

**TEK UZUVLU ESNEK MANİPÜLATÖRÜN ARTIK
TİTREŞİMLERİNİN BASKILANMASINDA
OPTİMİZASYON TABANLI BİR KONTROL
ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ**

Sezgin ESER



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TEK UZUVLU ESNEK MANİPÜLATÖRÜN ARTIK TİTREŞİMLERİNİN
BASKILANMASINDA OPTİMİZASYON TABANLI BİR KONTROL
ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ**

Sezgin ESER
0000-0001-7906-2324

Dr. Öğr. Üyesi Sevda TELLİ ÇETİN
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Sezgin ESER tarafından hazırlanan “TEK UZUVLU ESNEK MANİPÜLATÖRÜN ARTIK TİTREŞİMLERİNİN BASKILANMASINDA OPTİMİZASYON TABANLI BİR KONTROL ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Sevda TELLİ ÇETİN

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Sevda TELLİ ÇETİN
0000-0002-3281-9112
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Osman KOPMAZ
0000-0002-9429-9300
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr. Zeliha KAMIŞ KOCABIÇAK
0000-0003-3292-8324
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Hüray CAN
0000-0002-1049-9242
Balıkesir Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÜLKER
0000-0002-6416-0973
Bursa Teknik Üniversitesi,
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

.././.....

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

25/05/2022

Sezgin ESER

ÖZET

Doktora Tezi

TEK UZUVLU ESNEK MANİPÜLATÖRÜN ARTIK TİTREŞİMLERİNİN BASKILANMASINDA OPTİMİZASYON TABANLI BİR KONTROL ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ

Sezgin ESER

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sevda TELLİ ÇETİN

Bu tez çalışmasında tek uzuvlu esnek bir manipülatör için sistem enerjisine dayanan bir kontrolcü geliştirilmiştir. Esnek uzvun modellenmesinde Euler-Bernoulli kirişi dikkate alınmıştır. Sistemin indirgenmiş dinamik modeli ise Varsayılan Modlar Metodu kullanılarak elde edilmiştir. Konum ve titreşim kontrolü, sistemin tek kontrol girişi olan motor torku ile gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen kontrolcüde üç adet bağımsız parametre yer almaktadır. Bağımsız parametreler için uygun değerlerin belirlenmesinde Yapay Arı Kolonisi Algoritması kullanılmıştır. Algoritma ile tüm bağımsız parametreler aynı anda optimizasyon sürecine alınmış ve uygun tork değeri belirlenmiştir. Ek olarak, esnek manipülatörün farklı uç kütleyle sahip olduğu durumlarda da kontrolcünün uygulanabilir olması için bir algoritma geliştirilmiştir.

Geliştirilen kontrolcünün performans incelemesi için MATLAB yazılımında simülasyon hazırlanmıştır. Performans incelemesi, hedeflenen açısal konuma ulaşma süreleri, açısal konumda meydana gelen aşmalar, hareket sırasında meydana gelen uç nokta salınımları, açısal hız değerleri ve ihtiyaç duyulan maksimum tork değerleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, tork ifadesinde yer alan tüm parametrelerin optimizasyonuna ilişkin sonuçlar, parametrelerin farklı kombinasyonlar ile optimize edildiği ve tüm parametrelerin uygun sabit değerlerde seçildiği durumlara ilişkin sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. İkinci adımda, geliştirilen kontrolcü, katsayıları Yapay Arı Kolonisi Algoritması ile optimize edilmiş klasik PD kontrolcü ile karşılaştırılmıştır. Üçüncü adımda, geliştirilen kontrolcünün literatürde yer alan bir kontrolcü ile performans karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. Dördüncü ve son adımda ise farklı uç kütle durumları için geliştirilen kontrolcünün performansının değerlendirilmesi amacı ile farklı uç kütle durumlarına ilişkin simülasyon sonuçları incelenmiştir.

Geliştirilen kontrolcü ile farklı uç kütle değerleri için dahi hedeflenen açısal konuma hızlı ve düşük aşma değerleri ile ulaşılmış ve hareket sırasında meydana gelen salınım hareketleri sönmülmüştür. Kontrolcünün farklı uç kütle durumlarında dahi başarılı bir kontrol gerçekleştirdiği, ek olarak optimizasyon sürecinde kısa döngüler sonucunda uygun parametrelerin elde edilebildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: esnek manipülatör, Euler-Bernoulli, optimizasyon, Yapay Arı Kolonisi, kontrol
2022, xii + 95 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

DEVELOPMENT OF AN OPTIMISATION-BASED CONTROL ALGORITHM FOR SUPPRESSING RESIDUAL VIBRATIONS OF A SINGLE-LINK FLEXIBLE MANIPULATOR

Sezgin ESER

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Dr. Sevda TELLİ ÇETİN

In this thesis, a controller based on system energy has been developed for a single link flexible manipulator. The flexible link is considered as Euler-Bernoulli beam and its lumped dynamic model is based on Assumed Mode Method. Position and vibration control are realised with a single controller as motor torque. The controller has three parameters that must be selected. Artificial Bee Colony Algorithm is performed to obtain suitable parameter values. All three parameters are optimised simultaneously with the algorithm and the suitable torque values are achieved. In addition, to extend the controller for different payload conditions, an algorithm is developed and added to the control process.

MATLAB simulations are applied to illustrate the performance of the controller. Performance investigation is carried out over settling time, overshoot percentages, tip point vibration and maximum torque values. First, results achieved with all parameter optimisation are compared with the results achieved with combined parameter optimisation and the results achieved with constant proper parameters. In the second step, results are compared with PD control which controller coefficients are also optimised with Artificial Bee Colony Algorithm. In the third step, the performance of the controller is compared with a reference method. In the last step, simulations are applied with different payload conditions to illustrate the performance of the algorithm developed for different payload conditions.

Simulations show that the flexible manipulator achieves the position objective in a small amount of time without overshoot and exhibits satisfactory performance in terms of vibration suppression even with different payload conditions. In addition, Artificial Bee Colony Algorithm finds the suitable values within short cycles in the optimisation process.

Keywords: flexible manipulator, Euler-Bernoulli, optimisation, Artificial Bee Colony, control

2022, xii + 95 pages.

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasını yöneterek gerekleőtirilmesinde büyük katkı sağlayan, yardımları ile alıőmayı destekleyen, bilgi ve tecrübelerini her zaman paylaşan tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Sevda TELLİ ÇETİN'e teőekkürlerimi sunarım.

Tez alıőması süresince yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerini her zaman paylaşan Sayın Prof. Dr. Osman KOPMAZ'a teőekkürlerimi sunarım.

Programlama ve simülasyon çalışmalarında fikir alışverişinde bulunduğum, yardımlarını esirgemeyen Sayın ađlar KAHYA'ya teőekkürlerimi sunarım.

Doktora öğrenimim boyunca her konuda öneri ve eleőtirileri ile yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teőekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her alanında yanımda yer alan, bana olan inançları ile güç veren ve ilk öğretmenlerim olan annem ve babama teőekkürlerimi bir borç bilirim.

Sezgin ESER
25/05/2022

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|---|-------|
| ÖZET..... | v |
| ABSTRACT..... | vi |
| TEŞEKKÜR | vii |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | x |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI ve KURAMSAL TEMELLER | 4 |
| 2.1. Kaynak Araştırması..... | 6 |
| 2.2. Yapay Arı Kolonisi Algoritması | 21 |
| 3. MATERYAL ve YÖNTEM..... | 23 |
| 3.1. Hareket Denklemlerinin Çıkartılması | 24 |
| 3.2. Hareket Denklemlerinin İndirgenmesi..... | 28 |
| 3.2.1. Varsayılan Modlar Metodu uygulaması..... | 29 |
| 3.2.2. Ortogonallik Şartı..... | 31 |
| 3.2.3. Lagrange Denklemlerinin Oluşturulması..... | 32 |
| 3.3. Kontrolcü Tasarımı | 34 |
| 3.3.1. Lyapunov fonksiyonu önerisi..... | 35 |
| 3.3.2. Optimizasyon amaç fonksiyonu | 37 |
| 3.3.3. Tork parametreleri optimizasyonu | 38 |
| 3.4. Sistem ve Optimizasyon Parametreleri | 41 |
| 3.4.1. Gerekli mod sayısı seçimi | 42 |
| 3.4.2. Tork parametreleri..... | 44 |
| 3.4.3. Optimizasyon parametrelerinin seçimi | 48 |
| 4. BULGULAR ve TARTIŞMA..... | 52 |
| 4.1 Tork Parametrelerinin Farklı Kombinasyonlardaki Sonuçların Karşılaştırılması | 52 |
| 4.2. PD Kontrolcü ile Karşılaştırma | 59 |
| 4.3. Referans Çalışma ile Karşılaştırma | 62 |
| 4.4. Farklı Uç Kütle Durumları İçin Sonuçlar..... | 64 |
| 5. SONUÇ | 66 |
| KAYNAKLAR | 68 |
| EKLER | 73 |
| EK 1. Kinetik Enerji İfadesinin İntegral İşlemleri | 74 |
| EK 2. Potansiyel Enerji İfadesinin İntegral İşlemleri | 77 |
| EK 3. İntegral Düzenlemesi | 79 |
| EK 4. Ortogonallik İfadesinde Ara İşlemler | 80 |
| EK 5. Lagrange İfadesinde Ara İşlemler..... | 83 |
| EK 6. MATLAB Programının Kod Yapısı | 86 |
| ÖZGEÇMİŞ | 93 |

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| Simgeler | Açıklama |
|-----------------|--|
| EI | Eğilme rijitliği |
| I_h | Bağlantı göbeği ataleti |
| L | Esnek uzuv uzunluğu |
| m | Uç kütle |
| $s(x, t)$ | Esnek uzuv üzerinde yer alan bir noktanın global koordinatlara göre konumu |
| $v(x, t)$ | Esnek uzuv üzerinde yer alan bir noktanın eğilmesi |
| $\theta(t)$ | Esnek uzvun global koordinatlara göre açısal konumu |
| ρ | Esnek uzvun birim uzunluk kütlesi |
| τ | Kontrol torku |

| Kısaltmalar | Açıklama |
|--------------------|--|
| ABC | Yapay Arı Kolonisi |
| ABFA | Adaptif Bakteriyel Yiyecek Arama Algoritması |
| AMM | Varsayılan Modlar Metodu |
| AR | Özbağlanımlı Model |
| ARMA | Özbağlanımlı Hareketli Ortalamalar Model |
| ARX | Dışsal Değişken Kaynaklı Özbağlanımlı Model |
| ARMAX | Dışsal Değişken Kaynaklı Özbağlanımlı Hareketli Ortalamalar Modeli |
| BFA | Bakteriyel Yiyecek Arama Algoritması |
| DE | Diferansiyel Gelişim |
| EBC | Energy Based Controller-Enerji Temelli Kontrolcü |
| GA | Genetik Algoritma |
| GWO | Gri Kurt Optimizasyonu |
| LMI | Lineer matris eşitsizlikleri |
| LPM | İndirgenmiş Parametreler Metodu |
| LQR | Lineer-Kuadratik Regülatör |
| NN | Yapay sinir ağı |
| PP | Kutup Değişim |
| PSO | Parçacık Sürü Optimizasyonu |
| SFS | Rastlantısal Fraktal Arama |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | | |
|-------------|--|----|
| Şekil 2.1. | Kolonide yer alan arı türleri | 21 |
| Şekil 2.2. | Yapay Arı Kolonisi Algoritması temel adımları (Karaboğa, 2020) | 22 |
| Şekil 3.1. | Esnek uzuvlu manipülatörün geometrik modeli | 23 |
| Şekil 3.2. | ABC Algoritması akış şeması | 40 |
| Şekil 3.3. | Uç kütlelenin olmadığı durumda mod sayısı etkileri a) Farklı mod sayısı için uç nokta konumu değişimi b) MOD3 ve MOD2 fark grafiği c) MOD5 ve MOD3 fark grafiği d) MOD10 ve MOD5 fark grafiği | 43 |
| Şekil 3.4. | Uç kütlelenin $m=0,2$ kg olduğu durumda mod sayısı etkileri a) Farklı mod sayısı için uç nokta konumu değişimi b) MOD3 ve MOD2 fark grafiği c) MOD5 ve MOD3 fark grafiği d) MOD10 ve MOD5 fark grafiği | 43 |
| Şekil 3.5 | Uç kütlelenin $m=0,5$ kg olduğu durumda mod sayısı etkileri a) Farklı mod sayısı için uç nokta konumu değişimi b) MOD3 ve MOD2 fark grafiği c) MOD5 ve MOD3 fark grafiği d) MOD10 ve MOD5 fark grafiği | 43 |
| Şekil 3.6. | r_1 parametresi değişiminin sonuçlara etkisi a) Açısal konum grafikleri b) Açısal hız grafikleri c) Uç nokta salınım grafikleri d) Tork grafikleri | 45 |
| Şekil 3.7. | r_2 parametresi değişiminin sonuçlara etkisi a) Açısal konum grafikleri b) Açısal hız grafikleri c) Uç nokta salınım grafikleri d) Tork grafikleri | 46 |
| Şekil 3.8. | r_3 parametresi değişiminin sonuçlara etkisi a) Açısal konum grafikleri b) Açısal hız grafikleri c) Uç nokta salınım grafikleri d) Tork grafikleri | 47 |
| Şekil 3.9. | Uç kütle değerinin $m=0,2$ kg olduğu durumda farklı γ değerleri için uç nokta konum değişimleri | 48 |
| Şekil 3.10. | Optimizasyon parametreleri etkisi, a) Farklı NP ve mc değerleri için simülasyon sonuçları, b) Farklı simülasyon sonuçlarının NP=10 ve mc=5 durumu ile karşılaştırması | 49 |
| Şekil 3.11. | Farklı uç kütle durumlarında elde edilen uç nokta konumları | 50 |
| Şekil 3.12. | γ değeri seçim algoritması | 51 |
| Şekil 4.1. | Uç kütlelenin olmadığı durumda parametre optimizasyon karşılaştırmaları a) Yüzde aşma değerleri b) Kalıcı duruma ulaşma süreleri (s) c) Maksimum uç nokta salınım değerleri (m) d) Maksimum tork değerleri (Nm) | 53 |
| Şekil 4.2. | Uç kütlelenin $m=0,2$ kg olduğu durumda parametre optimizasyon karşılaştırmaları a) Yüzde aşma değerleri b) Kalıcı duruma ulaşma süreleri (s) c) Maksimum uç nokta salınım değerleri (m) d) Maksimum tork değerleri (Nm) | 54 |
| Şekil 4.3. | Uç kütlelenin $m=0,3$ kg olduğu durumda parametre optimizasyon karşılaştırmaları a) Yüzde aşma değerleri b) Kalıcı duruma ulaşma süreleri (s) c) Maksimum uç nokta salınım değerleri (m) d) Maksimum tork değerleri (Nm) | 55 |
| Şekil 4.4. | Uç kütlelenin $m=0,4$ kg olduğu durumda parametre optimizasyon karşılaştırmaları a) Yüzde aşma değerleri b) Kalıcı duruma ulaşma | 56 |

| | | |
|-------------|--|----|
| | süreleri (s) c) Maksimum uç nokta salınım değerleri (m) d) Maksimum tork değerleri (Nm) | |
| Şekil 4.5. | Uç kütle için $m=0,5$ kg olduğu durumda parametre optimizasyon karşılaştırmaları a) Yüzde aşma değerleri b) Kalıcı duruma ulaşma süreleri (s) c) Maksimum uç nokta salınım değerleri (m) d) Maksimum tork değerleri (Nm) | 57 |
| Şekil 4.6. | EBC ABC ve PD ABC için açısal konum karşılaştırmaları a) Uç kütle olmadığı durum için açısal konumlar b) $m=0,2$ kg için açısal konumlar c) $m=0,3$ kg için açısal konumlar d) $m=0,5$ kg için açısal konumlar | 59 |
| Şekil 4.7. | EBC ABC ve PD ABC için uç nokta salınım karşılaştırmaları a) Uç kütle olmadığı durum için uç nokta salınımları b) $m=0,2$ kg için uç nokta salınımları c) $m=0,3$ kg için uç nokta salınımları d) $m=0,5$ kg için uç nokta salınımları | 60 |
| Şekil 4.8. | EBC ABC ve PD ABC için açısal hız karşılaştırmaları a) Uç kütle olmadığı durum için açısal hızlar b) $m=0,2$ kg için açısal hızlar c) $m=0,3$ kg için açısal hızlar d) $m=0,5$ kg için açısal hızlar | 61 |
| Şekil 4.9. | EBC ABC ve PD ABC için denge durumunda açısal hız karşılaştırmaları a) Uç kütle olmadığı durum için açısal hızlar b) $m=0,2$ kg için açısal hızlar c) $m=0,3$ kg için açısal hızlar d) $m=0,5$ kg için açısal hızlar | 61 |
| Şekil 4.10. | EBC ABC ve PD ABC için tork değerleri karşılaştırmaları a) $m=0$ kg için tork değerleri b) $m=0,2$ kg için tork değerleri c) $m=0,3$ kg için tork değerleri d) $m=0,5$ kg için tork değerleri | 62 |
| Şekil 4.11. | Referans çalışma ile karşılaştırma, a) Açısal konum, b) Uç nokta salınımları, c) Açısal hız, d) Tork değerleri | 63 |
| Şekil 4.12. | Farklı uç kütle durumları için sonuçlar a) Açısal konum b) Uç nokta salınımları c) Açısal hız d) Tork değerleri | 65 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | Sayfa |
|-----------------------------------|--------------|
| Çizelge 3.1. Sistem parametreleri | 42 |

1. GİRİŞ

Manipülatörler; farklı mafsal türleri ile birbirine bağlanmış uzuvların meydana getirdiği, ilgili uzuvlarının uzaydaki konumları ve hızlarına ilişkin bilgilerin çeşitli sensörler tarafından ölçüldüğü ve uç noktasında çevresi ile etkileşim kurup çeşitli görevleri yerine getiren robot kollar olarak tanımlanabilir. Söz konusu görevler, bir objenin konumunu değiştirmekten, bir noktadan ölçüm almaya veya iki parçanın belirli bir noktadan kaynak bağlantısı ile bağlanmasına kadar çok çeşitli türde olabilir. Bu nedenle, endüstride, uzay çalışmalarında, derin su altı çalışmalarında, mikro cerrahide ve daha birçok alanda manipülatör kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır.

Manipülatör üretiminde genellikle rijit malzemeler tercih edilmektedir. Rijit malzemelerin tercih edilmesindeki amaç, uç nokta hareketinin yüksek doğruluk oranlarına sahip olacak şekilde kontrol edilebilmesine katkı sağlamaktır. Bu türden bir seçim sayesinde titreşim hareketi olabildiğince azaltılırken, uzuvların konumlarının ölçümü de göreceli olarak kolaylaşmaktadır. Ancak rijit malzeme seçimi, manipülatörler için bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Rijit yapıli manipülatörlerin ağırlık ve ataletleri yüksek değerlerdedir. Bu durumun sonucu olarak da büyük boyutlu ve yüksek güç gerektiren eyleyiciler ile hareket ettirilme gereksinimi duyulmaktadır.

Rijit manipülatörlere ilişkin bahsi geçen dezavantajlar araştırmacıları esnek manipülatörler üzerine çalışmalar yürütmeye yönlendirmiştir. Eyleyici boyutlarının ve gerek duyulan gücün azaltılması, hızlı sistem cevabı oluşturulabilmesi, taşınan kütleyle oranla daha yüksek hıza ulaşılabilmesi, toplam kütle ve genel maliyette azalma, insanlar için daha güvenli bir çalışma ortamı oluşturabilme ve taşınabilirliğin artırılması gibi potansiyel avantajları sebebi ile esnek manipülatörler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.

Esnek manipülatörler, yukarıda bahsedilen avantajları sayesinde birçok yeni uygulamada kendilerine kullanım alanı bulabilmektedirler. Ağırlığın ve hareket için gerek duyulan gücün rijit manipülatörlere göre daha düşük olması sayesinde esnek manipülatörler uzay çalışmalarında kullanılabilir. Rijit manipülatörlere göre daha az yer kaplayan ve daha düşük atalet kuvvetlerine sahip olan esnek manipülatörlerin daha güvenli bir çalışma alanı oluşturma potansiyelleri sayesinde, esnek manipülatörler ile insanlar aynı ortamda birlikte çalışabilirler. Esnek manipülatörlerin kapı aralayacağı yeni uygulamalara diğer

bir örnek ise insansı robotlardır. Bu tür robotlarda esnek uzuvların kullanılması, üretilecek insansı robotların ağırlıklarının ve ataletinin azalmasına imkân sağlayacaktır. Böylelikle insansı robotların hem taşınabilirliği artırılacak hem de kontrol için gerekli güç azaltılmış olacaktır.

Bu noktaya kadar esnek manipülatörlerin sahip olduğu avantajlardan bahsedilmiştir. Ancak, esnek manipülatörler sahip oldukları esnek yapıları nedeni ile çözülmesi gereken önemli problemler de barındırmaktadır. Problemlerin temelinde, esneklik nedeni ile ortaya çıkan salınım hareketleri yer almaktadır. İlk problem, esnek manipülatörün konum ölçümünün rijit manipülatörlere göre daha zor olmasıdır. Bu durum, esnek uzvun salınım hareketinin sonlu sayıda sensör yardımı ile ölçülmesinden kaynaklanmaktadır. Diğer bir önemli problem ise, esnek uzuv için salınım hareketini de sönmüleyecek, düşük maliyetli, basit ve etkili bir kontrolcü oluşturulmasında yaşanan zorluklarıdır. Esnek manipülatör uzvunda kullanılacak malzemenin seçimi, salınım karakteristiklerine doğrudan etki edeceği için, malzeme seçimi de esnek manipülatörler için önem arz etmektedir.

Üretim hatlarından, insan-robot etkileşimli çalışmalara kadar birçok alanda verimliliği artırma potansiyeline sahip olan esnek manipülatörlerin salınım hareketinin sönmülmesi ve basit yapısının yanı sıra düşük maliyetli kontrolcülerin geliştirilmesi için on yıllardır çalışmalar yürütülmektedir. Esnek manipülatör dinamiği, rijit gövde hareketi ile esnek hareketin birleşiminden meydana gelmektedir (Tokhi ve Azad, 2008). Sistem dinamiğinde esnek hareketin varlığı sonucunda, doğrusal olmayan sistem yapısı ile karşılaşılacaktır. Esnek uzvun modellenmesi için sürekli giriş modelleri veya ayrıklaştırılmış modeller kullanılmaktadır. Her iki durum için de elde edilen dinamik ifade rijit manipülatörün dinamik ifadesinden daha karmaşık yapıdır. Bu durumun sonucu olarak, esnek manipülatörler için kontrolcü tasarlamak, rijit manipülatörlere göre kontrolcü tasarlamaktan daha zorlayıcı olmaktadır.

Kontrolcü tasarımına yönelik çalışmalar incelendiğinde, son yıllarda bilgisayarların işlem gücündeki gelişmelerin sonucu olarak, sıklıkla yapay zekâ algoritmalarından faydalandığı görülmektedir. Algoritmalar sayesinde, uygun bir kontrolcü oluşturmak için sistem kontrolçüsünde yer alan parametrelerin amaçlanan kontrole uygun optimum

değerleri belirlenmektedir. Bu sayede esnek uzuvda meydana gelen salınım hareketleri de ortadan kaldırılmaktadır.

Tez çalışması kapsamında, esnek uzuvlu bir manipülatör için salınım hareketlerini ortadan kaldıran ve esnek manipülatörün hedeflenen açısal konuma ulaşmasını sağlayan bir kontrolcü geliştirilmiştir. Oluşturulan kontrolcüde yer alan bağımsız parametrelerinin optimizasyonu için Yapay Arı Kolonisi (ABC) Algoritması kullanılmıştır. Literatür taramasında yer alan kontrolcüler, uç kütle olmadığı durumda veya belirli bir uç kütle değeri durumunda uygulanmıştır. Bu çalışmada ise uç kütle farklı değerler alması halinde de kontrolcünün uygulanabilir olması için bir algoritma geliştirilmiş, böylece farklı uç kütle yükleri altında da başarılı bir kontrol gerçekleştirilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI ve KURAMSAL TEMELLER

Literatür çalışmaları incelendiğinde, esnek uzuvlu manipülatörlerin matematiksel modellemesi için genellikle enerji prensibinden yararlanıldığı görülmüştür. Rijit manipülatörde uzvun enerjisi, rijit kol hareketi nedeni ile oluşan kinetik enerji ve kolun yerçekimine karşı hareketinden kaynaklanan potansiyel enerji ile ifade edilmektedir. Esnek manipülatörlerde ise rijit gövde hareketi ve esnek hareketin bir arada bulunması sonucunda iki etki de uzuv enerjisi ifadesinde yer almaktadır. Böylece, rijit hareketten kaynaklı kinetik enerji ile yer çekimi kaynaklı potansiyel enerjiye ek olarak uzvun esnekliğinden kaynaklanan potansiyel enerji de dikkate alınmaktadır. Esnek manipülatörün matematik modelin oluşturulmasında dikkate alınan diğer enerjiler ise elektrik motoru kaynaklı dönme kinetik enerji ve uzvun uç noktasında yük yer alması durumunda ortaya çıkan kinetik enerjidir. Çalışmalar incelendiğinde uç noktada yer alan yük için genellikle noktasal kütle kabulü yapıldığı, dolayısı ile yükün yalnızca çizgisel hareketinden kaynaklanan kinetik enerji ifadesinin dikkate alındığı görülmüştür.

Esnek uzvun sürekli modelinin oluşturulması için Euler-Bernoulli modeli veya Timoshenko modeli kullanılmaktadır. Uzuv üzerinde meydana gelen kesme kuvvetleri ile dönme ataleti etkilerinin ihmal edildiği çalışmalarda Euler-Bernoulli modeli kullanılırken, aksi durumlarda Timoshenko modeli kullanılmıştır. Literatürdeki çalışmalarda sürekli model için daha çok Euler-Bernoulli modelinden faydalandığı görülmüştür. Sürekli model kullanımı ile esnek manipülatör dinamiği kısmi diferansiyel denklemler formunda elde edilmektedir. Sonsuz boyutlu elde edilen dinamik ifadenin, sistemin analizi ve kontrolü için kullanımındaki zorluklar nedeni ile çoğu literatür çalışmasında manipülatörün indirgenmiş modeline ait ifade kullanılmıştır. Varsayılan Modlar Metodu (AMM), esnek uzvun kritik modlarını dikkate alarak sonsuz boyutlu ifadesini sonlu boyutta temsil için sıklıkla faydalanılan bir yöntemdir.

Esnek uzuv için modellemenin ilk adımında ayrıklaştırmanın yapıldığı yöntemler de mevcuttur. Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) sıklıkla başvurulan modelleme yöntemidir. Bununla birlikte İndirgenmiş Parametreler Metodu (LPM) da esnek uzuv modellemesinde kullanılmaktadır.

Literatür incelemesi sonucunda, esnek manipülatör modellemesinde polinom model yapısının kullanıldığı çalışmalar da görülmüştür. Bu tür modellemelerde, sistemin dinamik ifadesini temsil etmesi için polinom yapısında bir fonksiyon önerilmektedir. Fonksiyon yapısında, sistem girdisi, sistem çıktısı ve gürültüyü temsil eden elemanlar yer almaktadır. Fiziksel sistem üzerinden yapılan ölçümler kullanılarak polinomda yer alan katsayı değerleri belirlenerek sistemi temsil eden denklem elde edilmiş olur. Katsayı değerlerinin belirlenmesinde ise çeşitli optimizasyon yöntemlerinden faydalanılmıştır. Literatürde, AR, ARMA, ARX gibi farklı polinom yapılarının kullanıldığı çalışmalar yer almaktadır. Sürekli ve ayrık model oluşturma yöntemlerinden farklı olarak bu tür bir model oluşturulması için fiziksel sistem gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen verilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Uygun bir kontrol yöntemi geliştirilmeden önce manipülatör sistemini yeterli doğrulukta temsil edecek matematiksel modelinin geliştirilmesi önemlidir. Bu sebeple, buraya kadar olan kısımda literatürde kullanılan matematiksel modelleme yöntemlerinden söz edilmiştir. Uygulanan kontrol yöntemleri incelendiğinde ise, PID, lineer matris eşitsizlikleri (LMI), Lineer-Kuadratik Regülatör (LQR) ve kutup değişimi (PP) gibi kontrolcülerin yanı sıra bulanık mantık, yapay sinir ağı (NN) kontrolcülerini, kayan modlu kontrolcü ve H_∞ kontrolcüsü gibi kontrolcülerin kullanıldığı görülmüştür. Kontrolcülerin tek başlarına kullanılmasının yanı sıra birden fazla kontrolcünün bir arada kullanıldığı hibrit yapılı kontrolcü tasarımları da literatürde yer almaktadır. Bununla birlikte, yapay zekâ algoritmaları da kontrolcü parametreleri optimizasyonunda kullanılmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalarda sıklıkla karşılaşılan Genetik Algoritma (GA)'nın yanı sıra, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Diferansiyel Gelişim (DE) Algoritması, Bakteriyel Yiyecek Arama Algoritması (BFA), Gri Kurt Optimizasyonu (GWO), Rastlantısal Fraktal Arama (SFS) Algoritması ve Yapay Arı Kolonisi (ABC) Algoritması da parametre optimizasyonu için literatürde başvurulan algoritmalarlardır.

Esnek manipülatör sistemi için kontrol ifadesi oluşturulurken, kontrol sistemi geri beslemeli olarak tasarlanmaktadır. Geri besleme sinyalleri, uzuv açısal konumları, salınım değerleri ve sisteme ait hız değerleridir. İlgili ifadelerin doğrudan ölçülebilir olduğu veya ölçülebilir kabul edildiği çalışmalarda tam durum geri beslemesi kullanılmıştır. İlgili geri besleme sinyallerinden biri veya birkaçının doğrudan

ölçülemediği durumlarda ise çıktı geri beslemesi kullanılmış ve bilinmeyen değerlerin tahmin edilmesi için gözlemci tasarlanmıştır.

Buraya kadar olan kısımda literatürde yer alan çalışmalar üzerinden esnek manipülatör sistemlerinde modelleme ve kontrol yöntemlerinin genel çerçevesi oluşturulmuştur. Literatür çalışmalarına ilişkin detaylı bilgiler ise Kaynak Araştırması alt bölümünde aktarılmıştır.

2.1. Kaynak Araştırması

Esnek manipülatörler on yıllardır araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Günümüzde de esnek manipülatör sistemleri güncelliğini korumakta ve araştırmacıların çalışmalarına konu olmaya devam etmektedir. Modelleme ve kontrol üzerine gerçekleştirilen çalışmaların yanı sıra dönem dönem gerçekleştirilen derleme çalışmaları ile mevcut durumun genel çerçevesi ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Dwivedy ve Eberhard (2006), 1974 – 2005 yılları arasını kapsayan 433 çalışmayı incelemiş, modelleme ve kontrol yöntemleri bakımından bir derleme hazırlamıştır. Rahimi ve Nazemizadeh (2014), 1970 – 2013 yılları arasında yer alan 115 çalışmayı kapsayan bir derleme oluşturmuştur. Lee ve Alandoli (2020) ise 2010 – 2020 yılları arasında yer alan 170 çalışmanın incelemesini ve gruplandırmasını gerçekleştirmiştir. Subedi ve ark. (2020), çalışmalarında 2020 yılına kadar yayınlanmış olan 159 çalışmanın modelleme ve kontrol yöntemleri bakımından incelemiş ve gruplandırmıştır. Derleme çalışmaları ışığında esnek uzuvlu manipülatörün indirgenmiş modeli için, AMM, FEM ve LPM yönteminin sıklıkla kullanılan temel modelleme yöntemleri olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte literatürde, esnek uzuv modellemesi için polinom önerisi yapılan ve polinom katsayılarının belirlenmesinde deneysel verilerin kullanıldığı çalışmalar da yer almaktadır. Bu çalışmalar incelendiğinde modelleme sırasında model parametrelerinin belirlenmesinde çeşitli optimizasyon yöntemlerinden faydalandığı da görülmektedir.

