



İSKENDERUN TEKNİK
ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

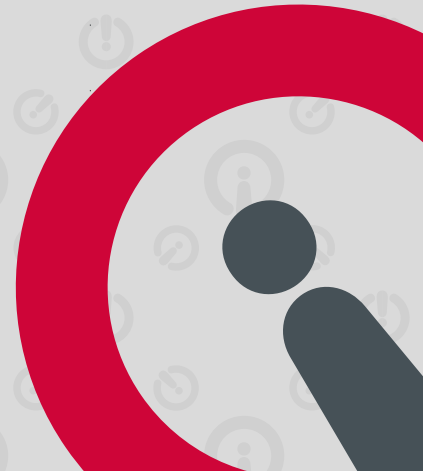
**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**ESNEK ROBOT KOL
SİSTEMİ İÇİN LQR DENETLEYİCİ
PARAMETRELERİNİN
METASEZGİSEL ALGORİTMALAR
KULLANILARAK BELİRLENMESİ**

Semih ÖZKAYA

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

OCAK 2022





**ESNEK ROBOT KOL SİSTEMİ İÇİN LQR DENETLEYİCİ
PARAMETRELERİNİN METASEZGİSEL ALGORİTMALAR
KULLANILARAK BELİRLENMESİ**

Semih ÖZKAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2022

Semih ÖZKAYA tarafından hazırlanan “ESNEK ROBOT KOL SİSTEMİ İÇİN LQR DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN METASEZGİSEL ALGORİTMALAR KULLANILARAK BELİRLENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Çağlar CONKER

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum.~~

.....

.....

Başkan: Dr. Öğr. Üyesi Ali KILIÇ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gaziantep Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum.~~

.....

.....

Üye: Doç. Dr. Mustafa Kaan BALTACIOĞLU

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum.~~

.....

.....

Tez Savunma Tarihi: 17/01/2022

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

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

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

İmza

Semih ÖZKAYA

.../.../...

ESNEK ROBOT KOL SİSTEMİ İÇİN LQR DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN
METASEZGİSEL ALGORİTMALAR KULLANILARAK BELİRLENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Semih ÖZKAYA

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
Ocak 2022

ÖZET

Yapılan bu çalışma, hem esnek robot kol sisteminin hareket kontrolü için tasarlanmış LQR denetleyicisi hem de kontrol parametrelerinin optimizasyonu hakkında analizler sunmaktadır. Bu optimizasyon çalışması ile esnek robot kol sistemi istenilen açısal hedefe en hızlı şekilde gelirken artık titreşimlerde ortadan kalkar. Titreşimli parçacık sistemi yeni bir meta-sezgisel yaklaşımdır ve ilk kez bu çalışmada LQR'a ait parametrelerin (ağırlık matrislerinin) ayarlanmasında kullanılmıştır. Çalışmada kullanılacak metodun etkinliği, çok sık kullanılan optimizasyon algoritmalarından olan genetik ve yapay arı kolonisi algoritması gibi algoritmalar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu çalışma, kullanılan sistem için kontrol yanıtının parametrelerini dikkate alan yeni çoklu amaç fonksiyonu önermektedir. Optimizasyon algoritmalarına ait parametreler geniş bir arama uzayı vasıtasıyla belirlenmiştir. Her bir algoritma dört farklı popülasyon/parçacık değeri ile incelenmiş ve 100 iterasyon için sonuçlar elde edilmiştir. GA, ABC ve VPS algoritmalarından elde edilen en iyi kontrol sonuçları, esnek robot kol sistemine uygulanmıştır. Uygulama sonrası teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda istenilen en iyi kontrol sonuçlarının VPS tabanlı LQR denetleyicisi ile elde edildiği görülmüştür. Ayrıca yapılan bu çalışma, optimizasyon algoritmalarındaki teorik uygulamaya yönelik ayrıntıları gösterecek şekilde düzenlenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Esnek robot kol sistemi, lqr, artık titreşim, genetik algoritma, yapay arı kolonisi algoritması, titreşimli parçacık algoritması
Sayfa Adedi : 60
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Çağlar CONKER

DETERMINATION OF LQR CONTROLLER PARAMETERS FOR FLEXIBLE LINK
MANIPULATOR USING META INTUITIONAL ALGORITHMS

(M.Sc. Thesis)

Semih ÖZKAYA

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

January 2022

ABSTRACT

This study presents analyzes on both the LQR controller designed for motion control of the flexible robot arm system and the optimization of the control parameters. With this optimization work, the flexible robot arm system reaches the desired angular target in the fastest way, while residual vibrations are eliminated. The vibrating particle system is a new meta-heuristic approach and was used for the first time in this study to adjust the parameters (weight matrices) of the LQR. The effectiveness of the method to be used in the study was compared with algorithms such as genetic and artificial bee colony algorithm, which are among the most frequently used optimization algorithms. In addition, this study proposes a new multi-objective function that takes into account the parameters of the control response for the system used. The parameters of the optimization algorithms were determined by means of a large search space. Each algorithm was examined with four different population/particle values and results were obtained for 100 iterations. The best control results obtained from GA, ABC and VPS algorithms are applied to the flexible robot arm system. After the application, the theoretical and experimental results were compared. As a result of the comparison, it was seen that the best control results were obtained with the VPS-based LQR controller. In addition, this study is organized to show the details of the theoretical application in optimization algorithms.

Key Words : Flexible link manipulator system, residual vibration, genetic algorithm, artificial bee colony, vibrating particle system
Page Number : 60
Supervisor : Asst. Prof. Çağlar CONKER

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim boyunca tecrübesi ile yaptığım çalışmalarına yön veren, tez konumun belirlenmesi ve yardımlarını her daim eksik etmeyen değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Çağlar CONKER'e, tez yazımında ve araştırmalarımnda desteklerini benden esirgemeyen değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Hasan Hüseyin BİLGİÇ'e saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarımın sürecinde her daim desteğini esirgemeyen değerli Sayın Müdürüm Ekrem Altınözlü'ye, tez yazımında yardımlarını eksik etmeyen değerli arkadaşım Onur Özdeş'e ve çalışmalarımnda bana olan desteklerini ve güvenlerini her zaman hissettiğim, aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. MATERYAL VE METOT.....	8
2.1. Esnek Robot Kol Sisteminin Modellenmesi	9
2.1.1. Doğrusal kuadratik regülatör (lqr) kontrolör tasarımı	23
2.2. Yapay Zeka Optimizasyon Teknikleri.....	25
2.2.1. Metasezgisel arama algoritmaları	27
2.3. LQR Kontrolör Çok Amaçlı Optimizasyonu	36
3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	38
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	54
KAYNAKLAR	56

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. ERK sistemi parametreleri ve sayısal değerleri (Quanser Inc. 2011)	10
Çizelge 2.2. Hesaplanan sistem parametreleri	16
Çizelge 2.3. Klasik ve Bulanık Mantık Arasındaki Farklar	25
Çizelge 3.1.10 PPS için GA çaprazlama fraksiyon oranı, ABC modifikasyon oranı ve VPS titreşim sabiti için sayısal değerlerin belirlenmesi	39
Çizelge 3.2. 20 PPS için GA çaprazlama fraksiyon oranı, ABC modifikasyon oranı ve VPS titreşim sabiti için sayısal değerlerin belirlenmesi	40
Çizelge 3.3. 30 PPS için GA çaprazlama fraksiyon oranı, ABC modifikasyon oranı ve VPS titreşim sabiti için sayısal değerlerin belirlenmesi	41
Çizelge 3.4. 40 PPS için GA çaprazlama fraksiyon oranı, ABC modifikasyon oranı ve VPS titreşim sabiti için sayısal değerlerin belirlenmesi	42
Çizelge 3.5. GA, ABC ve VPS algoritmaları 10 PPS için optimizasyon sonuçları.....	44
Çizelge 3.6. GA, ABC ve VPS algoritmaları 20 PPS için optimizasyon sonuçları.....	45
Çizelge 3.7. GA, ABC ve VPS algoritmaları 30 PPS için optimizasyon sonuçları.....	45
Çizelge 3.8. GA, ABC ve VPS algoritmaları 40 PPS için optimizasyon sonuçları.....	45
Çizelge 3.9. ERK sisteminden elde edilen deneysel veriler	52

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Açık Çevrim Kontrol Sistemleri İçin Blok Diyagramı.....	3
Şekil 1.2. Kapalı Çevrim Kontrol Sistemleri İçin Blok Diyagramı.....	3
Şekil 2.1. ERK sisteminin mekanik modeli ve şematik gösterimi.....	8
Şekil 2.2. SRV02 DC motorun yapısı ve bileşenleri (Quanser Inc. (2011).....	14
Şekil 2.3. Esnek kol MATLAB/Simulink modeli.....	15
Şekil 2.4. Çalışmaya ait teorik ve deneysel grafikler.....	16
Şekil 2.5. İkinci derece bir sistem için kapalı çevrim kontrol blok diyagramı	20
Şekil 2.6. İkinci derece bir sistem için birim basamak giriş cevabı (Bilgiç, 2018)	21
Şekil 2.7. Bulanıklaştırma ve durulaştırma birimli bulanık sistem (Yılmaz ve Aslan, 2005)	26
Şekil 2.8. Girdi, Gizli Tabaka ve Çıktı Katmanından Oluşan Yapay Sinir Ağı	27
Şekil 2.9. Genetik Algoritma (GA) program akış şeması.....	29
Şekil 2.10. Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritması program akış şeması	31
Şekil 2.11. VPS algoritması program akış şeması	34
Şekil 2.12. LQR kontrolöre ait parametrelere ait blok diyagramı	37
Şekil 3.1. GA, ABC ve VPS algoritmalarının 10 PPS için yakınsama grafiği.....	40
Şekil 3.2. GA, ABC ve VPS algoritmalarının 20 PPS için yakınsama grafiği.....	41
Şekil 3.3. GA, ABC ve VPS algoritmalarının 30 PPS için yakınsama grafiği.....	42
Şekil 3.4. GA, ABC ve VPS algoritmalarının 40 PPS için yakınsama grafiği.....	43
Şekil 3.5. Esnek kol servo açısı pozisyonu simülasyon sonuçları 10 PPS değeri için ...	46
Şekil 3.6. Esnek kol servo açısı pozisyonu simülasyon sonuçları 20 PPS değeri için ...	46
Şekil 3.7. Esnek kol servo açısı pozisyonu simülasyon sonuçları 30 PPS değeri için ...	47
Şekil 3.8. Esnek kol servo açısı pozisyonu simülasyon sonuçları 40 PPS değeri için ...	47

Şekil**Sayfa**

Şekil 3.9. ERK uç sapma sonuçlarına yönelik optimizasyonun GA, ABC ve VPS algoritmaları ile 10 PPS değeri için simülasyonu	48
--	----



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Robotik Sistemler (Resourcesnews)	1
Resim 1.2. Otomotiv Sanayide Kullanılan Robotik Sistemler (Demircelikstore).....	2
Resim 1.3. Vinç Sistemleri (Guralpvinc).....	2
Resim 2.1. ERK düzeneği ve bileşenleri.....	9



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

B_{eq}	Eşdeğer viskoz sönüm oranı
f_{maks}	Maksimum motor voltaj frekansı
g	Yerçekimi ivmesi
I_{maks}	Maksimum motor giriş akımı
$J_{m,rotor}$	Rotor atalet momenti
K_g	Planet dişli kutusu dişli oranı
k_m	Zıt emk sabiti
k_t	Tork sabiti
m_l	Esnek robot kol ağırlığı
R_m	Motor armatür direnci
ω_{maks}	Maksimum motor hızı
L_m	Motor armatür indüktansı
J_{eq}	Büyük ve Küçük dişli eşdeğer atalet momenti
J_l	Esnek robot kol atalet momenti
L_l	Esnek robot kol uzunluğu
K_{enc}	Enkoder hassasiyeti
K_{tach}	Takometre hassasiyeti

Kısaltmalar**Açıklamalar****ABC**

Yapay Arı Kolonisi

BP

Kötü Parçacık

ERK

Esnek Robot Kol

GA

Genetik Algoritma

GP

İyi Parçacık

HP

En İyi Konum

LQR

Doğrusal Kuadratik Regülatör

PID

Oransal-İntegral-Türevsel

VPS

Titreşimli Parçacık Sistemi

1. GİRİŞ

Günümüzde robotik ve otomasyon sistemlerinin hareket kontrollerine yönelik çalışmalar, birçok araştırmmanın odak noktası haline gelmiştir. Endüstri alanında, üretkenliğin artırılabilmesi ancak hızlı üretim ile sağlanabilmektedir. Hızlı üretim ihtiyacıyla kullanılan sistemlerde artık titreşimlerin önlenmesi için rijit makine elemanları kullanılmaktadır. Rijit makine sistemleri; ağır yapılarıyla nedeniyle her ne kadar hassas hareket kontrollerini sağlayabilse de yüksek kapasiteli manipülatör ihtiyacı ve istenilen hıza bağlı olarak yüksek enerji tüketimi gibi olumsuz durumlar ortaya çıkmaktadır. İmalat endüstrisi, ihtiyaç duyulan yüksek hız ve düşük maliyet nedeniyle esnek ekipman kullanımına yönelmektedir (Rübmänn ve diğerleri, 2015). Ancak, ihtiyaç duyulan hız gereksinimi nedeniyle sistemlerde artık titreşimler oluşmaktadır. Bu husus robotik sistemlerde hareket kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, ihtiyaç duyulan hıza bağlı olarak artık titreşimlerin azaltılması için sistemdeki dengenin ve hareket kontrolünün sağlanmasına istinaden ortaya çıkarılan uygulamalar önem kazanmıştır. Bu uygulamalar; robot kontrolörler (Ölgün ve Tilki, 2020), vinçler (Jarzebowska, Augustynek ve Urbas, 2018), uzay araçları (Kumar, Pathak ve Sukavanam, 2013) vb. birçok alan esnek robot kol (ERK) sistemlerinde kullanılmaktadır (Conker, Kilic, Mistikoglu, Kapucu ve Yavuz, 2014; Bilgic, Sen, Yapici, Yavuz ve Kalyoncu, 2021). Robotik sistemlere ait otomotiv sanayide kullanılan örnek robotlar ve vinç sistemleri Resim 1.1, 1.2 ve 1.3'te sunulmaktadır.



Resim 1.1. Robotik Sistemler (Resourcesnews)

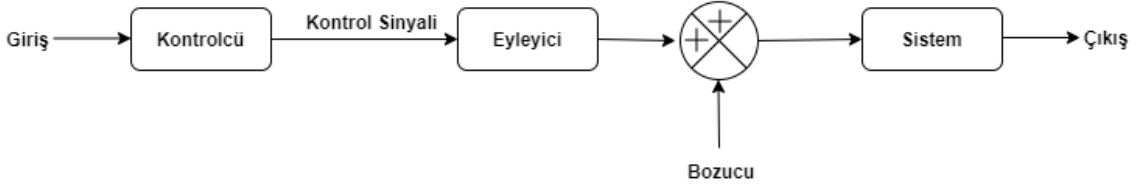


Resim 1.2. Otomotiv Sanayide Kullanılan Robotik Sistemler (Demircelikstore)



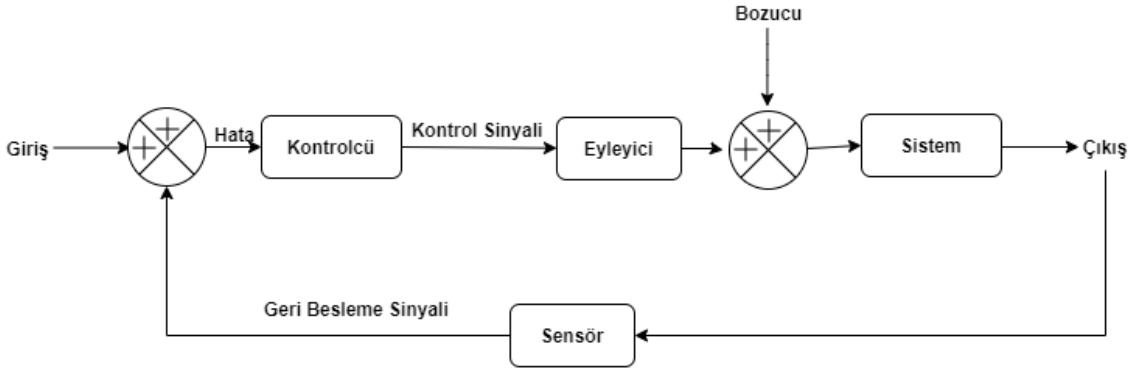
Resim 1.3. Vinç Sistemleri (Guralpvinc)

Esnek robot kol sistemleri, birçok kontrol tekniğinin performansını değerlendirmek için kullanılmaktadırlar. Sistemin denetimi temel olarak, ileri besleme (açık çevrim) ve geri besleme (kapalı çevrim) kontrol ile sağlanabilmektedir. Açık çevrim kontrol sistemlerinde sistem çıktısının referans girdi sinyali üzerinde bir etkisi bulunmamaktadır. Açık çevrim sistemler; tasarımlarının basit olmasının yanı sıra sensör ve algılayıcılara gereksinim duymamaktadır. Ancak hassasiyet gerektiren sistemlerde uygulanması zor ve bozucu girişlere karşı duyarlılığı bulunmaktadır. Sistem düzenekleri çıkış değerlerinden etkilenmemektedir. Ayrıca sistemde verilen referans parametlerine göre kontrol işleminin yapıldığı sistemlerdir. Giriş verileri önceden belirlenmiş referans değerleri üzerinden sistemde işlenmektedir. Bu nedenle hassasiyet gerektirmeyen sistemlerde kullanılan kontrol sistemidir. Sisteme etkiyen bozucu sinyallerin algılanması öncesinde planlanmış referans değeri ile sağlanabilmektedir (Elektrikde). Açık çevrim kontrol sistemine ait blok diyagramı Şekil 1.1’de sunulmaktadır.



Şekil 1.1. Açık Çevrim Kontrol Sistemleri İçin Blok Diyagramı

Kapalı çevrim kontrol sistemlerinde ise sistem çıkış sinyalleri, giriş sinyallerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Kapalı çevrim kontrol sistemleri sistem çıkış sinyali ile referans girdi sinyalini karşılaştırılarak hataları sıfırlanmaya çalışılmaktadır. Kapalı çevrim sisteminde, hassas kontroller yapılabilme ve hızlı çalışma sağlanabilmektedir. Ancak kapalı çevrim kontrol sistemlerinin tasarımları açık çevrim kontrol sistemlerine göre daha zordur. Ayrıca kapalı çevrim kontrol sistemlerinde sistem çıktılarını ölçmek ve gerekli kontrol sinyallerini üretmek için ek sensör ve hareket üreteçlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum da kapalı çevrim kontrol sistemlerini açık çevrim kontrol sistemlerine göre hem daha karmaşık hem de daha yüksek maliyetli hale getirmektedir. Kapalı çevrim kontrol sistemine ait blok diyagramı Şekil 1.2’de sunulmaktadır.



