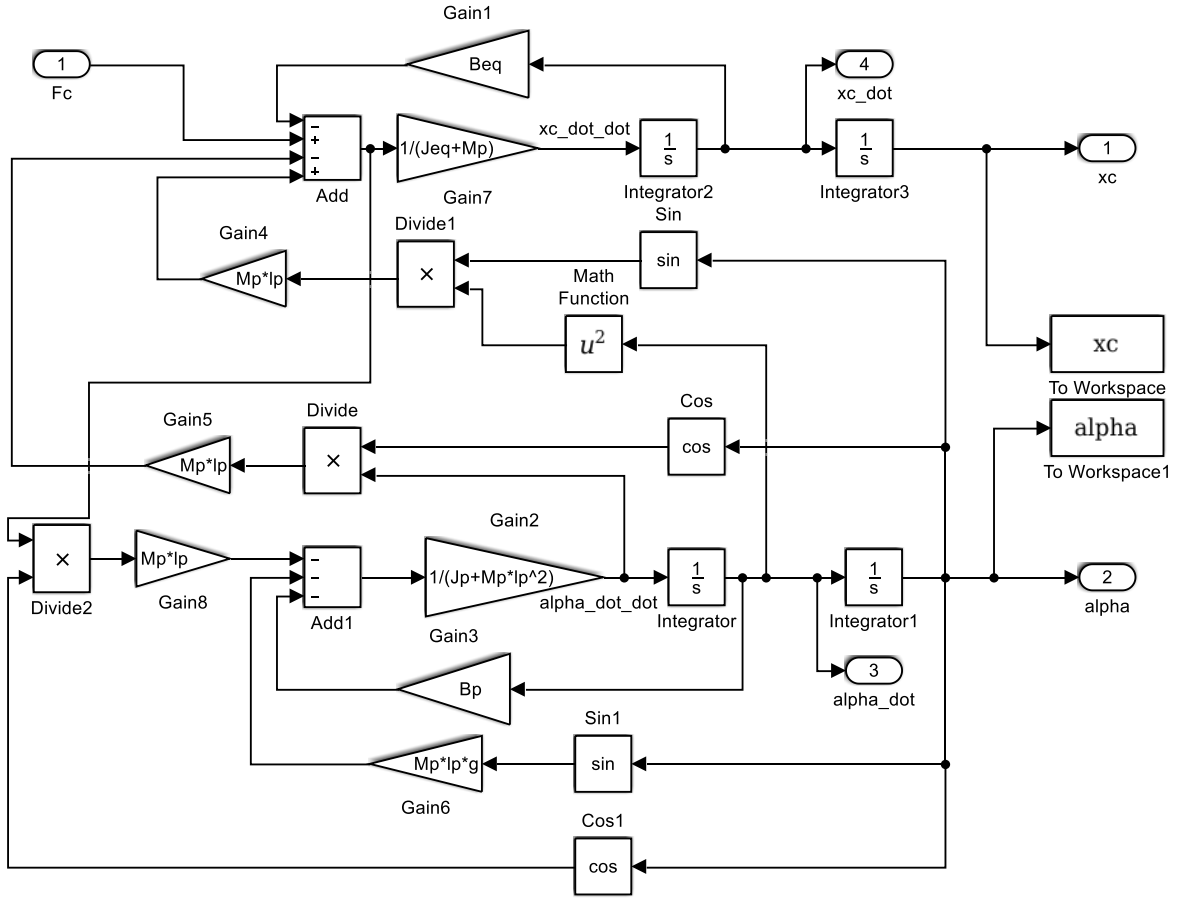
Resim 2.2. Doğrusal gezer vinç deney düzeneği ve şematik gösterimi

Resim 2.2'de doğrusal gezer vinç deney düzeneği ve şematik gösterimi sunulmaktadır. Sistemin matematiksel modeli Euler-Lagrange yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Araba yatay düzlemde hareket ederken, sarkaç araba üzerinde bağlı olduğu nokta etrafında serbest bir şekilde salınım yapabilmektedir. Sistemin hareket denklemleri Eş. 2.11 ve 2.12 ile sunulduğu gibidir.

$$(J_{eq} + M_p) \ddot{x}_c + M_p l_p \cos(\alpha) \ddot{\alpha} + B_{eq} \dot{x}_c - M_p l_p \sin(\alpha) \dot{\alpha}^2 = F_c \quad (2.12)$$

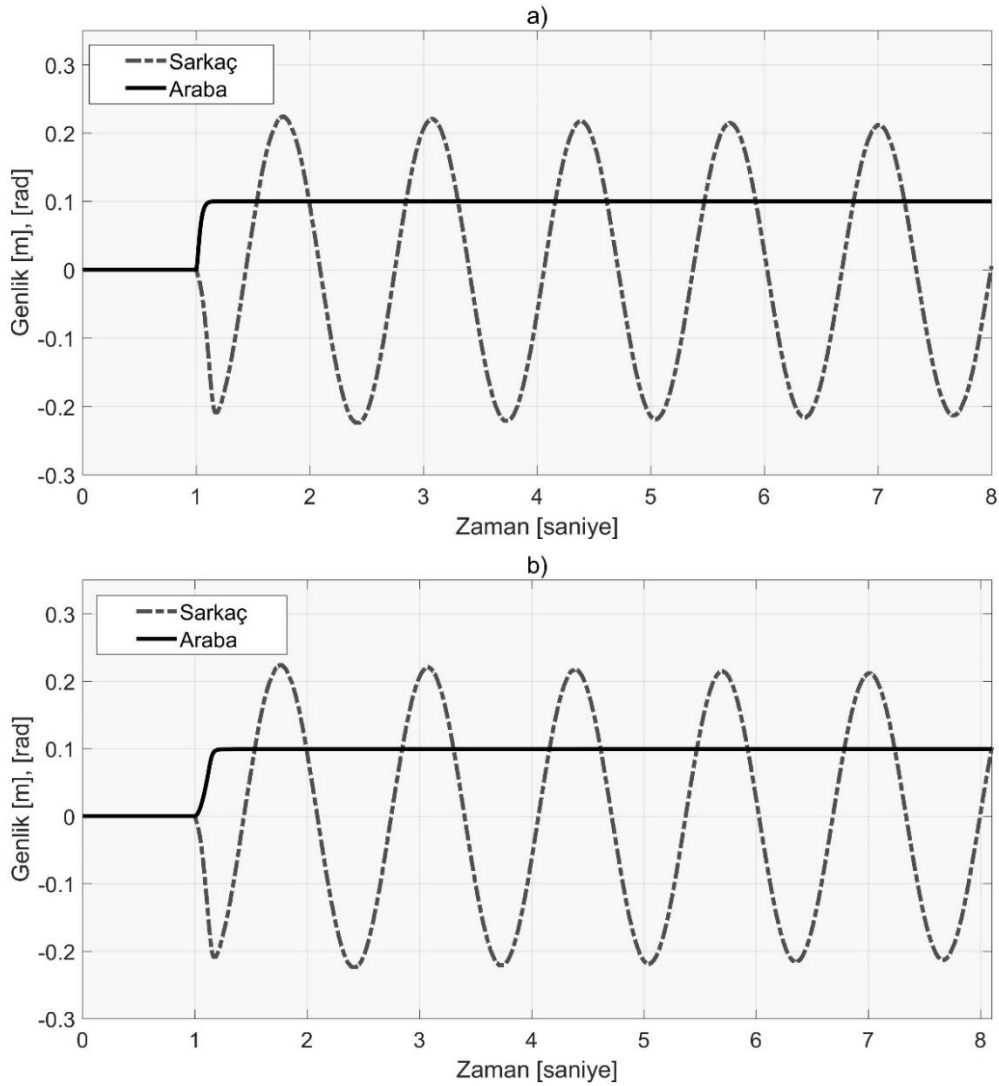
$$M_p l_p \cos(\alpha) \ddot{x}_c + (J_p + M_p l_p^2) \ddot{\alpha} + B_p \dot{\alpha} + M_p l_p g \sin(\alpha) = 0 \quad (2.13)$$

Sistemin MATLAB/Simulink modeli Şekil 2.10 ile sunulmaktadır.



Şekil 2.10. Doğrusal gezer vinç MATLAB/Simulink modeli

Sisteme uygulanan birim basamak girdi için sistem cevabı Şekil 2.11'de sunulmuştur. Benzetim ve deneysel sonuçlar modellemenin başarılı olduğunu göstermektedir.

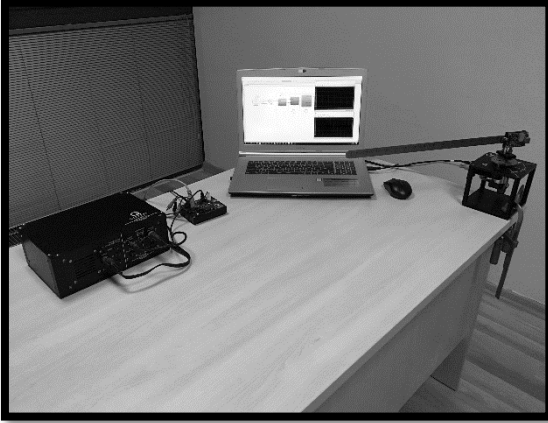


Şekil 2.11. Doğrusal gezer vinç basamak giriş cevabı a) Benzetim b) Deneysel

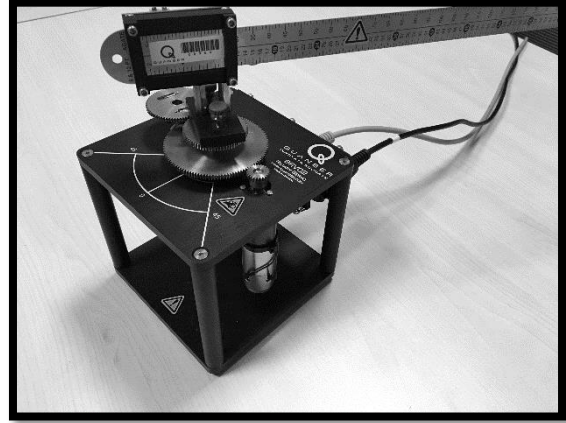
### 2.2.2. Esnek uzuv deney düzeneği

Deney cihazı elastik bir uzuv, dönüş hareketi sağlayan DC servo motor ve motor milinin açısal konumunu ölçen optik bir enkoderden oluşmaktadır. Elastik uzvun uç açısı; esnek uzuv üzerinde motor miline yakın uca yerleştirilmiş bir deformasyon rozeti (strain gauge) ile ölçülmektedir. Resim 2.3'de deney cihazının genel görünümü ve bileşenleri sunulmaktadır.

a) Genel görünüm



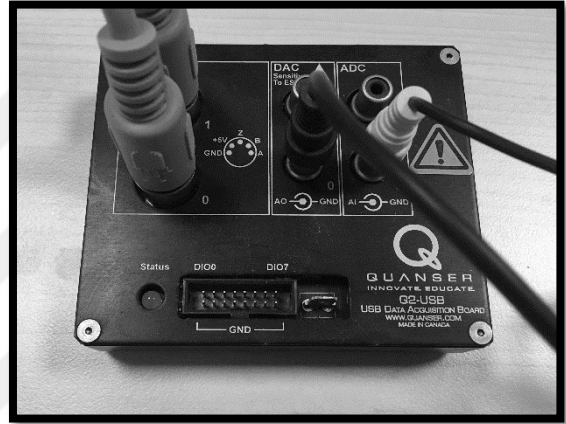
b) Esnek uzuv



c) Güç kaynağı



d) Kontrol kartı



Resim 2.3. Esnek uzuv deney düzeneği ve bileşenleri

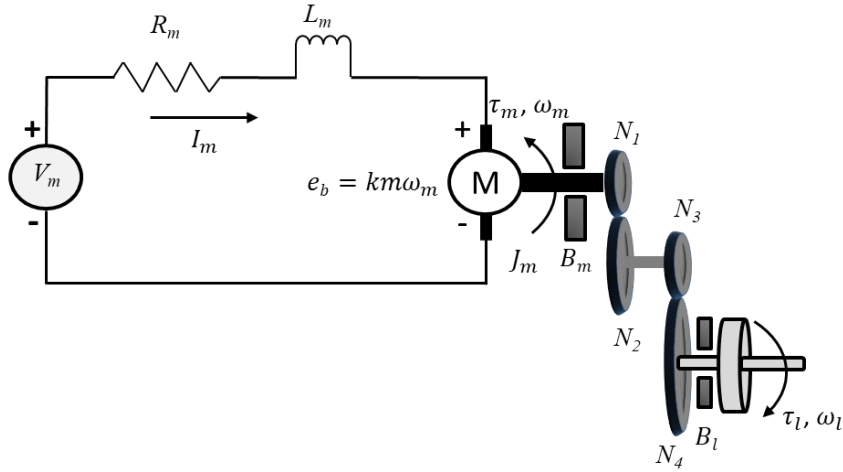
Esnek Uzuv Deney Düzeneği Quanser firması tarafından üretilen bir deney düzeneğidir. Dolayısıyla tüm bileşenler ve ilgili detaylar üretici tarafından sağlanmaktadır (Quanser, 2012b). Çizelge 2.2’de esnek uzuv deney setine ait sistem parametreleri sunulmaktadır.



Çizelge 2.2. Esnek uzuv deney seti sistem parametreleri

Parametre	Açıklama	Değer	Birim
$g$	Yer çekimi sabiti	9,81	$m/sn^2$
$R_m$	Motor armatür direnci	2,6	$ohm$
$L_m$	Motor armatür indüktansı	0,18	$mH$
$k_t$	Motor tork sabiti	$7,68 \cdot 10^3$	$N m/A$
$k_m$	Zıt emk sabiti	$7,68 \cdot 10^3$	$V(rad/s)$
$K_g$	Dişli kutusu oranı	14	
$\eta_m$	Motor verimi	0,69	-
$\eta_g$	Dişli kutusu verimi	0,90	-
$J_{m,rotor}$	Rotor atalet momenti	$3,9 \cdot 10^{-7}$	$kg m^2$
$J_{tach}$	Takometre atalet momenti		
$K_g$	Planet dişli kutusu dişli oranı	3,71	-
$B_{eq}$	Büyük dişli eşdeğer viskoz sönüm oranı Küçük dişli eşdeğer viskoz sönüm oranı	0,0015 0,015	$N m s/rad$
$J_{eq}$	Büyük dişli eşdeğer atalet momenti Küçük dişli eşdeğer atalet momenti	$9,76 \cdot 10^{-7}$ $2,08 \cdot 10^{-5}$	$kg m^2$
$m_l$	Esnek uzvun ağırlığı	0,065	$kg$
$J_l$	Esnek uzvun atalet momenti	0,0038	$kg m^2$
$L_l$	Esnek uzuv uzunluğu	0,419	$m$
$K_{enc}$	Enkoder hassasiyeti	8192	$adım/dev$
$K_{tach}$	Takometre hassasiyeti	1,5	$V/k_{rpm}$
$f_{maks}$	Maksimum motor giriş voltaj frekansı	50	$Hz$
$I_{maks}$	Maksimum motor giriş akımı	1	$A$
$\omega_{maks}$	Maksimum motor hızı	628,3	$rad/sn$

Sistemin hareketini sağlayan kuvvet; DC servo motora uygulanan gerilim ( $V_m$ ) sonucu motor milinde oluşan tork ile hesaplanmaktadır. DC motorun şematik gösterimi Şekil 2.12'de sunulmaktadır.

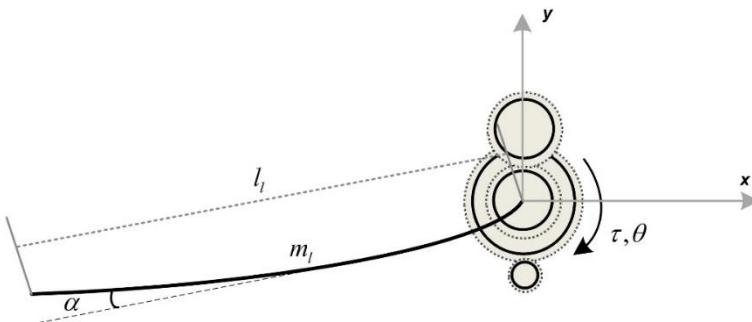
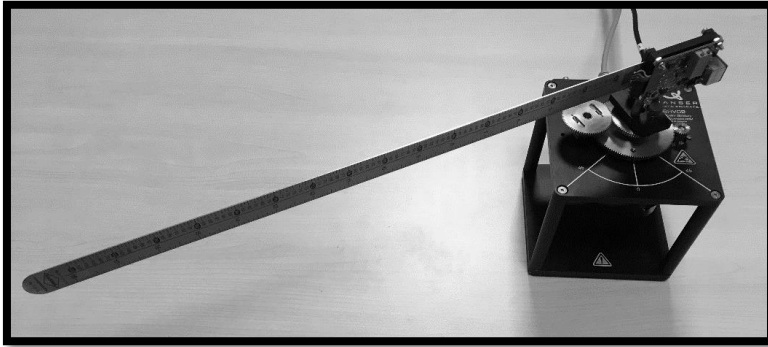


Şekil 2.12. DC motorun yapısı ve bileşenleri

Sisteme etkiyen  $\tau_l$  torkunun hesaplamaları Newton'un hareket kanunları ve kapalı devreye Kirchhoff Voltage yasasına göre düzenlendiğinde  $\tau_l$  ve  $\tau_m$  (motor milinde oluşan tork) kuvveti Eş. 2.14 ve 2.15 ile sunulmaktadır.

$$\tau_m(t) = \frac{\eta_m k_t (V_m(t) - k_m K_g \omega_l(t))}{R_m} \quad (2.14)$$

$$\tau_l(t) = \eta_g K_g \tau_m(t) \quad (2.15)$$



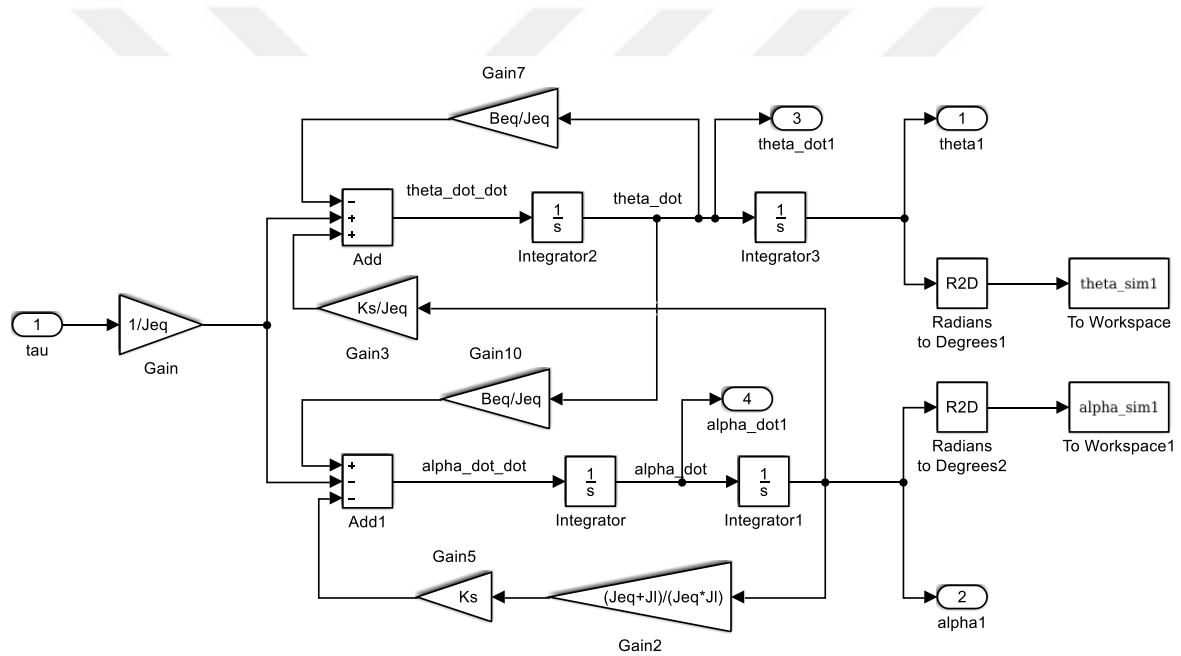
Resim 2.4. Esnek uzuv deney düzeneği ve şematik gösterimi

Resim 2.4'de esnek uzuv deney düzeneği ve şematik gösterimi sunulmaktadır. Sistemin matematiksel modeli Euler-Lagrange yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Sistemin hareket denklemleri; Eş. 2.16 ve 2.17 ile sunulmaktadır.

$$\ddot{\theta} = -\frac{B_{eq}}{J_{eq}}\dot{\theta} + \frac{K_s}{J_{eq}}\alpha + \frac{1}{J_{eq}}\tau \quad (2.16)$$

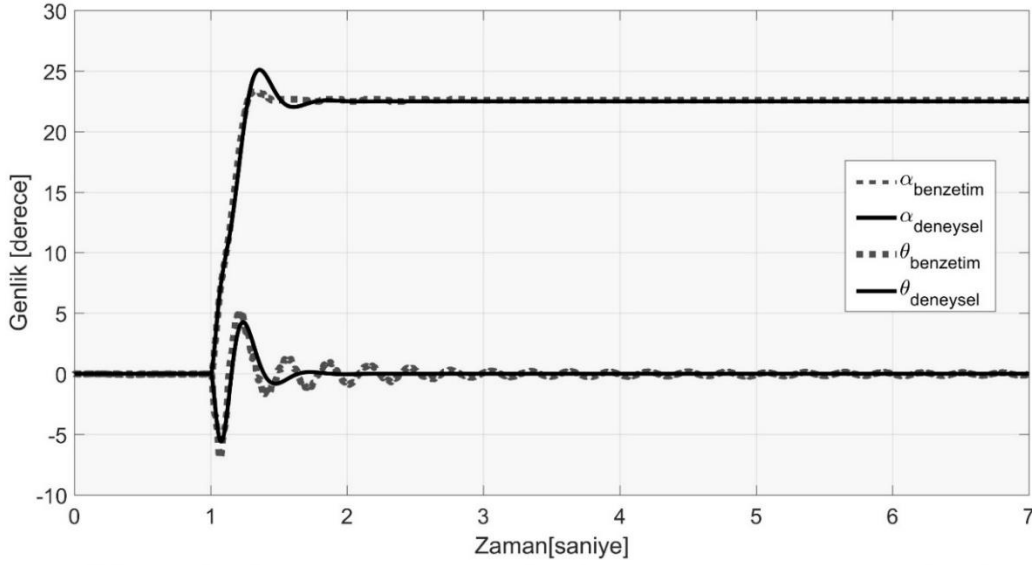
$$\ddot{\alpha} = -\frac{B_{eq}}{J_{eq}}\dot{\alpha} + K_s \left( \frac{J_l + J_{eq}}{J_l J_{eq}} \right) \alpha - \frac{1}{J_{eq}}\tau \quad (2.17)$$

Sistemin MATLAB/Simulink modeli Şekil 2.13'de sunulmuştur.



Şekil 2.13. Esnek uzuv MATLAB/Simulink modeli

Sisteme uygulanan birim basamak girdi için sistem cevabı Şekil 2.14'de görülmektedir. Benzetim ve deneysel sistem sonuçları modellemenin başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.14. Esnek uzuv basamak giriş cevabı a) Benzetim b) Deneysel

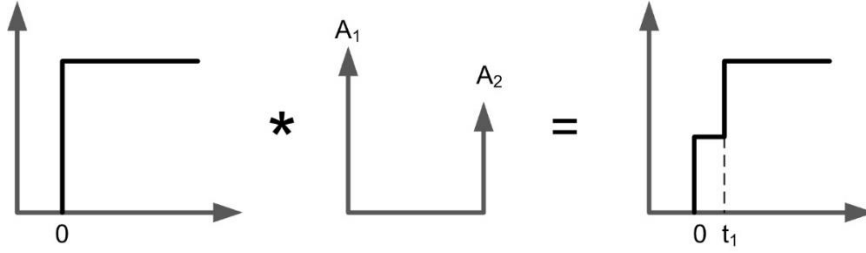
Deneysel verilerden elde edilen sonuçlar Bölüm 2.1’de anlatılan logaritmik azalma yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Doğrusal gezer vinç ve esnek uzuv sisteminin sönümlü doğal frekansı ve sönüm oranı değerleri Çizelge 2.3’de sunulmuştur.

Çizelge 2.3. Deney düzeneği için hesaplanan sistem parametreleri

Deney Düzenekleri	$\zeta$	$\omega_d$
Doğrusal Gezer Vinç	0,004	4,789
Esnek Uzuv	0,07	20,4

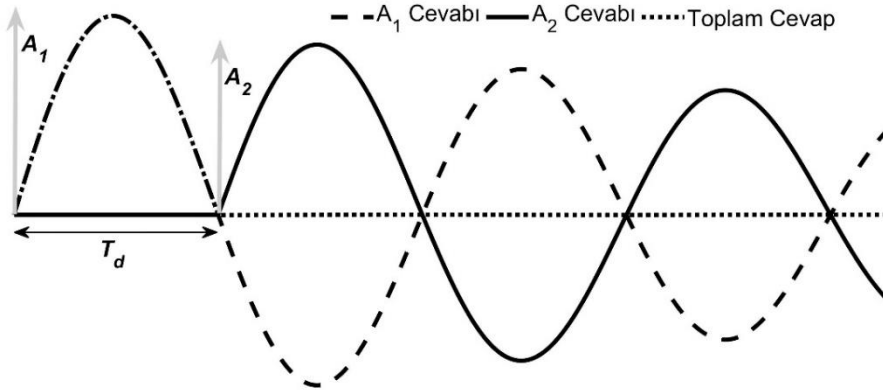
### 2.3. Girdi Şekillendiriciler

Girdi şekillendirme veya komutun önceden şekillendirilmesi, sistemin titreşim modlarının iptal edileceği şekilde referans sinyalinin uygun biçimde şekillendirilmesiyle titreşimi azaltan bir komut üretim tekniğidir. Şekilli komut profilleri iki yolla üretilir. İlk yaklaşım, bir dizi darbenin katlanması esasına dayanır, ikincisi ise istenen komut sinyali için özel fonksiyonların çözülmesiyle elde edilir. Şekil 2.15’de girdi şekillendiricinin girdiye uygulandığı görülmektedir.



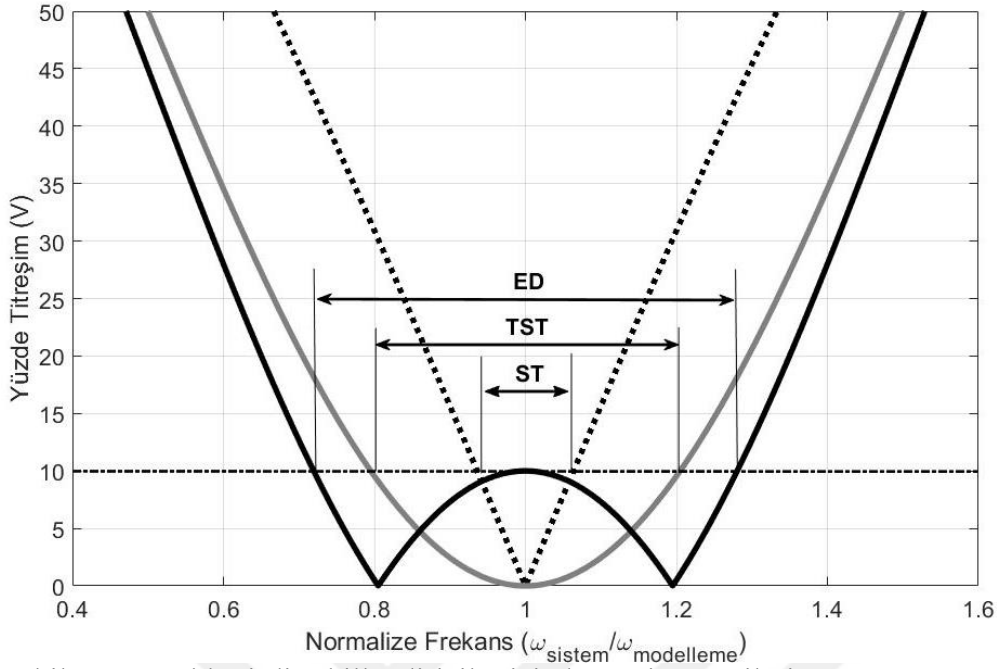
Şekil 2.15. Girdi şekillendiricilerin uygulanaşı

Şekil 2.15'de görüldüğü gibi basamak giriş uygun darbe dizleri ile katlanarak (zamanda ötelenmiş ikinci bir adım girdisine dönüştürülerek) sisteme uygulanır. En popüler yöntemlerden biri, referans komutunu bir dizi darbe ile birleştirerek uygulanan şekillendirme yöntemidir. Referans komutu iki darbeden oluşur. İlk darbe sıfır zamanında bulunur. İkinci darbe, sistemin bir titreşim periyodu kadar geciktirilir. Bu işlemin detayları Şekil 2.16'da sunulmaktadır. Burada ilk darbenin bir titreşimi nasıl başlattığı ve ikinci darbenin bu titreşimi nasıl ortadan kaldırdığı görülmektedir (Singer ve Seering, 1990).



Şekil 2.16. Şekillendirilmiş girdi için sistem cevabı

Girdi şekillendirme teknikleri tasarlanırken, sistemin doğal frekansı ( $\omega_n$ ) ve sönüm oranı ( $\zeta$ ) parametreleri bilinmelidir. Bu sayede sistem cevabına göre uygun zamanda uygun girdi üretilebilmektedir. Fakat dinamik sistemler yapıları gereği veya mekanik sistemdeki aksaklıklar, ortam şartları (gürültü, titreşim v.b.) gibi nedenlerle tam olarak modellenemeyebilirler (Magee ve Book, 1992). Bu sebeple modelleme frekansındaki hatalara karşı kontrolcü performansının değerlendirilebilmesi gerekir. Artık titreşim genliğinin modelleme hatalarına karşı değişimi hassasiyet eğrisi olarak tanımlanmıştır (Singhose, Porter ve Singer, 1995). Şekil 2.17'de farklı girdi şekillendiriciler için hassasiyet eğrileri sunulmuştur.



Şekil 2.17. Farklı girdi şekillendiriciler için hassasiyet eğrileri

Şekil 2.17'de y eksenini sistem cevabındaki artık titreşim değerini, x eksenini ise normalize frekans değerini göstermektedir. Normalize frekans; sistemin doğal frekans değerinin modelleme frekansına oranıdır. Hassasiyet eğrisi tasarlanan girdi şekillendirici performansının ölçülmesinde en önemli performans kriterlerinden birisi olan gürbüzlüğün tespiti için kullanılmaktadır. Şekilde x eksenine paralel olarak çizilen ve %10 artık titreşim değerini kesen doğrular %10 artık titreşim değeri için gürbüzlük değerini vermektedir. Bunun anlamı eğer sistem belirli bir artık titreşime müsaade ediyorsa (bu titreşim değeri %10 veya tasarlanan sistemin özelliğine göre farklı bir değer de olabilir) o titreşim değerinden yatayda çizilen doğru ile hassasiyet eğrisinin iki kolu arasında kalan aralık girdi şekillendiricilerin gürbüzlüğünü göstermektedir. Buna göre TST (Türevsel Sıfır Titreşim) girdi şekillendirici ST (Sıfır Titreşim) girdi şekillendiriciden daha gürbüz, ED (Ekstra Duyarsız) girdi şekillendirici Şekil 2.17'de kıyaslama yapılan girdi şekillendiricilerin en gürbüz olanıdır. Diğer bir deyişle oklar arasında kalan bölge içerisindeki kadar modelleme frekansı yanlış tahmin edilse de kontrolcü yeterli performansı vermektedir denilebilir.

Girdi şekillendirici tasarımı; ilk darbe sonunda oluşan titreşim ve onu sönmüleyecek uygun zamanda uygun bir ikinci darbenin oluşturulması esasına dayanmaktadır. Yani sistem girdisine karşılık oluşacak artık titreşimin değerinin hesaplanması gerekmektedir. İkinci

mertebeden bir sistem için  $t_0$  zamanında uygulanan darbeye karşı  $t$  anındaki sistem cevabı Eş. 2.18 ile sunulmaktadır (Bolz, 1973).

$$y(t) = \left[ \frac{A\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta \omega_n (t-t_0)} \right] \sin \left( \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} (t-t_0) \right) \quad (2.18)$$

Burada  $A$  uygulanan darbe,  $\omega_n$  sistemin sönümsüz doğal frekans değeri,  $\zeta$  sistemin sönüm oranı,  $t_0$  darbenin uygulama zamanı,  $y(t)$  ise incelenen sistemin  $t$  zamanında verdiği cevaptır.

Eğer sisteme birden fazla darbe uygulanıyorsa son darbenin uygulanmasından sonra oluşan sistem cevabı Eş. 2.19 ile gösterildiği gibidir (Gieck, 1983).

$$y(t_n) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{A_i \omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta \omega_n (t-t_i)} \right] \sin \left( \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} (t-t_i) \right) \quad (2.19)$$

Sisteme uygulanan tek darbeleri sistem cevabını  $n$  tane darbeleri sistem cevabına bölünce ortaya çıkan,  $\zeta$  ve  $\omega_n$ 'e bağlı, boyutsuz eşitliğe artık titreşim denir.  $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$  eşitliği ile düzenlenen artık titreşim denklemi Eş. 2.20'de  $V$  ile sunulmaktadır (Singer ve Seering, 1990; Pao ve Lau, 2000).

$$V(\omega, \zeta) = e^{-\zeta \omega_n t_n} \left[ \left( \sum_{i=0}^n A_i e^{-\zeta \omega_n t_i} \cos(\omega_d t_i) \right)^2 \left( \sum_{i=0}^n A_i e^{-\zeta \omega_n t_i} \sin(\omega_d t_i) \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.20)$$

Girdi şekillendirici tasarlanırken göz önüne alınması gereken çeşitli kriterler vardır. Denetleyici tasarlanırken dikkate alınan ve kontrolcü performansı hakkında bilgiler veren kriterler kısıtlamalar olarak tasarım sırasında dikkate alınır. Bunlar:

- Girdi sonunda oluşacak titreşim için artık titreşim kısıtlaması,
- Cevabı minimum sürede almak için minimum zaman kısıtlaması,
- Girdilerin genlikleri için birim genlik kısıtlaması ve

- Parametre değişikliğine karşı sistem cevabındaki duyarsızlığın ifadesi olan gürbüzlük kısıtlamasıdır.

Bu kısıtlamalar tasarlanan sistem için; sistemden istenen gürbüzlük, sistemin seyahat süresi, sistem cevabında tolere edilebilir titreşim değeri vb. gibi parametrelere göre belirlenerek denetleyici tasarlanır.

## 2.4. Pozitif Girdi Şekillendiriciler

### 2.4.1. Sıfır Titreşim (ST) girdi şekillendirici

Literatürdeki en temel girdi şekillendirici Sıfır Titreşim (ST) girdi şekillendiricidir. Şekillendirici için kısıtlamalar, modelleme frekansında sıfır titreşim ve minimum süredir. ST girdi şekillendirici tasarımı için; titreşim denklemleri sıfıra eşitlenir ve şekillendirici tasarımının çözümünde kullanılır.

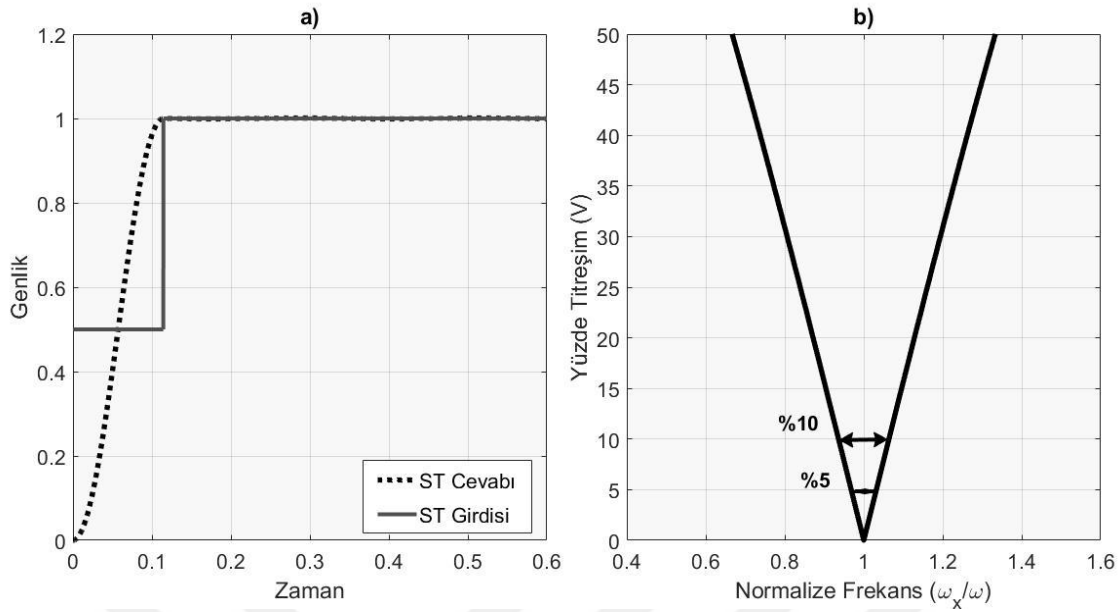
Ortaya çıkan şekillendirici Sıfır Titreşim (ST) girdi şekillendirici olarak adlandırılır. ST girdi şekillendiricinin seyahat süresi ve genlikleri Eş. 2.21 ve 2.22 ile sunulmaktadır (Singer ve Seering, 1990; Vaughan ve diğerleri, 2008).

$$ZV = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+K} & \frac{K}{1+K} \\ 0 & 0.5T_d \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$K = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \text{ ve } T_d = 2\pi / \omega\sqrt{(1-\zeta^2)} \quad (2.22)$$

İkinci mertebeden bir sistem için birim basamak girdisinin şekillendirilmiş girdi profili, birim basamak cevabı ve hassasiyet eğrisi Şekil 2.18'de sunulmaktadır.





Şekil 2.18. Sıfır Titreşim (ST) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

Şekil 2.18 a'da şekillendirilmiş komut profili ve sistem cevabı görülmektedir. ST girdi şekillendirici için seyahat süresi sistem periyodunun yarısı kadardır. Şekillendirici seyahat süresi oldukça kısa iken şekillendirici modelleme frekansındaki hatalara karşı oldukça duyarlıdır. Şekil 2.18 b'de ST girdi şekillendirici hassasiyet eğrisi ile %5 ve %10 artış titreşim değerleri için sistem gürbüzlüğü sunulmaktadır. Hassasiyet eğrisinden de anlaşıldığı üzere modelleme frekansındaki hatalı tahminlere karşı sistem cevabındaki artış titreşim oldukça yüksektir.

#### 2.4.2. Türevsel Sıfır Titreşim (TST) girdi şekillendirici

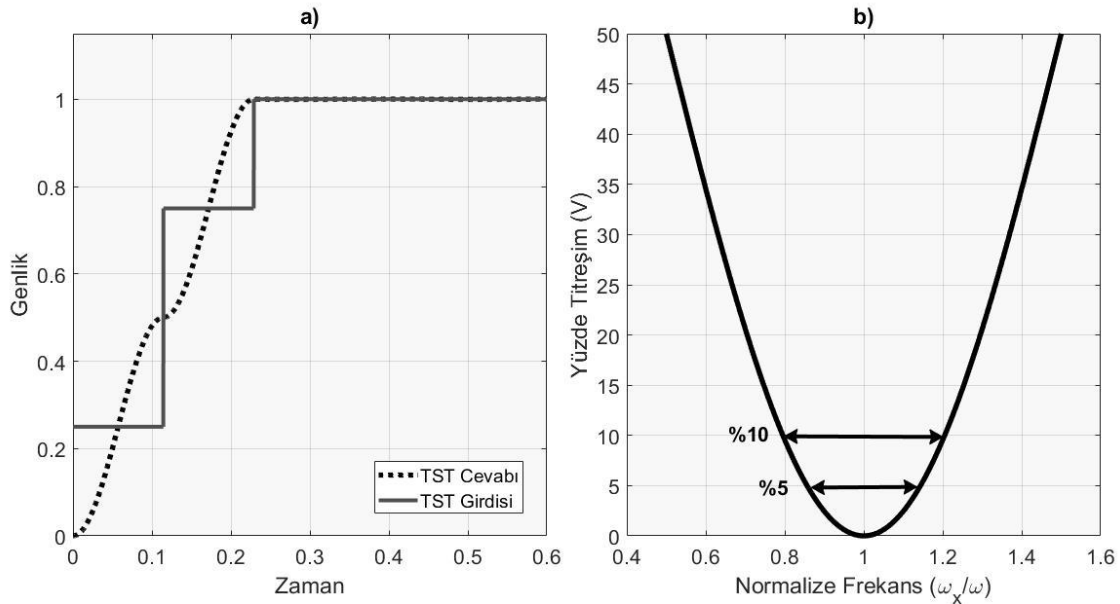
ST girdi şekillendiricinin modelleme hatalarındaki duyarsızlığının yani gürbüzlüğünün artırılması için tasarlanan girdi şekillendiricinin en erken şekli, artış titreşim denklemlerinin sistem frekansına göre türevi sifira eşitlenip titreşim denklemlerine dahil edilerek yapılan çözümlerle elde edilmiştir.

$$\frac{d}{d\omega}[V(\omega, \zeta)] = 0 \quad (2.23)$$

Ortaya çıkan şekillendirici Türevsel Sıfır Titreşim (TST) girdi şekillendirici olarak adlandırılmaktadır. TST girdi şekillendiricinin seyahat süresi ve genlikleri Eş. 2.24 ile sunulmaktadır (Singer ve Seering, 1990; Vaughan ve diğerleri, 2008).

$$ZVD = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+2K+K^2} & \frac{2K}{1+2K+K^2} & \frac{K^2}{1+2K+K^2} \\ 0 & 0.5T_d & T_d \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

İkinci mertebeden bir sistem için birim basamak girdisinin şekillendirilmiş girdi profili, birim basamak cevabı ve hassasiyet eğrisi Şekil 2.19'da sunulmaktadır.



Şekil 2.19. Türevsel Sıfır Titreşim (TST) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

Şekil 2.19 a'da şekillendirilmiş komut profili ve sistem cevabı görülmektedir. TST girdi şekillendirici için seyahat süresi bir sistem periyodu kadardır. Şekillendirici seyahat süresi ST girdi şekillendiriciye göre daha uzun iken şekillendiricinin modelleme frekansındaki hatalara karşı duyarsızlığı artmıştır. Şekil 2.19 b'de TST girdi şekillendirici hassasiyet eğrisi ile %5 ve %10 artık titreşim değerleri için sistem gürbüzlüğü sunulmaktadır. Hassasiyet eğrisinden de anlaşıldığı üzere modelleme frekansındaki hatalı tahminlere karşı sistem cevabında meydana gelen artık titreşim ST girdi şekillendirici ile kıyaslandığında oldukça azalmıştır.

ST girdi şekillendirici, sistem parametreleri doğru bir şekilde bilindiğinde en hızlı ve salınımsız cevabın alındığı girdi şekillendiricidir. Fakat gerçek sistem uygulamalarında sistem parametreleri çoğu zaman kesin olarak belirlenemez. ST girdi şekillendirici bu değişim için oldukça duyarlıyken TST girdi şekillendirici sistem periyodunun yarısı kadar bir zaman gecikmesiyle daha gürbüz bir cevaba sahiptir.

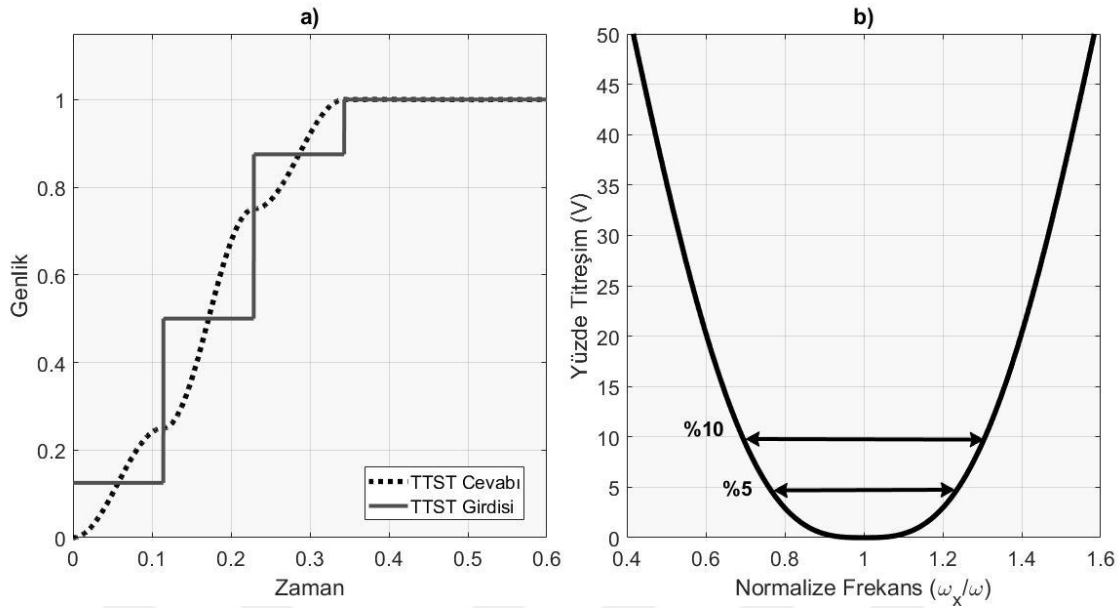
#### 2.4.3. Türevsel Türevsel Sıfır Titreşim (TTST) girdi şekillendirici

TST girdi şekillendiricinin tasarımından yola çıkarak; artık titreşim denklemlerinin sistem frekansına göre ikinci kez türevinin alınmasıyla TST girdi şekillendiriciden daha fazla duyarsızlığa sahip dört basamak girdisine sahip bir girdi şekillendirici elde edilebilmektedir. Bu şekillendirici Türevsel Türevsel Sıfır Titreşim (TTST) girdi şekillendirici olarak adlandırılır. TTST girdi şekillendiricinin seyahat süresi ve genlikleri Eş. 2.25 ve 2.26 ile sunulmaktadır (Vaughan ve diğerleri, 2008).

$$ZVDD = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{B} & \frac{3K}{B} & \frac{3K^2}{B} & \frac{K^3}{B} \\ 0 & 0.5T_d & T_d & 1.5T_d \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$B = 1 + 3K + 3K^2 + K^3 \quad (2.26)$$

İkinci mertebeden bir sistem için birim basamak girdisinin şekillendirilmiş girdi profili, birim basamak cevabı ve hassasiyet eğrisi Şekil 2.20'de sunulmaktadır.



Şekil 2.20. Türevsel Türevsel Sıfır Titreşim (TTST) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

Şekil 2.20 a'da şekillendirilmiş komut profili ve sistem cevabı görülmektedir. TTST girdi şekillendirici için seyahat süresi, sistem periyodunun bir buçuk katı kadardır. Şekillendirici seyahat süresi TST girdi şekillendiriciye göre uzun iken şekillendiricinin modelleme frekansındaki hatalara karşı duyarsızlığı artmıştır. Şekil 2.20 b'de TTST girdi şekillendirici hassasiyet eğrisi ile %5 ve %10 artık titreşim değerleri için sistem gürbüzlüğü sunulmaktadır. Hassasiyet eğrisinden de anlaşıldığı üzere modelleme frekansındaki hatalı tahminlere karşı sistem cevabındaki artık titreşim TST girdi şekillendirici ile kıyaslandığında oldukça azalmıştır.

TTST girdi şekillendirici TST girdi şekillendiriciden daha duyarsızdır ve sistem periyodunun yarısı kadar bir miktar zaman gecikmesiyle gürbüzlüğün daha önemli olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir.