Alam ve Tokhi (2007), esnek uzuvlu bir manipülatör deney seti üzerinden ölçülen değerler yardımı ile sistemin matematiksel modelini oluşturmuştur. Literatürde AR, ARX, ve ARMAX gibi model yapılarının da yer aldığı belirtilirken, basitlik, performans

ve hesaplama maliyeti göz önünde bulundurularak ARMA model yapısı tercih edilmiştir. Sistemin matematiksel modelini temsil edecek ifadeye yer alan parametre değerlerinin belirlenmesi için optimizasyon yöntemi olarak PSO kullanılmıştır.

Supriyono ve Tokhi (2012), ARX modeli ve optimizasyon yöntemi olarak BFA kullanarak esnek uzuvlu manipülatörün matematiksel modelini oluşturmuştur. Standart BFA'da kullanılan büyük adımların optimizasyonun minimum değerine hızlı bir yaklaşma sağlandığı ancak minimum değer yakınlarında salınımlara sebep olduğu ve bu nedenle global minimum değerine ulaşılamayabileceği belirtilmiştir. Bu sebeple Adaptif BFA (ABFA) yöntemi geliştirilmiştir. Adaptasyon mekanizması olarak, lineer, ikinci dereceden ve üstel olmak üzere üç farklı adımlama yöntemi kullanılmıştır. Farklı adımlama yöntemleri içeren ABFA optimizasyon yöntemleri, standart BFA ve deneysel verilerden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, ABFA optimizasyon yöntemleri ile deneysel verilere oldukça yakın sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiş ve standart BFA optimizasyonuna göre daha başarılı bir modelleme gerçekleştirildiği sonucuna ulaşılmıştır. Farklı adımlama yöntemleri sonuçlarının ise birbirine oldukça yakın değerlerde olduğu belirtilmiştir.

Al-Khafaji ve ark. (2015), esnek uzuvlu manipülatörün ARX modelinin oluşturulması üzerine çalışma gerçekleştirmiştir. İlk olarak FEM ile dinamik model oluşturulmuş ve bang-bang torku uygulanarak simülasyon sonuçları alınmıştır. Simülasyon sonucu elde edilen veriler, ARX model yapısında giriş verileri olarak kullanılmıştır. ARX modelinin oluşturulması için DE ve PSO algoritmaları ayrı ayrı kullanılmıştır. Sonuç olarak DE Algoritması ile daha başarılı bir model oluşturulmuştur.

Esnek uzuvlu manipülatörlerin kontrolü için farklı türlerde birçok kontrolcü geliştirilmiştir. Alandoli ve Lee (2020), derleme çalışmasında, manipülatörler için geliştirilen kontrol yöntemlerinin yer aldığı, yakın zamanda yayınlanmış toplam 237 çalışmayı incelemiştir. Çalışmada kontrol yöntemleri, klasik kontrolcüler, akıllı kontrolcüler, gürbüz kontrolcüler ve farklı kontrolcülerin birlikte kullanıldığı hibrit kontrolcüler olmak üzere dört ana grup altında toplanmıştır. PD, PID ve LQR kontrolcülerini klasik kontrolcüler kapsamında değerlendirmiştir. Bulanık mantık ve yapay sinir ağlarını ise akıllı kontrolcüler grubuna dahil etmiştir. Kayan modlu kontrolcü ve H_{∞}

kontrolcü gürbüz kontrolcüler grubunu oluşturmuştur. Son olarak, hibrit kontrolcü grubu altında farklı kontrol yöntemlerinin bir arada kullanıldığı durumlar irdelenmiştir. Rahimi ve Nazemizadeh (2014) ise derleme çalışmasında akıllı kontrolcüler altında bulanık mantık, NN ve GA optimizasyon yöntemine de yer vermiştir.

Literatürde PD, PID ve LQR kontrolcüler için performans karşılaştırmalarının yapıldığı çalışmalar yer almaktadır. Ek olarak, ilgili kontrol teknikleri çeşitli optimizasyon yöntemleriyle birlikte kullanılmış ve kontrolcü performansı iyileştirmeleri gerçekleştirilmiştir.

Saad ve ark. (2015), matematiksel ifadesi ARX modeli ile elde edilen esnek uzuvlu manipülatörün kontrolü için, evrimsel optimizasyon yöntemleri olan GA ve DE Algoritması ile optimize edilmiş bir PID kontrolcü kullanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Zeigler-Nichols ile optimize edilmiş PID kontrolcü sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Evrimsel algoritma ile daha başarılı sonuçlar elde edildiği sonucuna ulaşılrken, GA ve DE Algoritması ile elde edilen sonuçlar arasında anlamlı bir fark görülmemiştir.

Razmjoooy ve ark. (2016), esnek uzuvlu manipülatörün kontrolü için LQR kontrolcüsü uygulamışlardır. LQR parametreleri optimizasyonu için GWO ve PSO ayrı ayrı uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Rahman ve ark. (2017), SFS Algoritması'nın esnek manipülatör modellemesi ve kontrolü üzerinde başarımına ilişkin çalışma gerçekleştirmiştir. Sistemin matematiksel ifadesi ARX modeli ile oluşturulmuştur. Kontrol aşamasında ise PID denetleyici kullanılmıştır. Hem ARX modelde yer alan parametrelerin hem de kontrol ifadesinde yer alan parametrelerin optimum değerlerinin belirlenmesinde SFS Algoritması kullanılmıştır.

Tahir ve ark. (2017), esnek uzuvlu manipülatör modellemesini FEM ile gerçekleştirmiştir. Kontrol için LQR kontrolcü ve PID kontrolcü ayrı ayrı uygulanmıştır. İki kontrolcü türünde de girdiler, sistem çıktısının filtrelenmesi ile elde edilmiştir. Simülasyonlar farklı uç kütle değerleri için tekrarlanmış ve iki kontrol yöntemi karşılaştırılmıştır. Yörünge takibi ve uç nokta salınımları incelendiğinde LQR kontrolcü ile daha başarılı sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir.

Alandoli ve ark. (2017), durum uzayı modeli ile ifade ettikleri tek uzuvlu esnek manipölatör için PD kontrolcü ile LQR kontrolcü karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. PD kontrolcü parametrelerini Ziegler-Nichols metodu ile, LQR parametrelerini ise deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. Simülasyonlar sonucunda LQR kontrolcü ile PD kontrolcüye göre daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Chen ve ark. (2018), esnek uzuvlu manipölatörün matematiksel ifadesini ARMAX modeli ile oluşturmuştur. Sistemin kontrolü için LQR kontrolcü kullanılmıştır. Sistem kutuplarının bulunduğu konumların sistem cevabı karakteristiğini belirliyor oluşundan yola çıkarak bir kontrol kuralı geliştirilmiş ve sistem kutuplarını geri besleme verilerine göre değiştirilmiştir. Böylelikle LQR performansında iyileştirme gerçekleştirilmiştir.

Khairudin (2021), çalışmasında esnek uzuvlu manipölatör kontrolünde kullanılan üç farklı kontrolcü olan PP, LMI ve LQR kontrolcülerin performans karşılaştırmalarını gerçekleştirmiştir. Simülasyonlar ve deneyler farklı uç kütle yüklemeleri için tekrarlanmıştır. Aşma durumu, oturma zamanı ve hareket esnasında meydana gelen salınımlar karşılaştırma verileri olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak PP yönteminin diğer yöntemlere göre daha başarılı performans gösterdiği görülmüştür.

Bulanık mantık ve NN esnek uzuvlu manipölatör kontrolünde başvurulan yöntemler arasında yer almaktadır. Bu yöntemler tek başlarına kullanıldığı gibi diğer kontrol yöntemleri ile hibrit yapıda kontrolcü oluşturulmasında da kullanılmaktadır. Yine ilgili kontrol yöntemlerinin çeşitli optimizasyon yöntemleri ile desteklenerek kontrolcü tasarımı gerçekleştirilen çalışmalar literatürde yer almaktadır.

Alam ve Tokhi (2008), esnek uzuvda meydana gelen titreşimin engellenmesi için kullanılan yöntemlerin olumsuz bir etki olarak sistemin çalışma hızında da azalmaya neden olduğunu vurgulanmıştır. Buradan yola çıkarak çalışmanın amacını, sistemin çalışma hızında azalmaya sebep olmadan uç nokta salınımlarının engellenmesi olarak belirlenmiştir. Sistemin matematiksel modeli için Alam ve Tokhi (2007) tarafından oluşturulan model kullanılmıştır. Kuralları GA ile optimize edilen bir PD temelli bulanık mantık kontrolcüsü tasarlanmıştır. İlgili kontrolcünün uç nokta salınım değerlerini sönmülemeye yetersiz kalması nedeni ile sisteme GA temelli bir giriş şekillendirme

kontrolcüsü de eklenmiştir. Sonuç olarak geliştirilen hibrit yöntem ile uç nokta salınımları da sönümlenmiştir. Ancak, iki kontrolcünün bir arada kullanılmasının pratik uygulamalarda senkronizasyon sorunları, gecikmeler ve yüksek kaynak gerekliliği gibi sorunlara neden olabileceği de belirtilmiştir.

Loudini (2013), esnek uzuv modelinde Timoshenko kiriş teorisini uygulamıştır. İndirgenmiş model için AMM kullanılmıştır. Modele esnek uzvun sönüm etkisi ile viskoz hava sönüm etkisi de dahil edilmiştir. Bulanık mantık temelinde iki farklı kontrol stratejisi dikkate alınmıştır. İlk kontrolcü olarak PD bulanık mantık kontrolcüsü uygulanmıştır. Kontrolcü parametreleri deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlar sonucu kontrolcü ile amaçlanan konuma ulaşma ve uç nokta salınımı sönümleme görevlerinin kabul edilebilir süreler içerisinde başarıldığı sonucuna ulaşılmıştır. İkinci kontrolcü olarak ise GA temelli bulanık mantık kontrolcüsü geliştirilmiştir. Geliştirilen kontrolcünün tatmin edici hızlılık, doğruluk ve kararlılık performansı gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Ek olarak, geliştirilen ikinci kontrol yöntemi ile ani yük değişimleri ile de başa çıkabildiği ve gürbüz bir kontrol sağladığı belirtilmiştir.

Ouyang ve ark. (2017), Euler-Bernoulli modelini dikkate alarak tek uzuvlu esnek manipülatörün dinamik ifadesini oluşturmuş, ardından AMM ile dinamik ifadeyi sonlu sayıda denklem takımına indirgemıştır. Sistemin kontrolü için takviyeli öğrenme kontrolcüsü geliştirmişlerdir. Bu kontrolcü kritik ve aktör NN olmak üzere iki farklı yapay sinir ağı barındırmaktadır. Kritik NN her simülasyon adımında sistemin maliyet fonksiyonunu tahmin etmek için kullanılmıştır. Aktör NN ise kritik yapay sinir ağı ile sisteme uygun kontrol girişinin oluşturulmasında kullanılmıştır.

Sun ve ark. (2018), indirgenmiş modelini AMM ile elde ettiği esnek uzuvlu bir manipülatör için bulanık mantık ile desteklenmiş NN kontrolcüsü tasarlamıştır. Çalışmada, tam durum geri besleme ve çıktı geri besleme türünde iki farklı geri besleme durumu için simülasyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma için bulanık mantıklı NN kontrolcüsü PD kontrolcü ile karşılaştırılmış ve önerilen kontrolcünün daha efektif bir kontrol yöntemi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Liu ve Liu (2018), bozucu girişler ve çıkış değeri sınırlandırmaları altında yinelemeli öğrenme kontrolcüsü tasarlamıştır. Kontrolcü tasarımı esnek manipülatör sisteminin kısmi diferansiyel denklem ifadesi üzerinden doğrudan oluşturulmuş, indirgeme yöntemleri kullanılmamıştır.

Zhang ve ark. (2019), sistem parametrelerinde meydana gelebilecek ani değişimleri dikkate alarak, bu değişimler ile başa çıkabilecek bir kontrolcü tasarımı gerçekleştirmiştir. Esnek manipülatör modeli, esnek uzvun Euler-Bernoulli kiriş modeli kullanılması ile elde edilen kısmi diferansiyel denklem ile ifade edilmiştir. Eğilme rijitliği, esnek uzuv ataleti ve uç kütle, zamana bağlı değişen sistem parametreleri olarak kabul edilmiş ve ağırlıklandırılmış NN'den faydalanılarak bir kontrolcü geliştirilmiştir. Simülasyonlar, zamana bağlı parametrelerin simülasyon sırasında belirli bir anda farklı değerler alması durumu üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Wang ve Kang (2019), kontrol girdisi ölü alanı dikkate alarak, NN ile yörünge kontrolü metodu geliştirmiştir. Geliştirilen yöntem ile gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda, kapalı döngü sistemdeki kontrol girdisinin sınırlı bir değer aralığında kalmasının garanti altına alındığı görülmüştür. Yörünge takip hatası incelendiğinde ise hatanın zamanla sifıra yakın bir aralığa indirildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Dong ve ark. (2019), esnek uzuvlu manipülatörün tekrarlı hareketleri yerine getirebilmesi için yinelemeli öğrenme kontrolcüsü yaklaşımından yararlanmıştır. Kullanılan kontrolcü yapısı sayesinde modelden bağımsız olarak yörünge kontrolü gerçekleştirilebilmektedir. Açık-kapalı-döngü PD kontrolcü de kontrol uygulamasına dahil edilmiş ve bozucu giriş etkilerinin ortadan kaldırıldığı gürbüz bir kontrolcü elde edilmiştir. Deney düzeneğinde, ilk olarak yinelemeli öğrenme kontrolcüsü tek başına kullanılmıştır. Ardından, açık-kapalı-döngü PD kontrolcünün dahil edildiği kontrol uygulanmış sonuçlar karşılaştırılmıştır. PD kontrolcünün eklenmesi ile bozucu giriş etkilerinin daha çabuk elimine edildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Li ve Liu, (2020), esnek uzuvlu manipülatör sisteminde eyleyici hatalarının ve bozucu giriş etkilerinin dikkate alındığı durum için kontrolcü tasarımı gerçekleştirmiştir. Hatalar ile başa çıkabilmek için NN'den yararlanılmıştır. Gerçekleştirilen simülasyonlarda

adaptif kontrolcü, klasik PD kontrolcü ile, istenen yörünge takibi ve uç nokta salınım sönümlenmeleri değerleri üzerinden karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, tasarlanan kontrolcü ile PD kontrolcüyeye göre daha başarılı bir kontrol elde edilmiştir.

Kayan modlar metodu ve H_∞ kontrolcülerini, Alandoli ve Lee (2020) tarafından gürbüz kontrolcü olarak gruplandırılmış olan kontrolcü türlerindedir. Çalışmalarında gürbüz kontrolcülerinin sisteme etki eden bozucu girişler ve sistem parametrelerindeki belirsizlikler ile baş edebildikleri belirtilmiştir.

Peza-Solís ve ark. (2015), Euler-Bernoulli modelini dikkate alarak oluşturdukları esnek uzuvlu manipülatörün dinamik ifadesini FEM ile sonlu sayıdaki dinamik ifadeye indirgemişlerdir. Esnek uzuvlu manipülatörün uç noktasının belirli bir yörünge takibi gerçekleştirmesi ve bu hareket esnasında gerçekleşecek titreşimlerin sönümlenmesi amaç olarak belirlenmiştir. Dinamik bozucu girişler ve modelleme hatalarından kaynaklı sorunlar ile başa çıkabilme özelliklerinden dolayı kayan modlu bir kontrolcü geliştirilmiştir.

Karimi ve Yazdanpanah (2006), tek uzuvlu esnek bir manipülatör için tekil pertürbasyon teorisi ile yeni bir modelleme metodolojisi geliştirmiştir. Geri besleme kontrolü tekil pertürbasyon parametresine bağlı olarak oluşturulan H_∞ kontrol ile gerçekleştirilmiştir.

Altiner ve ark. (2018), çalışmalarında tek uzuvlu esnek manipülatörün sonsuz boyutlu modelinin sonlu boyuta indirgenmesi ile ortaya çıkması muhtemel modellenmemiş dinamiklerin olumsuz etkilerini ortadan kaldıracak kontrolcü geliştirmiştir. Esnek uzuv Euler-Bernoulli kirişi kabul edilmiştir. Sonlu boyuta indirgeme için ise AMM kullanılmıştır. Ayrıca, çalışmada kullanılan deney düzeneği ayrıca LPM ile modellenmiştir. Sistemin kontrolü için Lineer kuadratik Gauss ve ağırlıklandırılmış H_∞ olmak üzere iki farklı kontrolcü oluşturulmuştur. Oluşturulan iki modelin, deney düzeneğini temsil etme başarısını karşılaştırmak amacı ile, sinüzoidal giriş uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, AMM ile oluşturulan modelin salınım hareketlerini bakımında gerçek modele çok daha yakın sonuçlar sağladığı görülmüştür. Ancak, uzuv açısal konumu açısından karşılaştırma yapıldığında ise, sonuçlar birbirine yakın olmakla birlikte LPM ile gerçek sisteme biraz daha yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Oluşturulan kontrolcüler karşılaştırıldığında ise lineer kuadratik Gauss kontrolün daha başarılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Sistemin mevcut durumundan yola çıkarak sonraki durumlarına ilişkin tahminde bulunan gözlemciler, esnek uzuvlu manipülatörlerin kontrolünde de uygulanmıştır. Sistem durumlarının tahmininin yan sıra bozucu giriş etkilerinin de tahmin edilmesi için gözlemci geliştirilen çalışmalar literatürde mevcuttur.

Dubay ve ark. (2014), FEM ile modelini oluşturdukları tek uzuvlu esnek manipülatör kontrolü için model öngörücü kontrolcü geliştirmişlerdir. Kontrolcü esnek manipülatörün sonraki zamanlardaki konum tahminini FEM modeli üzerinde gerçekleştirmektedir. Titreşim kontrolünde eyleyici olarak piezoelektrik eyleyiciler kullanılmıştır. Bu tür eyleyicinin tercih edilmesinin sebebi olarak, mafsal hızları üzerinden gerçekleştirilen titreşim kontrolünün uzuv hız ve konum değerlerine sınırlamalar getirebilmesi sorunu olduğu belirtilmiştir. Hafif bir malzeme olan piezoelektrik eyleyicilerin sistem üzerine ihmal edilebilir oranlarda yük getirdiği de vurgulanmıştır. Deneysel çalışmalar ile yapılan karşılaştırmalar sonucunda standart şemaya sahip model öngörücü kontrolcüye kıyasla FEM modeline dayalı öngörücü kontrolcü ile daha başarılı titreşim sönümlenme elde edildiği belirtilmiştir.

Yang ve ark. (2015), çalışmalarında tek uzuvlu esnek manipülatör için kısmi diferansiyel denklem yapısında bir gözlemci tasarımı gerçekleştirmiştir. Gözlemcinin model üzerinde indirgeme işlemi gerçekleştirilmeden titreşim tahmini yapıyor oluşu çalışmanın temel katkısı olarak belirtilmiştir. Titreşim kontrolü için ise PD kontrolcü kullanmışlardır.

Yang ve Liu (2016), yüzeyi piezoelektrik eyleyici ile kaplı olan ve Euler-Bernoulli modeli ile ifade edilmiş esnek bir manipülatör için kontrolcü geliştirmiştir. Uzuv üzerindeki herhangi bir noktanın konumunu ifade etmek için uzuv üzerinden yapılan ölçümlerden faydalanılarak bir gözlemci oluşturulmuştur. Gözlemciye ve esnek uzvun açısal konum farkına dayanan bir kontrolcü tasarlanmıştır. Kontrolcü stabilitesi önerilen Lyapunov fonksiyonu ile kontrol edilmiştir. Simülasyonlar sonucunda titreşimin sönümlenmesinde etkili bir yöntem olduğu ancak bozucu girişler ve sistem parametrelerinde belirsizlik durumları ile kontrolcünün baş etmede başarısız olduğu belirtilmiştir.

Jiang ve ark. (2017), bozucu giriş etkileri altında esnek manipülatörün kısmi diferansiyel denklem ifadesine dayanan bir gözlemci tasarlamışlardır. Gözlemci ile uzuv açısai konumu, hızı ve uç nokta konumu tahmini gerçekleştirilmiştir.

Liu ve ark. (2017), Euler-Bernoulli modeli ile ifade ettikleri esnek uzuvlu manipülatörün giriş satürasyonu ve bozucu giriş etkileri altında olduğu durum için kontrol çalışması gerçekleştirmiştir. Bozucu girişlerin tahmini için bir gözlemci modeli oluşturulmuştur. Motor torku ve uç noktadan etki eden kuvvet şeklinde iki adet kontrol girdisi için hiperbolik fonksiyon temelinde kontrol ifadeleri önerilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda kontrolcünün giriş satürasyonu ve bozucu etkiler ile baş edebildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Liu ve Liu, (2017), çalışmalarında esnek uzuvlu manipülatörün kısmi diferansiyel ifadesini daha basit yapıda iki alt sisteme pertürbasyon yöntemi ile ayırmıştır. Giriş satürasyonu ve bozucu etkisi altındaki sistemin bozucu giriş değerlerinin tahmini için bir bozucu giriş gözlemcisi tasarlanmıştır. Açısai konum ve titreşimin kontrolü için gözlemciye dayanan bir kontrolcü tasarlanmıştır. Sistemin üzerinden giriş torku ve uç nokta kuvveti ile kontrol sağlanmaktadır. Kontrolcü ifadesi hiperbolik fonksiyon temelinde önerilmiştir. Oluşturulan alt sistemden birinde kontrol torku ifadesi ile açısai konum kontrolü gerçekleştirilirken, diğer alt sistem ifadesinde uç nokta kontrol kuvveti ile uç nokta titreşimi kontrolü gerçekleştirilmiştir. Sayısal simülasyonlar ile giriş satürasyonu gerçekleşmeden açısai konum ve titreşim sönümlenme hedefleri gerçekleştirilmiştir.

Sun ve ark. (2017), esnek uzvu Euler-Bernoulli modeli ile ifade etmiş ve kütle yay modeli kullanarak sistemin indirgenmiş dinamik ifadesini elde etmiştir. Kontrol için iki farklı kontrolcü geliştirmiştir. İlk tür kontrolcü NN ile desteklenmiş tam durum geri besleme türünde oluşturulmuştur. İkinci tür kontrolcü için sistemin çıktılarından olan uzuv açısai değerinin pratikte ölçülemeyeceği düzenekler olacağından yola çıkılmış ve ilgili değer için bir gözlemci tasarlanmıştır. Ardından NN destekli çıktı geri beslemeli kontrolcü tasarlanmıştır. İki kontrolcünün kullanımı durumunda da oluşturulan Lyapunov fonksiyonu üzerinden sistem stabilitesi garanti altına alınmıştır. Simülasyonlar ve deneysel çalışmalar sonucunda iki yöntem ile de esnek uzuvlu manipülatörün amaç açısai

konumu takibinde ve uç nokta titreşimi sönümlemede oldukça başarılı olduğu belirtilmiştir.

Yang ve ark. (2018), yayılı bozucu giriş etkisi altındaki esnek manipülatör için kontrolcü geliştirmiştir. Çalışmanın amacı Yang ve Liu (2016) tarafından gerçekleştirilen piezoelektrik materyal ile kaplı esnek manipülatör kontrolü çalışmasında dikkate alınmayan bozucu giriş etkisi altında kontrol gerçekleştirmek olarak belirlenmiştir. Yayılı bozucu giriş için bir gözlemci geliştirilmiş ve bu gözlemciye dayalı bir kontrolcü oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda önerilen gözlemci temelli kontrolcü ile yayılı bozucu giriş etkisinde esnek uzuvlu manipülatörün hedef konuma ulaşma görevinin gerçekleştirildiği ve uç noktada meydana gelen salınımların da sönümlendiği ifade edilmiştir.

Liu ve ark. (2018), çalışmalarında üç boyutlu bir esnek manipülatörün bozucu girişler etkisi altında kontrolünü gerçekleştirmiştir. Esnek uzuv modellemesinde Euler-Bernoulli modeli kullanılmıştır. Bozucu girişler için gözlemci tasarımı gerçekleştirilmiş ve oluşturdukları kontrolcü ile konum ve titreşim kontrolü sağlanmıştır.

Ma ve ark. (2018), bozucu giriş etkisi altındaki esnek manipülatör için bir kontrolcü tasarımı geliştirmiştir. Bozucu giriş için gözlemci tasarımı gerçekleştirilmiş, kontrol için ise kontrol girdisi satürasyonu ile başa çıkabilecek şekilde hiperbolik fonksiyonlardan faydalanılmıştır. Bozucu girişin değişiminin yavaş veya hızlı karakterde olması durumunu gözetken sabit gözlemci ve yüksek mertebeden gözlemci olmak üzere iki farklı gözlemci geliştirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda yüksek mertebeli gözlemci ile daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Yang ve Liu (2019), Euler-Bernoulli giriş modeli kullanarak tek uzuvlu esnek manipülatör için dinamik modeli kısmı diferansiyel denklem ifadesi olarak elde etmiştir. Yayılı bozucu giriş etkisi ve giriş sınırlaması altında kontrol geliştirmiştir. Bozucu giriş etkisinin tahmini için gözlemci tasarlanmıştır. Giriş satürasyonunun engellenmesi amacı da dikkate alınarak gözlemciye dayalı bir kontrolcü geliştirilmiş ve kontrolcü oluşturulması sırasında hiperbolik fonksiyonlardan yararlanılmıştır.

Zhao ve ark. (2021), bozucu girişler etkisindeki esnek uzuvlu manipülatörün kontrolü için bozucu giriş gözlemcisi temelli bir kontrolcü tasarlamıştır. Kontrolcü oluşturulurken sistem modelinde indirgeme yapılmadığı için kontrolde yayılım etkisi de engellenmiştir. Geliştirilen kontrolcü etkinliği simülasyonlar yardımı ile PD kontrolcü ile karşılaştırılmıştır.

Hibrit kontrolcüler, birden fazla kontrol yönteminin birlikte uygulanması ile elde edilen kontrolcülerdir. Böylece farklı kontrolcülerin getireceği avantajlardan faydalanılarak kontrol gerçekleştirilmektedir. Bu türde oluşturulacak olan kontrolcülerin en büyük dezavantajı karmaşık yapıda bir kontrolcü şeması ile karşılaşılabilmesi durumudur.

Ahmad ve Mohamed (2010), Euler-Bernoulli modelini dikkate alarak esnek uzuv dinamik ifadesini elde etmiştir. Modelin sonlu yapıya indirgenmesi AMM ile gerçekleştirilmiştir. Modellemede esnek uzvun Rayleigh sönümlenme davranışı gösterdiği de kabul edilmiştir. Sistemin durum-uzay denklemleri ifade edilmiş ve iki farklı kontrolcü geliştirilmiştir. İlk kontrolcü önerisi iki geri besleme döngüsü barındırmaktadır. Rijit gövde hareketi kontrolü için LQR kontrolcü kullanılırken, uç nokta titreşim sönümlenmesi için sensör ve eyleyicinin farklı konumları dikkate alınarak oluşturulmuş PID (non-collocated PID) kontrolcü kullanılmıştır. İkinci kontrolcü önerisi için rijit gövde hareketlerinde yine LQR kullanılırken, uç nokta titreşim sönümü için giriş şekillendirme yöntemi kullanılmıştır. Önerilen ikinci kontrolcü titreşim sönümlenme değerleri bakımından daha başarılı sonuçlar verdiği, önerilen ilk kontrolcü ise daha yüksek cevap hızlarına sahip olduğu, sonuç olarak ise iki yöntem ile de başarılı sonuçlar elde edildiği ifade edilmiştir.

Lu ve ark. (2018), esnek manipülatörlerde kullanılan piezoelektrik materyallerin konumlandırılması için uygun konumların belirlenmesi ve titreşim kontrolü üzerine çalışma gerçekleştirmiştir. Manipülatörün dinamik ifadesi varsayılan modlar metodu ile indirgendikten sonra pertürbasyon yöntemi ile rijit ve esnek olmak üzere iki alt sisteme bölünmüştür. Piezoelektrik materyal konumlandırması için parçacık sürü optimizasyonu kullanılmıştır. Kontrol ise rijit alt sistem ifadesi üzerinden kayan modlar kontrolcü ile konum kontrolü ve esnek alt sistem ifadesi üzerinden LQR kontrolcü ise titreşim kontrolü

şeklinde gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyon sonuçları deneysel çalışma ile desteklenmiştir.

Yang ve Tan (2018), esnek uzuv parametrelerinden olan eğilme rijitliğinin ısı değişimleri sebebi ile farklı değerler alabileceğini belirtmiş ve ilgili parametre belirsizliğini çalışmada dikkate almıştır. Ayrıca, dış bozucu girişler de dikkate alınmıştır. Belirsizlik ve bozucu girişlerin giderilmesi için yapay sinir ağlarından faydalanılmıştır. Amaç konuma ulaşma ve uç nokta titreşimlerinin sönümlenmesi için ise kayan modlar metodu ile bir kontrolcü geliştirilmiştir.

Alandoli ve ark. (2019), farklı uzuv uzunluğuna sahip olan esnek uzuvlu manipülatörlerde kullanılmak üzere PD/ H_∞ kontrolcü geliştirmiştir. Geliştirdikleri kontrolcüyu konum kontrolü ve uç nokta salınımları sönümlenme sonuçları üzerinden LQR kontrolcü ile karşılaştırmıştır. Karşılaştırmalar 50 cm, 75 cm ve 100 cm uzunluğa sahip üç farklı esnek manipülatör sistemi için gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda PD/ H_∞ kontrolcü ile LQR kontrolcüye nazaran daha başarılı bir kontrol elde edilmiştir.

Alandoli ve ark. (2021), modellemede FEM kullanmıştır. Kontrol için ise bulanık mantık kontrolcü ve LQR kontrolcünden yararlanmıştır. Bulanık mantık kontrolcüsü, LQR kontrolcünden gelen kontrol değeri üzerinden belirsizliklere karşı kontrol amacı ile kontrol sinyalini düzenleme görevindedir. Simülasyonlar için esnek uzuvlu manipülatörün SimMechanics modeli oluşturulmuştur. Simülasyonlar sonucunda standart LQR kontrolcüye göre titreşim sönümlenme ve belirsizlikler ile baş edebilmede daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Alandoli ve ark. (2021), DC motor parametrelerini de dahil ederek esnek uzuvlu manipülatör modeli oluşturmuştur. Sistem kontrolü için, P kontrolcü ile H_∞ kontrolcü bir arada kullanılmıştır. Oransal kontrolcü sistem cevabı oluşturmada kullanılırken, titreşim sönümlenme ve bozucu giriş etkilerinin ortadan kaldırılması için H_∞ kontrolcü görev yapmaktadır. Kontrolcü ifadesinde yer alan parametre değerleri deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. Simülasyon sonuçları standart LQR kontrolcü ile karşılaştırılmış ve önerilen kontrolcü ile daha başarılı sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir.

Mohamed ve Tokhi (2004) esnek uzuvlu manipülatör dinamik denklemlerini FEM ile ifade etmiştir. Esnek uzuvlu manipülatör modeli için tek bir eleman kullanımının yeterli doğrulukta bir model olduğu çalışmada belirtilmiştir. Sistemin durum-uzay modeli oluşturulmuştur. Giriş şekillendirme, alçak geçirgen filtre ve bant durduran filtre yöntemleri ile kontrolcüler oluşturulmuştur. Simülasyon karşılaştırmaları, titreşim sönümlenme, cevap hızları, gürbüzlük ve hesaplama karmaşıklığı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, giriş şekillendirme yönteminin diğer yöntemlerden daha başarılı olduğu belirtilmiştir. Ancak bu yöntemde hesaplama sürecinin de diğer yöntemlere göre daha uzun zaman gerektirdiği vurgulanmıştır.

