



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Üç serbestlik dereceli (3R) bir çizim robotunun tasarımı ve arı algoritması kullanılarak optimal yörünge kontrolü

Design of a three degrees of freedom (3R) drawing robot and optimal trajectory control using the bees algorithm

Yazar(lar) (Author(s)): Muhammet Ali ÇINAR¹, Mete KALYONCU², Muhammed Arif ŞEN³

ORCID¹: 0000-0003-3082-8792

ORCID²: 0000-0002-2214-7631

ORCID³: 0000-0002-6081-2102

To cite to this article: Çınar M. A., Kalyoncu M. ve Şen M. A., “Üç Serbestlik Dereceli (3R) Bir Çizim Robotunun Tasarımı ve Arı Algoritması Kullanılarak Optimal Yörünge Kontrolü”, *Journal of Polytechnic*, *(*) : *, (*).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Çınar M. A., Kalyoncu M. ve Şen M. A., “Üç Serbestlik Dereceli (3R) Bir Çizim Robotunun Tasarımı ve Arı Algoritması Kullanılarak Optimal Yörünge Kontrolü”, *Politeknik Dergisi*, *(*) : *, (*).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1198103

Üç Serbestlik Dereceli (3R) Bir Çizim Robotunun Tasarımı ve Arı Algoritması Kullanılarak Optimal Yörünge Kontrolü

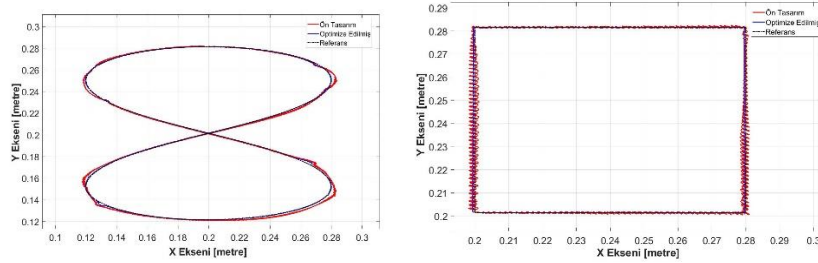
Design of a Three Degrees of Freedom (3R) Drawing Robot and Optimal Trajectory Control Using The Bees Algorithm

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ 3R Çizim robotunun matematiksel, fiziksel ve kinematik modellemelerinin elde edilmesi ve PID tabanlı optimal yörünge kontrolcü tasarımı / To obtain the mathematical, physical and kinematic models of the 3R Drawing robot and and PID-based optimal orbital controller design
- ❖ Arı Algoritması (AA) optimizasyonu sonucu optimal PID kazançlarının elde edilmesi / Obtaining optimal PID gains using The Bees Algorithm
- ❖ 8 (sekiz) ve kare referans yörüngelerin simülasyonu / Simulation of 8 (eight) and square reference trajectories

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, üç serbestlik dereceli bir çizim robotunun optimal yörünge kontrolü PID kontrolcü yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Kontrolcü kazançları AA optimizasyonu yapılarak elde edilmiştir.



Şekil. 8 (sekiz) ve kare çizimleri /Figure. 8 (eight) and square drawings

Amaç (Aim)

Bu çalışmada, 3R çizim robotunun yörünge kontrolü, AA ile optimize edilmiş PID kontrolcü ile sağlanmıştır. / In this study, the trajectory control of the 3R drawing robot is provided with a PID controller, whose gains are determined using The Bees Algorithm.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Çalışmada, katı model tasarımı yapılan sistemin, AA ile Matlab/Simulink ortamında optimizasyon ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. / In the study, optimization and simulation of the solid model designed system was carried out in Matlab/Simulink environment with The Bees Algorithm.

Özgünlük (Originality)

Çizim robotuna entegre edilmek üzere AA ile optimal yörünge kontrolcü tasarımı yapılmıştır. / An optimal trajectory controller was designed with the The Bees Algorithm to be used in the drawing robot.

Bulgular (Findings)

Ön tasarım ve optimize edilmiş parametreler ile yapılan 8 (sekiz) ve kare çizimleri ayrı ayrı karşılaştırıldığında, optimize edilmiş çizimler de ön tasarım çizimlerine göre isabet artışı sağlanmıştır. / When the 8 (eight) and square drawings made using the preliminary design and optimized parameters are compared separately, the optimized drawings are also more accurate than the preliminary design drawings.