#### 2.4.4. Türevsel Türevsel Türevsel Sıfır Titreşim (TTTST) girdi şekillendirici

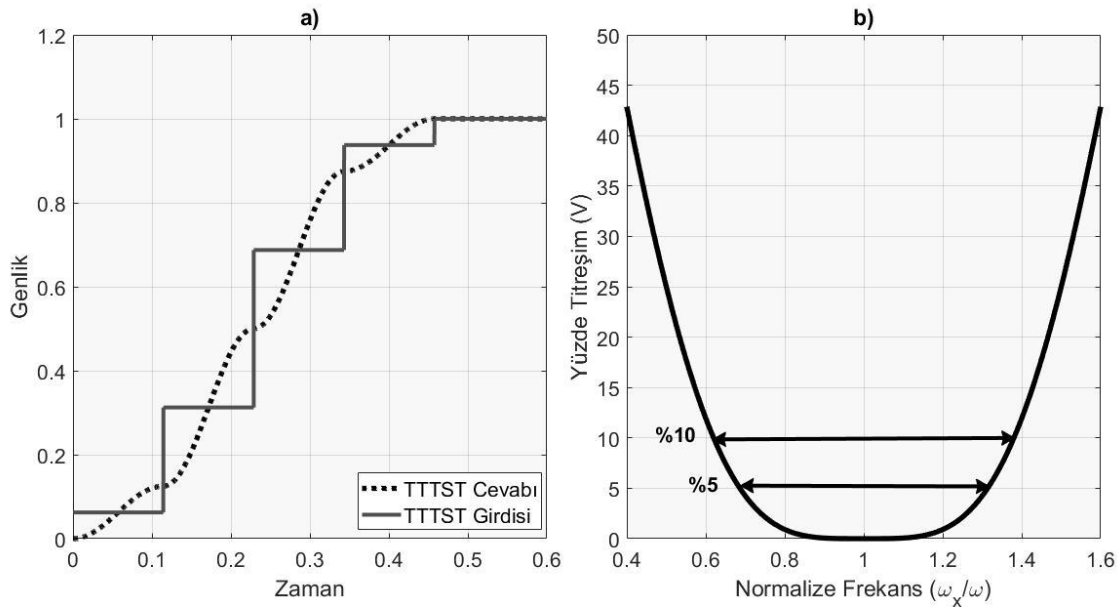
Türevsel girdi şekillendiricilerin tasarımından yola çıkarak artık titreşim denklemlerinin sistem frekansına göre her bir türevinin alınmasıyla sisteme uygulanan darbe sayısına yeni bir darbe eklenirken seyahat süresi sistem periyodunun yarısı kadar artmaktadır. Algoritma, titreşim denklemlerinin sistem frekansına göre tekrarlayan türev alma işlemleri ile uzatılabilir. Artık titreşim denklemlerinin sistem frekansına göre üçüncü kez türevinin alınmasıyla elde edilen girdi şekillendirici Türevsel Türevsel Türevsel Sıfır Titreşim

(TTTST) girdi şekillendirici olarak adlandırılır. TTTST girdi şekillendiricinin seyahat süresi ve genlikleri Eş. 2.27 ve 2.28 ile sunulmaktadır (Vaughan ve diğerleri, 2008).

$$ZVDDD = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 4K & 6K^2 & 4K^3 & K^4 \\ C & C & C & C & C \\ 0 & 0.5T_d & T_d & 1.5T_d & 2T_d \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$C = 1 + 4K + 6K^2 + 4K^3 + K^4 \quad (2.28)$$

İkinci mertebeden bir sistem için birim basamak girdisinin şekillendirilmiş girdi profili, birim basamak cevabı ve hassasiyet eğrisi Şekil 2.21'de sunulmaktadır.



Şekil 2.21. Türevsel Türevsel Türevsel Sıfır Titreşim (TTTST) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

Şekil 2.21 a'da şekillendirilmiş komut profili ve sistem cevabı görülmektedir. TTTST girdi şekillendirici için seyahat süresi sistem periyodunun iki katı kadardır. Şekillendirici seyahat süresi TTST girdi şekillendiriciye göre daha uzun iken şekillendiricinin modelleme frekansındaki hatalara karşı duyarsızlığı artmıştır. Şekil 2.21 b'de TTTST girdi şekillendirici hassasiyet eğrisi ile %5 ve %10 artık titreşim değerleri için sistem gürbüzlüğü sunulmaktadır. Modelleme frekansındaki hatalı tahminlere karşı sistem cevabındaki artık titreşim TTST girdi şekillendirici ile kıyaslandığında azalmıştır.

### 2.4.5. Ekstra Duyarsız (ED) girdi şekillendirici

Sıfır titreşim girdi şekillendiricilerde olduğu gibi artık titreşim genliğini mutlak sıfıra düşürmek çok zordur. Aslında, gerçek uygulamalarda böyle katı bir gereksinim nadiren uygulanmaktadır. Artık titreşim genliği belli bir tolerans değere ayarlanırsa, sistemin gürbüzlüğü önemli ölçüde arttırılabilir. Bu fikre dayanarak, Singhose ve diğerleri, (1994), Ekstra Duyarsız (ED) girdi şekillendirme yaklaşımını önermişlerdir. ED girdi şekillendiricinin seyahat süresi ve genlikleri Eş. 2.29 ile sunulmaktadır (Singhose ve diğerleri, 1994).

$$ED = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1+V_{tol}}{4} & \frac{1-V_{tol}}{4} & \frac{1+V_{tol}}{4} \\ 0 & 0.5T_d & T_d \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Burada  $V_{tol}$  tolere edilebilen titreşim seviyesidir. İkinci mertebeden bir sistem için ED girdi şekillendirici Vaughan ve diğerleri (2008) ile Singhose ve diğerleri (1994) tarafından Eş. 2.30, 2.31, 2.32 ve 2.33 ile sunulmaktadır.

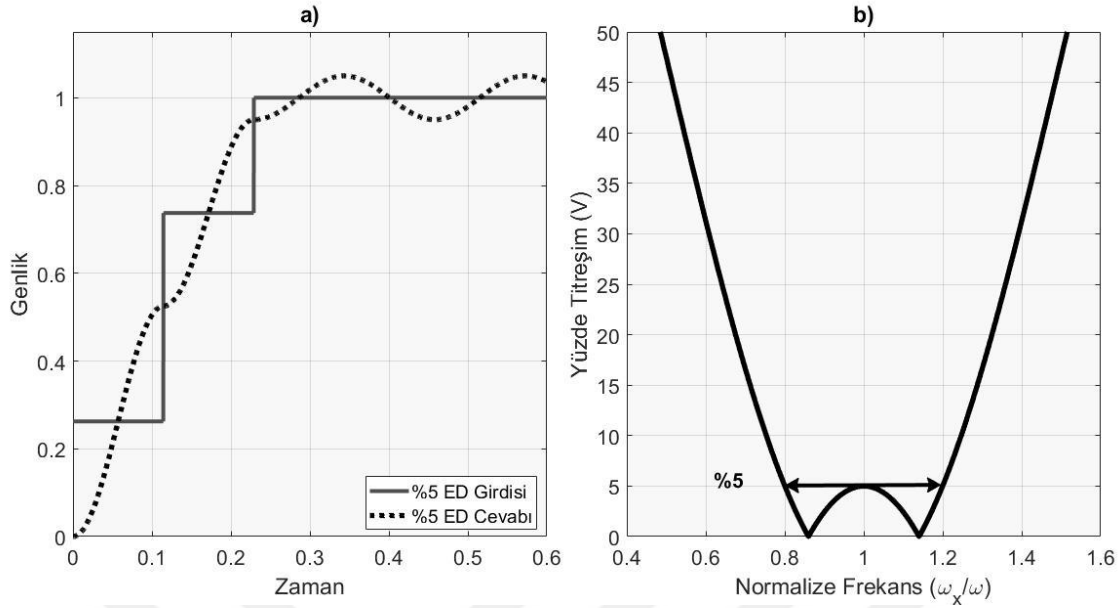
$$ED = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 1-(A_1+A_3) & A_3 \\ 0 & t_2 & T_d \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$A_1 = 0.24968 + 0.24961V_{tol} + 0.80008\zeta + 1.23328V_{tol}\zeta + 0.49599\zeta^2 + 3.17316V_{tol}\zeta^2 \quad (2.31)$$

$$A_3 = 0.25149 + 0.21474V_{tol} - 0.83249\zeta + 1.41498V_{tol}\zeta + 0.85181\zeta^2 - 4.90094V_{tol}\zeta^2 \quad (2.32)$$

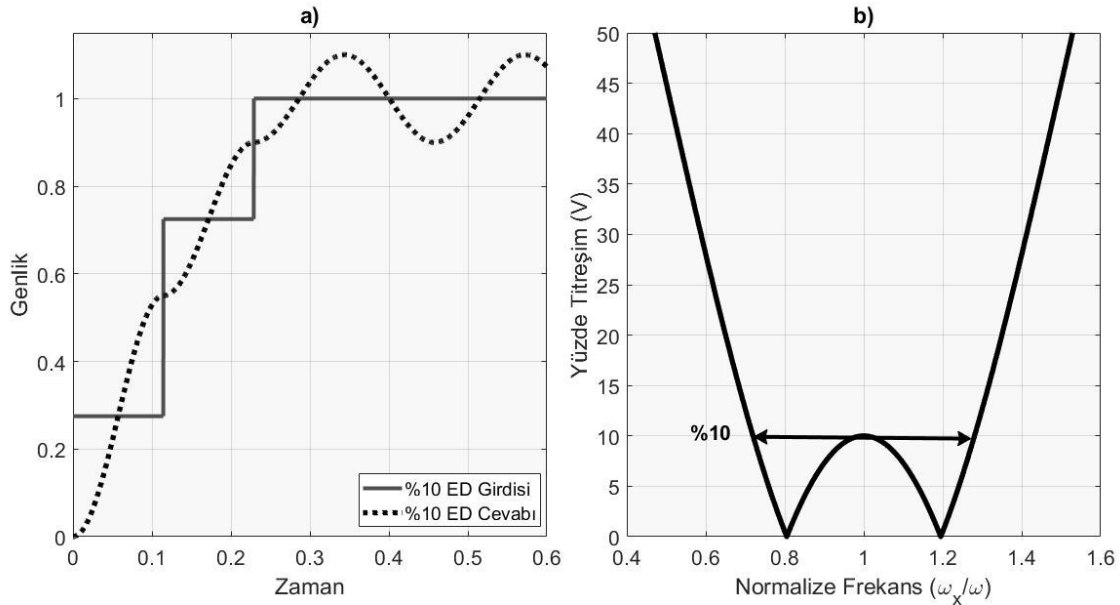
$$t_2 = \frac{\omega\sqrt{1-\zeta^2}}{2\pi} \left( \begin{array}{l} 0.4999 + 0.46159V_{tol}\zeta + 4.26169V_{tol}\zeta^2 + 1.75601V_{tol}\zeta^3 \\ + 8.57843V_{tol}^2\zeta - 108.644V_{tol}^2\zeta^2 + 336.989V_{tol}^2\zeta^3 \end{array} \right) \quad (2.33)$$

İkinci mertebeden bir sistem için birim basamak girdisinin şekillendirilmiş girdi profili, birim basamak cevabı ve hassasiyet eğrisi Şekil 2.22’de sunulmaktadır. Burada tolere edilebilir titreşim değeri %5’e ayarlanarak girdi şekillendirici tasarlanmıştır.



Şekil 2.22. %5 Tolerantlı Ekstra Duyarsız (ED) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

Şekil 2.23'de tolere edilebilir titreşim değeri %10 için sisteme uygulanan birim basamak girdisinin şekillendirilmiş girdi profili, birim basamak cevabı ve hassasiyet eğrisi sunulmaktadır.



Şekil 2.23. %10 Tolerantlı Ekstra Duyarsız (ED) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

Şekil 2.22 a'da %5 artık titreşim toleranslı, Şekil 2.23 a'da %10 artık titreşim toleranslı ED girdi şekillendirici için şekillendirilmiş komut profili ve sistem cevabı görülmektedir. Artık titreşimin tolere edilebilir bir değere ayarlanması modelleme frekans değerinin sağında ve

solunda birbirine eşit uzaklıkta iki farklı frekans değeri için sistemin salınımsız cevap üretmesini sağlamaktadır. Böylece TST girdi şekillendirici seyahat süresi ile aynı seyahat süresine sahip fakat modelleme frekansındaki hatalı tahminlere oldukça duyarsız bir girdi şekillendirici tasarlanmış olur. ED girdi şekillendirici için seyahat süresi bir sistem periyodu kadardır. Sırası ile Şekil 2.22 b’de ve 2.23 b’de ED girdi şekillendirici hassasiyet eğrileri ile %5 ve %10 artık titreşim değerleri için sistem gürbüzlüğü sunulmaktadır. Hassasiyet eğrisinden de anlaşıldığı üzere modelleme frekansındaki hatalı tahminlere karşı sistem cevabındaki gürbüzlük aynı seyahat süresine sahip olmasına rağmen TST girdi şekillendirici ile kıyaslandığında oldukça artmıştır.

#### 2.4.6. İki Tepecikli Ekstra Duyarsız (2T-ED) girdi şekillendirici

ED girdi şekillendirici duyarsızlığını artırmak amacıyla Singhose ve diğerleri (1994), İki Tepecikli Ekstra Duyarsız (2T-ED) girdi şekillendirme yaklaşımını önermişlerdir. 2T-ED girdi şekillendiricinin seyahat süresi ve genlikleri Eş. 2.34 ve 2.35 ile sunulmaktadır (Singhose ve diğerleri, 1995).

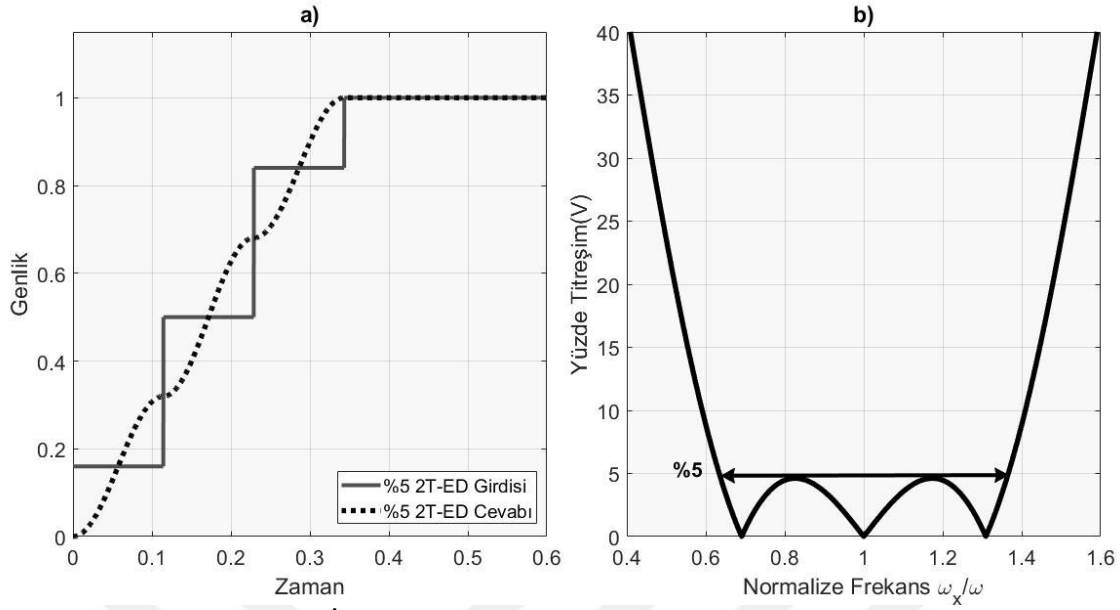
$$2T - ED = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{12H} & \frac{1}{2} - A_1 & A_2 & A_1 \\ 0 & 0.5T_d & T_d & 1.5T_d \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$A_1 \equiv A_{12H} = \frac{3X^2 + 2X + 3V_{tol}^2}{16X} \quad (2.35)$$

$$X = \sqrt[3]{V_{tol}^2 \left( \sqrt{1 - V_{tol}^2} \right) + 1}$$

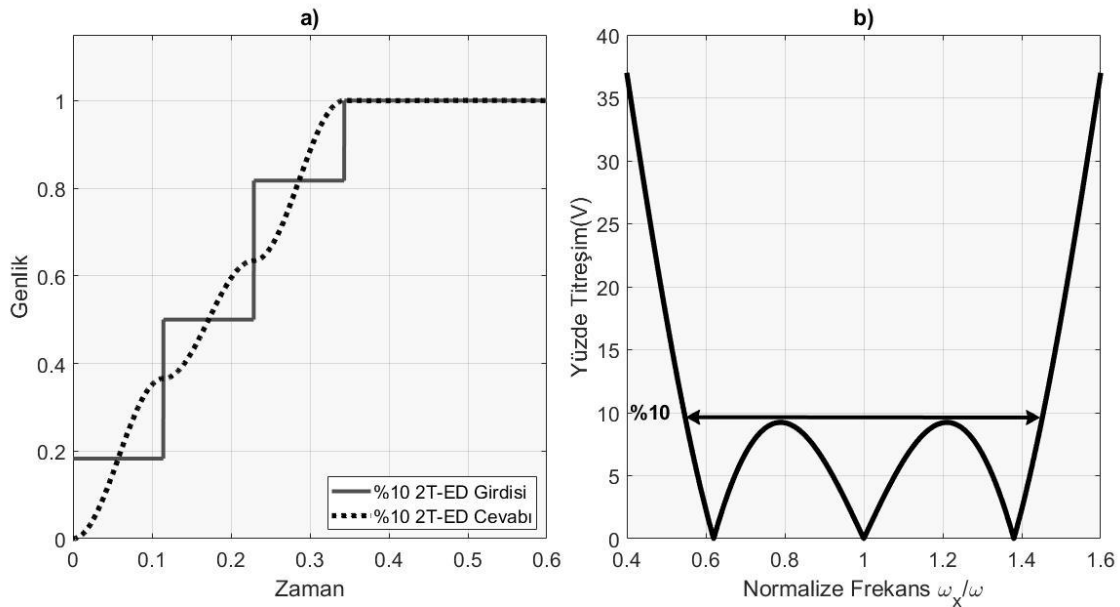
İkinci mertebeden bir sistem için birim basamak girdisinin şekillendirilmiş girdi profili, birim basamak cevabı ve hassasiyet eğrisi Şekil 2.24’de sunulmaktadır. Burada tolere edilebilir titreşim değeri %5’e ayarlanarak girdi şekillendirici tasarlanmıştır.





Şekil 2.24. %5 Toleranslı İki Tepecikli Ekstra Duyarsız (2T-ED) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

Şekil 2.25’de tolere edilebilir titreşim değeri %10 için sisteme uygulanan birim basamak girdisinin şekillendirilmiş girdi profili, birim basamak cevabı ve hassasiyet eğrisi sunulmaktadır.



Şekil 2.25. %10 Toleranslı İki Tepecikli Ekstra Duyarsız (2T-ED) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

Şekil 2.24 a’da %5 artık titreşim toleranslı, Şekil 2.25 a’da %10 artık titreşim toleranslı 2T-ED girdi şekillendirici için şekillendirilmiş komut profili ve sistem cevabı sunulmaktadır. 2T-ED girdi şekillendirici tasarım frekans değerinde, bu frekans değerinin

sağında ve solunda birbirine eşit uzaklıkta iki farklı frekans değeri için sistemin salınımsız cevap üretmesini sağlamaktadır. Böylece TTST girdi şekillendirici seyahat süresi ile aynı seyahat süresine sahip fakat modelleme frekansındaki hatalı tahminlere oldukça duyarsız bir girdi şekillendirici tasarlanmış olur. 2T-ED girdi şekillendirici için seyahat süresi sistem periyodunun bir buçuk katı kadardır. Sırası ile Şekil 2.24 b’de ve 2.25 b’de 2T-ED girdi şekillendirici hassasiyet eğrileri ile %5 ve %10 artık titreşim değerleri için sistem gürbüzlüğü sunulmaktadır. Hassasiyet eğrisinden de anlaşıldığı üzere modelleme frekansındaki hatalı tahminlere karşı sistem cevabındaki gürbüzlük TTST girdi şekillendirici ile kıyaslandığında artmıştır.

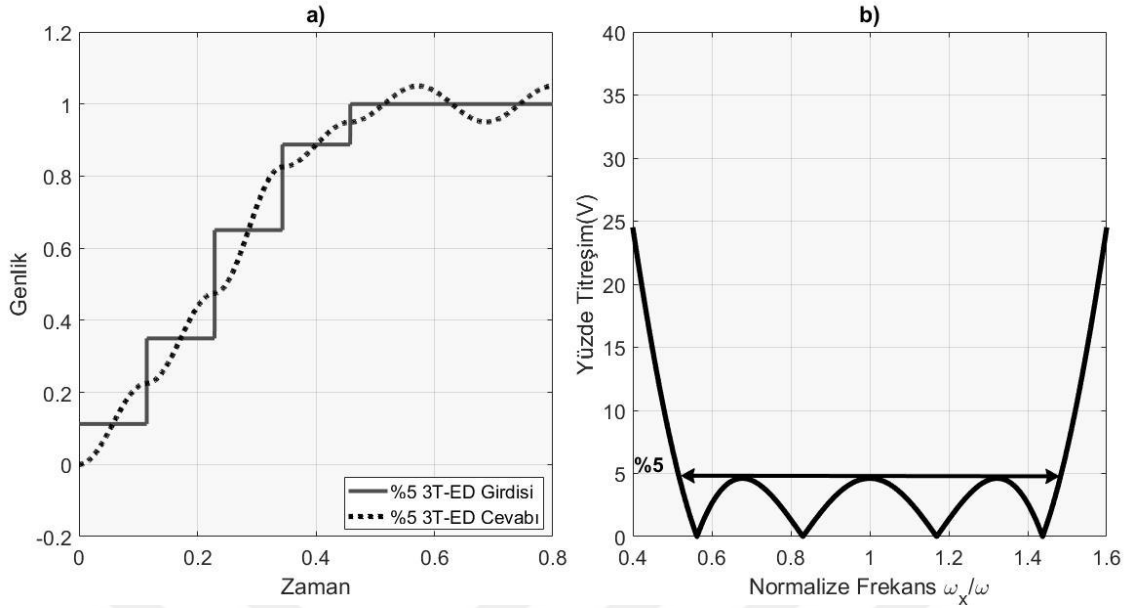
#### 2.4.7. Üç Tepecikli Ekstra Duyarsız (3T-ED) girdi şekillendirici

2T-ED girdi şekillendirici duyarsızlığını artırmak amacıyla Singhose ve diğerleri (1995), Üç Tepecikli Ekstra Duyarsız (3T-ED) girdi şekillendirme yaklaşımını önermişlerdir. 3T-ED girdi şekillendiricinin seyahat süresi ve genlikleri Eş. 2.36 ve 2.37 ile sunulmaktadır.

$$3T - ED = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{13H} & \frac{1-V_{tol}}{4} & 1-2(A_1 + A_2) & A_2 & A_1 \\ 0 & 0.5T_d & T_d & 1.5T_d & 2T_d \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

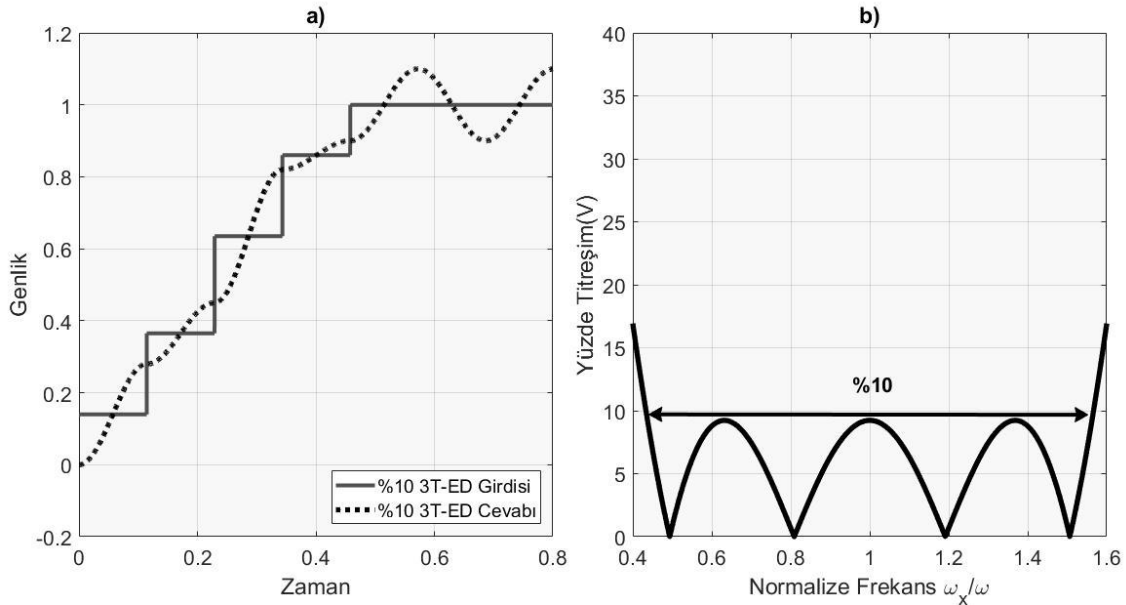
$$A_1 \equiv A_{13H} = \frac{1 + 3V_{tol} + 2\sqrt{2V_{tol}(V_{tol} + 1)}}{16} \quad (2.37)$$

İkinci mertebeden bir sistem için birim basamak girdisinin şekillendirilmiş girdi profili, birim basamak cevabı ve hassasiyet eğrisi Şekil 2.26’da sunulmaktadır. Burada tolere edilebilir titreşim değeri %5’e ayarlanarak girdi şekillendirici tasarlanmıştır.



Şekil 2.26. %5 Toleranslı Üç Tepecikli Ekstra Duyarsız (3T-ED) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

Şekil 2.27’de tolere edilebilir titreşim değeri %10 için sisteme uygulanan birim basamak girdisinin şekillendirilmiş girdi profili, birim basamak cevabı ve hassasiyet eğrisi sunulmaktadır.



Şekil 2.27. %10 Toleranslı Üç Tepecikli Ekstra Duyarsız (3T-ED) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

Şekil 2.26 a’da %5 artık titreşim toleranslı, Şekil 2.27 a’da %10 artık titreşim toleranslı 3T-ED girdi şekillendirici için şekillendirilmiş komut profili ve sistem cevabı sunulmaktadır. 3T-ED girdi şekillendirici için sistem cevabında; tasarım frekansında tolere

edilebilir bir artık titreşim oluşurken, bu frekans değerinin sağında ve solunda birbirine eşit uzaklıkta ikişer farklı frekans değeri için sistemin salınımsız cevap üretmesi sağlanmaktadır. Böylece TTTST girdi şekillendirici seyahat süresi ile aynı seyahat süresine sahip fakat modelleme frekansındaki hatalı tahminlere oldukça duyarsız bir girdi şekillendirici tasarlanmış olur. 3T-ED girdi şekillendirici için seyahat süresi sistem periyodunun iki katı kadardır. Sırası ile Şekil 2.26 b'de ve 2.27 b'de 3T-ED girdi şekillendirici hassasiyet eğrileri ile %5 ve %10 artık titreşim değerleri için sistem gürbüzlüğü sunulmaktadır. Hassasiyet eğrisinden de anlaşıldığı üzere modelleme frekansındaki hatalı tahminlere karşı sistem cevabındaki gürbüzlük TTTST girdi şekillendirici ile kıyaslandığında artmıştır.

#### 2.4.8. Modifiye Edilmiş Sıfır Titreşim girdi şekillendiriciler

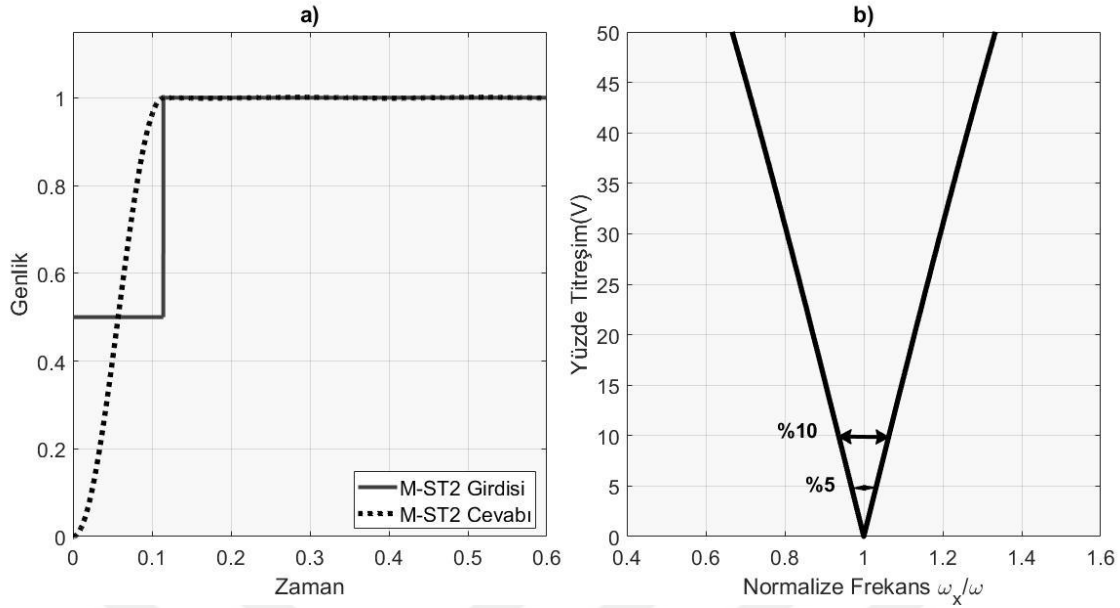
Bir diğer önemli girdi şekillendirici tekniği ST girdi şekillendiricinin modifiye edilmiş şeklidir. Shan ve diğerleri (2005) tarafından önerilen bu teknik ST girdi şekillendiricinin darbe genliklerinin ve darbe sürelerinin Eş. 2.38 ile gösterilen ve  $K$  ile  $M$  arasındaki ilişkinin modifiye edilmesi ile elde edilmiştir.

$$M = K_m + \dots + K_m^{i-1} + K_m^{N-1}, \quad K_m = e^{-2\zeta\pi/N\sqrt{1-\zeta^2}} \quad \text{ve} \quad T_d = 2\pi/\omega\sqrt{1-\zeta^2} \quad (2.38)$$

$N$  darbeleri Modifiye edilmiş girdi şekillendiriciler Eş. 2.39 ile ifade edilmektedir (Shan ve diğerleri, 2005; Vaughan ve diğerleri, 2008).

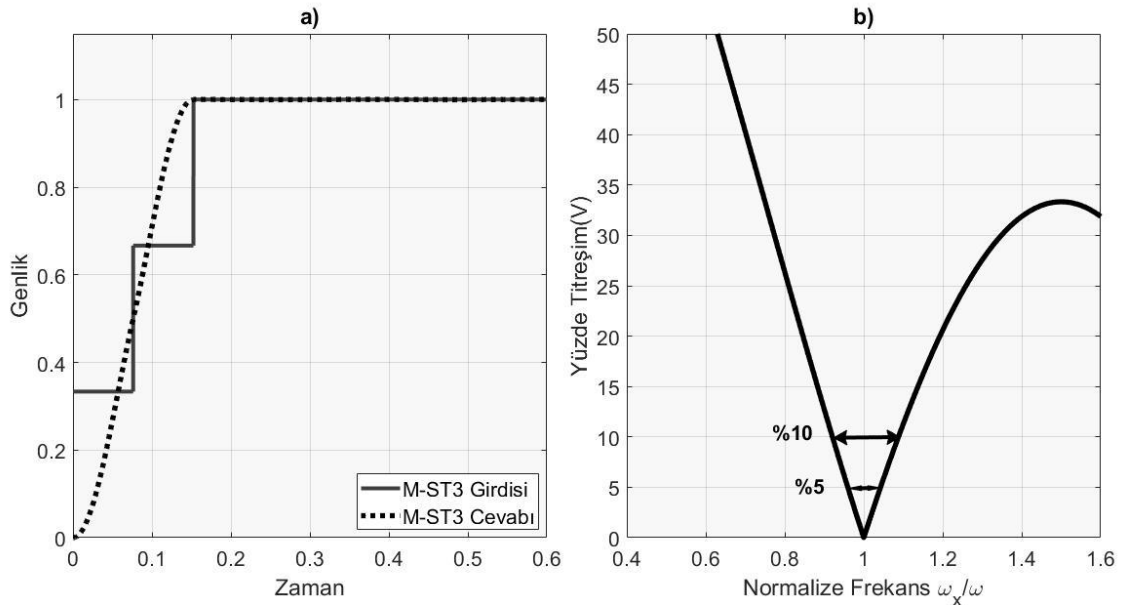
$$N - \text{darbeleri } M - ST = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+M} & \frac{K_m}{1+M} & \dots & \frac{K_m^{i-1}}{1+M} & \frac{K_m^{N-1}}{1+M} \\ 0 & \frac{T_d}{N} & \dots & \frac{(i-1)T_d}{N} & \frac{(N-1)T_d}{N} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

İkinci mertebeden bir sistem için sırasıyla 2 Darbeleri Modifiye Edilmiş Sıfır Titreşim (M-ST2) girdi şekillendirici, 3 Darbeleri Modifiye Edilmiş Sıfır Titreşim (M-ST3) girdi şekillendirici, 4 Darbeleri Modifiye Edilmiş Sıfır Titreşim (M-ST4) girdi şekillendirici ve 5 Darbeleri Modifiye Edilmiş Sıfır Titreşim (M-ST5) girdi şekillendirici birim basamak girdisinin şekillendirilmiş girdi profili, birim basamak cevabı ve hassasiyet eğrileri Şekil 2.28, 2.29, 2.30 ve 2.31'de sunulmaktadır.



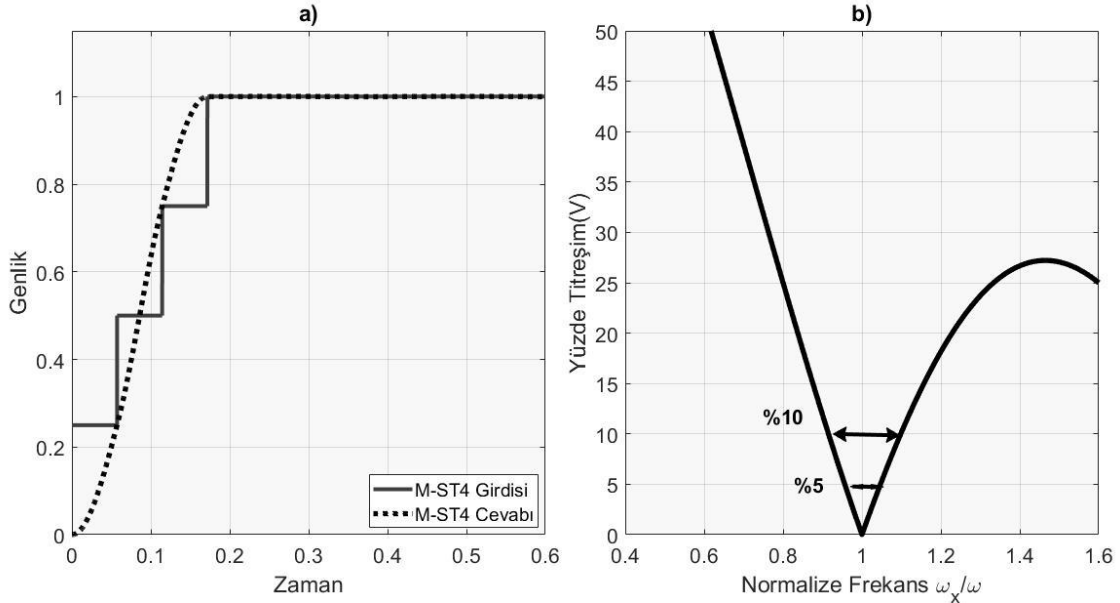
Şekil 2.28. Modifiye edilmiş 2 darbeleri Sıfır Titreşim (M-ST2) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

Şekil 2.28 a'da şekillendirilmiş komut profili ve sistem cevabı sunulmaktadır. M-ST2 girdi şekillendirici ST girdi şekillendiricinin aynısıdır ve seyahat süresi sistem periyodunun yarısı kadardır. Şekil 2.28 b'de M-ST2 girdi şekillendirici hassasiyet eğrisi ile %5 ve %10 artık titreşim değerleri için sistem gürbüzlüğü sunulmaktadır.



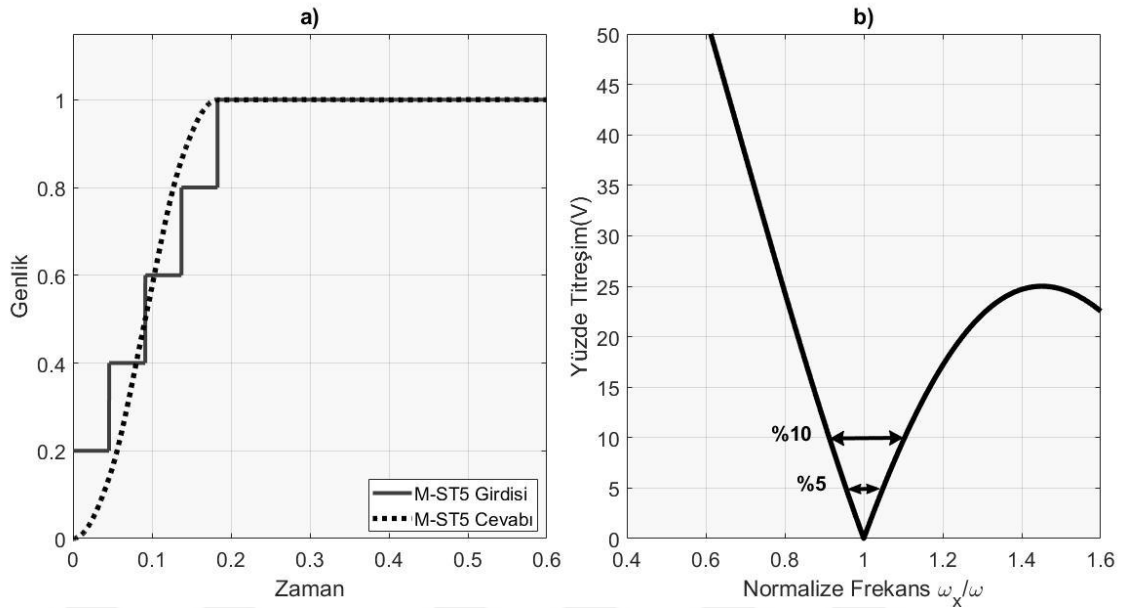
Şekil 2.29. Modifiye edilmiş 3 darbeleri Sıfır Titreşim (M-ST3) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

Şekil 2.29 a’da şekillendirilmiş komut profili ve sistem cevabı sunulmaktadır. M-ST3 girdi şekillendirici seyahat süresi sistem periyodunun 0.665 katı kadardır. Şekil 2.29 b’de M-ST3 girdi şekillendirici hassasiyet eğrisi ile %5 ve %10 artık titreşim değerleri için sistem gürbüzlüğü sunulmaktadır.



Şekil 2.30. Modifiye edilmiş 4 darbeli Sıfır Titreşim (M-ST4) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

Şekil 2.30 a’da şekillendirilmiş komut profili ve sistem cevabı sunulmaktadır. M-ST4 girdi şekillendirici seyahat süresi sistem periyodunun 0.749 katı kadardır. Şekil 2.30 b’de M-ST4 girdi şekillendirici hassasiyet eğrisi ile %5 ve %10 artık titreşim değerleri için sistem gürbüzlüğü sunulmaktadır.



Şekil 2.31. Modifiye edilmiş 5 darbeli Sıfır Titreşim (M-ST5) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

Şekil 2.31 a’da şekillendirilmiş komut profili ve sistem cevabı sunulmaktadır. M-ST5 girdi şekillendirici seyahat süresi sistem periyodunun 0.799 katı kadardır. Şekil 2.31 b’de M-ST5 girdi şekillendirici hassasiyet eğrisi ile %5 ve %10 artık titreşim değerleri için sistem gürbüzlüğü sunulmaktadır.

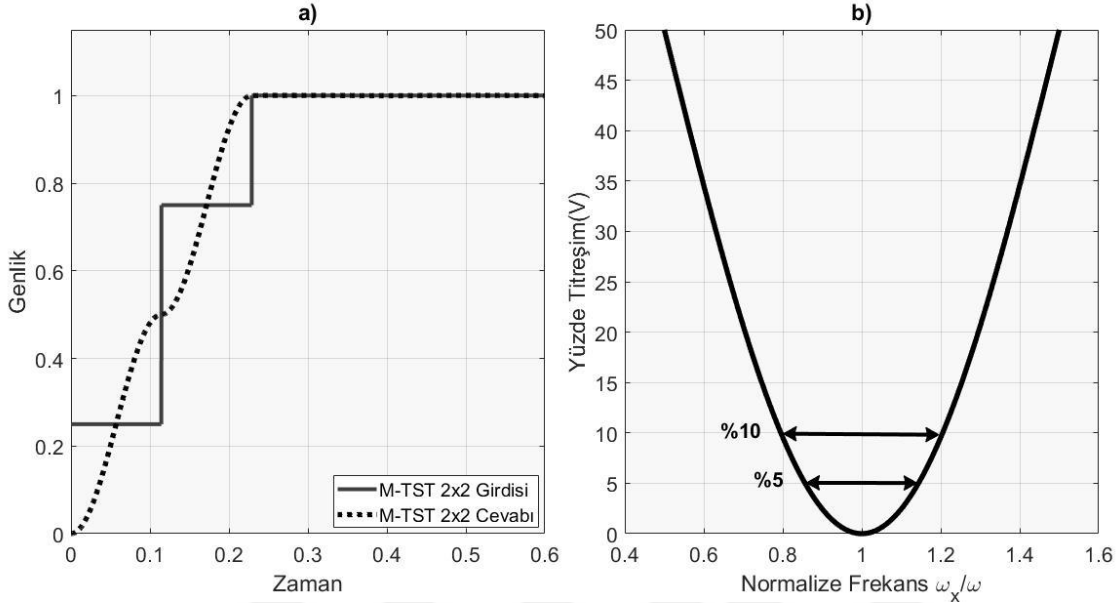
#### 2.4.9. Modifiye Edilmiş Türevsel Sıfır Titreşim girdi şekillendiriciler

Modifiye edilmiş türevsel girdi şekillendiriciler aynı doğal frekans değeri için tasarlanan iki M-ST girdi şekillendiricinin katlanması esasına dayanır. 2x2 Modifiye Edilmiş Türevsel Sıfır Titreşim (M-TST 2x2) girdi şekillendirici için darbe genlikleri ve seyahat süreleri Eş. 2.40 ve 2.41 ile sunulmaktadır (Shan ve diğerleri, 2005).

$$M-TST\ 2x2 = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+2K_m+K_m^2} & \frac{K_m}{1+2K_m+K_m^2} & \frac{K_m^2}{1+2K_m+K_m^2} \\ 0 & \frac{T_d}{2} & T_d \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

$$K_m = e^{-2\zeta\pi/N\sqrt{1-\zeta^2}} \quad \text{ve} \quad T_d = 2\pi/\omega\sqrt{1-\zeta^2} \quad (2.41)$$

İkinci mertebeden bir sistem için M-TST 2x2 girdi şekillendirici birim basamak girdisinin şekillendirilmiş girdi profili, birim basamak cevabı ve hassasiyet eğrisi Şekil 2.32’de sunulmaktadır.



Şekil 2.32. Modifiye edilmiş 2x2 Türevsel Sıfır Titreşim (M-TST 2x2) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

Şekil 2.32 a’da şekillendirilmiş komut profili ve sistem cevabı sunulmaktadır. M-TST 2x2 girdi şekillendirici seyahat süresi bir sistem periyodu kadardır. Şekil 2.32 b’de M-TST 2x2 girdi şekillendirici hassasiyet eğrisi ile %5 ve %10 artık titreşim değerleri için sistem gürbüzlüğü sunulmaktadır.

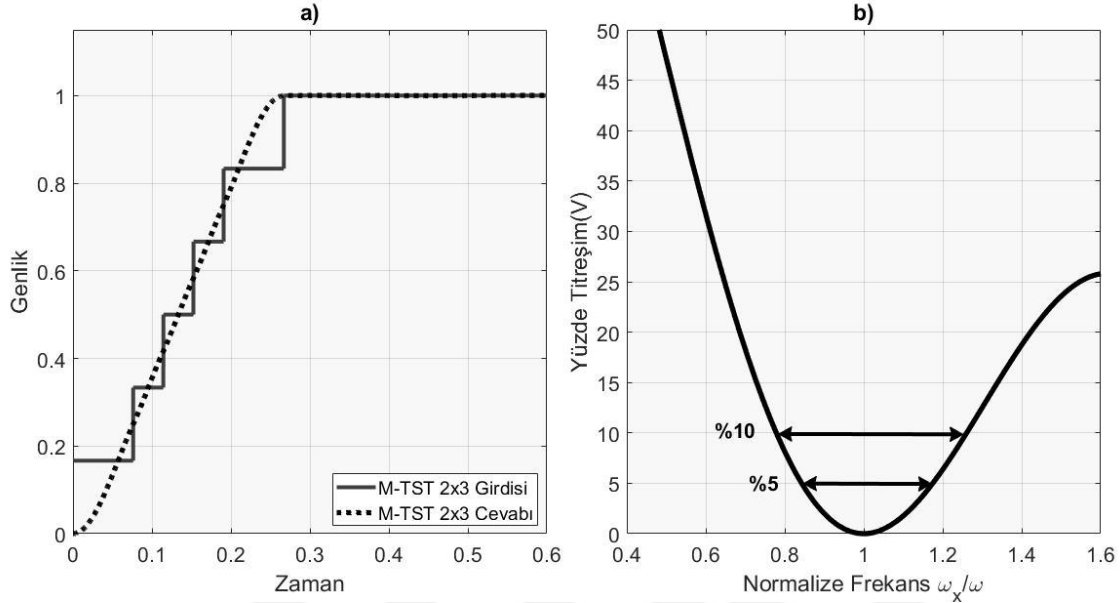
2x3 Modifiye Edilmiş Türevsel Sıfır Titreşim (M-TST 2x3) girdi şekillendirici için darbe genlikleri ve seyahat süreleri Eş. 2.42 ve 2.43 ile sunulmaktadır (Shan ve diğerleri, 2005).

$$M - TST \ 2x3 = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+M} & \frac{K_m^2}{1+M} & \frac{K_m^3}{1+M} & \frac{K_m^4}{1+M} & \frac{K_m^5}{1+M} & \frac{K_m^6}{1+M} \\ 0 & \frac{T_d}{3} & \frac{T_d}{2} & \frac{2T_d}{3} & \frac{5T_d}{6} & \frac{7T_d}{6} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$M = K_m + \dots + K_m^{i-1} + K_m^{N-1}, \quad K_m = e^{-2\zeta\pi/N\sqrt{1-\zeta^2}} \quad \text{and} \quad T_d = 2\pi/\omega\sqrt{1-\zeta^2} \quad (2.43)$$



İkinci mertebeden bir sistem için M-TST 2x3 girdi şekillendirici birim basamak girdisinin şekillendirilmiş girdi profili, birim basamak cevabı ve hassasiyet eğrisi Şekil 2.33'de sunulmaktadır.



Şekil 2.33. Modifiye edilmiş 2x3 Türevsel Sıfır Titreşim (M-TST 2x3) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

Şekil 2.33 a'da şekillendirilmiş komut profili ve sistem cevabı sunulmaktadır. M-TST 2x3 girdi şekillendirici seyahat süresi sistem periyodunun 1.16 katı kadardır. Şekil 2.33 b'de M-TST 2x3 girdi şekillendirici hassasiyet eğrisi ile %5 ve %10 artık titreşim değerleri için sistem gürbüzlüğü sunulmaktadır.