Chen ve ark. (2019), esnek manipülatör için kontrol sürücülerinin sahip olabileceği büyük direnç değerlerini ve bağlantı göbeğinin sahip olabileceği büyük atalet değerlerini dikkate almış, Duffing osilatör dinamiğini kullanarak esnek manipülatör için yeni bir dinamik model ifadesi elde etmiştir. Kontrol için ise tek modlu ve çok modlu Duffing osilatörü ile iki farklı kontrolcü oluşturmuştur.

Tang ve ark. (2021), esnek uzuvlu manipülatör sistemine ekledikleri yay elemanları ile yeni bir tasarım gerçekleştirmiştir. Tasarımın amacı manipülatörün doğal frekans değerlerinin artırılmasıdır. Dinamik modelin oluşturulması esnasında yayların kütleleri ihmal edilmiş ve esnek uzuv Euler-Bernoulli modeli olarak kabul edilmiştir. Hesaplamalar sonucunda yay elemanları eklenmiş olan sistemin doğal frekanslarında artış görülmüştür. Hesaplamaların kontrolü için paket programlar üzerinden modellenmeler gerçekleştirilmiş ve program üzerinde gerçekleştirilen simülasyonlar ile hesaplamalara uygun sonuçlar elde edilmiştir.

Belherazem ve Chenafa (2021), esnek uzuvlu manipülatör için sistem parametrelerindeki belirsizlikleri de dikkate alarak pasiflik temelli bir kontrolcü geliştirmiştir. Manipülatörün indirgenmiş modeli AMM ile elde edilmiştir. Yöntemin başarımı simülasyonlar ile kontrol edilmiştir. Geliştirilen yöntem sayesinde parametre tahmini garanti altına alınmış, yanı sıra planlanan yörünge takibi ve uç noktada meydana gelen titreşimler sönümlenmiştir.

Liu ve ark. (2016), esnek uzuvlu manipülatörün kısmi diferansiyel denklem ifadesini pertürbasyon yöntemi ile iki alt sisteme ayırmıştır. Konum amacına ulaşma ve titreşim sönümlenme için tasarlanan adaptif kontrolcü aynı zamanda, parametrik belirsizlikler, bozucu girişler ve kontrol girdisi satürasyonu ile de başa çıkılabilmektedir.

Lyapunov fonksiyonu bir sistemin stabilitesini kontrol etmek ve garanti altına almak için önerilen enerji terimi benzeri fonksiyonlardır. Literatür çalışmaları incelendiğinde Lyapunov fonksiyonlarının esnek uzuvlu manipülatör sistemlerinde kullanıldığı görülmüştür.

He ve Sun (2016), bozucu yayılı bir giriş altında, uç nokta salınımı ve açısal konum hatası için üst sınır değerleri ile sınırlandırılmış bir tek uzuvlu esnek manipülatörün kontrolünü gerçekleştirmiştir. Sistemin kontrolü, sistemin diferansiyel denklem ifadesinin sınır koşullarında yer alan motor torku girişi ve uç nokta kontrol kuvveti girişi olmak üzere iki giriş ile gerçekleştirilmiştir. Kontrol torku ve kuvveti sistemin sınır şartlarını barındıran ifadeler olarak önerilmiştir. Sistemin stabilitesi ise önerilen bir Lyapunov fonksiyonu ile kontrol edilmiştir. Kontrol girişi ifadelerinde yer alan parametreler deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlar ile belirlenen uç nokta salınım ve açısal konum hatası üst sınır değerleri aşılmadan kontrolün gerçekleştirildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Liu ve Liu (2017a), bozucu girişler ve çıkış sınırlandırması altında esnek uzuvlu manipülatör için kontrolcü geliştirmiştir. Kontrol girişi olarak motor torku ve uzuv uç noktasından etki edecek olan kontrol kuvveti kullanılmıştır. Sistemin stabilitesi önerilen Lyapunov fonksiyonu ile kontrol edilmiştir. Kontrolcü, sistem modelinde indirgeme gerçekleştirilmeden doğrudan kısmi diferansiyel denklem ifadesi üzerinden tasarlanmıştır. Kontrolcü ifadelerinde yer alan parametreler uygun değerlerde seçilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlar ile yöntemin başarımı kontrol edilmiştir.

Meng ve ark. (2018), esnek uzuvlu manipülatör için sistemin sahip olduğu enerji ifadesini ve kontrol hedeflerini içeren bir Lyapunov fonksiyonu geliştirmiştir. Bu fonksiyon üzerinden sistemin tek kontrol girdisi olan kontrol torku ifadesi elde edilmiştir. Tork ifadesinde yer alan üç bağımsız parametrenin ikisi uygun değerlerde seçilmiştir. İfadede

yer alan üçüncü parametrenin online optimizasyonu ile sistem performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, bulanık mantık destekli bir GA oluşturulmuştur. Simülasyonlar, kontrol ifadesinde yer alan üç parametrenin de uygun değerlerde seçildiği durum için ve seçilen bir parametrenin geliştirilen yöntem ile optimize edildiği durum için tekrarlanmıştır.

Khajepour ve ark. (2020), esnek uzvu Euler-Bernoulli kiriş modeli olarak ifade etmiş ve yer çekim etkisini de göz önünde bulundurmuştur. Manipülatörün indirgenmiş modeli ise Galerkin metodu ile elde edilmiştir. Sistem pertürbasyon yöntemi ile rijit ve esnek olmak üzere iki alt sisteme ayrılmıştır. Rijit alt sistem için, Lyapunov fonksiyonu üzerinden kontrolcü tasarlanmıştır. Esnek alt sistem için sistem kutup değişimi yöntemi ile titreşim kontrolü için kontrolcü oluşturulmuştur.

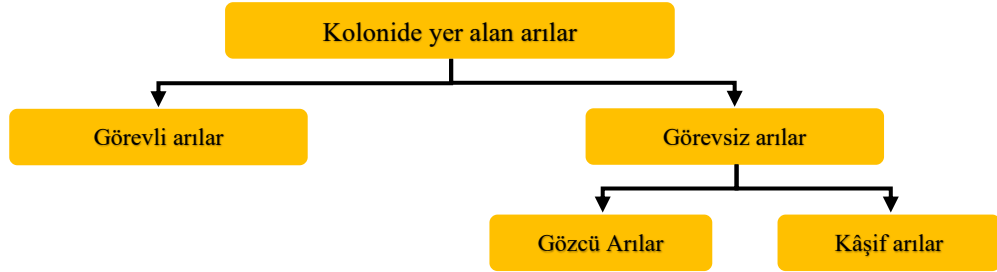
Literatür çalışmaları incelendiğinde farklı türde kontrolcülerin çeşitli optimizasyon yöntemleri ile kullanılması sonucunda kontrol performanslarında iyileştirmeler gerçekleştirildiği görülmüştür. Yine literatür çalışmalarında sistemin sahip olduğu toplam enerji ifadesini içeren bir Lyapunov fonksiyonu önerisinden yola çıkılarak esnek manipülatörün tek bir kontrol girişi ile kontrol edilebildiği görülmüştür. Ancak bu kontrol girdisinde yer alan bağımsız parametrelerden yalnızca bir tanesi optimize edilmiş, diğer parametreler uygun sabit değerlerde seçilmiştir. Bununla birlikte, genel olarak tek bir uç kütle değeri için kontrolcü tasarlandığı görülmüştür.

Bu tez kapsamında, ilgili eksikliklerin giderilmesi amacı ile, farklı uç kütle durumlarını da içeren ve kontrol ifadesinde yer alan tüm parametrelerin optimizasyon sürecine dahil edildiği bir kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda ilk olarak, esnek uzvun toplam enerji ifadesini de barındıran bir Lyapunov fonksiyonu önerisi üzerinden kontrolcü oluşturulmuştur. Kontrolcü parametrelerinin optimizasyonu için ABC Algoritması kullanılmıştır. Farklı uç kütle yükleme durumları için ise yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Kontrolcüde yer alan parametrelerin farklı kombinasyonlarının optimizasyon adımına dahil edilmesi ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır ve içlerinden en uygunu nihai kontrolcü olarak uygulanmıştır. Geliştirilen kontrolcünün performansı parametreleri yine ABC Algoritması ile optimize edilmiş klasik PID kontrolcü ve literatürde yer alan bir referans çalışması ile karşılaştırılmıştır.

2.2. Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Yapay Arı Kolonisi (ABC) Algoritması, Karaboğa (2005) tarafından arıların yiyecek arama davranışlarından esinlenilerek geliştirilmiş olan bir optimizasyon yöntemidir.

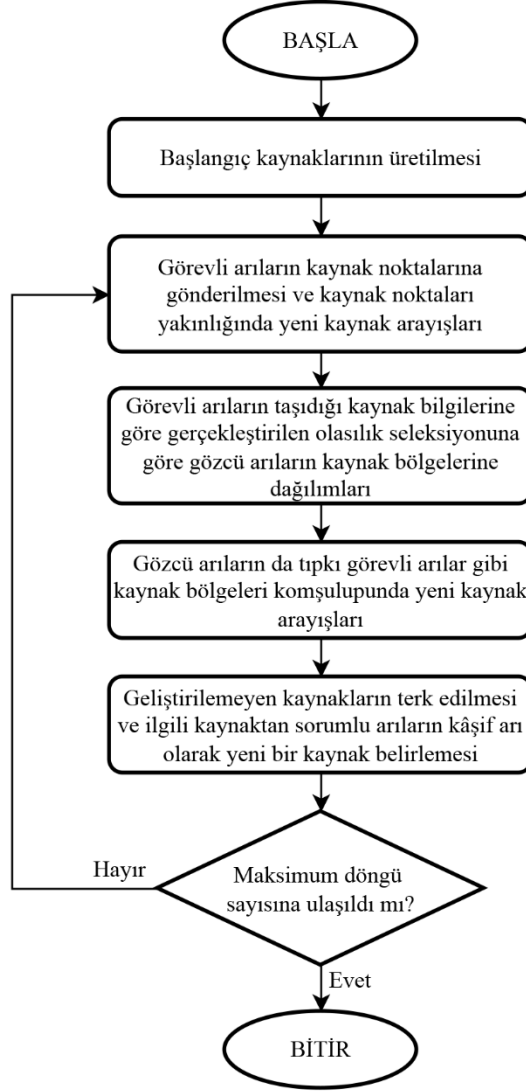
Gerçek arılar, yiyecek arama davranışları sırasında merkezi bir kontrole ihtiyaç duymadan kendi kendilerine organize olup, iş dağılımı gerçekleştirmektedir. Bu nedenle arılar sürü zekasına sahiptir. Arıların yiyecek arama sürecinde temel bileşenler, yiyecek kaynakları, görevli arılar ve görevsiz arılar olmak üzere, üç temel başlık altına toplanabilir. Yiyecek kaynakları, arıların nektar elde etmek için gittikleri kaynaklardır. Kaynağın değerini; nektar kalitesi, nektarın çıkarım kolaylığı ve konsantrasyonu, kaynağın yuvaya uzaklığı gibi parametreler belirlemektedir. Görevli arılar, belirlenen kaynaklardan nektar toplamanın yanı sıra bulunduğu kaynağın kalitesine ilişkin bilgileri de kovana taşıma görevini yerine getirirler. Görevsiz arılar ise, gözcü arılar ve kâşif arılar olmak üzere iki alt türe ayrılır. Gözcü arılar, görevli arılardan gelen kaynak kalitesi bilgilerine göre kaynak seçimi yaparken, kâşif arılar ise yeni bir kaynak bulma görevini üstlenir. Bir kolonide yer alan arıların gruplandırılması Şekil 1 ile gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Kolonide yer alan arı türleri

ABC Algoritması, kendi kendine organize olabilen arıların yiyecek arama davranışlarından yola çıkılarak geliştirilmiş bir optimizasyon yöntemidir. Yöntemin uygulama kolaylığı açısından arıların davranışlarından birtakım basitleştirilmelere gidilmiştir. Öncelikle, her bir kaynak için tek bir arının görevli olduğu kabulü yapılmıştır. Nektarı tükenen kaynaklardan sorumlu arılar ise kâşif arılara dönüşmektedir. Algoritmada yiyecek kaynağı yeri, optimizasyon probleminin olası çözümlerine karşılık gelmektedir. Son olarak, kaynak nektarı ise ilgili kaynağa ilişkin çözümün uygunluğunu ifade etmektedir.

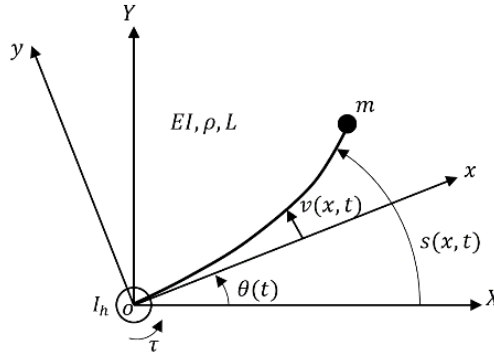
ABC Algoritması hem yerel hem de global araştırma gerçekleştirebilen bir optimizasyon yöntemidir. Görevli arıların ve gözcü arıların araştırmaları ile yerel araştırma gerçekleştirilirken, kâşif arıların belirlediği rastgele noktalar ile global araştırma gerçekleştirilmektedir. Algoritmanın temel adımları Şekil 2.2 ile ifade edilmiştir.



Şekil 2.2. Yapay Arı Kolonisi Algoritması temel adımları (Karaboğa, 2020)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Gerçekleştirilen çalışmada dikkate alınan esnek uzuvlu manipülâtörün geometrik modeli Şekil 3.1 ile verilmiştir. Çalışmaya konu olan esnek manipülâtör, yalnızca xy düzleminde hareket etmekte ve bu hareketini ilgili düzleme dik olan eksene göre dönme hareketi yaparak gerçekleştirmektedir. Euler-Bernoulli kirişi olarak kabul edilen esnek uzvun, yalnızca xy düzlemindeki eğilmesi dikkate alınmıştır. Diğer eksenlerde meydana gelen yer değiştirmelerin ise ihmal edilebilir boyutlarda olduğu kabul edilmiştir. Manipülâtörün uç noktasında yer alan kütle, noktasal kütle olarak kabul edilmiş, bu nedenle uç kütleinin yalnızca sahip olduğu çizgisel hızlar dikkate alınmıştır.



Şekil 3.1. Esnek uzuvlu manipülâtörün geometrik modeli

İlgili şekil üzerinde; global koordinatlar XOY , rotorun dönme ekseni ile değişen yerel koordinatlar xOy , kontrol torku τ , bağlantı göbeği ataleti I_h , esnek uzvun global koordinatlara göre açısal konumu $\theta(t)$, esnek uzuv üzerinde yer alan bir noktanın sehimi $v(x, t)$, esnek uzuv üzerinde yer alan bir noktanın global koordinatlara göre konumu $s(x, t)$, esnek uzuv uzunluğu L , esnek uzuv için birim uzunluktaki kütle değeri ρ , eğilme rijitliği EI ve uç kütle m ile gösterilmiştir. Hareket esnasında esnek uzuv üzerinde meydana gelen sehimlerin küçük boyutlarda olduğu kabul edilmiştir ve uzuv üzerinde yer alan herhangi bir noktanın konum ifadesi

$$s(x, t) = x\theta(t) + v(x, t) \quad (3.1)$$

eşitliği ile ifade edilmiştir.

3.1. Hareket Denklemlerinin Çıkarılması

Sisteme ait dinamik denkleminin elde edilmesi için

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta E_k - \delta E_p + \delta W_{nc}) dt = 0 \quad (3.2)$$

eşitliği ile ifade edilen Hamilton Prensipli kullanılmıştır. Denklem (3.2)'de yer alan δE_k , δE_p ve δW_{nc} terimleri sırasıyla; sistemin kinetik enerjisinin, sistemin potansiyel enerjisinin ve sistemde yer alan korunumsuz kuvvetlerce yapılan işlerin varyasyonlarıdır.

Hamilton Prensipli'nde kullanılmak üzere, öncelikle sistemin enerji ifadeleri ve sistem üzerinde yapılan işler tanımlanmıştır. Sistemin kinetik enerjisi

$$E_k = \frac{1}{2} I_h \dot{\theta}(t)^2 + \frac{1}{2} \rho \int_0^L \dot{s}(x, t)^2 dx + \frac{1}{2} m \dot{s}(L, t)^2 \quad (3.3)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Kinetik enerji ifadesinde yer alan ilk terim, rotorun dönme hareketinden kaynaklanan kinetik enerjisidir. İkinci terim, esnek uzvun hareketinden kaynaklanan kinetik enerji ifadesidir. Esnek uzvun kinetik enerjisi, uzuv üzerindeki dx elemanlarının kinetik enerjilerinin toplamı ile ifade edilmiştir. Noktasal kütle kabul edilen uç kütle, yalnızca öteleme kinetik enerjisine sahiptir. İlgili enerji ifadesi Denklem (3.3)'te yer alan üçüncü ve son terimdir.

Esnek uzuv uzunluğunun kesit boyutuna göre yeterli büyüklükte olduğu kabul edilerek, kesitin dönme ataleti ve kesme etkileri ihmal edilmiştir. Sistemin potansiyel enerjisi, yalnızca uzvun eğilme gerinim enerjisinden oluşmaktadır ve

$$E_p = \frac{1}{2} EI \int_0^L (v''(x, t))^2 dx \quad (3.4)$$

ifadesi ile tanımlanmıştır.

Sistemde yer alan tek korunumsuz kuvvet olan kontrol torkunun yaptığı iş ise Denklem (3.5) ile ifade edilmiştir.

$$W_{nc} = \tau\theta(t) \quad (3.5)$$

Denklem (3.3) ile tanımlanan kinetik enerji ifadesinin varyasyonu için EK 1 ile gösterilen işlemler yapılmış ve

$$\begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} \delta E_k dt &= \int_{t_1}^{t_2} -I_h \ddot{\theta}(t) \delta\theta(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} -\rho \frac{L^3}{3} \ddot{\theta}(t) \delta\theta(t) dt \\ &+ \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L -\rho x \ddot{v}(x, t) \delta\theta(t) dx dt + \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L -\rho x \ddot{\theta}(t) \delta v(x, t) dx dt \\ &+ \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L -\rho \ddot{v}(x, t) \delta v(x, t) dx dt + \int_{t_1}^{t_2} -mL^2 \ddot{\theta}(t) \delta\theta(t) dt \\ &+ \int_{t_1}^{t_2} -mL \ddot{v}(x, t) \delta\theta(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} -mL \ddot{\theta}(t) \delta v(L, t) dt \\ &+ \int_{t_1}^{t_2} -m \ddot{v}(L, t) \delta v(L, t) dt \end{aligned} \quad (3.6)$$

eşitliği elde edilmiştir. Benzer şekilde, Denklem (3.4) ile tanımlanan potansiyel enerji ifadesinin varyasyonu EK 2 ile detayları verilen işlemlere göre düzenlendiğinde

$$\begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} \delta E_p dt &= \int_{t_1}^{t_2} EI v''(L, t) \delta v'(L, t) dt + \int_{t_1}^{t_2} -EI v''(0, t) \delta v'(0, t) dt \\ &+ \int_{t_1}^{t_2} -EI v'''(L, t) \delta v(L, t) dt + \int_{t_1}^{t_2} EI v'''(0, t) \delta v(0, t) dt \\ &+ \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L EI v^{IV}(x, t) \delta v(x, t) dx dt \end{aligned} \quad (3.7)$$

eşitliği elde edilmiştir. Son olarak Denklem (3.5) ile tanımlanan iş ifadesinin varyasyonu düzenlendiğinde ise

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta W_{nc} dt = \int_{t_1}^{t_2} \tau \delta\theta(t) dt \quad (3.8)$$

eşitliği elde edilmiştir.

Denklem (3.6) - (3.8) ile verilen varyasyonların Hamilton Prensipli'nde yerine yazılması ve uygun parantezler altında toplanması sonucunda

$$\begin{aligned} & \int_{t_1}^{t_2} K_1 \delta\theta(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L K_2 \delta v(x, t) dx dt + \int_{t_1}^{t_2} K_3 \delta v(L, t) dt + \\ & \int_{t_1}^{t_2} K_4 \delta v'(L, t) dt + \int_{t_1}^{t_2} K_5 \delta v'(0, t) dt + \int_{t_1}^{t_2} K_6 \delta v(0, t) dt = 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

integral eşitliğine ulaşılmıştır. Buradaki K_i katsayılarının karşılıkları ise aşağıda yer alan denklemler ile gösterilmiştir.

$$K_1 = -I_h \ddot{\theta}(t) - \rho \frac{L^3}{3} \ddot{\theta}(t) - \int_0^L \rho x \ddot{v}(x, t) dx - mL^2 \ddot{\theta}(t) - mL \ddot{v}(L, t) + \tau \quad (3.10)$$

$$K_2 = -\rho x \ddot{\theta}(t) - \rho \ddot{v}(x, t) - EI v^{IV}(x, t) \quad (3.11)$$

$$K_3 = -mL \ddot{\theta}(t) - m \ddot{v}(L, t) + EI v'''(L, t) \quad (3.12)$$

$$K_4 = EI v''(L, t) \quad (3.13)$$

$$K_5 = EI v''(0, t) \quad (3.14)$$

$$K_6 = -EI v'''(0, t) \quad (3.15)$$

Esnek uzvun rotor ile bağlandığı uç noktası için ankastre mesnet kabulü yapılmıştır. İlgili kabul sonucunda geçerli olan sınır şartları

$$v(0, t) = 0 \quad (3.16)$$

$$v'(0, t) = 0 \quad (3.17)$$

eşitlikleri ile ifade edilmiştir.

Denklem (3.9) ile verilen eşitlik, tüm toplam terimlerinin ayrı ayrı sıfıra eşit olması ile sağlanmaktadır. Denklem (3.16) ve (3.17) ile kabul edilen sınır şartları sonucunda K_5 ve K_6 katsayılarının olduğu integral ifadeleri sıfır olmaktadır. Denklem (3.9)'da yer alan

diğer toplam terimlerinin sıfır olması için ise, Denklem (3.10) - (3.13) ile verilen, K_1 , K_2 , K_3 ve K_4 katsayılarının da sıfıra eşit olması gerektiği açıktır. Buradan

$$EIv^{IV}(x, t) + \rho\ddot{v}(x, t) = -\rho x\ddot{\theta}(t) \quad (3.18)$$

$$\tau(t) = I_h\ddot{\theta}(t) + \rho\frac{L^3}{3}\ddot{\theta}(t) + \int_0^L \rho x\ddot{v}(x, t)dx + mL^2\ddot{\theta}(t) + mL\ddot{v}(L, t) \quad (3.19)$$

$$EIv'''(L, t) = mL\ddot{\theta}(t) + m\ddot{v}(L, t) \quad (3.20)$$

$$v''(L, t) = 0 \quad (3.21)$$

denklemleri elde edilmiştir. Denklem (3.18) esnek uzuvlu manipülatörün hareket denklemini ifade etmektedir. Dördüncü mertebeden diferansiyel denklem yapısına sahip olan eşitliğin çözümü dört sınır şartı gerektirmektedir. Bu şartlardan ikisi Denklem (3.16) ve (3.17) ile, diğer iki sınır şartı ise Denklem (3.20) ve (3.21) ile tanımlanmıştır. Denklem (3.19) ise rotor denklemini ifade etmektedir.

Hareket denkleminin çözüm aşamasından önce, Denklem (3.19)'da yer alan integral ifadesinden ve Denklem (3.20)'de yer alan $\ddot{v}(L, t)$ zaman türevi ifadelerinden kurtulmak için düzenlemeler yapılmıştır. Bu amaçla ilk olarak, Denklem (3.18) ile verilen hareket denklemini x ile genişletilmiş ve 0 ile L aralığında integrali alınmıştır. Böylece

$$\int_0^L EIxv^{IV}(x, t)dx + \int_0^L \rho x\ddot{v}(x, t)dx = \int_0^L -\rho x^2\ddot{\theta}(t)dx \quad (3.22)$$

eşitliğine ulaşılmıştır. EK 3 ile verilen ara işlemler sonrasında eşitlik

$$EILv'''(L, t) + EIv''(0, t) + \int_0^L \rho x\ddot{v}(x, t)dx = -\rho\frac{L^3}{3}\ddot{\theta}(t) \quad (3.23)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Denklem (3.23)'te bulunan $v'''(L, t)$ yerine Denklem (3.20)'den elde edilen karşılığı yazıldığında

$$\int_0^L \rho x\ddot{v}(x, t)dx + \rho\frac{L^3}{3}\ddot{\theta}(t) = -v''(0, t) - mL^2\ddot{\theta}(t) - mL\ddot{v}(L, t) \quad (3.24)$$

eşitliği elde edilmiştir. Denklem (3.24)'ün sol tarafında yer alan terimler Denklem (3.19)'da yerine yazıldığında ve sadeleştirilmeler yapıldığında

$$\tau(t) = I_h \ddot{\theta}(t) - EI v''(0, t) \quad (3.25)$$

eşitliğine ulaşılmıştır. Böylece, Denklem (3.19) ile verilen rotor denklemi integral ifadelerinden arındırılmıştır. Eşitlikte; $EI v''(0, t)$ esnek uzvun rotora bağlı uç noktasındaki eğilme momenti, $I_h \ddot{\theta}(t)$ ise bağlantı göbeğinin moment ifadesidir.

Rotor denkleminin ardından Denklem (3.20)'de yer alan zamana göre türevi içeren terimler için düzenlemeler yapılmıştır. Denklem (3.20)'nin sağ tarafında yer alan ifade için $s(L, t)$ yay uzunluğu dikkate alınmış ve böylece eşitlik

$$EI v'''(L, t) = m \ddot{s}(L, t) \quad (3.26)$$

şeklinde düzenlenmiştir. Eşitliğin sağ tarafından yer alan $\ddot{s}(L, t)$ terimi yerine, Denklem (3.18)'in, L uç nokta konumu için yazıldığında elde edilen

$$\ddot{s}(L, t) = -\frac{EI}{\rho} v^{IV}(L, t) \quad (3.27)$$

karşılığının kullanılması ile

$$v^{IV}(L, t) = -\frac{\rho}{m} v'''(L, t) \quad (3.28)$$

sınır şartı elde edilmiştir. Böylece tüm sınır şartları sadece konuma bağlı türevleri içerir hale getirilmiştir.

3.2. Hareket Denklemlerinin İndirgenmesi

Hamilton Prensibi ile esnek uzuvlu manipülatörün Denklem (3.18) ile verilen dördüncü mertebeden kısmi diferansiyel denklem yapısına sahip hareket denklemi elde edilmiştir. Çözüm için gerekli sınır şartları ise Denklem (3.16), (3.17), (3.21) ve (3.28) ile verilmiştir. Bu bölümde ise hareket denkleminin indirgenmesi ve Lagrange denklemlerinin oluşturulması adımları aktarılmıştır.

3.2.1. Varsayılan Modlar Metodu uygulaması

Esnek uzuvlu manipülatörün hareket denkleminin indirgenmesi için Varsayılan Modlar Metodu (AMM) kullanılmıştır. Esnek uzvun herhangi bir noktasındaki sehim

$$v(x, t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x) q_i(t) \quad (3.29)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada n , dikkate alınan mod sayısını temsil etmektedir. Denklem (3.18) ile verilen dördüncü mertebeden kısmi diferansiyel denklemin çözümü için AMM ile tanımlanan sehim fonksiyonu kullanıldığında ve bağımsız parametrelere göre düzenlendiğinde

$$-\frac{EI}{\rho} \frac{\phi_i^{IV}(x)}{\phi_i(x)} = \frac{\ddot{q}_i(t)}{q_i(t)} = -\omega_i^2 \quad (3.30)$$

eşitlikleri elde edilmiştir. Denklem (3.30) ile verilen eşitlikler konum ve zaman parametrelerine göre ayrı ayrı yazılmıştır. Konum bağımsız parametresi için

$$\phi_i^{IV}(x) - \beta^4 \phi_i(x) = 0 \quad (3.31)$$

eşitliği elde edilmiştir. Eşitlikte yer alan β

$$\beta^4 = \omega_i^2 \frac{\rho}{EI}$$

eşitliği ile tanımlanmıştır. Zaman bağımsız parametresine için

$$\ddot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = 0 \quad (3.32)$$

eşitliği elde edilmiştir. Denklem (3.16), (3.17), (3.21) ve (3.28) ile verilen sınır şartlarına AMM uygulandığında yeni sınır şartları

$$\phi(0) = 0 \quad (3.33)$$

$$\phi'(0) = 0 \quad (3.34)$$

$$\phi''(L) = 0 \quad (3.35)$$

$$\phi^{IV}(L) = \frac{-\rho}{m} \phi'''(L) \quad (3.36)$$

olarak elde edilmiştir. Denklem (3.31) ile verilen konuma bağlı dördüncü mertebe diferansiyel denklem çözümü için

$$\phi(x) = A_1 \cos(\beta x) + A_2 \sin(\beta x) + A_3 \cosh(\beta x) + A_4 \sinh(\beta x) \quad (3.37)$$

fonksiyonu önerilmiştir. Denklem (3.33) ve (3.34) ile verilen sınır şartları uygulandığında önerilen fonksiyon katsayıları arasında

$$A_1 + A_3 = 0 \quad (3.38)$$

$$A_2 + A_4 = 0 \quad (3.39)$$

eşitlikleri elde edilmiştir. Bu eşitliklerde yer alan A_3 ve A_4 katsayılarının karşılıkları Denklem (3.37) ile önerilen fonksiyonda yerine yazıldıktan sonra Denklem (3.35) ile verilen sınır şartı uygulandığında, A_1 ve A_2 katsayıları arasında

$$A_2 = -\frac{\cos(\beta L) + \cosh(\beta L)}{\sin(\beta L) + \sinh(\beta L)} A_1 \quad (3.40)$$

eşitliği elde edilmiştir. İlgili eşitlikte A_1 ve A_2 arasındaki oranı ifade eden terim için

$$K = -\frac{\cos(\beta L) + \cosh(\beta L)}{\sin(\beta L) + \sinh(\beta L)} \quad (3.41)$$

tanımlaması yapıldıktan sonra, A_2 katsayısının A_1 katsayısı karşılığı Denklem (3.37) ile önerilen fonksiyonda yerine yazıldığında

$$\phi(x) = A_1[(\cos(\beta x) - \cosh(\beta x)) + K(\sin(\beta x) - \sinh(\beta x))] \quad (3.42)$$

ifadesine ulaşılmıştır. Bu eşitlik, son sınır şartı olan Denklem (3.36)'da kullanıldığında

$$m\lambda(\cos(\lambda) - \cosh(\lambda)) + \rho L(\sin(\lambda) - \sinh(\lambda)) + K(m\lambda(\sin(\lambda) - \sinh(\lambda)) - \rho L(\cos(\lambda) + \cosh(\lambda))) = 0 \quad (3.43)$$

karakteristik denklemini elde edilmiştir. Burada

$$\lambda = \beta L$$

olarak tanımlanmıştır. Denklem (3.43) ile verilen karakteristik denklem, λ için çözüldüğünde sonsuz sayıda çözüm oluşacaktır. Simülasyonlar sırasında tercih edilen n mod sayısına göre karakteristik denklemin ilk n çözümü, dolayısıyla sistemin ilk n modu belirlenmiştir. Denklem (3.42) ile verilen $\phi(x)$ fonksiyonunun bilinmeyen A_1 katsayısının belirlenmesi için ise ortogonalite şartından faydalanılmıştır.

