



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

¹Semih ÖZKAYA , ²Çağlar CONKER , ³Hasan Hüseyin BİLGİÇ 

^{1,3} İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Hatay, TÜRKİYE
² İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Hatay, TÜRKİYE
¹semihozkaya.mfbel7@iste.edu.tr, ²caglar.conker@iste.edu.tr, ³hhuseyin.bilgic@iste.edu.tr

(Geliş/Received: 12.03.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 03.08.2021)

ÖZ: Sunulan çalışma, bir esnek robot kol sisteminin hareket kontrolüne yönelik LQR denetleyici tasarımı ile kontrol parametrelerinin optimizasyonu hakkında ayrıntılı analizler sunmaktadır. Optimizasyonun temel amacı esnek robot kol sisteminin istenilen açısal konuma en hızlı şekilde gelmesini sağlamak ve uç sapmalarını ortadan kaldırmaktır. Titreşimli Parçacık Sistemi algoritması ilk kez bu çalışma ile LQR ağırlık matrislerinin ayarlanmasında kullanılmıştır. Önerilen yaklaşımın etkinliği, Genetik Algoritma ve Yapay Arı Kolonisi gibi iyi bilenen optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırılarak gösterilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında esnek robotik sistemler için kontrol yanıtının önemli parametrelerini dikkate alan bir çoklu amaç fonksiyonu da önerilmektedir. Optimizasyon algoritmalarına ait parametreler geniş bir arama uzayı taranarak belirlenmiş olup her algoritma dört farklı popülasyon değeri altında incelenerek 100 iterasyon için sonuçlar elde edilmiştir. Optimizasyon algoritmaları ile elde edilen en iyi kontrol sonuçları, esnek robot kol sistemine uygulanarak elde edilen sonuçlar teorik ve deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Makale, tanıtılan optimizasyon algoritmalarının her biri için gerekli teorik arka plan ile uygulamaya yönelik ayrıntıları sunacak şekilde düzenlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Esnek robot kol, Doğrusal kuadratik regülatör, Genetik algoritma, Yapay arı kolonisi, Titreşimli parçacıklar sistemi algoritması

Determination of LQR Controller Parameters for Flexible Link Manipulator System Using Metaheuristic Algorithms

ABSTRACT: The presented study provides detailed analysis of the LQR controller design for motion control of a flexible link manipulator system with the optimization of control parameters. The main objective of proposed optimization ensures that the flexible link manipulator system reaches the desired angular position as soon as possible and eliminates tip deflections. The Vibrating Particle System algorithm used for the first time in the adjustment of LQR weight matrices with this study. The efficiency of the proposed approach has been showing by comparing it with well-known optimization algorithms such as Genetic Algorithm and Artificial Bee Colony. Also, multi-objective function is proposed that considers the important parameters of the control response for flexible link manipulator systems in this study. Parameters of optimization algorithms have been determined by searching a wide search space and each algorithm was examined in terms of four different population values in order to reach results for 100 iterations. Furthermore, the configurations that obtained the best control results for optimization algorithms are compared with each other according to the theoretical and experimental studies performed. The article is organized in a manner that presents the required theoretical background and the implementation-related details for each of the optimization algorithms introduced.

Keywords: Flexible link manipulator, Linear quadratic regulator, Genetic algorithm, Artificial bee colony, Vibrating particles system algorithm

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde hareket kontrolüne yönelik çalışmalar, robotik ve otomasyonla ilgili araştırma alanlarının ana konularından biri haline gelmiştir. Modern imalat endüstrisinde, yüksek hızlı üretim için yüksek hız ve hassas hareket kontrolü gereklidir. Ancak, yüksek hız gereksinimi, artık titreşimler nedeniyle hassas hareket kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, hareket hızı ile artık titreşimlerin ortadan kaldırılması veya en azından azaltılması arasında bir denge bulunması, hareket kontrol çalışmalarının ve ilgili pratik uygulamaların önemli bir parçası haline gelmiştir. Esnek robotik sistemler; robot manipülatörler, vinçler, koordinat ölçüm makineleri, uzay araçları vb. geniş bir alanda kullanılmaktadır (Conker ve diğ., 2014; Bilgiç ve diğ., 2021). Bu nedenle esnek robot kol (ERK) sistemleri, çeşitli kontrol tekniklerinin performansını incelemede sıklıkla kullanılmaktadırlar. Geleneksel olarak ERK'nin kontrolünde lineer kontrol yöntemlerinden olan LQR (doğrusal kuadratik regülatör) (Mansour ve diğ., 2008) ve PID (oransal-integral-türevsel) (Fahmy ve diğ., 2012) kontrolörler kullanılmaktadır. PID denetleyiciler, basit yapıları nedeniyle çeşitli kontrol problemleri için sıklıkla tercih edilmektedir. PID denetleyici kazançlarının hassas olarak ayarlanması özellikle hassas pozisyon kontrolü veya hız kontrolü gibi uygulamalarda oldukça önemlidir (Önen ve diğ., 2019). Lineer kontrol yöntemlerinden bir diğer yaklaşım ise optimal durum-uzay geri besleme yöntemi olan LQR denetleyicilerdir. Bu yaklaşımda kontrol sinyali, performans indeksi ve durum-uzay matrisleri kullanılarak ayarlanmaktadır. Q ve R olarak gösterilen ağırlık matrislerinin belirlenmesi LQR performansının en önemli kısmını oluşturmaktadır. Geleneksel olarak PID ve LQR teknikleri için kontrol parametrelerinin hassas olarak ayarlanmasında deneme/yanılma yöntemi kullanılmaktadır (Lahdhiri ve Elmaraghy, 1999). Kontrol parametrelerini belirlemek için deneme/yanılma yönteminin kullanılması hem zaman almakta hem de en iyi çözümü elde etmekte güvence vermemektedir.

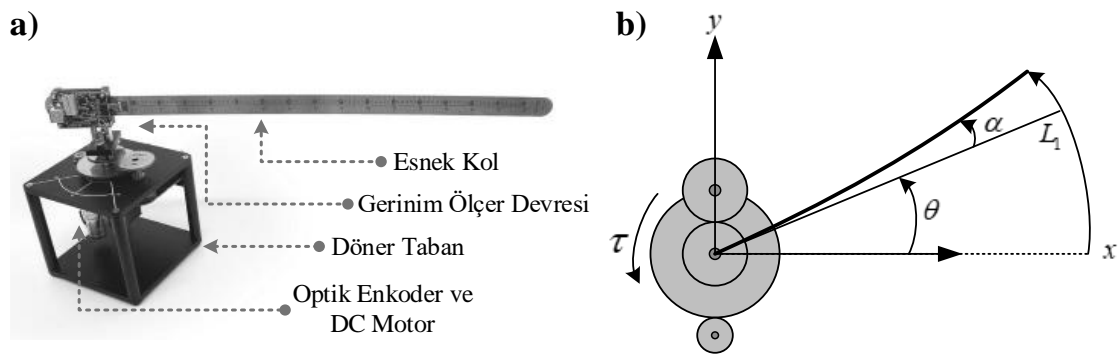
ERK'nin sistemlerinin kontrolü için literatürde doğrusal olmayan birçok kontrol yaklaşımı bulunmaktadır. Geri beslemeli doğrusallaştırma (feedback linearization) (Huang ve Lin, 2008), geri adımlamalı (back stepping) (He ve diğ., 2012), geri besleme stabilizasyonu (output feedback stabilization) (Jnifene, 2007), gecikmeli geri besleme (delayed feedback) (Pieper, 1998), H^∞ (D. G. Wilson ve diğ., 2002), ve kayan kipli kontrol (Sooraksa ve Chen, 1998) gibi bir dizi doğrusal olmayan kontrol yöntemi ERK sistemlerinin kontrolünde kullanılmıştır. Doğrusal olmayan kontrol teknikleri, doğrusal olmayan sistemlerin takibi ve stabilizasyonu gibi problemlerde avantajlı olmasına rağmen bu yapıların uygulanması kontrol teknikleri arasında göreceli olarak zor ve karmaşıktır. Literatürde ERK sistemlerini kontrol etmek için, bulanık mantık (Talebi ve diğ., 1998) ve yapay sinir ağları (Cao ve diğ., 2010) gibi yapay zeka temelli kontrol teknikleri önerilmiştir. ERK kontrol sistemlerinde kontrolcü performansını iyileştirmek için; bulanık mantık tabanlı PID kontrolü (Tinkir ve diğ., 2010), bulanık mantık tabanlı kayan kip kontrolü (Mirshekaran ve diğ., 2013), yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık kontrolü (Siddique ve diğ., 2002) ve genetik algoritmaya dayalı nöro-bulanık kontrol (Wongsathan ve diğ., 2009) gibi bir veya daha fazla kontrol yöntemi kullanılarak bir dizi hibrit kontrol tekniği geliştirilmiştir. Denetleyici tasarımında yapay zeka teknikleri temelli metasezgisel optimizasyon algoritmaları yaygın olarak kullanılmaktadır (Moura Oliveira , 2005; Jans ve Degraeve, 2007; Abdel-razak ve diğ., 2019, Bilgiç ve diğ., 2021). Genetik algoritma (Wongsathan ve diğ., 2009), parçacık sürü optimizasyonu (Çınaroğlu ve Bulut, 2018), yapay arı kolonisi algoritması (Bingul ve Karahan, 2018), arı algoritması (Bilgiç ve diğ., 2016), karınca kolonisi optimizasyonu (Jacknoon ve Abido, 2017) ve bozkurt algoritması (Sen ve Kalyoncu, M., 2020) farklı mühendislik problemlerinin optimizasyonunda sıklıkla kullanılan metasezgisel algoritmalarıdır.