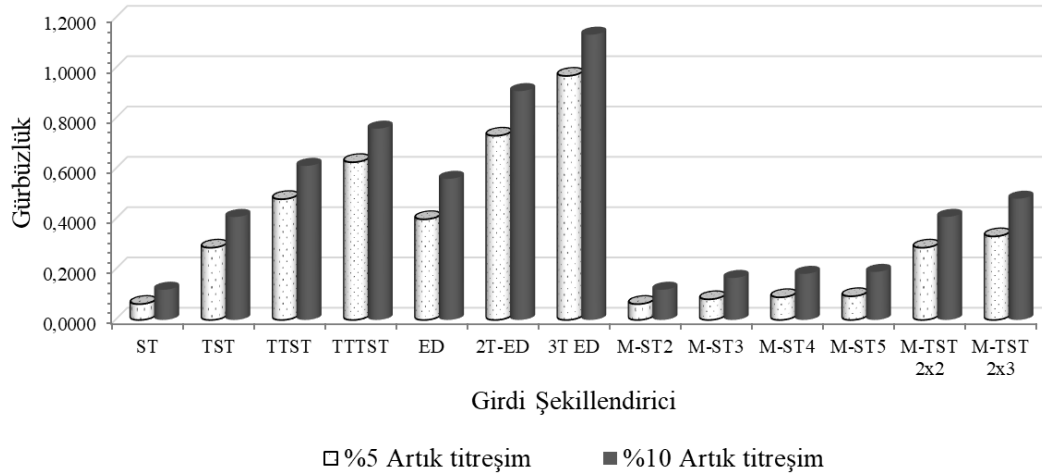
#### 2.4.10. Pozitif girdi şekillendiriciler için genel değerlendirme

İncelenen 13 pozitif girdi şekillendiriciye ait %5 ve %10 artık titreşim değerleri için gürbüzlükler, duyarsızlık oranları ve seyahat süreleri grafikler halinde Şekil 2.34, Şekil 2.35 ve Şekil 2.36'da sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde;

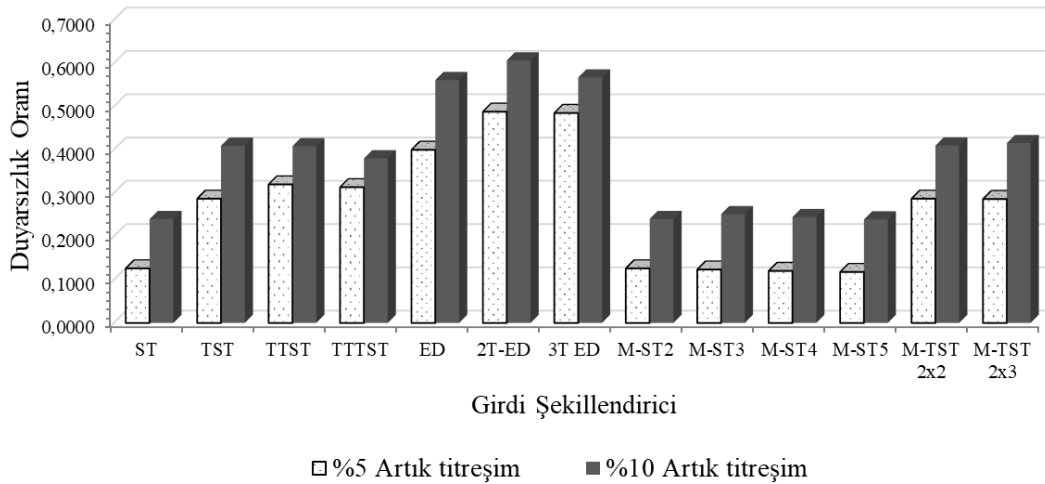
- ST girdi şekillendirici en hızlı girdi şekillendirici metodu olarak görülmektedir. Fakat modelleme frekansındaki hatalı tahminlere karşı sistemde önemli büyüklükte ve istenmeyen artık titreşim oluşmaktadır.
- ST girdi şekillendirici titreşim denklemlerinin sistem doğal frekansına göre türevi sifıra ayarlanarak üç darbeli Türevsel Sıfır Titreşim (TST) şekillendirici elde edilmiştir. TST girdi şekillendirici ST girdi şekillendiriciye kıyasla gürbüzlüğü

önemli ölçüde artırmaktadır, ancak TST girdi şekillendirici bir miktar zaman gecikmesine neden olmuştur. TST şekillendirici hareket süresi tam bir titreşim periyodundayken, Sıfır Titreşim (ST) şekillendirici hareket süresi yarım titreşim periyodudur. Buna karşın TST girdi şekillendirici uygulamada; modelleme frekansındaki hatalı tahminlere karşı oldukça duyarsız bir sistem cevabı sağlamaktadır.

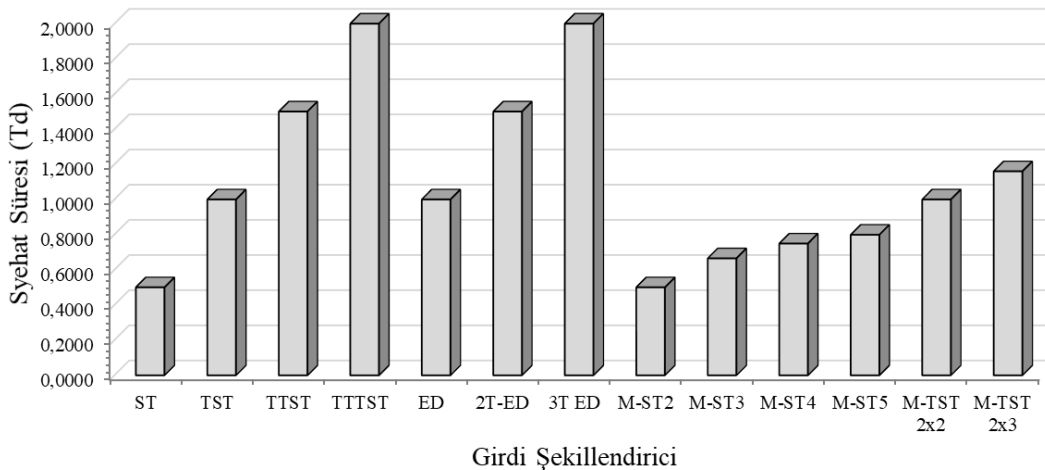
- TTST girdi şekillendirici TST girdi şekillendiriciden daha duyarsızdır ve sistem periyodunun yarısı kadar bir zaman gecikmesiyle gürbüzlüğün daha önemli olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. TST girdi şekillendiriciler için uygulanan algoritmanın tekrar edilmesi ile daha gürbüz girdi şekillendiriciler tasarlanabilmektedir. Bu sayede her seferinde sistem periyodunun yarısı kadar bir zaman gecikmesi ile daha gürbüz girdi şekillendiriciler tasarlanabilmektedir.
- Artık titreşimin tolere edilebilir bir değere ayarlanması esasına dayanarak tasarımı yapılan Ekstra Duyarsız girdi şekillendiricilerden ED girdi şekillendirici TST girdi şekillendirici ile, 2T-ED girdi şekillendirici TTST girdi şekillendirici ile ve 3T-ED girdi şekillendirici TTTST girdi şekillendirici ile eşit seyahat süresine sahip olmasına rağmen ekstra duyarsız girdi şekillendiricilerin oldukça gürbüz olduğu görülmüştür.
- ED girdi şekillendiricinin gürbüzlüğü TST girdi şekillendiricinin gürbüzlüğünün 1,39 katı, 2T-ED girdi şekillendiricinin gürbüzlüğü TTST girdi şekillendiricinin gürbüzlüğünün 1,52 katı ve 3T-ED girdi şekillendirici gürbüzlüğü TTTST girdi şekillendiricinin gürbüzlüğünün 1,54 katı olarak hesaplanmıştır.
- Modifiye edilmiş girdi şekillendiriciler incelendiğinde ilave her bir darbenin şekillendiricinin duyarsızlık oranını bir miktar iyileştirdiği görülmektedir.
- Modifiye edilmiş türevsel sıfır titreşim girdi şekillendiriciler Türevsel Sıfır Titreşim girdi şekillendiricilerle seyahat süresi ve duyarsızlık oranı ile birlikte değerlendirildiğinde daha iyi bir performansa sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 2.34. %5 ve %10 artık titreşim için pozitif girdi şekillendirici gürbüzlükleri



Şekil 2.35. %5 ve %10 artık titreşim için pozitif girdi şekillendirici duyarsızlık oranları

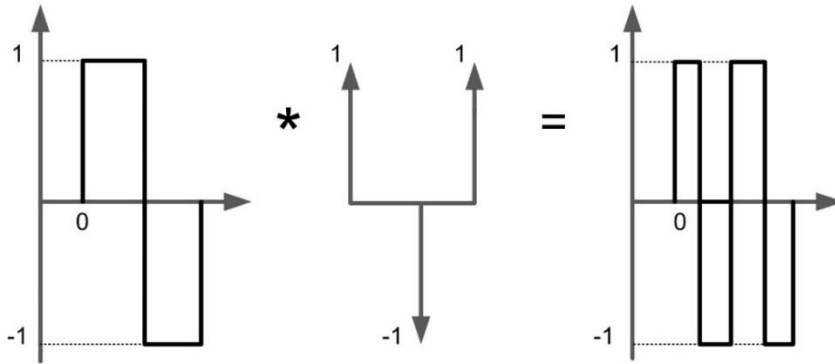


Şekil 2.36. Pozitif girdi şekillendiriciler için seyahat süreleri

Pozitif girdi şekillendiriciler için çok daha kapsamlı değerlendirmeler Vaughan ve diğerleri (2008), Singhose (2009) ile Conker ve diğerleri (2016) tarafından sunulan çalışmalar incelenebilir.

## 2.5. Negatif Girdi Şekillendiriciler

Artık titreşimlerin yok edilmesi veya azaltılması için kullanılan yöntemlerden bir tanesi girdi sinyalinin, önceden bilinen sistem parametreleri kullanılarak düzenlenmesidir. Düzenlenecek girdi profilinin hesaplanmasında negatif darbelere izin verildiğinde seyahat süresi önemli ölçüde azaltılabilir. Şekil 2.37’de negatif girdi şekillendiricinin girdiye uygulanışı sunulmaktadır.



Şekil 2.37. Negatif girdi şekillendiricilerin uygulanışı

Şekilde 2.37’de görüldüğü gibi basamak giriş uygun negatif darbe dizileri şeklinde sisteme uygulanır. Negatif genliklerin kullanılması durumunda Parçalı Toplam (PT) ve Birim Genlik (BG) olmak üzere iki temel kısıtlama geliştirilmiştir. Örnek olarak negatif Sıfır Titreşim (ST) kısıtlamalarını karşılamak için, negatif şekillendiriciler üç darbeye sahip olmalıdır. BG-ST ve PT-ST için şekillendirici genlikleri Eş. 2.44 ve 2.45 ile sunulmaktadır.

$$PT - ST = A_j = [1 \quad -2 \quad 2] \quad (2.44)$$

$$BG - ST = A_j = [1 \quad -1 \quad 1] \quad (2.45)$$

Her bir darbenin zaman konumu sönüm oranı  $\zeta$ ’nın karmaşık bir fonksiyonudur. Çözümler Singhose tarafından BG ve PT genlik kısıtlamalarının her biri için  $\zeta$ ’nın geniş bir aralığı üzerinden elde edilebilmektedir (Vaughan, 2008; Singhose, Seering ve Singer, 1997; Singhose, 1997).

Literatürde adı geçen negatif girdi şekillendiricilerin birçoğu için kapalı form çözümlerinin kolayca elde edilemeyeceği belirtilmiştir (Vaughan, 2008; Singhose ve diğerleri, 1997;

Singhose, 1997). Negatif girdi şekillendirme için analitik çözümler Çizelge 2.4, 2.5 ve 2.6 ile listelenmiştir. Analitik çözümler hakkında daha fazla bilgi için, Singhose (1997) tarafından yapılan çalışmalara bakılabilir.

### 2.5.1. Negatif Sıfır Titreşim girdi şekillendiriciler

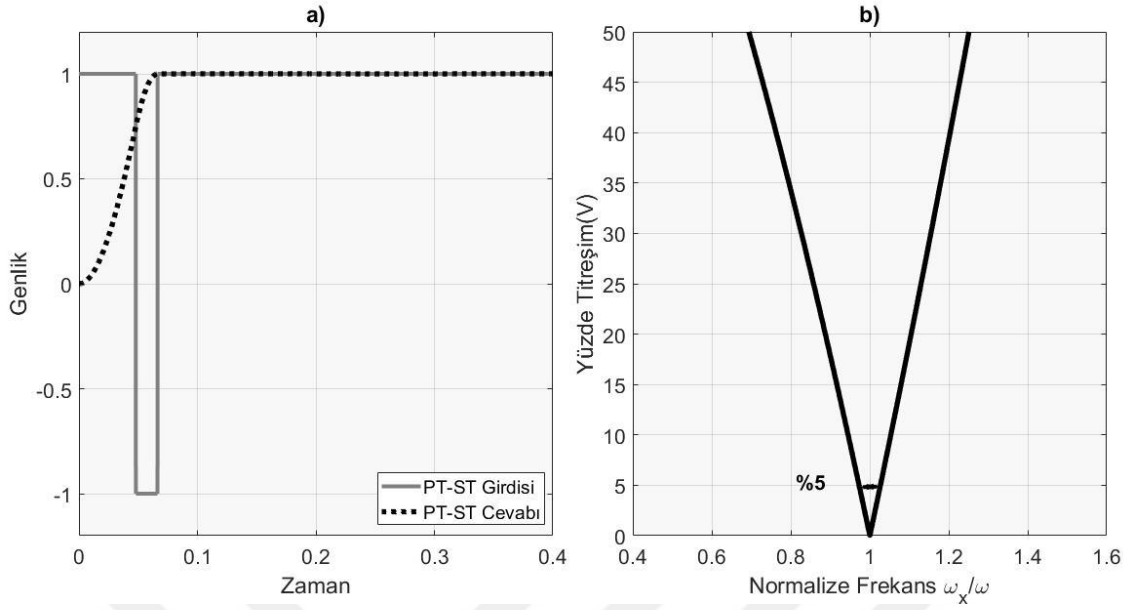
ST girdi şekillendiriciler sistem parametrelerinin doğru tahminine dayandıkları için gerçek sistemlerin çoğunda iyi çalışmazlar fakat sistem doğal frekansı kesin bir şekilde bilindiği zaman şekillendirici performansı en iyi ve en hızlıdır (Singhose, 1997). Ayrıntılı kapalı form tanımı Singhose ve Pao (1996), Singhose ve diğerleri (2000) ile Pao ve Singhose (1996) tarafından yapılmıştır.

Parçalı Toplam Sıfır Titreşim (PT-ST) ve Birim Genlik Sıfır Titreşim (BG-ST) girdi şekillendiriciler için genlikler ve genliklerin zaman değerleri, sönüm oranının bir fonksiyonu olarak Çizelge 2.4’de sunulmaktadır (Singhose ve diğerleri, 1997; Singhose, 1997). PT-ST ve BG-ST şekillendiricilere uyan eğriler için  $\zeta$  ;  $0 \leq \zeta \leq 0,3$  aralığındadır.

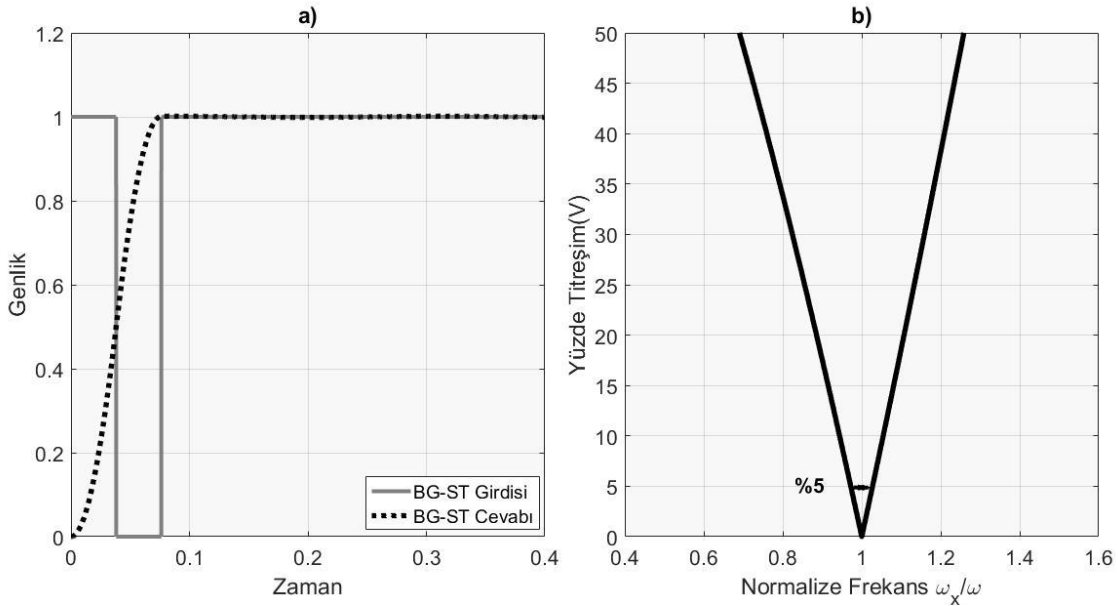
Çizelge 2.4. Sayısal olarak hesaplanmış Negatif Sıfır Titreşim girdi şekillendiriciler

$t_j = (M_0 + M_1\zeta + M_2\zeta^2 + M_3\zeta^3)T_d, T_d = 2\pi/\omega$						
Girdi Şekillendirici	$A_j$	$t_j$	$M_0$	$M_1$	$M_2$	$M_3$
PT-ST	1	$t_1$	0	0	0	0
	-2	$t_2$	0,2097	0,2244	0,0802	0,2312
	2	$t_3$	0,2901	0,0955	0,1034	0,2462
BG-ST	1	$t_1$	0	0	0	0
	-1	$t_2$	0,1665	0,2927	0,0754	0,2133
	1	$t_3$	0,3332	0,0053	0,1791	0,2012

Parçalı Toplam Sıfır Titreşim (PT-ST) ve Birim Genlik Sıfır Titreşim (BG-ST) girdi şekillendiriciler için birim basamak girdisinin şekillendirilmiş girdi profili, birim basamak cevabı ve hassasiyet eğrileri Şekil 2.37 ve 2.38’de sunulmaktadır.



Şekil 2.37. Parçalı Toplam Sıfır Titreşim (PT-ST) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi



Şekil 2.38. Birim Genlik Sıfır Titreşim (BG-ST) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

Birim basamak girdi için, PT-ST girdi şekillendiricilerin seyahat süresi  $0,29T_d$ 'dir. Burada  $T_d$  titreşim periyodunu göstermektedir. Pozitif ST girdi şekillendiricinin seyahat süresi  $0,5T_d$  iken, BG-ST girdi şekillendiricinin seyahat süresi  $0,33T_d$ 'dir. Negatif ST girdi şekillendiriciler model hatalarının varlığında gürbüzlük kısıtlamasını sağlasalar ve pozitif ST girdi şekillendiriciye göre düşük bir performans gösterebilirler de daha kısa seyahat sürelerine sahiptirler (Singhose ve diğerleri, 1997).

### 2.5.2. Negatif Türevsel Sıfır Titreşim girdi şekillendiriciler

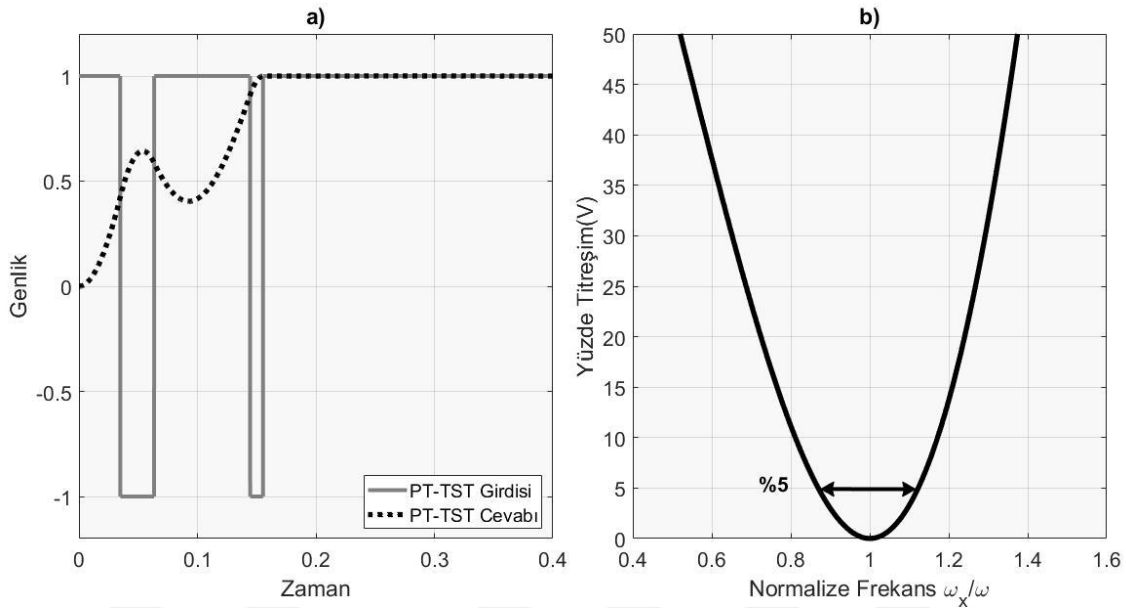
Türevsel sıfır titreşim girdi şekillendiriciler sistem parametrelerinin belirli ölçüde hatalı tahmin edilmesine olanak sağladıkları için gerçek sistemlerin çoğuna uygulanabilirler. Gürbüzlüğü arttırabilmek için girdi beş darbeyi içermekte ve seyahat süresi sıfır titreşim girdi şekillendiricilere göre daha uzun olmaktadır (Singhose ve diğerleri, 1997).

Parçalı Toplam Türevsel Sıfır Titreşim (PT-TST) ve Birim Genlik Türevsel Sıfır Titreşim (BG-TST) girdi şekillendiriciler için genlikler ve genliklerin uygulama zamanları, sönüm oranının bir fonksiyonu olarak Çizelge 2.5’de sunulmaktadır (Singhose ve diğerleri, 1997; Singhose, 1997).

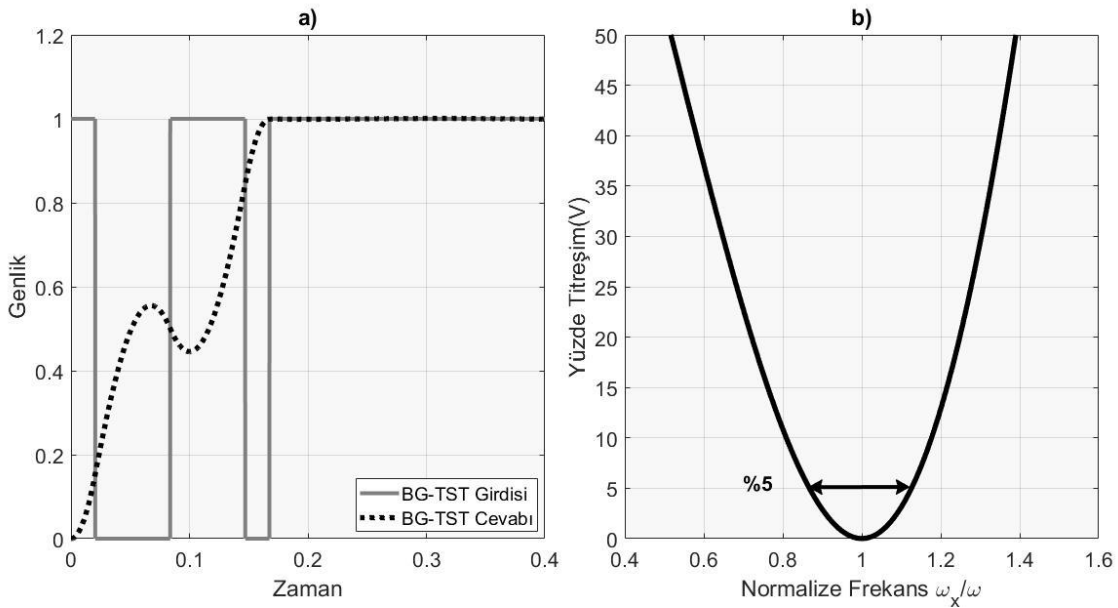
Çizelge 2.5. Sayısal olarak hesaplanmış Negatif Türevsel Sıfır Titreşim girdi şekillendiriciler

$t_j = (M_0 + M_1\zeta + M_2\zeta^2 + M_3\zeta^3)T_d, T_d = 2\pi/\omega$						
Girdi Şekillendirici	$A_j$	$t_j$	$M_0$	$M_1$	$M_2$	$M_3$
PT-TST	1	$t_1$	0	0	0	0
	-2	$t_2$	0,1523	0,2339	0,1516	0,2131
	2	$t_3$	0,2773	0,1114	0,0461	0,2878
	-2	$t_4$	0,6311	0,3493	0,1184	0,5255
	2	$t_5$	0,6787	0,1941	0,2743	0,4850
BG-TST	1	$t_1$	0	0	0	0
	-1	$t_2$	0,0894	0,2841	0,2301	0,1640
	1	$t_3$	0,3661	-0,0883	0,2404	0,1700
	-1	$t_4$	0,6427	0,2910	0,2326	0,4378
	1	$t_5$	0,7322	0,0099	0,4938	0,3863

Parçalı Toplam Türevsel Sıfır Titreşim (PT-TST) ve Birim Genlik Türevsel Sıfır Titreşim (BG-TST) girdi şekillendiriciler için birim basamak girdisinin şekillendirilmiş girdi profili, birim basamak cevabı ve hassasiyet eğrileri Şekil 2.39 ve 2.40’da sunulmaktadır.



Şekil 2.39. Parçalı Toplam Türevsel Sıfır Titreşim (PT-TST) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi



Şekil 2.40. Birim Genlik Türevsel Sıfır Titreşim (BG-TST) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

Birim basamak girdi için PT-TST girdi şekillendiricinin seyahat süresi seyahat süresi  $0,67T_d$ 'dir. Pozitif TST girdi şekillendiricinin seyahat süresi  $T_d$  iken, BG-TST şekillendiricinin seyahat süresi  $0,73 T_d$ 'dir. Negatif türevsel girdi şekillendirici modelleme hataları varlığında pozitif türevsel girdi şekillendiriciye göre gürbüzlük kısıtlamasını sağlasa bile daha kötü bir performans gösterecektir.



### 2.5.3. Negatif Ekstra Duyarsız girdi şekillendiriciler

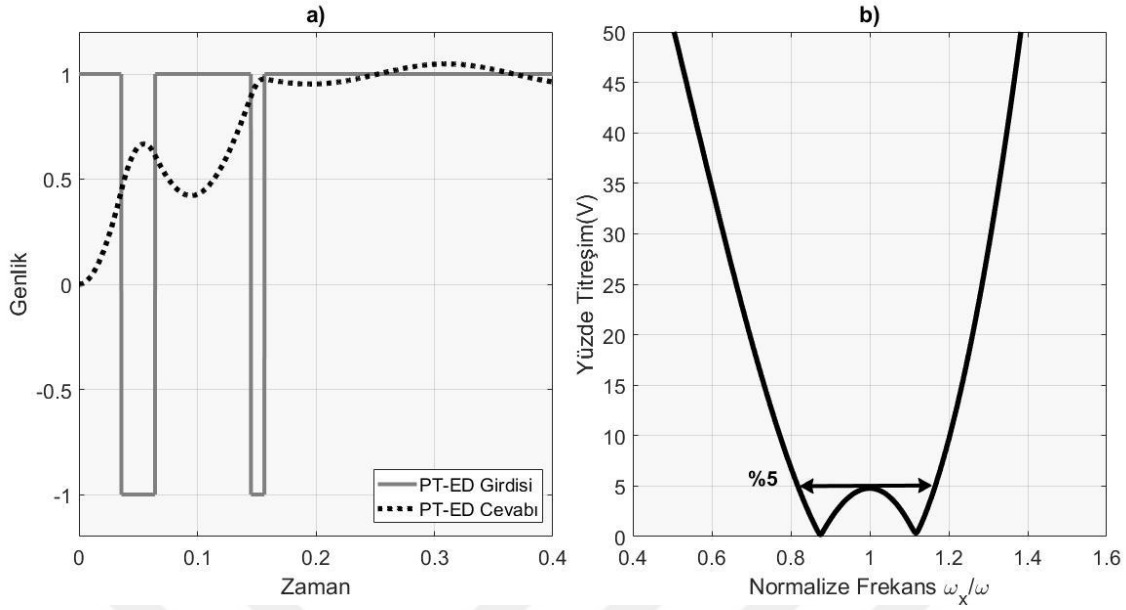
Singhose ve arkadaşları (1997) titreşim kısıtlaması için sönüm oranı ve genlik kısıtlamasına uygun bir denklem dizisi üzerinden BG ve PT genlik kısıtlamalarını çözmüştür. Çizelge 2.6 artık titreşim %5 iken negatif ED şekillendiricilerin zaman konumlarına uyan eğrileri içermektedir. Çizelge 2.6 incelendiğinde, ED şekillendiricilerin  $\zeta$  değerinden bağımsız olarak TST şekillendiricilerle aynı seyahat süresine sahip olduğu görülmektedir. Ancak negatif ekstra duyarsız girdi şekillendiriciler modelleme hatalarına karşı negatif türevsel sıfır titreşim girdi şekillendiricilerden daha gürbüzdür.

Parçalı Toplam Ekstra Duyarsız (PT-ED) ve Birim Genlik Ekstra Duyarsız (BG-ED) girdi şekillendiriciler için genlikler ve genliklerin zaman değerleri, sönüm oranının bir fonksiyonu olarak Çizelge 2.6.'da sunulmaktadır (Singhose ve diğerleri, 1997; Singhose, 1997).

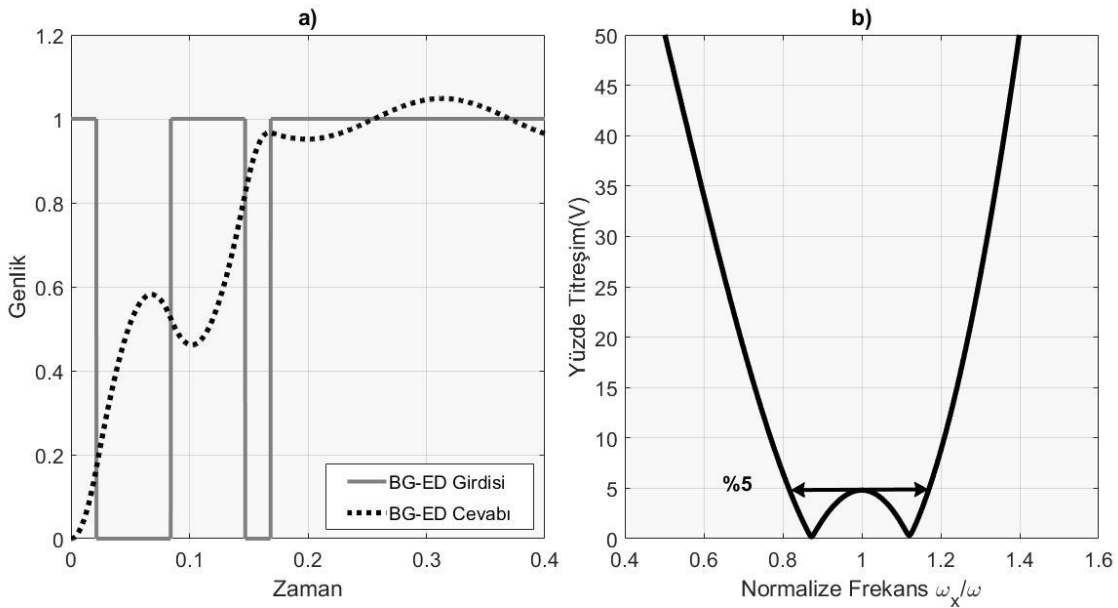
Çizelge 2.6. Sayısal olarak hesaplanmış Negatif Ekstra Duyarsız girdi şekillendiriciler

		$t_j = (M_0 + M_1\zeta + M_2\zeta^2 + M_3\zeta^3)T_d, \quad T_d = 2\pi/\omega$				
Girdi Şekillendirici	$A_j$	$t_j$	$M_0$	$M_1$	$M_2$	$M_3$
PT-ED V=5%	1	$t_1$	0	0	0	0
	-2	$t_2$	0,1563	0,2655	0,0532	0,6945
	2	$t_3$	0,2808	0,1393	-0,0562	0,7542
	-2	$t_4$	0,6342	0,3414	0,1537	0,3290
	2	$t_5$	0,6841	0,1849	0,3105	0,2856
BG-ED V=5%	1	$t_1$	0	0	0	0
	-1	$t_2$	0,0937	0,3190	0,1358	0,6527
	1	$t_3$	0,3679	-0,0589	0,1364	0,6326
	-1	$t_4$	0,6425	0,2859	0,2633	0,2499
	1	$t_5$	0,7366	0,0016	0,5274	0,1920

Parçalı Toplam Ekstra Duyarsız (PT-ED) ve Birim Genlik Ekstra Duyarsız (BG-ED) girdi şekillendiriciler için birim basamak girdisinin şekillendirilmiş girdi profili, birim basamak cevabı ve hassasiyet eğrileri Şekil 2.41 ve 2.42'de sunulmaktadır.



Şekil 2.41. Parçalı Toplam Ekstra Duyarsız (PT-ED) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi



Şekil 2.42. Birim Genlik Ekstra Duyarsız (BG-ED) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

PT-ED ve BG-ED girdi şekillendiriciler ve hassasiyet eğrileri Şekil 2.41 ve 2.42'de sunulmaktadır. PT-ED girdi şekillendiricinin seyahat süresi pozitif ED girdi şekillendiricinin %68'i iken BG-ED şekillendiricinin seyahat süresi pozitif ED girdi şekillendiricinin %73'üdür.

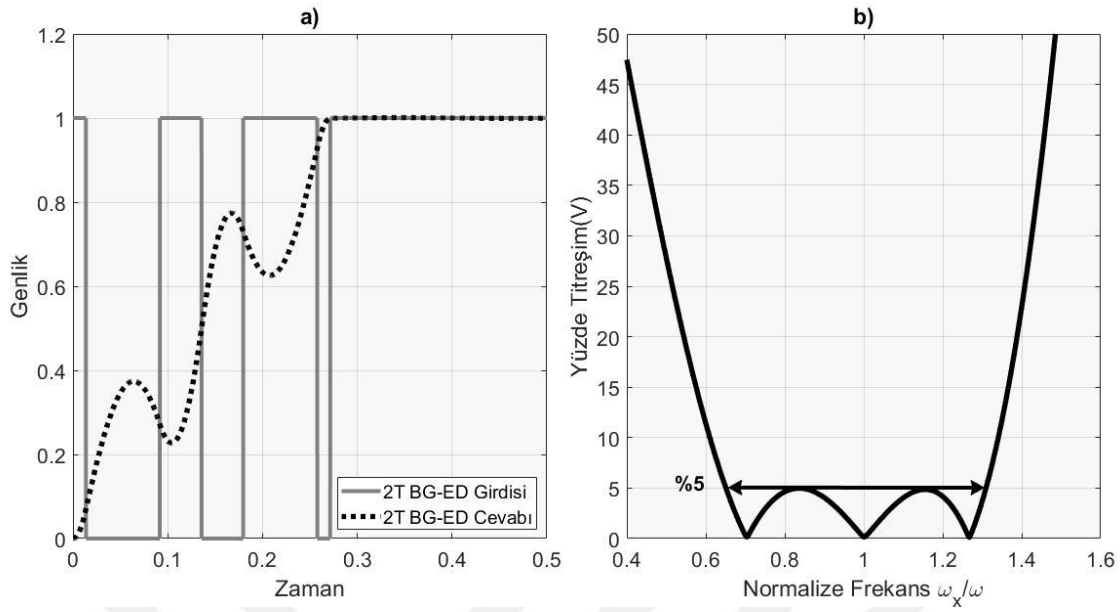
Negatif ekstra duyarsız girdi şekillendiricilerin gürbüzlüğünün artırılması için geliştirilen bir diğer metot İki Tepecikli Parçalı Toplam Ekstra Duyarsız (2T PT-ED) ve İki Tepecikli

Birim Genlik Ekstra Duyarsız (2T BG-ED) girdi şekillendiricilerdir. Geliştirilen şekillendiriciler için genliklerin zaman değerleri, sönüm oranının bir fonksiyonu olarak Çizelge 2.7’de sunulmaktadır (Singhose ve diğerleri, 1997; Singhose, 1997).

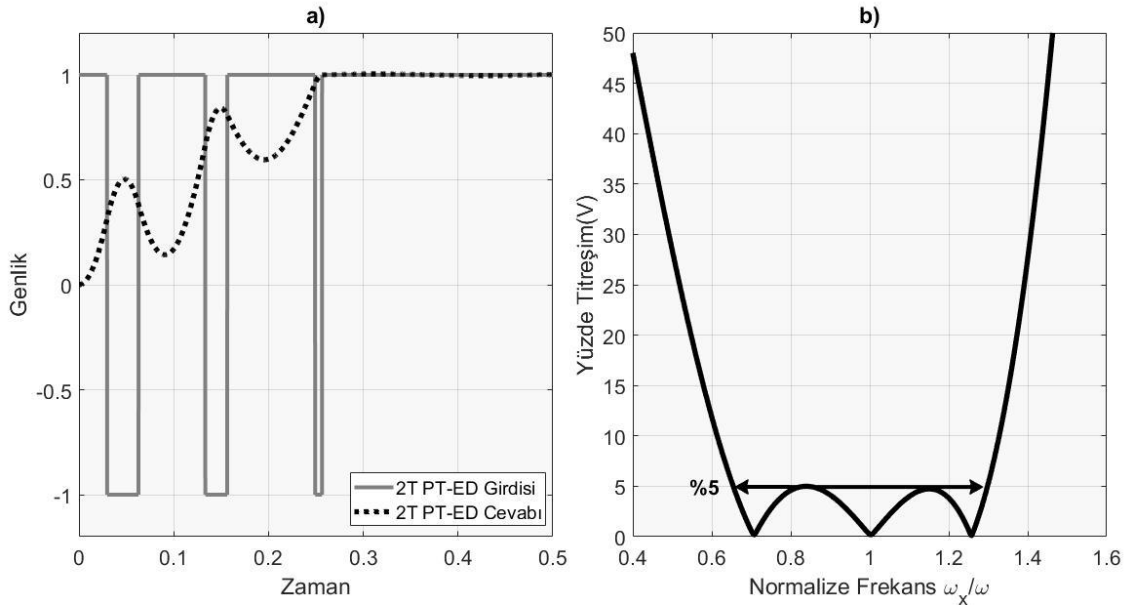
Çizelge 2.7. Sayısal olarak hesaplanmış Negatif Ekstra Duyarsız girdi şekillendiriciler

$t_j = (M_0 + M_1\zeta + M_2\zeta^2 + M_3\zeta^3)T_d, \quad T_d = 2\pi/\omega$						
Girdi Şekillendirici	$A_j$	$t_j$	$M_0$	$M_1$	$M_2$	$M_3$
2T PT-ED V=5%	1	$t_1$	0	0	0	0
	-2	$t_2$	0,12952	0,29981	0,08010	1,7913
	2	$t_3$	0,27452	0,22452	-0,20059	1,8933
	-2	$t_4$	0,58235	0,51403	-0,00620	1,6106
	2	$t_5$	0,68355	0,26308	0,08029	1,7095
	-2	$t_6$	1,08870	0,39342	0,14197	0,48868
	2	$t_7$	1,12080	0,25926	0,35816	0,35035
2T BG-ED V=5%	1	$t_1$	0	0	0	0
	-1	$t_2$	0,05970	0,31360	0,31759	1,5872
	1	$t_3$	0,40067	-0,08570	0,14685	1,6059
	-1	$t_4$	0,59292	0,38625	0,34296	1,2889
	1	$t_5$	0,78516	-0,08828	0,54174	1,3883
	-1	$t_6$	1,12640	0,20919	0,44217	0,30771
	1	$t_7$	1,18640	-0,02993	0,79859	0,10478

İki Tepecikli Parçalı Toplam Ekstra Duyarsız (2T PT-ED) ve İki Tepecikli Birim Genlik Ekstra Duyarsız (2T BG-ED) girdi şekillendiriciler için birim basamak girdisinin şekillendirilmiş girdi profili, birim basamak cevabı ve hassasiyet eğrileri Şekil 2.43 ve 2.44’de sunulmaktadır.



Şekil 2.43. İki Tepecikli Birim Genlik Ekstra Duyarsız (2T BG-ED) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi



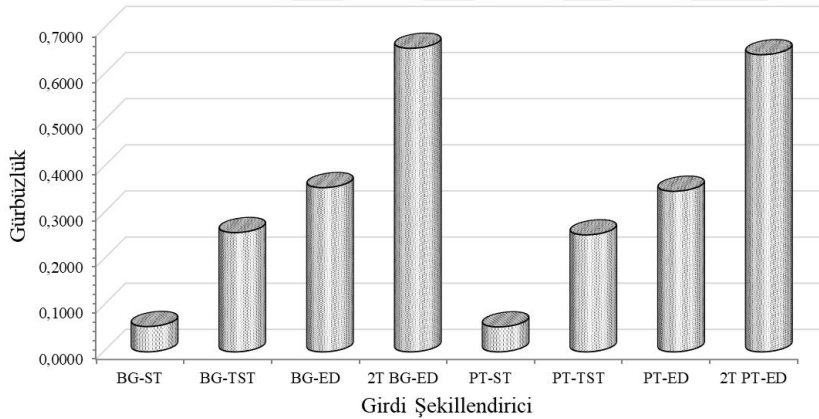
Şekil 2.44. İki Tepecikli Parçalı Toplam Ekstra Duyarsız (2T PT-ED) girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

2T PT-ED ve 2T BG-ED girdi şekillendiriciler ve hassasiyet eğrileri Şekil 2.43 ve 2.44'de sunulmaktadır. 2T PT-ED girdi şekillendiricinin seyahat süresi pozitif 2T-ED girdi şekillendiricinin %74'ü iken 2T BG-ED girdi şekillendiricinin seyahat süresi pozitif 2T-ED girdi şekillendiricinin %79'udur.

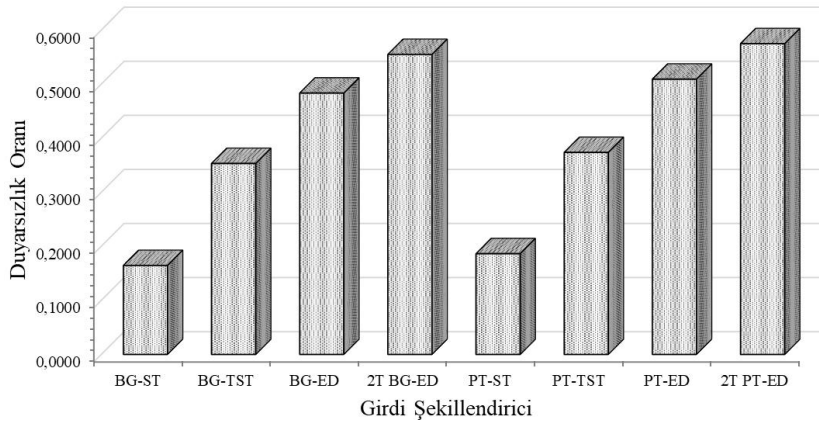
#### 2.5.4. Negatif girdi şekillendiriciler için genel değerlendirme

İncelenen 8 negatif girdi şekillendiriciye ait %5 artık titreşim değerleri için gürbüzlükler, duyarsızlık oranları ve seyahat süreleri grafikler halinde Şekil 2.45, 2.46 ve 2.47’de sunulmaktadır. Grafikler incelendiğinde;

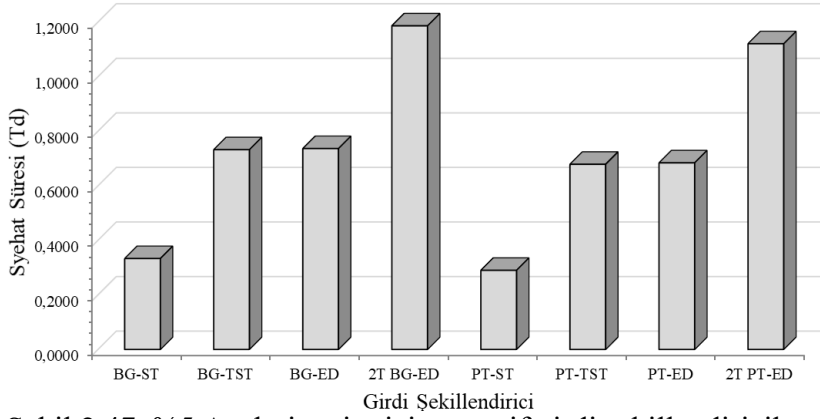
- Girdi şekillendiriciler için seyahat süresinin artmasıyla gürbüzlüklerin arttığı görülmektedir.
- Negatif ST girdi şekillendiriciler modelleme hatalarına karşı oldukça duyarlıdır, modelleme frekansındaki hatalı tahminler artık titreşime neden olmaktadır.
- Negatif TST girdi şekillendiriciler modelleme hatalarına karşı negatif ST girdi şekillendiricilerden daha duyarlı olmakla birlikte seyahat süreleri daha fazladır.
- Gürbüzlüğün seyahat süresine oranı (duyarsızlık verimi) incelendiğinde performans olarak en iyi şekillendiricinin PT-ED girdi şekillendirici olduğu görülmektedir.



Şekil 2.45. %5 Artık titreşim için negatif girdi şekillendirici gürbüzlükleri



Şekil 2.46. %5 Artık titreşim için negatif girdi şekillendirici duyarsızlık oranları



Şekil 2.47. %5 Artık titreşim için negatif girdi şekillendiriciler seyahat süreleri

Negatif girdi şekillendiricilerle ilgili sunulan her bir yöntem için teorik arka plan ve uygulamalar sunulmuştur. Negatif girdi şekillendiricilerin çok daha kapsamlı değerlendirmeleri için Singhose ve diğerleri (1997) tarafından sunulan çalışma incelenebilir.

## 2.6. Sikloid+Rampa Versine+Rampa (CPRPVR) Fonksiyonlu ile Girdi Şekillendirici

Sisteme uygulanacak girdinin daha yumuşak geçişli olarak üretildiği bu yöntem için girdi fonksiyonu sikloid, rampa versine ve rampa olmak üzere üç fonksiyondan oluşur. Belirli bir süre içinde bir hareketin başlangıcından sonuna kadar süren toplam mesafe, aynı seyahat süresi içinde üç fonksiyonun her biri tarafından gidilecek mesafelerin toplamıdır. Her bir fonksiyonun seyahat mesafesini ayarlayarak, belirtilen hareket süresinin ve toplam mesafenin değişmemesi şartıyla titreşim ortadan kaldırılabilir. Referans girdinin her bir bileşeni, bu salınımların birbirini iptal edeceği şekilde bir cevap üretir. Bu durum da artık titreşimin azaltılması veya ortadan kaldırılmasıyla sonuçlanır. CPRPVR fonksiyonu için hareket profili Eş. 2.44 ile sunulmaktadır (Kapucu, Alıcı ve Bayseç, 2001).

$$Y(t) = \frac{L_1 R t}{2\pi} + \frac{L_2}{2\pi} [R t - \sin(R t)] + \frac{L_3 R t}{2\pi} + \frac{L_3}{2\pi} [1 - \cos(R t)] \quad (2.44)$$

Eş. 2.44'de  $L_1$ ; rampa fonksiyonu ile gidilen maksimum seyahat mesafesi,  $L_2$ ; sikloid fonksiyonu ile gidilen maksimum seyahat mesafesi ve  $L_3$ ; rampa versine fonksiyonu ile gidilen maksimum seyahat mesafesidir.  $t$  hareketin başlangıç zamanı,  $\tau$  seyahat süresi ve  $R = 2\pi/\tau$  'dur. Ayrıca toplam mesafe  $L = L_1 + L_2 + L_3$  'dür. Eş. 2.44'ün düzenlenmiş şekli:

$$Y(t) = \frac{LRt}{2\pi} - \frac{L_2}{2\pi} \sin(Rt) + \frac{L_3}{2\pi} (1 - \cos(Rt)) \quad (2.45)$$

$$\dot{Y}(t) = \frac{LR}{2\pi} - \frac{L_2 R}{2\pi} \cos(Rt) - \frac{L_3 R}{2\pi} \sin(Rt) \quad (2.46)$$

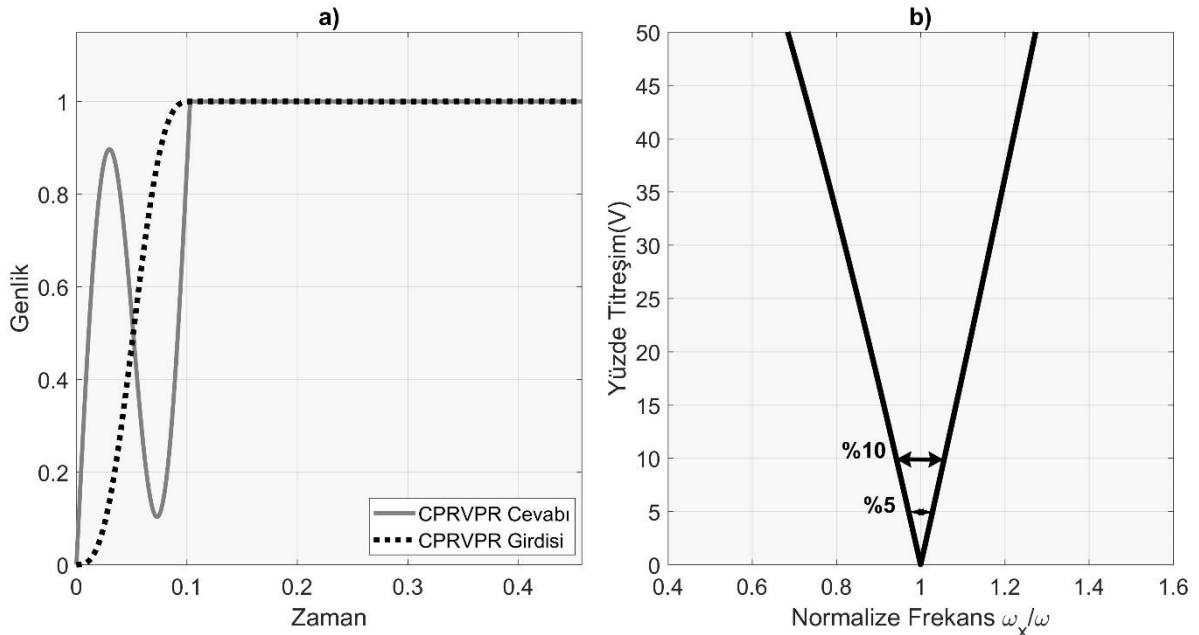
Eş. 2.46 ile ise hız profili sunulmaktadır. Sıfır başlangıç şartları ve sıfır artık titreşim kısıtlaması ile  $L_1$ ,  $L_2$  ve  $L_3$  mesafesi Eş. 2.47 ile sunulmaktadır (Kapucu ve diğerleri, 2001).

$$L_1 = \frac{LR(R - 2\zeta\omega_n)}{\omega_n^2} = \frac{L\tau_n(\tau_n - 2\zeta\tau)}{\tau^2}$$

$$L_2 = L \left( 1 - \frac{R^2}{\omega_n^2} \right) = L \left( 1 - \frac{\tau_n^2}{\tau^2} \right)$$

$$L_3 = \frac{2L\zeta R}{\omega_n} = \frac{2L\zeta\tau_n}{\tau} \quad (2.47)$$

İkinci mertebeden bir sistem için birim basamak girdisinin şekillendirilmiş girdi profili, birim basamak cevabı ve hassasiyet eğrisi Şekil 2.48'de sunulmaktadır.