Şekil 1.2. Kapalı Çevrim Kontrol Sistemleri İçin Blok Diyagramı

Hassas konumlandırma sağlamak ve artık titreşimlerin yarattığı etkileri azaltmak için ERK sistemlerine uygun bir kontrolör seçilmesi gereklidir. Bunun için açık çevrim kontrolcülerin yetersiz kaldığı durumlar nedeniyle kapalı çevrim uygulaması olan LQR (doğrusal kuadratik regülatör) kontrolcü tasarımı yapılması amaçlanmıştır. Geri beslemeli lineer kontrol yöntemlerinden olan LQR (doğrusal kuadratik regülatör) ve PID (oransal-integral-türevsel) kontrolörler, Esnek Robot Kol kontrollerinde sıklıkla kullanılmaktadır (Alandoli, Rashid ve Sulaiman, 2017). PID kontrolörler birçok kontrol problemlerinin çözümü için sıklıkla tercih edilmektedir. PID kontrolörde, çözüm parametrelerinin ayarlamalarının yapılması

gerekmektedir (Mallikarjunaiah ve Reddy, 2013). Hassas konumlandırma veya hız kontrolü gibi uygulamalarda parametre ayarlamaları çözümün performansı etkileyen temel kriteri oluşturduğundan önem arz etmektedir. Lineer kontrol yöntemlerinden biri olan LQR kontrolör, optimal durum-uzay geri besleme yöntemidir. LQR kontrol sinyali, durum-uzay matrisi ve performans indeksini kullanılarak ayarlanmaktadır. LQR performansını etkileyen en önemli etken uygun ağırlık matrislerinin (Q ve R değerleri) belirlenmesidir. PID ve LQR kontrolörler için kontrol parametrelerinin ayarlanması deneme/yanılma yöntemi sağlanmaktadır. Kontrol parametrelerinin belirlenmesinde deneme/yanılma yöntemi, vakit almakla beraber en iyi çözüm sonucu için güvence verememektedir (Woo, Daud, Tasirin, ve Talib, 2007).

Literatürde, esnek robot kol kontrolü için birçok doğrusal olmayan kontrol yöntemi mevcuttur. Bahsi geçen doğrusal olmayan kontrol yöntemlerine örnek olarak Geri adımlamalı (Gholipour, Khosravi ve Mojallali, 2013), Geri beslemeli doğrusallaştırma (Pedro, Dangor, Dahunsi ve Ali, 2014), kayan kipli kontrol (Xu ve Zhang, 2017), gecikmeli geri besleme (Zhang, Kimura ve Fukuoka, 2006), geri besleme stabilizasyonu (Jnifene, 2007) ve H_{∞} (Wilson, Robinett, Parker ve Starr, 2002) kontrolörleri verilebilmektedir. Bu sistemler esnek robot kol sistemlerinin kontrolünde kullanılmıştır. Bu kontrol yöntemleri, doğrusal olmayan sistemlerde oluşan stabilizasyon problemlerinde avantajlı olduğu gibi çeşitli kontrol yöntemleri açısından da karmaşık yapıya sahiptir. Esnek robot kol sistem kontrolü için yapay sinir ağları (Hakimpoor, Arshad, Tat, Khani ve Rahmandoust, 2011) ve bulanık mantık (Talebi, Khorasani ve Patel, 1998) gibi kontrol yöntemleri önerilmiştir. Esnek robot kol kontrol sistemlerinde bulanık mantık tabanlı kayan kip kontrolü (Mirshekaran, Piltan, Esmaceli, Khajeaian ve Kazeminasab, 2013), bulanık mantık tabanlı PID kontrolü (Tinkir, Önen ve Kalyoncu, 2010) ve yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık kontrolü (Siddique ve Tokhi, 2002) gibi birden fazla kontrol yöntemleri kullanarak hibrit kontrol teknikleri geliştirilmiştir. Bu teknikler kontrolcü performanslarını iyileştirmede kullanılmıştır. Yapay zeka tabanlı metasezgisel optimizasyon algoritmaları kontrolör tasarımlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Bilgic, Conker ve Yavuz, 2021). Sıklıkla kullanılan metasezgisel algoritmalarının başlıcaları; Genetik algoritma (Tabassum ve Mathew, 2014), Büyük Patlama Büyük Çöküş Algoritması (Erol ve Eksin, 2006), yapay arı kolonisi algoritması (Bingul ve Karahan, 2018), Benzetimli Tavlama Algoritması (Lutfiyya, McMillin, Poshyanonda ve Dagli, 1992), Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Dorigo, Birattari ve Stutzle, 2006), Armoni Arama Algoritması (Geem, Kim ve Loganathan., 2001),

Diferansiyel Gelişim Algoritması (Keskintürk, 2006), Ateşböceği Algoritması ve Bozkurt algoritması (Şen ve Kalyoncu, 2020) gibi mühendislik problemlerinin optimizasyonunda çözüm sağlayan algoritmalara örnek olarak verilebilir.

Sunulan çalışmada, ERK sistemi için LQR kontrol ağırlık matrislerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyona ilişkin GA, ABC ve VPS algoritmalarının tasarım ve performans analizlerini ise çalışmada gösterilmektedir. Bahsi geçen algoritmaların kontrolcü performanslarını karşılaştırılabilmek için farklı popülasyon/parçacık sayıları (PPS) kullanılmıştır. Farklı PPS değerleri ile en iyi elde edilen optimizasyon sonuçları ise ayrıca performans kriterlerini incelemek için kullanılmıştır. Çalışmadaki elde edilen sonuçlar; optimal amaç fonksiyonu değeri, optimizasyon süresi ve ideal PPS değerine göre karşılaştırılmış olup tablo ve grafiklerle sunulmuştur. Algoritmalar ile elde edilen en iyi optimizasyon sonuçları, ERK sistemine uygulanmıştır. Elde edilen kol servo açısı ve esnek kol uç sapma değerleri; yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve aşma değeri gibi kriterler dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Çalışmada Titreşimli Parçacık Algoritması kullanılarak performans değerleri incelenmiş olup uygun kontrolör parametrelerinin belirlenmesi sağlanmıştır. Sistemin optimizasyonu sonucu, Titreşimli Parçacık Algoritmasının, düşük PPS değeri ile Genetik Algoritma ve Yapay Arı Kolonisi algoritmalarına göre daha hızlı bir yakınsama değerini sağlamıştır. Bunun yanı sıra GA ve ABC algoritmalarından daha kısa sürede işlemi tamamladığı görülmüştür. Esnek Robot Kol sisteminde kontrol yanıtının parametrelerini sistem performansı açısından önemlidir. Bu nedenle kontrol parametrelerini dikkate alan amaç fonksiyonu önerilmiştir.

Tezin yapısı

Tez dört bölümden oluşmaktadır.

Giriş bölümünde;

- İmalat sanayide robotik sistemlerin kullanım alanları ana hatları ile gösterilmiş olup sistemlerden beklenen kriterler belirtilmiştir.
- Esnek robot kol sistemlerinin kullanım alanları, avantaj ve dezavantajları ile ilgili temel bilgiler verilmiştir.

- Temel kontrol yaklaşımları olan açık çevrim ve kapalı çevrim kontrol sistemleri ana hatları ile anlatılmıştır.
- Tezin gerekçesi belirtilmiş olup sisteme uygun denetleyici seçimi tartışılmıştır.
- Esnek robot kol sistemi için literatürde bulunan farklı kontrol yaklaşımları ile algoritma yapıları tartışılmıştır.

Materyal ve metot bölümünde;

- Çalışmada kullanılacak esnek robot kol sistemi açıklanmıştır. Sistemin modeli MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur.
- Sonrasında sistemin elemanları, kontrol tipleri ve sistemin parametrelerinin belirlenmesine ilişkin teorik bilgilere yer verilmiştir.
- Ayrıca sisteme ait parametrelerinin belirlenmesinde yardımcı olan elektrik denklemleri, mekanik denklemler, elektriksel ve mekanik denklemlerin birleşimi ve ikinci derece sistem denklemleri gösterilmiştir.
- Esnek Robot Kol (ERK)'a ait sistemin modellemesi ve modelleme için kullanılan yöntemler belirtilmiştir. Sistem parametreleri bu bölümde belirtilmiş olup simülasyon ve deneysel sonuçlar arasındaki uyumluluk gösterilmiştir.
- Doğrusal Kuadratik Regülatör(LQR) tasarımı sunulmuştur.
- Çalışmanın ana fikri olan yapay zeka sistemleri ve günümüzde kullanılan yapay zeka algoritma uygulamaları örnekler ile tanıtılmıştır.
- Sunulan çalışmada metasezgisel algoritmalara yer verildiğinden bu hususa ilişkin örnekler ve tanımlamalar gösterilmiştir.
- Teze konu olan GA, ABC ve VPS algoritmaları tanımlanmış olup avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir.

Araştırma bulguları ve tartışma bölümünde;

- Önerilen kontrol sistemi, yapısı ve tasarım aşamaları detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Sistem performansı Esnek Robot Kol Sistemi (ERK) üzerinde doğrulanarak sistemin başarısı ölçülmüştür.
- Ayrıca sistemin amaç fonksiyon değerleri bu bölümde tartışılmış ve algoritmalar arasındaki avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir.

- Ardından Esnek Robot Kol için LQR kontrolcü tasarımı, GA, ABC ve VPS algoritması ile optimizasyon ve simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Simülasyon çalışmaları incelenmiş olup deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.
- İncelenen ve tartışılan metotların simülasyon ve deneysel sonuçları, grafikler ve tablolar halinde sunulmuştur.

Sonuç ve öneriler bölümünde;

- Yapılan çalışmalarda incelenen ve önerilen metotlar için değerlendirilmiş olup elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

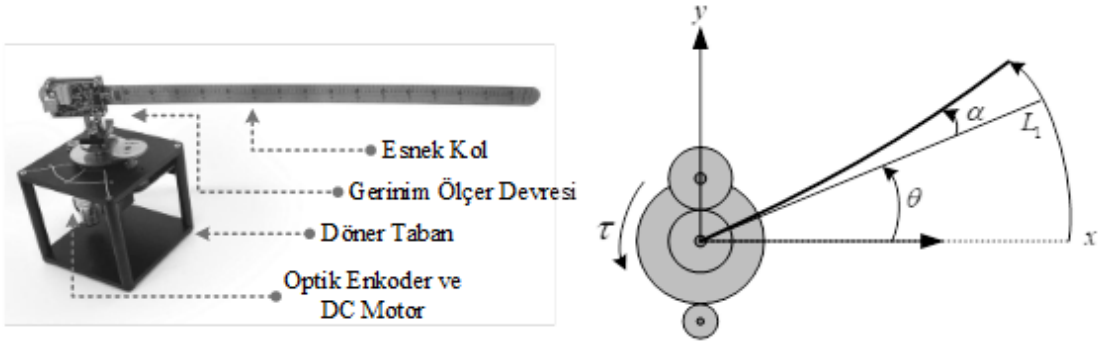


2. MATERYAL VE METOT

Çalışmada gösterilen LQR (optimize edilen) için yapılan deneysel çalışmalar, esnek robot kol (ERK) sisteminde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan ERK sistemi Quanser firması tarafından üretilmiştir. Sisteme ait bileşenler ve gerekli parametre değerleri Quanser firması tarafından sağlanmıştır (Quanser, 2012b). Deney düzeneği;

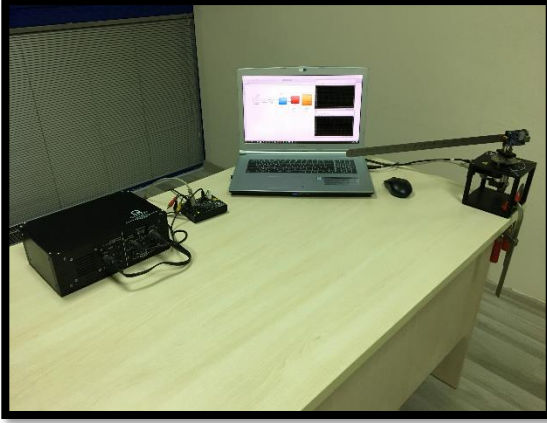
- Esnek kol (uzuv),
- Servo motor
- Enkoder (açısal konumun ölçümünü yapmaktadır)'den oluşmaktadır.

Elastik robot kol açısı; sistem içindeki motor milinin yakınına bulunan ampermetre ile ölçülmektedir. Deney düzeneğinin genel görünümü ve bileşenleri Resim 2.1'de sunulmaktadır. Aşağıdaki şekilde belirtilen α , θ ve τ değerleri; sırasıyla ERK sisteminin uç sapma açısını, servo motor açısını ve motor tarafından üretilen torku temsil etmektedir.



Şekil 2.1. ERK sisteminin mekanik modeli ve şematik gösterimi

a) Sistem Görünümü



b) Esnek robot kol



c) Power Supply



d) Kontrol kartı



Resim 2.1. ERK düzeneği ve bileşenleri

2.1. Esnek Robot Kol Sisteminin Modellenmesi

ERK sisteminin dinamik modeli, Lagrange yöntemi ile elde edilmiştir. Lagrange yöntemi; ERK gibi çoklu eklemlere sahip karmaşık robotik sistemler için kullanılabilir. ERK sisteminin hareket denklemleri Eş. 2.1 ve Eş. 2.2'de gösterilmektedir.

$$\ddot{\theta} = -\frac{B_{eq}}{J_{eq}} \dot{\theta} + \frac{K_s}{J_{eq}} \alpha + \frac{1}{J_{eq}} \tau \quad (2.1)$$

$$\ddot{\alpha} = -\frac{B_{eq}}{J_{eq}} \dot{\theta} + K_s \left(\frac{J_{link} + J_{eq}}{J_{link} J_{eq}} \right) \alpha - \frac{1}{J_{eq}} \tau \quad (2.2)$$

Quanser tarafından yayınlanan ürün kataloğu üzerinden Esnek Robot Kol sisteminin matematiksel modeli hakkında ayrıntılı bilgilere ulaşılabilmektedir (Quanser Inc. 2011). Çizelge 1’de deney düzeneğine ait değerleri Quanser firması tarafından sağlanan parametreler gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. ERK sistemi parametreleri ve sayısal değerleri (Quanser Inc. 2011)

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

Servo motor voltajına göre servo ve bağlantının hareketlerini tanımlayan denklemler, yani dinamikler, Eş. 2.3’de gösterilen Euler-Lagrange denklemi kullanılarak elde edilmiştir.

$$\frac{\partial^2 L}{\partial t \partial q_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (2.3)$$

Değişken q_i değeri genelleştirilmiş koordinatlar olarak belirtilmiştir.

$$q(t)^T = [\theta(t) \alpha(t)] \quad (2.4)$$

Şekil 2.1.b’de ve Eş. 2.5’deki denklemde gösterilen $\theta(t)$; servo açısı ve $\alpha(t)$; esnek robot kol açısını ifade etmektedir. Karşılık gelen hızlar;

$$\dot{q}(t)^T = \left[\left[\frac{\partial \theta(t)}{\partial t} \quad \frac{\partial \alpha(t)}{\partial t} \right] \right] \quad (2.5)$$

Esnek robot kol sistemlerinde, Euler-Lagrange denklemi genelleştirilmiş koordinatlar ile Eş. 2.6 ve Eş. 2.7’deki gibi tanımlanmıştır.

$$\frac{\partial^2 L}{\partial t \partial \theta} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = Q_1 \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial t \partial \alpha} - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = Q_2 \quad (2.7)$$

Lagrangian sistemi denklemi Eş. 2.8’deki gibi tanımlanmıştır.

$$L = T - V \quad (2.8)$$

T; sistemin toplam kinetik enerjisini ve V; sistemin toplam potansiyel enerjisini ifade etmektedir.

Kinetik enerji eşitliği denklemi Eş. 2.9’deki gibi tanımlanmaktadır. Eş. 2.9 denklemindeki m ; nesnenin kütesini ve v ; doğrusal hızı ifade etmektedir.

$$T = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2.9)$$

Dönen kinetik enerji denklemi Eş. 2.10'deki gibi tanımlanmaktadır. Eş. 2.10 denklemindeki J ; nesnenin eylemsizlik momentini ve w ; açısal oranı ifade etmektedir.

$$T = \frac{1}{2}Jw^2 \quad (2.10)$$

Potansiyel enerji farklı formlardan oluşmaktadır. Tipik olarak mekanik sistemde, yerçekimine bağlı olarak potansiyel enerji oluşmaktadır. Bir cismin bağlı yerçekimi potansiyel enerjisi denklemi Eş. 2.11 de gösterilmiştir.

$$V_g = mg\Delta h \quad (2.11)$$

Eş. 2.11 denklemdeki, m ; nesne kütlesi ve Δh , nesnenin yüksekliğindeki değişikliğini ifade etmektedir (bir referans noktasından). Masa yüzeyinden (yani referans noktasından) 0.25 metreye kadar yükselen bir cismin potansiyel enerji; $\Delta h = 0.25 - 0 = 0.25$ ve depolanan enerji $V_g = 0.25mg$ olarak gösterilmiştir.

Elastik potansiyel enerji (yayda depolanan enerji) denklemi Eş. 2.12'da gösterilmiştir.

$$V_e = \frac{1}{2}K\Delta x^2 \quad (2.12)$$

Döner kola etki eden kuvvet;

$$Q_1 = \tau - B_{eq}\dot{\theta} \quad (2.13)$$

Bağlantı üzerindeki hareketi;

$$Q_2 = B_1\dot{\alpha} \quad (2.14)$$

Eş. 2.10 kullanılarak, SRV02'nin dönmesinden ve bağlantının sapmasından kaynaklanan toplam kinetik enerji denklemi Eş. 2.15 de gösterilmiştir.

$$T = \frac{1}{2}J_{eq}\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}j_l(\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2 \quad (2.15)$$

Eş. 2.8 kullanılarak, SRV02'nin dönmesinden ve bağlantının sapmasından kaynaklanan toplam kinetik enerji denklemi Eş. 2.16'te gösterilmiştir.

$$L = \frac{1}{2}J_{eq}\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}J_l(\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2 - \frac{1}{2}K_s\alpha^2 \quad (2.16)$$

Eş. 2.6'daki işlem ile türev hesaplanarak Q_1 değeri elde edilir ve Eş. 2.13'deki denklemde yerine konularak Eş. 2.17 elde edilir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} &= J_{eq}\dot{\theta} + J_l(\dot{\theta} + \dot{\alpha}) \\ \frac{\partial^2 L}{\partial t \partial \dot{\theta}} &= J_{eq}\ddot{\theta} + J_l(\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) \\ \frac{\partial L}{\partial \theta} &= 0 \end{aligned} \quad (2.17)$$

Yukarıdaki cevaplar ve Eş. 2.13 ile Eş. 2.6 ile birleştirilerek ilk hareket denklemi olan Eş. 2.18 elde edilir.

$$(J_{eq} + J_l)\ddot{\theta} + J_l\ddot{\alpha} + B_{eq}\dot{\theta} = \tau \quad (2.18)$$

Eş. 2.7'deki işlem ile türev hesaplanarak Q_2 değeri elde edilir ve Eş. 2.14'deki denklemde yerine konularak Eş. 2.19 elde edilir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} &= J_l(\dot{\theta} + \dot{\alpha}) \\ \frac{\partial^2 L}{\partial t \partial \dot{\alpha}} &= J_l(\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) \\ \frac{\partial L}{\partial \alpha} &= K_s\alpha \end{aligned} \quad (2.19)$$

Yukarıdaki türevler yerine konularak alınan cevaplar ve Eş. 2.14 ile Eş. 2.7 ile birleştirilerek ilk hareket denklemi olan Eş. 2.20 elde edilir.

$$J_l\ddot{\theta} + J_l\ddot{\alpha} + B_l\dot{\theta} + B_l\dot{\alpha} = 0 \quad (2.20)$$

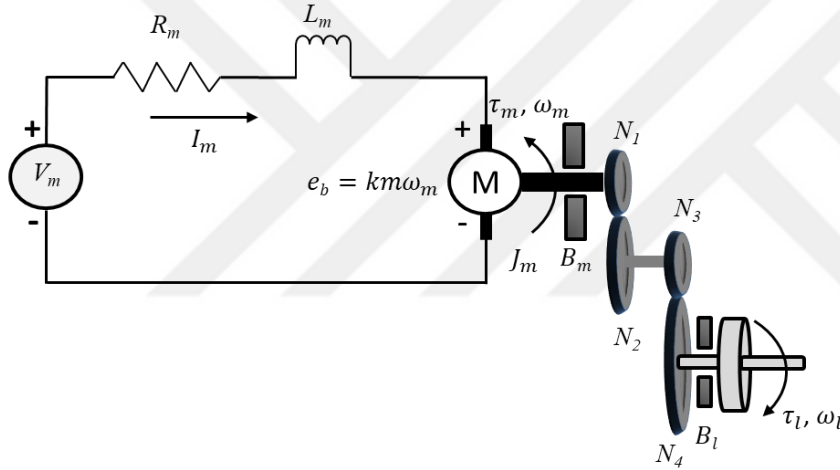
Eş. 2.18'teki denklemden Eş. 2.20 çıkartılıp ve $B_l = 0$ verilerek Eş. 2.21'daki ilk hareket denklemi elde edilir.

$$\ddot{\theta} = \frac{B_{eq}}{J_{eq}} \ddot{\theta} + \frac{K_s}{J_{eq}} + \frac{1}{J_{eq}} \quad (2.21)$$

Eş. 2.18'deki denklemle yer değiştirildiğinde ise Eş. 2.22 elde edilir.

$$J_l \left(\frac{B_{eq}}{J_{eq}} \ddot{\theta} + \frac{K_s}{J_{eq}} + \frac{1}{J_{eq}} \right) + J_l \ddot{\alpha} + K_s \alpha = 0 \quad (2.22)$$

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



Şekil 2.2. SRV02 DC motorun yapısı ve bileşenleri (Quanser Inc. (2011))

Şekil 2.2'de gösterilen servo motora uygulanan gerilim (V_m) sonucu motor milinde dönme momenti oluşmaktadır. Bu oluşan dönme momenti sayesinde sistemin hareketini sağlayan kuvvet meydana gelmektedir. SRV02 DC motorun yapısı Şekil 2.2'de gösterilmektedir.