3.2.2. Ortogonalite Şartı

Denklem (3.32)'de yer alan zamana bağlı diferansiyel denklemin çözümü için

$$q_i(t) = e^{j\omega_i t}$$

fonksiyonu önerilmiş ve

$$v_i(x, t) = \phi_i e^{j\omega_i t} \quad (3.44)$$

ifadesi elde edilmiştir. İlgili ifadenin Denklem (3.18)'de yerine yazılması ile

$$(EI\phi_i^{IV}(x) - \rho\omega_i^2\phi_i(x))e^{j\omega_i t} = 0 \quad (3.45)$$

eşitliği elde edilmiştir. Denklem (3.45)'in geçerli olması

$$\phi_i^{IV}(x) - \beta^4\phi_i(x) = 0 \quad (3.46)$$

eşitliğinin sağlanması ile mümkündür. Denklem (3.46) ifadesinin $\phi_j(x)$ ile genişletildikten sonra 0 ile L arasında integralinin alınması ile

$$\int_0^L \phi_j(x)\phi_i^{IV}(x)dx = \beta_i^4 \int_0^L \phi_j(x)\phi_i(x)dx \quad (3.47)$$

integral eşitliğine ulaşılmıştır. Denklem (3.47)'de yer alan i ve j indisleri esnek uzun farklı modlarını temsil etmektedir. Bu durumda indislerin yer değiştirmesi ile elde edilen

$$\int_0^L \phi_i(x) \phi_j^{IV}(x) dx = \beta_j^4 \int_0^L \phi_i(x) \phi_j(x) dx \quad (3.48)$$

eşitliği de geçerlidir. Denklem (3.47) ve (3.48)'e EK 4 ile gösterilen ara işlemler uygulandıktan sonra

$$\int_0^L \phi_j(x) \phi_i(x) dx + \frac{m}{\rho} \phi_j(L) \phi_i(L) = \delta_{ij} \quad (3.49)$$

ortogonalite ifadesi elde edilmiştir. Denklem (3.49)'da δ_{ij} ile gösterilen terim Kroneker Delta'dır ve

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (3.49) ile verilen ortogonalite ifadesi, mod indislerinin birbirine eşit olduğu $i = j$ durumu için çözümlenerek $\phi_i(x)$ fonksiyonlarına ait A_1 katsayıları belirlenmiştir.

Bu bölümde gerçekleştirilen işlemler ile AMM uygulaması sonrası elde edilen konum fonksiyonlarının çözümlerine ulaşılmıştır. Sonraki bölümde zaman fonksiyonlarının çözümü için Lagrange denklemlerinden faydalanılacaktır.

3.2.3. Lagrange Denklemlerinin Oluşturulması

AMM uygulanması ile konum fonksiyonları bilinen esnek uzuvlu manipülatörün çözülmesi gereken zaman fonksiyonları için

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{Q} \quad (3.50)$$

şeklinde tanımlanmış Lagrange denklemlerinden faydalanılmıştır. Denklem (3.50) ile verilen Lagrange denkleminde; \mathbf{q} sisteme ait bağımsız parametreleri, \mathcal{L} sistem Lagrangianı'nı, \mathbf{Q} ise sistemde yer alan korunumsuz kuvvetlerin yaptığı işi temsil etmektedir.

Esnek uzvun eğilme ifadesi $v(x, t)$ için tanımlanan Denklem (3.29) dikkate alınarak, Denklem (3.3) ile verilen kinetik enerji ve Denklem (3.4) ile verilen potansiyel enerji ifadeleri yeniden yazılmıştır. Böylece kinetik enerji ifadesi

$$E_k = \frac{1}{2} I_h \dot{\theta}(t)^2 + \frac{1}{2} \rho \int_0^L \left(x \dot{\theta}(t) + \sum_{i=1}^n \phi_i(x) \dot{q}_i(t) \right)^2 dx + \frac{1}{2} m \left(L \dot{\theta}(t) + \sum_{i=1}^n \phi_i(L) \dot{q}_i(t) \right)^2 \quad (3.51)$$

potansiyel enerji ifadesi ise

$$E_p = \frac{1}{2} EI \int_0^L \left(\sum_{i=1}^n \phi_i''(x) q_i(t) \right)^2 dx \quad (3.52)$$

şeklinde yeniden ifade edilmiştir. Sistemin Lagrangian'ı ise

$$L = \frac{1}{2} I_h \dot{\theta}(t)^2 + \frac{1}{2} \rho \int_0^L \left(x \dot{\theta}(t) + \sum_{i=1}^n \phi_i(x) \dot{q}_i(t) \right)^2 dx + \frac{1}{2} m \left(L \dot{\theta}(t) + \sum_{i=1}^n \phi_i(L) \dot{q}_i(t) \right)^2 - \frac{1}{2} EI \int_0^L \left(\sum_{i=1}^n \phi_i''(x) q_i(t) \right)^2 dx \quad (3.53)$$

olmaktadır. Sisteme ait bağımsız parametreler

$$\mathbf{q} = [\theta(t) \quad q_1(t) \quad \dots \quad q_n(t)]^T$$

vektörü ile ifade edilmiştir. Bağımsız parametrelere göre Denklem (3.50) ile verilen Lagrange denklemi uygulandığında sisteme ait diferansiyel denklem takımı

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{T} \quad (3.54)$$

elde edilmiştir. İfadenin elde edilmesine ilişkin ara işlemler EK 5 ile gösterilmiştir. Denklem (3.54)'te, \mathbf{M} sisteme ait atalet matrisini, \mathbf{K} ise katılık matrisini ifade etmektedir. Sağ taraf matrisi \mathbf{T} ise sisteme etki eden dış kuvvetler matrisidir. \mathbf{q} ise sisteme ait bağımsız parametrelerden oluşan satır vektörüdür.

Atalet matrisi \mathbf{M} , simetrik matristir ve matris elemanları

$$M(1,1) = I_h + \rho \frac{L^3}{3} + mL^2 \quad (3.55)$$

$$M(1, i + 1) = \rho \int_0^L x \phi_i(x) dx + mL \phi_i(L) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.56)$$

$$M(i + 1, 1) = M(1, i + 1) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.57)$$

$$M(i + 1, i + 1) = \rho \int_0^L \phi_i(x)^2 dx + m \phi_i(L)^2 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.58)$$

ifadeleri ile verilmiştir. Atalet matrisinin belirtilen elemanları dışındaki diğer tüm elemanları sıfır değerindedir. Katılık matrisi \mathbf{K} diyagonal matristir ve köşegen elemanları

$$K(1,1) = 0 \quad (3.59)$$

$$K(i + 1, i + 1) = EI \int_0^L (\phi_i''(x))^2 dx \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.60)$$

denklemleri ile verilmiştir. Sağ taraf matrisi \mathbf{T} ise sütun vektörü formundadır ve matrisine ait elemanlar

$$\mathbf{T} = [\tau \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T \quad (3.61)$$

vektörü ile ifade edilmiştir.

Böylelikle, Denklem (3.54)'te yer alan, \mathbf{M} ve \mathbf{K} matrislerinin elemanları belirlenmiştir. Diferansiyel denklem takımının çözümü için ihtiyaç duyulan son değer, sağ taraf matrisinde yer alan τ kontrol torku ifadesidir. Sonraki bölümde ilgili tork ifadesinin eldesi izah edilecektir.

3.3. Kontrolcü Tasarımı

Esnek uzuvlu manipülatörün istenilen konuma ulaşması ve bu hareket sırasında titreşim hareketinin minimize edilmesi için gerekli olan tork değerinin belirlenmesinde sistemin toplam enerji ifadesinden faydalanılmıştır.

3.3.1. Lyapunov fonksiyonu önerisi

Esnek uzuvlu manipülatör istenilen pozisyona ulaşmak için dönme hareketi gerçekleştirirken sistem kinetik enerjiye sahiptir. Yine bu hareket sırasında esnek uzvun eğilme hareketinden kaynaklı potansiyel enerjiye de sahiptir. Manipülatör herhangi bir konumda durduğunda esnek uzvun titreşim hareketi de sönümlenmiş ise sistemin toplam enerjisi sıfır olacaktır. Bu açıklamadan yola çıkılarak sistemin enerji ifadesi yazılmış ve esnek manipülatör için uygun bir Lyapunov fonksiyonu seçilmiştir. Ardından, Lyapunov stabilite kriteri gözetilerek uygun tork değerini üretebilecek tork fonksiyonu elde edilmiştir.

Kontrolcü tasarımı için ilk olarak sistemin sahip olduğu toplam enerji

$$E = E_k + E_p$$

olarak ifade edilmiştir. Sistemin kinetik enerji ifadesi Denklem (3.54)'ten faydalanılarak

$$E_k = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{q}} \quad (3.62)$$

eşitliği ile ifade edilmiştir. Sistemin potansiyel enerjisi de benzer olarak

$$E_p = \frac{1}{2} \mathbf{q}^T \mathbf{K} \mathbf{q} \quad (3.63)$$

eşitliği ile ifade edilmiştir.

Kinetik ve potansiyel enerji ifadeleri ile toplam enerjinin tanımlanmasının ardından sistemin toplam enerjisinin zaman değişkenine göre türevi

$$\dot{E} = \dot{\mathbf{q}}^T (\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \mathbf{q}) \quad (3.64)$$

olacaktır. Denklem (3.64)'te parantez içinde yer alan terim Denklem (3.54) ile verilen sistemin diferansiyel denklem takımının sol tarafında yer alan ifadedir. İlgili ifadenin karşılığı olan \mathbf{T} sütun matrisinin yerine yazılması ile

$$\dot{E} = \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{T} \quad (3.65)$$

elde edilmiştir. Denklem (3.65)'te yer alan ve bağımsız parametrelerin türev vektörü

$$\dot{\mathbf{q}}^T = [\dot{\theta}(t) \quad \dot{q}_1(t) \quad \cdots \quad \dot{q}_n(t)]$$

ve Denklem (3.61) ile verilen sağ taraf matrislerinin yerine yazılarak matris çarpımının yapılması sonucunda toplam enerjinin değişimi için

$$\dot{E}(t) = \tau \dot{\theta}(t) \quad (3.66)$$

yazmak mümkündür. Denklem (3.66) incelendiğinde esnek manipülatörün sahip olduğu toplam enerjideki değişimin, uygulanacak giriş torku ve sistemin açısal hız değişimi ile orantılı olduğu görülmüştür.

Esnek manipülatör sisteminde kontrolün amacı hem manipülatörün istenilen pozisyona ulaşması hem de bu pozisyonda iken sistemin sahip olduğu enerjinin sıfır olmasıdır. Bunun için literatürde yer alan ve bundan sonraki bölümlerde referans çalışma olarak isimlendirilecek olan Meng ve ark., (2018) çalışmasına benzer şekilde aşağıdaki Lyapunov fonksiyonu önerilmiştir.

$$V(t) = E(t) + \frac{1}{2} r_1 (\theta(t) - \theta_d)^2 + \frac{1}{2} r_2 \dot{\theta}^2(t) \quad (3.67)$$

Sistemin kararlılığı için bu fonksiyonun değişiminin sıfır veya negatif olması gerektiği bilinmektedir. Bu nedenle Denklem (3.67) ile verilen Lyapunov fonksiyonunun zaman değişkenine göre türevi alındığında

$$\dot{V}(t) = \dot{E}(t) + r_1 (\theta(t) - \theta_d) \dot{\theta}(t) + r_2 \dot{\theta}(t) \ddot{\theta}(t) \quad (3.68)$$

elde edilmiştir. Denklem (3.66)'nın Denklem (3.68)'de kullanılması ile eşitlik

$$\dot{V}(t) = \dot{\theta}(t) (\tau + r_1 (\theta(t) - \theta_d) + r_2 \ddot{\theta}(t)) \quad (3.69)$$

formuna getirilmiştir. Esnek uzva ait açısal ivme ise Denklem (3.54) üzerinden

$$\ddot{\theta}(t) = m_{11} \tau - k \quad (3.70)$$

eşitliği ile ifade edilmiştir. Denklem (3.70)'de yer alan m_{11} ve k terimleri Denklem (3.71) ve (3.72) ile verilmiştir.

$$m_{11} = (\mathbf{M}^{-1})(1,1) \quad (3.71)$$

$$k = (\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}\mathbf{q})(1,1) \quad (3.72)$$

Denklem (3.69) ile verilen Lyapunov türev ifadesinin daima negatif olmasını garanti altına almak için referans çalışmada olduğu gibi aşağıdaki tork ifadesi seçilmiştir.

$$\tau(t) = \frac{-r_1}{1 + r_2 m_{11}} (\theta(t) - \theta_d) + \frac{r_2}{1 + r_2 m_{11}} k + \frac{-r_3}{1 + r_2 m_{11}} \dot{\theta}(t) \quad (3.73)$$

Tork ifadesinde yer alan r_1 , r_2 ve r_3 katsayıları pozitif değerli katsayılardır. Seçilen tork ifadesinin Denklem (3.69)'da yerine yazılması ile $\dot{V}(t)$ için

$$\dot{V}(t) = -r_3 \dot{\theta}^2(t) \leq 0 \quad (3.74)$$

durumu elde edilmiş ve böylece sistemin stabilitesi sağlanmıştır.

3.3.2. Optimizasyon amaç fonksiyonu

Esnek uzuvlu manipülatör için oluşturulan tork ifadesinde r_1 , r_2 ve r_3 olmak üzere üç adet parametre yer almaktadır. Bu parametrelerin her biri esnek uzuvlu manipülatörün hareketini farklı şekillerde etkilemektedir. Uygun parametrelerin seçilmesi için ABC Algoritması'ndan faydalanılmıştır. Parametre optimizasyonundan önce optimizasyon için gerekli olan uygun bir amaç fonksiyonunun seçilmesi gerekmektedir. Burada Denklem (3.75) ile verilen ifade amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir.

$$f = \gamma(\theta(t) - \theta_d)^2 + (1 - \gamma)E \quad (3.75)$$

Amaç fonksiyonunda yer alan θ_d esnek uzvun istenen açısal konum değerini ifade etmektedir. Denklem (3.75)'te görüleceği üzere amaç fonksiyonu iki amacın toplamından oluşmaktadır. Konum hatasının karesinin ve sistemin sahip olduğu toplam enerjinin amaç fonksiyonu içindeki etkisi ağırlık katsayısı olan γ ile belirlenmiştir. Ağırlık katsayısı $0 \leq \gamma \leq 1$ şartını sağlayacak değerde olmaktadır.

3.3.3. Tork parametreleri optimizasyonu

Tork parametrelerinin optimizasyonu için Karaboğa tarafından geliştirilmiş olan ABC Algoritması kullanılmıştır. ABC Algoritması doğada yiyecek arayan arıların kaynak arama yönteminden faydalanılarak geliştirilmiş bir optimizasyon yöntemidir. Yöntemde işçi arı, gözcü arı ve kâşif arı olmak üzere üç farklı arı türü ile kaynak araştırması gerçekleştirir. Burada kaynak ifadesi optimize edilecek parametre değerlerinin arama uzayındaki konumu için kullanılmaktadır.

Optimizasyonun ilk adımı olarak optimizasyon parametreleri olan; arama uzayı sınırları, arama uzayında yer alacak başlangıç noktaları sayısı (NP) ve maksimum çevrim sayısının (mc) belirlenmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Başlangıç noktaları (BN)

$$r_{ij} = r_j^{min} - \varphi(r_j^{maks} - r_j^{min}) \quad 0 \leq \varphi \leq 1 \quad (3.76)$$

eşitliği ile belirlenmiştir. Denklem (3.76)'da i indisi başlangıç noktasını temsil etmekte ve $i = 1, 2, \dots, BN$ değerlerini almaktadır. Optimize edilecek parametre sayısı ise j indisi ile temsil edilmektedir. Toplam optimize edilecek parametre sayısı D olmak üzere $j = 1, 2, \dots, D$ değerlerini almaktadır. Böylelikle her satırı farklı başlangıç noktası koordinatlarını temsil eden \mathbf{r} matrisi oluşturulmuştur.

İşçi arıların sayısı başlangıç noktaları sayısına eşit olmaktadır. Bununla birlikte her işçi arı tek bir başlangıç noktasından sorumlu bulunmaktadır. İşçi arıların sorumlu oldukları başlangıç noktası çevresinde yeni bir kaynak araması işlemi

$$v_{ij} = r_{ij} - \phi(r_{ij} - r_{kj}) \quad -1 \leq \phi \leq 1 \quad (3.77)$$

eşitliği ile gerçekleştirilmiştir. Bu eşitlikte k indisi her adımda rastgele seçilen bir başlangıç noktasını ifade etmektedir. Belirlenen yeni kaynağın arama uzayı sınırlarında olmasının garanti altına alınması ise

$$v_{ij} = \begin{cases} r_j^{min} & , \quad v_{ij} < r_j^{min} \\ v_{ij} & , \quad r_j^{min} \leq v_{ij} \leq r_j^{maks} \\ r_j^{maks} & , \quad v_{ij} > r_j^{maks} \end{cases} \quad (3.78)$$

ifadesi ile sağlanmıştır. Belirlenen noktaların uygunluğu, oluşturulan amaç fonksiyonu doğrultusunda

$$uygunluk_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + f_i} & , f_i \geq 0 \\ 1 + |f_i| & , f_i < 0 \end{cases} \quad (3.79)$$

ifadesi ile kontrol edilmiştir. İşçi arıların belirlediği yeni kaynakların uygunluk değerlerinden faydalanan gözcü arılar kaynak seçimini gerçekleştirmektedir. Gözcü arıların kaynak seçiminde rulet tekeri yöntemi kullanılmış ve yonteme ait denklem aşağıda verilmiştir.

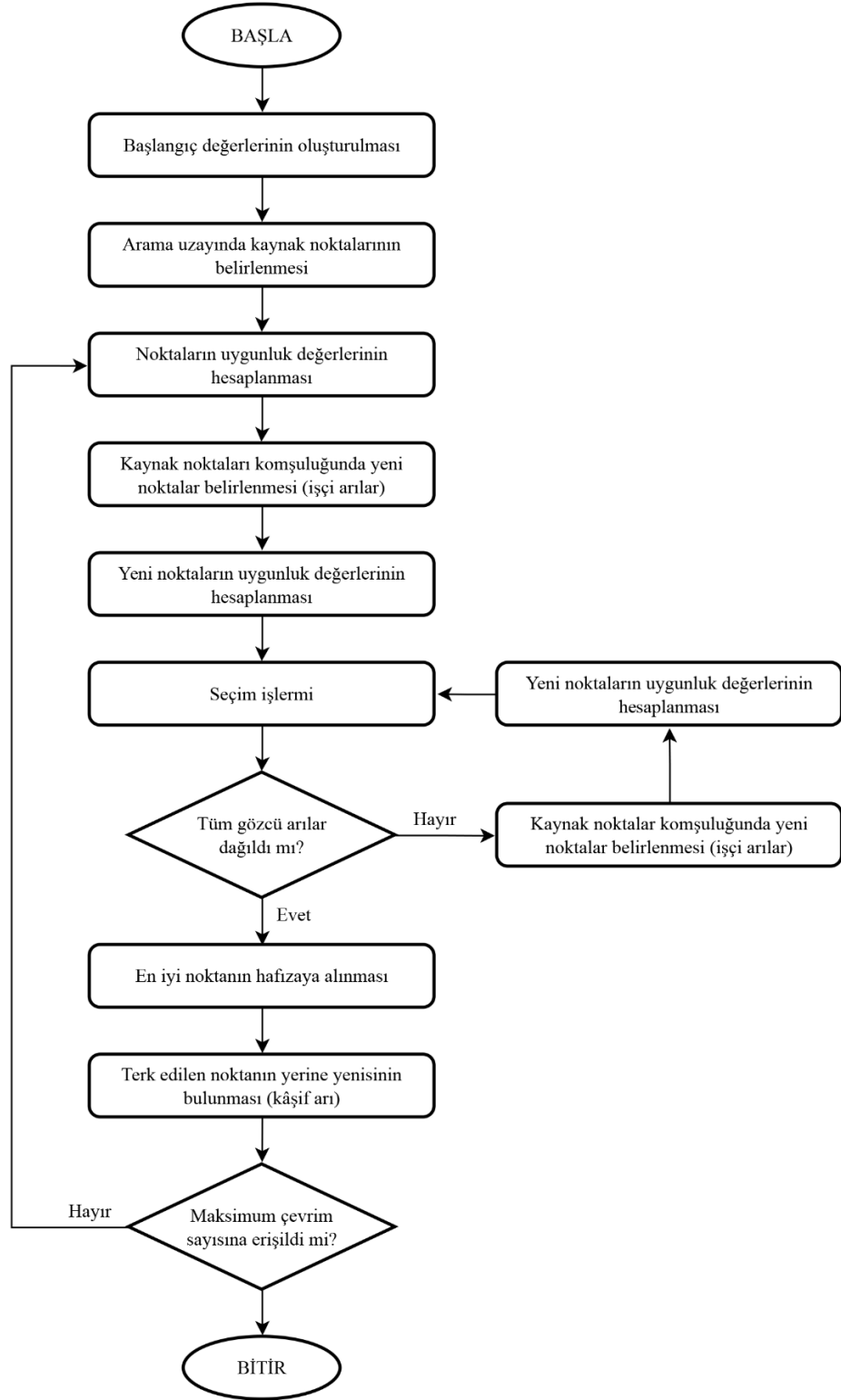
$$r_i = \frac{uygunluk_i}{\sum_{j=1}^{BN} uygunluk_j} \quad (3.80)$$

Denklem (3.80)'de görüleceği üzere uygunluk değeri yüksek olan kaynağın gözcü arı tarafından seçilme ihtimali de yüksektir. Her gözcü arı bir kaynak bölgesine dağılana kadar seçim işlemine devam edilmektedir.

Tüm gözcü arıların kaynaklara dağılmasının ardından, gözcü arılar da işçi arıların yaptığı gibi kaynak bölgesinde Denklem (3.77) ile yeni bir kaynak belirler ve ilgili kaynağın uygunluk değeri hesaplanır. Eğer yeni belirlenen kaynağın uygunluk değeri daha iyi ise yeni kaynak hafızaya alınır. Aksi durumda eski kaynak hafızada yer almaya devam ederken ilgili kaynağa ait geliştirilememe sayacı bir artırılır.

Bir döngünün tamamlanmasının ardından ilgili döngüye en iyi uygunluk değerine sahip kaynak hafızaya alınmaktadır. Geliştirilememe sayacı belirlenen bir değer üstünde olan kaynak ise terk edilir ve ilgili kaynak yerine kâşif arı tarafından Denklem (3.77) ile yeni bir başlangıç kaynağı oluşturulur. Belirlenen durma kriterinin sağlanması durumunda veya maksimum çevrim sayısına ulaşılması durumunda en iyi uygunluk değerine sahip kaynak nihai kaynak olarak belirlenmiş olur.

ABC Algoritması'na ilişkin akış şeması Şekil 3.2 ile verilmiştir.



Şekil 3.2. ABC Algoritması akış şeması

3.4. Sistem ve Optimizasyon Parametreleri

Esnek uzuvlu manipülatörün kontrolünde dinamik denklemlerin oluşturulması ve uygun kontrolcü tasarımının gerçekleştirilmesinden sonra, sisteme ve kontrol yöntemine ilişkin parametrelerin belirlenmesi aşamasına geçilmiştir. Bu kapsamda; indirgenmiş modelin sistemi yeterli doğrulukta temsili, her bir tork parametresinin sistem davranışına etkilerinin gözlemlenmesi ve optimizasyon algoritmasına ilişkin parametre değerlerinin seçimi için MATLAB ortamında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyonun kod yapısı ise EK 6 ile verilmiştir.

Tek uzuvlu esnek manipülatör sisteminin yeterli doğrulukta modellenmesi için, sistemin dinamik davranışını temsil eden indirgenmiş modelinde dikkate alınacak mod sayısı seçimi önemlidir. Bu amaçla, farklı mod sayıları dikkate alınarak simülasyonlar tekrarlanmıştır. Simülasyonlar sonucunda elde edilen uç nokta konum değerleri karşılaştırılmış ve dikkate alınması gereken mod sayısı tespit edilmiştir.

Mod sayısı tespitinin yanı sıra, kontrol amacı ile oluşturulan tork ifadesinde yer alan r_1 , r_2 ve r_3 parametrelerinin alacağı farklı değerlerin sonuçlara etkileri de incelenmiştir. Bu amaçla gerçekleştirilen simülasyonlarda, seçilen bir tork parametresine farklı değerler atanırken, diğer iki parametre sabit tutulmuştur.

Son olarak, ABC Algoritması'na ilişkin parametre değerlerinin belirlenmesi için algoritmaya ait parametrelere atanan farklı değerler ile simülasyonlar tekrarlanmıştır. Farklı uç kütle durumlarında kullanılmak üzere oluşturulan algoritma da bu kısım kapsamında aktarılmıştır.

Simülasyonlarda kullanılan sistem parametreleri Çizelge 3.1 ile gösterilmiştir. Bu parametrelerin seçiminde referans çalışma dikkate alınmıştır. Burada amaç elde edilecek simülasyon sonuçlarının referans çalışma ile karşılaştırılmasını mümkün kılmaktır. Uç kütle değeri çizelgeye eklenmemiş, ilerleyen bölümlerde gerçekleştirilecek ilgili simülasyonlarda uç kütle değerleri ayrıca belirtilmiştir. Gerçekleştirilen tüm simülasyonlarda başlangıç değerleri olarak $\theta(0) = 0$ rad ve $\dot{\theta}(0) = 0$ rad/s alınmıştır.

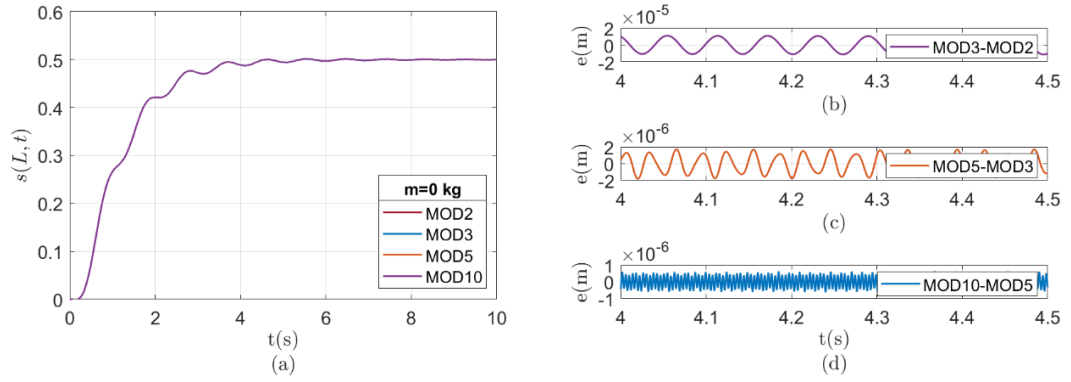
Çizelge 3.1. Sistem parametreleri

| Parametre | Tanım | Değer | Birim |
|-----------|-----------------------------------|-------|-------------------|
| L | Esnek uzuv uzunluğu | 1 | m |
| EI | Eğilme rijitliği | 3 | Nm ² |
| ρ | Esnek uzvun birim uzunluk kütlesi | 1 | kgm ⁻¹ |
| I_h | Bağlantı göbeği ataleti | 0.04 | kgm ² |

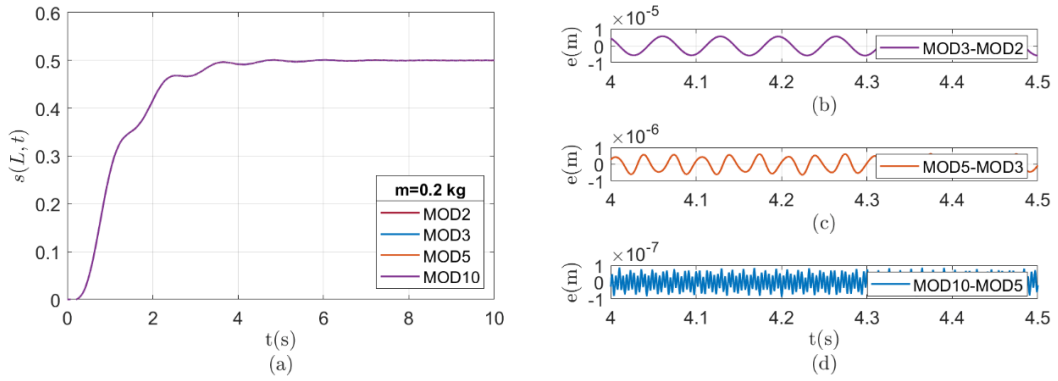
3.4.1. Gerekli mod sayısı seçimi

AMM uygulaması sonucunda sonlu sayıda denklem ile temsil edilen esnek uzuvlu manipülatör için dikkate alınması gereken mod sayısının belirlenmesi amacı ile gerçekleştirilen simülasyonlarda Denklem (3.73) ile tanımlanan tork ifadesi sisteme giriş olarak verilmiştir. Simülasyonlarda karşılaştırılacak mod sayıları 2, 3, 5 ve 10 olarak seçilmiştir. Farklı uç kütle durumlarının da mod sayısı seçimine etkisini gözlemlemek amacıyla simülasyonlar $m = 0$ kg, $m = 0,2$ kg ve $m = 0,5$ kg uç kütle durumları için tekrarlanmıştır. Simülasyonlarda tork ifadesinde yer alan parametreler $r_1 = 4$, $r_2 = 1$ ve $r_3 = 5$ olarak seçilmiştir. Elde edilen grafiklerde mod sayıları MOD2, MOD3, MOD5 ve MOD10 ifadeleri ile temsil edilmiştir.

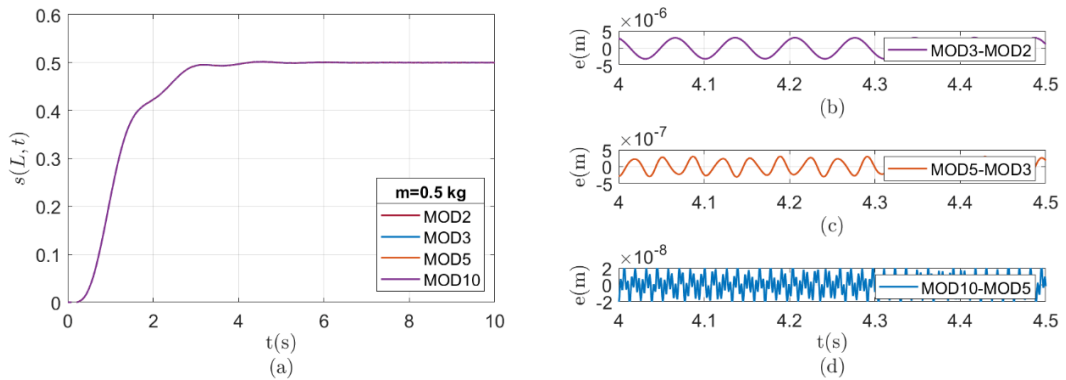
Uç kütlenin olmadığı ($m = 0$ kg) durum için farklı mod sayısına ilişkin $s(L, t)$ uç nokta konum grafikleri Şekil 3.3 ile gösterilmiştir. Uç nokta hareketi incelediğinde seçilen farklı mod sayılarında sonuçların oldukça yakın olduğu görülmüştür. Yaklaşık 5. saniyeden itibaren uzvun uç noktasının hedef konumuna ulaşılmış ve salınım da sona ermiştir. Şekil 3.3a ile verilen uç nokta konum değişimindeki farkların yorumlanabilmesi için farklı mod sayısı seçimleri ile elde edilen konum değerlerinin farkları e ile ifade edilmiş ve Şekil 3.3b, c ve d ile gösterilmiştir. İlgili grafiklerde görüleceği üzere uç kütlenin olmadığı durum için ilk 2 mod yerine ilk 3 mod dikkate alındığında konum değerleri arasındaki fark 10^{-5} m seviyelerinde olmaktadır. İlk 3 mod yerine ilk 5 mod dikkate alındığında konum değerleri arasındaki fark 2×10^{-6} m seviyelerinde olurken, ilk 5 mod yerine ilk 10 mod dikkate alındığında ise bu farkın 10^{-6} m'den daha az olduğu görülmüştür.