Şekil 2.48. Sikloid+Rampa Versine+Rampa (CPRVPR) Fonksiyonlu girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

Şekil 2.48 a’da şekillendirilmiş komut profili ve sistem cevabı sunulmaktadır. CPRVPR girdi şekillendirici için seyahat süresi sistem periyodunun yarısı kadardır. Şekillendirici seyahat süresi oldukça kısa iken şekillendiricinin modelleme frekansındaki hatalara karşı duyarsızlığı aynı seyahat süresine sahip ST girdi şekillendirici ile kıyaslandığında görünür bir iyileşme sağlanmıştır. Şekil 2.48 b’de CPRVPR girdi şekillendirici hassasiyet eğrisi ile %5 ve %10 artık titreşim değerleri için sistem gürbüzlüğü sunulmaktadır.

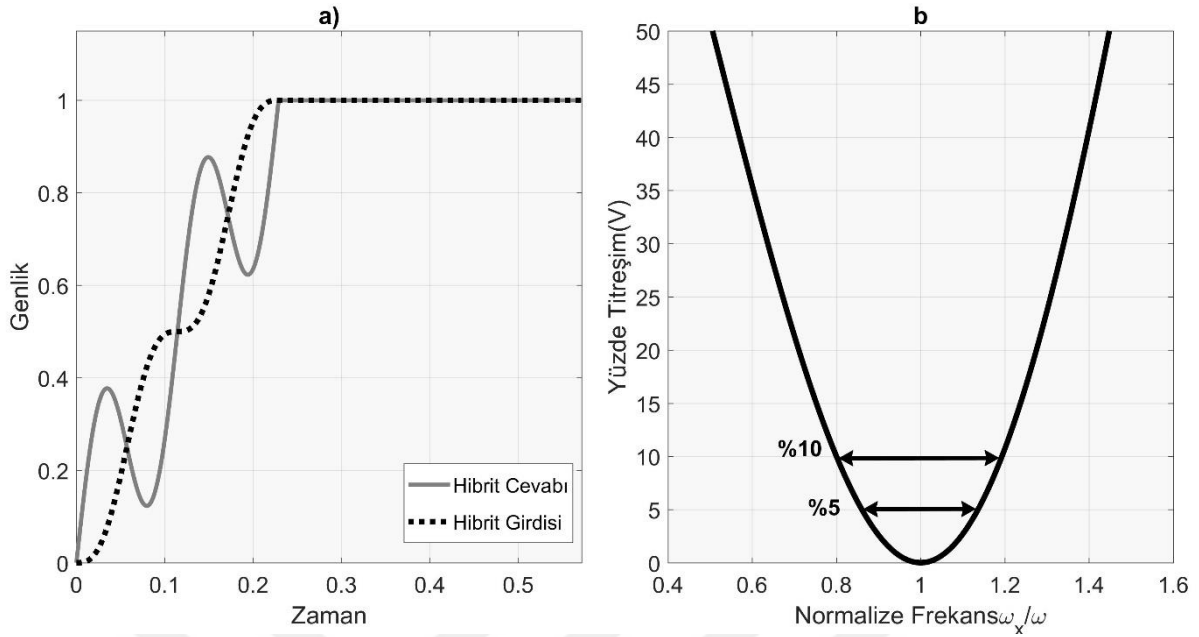
## 2.7. Hibrit Girdi Şekillendirici

Yavuz ve diğerleri (2012) tarafından önerilen bu yöntemde, önceden belirlenmiş bir komut, süresinin ayarlanabilir olmasına izin verilen farklı profildeki fonksiyonların birleştirilmesiyle üretilir. Hibrit girdi şekillendirici olarak adlandırılan yöntem ve uygulama esasları:

- Girdi fonksiyonunun seyahat süresi  $\tau_1 = \tau_t - \tau_{gecikme}$  olarak hesaplanır. Burada toplam seyahat süresi,  $\tau_t$ , gecikme süresinden,  $\tau_{gecikme}$ , büyük olmalıdır.
- $L_1$ ,  $L_2$  ve  $L_3$  Eş. 2.47 ile hesaplanır.
- Metodun uygulanması Eş. 2.21 ile tanımlanan iki darbenin katlanması esasına dayanır.

İkinci mertebe bir sistem için;  $L=1$  ve seyahat süresi bir sistem periyoduna ayarlanarak uygulanan şekillendirilmiş girdi profili, birim basamak cevabı ve hassasiyet eğrisi Şekil 2.49’da sunulmaktadır.





Şekil 2.49. Hibrit girdi şekillendirici için a) Sistem davranışı b) Hassasiyet eğrisi

Şekil 2.49 a'da şekillendirilmiş komut profili ve sistem cevabı sunulmaktadır. Hibrit girdi şekillendirici için seyahat süresi bir sistem periyodu kadardır. Şekil 2.49 b'de Hibrit girdi şekillendirici hassasiyet eğrisi ile %5 ve %10 artık titreşim değerleri için sistem gürbüzlüğü sunulmaktadır. Aynı seyahat süresine sahip TST girdi şekillendirici ile kıyaslandığında Hibrit girdi şekillendirici modelleme hatalarına karşı çok az da olsa daha duyarsızdır. Fakat Hibrit girdi şekillendiricinin en büyük avantajı uygulamada seyahat süresi kısıtlaması yoktur (Yavuz ve diğerleri, 2011).

Çizelge 2.8 CPRVPR ve Hibrit Girdi Şekillendiriciler için seyahat süreleri, %5 artık titreşim değeri için gürbüzlükler ve duyarsızlık verimleri sunulmaktadır.

Çizelge 2.8. CPRVPR ve Hibrit girdi şekillendiricileri performansları

	CPRVPR	Hibrit
Seyahat Süresi $T_d$	0,5	1
Gürbüzlük 5%	0,0585	0,2754
Duyarsızlık Verimi	0,117	0,2754

Çizelge 2.8 incelendiğinde;

- Seyahat süresi arttıkça girdi şekillendirici gürbüzlükleri de artmıştır.

- CPRVPR girdi şekillendirici modelleme hatalarına karşı oldukça hassastır. Modelleme frekansındaki hatalı tahminler sistem cevabında büyük genlikli artık titreşime sebep olmaktadır.
- Hibrit girdi şekillendirici CPRVPR girdi şekillendirici ile kıyaslandığında modelleme hatalarına karşı daha duyarsızdır. Fakat sistem periyodunun yarısı kadar kısa bir zaman gecikmesine sahiptir.

## 2.8. Bulanık Mantık

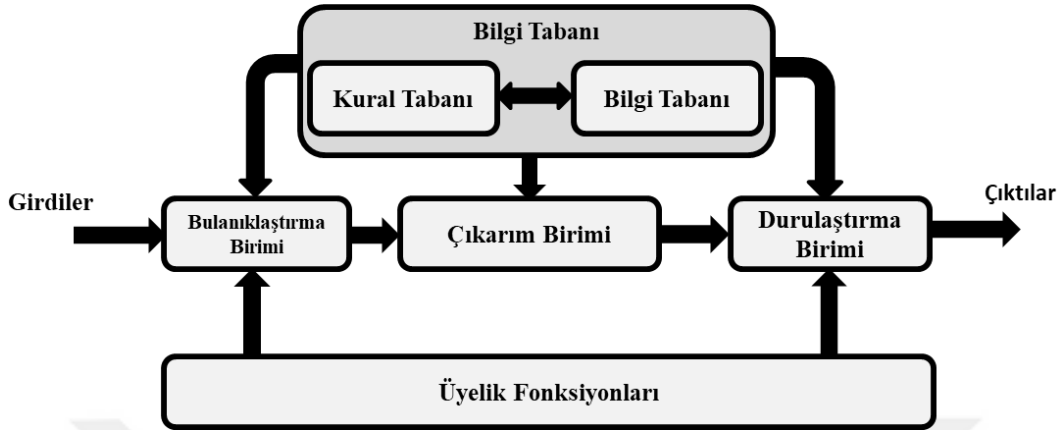
Aristo mantığı dediğimiz bir sonucun sadece doğru veya sadece yanlış olabileceği kabulüne dayanan klasik mantıktan farklı olarak bulanık mantık; faaliyetlerin ve gözlemlerin tanımlarının kesin olmayan, anlaşılmaz ve belirsiz olduğu sorunları çözmek için geliştirilmiştir. Belirsizliğin fazla olduğu, karmaşık ve zamanla değişen karar verme süreçlerinde sıkça kullanılan bulanık mantık matematik modelinin çıkarılması zor olan endüstriyel uygulamalarda da başarı ile kullanılmaktadır (Rodriguez, Martinez ve Herrera, 2012; Yordanova, Merazchiev ve Jain, 2015).

Tez kapsamında tasarlanan karar destek sistemi için bulanık mantık tabanlı bir kontrol sistemi geliştirildiğinden bu bölümde; bulanık küme teorisinin temel kavramları, cebirsel işlemler, üçgen bulanık sayılar ve dilsel değişkenler hakkında kısa bir giriş sunulmaktadır.

### 2.8.1. Bulanık küme teorisi

Bulanık küme teorisi; yaklaşık akıl yürütme yöntemi ile dilsel terimlerin doğru bir şekilde temsil edilebildiği insan düşünce ve algılamasındaki belirsizliğin nicelenmesi ile ilgilidir. Verilerin bulanıklığını içeren bulanık küme teorisi ilk olarak Zadeh (1965) tarafından tanıtılmıştır. Bulanık küme, üyelik derecesinin sürekliliği olan ve üyelik derecesinin 0 ile 1 arasında bir ara değer olarak alınabileceği bir nesne sınıfıdır. Evrensel bir  $X$  kümesinin bulanık bir  $A$  altkümesi,  $X$ 'deki her bir  $x$  elemanını  $[0,1]$  aralığına eşleyen  $\mu_A(x)$  üyelik fonksiyonu olarak tanımlanır. Bir ögenin üyelik derecesi 1 olduğunda, öge o kümede kesinlikle bulunur demektir. Üyelik derecesi 0 olması ise ögenin bu kümede kesinlikle bulunmadığı anlamına gelir. Belirsiz durumlara 0 ile 1 arasında değerler atanır. Teori ayrıca, bulanık kümelere uygulanacak olan toplama, çıkarma, çarpma ve bölme gibi

matematiksel operatöre izin verir (Dubois ve Prade, 1979). Bulanık bir karar verme sistemi; Şekil 2.50’de gösterildiği gibi dört ana bileşenden oluşur (Zimmerman, 2012).

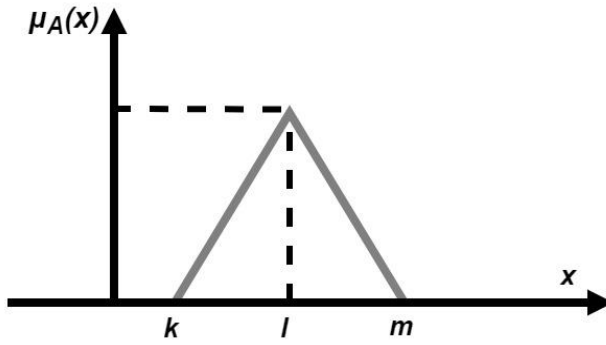


Şekil 2.50. Bulanık çıkarım birimi blok gösterimi

Sistemin bu dört bileşeni aşağıda verilmiştir:

- Bulanıklaştırma: Bu ara yüzde, farklı girdi ve çıktı değişkenleri ölçülür ve doğal dilsel terimlere dönüştürülür;
- Bilgi Tabanı: Bilgi tabanı arabirimi iki bileşenden oluşur; veri tabanı ve kural tabanı. Bu ara yüzde, uzmanlar tarafından sistem hakkındaki bilgilere dayanarak üyelik fonksiyonlarına karar verilir. Kural tabanı biriminde, uzmanların karar verme yeteneği bulanık kavram temel alınarak simüle edilir.
- Çıkarım Birimi: Çıkarım biriminde, bulanıklaştırma biriminden gelen bulanık değerleri kurallara uygun olarak değerlendirerek bulanık sonuçlar üretir.
- Durulaştırma: Bu ara yüzde, bulanık çıktılar, ağırlık merkezi, maksimumların ortalaması, minimumların ortalaması, alan açığortayı vb. yöntemler ile berrak (bulanık olmayan) değerlere dönüştürülür.

Bulanık çıkarım kısmında, Şekil 2.51’de gösterildiği gibi üçgen bulanık üyelik fonksiyonları kullanılmaktadır. Hesaplamaların basitliği açısından, üçgen üyelik fonksiyonları hem girdiler hem de çıktılar için dikkate alınmıştır. Üçgen üyelik fonksiyonlarını kullanmanın bir diğer nedeni, sezgisel olmasıdır.

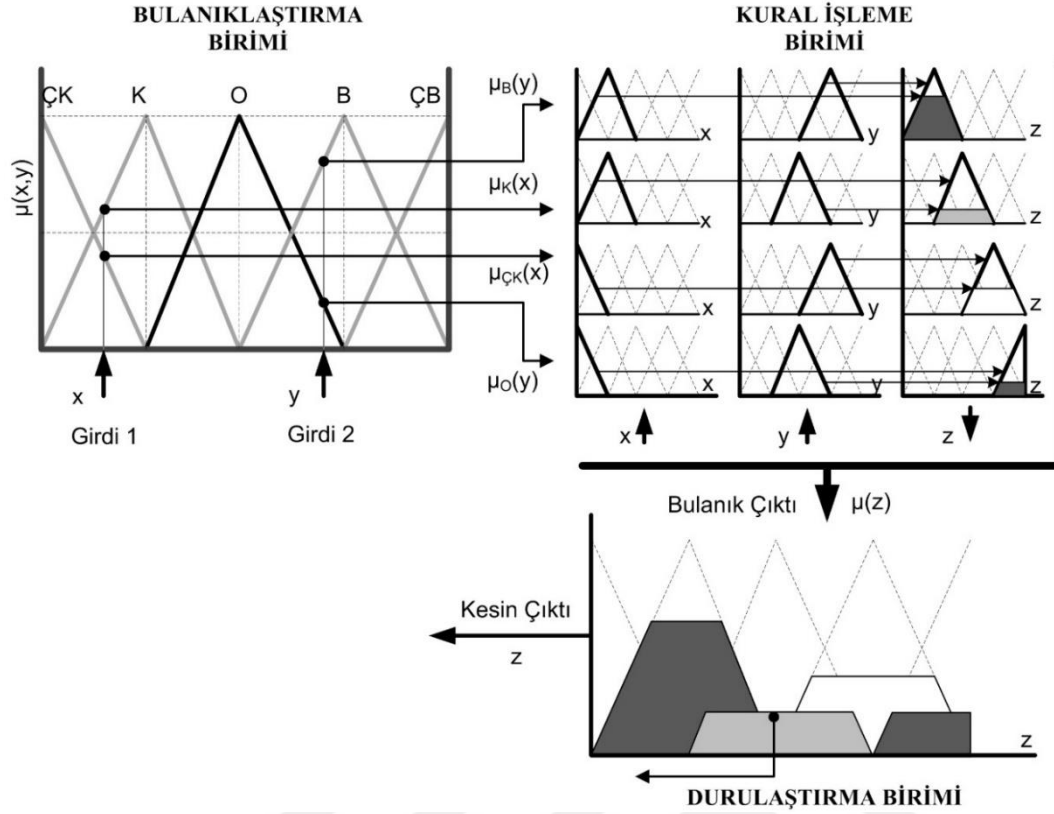


Şekil 2.51. Bulanık çıkarım birimi blok gösterimi

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & k \leq 0 \\ x = \frac{x-m}{l-k}, & k < x \leq l \\ \frac{x-m}{l-k}, & l \leq x < m \\ 0, & x \geq m \end{cases} \quad (2.50)$$

$\mu_A$  üyelik derecesi Eş. 2.50 ile belirlenir. Burada;  $k$ ,  $l$  ve  $m$  gerçek sayılar,  $\mu_A$ ,  $A$  kümesinin üyelik derecesidir.

Şekil 2.52’de bulanık mantık tabanlı bir çıkarım sisteminin genel yapısı sunulmuştur.  $x$  ve  $y$  olarak tanımlanmış iki adet girdi ile  $z$  değişkeninin tanımlandığı yapıda her bir değişken için ÇK (Çok Küçük), K (Küçük), O (Orta), B(Büyük) ve ÇB (Çok Büyük) olarak dilsel değişkenlere sahip beşer adet üçgen üyelik fonksiyonu belirlenmiştir.



Şekil 2.52. Bulanık mantık tabanlı çıkarım sistemi genel yapısı (Altaş, 1999)

İlk olarak girdiler bulanıklaştırma birimine dahil edilir. Burada girdi kullanıcıdan gelen veriler olabildiği gibi fiziksel bir sistem için sensörlerden veya algılayıcılardan alınan bilgiler de olabilir.

Bulanıklaştırma biriminde girdilerin üyelik fonksiyonlarını kestiği noktalar belirlenerek o üyelik fonksiyonları ile ilgili kural tablosu incelenerek kural işleme biriminde gerekli işlemler yapılır. Verilen örnek için “*if...then*” yapısı ile değerlendirme yapılmış ve ilgili kısma ait kural tablosu Çizelge 2.9’da sunulmuştur.

Çizelge 2.9. Örnek kural tablosu

$\mu(x)$	$\mu(y)$	$\mu(z)$
ÇK (Çok Küçük)	O (Orta)	ÇB (Çok Büyük)
ÇK (Çok Küçük)	B(Büyük)	B (Büyük)
K (Küçük)	O (Orta)	O (Orta)
K (Küçük)	B(Büyük)	K (Küçük)

Kural tablosuna göre her bir durum için çıkış üyelik derecesi minimum operatörü ile belirlenmiştir. Daha sonra ağırlık merkezi metoduna göre işlemlerin yapıldığı durulaştırma

birimine geçilir. Burada  $\mu(z)$  bulanık çıktıları ile oluşan geometrik şeklin ağırlık merkezi belirlenerek bu noktanın x eksenini kestiği nokta z değişkeninin kesin değerini verir ve durulaştırma işlemi tamamlanmış olur. Bulanık mantık yapısı ve işlemleri ile ilgili çok daha detaylı bilgiler için Lee (1990), Klir ve Yuan (1995) ile Altaş'ın (1999) çalışmalarına bakılabilir.

## 2.9. LQR Kontrolcü Tasarımı

LQR kontrol durum darbe cevaplarının minimize edilmesini amaçlar ve doğrusal optimal kontrol olarak da adlandırılabilir LQR kontrol; düzenli bir sentez sürecine sahip olduğu gibi aynı zamanda yüksek seviyede kararlılığa sahiptir. LQR kontrol ile en uygun girdi işareti performans indeksi ve durum değişkenlerini kullanarak yapılan hesaplamalarla elde edilebilir. Fakat bunun için sistemin kontrol edilebilir ve gözlemlenebilir olması gerekir (Anderson, 2007).

LQR kontrol, optimal kontrol sistemleri isimlendirilir ve amaç performans kriterini en aza indiren optimum kontrolün bulunmasıdır. Ayrıca arzu edilen cevap için sistemin tasarlanması amaçlanmıştır. İstenilen performans zaman alanı bir basamak giriş için, maksimum aşma ve yükselme zamanı gibi performans indisleri ile ifade edilebilir (Oral, 2010).

LQR,  $\dot{X}=AX+BU$  şeklinde ifade edilen bir sistem için  $U=KX$  şeklinde, durum geri beslemeli denetim amacı ile tasarlanan “K” kontrolcünün performansını belirler. Uygun kontrol için performans indeksi ve bu indeksi minimize edecek  $U=KX$  aranır. Performans indeksi;

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t) Qx(t) + u^T(t) Ru(t)] dt \quad (2.51)$$

Eş. 2.51 ile ifade edildiği gibidir. Burada,  $Q$ , simetrik, yarı kesin pozitif ve  $R$ , simetrik, kesin pozitif matrislerdir. Performans indeksi  $J$ 'yi minimize ederek  $u(t) = Kx(t)$ 'nin bulunması için sistem koşullarının ve  $J$ 'nin durumlarının tam ifade edilmesi, ayrıca düzenleyicisi tasarlanan sistemin kontrol edilebilir ve gözlemlenebilir olması gereklidir.  $Q$

ve  $R$  pozitif, reel ve Hermisyen (Hermetian) matrislerdir.  $Q$  ve  $R$  matrisinin büyüklüğü sistem cevabı ve kontrol işareti etkilemektedir.  $Q$  ve  $R$  matrisi için:

- $R$  matrisi  $Q$  matrisinden büyük seçilirse, sistem az bir güçle durum vektörünü sıfıra yaklaştırır fakat sistemin cevap süresi uzar.
- Eğer  $R$  matrisi  $Q$  matrisinden küçük seçilirse, sistem daha büyük bir güç harcayarak, hızlı bir şekilde cevaba ulaşacaktır.

İşte bu iki durum arasında denge LQR tasarımındaki esastır. Diğer bir yandan,  $R$  ve  $Q$  değerleri büyüdükçe hata azalır ve sistem hızlanır (Anderson, 2007).

Performans indeksi belirlendikten sonra girişe bağlı olarak bu indeks minimize edilir. Bu giriş kontrol vektörünün indeks matrisini minimum yapacak değerde seçilerek yapılmaktadır. Bu giriş değerleri optimaldir. Eğer performans indeksi değişecek olursa optimal girişler de beraberinde değişecektir. Optimal kontrol tasarımı, kontrol sisteminin davranışı kabul edilebilir değerlere ulaşana kadar performans indeksinin değiştirilmesine dayanmaktadır. Yapının kullanılmasının avantajı çok özel durumlar hariç sistem dizaynının kararlı olmasıdır (Ogata, 1994).

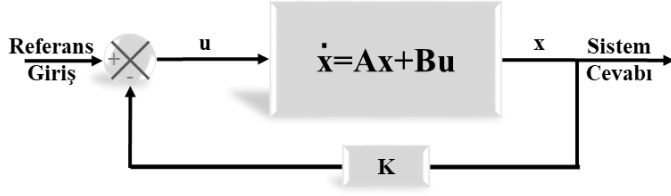
$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & q_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & q_n \end{bmatrix}, \quad R = r_i \quad (2.52)$$

LQR kontrolde anlatılan bilgiler ışığında kullanıcının tanımladığı  $q_i$  ve  $r_i$  katsayılarına bağlı olarak performans indeksi minimize edecek “U” sistem girdisi bulunur.  $U=KX$  olarak kabul edilirse;  $K=R^{-1}B^T P$  olup  $P$  ise Ricatti Eşitliğinin çözümünden bulunan simetrik matristir.

$$PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (2.53)$$

Eş. 2.53 nümerik olarak birçok program yardımı ile hesaplanabilir. Ağırlık matrisleri  $Q$ ,  $R$ , sistem matrisi  $A$  ve giriş matrisi  $B$  bilindiğinde  $K$  geri besleme matrisi MATLAB

programının “lqr” komutu ile bulunabilmektedir. Şekil 2.53’de LQR kontrolcünün bir sisteme uygulanması gösterilmektedir.



Şekil 2.53. LQR kontrolün sisteme uygulanması

LQR kontrolcü parametreleri sistem dinamikleri ve durum değişkenleri dikkate alınarak deneme yanılma yöntemi ile hesaplanır. LQR kontrolcü performansını artırmak amacıyla  $Q$  ve  $R$  matrislerinin optimize edilmesi gerekir. Bu amaçla literatürde; Memetik, Çok Amaçlı Diferansiyel Gelişim, Genetik, Kuantum Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Yapay Arı Koloni Algoritması ile ilgili sezgisel algoritmalar geliştirilmiştir (Amir ve Basiri, 2011; Zhang, Zhang ve X,e, 2011; Tijani, Akmeliwati ve Abdullateef, 2013; Wongastan ve Sirima, 2009; Hassani ve Lee, 2014; Ata ve Coban, 2015; Wang, Zhou, Wang ve Wen, 2013).

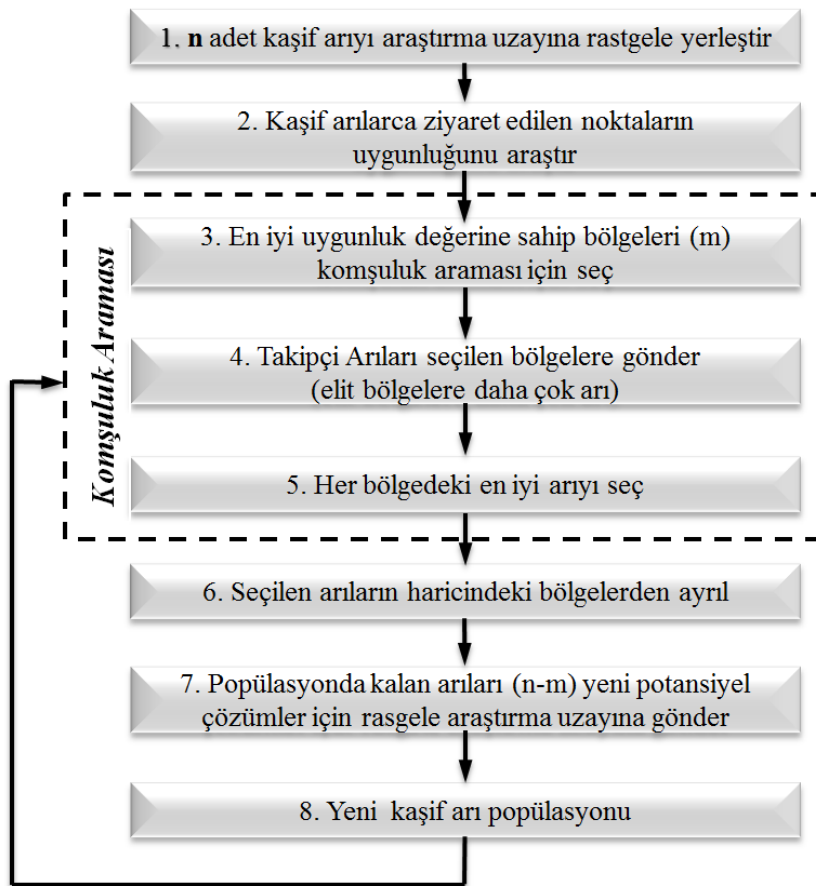
## 2.10. Arı Algoritması

Arı Algoritması (The Bees Algorithm); D.T. Pham tarafından, arıların nektar ve su gibi kaynak arama davranışları, öğrenme, hatırlama ve bilgi paylaşma gibi kolektif zeka özelliklerini taklit eden popülasyon tabanlı, sezgisel bir arama algoritması olarak önerilmiştir (Pham, Ghanbarzadeh, Koc, Rahim ve Zaidi, 2005; Pham, Ghanbarzadeh, Koc, Otri, ve Zaidi 2006). Arı Algoritması kullanılarak kontrolcü optimizasyona ait ilk teorik ve deneysel çalışmalar; Pham, Koç, Kalyoncu ve Tınkır (2008) ile Pham ve Kalyoncu (2009) tarafından gerçekleştirilen elastik uzuvlu bir robot kolunun kontrolü için Arı Algoritması kullanarak Bulanık Mantık ve PID kontrolcülerini tasarladıkları çalışmalardır. İlerleyen yıllarda Arı Algoritmasının kontrolcü optimizasyonundaki performansını incelemek üzere, ters sarkaç sistemleri için Arı Algoritması ile PID ve LQR kontrolcü tasarımı üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Şen ve Kalyoncu, 2015; Şen ve Kalyoncu, 2016; Bilgiç, Şen ve Kalyoncu, 2016). Çalışmalar sonucunda, Arı Algoritmasının kontrolcü parametrelerinin optimizasyonunda başarılı sonuçlar verdiği, geleneksel yöntemlere kıyasla sistemin konum ve denge kontrolünde önemli bir iyileşme gösterdiği, özellikle sistemin geçici ve kalıcı rejim cevap kriterlerinin (yerleşme zamanı,



maksimum aşma, kalıcı durum hatası vb.) ayarlanmasına imkan sağladığı, ayrıca önerilen yöntemin farklı sistem ve kontrolcülere yönelik geliştirilmeye açık olduğu belirtilmiştir.

İlk olarak 2006 yılında D.T. Pham ve arkadaşları tarafından önerilen temel Arı Algoritmasına ait parametreler: kâşif arı sayısı ( $n$ ), ziyaret edilen  $n$  nokta içinden seçilen en uygun bölge sayısı ( $m$ ), seçilen  $m$  bölge içindeki elit bölge sayısı ( $e$ ), en iyi  $e$  bölgeye gönderilen arı sayısı ( $nep$ ), kalan ( $m-e$ ) bölgeye gönderilen arı sayısı ( $nsp$ ), bölge boyutu ( $ngh$ ) ve durdurma kriteri/iterasyon ( $itr$ ) sayısıdır. Arı Algoritmasına ait temel akış şeması Şekil 2.54’de sunulmuştur.



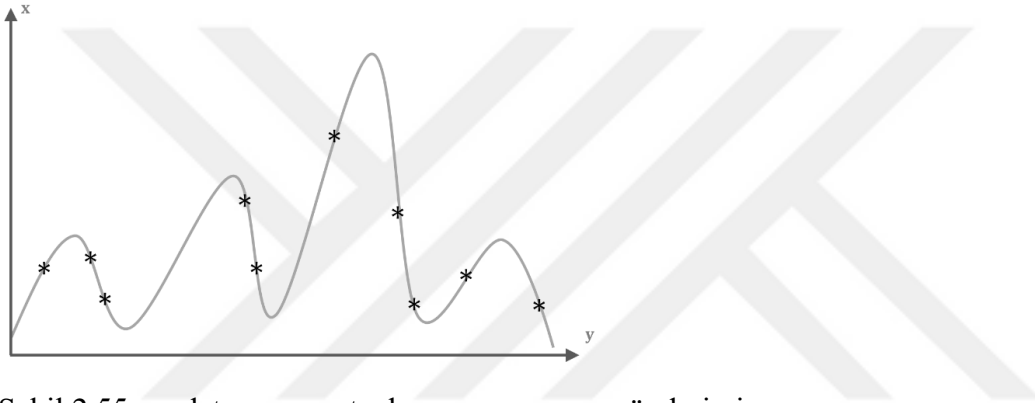
Şekil 2.54. Arı Algoritması akış şeması (Pham ve diğerleri, 2006)

Örnek bir arama uzayında en yüksek değer bulunmasına yönelik bir Arı Algoritması tüm adımları ile nasıl uygulandığı Pham ve diğerleri (2005) tarafından sunulmuştur. İlk olarak algoritma parametreleri belirlenir. Örnek uygulama için Arı Algoritmasının parametreleri Çizelge 2.10’da sunulmaktadır.

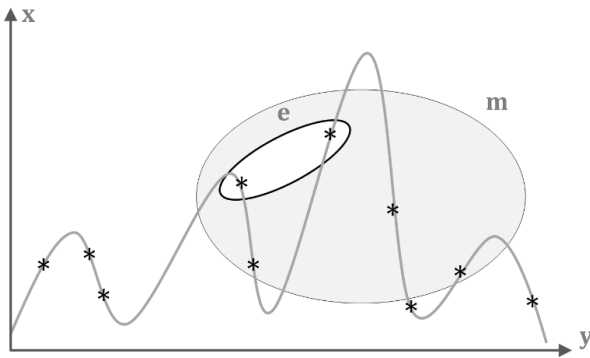
Çizelge 2.10. Örnek Arı Algoritması parametreleri

	$n$	$m$	$e$	$nep$	$nsp$
Açıklama	Kâşif arı sayısı	En uygun bölge sayısı	Elit bölge sayısı	$e$ bölgeye gönderilen arı sayısı	$(m-e)$ bölgeye gönderilen arı sayısı
Değer	10	5	2	4	2

Uygulama başlamadan önce arama yapılacak uzay belirlenir ve ilk olarak  $n$  adet kâşif arının araştırma uzayına rastgele yerleştirilmesi ile başlar. Şekil 2.55’de görüldüğü gibi 10 adet kaşif arı arama uzayına rastgele gönderilmiştir. Ardından bu  $n$  adet veri için uygunluk değeri hesaplanmıştır.

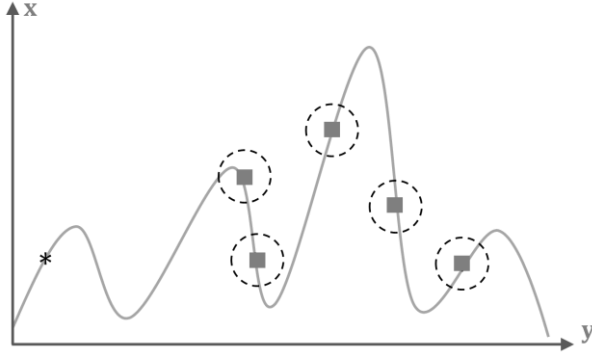
Şekil 2.55.  $n$  adet arının rastgele arama uzayına gönderimi

Kaşif arılarca ziyaret edilen  $n$  adet nokta için hesaplanan uygunluk değerlerinden en iyisine sahip olan  $m$  adet bölge belirlenir. Ayrıca bu  $m$  adet bölge içerisinde en iyi olan  $e$ , elit bölgeler, de belirlenir. Şekil 2.56’ da araştırma bölgesinin ve elit arılar bölgesinin nasıl belirlendiği sunulmaktadır.

Şekil 2.56.  $m$ , araştırma bölgesinin ve  $e$ , elit arılar bölgesinin seçimi

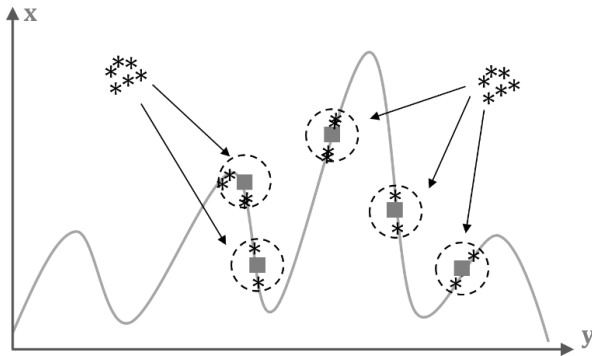
Daha sonra  $m$  adet bölge için bölge boyutu ( $ngh$ ) belirlenmektedir. Komşuluk çevresi aralığı olarak da bilinen ( $ngh$ ) boyutu komşuluk araması yapılacak bölge  $m$  adet bölgeye

gönderilecek takipçi arıların arama yapacakları bölgenin sınırlarını göstermektedir. Şekil 2.57’de komşuluk araması araştırması bölge boyutu ( $ngh$ ) seçimi sunulmaktadır.



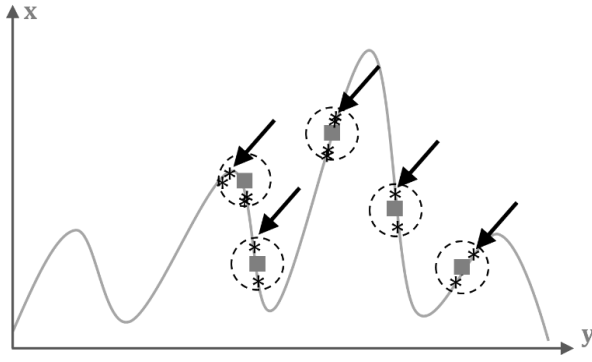
Şekil 2.57. Komşuluk araması araştırması bölge boyutu ( $ngh$ ) seçimi

Bölge boyutu belirlendikten sonra  $m$  adet bölgeye (komşuluk çevresi aralığına) takipçi arılar gönderilir. Seçilen bölgelerde komşuluk araması (bölge içinde en uygun noktaların araştırılması) için, daha umut verici çözümleri temsil eden en iyi  $e$  bölgeye seçilen diğer bölgelere göre daha fazla takipçi arı ( $nep$ ), diğer bölgelere ise daha az takipçi arı ( $nsp$ ) gönderilerek, detaylı arama yapılır. Elit arıların etrafına daha fazla arı göndererek çözüme yakın alternatifler arasında arama yapmak Arı Algoritmasını diğer algoritmalarından ayıran önemli bir özelliktir. Şekil 2.58’de takipçi arıların gönderimi sunulmaktadır.



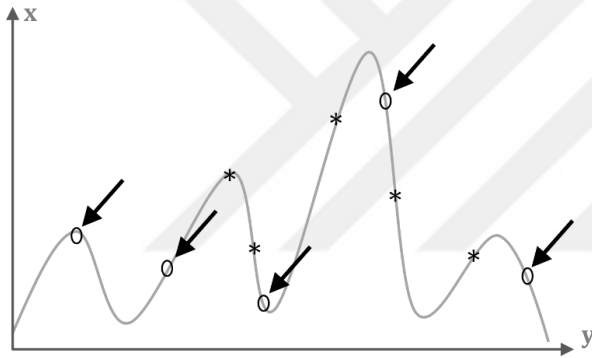
Şekil 2.58. Araştırma bölgesine takipçi arıların gönderimi

Takipçi arılar ile birlikte arama bölgesindeki tüm noktalar için uygunluk değerleri hesaplanarak Şekil 2.59’da görüldüğü gibi her bir araştırma bölgesindeki en uygun arılar belirlenir.



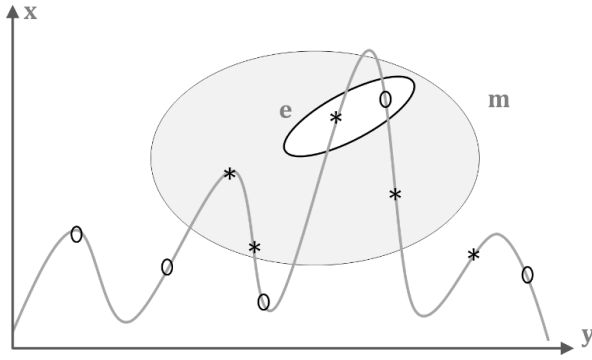
Şekil 2.59. Her bir araştırma bölgesindeki en uygun arıların belirlenmesi

Daha sonra her bir bölgedeki en iyi arı haricindeki diğer arılar bölgeden ayrılır ve popülasyondaki diğer arılar ( $n-m$ ) yeni potansiyel çözümler elde etmek için tekrar, rastgele olarak, araştırma uzayına yerleştirilirler (Şekil 2.60)



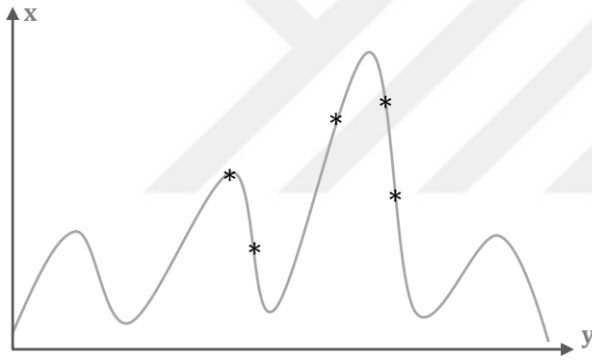
Şekil 2.60. Kalan arıların rastgele arama uzayına gönderimi

Popülasyondaki diğer arılar ( $n-m$ ) yeni potansiyel çözümler elde etmek için tekrar, rastgele olarak, araştırma uzayına yerleştirildikten sonra yeni durumda  $m$  adet bölge ve  $e$ , elit bölge seçimi yapılarak bölge boyutuna uygun takipçi arılar tekrar bu bölgelere gönderilir (Şekil 2.61). Böylelikle yerel arama ile gözden kaçabilecek optimum noktanın göz ardı edilmemiş olur.



Şekil 2.61. Yeni popülasyonda araştırma bölgesi ve elit arıların seçimi

Bir çevrim bu şekilde tamamlanmış olur. Optimizasyon durdurma kriteri (*itr*) sağlanana kadar devam ettirilir. Her bir iterasyonun sonunda yeni popülasyon; seçilen her bir bölgenin temsilcileri ve rastgele arama yapan kâşif arılar olmak üzere iki parçadan oluşur. İlk iterasyon sonucu optimum araştırma bölgesi Şekil 2.62’de sunulmaktadır.



Şekil 2.62. Optimum araştırma bölgesi

Arı Algoritması rastgele gönderilen arıların bulunduğu bölgeler ve bu bölgeler üzerinden ilerlemeyi sağlayarak uygun çözümler üretmeyi sağlayan önemli bir arama algoritmasıdır. Algoritmanın başarısı problemin doğru anlaşılması, doğru parametre tahmini ve komşuluk arama sınırlarının doğru belirlenmesi ile artırılabilir.

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

#### 3.1. Bulanık Mantık Tabanlı Karar Destek Sistemi Tasarımı

Girdi şekillendirme tekniği, robotik sistemlerin yerleşme zamanını ve konumlandırma hassasiyetini geliştirmek için önemli bir açık çevrim kontrol yöntemidir. Bu teknik aynı zamanda hareket sonucunda oluşan artık titreşimleri de en aza indirir. Tipik olarak, şekillendirilmiş komut profilleri, bir dizi darbenin katlanması veya istenen komut sinyali için özel fonksiyonların çözülmesiyle oluşturulur. Genel olarak, gerçek sistemler tam olarak modellenemez veya sistem parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi kolay değildir. Bu gibi durumlarda, girdi şekillendirici tabanlı kontrol işareti, doğal frekans ve sönüm oranı gibi tahmini sistem parametreleri kullanılarak belirlenir. Tahmin edilen sistem parametrelerindeki belirsizlik nedeniyle, şekillendiricinin gürbüzlüğü modelleme hatalarına karşı oldukça duyarsızdır. Bu konu robotik kontrol uygulamalarındaki komut sinyali üretimi için hayati bir tasarım konusu haline gelmektedir. Literatürde geliştirilmiş birçok gürbüz girdi şekillendirici vardır. Gürbüz girdi şekillendiricilerin tipik olarak, yavaş sistem cevaplarına yol açtığı ve daha uzun seyahat sürelerine sahip oldukları gözlemlenmiştir. Çalışmanın bu kısmında, uygun girdi şekillendiricilerinin seçimi için Bulanık Çıkarım Sistemi yaklaşımına dayalı yeni bir Karar Destek Sistemi (KDS) tasarlanmıştır. Tasarlanan yaklaşım, hassas konumlandırma sistemleri, vinç sistemleri, esnek robotik sistemleri vb. gibi istenilen robotik uygulamalar için uygun girdi şekillendirme tekniğini seçmektedir. Çalışmada Karar Destek Sistemi için toplamda on üç iyi bilinen girdi şekillendirme yönteminden en uygun olanını artık titreşim eliminasyon uygulamalarının seçimine yönelik Bulanık Mantık tabanlı bir Karar Destek Sistemi (BM-KDS) önerilmektedir. Tasarlanan sistemin yüksek performansını doğrulamak için simülasyonların ve deney sonuçlarının ayrıntıları verilmiştir. Deneysel çalışmalar doğrusal gezer vinç sistemi üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Geleneksel olarak, elektromekanik sistemler, güvenli ve hassas hareketler elde etmek için çok rijit ve ağır makine elemanları kullanılarak tasarlanmaktadır. Bu nedenle, taşıma işlemi yapan robot manipülatörler gibi sistemler, taşıma kapasitelerinden daha ağır ve daha büyüktür. Ağır ve büyük boyutlu bu tip sistemler, çalışma hızını sınırlar ve yüksek enerji tüketimine neden olur (Mohammed ve Tokhi, 2004). Son yıllarda, özellikle çevre sorunları ve enerji verimliliği konusundaki bilincin artması nedeniyle, daha etkili ve enerji verimli

sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum hali hazırda endüstriyel gelişimin önemli bir parçası olan robotik sistemler için de geçerlidir. Ağır ve büyük robotik sistemler, daha hafif ve esnek malzemelerle tasarlanabilirse, elektrik tüketimleri de bu değişime oranla azaltacaktır. Bununla birlikte, bu tür tasarımlar artık titreşim problemine sahiptir. Esnek sistemlerde; artık titreşimleri ortan kaldırmak için girdi şekillendirme teknikleri ile başarılı kontrolcüler tasarlanabilir.

Girdi şekillendirme teknikleri, açık çevrim kontrol yöntemlerinin bir parçası olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Girdi şekillendirme tekniği, özellikle yerleşme süresinin azaltılması ve artık titreşimlerin bastırılması sırasında konumlandırma hassasiyetinin artırılması için ileri besleme bir denetim yaklaşımıdır. Şekilli komut profilleri, istenen komut sinyali için çözüldükten sonra, şekillendirilmiş komut, istenmeyen salınımları ortadan kaldırır ve sistemin titreşimsiz hareketini sağlar. Bu doğrultuda, yolun şekli veya geometrisi önemli değildir ve şekillendirilmiş komut sinyalinin amacı, sistemi mümkün olduğunca hızlı bir noktadan diğerine hareket ettirmek ve sistemi büyük miktarda artık titreşim olmaksızın istenen noktada durdurmaktır.

Literatürde farklı duyarsızlık oranına sahip birçok girdi şekillendirme tekniği vardır. Farklı komut şekillendirme tekniklerinin kapsamlı incelemeleri Materyal ve Metot kısmında detaylı bir şekilde sunulmuştur. Tartışılan yöntemlerden farklı olarak çok sayıda girdi şekillendirici tasarım yapılabilir. Girdi şekillendirme tekniklerinde, gürbüzlük genellikle seyahat süresinin artmasıyla artmaktadır. Bununla birlikte, seyahat süresi ve gürbüzlük arasındaki ilişki (duyarsızlık verimi) bir yöntemden diğerine farklılık göstermektedir. Bu nedenle, dikkate alınan sistemin özelliklerine uygun girdi şekillendirme tekniğinin seçilmesi sistem performansını önemli ölçüde artıracaktır. Beklenen sistem performansına uygun girdi şekillendirme tekniğinin seçimi ve uygulaması uzmanlık gerektiren bir konudur. Bulanık Mantığın karmaşık karar verme durumlarını ele alabilecek karar verme sürecine etkili bir çözüm olduğunu düşünürsek, bu karmaşık karar verme süreci için bir çözüm sunabileceği düşünülmüştür.

Bulanık Mantık Tabanlı Karar Destek Sistemleri, diğer geleneksel karar verme tekniklerine göre birçok avantajı nedeniyle, son on yıl içinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Karar destek sistemleri sağlık alanında; kalp yetmezliği risk tahmininden, üretim alanında; makine elemanlarının seçimi, üretim planlaması ve takım durumu izleme uygulamalarına

kadar çok farklı alanlarda ve sistemlerde kullanılmaktadırlar (Sadeghian ve Sadeghian, 2016; Samuel, Asogbon, Sangaiah, Fang ve Li, 2017; Plitsos, Repoussis, Mourtos ve Tarantilis 2017; Cuka ve Kim, 2017).