Döner kolun tabanına (yani yük dişlisine) uygulanan tork, Eş. 2.13'deki denklemde gösterildiği gibi servo motor tarafından üretilmektedir.

Sisteme etki eden τ_l torkunun hesaplamaları, Newton'un hareket kanunları ve kapalı devre Kirchhoff Voltage yasasına göre düzenlendiğinde oluşan τ_l ve τ_m (motor milinde oluşan tork) kuvvetleri Eş. 2.23 ve 2.24 ile sunulmaktadır.

$$\tau_m(t) = \frac{\eta_m k_t (V_m(t) - k_m K_g \omega_l(t))}{R_m} \quad (2.23)$$

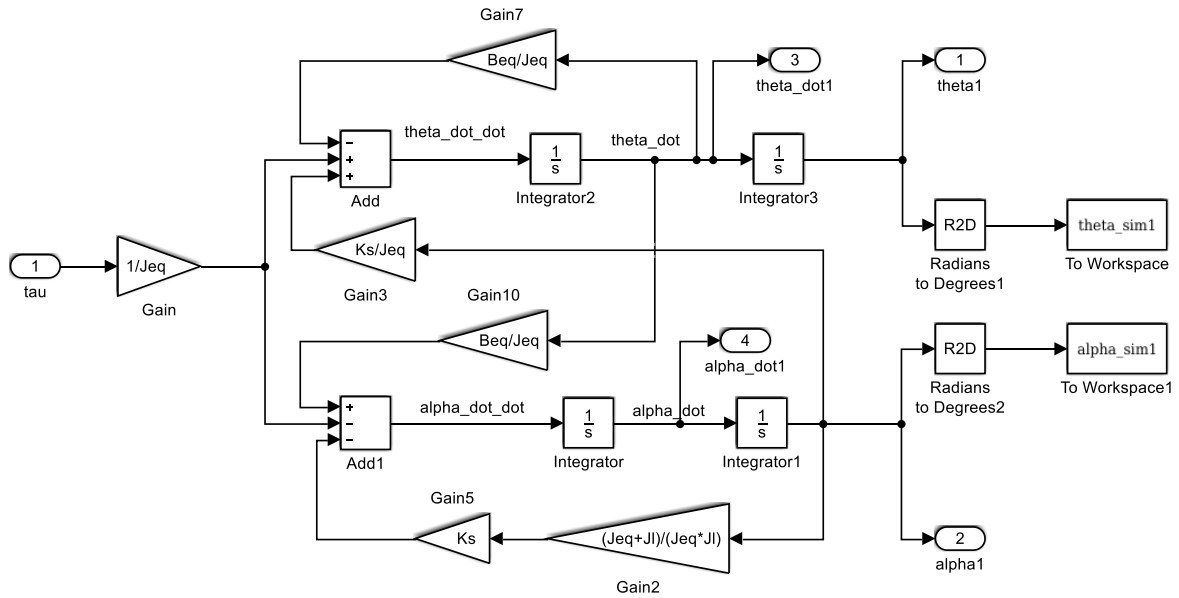
$$\tau_l(t) = \eta_g K_g \tau_m(t) \quad (2.24)$$

Resim 2.1'de esnek kol düzeneği ve şematik gösterimi sunulmaktadır. Sistemin hareket denklemleri; Eş. 2.25 ve 2.26 ile sunulmaktadır.

$$\ddot{\theta} = -\frac{B_{eq}}{J_{eq}} \dot{\theta} + \frac{K_s}{J_{eq}} \alpha + \frac{1}{J_{eq}} \tau \quad (2.25)$$

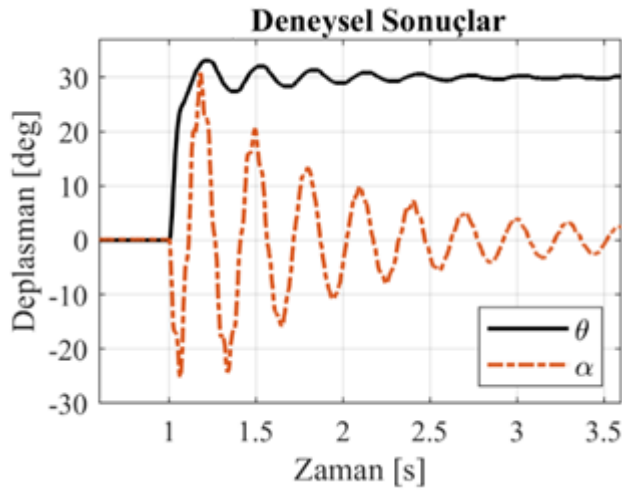
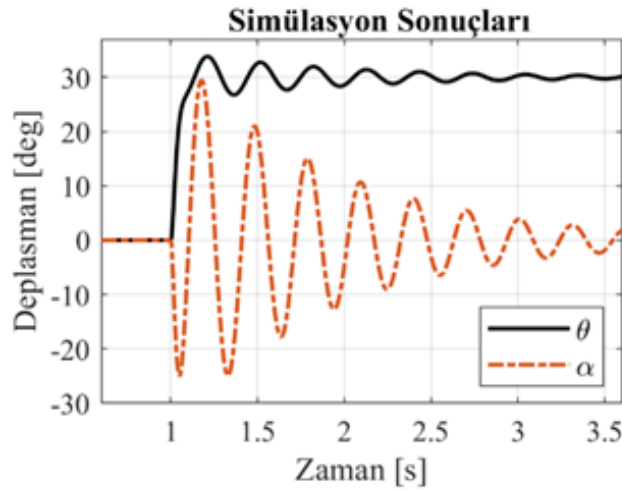
$$\ddot{\alpha} = -\frac{B_{eq}}{J_{eq}} \dot{\alpha} + K_s \left(\frac{J_l + J_{eq}}{J_l J_{eq}} \right) \alpha - \frac{1}{J_{eq}} \tau \quad (2.26)$$

Sistemin modeli Şekil 2.3'de sunulmuştur (MATLAB/Simulink).



Şekil 2.3. Esnek kol MATLAB/Simulink modeli

Sisteme uygulanan birim basamak girdi için sistem cevabı Şekil 2.4'de görülmektedir. Simülasyon ve deneysel sonuçlar yapılan modellenmenin başarılı bir şekilde sonuç verdiğini göstermektedir.



Şekil 2.4. Çalışmaya ait teorik ve deneysel grafikler

Esnek robot kol sisteminin deneysel olarak belirlenen sönümlü doğal frekansı ve sönüm oranı değerleri Çizelge 2.2’de sunulmuştur.

Çizelge 2.2. Hesaplanan sistem parametreleri

Deney Düzeneği	ζ	ω_d
Esnek Kol	0,07	20,4

Eş. 2.25 ve Eş. 2.26’te gösterilen Esnek Robot Kol sisteminin matematiksel modeli, LQR kontrolörüne ait ağırlık matrislerinin ayarlanmasında kullanılmıştır. Şekil 2.4’de, Esnek Robot Kol sistemine uygulanan basamak girişi için elde edilen motor konumu (θ) ile uç sapmasına (α) ait sonuçlar teorik ve deneysel grafik olarak gösterilmiştir. Servo motorun

konumu ve esnek kol uç sapması gibi açısal değerler derece olarak gösterilmektedir. Şekil 2.4'de sunulan teorik ve deneysel sonuçlar birbirleri ile yakından eşleştiği görülmektedir. Bu nedenle Esnek Robot Kol sisteminin matematiksel olarak gerçekçi bir şekilde modellendiğinin sonucuna varılmaktadır.

Elektrik Denklemleri

Elektromotor gerilimi ($e_b(t)$), motor milinin hızına (ω_m) ve elektromotor sabiti (k_m) değerlerine bağlıdır. Akım akışına karşıdır. Elektromotor voltajı Eş. 2.27 deki gibi gösterilmiştir.

$$e_b(t) = k_m \omega_m(t) \quad (2.27)$$

Kirchhoff gerilim yasası kullanarak aşağıdaki denklem yazılabilmektedir.

$$V_m(t) - R_m I_m(t) - L_m \frac{dI_m(t)}{dt} - k_m \omega_m(t) = 0 \quad (2.28)$$

Motor endüktansı (L_m), direnç değerinden çok daha az olduğu için ihmal edilebilmektedir. Bu nedenle denklem aşağıdaki gibi değişiklik gösterecektir.

$$V_m(t) - R_m I_m(t) - k_m \omega_m(t) = 0 \quad (2.29)$$

Motor akımının ($I_m(t)$) çözümü aşağıdaki denklem ile elde edilebilmektedir.

$$I_m(t) = \frac{V_m(t) - k_m \omega_m(t)}{R_m} \quad (2.30)$$

Mekanik Denklemler

Mekanik denklemlerde denklemlerde gösterilen, ω_1 ; hareket denklemini tanımlayan yük mili hızı ve τ_m ; uygulanan motor torkunu ifade etmektedir.

SRV02 bir serbestlik dereceli döner sistem olduğundan, Newton'un İkinci Hareket Yasası Eş. 2.31'deki gibi yazılabilmektedir.

$$J \cdot \alpha = \tau \quad (2.31)$$

J ; cismin eylemsizlik momenti (kütle merkezi civarında), α ; sistemin açısal ivmesi ve τ ; cisme uygulanan torkun toplamını ifade etmektedir.

Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, motor shaftı, B_m ve yük shaftı B_l de viskoz sürtünme etkisi ile birlikte SRV02 dişli takımı dikkate alınmıştır. Hareketin yük denklemi Eş. 2.32'de verilmiştir.

$$J_l \frac{d\omega_l(t)}{dt} + B_l \omega_l(t) = \tau_l(t) \quad (2.32)$$

Eş. 2.32'de belirtilen J_l , yükün atalet momenti ve τ_l ise yüke uygulanan toplam torku ifade etmektedir. Yük ataleti, dişli takımından ve bağlı herhangi bir harici yükten gelen ataleti içermektedir. Harici yüke örnek olarak disk veya çubuk verilebilir. Motor mili denklemi Eş. 2.33'deki gibi ifade edilmektedir.

$$J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B_m \omega_m(t) + \tau_{ml}(t) = \tau_m(t) \quad (2.33)$$

Eş. 2.34'da belirtilen J_m , motor mili atalet momenti ve τ_{ml} ise yük torkundan motor miline etki eden sonuçtaki torku ifade etmektedir.

$$\tau_l(t) = \eta_g K_g \tau_{ml}(t) \quad (2.34)$$

Eş. 2.34'de belirtilen K_g , dişli oranını ve η_g , dişli kutusu verimliliğini ifade etmektedir. Doğrudan SRV02 motora monte edilen planet dişli kutusu (Şekil 2.2) N_1 ve N_2 dişlileri ile temsil edilmektedir ve dişli oranı denklemi Eş. 2.35'deki gibidir.

$$K_{gi} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.35)$$

Eş. 2.35 iç dişli kutusu oranını ifade etmektedir. Motor dişlisi N_3 ve yük dişlisi N_4 doğrudan birbirine geçmiş ve dışarıdan görülebilmektedir. Eş. 2.36'de ilişkili dişli oranı gösterilmektedir.

$$K_{ge} = \frac{N_4}{N_3} \quad (2.36)$$

SRV02 dişli takımının dişli oranı denklemi Eş. 2.37'deki gibidir.

$$K_g = K_{ge}K_{gi} \quad (2.37)$$

Motor milinde dişliler boyunca görülen tork denklemi Eş. 2.38'deki gibidir.

$$\tau_{ml}(t) = \frac{\tau_l(t)}{\eta_g K_g} \quad (2.38)$$

Sezgisel olarak, çıkış milinin bir tur dönmesi için motor milinin K_g kadar dönmesi gerekmektedir.

$$\theta_m(t) = K_g \theta_l(t) \quad (2.39)$$

Motor milinin açısal hızı ω_m ile yük milinin açısal hızı ω_l arasındaki ilişkiyi zamana türev olarak bulunabilmektedir.

$$\omega_m(t) = K_g \omega_l(t) \quad (2.40)$$

Eş. 2.38, Eş. 2.40 ve Eş. 2.42 denklemleri, Eş. 2.43'a ekleyerek Eş.2.41'deki denklem elde edilmiştir.

$$J_m K_g \frac{d\omega_1(t)}{dt} + B_m K_g \omega_l(t) + \frac{J_l \left(\frac{d\omega_1(t)}{dt} \right) + B_l \omega_l(t)}{\eta_g K_g} = \tau_m(t) \quad (2.41)$$

Eş. 2.42, katsayıları toplayarak yük mili hızı ve ivmesini vermektedir.

$$\eta_g K_g^2 J_m + J_l \frac{d\omega_l(t)}{dt} + (\eta_g K_g^2 B_m + B_l) \omega_l(t) = \eta_g K_g \tau_m(t) \quad (2.42)$$

J_{eq} ve B_{eq} değerleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$J_{eq} = \eta_g K_g^2 J_m + J_l \quad (2.43)$$

$$B_{eq} = \eta_g K_g^2 B_m + B_l \quad (2.44)$$

Denklemler kısaca Eş. 2.45'deki gibi gösterilmektedir.

$$J_{eq} \frac{d\omega_l(t)}{dt} + B_{eq} \omega_l(t) = \eta_g K_g \tau_m(t) \quad (2.45)$$

Elektriksel ve Mekanik Denklemlerin Birleştirilmesi

Sistemdeki elektrik ve mekanik denklemleri, uygulanan motor voltajı cinsinden yük şaft hızını temsil eden bir ifade elde etmek için bir araya getirilmektedir. Motorun torku uygulanan voltajla orantılıdır ve Eş. 2.46'deki gibi gösterilmektedir.

$$\tau_m(t) = \eta_m k_t I_m(t) \quad (2.46)$$

Eş. 2.46'da yer alan k_t , akım-tork sabiti (N.m/A), η_m , motor verimidir ve I_m , armatür akımı olarak ifade edilmektedir.

Elektrik denklemlerindeki Eş. 2.30'deki verilen motor armatür akımını, motor torku ile uyumlu giriş voltajı ve yük mili hızına göre aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\tau_m(t) = \frac{\eta_m k_t (V_m(t) - k_m \omega_m(t))}{R_m} \quad (2.47)$$

V_m ve ω_l açısından ifade edilirse, motor yükü mil hızı denklemi Eş. 2.40'ı Eş. 2.46'ya ekleyerek aşağıdaki Eş. 2.48 elde edilmektedir.

$$\tau_m(t) = \frac{\eta_m k_t (V_m(t) - k_m K_g \omega_l(t))}{R_m} \quad (2.48)$$

Eğer Eş. 2.48'i Eş. 2.45'e eklenmesiyle, Eş. 2.49'u elde edilmektedir.

$$J_{eq} \left(\frac{d}{dt} \omega_l(t) \right) + B_{eq} \omega_l(t) = \frac{\eta_g K_g \eta_m k_t (V_m(t) - k_m K_g \omega_l(t))}{R_m} \quad (2.49)$$

Eş. 2.49'da gösterilen terimleri topladıktan sonra Eş. 2.50 haline gelmektedir.

$$\left(\frac{d}{dt}\omega_l(t)\right)J_{eq} + \left(\frac{k_m\eta_g k_g^2 \eta_m k_t}{R_m} + B_{eq}\right)\omega_l(t) = \frac{\eta_g K_g \eta_m k_t V_m(t)}{R_m} \quad (2.50)$$

Eş. 2.50'deki denklem, Eş. 2.51'deki gibi yeniden yazılabilmektedir.

$$\left(\frac{d}{dt}\omega_l(t)\right)J_{eq} + B_{eq,v}\omega_l(t) = A_m V_m(t) \quad (2.51)$$

Eşdeğer sönümlenme teriminin verildiği durumlarda:

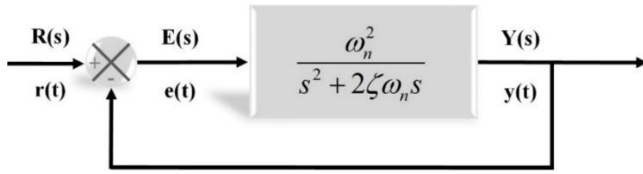
$$B_{eq,v} = \frac{\eta_g K_g^2 \eta_m k_t k_m + B_{eq} R_m}{R_m} \quad (2.52)$$

Aktüatör kazancı ise Eş. 2.53'de gösterilmiştir.

$$A_m = \frac{\eta_g K_g \eta_m k_t}{R_m} \quad (2.53)$$

İkinci Dereceden Sistemler:

Şekil 2.5'de ikinci derece bir sistem için kapalı çevrim kontrol blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.5. İkinci derece bir sistem için kapalı çevrim kontrol blok diyagramı

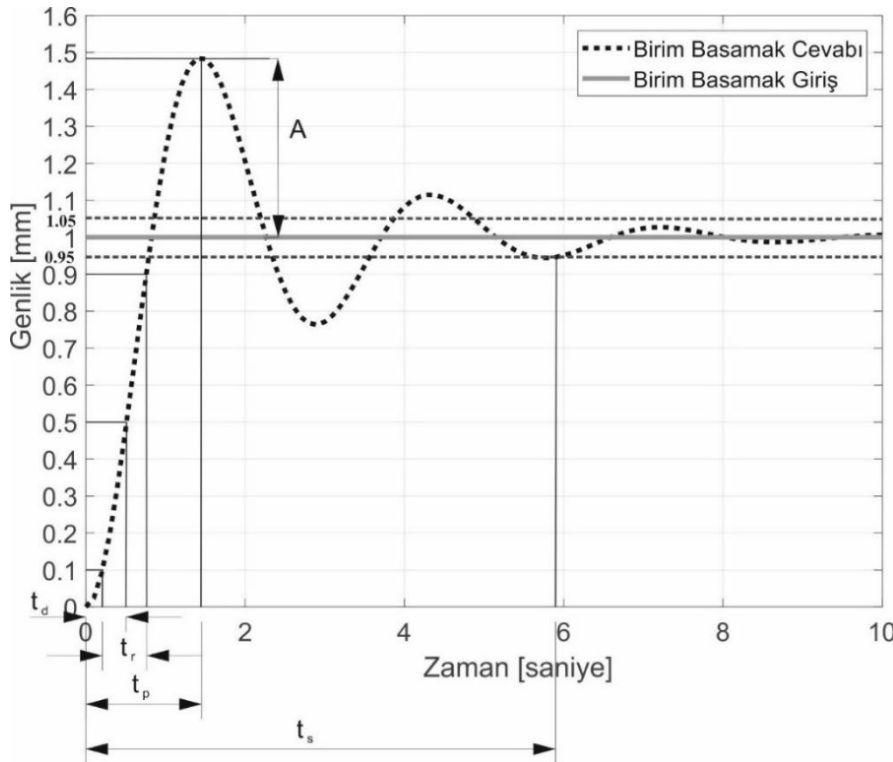
İkinci derece bir sistem için açık çevrim transfer fonksiyonunun s domeninde gösterimi Eş. 2.54 ile sunulmaktadır.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s} \quad (2.54)$$

Kapalı çevrim transfer fonksiyonu ise Eş. 2.55 ile sunulmaktadır.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.55)$$

Elde edilen transfer fonksiyonuna $\omega_n^2 = \sqrt{5}$, $\zeta = \sqrt{5}/10$ değerleri için birim basamak giriş uygulandığında Şekil 2.6'da gösterilen grafik elde edilmektedir. Sistem cevabı izlendiğinde ise kritik altı sönüme sahip ikinci dereceden bir sistem davranışı olduğu görülmektedir. Sistem cevabı salınımlı ve zamanla referans değere ulaşan bir karaktere sahiptir.