Bu çalışma, esnek robot kol sistemi için LQR denetleyici ağırlık matrislerinin optimizasyonunda genetik algoritma (GA), yapay arı kolonisi (ABC) ve titreşimli parçacık sistemi (VPS) algoritmalarının tasarım ve performans analizleri sunmaktadır. En iyi optimizasyon sonuçlarını elde etmek için, GA, ABC ve VPS algoritmalarının farklı popülasyon/parçacık sayıları altındaki kontrolcü performansları incelenmiştir. Elde edilen optimizasyon sonuçları; ulaşılan minimum amaç fonksiyonu değeri, optimizasyon süresi ve ideal popülasyon/parçacık sayısına göre karşılaştırmalı olarak tablo ve grafiklerle

sunulmuştur. Optimizasyon algoritmaları ile elde edilen en iyi kontrol sinyalleri esnek robot kol sistemine uygulanarak sistemden elde edilen servo konum ve esnek kol uç sapmaları; yükselme zamanı, yerleşme zamanı, aşma değeri, kararlı durum hatası gibi birçok performans kriterine göre değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen VPS algoritması ilk kez bu çalışma ile LQR parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları sonucunda VPS algoritmasının, düşük popülasyon veya parçacık sayılarında, GA ve ABC algoritmalarına göre daha hızlı bir yakınsama oranı sağlayarak daha kısa sürede sonuca ulaştığı gösterilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında esnek robotik sistemler için kontrol yanıtının önemli parametrelerini dikkate alan bir amaç fonksiyonu da önerilmiştir.

MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Çalışma kapsamında optimize edilmiş LQR kontrolörü için yapılan deneysel çalışmalar, Quanser firması tarafından üretilen esnek robot kol (ERK) sisteminde gerçekleştirilmiştir. Esnek robot kol sistemi, bir DC motor ile yatay olarak çalıştırılan elastik bir uzuvdan meydana gelmektedir. DC servo motor ve motor milinin açısal konumu, elastik uzvun uç noktasına yerleştirilmiş bir enkoder ile ölçülmektedir. ERK sistem modeli ile şematik gösterimi Şekil 1'de sunulmaktadır. Şekil 1'de belirtilen α , θ ve τ değerleri; sırasıyla esnek robot kolun uç sapma açısını, servo motor açısını ve motor tarafından üretilen torku temsil etmektedir.



Şekil 1. Esnek robot kol sisteminin mekanik modeli (a) ve şematik (b) gösterimi

Figure 1. a Mechanical model and b) Schematic illustration of the flexible link manipulator

Esnek Robot Kol Sisteminin Modellenmesi (Modelling of the Single-Link Flexible Manipulator System)

Esnek Robot Kol sisteminin dinamik modeli, çoklu eklemlere sahip robot manipülatörleri gibi karmaşık robotik sistemler için kullanılan Lagrange yöntemi ile elde edilmiştir. Esnek robot kol sisteminin hareket denklemleri Eş. 1 ve Eş. 2'de sunulmaktadır.

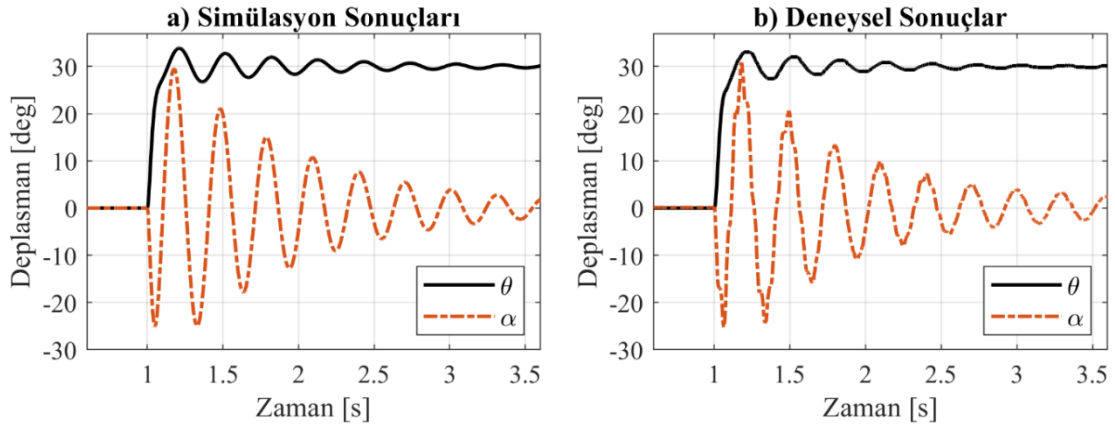
$$\ddot{\theta} = -\frac{B_{eq}}{J_{eq}} \dot{\theta} + \frac{K_s}{J_{eq}} \alpha + \frac{1}{J_{eq}} \tau \quad (1)$$

$$\ddot{\alpha} = -\frac{B_{eq}}{J_{eq}} \dot{\alpha} + K_s \left(\frac{J_{link} + J_{eq}}{J_{link} J_{eq}} \right) \alpha - \frac{1}{J_{eq}} \tau \quad (2)$$

ERK sisteminin matematiksel modeli hakkında ayrıntılı bilgilere Quanser tarafından yayınlanan ürün kataloğu üzerinden ulaşılabilir (Quanser Inc. 2011). Çizelge 1'de ERK sistemine ait parametreler ile sayısal değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 1. Esnek robot kol (ERK) sistemine ait parametreler ve sayısal değerleri (Quanser Inc. 2011)**Table 1.** Parameters and numerical values of the flexible link system (Quanser Inc. 2011)

Sembol	Açıklama	Değer
B_{eq}	Dişli eşdeğer viskoz sönüm oranı	0.004 N.m.s/rad
J_{link}	Esnek robot kol atalet momenti	0.0038 kg.m ²
J_{eq}	Büyük-Dişli eşdeğer atalet momenti	0.0026 kg.m ²
η_g	Dişli kutusu verimi	0.9
η_m	Motor verimi	0.69
R_m	Motor armatür direnci	2.6 Ω
K_s	Esnek kol için esneklik katsayısı	1.3522
K_m	Zıt emk sabiti	0.00767 V/(rad/s)
K_t	Motor tork sabiti	0.00767 N.m/A
K_g	Planet dişli kutusu oranı	14:5
V_M	Motor giriş voltajı	-

**Şekil 2.** Esnek robot kol sistemine ait teorik (a) ve deneysel (b) sonuçlar**Figure 2.** Flexible link simulation (a) and experimental (b) results for a step input

Eş. 1 ve Eş. 2 ile sunulan ERK sisteminin matematiksel modeli, doğrusal kuadratik regülatör (LQR) denetleyiciye ait ağırlık matrislerinin ayarlanmasında kullanılmıştır. ERK sistemine uygulanan basamak girişi için elde edilen motor konumu (θ) ile uç sapmasına (α) ait sonuçlar teorik (a) ve deneysel (b) olarak Şekil 2’de sunulmaktadır. Servo motorun konumu ve esnek uzuv uç sapması gibi açısal değerler derece olarak gösterilmektedir. Şekil 2’de sunulan teorik (a) ve deneysel (b) sonuçların yakından eşleşmesi, ERK sisteminin matematiksel olarak gerçekçi bir şekilde modellendiğini göstermektedir.