Sonuç (Conclusion)

Sonuç olarak, 8 (sekiz) çiziminde, yüzde isabet oranı (MPE), yatayda %1.7583, dikeyde ise %1.1152 ; kare çiziminde ise yatayda %0.1753, dikeyde ise %0.0562 isabet artışı görülmüştür. / As a result, in drawing 8 (eight), percent accuracy (MPE) is 1.7583% horizontally and 1.1152% vertically; In the square drawing, an increase of 0.1753% in horizontal and 0.0562% in vertical was observed.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Üç Serbestlik Dereceli (3R) Bir Çizim Robotunun Tasarımı ve Arı Algoritması Kullanılarak Optimal Yörünge Kontrolü

Araştırma Makalesi / Research Article

Muhammet Ali ÇINAR^{1*}, Mete KALYONCU², Muhammed Arif ŞEN²

¹ MPG Makine Prodüksiyon Grubu Makine İmalat San. Ve Tic. A.Ş., Türkiye

²Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Konya Teknik Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 01.11.2022 ; Kabul/Accepted : 14.12.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 31.01.2023)

ÖZ

Bu çalışmada, üç serbestlik dereceli (RRR) düzlemsel bir çizim robotuna ait uç işlevcinin konum kontrolüne yönelik kontrolcü tasarımı ve arıların sezgisel davranışlarından esinlenilerek geliştirilmiş sürü tabanlı Arı Algoritması (AA) ile optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Öncelikle sistemin matematiksel modellemesi elde edilmiş ve ileri kinematik hesapları yapılmıştır. Analitik hesaplamaların yanı sıra, sistemin katı modeli üzerinden sistemin çok kütleli dinamik modellemesi ve PID kontrolcü tasarımı Matlab/Simulink ortamında yapılmıştır. Uç işlevcinin yörünge hatasını en aza indirmek ve optimal PID kontrolcü elde etmek amacıyla, kontrolcü kazançları (Kp-oransal, Ki-integral, Kd-türevsel) AA optimizasyonu sonucu elde edilmiştir. Ayrıca optimize edilmiş PID parametreleri kullanılarak 8 (sekiz) ve kare çizimleri yapılmıştır. Yapılan çizimler ile referans çizim arasındaki karşılaştırma 11 farklı hata kriteri göz önün bulundurulmuş ve elde edilen hata değerleri esas alınarak yapılmıştır. Optimizasyon sonrası 8 (sekiz) çizimi ve kare çizimi için yüzde doğruluk oranlarının, X-Y düzleminde sırasıyla %2,0233 ve %0,1711 arttığı görülmüştür. Sistemin simülasyonundan ve optimizasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar sunulmuş ve değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: 3R düzlemsel robot, optimal yörünge kontrolü, arı algoritması, PID.

Design of a Three Degrees of Freedom (3R) Drawing Robot and Optimal Trajectory Control Using The Bees Algorithm

ABSTRACT

In this study, the controller design for the position control of the terminal functionary of a three-degree-of-freedom (RRR) planar drawing robot and its optimization were realised with the developed swarm-based The Bees Algorithm (BA) inspired by the intuitive behavior of bees. First of all, the mathematical modeling of the system was obtained and advanced kinematic calculations were made. In addition to analytical calculations, Matlab/Simulink environment was used for multi-mass dynamic modeling and PID controller design of the system over the solid model of the system. Controller gains (Kp-proportional, Ki-integral, Kd-derivative) were determined by optimizing using AA, in order to minimize the orbital error of the terminal operator and to obtain an optimal PID controller. In addition, 8 (eight) and square drawings were plotted by using optimized PID parameters. The error comparison between the plotted drawings and the reference drawing was carried out according to the error values obtained by considering 11 different error criteria. After optimization, the percent accuracies for drawing 8 (eight) and the square drawing increase 2,0233% and 0,1711% in the X-Y plane respectively. The results obtained from the simulation and optimization studies of the system are presented and evaluated.

Keywords: 3R planar robot arm, optimal trajectory control, the bees algorithm, PID.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Robot kol sistemleri, akademik çalışmalarda ve endüstriyel uygulamalarda oldukça yaygın bir şekilde, farklı gereksinimlerdeki birçok görevleri yerine getirmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu sistemlerin, belirlenen görevi en etkili ve verimli bir şekilde gerçekleştirebilmesi için kontrol sistemlerinin geliştirilmesi, mevcutların iyileştirmesi büyük önem arz etmektedir.