Şekil 2.6. İkinci derece bir sistem için birim basamak giriş cevabı (Bilgiç, 2018)

Tasarımlanan sistem modellenip uygun kontrolcü ile sistem cevaplarının incelenmesi gerekmektedir. İnceleme sonucunda kontrolcü performansının değerlendirilmesinin yapılması sağlanmalıdır. Bunun için sisteme uygulanan basamak giriş cevabının analiz edilmesi ve çeşitli performans kriterlerinin sistem cevabı üzerindeki etkilerin belirlenebilmesi gerekmektedir. Şekil 2.6'da temel performans kriterlerinden gecikme zamanı (t_d), yükselme zamanı (t_r), tepe zamanı (t_p), yerleşme zamanı (t_s), maksimum aşım (A) kriterleri belirtilmiştir. Ayrıca performans kriterleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Gecikme zamanı (t_d): Çıkış sinyalinin, referans değerinin yarısına ulaştığı zamana kadar geçen süre gecikme zamanı olarak tanımlanmaktadır. t_d simgesi ile gösterilmektedir.

Yükselme zamanı (t_r): Çıkış sinyalinin, referans değerinin %10'unundan %90'ına ulaşana kadar geçen süre yükselme zamanı olarak tanımlanmaktadır. t_r simgesi ile gösterilmektedir.

Tepe zamanı (t_p): Çıkış sinyalinin, referans değeri geçip ilk maksimum genlik değerine ulaştığı zamana kadar geçen süre tepe zamanı olarak tanımlanmaktadır. t_p simgesi ile gösterilmektedir.

Yerleşme zamanı (t_s): Çıkış sinyalinin, referans değerinin %5 altına ve üzerine ilk girdiği ve bu değeri aşmadığı ilk ana kadar geçen süre yerleşme zamanı olarak ifade edilmektedir. t_s simgesi ile gösterilmektedir.

Maksimum aşım (A): Çıkış sinyalinin, en yüksek değeri ile denge konumundaki değer arasındaki fark maksimum aşım olarak ifade edilmektedir.

2.1.1. Doğrusal kuadratik regülatör (lqr) kontrolör tasarımı

LQR, yapay zeka tabanlı birçok kontrol problemleri için sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca kontrolör kapalı çevrim sistem yapısına sahiptir. LQR performansını etkileyen en önemli parametreler ağırlık matrisleridir. En önemli ağırlık matrisleri; Q ve R ile sembolize edilen değerlerden oluşmaktadır. Bu ağırlık matrislerinin belirlenmesi LQR sisteminin başarısını etkileyen en önemli etmendir. Sistem modelinin doğrusal zamanla değişmeyen durum-uzay temsili ile kuadratik maliyet fonksiyonu, sırasıyla Eş. 2.56 ve Eş. 2.57'de gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (2.56)$$

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (e^T Q e + u^T R u) dt \quad (2.57)$$

Eş. 2.56 ve Eş. 2.57’de belirtilen;

- x ve u değerleri sırası ile durum vektörü ve kontrol sinyalini,
- A , B ve C değerleri sırası ile durum, girdi ve çıktı matrislerini,
- Üst simge T , matrisin transpozunu ifade etmektedir.

$u=K(\text{referans}-x)$ sistemi stabilize eden ve J performans indeksini en aza indirmeyi amaçlayan durum geri besleme kontrol sinyalidir. K kontrolcü kazancı ise Eş. 2.58’deki gibi ifade edilmektedir:

$$K = R^{-1}B^T P \quad (2.58)$$

Eş. 2.58’de belirtilen P , Ricatti eşitliğinin çözümünden elde edilen simetrik matrisidir.

$$PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (2.59)$$

Performans indeksini azaltmak için LQR kontrolör tasarımında Q ve R matrisleri, sistem giriş sinyallerini hesaplamakta kullanılmaktadır. Eş. 2.60 de belirtilen Q , ağırlık matrisini ve R ise, sistem matrisini ifade etmektedir.

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_n \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_m \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

LQR tasarımında kullanılan Q ve R matrislerine ait değerlerin kontrol kriterlerinin sağlanması için ayarlanması gerekmektedir. Q ve R kontrol parametrelerinin belirlenmesi deneme/yanılma yöntemi ile sağlanmaktadır. Bu nedenle deneme/yanılma yönteminin başarısı tamamıyla tasarımcının deneyimine bağlı bulunmaktadır. Yöntem her zaman problemlerde en iyi çözümü elde etmek için garanti vermemektedir. Ayrıca problem çözümlerinde ise uzun sürelerde gerekebilmektedir.

2.2. Yapay Zeka Optimizasyon Teknikleri

Yapay zeka doğada görülen karar verme mekanizmaların taklit ederek oluşturulan modellemenin algoritmalara dönüştürülmüş halidir. Yapay zeka sistemleri günümüzde bir çok optimizasyon problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılmaktadır. Günümüzde kullanılan klasik optimizasyon teknikleri birçok problemlerin çözümünde yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle zorlu problemler için doğadan esinlenerek oluşturulmuş algoritmalar kullanılarak daha hızlı çözümler sağladığı görülmüştür. Bunlardan en bilinenleri aşağıdaki gibi gösterilebilmektedir.

- Bulanık Mantık Algoritmaları
- Yapay Sinir Ağı Algoritmaları
- Metasezgisel Algoritmalar

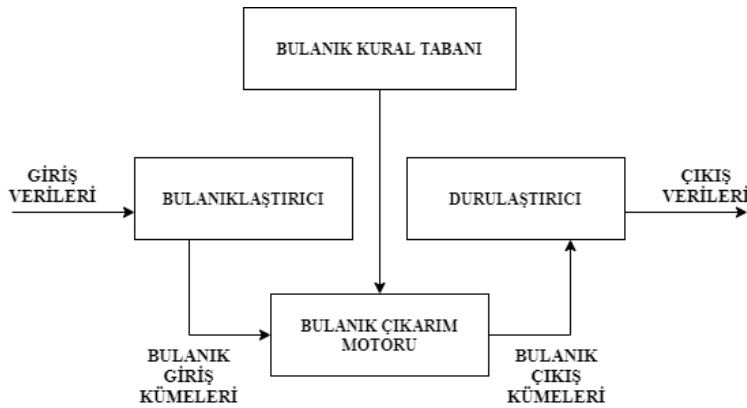
Bulanık Mantık: Bulanık Mantık (BM) 1965 yılında Zadeh (Zadeh, 2008) tarafından tanıtılmıştır. Uygulama yapay zeka tekniklerinden biridir. Mantık, doğrunun ya da yanlışın muhakemesini yapabilen ilkelerinin bilimidir. Bu anlamda, bulanık mantık ise sınırlayıcı bir durum olarak görülen kesin akıl yürütme ile yaklaşık akıl yürütmenin biçimsel ilkelerini barındırmaktadır. Bulanık mantık, insan mantığında olduğu gibi, büyük-küçük yerine çok büyük-orta küçük gibi değerlerden oluşmakta olup tüm değerler $[0,1]$ gerçel sayılar kümesinden sayılarla gösterilmektedir. Eğer sistem sonuçlarının; kesin değerlere ihtiyacı bulunmuyorsa ve aralık değerlerinde görüntülenmesi isteniyorsa bulanık mantık yöntemi kullanılabilir. Bulanık mantığın klasik mantık ile farkları Çizelge 2.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Klasik ve Bulanık Mantık Arasındaki Farklar

Klasik Mantık	Bulanık Mantık
A veya A Değil	A veya A Değil
Kesin	Kısmi
Hepsi veya Hiçbiri	Belirli Derecelerde
0 veya 1	0 ve 1 arasında süreklilik
İkili Birimler	Bulanık Birimler

Bulanık sistem aşağıda görüldüğü üzere işleyişi sırasıyla gösterilmektedir.

- Giriş Verileri: Sistemin işleyişine verilecek girdilere ait bilgileri içermektedir. Sayısal yada sözel değerler olabilmektedir.
- Bulanıklaştırıcı: Bu bölümde, girdi ve çıktı değişkenleri ölçülmektedir. Sayısal veya sözel girdi verilerini derecelendirir. Doğal dilsel terimlere dönüştürülür;
- Bulanık Kural Tabanı: Bu birim veri tabanı ve kural tabanı olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Bu ara yüzde, giriş ve çıkış değişkenlerine bağlayan mantıksal kurallar içeren birimdir. Bu kuralların yazılmasında sadece girdi verileri ile çıktılar arasında olabilecek bulanık küme bağlantıları oluşturulur. İşlem sonrası uzmanların karar verme yeteneği bulanık kavram temel alınarak simüle edilir.
- Bulanık Çıkarım Motoru: Çıkarım biriminde, bulanıklaştırma biriminden gelen bulanık değerleri kurallara uygun olarak bir araya toplar ve tüm sistemin girdiler altında değerlendirerek sonuçlar üretmektedir.
- Durulaştırıcı: Bulanık işlemler sonucu elde edilen bulanık çıktılar, ağırlık merkezi, maksimumların ortalaması, minimumların ortalaması ile berrak (bulanık olmayan) sonuçlar sayısal çıkış değerlerine dönüştürülmektedir. (Bilgiç, 2018)

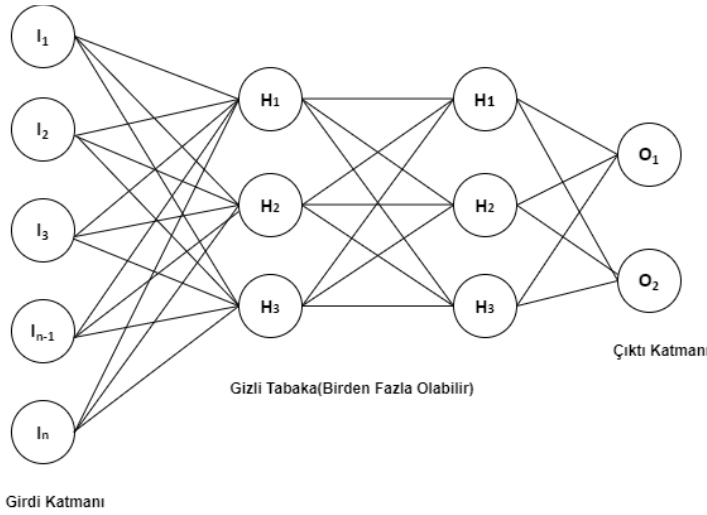


Şekil 2.7. Bulanıklaştırma ve durulaştırma birimli bulanık sistem (Yılmaz ve Aslan, 2005)

Yapay sinir ağları: Yapay sinir ağı, insan beynini örnek alarak geliştirilmiş bir modellemedir. Bilim adamları tarafından insan beyninin nerofiziksel yapısından esinlenerek matematiksel modelli çıkarılmaya çalışılmıştır. Sistem deneme/yoluyla öğrenme prensibi üzerine kurulmuştur. Ayrıca bilgiyi depolamak ve kullanışlı hale getirmek için basit bölümlerden belleklerden meydana gelmektedir. İnsan beyni de yapay sinir ağında olduğu gibi iki şekilde benzerlik göstermektedir. Bunlardan birincisi olan bilgi, öğrenme yoluyla sağlanarak ağ

tarafından oluşturulmaktadır. İkincisi ise nöronlar arası bağlantı kuvvetlerini, bilgiyi depolamak için kullanmaktadır. (Yılmaz ve Aslan, 2005)

Yapay sinir ağında oluşturulan modellerde nöron adı verilen birçok işlem biriminden oluşmakta ve bu nöronlar katman olarak adlandırılan mantıksal gruplar içerisinde yer almaktadır. Yapay sinir ağı birçok katmandan oluşmaktadır. Ayrıca oluşturulan katmanlar hiyerarşik bir yapıya sahiptir. Sistemde girdi, gizli ve çıktı katmanı bulunmaktadır. Yapay sinir ağına ait bir girdi, 2 gizli katman ve 1 çıktı katmanı ait Şekil 2.85’de gösterilmiştir. (Hakimpoor ve diğerleri, 2011)



Şekil 2.8. Girdi, Gizli Tabaka ve Çıktı Katmanından Oluşan Yapay Sinir Ağı

Yapay sinir ağları veriler arasındaki fark edilmesi güç bağlantıları ortaya çıkartılmasında kullanılmaktadır. Yapay sinir ağında çözülmesi istenen problem eğer doğrusal değilse modellemek mümkün değildir. (Hamzaçebi ve Kutay, 2004) Bu nedenle bu tarz problemler daha gelişmiş ağ türleriyle sağlanabilmektedir. Yapay sinir ağlarının bir diğer özelliği ise deneme yanılma yolu ile öğrenme yeteneğine sahip olmasıdır. (Hamzaçebi ve Kutay, 2004)

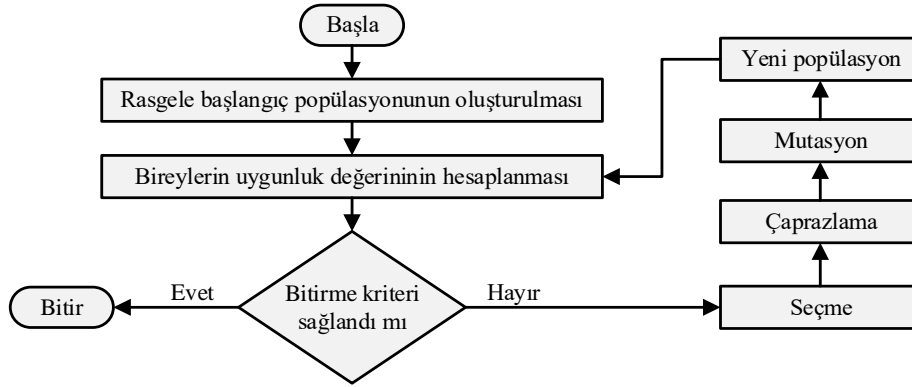
2.2.1. Metasezgisel arama algoritmaları

Metasezgisel arama algoritmaları, yüksek kaliteli ve hızlı çözümleri etkin şekilde üretmek için kullanılan üst seviye sezgiseller algoritmalarıdır. Son zamanlarda hem sayısal hem de kombinatoriyal olmak üzere optimizasyon problemlerini çözmek için birçok metasezgisel algoritma geliştirilmiştir. Meta sezgisel algoritmalar çoğunlukta doğadan esinlenerek elde

edilmektedir. Genetik algoritma, karınca kolonisi algoritması, yapay arı kolonisi, gri kurt optimizasyon algoritması vb. algoritmalar doğadan esinlenerek oluşturulmuştur. Bunlar, popülasyon tabanlı, yinelemeli tabanlı, stokastik, deterministik ve diğer yaklaşımları içermektedir. Sistemde her kullanılan iterasyon, oluşturulan çözüm topluluğunu kullanmaktadır. Metasezigisel algoritmaların amacı en iyiye yakın çözümleri en kısa sürede bulmak için arama uzayını araştırmaktadır. Çalışmada, ERK sisteminin istenilen açısız konuma en hızlı şekilde gelmesi esnasında oluşan uç sapmalarını ortadan kaldırmak için GA, ABC ve VPS algoritmaları kullanılmıştır.

Genetik Algoritma (GA)

Genetik Algoritma (GA) ilk kez, John Holland (Holland, 1992) tarafından önerilmiş olup karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılmıştır. Genetik algoritma, popülasyon genetiğine dayalı uyarlanabilir bir meta-sezgisel arama yöntemidir. Ayrıca doğal seçim ve doğal genetik mekaniğine dayanan olasılıksal bir arama algoritmasıdır. Genetik Algoritmasının sıklıkla tercih edilmesinin temel sebeplerinden biride alan taramasına yönelik işlemleri kısa sürede tamamlayabiliyor olmasıdır. Ayrıca Genetik Algoritma zaman kısıtlamalarını dikkate alan literatürdeki başarılı algoritma olmakla beraber evrimden ilham alan bir hesaplama modeli ailesindedir. Evrim teorisinde bahsi geçen doğal seçim, GA'nın temelini oluşturmaktadır. Bu nedenle Genetik Algoritma ile Evrim Teorisi birbirleriyle bağlantılıdır. Bu algoritmalar, veri yapısı üzerinde belirli bir soruna olası bir çözümü oluşmasıyla birlikte kritik bilgileri korumak için bu yapılar rekombinasyon operatörleri uygulamaktadır. Genellikle GA uygulandığı optimizasyon problem aralığı oldukça geniştir. Bu nedenle GA fonksiyon optimize edici olarak görülebilir. Bunun yanı sıra sistem uygunluğunu da dikkate alarak bir çözüm yaratmaktadır. Evrim teorisinde de olduğu gibi doğal seçim ile genlerin sonraki nesillere aktarımı Genetik Algoritmasında sağlanmaktadır. Şekil 2.9'da Genetik Algoritmaya ait akış şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Genetik Algoritma (GA) program akış şeması

Başlangıçta Genetik Algoritmada, 0 ve 1 gibi değerler ile rasgele oluşturulan bireyler (kromozomlar) üretilmektedir. Sonraki aşamada önceki popülasyondan elde edilen veriler kullanılarak yeni bir popülasyon değerleri sağlanmaktadır. Üretilen bireyin uygunluğunu, her tekrar için amaç fonksiyonunu dikkate alınarak değerlendirmektedir. Değerlendirme sonrası belirlenen uygun bireyler, doğal seleksiyon evresinden geçirilmektedir. Bu sayede bireyler daha iyi özelliğe sahip yeni nesil popülasyona dönüşmektedir. Sonraki süreçte seçme, çaprazlama, mutasyon ve popülasyon üretimi döngüsü devam ederek algoritma içerisinde tekrarı sağlanmaktadır. Yeni popülasyon oluşumunda aynı bireylerle sahip tekrar eden seçimler sonraki süreçte kendini tekrar eden duruma gelmektedir. Bu sebeple yeni bireylerdeki uçlarda küçük değişiklikler yaparak bireyler mutasyona uğratılması gerekmektedir. Bu sayede geçiş dönemleri için spesifik bireylerle yeni bir nesil meydana gelmiş olacaktır. Mutasyona uğratılarak oluşturulan yeni aday çözüm bireyleri, algoritmanın sonraki nesillerinde kullanılabilir. Süreç içerisinde her yeni oluşturulan popülasyonun mevcut popülasyondan daha iyi olması istenilmektedir. Bu sayede algoritma, daha uygun bireylerin bulunmasına olanak sağlamaktadır. Bu işlem, uygun bir çözüm veya maksimum tekrar sayısı elde edilene kadar devam etmektedir.