Doğrusal Kuadratik Regülatör (LQR) Kontrolör Tasarımı (Design of the Linear Quadratic Regulator (LQR) Controller)

Doğrusal kuadratik regülatör (LQR), çeşitli kontrol problemleri için sıklıkla tercih edilen bir tam durum geri besleme kontrol tekniğidir. LQR kontrol performansını etkileyen en önemli parametreler Q ve R ile sembolize edilen ağırlık matrislerine ait değerlerinin belirlenmesidir. Sistem modelinin doğrusal zamanla değişmeyen durum-uzay temsili ile kuadratik maliyet fonksiyonu, sırasıyla Eş. 3 ve Eş. 4’te sunulmaktadır.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3)$$

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (e^T Q e + u^T R u) dt \quad (4)$$

Yukarıdaki eşitlikte belirtilen x ve u değerleri sırası ile durum vektörü ve kontrol sinyalini, A , B ve C ise sırası ile durum, girdi ve çıktı matrislerini temsil etmektedir. Eşitliklerde belirtilen 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. 5'de gösterildiği şekilde ifade edilmektedir:

$$K = R^{-1} B^T P \quad (5)$$

Eş. 5'de belirtilen P , Ricatti eşitliğinin çözümünden elde edilen simetrik matrisi ifade etmektedir.

$$PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (6)$$

Q ve R diyagonal matrisleri, performans indeksini azaltmak için LQR denetleyici tasarımında sistem girişini hesaplamakta kullanılmaktadır. Eş. 7 de belirtilen Q , ağırlık matrisi ve R , sistem matrisini ifade etmektedir.

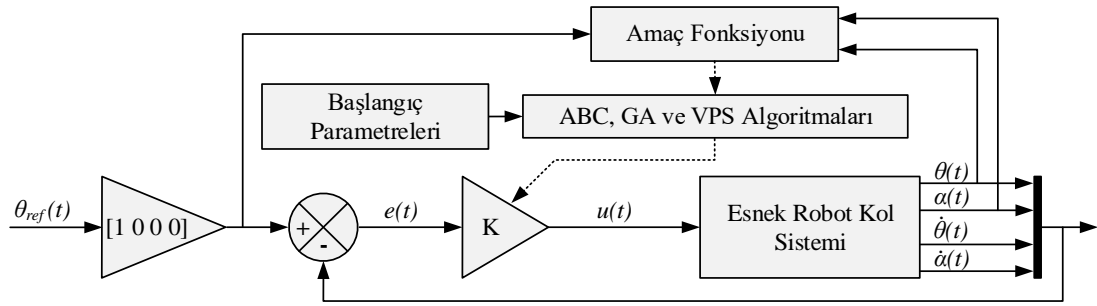
$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_n \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

İstenilen kontrol kriterlerinin sağlanması için Q ve R matrislerine ait değerlerin ayarlanması gerekmektedir. Geleneksel olarak Q ve R kontrol parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan yöntem, deneme/yanılma yaklaşımıdır. Deneme/yanılma yönteminin başarısı tasarımcının deneyimine bağlı olmakla birlikte bu yaklaşım en iyi çözümü elde etmek için garanti vermediği gibi genellikle uzun süreler gerekmektedir.

LQR Kontrolör Çok Amaçlı Optimizasyonu (Multi-Objective Optimization Of The LQR Controller)

Bu bölümde, LQR denetleyici tasarımı ile kontrol parametrelerinin optimizasyonunda metasezgisel algoritmaların kullanımı açıklanmaktadır. Sunulan çalışmada Genetik Algoritma (GA), Yapay Arı Kolonisi (ABC) ve Titreşimli Parçacık Sistemi (VPS) algoritmaları, LQR denetleyicinin ağırlık matrislerini optimize etmek ve kontrolcü cevabını iyileştirmek için kullanılmaktadır. Tasarlanan kontrol sisteminin amacı, esnek robot kolun bağlı olduğu servo motoru mümkün olan en hızlı şekilde hareket ettirerek noktadan noktaya hareket kontrolünü sağlamak ve sistemde meydana gelen artık titreşimleri ortadan kaldırmaktır. Şekil 3'te sunulan blok diyagramında, LQR kontrol parametrelerinin çok amaçlı optimizasyonunda kullanılacak yaklaşım ana hatları ile gösterilmektedir.

Şekil 3'te görüleceği üzere, optimizasyon algoritmaları kullanıldığında Q ve R matrislerini ayarlamak için bir amaç fonksiyonu gerekmektedir. Çalışma kapsamında esnek robotik sistemler için kontrol cevabının önemli parametrelerini dikkate alan ve objektif ağırlıklandırma yöntemini kullanan çoklu amaç fonksiyonu önerilmektedir.



Şekil 3. LQR kontrol parametrelerinin optimal ayarı için geliştirilen kontrol sistemine ait genel blok diyagramı

Figure 3. Block diagram for optimal tuning of LQR control parameters

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. 8’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. 8’de önerilen çoklu amaç fonksiyonu, mevcut birçok çalışmanın (Çınaroğlu ve Bulut, 2018, Bilgiç ve diğ., 2021) incelenmesi ile tasarlanmıştır.

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

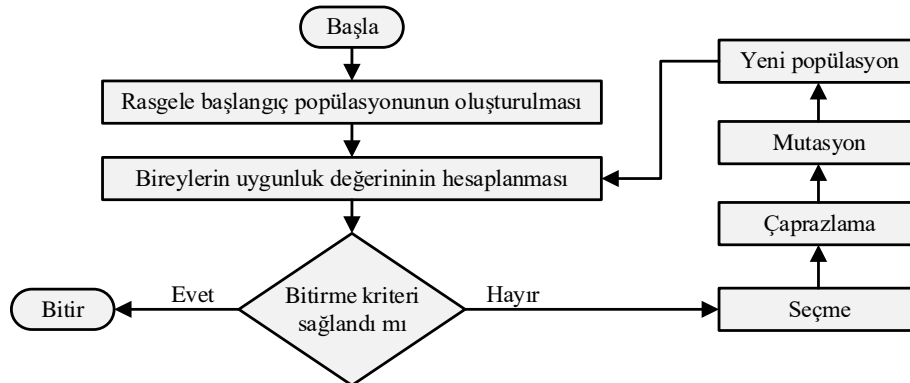
$$J_{\theta} = (10 t_r(\theta)) + (6 t_s(\theta)) + (6.5 t_p(\theta)) + (0.1 |\max s_p|(\theta)) + (4.4 |\max s_s - ref|(\theta)) \quad (8)$$

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

Eş. 8’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.

Genetik Algoritma (GA) (Genetic Algorithm)

John Holland (Holland, 1992) tarafından önerilen Genetik Algoritma (GA), karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Genetik Algoritmanın tercih edilmesinin temel sebebi, geniş bir alanın taranmasına yönelik işlemleri kısa sürede tamamlayarak uygun bir çözüme kavuşturmasıdır.