Çalışmanın bu kısmında; parametre tahmin hatası ve seyahat süresi kriterlerine göre uygun girdi şekillendirme yönteminin seçimi için Bulanık Mantık tabanlı Karar Destek Sistemi (BM-KDS) önerilmiştir. Önerilen Bulanık Mantık temelli yaklaşım, uygun girdi şekillendiricinin seçiminde karar vericiler için uzman tavsiyesi sağlamayı amaçlamaktadır. Çizelge 3.1’de KDS için kullanılan girdi şekillendirici yöntemleri, denklemleri ve performans kriterleri vardır. Görüldüğü üzere bazı metotların seyahat süreleri çok kısa iken bazı metotların çok uzundur. Fakat metotların seyahat süreleri artarken gürbüzlükleri de artabilmektedir. Yani kimi metot parametrelerin hatalı tahmin edilmesine rağmen başarılı bir kontrol sağlarken kimisi istenen sonucu vermeyebilir. Örneğin bir liman vincini ele alalım vinç ile yük taşınırken yükün ağırlığı, yükün yerden yüksekliği, geometrisi vb. değişkenler sistemin temel parametrelerini değiştireceği için tek bir metotla veya aynı sistem parametreleri ile uygun girdinin üretilmesi mümkün değildir. Kaldı ki metot seçilecek olsa da hangi kriterlere göre veya belirlenen kriterlerin hangi aralığına göre hangi metodun seçilmesi gerektiği cevaplanması gereken önemli bir sorudur. Tüm bu sebeplerle sistemin duyarsızlığını artırmaya yönelik bir BM-KDS önerilmiştir.



Çizelge 3.1. KDS için seçilen girdi şekillendiriciler ve özellikleri

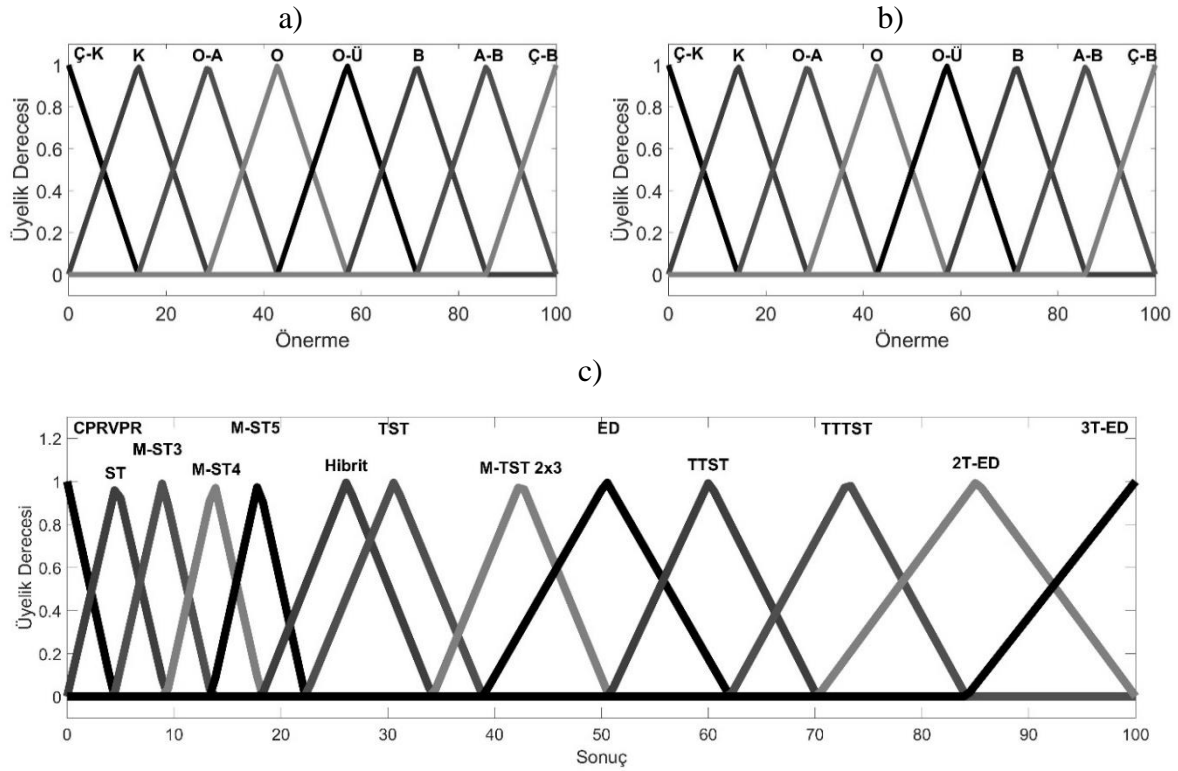
	Formülasyon	Seyahat Süresi ( $T_d$ )	Gürbüzlük	Duyarsızlık oranı
CPRVPR	$Y = \frac{L_1 R t}{2\pi} + \frac{L_2}{2\pi} [R t - \sin(R t)] + \frac{L_3 R t}{2\pi} + \frac{L_3}{2\pi} [1 - \cos(R t)]$ $L_1 = LR(R - 2\zeta\omega_n) / \omega_n^2 = L\tau_n(\tau_n - 2\zeta\tau) / \tau^2$ $L_2 = L(1 - R^2 / \omega_n^2) = L(1 - \tau_n^2 / \tau^2)$ $L_3 = 2L\zeta R / \omega_n = 2L\zeta\tau_n / \tau$	0,5	0,0585	0,117
ST	$ZV = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & K \\ 1+K & 1+K \\ 0 & 0.5T_d \end{bmatrix}$ $K = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}, T_d = 2\pi / \omega\sqrt{1-\zeta^2}$	0,5	0,063	0,126
M-ST3	$N - \text{impulse MISZV} = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & K_m & \dots & K_m^{i-1} & K_m^{N-1} \\ 1+M & 1+M & \dots & 1+M & 1+M \\ 0 & T_d & \dots & (i-1)T_d & (N-1)T_d \\ & N & \dots & N & N \end{bmatrix}$ $K_m = e^{-2\zeta\pi/N\sqrt{1-\zeta^2}}, M = K_m + \dots + K_m^{i-1} + K_m^{N-1}$ $T_d = 2\pi / \omega\sqrt{1-\zeta^2}$	0,665	0,082	0,124
M-ST4		0,749	0,090	0,121
M-ST5		0,799	0,094	0,1176
Hibrit	$Y = \frac{L_1 R t}{2\pi} - \frac{L_2}{2\pi} \sin(R t) + \frac{L_3}{2\pi} [1 - \cos(R t)]$	1	0,2754	0,2754
TST	$ZVD = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2K & K^2 \\ 1+2K+K^2 & 1+2K+K^2 & 1+2K+K^2 \\ 0 & 0.5T_d & T_d \end{bmatrix}$	1	0,2876	0,2876
M-TST 2X3	$\text{MISZVD} - 6 = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & K^2 & K^3 & K^4 & K^5 & K^7 \\ 1+M & 1+M & 1+M & 1+M & 1+M & 1+M \\ 0 & T_d & T_d & 2T_d & 5T_d & 7T_d \\ & 3 & 2 & 3 & 6 & 6 \end{bmatrix}$	1,16	0,332	0,286
ED	$EI = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 1 - (A_1 + A_3) & A_3 \\ 0 & t_2 & T_d \end{bmatrix}$ <p>1</p> $A_1 = 0.24968 + 0.24961V_{tol} + 0.80008\zeta + 1.23328V_{tol}\zeta + 0.49599\zeta^2 + 3.17316V_{tol}\zeta^2$ $A_3 = 0.25149 + 0.21474V_{tol} - 0.83249\zeta + 1.41498V_{tol}\zeta + 0.85181\zeta^2 - 4.90094V_{tol}\zeta^2$ $t_2 = \frac{\omega\sqrt{1-\zeta^2}}{2\pi} \left( 0.4999 + 0.46159V_{tol}\zeta + 4.26169V_{tol}\zeta^2 + 1.75601V_{tol}\zeta^3 \right. \\ \left. + 8.57843V_{tol}^2\zeta - 108.644V_{tol}^2\zeta^2 + 336.989V_{tol}^2\zeta^3 \right)$		0,40	0,40
TTST	$ZVDD = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 3K & 3K^2 & K^3 \\ B & B & B & B \\ 0 & 0.5T_d & T_d & 1.5T_d \end{bmatrix}$ $B = 1 + 3K + 3K^2 + K^3$	1,5	0,48	0,3135
TTTST	$ZVDDD = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 4K & 6K^2 & 4K^3 & K^4 \\ C & C & C & C & C \\ 0 & 0.5T_d & T_d & 1.5T_d & 2T_d \end{bmatrix}$ $C = 1 + 4K + 6K^2 + 4K^3 + K^4$	2	0,627	0,3135
2T-ED	$2HEI = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{12H} & \frac{1}{2} - A_1 & A_2 & A_1 \\ 0 & 0.5T_d & T_d & 1.5T_d \end{bmatrix}$	1,5	0,732	0,488
3T-ED	$3HEI = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{13H} & \frac{1-V_{tol}}{4} & 1 - 2(A_1 + A_2) & A_2 & A_1 \\ 0 & 0.5T_d & T_d & 1.5T_d & 2T_d \end{bmatrix}$	2	0,97	0,484

### 3.1.1. Bulanık mantık tabanlı karar verme yaklaşımı

Karar destek sistemleri, herhangi bir sistem veya durum için karar aşamasında mevcut olan bilgiden yararlanarak karar vermeyi kolaylaştıran sistemlerdir. Karar destek sistemleri, hem bilgisayar temelli, hem de insan temelli olarak veya her ikisinin birleşimi olarak tasarlanabilir. Çalışma kapsamında; bulanık mantık temelli bir seçim algoritmasına dayanan, hem algoritmik hem de nitel bir bilgi tabanlı bir karar destek sistemi yaklaşımı önerilmiştir.

Bulanık mantık tekniklerini kullanarak karar vermeye kural tabanlı bir yaklaşım; belirsiz muğlak ifadeyi, sonlu sayıda sonuca bağlayan bir dizi kural olarak düşünebilir. Bu tür sistemlerin bilgi tabanı iki bileşenden oluşur: dilsel terimler tabanı ve bulanık kurallar tabanı (Balazinski ve Bellerose, 1994). Birincisi, bulanık girdiler ve bulanık çıktılar olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Genel olarak, her ikisi birden fazla giriş ve çıkış içerebilir. Bununla birlikte bu çalışma, iki girişli ve tekli çıkışlı bir sistemle sınırlandırılmıştır. Hesaplamaların basitliği açısından ve sezgisel algoritmalara uygunluğu için girdiler ve çıktılar üzerinde yalnızca simetrik üçgen üyelik fonksiyonları kullanılması uygun görülmüştür.

Şekil 3.1 girdilerin ve çıktılarının üyelik fonksiyonları sunulmaktadır. Şekil 3.1 a'da parametre tahmin hatası için üyelik fonksiyonları, Şekil 3.1 b'de seyahat süresi için üyelik fonksiyonları sunulmaktadır. Şekil 3.1 c'de ise girdi şekillendirici seçimi için üyelik fonksiyonları sunulmaktadır. Girdi şekillendirici seçimi için üyelik fonksiyonlarının ağırlıkları, girdi şekillendiricilerinin duyarsızlık oranları dikkate alınarak belirlenmiştir.



Şekil 3.1. Üyelik fonksiyonları a) Parametre tahmin hatası b) Seyahat süresi c) Girdi şekillendirici seçimi

Üyelik fonksiyonunun ağırlıkları ve girdi şekillendirici seçenekleri alternatifinin derecelendirme değerleri için dilsel terimler atanmıştır. Dilsel terimler doğal dilde kelimeler veya cümleler olarak tanımlanabilir. Üyelik fonksiyonları büyük ve küçük gibi dilsel terimlerle değerlendirilebilir. Uygun girdi şekillendirici alternatiflerini belirlemek için, derecelendirme kriterleri, Çok Küçük, Küçük, Orta-Altı, Orta, Orta-Üstü, Büyük, Az-Büyük ve Çok-Büyük olarak tanımlanmıştır. Bu dilsel terimler, Çizelge 3.2’de sunulduğu gibi üçgen üyelik fonksiyonları ile ifade edilirken, sekiz dilsel değişkenin üyelik işlevleri Şekil 3.1’de sunulmaktadır.

Çizelge 3.2. Seyahat süresi ve parametre tahmin hatası dilsel terimler ve ağırlıkları

Seyahat süresi			Parametre tahmin hatası				
Dilsel terim	Ağırlıklar		Dilsel terim	Ağırlıklar			
Çok Küçük (Ç-K)	[-14,29	0	14,29]	Çok Küçük (Ç-K)	[-14,29	0	4,29]
Küçük (K)	[0	14,29	28,57]	Küçük (K)	[0	14,29	28,57]
Orta Altı (O-A)	[14,29	28,57	42,86]	Orta Altı (O-A)	[14,29	28,57	2,86]
Orta (O)	[28,57	42,86	57,14]	Orta (O)	[28,57	42,86	57,14]
Orta Üstü (O-Ü)	[42,86	57,14	71,43]	Orta Üstü (O-Ü)	[42,86	57,14	71,43]
Büyük (B)	[57,14	71,43	85,71]	Büyük (B)	[57,14	71,43	5,71]
Az Büyük (A-B)	[71,43	85,71	100]	Az Büyük (A-B)	[71,43	85,71	100]
Çok Büyük (Ç-B)	[85,71	100	114,3]	Çok Büyük (Ç-B)	[85,71	100	114,3]

Çıkış dilsel terimleri için seçimi yapılacak girdi şekillendiriciler atanmıştır. Ağırlıkları ise girdi şekillendiricilerin duyarsızlık oranlarına göre belirlenmiştir. Girdi şekillendirici seçimi için belirlenen üçgen üyelik fonksiyonları Çizelge 3.3’de sunulmuştur.

Çizelge 3.3 Girdi şekillendirici seçimi için dilsel terimler ve ağırlıkları

Dilsel terim	Ağırlıklar			
CPRVPR	[-4,38	0	4,38]	
ST	[	0	4,64	9,28]
M-ST3	[4,38	8,94	13,5]	
M-ST4	[9,28	13,75	18,2]	
M-ST5	[13,5	17,9	22,3]	
Hibrit	[18,2	26,16	34,2]	
TST	[22,3	30,61	38,92]	
M-TST 2x3	[63	42,47	50,74]	
ED	[38,92	50,48	62,04]	
TTST	[50,74	60,08	70,22]	
TTTST	[62,04	73,1	84,16]	
2T-ED	[70,22	85,12	100]	
3T-ED	[84,16	100	115,84]	

Çizelge 3.4 ile sunulan kural tablosu, incelenen temel giriş şekillendirme yöntemleri için farklı parametre tahmin hataları ve seyahat süresi değerleri için sistem yanıtları incelenerek tasarlanmıştır. Bulanık çıktıların kesin çıktılara dönüştürülmesinde ağırlık merkezi metodu ile durulaştırma işlemi uygulanmıştır. Buna göre, uygulanacak girdi şekillendirici için sayısal değerler elde edilebilmektedir.

Çizelge 3.4. Kural tablosu

		Parametre Tahmin Hatası							
		Ç-K	K	O-A	O	O-Ü	B	A-B	Ç-B
Sevhat Süresi	Ç-K	CPRVPR	CPRVPR	ST	M-ST3	M-ST4	M-ST5	Hibrit	TST
	K	CPRVPR	ST	M-ST3	M-ST4	M-ST5	Hibrit	TST	M-TST 2X3
	O-A	ST	M-ST3	M-ST4	M-ST5	Hibrit	TST	M-TST 2X3	ED
	O	M-ST3	M-ST4	M-ST5	Hibrit	TST	M-TST 2X3	ED	TTST
	O-Ü	M-ST4	M-ST5	Hibrit	TST	M-TST 2X3	ED	TTST	TTTST
	B	M-ST5	Hibrit	TST	M-TST 2X3	ED	TTST	TTTST	2T-ED
	A-B	Hibrit	TST	M-TST 2X3	ED	TTST	TTTST	2T-ED	3T-ED
	Ç-B	TST	M-TST 2X3	ED	TTST	TTTST	2T-ED	3T-ED	3T-ED

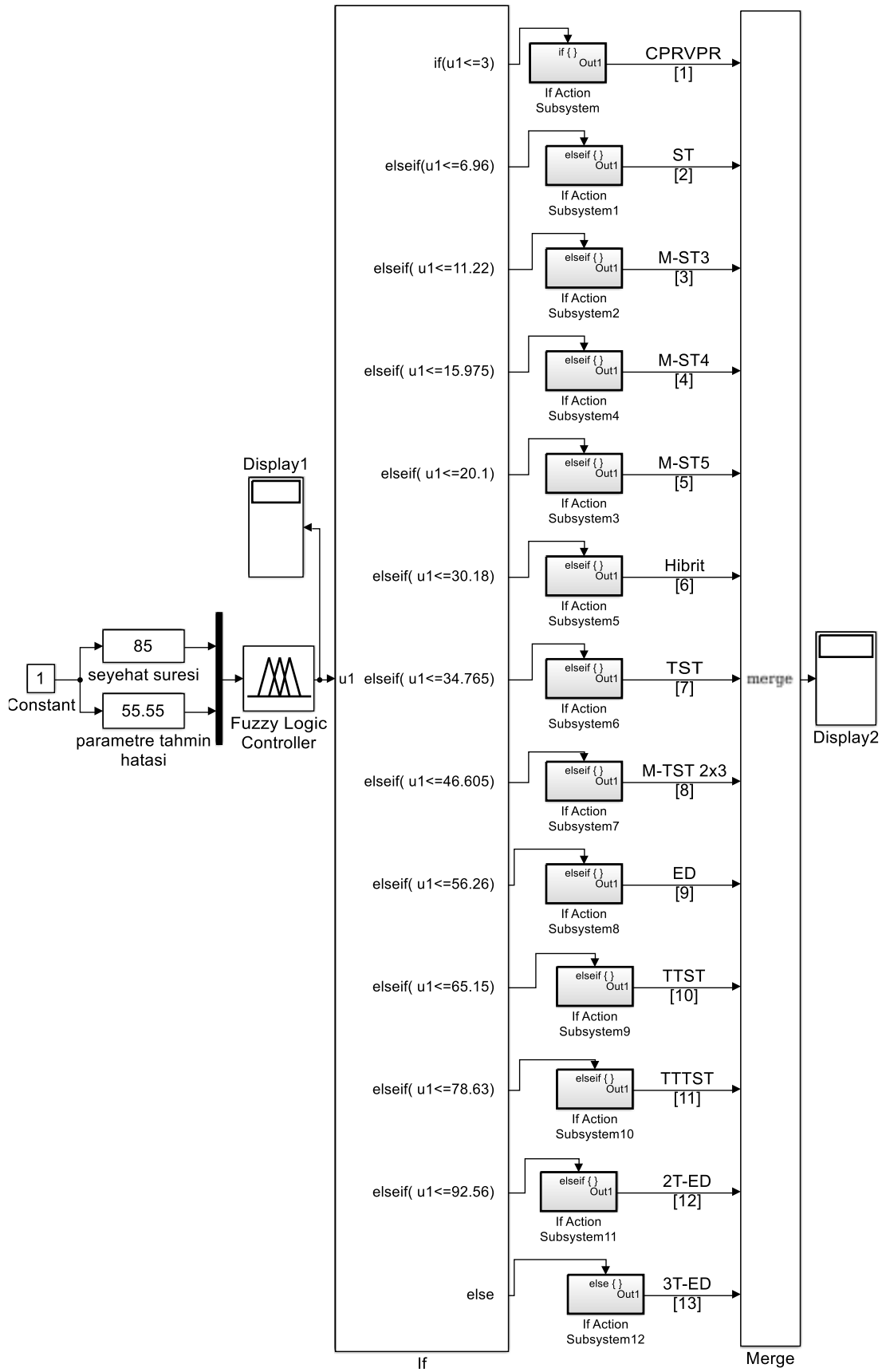
### 3.1.2. Uygun girdi şekillendirici seçimi ve uygulaması

Girdi şekillendirme yöntemlerinin başarılı bir şekilde uygulanması, fiziksel sistemin sönüm oranının ve doğal frekans özelliklerinin doğru tahminini veya belirlenmesini gerektirir. Bununla birlikte, herhangi bir sistemin, özellikle esnek sistemlerin matematiksel modelleri tam ve kesin bir şekilde belirlenemeyebilir. Şekillendirilmiş girdi sinyalinin, sistem parametrelerinin çeşitliliğine veya sistem üzerindeki çevresel etkilere göre ayarlanması gereken bazı durumlar vardır. Bu, esas olarak değişken koşulların sistem cevabını etkilemesinden kaynaklanmaktadır. Gürbüz metotların avantajı, sistem doğal frekansının hatalı tahminlerine karşı duyarsız olduğu geniş bir frekans aralığına sahip olmalarıdır. Bu nedenle, seçilen metodun belirsiz sistemlere yönelik gürbüzlüğü, girdi şekillendirme yöntemleri için önemli bir performans karşılaştırma aracıdır.

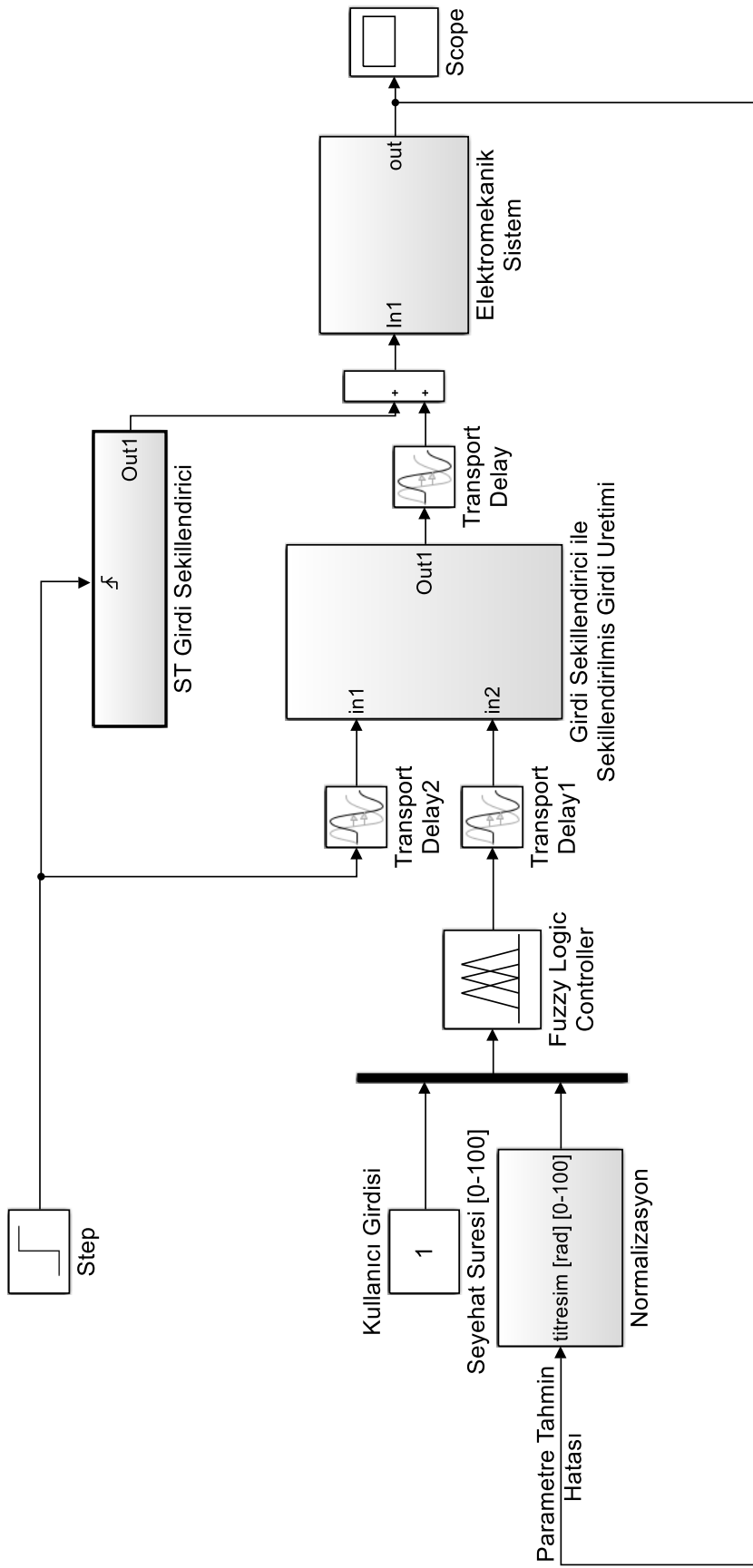
Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, literatürde birçok girdi şekillendirme tekniği vardır. Bu tekniklerin farklı çalışma hızlarına, gürbüzlüklere ve duyarsızlık oranlarına sahip olduğu görülmektedir. Artık titreşim kontrol uygulamalarının her birinin, sistemin özel çalışma koşullarına göre ayarlanması gerekmektedir. Bu nedenle, titreşim eliminasyon uygulamaları kendi özel koşullarına bağlı olarak değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, artık titreşim kontrol problemi için uygun tekniği seçme işlemi bir uzmanlık konusu haline gelmektedir.

Bu noktada sorulması gereken bazı sorular vardır. Örneğin, “Sistem özellikleriniz ne kadar doğru belirlendi? ” , “Sisteminizin ne kadar hızlı cevap vermesi gerekiyor veya hızlı cevap verebilir? ” , “Sisteminiz parametre tahmin hatalarına karşı ne derece toleranslı? ”. Bu ve benzeri soruların cevaplarına bağlı olarak, seçilen girdi şekillendirme yöntemi ve ayarları farklılıklar gösterir. Çalışma kapsamında değerlendirilen temel girdi şekillendiricilerinin gürbüzlüğü, seyahat süreleri ve duyarsızlık oranları, önceki bölümlerde ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu bölümde, herhangi bir uygulama için uygun girdi şekillendirme tekniğini öneren bir karar destek sisteminin uygulaması anlatılmaktadır. Şekil 3.2’de karar destek sistemi için girdi şekillendiricinin seçimi blok gösterimi sunulmaktadır.





Şekil 3.2. Girdi şekillendirici seçimi



Şekil 3.3. BM-KDS ve uygulaması



BM-KDS yaklaşımı iki aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada, söz konusu sistem için parametre tahmin hatasının belirlenmesi aşamasında bir ön değerlendirme sistemi kurulmuştur. Bu amaçla, sistem ST girdi şekillendirici ile test edilmiş ve kullanıcı tarafından sağlanan doğal frekans ve sönüm oranı parametreleri ile girdi komutu oluşturulmuştur.

Üretilen girdinin sisteme uygulanmasından sonra, kalan artık titreşim yüzdesi belirlenerek bu değer; parametre tahmin hatası değeri için ön bilgi olarak kullanılmaktadır. Artık titreşim değeri Çizelge 3.5 ile sunulduğu gibi maksimum ve minimum değerler belirlenerek 0-100 arasına normalize edilerek bulanık çıkarım birimine bilgi olarak gönderilmektedir. Ön değerlendirme sürecinde Sıfır Titreşim girdi şekillendirici kullanılmasının sebebi; ST girdi şekillendirici, en temel girdi şekillendirme yöntemlerinden birisidir ve modelleme hatalarına karşı oldukça duyarlıdır. Ayrıca hassasiyet eğrisi doğrusal bir karaktere sahiptir ve artık titreşimin ara değerleri için normalize edilen değer basit hesaplamalarla elde edilebilmektedir.

Çizelge 3.5’de parametre tahmin hatası değerleri için ön değerlendirme sonuçları sunulmaktadır. Tablodaki veriler, 21 farklı kullanıcı tanımlı belirsizlik tabanlı denemeye dayanan çalışma ile elde edilmiştir. Çizelge 3.5’de artık titreşim değerleri, normalize frekansa ( $\omega_n^*/\omega_n$ ) göre belirlenmiştir. Burada  $\omega_n^*$ , tahmini doğal frekans değeri ve  $\omega_n$ , sistemin doğal frekansıdır. Yüzde artık titreşim değeri, parametre tahmin hatası seviyesini belirlemek için kullanılmaktadır. Buna göre, artık titreşim değeri %70.71 veya daha fazla olması durumunda, normalize edilmiş değer 100’e eşit olarak ayarlanmaktadır. Diğer taraftan, artık titreşim değeri %0 ise, normalize edilmiş değer 0’a eşit olarak ayarlanmaktadır. Normalize edilen değerlerin 0’dan 100’e doğru artması demek sistem için parametre tahmin hatasının arttığı anlamına gelmektedir.

Çizelge 3.5. Parametre tahmin hatası (benzetim) değerleri için ön değerlendirme sonuçları

Deney No	Normalize Frekans ( $\omega_n^*/\omega_n$ )	Yüzde Artık Titreşim	Normalize Değer	Deney No	Normalize Frekans ( $\omega_n^*/\omega_n$ )	Yüzde Artık Titreşim	Normalize Değer
1.	yukarısı	>70,71	100	13.	0,95	7,85	11,11
2.	1,50	70,71	100	14.	0,90	15,66	22,15
3.	1,45	64,95	91,86	15.	0,85	23,35	33,03
4.	1,40	58,78	83,13	16.	0,80	30,9	43,70
5.	1,35	52,25	73,90	17.	0,75	38,27	54,13
6.	1,30	45,4	64,21	18.	0,70	45,4	64,21
7.	1,25	38,27	54,13	19.	0,65	52,25	73,90
8.	1,20	30,9	43,70	20.	0,60	58,78	83,13
9.	1,15	23,35	33,03	21.	0,55	64,95	91,86
10.	1,10	15,66	22,15	22.	0,50	70,71	100
11.	1,05	7,85	11,11	23.	aşağısı	>70,71	100
12.	1	0	0				

İkinci aşamada, kullanıcının seyahat süresi değerlerini (0 ile 100 arasında) seçmesi beklenir. Seçimin büyüklüğü seyahat süresinin büyüklüğü ile orantılı olarak ayarlanmıştır. Bu değer küçük seçilmesi hızlı sistem cevabı istendiği anlamına gelmektedir. Seyahat süresi ve parametre tahmin hatası değerleri, karar verme sürecinde girdi şekillendirici alternatiflerinin derecesini belirlemesini sağlar. Bu değer büyüklüğü uygulanacak girdi şekillendirici yönteminin seçiminde kullanılır. 64 kurallı bulanık çıkarım yapısında bulanıklaştırma işlemi için minimum operatörü, durulaştırma işlemi için ağırlık merkezi metodu kullanılmaktadır. Daha sonra seçilen en uygun girdi şekillendirici ile girdi profili oluşturularak sisteme uygulanır. İncelenen girdi şekillendiriciler farklı parametre tahmin hatası değerleri için doğrusal gezer vinç sisteminde uygulanarak sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur.

### 3.2. Doğrusal Gezer Vinç Sistemi için BM-KDS Deneysel Uygulamaları

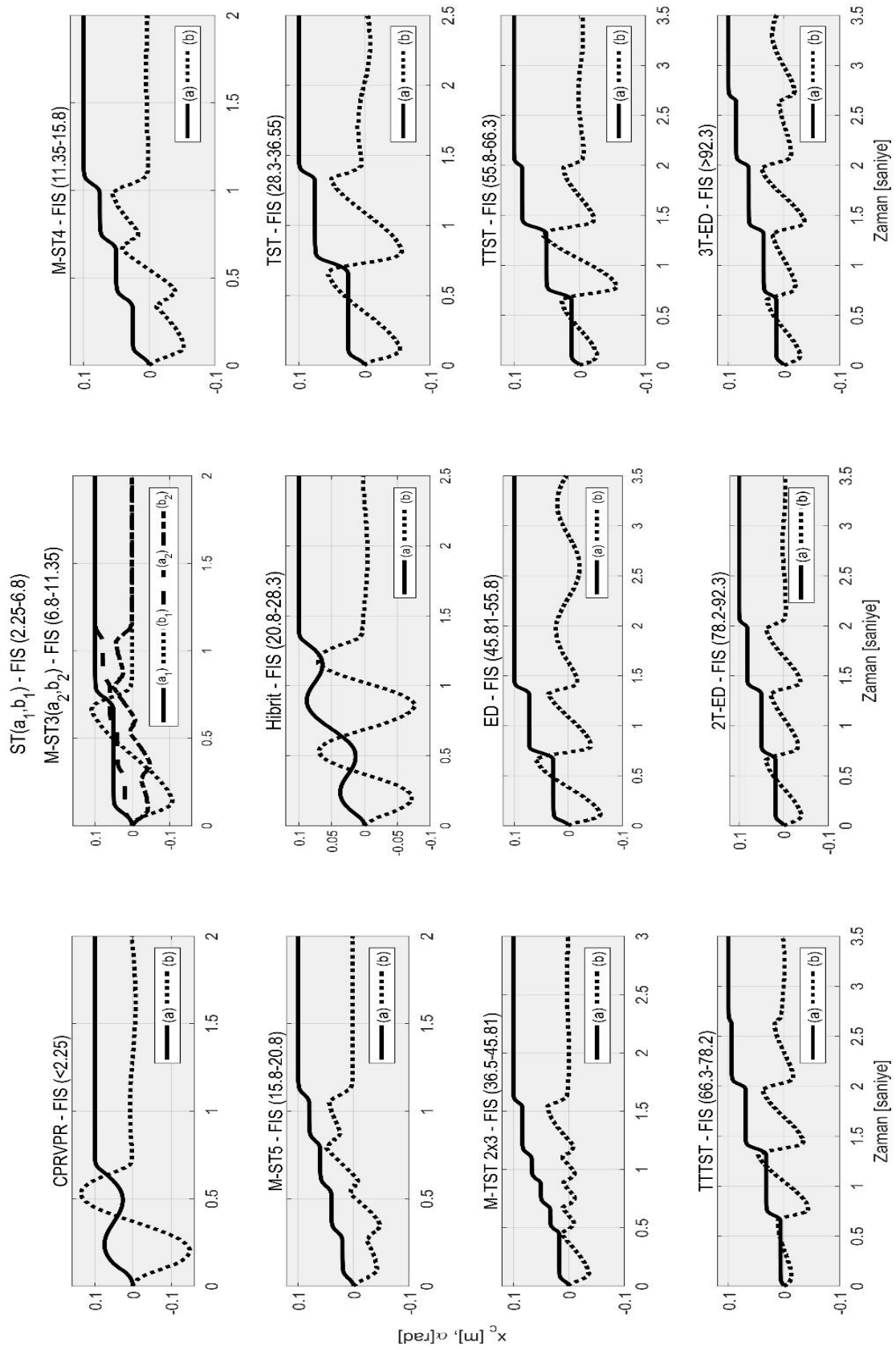
Karar destek sistemi gerçek uygulaması için Çizelge 3.6'da, parametre tahmin hatası değerleri için ön değerlendirme sonuçları sunulmaktadır. Tablodaki veriler, 21 farklı kullanıcı tanımlı belirsizlik tabanlı denemeye dayanan deneysel çalışma ile elde edilmiştir. Çizelge 3.6'da, artık titreşim değerleri, normalize frekans ( $\omega_n^*/\omega_n$ ) değerlerine göre belirlenmiştir. Burada  $\omega_n^*$ , tahmini doğal frekans değeri ve  $\omega_n$ , sistemin doğal frekansıdır. Artık titreşim değeri, parametre tahmin hatasının büyüklüğünü belirlemek için

kullanılmaktadır. Buna göre, artık titreşim değeri 0.162rad veya daha fazla olması durumunda, normalize edilmiş değer 100'e eşit olarak ayarlanmaktadır. Diğer taraftan, artık titreşim değeri 0rad ise, normalize edilmiş değer 0'a eşit olarak ayarlanmaktadır. Normalize değerın sıfır olması parametre tahmininde hata yapılmadığı anlamına gelmektedir. 0 ile 100 arasında normalize edilmiş değer parametresi tahminlerindeki belirsizlik düzeyini ifade etmektedir.

Çizelge 3.6. Parametre tahmin hatası (deneysel) değerleri için ön değerlendirme sonuçları

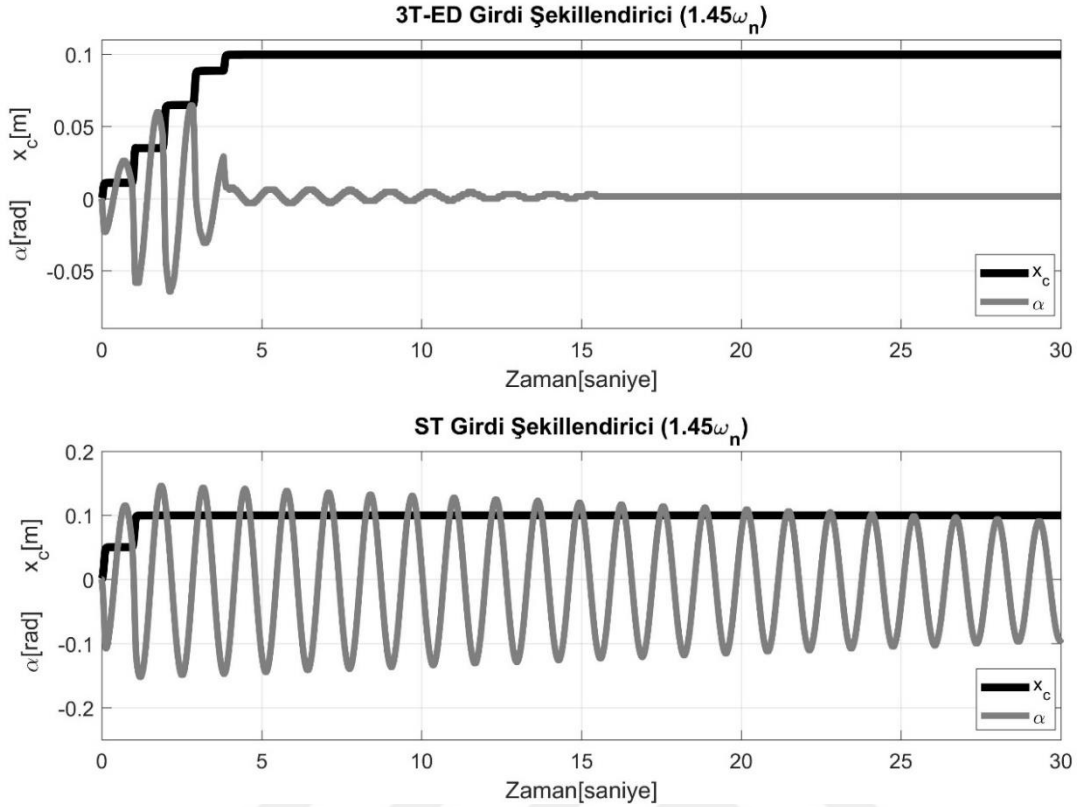
Deney No	Normalize Frekans ( $\omega_n^*/\omega_n$ )	Artık Titreşim [rad]	Normalize Değer	Deney No	Normalize Frekans ( $\omega_n^*/\omega_n$ )	Artık Titreşim [rad]	Normalize Değer
1.	yukarısı	>0,162	100	13.	0,95	0,018	11,11
2.	1,50	0,162	100	14.	0,90	0,036	22,22
3.	1,45	0,151	93,2	15.	0,85	0,055	33,95
4.	1,40	0,136	83,95	16.	0,80	0,071	43,82
5.	1,35	0,122	75,3	17.	0,75	0,090	55,55
6.	1,30	0,106	65,43	18.	0,70	0,106	65,43
7.	1,25	0,090	55,55	19.	0,65	0,122	75,3
8.	1,20	0,071	43,82	20.	0,60	0,136	83,95
9.	1,15	0,055	33,95	21.	0,55	0,151	93,2
10.	1,10	0,036	22,22	22.	0,50	0,162	100
11.	1,05	0,018	11,11	23.	aşağısı	>0,162	100
12.	1	0	0				

Şekil 3.4'de parametre tahmin hatası ve kullanıcı tanımlı seyahat süresi değerleri için karar mekanizmasından alınan Bulanık Mantık çıktı (FIS) değerlerinin hangi aralıklarında hangi metodun seçileceği belirtilmiştir. Ayrıca incelenen tüm metotlar için parametre tahmin hatasının 0 olduğu durumlardaki sistem cevapları sunulmuştur.



Bölüm 2.2.1’de sunulan doğrusal gezer vinç sisteminin birim basamak girdi cevabı incelendiğinde artık titreşimin maksimum değeri 0.224rad değerine karşılık geldiği görülmüştür. Gerçek sistem uygulamalarında kabul edilebilir artık titreşim değeri maksimum titreşimin %5’ine kadar kabul edilmektedir. Yapılan çalışmalarda sistem cevabının kabul edilebilir artık titreşim seviyesine çekilmesi amaçlanmıştır.

Şekil 3.5’de  $1,45 \omega_n$  modelleme frekansı için 3T-ED ve ST girdi şekillendirici cevabı sunulmaktadır. Girdi şekillendiricinin seçim aşamasında sisteme  $1,45 \omega_n$  modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici uygulanmış ve cevap olarak 0,151rad değerine karşılık gelen artık titreşim değeri alınmıştır. Bu değer Çizelge 3.6’ya göre 0-100 aralığına normalize edilerek 93,2 değeri elde edilmiştir. Bu değer büyüklüğü sistem parametre hatası ile doğru orantılıdır. Yani tahmin edilen modelleme frekansı oldukça hatalı tahmin edilmiştir. Bu sebeple seyahat süresi biraz daha uzun seçilerek sistemden daha gürbüz bir cevap alınması amaçlanmıştır. Tasarlanan Bulanık Mantık tabanlı Karar Destek Sistemi için parametre tahmin hatası 93,2 ve seyahat süresi 100 olarak belirlenen girdiler için BM-KDS uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak 3T-ED girdi şekillendiriciyi önermiştir. Sistem cevabı aynı modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici ile karşılaştırılmıştır.

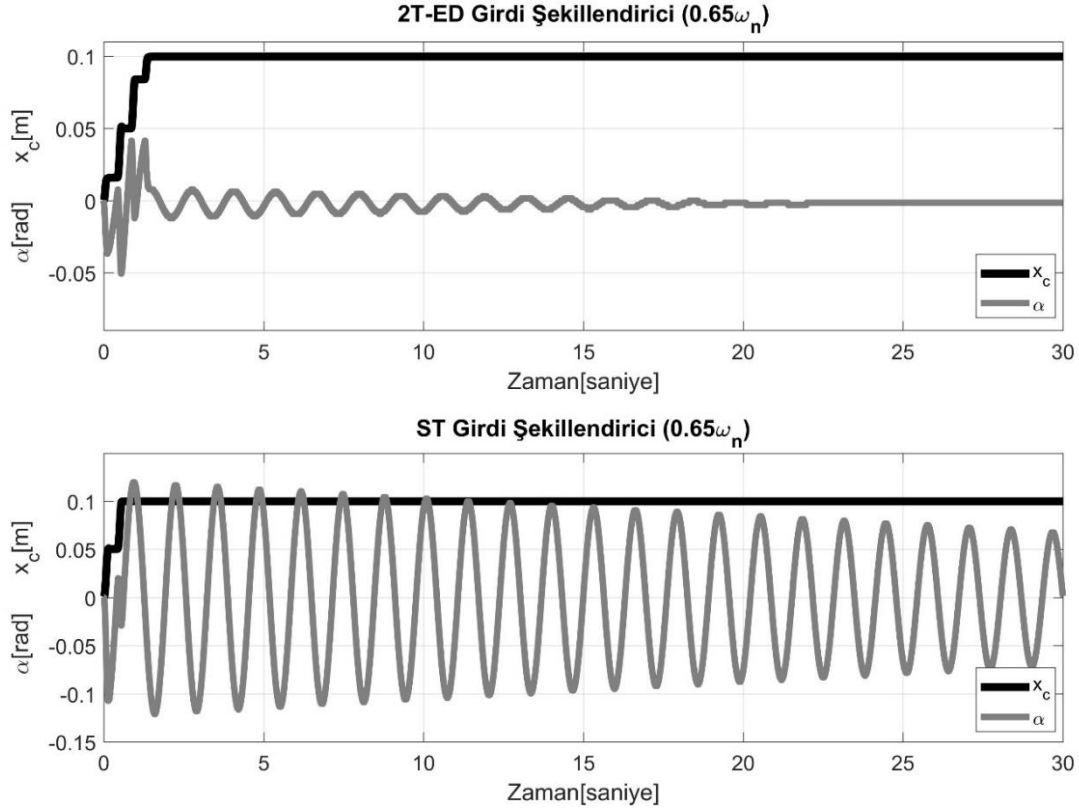


Şekil 3.5.  $1,45 \omega_n$  modelleme frekansı için 3T-ED ve ST girdi şekillendirici cevabı

Grafikler incelendiğinde; 3T-ED girdi şekillendirici için artık titreşim değeri  $0,0077\text{rad}$  değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. ST girdi şekillendirici için ise bu değer  $0,151\text{rad}$  değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. Maksimum artık titreşim değeri  $0,224\text{rad}$  değeri için 3T-ED girdi şekillendirici artık titreşim değeri %3,4 iken ST girdi şekillendirici artık titreşim değeri ise %67,4 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda  $1,5T_d$  kadar bir zaman gecikmesi ile artık titreşim değeri %5 kabul edilebilir titreşim değerinin altına çekilmiştir.

Şekil 3.6'da  $0,65 \omega_n$  modelleme frekansı için 2T-ED ve ST girdi şekillendirici cevabı sunulmaktadır. Girdi şekillendiricinin seçim aşamasında sisteme  $0,65 \omega_n$  modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici uygulanmış ve cevap olarak  $0,122\text{rad}$  değerine karşılık gelen artık titreşim değeri alınmıştır. Bu değer Çizelge 3.6'ya göre 0-100 aralığına normalize edilerek 75,3 değeri elde edilmiştir. Bu değer büyüklüğü sistem parametre hatası ile doğru orantılıdır. Yani tahmin edilen modelleme frekansı oldukça hatalıdır. Bu sebeple seyahat süresi biraz daha uzun seçilerek sistemden daha gürbüz bir cevap alınması amaçlanmıştır. Tasarlanan Bulanık Mantık tabanlı Karar Destek Sistemi için parametre tahmin hatası 75,3 ve seyahat süresi 90 olarak belirlenen girdiler için BM-KDS

uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak 2T-ED girdi şekillendiriciyi önermiştir. Sistem cevabı aynı modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici ile karşılaştırılmıştır.

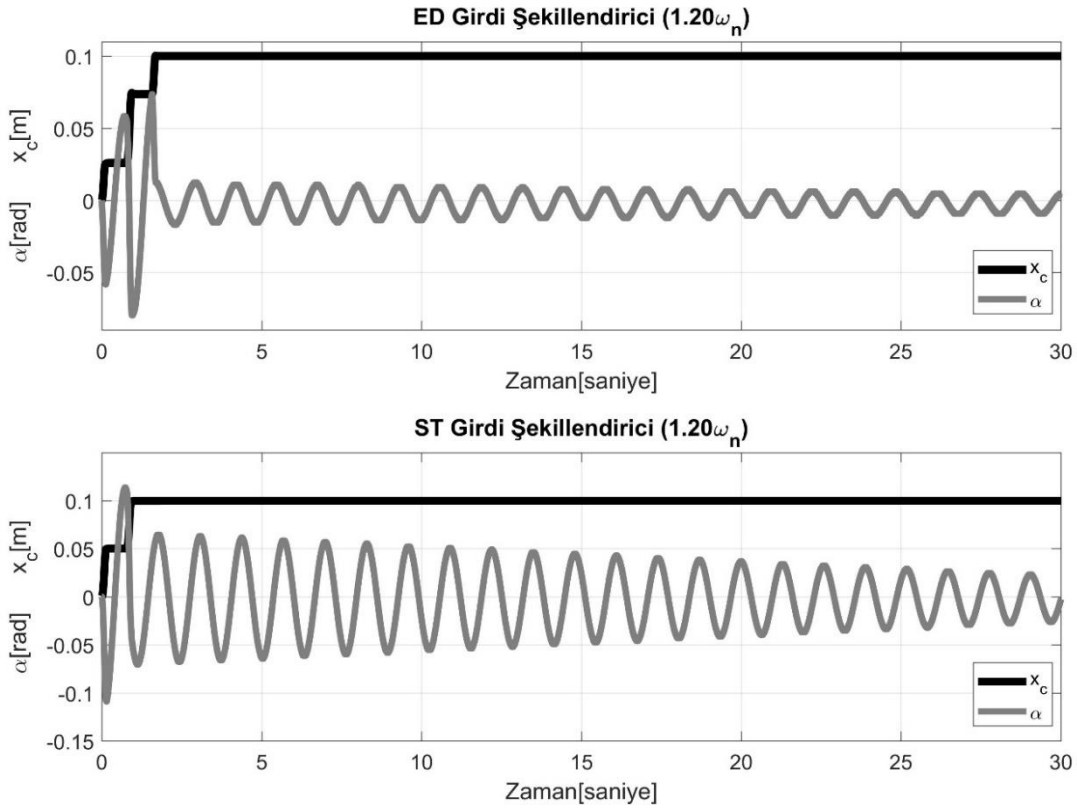


Şekil 3.6.  $0,65 \omega_n$  modelleme frekansı için 2T-ED ve ST girdi şekillendirici cevabı

Grafikler incelendiğinde; 2T-ED girdi şekillendirici için artık titreşim değeri  $0,0079\text{rad}$  değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. ST girdi şekillendirici için ise bu değer  $0,122\text{rad}$  değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. Maksimum artık titreşim değeri  $0,224\text{rad}$  değeri için 2T-ED girdi şekillendirici artık titreşim değeri %3,5 iken ST girdi şekillendirici artık titreşim değeri ise %54,4 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda  $1T_d$  kadar bir zaman gecikmesi ile artık titreşim değeri %5 kabul edilebilir titreşim değerinin altına çekilmiştir.