Genetik Algoritmaya ait pseudo kod aşağıdaki gibi gösterilmektedir.

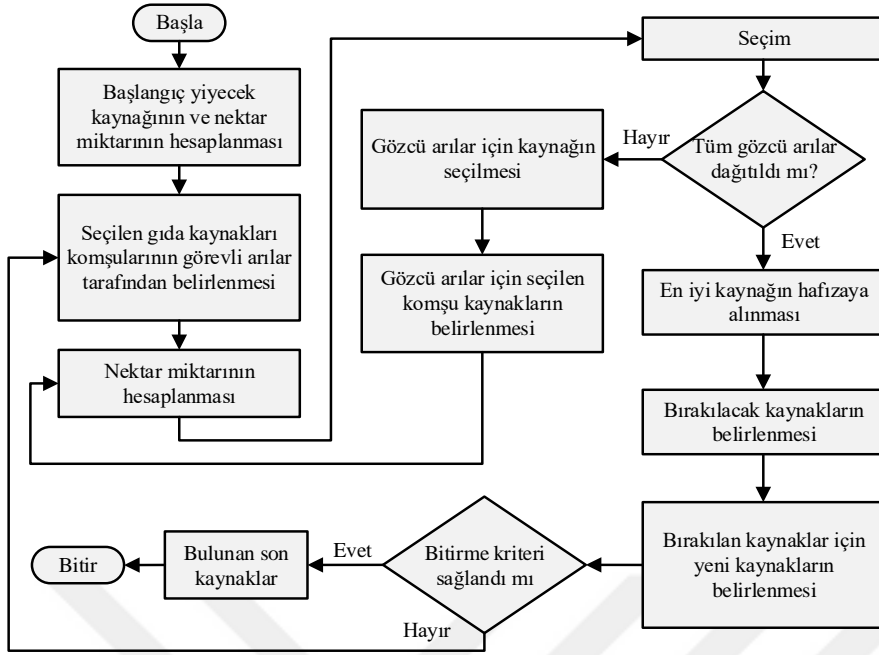
- İlk Jenerasyonu üret $t = 0$
- Rastgele başlangıç popülasyonunu seç $P(0)$
- $P(0)$ 'deki bireyleri değerlendir
- Tekrar
- İyi sonuç verecek bireyleri çiftleşmeye hazırla $P(t)$

- Yeni bireylerin oluşumu için çaprazlama işlemini yap
- Oluşan bireylerde değişiklik yapmak için mustasyon işlemini yap
- $P(t)$ popülasyonunu eskisiyle yer değiştir
- Yeni Jenerasyonu yer değiştir $t=t+1$
- En iyi çözümü göster
- Dur

Yapay Arı Kolonisi Algoritması (ABC)

Yapay Arı Kolonisi, Derviş Karaboğa (Karaboga, 2017) tarafından karmaşık sayısal optimizasyon problemlere hızlı çözümler bulmak için önerilmiştir. ABC algoritması, arıların besin kaynağı arayışındaki etkileşimden ilham almıştır. Yapay arı kolonisi (ABC) algoritması, bal arılarının yiyecek arama davranışına dayalı olarak sayısal optimizasyon problemleri için tasarlanmıştır. Metasezgisel algoritmaların performansı parametre sayısına ve seçimine bağlı olduğundan, ABC algoritmasının ana avantajları, algoritmanın 3 kontrol parametresi kullanılmasına bağlıdır. Bunlar; koloni boyutu, maksimum döngü sayısı ve limitidir.

Yapay Arı Kolonisi algoritmasında belirtilen arılar üç kategoriden oluşmaktadır. Bunlar kâşif arılar, gözcü arılar ve işçi arılardır. Bunların ilki işçi arılar, çevredeki besin kaynaklarını araştırmaktadır. Bu arılar besin kaynaklarının bulunduğu konum hakkındaki bilgileri kolonideki gözcü arılara paylaşmaktadırlar. Gözcüler işçi arılardan edindikleri bilgilere göre bir besin kaynağına yönelmektedirler. Her besin kaynağından sorumlu sadece bir işçi arı bulunmaktadır. Yani işçi arı sayısı, kovan çevresindeki besin kaynaklarının sayısına eşittir. Başlangıç olarak, işçi arı besin kaynağını boşaltmaktadır. Yapay Arı Kolonisine ait program akış diyagramı Şekil 2.10'da gösterilmektedir (Rao, Narasimham ve Ramalingaraju, 2008).



Şekil 2.10. Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritması program akış şeması

Besin kaynakların tükenmesi sonrası işçi arılar, kâşif arılara dönüşmektedir. Keşif arıları dönüşümü sonrası kovanın etrafındaki yeni besin kaynaklarını aramaya başlamaktadır. Bir besin kaynağının durumu, uygun bir problem için bir çözüm adayı olabilmektedir. Besin kaynağının içinde bulunan nektar miktarı, optimizasyonda yer alan amaç fonksiyonun değerini belirlemektedir.

ABC ile diğer sürü zekası algoritmaları arasındaki temel fark, olası çözümlerin popülasyondaki bireyler tarafından değil, besin kaynakları tarafından temsil edilmesi gerçeğine dayanmaktadır. Olası çözümün kalitesi, problemin amaç fonksiyonunun değerinden hesaplanan bir uygunluk değerine bağlıdır. Algoritma, keşif arılarının kovanın etrafına rastgele dağılması ve ilk çözümlerin üretilmesiyle başlamaktadır. $i = 1; 2; \dots; SN$ (SN kaynakların sayısını göstermektedir) için her bir besin kaynağı D -boyutlu bir vektördür. Arama uzayı $X_i = (X_{i1} X_{i2} \dots X_{iD})^T$ değeri i 'nci besin kaynağının pozisyonuna karşılık gelmektedir. İşçi arıların her biri aşağıdaki eşitlikle değiştirilmiş bir besin kaynağı pozisyonu araştırmakta ve üretmektedir:

$$x'_{ij} = x_{ij} + r_{ij} (x_{ij} - x_{kj}) \quad (2.61)$$

Eş. 2.62’de ve $k \in 1, 2, \dots, SN$ rastgele seçilmiş indekslerdir ve $k \neq 1$ ’dir. r_{ij} parametresi de $[-1; 1]$ alanı içerisindeki rastgele bir sayıdır. Gözcü arı besin kaynağı hakkında veri elde ettikten sonra, Eş. 2.62’de gösterilen P_i olasılığına dayanarak X_i besin kaynağı bölgesini hesaplamaktadır:

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{n=1}^{SN} fit_n} \quad (2.62)$$

Uygunluk değeri fit_i ’i hesaplamak amacıyla aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır:

$$fit_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + f(x_i)}, & f(x_i) \geq 0 \\ 1 + |f(x_i)|, & f(x_i) \leq 0 \end{cases} \quad (2.63)$$

Eş. 2.63’de X_i kaynağının amaç fonksiyonu $f(x_i)$ ile temsil edilmektedir. Besin kaynağı değerlerinin en iyi durdurma kriterleri değerlendirilir. Besin kaynağının uygunluğu doğrultusunda ise işlem sonlandırılmaktadır. Aksi takdirde uygunsuzluğa rastlanırsa komşu besin kaynakları incelenir ve yeni besin kaynakları aranmaya başlanmaktadır. ABC algoritması hakkında detaylı bilgilere literatürde sunulan kaynaklardan ulaşılabilir (Bingul ve Karahan, 2018). Ayrıca aşağıda ABC algoritmasına ait pseudo kodu gösterilmiştir. nHB; bal arı sayısı, newHB; yeni bal arı sayısı, maxNFES; maksimum amaç fonksiyonu değeri, NFES; amaç fonksiyonu değeri, A; seçim olasılık şeması ve mr; değişiklik oranını ifade etmektedir.

- Algoritma Parametrelerini Tanımla: nHB, maxNFES, A, and mr.
- Rastgele yemek kaynaklarındaki başlangıç çözümleri yarat (HB)
- Başlangıç popülasyon yada başlangıç besin kaynağı nektarını değerlendir.
- While NFES < maxNFES
- işçi araların stratejisini kullanarak yeni yemek kaynağı üret Eq.(3.1).
- newHB’i değerlendir ve eski-yeni besin kaynakları arasında değiştirme stratejisi kullan.

- NFEs yi güncelle
- Gözcü arıların stratejisini kullanarak yeni besin kaynağı üret Eq.(3.1).
- NewHB'i değerlendir ve eski-yeni besin kaynakları arasında değiştirme stratejisi kullan.
- NFEs yi güncelle
- Sayı döngüsünden sonra herhangi bir değişiklik olmazsa her besin kaynağını at
- Kovan çevresinde rastgele besin kaynağı oluşturmak için kaşif arılarını görevlendir ve ardından kaynakları değerlendir.
- NFEs yi güncelle
- En iyi besin kaynağını görüntüle
- Son

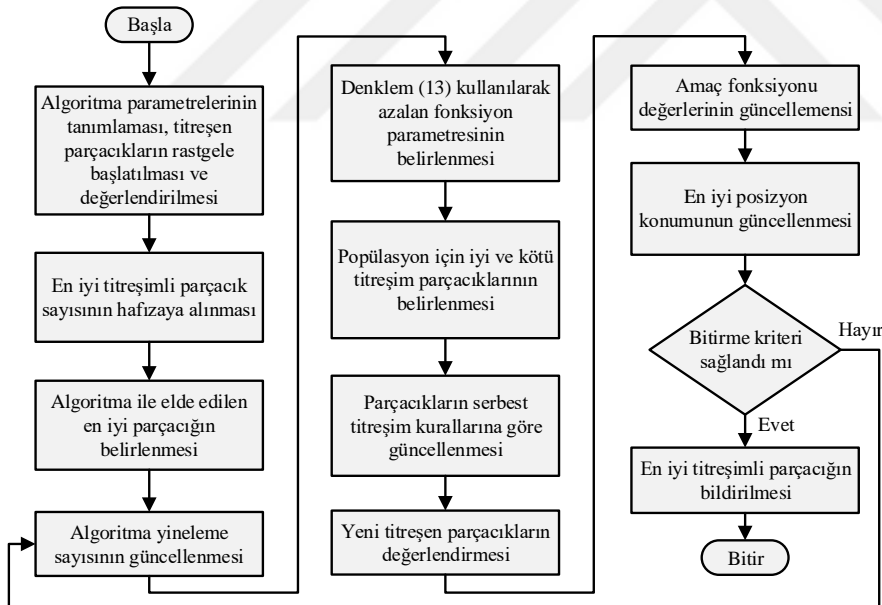
Titreşimli Parçacıklar Algoritması (VPSA)

Titreşimli Parçacıklar Sistemi (VPS) algoritması, viskoz sönümlenmeli tek serbestlik dereceli sistemlerin serbest titreşimden esinlenen yeni bir meta-sezgisel yöntemdir. VPS algoritması Kaveh ve Ghazaan tarafından 2017 yılında önerilmiştir. Ayrıca yakın zamanda önerilen bir algoritma olmasına rağmen parametre tahmini gibi alanlarda kullanılmıştır. (Kaveh, Rahmani ve Eslamlou, 2021). VPS, parçacık sistemini temsil eden bir dizi aday çözümü içerir. Parçacıklar, bir arama uzayında rastgele başlatılır ve yavaş yavaş denge konumlarına yaklaşır. Denge konumları, çeşitlendirme ve yoğunluk arasında uygun bir dengeye sahip olmak için mevcut popülasyon ile elde edilen en iyi değerden elde edilir. Döngü, VPS algoritması optimizasyonunda en iyi kriter sağlanana kadar tekrar etmektedir. Önerilen yöntemin performansını değerlendirmek için Esnek Robot Kol sistemi optimizasyonuna uygulanmıştır.

Titreşim, bir parçacığın veya bir cismin denge konumu etrafındaki salınım hareketidir. Genel olarak iki tür titreşim vardır: (1) serbest titreşim ve (2) zorlamalı titreşim. Hareket sadece geri getirme kuvvetleri tarafından sağlandığında, titreşimin serbest olduğu söylenir ve sisteme periyodik bir kuvvet uygulandığında ortaya çıkan hareket zorlanmış bir titreşim olarak tanımlanır. Titreşimli bir sistem çalışmasında, sürtünme etkileri ihmal edilebilir ve bu da sönümsüz bir titreşime neden olabilmektedir. Bununla birlikte, tüm titreşimler aslında bir dereceye kadar sürtünme kuvvetleri tarafından sönümlenir. Bu kuvvetlere, katı cisimler

arasındaki kuru sürtünme veya Coulomb sürtünmesi, katı bir cisim bir sıvı içinde hareket ettiğinde sıvı sürtünmesi veya görünüşte elastik bir cismin molekülleri arasındaki iç sürtünme neden olabilir. Bu çalışmada, viskoz sönümlenmeli tek serbestlik dereceli sistemlerin serbest titreşiminden esinlenen VPS algoritması incelenmiştir. Viskoz sönüm, düşük ve orta hızlarda sıvı sürtünmesinden kaynaklanır. Viskoz sönüm, sürtünme kuvvetinin hareket eden cismin hızıyla doğru orantılı ve zıt olması ile karakterize edilmektedir.

VPS algoritması her parçacığın kararlılık pozisyonunu, tüm popülasyonda elde edilen en iyi konum (HP), iyi parçacık (GP) ve kötü parçacık (BP) olmak üzere üç alt kategori altında sınıflandırmaktadır. Titreşimli parçacık sistemi algoritmasının temeli, kendini uyarılma, işbirliği ve rekabet olarak sıralanabilecek üç temel kavram üzerinde durmaktadır. VPS algoritması, uyum arama stratejisine dayanmakla birlikte bellek kullanımını da optimize etmektedir. Ayrıca algoritma arama alanından çıkan titreşimli parçacıkların konumunu düzeltmektedir. VPS algoritmasına ait program akış şeması Şekil 2.11’de gösterilmektedir.



Şekil 2.11. VPS algoritması program akış şeması

Tek serbestlik dereceli kritik altı sönümlü titreşimler için sistemin çözümü Eş. 2.64’de gösterilmektedir:

$$x(t) = \rho e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_D t + \phi) \quad (2.64)$$

Eş. 2.64’de gösterilen parametre değerlerinin tanımlamaları aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

- ω_n ; sistemin doğal frekansı
- ξ ; sistemin sönüm oranını
- ρ ve ϕ ; titreşimin başlangıç koşulu sabit değeri

VPS algoritmasında her bir popülasyon/parçacık değeri için farklı ağırlıkları olan üç denge kriteri mevcuttur. Bunlar; HP - tüm popülasyon değerinin tarihsel olarak en iyi konumu, GP – En iyi parçacık değeri ve BP –kötü parçacık değerini ifade etmektedir. Bu parametreler her parçacık için seçilmektedir. Şöyleki; HB değeri yinelemeye kadar en iyi adaydır, GB ve BP değerleri sırasıyla her yinelemede kısmen en iyi ve en kötü cevaplar arasında rastgele seçilmektedir. Eş. 2.65’te yineleme sayısına bağlı olarak azalma fonksiyonu tanımlanmıştır. Bu azalma fonksiyon (D) parametresi, titreşimdeki sönümlenme seviyesinin etkisini ayarlanması nedeniyle girilmektedir.

$$D = \left(\frac{NITs}{\max NITs} \right)^{-\alpha} \quad (2.65)$$

Eş. 2.65’deki NITs ve maxNITs, sırasıyla mevcut iterasyon ile maksimum iterasyon sayısını temsil etmekte, α ise azalma fonksiyonuna ait sabiti göstermektedir. Yukarıdaki tanımlara göre, VPS algoritmasının güncelleme kuralları Eş. 2.66’te gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} newVP_i &= \omega_1 (D.A.rand + HP) + \omega_2 (D.A.rand + GP_i) + \omega_3 (D.A.rand + BP_i) \\ A &= \omega_1 (HP - VP_i) + \omega_2 (GP_i - VP_i) + \omega_3 (BP_i - VP_i) \\ \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 &= 0 \end{aligned} \quad (2.66)$$

Eş. 2.66’daki VP_i titreşimli parçacığın mevcut konumunu, $newVP_i$ ise titreşimli parçacığın güncellenmiş konumunu temsil etmektedir. ω_1 , ω_2 ve ω_3 ağırlıkları sırasıyla en iyi parçacığın (HP), iyi parçacığın (GP) ve kötü parçacığın (BP) göreceli önemini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Titreşimli Parçacıklar Algoritmasının akış şeması ve algoritmaya ait formüllerin sistem üzerindeki pseudo kodları aşağıdaki gibi belirtilmiştir. Nvp; parçacık

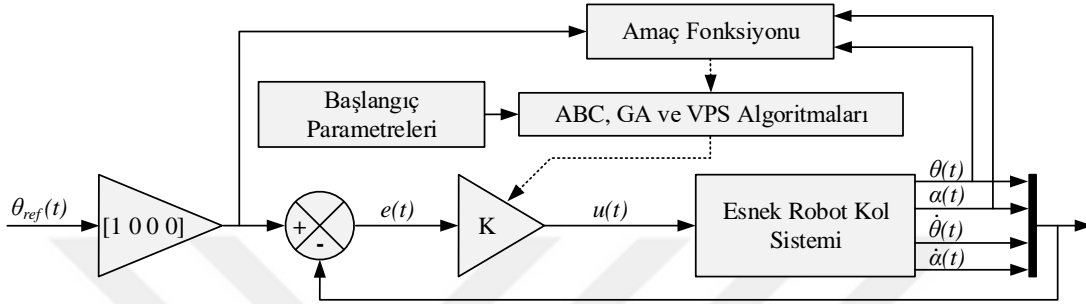
sayısı, α ; azalma fonksiyonuna ait sabiti(bu değer için 0,05 önerilmektedir), $w_1 - w_2$; sistemin doğal frekansını, p ; titreşimin başlangıç koşulları ile belirlenen sabit değerleri, $vpmcr$; titreşimli parçacık değişken bellek oranı, par ; bellekte kayıtlı parçacıktan seçilen değer, $maxNFES$; maksimum amaç fonksiyonu değerlerini ifade etmektedir.

- Algoritma parametrelerini belirle; nVP , α , w_1 , w_2 , p , $vpmcr$, par , bw , and $maxNFES$.
- Rastgele başlangıç titreşimli parçacık (VP) üret.
- Başlangıç titreşimli parçacıkları değerlendir.
- Amaç fonksiyonun (F_{it}) karşılık gelen vektörlerini ve cezalı amaç fonksiyonunu (PF_{it}) oluştur.
- Titreşimli parçacıklar bellek matrisini (VP_M) ve buna karşılık gelen amaç fonksiyon belleği (F_{it_M}) ve cezalı amaç fonksiyon belleği (PF_{it_M}) vektörlerini oluştur.
- Algoritma tarafından şimdiye kadar elde edilen parçacığı belirle (HP).
- While $NFEs < maxNFES$:
- Algoritma iterasyon numaralarını güncelle (NITs)
- Kullanılan D parametresini tanımla
- İyi parçacık (GP) ve kötü parçacık (BP) matrisleri tanımla
- Temel parçacıkları güncelle
- Harmoni arama tabanlı yaklaşımını kullanarak arama uzayından çıkan titreşimli parçacıkları yeniden oluştur.
- Yeni titreşimli parçacıkları değerlendir.