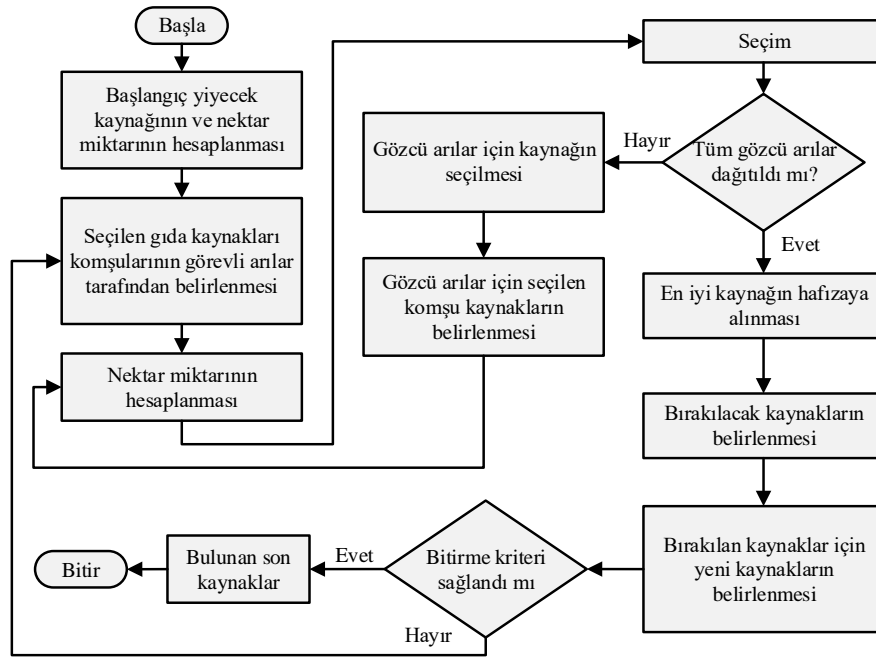
Şekil 4. Genetik Algoritma (GA) program akış şeması

Figure 4. Flowchart of the Genetic Algorithm (GA)

Evrım teorisinde konu edilen doğal seçim, genetik algoritmanın temelini oluşturduğundan dolayı genetik algoritma ve evrım teorisi birbiriyle bağlantılıdır. Genel olarak Genetik Algoritma doğal seçim sistemini organize ederek genlerin sonraki nesillere aktarımını sağlamaktadır. GA'ya ait program akış şeması Şekil 4'te sunulmaktadır. GA'nın başlangıç noktası 0 ve 1'lerden meydana gelen rastgele oluşturulmuş bireylerin (kromozomların) üretilmesinden meydana gelmektedir. Süreçte yeni bir popülasyon üretilirken, önceki popülasyondan elde edilen veriler kullanılmaktadır. Üretilen kromozomun uygunluğu, her iterasyon için optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu dikkate alınarak belirlenmektedir. Belirlenen uygun değerler, doğal seleksiyon periyodu ile daha iyi özelliğe sahip yeni nesillere dönüştürülmektedir. Bu süreçte Genetik Algoritmada temel olarak belirlenen seçme, çaprazlama, mutasyon ve yeni popülasyon üretimi işlemleri uygulanmaktadır. Yeni nesil oluşumunda aynı kromozomlara sahip tekrar eden seçimler sürekli kendini tekrar eden konuma gelebilmektedir. Bu nedenle kromozomlar mutasyon sürecine tabi tutularak, yeni kromozomlardaki uçların küçük parçalarında değişiklikler yapılarak sonraki geçiş dönemleri için spesifik kromozomlarla yeni bir nesil oluşturmaktadır. Sonrasında, yeni aday çözüm kromozomları, algoritmanın sonraki nesillerinde kullanılabilir. Süreç içerisinde her yeni oluşturulan nüfusun mevcut nüfustan daha iyi olması arzu edilmektedir. Bu sayede algoritma, daha uygun kromozomların bulunmasına olanak sağlamaktadır. Bu işlem, uygun bir çözüm veya maksimum iterasyon sayısı elde edilene kadar devam etmektedir. GA zaman kısıtlamalarını dikkate alan literatürdeki başarılı algoritmalarından birisidir.

Yapay Arı Kolonisi (ABC) Algoritması (Artificial Bee Colony Algorithm)

Yapay Arı Kolonisi (ABC), karmaşık optimizasyon sorunlarına çözümler bulmak için Derviş Karaboğa (Karaboga, 2017) tarafından önerilen bir diğer iyi bilinen akıllı arama algoritmasıdır. ABC algoritması, arılar ile kaynaklar arasındaki etkileşimden ilham alarak oluşturulmuştur. ABC algoritması yapay arıları üç gruba ayırmaktadır. Bunlar kâşif arılar, gözcü arılar ve işçi arılardır. İşçi arılar, gıda kaynaklarını araştırmakta ve gıdaların bulunduğu yer hakkındaki bilgiyi koloni arılarıyla paylaşmaktadırlar. Yukarıda bahsedilen her bir arı sadece bir besin kaynağından sorumludur. İşçi arılar kovandaki gözcü arılar için besin kaynağı bilgisi sağlamaktadır. Başlangıç olarak, işçi arı gıda kaynağını boşaltmaktadır.



Şekil 5. Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritması program akış şeması

Figure 5. Flowchart of the Artificial Bee Colony (ABC) algorithm

Kaynakların tükenmesi sonrası işçi arılar, kâşif arılara dönüşmekte ve kovanın etrafında yeni yiyecek kaynakları aramaya başlamaktadır. Bir gıda kaynağının durumu, uygun bir problem için bir çözüm adayı olabilmektedir. Yiyecek kaynağı ve nektar miktarı, amaç fonksiyonun değerini belirlemektedir. ABC algoritmasına ait program akış şeması Şekil 5’de sunulmaktadır (Çınaroğlu ve Bulut, 2018). Algoritma, arıların arama alanına rastgele yerleştirilmesi ve ilk çözümlerin üretilmesiyle başlamaktadır. $i = 1; 2; \dots; SN$ (SN kaynakların sayısını göstermektedir) için her bir kaynak D -boyutlu bir vektördür. Arama uzayı $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, X_{iD})^T$ değeri i ’nci gıda kaynağının pozisyonuna karşılık gelmektedir. İşçi arıların her biri aşağıdaki eşitlikle değiştirilmiş bir gıda kaynağı pozisyonu araştırmakta ve üretmektedir:

$$x_{ij}' = x_{ij} + r_{ij} (x_{ij} - x_{kj}) \quad (9)$$

Eş.10’da $j \in 1, 2, \dots, D$ ve $k \in 1, 2, \dots, SN$ rastgele seçilmiş indekslerdir ve $k \neq i$ ’dir. r_{ij} parametresi de $[-1; 1]$ alanı içerisindeki rastgele bir sayıdır. Gözcü arı gıda kaynağı hakkında veri elde ettikten sonra, Eş. 10’da gösterilen P_i olasılığına dayanarak X_i gıda kaynağı bölgesini hesaplamaktadır:

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{n=1}^{SN} fit_n} \quad (10)$$

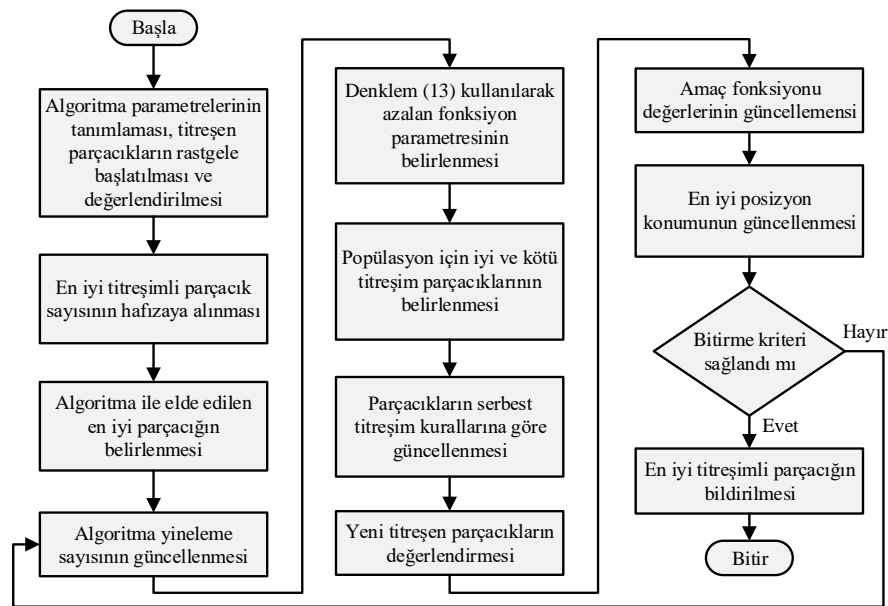
Uygunluk değeri fit_i ’i hesaplamak amacıyla aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır:

$$fit_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + f(x_i)}, & f(x_i) \geq 0 \\ 1 + |f(x_i)|, & f(x_i) \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

Eş.11’de X_i kaynağının amaç fonksiyonu $f(x_i)$ ile temsil edilmektedir. Elde edilen kaynak değerlerinin en iyi durdurma kriterlerinin uygunluğuna bakılır ve uygunluğu doğrultusunda ise işlem sona erer. Eğer aksi bir durum söz konusuysa komşu kaynaklar incelenir ve yeni kaynaklar aranmaya başlanır. Yapay arı kolonisi hakkında detaylı bilgilere literatürde sunulan kaynaklardan ulaşılabilir (Bingül ve Karahan, 2018).