Şekil 3.7’de  $1,20 \omega_n$  modelleme frekansı için ED ve ST girdi şekillendirici cevabı sunulmaktadır. Girdi şekillendiricinin seçim aşamasında sisteme  $1,20 \omega_n$  modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici uygulanmış ve cevap olarak  $0,071\text{rad}$  değerine karşılık gelen artık titreşim değeri oluşmuştur. Bu değer Çizelge 3.6’ya göre 0-100 aralığına normalize edilerek 43,82 değeri elde edilmiştir. Bu değer  $0,071\text{rad}$  değeri ile sistem parametre

hatası ile doğru orantılıdır. Yani tahmin edilen modelleme frekansı oldukça hatalıdır. Bu sebeple seyahat süresi biraz daha uzun seçilerek sistemden daha gürbüz bir cevap alınması amaçlanmıştır. Tasarlanan Bulanık Mantık tabanlı Karar Destek Sistemi için parametre tahmin hatası 43,82 ve seyahat süresi 75 olarak belirlenen girdiler için BM-KDS sistemi uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak ED girdi şekillendiriciyi önermiştir. Sistem cevabı aynı modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici ile karşılaştırılmıştır.

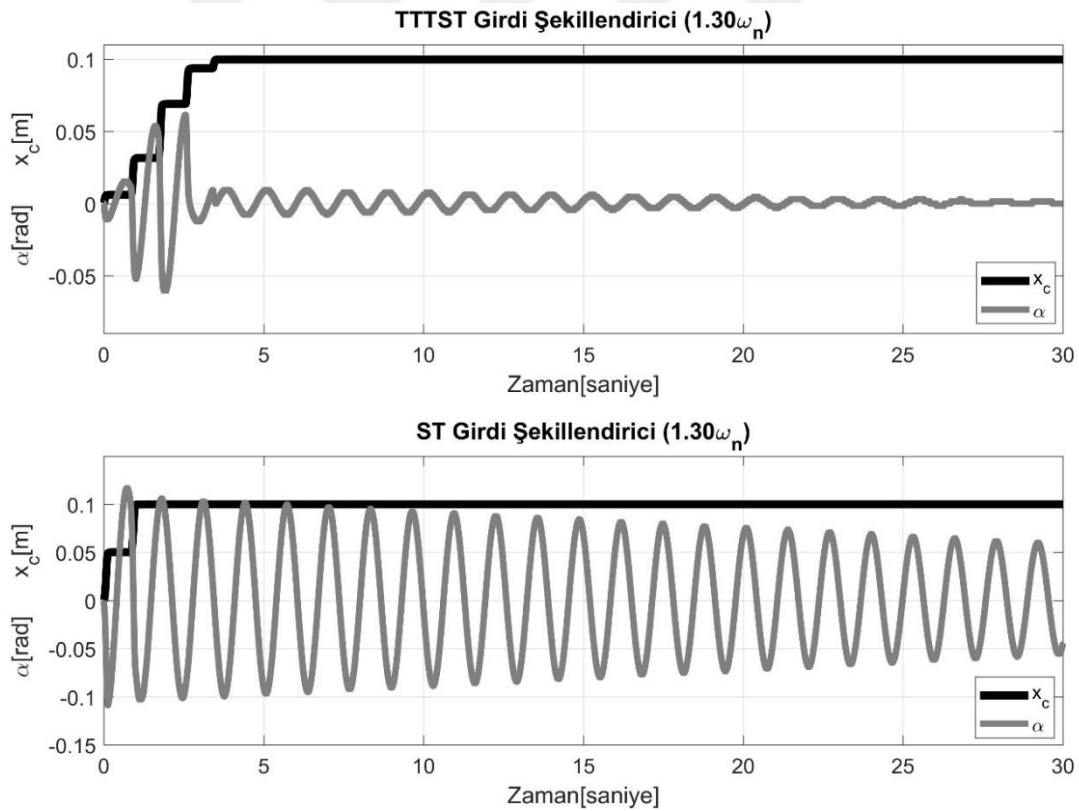


Şekil 3.7.  $1,20 \omega_n$  modelleme frekansı için ED ve ST girdi şekillendirici cevabı

Grafikler incelendiğinde; ED girdi şekillendirici için artık titreşim değeri 0,012rad değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. ST girdi şekillendirici için ise bu değer 0,071rad değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. Maksimum artık titreşim değeri 0,224rad değeri için ED girdi şekillendirici titreşim değeri %5,3 iken ST girdi şekillendirici artık titreşim değeri ise %31,6 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda  $0,5T_d$  kadar bir zaman gecikmesi ile artık titreşim değeri yaklaşık %5 kabul edilebilir titreşim değerine çekilmiştir.



Şekil 3.8’de  $1,30\omega_n$  modelleme frekansı için TTTST ve ST girdi şekillendirici cevabı sunulmaktadır. Girdi şekillendiricinin seçim aşamasında sisteme  $1,30\omega_n$  modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici uygulanmış ve cevap olarak  $0,106\text{rad}$  değerine karşılık gelen artık titreşim değeri alınmıştır. Bu değer Çizelge 3.6’ya göre 0-100 aralığına normalize edilerek 65,43 değeri elde edilmiştir. Bu değerın büyüklüğü sistem parametre hatası ile doğru orantılıdır. Yani tahmin edilen modelleme frekansı oldukça hatalıdır. Bu sebeple seyahat süresi biraz daha uzun seçilerek sistemden daha gürbüz bir cevap alınması amaçlanmıştır. Tasarlanan Bulanık Mantık tabanlı Karar Destek Sistemi için parametre tahmin hatası 65,43 ve seyahat süresi 85 olarak belirlenen girdiler için BM-KDS sistemi uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak TTTST girdi şekillendiriciyi önermiştir. Sistem cevabı aynı modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici ile karşılaştırılmıştır.

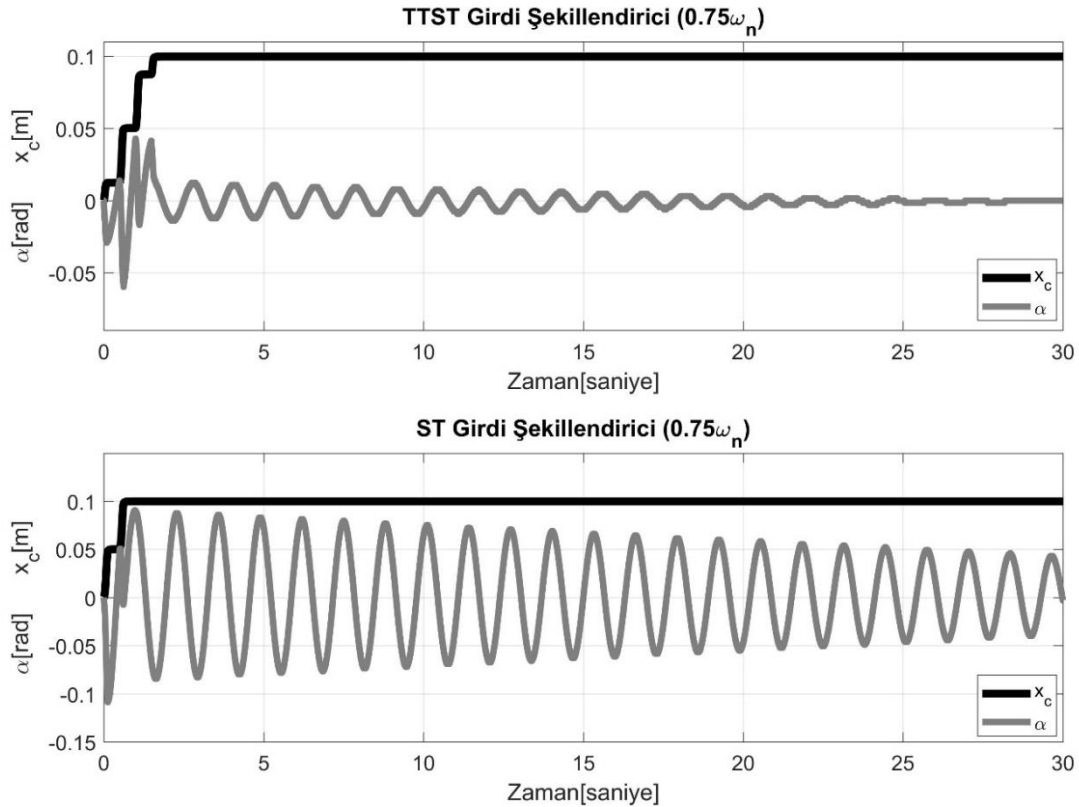


Şekil 3.8.  $1,30\omega_n$  modelleme frekansı için TTTST ve ST girdi şekillendirici cevabı

Grafikler incelendiğinde; TTTST girdi şekillendirici için artık titreşim değeri  $0,0093\text{rad}$  değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. ST girdi şekillendirici için ise bu değerın  $0,106\text{rad}$  değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. Maksimum artık titreşim değeri  $0,224\text{rad}$  değeri için TTTST girdi şekillendirici artık titreşim değeri %4,1 iken ST girdi şekillendirici yüzde

artık titreşim ise %47,3 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda  $1,5T_d$  kadar bir zaman gecikmesi ile artık titreşim değeri %5 kabul edilebilir titreşim değerinin altına çekilmiştir.

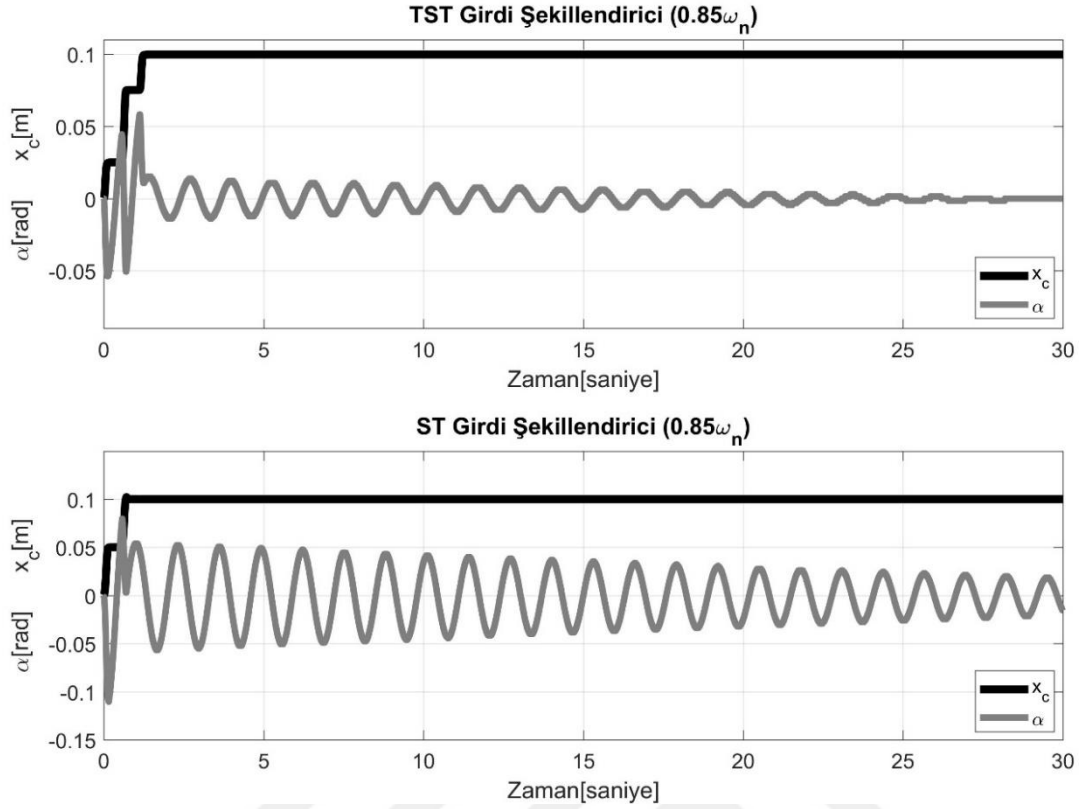
Şekil 3.9’da  $0,75 \omega_n$  modelleme frekansı için TTST ve ST girdi şekillendirici cevabı sunulmaktadır. Girdi şekillendiricinin seçim aşamasında sisteme  $0,75 \omega_n$  modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici uygulanmış ve cevap olarak 0,09rad değerine karşılık gelen artık titreşim değeri oluşmuştur. Bu değer Çizelge 3.6’ya göre 0-100 aralığına normalize edilerek 55,55 değeri elde edilmiştir. Bu değer büyüklüğü sistem parametre hatası ile doğru orantılıdır. Yani tahmin edilen modelleme frekansı oldukça hatalıdır. Bu sebeple seyahat süresi biraz daha uzun seçilerek sistemden daha gürbüz bir cevap alınması amaçlanmıştır. Tasarlanan Bulanık Mantık tabanlı Karar Destek Sistemi için parametre tahmin hatası 55,55 ve seyahat süresi 85 olarak belirlenen girdiler için BM-KDS sistemi uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak TTST girdi şekillendiriciyi önermiştir. Sistem cevabı aynı modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.9.  $0,75 \omega_n$  modelleme frekansı için TTST ve ST girdi şekillendirici cevabı

Grafikler incelendiğinde; TTST girdi şekillendirici için artık titreşim değeri  $0,0122\text{rad}$  değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. ST girdi şekillendirici için ise bu değer  $0,09\text{rad}$  değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. Maksimum artık titreşim değeri  $0,224\text{rad}$  değeri için TTST girdi şekillendirici artık titreşim değeri %5,4 iken ST girdi şekillendirici artık titreşim değeri ise %40,1 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda  $1T_d$  kadar bir zaman gecikmesi ile artık titreşim değeri yaklaşık %5 kabul edilebilir titreşim değerine çekilmiştir.

Şekil 3.10'da  $0,85 \omega_n$  modelleme frekansı için TST ve ST girdi şekillendirici cevabı sunulmaktadır. Girdi şekillendiricinin seçim aşamasında sisteme  $0,85 \omega_n$  modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici uygulanmış ve cevap olarak  $0,055\text{rad}$  değerine karşılık gelen artık titreşim değeri alınmıştır. Bu değer Çizelge 3.6'ya göre 0-100 aralığına normalize edilerek 33,95 değeri elde edilmiştir. Bu değer  $33,95$  büyüklüğü sistem parametre hatası ile doğru orantılıdır. Yani tahmin edilen modelleme frekansı biraz hatalıdır. Bu sebeple seyahat süresi biraz kısa seçilerek sistemden daha gürbüz bir cevap alınması amaçlanmıştır. Tasarlanan Bulanık Mantık tabanlı Karar Destek Sistemi için parametre tahmin hatası  $33,95$  ve seyahat süresi 60 olarak belirlenen girdiler için BM-KDS sistemi uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak TST girdi şekillendiriciyi önermiştir. Sistem cevabı aynı modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici ile karşılaştırılmıştır.

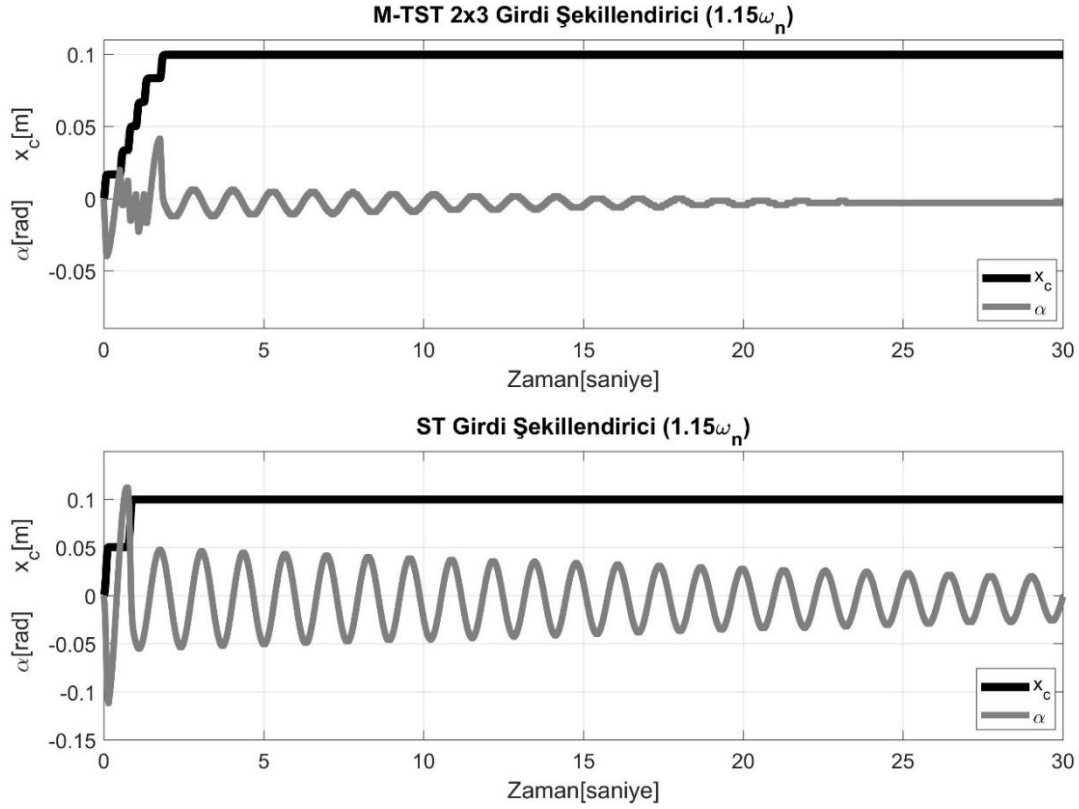


Şekil 3.10.  $0,85 \omega_n$  modelleme frekansı için TST ve ST girdi şekillendirici cevabı

Grafikler incelendiğinde; TST girdi şekillendirici için artık titreşim değeri  $0,0138\text{rad}$  değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. ST girdi şekillendirici için ise bu değerin  $0,055\text{rad}$  değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. Maksimum artık titreşim değeri  $0,224\text{rad}$  değeri için TST girdi şekillendirici artık titreşim değeri %6,1 iken ST girdi şekillendirici artık titreşim değeri ise %24,5 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda  $0,5T_d$  kadar bir zaman gecikmesi ile artık titreşim değeri yaklaşık %5 kabul edilebilir titreşim değerine çekilmiştir.

Şekil 3.11’de  $1,15 \omega_n$  modelleme frekansı için M-TST 2x3 ve ST girdi şekillendirici cevabı sunulmaktadır. Girdi şekillendiricinin seçim aşamasında sisteme  $1,15 \omega_n$  modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici uygulanmış ve cevap olarak  $0,055\text{rad}$  değerine karşılık gelen artık titreşim değeri alınmıştır. Bu değer Çizelge 3.6’ya göre 0-100 aralığına normalize edilerek 33,95 değeri elde edilmiştir. Bu değerin büyüklüğü sistem parametre hatası ile doğru orantılıdır. Yani tahmin edilen modelleme frekansı biraz hatalıdır. Bu sebeple seyahat süresi biraz kısa seçilerek sistemden daha gürbüz bir cevap alınması amaçlanmıştır. Tasarlanan Bulanık Mantık tabanlı Karar Destek Sistemi için parametre tahmin hatası 33,95 ve seyahat süresi 70 olarak belirlenen girdiler için BM-KDS sistemi

uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak M-TST 2x3 girdi şekillendiriciyi önermiştir. Sistem cevabı aynı modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici ile karşılaştırılmıştır.

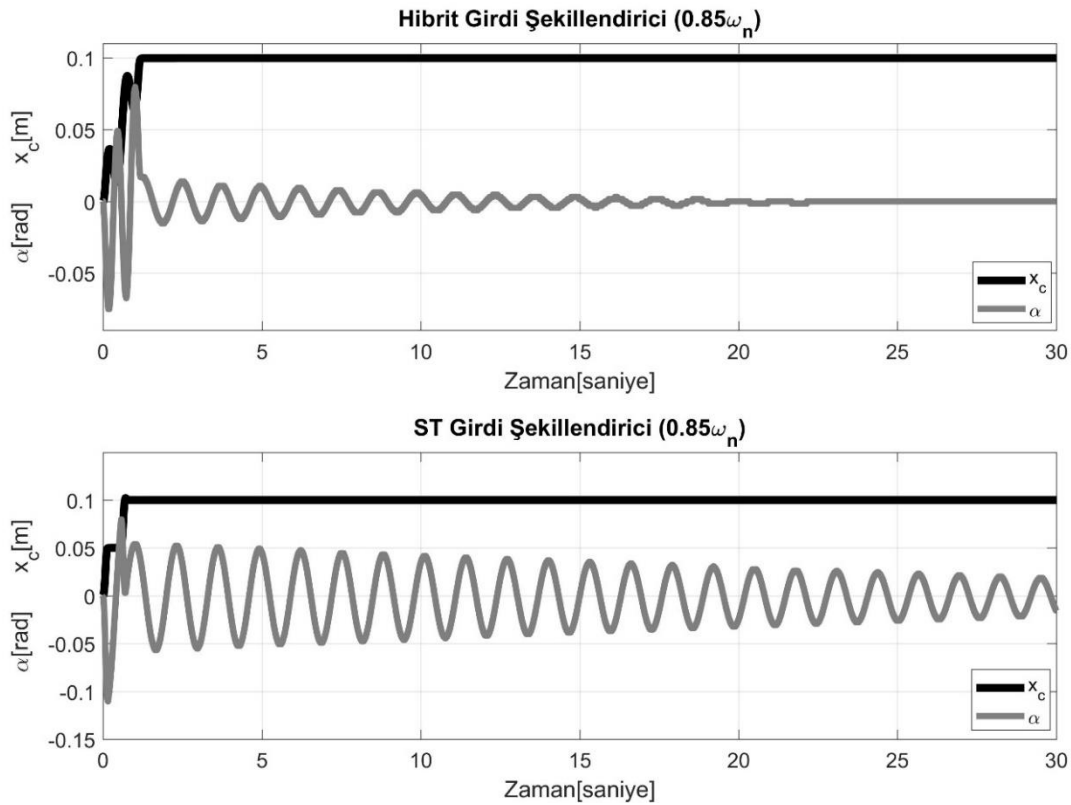


Şekil 3.11.  $1,15 \omega_n$  modelleme frekansı için M-TST 2x3 ve ST girdi şekillendirici cevabı

Grafikler incelendiğinde; M-TST 2x3 girdi şekillendirici için artık titreşim değeri 0,009rad değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. ST girdi şekillendirici için ise bu değer 0,055rad değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. Maksimum artık titreşim değeri 0,224rad değeri için M-TST 2x3 girdi şekillendirici artık titreşim değeri %4 iken ST girdi şekillendirici artık titreşim değeri ise %24,5 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda  $0,66T_d$  kadar bir zaman gecikmesi ile artık titreşim değeri %5 kabul edilebilir titreşim değerinin altına çekilmiştir.

Şekil 3.12’de  $0,85 \omega_n$  modelleme frekansı için Hibrit ve ST girdi şekillendirici cevabı sunulmaktadır. Girdi şekillendiricinin seçim aşamasında sisteme  $0,85 \omega_n$  modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici uygulanmış ve cevap olarak 0,055rad değerine karşılık gelen artık titreşim değeri alınmıştır. Bu değer Çizelge 3.6’ya göre 0-100 aralığına normalize edilerek 33,95 değeri elde edilmiştir. Bu değer büyüklüğü sistem parametre

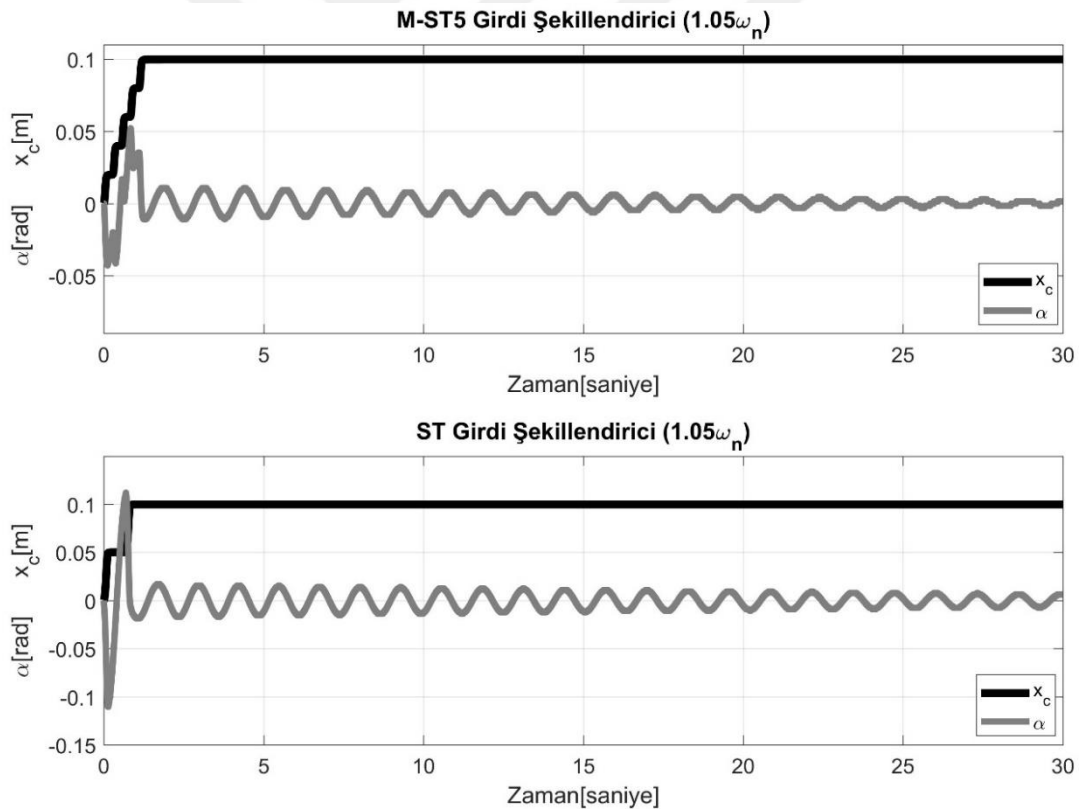
hatası ile doğru orantılıdır. Yani tahmin edilen modelleme frekansı biraz hatalıdır. Bu sebeple seyahat süresi biraz kısa seçilerek sistemden daha gürbüz bir cevap alınması amaçlanmıştır. Tasarlanan Bulanık Mantık tabanlı Karar Destek Sistemi için parametre tahmin hatası 33,95 ve seyahat süresi 35 olarak belirlenen girdiler için BM-KDS sistemi uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak Hibrit girdi şekillendiriciyi önermiştir. Sistem cevabı aynı modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.12.  $0,85 \omega_n$  modelleme frekansı için Hibrit ve ST girdi şekillendirici cevabı

Grafikler incelendiğinde; Hibrit girdi şekillendirici için artık titreşim değeri 0,014rad değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. ST girdi şekillendirici için ise bu değer 0,055rad değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. Maksimum artık titreşim değeri 0,224rad değeri için Hibrit girdi şekillendirici artık titreşim değeri %6,2 iken ST girdi şekillendirici artık titreşim değeri ise %24,5 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda  $0,5T_d$  kadar bir zaman gecikmesi ile artık titreşim değeri yaklaşık %5 kabul edilebilir titreşim değerine çekilmiştir.

Şekil 3.13’de  $1,05 \omega_n$  modelleme frekansı için M-ST5 ve ST girdi şekillendirici cevabı sunulmaktadır. Girdi şekillendiricinin seçim aşamasında sisteme  $1,05 \omega_n$  modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici uygulanmış ve cevap olarak  $0,018\text{rad}$  değerine karşılık gelen artık titreşim değeri alınmıştır. Bu değer Çizelge 3.6’ya göre 0-100 aralığına normalize edilerek 11,11 değeri elde edilmiştir. Bu değerın büyüklüğü sistem parametre hatası ile doğru orantılıdır. Yani tahmin edilen modelleme frekansı oldukça doğru tahmin edilmiştir. Bu sebeple seyahat süresi kısa seçilerek sistemden daha gürbüz bir cevap alınması amaçlanmıştır. Tasarlanan Bulanık Mantık tabanlı Karar Destek Sistemi için parametre tahmin hatası 11,11 ve seyahat süresi 55 olarak belirlenen girdiler için BM-KDS sistemi uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak M-ST5 girdi şekillendiriciyi önermiştir. Sistem cevabı aynı modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici ile karşılaştırılmıştır.

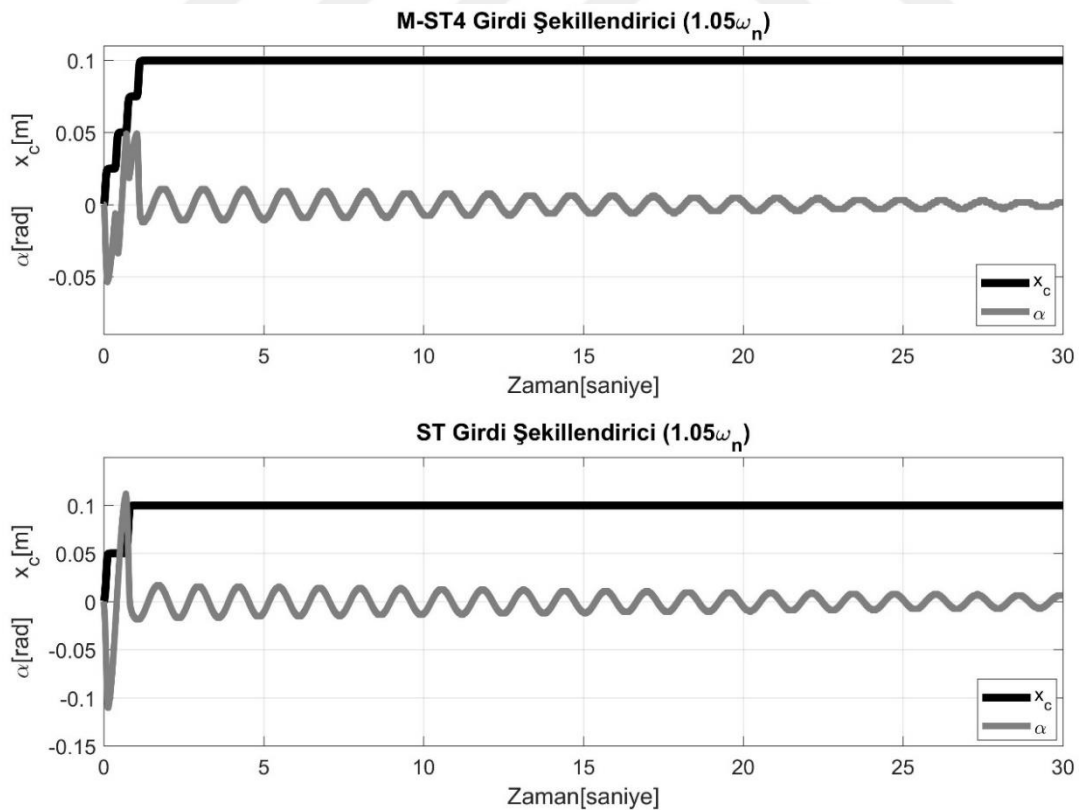


Şekil 3.13.  $1,05 \omega_n$  modelleme frekansı için M-ST5 ve ST girdi şekillendirici cevabı

Grafikler incelendiğinde; M-ST5 girdi şekillendirici için artık titreşim değeri  $0,018\text{rad}$  değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. ST girdi şekillendirici için ise bu değerın  $0,224\text{rad}$  değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. Maksimum artık titreşim değeri  $0,224\text{rad}$  değeri için M-ST5 girdi şekillendirici artık titreşim değeri %4,4 iken ST girdi şekillendirici artık

titreşim değeri ise %8 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda  $0,299T_d$  kadar bir zaman gecikmesi ile artık titreşim değeri %5 kabul edilebilir titreşim değerinin altına çekilmiştir.

Şekil 3.14'de  $1,05\omega_n$  modelleme frekansı için M-ST4 ve ST girdi şekillendirici cevabı sunulmaktadır. Girdi şekillendiricinin seçim aşamasında sisteme  $1,05\omega_n$  modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici uygulanmış ve cevap olarak 0.018rad değerine karşılık gelen artık titreşim değeri alınmıştır. Bu değer Çizelge 3.6'ya göre 0-100 aralığına normalize edilerek 11,11 değeri elde edilmiştir. Bu değer büyüklüğü sistem parametre hatası ile doğru orantılıdır. Yani tahmin edilen modelleme frekansı oldukça doğru tahmin edilmiştir. Bu sebeple seyahat süresi oldukça kısa seçilerek sistemden daha gürbüz bir cevap alınması amaçlanmıştır. Tasarlanan Bulanık Mantık tabanlı Karar Destek Sistemi için parametre tahmin hatası 11,11 ve seyahat süresi 40 olarak belirlenen girdiler için BM-KDS sistemi uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak M-ST4 girdi şekillendiriciyi önermiştir ve sonuçlar ST girdi şekillendirici ile karşılaştırılmıştır.

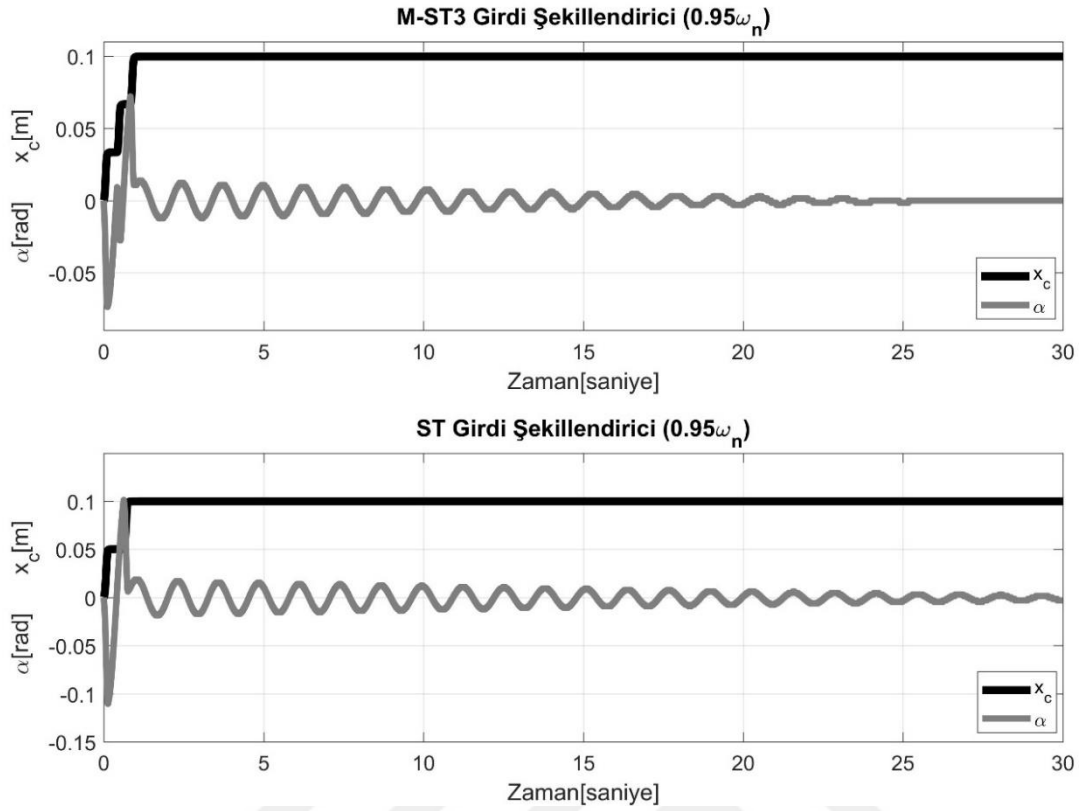


Şekil 3.14.  $1,05\omega_n$  modelleme frekansı için M-ST4 ve ST girdi şekillendirici cevabı



Grafikler incelendiğinde; M-ST4 girdi şekillendirici için artık titreşim değeri 0,0108rad değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. ST girdi şekillendirici için ise bu değer 0,018rad değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. Maksimum artık titreşim değeri 0,224rad değeri için M-ST4 girdi şekillendirici artık titreşim değeri %4,8 iken ST girdi şekillendirici artık titreşim değeri ise %8 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda  $0,249T_d$  kadar bir zaman gecikmesi ile artık titreşim değeri %5 kabul edilebilir titreşim değerinin altına çekilmiştir.

Şekil 3.15’de  $0,95\omega_n$  modelleme frekansı için M-ST3 ve ST girdi şekillendirici cevabı sunulmaktadır. Girdi şekillendiricinin seçim aşamasında sisteme  $0,95\omega_n$  modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici uygulanmış ve cevap olarak 0,018rad değerine karşılık gelen artık titreşim değeri alınmıştır. Bu değer Çizelge 3.6’ya göre 0-100 aralığına normalize edilerek 11,11 değeri elde edilmiştir. Bu değer büyüklüğü sistem parametre hatası ile doğru orantılıdır. Yani tahmin edilen modelleme frekansı oldukça doğru tahmin edilmiştir. Bu sebeple seyahat süresi çok kısa seçilerek sistemden daha gürbüz bir cevap alınması amaçlanmıştır. Tasarlanan Bulanık Mantık tabanlı Karar Destek Sistemi için parametre tahmin hatası 11,11 ve seyahat süresi 25 olarak belirlenen girdiler için BM-KDS sistemi uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak M-ST3 girdi şekillendiriciyi önermiştir. Sistem cevabı aynı modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici ile karşılaştırılmıştır.

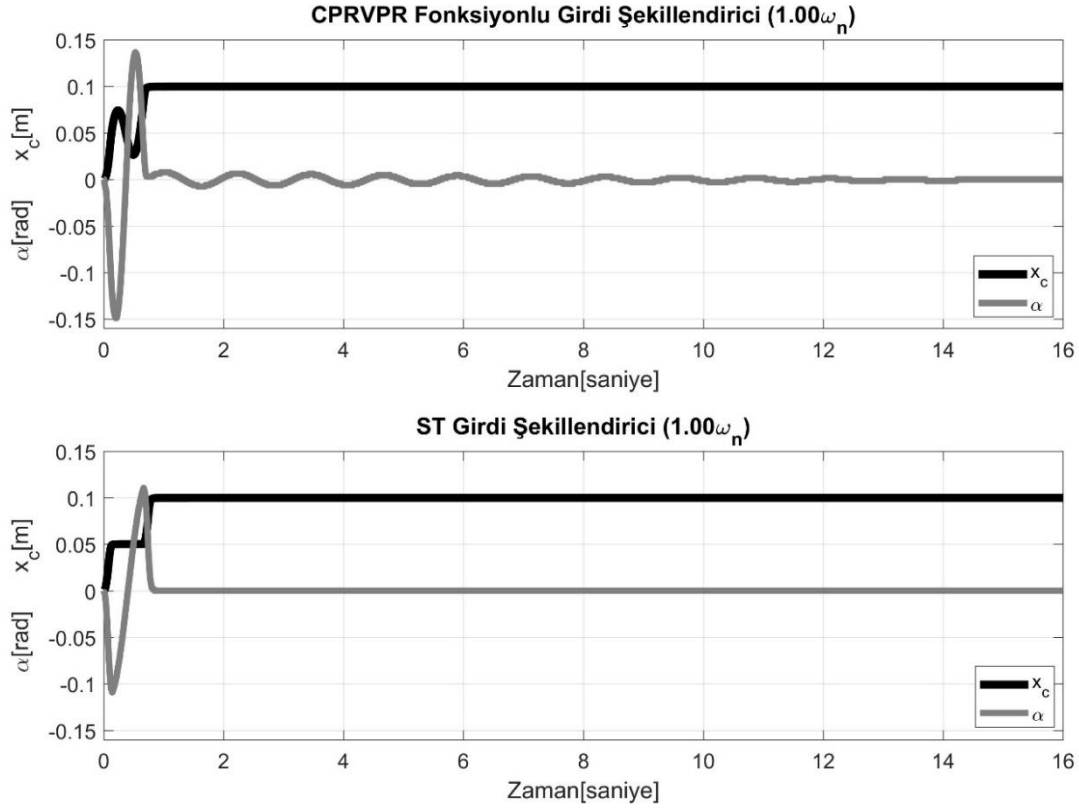


Şekil 3.15.  $0,95 \omega_n$  modelleme frekansı için M-ST3 ve ST girdi şekillendirici cevabı

Grafikler incelendiğinde; M-ST3 girdi şekillendirici için artık titreşim değeri  $0,012\text{rad}$  değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. ST girdi şekillendirici için ise bu değerin  $0,018\text{rad}$  değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. Maksimum artık titreşim değeri  $0,224\text{rad}$  değeri için M-ST3 girdi şekillendirici yüzde artık titreşim değeri %5,3 iken ST girdi şekillendirici yüzde artık titreşim ise %8 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda  $0,165T_d$  kadar bir zaman gecikmesi ile artık titreşim değeri yaklaşık %5 kabul edilebilir titreşim değerine çekilmiştir.

Şekil 3.16'da  $1,00 \omega_n$  modelleme frekansı için CPRVPR ve ST girdi şekillendirici cevabı sunulmaktadır. Girdi şekillendiricinin seçim aşamasında sisteme  $1,00 \omega_n$  modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici uygulanmış ve cevap olarak  $0\text{rad}$  değerine karşılık gelen artık titreşim değeri oluşmuştur. Bu değer Çizelge 3.6'ya göre 0-100 aralığına normalize edilerek 0 değeri elde edilmiştir. Bu değer büyüklüğü sistem parametre hatası ile doğru orantılıdır. Yani tahmin edilen modelleme frekansı hatasız tahmin edilmiştir. Bu sebeple seyahat seçilebilecek en kısa süre seçilerek sistemden hızlı bir cevap alınması amaçlanmıştır. Tasarlanan Bulanık Mantık tabanlı Karar Destek Sistemi için parametre tahmin hatası 0 ve seyahat süresi 0 olarak belirlenen girdiler için BM-KDS sistemi

uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak CPRVPR girdi şekillendiriciyi önermiştir. Sistem cevabı aynı modelleme frekansı için ST girdi şekillendirici ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.16.  $1,00 \omega_n$  modelleme frekansı için CPRVPR ve ST girdi şekillendirici cevabı

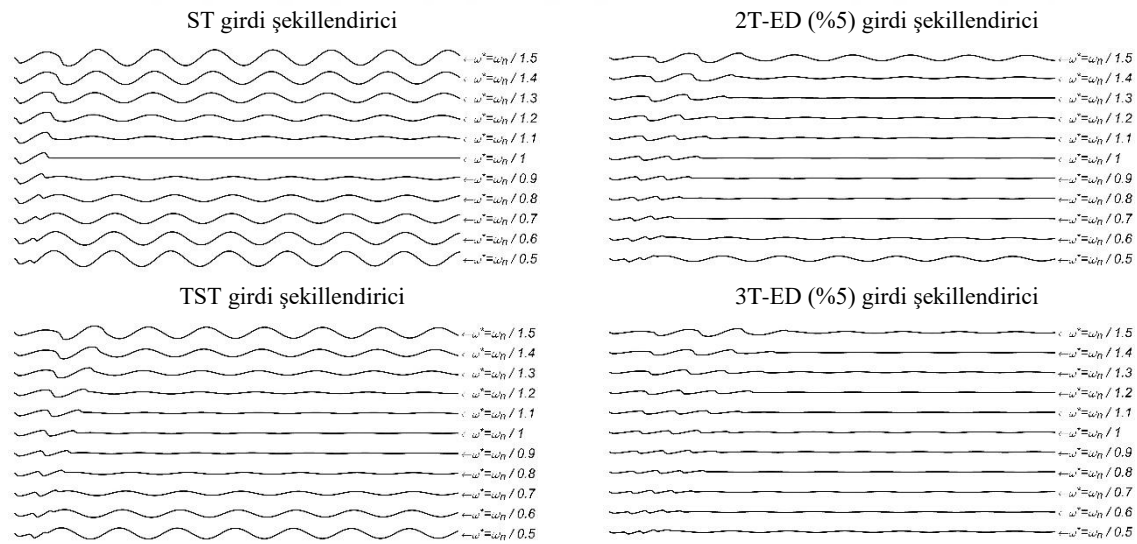
Grafikler incelendiğinde; CPRVPR girdi şekillendirici için artık titreşim değeri 0,007rad değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. ST girdi şekillendirici için ise bu değer 0rad değerine karşılık geldiği belirlenmiştir. Maksimum artık titreşim değeri 0,224rad değeri için CPRVPR girdi şekillendirici artık titreşim değeri %3,1 iken ST girdi şekillendirici artık titreşim değeri ise %0 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda aynı sürede artık titreşim değeri %5 kabul edilebilir titreşim değerinin altında kalırken, bu yöntem ile hareket süresince oluşan büyük atalet kuvvetleri bir miktar azaltılmıştır.

Çizelge 3.7 ile Bulanık Mantık tabanlı Karar Destek Sistemi için farklı parametre tahmin hataları ve seyahat süreleri için sistemin önerdiği girdi şekillendirici ve yüzde artık titreşim değerleri sunulmaktadır. Çizelge incelendiğinde önerilen metotların artık titreşim değerini %5'in altına veya yaklaşık bu seviyeye çektiği görülmektedir. Sonuç olarak önerilen yöntemin sistem cevabı üzerindeki etkinliği başarılı olduğu görülmüştür.