Şekil 3.3. Uç kütleinin olmadığı durumda mod sayısı etkileri a) Farklı mod sayısı için uç nokta konumu değişimi b) MOD3 ve MOD2 fark grafiği c) MOD5 ve MOD3 fark grafiği d) MOD10 ve MOD5 fark grafiği



Şekil 3.4. Uç kütleinin $m=0,2$ kg olduğu durumda mod sayısı etkileri a) Farklı mod sayısı için uç nokta konumu değişimi b) MOD3 ve MOD2 fark grafiği c) MOD5 ve MOD3 fark grafiği d) MOD10 ve MOD5 fark grafiği



Şekil 3.5. Uç kütleinin $m=0,5$ kg olduğu durumda mod sayısı etkileri a) Farklı mod sayısı için uç nokta konumu değişimi b) MOD3 ve MOD2 fark grafiği c) MOD5 ve MOD3 fark grafiği d) MOD10 ve MOD5 fark grafiği

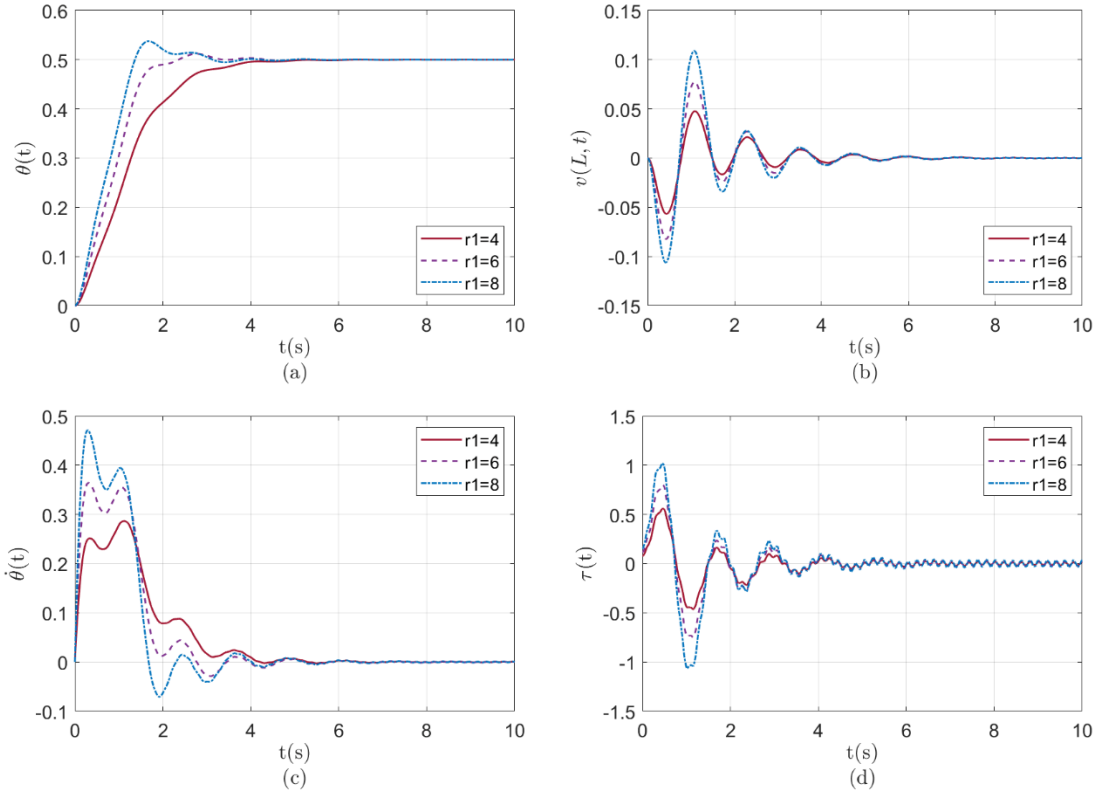
Uç kütlenin $m = 0,2$ kg olması durumunda elde edilen sonuçlar Şekil 3.4 ile gösterilmiştir. Şekil 3.4a'da görüldüğü üzere farklı mod sayıları için uç nokta konumları oldukça yakın değerler almıştır. Şekil 3.4b, c ve d ile verilen fark grafikleri incelendiğinde ise ilk 2 mod ve ilk 3 mod arasındaki farkın 2×10^{-5} m seviyelerinde, ilk 3 mod ile ilk 5 mod arasındaki farkın 2×10^{-6} m seviyelerinde ve ilk 5 mod ile ilk 10 mod arasındaki farkın 1×10^{-7} m seviyelerinden daha düşük değerlerde olduğu görülmüştür. Uç kütlenin olmadığı durum ile kıyaslandığında, uç kütlenin $m = 0,2$ kg olması durumunda, dikkate alınan mod sayısındaki artışın simülasyon sonucuna daha az etki ettiği görülmüştür.

Uç kütlenin $m = 0,5$ kg olması durumuna elde edilen sonuçlar ise Şekil 3.5 ile gösterilmiştir. Şekil 3.5b, c ve d fark grafikleri incelendiğinde ilk 3 mod ile ilk 2 mod arasındaki farkın 5×10^{-6} m, ilk 5 mod ile ilk 3 mod arasındaki farkın 5×10^{-7} m, ilk 10 mod ile ilk 5 mod arasındaki farkın ise 2×10^{-8} m seviyelerinde olduğu görülmüştür. İlgili fark sonuçları, $m = 0,2$ kg uç kütle durumu sonuçları ile karşılaştırıldığında ise artan mod sayısının etkisinin daha az olduğu görülmüştür.

Gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda, uç kütlenin olmadığı veya farklı uç kütle durumlarında sistemin temsil edilmesi için ilk 3 modun dikkate alınmasının yeterli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

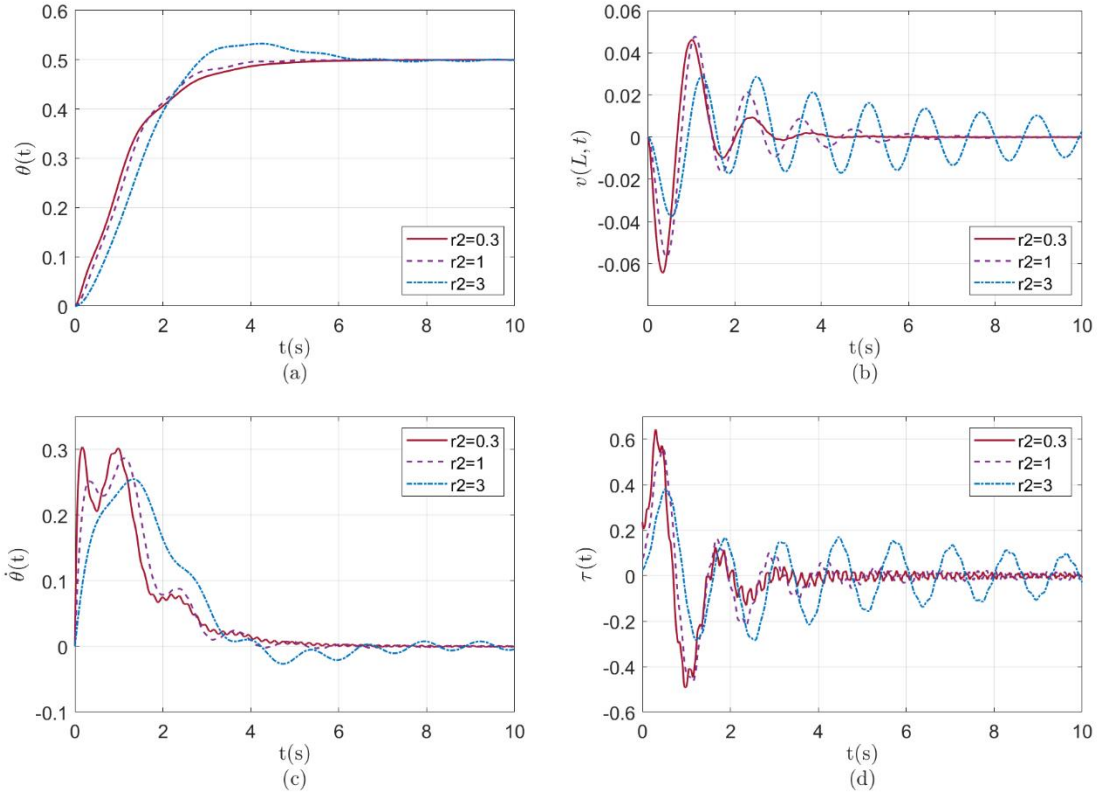
3.4.2. Tork parametreleri

Denklem (3.73) ile tanımlanan tork ifadesi sistemin tek kontrol girişini oluşturmakta ve r_1 , r_2 ve r_3 olmak üzere üç farklı parametre barındırmaktadır. İlgili parametrelerinin farklı değerler alması durumunda açısız konum, açısız hız, uç nokta salınımları ile simülasyon sırasında kontrol girişi olan tork değerlerinin değişimleri incelenmiştir. Böylece, tork parametrelerinin ilgili sonuçlara etkileri değerlendirilmiştir.



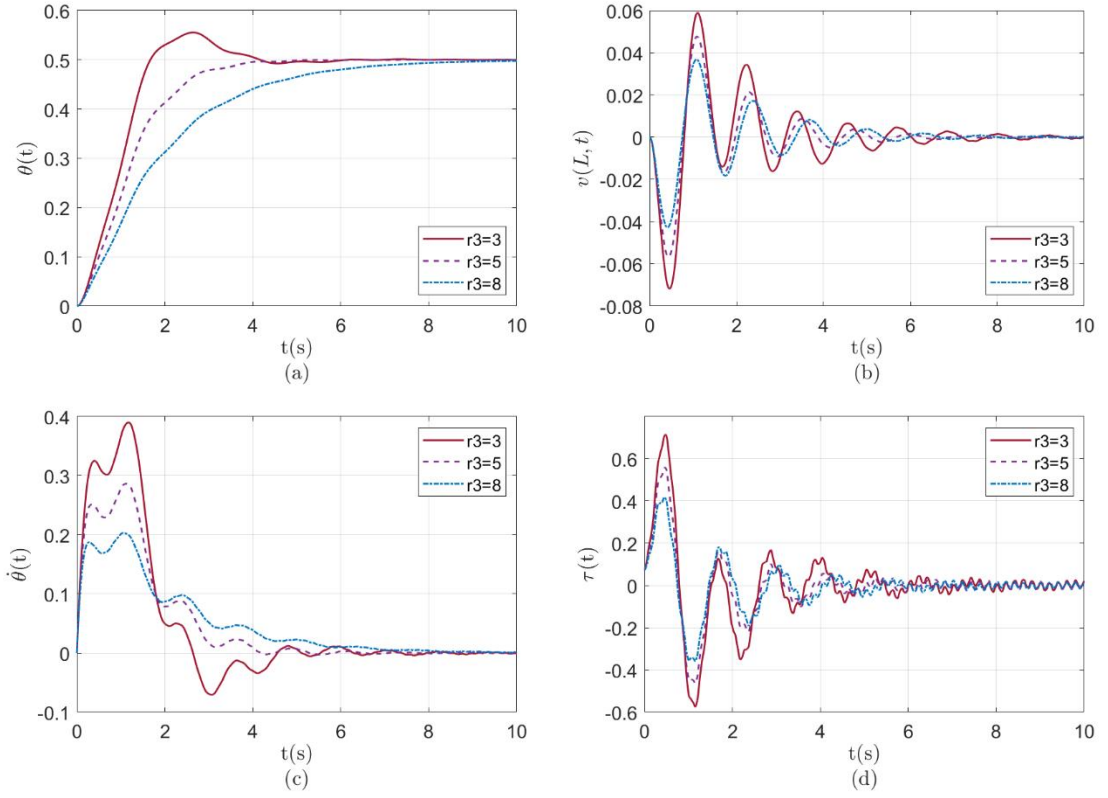
Şekil 3.6. r_1 parametresi değişiminin sonuçlara etkisi **a)** Açısal konum grafikleri, **b)** Açısal hız grafikleri **c)** Uç nokta salınım grafikleri **d)** Tork grafikleri

İlk simülasyon, r_1 parametresinin etkilerinin incelenmesi için gerçekleştirilmiştir. Diğer parametrelere $r_2 = 1$ ve $r_3 = 5$ sabit değerleri verilmiştir. Simülasyon sonuç grafikleri Şekil 3.6 ile verilmiştir. Şekil 3.6a incelendiğinde, artan r_1 değerleri için esnek uzvun amaçlanan açısal konuma ulaşma süresinin azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte, yine artan r_1 değerlerinin açısal konumda aşma meydana gelmesine sebep olabileceği aynı grafik üzerinde görülmüştür. Uç noktada meydana gelen salınımlar Şekil 3.6b ile verilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere, artan r_1 değerleri ile hareket esnasında meydana gelen maksimum salınım değerlerinde de artış meydana gelmiştir. Şekil 3.6c incelendiğinde artan r_1 değerleri sonucunda daha büyük açısal hız değerleri elde edildiği görülmüştür. Şekil 3.6d’de ise yine r_1 parametre değerindeki artışla paralel olarak ihtiyaç duyulan maksimum tork değerinde de artış görülmüştür.



Şekil 3.7. r_2 parametresi değişiminin sonuçlara etkisi **a)** Açısal konum grafikleri **b)** Açısal hız grafikleri **c)** Uç nokta salınım grafikleri **d)** Tork grafikleri

İkinci simülasyonda r_2 parametresi etkisi incelenmiştir. Sabit parametreler ise $r_1 = 4$ ve $r_3 = 5$ alınmıştır. Denklem (3.73)'te görüleceği üzere r_2 parametresi titreşim sönümlenmesinde etkin olan parametredir. Artan r_2 değerleri için denklemde yer alan k terimi katsayısı değeri azalmaktadır. Bu nedenle Şekil 3.7b'de görüleceği üzere r_2 değeri arttıkça titreşim sönümü etkisi azalmıştır. $r_2 = 3$ değeri için grafik incelendiğinde sönümlenmenin oldukça yavaş gerçekleştiği görülmektedir. Buna bağlı olarak da Şekil 3.7d'de görüleceği üzere $r_2 = 3$ değeri için salınım devam ettiği müddetçe tork üretilmeye devam etmiştir. Şekil 3.7a incelendiğinde artan r_2 değerinin son konuma ulaşma süresini etkilemediği ancak aşma olayına sebep olduğu görülmüştür. r_2 değerindeki artış, Şekil 3.7c'de görüleceği üzere hareket esnasında ulaşılan maksimum açısal hız değerinde azalmaya sebep olurken, salınım hareketinde olduğu gibi açısal hız değerinin de sıfıra ulaşma süresini belirgin şekilde artırmıştır.



Şekil 3.8. r_3 parametresi değişiminin sonuçlara etkisi **a)** Açısal konum grafikleri **b)** Açısal hız grafikleri **c)** Uç nokta salınım grafikleri **d)** Tork grafikleri

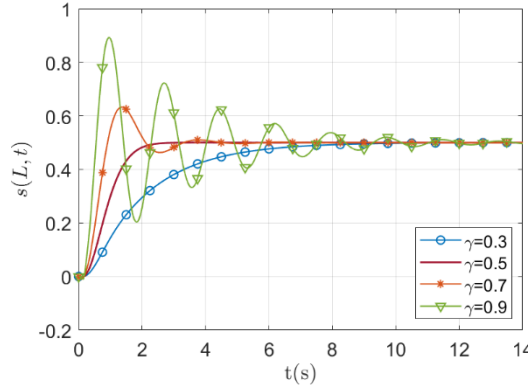
Son olarak, r_3 parametresi etkileri incelenmiştir. Sabit parametrelerin değerleri $r_1 = 4$ ve $r_2 = 1$ olarak belirlenmiştir. Şekil 3.8a’da görüleceği üzere artan r_3 değerleri ile aşma engellenmiştir. Ancak r_3 değerindeki aşırı artış hedeflenen konuma ulaşma süresini de artırmıştır. Farklı r_3 değerine karşılık açısal hız değerlerinde meydana gelen değişimleri gösteren Şekil 3.8c incelendiğinde r_3 değerindeki artışın açısal hız değerlerinde azalma etkisi gösterdiği görülmüştür. Benzer şekilde Şekil 3.8b ve Şekil 3.8d grafiklerinde görüleceği üzere meydana gelen maksimum salınım ve ihtiyaç duyulan maksimum tork değerleri de artan r_3 değerleri için azalma eğilimi göstermiştir.

Gerçekleştirilen simülasyonlar göstermiştir ki, tork ifadesinde yer alan üç parametre de sonuçları farklı şekillerde etkilemektedir. Bu sebeple esnek uzuvlu manipülatörün kontrolü sırasında üç parametre de eş zamanlı olarak optimizasyon sürecine dahil edilmiş, böylece mümkün olan en geniş arama uzayı oluşturulmuştur. Böylelikle en uygun tork değerinin elde edilmesi amaçlanmıştır.

3.4.3. Optimizasyon parametrelerinin seçimi

Denklem (3.75) ile tanımlanan amaç fonksiyonunda yer alan ağırlık katsayısı γ ve ABC Algoritması'na ilişkin parametrelerin belirlenmesi, optimizasyon süresinin kısaltılması ve hesaplama maliyetinin düşürülmesi için önemli bir adımdır. Bu amaçla başlangıç olarak sistemin uç kütle değerinin $m = 0,2$ kg olduğu durum için uygun ağırlık katsayısı γ ve ABC Algoritması parametreleri belirlenmiştir. Sonraki adımda, ağırlık katsayısı γ 'nın değişimini içeren bir algoritma geliştirilerek farklı uç kütle durumları için yöntem genişletilmiştir.

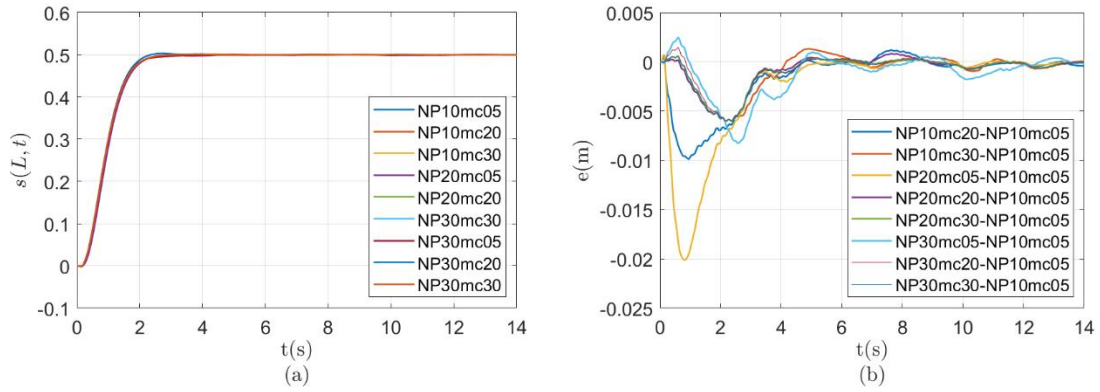
Başlangıç olarak dikkate alınan $m = 0,2$ kg durumu için uygun γ değerinin belirlenmesi amacı ile farklı γ değerleri kullanılarak simülasyonlar tekrarlanmıştır. Simülasyonlarda optimize edilecek tork parametreleri r_1, r_2 ve r_3 'ün alt ve üst sınırları $0 \leq r_i \leq 5$ olarak seçilmiştir. ABC Algoritması için koloni sayısı $NP = 30$ ve maksimum çevrim sayısı $mc = 30$ olarak seçilmiştir. Bu durumda, esnek uzvun uç noktasına ilişkin konum grafikleri Şekil 3.9 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Uç kütle değerinin $m=0,2$ kg olduğu durumda farklı γ değerleri için uç nokta konum değişimleri

Simülasyonlar sonucunda elde edilen farklı γ değerlerine ilişkin sonuçlar incelendiğinde mevcut uç kütle durumu için en uygun katsayı değerinin $\gamma = 0,5$ olduğu görülmüştür. Katsayının daha büyük değerleri için aşma ve salınımlar gözlemlenirken, daha küçük değerleri için ise son konuma ulaşma süresinde artma olduğu görülmüştür.

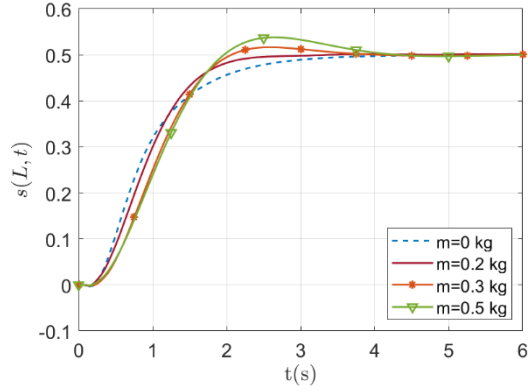
Amaç fonksiyonunda yer alan ağırlık katsayısı γ 'nın belirlenmesinin ardından, koloni sayısı ve çevrim sayısı için yeterli büyüklüğün belirlenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla NP değerleri 10, 20 ve 30 olarak, mc değerleri 5, 10 ve 30 olarak seçilmiştir. Ardından, bu değerlerin tüm kombinasyonları ile dokuz farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonucu elde edilen uç nokta konum grafikleri Şekil 3.10a ile gösterilmiştir. Sonuçların birbirinden farklılığının daha yakından incelenebilmesi için en düşük parametre değerleri olan $NP = 10$ ve $mc = 5$ durumuna ilişkin simülasyon sonucu ile diğer simülasyonların sonuçlarının fark grafikleri Şekil 3.10b ile gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Optimizasyon parametreleri etkisi **a)** Farklı NP ve mc değerleri için simülasyon sonuçları **b)** Farklı simülasyon sonuçlarının $NP=10$ ve $mc=5$ durumu ile karşılaştırması

Gerçekleştirilen simülasyonlara ilişkin elde edilen grafikler incelendiğinde optimizasyon parametrelerinin en düşük değerleri olan $NP = 10$ ve $mc = 5$ için elde edilen sonuçların parametre değerlerinin daha büyük seçilmesi durumları ile oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu nedenle optimizasyon parametreleri $NP = 10$ ve $mc = 5$ olarak tercih edilmiştir. Böylelikle çevrim sayısının yalnızca 5 döngüde tutulması ile optimizasyon süreci kısaltılmış, ayrıca koloni sayısının da 10 olması durumu ile hesaplama maliyeti de mevcut seçenekler arasında minimum değerde tutulmuştur.

Farklı uç kütle durumları için bir algoritma geliştirilmeden önce, belirlenen optimizasyon parametreleri kullanılarak, $m = 0$ kg, $m = 0,3$ kg, ve $m = 0,5$ kg durumları için simülasyonlar tekrarlanmıştır.



Şekil 3.11. Farklı uç kütle durumlarında elde edilen uç nokta konumları

Simülasyonlar sonucunda elde edilen uç nokta konumlarının grafikleri Şekil 3.11 ile gösterilmiştir. Karşılaştırma amacı ile grafikte ayrıca $m = 0,2$ kg durumuna ilişkin konum değerlerine de yer verilmiştir.

Simülasyon sonuçları incelendiğinde, uç kütle olmadığı durumda aşma gerçekleşmediği görülmüştür. Ancak, uç kütle 0,2 kg olduğu durumda yaklaşık 2,5 s olan denge durumuna ulaşma süresi, uç kütle olmadığı durumda yaklaşık 4 s olarak elde edilmiştir. Algoritma oluşturulurken, uç kütle olmadığı durumda, aşma olayının gerçekleşmesine müsaade etmeden denge durumuna ulaşma süresi azaltılması amaç olarak belirlenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, uç kütle olmadığı durumda, amaç fonksiyonunda yer alan ağırlık katsayısı $\gamma = 0,6$ değerine yükseltilmiş ve böylece amaç fonksiyonunda konum farkının etkisi artırılmış ve daha esnek uzvun daha yüksek açılma hızlarına ulaşması sağlanmıştır.

Uç kütle 0,2 kg değerinden daha büyük değerler aldığı duruma ilişkin sonuçlar incelendiğinde ise aşma gerçekleştiği, ayrıca artan uç kütle değerleri ile aşmanın da arttığı görülmüştür. Gerçekleşen aşmaların bir sonucu olarak da artan kütle değerleri ile denge durumuna ulaşma süreleri de artış göstermiştir. Bu nedenle algoritma oluşturulurken uç kütle 0,2 kg değerinden daha büyük değere sahip olduğu durumlarda aşmanın engellenmesine yönelik bir düzenleme yapılması amaç olarak belirlenmiştir. Bu amaç doğrultusunda uç kütle 0,2 kg değerinden daha büyük olduğu durumlarda hareketin tamamlanma oranına göre iki farklı ağırlık katsayısı kullanılmıştır. İlgili oran boyutsuz olacak şekilde Denklem (3.81) ile oluşturulmuştur.

$$e_p(t) = \frac{|\theta_d - \theta(t)|}{\theta_d} \quad (3.81)$$

Denklem (3.81) yardımı ile esnek uzuv hedef konuma belirli bir oranda yaklaştığında ağırlık katsayısı γ değeri azaltılmıştır. Bu sayede, amaç fonksiyonunda konum farkının etkisi de azaltılmış, bununla birlikte toplam sistem enerjisinin etkisi artırılmıştır. ABC algoritması ile optimizasyon sürecinde sistem enerjisini minimize etme amacı etkinliğinin artması sayesinde uç nokta salınımı sorunu elimine edilmiştir. Artan kütle değerleri için ağırlık katsayısının hem değeri daha fazla azaltılmış hem de bu azaltma işleminin gerçekleşeceği zaman öne çekilmiştir. Oluşturulan algoritmanın yapısı Şekil 3.12 ile gösterilmiştir.

```

Girdi: uç kütle ( $m$ ) ve karşılaştırma parametresi ( $e_p$ )
if  $m = 0$ 
     $\gamma = 0,6$ 
else if  $m = 0,2$ 
     $\gamma = 0,5$ 
else if  $m = 0,3$ 
    if  $e_p \leq 0,2$ 
         $\gamma = 0,35$ 
    else
         $\gamma = 0,5$ 
else if  $m = 0,4$ 
    if  $e_p \leq 0,35$ 
         $\gamma = 0,3$ 
    else
         $\gamma = 0,5$ 
else if  $m = 0,5$ 
    if  $e_p \leq 0,4$ 
         $\gamma = 0,2$ 
    else
         $\gamma = 0,5$ 

```

Şekil 3.12. γ değeri seçim algoritması

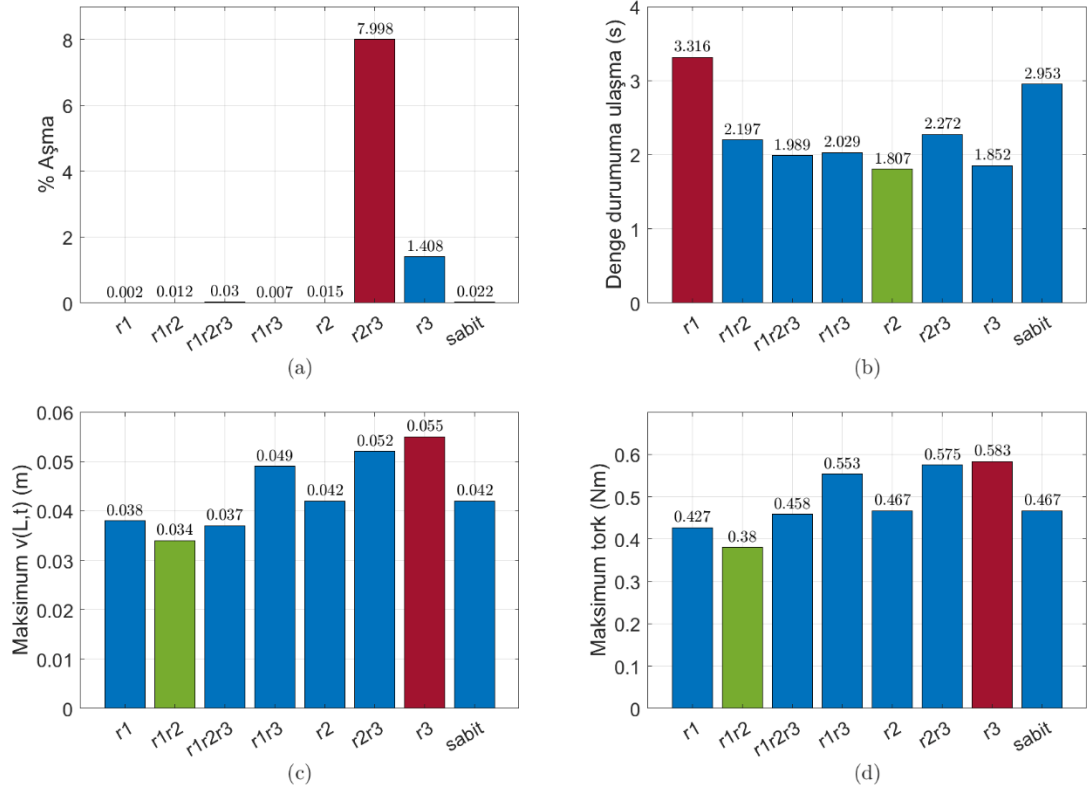
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Geliştirilen kontrol yönteminin performans incelenmesi için çeşitli karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla ilk olarak, tork ifadesinde yer alan parametrelerin farklı kombinasyonları ile simülasyonlar tekrarlanmıştır. İkinci olarak katsayıları ABC Algoritması ile optimize edilmiş klasik bir PD kontrolcü ile sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ardından, referans çalışma ile performans karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. Son olarak, farklı uç kütle değerleri ile simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve Şekil 3.11 ile verilen algoritmanın performansı incelenmiştir. Tüm simülasyonlarda EK 6 ile kod yapısı verilen algoritma kullanılmıştır.

4.1 Tork Parametrelerinin Farklı Kombinasyonlardaki Sonuçların Karşılaştırılması

Denklem (3.73) ile önerilen tork ifadesindeki üç parametrenin tüm kombinasyonları ile optimize edildiği ve üç parametrenin de uygun sabit değerler aldığı toplam sekiz simülasyon farklı uç kütle değerleri için gerçekleştirilmiştir. Yüzde aşma değerleri, kalıcı duruma ulaşma süreleri, maksimum salınım değerleri ve ihtiyaç duyulan maksimum tork değerleri üzerinden sonuçlar yorumlanmıştır.

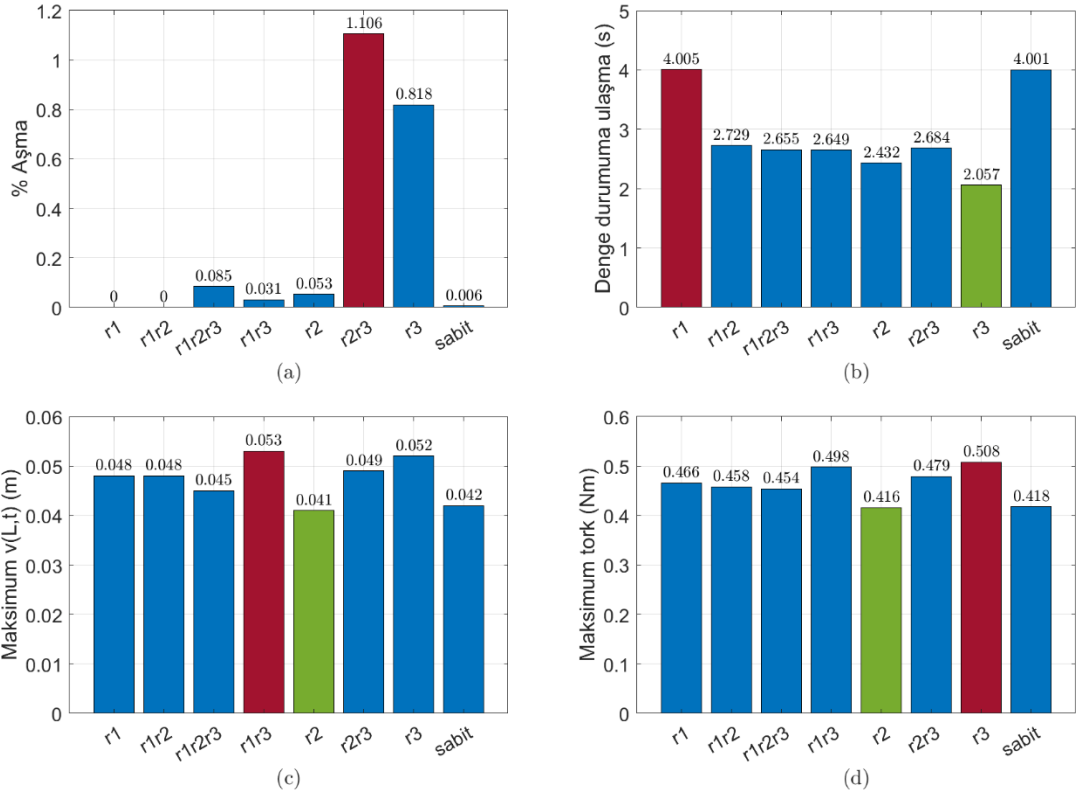
Şekil 4.1 ile verilen grafik uç kütle olmadığı duruma ilişkin sonuç karşılaştırmalarını içermektedir. Yüzde aşma değerleri bakımından en kötü sonuçlar %7,998 ve %1,408 ile sırasıyla r_2 ve r_3 parametrelerinin bir arada optimize edildiği ve r_3 parametresinin tek başına optimize edildiği simülasyonlarda elde edilmiştir. Kalıcı duruma ulaşma süreleri incelendiğinde en iyi performans 1,807 s ile r_2 parametresinin tek başına optimize edilmesi durumunda, en kötü performans ise 3,316 s ile r_1 parametresinin tek başına optimize edilmesi durumunda görülmüştür. Uç nokta salınımları incelendiğinde, r_3 parametresinin tek başına optimize edildiği durum 0,055 m maksimum salınım değeri ile en kötü durumu, r_1 ve r_2 parametrelerinin birlikte optimizasyonu 0,034 m salınım değeri ile en düşük salınımlı durumu oluşturmuştur. Tork değerleri incelendiğinde, en fazla tork ihtiyacı 0,583 Nm ile r_3 parametresinin tek başına optimizasyonu durumunda ortaya çıkmıştır. r_1 ve r_2 parametrelerinin birlikte optimizasyonu ise 0,38 Nm değeri ile en düşük tork değerine ihtiyaç duyulan durum olmuştur.