Titreşimli Parçacıklar Sistemi (VPS) Algoritması (Vibrating Particles System Algorithm)

Titreşimli Parçacıklar Sistemi (VPS), 2017 yılında Kaveh ve Ghazaan tarafından önerilen yeni bir metasezgisel arama algoritmasıdır. Yakın zamanda önerilen bir algoritma olmasına karşın süreç planlaması, parametre tahmini, imalat vb. birçok alanda kullanılmaktadır (Fathi ve diğ., 2021; Kaveh ve diğ., 2021). VPS algoritması temel olarak sönümlü, tek serbestlik dereceli sistemlerin titreşimine dayanmaktadır. Algoritma, ilk olarak rastgele çözümlerle başlamakta ve bunları sönümlü, tek serbestlik dereceli sistemlerin serbest titreşimi olarak incelemektedir. Düşük sönüm koşulları dikkate alındığında, serbest titreşimli sistemler veya titreşimli parçacıklar salınım yapmakta ve diferansiyel denklemler yardımıyla ifade edilen belirli bir algoritmaya göre denge konumuna geri dönmektedir. VPS algoritması optimizasyon süresince elde edilen sonuçların rastgele bir şekilde kullanılması ve sonuçların bir kombinasyonu alınarak parçacıkların derecesini en iyi kriterler sağlanana kadar döngü içerisinde tekrar ettirmektedir. 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 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Titreşim Parçacıkları Sistemi (VPS) algoritması program akış şeması

Figure 6. Flowchart of the Vibration Particles System (VPS) algorithm

Tek serbestlik dereceli kritik altı sönümlü titreşimler için sistemin çözümü Eş. 12'de gösterilmektedir:

$$x(t) = \rho e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_D t + \phi) \quad (12)$$

Eş.12'de ω_n sistemin doğal frekansını, ξ sistemin sönüm oranını, ρ ve ϕ titreşimin başlangıç koşulları ile belirlenen sabit değerleri ifade etmektedir. VPS algoritmasında her bir parçacık için farklı ağırlıkları olan üç denge pozisyonu bulunmaktadır. HP - Tüm popülasyonun süresi boyunca elde edilen en iyi konumu, GP - İyi bir parçacığı ve BP - Kötü bir parçacığı ifade etmektedir. Mevcut popülasyon, her bir çözüm adayını için GP ve BP'yi seçerek artan bir sırayla amaç fonksiyon değeri açısından hizalanmaktadır. Sistemin serbest titreşimlerindeki salınım genliklerinin azalma oranını belirleyen

parametre sönüm oranıdır. Azalma fonksiyonu (D) VPS algoritmasının sönüm seviyesinin ayarlanması için tanımlanır. Azalma fonksiyonu D Eş.13'te gösterildiği şekilde ifade edilmektedir.

$$D = \left(\frac{NITs}{\max NITs} \right)^{-\alpha} \quad (13)$$

Eş.13'teki 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.14'te gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} newVP_i &= \omega_1 (D.A.rand + HP) + \omega_2 (D.A.rand + GP_i) + \omega_3 (D.A.rand + BP_i) \\ A &= \omega_1 (HP - VP_i) + \omega_2 (GP_i - VP_i) + \omega_3 (BP_i - VP_i) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 0$$

Eş.14'teki 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.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA (RESEARCH FINDINGS AND DISCUSSIONS)

Bu bölümde LQR denetleyici parametrelerinin optimize edilmesinde GA, ABC ve VPS algoritmalarının performanslarının değerlendirilmesine yönelik teorik ve deneysel çalışmalara yer verilmektedir. VPS algoritması ilk kez bu çalışma ile LQR kontrol parametrelerinin optimizasyonunda kullanılmış olup elde edilen sonuçlar diğer optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırılarak VPS algoritmasının avantajları gösterilmiştir. Ayrıca, sunulan çalışma ERK sistemi için kontrol yanıtının önemli parametrelerini dikkate alan bir amaç fonksiyonunun tasarımına yönelik detayları da sunmaktadır. Çalışma kapsamında sunulan algoritmalar 8 GB belleğe sahip Intel Core i5 CPU 1.8 GHz PC'de çalıştırılmıştır. LQR kontrolörüne ait ağırlık matrislerinin optimize edilmiş değerlerinin etkinliği esnek robot kol sisteminde karşılaştırılmıştır. En iyi optimizasyon sonuçlarının elde edilebilmesi için, her algoritma dört farklı popülasyon veya parçacık değerleri (10, 20, 30, 40) altında 100 iterasyon için incelenmiştir. Ayrıca, her algoritma için en iyi kontrol sonuçlarını veren değerler birbirleriyle karşılaştırılarak optimizasyon algoritmalarının avantaj ve dezavantajları gösterilmiştir. Optimizasyon algoritmalarına ait başlangıç parametreleri, tasarlanan amaç fonksiyonu için geniş bir aralık taranarak incelenmiştir. Çizelge 2, GA, ABC ve VPS algoritmalarına ait başlangıç parametrelerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen minimum amaç fonksiyonu değerlerini göstermektedir. Çizelge 2'den görüleceği üzere optimizasyon algoritmalarının başlangıç parametreleri optimizasyon performansını önemli oranda etkilemektedir. Bu nedenle belirlenen popülasyon/parçacık sayıları ile iterasyon sayısı sabit tutularak en düşük amaç fonksiyonu değeri veren başlangıç parametreleri geniş bir aralık taranarak elde edilmiştir. Çizelge 2 ve Çizelge 3'de PPS popülasyon veya parçacık sayısını, J_{sum} ise Eş. 8'de tanımlanan amaç fonksiyonunun minimum değerini ifade etmektedir.

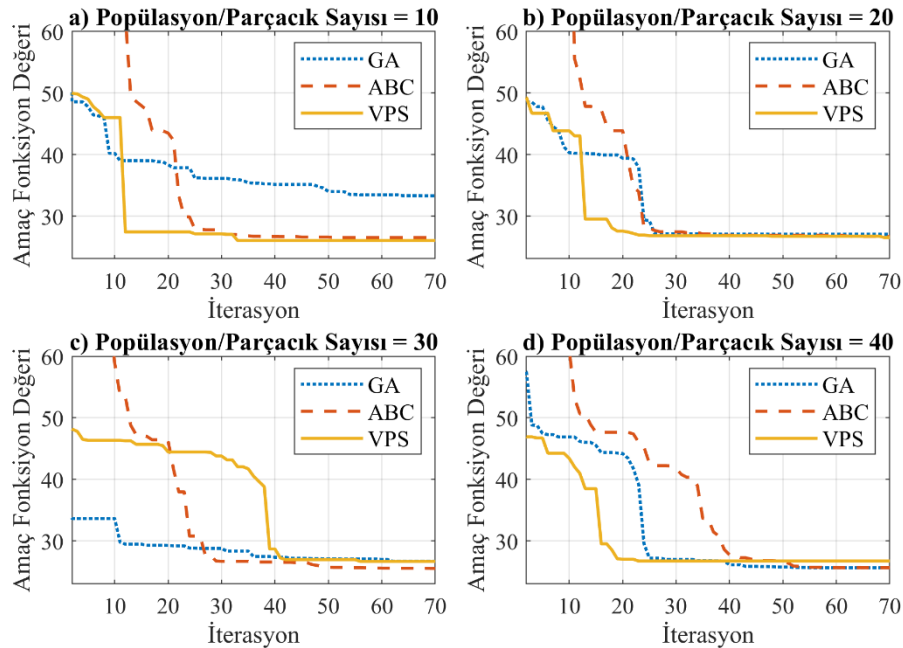
GA, ABC ve VPS algoritmaları için gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen en iyi algoritma başlangıç parametreleri aşağıda sıralanmaktadır. Genetik Algoritmada (GA) için, elit (en iyi) birey sayısı ile çaprazlama fraksiyon oranı sırasıyla PPS * 0.05 ve 0.7 olarak belirlenmiştir. Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritmasında, modifikasyon oranı ve vazgeçme için önceden belirlenmiş tekrarlamaya 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 2'den görüleceği üzere tasarlanan amaç fonksiyonu için geniş bir aralık taranarak belirlenen en iyi değerleridir. Çizelge 2 incelendiğinde Genetik Algoritma ile Yapay Arı Kolonisine 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 2. GA algoritmasının çaprazlama fraksiyon oranı, ABC algoritmasının modifikasyon oranı ve VPS algoritmasının titreşim sabiti için sayısal değerlerin belirlenmesi