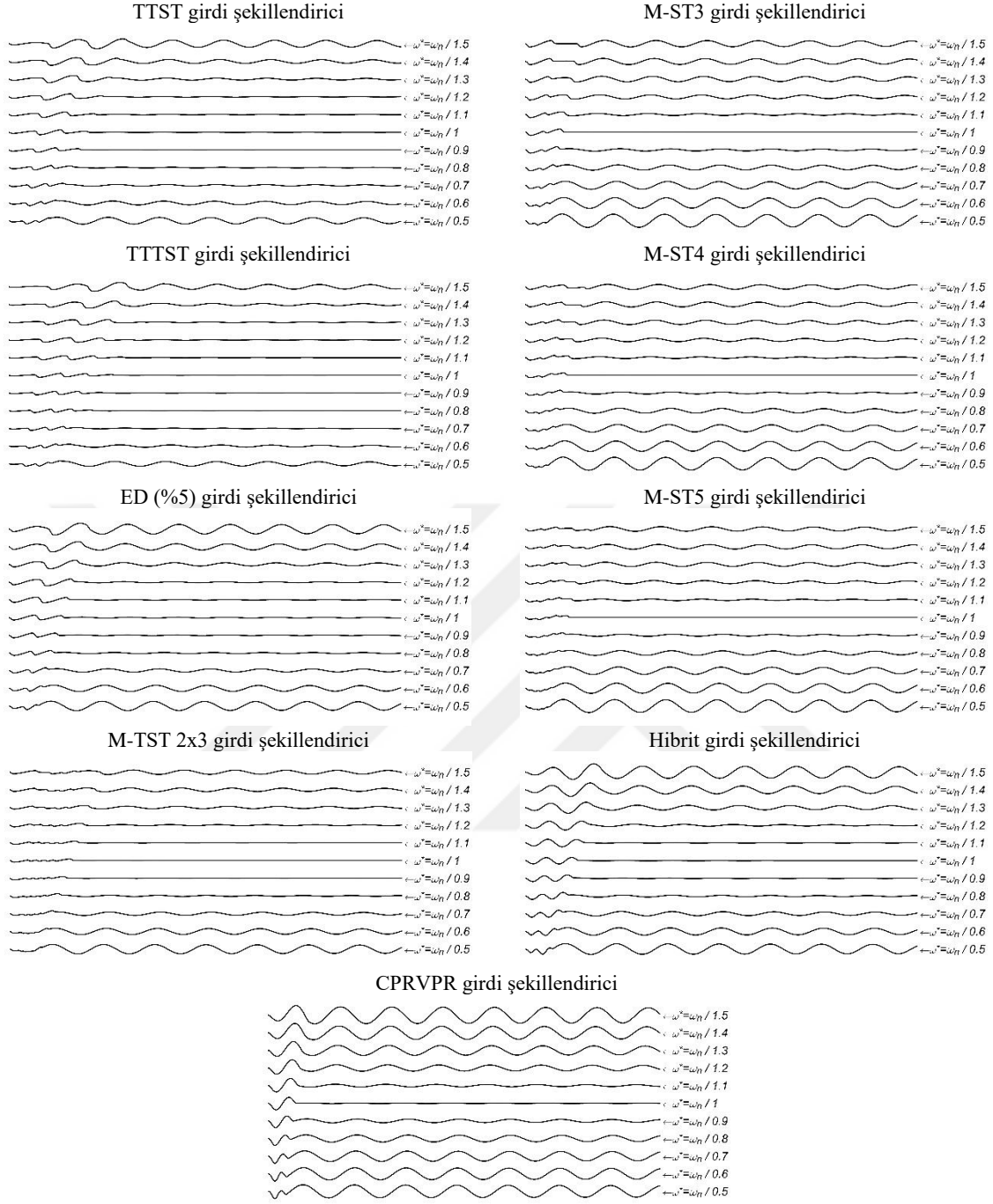
Çizelge 3.7. BM-KDS ile elde edilen bazı sayısal sonuçlar

Normalize Frekans ( $\omega_n^*/\omega_n$ )	Parametre Tahmin Hatası	Seyahat Süresi	Önerilen Metot	V (% titreşim)	
				Önerilen Metot	ST girdi şekillendirici
1,45	93,2	100	3T-ED	%3,4	%67,4
0,65	75,3	90	2T-ED	%3,5	%54,4
1,30	65,43	85	TTTST	%4,1	%47,3
0,75	55,55	85	TTST	%5,4	%40,1
1,15	33,95	70	M-TST 2x3	%4	%24,5
0,85	33,95	60	TST	%6,1	%24,5
1,2	43,48	75	ED	%5,3	%31,6
0,85	33,95	35	Hibrit	%6,2	%24,5
1,05	11,11	55	M-ST4	%4,4	%8
1,05	11,11	25	M-ST3	%4,8	%8

Şekil 3.17’de sapmaları görülmektedir. Grafikler detaylı incelendiğinde modelleme frekansındaki hatalı tahminler bazı metotlarda büyük genlikli titreşimlere sebep olurken bazı metotlarda daha küçük genliklerde titreşime sebep olmaktadır.

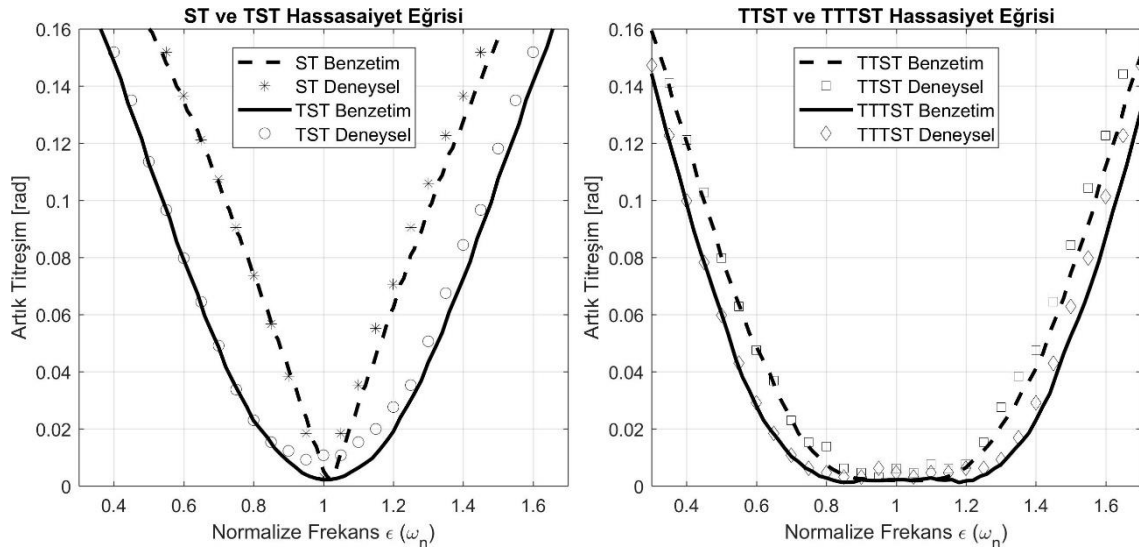


Şekil 3.17. Farklı normalize frekans değerleri için uç sapmaları



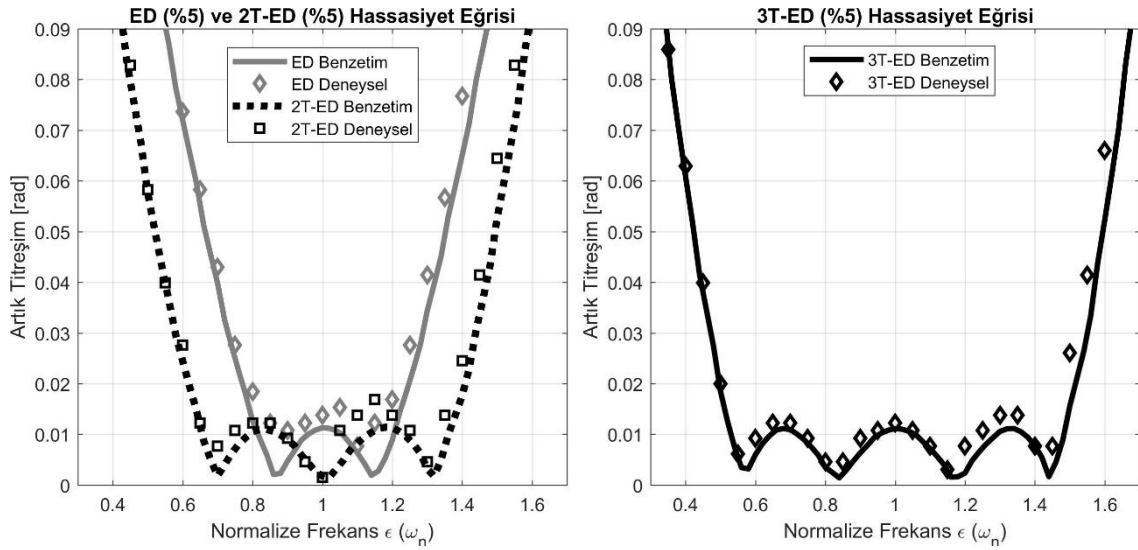
Şekil 3.17. (Devam) Farklı normalize frekans değerleri için uç sapsmaları

Şekil 3.18’de ST, TST, TTST ve TTTST girdi şekillendiricilerin doğrusal gezer vinç sistemine uygulanması ile elde edilen deneysel sonuçlar ve benzetim sonuçları için hassasiyet eğrileri sunulmaktadır. Burada normalize frekans değeri, tahmin edilen doğal frekansın modelleme frekansına oranıdır. Artık titreşim değeri ise sistem cevabının radyan cinsinden ifadesidir. Grafikler detaylı incelendiğinde her bir yöntem için deneysel sonuçların ve benzetim sonuçlarının birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Şekil 3.18’de sunulan metotlar arasında  $0,5T_d$  zaman gecikmesi mevcuttur ve gürbüzlük seyahat süresi arttıkça artmaktadır. Buna göre tartışılan girdi şekillendiriciler arasında seyahat süresi daha uzun olmasına rağmen en gürbüz girdi şekillendirici TTTST girdi şekillendiricidir.



Şekil 3.18. ST, TST, TTST ve TTTST girdi şekillendiriciler için hassasiyet eğrileri

Şekil 3.19’da %5 tolere edilebilir artık titreşim değeri için tasarlanan ED, 2T-ED ve 3T-ED girdi şekillendiricilerin doğrusal gezer vinç sistemine uygulanması ile elde edilen deneysel sonuçlar ve benzetim sonuçları için hassasiyet eğrileri sunulmaktadır. Burada normalize frekans değeri, tahmin edilen doğal frekansın modelleme frekansına oranıdır. Artık titreşim değeri ise sistem cevabının radyan cinsinden ifadesidir. Grafikler detaylı incelendiğinde her bir yöntem için deneysel sonuçların ve benzetim sonuçlarının birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. ED ve 2T-ED girdi şekillendirici arasında  $0,5T_d$  zaman gecikmesi mevcut iken, ED ve 3T-ED girdi şekillendirici arasındaki zaman gecikmesi  $T_d$  kadardır. Buna göre Şekil 3.19’daki girdi şekillendiriciler arasında seyahat süresi daha uzun olmasına rağmen en gürbüz girdi şekillendirici 3T-ED girdi şekillendiricidir.

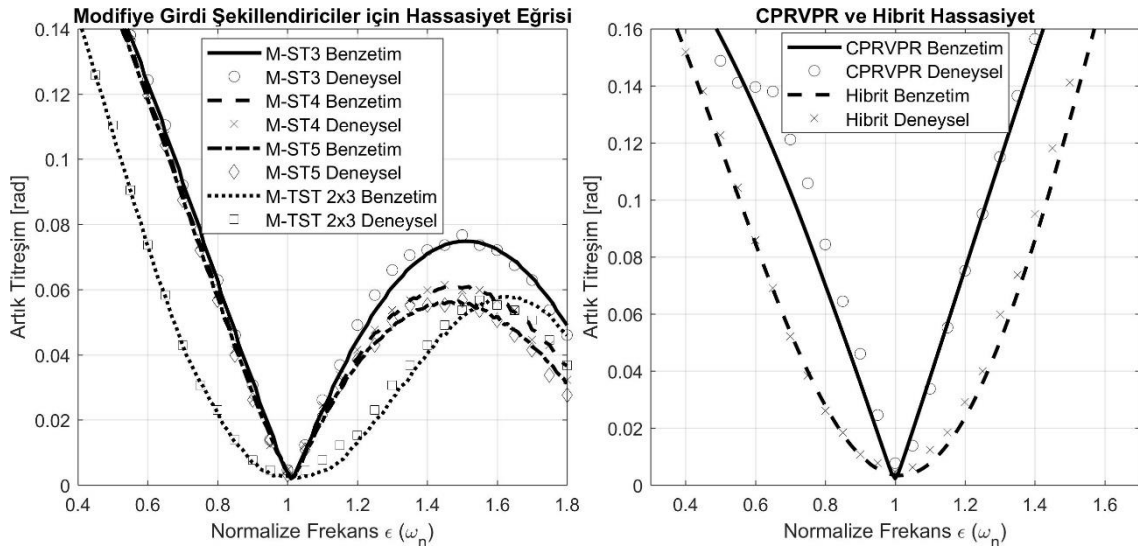


Şekil 3.19. Ekstra Duyarsız (%5) girdi şekillendiriciler için hassasiyet eğrileri

Şekil 4.20’de Modifiye, CPRVPR ve Hibrit girdi şekillendiricilerin doğrusal gezer vinç sistemine uygulanması ile elde edilen deneysel sonuçlar ve benzetim sonuçları için hassasiyet eğrileri sunulmaktadır Burada normalize frekans değeri, tahmin edilen doğal frekansın modelleme frekansına oranıdır. Artık titreşim değeri ise sistem cevabının radyan cinsinden ifadesidir.

Şekil 3.20’de Modifiye girdi şekillendiriciler için birinci grafik detaylı incelendiğinde her bir yöntem için deneysel sonuçların ve benzetim sonuçlarının oldukça yakın olduğu görülmektedir. Yöntemler arasındaki zaman gecikmesi; M-ST3 ve M-ST4 için  $0,084T_d$ , M-ST3 ve M-ST5 için  $0,134T_d$ , M-ST3 ve M-TST 2x3 için  $1,093T_d$ ’dir.

Şekil 3.20’de CPRVPR ve Hibrit girdi şekillendiriciler için ikinci grafik detaylı incelendiğinde her bir yöntem için deneysel sonuçların ve benzetim sonuçlarının oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu iki yöntem arasında  $0,5T_d$  zaman gecikmesi mevcuttur. Buna göre Şekil 3.20’deki girdi şekillendiriciler arasında seyahat süresi daha uzun olmasına rağmen en gürbüz girdi şekillendirici M-TST 2x3 girdi şekillendiricidir.



Şekil 3.20. Modifiye, CPRVPR ve Hibrit girdi şekillendiriciler için hassasiyet eğrileri

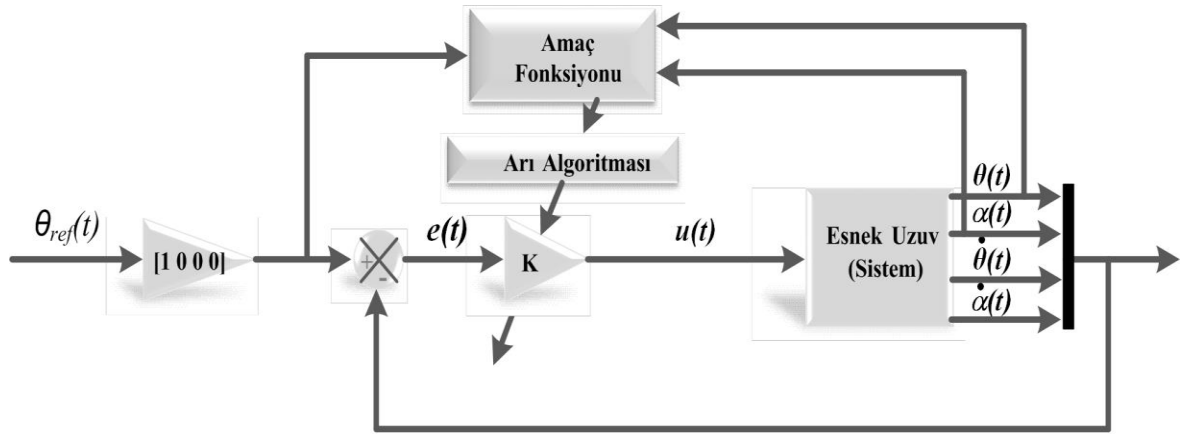
Girdi şekillendirme tekniklerinin çoğunda gürbüzlük, seyahat süresinin artmasıyla genellikle artar. Bununla birlikte, seyahat süresi ve gürbüzlük seviyesi arasındaki oran (duyarsızlık oranı) bir yöntemden diğerine farklılık gösterir. Bu nedenle, uygun girdi şekillendirme tekniğinin hem ele alınan sistemin özelliklerini hem de istenen girdi şekillendirici performansını (hareket süresi ve gürbüzlük seviyesi) seçmek gereklidir. Belirli bir titreşim kontrol durumu için gerekli performans özelliklerine sahip uygun girdi şekillendirme tekniklerinin seçimi ve uygulanması teknik bir problemdir ve problemin çözümü uzmanlık gerektirmektedir. Bu problemin üstesinden gelmek için, BM-KDS yaklaşımı, robotik uygulamalar için uygun girdi şekillendirme tekniğinin seçilmesi ve uygulanması için uzmanlık bilgisine olan ihtiyacı ortadan kaldıran etkili bir çözüm olarak önerilmiştir. Önerilen yaklaşımın geçerliliğini onaylamak için sonuçlar doğrusal gezer vinç sistemi üzerinde deneysel olarak test edilmiştir. Sunulan sonuçlar, yaklaşımın başarılı bir şekilde uygulandığını doğrulamaktadır. Önerilen yaklaşımın, araştırma kapsamındaki girdi şekillendirme tekniklerinin başarılı bir şekilde uygulanması için uzmanlık bilgisi ihtiyacını büyük oranda ortadan kaldırdığı da belirtilmelidir.

### 3.3. Arı Algoritması ile LQR Kazanç Matrisinin Optimizasyonu

Bir sistem için LQR kontrolcü tasarımı yapılırken sistem dinamikleri, sistem durumlarının birbirleri arasındaki ilişki ve sistem kontrolü üzerindeki etkiler incelenerek kontrolcü parametreleri belirlenir. Bu işlem daha çok deneme yanılma yöntemi ile yapılmaktadır. Bu kısımda esnek uzvun uç konum kontrolü ve motor milinin pozisyon kontrolü için sezgisel



bir arama algoritması olan Arı Algoritması (AA) kullanılarak LQR kontrolcü tasarımı yapılmış ve benzetim sonuçları deneysel sistem üzerinde doğrulanmıştır. LQR kontrolcüye ait  $Q$  ve  $R$  ağırlık matrisleri Arı Algoritması ile optimize edilerek kazanç matrisi ( $K$ ) elde edilmiştir. Bölüm 2.10'da anlatılan Arı algoritmasının optimizasyonu ve LQR kontrolcünün sisteme uygulanışı Şekil 3.21'de sunulmaktadır.



Şekil 3.21. Arı Algoritması tabanlı LQR kontrol blok şeması

Şekil 3.21'de esnek uzuv sistemine ait Arı Algoritması tabanlı LQR kontrol blok şeması görülmektedir. Sistemin esnek uzuv uç konumu ( $\alpha$ ) ve motor milinin pozisyonunun ( $\theta$ ) kontrolü için tasarlanan denetleyici Şekil 3.21'de de görüldüğü gibi kapalı çevrim uygulaması olan LQR kontrolcü ile sağlanmıştır. Sisteme uygulanan kontrol girdisi  $u(t)$  LQR kontrolcü tarafından üretilmektedir.

Doğrusal Kuadratik Düzenleyici (Linear Quadratic Regulator) olarak da isimlendirilen LQR kontrol  $A$  ve  $B$  sistem matrisleri ile  $Q$  ve  $R$  ağırlık matrislerine (köşegen matris) bağlı olarak  $J$  performans indeksini minimize eden kontrol girdisinin hesaplaması esasına dayanmaktadır. LQR kontrolcü tasarım aşamaları Bölüm 2.10'da detaylı bir şekilde tanımlanmıştır.

### LQR kontrol ön tasarımı

Bölüm 2.2.2'de matematik modeli sunulan esnek uzuv sistemi için LQR kontrol ön tasarımı yapılmıştır. Sistemin durum uzay gösterimi ve durumları Eş. 3.1 ve 3.2 ile sunulmaktadır.

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad x = \begin{bmatrix} \theta & \alpha & \dot{\theta} & \dot{\alpha} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 623,7 & -40,3 & 0 \\ 0 & -965,3 & 40,3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 61,6 \\ -61,6 \end{bmatrix} u \quad (3.2)$$

Ön tasarım için LQR kontrolcü ağırlık matrislerine Eş. 3.3 ile verilen değerler başlangıç değeri olarak atanmıştır.

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = 1 \quad (3.3)$$

Verilen değerler için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. LQR kontrolde  $Q$  ve  $R$  ağırlık matrisleri genellikle deneme yanılma yöntemi ile belirlenmektedir.  $Q$  ve  $R$  matrislerinin değeri ve büyüklükleri sistem performansını doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple LQR kontrolcünün  $Q = \text{diag}[q_1, q_2, q_3, q_4]$  ve  $R = \text{diag}[r_1]$  matrislerine ait parametreler Arı Algoritması ile sistem cevabını iyileştirecek şekilde optimize edilmiştir. Optimizasyonda sistemin motor milinin referans konumdan sapmadan hızlı bir şekilde denge konuma ulaşırken esnek uzuv uç açısının minimum salınım ile referans konuma ulaşması için en uygun LQR kontrolcü tasarımı hedeflenmiştir. Sistemin durum değişkenlerinden ( $\alpha$ ) ve ( $\theta$ ) ya ait birim basamak zaman cevapları ile tasarlanan  $J_e$  amaç fonksiyonunu minimize edecek değerlerden en uygunu araştırılmıştır.  $J_e$  amaç fonksiyonunu Eş. 3.1 ile sunulmaktadır.

$$J_e = (10 t_r(\theta)) + (6 t_s(\theta)) + (6.5 t_p(\theta)) + (0.1 |maks_p|(\theta)) + (4.4 |maks_s - ref|(\theta)) \\ + (0.1 norm(\alpha)) + (3.3 t_s(\alpha)) + (50 t_p(\alpha)) + (0.8 |maks_p|(\alpha)) + (1500 |maks_s - ref|(\alpha)) \quad (3.4)$$

Eş. 3.4'de  $t_r$ : yükselme zamanı,  $t_s$ : yerleşme zamanı,  $t_p$ : tepe zamanı,  $maks$ : maksimum aşma,  $maks_s$ : kalıcı durum hatası ve  $norm$ : matriksel norm olarak ifade edilmektedir. Amaç fonksiyonunun değişkenleri Bölüm 2.1'de detaylı bir şekilde belirtilmiştir ve bu değişkenlerin katsayıları sistem performansını iyileştirmek için birbirlerini dengeleyecek şekilde belirlenmiştir. Çizelge 3.8'de optimizasyona tabi tutulan parametreler ve optimizasyon aralıkları verilmiştir.

Çizelge 3.8. Arı Algoritması optimizasyon parametreleri

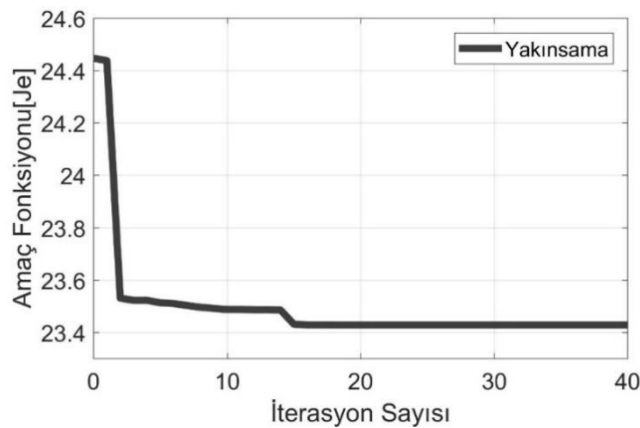
	Q				R	K (LQR Kazanç Matrisi)	Optimizasyon Süresi [saniye]
	q <sub>1</sub>	q <sub>2</sub>	q <sub>3</sub>	q <sub>4</sub>	r <sub>1</sub>		
Maks	1000	10	10	50	10	-	-
Min	0	0	0	0	0,00001	-	-
Optimizasyon Öncesi	1	1	1	1	1	[1,0000 -9,5716 0,6011 -0,4094]	-
Optimizasyon Sonrası	727,24	1,98	7,42	36,33	8,87	[9,0499 -26,5119 1,2163 -0,6809]	312

Çizelge 3.8. ile Arı Algoritması optimizasyon parametreleri ve arama sınırları sunulmaktadır. Algoritma optimizasyon aralıklarının ve amaç fonksiyonunun belirlenmesinde sistemin dinamikleri ve konu ile ilgili mevcut çalışmalardan faydalanılmıştır (Pham ve diğerleri, 2008; Pham ve Castellani, 2014; Şen ve Kalyoncu, 2015; Bilgiç ve diğerleri, 2016). Çizelge 3.9 ile Arı Algoritması parametreleri sunulmaktadır.

Çizelge 3.9. Arı Algoritması parametreleri

n	m	e	nep	nsp	ngh	İtr
30	20	6	12	8	0.01	50

İterasyon sayısı 50 alınarak algoritma; en uygun amaç fonksiyonuna 15. iterasyonda ulaşılmıştır. Şekil 3.22 ile yakınsama grafiği sunulmaktadır.



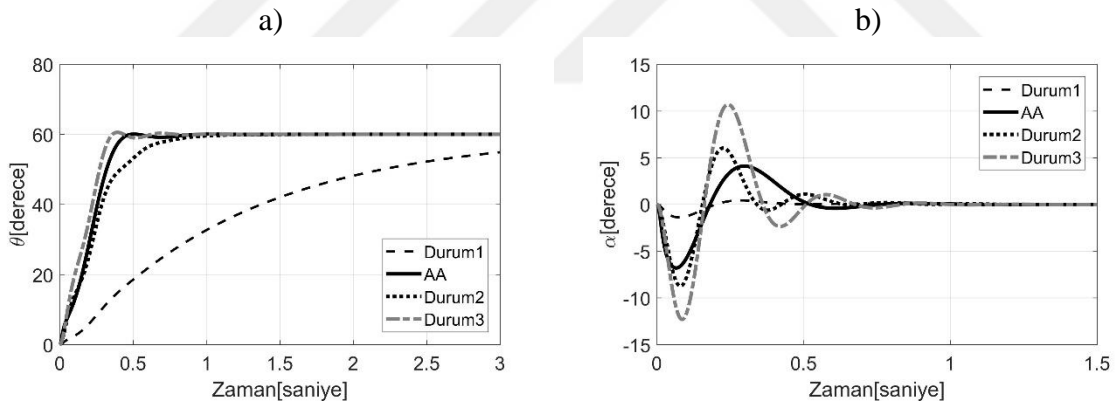
Şekil 3.22. Arı Algoritması optimizasyonu yakınsama grafiği

Tasarlanan kontrolcünün performansı literatürdeki benzer sistem için elde edilen farklı çalışmalarla karşılaştırılarak grafiklerle doğrulanmıştır. Grafiklerde belirtilen Durum1; optimizasyon öncesi elde edilen kontrolcü cevabını, Durum2; Baroudi, Saad, Ghie,

Kaddouri ve Zaide (2010) tarafından tasarımı yapılan LQR kontrolcü için sistem cevabını, Durum3 ise Rahman, Isa, Ali ve Anuar (2013) tarafından tasarlanan LQR kontrolcü sistem cevabını göstermektedir. AA ise tasarımı yapılan Arı Algoritması tabanlı LQR kontrolcü için sistem cevabını göstermektedir.

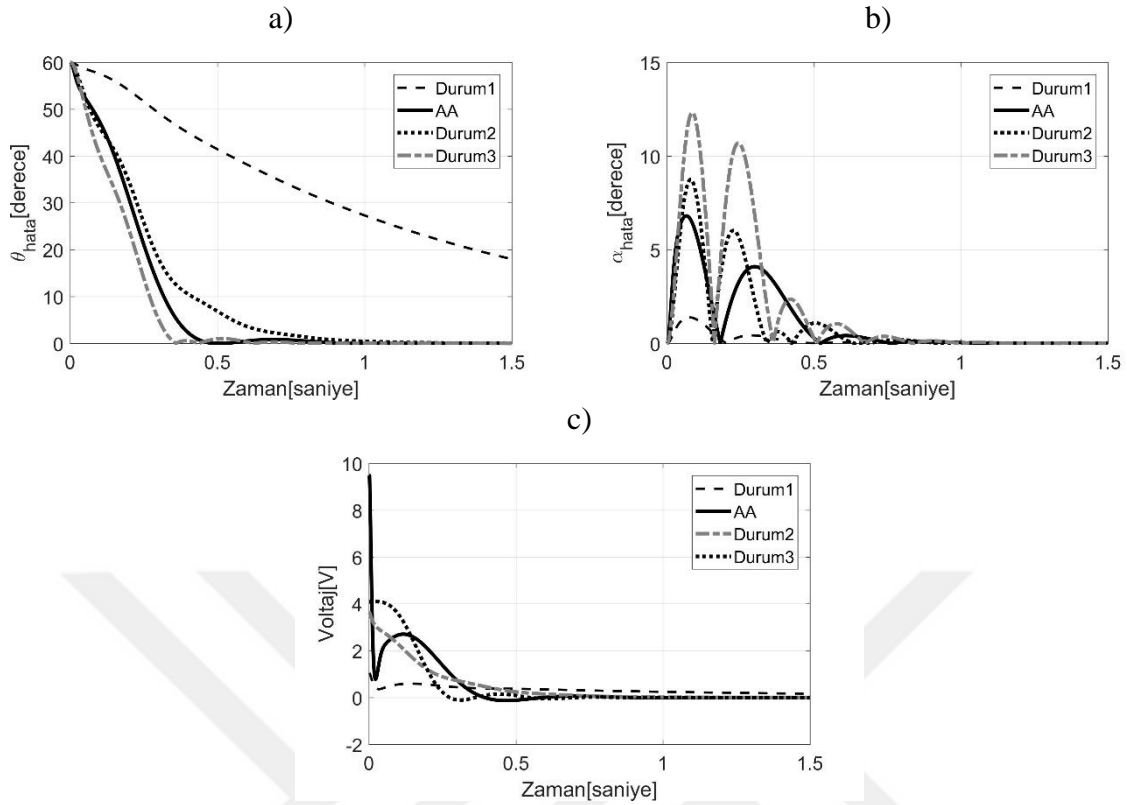
Şekil 3.23 a'da farklı durumlar için motor pozisyonunun zamana bağlı değişimi sunulmaktadır. Sistem cevapları incelendiğinde Arı Algoritması tabanlı kontrolcünün referans girdiye en kısa sürede minimum aşım ile ulaşarak sistem performansını önemli ölçüde artırdığı sonucuna varılmaktadır.

Şekil 3.23 b'de ise farklı durumlar için esnek uzuv uç konumunun zamana bağlı değişimi sunulmaktadır. Sistem cevapları incelendiğinde Arı Algoritması tabanlı kontrolcünün esnek uzuv uç konumunun diğer durumlara göre oldukça küçük genlikli salınımlar ile hareketini sonlandırdığı görülmektedir. Grafikler incelendiğinde sistem performansının Arı Algoritması tabanlı kontrolcü ile önemli ölçüde iyileştiği sonucuna ulaşılmaktadır.



Şekil 3.23. Farklı durumlar için a) Motor pozisyonunun zamana bağlı değişimi b) Esnek uzuv uç konumunun zamana bağlı değişimi

Şekil 3.24 a'da farklı durumlar için motor pozisyon hatası, Şekil 3.24 b'de ise farklı durumlar için esnek uzuv uç konumunun pozisyon hatası sunulmaktadır. Hatanın zamana göre değişim grafikleri incelendiğinde sistem performansının başarısı daha net görülmektedir. Şekil 3.24 c'de ise farklı durumlar için motora uygulanan gerilim sunulmaktadır.



Şekil 3.24. Farklı durumlar için a) Motor pozisyon hatası b) Esnek uzuv uç konumunun pozisyon hatası c) Motora uygulanan gerilim

İncelenen farklı durumlar için sistem performansı Çizelge 3.10 ile sunulmaktadır. Çizelge incelendiğinde;

- Durum2, Durum3 ve Arı Algoritması tabanlı LQR kontrolcünün, sistemin referans konumdaki kararlılığını sürdürerek; uç konumun dengeye ulaştırdığı,
- Her bir kontrolcünün, sistemin hareketi üzerinde de benzer eğilim gösterdiği ancak kontrolcülerin birbirlerine göre farklı performans gösterdiği,
- AA-LQR kontrolcünün maksimum aşma, yerleşme zamanı ve yükselme zamanı gibi performans kriterleri birlikte incelendiğinde diğer iki kontrolcüye göre daha başarılı bir performans gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

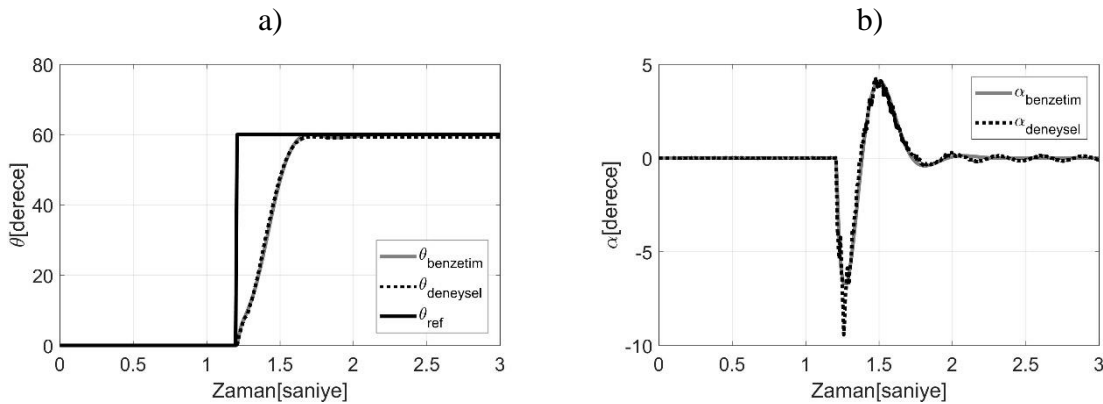
Buna göre Arı Algoritması tabanlı LQR kontrolcünün sistemin performansını önemli ölçüde iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Farklı durumlar için denetleyici performansı Çizelge 3.10 ile sunulmuştur.

Çizelge 3.10. Farklı durumlar için kontrolcü performansı

	Durum1	Durum2	Durum3	AA
Ref.	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 60^\circ$
$t_r$ (saniye)	2,611	0,4796	0,2571	0,3168
$t_s$ (saniye)	4,7347	0,82	0,3377	0,4246
$\theta$ $t_p$ (saniye)	36,4080	4	0,3920	0,5040
Maks. genlik (derece)	60	60	60,55	60,0472
Kalıcı durum hatası	$3,84 \cdot 10^{-12}$	$5,01 \cdot 10^{-8}$	0,5583	0,0472
Norm	10,03	65,0986	105,0727	57,4876
$t_s$ (saniye)	1,8317	0,8165	0,785	0,719
$\alpha$ $t_p$ (saniye)	0,076	0,08	0,086	0,066
Maks. genlik (derece)	1,3904	8,7472	12,3109	6,8076
Kalıcı durum hatası	$1,0603 \cdot 10^{-10}$	$1,75 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$

Arı Algoritması tabanlı LQR kontrolcü başarısını deneysel olarak doğrulamak amacıyla farklı referans girdi değerleri için sistem cevabı incelenmiş ve sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur.

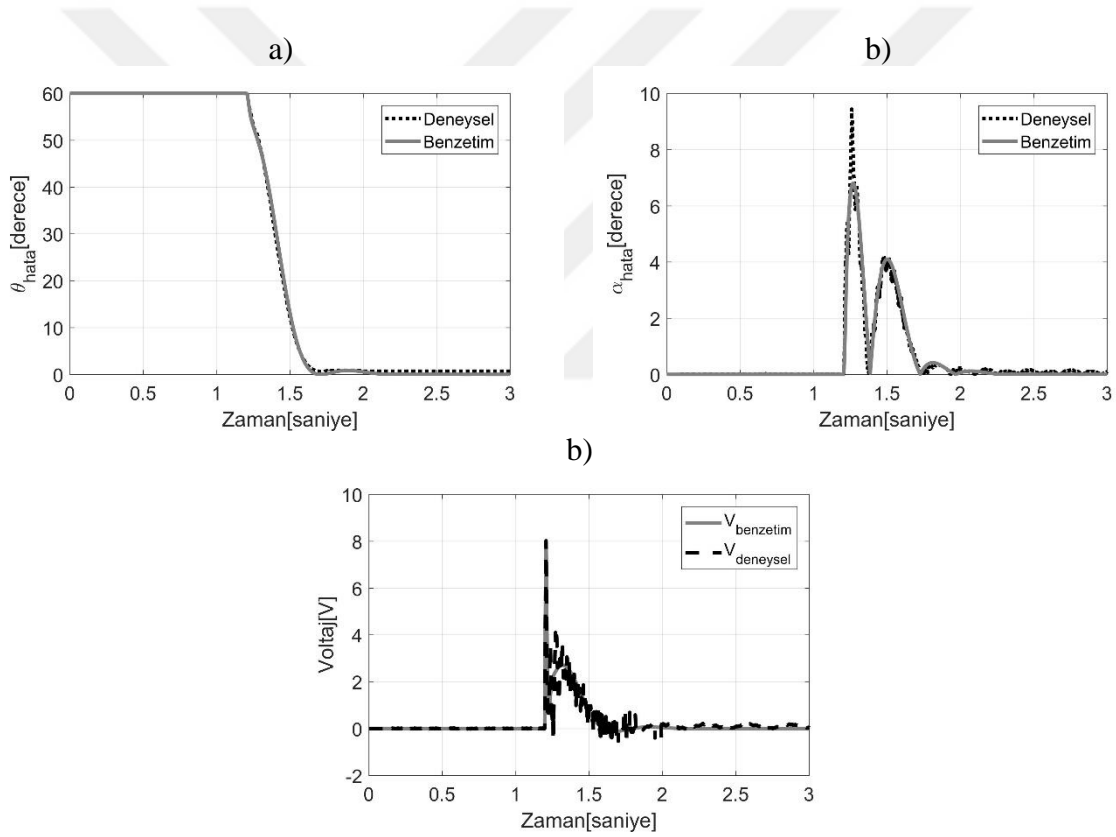
Denetleyicinin gerçek sistem üzerinde uygulanabilirliğini göstermek için kontrolcü senek uzuv deney seti üzerinde  $\theta = 60^\circ$  ve  $\theta = 120^\circ$  için test edilmiştir. Şekil 3.25 a'da  $\theta = 60^\circ$  için motor pozisyonunun zamana bağlı değişimi sunulmaktadır. Sistem cevabından da görüldüğü üzere kontrolcü sistemi referans girdiye kısa sürede minimum aşım ile ulaştırırken deneysel sonuçlar ve benzetim sonuçlarının birbirine çok yakın bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 3.25. a) Motor pozisyonunun zamana bağlı değişimi b) Esnek uzuv uç konumunun zamana bağlı değişimi

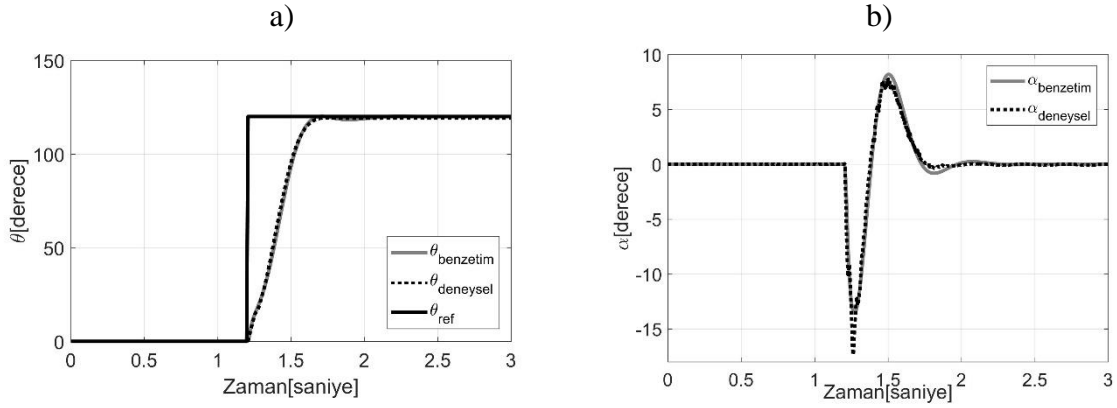
Şekil 3.25 b’de ise  $\theta=60^\circ$  için esnek uzuv uç konumunun zamana bağlı değişimi sunulmaktadır. Buna göre esnek uzuv uç konumunun oldukça küçük genlikli salınımlar ile hareketini sonlandırırken deneysel sonuçlar ve benzetim sonuçları birbirine çok yakın bir şekilde gerçekleşmiştir.

Şekil 3.26 a’da  $\theta=60^\circ$  için motor pozisyon hatası, Şekil 3.26 b’de ise farklı durumlar için esnek uzuv uç konumunun pozisyon hatası sunulmaktadır. Hatanın zamana göre değişimin daha iyi görülmesi için oluşturulan grafikler incelendiğinde deneysel sonuçlar ve benzetim sonuçlarının birbirine çok yakın bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 3.26 c’de ise motora uygulanan gerilim sunulmaktadır.



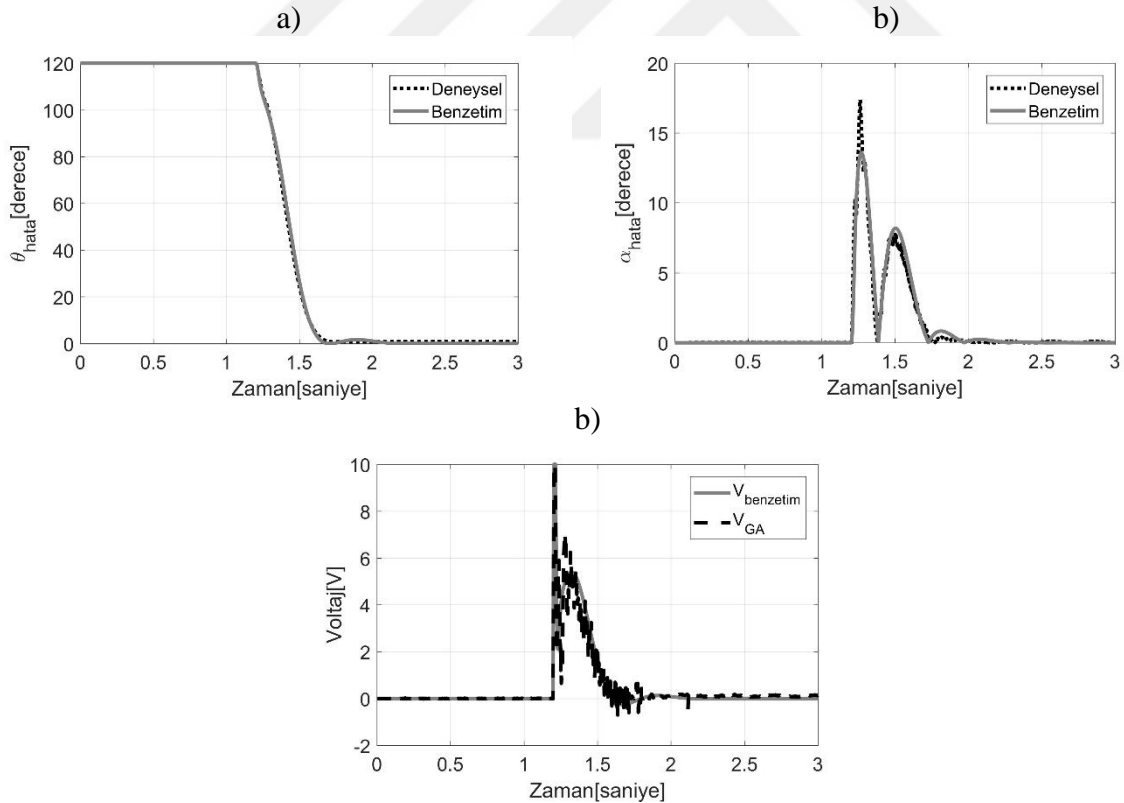
Şekil 3.26.  $\theta=60^\circ$  için a) Motor pozisyon hatası b) Esnek uzuv uç konumunun pozisyon hatası c) Motora uygulanan gerilim

Kontrolcü performansının farklı durumlar için de başarılı performans gösterdiğini kanıtlamak için farklı bir referans girdi ile de sistem cevapları incelenmiştir. Şekil 3.27 a’da  $\theta=120^\circ$  için motor pozisyonunun zamana bağlı değişimi sunulmaktadır. Sistem cevabından da görüldüğü üzere kontrolcünün sistemi referans girdiye kısa sürede minimum aşım ile ulaştırırken deneysel sonuçlar ve benzetim sonuçları birbirine çok yakın bir şekilde gerçekleşmiştir.



Şekil 3.27. a) Motor pozisyonunun zamana bağlı değişimi b) Esnek uzuv uç konumunun zamana bağlı değişimi

Şekil 3.27 b’de ise  $\theta=120^\circ$  için esnek uzuv uç konumunun zamana bağlı değişimi sunulmaktadır. Buna göre esnek uzuv uç konumunun oldukça küçük genlikli salınımlar ile hareketini sonlandırırken deneysel sonuçlar ve benzetim sonuçları birbirine çok yakın bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 3.28.  $\theta=120^\circ$  için a) Motor pozisyon hatası b) Esnek uzuv uç konumunun pozisyon hatası c) Motora uygulanan gerilim

Şekil 3.28 a’da  $\theta=120^\circ$  için motor pozisyon hatası, Şekil 3.28 b’de ise farklı durumlar için esnek uzuv uç konumunun pozisyon hatası sunulmaktadır. Hatanın zamana göre değişiminin



daha iyi görülmesi için oluşturulan grafikler incelendiğinde deneysel sonuçlar ve benzetim sonuçlarının birbirine çok yakın bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 3.28 c’de ise motora uygulanan gerilim sunulmaktadır.

Sonuç olarak, esnek uzuv sisteminin motor milinin pozisyon kontrolü ve uç konum kontrolünü sağlamaya yönelik ön tasarımı yapılan LQR kontrolcü parametreleri sezgisel bir arama algoritması olan Arı Algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. İlk olarak sistemin Euler-Lagrange hareket denklemleri kullanılarak elde edilen ve giriş-çıkış formunda ifade edilen Durum Uzay modeli oluşturulmuştur. Daha sonra LQR kontrolcü parametrelerinin belirlenmesi amacıyla Arı Algoritmasının ile optimizasyon işlemi geliştirilmiştir. Arı Algoritmasına ait parametrelerin LQR kontrolcü performansı üzerindeki etkisinin belirlenmesi için literatürdeki farklı çalışmalar ile tasarımı yapılan kontrolcü karşılaştırılarak sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur. Son olarak tasarımı yapılan LQR kontrolcünün gerçek sistemler üzerinde etkinliğini ve uygulanabilirliğini belirleyebilmek ve inceleyebilmek için Quanser esnek uzuv deney seti üzerinde sistemin deneysel doğrulaması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar tablo ve grafikler halinde sunulmuştur.

## 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektromekanik sistemler teknolojinin ilerlemesi ile birlikte zaman içerisinde esnek ve hafif bir şekilde üreilmeye başlanmıştır. Esnek ve hafif sistemlerin üretimi ve kullanımı, rijit ve ağır sistemlerin kullanımı ile karşılaştırıldığında düşük elektrik tüketimi, geniş çalışma alanı, düşük kapasiteli hareket üretici kullanımı, üretim maliyetlerinde azalma, yüksek operasyon hızı vb. gibi birçok avantajı da beraberinde getirmektedir. Fakat esnek sistemler dinamik yapıları nedeniyle hareketleri sonucunda büyük miktarlarda artık titreşime sebep olurlar. Bu artık titreşim genel olarak açık çevrim ve kapalı çevrim kontrol teknikleri ile giderilmeye çalışılır. Hareket kontrolü yapılan sistemlerde kapalı çevrim denetim sistemi tercih edilirse; sisteme eklenen algılayıcılar ve sensörler yardımı ile geri besleme bilgisi alınarak denetim işlemi gerçekleştirilir. Bu durumda uygun bir örnekleme zamanı seçimi ve kontrolcü tasarımı gereklidir. Eğer ek sensörler veya algılayıcılar kullanılmadan açık çevrim denetim sistemi tercih edilirse sistem doğru bir şekilde modellenir ve sistemin karakteristik parametreleri belirlendiğinde uygun girdiye karşı sistem cevabı da tahmin edilebilir. Ancak değişen şartlara ve modelleme hatalarına karşı denetleyicinin duyarsızlığı; kontrolcü gürbüzlüğü açısından bir dezavantajdır.

Tez çalışmaları kapsamında esnek sistemlerde oluşan artık titreşimin azaltılması veya giderilmesi amacı ile açık çevrim denetim sistemlerinden girdi şekillendirme teknikleri tasarlanmış ve deneysel uygulamaları yapılmıştır.

Tez çalışmaları kapsamında incelenen 13 pozitif girdi şekillendiriciye ait %5 ve %10 artık titreşim değerleri için gürbüzlükler, seyahat süreleri ve duyarsızlık oranlarının detaylı olarak incelendiği, grafikler ve tablolar halinde sunulduğu çalışmalar sonucunda;

- ST girdi şekillendirici en hızlı girdi şekillendirici metodu olarak görülmektedir. Fakat modelleme frekansındaki hatalı tahminlere karşı sistemde önemli büyüklükte ve istenmeyen artık titreşim oluşmaktadır.
- Türevsel Sıfır Titreşim (TST) girdi şekillendirici ST girdi şekillendiriciye kıyasla gürbüzlüğü önemli ölçüde arttırmıştır, ancak TST girdi şekillendirici bir miktar zaman gecikmesine neden olmuştur. TST şekillendirici hareket süresi tam bir titreşim periyodundayken, Sıfır Titreşim (ST) şekillendirici hareket süresi titreşiminin yarım periyodudur. Buna karşın TST girdi şekillendirici

kullanarak modelleme frekansındaki hatalı tahminlere karşı oldukça duyarsız bir sistem cevabı alınmıştır.