Şekil 4.1. Uç kütleinin olmadığı durumda parametre optimizasyon karşılaştırmaları **a)** Yüzde aşma değerleri **b)** Kalıcı duruma ulaşma süreleri (s) **c)** Maksimum uç nokta salınım değerleri (m) **d)** Maksimum tork değerleri (Nm)

Tüm grafikler bir arada değerlendirildiğinde, belirlenen dört ihtiyacın da gözetildiği durumda r_1 ve r_2 'nin bir arada optimizasyonu veya r_1 , r_2 ve r_3 parametrelerinin tümünün birden optimize edilmesi optimum performans için uygun tercihler olarak belirlenmiştir.

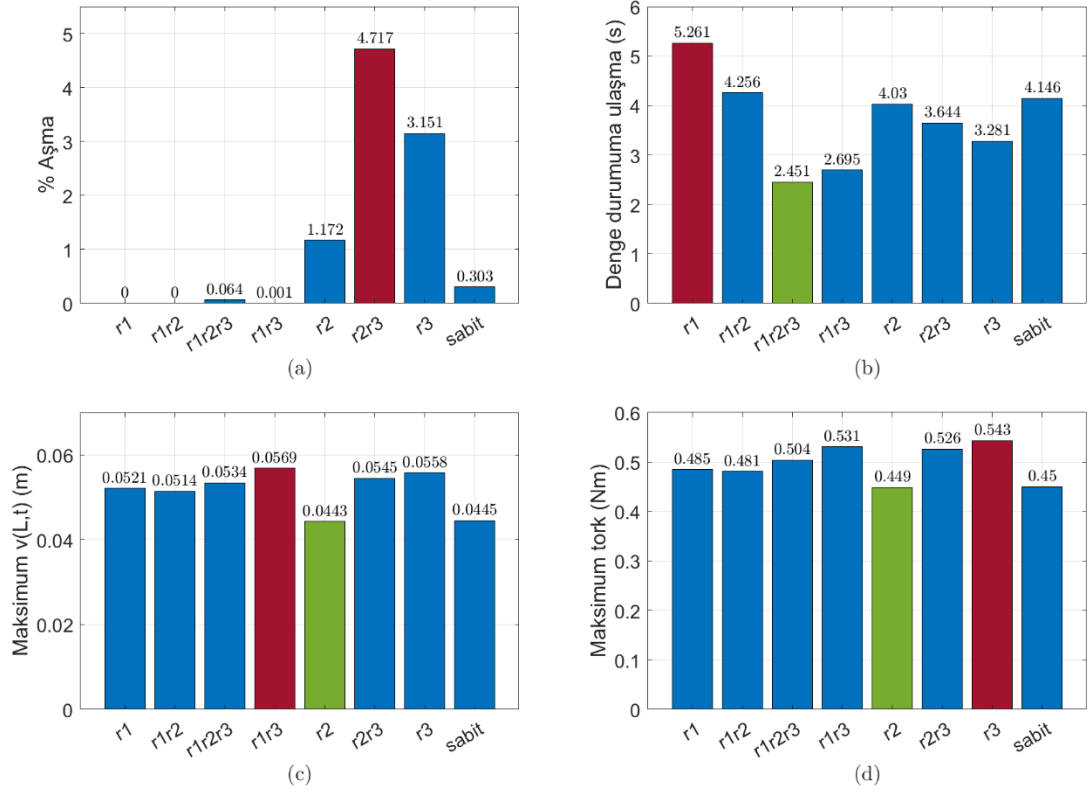
Uç kütleinin $m = 0,2$ kg olduğu duruma ilişkin sonuçlar Şekil 4.2 ile gösterilmiştir. Meydana gelen aşma yüzdeleri bakımında uç kütleinin olmadığı duruma benzer şekilde r_1 ve r_2 parametrelerinin birlikte optimizasyonu %1,106 aşma oranı ile en kötü performansı göstermiştir. Bu oranı %0,818 ile r_3 parametresinin tek başına optimize edildiği durum takip etmiştir. Kalıcı duruma ulaşma süreleri incelendiğinde, en kötü performans 4,005 s ile r_1 parametresi optimizasyonunda, en iyi performans ise r_3 parametresi optimizasyonunda görülmüştür. Uç nokta salınımları karşılaştırıldığında, 0,053 m değeri ile r_1 ve r_3 parametrelerinin birlikte optimizasyonu en kötü, r_2 parametresinin tek başına optimize edildiği durum ise 0,041 m değeri ile en iyi performansı göstermiştir.



Şekil 4.2. Uç kütleinin $m=0,2$ kg olduğu durumda parametre optimizasyon karşılaştırmaları **a)** Yüzde aşma değerleri **b)** Kalıcı duruma ulaşma süreleri (s) **c)** Maksimum uç nokta salınım değerleri (m) **d)** Maksimum tork değerleri (Nm)

Maksimum tork değeri incelendiğinde ise 0,508 Nm ile r_3 parametresi optimizasyonunda en fazla tork değeri gerekli olurken, 0,416 Nm ile r_2 parametresi optimizasyonu sonucunda en az tork değeri ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

Grafiklerin birlikte değerlendirilmesi durumunda $m = 0,2$ için r_2 parametresinin tek başına optimize edilmesinin uygun yöntem olarak görülmüştür. Bu tercihe ek olarak tüm parametrelerin optimizasyonu da r_2 parametre optimizasyonuna göre oldukça yakın sonuçlar vermektedir.

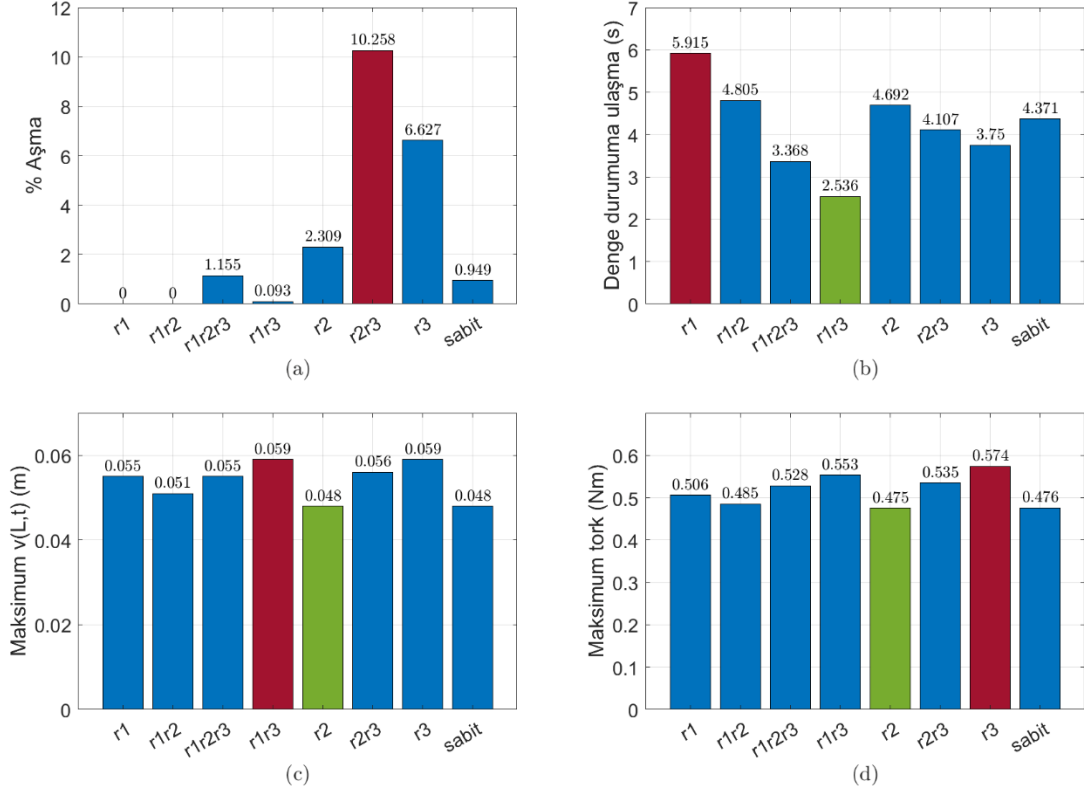


Şekil 4.3. Uç kütleinin $m=0,3$ kg olduğu durumda parametre optimizasyon karşılaştırmaları **a)** Yüzde aşma değerleri **b)** Kalıcı duruma ulaşma süreleri (s) **c)** Maksimum uç nokta salınım değerleri (m) **d)** Maksimum tork değerleri (Nm)

Şekil 4.3 ile uç kütleinin $m = 0,3$ kg olduğu duruma ilişkin sonuçlar gösterilmiştir. Yüzde aşmalar incelendiğinde %4,717 ile r_2 ve r_3 parametrelerinin birlikte optimizasyonu en fazla aşmanın görüldüğü durum olmuştur. Bu durumu %3,151 ile r_3 parametresinin tek başına optimize edildiği durum takip etmektedir. Kalıcı duruma ulaşma süreleri incelendiğinde ise tüm parametrelerin optimize edildiği durumda 2,451 s ile en iyi değer elde edilmiştir. Kalıcı duruma ulaşma süreleri bakımından en kötü değer ise 5,261 s ile r_1 parametresinin tek başına optimize edilmesi ile elde edilmiştir. İhtiyaç duyulan tork değerleri incelendiğinde ise en fazla tork ihtiyacının r_3 parametresinin tek başına optimize edildiği durumda ortaya çıktığı görülmüştür. r_2 parametresinin tek başına optimize edildiği durum ise en az tork değerine ihtiyaç duyulan durum olmuştur.

Grafikler bir arada değerlendirildiğinde ise r_2 parametresinin en düşük salınım değerini sağlaması ve minimum tork ihtiyacına gereksinim duymasına karşın kalıcı duruma ulaşma süresi açısından 8 simülasyon arasında 5. sırada yer aldığı ve %1,172 aşma ile en

kötü 3. simülasyon olduğu görülmüştür. Tüm parametrelerin birlikte optimizasyonu yalnızca kalıcı duruma ulaşma süresi bakımından en iyi performansı göstermekle birlikte, diğer karşılaştırmalarda da ortalama veya ortalamanın üstünde bir performans göstermiştir.

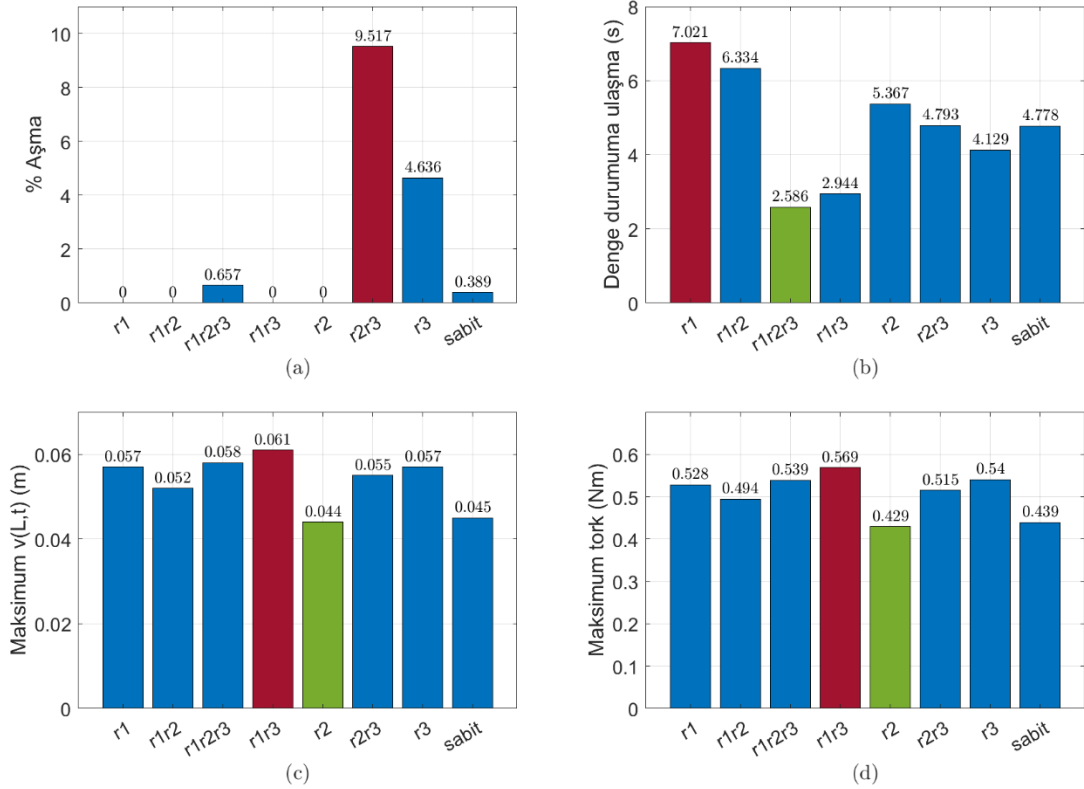


Şekil 4.4. Uç kütleinin $m=0,4$ kg olduğu durumda parametre optimizasyon karşılaştırmaları **a)** Yüzde aşma değerleri **b)** Kalıcı duruma ulaşma süreleri (s) **c)** Maksimum uç nokta salınım değerleri (m) **d)** Maksimum tork değerleri (Nm)

Şekil 4.4 ile uç kütleinin $m = 0,4$ kg olduğu duruma ilişkin sonuçlar gösterilmiştir. Yüzde aşmalar incelendiğinde en kötü performansların %10,258 ile r_2 ve r_3 parametrelerin birlikte optimize edildiği durum ile %6,627 ile yalnızca r_3 parametresinin optimize edildiği durumlarda gerçekleştiği görülmüştür. En kötü 3. sırada ise r_2 parametresinin tek başına optimize edildiği durum yer almaktadır. Kalıcı duruma ulaşma süresinde ise r_1 ve r_3 parametrelerinin birlikte optimize edildiği durum 2,536 s ile en iyi performansı gösterirken yalnızca r_1 parametresi optimizasyonu 5,915 s ile en kötü performansı göstermiştir. r_1 ve r_3 parametreleri kalıcı duruma ulaşma süresinde gösterdiği performansa karşın maksimum uç nokta salınımlarında 0,059 s değeri ile en kötü

performansı göstermiştir. Maksimum uç nokta salınımı en düşük olan simülasyon ise r_2 parametresinin tek başına optimize edildiği durum olmuştur. Tork değerleri açısından sonuçlar değerlendirildiğinde ise r_2 parametresi optimizasyonu sonucunda ihtiyaç duyulan maksimum tork değeri 0,475 Nm ile diğer simülasyonlar arasındaki en düşük değer olmuştur. En yüksek tork değeri gereksinimi ise 0,574 Nm ile r_3 parametresinin tek başına optimize edilmesi durumunda ortaya çıkmıştır.

Grafikler bir arada değerlendirildiğinde, kalıcı duruma ulaşma süresinden taviz verilmesi halinde r_1 ve r_2 parametrelerinin birlikte optimizasyonu en uygun tercih olacaktır. Kalıcı duruma ulaşma süresi de dikkate alındığında tüm parametrelerin birlikte optimize edildiği durum optimum bir performans göstermiştir.



Şekil 4.5. Uç kütle için $m=0,5$ kg olduğu durumda parametre optimizasyon karşılaştırmaları, **a)** Yüzde aşma değerleri **b)** Kalıcı duruma ulaşma süreleri (s) **c)** Maksimum uç nokta salınım değerleri (m) **d)** Maksimum tork değerleri (Nm)

Son olarak Şekil 4.5 ile uç kütle için $m = 0,5$ kg olduğu duruma ilişkin sonuçlar gösterilmiştir. Yüzde aşma değerleri incelendiğinde, diğer uç kütle değerlerinde olduğu

gibi r_2 ve r_3 parametrelerin birlikte optimizasyonunun en kötü performansı gösterdiği ve r_3 parametresi optimizasyonunun en kötü ikinci performansı gösterdiği görülmüştür. Kalıcı duruma ulaşma süreleri incelendiğinde ise 2,586 s ile tüm parametrelerin birlikte optimize edildiği durumda en iyi performans elde edilmiştir. En kötü performans ise 7,021 s ile yalnızca r_1 parametresi optimizasyonunda elde edilmiştir. Maksimum salınımlar incelendiğinde en düşük salınımın 0,044 s ile yalnızca r_2 parametresi optimize edildiği durumda elde edildiği görülmüştür. Maksimum uç nokta salınım değeri en yüksek olan simülasyon ise 0,061 s ile r_1 ve r_3 parametrelerin birlikte optimizasyonu olmuştur. Hareket sırasında ihtiyaç duyulan maksimum tork değeri karşılaştırması sonucunda ise en düşük tork ihtiyacı 0,429 Nm ile r_2 parametresi optimizasyonu ile ortaya çıkarken, en yüksek tork ihtiyacı r_1 ve r_3 parametrelerin birlikte optimizasyonu ile ortaya çıkmıştır.

Grafikler bir arada değerlendirildiğinde her amaç için en iyi sonucu vermemekle birlikte optimum performans için tüm parametrelerin birlikte optimize edildiği durum uygun bir tercih olarak görülmüştür. Yalnızca r_2 parametresinin optimize edildiği durum da uygun bir tercih olmakla birlikte, kalıcı duruma ulaşma süresinin 5,367 s olması sebebi ile tüm parametrelerin birlikte optimize edildiği duruma göre yaklaşık 2 kat kalıcı duruma ulaşma süresine sahip olması dezavantajını içermektedir.

Farklı uç kütleler için gerçekleştirilen tüm simülasyonlar bir arada değerlendirildiğinde r_2 parametresinin en uygun sonuçların elde edilmesi için önemli bir parametre olduğu görülmüştür. Denklem (3.73) ile önerilen tork ifadesi incelendiğinde, ifadede yer alan tüm katsayıların r_2 parametresini barındırdığı görülmektedir. Bu durumun sonucu olarak r_2 parametresinin değiştirilmesi ile tüm katsayılar da değişmektedir. Ancak yine grafikler incelendiğinde r_2 parametresinin değişiminin her yükleme durumunda yeterli olmadığı da görülmüştür. Uç kütleinin olmadığı ve $m = 0,2$ kg olduğu durumlarda alternatifler arasında en iyi performanslardan birini gösterirken, uç kütleinin $m = 0,3$ kg ve üzeri değerlerinde yalnızca r_2 parametresinin optimize edilmesi ile özellikle kalıcı duruma ulaşma süreleri açısından performans kayıpları görülmüştür. Bunun sonucunda farklı kütle durumları gözetilerek, kontrol için optimum tercih tüm parametrelerin bir arada optimize edildiği durum olarak seçilmiştir.

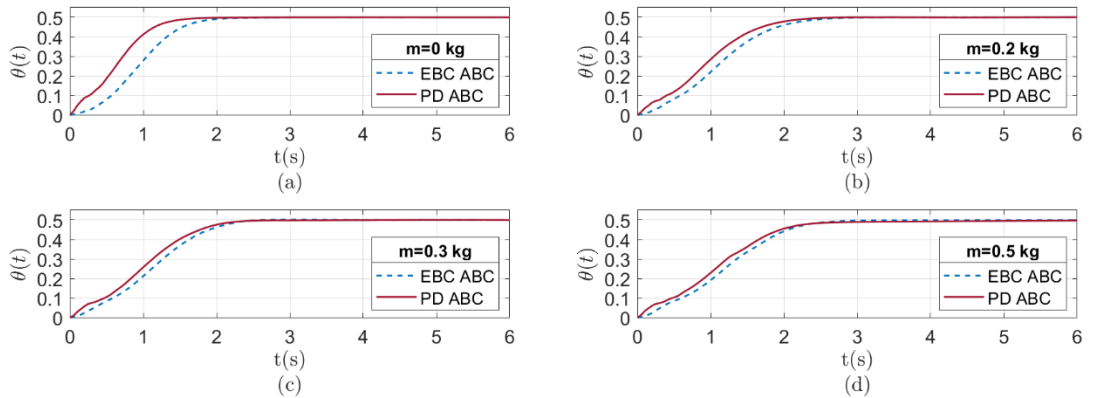
4.2. PD Kontrolcü ile Karşılaştırma

Denklem (3.73) ile önerilen tork ifadesinin PD kontrolcüye benzerliği dikkat çekmektedir. Bu nedenle simülasyon sonuçları PD kontrolcü kullanılan bir sistemle karşılaştırılmıştır. Anlamlı bir karşılaştırma için PD kontrolcünün parametreleri de ABC Algoritması ile optimize edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan kontrolcü, tasarımı sistemin toplam enerjisine dayalı (Energy Based Controller-Enerji Temelli Kontrolcü) olarak geliştirildiği ve parametreleri ABC Algoritması ile optimize edildiği için yapılan karşılaştırmalarda EBC ABC kısaltması ile tanımlanmıştır. Katsayıları ABC Algoritması ile optimize edilen PD kontrolcü ise PD ABC olarak adlandırılmıştır. Uygun bir performans karşılaştırmasının gerçekleştirilmesi amacı ile klasik PD kontrolcüsü katsayılarının optimizasyonunda da Denklem (3.75) ile verilen amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Klasik PD kontrolcünün yapısı ise Denklem 4.1 ile gösterilmiştir.

$$\tau(t) = k_p(\theta_d - \theta(t)) - k_d(\dot{\theta}(t)) \quad (4.1)$$

Simülasyonlar uç kütlelenin olmadığı durum ile uç kütlelenin $m = 0,2$ kg ve $m = 0,5$ kg değerlerinde olduğu durumlar için gerçekleştirilmiştir.

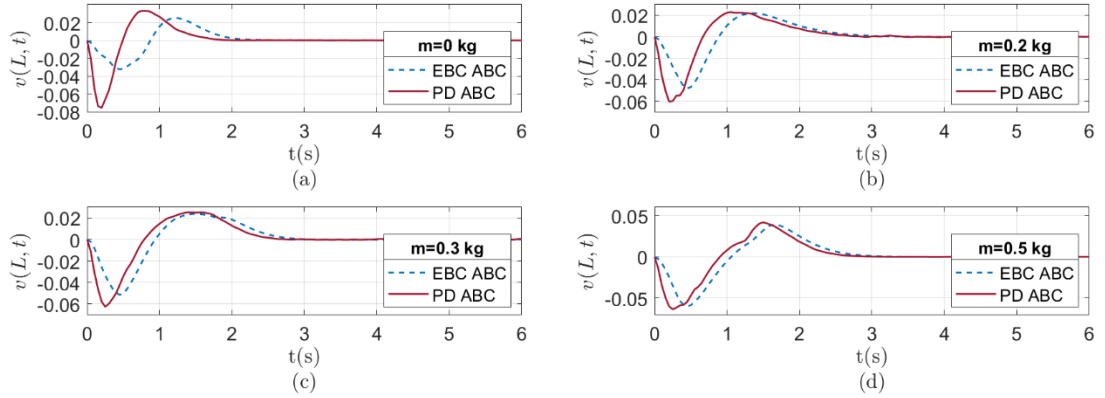
Simülasyonlar sonucunda, EBC ABC ve PD ABC yöntemleri için elde edilen açısal konum grafikleri Şekil 4.6 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.6. EBC ABC ve PD ABC için açısal konum karşılaştırmaları **a)** Uç kütlelenin olmadığı durum için açısal konumlar **b)** $m=0,2$ kg için açısal konumlar **c)** $m=0,3$ kg için açısal konumlar **d)** $m=0,5$ kg için açısal konumlar

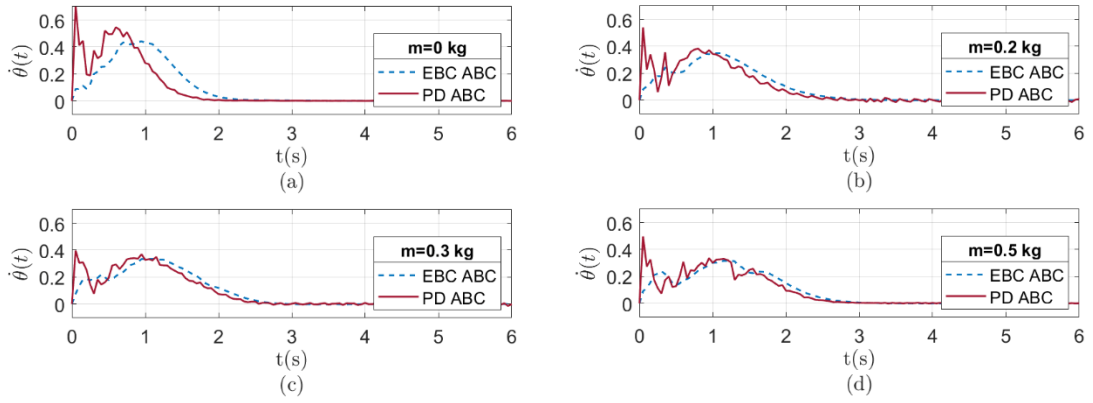
Uç kütleinin olmadığı duruma ilişkin açısal konum grafiklerini içeren Şekil 4.6a incelendiğinde, PD ABC yöntemi ile amaç konuma daha hızlı ulaşıldığı görülmüştür. Şekil 4.6b, c ve d grafikleri incelendiğinde ise, artan uç kütle değerleri sonucunda PD ABC yöntemi ile elde edilen amaç konuma ulaşma sürelerinin EBC ABC yöntemi ile elde edilen sürelerle oldukça yaklaştığı görülmüştür.

Şekil 4.7a ile uç kütleinin olmadığı durumda gerçekleşen uç nokta salınımları incelendiğinde PD ABC yöntemi ile gerçekleşen uç nokta salınımlarının EBC ABC yönteminden belirgin şekilde yüksek değerde olduğu görülmüştür. PD ABC ile maksimum salınım değeri 0,08 m değerine yakın bir değerde olurken, EBC ABC yöntemi ile maksimum salınım 0,03 m değeri yakınında olmaktadır. Artan uç kütle değerleri için Şekil 4.7b, c ve d incelendiğinde gerçekleşen maksimum salınım değerlerinin artan uç kütle değerleri için birbirine yaklaştığı görülmüştür.



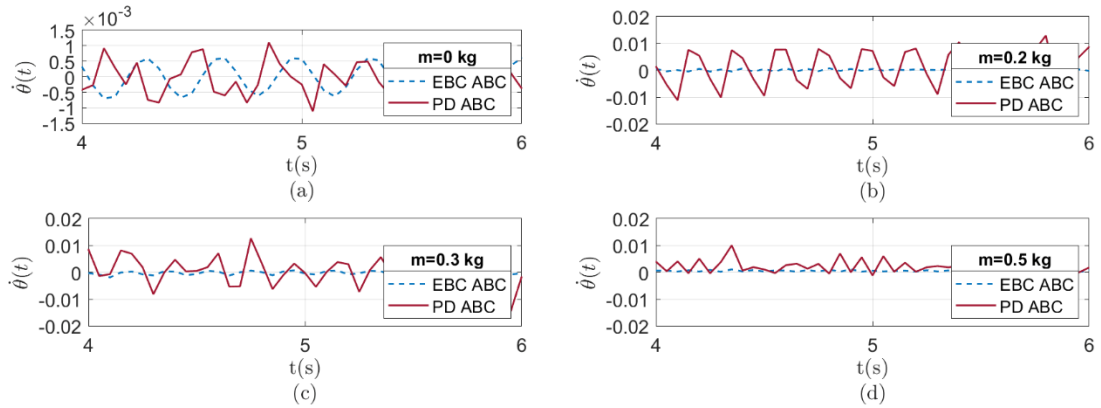
Şekil 4.7. EBC ABC ve PD ABC için uç nokta salınım karşılaştırmaları **a)** Uç kütleinin olmadığı durum için uç nokta salınımları **b)** $m=0,2$ kg için uç nokta salınımları **c)** $m=0,3$ kg için uç nokta salınımları **d)** $m=0,5$ kg için uç nokta salınımları

Simülasyonlar sonucunda elde edilen uç nokta açısal hız değerleri Şekil 4.8 ile gösterilmiştir. Açısal hız değerleri incelendiğinde, PD ABC yöntemi ile farklı kütle durumlarında dahi daha yüksek değerler elde edildiği görülmüştür. Yine PD ABC yönteminde maksimum açısal hız değerlerinin hareketin ilk 1 saniyesi içinde ortaya çıktığı görülmüştür. Şekil 4.7’de PD ABC yöntemi ile maksimum salınımların daha erken görülmesi bu durumun sonucudur. Şekil 4.8 ile verilen açısal hızların değişimlerine dikkat edildiğinde ise PD ABC yönteminde belirgin bir dalgalanma, EBC ABC yönteminde ise daha yumuşak açısal hız geçişlerinin ortaya çıktığı görülmüştür.



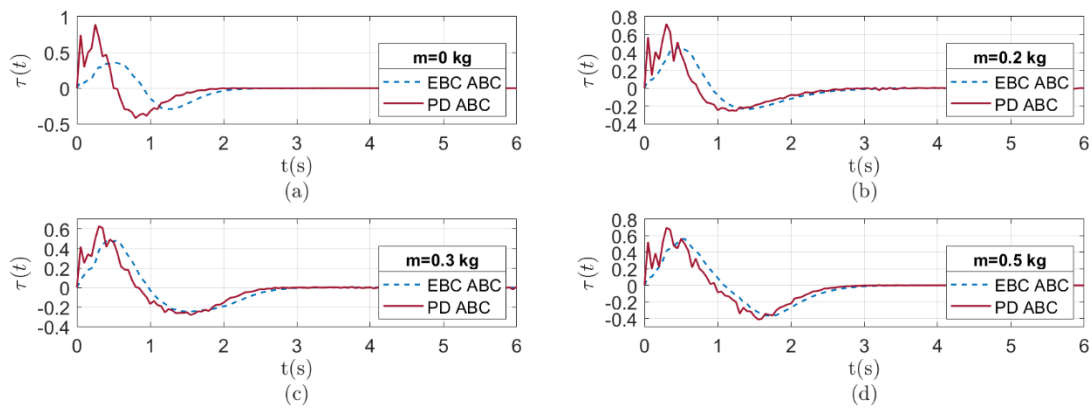
Şekil 4.8. EBC ABC ve PD ABC için açısai hız karşılaştırmaları **a)** Uç kütleinin olmadığı durum için açısai hızlar **b)** $m=0,2$ kg için açısai hızlar **c)** $m=0,3$ kg için açısai hızlar **d)** $m=0,5$ kg için açısai hızlar

Şekil 4.9’da ise Şekil 4.8 ile verilen açısai hız değışimlerinin denge durumundaki değerlerine odaklanılmıştır. Şekil 4.9a görüldüğü üzere iki yöntem ile de kalıcı durumda açısai hız değerler $\pm 0,001$ rad/s değerleri arasında salınım gerçekteşirmiştir. Sistemde uç kütle eklenmesinden ve eklenen uç kütleinin değerinden EBC ABC yöntemi ile gerçekteşirilen kontrol dikkate alınacak seviyelerde etkilenmemiştir. PD ABC yönteminde ise uç kütleinin $m = 0,2$ kg ve $m = 0,3$ kg olması durumunda $\pm 0,01$ rad/s aralığında salınım görülmüş, uç kütleinin $m = 0,5$ kg olması durumunda ise 0 ile 0,01 rad/s aralığında salınım gerçekteşirmiştir.