Table 2. Determination of the numerical values for the GA algorithm's crossover fraction rate, ABC algorithm's modification rate and, VPS algorithm's vibration constant

GA	J_{sum}	Çaprazlama Fraksiyon Oranı								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
PPS	10	46.782	45.153	46.439	46.584	46.453	45.094	33.013	46.310	46.279
	20	46.012	46.05	36.775	46.514	45.707	27.685	27.051	27.160	27.137
	30	45.858	46.540	45.890	29.325	26.914	25.954	25.573	25.969	25.583
	40	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
PPS	10	45.726	45.889	44.441	27.090	26.499	26.615	26.516	26.940	29.328
	20	26.521	26.091	27.315	26.649	26.582	27.064	26.808	29.330	26.490
	30	25.511	25.472	25.530	25.617	25.502	25.497	26.139	27.705	25.539
	40	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
PPS	10	25.445	26.085	26.489	25.529	26.072	26.586	25.781	26.166	26.575
	20	26.205	26.730	26.860	25.871	25.728	26.402	25.795	26.079	25.887
	30	26.082	27.007	25.824	25.704	26.042	26.295	26.740	26.159	26.500
	40	25.816	26.328	26.356	25.896	25.910	26.278	26.264	26.154	26.089



Şekil 7. GA, ABC ve VPS algoritmalarının a) 10, b) 20, c) 30 ve d) 40 Popülasyon/Parçacık sayı değerleri (PPS) için yakınsama geçmişleri

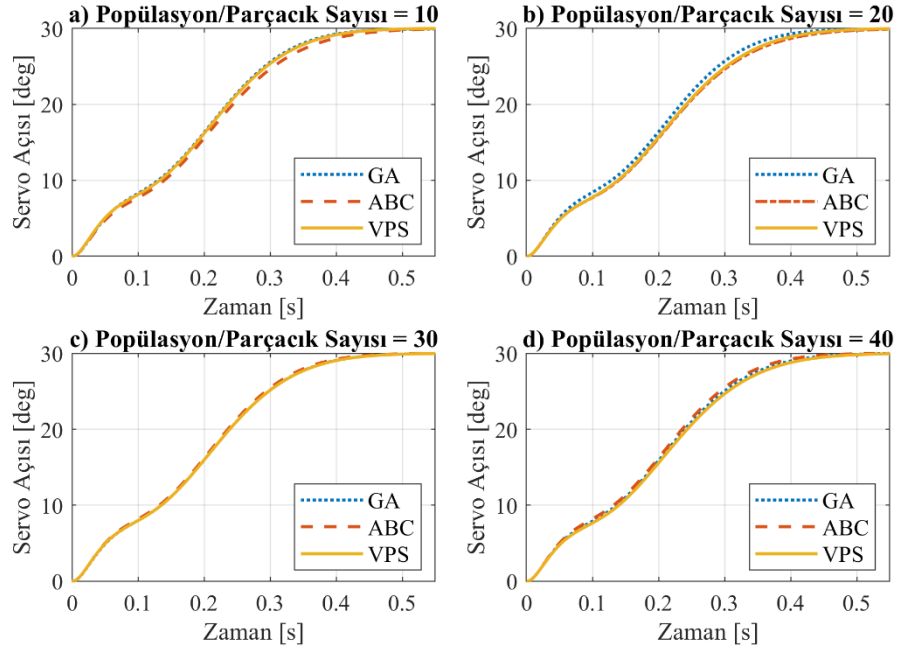
Figure 7. Convergence histories of GA, ABC, and VPS algorithms for population or particle size value a) 10, b) 20, c) 30 and, d) 40

Metasezgisel algoritmaların optimizasyon performansını belirleyen bir diğer önemli parametre ise algortmada kullanılacak olan popülasyon ya da parçacık sayısının değeridir. Düşük popülasyon ya da parçacık sayısının seçilmesi algoritmanın lokal minimuma takılmasına neden olabileceği gibi popülasyon ya da parçacık sayısının yüksek belirlenmesi de toplam hesaplama zamanının artmasına neden olacaktır. Metasezgisel algoritmaların optimizasyon performanslarının değerlendirmesinde üç kriter öne çıkmaktadır. Bu kriterler hesaplanan minimum amaç fonksiyon değeri, yakınsama geçmişi ve toplam hesaplanma süresidir. Şekil 7 GA, ABC ve VPS algoritmaları için dört farklı popülasyon ya da parçacık değerleri ile elde edilen yakınsama geçmişlerini sunmaktadır. Yakınsama geçmişlerinin daha net görülebilmesi için şekilde yatay eksen 70 iterasyon ile sınırlandırılmıştır. Şekil 7a ve Şekil 7b’de görüldüğü üzere özellikle düşük popülasyon ya da parçacık değerleri için VPS algoritması diğer algoritmalara göre hem daha hızlı bir yakınsama oranı sağlamakta hem de daha düşük amaç fonksiyonu değerine ulaşmaktadır. Şekil 7c ve Şekil 7d’de görüldüğü üzere yüksek popülasyon ya da parçacık sayısının seçildiği durumlarda ise GA ve ABC algoritmaları VPS algoritmasından daha iyi sonuçlar vermektedir. GA, ABC ve VPS algoritmalarının dört farklı popülasyon/parçacık değeri için optimize edilmiş LQR ağırlık matrislerinin (Q ve R) değerleri, elde edilen minimum amaç fonksiyonlarının değerleri (J_{sum}) ve hesaplama süreleri Çizelge 3’te sunulmaktadır. Çizelge 3’ten de görüleceği üzere minimum amaç fonksiyon değerleri 10 ve 20 PPS için VPS algoritması ile 30 ve 40 PPS için ABC algoritması ile elde edilmiştir. Optimizasyon süreleri dikkate alındığında ise en hızlı sonucun VPS algoritması ile elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 3. GA, ABC ve VPS algoritmaları için optimizasyon sonuçları

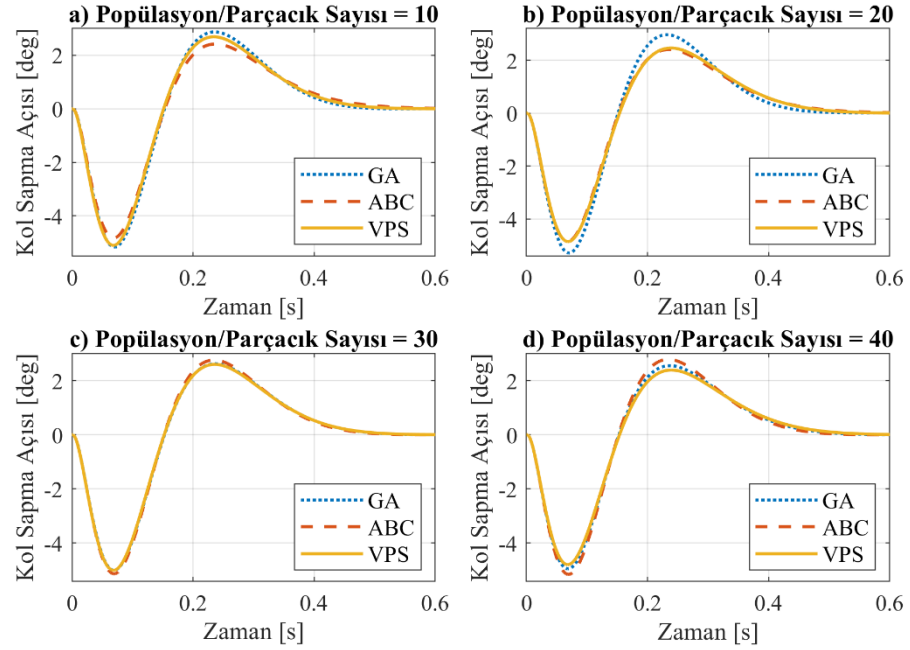
Table 3. Optimization results for GA, ABC, and VPS algorithms