- TTST girdi şekillendirici TST girdi şekillendiriciden daha duyarsızdır ve sistem periyodunun yarısı kadar bir zaman gecikmesiyle gürbüzlüğün daha önemli olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. TST girdi şekillendiriciler için uygulanan algoritmanın tekrar edilmesi ile biraz daha gürbüz girdi şekillendirici tasarlanmaktadır fakat her seferinde sistem periyodunun yarısı kadar bir zaman gecikmesi oluşmaktadır.
- Artık titreşimin tolere edilebilir bir değere ayarlanması temeline dayanarak tasarımı yapılan şekillendiricilerden ED girdi şekillendirici TST girdi şekillendirici ile eşit seyahat süresine, 2T-ED girdi şekillendirici TTST girdi şekillendirici ile eşit seyahat süresine ve 3T-ED girdi şekillendirici TTTST girdi şekillendirici ile eşit seyahat süresine sahip olmasına rağmen ekstra duyarsız girdi şekillendiricilerin oldukça gürbüz olduğu görülmüştür.
- ED girdi şekillendiricinin gürbüzlüğü TST girdi şekillendiricinin gürbüzlüğünün 1,39 katı, 2T-ED girdi şekillendiricinin gürbüzlüğü TTST girdi şekillendiricinin gürbüzlüğünün 1,52 katı ve 3T-ED girdi şekillendiricinin gürbüzlüğü TTTST girdi şekillendiricinin gürbüzlüğünün 1,54 katı olarak hesaplanmıştır.
- Modifiye girdi şekillendiriciler incelendiğinde ilave her bir darbenin şekillendiricinin duyarsızlık oranını bir miktar iyileştirdiği görülmüştür.
- Modifiye edilmiş türevsel sıfır titreşim girdi şekillendiriciler türevsel sıfır titreşim girdi şekillendiricilerle seyahat süresi ve duyarsızlık oranı ile birlikte değerlendirildiğinde daha iyi bir performansa sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Artık titreşimlerin yok edilmesi veya azaltılması için kullanılan yöntemlerden bir tanesi de girdi sinyalinin, önceden bilinen sistem parametreleri kullanılarak düzenlenmesidir. Düzenlenecek girdi profilinin hesaplanmasında negatif darbelere izin verildiğinde seyahat süresi önemli ölçüde azaltılabilir. Tez çalışmaları kapsamında incelenen 8 negatif girdi şekillendiriciye ait %5 artık titreşim değerleri için gürbüzlükler, seyahat süreleri ve duyarsızlık oranlarının detaylı olarak incelendiği, grafikler ve tablolar halinde sunulduğu çalışmalar sonucunda;

- Girdi şekillendiriciler için seyahat süresinin artmasıyla gürbüzlüklerin arttığı görülmüştür.
- Negatif ST girdi şekillendiriciler modelleme hatalarına karşı oldukça duyarlıdır, hesaplamada yapılan hatalar önemli miktarda artık titreşim oluşmasına neden olmaktadır.
- Negatif TST girdi şekillendiriciler modelleme hatalarına karşı negatif ST şekillendiricilerden daha duyarsız olmakla birlikte seyahat süreleri daha uzundur.
- Gürbüzlüğün seyahat süresi oranına (Duyarsızlık oranı) bakıldığında performans olarak en iyi şekillendiricinin PT-ED şekillendirici olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Tez kapsamında incelenen girdi profilinin daha önce belirlenen fonksiyonların çözümü ile elde edildiği girdi işaretinin yumuşak geçişli olduğu CPRVPR ve Hibrit girdi şekillendiricilere ait %5 artık titreşim değerleri için gürbüzlükler, seyahat süreleri ve duyarsızlık oranlarının detaylı olarak incelendiği, grafikler ve tablolar halinde sunulduğu çalışmalar sonucunda;

- Seyahat süresi arttıkça girdi şekillendirici gürbüzlükleri de artmıştır.
- CPRVPR girdi şekillendirici modelleme hatalarına karşı oldukça hassastır. Modelleme frekansındaki hatalı tahminler sistem cevabında büyük genlikli artık titreşime sebep olmaktadır.
- Hibrit girdi şekillendirici CPRVPR girdi şekillendirici ile kıyaslandığında modelleme hatalarına karşı daha duyarsızdır. Fakat sistem periyodunun yarısı kadar kısa bir zaman gecikmesine sahiptir.

Girdi şekillendiriciler ile ilgili detaylı incelemeler sonucunda gürbüz bir metot tasarımından çok uygun durum için uygun metodun seçilmesine yönelik bir yapıya ihtiyaç olduğu görülmüştür. Bunun için bir karar destek sistemi önerilmiştir. Çalışma kapsamında; tasarlanan karar destek sistemi bulanık mantık temelli bir seçim algoritmasına dayanan, hem algoritmik hem de nitel bir bilgi tabanlı karar destek sistemi yaklaşımıdır. Yöntem fiziksel sistemden ve kullanıcıdan aldığı bilgilerle seçilmesi gereken en hızlı ve en gürbüz metodu önermektedir. BM-KDS için sağlanan girdiler ile önerilen metot ve deneysel uygulamalar sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- 1,45  $\omega_n$  modelleme frekansı ile verilen girdiler ile BM-KDS sistemi uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak 3T-ED girdi şekillendiriciyi önermiştir. ST girdi şekillendirici ile karşılaştırıldığında yüzde artık titreşim değeri; ST girdi şekillendirici için 67,4 iken önerilen metot olan 3T-ED girdi şekillendirici uygulaması için 3,4 olarak hesaplanmıştır.
- 0,65  $\omega_n$  modelleme frekansı ile verilen girdiler ile BM-KDS sistemi uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak 2T-ED girdi şekillendiriciyi önermiştir. ST girdi şekillendirici ile karşılaştırıldığında yüzde artık titreşim değeri; ST girdi şekillendirici için 54,4 iken önerilen metot olan 2T-ED girdi şekillendirici uygulaması için 3,5 olarak hesaplanmıştır.
- 1,20  $\omega_n$  modelleme frekansı ile verilen girdiler ile BM-KDS sistemi uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak ED girdi şekillendiriciyi önermiştir. ST girdi şekillendirici ile karşılaştırıldığında yüzde artık titreşim değeri; ST girdi şekillendirici için 31,6 iken önerilen metot olan ED girdi şekillendirici uygulaması için 5,3 olarak hesaplanmıştır.
- 1,30  $\omega_n$  modelleme frekansı ile verilen girdiler ile BM-KDS sistemi uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak TTTST girdi şekillendiriciyi önermiştir. ST girdi şekillendirici ile karşılaştırıldığında yüzde artık titreşim değeri; ST girdi şekillendirici için 47,3 iken önerilen metot olan TTTST girdi şekillendirici için 4,1 olarak hesaplanmıştır.
- 0,75  $\omega_n$  modelleme frekansı ile verilen girdiler ile BM-KDS sistemi uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak TTST girdi şekillendiriciyi önermiştir. ST girdi şekillendirici ile karşılaştırıldığında yüzde artık titreşim değeri; ST girdi şekillendirici için 40,1 iken önerilen metot olan TTST girdi şekillendirici için 5,4 olarak hesaplanmıştır.
- 0,85  $\omega_n$  modelleme frekansı ile verilen girdiler ile BM-KDS sistemi uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak TST girdi şekillendiriciyi önermiştir. ST girdi şekillendirici ile karşılaştırıldığında yüzde artık titreşim değeri; ST girdi şekillendirici için 24,5 iken önerilen metot olan TST girdi şekillendirici için 6,1 olarak hesaplanmıştır.
- 1,15  $\omega_n$  modelleme frekansı ile verilen girdiler ile BM-KDS sistemi uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak M-TST 2x3 girdi şekillendiriciyi önermiştir. ST girdi şekillendirici ile

karşılaştırıldığında yüzde artık titreşim değeri; ST girdi şekillendirici için 24,5 iken önerilen metot olan M-TST 2x3 girdi şekillendirici için 4 olarak hesaplanmıştır.

- 0,85  $\omega_n$  modelleme frekansı ile verilen girdiler için BM-KDS sistemi uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak Hibrit girdi şekillendiriciyi önermiştir. ST girdi şekillendirici ile karşılaştırıldığında yüzde artık titreşim değeri; ST girdi şekillendirici için 24,5 iken önerilen metot olan Hibrit girdi şekillendirici için 6,2 olarak hesaplanmıştır.
- 1,05  $\omega_n$  modelleme frekansı ile verilen girdiler için BM-KDS sistemi uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak M-ST5 girdi şekillendiriciyi önermiştir. ST girdi şekillendirici ile karşılaştırıldığında yüzde artık titreşim değeri; ST girdi şekillendirici için 8 iken önerilen metot olan M-ST5 girdi şekillendirici için 4,4 olarak hesaplanmıştır.
- 1,05  $\omega_n$  modelleme frekansı ile verilen girdiler için BM-KDS sistemi uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak M-ST4 girdi şekillendiriciyi önermiştir. ST girdi şekillendirici ile karşılaştırıldığında yüzde artık titreşim değeri; ST girdi şekillendirici için 24,5 iken önerilen metot olan M-ST4 girdi şekillendirici için 4,8 olarak hesaplanmıştır.
- 0,95  $\omega_n$  modelleme frekansı ile verilen girdiler için BM-KDS sistemi uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak M-ST3 girdi şekillendiriciyi önermiştir. ST girdi şekillendirici ile karşılaştırıldığında yüzde artık titreşim değeri; ST girdi şekillendirici için 8 iken önerilen metot olan M-ST3 girdi şekillendirici için 5,3 olarak hesaplanmıştır.
- 1,00  $\omega_n$  modelleme frekansı ile verilen girdiler için BM-KDS sistemi uygulanması gereken en hızlı ve en gürbüz girdi şekillendirici olarak CPRVPR girdi şekillendiriciyi önermiştir. ST girdi şekillendirici ile karşılaştırıldığında yüzde artık titreşim değeri; ST girdi şekillendirici için 0 iken önerilen metot olan CPRVPR girdi şekillendirici için 3,1 olarak hesaplanmıştır.

Girdi şekillendirme tekniklerinin çoğunda gürbüzlük arttıkça seyahat süresi genellikle artar. Yapılan incelemeler neticesinde; seyahat süresi ve gürbüzlük seviyesi arasındaki oranın (duyarsızlık oranı) bir yöntemden diğerine farklılık gösterdiği görülmüştür. Bu nedenle, uygun girdi şekillendirme tekniğinin seçimi için hem ele alınan sistemin

özelliklerini hem de istenen girdi şekillendirici performansını (hareket süresi ve gürbüzlük seviyesi) seçmek gereklidir. Belirli bir titreşim kontrol durumu için gerekli performans özelliklerine sahip uygun girdi şekillendirme tekniklerinin seçimi ve uygulanması teknik bir problemdir ve problemin çözümü uzmanlık gerektirmektedir. Bu problemin üstesinden gelmek için, BM-KDS yaklaşımı, robotik uygulamalar için uygun girdi şekillendirme tekniğinin seçilmesi ve uygulanması için uzmanlık bilgisine olan ihtiyacı ortadan kaldıran etkili bir çözüm olarak önerilmiştir. Önerilen yaklaşım geçerliliğini onaylamak için sonuçlar doğrusal gezer vinç sistemi üzerinde deneysel olarak test edilmiştir. Sunulan sonuçlar, yaklaşımın başarılı bir şekilde uygulanmasını doğrulamaktadır. Önerilen yaklaşımın, araştırma kapsamındaki girdi şekillendirme tekniklerinin başarılı bir şekilde uygulanması için uzmanlık bilgisi ihtiyacını büyük oranda ortadan kaldırdığı da belirtilmektedir.

Açık çevrim denetim sistemlerinin yanında kapalı çevrim denetim sistemlerinden LQR kontrolcü tasarımı yapılmış ve deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Birçok endüstriyel robot manipülatörlerin çalışmalarında teorik altyapıya katkıda bulunması için önerilen Arı Algoritması tabanlı LQR kontrolcünün tasarlandığı esnek uzuv sistemine ait matematik model Euler-Lagrange eşitliği kullanılarak elde edilmiştir. Fiziksel sistem, hareket denklemleri kullanılarak oluşturulan durum uzay modeli ile MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir. Daha sonra Arı Algoritması kullanılarak LQR kontrolcü kazancı optimize edilmiştir. Kontrolcü tasarımında motor pozisyonu ve esnek uzvun uç açısını minimum sapma ile hareketi sağlayacak LQR kontrolcünün tasarımı amaçlanmıştır. Arı Algoritması parametreleri ve amaç fonksiyonu belirlenirken sistemin dinamikleri ve benzer çalışmalar dikkate alınmıştır. Önerilen yöntemin başarısını araştırmak amacıyla sistem performansı literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmış ve sonuçlar Çizelge halinde sunulmuştur.

- Durum2, Durum3 ve Arı Algoritması tabanlı LQR kontrolcünün, sistemin referans konumdaki kararlılığını sürdürerek; uç konumun dengeye ulaştırdığı,
- Her bir kontrolcünün, sistemin hareketi üzerinde de benzer eğilim gösterdiği ancak kontrolcülerin birbirlerine göre farklı performans gösterdiği,

- AA-LQR kontrolcünün maksimum aşma, yerleşme zamanı, ve yükselme zamanı gibi performans kriterleri birlikte incelendiğinde diğer iki kontrolcüye göre daha başarılı bir performans gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Buna göre Arı Algoritması tabanlı LQR kontrolcünün sistemin performansını önemli ölçüde iyileştirdiği sonucuna ulaşılmış ve önerilen yöntemin daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Arı algoritması tabanlı LQR kontrolcü kazanç matrisinin sistem cevabı üzerindeki başarılı benzetim sonuçları, deneysel olarak doğrulanarak yöntemin uygulanabilirliği ispatlanmıştır. Sonuçlar grafikler halinde sunularak detaylı incelemeler yapılmıştır. Sonuç olarak sunulan yöntemin literatürdeki benzer sistemler ile karşılaştırıldığında daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Deneysel doğrulama ile desteklenen tasarımın; farklı sistemler ve farklı kontrolcü tasarımları için de model olabileceği öngörülmektedir.

Geri besleme kontrol yöntemi olarak; mevcut sezgisel algoritmaları çeşitlendirmek ve sistem cevaplarını iyileştirmek için Arı Algoritması tabanlı LQR kontrolcü tasarımı önerilmiştir. Çalışmanın ana hedefi, Arı Algoritmasının LQR kontrolcü optimizasyonunda kullanılabilirliğini incelemenin yanı sıra Arı Algoritması parametrelerinin sistem cevabı üzerindeki etkisini de araştırmaktır. Bu sebeple, Arı Algoritması ile mevcut arama yöntemlerinin kontrolcü tasarımına yönelik performanslarının karşılaştırılması farklı ve daha detaylı bir çalışmada yer verilmesi düşünülmektedir.



## KAYNAKLAR

- Abdullahi, A. M., Mohamed, Z., Selamat, H., Pota, H. R., Abidin, M. Z., Ismail, F. S., & Haruna, A. (2018). Adaptive output-based command shaping for sway control of a 3D overhead crane with payload hoisting and wind disturbance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 98, 157-172.
- Ahmad, M. A. (2008). Vibration and input tracking control of flexible manipulator using LQR with non-collocated PID controller. In *Computer Modeling and Simulation, 2008. EMS'08. Second UKSIM European Symposium on* (pp. 40-45). IEEE.
- Alam, M. S., & Tokhi, M. O. (2008). Hybrid fuzzy logic control with genetic optimisation for a single-link flexible manipulator. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21(6), 858-873.
- Altaş, İ. H. (1999). Bulanık Mantık: Bulanık Denetim. *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 64, 76-81.
- Alhazza, K. A. (2017). Adjustable maneuvering time wave-form command shaping control with variable hoisting speeds. *Journal of Vibration and Control*, 23(7), 1095-1105.
- Alıcı, G., Kapucu, S., & Bayseç, S. (2000). On preshaped reference inputs to reduce swing of suspended objects transported with robot manipulators. *Mechatronics*, 10(6), 609-626.
- Anderson, B. D., & Moore, J. B. (2007). *Optimal control: linear quadratic methods*. Courier Corporation.
- Aspinwall, D. M. (1980). Acceleration profiles for minimizing residual response. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 102(1), 3-6.
- Ata, B., & Coban, R. (2015). Artificial bee colony algorithm based linear quadratic optimal controller design for a nonlinear inverted pendulum. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 3(1), 1-6.

- Balas, M. (1982). Trends in large space structure control theory: fondest hopes, wildest dreams. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 27(3), 522-535.
- Balazinski, M., Bellerose, M., & Czogala, E. (1994). Application of fuzzy logic techniques to the selection of cutting parameters in machining processes. *Fuzzy sets and systems*, 63(3), 307-317.
- Baroudi, M., Saad, M., Ghie, W., Kaddouri, A., & Ziade, H. (2010). Vibration controllability and observability of a single-link flexible manipulator. In *Systems Signals and Devices (SSD), 2010 7th International Multi-Conference on* (pp. 1-6). IEEE.
- Bilgic, H. H., Sen, M. A., & Kalyoncu, M. (2016). Tuning of LQR controller for an experimental inverted pendulum system based on The Bees Algorithm. *Journal of Vibroengineering*, 18(6).
- Blackburn, D., Singhose, W., Kitchen, J., Patrangenaru, V., Lawrence, J., Kamoi, T., & Taura, A. (2010). Command shaping for nonlinear crane dynamics. *Journal of Vibration and Control*, 16(4), 477-501.
- Bolz, R. E. (1973). *CRC handbook of tables for applied engineering science*. CRC press.
- Boeren, F., Bruijnen, D., van Dijk, N., & Oomen, T. (2014). Joint input shaping and feedforward for point-to-point motion: Automated tuning for an industrial nanopositioning system. *Mechatronics*, 24(6), 572-581.
- Cambers, J. C., & Feliu-Batlle, V. (2017). Input-state feedback linearization control of a single-link flexible robot arm moving under gravity and joint friction. *Robotics and Autonomous Systems*, 88, 24-36.
- Cao, F., & Liu, J. (2017). An adaptive iterative learning algorithm for boundary control of a coupled ODE–PDE two-link rigid–flexible manipulator. *Journal of the Franklin Institute*, 354(1), 277-297.

- Chen, L. X., & Sun, J. Q. (2014). Multi-objective optimal design and experimental validation of tracking control of a rotating flexible beam. *Journal of Sound and Vibration*, 333(19), 4415-4426.
- Chu, Z., & Hu, J. (2016). An improved recursive least square-based adaptive input shaping for zero residual vibration control of flexible system. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(4)
- Conker, Ç., Kilic, A., Mistikoglu, S., Kapucu, S., & Yavuz, H. (2014). An enhanced control technique for the elimination of residual vibrations in flexible-joint manipulators. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 60(9), 592-599.
- Conker, C., Yavuz, H., & Bilgic, H. H. (2016). 2097. A review of command shaping techniques for elimination of residual vibrations in flexible-joint manipulators. *Journal of Vibroengineering*, 18(5).
- Cuka, B., & Kim, D. W. (2017). Fuzzy logic based tool condition monitoring for end-milling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 47(C), 22-36.
- Dharne, A. G., & Jayasuriya, S. (2007). Robust adaptive control of residual vibration in point-to-point motion of flexible bodies. *Journal of Vibration and Control*, 13(7), 951-968. Dubois, Didier, and Henri Prade. 1979. "Fuzzy Real Algebra: Some Results." *Fuzzy Sets and Systems* 2(4): 327-48.
- Dwivedy, S. K., & Eberhard, P. (2006). Dynamic analysis of flexible manipulators, a literature review. *Mechanism and machine theory*, 41(7), 749-777.
- Ertugrul, M., & Kaynak, O. (2000). Neuro sliding mode control of robotic manipulators. *Mechatronics*, 10(1-2), 239-263.
- Fang, Y., Wang, P., Sun, N., & Zhang, Y. (2014). Dynamics analysis and nonlinear control of an offshore boom crane. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(1), 414-427.
- Gieck, K. (1986). *Engineering formulas*. New York, US: McGraw-Hill.

- Green, A., & Sasiadek, J. Z. (2004). Dynamics and trajectory tracking control of a two-link robot manipulator. *Modal Analysis*, 10(10), 1415-1440.
- Gurleyuk, S.S., (2015). *Dinamik sistemler, kontrol ve giriş şekillendirici denetim MATLAB örnekli*. Ankara: Palme Yayıncılık.
- Gürleyük, S. S., & Cinal, Ş. (2007). Robust three-impulse sequence input shaper design. *Journal of Vibration and Control*, 13(12), 1807-1818.
- Hassani, K., & Lee, W. S. (2014). Optimal tuning of linear quadratic regulators using quantum particle swarm optimization. In *Proceedings of the International Conference on Control, Dynamic Systems, and Robotics (CDSR'14)* (pp. 14-15).
- Jnifene, A. (2007). Active vibration control of flexible structures using delayed position feedback. *Systems & control letters*, 56(3), 215-222.
- Kapucu, S., Alici, G., & Baysec, S. (2001). Residual swing/vibration reduction using a hybrid input shaping method. *Mechanism and Machine Theory*, 36(3), 311-326.
- Kapucu, Sadettin & Mahmut Kaplan. (2005). Hafif sönümlü sistemlerin girdi komutu biçimlendirme tekniği ile artık titreşimlerinin azaltılması. 12. *Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu*, 347-354.
- Kapucu, S., Yıldırım, N., Yavuz, H., & Bayseç, S. (2008). Suppression of residual vibration of a translating–swinging load by a flexible manipulator. *Mechatronics*, 18(3), 121-128.
- Kim, D., & Singhose, W. (2010). Performance studies of human operators driving double-pendulum bridge cranes. *Control Engineering Practice*, 18(6), 567-576.
- Klir, G., & Yuan, B. (1995). *Fuzzy sets and fuzzy logic* (Vol. 4). New Jersey: Prentice hall.
- Kuo, K. Y., & Lin, J. (2002). Fuzzy logic control for flexible link robot arm by singular perturbation approach. *Applied soft computing*, 2(1), 24-38.

- Kuo, P., Hosein, A., & Farmanborda, M. S. (2013). Nonlinear output feedback control of a flexible link using adaptive neural network: controller design. *Journal of Vibration and Control*, 19(11), 1690-1708.
- Lee, C. C. (1990). Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. I. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 20(2), 404-418.
- Li, W. P., Luo, B., & Huang, H. (2016). Active vibration control of flexible joint manipulator using input shaping and adaptive parameter auto disturbance rejection controller. *Journal of Sound and Vibration*, 363, 97-125.
- Liu, X., Yang, C., Chen, Z., Wang, M., & Su, C. Y. (2018). Neuro-adaptive observer based control of flexible joint robot. *Neurocomputing*, 275, 73-82.
- Liu, Z., Liu, J., & He, W. (2017). An adaptive iterative learning algorithm for boundary control of a flexible manipulator. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 31(6), 903-916.
- Lou, J., Liao, J., Wei, Y., Yang, Y., & Li, G. (2017). Experimental Identification and Vibration Control of A Piezoelectric Flexible Manipulator Using Optimal Multi-Poles Placement Control. *Applied Sciences*, 7(3), 309.
- Smith, O. J. (1957). Posicast control of damped oscillatory systems. *Proceedings of the IRE*, 45(9), 1249-1255.
- Magee, D. P., & Book, W. J. (1992). The application of input shaping to a system with varying parameters. Georgia Institute of Technology.
- Masoud, Z. N., & Alhazza, K. A. (2017). A smooth multimode waveform command shaping control with selectable command length. *Journal of Sound and Vibration*, 397, 1-16.
- IEA (20 Mayıs 2018). <https://www.iea.org/newsroom/news/2011/may/2011-05-18-.html>

- Meckl, P. H., & Seering, W. P. (1990). Experimental evaluation of shaped inputs to reduce vibration for a cartesian robot. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 112(2), 159-165.
- Mohamed, Z., & Tokhi, M. O. (2004). Command shaping techniques for vibration control of a flexible robot manipulator. *Mechatronics*, 14(1), 69-90.
- Nanos, K., & Papadopoulos, E. G. (2015). On the dynamics and control of flexible joint space manipulators. *Control Engineering Practice*, 45, 230-243.
- Newman, D., & Vaughan, J. (2017). Reduction of Transient Payload Swing in a Harmonically Excited Boom Crane by Shaping Luff Commands. In *ASME 2017 Dynamic Systems and Control Conference*. American Society of Mechanical Engineers.
- Oral, Ö., Çetin, L., & Uyar, E. (2010). A Novel Method on Selection of Q And R Matrices In The Theory Of Optimal Control. *International Journal of Systems Control*, 1(2).
- Ozgoli, S., & Taghirad, H. D. (2006). A survey on the control of flexible joint robots. *Asian Journal of Control*, 8(4), 332-344.
- Pao, L. Y., & Singhose, W. E. (1996). Unity-magnitude input shapers and their relation to time-optimal control. *IFAC Proceedings Volumes*, 29(1), 385-390.
- Pao, L. Y., & Singhose, W. E. (1995). On the equivalence of minimum time input shaping with traditional time-optimal control. In *Control Applications, 1995., Proceedings of the 4th IEEE Conference on* (pp. 1120-1125). IEEE.
- Pao, L. Y., & Lau, M. A. (2000). Robust input shaper control design for parameter variations in flexible structures. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 122(1), 63-70. Paul, Leo. 2000. "I ; I." (4): 1120–25.
- Pham, D. T., & Castellani, M. (2014). Benchmarking and comparison of nature-inspired population-based continuous optimisation algorithms. *Soft Computing*, 18(5), 871-903.

- Pham, D. T., Koç, E., Kalyoncu, M., & Tinkır, M. (2008). Hierarchical PID controller design for a flexible link robot manipulator using the bees algorithm. *methods (eg. genetic algorithm)*, 25, 32.
- Pham, D. T., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S., & Zaidi, M. (2005). The bees algorithm. Technical note. *Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University, UK*, 1-57.
- Pham, D. T., Ghanbarzadeh, A., Koç, E., Otri, S., Rahim, S., & Zaidi, M. (2006). -The Bees Algorithm—A Novel Tool for Complex Optimisation Problems. In *Intelligent Production Machines and Systems* (pp. 454-459).
- Pham, D. T., & Kalyoncu, M. (2009). Optimisation of a fuzzy logic controller for a flexible single-link robot arm using the Bees Algorithm. In *Industrial Informatics, 2009. INDIN 2009. 7th IEEE International Conference on* (pp. 475-480). IEEE.
- Piazzì, A., & Visioli, A. (2000). Minimum-time system-inversion-based motion planning for residual vibration reduction. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 5(1), 12-22.
- Plitsos, S., Repoussis, P. P., Mourtos, I., & Tarantilis, C. D. (2017). Energy-aware decision support for production scheduling. *Decision Support Systems*, 93, 88-97.
- Quanser Inc 2012a. "IP02 Inverted Pendulum user manuel."
- Quanser Inc 2012 b "SRV02-Series Flexgagge-Rotary Flexible link user manual."
- Rahman, Z. A., Mat Isa, A. A., Ali, H. H., & Anuar, M. A. (2013). Control of flexible beam with unmodelled dynamics using second-order pole placement and LQR techniques. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 393, pp. 675-682). Trans Tech Publications.
- Ramli, L., Mohamed, Z., & Jaafar, H. I. (2018). A neural network-based input shaping for swing suppression of an overhead crane under payload hoisting and mass variations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 107, 484-501.

- Rappole, B. W., Singer, N. C., & Seering, W. P. (1993, June). Input shaping with negative sequences for reducing vibrations in flexible structures. In *American Control Conference, 1993* (pp. 2695-2699). IEEE.
- Resta, F., Ripamonti, F., Cazzulani, G., & Ferrari, M. (2010). Independent modal control for nonlinear flexible structures: An experimental test rig. *Journal of Sound and Vibration*, 329(8), 961-972.
- Rodriguez, R. M., Martinez, L., & Herrera, F. (2012). Hesitant fuzzy linguistic term sets for decision making. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 20(1), 109-119.
- Sadeghian, R., & Sadeghian, M. R. (2016). A decision support system based on artificial neural network and fuzzy analytic network process for selection of machine tools in a flexible manufacturing system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82(9-12), 1795-1803.
- Sahinkaya, M. N. (2001). Input shaping for vibration-free positioning of flexible systems. *Proceedings of the Institution of mechanical engineers, part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 215(5), 467-481.
- Sahinkaya, M. N. (2004). Exponential input shaping for vibration free positioning of lightly damped multi-mode systems. In *Seventh International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC'04)*. University of Bath.
- Saini, S. C., Sharma, Y., Bhandari, M., & Satija, U. (2012). Comparison of pole placement and LQR applied to single link flexible manipulator. In *Communication Systems and Network Technologies (CSNT), 2012 International Conference on* (pp. 843-847). IEEE.
- Sallaberger, C., & Force, S. P. T. (1997). Canadian space robotic activities. *Acta Samuel*, O. W., Asogbon, G. M., Sangaiah, A. K., Fang, P., & Li, G. (2017). An integrated decision support system based on ANN and Fuzzy\_AHP for heart failure risk prediction. *Expert Systems with Applications*, 68, 163-172.



- Sen, M. A., & Kalyoncu, M. (2016). Optimal Tuning of a LQR Controller for an Inverted Pendulum Using The Bees Algorithm. *Journal of Automation and Control Engineering Vol, 4(5)*, 384–87.
- Sen, M. A., & Kalyoncu, M. (2015). Optimisation of a PID Controller for an Inverted Pendulum Using the Bees Algorithm. *Applied Mechanics & Materials*.
- Shan, J., Liu, H. T., & Sun, D. (2005). Modified input shaping for a rotating single-link flexible manipulator. *Journal of Sound and Vibration*, 285(1-2), 187-207.
- Shang, J., Payne, C. J., Clark, J., Noonan, D. P., Kwok, K. W., Darzi, A., & Yang, G. Z. (2012, October). Design of a multitasking robotic platform with flexible arms and articulated head for minimally invasive surgery. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*(pp. 1988-1993). IEEE.
- Singer, N. C., & Seering, W. P. (1990). Preshaping command inputs to reduce system vibration. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 112(1), 76-82.
- Singer, N., Singhose, W., & Kriekku, E. (1997). *An input shaping controller enabling cranes to move without sway* (No. WSRC-TR--97-0049; CONF-970464--17). Westinghouse Savannah River Co., Aiken, SC (United States).
- Singer, N. C., & Seering, W. P. (1988). Using acausal shaping techniques to reduce robot vibration. In *Robotics and Automation, 1988. Proceedings., 1988 IEEE International Conference on* (pp. 1434-1439). IEEE.
- Singhose, W. E. (1997). *Command generation for flexible systems* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- Singhose, W. E., Seering, W. P., & Singer, N. C. (1997). Time-optimal negative input shapers. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 119(2), 198-205.
- Singhose, W., & Pao, L. (1997). A comparison of input shaping and time-optimal flexible-body control. *Control Engineering Practice*, 5(4), 459-467.

- Singhose, W., Seering, W., & Singer, N. (1994). Residual vibration reduction using vector diagrams to generate shaped inputs. *Journal of Mechanical Design*, 116(2), 654-659.
- Singhose, W. (2009). Command shaping for flexible systems: A review of the first 50 years. *International journal of precision engineering and manufacturing*, 10(4), 153-168.
- Singhose, W. E., Seering, W. P., & Singer, N. C. (1996). Input shaping for vibration reduction with specified insensitivity to modeling errors. *Japan-USA Sym. on Flexible Automation*, 1, 307-13.
- Singhose, W. E., Porter, L. J., & Singer, N. C. (1995). Vibration reduction using multi-hump extra-insensitive input shapers. In *Proceedings of the American Control Conference*(Vol. 5, pp. 3830-3830). AMERICAN AUTOMATIC CONTROL COUNCIL.
- Singhose, W., Porter, L., Kenison, M., & Kriikku, E. (2000). Effects of hoisting on the input shaping control of gantry cranes. *Control engineering practice*, 8(10), 1159-1165.
- Tahir, N. M., Hassan, S. M., Mohamed, Z., & Ibrahim, A. G. (2017). Output based input shaping for optimal control of single link flexible manipulator. *International Journal on Smart Sensing & Intelligent Systems*, 10(2).
- Tallman, G., & Smith, O. (1958). Analog study of dead-beat posicast control. *IRE Transactions on Automatic Control*, 4(1), 14-21.
- Thomson, W. (1996). *Theory of vibration with applications*. CRC Press.
- Tian, L., & Collins, C. (2004). A dynamic recurrent neural network-based controller for a rigid-flexible manipulator system. *Mechatronics*, 14(5), 471-490.
- Tijani, I. B., Akmeliawati, R., & Abdullateef, A. I. (2013). Control of an inverted pendulum using MODE-based optimized LQR controller. In *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013 8th IEEE Conference on* (pp. 1759-1764). IEEE.

- Tinkir, M., Önen, Ü., & Kalyoncu, M. (2010). Modelling of neurofuzzy control of a flexible link. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 224(5), 529-543.
- Tromme, E., Sonnevile, V., Guest, J. K., & Bröls, O. (2018). System-wise equivalent static loads for the design of flexible mechanisms. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 329, 312-331.
- Tuttle, T. D., & Seering, W. P. (1994). A zero-placement technique for designing shaped inputs to suppress multiple-mode vibration. In *American Control Conference, 1994* (Vol. 3, pp. 2533-2537). IEEE.
- Tuttle, T. D., & Seering, W. P. (1995). Vibration reduction in 0-g using input shaping on the MIT middeck active control experiment. In *American Control Conference, Proceedings of the 1995* (Vol. 1, pp. 919-923). IEEE.
- Utkin, V., Guldner, J., & Shi, J. (2009). *Sliding mode control in electro-mechanical systems*. CRC press.
- Vaughan, J., Yano, A., & Singhose, W. (2008). Performance comparison of robust negative input shapers. In *American Control Conference, 2008* (pp. 3257-3262). IEEE.
- Wang, H., Zhou, H., Wang, D., & Wen, S. (2013). Optimization of LQR controller for inverted pendulum system with artificial bee colony algorithm. In *Advanced Mechatronic Systems (ICAMEchS), 2013 International Conference on* (pp. 158-162). IEEE.
- Wongsathan, C., & Sirima, C. (2009). Application of GA to design LQR controller for an Inverted Pendulum System. In *Robotics and Biomimetics, 2008. ROBIO 2008. IEEE International Conference on* (pp. 951-954). IEEE.
- Wilbanks, J. J., Adams, C. J., & Leamy, M. J. (2018). Two-scale command shaping for feedforward control of nonlinear systems. *Nonlinear Dynamics*, 92(3), 885-903.

- Yavuz, H., Mıstıkoğlu, S., & Kapucu, S. (2012). Hybrid input shaping to suppress residual vibration of flexible systems. *Journal of Vibration and Control*, 18(1), 132-140.
- Yordanova, S., Merazchiev, D., & Jain, L. (2015). A two-variable fuzzy control design with application to an air-conditioning system. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, 23(2), 474-481.
- Zadeh, Lotfi A. "Fuzzy sets," *Inf. Control*, vol. 8, pp. 338–353, 1965.
- Zhang, J., Zhang, L., & Xie, J. (2011). Application of memetic algorithm in control of linear inverted pendulum. In *Cloud Computing and Intelligence Systems (CCIS), 2011 IEEE International Conference on* (pp. 103-107). IEEE.
- Zimmermann, H. J. (2012). *Fuzzy sets, decision making, and expert systems* (Vol. 10). Springer Science & Business Media.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BİLGİÇ, Hasan Hüseyin  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 22.08.1987, Kırıkkale  
Medeni hali : Evli  
Telefon : 0 (326) 613 56 00 - 2419  
Faks : 0 (326) 613 56 13 - 2403  
e-mail : hhuseyin.bilgic@iste.edu.tr



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	İskenderun Teknik Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2018
Yüksek lisans	Mustafa Kemal Üniversitesi / Makina Mühendisliği	2014
Lisans	Selçuk Üniversitesi / Makina Mühendisliği	2011

Yabancı Dil	Puanı	Dönemi
YÖKDİL (İngilizce)	83,75	Mart 2017
YDS (İngilizce)	75	Eylül 2017

## Yayınlar

### A. Uluslararası Hakemli (SCI) Dergilerde Yayımlanan Makaleler

A.1. Bilgiç Hasan Hüseyin, Sen Muhammed Arif, Kalyoncu Mete. Tuning of LQR controller for an experimental inverted pendulum system based on The Bees Algorithm. Journal of Vibroengineering, Vol. 18, Issue 6, 2016, p. 3684-3694.

A.2. Conker Çağlar, Yavuz Hakan, Bilgiç Hasan Hüseyin. A Review of Command Shaping Techniques for Elimination of Residual Vibrations in Flexible-Joint Manipulators. Journal of Vibroengineering Aug2016, Vol. 18 Issue 5, p2947-2958.

### B. Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitaplarında Basılan Bildiriler

B.1. Bilgiç Hasan Hüseyin, Conker Çağlar, Yavuz Hakan (2017). Anfis Based Fuzzy Controller Design of Ball and Beam System Using PD Controller. International Advanced Researches Engineering Congress-2017, 1(1), 493-493. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3744635)

B.2. Bilgiç Hasan Hüseyin, Conker Çağlar, Yavuz Hakan, Yapıcı Ahmet (2017). Designing of a Decision Support System for Input Shapers. 2. ULUSLARARASI MÜHENDİSLİK MİMARLIK VE TASARIM KONGRESİ, 1(1), 745-745. - (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3816501)

B.3. Bilgiç Hasan Hüseyin, Koç Yıldız, Yağlı Hüseyin, Koç Ali (2017). Sıfır Enerjili ve Pasif Evlerin Havalandırma Sistemi ve Tasarımı. 1. Uluslararası İleri Araştırmalar ve Mühendislik Kongresi, 182-191. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3744728)

B.4. Bilgiç Hasan Hüseyin, Yağlı Hüseyin, Koç Yıldız, Koç Ali (2017). Designing, Analysing and Optimization of an Energy Recovered Room Type Ventilating System. 2nd International Congress on Engineering Architecture and Design, 649-650. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3744487)

B.5. Şanverdi Sevda, Bilgiç Hasan Hüseyin, Yağlı Hüseyin, Karakuş Cuma, Koç Ali (2017). Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık ve Doğrusal Regresyon Modeli Kullanılarak Antakya Bölgesi için Rüzgâr Hızı Tahmini. 2.ULUSLARARASI MÜHENDİSLİK MİMARLIK VE TASARIM KONGRESİ, 751-752. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3604647)

B.6. Yağlı Hüseyin, Bilgiç Hasan Hüseyin, Koç Yıldız, Koç Ali (2016). Heat Exchanger Optimization and Design via Reverse Engineering. International Conference on Natural Science and Engineering(ICNASE'16), 1(1), 2579-2585. (Tam Metin Bildiri/)(Yayın No:2868364)

B.7. Bilgiç Hasan Hüseyin, Conker Çağlar, Yavuz Hakan (2016). A New Fuzzy Logic Controller Approach for Stabilization Control of Double Inverted Pendulum. International Conference on Natural Science and Engineering(ICNASE'16), 1(1), 2610-2619. (Tam Metin Bildiri/)(Yayın No:2868375)

B.8. Bilgiç Hasan Hüseyin, Mert İlker, Karakuş Cuma (2016). Estimation of Wind Speed Using Artificial Neural Network MethodBased Multiple Linear Regression. International Conference on Natural Science and Engineering(ICNASE'16), 1(1), 2620-2628. (Tam Metin Bildiri/)(Yayın No:2868387)

## C. KİTAPLAR

## D. ULUSAL HAKEMLİ DERGİLERDE YAYIMLANAN MAKALELER

D.1. Şen Muhammed Arif, Bilgiç Hasan Hüseyin, Kalyoncu Mete. (2016). Çift Ters Sarkaç Sisteminin Denge ve Konum Kontrolü için Arı Algoritması ile LQR Kontrolcü Parametrelerinin Tayini. Engineer & the Machinery Magazine, 57(679) p. 53-62.

D.2. Bilgiç Hasan Hüseyin, Yağlı, Hüseyin, Koç Ali, Yapıcı Ahmet. Deneysel bir organik Rankine çevriminde yapay sinir ağları (YSA) yardımıyla gç tahmini. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi. 2016. c. 4-1 s. 7-17

## E. ULUSAL BİLİMSEL TOPLANTILARDA SUNULAN VE BİLDİRİ KİTAPLARINDA BASILAN BİLDİRİLER

E.1. Bilgiç Hasan Hüseyin, Mert İlker, Karakuş Cuma. Antakya Bölgesi Rüzgar Hızı Verisinin Yapay Sinir Ağı ve Çoklu Lineer Regresyon Yaklaşımı Yöntemleri ile Tahmini. EEB 2016 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, s.120-126 11-13 Mayıs 2016, Tokat TÜRKİYE

E.2. Bilgiç Hasan Hüseyin, Conker Çağlar, Yavuz Hakan, Şen Muhammed Arif. Sarkaç Tipi Bir Tepe Vincinin Kontrolüne Bulanık Yaklaşım. Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu, İzmir, 14-17 Haziran 2015

E.3. Conker Çağlar, Bilgiç Hasan Hüseyin, Yavuz Hakan. Esnek Sistemlerin Artık Titreşim Kontrolünde Konvansiyonel Negatif Girdi Şekillendirme Teknikleri ve Gürbüzlüklerinin Kıyaslanması. Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu, İzmir, 14-17 Haziran 2015

E.4. Bilgiç Hasan Hüseyin, Şen Muhammed Arif, Yapıcı Ahmet, Kalyoncu Mete. Doğrusal Ters Sarkacın Denge Kontrolü İçin Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık & LQR Kontrolcü Tasarımı. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı–(TOK 2014)(Poster), Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı Bildiriler Kitabı, s.921-926.



## DİZİN

**A**

açık çevrim · iv, 1, 2, 3, 5, 6, 8,  
13, 14, 19, 81, 82, 125  
ağırlık matrisleri · 116, 117  
ağırlık merkezi metodu · 87, 93  
amaç fonksiyonunu · 117  
Arı Algoritması · iv, viii, x, xi, xv,  
xvi, xx, 4, 5, 6, 7, 75, 76, 77,  
80, 115, 116, 117, 118, 119,  
120, 121, 124, 130, 131

**B**

Bilgi Tabanı · 70  
Birim Genlik · xiv, xx, xxi, 12, 55,  
56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63  
Bozucu giriş · 14, 15  
bulanık küme teorisi · 69  
Bulanık Mantık · iv, viii, 69, 75,  
81, 82, 83, 94, 96, 97, 99, 100,  
101, 102, 103, 105, 106, 107,  
108, 109, 110, 132  
Bulanıklaştırma · 70, 72

**C**

CPRPVR · viii, xiv, 65, 66

**Ç**

Çıkarım Birimi · 70

**D**

doğal frekans · 2, 9, 12, 16, 21,  
33, 34, 50, 81, 88, 92, 93  
Durulaştırma · 70

**E**

Ekstra Duyarsız · vii, viii, x, xiii,  
xiv, xvi, xx, xxi, 9, 33, 41, 42,  
43, 44, 45, 46, 53, 60, 61, 62,  
63, 114  
esnek robot kol · 1, 7  
esnek sistemler · iv, 125  
esnek uzvun · 115, 130  
eyleyici · 14, 15

**F**

faz farkı · 18

**G**

gecikme zamanı · 20  
geri besleme · 1, 3, 6, 8, 14, 15,  
19, 74, 125  
Gibbs-Appel · 21  
girdi şekillendirici · iv, vii, viii, xii,  
xiii, xiv, xv, xvi, 4, 6, 7, 9, 10,  
11, 21, 33, 35, 36, 37, 38, 39,  
40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47,  
48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 57,  
59, 61, 63, 64, 66, 67, 68, 69,  
81, 82, 83, 85, 86, 87, 88, 92,  
93, 95, 96, 97, 98, 99, 100,  
101, 102, 103, 104, 105, 106,  
107, 108, 109, 110, 111, 112,  
113, 114, 115, 125, 126, 127,  
128, 129, 130

Girdi Şekillendirme · iv

gürbüzlük · 33, 35, 43, 45, 47, 57,  
59, 82, 113, 115, 129

**H**

Hamilton prensibi · 21  
Hareket üretici · 14, 15  
hassas konum kontrolü · 1  
hassasiyet eğrisi · 32, 35, 36, 37,  
38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45,  
46, 48, 49, 50, 51, 52, 66, 67,  
68, 92  
Hibrit girdi şekillendirici · 68,  
105, 129

**İ**

ikinci merteye bir sistem · xii, 19,  
20, 67  
ileri besleme · 1, 6, 8, 13, 82

**K**

kalıcı durum hatası · 76, 117  
kapalı çevrim · iv, xii, 1, 2, 3, 4, 5,  
6, 7, 8, 13, 14, 19, 116, 125,  
130  
Karar Destek Sistemi · iv, viii, 81,  
83, 96, 97, 99, 100, 101, 102,  
103, 105, 106, 107, 108, 109,  
110  
kısıtlama denklemleri · 10  
Kirchhoff Voltage · 24, 29  
kontrol sinyali · 2, 8, 14, 15

**L**

Lagrange · iv, v, 7, 21, 24, 30,  
124, 130  
Lagrange-Euler · 21  
logaritmik azalma · 17, 18, 31

LQR · iv, v, viii, xv, xvi, xx, 4, 5, 6,  
7, 73, 74, 75, 115, 116, 117,  
118, 119, 120, 121, 124, 130,  
131, 132, 133, 138, 139, 140,  
141, 142

LQR kontrolcü · iv, viii, 4, 6, 7,  
75, 115, 116, 117, 119, 121,  
124, 130, 131

---

## M

maksimum aşım · 20

MATLAB · iv, v, xii, 4, 5, 21, 24,  
25, 30, 74, 130, 135

minimum operatörü · 72, 93

---

## N

Newton-Euler · 21

Normalize frekans · 33

---

## O

optimizasyon · xi, 2, 6, 117, 118,  
124

---

## Ö

örnekleme zamanı · 2, 14, 125

---

## P

parametre tahmin hatası · x, 83,  
85, 87, 92, 93, 94, 96, 97, 99,  
100, 101, 102, 103, 105, 106,  
107, 108, 109

Parçalı Toplam · xiv, xx, xxi, 55,  
56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63

performans indeksi · 73, 74

PID · 7, 75, 132, 138, 140

posicast · 9, 141

---

## Q

Quanser · iv, v, 4, 22, 27, 124, 138

---

## R

Ricatti Eşitliğinin · 74

robot manipülatörler · 81

---

## S

seyahat süresi · 10, 11, 35, 36, 37,  
38, 39, 40, 41, 43, 45, 47, 48,  
49, 50, 51, 52, 53, 55, 57, 58,  
59, 61, 63, 65, 67, 68, 82, 83,  
85, 87, 93, 94, 96, 97, 99, 100,  
101, 102, 103, 105, 106, 107,  
108, 109, 113, 114, 115, 126,  
127, 129

Sıfır Titreşim · vii, viii, x, xii, xiii,  
xiv, xx, xxi, 9, 12, 33, 35, 36,  
37, 38, 39, 40, 47, 48, 49, 50,  
51, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 59,  
92, 125

Simulink · iv, v, xii, 5, 21, 24, 25,  
30, 130

sistem periyodu · xx, 18, 37, 43,  
51, 68

sönüm oranı · xix, 2, 16, 17, 18,  
21, 23, 28, 31, 32, 34, 55, 60,  
81, 92

---

## T

tepe zamanı · 20, 117

titreşim · iv, xiii, xiv, xxi, 2, 8, 9,  
14, 16, 17, 31, 32, 33, 34, 35,  
36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43,  
44, 45, 46, 48, 49, 50, 51, 52,  
53, 54, 57, 58, 60, 64, 65, 66,  
67, 68, 81, 82, 88, 92, 93, 96,

97, 98, 99, 100, 101, 102, 103,  
104, 105, 106, 107, 108, 109,  
110, 111, 113, 114, 115, 125,  
126, 127, 128, 129, 130

titreşim eliminasyon · 9, 81, 88

Transfer fonksiyonu · 16

Türevsel Sıfır Titreşim · 9, 12, 58

---

## U

uç konum kontrolü · 115

---

## Ü

üçgen üyelik fonksiyonları · 70,  
85, 86, 87

Üyelik derecesi · 69

üyelik fonksiyonu · xix, 69, 71

---

## V

Virtüel iş · 21

---

## Y

yakınsama · xvi, 118

Yapay zeka · 7

yerleşme zamanı · 8, 20, 75, 117,  
120, 130

yükselme zamanı · 20, 73, 117,  
120, 130

Yüzde artık titreşim · 92

---

## Z

zaman gecikmesi · 9, 53, 97, 98,  
99, 101, 102, 103, 104, 105,  
107, 108, 109, 113, 114, 126



**TEKNOVERSITE**



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