2.3. LQR Kontrolör Çok Amaçlı Optimizasyonu

Çalışmada, LQR kontrolcünün ağırlık matrislerini optimize etmek ve sistem cevabını en iyi sonuca getirilmek istenmektedir. Bu nedenle kontrolcü tasarımında Genetik Algoritma (GA), Yapay Arı Kolonisi (ABC) ve Titreşimli Parçacık Sistemi (VPS) algoritmaları kullanılmıştır. Kontrol sisteminin amacı, ERK sistemine bağlı olduğu servo motorunun hızlı bir şekilde hareket ettirilerek istenilen açısal konuma ulaşmasıdır. Bunun sonucunda ortaya çıkacak artık titreşimleri ise minimize edilmesi hedeflenmektedir. Şekil 2.12’de sunulan blok diyagramında, LQR kontrol parametrelerinin çok amaçlı optimizasyonunda kullanılacak yaklaşım ana hatları ile gösterilmektedir.

Şekil 2.12’de görüleceği üzere, optimizasyon algoritmaları kullanılarak sistemin çalışabilmesi için gerekli olan Q ve R matrislerini ayarlanması gerekmektedir. Matris değerlerinin alınabilmesi için ise bir amaç fonksiyona ihtiyaç vardır. Çalışma kapsamında ERK sistemleri için kontrol cevabının önemli parametrelerini dikkate alan ve objektif ağırlıklandırma yöntemini kullanan çoklu amaç fonksiyonu önerilmektedir.



Şekil 2.12. LQR kontrolöre ait parametrelere ait blok diyagramı

Önerilen çoklu amaç fonksiyonunda, esnek sistemlerin kontrol performansını belirleyen birçok alt fonksiyon tek bir amaç fonksiyonu altında birleştirilmiştir. Alt fonksiyonlara ait ağırlık katsayıları ise deneysel olarak belirlenmiştir. Eş. 2.67’de J_{sum} olarak ifade edilen amaç fonksiyonu, sistemin zaman tepkisinden elde edilen tepe zamanı, yükselme süresi, yerleşme zamanı, kalıcı durumu hatası ve maksimum aşma gibi parametreleri optimize etmeyi amaçlamaktadır. Eş. 2.67’de önerilen çoklu amaç fonksiyonu, mevcut birçok çalışmanın (Bilgiç, Tutumlu ve Conker, 2021) incelenmesi ile tasarlanmıştır.

$$J_{sum} = J_{\theta} + J_{\alpha}$$

$$J_{\theta} = (10 t_r(\theta)) + (6 t_s(\theta)) + (6.5 t_p(\theta)) + (0.1 |\max s_p|(\theta)) + (4.4 |\max s_s - ref|(\theta)) \quad (2.67)$$

$$J_{\alpha} = (0.1 \text{norm}(\alpha)) + (3.3 t_s(\alpha)) + (50 t_p(\alpha)) + (0.8 |\max s_p|(\alpha)) + (1500 |\max s_s - ref|(\alpha))$$

Eş. 2.67’de α esnek robot kolun uç açısını, θ servo motor açısını, t_r yükselme zamanını, t_s yerleşme zamanını, t_p tepe zamanını, s_p maksimum aşmayı, s_s kalıcı durum hatasını, “norm” matematiksel normu ve “ref” referansı simgelemektedir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde GA, ABC ve VPS algoritmalarının LQR kontrolör parametrelerinin optimize edilmesindeki performanslarına yönelik teorik ve deneysel çalışmalar gösterilmektedir. Titreşimli Parçacık Sistemi ilk kez bu çalışmada kullanılmıştır. Ayrıca sistemdeki kontrol parametrelerinin optimizasyonu sağlanmış olup elde edilen sonuçlar GA, ABC ve VPS algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Esnek Robot Kol sistemi için kontrol yanıtının önemli parametrelerini dikkate alan bir amaç fonksiyonu detaylı açıklamalarla birlikte çalışmada yer verilmiştir. Teorik ve deneysel çalışmalar; i5 işlemci ve 8 GB belleğe sahip bilgisayarda yapılmıştır. LQR kontrolörü ile optimizasyonu tamamlanmış ağırlık matris değerinin performans kriterleri esnek robot kol sisteminde değerlendirilmiştir.

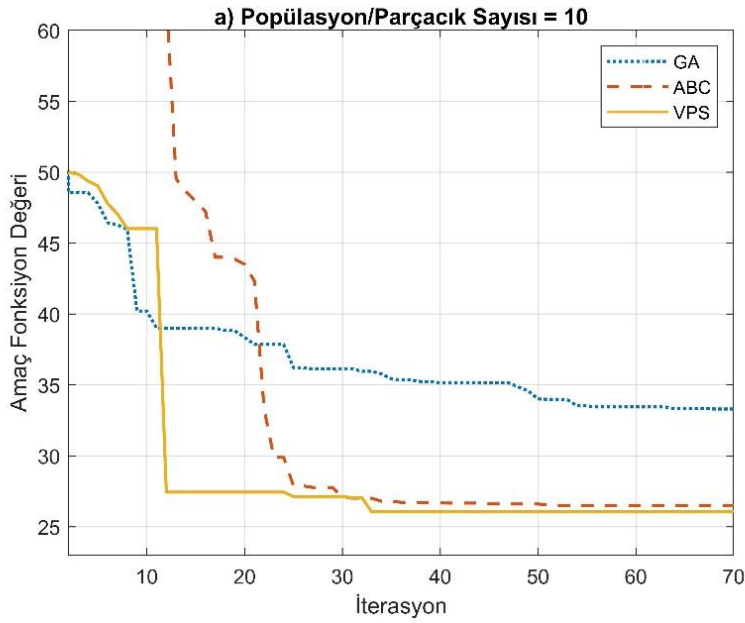
ERK sisteminin optimizasyon işlemlerinde kullanılan algoritmalar için dört farklı popülasyon/parçacık değerleri altında 100 iterasyon kullanılmıştır. Algoritmaların kullanımıyla optimizasyon işlemindeki en iyi kontrol sonuçlarını veren değerler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu optimizasyon algoritmalarının avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir. Başlangıç parametreleri, yukarıda da belirtildiği üzere amaç fonksiyonu için geniş bir aralık taranmış olup sonuçlar değerlendirilmiştir.

Çalışmada algoritma parametrelerinin belirlenmesi için simülasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.1'de simülasyon sonucunda elde edilen minimum amaç fonksiyonu değerlerini gösterilmektedir. Görüleceği üzere optimizasyon algoritmalarının başlangıç parametreleri optimizasyon performansı açısından önemlidir. Bu nedenle en düşük amaç fonksiyonu değeri veren başlangıç parametreleri, popülasyon/parçacık sayıları (PPS) ve iterasyon (tekrarlama) sayısı sabit tutularak geniş bir aralık taranarak elde edilmiştir. Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de popülasyon/parçacık sayısını (PPS), J_{sum} ise Eş. 2.67'de tanımlanan amaç fonksiyonun minimum değerini ifade etmektedir. Yukarıda belirtilen kriterler doğrultusunda GA, ABC ve VPS algoritmaları ile simülasyon çalışmaları tamamlanmıştır. Simülasyon sonucu elde edilen en iyi algoritma başlangıç parametreleri ise aşağıdaki gibi belirtilmiştir.

Genetik Algoritmada (GA) için, elit (en iyi) birey sayısı ile çaprazlama fraksiyon oranı sırasıyla PPS * 0.05 ve 0.7 olarak belirlenmiştir. ABC algoritmasında, modifikasyon oranı ve vazgeçme için önceden belirlenmiş tekrarlama sayıları sırasıyla 0.5 ve 400 olarak belirlenmiştir. Titreşimli Parçacık Sistemi (VPS) algoritmasında, titreşim sabitinin başlangıç değerleri olan ω_1 , ω_2 , ve ω_3 sırasıyla 0.3, 0.3 ve 0.4 olarak seçilmiştir. Azalan fonksiyon sabiti α ve titreşim sabitinin ρ başlangıç koşulları sırasıyla 0.05 ve 0.4 olarak belirlenmiştir. Bu algoritma parametreleri, Çizelge 3.1'den görüleceği üzere tasarlanan amaç fonksiyonu için geniş bir aralık taranarak belirlenen en iyi değerleridir. Çizelge 3.1 incelendiğinde GA ile ABC algoritmasına ait başlangıç parametrelerinin doğru belirlenmediği durumlarda algoritmaların lokal minimuma takıldığı görülmektedir. VPS algoritmasının ise diğer algoritmalara nazaran lokal minimum değerlerine takılmadığı ve özellikle düşük popülasyon sayılarında daha iyi bir performans göstererek daha düşük amaç fonksiyonu değerlerine ulaştığı tespit edilmiştir.

Çizelge 3.1. 10 PPS için GA çaprazlama fraksiyon oranı, ABC modifikasyon oranı ve VPS titreşim sabiti için sayısal değerlerin belirlenmesi

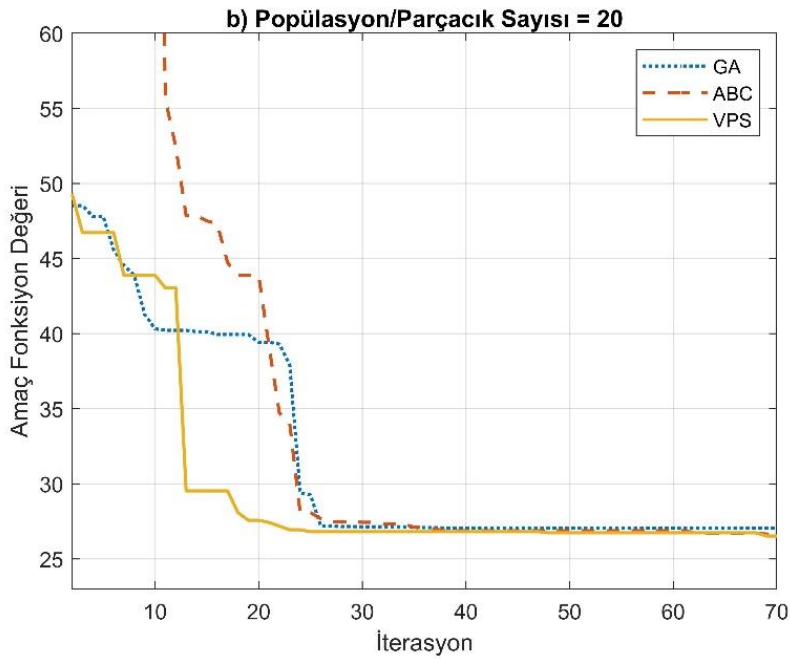
GA	J_{sum}	Çaprazlama Fraksiyon Oranı								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	10 PPS	46.782	45.153	46.439	46.584	46.453	45.094	33.013	46.310	46.279
ABC	J_{sum}	Modifikasyon Oranı								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	10 PPS	45.726	45.889	44.441	27.090	26.499	26.615	26.516	26.940	29.328
VPS	J_{sum}	Titreşim Sabitinin Başlangıç Değerleri								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	10 PPS	25.445	26.085	26.489	25.529	26.072	26.586	25.781	26.166	26.575



Şekil 3.1. GA, ABC ve VPS algoritmalarının 10 PPS için yakınsama grafiği

Çizelge 3.2. 20 PPS için GA çaprazlama fraksiyon oranı, ABC modifikasyon oranı ve VPS titreşim sabiti için sayısal değerlerin belirlenmesi

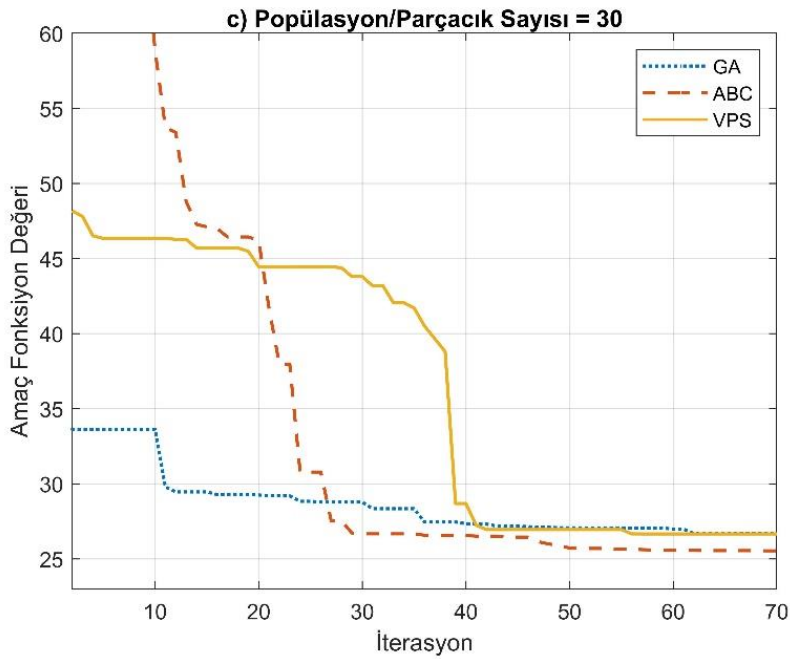
GA	J_{sum}	Çaprazlama Fraksiyon Oranı								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	20 PPS	46.012	46.05	36.775	46.514	45.707	27.685	27.051	27.160	27.137
ABC	J_{sum}	Modifikasyon Oranı								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	20 PPS	26.521	26.091	27.315	26.649	26.582	27.064	26.808	29.330	26.490
VPS	J_{sum}	Titreşim Sabitinin Başlangıç Değerleri								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	20 PPS	26.205	26.730	26.860	25.871	25.728	26.402	25.795	26.079	25.887



Şekil 3.2. GA, ABC ve VPS algoritmalarının 20 PPS için yakınsama grafiği

Çizelge 3.3. 30 PPS için GA çaprazlama fraksiyon oranı, ABC modifikasyon oranı ve VPS titreşim sabiti için sayısal değerlerin belirlenmesi

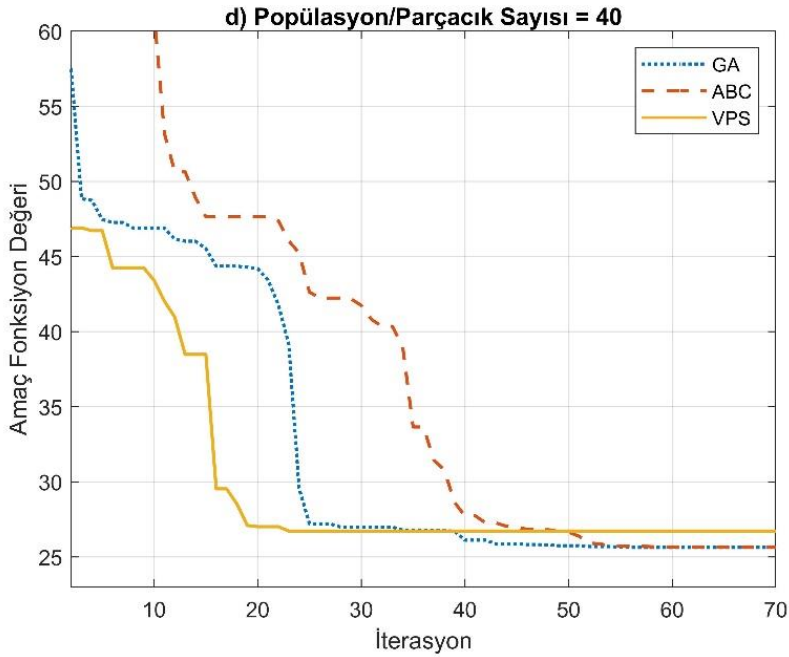
GA	J_{sum}	Çaprazlama Fraksiyon Oranı								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	30 PPS	45.858	46.540	45.890	29.325	26.914	25.954	25.573	25.969	25.583
ABC	J_{sum}	Modifikasyon Oranı								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	30 PPS	25.511	25.472	25.530	25.617	25.502	25.497	26.139	27.705	25.539
VPS	J_{sum}	Titreşim Sabitinin Başlangıç Değerleri								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	30 PPS	26.082	27.007	25.824	25.704	26.042	26.295	26.740	26.159	26.500



Şekil 3.3. GA, ABC ve VPS algoritmalarının 30 PPS için yakınsama grafiği

Çizelge 3.4. 40 PPS için GA çaprazlama fraksiyon oranı, ABC modifikasyon oranı ve VPS titreşim sabiti için sayısal değerlerin belirlenmesi

GA	J_{sum}	Çaprazlama Fraksiyon Oranı								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	40 PPS	46.424	28.135	45.922	26.973	26.090	25.411	25.593	26.539	25.444
ABC	J_{sum}	Modifikasyon Oranı								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	40 PPS	25.518	25.51	25.590	25.546	25.505	25.508	25.530	25.883	27.370
VPS	J_{sum}	Titreşim Sabitinin Başlangıç Değerleri								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	40 PPS	25.816	26.328	26.356	25.896	25.910	26.278	26.264	26.154	26.089



Şekil 3.4. GA, ABC ve VPS algoritmalarının 40 PPS için yakınsama grafiği

Metasezgisel algoritmaların optimizasyon performansını etkileyen bir diğer önemli parametre ise popülasyon/parçacık değeridir. Düşük popülasyon/parçacık değerinin seçilmesi sistemin lokal minimum değerine ulaşabilmesine neden olabilecektir. Bunun yanı sıra popülasyon/parçacık değerinin yüksek seçilmesi durumunda ise hesaplama süresinin artmasına sebebiyet verebilecektir. Çalışmada sunulan metasezgisel algoritmalar optimizasyon performansları açısından değerlendirilirken 3 temel kriter dikkate alınmıştır. Birincisi; hesaplanan minimum amaç fonksiyon değeridir. İkincisi; yakınsama geçmiştir. Üçüncüsü ise; sistem çalışma esnasındaki toplam hesaplama süresidir.

Şekil 3.1, 3.2, 3.3 ve 3.4'de dört farklı popülasyon/parçacık değerleri ile elde edilen algoritmaların yakınsama geçmişlerini gösterilmektedir. Sunulan şekillerde değerlerin net bir şekilde değerlendirilebilmesi için yatay eksen üzerinde 70 iterasyon ile sınırlandırılmıştır.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda düşük PPS değeri için Titreşimli Parçacık algoritması diğer algoritmalarından hızlı yakınsama oranına ulaşmakta ve düşük amaç fonksiyonu değerini sağlamaktadır (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2). Yüksek popülasyon/parçacık değeri ile ise GA ve ABC algoritması daha iyi değerler elde edilmektedir (Şekil 3.3 ve Şekil 3.4).

Çalışmalarda kullanılan algoritmaların 4 farklı popülasyon/parçacık değeri kullanılarak optimizasyonunda elde edilen amaç fonksiyon değerleri ve hesaplama süreleri Çizelge 3.5, 3.6, 3.7 ve 3.8’de gösterilmektedir. Minimum amaç fonksiyon değerlerinin 10 ve 20 PPS değeri ile elde edildiği tespit edilmiş olup bu değerlerin VPS algoritması elde edildiği görülmüştür. 30 ve 40 PPS değeri kullanıldığında ise minimum amaç fonksiyon değerinin ABC algoritması ile sağlandığı görülmüştür. Ancak optimizasyon hesaplama hızının en fazla VPS algoritmasıyla sağlandığı tespit edilmiştir.