Şekil 4.9. EBC ABC ve PD ABC için denge durumundaki açısai hız karşılaştırmaları **a)** Uç kütleinin olmadığı durum için açısai hızlar **b)** $m=0,2$ kg için açısai hızlar **c)** $m=0,3$ kg için açısai hızlar **d)** $m=0,5$ kg için açısai hızlar

Simülasyonlarda elde edilen tork değerlerine ilişkin grafikler Şekil 4.10 ile gösterilmiştir. Açışal hız değişimlerine benzer olarak, PD ABC yöntemi ile kontrol sırasında ihtiyaç duyulan tork değerleri ani değişimler gösterirken, EBC ABC yöntemi ile gerçekleştirilen kontrolde tork değerleri daha yumuşak değişimler göstermiştir. Gereksinim duyulan tork değerlerinin maksimum değerleri incelendiğinde, PD ABC yöntemi ile ihtiyaç duyulan maksimum tork değerinin EBC ABC yöntemine göre, uç kütleinin olmadığı durumda yaklaşık %125, $m = 0,2$ kg olduğunda %75, $m = 0,3$ kg olduğunda %20 ve son olarak $m = 0,5$ kg olduğunda %17 oranında arttığı görülmüştür.



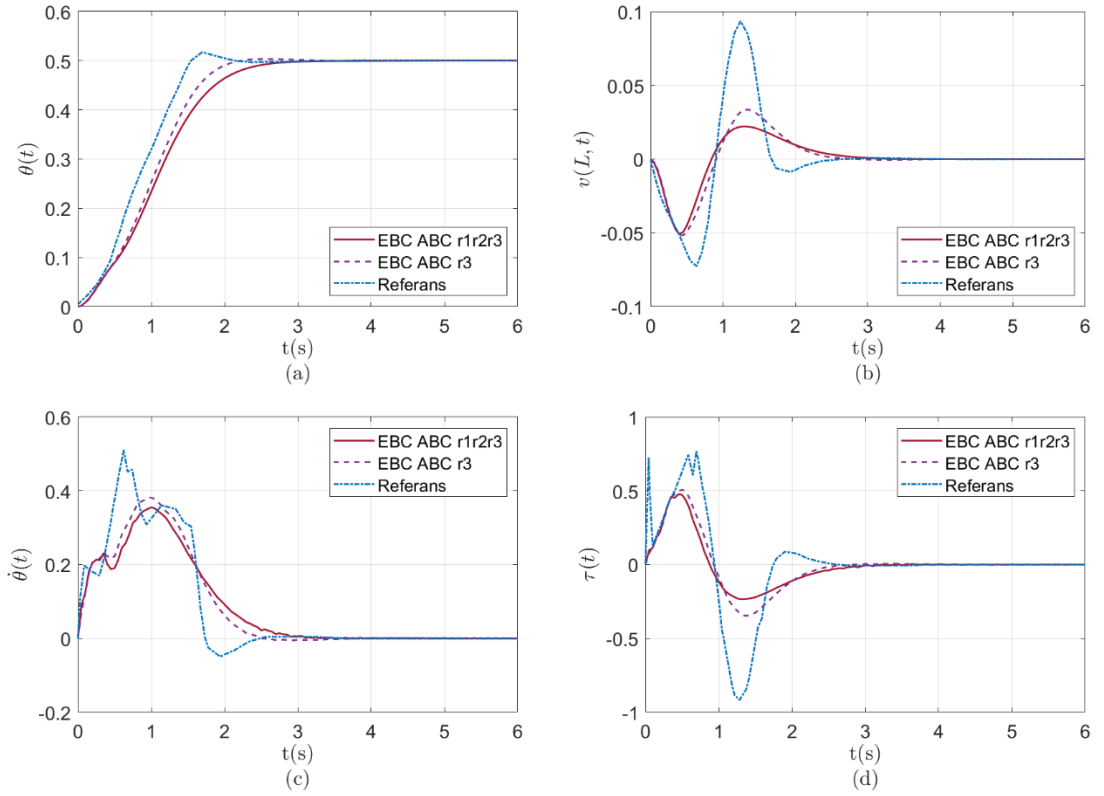
Şekil 4.10. EBC ABC ve PD ABC için tork değerleri karşılaştırmaları
a) Uç kütleinin olmadığı durum için tork değerleri **b)** $m=0,2$ kg için tork değerleri
c) $m=0,3$ kg için tork değerleri **d)** $m=0,5$ kg için tork değerleri

4.3. Referans Çalışma ile Karşılaştırma

Önerilen EBC ABC kontrolcüsünün sağladığı iyileştirmenin incelenebilmesi için, simülasyon sonuçları, tork ifadesinin belirlenmesinde referans alınan çalışma (Meng ve ark., 2018) ile karşılaştırılmıştır.

Referans çalışmada kontrol, tork ifadesinde yer alan parametrelerden r_1 ve r_2 uygun sabit değerler seçilerek yalnızca r_3 parametresi optimize edilerek gerçekleştirilmiştir. İlgili çalışmada parametre optimizasyonu için genetik algoritma kullanılmış, ayrıca optimizasyon amaç fonksiyonunda yer alan ağırlık katsayısı değeri değişimi için bulanık mantık kullanılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında önerilen EBC ABC kontrolcüsünün performansının referans çalışma ile karşılaştırılması için iki farklı simülasyon seçilmiştir. Öncelikle, r_3 parametresinin tek başına ABC algoritması ile optimize edildiği duruma

ilişkin sonuçlar alınmıştır. Burada amaç, referans çalışmada olduğu gibi tek parametre optimize edildiği durumda, EBC ABC kontrolcüsünün referans çalışmasına karşısında performansının karşılaştırılmasıdır. İkinci olarak ise, tork ifadesindeki tüm parametrelerin ABC Algoritması ile optimize edildiği simülasyon sonuçları alınmıştır. Referans çalışmasında elde edilen sonuçların da yer aldığı karşılaştırma grafikleri Şekil 4.11 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Referans çalışma ile karşılaştırma **a)** Açısal konum **b)** Uç nokta salınımları **c)** Açısal hız **d)** Tork değerleri

Şekil 4.11a incelendiğinde referans çalışmasında meydana gelen aşma olayının EBC ABC yöntemi ile önemli ölçüde elimine edildiği görülmüştür. Bununla birlikte EBC ABC yöntemi ile elde edilen son konuma ulaşma süreleri de referans çalışma ile oldukça yakın değerlerde olmuştur. Şekil 4.11b ile gösterilen uç nokta salınımları incelendiğinde ise EBC ABC yöntemi ile referans çalışmasında meydana gelen uç nokta salınım değerlerinden belirgin oranda düşük değerler elde edildiği görülmüştür. Referans çalışmada 0,1 m değerine yaklaşan uç nokta salınımı, EBC ABC yönteminde yaklaşık

0,05 m değerine indirilmiştir. Referans çalışmasına benzer olarak, EBC ABC yöntemi ile de uç nokta salınımı yaklaşık 3 s sonunda elimine edilmiştir. Böylece, uç nokta salınımının sonlandığı sürede değişiklik olmazken, referans çalışmasına göre EBC ABC yöntemi ile uç nokta salınımında %50 azalma elde edilmiştir.

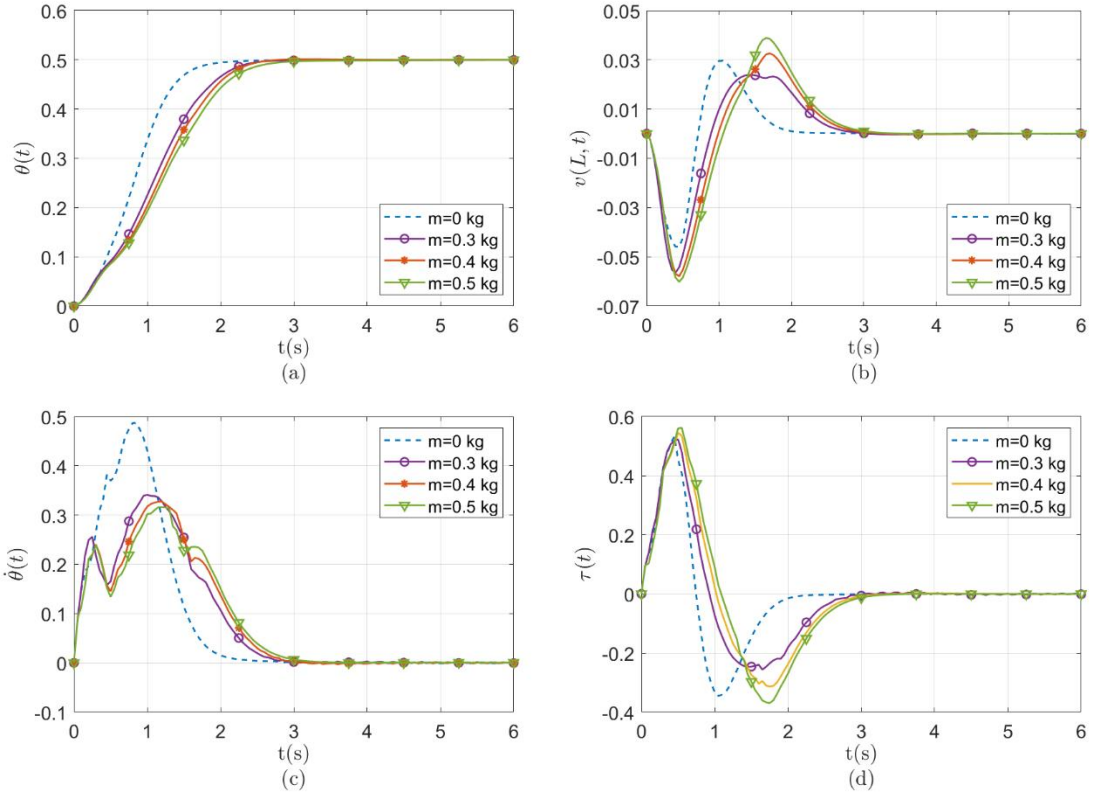
Açısal hız değişimine ait sonuçlar sonuçları içeren Şekil 4.11c incelendiğinde, EBC ABC yöntemi ile referans çalışmasına göre ani artış ve azalışların olmadığı görülmüştür. Tork ifadesinde yer alan üç parametrenin de optimize edildiği durumda maksimum açısal hız değeri diğer durumlara göre daha düşük olmaktadır. Bunun yanında açısal hız değişimi diğer yöntemlere göre daha düzenli olduğu görülmüştür. Şekil 4.11d ile gösterilen tork değerleri incelendiğinde EBC ABC yöntemi ile hareket esnasında ihtiyaç duyulan maksimum tork değerinin yaklaşık %50 oranında azaldığı görülmüştür.

Referans çalışma ile karşılaştırma sonucunda önerilen EBC ABC yöntemi ile aşma durumunun ihmal edilebilecek boyutlara düşürülmesi, uç nokta salınımında %50 azalma ve yine ihtiyaç duyulan tork değerinde %50 azalma görülmesi sonucunda daha iyi performans elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. Yine grafiklerden görüldüğü üzere EBC ABC yönteminde tüm parametrelerin bir arada optimize edilmesi sadece r_3 parametresi optimizasyonuna göre daha başarılı bir performans göstermiştir.

4.4. Farklı Uç Kütle Durumları İçin Sonuçlar

Önerilen EBC ABC kontrol yönteminin farklı uç kütle durumlarında gösterdiği performansın incelenmesi amacı doğrultusunda uç kütle bulunmadığı durum ile $m = 0,3$ kg, $m = 0,4$ kg ve $m = 0,5$ kg durumlarına ilişkin simülasyon sonuçları Şekil 4.12 ile gösterilmiştir.

Şekil 4.12a'da görüldüğü üzere uç kütle bulunmadığı gibi amaçlanan konuma yaklaşık 2 s içinde ulaşılmıştır. Bu hareket sırasında esnek uzuvda meydana gelen maksimum salınım ise Şekil 4.12b'de görüldüğü üzere yaklaşık 0,04 m olmuştur. Şekil 4.12c incelendiğinde, uç kütle bulunmadığı durumda esnek uzvun açısal hız değerleri diğer uç kütle durumlarından yüksek değerde olduğu görülmüştür. Şekil 4.12d incelendiğinde ise ihtiyaç duyulan maksimum tork değerinin ise diğer uç kütle durumlarına oldukça yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 4.12. Farklı uç kütle durumları için sonuçlar **a)** Açısal konum **b)** Uç nokta salınımları **c)** Açısal hız **d)** Tork değerleri

Şekil 4.12a'da yer alan $m = 0,3$ kg, $m = 0,4$ kg ve $m = 0,5$ kg durumlarına ilişkin açısal konum değişimleri incelendiğinde ilgili üç durum için de sistemin 2,5 s civarında amaç konuma ulaştığı görülmüştür. Şekil 4.12b'de görüldüğü gibi uç kütle artması ile hareket sırasında meydana gelen salınımın maksimum değeri de artmıştır. Maksimum salınım değerinin $m = 0,5$ kg için 0,06 m değerine yakın olduğu görülmüştür. Şekil 4.12d'de görüldüğü üzere, artan uç kütle değerleri tork değerlerinde de artışa sebep olmuştur.

Grafikler bir arada değerlendirildiğinde ise uç kütle olmadığı durumun, uç kütle olduğu durumlardan belirgin bir şekilde ayrıştığı görülmüştür. Uç kütle olmadığı durumda diğer durumlara benzer tork değerleri üretilirken, bu tork değeri belirgin bir şekilde daha düşük uç nokta salınıma sebep olmuştur. Yine, üretilen tork değerleri sonucunda açısal hız değeri uç kütle olmadığı durumda daha yüksek değerlere ulaşmış ve bunun sonucu olarak da esnek uzuv daha kısa sürede hedeflenen konuma ulaşmıştır.

5. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında, uç kütleyle sahip tek uzuvlu esnek bir manipülatör sistemi için, belirlenen konum hedefine ulaşmayı ve hareket sırasında meydana gelen salınımları sönmülmeyi amaçlayan bir kontrolcü geliştirilmiştir. Kontrolcünün farklı uç kütle değerleri için aynı performansta çalışmasını sağlamak amacıyla ilave bir algoritma geliştirilmiş ve kontrolcüye adapte edilmiştir.

Esnek uzuv, Euler-Bernoulli kirişi özelliklerine sahip olduğu kabulü ile modellenmiştir. İndirgenmiş modelin elde edilmesi için ise AMM kullanılmıştır. Modelde dikkate alınması gereken mod sayısının belirlenmesi için farklı mod sayıları ile simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve sistemi yeterli doğrulukta temsil eden mod sayısı seçilmiştir.

Esnek uzvun kontrolü için sistemde yer alan tek giriş kontrol torkudur. Kontrolde gereksinim duyulan tork değerinin belirlenmesi için bir Lyapunov fonksiyonu önerisi yapılmıştır. Böylece sistemin stabilitesinin de garanti altına alındığı bir tork ifadesi elde edilmiştir. Geliştirilen ABC Algoritması ile tork ifadesinde yer alan bağımsız parametreler hareket süresince belirli zaman aralıklarında optimize edilmiştir.

Bu tez kapsamında geliştirilen kontrolcünün benzerlerinden farklılaştığı en önemli özellikleri, farklı uç kütle durumlarında dahi uygulanabilir oluşu ve parametrelerinin tamamının optimizasyon sürecine dahil edilmesidir. Parametrelerin hepsinin optimizasyon sürecine dahil edilmesi ile muhtemel en geniş arama uzayı oluşturulmuştur.

Kontrol yönteminin performansının analizi için ilk olarak tork ifadesinde yer alan parametrelerin farklı kombinasyonları ile optimize edildiği ve tüm parametrelerin uygun sabit değerde olduğu durumlara ilişkin sonuçlar elde edilmiştir. Bu analizler farklı uç kütle durumları için ayrı ayrı ele alınmıştır ve tüm parametrelerin bir arada optimizasyonunun gerekli olduğu gösterilmiştir. Ardından, katsayıları ABC Algoritması ile optimize edilen klasik PD kontrolcü ile karşılaştırma yapılarak kontrol yönteminin klasik PD kontrolcünden üstün yanları vurgulanmıştır. Son karşılaştırma, literatürde yer alan benzer bir çalışma ile gerçekleştirilmiştir. Literatürde yer alan çalışmanın aksine önerilen yöntemde aşma olayı gerçekleşmemiştir. Ek olarak, hareket sırasında daha düşük salınım değerleri görülmüş ve ihtiyaç duyulan tork değeri de azalmıştır.

Böylece, çalışmada performans kriterleri olarak belirlenen açısai konuma ulaşma, uç nokta salınımı, açısai hız değerleri ve ihtiyaç duyulan maksimum tork değerleri açısından diğer kontrol yöntemlerine göre daha başarılı bir kontrolcü geliştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- Ahmad, M. A., & Mohamed, Z. (2010). Modelling and simulation of vibration and input tracking control of a single-link flexible manipulator. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 18(1), 61–76.
- Al-Khafaji, A. A. M., Shaharuddin, N. M. R., & Darus, I. Z. M. (2015). Evolutionary algorithm for identification of a flexible single-link manipulator system. *WSEAS Transactions on Systems and Control*, 10(January), 58–75.
- Alam, M. S., & Tokhi, M. O. (2007). Dynamic modelling of a single-link flexible manipulator system: A particle swarm optimisation approach. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, 26(1), 57–72. doi:10.1260/026309207781487466
- 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. doi:10.1016/j.engappai.2007.08.002
- Alandoli, E. A., & Lee, T. S. (2020). A Critical Review of Control Techniques for Flexible and Rigid Link Manipulators. *Robotica*, 38(12), 2239–2265. doi:10.1017/S0263574720000223
- Alandoli, E. A., Lee, T. S., Lin, Y., & Vijayakumar, V. (2021). Dynamic Model and Intelligent Optimal Controller of Flexible Link Manipulator System with Payload Uncertainty. *Arabian Journal for Science and Engineering*. doi:10.1007/s13369-021-05436-7
- Alandoli, E. A., Lee, T. S., My, C. A., & Mohammed, M. Q. (2021). Robust P-H ∞ Integrated Controller for Flexible Link Manipulator System in the Presence of Disturbance. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 7(2), 646–654. doi:10.22055/jacm.2020.35475.2668
- Alandoli, E. A., Rashid, M. Z. A., & Sulaiman, M. (2017). A comparison of PID and LQR controllers for position tracking and vibration suppression of flexible link manipulator. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 95(13), 2949–2955.
- Alandoli, E. A., Sulaiman, M., & Rashid, M. Z. A. (2019). Robustness and disturbance rejection of PD/H integrated controller for flexible link manipulator system. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 12(1), 27–36. doi:10.25103/jestr.121.04
- Altner, B., Delibaşı, A., & Erol, B. (2018). Modeling and control of flexible link manipulators for unmodeled dynamics effect. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 233(3), 245–263. doi:10.1177/0959651818791071
- Belherazem, A., & Chenafa, M. (2021). Passivity Based Adaptive Control of a Single-

Link Flexible Manipulator. *Automatic Control and Computer Sciences*, 55(1), 1–14. doi:10.3103/s0146411621010028

Chen, B., Huang, J., & Ji, J. C. (2019). Control of flexible single-link manipulators having Duffing oscillator dynamics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 121, 44–57. doi:10.1016/j.ymssp.2018.11.014

Chen, T., Lou, J., Yang, Y., Ma, J., Li, G. P., & Wei, Y. (2018). Auto-regressive moving average with exogenous excitation model based experimental identification and optimal discrete multi-poles shifting control of a flexible piezoelectric manipulator. *JVC/Journal of Vibration and Control*, 24(24), 5707–5725. doi:10.1177/1077546318790866

Dong, J., He, B., Ma, M., Zhang, C., & Li, G. (2019). Open-Closed-Loop PD Iterative Learning Control Corrected with the Angular Relationship of Output Vectors for a Flexible Manipulator. *IEEE Access*, 7, 167815–167822. doi:10.1109/ACCESS.2019.2930559

Dubay, R., Hassan, M., Li, C., & Charest, M. (2014). Finite element based model predictive control for active vibration suppression of a one-link flexible manipulator. *ISA Transactions*, 53(5), 1609–1619. doi:10.1016/j.isatra.2014.05.023

Dwivedy, S. K., & Eberhard, P. (2006). Dynamic analysis of flexible manipulators, a literature review. *Mechanism and Machine Theory*, 41(7), 749–777. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2006.01.014

He, W., & Sun, C. (2016). Boundary feedback stabilisation of a flexible robotic manipulator with constraint. *International Journal of Control*, 89(3), 635–651. doi:10.1080/00207179.2015.1088966

Jiang, T., Liu, J., & He, W. (2017). A robust observer design for a flexible manipulator based on a PDE model. *JVC/Journal of Vibration and Control*, 23(6), 871–882. doi:10.1177/1077546315587443

Karaboğa, D. (2005). An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimisation. *TECHNICAL REPORT-TR06*.

Karaboğa, D. (2020). *Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları* (7th ed.). Nobel Akademik Yayıncılık.

Karimi, H. R., & Yazdanpanah, M. J. (2006). A new modeling approach to single-link flexible manipulator using singular perturbation method. *Electrical Engineering*, 88(5), 375–382. doi:10.1007/s00202-005-0302-6

Khairudin, M. (2021). Vibration Control Using Pole Placement with Proportional Gain of a Flexible Manipulator Incorporating Payload. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 32(5), 1164–1176. doi:10.1007/s40313-021-00752-7

Khajepour, G., Vatankhah, R., Eghtesad, M., & Vakilzadeh, M. (2020). Cross term

- constructed Lyapunov function based two-time scale controller design and vibration suppression for a rotating hub-beam system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 42(3), 551–564. doi:10.1177/0142331219877800
- Lee, T. S., & Alandoli, E. A. (2020). A critical review of modelling methods for flexible and rigid link manipulators. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(10), 1–14. doi:10.1007/s40430-020-02602-0
- Li, L., & Liu, J. (2020). Neural-network-based adaptive fault-tolerant vibration control of single-link flexible manipulator. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 42(3), 430–438. doi:10.1177/0142331219874157
- Liu, Z., & Liu, J. (2017a). Boundary Control of a Flexible Robotic Manipulator With Output Constraints. *Asian Journal of Control*, 19(1), 332–345. doi:10.1002/asjc.1342
- Liu, Z., & Liu, J. (2017b). Disturbance observer based boundary control of a flexible manipulator with input saturation. *Chinese Control Conference, CCC*, 2(3), 1626–1631. doi:10.23919/ChiCC.2017.8027583
- Liu, Z., & Liu, J. (2018). Adaptive Iterative Learning Boundary Control of a Flexible Manipulator with Guaranteed Transient Performance. *Asian Journal of Control*, 20(3), 1027–1038. doi:10.1002/asjc.1379
- Liu, Z., Liu, J., & He, W. (2016). Adaptive boundary control of a flexible manipulator with input saturation. *International Journal of Control*, 89(6), 1191–1202. doi:10.1080/00207179.2015.1125022
- Liu, Z., Liu, J., & He, W. (2017). Partial differential equation boundary control of a flexible manipulator with input saturation. *International Journal of Systems Science*, 48(1), 53–62.
- Liu, Z., Liu, J., & He, W. (2018). Dynamic modeling and vibration control for a nonlinear 3-dimensional flexible manipulator. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 28(13), 3927–3945. doi:10.1002/rnc.4113
- Loudini, M. (2013). Modelling and intelligent control of an elastic link robot manipulator. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10. doi:10.5772/51102
- Lu, E., Li, W., Yang, X., Wang, Y., & Liu, Y. (2018). Optimal placement and active vibration control for piezoelectric smart flexible manipulators using modal H2 norm. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 29(11), 2333–2343. doi:10.1177/1045389X18770851
- Ma, J., Jin, D., Wei, Z., Chen, T., & Wen, H. (2018). Boundary Control of a Flexible Manipulator Based on a High Order Disturbance Observer with Input Saturation. *Shock and Vibration*, 2018. doi:10.1155/2018/2086424
- Meng, Q. X., Lai, X. Z., Wang, Y. W., & Wu, M. (2018). A fast stable control strategy

based on system energy for a planar single-link flexible manipulator. *Nonlinear Dynamics*, 94(1), 615–626. doi:10.1007/s11071-018-4380-1

Mohamed, Z., & Tokhi, M. O. (2004). Command shaping techniques for vibration control of a flexible robot manipulator. *Mechatronics*, 14(1), 69–90. doi:10.1016/S0957-4158(03)00013-8

Osman Tokhi, M., & Azad, A. K. M. (2008). *Flexible Robot Manipulators, Modelling, simulation and control* (Issue 1989). IET Digital Library.

Ouyang, Y., He, W., Li, X., Liu, J. K., & Li, G. (2017). Vibration Control Based on Reinforcement Learning for a Single-link Flexible Robotic Manipulator. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 3476–3481. doi:10.1016/j.ifacol.2017.08.932

Peza-Solís, J. F., Silva-Navarro, G., & Castro-Linares, N. R. (2015). Trajectory tracking control in a single flexible-link robot using finite differences and sliding modes. *Journal of Applied Research and Technology*, 13(1), 70–78. doi:10.1016/S1665-6423(15)30006-7

Rahimi, H. N., & Nazemizadeh, M. (2014). Dynamic analysis and intelligent control techniques for flexible manipulators: a review. *Advanced Robotics*, 28(2), 63–76. doi:10.1080/01691864.2013.839079

Rahman, T. A. Z., As'array, A., & Jalil, N. A. A. (2017). Active Vibration Control of a Flexible Beam Structure Using Chaotic Fractal Search Algorithm. *Procedia Engineering*, 170, 299–306. doi:10.1016/j.proeng.2017.03.033

Razmjoooy, N., Ramezani, M., & Namadchian, A. (2016). A new LQR optimal control for a single-link flexible joint robot manipulator based on grey wolf optimizer. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, 10(3), 53–60.

Saad, M. S., Jamaluddin, H., & Darus, I. Z. M. (2015). Active vibration control of a flexible beam using system identification and controller tuning by evolutionary algorithm. *JVC/Journal of Vibration and Control*, 21(10), 2027–2042. doi:10.1177/1077546313505635

Subedi, D., Tyapin, I., & Hovland, G. (2020). Review on Modeling and Control of Flexible Link Manipulators. *Modeling, Identification and Control: A Norwegian Research Bulletin*, 41(3), 141–163. doi:10.4173/mic.2020.3.2

Sun, C., Gao, H., He, W., & Yu, Y. (2018). Fuzzy neural network control of a flexible robotic manipulator using assumed mode method. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 29(11), 5214–5227. doi:10.1109/TNNLS.2017.2743103

Sun, C., He, W., & Hong, J. (2017). Neural Network Control of a Flexible Robotic Manipulator Using the Lumped Spring-Mass Model. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 47(8), 1863–1874.

- Supriyono, H., & Tokhi, M. O. (2012). Parametric modelling approach using bacterial foraging algorithms for modelling of flexible manipulator systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(5), 898–916. doi:10.1016/j.engappai.2012.03.004
- 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 and Intelligent Systems*, 10(2), 367–386. doi:10.21307/ijssis-2017-216
- Tang, L., Gouttefarde, M., Sun, H., Yin, L., & Zhou, C. (2021). Dynamic modelling and vibration suppression of a single-link flexible manipulator with two cables. *Mechanism and Machine Theory*, 162. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2021.104347
- Wang, H., & Kang, S. (2019). Adaptive Neural Command Filtered Tracking Control for Flexible Robotic Manipulator with Input Dead-Zone. *IEEE Access*, 7, 22675–22683. doi:10.1109/ACCESS.2019.2899459
- Yang, H.-J., & Tan, M. (2018). Sliding Mode Control for Flexible-link Manipulators Based on Adaptive Neural Networks. *International Journal of Automation and Computing*, 15(2), 239–248.
- Yang, H. J., Liu, J. K., & He, W. (2018). Distributed disturbance-observer-based vibration control for a flexible-link manipulator with output constraints. *Science China Technological Sciences*, 61(10), 1528–1536. doi:10.1007/s11431-017-9280-1
- Yang, H., & Liu, J. (2016). Distributed piezoelectric vibration control for a flexible-link manipulator based on an observer in the form of partial differential equations. *Journal of Sound and Vibration*, 363, 77–96. doi:10.1016/j.jsv.2015.11.001
- Yang, H., & Liu, J. (2019). Active Vibration Control for a Flexible-Link Manipulator with Input Constraint Based on a Disturbance Observer. *Asian Journal of Control*, 21(2), 847–855. doi:10.1002/asjc.1793
- Yang, H., Liu, J., & Lan, X. (2015). Observer design for a flexible-link manipulator with PDE model. *Journal of Sound and Vibration*, 341, 237–245. doi:10.1016/j.jsv.2014.12.033
- Zhang, Y., Li, Q., Zhang, W., Liu, Y., & Xue, Z. (2019). Weighted Multiple Neural Network Boundary Control for a Flexible Manipulator with Uncertain Parameters. *IEEE Access*, 7, 57633–57641. doi:10.1109/ACCESS.2019.2914077
- Zhao, Z., He, X., & Ahn, C. K. (2021). Boundary Disturbance Observer-Based Control of a Vibrating Single-Link Flexible Manipulator. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 51(4), 2382–2390. doi:10.1109/TSMC.2019.2912900

EKLER

- EK 1** Kinetik enerji ifadesinin integral işlemleri
- EK 2** Potansiyel enerji ifadesinin integral işlemleri
- EK 3** İntegral düzenlemesi
- EK 4** Ortogonallik ifadesinde ara işlemler
- EK 5** Lagrange ifadesinde ara işlemler
- EK 6** Optimizasyon parametreleri seçimi algoritması
- EK 7** Karşılaştırma simülasyonlarında kullanılan algoritma

EK 1. Kinetik Enerji İfadesinin İntegral İşlemleri

Hamilton Prensipli'nde yer alan kinetik enerjinin varyasyonu

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta E_k dt = \int_{t_1}^{t_2} \delta \left[\frac{1}{2} I_h \dot{\theta}(t)^2 + \frac{1}{2} \rho \int_0^L \dot{s}(x, t)^2 dx + \frac{1}{2} m \dot{s}(L, t)^2 \right] dt$$

ifadesinde yer alan $\dot{s}(x, t)$ ve $\dot{s}(L, t)$ için

$$\dot{s}(x, t) = x\dot{\theta}(t) + \dot{v}(x, t)$$

$$\dot{s}(L, t) = L\dot{\theta}(t) + \dot{v}(L, t)$$

açık ifadeleri eşitlikte yerine yazıldıktan sonra düzenlendiğinde

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta E_k dt = \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{1}{2} I_h \delta \dot{\theta}(t)^2 + \frac{1}{2} \rho \int_0^L \delta (x^2 \dot{\theta}(t)^2 + 2x\dot{\theta}(t)\dot{v}(x, t) + \dot{v}(x, t)^2) dx + \frac{1}{2} m \delta (L^2 \dot{\theta}(t)^2 + 2L\dot{\theta}(t)\dot{v}(L, t) + \dot{v}(L, t)^2) \right] dt$$

ifadesi elde edilmiştir. Eşitlikte yer alan integral işlemleri, bağlantı göbeği, esnek uzuv ve uç kütle için ayrı ayrı düzenlenmiştir.