Endüstride ve akademik çalışmalarda çok çeşitli yöntemler ile kontrolcü tasarlanıp entegre edildiği görülmektedir. Sıkça sözü geçen kontrol yöntemleri, Proportional-Integral-Derivative (PID) kontrolcüler, bulanık mantık kontrolcüler (BMK), lineer quadratic ragulator (LQR) kontrolcüler ve daha fazlası sıralanabilmektedir. Ghaleb ve Aly, iki serbestlik derecesine sahip bir robot kolun uç işlevci konum kontrolünü için PID kontrolcü yöntemini önermişlerdir. MATLAB/Simulink ortamında yaptıkları simülasyon sonucunda, sistemin eklemleri, istenen açıya başarılı bir şekilde ulaştırılmıştır [1]. Şen ve arkadaşları, çift ters sarkaç sisteminin denge ve konum kontrolünü LQR

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : malicinar@mpg.com.tr

kontrolcü tasarımıyla sağlamışlardır. Euler-Lagrange yöntemi aracılığıyla sistemin matematiksel modeli oluşturulmuş ve Ön tasarımı yapılan LQR kontrolcüsüne ait Q ve R matris parametrelerinin optimizasyonunda AA metodu seçilmiştir. Üç farklı AA parametre konfigürasyonu ile yapılan simülasyonlarda benzer sonuçlar elde edilerek sistem başarı ile kontrol edilmiştir [2]. Rahman, bir DC motorun BMK metodu yapmıştır. Sistemin modellemesi Matlab/Simulink ortamında hazırlanmış ve parametreleri gerçek bir motorun teknik özellikleri esas alınarak belirlenmiştir. BMK'nın temelinde bulunan, üyelik fonksiyonları, kural tabanı gibi bölümler oluşturulmuş ve sistemin pozisyon kontrolü başarılı bir şekilde sağlanmıştır [3]. Kocakulak ve arkadaşları, ön iletimli paralel hibrit bir aracın MATLAB/Simulink modelini oluşturmuş ve tork kontrol stratejisi geliştirmek üzere çalışmışlardır. Aracın tork kontrolü, geleneksel kural tabanlı (GKT) ve BMK yöntemlerle kontrol stratejileri geliştirilmiş ve yakıt tüketimi açısından karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, BMK yöntemi ile geliştirilen kontrol stratejisi, GKT'ye göre farklı sürüş çevrimi koşulları altında yakıt tasarrufu sağladığı görülmüştür [4].

Kontrol yöntemlerinin, hemen hemen hepsi birtakım parametrelere bağlı çalışmaktadır. PID kontrolci de kazanç parametreleri (K_p -oransal, K_i -integral, K_d -türevsel) [5], LQR kontrolcüsünde, Q ve R matrisleri [6], BMK'da, üyelik fonksiyonları ve kural tablosu [7] gibi parametreler bulunmaktadır. Söz konusu parametreler, sistemden sisteme değişiklik göstermektedir. Doğru parametrelerin tespit edilmesi sistem kontrolünde kritik önem arz etmektedir. Parametrelerin tespiti için geliştirilmiş, deneme-yanılma, Ziegler-Nichols gibi klasik yöntemlerin yanı sıra, AA, Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) gibi canlıların sezgisel davranışlarından ilham alınarak geliştirilmiş arama algoritmaları uygulanmaktadır. Korkmaz ve arkadaşları, doğrusal olmayan bir sistemin kontrolünü PID kontrolcü tasarlamış ve GA optimizasyonu yapmıştır. Ziegler-Nichols yöntemiyle ön tasarımı yapılan sistemin K_p , K_i ve K_d kazançlarını optimum hale getirmişlerdir. Çalışma sonucunda, GA optimizasyonu sonucu elde edilen parametreler ile sistemin kontrolü başarılı bir şekilde sağlanmıştır [8]. Bakırcıoğlu ve arkadaşları, dört ayaklı bir robotun bir bacağı için PID kontrolcü tasarımı ve AA optimizasyonu yapmışlardır. Bir CAD ortamında tasarlanmış robot bacağı MATLAB/Simulink'e aktararak 3D model üzerinden çoklu cisim dinamik modeli elde edilmiştir. Ayak hareketinin yörünge kontrolü AA optimizasyonu sonucu edilen PID kontrolcü ile oldukça başarılı bir şekilde kontrol edilmiştir [9]. Raza ve arkadaşları, iki serbestlik dereceli bir üst kol rehabilitasyon robotunun kontrolünü PSO algoritmasına tabi tutularak elde edilmiş PID kontrolcü ile gerçekleştirmişlerdir. Kinematik modeli hazırlanan robotun, sağlam, stabil ve düşük aşma sağlayacak şekilde simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Bu tip robotların üst kol rehabilitasyon tedavilerinde