		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
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
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
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 8. Esnek uzuv servo açısı pozisyonu simülasyon sonuçları a) 10, b) 20, c) 30 and d) 40 PPS değerleri için

Figure 8. Simulation results of flexible link manipulator servo position for a) PPS =10, b) PPS = 20, c) PPS = 30 and d) PPS =40

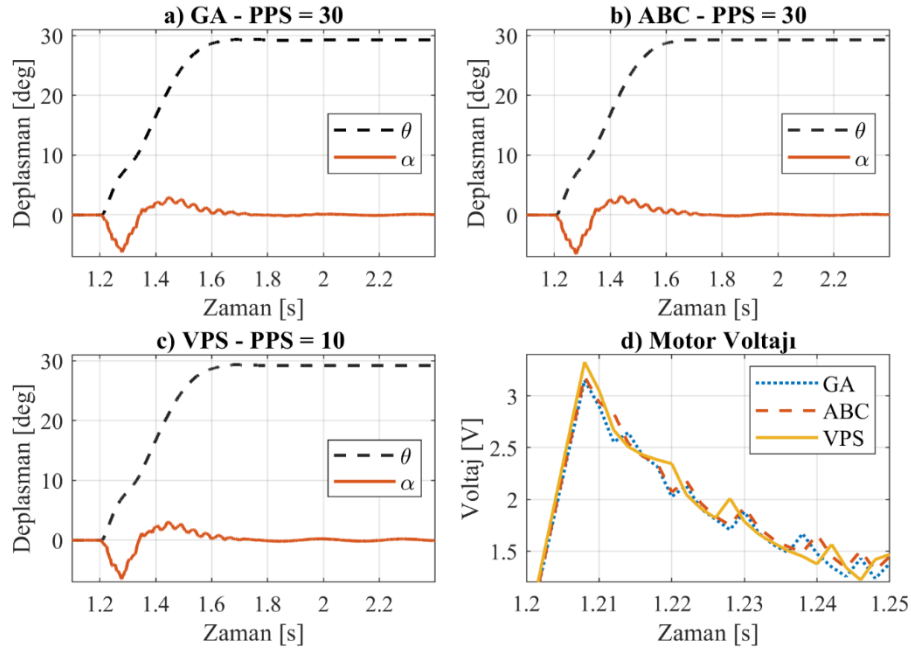


Şekil 9. GA, ABC ve VPS algoritmaları ile a) 10, b) 20, c) 30 ve d) 40 PPS değerleri için optimize edilmiş esnek robot kol uç sapmalarına ait simülasyon sonuçları

Figure 9. Simulation results of flexible link manipulator tip deflection for a) PPS =10, b) PPS = 20, c) PPS = 30 and d) PPS =40

GA, ABC ve VPS algoritmaları ile farklı PPS değerleri için ağırlık matrisleri optimize edilen LQR denetleyiciye ait teorik ve deneysel sonuçlar Şekil 8, 9 ve 10'da sunulmaktadır. Her üç algoritma ile LQR denetleyici ağırlık matrisleri optimize edilmiş ve minimum amaç fonksiyon değeri, optimizasyon süresi ve yakınsama oranları açısından algoritmalar arasında farklılıklar ortaya koyulmuştur. Önerilen amaç fonksiyonun, ERK sisteminin geçici yanıt analizinden elde edilen bir dizi parametreyi içermesi nedeniyle kontrol hedefine ilişkin daha kesin bir karara varılması ve algoritmaların performanslarının değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır. Şekil 8 ve Şekil 9'da GA, ABC ve VPS algoritmaları için

dört farklı popülasyon değeri altında elde edilen sonuçları göstermektedir. Algoritmaların performans karşılaştırmasını yapabilmek için parçacık sayısı ile elde edilen optimal sonuçlar aynı grafikte gösterilmiştir. Şekil 8, ERK sistemi için optimize edilmiş servo konumuna ait simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Şekil 8a ve 8b’de sunulan sonuçlardan, 10 ve 20 PPS için, en hızlı servo pozisyon yanıtının GA, en yavaş servo pozisyon yanıtının ise ABC algoritması ile elde edildiği gözlenmektedir. VPS algoritmasının 10 ve 20 PPS için servo pozisyon performansı ise GA ile ABC algoritmaları arasındadır. Şekil 8c ve 8d’de gösterilen sonuçlardan, 30 ve 40 PPS için, en hızlı servo pozisyon yanıtının ABC, en yavaş servo pozisyon yanıtının ise VPS algoritması ile elde edildiği gözlenmektedir. Şekil 9, Esnek robot kol sisteminin servo hareketlerinden kaynaklanan optimize edilmiş uç sapma açılarına ait simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Şekil 9a ve 9b’de 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 9c ve 9d’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 10. 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
Figure 10. Experimental results of flexible link manipulator servo angle and tip deflection for a) Best GA configuration, b) Best ABC configuration, c) Best VPS configuration and d) Motor Voltages

Optimizasyon çalışmaları sonucunda belirlenen en iyi yapılandırma değerleri için ERK sisteminden elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 10’da sunulmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda her algoritma için daha önce simülasyon çalışmaları ile optimal değerleri belirlenen başlangıç parametreleri ile popülasyon/parçacık sayıları kullanılmıştır. Şekil 10 ve Çizelge 4’de θ sisteminin servo konumunu, α ise esnek kolun uç sapmasını göstermektedir. Şekil 10’da görüleceği üzere, en iyi yapılandırma değerleri için GA, ABC ve VPS algoritmaları LQR kontrolörünün ağırlık matrislerini başarıyla optimize ederek benzer kontrol sonuçları üretmektedir. Ancak çalışma kapsamında incelenen metasezgisel algoritmalar için gerekli optimizasyon süreleri, ideal popülasyon/parçacık sayıları ve hesaplanan minimum amaç fonksiyonu değerleri bakımından farklılıklar bulunmaktadır.

Çizelge 4. Optimal LQR denetleyici parametreleri için ERK sisteminden elde edilen deneysel sonuçlar**Table 4.** Experimental results of optimal LQR controller parameters for flexible link manipulator

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

Çizelge 4, Şekil 10'da sunulan deneysel sonuçlar için kontrol yanıtının önemli parametreleri ile gerekli optimizasyon süreleri, ideal popülasyon/parçacık sayıları ve hesaplanan minimum amaç fonksiyonu değerlerini göstermektedir. GA, ABC ve VPS algoritmaları en düşük amaç fonksiyonu değerlerine sırasıyla 30, 30 ve 10 PPS değerleri ile ulaşmaktadır. Bu durum da optimizasyon algoritmaları arasında ciddi bir hesaplama süresi farkının oluşmasına neden olmaktadır. Çizelge 4 incelendiğinde VPS algoritması için gerekli hesaplama süresinin GA ve ABC algoritmalarına göre oldukça kısa olduğu görülmektedir. Algoritmaların ulaştığı en düşük amaç fonksiyonu değerleri birbirlerine yakın olmakla birlikte en iyi performans ABC algoritması ve en kötü performans ise GA ile elde edilmiştir. ERK servo pozisyonlarına ait kontrol sonuçları incelendiğinde en hızlı servo kontrol sonucunun ABC algoritması, en yavaş servo kontrol sonucunun ise GA ile sağlandığı görülmektedir. 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 popülasyon veya parçacık sayılarında GA ve ABC algoritmalarından daha hızlı bir yakınsama oranı sağlamakta, daha düşük amaç fonksiyonu değerlerine ulaşmakta ve daha az hesaplama süresi gerektirmektedir.

SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, bir esnek robot kol sisteminin hareket ve titreşim kontrolüne yönelik LQR ağırlık matrislerinin optimizasyonunda GA, ABC ve VPS algoritmalarının tasarım ve performans analizlerini detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen optimizasyonun temel amacı esnek robot kol sisteminin istenilen açısal konuma en hızlı şekilde ulaşması sağlamaktır. Titreşimli Parçacık Sistemi (VPS) algoritması ilk kez bu çalışma ile LQR ağırlık matrislerinin ayarlanmasında kullanılmıştır. Önerilen yaklaşımın etkinliği, Genetik Algoritma ve Yapay Arı Kolonisi gibi iyi bilinen optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırılarak gösterilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında esnek robotik sistemler için kontrol yanıtının önemli parametrelerini dikkate alan bir amaç fonksiyonu da önerilmektedir. GA, ABC ve VPS algoritmalarına ait başlangıç parametreleri geniş bir arama uzayı taranarak belirlenmiş olup her algoritma dört farklı popülasyon değeri altında incelenerek 100 iterasyon için sonuçlar elde edilmiştir. Optimizasyon algoritmaları ile elde edilen en iyi kontrol sonuçları esnek robot kol sistemine uygulanarak teorik ve deneysel karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır:

- VPS algoritması, özellikle düşük popülasyon veya parçacık sayılarında, GA ve ABC algoritmalarına göre daha hızlı bir yakınsama oranı sağlamaktadır.
- Popülasyon büyüklükleri ile iterasyon sayıları sabit tutularak optimizasyon süreleri dikkate alındığında, en hızlı algoritmanın VPS, en yavaş algoritmanın ise ABC olduğu görülmektedir.
- Çalışma kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan, VPS algoritması ile düşük popülasyon veya parçacık sayılarında (10-20 PPS) en düşük amaç fonksiyonu değerlerinin elde edildiği gözlemlenmiştir.
- Çalışma kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan, ABC algoritması ile yüksek popülasyon veya parçacık sayılarında (30-40 PPS) en düşük amaç fonksiyonu değerlerinin elde edildiği gözlemlenmiştir.

VPS tabanlı LQR kontrolörünün ERK sistemine ait maksimum aşma, yerleşme zamanı ve yükselme zamanı gibi performans ölçütleri dikkate alındığında GA ve ABC algoritmaları ile oluşturulan kontrolcülerden daha başarılı bir performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Çalışma kapsamında önerilen amaç fonksiyonu ve VPS algoritması ile LQR denetleyici ağırlık matrisleri optimize edilerek ERK sisteminin istenilen açılal konuma en hızlı şekilde ulaşılması sağlanmış ve bu hareket sonucunda sistemde meydana gelen artık titreşimler ortadan kaldırılmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abdel-razak, M. H., Ata, A. A., Mohamed, K. T., Haraz, E. H., 2020, "Proportional-integral-derivative controller with inlet derivative filter fine-tuning of a double-pendulum gantry crane system by a multi-objective genetic algorithm.", *Engineering Optimization*, Vol. 52, No. 3, pp. 527-548.
- Basturk, B., 2006, "An artificial bee colony (ABC) algorithm for numeric function optimization", *In IEEE Swarm Intelligence Symposium*, Vol. 39, No. 3, pp. 459-471.
- Bilgiç, H. H., Sen, M. A., Kalyoncu, M., 2016, "Tuning of LQR controller for an experimental inverted pendulum system based on The Bees Algorithm", *Journal of Vibroengineering*, Vol. 18, No. 6, pp. 3684-3694.
- Bilgiç, H. H., Sen, M. A., Yapıcı, 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.
- Bilgiç, 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*, Vol. 23, No. 67, pp. 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*, Vol. 39, No. 4, pp. 1431-1450.
- Cao, Q. S., Zhou, J. H., Li, L., Ye, L., 2010, "Vibration control of piezoelectric flexible manipulator based on fuzzy self-tuning PID algorithm", *Journal of Vibration and Shock*, Vol. 29, No. 12, pp. 181-186.
- 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.
- Çınaroğlu, S., Bulut, H., 2018, "K-ortalamlar ve parçacık sürü optimizasyonu tabanlı kümeleme algoritmaları için yeni ilklendirme yaklaşımları", *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, Vol. 33, No. 2, pp. 413 - 424.

- Dağdeviren, U., Kaymak, B., 2018, "Yapay arı koloni algoritması kullanılarak betonarme istinat duvarlarının optimum maliyet tasarımını etkileyen parametrelerin incelenmesi", *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, Vol. 33, No. 1, pp. 239-253.
- Fahmy, A. A., Kalyoncu, M., Castellani, M., 2012, "Automatic design of control systems for robot manipulators using the bees algorithm", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, Vol. 226, No. 4, pp. 497-508.
- Fathi, H., Vaez, S. H., Zhang, Q., Alavi, A. H., 2021, "A new approach for crack detection in plate structures using an integrated extended finite element and enhanced vibrating particles system optimization methods", *In Structures*, Elsevier, Vol. 29, pp. 638-651.
- He, W., Zhang, S., Ge, S. S., 2012, "Boundary output-feedback stabilization of a Timoshenko beam using disturbance observer", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 11, pp. 5186-5194.
- Huang, J. W., Lin, J. S., 2008, "Backstepping control design of a single-link flexible robotic manipulator", *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 41, No. 2, pp.11775-11780.
- Jacknoon, A., Abido, M. A., 2017, "Ant Colony based LQR and PID tuned parameters for controlling Inverted Pendulum", *2017 International Conference on Communication, Control, Computing and Electronics Engineering*, IEEE, 1-8.
- Jans, R., Degraeve, Z., 2007, "Meta-heuristics for dynamic lot sizing: A review and comparison of solution approaches", *European journal of operational research*, 177(3), 1855-1875.
- Jnifene, A., 2007, "Active vibration control of flexible structures using delayed position feedback", *Systems & control letters*, Vol. 56 No. 3, pp. 215-222.
- Karaboğa, D., 2017, "Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları", Nobel Akademi Yayıncılık.
- Kaveh, A., Ghazaan, M. I., 2017, "A new meta-heuristic algorithm: vibrating particles system, *Scientia Iranica*", *Transaction A: Civil Engineering*, Vol. 24 No. 2, pp. 551.
- 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.
- Lahdhiri, T., Elmaraghy, H. A., 1999, "Design of an optimal feedback linearizing-based controller for an experimental flexible-joint robot manipulator", *Optimal Control Applications and Methods*, Vol. 20 No. 4, pp. 165-182.
- Mansour, T., Konno, A., Uchiyama, M., 2008, "Modified PID control of a single-link flexible robot.", *Advanced Robotics*, Vol. 22 No. 4, pp. 433-449.
- Mirshekaran, M., Piltan, F., Esmaili, Z., Khajepour, 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.
- Oliveira, M., 2005, "Modern heuristics review for PID control optimization: a teaching experiment", *In 2005 international conference on control and automation*. IEEE, Vol. 2, pp. 828-833
- ÖNEN, Ü., Cakan, A., İlhan, I., 2019, "Performance comparison of optimization algorithms in LQR controller design for a nonlinear system", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, Vol. 27 No. 3, pp. 1938-1953.
- Pieper, J. K., 1998, "Optimal control of a flexible manipulator and controller order reduction", *Optimal Control Applications and Methods*, Vol. 19 No. 5, pp. 331-343.
- Quanser Inc., 2011, Rotary Flexible Link Module Datasheets, www.quanser.com
- Sen, M. A., Kalyoncu, M., 2016, "Optimal tuning of a LQR controller for an inverted pendulum using the bees algorithm", *Journal of Automation and Control Engineering*, Vol. 4 No.5, pp. 384-387.
- Sen, 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 & Architecture of Gazi University*, Vol. 32 No. 2, pp. 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.

- Sooraksa, P., Chen, G., 1998, "Mathematical modeling and fuzzy control of a flexible-link robot arm", *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 27 No. 6, pp. 73-93.
- Talebi, H. A., Khorasani, K., Patel, R. V., 1998, "Neural network based control schemes for flexible-link manipulators: simulations and experiments", *Neural networks*, Vol. 11 No. 7-8, pp. 1357-1377.
- 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*, Vol. 224 No. 5, pp. 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*, Vol. 34, No.4, pp. 415-430.
- Wongsathan, C., Sirima, C., 2009, "Application of GA to design LQR controller for an inverted pendulum system", *In 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, IEEE, 951-954.