Çizelge 3.5. GA, ABC ve VPS algoritmaları 10 PPS için optimizasyon sonuçları

		Q				R	K	J_{sum}	Süre [s]
		q_1	q_2	q_3	q_4	r_1			
PPS = 10	GA	322.1646	963.3616	0.1034	1.9890	8.9849	[5.9880 -6.7190 0.4522 0.0705]	33.013	79.866
	ABC	162.1510	891.3412	0.1612	0.8840	4.6800	[5.8863 -8.7261 0.4873 0.0806]	26.499	143.57
	VPS	212.6643	910.2563	0.2983	0.2206	4.6112	[6.3823 -8.7935 0.5323 0.1040]	25.529	73.372

Çizelge 3.6. GA, ABC ve VPS algoritmaları 20 PPS için optimizasyon sonuçları

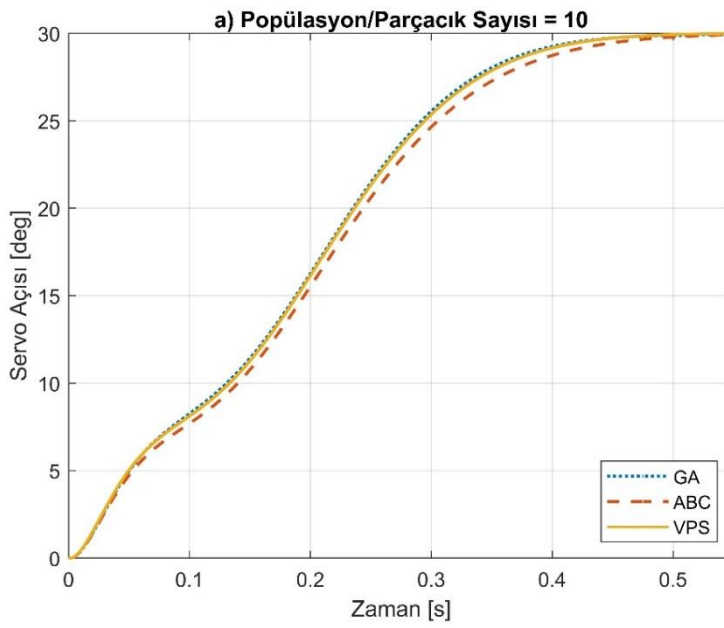
		Q				R	K	J_{sum}	Süre [s]
		q_1	q_2	q_3	q_4	r_1			
PPS = 20	GA	254.3068	845.0342	0.1000	1.1838	6.9271	[6.0590 -6.5979 0.4558 0.0981]	27.051	151.25
	ABC	158.5102	989.8905	0.3395	0.6892	4.2194	[6.1292 -9.6085 0.5355 0.1022]	26.582	283.79
	VPS	144.0129	801.3284	0.2863	1.0255	4.8642	[5.9877 -8.7933 0.4939 0.0690]	25.871	145.30

Çizelge 3.7. GA, ABC ve VPS algoritmaları 30 PPS için optimizasyon sonuçları

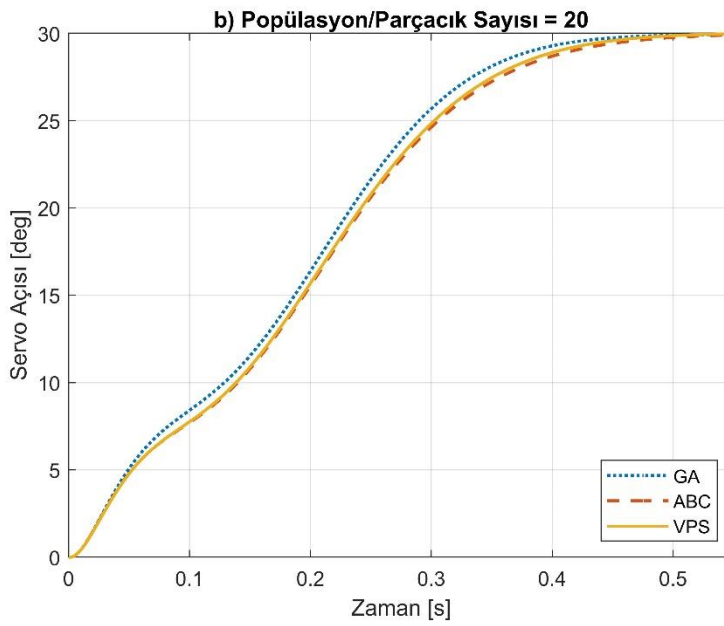
		Q				R	K	J_{sum}	Süre [s]
		q_1	q_2	q_3	q_4	r_1			
PPS = 30	GA	218.9296	954.7791	0.1251	1.2731	6.0292	[6.0259 -8.0699 0.4798 0.0770]	25.573	221.87
	ABC	233.7303	918.6623	0.1000	1.2454	6.2345	[6.0972 -7.5987 0.4747 0.0859]	25.502	423.30
	VPS	157.6089	862.1389	0.1818	0.6848	4.2923	[6.1803 -8.6487 0.5092 0.0888]	25.704	216.12

Çizelge 3.8. GA, ABC ve VPS algoritmaları 40 PPS için optimizasyon sonuçları

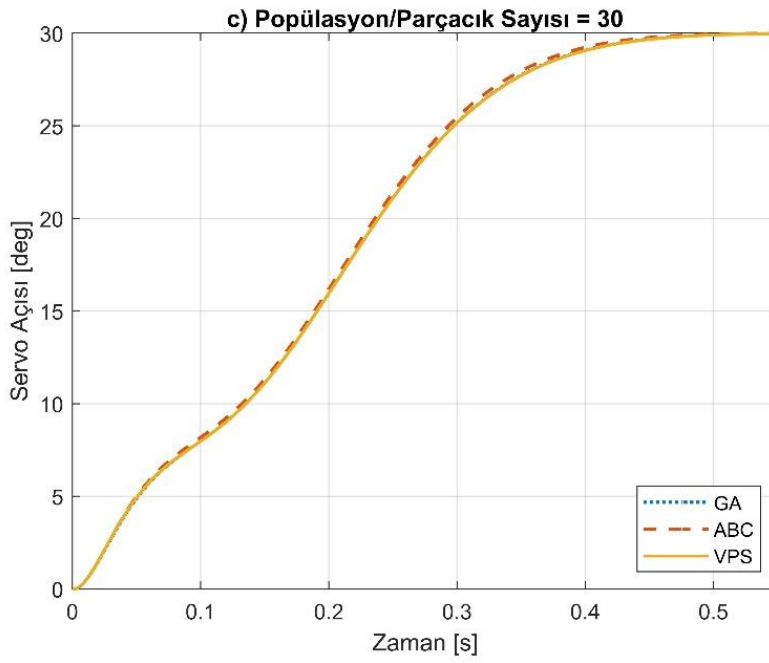
		Q				R	K	J_{sum}	Süre [s]
		q_1	q_2	q_3	q_4	r_1			
PPS = 40	GA	163.2876	796.1057	0.1808	0.9194	4.3752	[6.1091 -8.6928 0.5036 0.0808]	25.593	298.23
	ABC	243.8507	939.1684	0.1000	1.2901	6.5329	[6.1094 -7.5160 0.4738 0.0874]	25.505	562.57
	VPS	225.3902	932.6787	0.1932	0.4415	5.5423	[6.0906 -9.5593 0.5233 0.0740]	25.896	293.68



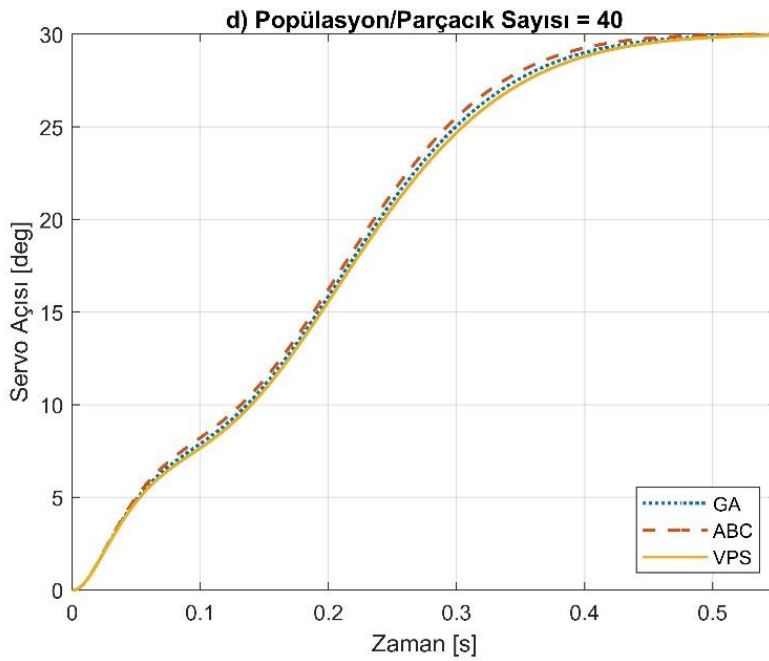
Şekil 3.5. Esnek kol servo açısı pozisyonu simülasyonu sonuçları 10 PPS değeri için



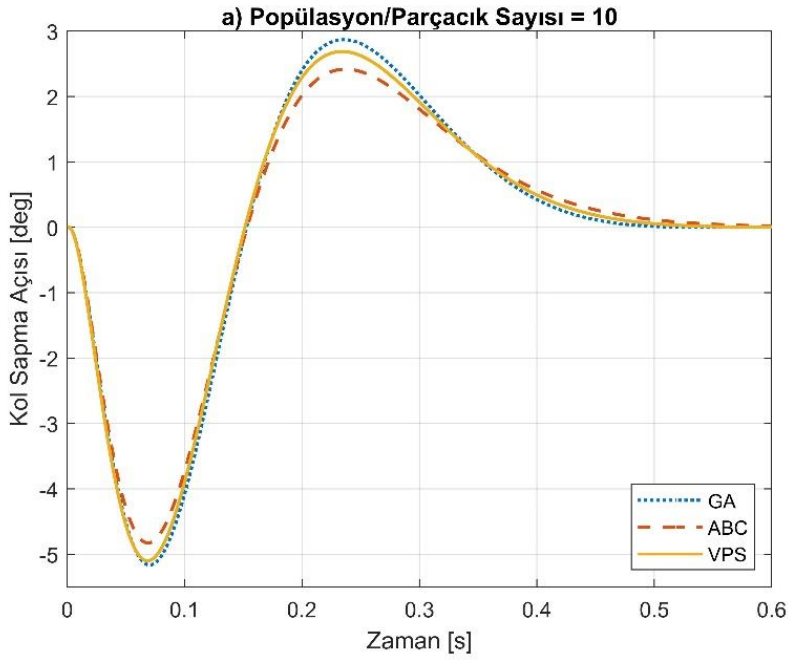
Şekil 3.6. Esnek kol servo açısı pozisyonu simülasyonu sonuçları 20 PPS değeri için



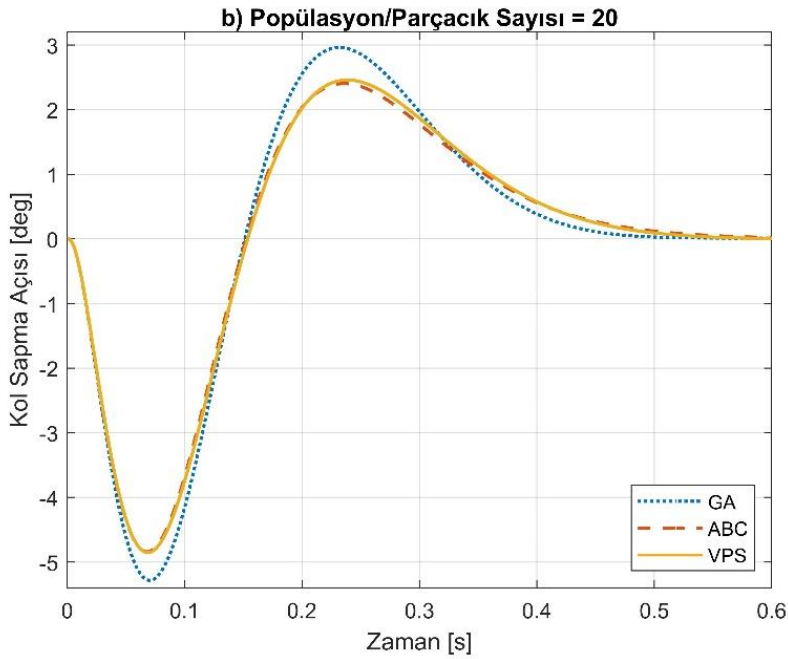
Şekil 3.7. Esnek kol servo açısı pozisyonu simülasyon sonuçları 30 PPS değeri için



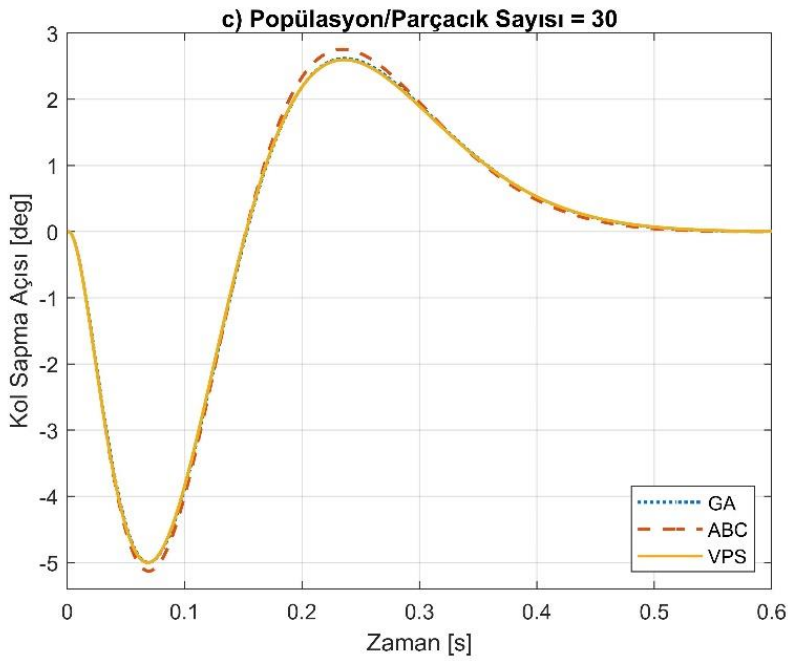
Şekil 3.8. Esnek kol servo açısı pozisyonu simülasyon sonuçları 40 PPS değeri için



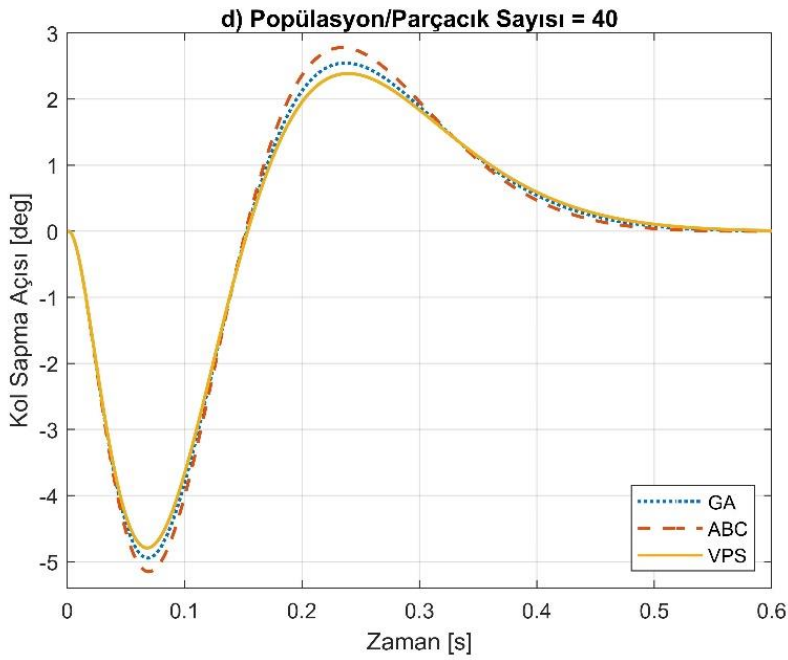
Şekil 3.9. ERK uç sapma sonuçlarına yönelik optimizasyonun GA, ABC ve VPS algoritmaları ile 10 PPS değeri için simülasyonu



Şekil 3.10. ERK uç sapma sonuçlarına yönelik optimizasyonun GA, ABC ve VPS algoritmaları ile 20 PPS değeri için simülasyonu



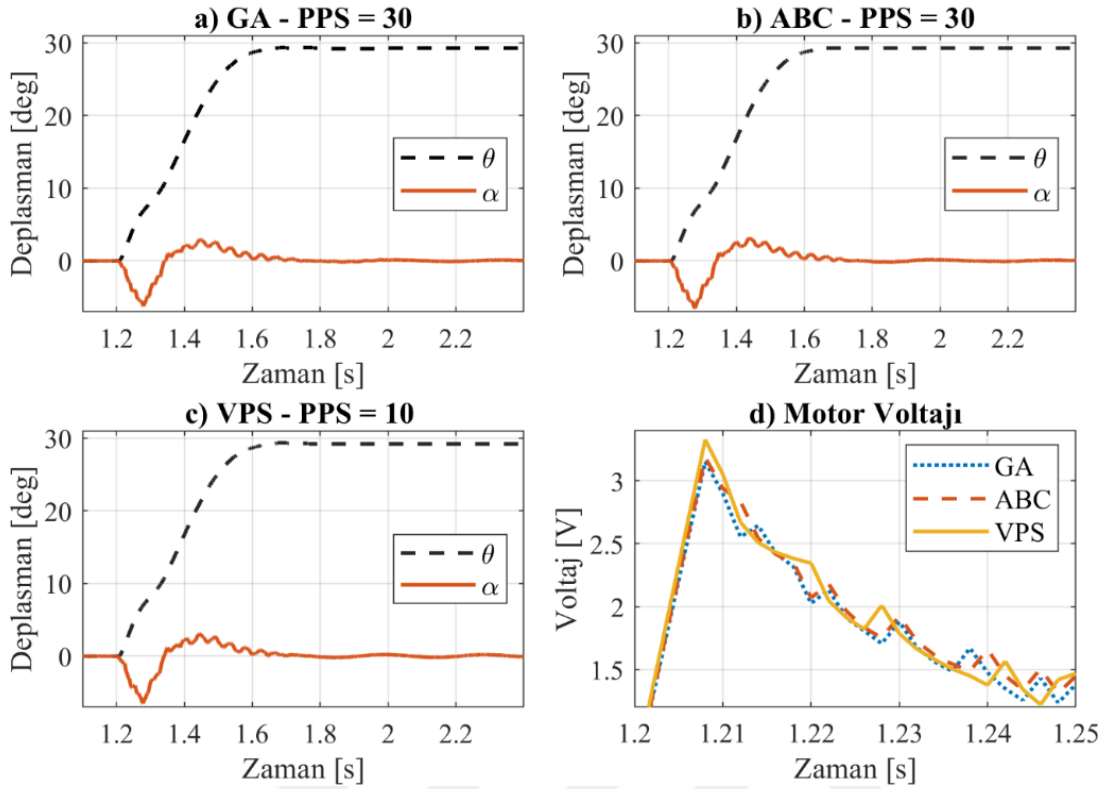
Şekil 3.11. ERK uç sapma sonuçlarına yönelik optimizasyonun GA, ABC ve VPS algoritmaları ile 30 PPS değeri için simülasyonu



Şekil 3.12. ERK uç sapma sonuçlarına yönelik optimizasyonun GA, ABC ve VPS algoritmaları ile 40 PPS değeri için simülasyonu

GA, ABC ve VPS algoritmaları ile 4 farklı PPS değerleri ile optimizasyonu gerçekleştirir. LQR kontrolöre ait teorik ve deneysel sonuçlar Şekil 3.1-3.12 arasındaki şekillerde gösterilmektedir. Her üç algorditmada da istenen amaç fonksiyon değeri, hesaplama süresi ve yakınsama değeri açısından farklılıklar olduğu görülmüştür. Sistemde önerilen amaç fonksiyonun çalışmada karşılaştırılan algoritmaların performanslarının net bir şekilde değerlendirilmesi ve kriterlerine ilişkin karara varılması açısından önemlidir.