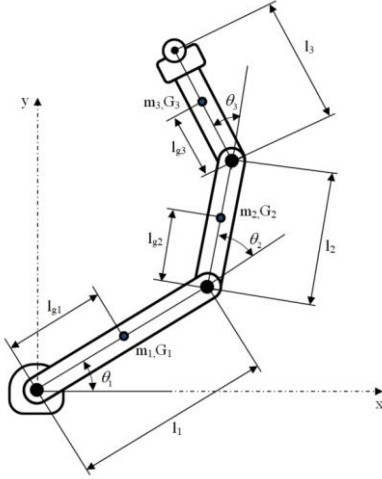
faydalı bir ekipman olabileceği kanıtlanmıştır [10]. Bilgiç ve arkadaşları, esnek kol yapısına sahip bir sistemin kontrolünü, LQR metodu ile gerçekleştirmişlerdir. Kontrol yönteminin gerektirdiği parametreler, geliştirilen amaç fonksiyonu doğrultusunda gerçekleştirilen, AA optimizasyonu sonucu belirlenmiştir. Esnek kolun en büyük aşma miktarı, literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırıldığında, %17,8'den %7,1 seviyesine indirilmiştir. Tasarımı yapılan kontrolcünün deneysel doğrulaması, Quanser markasının üretimini yaptığı test düzeneği üzerinde gerçekleştirilmiştir [11]. Özsağlam ve Çunkaş, PSO algoritmasının GA ve Diferansiyel Evrim Algoritması (DEA) karşısındaki performansını 8 farklı test fonksiyonuna tabi tutarak karşılaştırmıştır. Çalışma da, tüm yöntemlerin her birinde 100'er adet bireye sahip popülasyonlar oluşturulmuş ve testler sonucunda, PSO ve DEA'nın, GA göre yakınsama hızı açısından oldukça iyi olduğu görülmüştür. PSO ve DEA'nın yakınsama hızları birbirlerine yakın olmakla beraber, tüm fonksiyonlarda sonuca en hızlı PSO ulaşmıştır [12]. Yenipınar ve arkadaşları, asenkron motorlar için optimal rotor oluşturma geometrilerini farklı optimizasyon metodları ile tespit etmiş ve performansa etkilerini incelemişlerdir. Sequential Nonlinear Programming (SNP), GA ve Sequential Mixed Integer NonLinear Programming (SMINP) yöntemleri kullanılarak yapılan bu çalışmada, Ansys Maxwell ortamında 2D model oluk modeli oluşturulmuş ve gerekli analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, en verimli oluk geometrisi GA optimizasyonu sonucu elde edilmiştir [13]. Yüksek ve arkadaşları, bir sıvı seviye kontrol sistemi için LQR ve GA tabanlı iki farklı metotla parametreleri ayarlanmış PID kontrolcüler tasarlamışlardır. Tasarlanan kontrolcüler hem benzetim yoluyla hem de deneysel olarak test edilmiş ve performansları karşılaştırıldığında, GA tabanlı PID kontrolcünün, LQR tabanlı PID kontrolcüye göre daha başarılı olduğu sonucuna varmışlardır [14].

Bu çalışmada, düzlemsel üç serbestlik dereceli (RRR) bir robot kolun uç işlevci konumlaması için gerekli eklem hareket kontrolü, ön tasarımı deneme yanılma yoluyla belirlenen sonrasında, AA optimizasyonu sonucu elde edilen K_p , K_i , K_d parametreleri ne sahip PID kontrolcü metoduyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde, sistemin matematik, kinematik ve fiziksel modelini kapsayan sistem modeli açıklanmıştır. Üçüncü bölümde ise PID kontrolcü tasarımı anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, AA ile optimizasyon için gerekli, amaç fonksiyonu, arı parametreleri, arama aralığı gibi konular detaylandırılmıştır. Beşinci bölümde MATLAB/Simulink ortamında yapılan simülasyon bulguları grafik ve tablolar halinde sunulmuştur. Altıncı bölümde ise, elde edilen bulgular yorumlanarak bir sonuç çıkarılmıştır.

2. SİSTEM MODELİ (MODEL OF THE SYSTEM)

2.1 Sistem Parametreleri (System Parameters)

Bu bölümde düzlemsel üç serbestlik dereceli bir robot kolun sistem parametreleri verilmiştir. Sistemin temel amacı verilen bir resmi çizme veya yazı yazma görevini uç işlevcisine yerleştirilmiş bir kalem vasıtası ile yerine getirmektir. Şekil 1’de şematik olarak gösterilen sistemin, parametreleri Çizelge 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Sistemin şematik gösterimi (Schematic representation of the system)

Çizelge 1. Sistemin parametreleri (Technical specifications of collector)