Bağlantı göbeği için integral işlemleri;

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2} I_h \delta \dot{\theta}(t)^2 dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2} I_h \dot{\theta}(t) \delta \dot{\theta}(t) dt$$

Kısmi integral uygulandığında;

$$\begin{aligned} u &= \dot{\theta} & du &= \ddot{\theta} dt \\ dv &= \delta \dot{\theta} dt & v &= \delta \theta \end{aligned}$$
$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2} I_h \delta \dot{\theta}(t)^2 dt = \dot{\theta}(t) \delta \theta(t) \Big|_{t_1}^{t_2} - \int_{t_1}^{t_2} \ddot{\theta}(t) \delta \theta(t) dt$$

İntegral sınırlarında varyasyon değerlerinin

$$\delta \theta(t_1) = \delta \theta(t_2) = 0$$

olduğu dikkate alınarak ifade düzenlendiğinde bağlantı göbeği için integral ifadesinin düzenlenmiş hali aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2} I_h \delta \dot{\theta}(t)^2 dt = \int_{t_1}^{t_2} -I_h \ddot{\theta}(t) \delta \theta(t) dt$$

Esnek uzuv için integral işlemleri;

$$\begin{aligned} & \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2} \rho \int_0^L \delta (x^2 \dot{\theta}(t)^2 + 2x \dot{\theta}(t) \dot{v}(x, t) + \dot{v}(x, t)^2) dx \\ &= \int_0^L \rho \int_{t_1}^{t_2} (x^2 \dot{\theta}(t) \delta \dot{\theta}(t) + x \dot{v}(x, t) \delta \dot{\theta}(t) + x \dot{\theta}(t) \delta \dot{v}(x, t) \\ &+ \dot{v}(x, t) \delta \dot{v}(x, t)) dt dx \end{aligned}$$

İntegral içinde yer alan ifadeler, kısmi integral uygulanarak ve integralin zaman sınırlarında varyasyon değerlerinin sıfır olduğu da dikkate alınarak düzenlendiğinde

$$\begin{aligned} & \int_0^L \rho \int_{t_1}^{t_2} (x^2 \dot{\theta}(t) \delta \dot{\theta}(t) + x \dot{v}(x, t) \delta \dot{\theta}(t) + x \dot{\theta}(t) \delta \dot{v}(x, t) + \dot{v}(x, t) \delta \dot{v}(x, t)) dt dx \\ &= -\rho \int_{t_1}^{t_2} \left(\int_0^L x^2 \ddot{\theta}(t) \delta \theta(t) dx + \int_0^L x \ddot{v}(x, t) \delta \theta(t) dx \right. \\ &+ \left. \int_0^L x \ddot{\theta}(t) \delta v(x, t) dx + \int_0^L \ddot{v}(x, t) \delta v(x, t) dx \right) dt \end{aligned}$$

Konum türevleri alındıktan sonra esnek uzuv için integral ifadesi aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} & \int_0^L \rho \int_{t_1}^{t_2} (x^2 \dot{\theta}(t) \delta \dot{\theta}(t) + x \dot{v}(x, t) \delta \dot{\theta}(t) + x \dot{\theta}(t) \delta \dot{v}(x, t) + \dot{v}(x, t) \delta \dot{v}(x, t)) dt dx \\ &= \int_{t_1}^{t_2} -\rho \frac{L^3}{3} \ddot{\theta}(t) \delta \theta(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L -\rho x \ddot{v}(x, t) \delta \theta(t) dx dt \\ &+ \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L -\rho x \ddot{\theta}(t) \delta v(x, t) dx dt + \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L -\rho \ddot{v}(x, t) \delta v(x, t) dx dt \end{aligned}$$

Uç kütle için integral işlemleri;

$$\begin{aligned} & \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2} m \delta(L^2 \dot{\theta}(t)^2 + 2L\dot{\theta}(t)\dot{v}(x,t) + \dot{v}(L,t)^2) dt \\ &= \int_{t_1}^{t_2} m \left(L\dot{\theta}(t)\delta\dot{\theta}(t) + L\dot{v}(L,t)\delta\dot{\theta}(t) + L\dot{\theta}(t)\delta\dot{v}(L,t) \right. \\ & \quad \left. + \dot{v}(L,t)\delta\dot{v}(L,t) \right) dt \end{aligned}$$

Kısmi integral uygulaması ile uç nokta için integral ifadesi aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} & \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2} m \delta(L^2 \dot{\theta}(t)^2 + 2L\dot{\theta}(t)\dot{v}(x,t) + \dot{v}(L,t)^2) dt \\ &= \int_{t_1}^{t_2} -mL^2 \ddot{\theta}(t) \delta\theta(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} -mL\ddot{v}(x,t) \delta\theta(t) dt \\ & \quad + \int_{t_1}^{t_2} -mL\ddot{\theta}(t) \delta v(L,t) dt + \int_{t_1}^{t_2} -m\ddot{v}(L,t) \delta v(L,t) dt \end{aligned}$$

EK 2. Potansiyel Enerji İfadesinin İntegral İşlemleri

Hamilton Prensipleri'nde yer alan potansiyel enerjinin varyasyonu

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta E_P dt = \frac{1}{2} EI \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L \delta (v''(x, t))^2 dx dt$$

yeniden düzenlendiğinde

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta E_P dt = EI \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L (v''(x, t)) \delta (v''(x, t)) dx dt$$

elde edilmiştir. Kısmi integral uygulamasının peş peşe gerçekleştirilmesi ile

$$\begin{aligned} u &= v''(x, t) & du &= v'''(x, t) dx \\ dv &= \delta v''(x, t) dx & v &= \delta v'(x, t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} \delta E_P dt &= EI \int_{t_1}^{t_2} \left[v''(x, t) \delta v'(x, t) \Big|_0^L - \int_0^L v'''(x, t) \delta v'(x, t) dx \right] dt \\ &= \int_{t_1}^{t_2} EI \left[v''(L, t) \delta v'(L, t) - v''(0, t) \delta v'(0, t) - \int_0^L v'''(x, t) \delta v'(x, t) dx \right] dt \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u &= v'''(x, t) & du &= v^{IV}(x, t) dx \\ dv &= \delta v'(x, t) dx & v &= \delta v(x, t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} \delta E_P dt &= \int_{t_1}^{t_2} EI \left[v''(L, t) \delta v'(L, t) - v''(0, t) \delta v'(0, t) \right. \\ &\quad \left. - \left(v'''(x, t) \delta v(x, t) \Big|_0^L - \int_0^L v^{IV}(x, t) \delta v(x, t) dx \right) \right] dt \\ &= \int_{t_1}^{t_2} EI \left[v''(L, t) \delta v'(L, t) - v''(0, t) \delta v'(0, t) - v'''(L, t) \delta v(L, t) \right. \\ &\quad \left. + v'''(0, t) \delta v(0, t) + \int_0^L v^{IV}(x, t) \delta v(x, t) dx \right] dt \end{aligned}$$

ifadesine ulaşılmıştır.

Böylece potansiyel enerjiye ait integral ifadesi aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}\int_{t_1}^{t_2} \delta E_p dt &= \int_{t_1}^{t_2} EI v''(L, t) \delta v'(L, t) dt + \int_{t_1}^{t_2} -EI v''(0, t) \delta v'(0, t) dt \\ &+ \int_{t_1}^{t_2} -EI v'''(L, t) \delta v(L, t) dt + \int_{t_1}^{t_2} EI v'''(0, t) \delta v(0, t) dt \\ &+ \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L EI v^{IV}(x, t) \delta v(x, t) dx dt\end{aligned}$$

EK 3. İntegral Düzenlemesi

$$\int_0^L EI xv^{IV}(x,t)dx + \int_0^L \rho x \ddot{v}(x,t)dx = \int_0^L -\rho x^2 \ddot{\theta}(t)dx$$

İfadede yer alan $\int_0^L EI xv^{IV}(x,t)dx$ integrali içeren integral için kısmi integral uygulanmıştır.

$$\begin{aligned} u &= x & du &= dx \\ dv &= v^{IV}(x,t)dx & v &= v'''(x,t) \end{aligned}$$

$$EI \left(xv'''(x,t) \Big|_0^L - \int_0^L v'''(x,t)dx \right) + \int_0^L \rho x \ddot{v}(x,t)dx = \int_0^L -\rho x^2 \ddot{\theta}(t)dx$$

$$EI \left(xv'''(x,t) \Big|_0^L - v''(x,t) \Big|_0^L \right) + \int_0^L \rho x \ddot{v}(x,t)dx = \int_0^L -\rho x^2 \ddot{\theta}(t)dx$$

İfadenin düzenlenmesi ile eşitlik aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$EILv'''(L,t) + EIv''(0,t) + \int_0^L \rho x \ddot{v}(x,t)dx = \int_0^L -\rho x^2 \ddot{\theta}(t)dx$$

EK 4. Ortogonalite İfadesinde Ara İşlemler

İfadelerin düzenlenmesi Denklem (3.47) ile verilen

$$\int_0^L \phi_j(x) \phi_i^{IV}(x) dx = \beta_i^4 \int_0^L \phi_j(x) \phi_i(x) dx$$

eşitliği üzerinde gerçekleştirilmiştir. İndis değişimi ile Denklem (3.48) için de sonuçlar geçerli olmaktadır. İlk olarak eşitliğin sol tarafında yer alan integral ifadesine kısmi integral uygulanmıştır.

$$\begin{aligned} u &= \phi_j(x) & du &= \phi_j'(x) dx \\ dv &= \phi_i^{IV}(x) dx & v &= \phi_i'''(x) \end{aligned}$$

$$\int_0^L \phi_j(x) \phi_i^{IV}(x) dx = \phi_j(x) \phi_i'''(x) \Big|_0^L - \int_0^L \phi_j'(x) \phi_i'''(x) dx$$

Elde edilen ifadenin sağ tarafta yer alan integral için de kısmi integral uygulandığında

$$\begin{aligned} u &= \phi_j'(x) & du &= \phi_j''(x) dx \\ dv &= \phi_i'''(x) dx & v &= \phi_i''(x) \end{aligned}$$

$$\int_0^L \phi_j(x) \phi_i^{IV}(x) dx = \phi_j(x) \phi_i'''(x) \Big|_0^L - \left(\phi_j'(x) \phi_i''(x) \Big|_0^L - \int_0^L \phi_j''(x) \phi_i''(x) dx \right)$$

ifadesine ulaşılmıştır. İntegral sınırları yerine yazılarak aşağıdaki ifadeye ulaşılmıştır.

$$\begin{aligned} \int_0^L \phi_j(x) \phi_i^{IV}(x) dx &= \phi_j(L) \phi_i'''(L) - \phi_j(0) \phi_i'''(0) - \phi_j'(L) \phi_i''(L) + \phi_j'(0) \phi_i''(0) \\ &+ \int_0^L \phi_j''(x) \phi_i''(x) dx \end{aligned}$$

Diferansiyel denklemin sınır şartları Denklem (3.16), (3.17) ve (3.21) dikkate alındığında

$$\phi_j(0) = \phi_j'(0) = \phi_j''(L) = 0$$

geçerli olduğu görülmüştür. Böylece

$$\int_0^L \phi_j(x) \phi_i^{IV}(x) dx = \phi_j(L) \phi_i'''(L) + \int_0^L \phi_j''(x) \phi_i''(x) dx$$

ifadesi elde edilmiştir. Bulunan ifade Denklem (3.47) yerine yazıldığında aşağıdaki eşitliğe ulaşılmıştır.

$$\phi_j(L) \phi_i'''(L) + \int_0^L \phi_j''(x) \phi_i''(x) dx = \beta_i^4 \int_0^L \phi_j(x) \phi_i(x) dx$$

İndislerin yer değiştirmesi durumunda da eşitlik geçerlidir. Bu sebeple, Denklem (3.48) yerine

$$\phi_i(L) \phi_j'''(L) + \int_0^L \phi_i''(x) \phi_j''(x) dx = \beta_j^4 \int_0^L \phi_i(x) \phi_j(x) dx$$

ifadesi yazılmıştır. İki ifadenin taraf tarafa çıkartılması sonucunda

$$\phi_j(L) \phi_i'''(L) - \phi_i(L) \phi_j'''(L) = (\beta_i^4 - \beta_j^4) \int_0^L \phi_i(x) \phi_j(x) dx$$

eşitliğine ulaşılmıştır. Denklem (3.28) ile verilen sınır şartı

$$\phi'''(L) = -\frac{m}{\rho} \phi^{IV}(L)$$

ve Denklem (3.31)'den elde edilen

$$\phi^{IV}(L) = \beta^4 \phi(L)$$

eşitliğinin kullanılması ile

$$\phi'''(L) = -\frac{m}{\rho} \beta \phi(L)$$

ifadesine ulaşılmıştır. i ve j indisi için de geçerli olan üçüncü mertebe türev ifadesinin yerine yazılması ile

$$-\frac{m}{\rho}\beta_i^4\phi_j(L)\phi_i(L) + \frac{m}{\rho}\beta_j^4\phi_i(L)\phi_j(L) = (\beta_i^4 - \beta_j^4) \int_0^L \phi_i(x)\phi_j(x)dx$$

elde edilmiştir. Uygun parantezler altında gerçekleştirilen düzenleme sonucunda ise

$$(\beta_i^4 - \beta_j^4) \left[\int_0^L \phi_i(x)\phi_j(x)dx + \frac{m}{\rho}\phi_i(L)\phi_j(L) \right] = 0$$

eşitliğine ulaşılmıştır.

EK 5. Lagrange İfadesinde Ara İşlemler

Sistemin Lagrangian'ı Denklem (3.53) ile

$$L = \frac{1}{2} I_h \dot{\theta}(t)^2 + \frac{1}{2} \rho \int_0^L \left(x \dot{\theta}(t) + \sum_{i=1}^n \phi_i(x) \dot{q}_i(t) \right)^2 dx \\ + \frac{1}{2} m \left(L \dot{\theta}(t) + \sum_{i=1}^n \phi_i(L) \dot{q}_i(t) \right)^2 \\ - \frac{1}{2} EI \int_0^L \left(\sum_{i=1}^n \phi_i''(x) q_i(t) \right)^2 dx$$

verilmiştir. Denklemde yer alan ikinci kuvvetler uygulandığında elde edilen denklem aşağıda verilmiştir. Gösterim kolaylığı açısından bağlantı göbeği, esnek uzuv, uç nokta kinetik enerjileri ve esnek uzuv potansiyel enerjisi için sırasıyla L_1 , L_2 , L_3 ve L_4 ifadeleri kullanılmış ve açık halleri eşitliğin altında ifade edilmiştir.

$$L = L_1 + L_2 + L_3 - L_4$$

$$L_1 = \frac{1}{2} I_h \dot{\theta}(t)^2$$

$$L_2 = \frac{1}{2} \rho \int_0^L \left[\left(x \dot{\theta}(t) \right)^2 + 2x \dot{\theta}(t) \sum_{i=1}^n \phi_i(x) \dot{q}_i(t) + \left(\sum_{i=1}^n \phi_i(x) \dot{q}_i(t) \right)^2 \right] dx$$

$$L_3 = \frac{1}{2} m \left[\left(L \dot{\theta}(t) \right)^2 + 2L \dot{\theta}(t) \sum_{i=1}^n \phi_i(L) \dot{q}_i(t) + \left(\sum_{i=1}^n \phi_i(L) \dot{q}_i(t) \right)^2 \right]$$

$$L_4 = \frac{1}{2} EI \int_0^L \left(\sum_{i=1}^n \phi_i''(x) q_i(t) \right)^2 dx$$

Bağımsız parametrelerden ilki olan $\theta(t)$ için Lagrange ifadesi ise

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} = \frac{\partial W_{nc}}{\partial \theta}$$

olmaktadır. İlgili türevler aşağıda alınmıştır.

$$\begin{aligned}\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} &= I_h \dot{\theta}(t) + \rho \int_0^L \left(x^2 \dot{\theta}(t) + x \sum_{i=1}^n \phi_i(x) \dot{q}_i(t) \right) dx + mL^2 \dot{\theta}(t) \\ &\quad + mL \sum_{i=1}^n \phi_i(L) \dot{q}_i(t) \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} &= \left(I_h + \rho \frac{L^3}{3} + mL^2 \right) \ddot{\theta}(t) + \sum_{i=1}^n \left[\rho \int_0^L x \phi_i(x) dx + mL \phi_i(L) \right] \ddot{q}_i(t) \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} &= 0 \\ \frac{\partial W_{nc}}{\partial \theta} &= \tau\end{aligned}$$

Böylece $\theta(t)$ değişkenine göre diferansiyel denklem ifadesi

$$\left(I_h + \rho \frac{L^3}{3} + mL^2 \right) \ddot{\theta}(t) + \sum_{i=1}^n \left[\rho \int_0^L x \phi_i(x) dx + mL \phi_i(L) \right] \ddot{q}_i(t) = \tau$$

elde edilmiştir.

$\dot{q}_i(t)$ bağımsız parametrelerine göre Lagrange ifadesi

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = \frac{\partial W_{nc}}{\partial q_i}$$

olmaktadır. İlgili türev ifadeleri ise herhangi i . mod için aşağıda alınmıştır.

$$\begin{aligned}\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} &= \rho \int_0^L (x \dot{\theta}(t) \phi_i(x) + \phi_i(x)^2 \dot{q}_i(t)) dx + m(L \dot{\theta}(t) \phi_i(L) + \phi_i(L)^2 \dot{q}_i(t)) \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} &= \left(\rho \int_0^L x \phi_i(x) dx + mL \phi_i(L) \right) \ddot{\theta}(t) + \left(\rho \int_0^L \phi_i(x)^2 dx + m \phi_i(L)^2 \right) \ddot{q}_i(t) \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} &= -EI \int_0^L (\phi_i''(x))^2 dx q_i(t) \\ \frac{\partial W_{nc}}{\partial q_i} &= 0\end{aligned}$$

Böylece $q_i(t)$ değişkenine göre diferansiyel denklem ifadeleri

$$\left(\rho \int_0^L x \phi_i(x) dx + mL \phi_i(x) \right) \ddot{\theta}(t) + \left(\rho \int_0^L \phi_i(x)^2 dx + m \phi_i(L)^2 \right) \ddot{q}_i(t) + EI \int_0^L (\phi_i''(x))^2 dx q_i(t) = 0$$

elde edilmiştir.

EK 6. MATLAB Programının Kod Yapısı

```
%%---Esnek Uzuv Program---%%
%% Tanımlamalar
close all; clear all; clc;
syms lamda m ro L Ih x A_art C
optstat = 1; % optimizasyon optstat=0(yok) =1(var)
%
%% Esnek uzuv parametreleri
m = 0.2; % Uç kütle
L = 1; % Esnek uzuv uzunluğu
ro = 1; % Esnek uzvun birim uzunluk kütlesi
Ih = 0.04; % Bağlantı göbeği ataleti
EI = 3; % Eğilme rijitliği
%
%% Simülasyon süresi (tson) ve zaman adımı (delta_t)
tson = 10; % Toplam simülasyon süresi
delta_t = 5e-2; % Zaman adımı
t0 = 0;
t1 = delta_t;
tspan = t0:delta_t:t1;
%
%% Dikkate alınan mod sayısı
ModN = 5; % MOD numbers
%
%% Sabit tork parametreleri
const_r1 = 4; const_r2 = 1; const_r3 = 5;
%
%% Başlangıç değerler ve amaç konumlar
tetad = 0.5;
teta(1) = 0;
tetadot(1) = 0;
sd = L*tetad;
%
%% Özdeğerler
Altp1_ozdegerler %Altprogram1
%
%% X(x) terimleri (w(x,t)=X(x)Q(t))
Altp2_PDE_X_terimler %Altprogram2
%
%% M, K & T matrisleri
Altp3_matrisler %Altprogram3
%
%% Başlangıç terimler
Altp4_baslangic_terimler %Altprogram4
%
%% ABC ile r1r2r3 optimizasyonu
tic %zaman ölçüm (baş)
Altp5_EBC_r1r2r3 %Altprogram5
Sonuclar_ABC_r1r2r3=[tval;slt;teta;vlt;tetadot;tau];
Toc %zaman ölçüm (son)
save('Sonuclar_ABC_r1r2r3.mat','Sonuclar_ABC_r1r2r3')
Altp6_EBC_r1r2r3_figurler %Figürler_Altprogram6
%%-----
% Program Sonu
```

```

%Altprogram1
%% Dikkate alınan modlara ait özdeğerler
f_m2=@(lamda) ...
    m*lamda.*(cos(lamda)-cosh(lamda)) + ro*L*(sin(lamda)- sinh(lamda)) +...
    (-(cos(lamda)+cosh(lamda))./(sin(lamda)+sinh(lamda))).* ...
    (m*lamda.*(sin(lamda)-sinh(lamda))-ro*L*(cos(lamda)+cosh(lamda)));
%
cycle=1;
first=0;
last=10;
while cycle==1
    step=100*(last-first)+1;
    lamda_values = linspace(first,last,step);
    f_m2values = f_m2(lamda_values);
    finder = find(diff(sign(f_m2values)));
    modenumber = numel(finder); %MOD
    if modenumber >= ModN
        lamdaroots = NaN(1,modenumber);
        for i = 1:modenumber
            lamdaroots(i) = fzero(f_m2,lamda_values(finder(i) + [0 1]));
        end
        break;
    else
        last=last+1;
    end
end
%
lamda = lamdaroots';
lamda = lamda(1:ModN);
beta = lamda/L;
omega_sqr = ((beta.^4)*EI)/ro;
omega = sqrt(omega_sqr);
%
%Altprogram Sonu

```

```

%Altprogram2
%% Konum fonksiyonları (X_i(x))
for i=1:ModN
    Km(i) = -(cosh(lamda(i))+cos(lamda(i)))/(sinh(lamda(i))+sin(lamda(i)));
    X(i) = C*((cos(beta(i)*x)-cosh(beta(i)*x))+Km(i)*(sin(beta(i)*x)- ...
        sinh(beta(i)*x)));
    orto(i) = int(X(i)^2,0,L)+(m/ro)*subs(X(i)^2,L)-1;
    Csol = vpasolve(orto(i));
    Cval(i) = Csol(1);
    X(i) = Cval(i)*((cos(beta(i)*x)-
cosh(beta(i)*x))+Km(i)*(sin(beta(i)*x)-sinh(beta(i)*x)));
end
%
%% X(L)
for i=1:ModN
    XL(i)=subs(X(i),L);
end
%
%% Xd
for i=1:ModN
    Xd(i)=diff(X(i),1);
end
%
%Altprogram Sonu

```

```

%Altprogram3
%% Atalet (M), Katılık (K) & Sağ Taraf (T) Matrisleri
M = zeros(ModN+1,ModN+1);
K = zeros(ModN+1,ModN+1);
T = zeros(ModN+1,1);
%
M(1,1) = Ih + ((1/3)*ro*(L^3)) + m*L^2;
for ii = 2:ModN+1
    %M terimler
    M(1,ii) = ro*int(x*X(ii-1),0,L) + m*L*subs(X(ii-1),L);
    M(ii,1) = M(1,ii);
    M(ii,ii) = ro*int(X(ii-1)^2,0,L) + m*(subs(X(ii-1)^2,L));
    %K terimler
    K(ii,ii) = EI*int(diff(X(ii-1),2)^2,0,L);
end
%
invMK = M\K;
%
%Altprogram Sonu

```

```

%Altprogram4
%% Başlangıç anında sistemin dinamik değerleri
Qs = [teta(1) zeros(1,ModN)];
Qds = [tetadot(1) zeros(1,ModN)];
z1 = Qs; z2 = Qds; %çözücü için tanımlama
%
%Kontrolcü Terimleri
Minv = inv(M);
m11 = Minv(1,1);
f1 = invMK(1,:)*z1';
%
Ftop = 0; %başlangıç için
for i = 2:ModN
    ftop = invMK(i,:)+ftop;
end
ftop = -ftop;
%
%T Matrisi
T(1) = 0;
tau(1) = T(1);
invMT = M\T;
%
E = 0.5*( Qds*M*Qds' + Qs*K*Qs' );
Edot = tetadot(1)*T(1);
%
%Başlangıç konumlar ve hızlar
vLt(1) = 0;
for i_vLt_b = 1:ModN
    vLt(1) = XL(i_vLt_b)*Qs(i_vLt_b+1)+vLt(1);
end
sLt(1) = L*Qs(1)+vLt(1);
%
vdotLt(1) = 0;
for i_vdotLt_b = 1:ModN
    vdotLt(1) = XL(i_vdotLt_b)*Qds(i_vdotLt_b+1)+vdotLt(1);
end
sdotLt(1) = L*Qds(1) + vdotLt(1);
%
%Altprogram Sonu

```

```

%Altprogram5
%% AltP5_EBC_r1r2r3
r1values(1) = 0;
r2values(1) = 0;
r3values(1) = 0;
gammavalues(1)=0;
%
%while döngüsü terimleri
i_mw    = 2;
hata    = 1;
counter = 0;
eteta=0;
%
while t1<tson
    %Kontrolcü Terimleri
    Minv=inv(M);
    m11=Minv(1,1);
    f1=invMK(1,:)*Qs';
%
    if optstat==1
        AltP5_1_EBC_r1r2r3_ABCopt %ABC Algoritması ile optimizasyon
        r1values(i_mw)=r1;
        r2values(i_mw)=r2;
        r3values(i_mw)=r3;
        T(1)=( r1*(tetad-teta(i_mw-1)) + r2*f1 - r3*tetadot(i_mw-1) ) / ...
            (1+r2*m11);
    else
        r1values(i_mw)=const_r1;
        r2values(i_mw)=const_r2;
        r3values(i_mw)=const_r3;
        T(1)=( const_r1*(tetad-teta(i_mw-1)) + const_r2*f1 ...
            - const_r3*tetadot(i_mw-1) ) / (1+const_r2*m11);
    end
    tau(i_mw) = T(1);
    invMT = M\T;
%
    if ModN == 2
        [t,z] = ode23s(@(t,z) tqsolverMOD02(t,z,invMK,invMT),tspan,[Qs Qds]);
    elseif ModN == 3
        [t,z] = ode23s(@(t,z) tqsolverMOD03(t,z,invMK,invMT),tspan,[Qs Qds]);
    elseif ModN == 5
        [t,z] = ode23s(@(t,z) tqsolverMOD05(t,z,invMK,invMT),tspan,[Qs Qds]);
    elseif ModN == 10
        [t,z] = ode23s(@(t,z) tqsolverMOD10(t,z,invMK,invMT),tspan,[Qs Qds]);
    end
%
    tval(i_mw) = t1;
%
    %Yeni başlangıç şartları
    Qs = z(end,1:ModN+1);
    Qds = z(end,ModN+2:2*(ModN+1));
    z1 = Qs; z2 = Qds; %çözücü için tanımlama (sonraki döngüde kullanılacak)
%
    teta(i_mw) = Qs(1);
    tetadot(i_mw) = Qds(1);
    vLt(i_mw) = 0;

```

```

for i_vLt = 1:ModN
    vLt(i_mw) = XL(i_vLt)*Qs(i_vLt+1)+vLt(i_mw);
end
sLt(i_mw) = L*Qs(1)+vLt(i_mw);
%
vdotLt(i_mw) = 0;
for i_vdotLt = 1:ModN
    vdotLt(i_mw) = XL(i_vdotLt)*Qds(i_vdotLt+1)+vdotLt(i_mw);
end
sdotLt(i_mw) = L*Qds(1) + vdotLt(i_mw);
%
fprintf('m=%g Zaman=%g teta=%g\n',m,t1,teta(i_mw));
%
if t1<tson
    t0 = t1;
    t1 = t1+delta_t;
    tspan = t0:delta_t:t1;
    i_mw = i_mw+1;
else
    break;
end
%
end
%
%Altprogram Sonu

```


ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Sezgin ESER
Doğum Yeri ve Tarihi : YOZGAT - 21.08.1988
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Turhan Tayan Anadolu Lisesi (2002 - 2006)
Lisans : Karadeniz Teknik Üniversitesi (2007 - 2012)
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi (2013 - 2016)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Bursa Uludağ Üniversitesi (2014 - 2018)
Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi (2018 - Devam)

İletişim (e-posta) : sezgineser@kmu.edu.tr
sezgineser88@gmail.com

Yayımları :

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

Eser, S., & Telli Çetin, S. (2022). Optimum control of a flexible single link manipulator with Artificial Bee Colony Algorithm. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 236(7), 3731-3742. (Yayın No: 7688378)

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler :

Çırak, B., Oğulata, M., O., Eser, S., Sariaya O. (2019). The Controlling Parameters Efficiency to Quality in Biscuit Product Process. International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'19) (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5596022)

Çırak, B., Oğulata M., O., Eser, S., Özdal, A., Karapınar, G. (2019). Parameter Optimization sing Taguchi Methods for Surface Quality of Dough Knives. The International Aluminium-Themed Engineering and Natural Sciences Conference, (IATENS'19), (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:5596249)

Çırak, B., Oğulata M., O., Eser, S., Karapınar, G., Gür, Ö., (2019). Design Analysis and Mathematical Modeling of End - Effector in Robot Manipulators. The International Aluminium-Themed Engineering and Natural Sciences Conference, (IATENS'19) (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:5596073)

Çırak, B., Oğulata M., O., Eser, S., İzler, T., Gür, Ö., (2019). Impedance Control of Obstacles Avoidance Using Arduino Controller. 1st International Conference on

Environment, Technology and Management, (ICETEM) (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:5595916)

Çırak, B., Oğulata M., O., Eser, S., Topal, E., Yıldırım, M., (2019). The Controlling Parameters Efficiency to Quality in Turkish Mesir Maccun Process. International Conference on Computer Technologies and Applications in Food and Agriculture (ICCTAFA) (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:5596143)

Çırak, B., Oğulata M., O., Eser, S., Topal, E., Yıldırım, M., Özdal, A., (2019). The controlling and modeling of extruder temperature in 3d printer. 1st International Symposium on Implementations of Digital Industry and Management of Digital Transformation (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:5596226)

Çırak, B., Oğulata M., O., Eser, S., Özdal, A., Topal, E., (2019). Design and Construction of the Grinding Machine to Evaluate Stale Bread: A Study for Waste Economy. International Turkic World Congress on Science and Engineering, (UTUFEM'19) (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:5596204)

Eser, S., Telli Çetin, S., (2018). Bir Makaslı Kaldırıcının Dinamik ve Sanki Statik Durum Analizlerinin Karşılaştırılması. ISIDE2018, 3rd International Symposium on Industrial Design Engineering, 460-464. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:4668590)

Eser, S., Telli Çetin, S., (2018). Farklı Ön Cam Silecek Mekanizmalarının Karşılaştırılması ve Yeni Bir Silecek Mekanizması Tasarımı. ISIDE2018, 3rd International Symposium on Industrial Design Engineering, 235-237. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:4668478)

Çırak, B., Oğulata M., O., Eser, S., Ünüvar, Y., (2018). Applications of 3D Printing Technology in Dentistry. International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'18) (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:4682830)

Çırak, B., Oğulata M., O., Eser, S., Ünüvar, Y., (2018). Energy Profile of Karaman. International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'18) (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:4682897)

Sevim, İ., Gültekin, N., Mayda, M., Kilit, M., Tolu, M., E., Eser, S., (2018). Farklı Tork Değerlerinde ve Çeşitli Devirlerde Çalıştırılan Kavrama Diskindeki Aşınma-Sıcaklık Değişiminin İncelenmesi. 9th International Automotive Technologies Congress, OTEKON 2018, 1005-1012. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:4694396)

Eser, S., Telli Çetin, S., Kopmaz, O., (2017). Mathematical Modeling of the Door Closer Mechanism. ICENTE'2017-International Conference on Engineering Technologies (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:4124880)

Türkkan, Y., A., Eser, S., Şefkat, G., (2017). Değişken Yol Pürüzlülüklerinin Tam Taşıt Modeline Etkileri. ICADET 2017, 358-362. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:3977422)

Eser, S., Telli Çetin, S., (2016). Makaslı Kaldırma Platformlarının Farklı Çalışma Parametrelerine Göre Kuvvet Analizi. 1st International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:4488912)