Yukarıda yer alan şekillerde GA, ABC ve VPS algoritmaları için 4 farklı PPS değeri ile sağlanan sonuçlar göstermektedir. Çalışmada gösterilen GA, ABC ve VPS performanslarının değerlendirmesinin yapılabilmesi ve karara varılabilmesi için PPS değerleri ile elde edilen sonuçlar aynı grafikte sunulmuştur. Şekil 3.5, 3.6, 3.7 ve 3.8’de optimizasyonu sağlanmış esnek kol servo açı değerinin farklı popülasyon/parçacık değerlerine ait simülasyon sonuçlarını göstermektedir. 10 ve 20 PPS değeri ile en hızlı esnek kol servo açı yanıtının Genetik Algoritma ile sağlandığı ve en yavaş esnek kol servo açı yanıtının ise Yapay Arı Kolonisi algoritması ile elde edildiği görülmüştür. Şekil 3.5 ve 3.6’da gösterilen 10 ve 20 PPS değerleri için simülasyon sonuçlarında VPS algoritmasının esnek kol servo açı değerinin performansının GA ile ABC algoritmaları arasında olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3.7 ve 3.8’de gösterilen 30 ve 40 PPS değeri için simülasyon sonuçlarında, en hızlı esnek kol servo açı yanıtının ABC, en yavaş esnek kol servo açı yanıtının ise VPS algoritması ile elde edildiği görülmektedir. Şekil 3.9, 3.10, 3.11 ve 3.12’de esnek robot kol sisteminin servo hareketlerinden kaynaklanan optimizasyon sonucu uç sapma açılarına ait simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Şekil 3.9 ve 3.10’da gösterilen sonuçlardan, 10 ve 20 PPS için, en düşük uç sapma genliklerinin ABC algoritması, en büyük uç sapma genliklerinin ise GA ile elde edildiği gözlenmektedir. VPS algoritmasının uç sapma performansı ise 10 ve 20 PPS için GA ile ABC algoritmaları arasındadır. Şekil 3.11 ve 3.12’de sunulan sonuçlardan, 30 ve 40 PPS için, en düşük uç sapma genliğinin VPS algoritması, en büyük uç sapma genliğinin ise ABC algoritması ile elde edildiği görülmektedir. GA’nın 30 ve 40 PPS için uç sapma performansı ise VPS ile ABC algoritmaları arasındadır.



Şekil 3.13. Esnek robot kol servo açısı ve uç nokta salınımı için deneysel sonuçlar: a) En iyi GA konfigürasyonu, b) En iyi ABC konfigürasyonu, c) En iyi VPS konfigürasyonu, d) Motor Voltajı

Optimizasyon işlemleri sonucunda en iyi parametre değerleri belirlenerek ERK sistemine uygulanmıştır. ERK sisteminde elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 3.13’de sunulmaktadır. Şekil 3.13a’da 10 Popülasyon/Parçacık sayı değerleri ile Genetik Algoritmaya ait alfa ve teta sapmaları gösterilmiştir.

Şekil 3.13b’de 20 Popülasyon/Parçacık sayı değerleri ile Yapay Arı Kolonisi Algoritmasına ait alfa ve teta sapmaları gösterilmiştir.

Şekil 3.13c’de 30 Popülasyon/Parçacık sayı değerleri ile Titreşimli Parçacıklar Algoritmasına ait alfa ve teta sapmaları gösterilmiştir.

Şekil 3.13d’de GA, ABC ve VPS’ye ait Motor Voltajı gösterilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalarda GA, ABC ve VPS algoritmaları için optimizasyon değerleri ile belirlenen başlangıç parametreleri ve PPS değerleri kullanılmıştır. Şekil 3.13 ve Çizelge

3.9’da θ sisteminin esnek kol servo açısı, α ise esnek kolun uç sapmasını göstermektedir. Şekil 3.13’de görüleceği üzere, en iyi yapılandırma değerleri için GA, ABC ve VPS algoritmaları ile LQR sisteminin ağırlık matrislerini başarıyla optimizasyonunu sağlayarak kontrol sonuçlarını oluşturmaktadır. İncelenen algoritmalarda optimizasyon için gerekli hesaplama süreleri, ideal PPS değerleri ve minimum amaç fonksiyon değeri açısından farklılıklar içermektedir.

Çizelge 3.9. ERK sisteminden elde edilen deneysel veriler

	GA	ABC	VPS
Popülasyon/Parçacık Sayısı (PPS)	30	30	10
Min. Amaç Fonksiyonu (Jsum)	25.573	25.502	25.529
Optimizasyon Süresi [s]	221.87	423.30	73.372
θ			
Yükselme Zamanı (t_r) [s]	0.2871	0.2832	0.2841
Yerleşme Zamanı (t_s) [s]	1.6027	1.5987	1.5967
Tepe Zamanı (t_p) [s]	1.6800	1.7100	1.6740
Aşma Değeri [deg]	0.3003	0.3003	0.6024
Kararlı Durum Hatası (ess) [deg]	-	-	-
α			
Yükselme Zamanı (t_r) [s]	1.2432	1.2313	0.1025
Yerleşme Zamanı (t_s) [s]	3.0663	2.1896	2.9535
Tepe Zamanı (t_p) [s]	1.2800	1.2780	1.2780
Tepe Değeri	6.2303	6.4955	6.4802

Çizelge 3.9, Şekil 3.13’da sunulan deneysel sonuçlar için kontrol yanıtının önemli parametreleri ile sağlanan optimizasyon hesaplama süreleri, ideal PPS değerleri ve elde edilen minimum amaç fonksiyonu değerlerini göstermektedir. Çalışmada GA, ABC ve VPS algoritmaları sırasıyla 30, 30 ve 10 PPS değeri ile en düşük amaç fonksiyonu değeri elde edilmiştir. Ancak minimum amaç fonksiyon değerleri tespitinin yanı sıra sistem performans değerlendirmesinin sağlanabilmesi için optimizasyon hesaplama sürelerinin belirlenmesi önem kazanmaktadır. Çizelge 4’te de görüldüğü üzere Titreşimli Parçacık Algoritmasının optimizasyon süresinin diğer algoritmalarından ha kısa olduğu tespit edilmiştir. Yapılan testler sonucunda algoritmaların amaç fonksiyonu değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. Ancak en iyi performans Yapay Arı Kolonisi algoritmasıyla ve en kötü performans ise Genetik algoritma ile sağlanmıştır. Ayrıca, optimizasyon algoritmalarının

esnek kol uç sapmaları açısından performansları karşılaştırıldığında, en düşük salınım genliğinin GA, en yüksek salınım genliğinin ise ABC ile elde edildiği görülmektedir. VPS algoritmasına ait deneysel sonuçlar incelendiğinde ise servo kontrol ve uç sapma açısına ait performans değerlerinin GA ile ABC algoritmaları arasında bulunduğu görülmektedir. VPS algoritması, özellikle düşük PPS değeri ile karşılaştırılan diğer algoritmalarından daha hızlı bir yakınsama oranı sağlamaktadır. Bunun yanı sıra düşük amaç fonksiyonu değerlerine ulaşmakta ve hesaplama süresinin diğerlerinden çok daha kısa sürede tamamladığı görülmüştür.



4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma sonucunda ERK sisteminin hareket kontrolünde ortaya çıkan artık titreşimler, GA, ABC ve VPS algoritmaları ile optimize edilmiş olup işlem sonucunda ortaya çıkan performans değerleri analiz edilmiştir. Çalışmadaki asıl amaç artık titreşimlerin optimizasyonu ile esnek robot kol sisteminin noktasal konumuna en hızlı ve en az titreşim ile ulaşımının sağlanmasıdır. Yukarıdaki başlıklarda da bahsi geçen VPS algoritması ilk kez bu çalışmada LQR parametrelerinin ayarlanmasında kullanılmıştır.

ERK sisteminin optimizasyonunda, GA ve ABC gibi iyi bilinen algoritmalar da kullanılarak performans sonuçları gösterilmiştir. Esnek Robot Kol sistemlerinde kontrol parametreleri sistem sonucu için önem arz etmektedir. Bu nedenle sunulan çalışmada bu parametreleri dikkate alan amaç fonksiyonu da önerilmiştir. Performans değerlendirmesi yapılmış olan algoritmaların başlangıç parametreleri geniş bir arama uzay alanı taranarak sağlanmıştır. GA, ABC ve VPS algoritmaları 10, 20, 30 ve 40 PPS değeri ve 100 iterasyon ile incelenerek değerlendirilmiştir.

Algoritmalarla sağlanan en iyi optimizasyon sonuçları ERK sisteminde uygulanmış olup teorik ve deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonrası elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler aşağıda gösterilmiştir:

- GA, ABC ve VPS algoritmaları, düşük PPS değerleri ile yapılan karşılaştırmada en hızlı yakınsama oranı VSP algoritması ile sağlanmıştır.
- Algoritmaların PPS ve iterasyon değerleri sabit tutularak optimizasyon süre sonuçları değerlendirilmiş ve en hızlı optimizasyonun VPS ve en yavaş optimizasyonun ise ABC algoritması ile sağlandığı görülmüştür.
- Yapılan karşılaştırmalarda, 10-20 popülasyon/parçacık sayıları ile elde edilen en düşük amaç fonksiyon değeri VPS algoritması ile sağlanmıştır.
- Yapılan karşılaştırmalarda, 30-40 popülasyon/parçacık sayıları ile elde edilen en düşük amaç fonksiyon değeri ABC algoritması ile sağlanmıştır.

ERK sisteminde maksimum aşma, yerleşme zamanı ve yükselme zamanı değerleri GA, ABC ve VPS tabanlı LQR kontrolörü elde edilmiş olup performans ölçüleri değerlendirilmiştir. Performans ölçütleri dikkate alındığında VPS tabanlı LQR kontrolünün diğer kontrolcülerden daha başarılı bir performans gösterdiği tespit edilmiştir. Bu sayede amaç fonksiyonu ve VPS algoritması ile optimize edilerek ERK sisteminin istenilen açısal konumuna en hızlı bir şekilde ulaşması sağlanmış olup oluşan artık titreşimler minimize edilmiştir.



KAYNAKLAR

- 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).
- Basturk, B. (2006). An artificial bee colony (abc) algorithm for numeric function optimization. *In IEEE Swarm Intelligence Symposium*, 39(3), 459-471.
- Bilgiç, H. H. (2018). Esnek sistemlerin kontrolü için yapay zeka teknikleri ile girdi şekillendirici tasarımı, Doktora Tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay
- Bilgic, H. H., Sen, M. A., Yapici, A., Yavuz, H., Kalyoncu, M. (2021). Meta-heuristic tuning of the lqr weighting matrices using various objective functions on an experimental flexible arm under the effects of disturbance. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-14.
- Bilgic, H. H., Conker C, Yavuz H. (2021). Fuzzy logic-based decision support system for selection of optimum input shaping techniques in point-to-point motion systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 235(6), 795-808.
- Bilgiç, H. H., Tutumlu, M. S., Conker, Ç. (2021). Top ve çubuk sistemi için kaskad denetleyici parametrelerinin meta-sezgisel algoritmalarla optimizasyonu. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23(67), 157-167.
- Bingul, Z., Karahan, O. (2018). Comparison of pid and fopid controllers tuned by pso and abc algorithms for unstable and integrating systems with time delay. *Optimal Control Applications and Methods*, 39(4), 1431-1450.
- Conker, Ç., Kilic, A., Mistikoglu, S., Kapucu, S., Yavuz, H. (2014). An enhanced control technique for the elimination of residual vibrations in flexible-joint manipulators. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 60(9), 592-599.
- Dorigo, M., Birattari, M., Stutzle, T. (2006). Ant colony optimization. *IEEE computational intelligence magazine*, 1(4), 28-39.
- Erol, O. K., Eksin, I. (2006). A new optimization method: big bang-big crunch. *Advances in Engineering Software*, 37(2), 106-111.
- Geem, Z. W., Kim, J. H., Loganathan, G. V. (2001). A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simulation*, 76(2), 60-68.
- Gholipour, R., Khosravi, A., Mojallali, H. (2013). Suppression of chaotic behavior in duffing-holmes system using back-stepping controller optimized by unified particle swarm optimization algorithm. *IJE Transactions*, 26(11), 1299-1306.

- Hamzaçebi, C., Kutay, F. (2004). Yapay sinir ağıları ile Türkiye elektrik enerjisi tüketiminin 2010 yılına kadar tahmini. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19(3).
- Hakimpoor, H., Arshad, K. A. B., Tat, H. H., Khani, N., Rahmandoust, M. (2011). Artificial neural networks' applications in management. *World Applied Sciences Journal*, 14(7), 1008-1019.
- İnternet:Demircelikstore.URL: http://www.sanayiturk.com/haber_img/otomotiv-sektoru-insanrobot-isbirligi-ile-gelecege-hazir-1836.jpg, Son Erişim Tarihi: 22.12.2021
- İnternet:Elektrikde.URL:<https://www.elektrikde.com/wp-content/uploads/2020/08/kontrol-sistemleri.jpg>, Son Erişim Tarihi: 22.12.2021
- İnternet:Guralpvinc.URL:https://www.guralpvinc.com.tr/images2/ciftkirislitavanvinci_2.jpg, Son Erişim Tarihi: 22.12.2021
- İnternet:Quanser Inc. (2011), Rotary Flexible Link Module Datasheets. URL:www.quanser.com, Son Erişim Tarihi:22.12.2021
- İnternet:Quanser Inc. (2011), Rotary Servo Base Unit. URL:www.quanser.com, Son Erişim Tarihi:22.12.2021
- İnternet:Resourcesnews.URL:https://resources.news.e.abb.com/images/2020/10/14/0/Robotik760_1.jpg, Son Erişim Tarihi:22.12.2021
- Jarzebowska, E., Augustynek, K. and Urbas, A. (2018). Programmed task based motion analysis of robotic systems equipped with flexible links and supports. In MATEC Web of Conferences, 241, 1008.
- Jnifene, A. (2007). Active vibration control of flexible structures using delayed position feedback. *Systems and control letters*, 56(3), 215-222.
- Karaboğa, D. (2017). *Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları* (Dördüncü Baskı). Ankara: Nobel Akademi Yayıncılık.
- Kaveh, A., Rahmani, P., Eslamlou, A. D. (2021). A Multistage damage detection approach using graph theory and water strider algorithm. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-22.
- Keskintürk, T. (2006). Diferansiyel gelişim algoritması. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(9), 85-99.
- Kumar, A., Pathak, P. M., Sukavanam, N. (2013). Trajectory control of a two dof rigid-flexible space robot by a virtual space vehicle. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(5), 473-482.
- Lutfiyya, H., McMillin, B., Poshyanonda, P., Dagli, C. (1992). Composite stock cutting through simulated annealing. *Mathematical and Computer Modelling*, 16(1), 57-74.

- Mirshekaran, M., Piltan, F., Esmaeili, Z., Khajeaian, T., Kazeminasab, M. (2013). Design sliding mode modified fuzzy linear controller with application to flexible robot manipulator. *International Journal of Modern Education and Computer Science*, 5(10), 53.
- Mallikarjunaiah, S., Reddy, S. N. (2013). Design of pid controller for flexible link manipulator. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 3(6), 1207-1212.
- Ölgün, M., Tilki, U. (2020). Neural network based sliding mode controller with genetic algorithm for two link robot manipulator. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 120-129.
- Pedro, J. O., Dangor, M., Dahunsi, O. A., Ali, M. M. (2014). Intelligent feedback linearization control of nonlinear electrohydraulic suspension systems using particle swarm optimization. *Applied Soft Computing*, 24, 50-62.
- Rao, R. S., Narasimham, S. V. L., Ramalingaraju, M. (2008). Optimization of distribution network configuration for loss reduction using artificial bee colony algorithm. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems Engineering*, 1(2), 116-122.
- Rübmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., Harnisch, M. (2015). Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. *Boston Consulting Group*, 9(1), 54-89.
- Şen, M. A., Kalyoncu, M (2020). Grey wolf optimizer based tuning of a hybrid lqr-pid controller for foot trajectory control of a quadruped robot. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(2), 674-684.
- Siddique, M. N. H., Tokhi, M. O. (2002). GA-based neuro-fuzzy controller for flexible-link manipulator. *In Proceedings of the International Conference on Control Applications, IEEE*, 1, 471-476.
- Talebi, H. A., Khorasani, K., Patel, R. V. (1998). Neural network based control schemes for flexible-link manipulators: simulations and experiments. *Neural networks*, 11(7-8), 1357-1377.
- Tabassum, M., Mathew, K. (2014). A genetic algorithm analysis towards optimization solutions. *International Journal of Digital Information and Wireless Communications (IJDIWC)*, 4(1), 124-142.
- Tinkir, M., Önen, Ü., Kalyoncu, M. (2010). Modelling of neurofuzzy control of a flexible link. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 224(5), 529-543.
- Wilson, D. G., Robinett, R. D., Parker, G. G., Starr, G. P. (2002). Augmented sliding mode control for flexible link manipulators. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 34(4), 415-430.

- Woo, M. W., Daud, W. R. W., Tasirin, S. M., Talib, M. Z. M. (2007). Optimization of the spray drying operating parameters-a quick trial-and-error method. *Drying Technology*, 25(10), 1741-1747.
- Xu, B., Zhang, P. (2017). Composite learning sliding mode control of flexible-link manipulator. *Complexity*, <https://doi.org/10.1155/2017/9430259>.
- Yılmaz, M., Arslan, E. (2005). Bulanık mantığın jeodezik problemlerin çözümünde kullanılması. *Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu*, 2, 23-25.
- Zadeh, Los Angeles (2008). Fuzzy logic. *Scholarpedia*, 3 (3), 1766.
- Zhang, Z. G., Kimura, H., Fukuoka, Y. (2006). Autonomously generating efficient running of a quadruped robot using delayed feedback control. *Advanced Robotics*, 20(6), 607-629.

DİZİN

A

ABC · İV, V, viii, İX, X, xiii, 5, 6,
7, 28, 30, 31, 32, 36, 38, 39,
40, 41, 42, 43, 44, 45, 48, 49,
50, 51, 52, 54, 55
Amaç fonksiyonu · 29
Artık titreşim · İV

B

Bilgi Tabanı · 26

Ç

Çaprazlama fraksiyon · viii
Çıkarım Birimi · 26

D

Durulaştırma · 26

E

Esnek robot kol · İV, 1, 4, 6, 8,
11, 38, 50, 54

G

GA · İV, V, viii, İX, X, xiii, 5, 6,
7, 28, 29, 36, 38, 39, 40, 41,
42, 43, 44, 45, 48, 49, 50, 51,
52, 54, 55, 58
Genetik algoritma · İV

İ

İkinci merteye bir sistem · 21, 22
İleri besleme · 2

K

Kapalı çevrim · 2, 3, 21
Kontrolör · vii

L

LQR · 1, 2, İV, V, vii, İX, xiii, 3,
5, 6, 7, 8, 16, 23, 24, 36, 37,
38, 50, 52, 54, 55
LQR kontrolcü · 3, 7

M

Maksimum aşım · 22
Metasezgisel · vii, 25, 27, 30, 43

O

Optimizasyon · İV, viii, 4, 5, 7,
25, 27, 28, 30, 37, 38, 43, 44,
45, 50, 51, 52, 54

P

PPS · viii, İX, X, 5, 38, 39, 40,
41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48,
49, 50, 51, 52, 54

Q

Quenser · 10

R

Robotik Sistemler · Xi

S

Sönüm oranı · xii, 10, 16

T

Tepe zamanı · 22
Titreşim · İV

V

VPS · İV, V, viii, İX, X, xiii, 5, 6,
7, 28, 33, 34, 35, 36, 38, 39,
40, 41, 42, 43, 44, 45, 48, 49,
50, 51, 52, 54, 55

Y

Yapay arı kolonisi · İV, 4, 28
Yapay Zeka · vii
Yerleşme zamanı · 22
Yükselme zamanı · 22



TEKNOVERSITE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