Semboller	Açıklama	Değerler	Birimler
θ_1	Eklem-1 dönüş açısı	değişken	derece
θ_2	Eklem-2 dönüş açısı	değişken	derece
θ_3	Eklem-3 dönüş açısı	değişken	derece
l_1	Uzuv-1 uzunluğu	0,2500	m
l_2	Uzuv-2 uzunluğu	0,2000	m
l_3	Uzuv-3 uzunluğu	0,1410	m
m_1	Uzuv-1 kütlesi	1,0330	kg
m_2	Uzuv-2 kütlesi	0,6320	kg
m_3	Uzuv-3 kütlesi	0,4430	kg
G_1, l_{G1}	Uzuv-1 ağırlık merkezi ve konumu	0,0930	m
G_2, l_{G2}	Uzuv-2 ağırlık merkezi ve konumu	0,0810	m
G_3, l_{G3}	Uzuv-3 ağırlık merkezi ve konumu	0,0710	m
I_1	Uzuv-1 atalet momenti	0,0314	kg.m ²
I_2	Uzuv-2 atalet momenti	0,0177	kg.m ²
I_3	Uzuv-3 atalet momenti	0,0156	kg.m ²

2.2 Matematik Model (Mathematics Model)

Sistem davranışının modellenebilmesi ve bu davranışa göre kontrol sistemlerinin geliştirilebilmesi için, sistemin matematik modeli Lagrange Fonksiyonu kullanılarak hazırlanmıştır. Eşitlik 1’de robot kol için genel tork denklemi verilmiştir.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(\dot{q}, q) + G(q) \quad (1)$$

Eşitlik 1’de verilen denklem söz konusu sistem için özelleştirilerek, Eşitlik 2’deki matrisler elde edilmiştir.

$$M(q) = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}, \quad C(\dot{q}, q) = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix}, \quad G(q) = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_{11} = m_1 l_1^2 + m_2 (l_1^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2 + l_2^2) + m_3 (l_1^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2 + l_1 l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2^2 + 4l_2 l_3 \cos \theta_3 + 2l_3^2) + I_1 + I_2 + I_3 \quad (3)$$

$$A_{12} = m_2 (l_2 l_2 \cos \theta_2 + l_2^2) + m_3 (2l_1 l_2 \cos \theta_2 + l_1 l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2^2 + 4l_2 l_3 \cos \theta_3 + 2l_3^2) + I_2 + I_3 \quad (4)$$

$$A_{13} = m_3 (l_1 l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + 2l_1 l_2 \cos \theta_3 + 2l_3^2) \quad (5)$$

$$A_{21} = m_2 (l_1 l_2 \cos \theta_2 + l_2^2) + m_3 (2l_1 l_2 \cos \theta_2 + l_1 l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2^2 + 4l_2 l_3 \cos \theta_3 + 2l_3^2) + I_2 + I_3 \quad (6)$$

$$A_{22} = m_2 l_2^2 + m_3 (l_2^2 + 4l_2 l_3 \cos \theta_3 + 2l_3^2) + I_2 + I_3 \quad (7)$$

$$A_{23} = m_3 (2l_2 l_3 \cos \theta_3 + 2l_3^2) + I_3 \quad (8)$$

$$A_{31} = m_3 (l_1 l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + 2l_2 l_3 \cos \theta_3 + 2l_3^2) \quad (9)$$

$$A_{32} = m_3 (2l_2 l_3 \cos \theta_3 + 2l_3^2) + I_3 \quad (10)$$

$$A_{33} = 2m_3 l_3^2 + I_3 \quad (11)$$

$$B_1 = -m_2 l_1 l_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \sin \theta_2 - m_3 l_1 l_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2 + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_3^2) \sin(\theta_2 + \theta_3) - 2l_2 l_3 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_2^3) \sin \theta_3 \quad (12)$$

$$B_2 = -m_2 l_1 l_2 (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 - m_3 l_1 l_2 (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 - m_3 l_1 l_3 (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) - 2l_2 l_3 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_2^3) \sin \theta_3 + m_2 l_1 l_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 + m_3 l_1 l_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 + m_3 l_1 l_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) \quad (13)$$

$$B_3 = -m_3 l_1 l_2 (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) - 2m_3 l_2 l_3 (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3) \sin \theta_3 + m_3 l_1 l_3 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) + 2m_3 l_2 l_3 (\dot{\theta}_1^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_2^2) \sin \theta_3 \quad (14)$$

$$g_1 = m_1 l_1 g \cos \theta_1 + m_2 g (l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)) + m_3 g (l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) \quad (15)$$

$$g_2 = m_2 g (l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)) + m_3 g (l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) \quad (16)$$

$$g_3 = m_3 l_3 g \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (17)$$

2.3 Kinematik Model (Kinematic Model)

Kinematik model ise, eklem açıları ile uç işlevci konumu arasındaki ilişkiyi denklemler halinde açıklamak ile ilgilenmektedir. Robotik sistemlerde ileri kinematik, eklem pozisyonları bilinen sistemin uç işlevcisinin uzayda hangi konumda olduğunu tespit etmek ters kinematik ise uç işlevci uzayda bir hedef konuma ulaştırılmak istendiğinde, her bir eklemin hangi pozisyonda olması gerektiğini hesaplamak için kullanılır. Aysal ve arkadaşları, 3 serbestlik dereceli (RRR) bir robot kolunun uç işlevci pozisyon kontrolünü, hem analitik-geometrik yaklaşım ile hem de makine öğrenmesi algoritmalarından biri olan Multi-Layer Perception (MLP) yöntemi ile gerçekleştirmiş ve analiz verilerini karşılaştırmışlardır. 3 farklı geometrik modelin (helix, star, daisy) koordinatları MATLAB ortamında 3B olarak simüle etmiş ve farklı hata kriterlerine göre karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar ışığında MLP modelinin bu sistemi istenilen kararlılıkta çalıştırabileceği doğrulanmıştır [15].

Sistemin kinematik modeli çıkarılabilmesi için uzuvların ve eklemlerin birbirlerine göre durumları tarif edilmelidir. Bu çalışmada, Denavit-Hartenberg (D-H) yöntemiyle D-H tablosu [16] oluşturulmuştur (Çizelge 2).

Çizelge 2. D-H Tablosu (D-H Table)

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i	Değişken
1	0	0	0	θ_1	θ_1
2	0	l_1	0	θ_2	θ_2
3	0	l_2	0	θ_3	θ_3
4	0	l_3	0	0	0

D-H tablosu incelenerek elde edilen transformasyon matrisleri, kinematik denklemleri haline getirilmiştir. Elde edilen denklemler, Eşitlik 18, Eşitlik 19, Eşitlik 20'de verilmiştir.

$$P_x = l_1(\cos\theta_{12}\cos\theta_3 - \sin\theta_{12}\sin\theta_3) + l_2(\cos\theta_{12}) + l_3(\cos\theta_1) \quad (18)$$

$$P_y = l_3(\sin\theta_{12}\cos\theta_3 + \cos\theta_{12}\sin\theta_3) + l_2(\sin\theta_{12}) + l_1(\sin\theta_1) \quad (19)$$

$$P_z = 0 \quad (20)$$

Kinematik çözümünün basitleştirilebilmesi için sisteme yönelim açıları eklenebilmektedir. Bu çalışmada, Eklem-3'ün açısı, koordinat sistemine göre, operasyon öncesinde belirlenen, sabit bir değerde olacağı kabul edilmiştir. Dolayısıyla sistem, düzlemsel 2 serbestlik dereceli bir robot kol haline gelmiştir. Uç işlevci yönelim açısı Denklem 21'de gösterildiği gibi 3 eklem açısının toplamına eşittir.

$$\phi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (21)$$

Uç işlevci konumlaması için gereken noktanın x bileşeni P_x ve y bileşeni P_y olarak tanımlanırsa, 2R düzlemsel robotun uç işlevcisinin durması gereken konumun x koordinatı Denklem 22'de, y koordinatı ise Denklem 23'te gösterilmiştir.

$$W_x = P_x - l_3\cos\phi \quad (22)$$

$$W_y = P_y - l_3\sin\phi \quad (23)$$

Gerekli işlemler yapıldıktan sonra θ_2 açısı Denklem 24'te, θ_1 açısı Denklem 25'te ve θ_3 açısı ise Denklem 26'da eşitlikler kullanılarak hesaplanmaktadır.

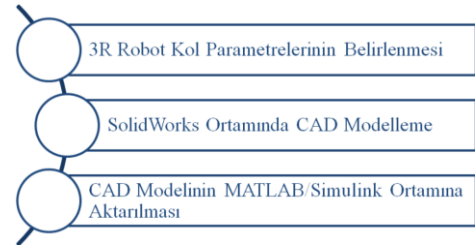
$$\theta_2 = \text{Atan2} \left(\frac{\pm \sqrt{1 - \left[\frac{W_x^2 + W_y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \right]^2}, \frac{W_x^2 + W_y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}} \right) \quad (24)$$

$$\theta_1 = \text{Atan2} \left(\frac{(l_1 + l_2 \cos(\theta_2))W_y - l_2 \sin\theta_2 W_x}{W_x^2 + W_y^2}, \frac{(l_1 + l_2 \cos(\theta_2))W_x - l_2 \sin\theta_2 W_y}{W_x^2 + W_y^2} \right) \quad (25)$$

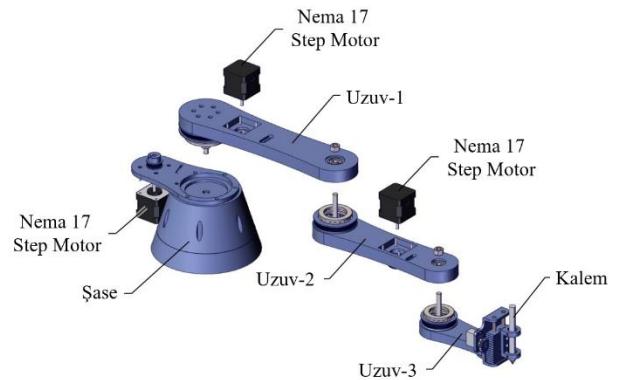
$$\theta_3 = \phi - \theta_1 - \theta_2 \quad (26)$$

2.4 Fiziksel Model (Physical Model)

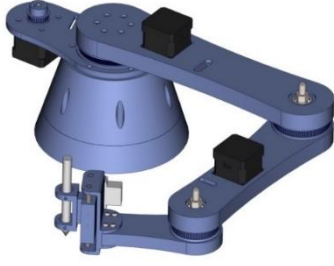
Tasarım parametreleri belirlenen sistemin, SolidWorks yazılımı ortamında CAD modeli hazırlanmıştır. CAD ortamından, MATLAB/Simulink ortamına aktararak simülasyon sistemi oluşturulmuştur [17]. Sistemin şase merkezinden, kalem ucuna kadar olan en büyük uzanma mesafesi 591 mm'dir. Uç işlevci, yaklaşık 50 gr'lık bir kalemî yük olarak taşımaktadır. Şekil 2'de modelleme ve simülasyona hazırlık aşamaları, Şekil 4'te çizim robotunun katı model montaj tasarımı, Şekil 3'te çizim robotunu oluşturan parçaların patlatılmış görünüşleri ve Şekil 5'te robot kolların ve taşıyıcı gövdenin ölçüleri verilmiştir.



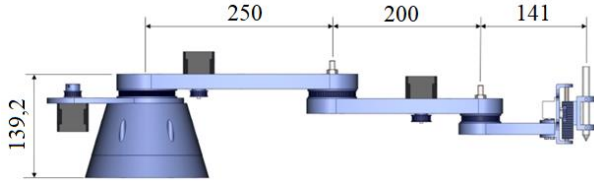
Şekil 2. Fiziksel Modelleme Adımları (Physical Modeling Steps)



Şekil 3. Çizim Robotu patlatma resmi (Explosion picture of the Drawing Robot)



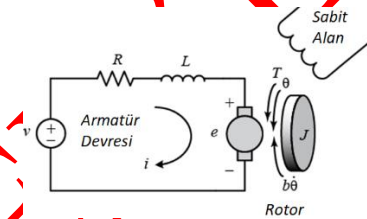
Şekil 4. Çizim Robotu katı model tasarımı (Solid model design of the Drawing Robot)



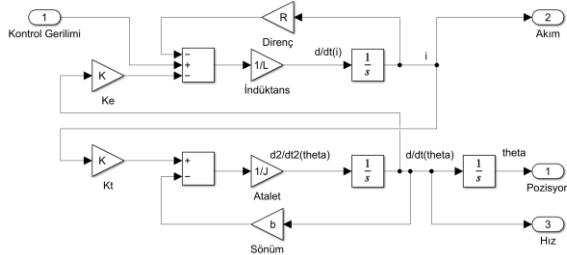
Şekil 5. Çizim Robotu temel boyutlandırmaları (Basic dimensions of the Drawing Robot)

2.5 DC Motor Modeli (DC Motor Model)

Sistemde tahrik elemanı olarak, Nema 17 standart ölçülerine uygun tasarlanmış adım (step) motorları kullanılmıştır. Step motorlar yüksek konum hassasiyetine sahiptir. Bununla beraber düşük dönüş hızlarında bile çıkış miline yüksek tork aktarabilmektedir. Bu avantajları göz önüne alınarak bu çalışmada tahrik elemanı olarak seçilmiştir. Matlab/Simulink modeli içerisinde step motor, bir armatür kontrollü DC motor modeli şeklinde tasarlanmıştır. Armatür kontrollü DC motorun eşdeğer devresi Şekil 6'da verilmiştir. Motorun Matlab/Simulink modeli ise Şekil 7'de gösterilmiştir [18]. Tercih edilen motorun parametreleri, rotor atalet momenti (J) = 47.10 - 7 kg.m², sürtünme katsayısı (B) = 3,5.10⁻⁶ N.m/(rad/s), tork katsayısı (K) = 0,26 N.m/A, direnci (R) = 1,8 Ohm, indüktansı (L) = 4,2.10⁻³ olacak şekilde modele aktarılmıştır.



Şekil 6. Armatür kontrollü motor eşdeğer devresi (Equivalent circuit of armature motor)



Şekil 7. Armatür kontrollü motorun Matlab/Simulink modeli (Matlab/Simulink model of armature controlled motor)

3. PID KONTROLÇÜ TASARIMI (PID CONTROLLER DESIGN)

PID kontrolcü, sistemin kontrol edilmek istenen çıkış değişkenini istenen referans girişe ulaştırmak amacıyla geliştirilmiş bir kontrol yöntemidir. Bu kontrolcü, referans giriş ile çıkış değişkeni arasındaki hata miktarını geri besleme olarak sistemin kontrolünü sağlamaktadır. PID kontrolcü, K_p (Oransal), K_i (Integral), K_d (Türevsel) olmak üzere üç kazanç parametresi ile çalışmaktadır [20]. Ang ve arkadaşları, üç serbestlik dereceli robot için üç farklı PID kontrolcü tasarlamışlardır [19]. Bu çalışmada, her bir ekleme için ayrı ayrı PID kontrolcüler tanımlanmıştır. Dolayısıyla, sistem karakteristiğine uygun 9 adet kazanç parametresi tespit edilmelidir. Kontrolcü ön tasarımı deneme-yanılma yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

4. ARI ALGORİTMASI (THE BEES ALGORITHM)

AA, ilk kez D. T. Pham ve arkadaşları tarafından 2006 yılında ortaya atılmıştır. Arıların, kaynak arama davranışları incelenerek geliştirilmiş olan bu yöntemde, sürü zekası incelenerek, öğrenme, hatırlama ve bireyler arasındaki haberleşme özellikleri göz önüne alınmış sezgisel bir optimizasyon yöntemi geliştirilmiştir [21-22]. AA ile yapılan ilk çalışmalar, Pham ve Kalyoncu tarafından, bir serbestlik dereceli esnek uzuvlu bir robot kolun pozisyon kontrolü BMK ve PID kontrolcü yöntemleri ile sağlanarak gerçekleştirilmiştir. BMK yöntemi için üyelik fonksiyonları ve PID kontrolcü için kazanç parametreleri AA optimizasyonu sonucu elde edilmiştir [23-24].

AA kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmalarına başlamadan önce AA ait parametreler belirlenmelidir. Bu parametreler, kâşif arı sayısı (n), ziyaret edilen n nokta içinden seçilen en uygun bölge sayısı (m), seçilen m bölge içindeki elit bölge sayısı (e), en iyi e bölgeye gönderilen arı sayısı (nep), kalan ($m-e$) bölgeye gönderilen arı sayısı (nsp), bölge boyutu (ngh) ve durdurma kriteri veya iterasyon (itr) sayısıdır [21].

Bu çalışmada, AA parametrelerinin sistem üzerindeki etkilerinin incelenmesi için 3 farklı konfigürasyonda arama yapılmıştır. Konfigürasyon 1 için $n = 12$, $m = 7$, $e = 5$, $nep = 5$, $nsp = 3$, $ngh = 0,1$, $itr = 30$; Konfigürasyon 2 için $n = 20$, $m = 10$, $e = 5$, $nep = 13$, $nsp = 5$, $ngh = 0,01$, $itr = 50$; Konfigürasyon 3 için $n = 30$, $m = 15$, $e = 10$, $nep = 16$, $nsp = 13$, $ngh = 0,05$, $itr = 100$ olacak şekilde belirlenmiştir.

Optimizasyon çalışması için gerekli olan amaç fonksiyonu, sistemin geçici durum cevabı dikkate alınarak hazırlanmıştır. Her bir eklemin geçici durum cevabı değişkenleri olan, yükselme zamanı (t_r), oturma zamanı (t_s), en büyük aşma miktarı (M_p), tepe değeri (θ_{maks}) ve kalıcı durum hatası (ess) değerleri belli katsayılar ile çarpılarak, toplamalarının minimum olması için çalışılmaktadır. Sistem tasarımı, bir resim çizmeyi veya bir yazıyı yazmayı amaçlamaktadır. Dolayısıyla amaç fonksiyonu katsayıları belirlenirken, kalıcı durum hatasının ve maksimum aşmanın minimize edilmesi

diğer cevaplara göre daha yüksek önem arz etmektedir. Dolayısıyla, amaç fonksiyonunda kalıcı durum hataları ve en büyük aşma diğerlerinde göre 10 katı katsayılarla sahiptir. Amaç fonksiyonu Eşitlik 21’de verilmiştir.

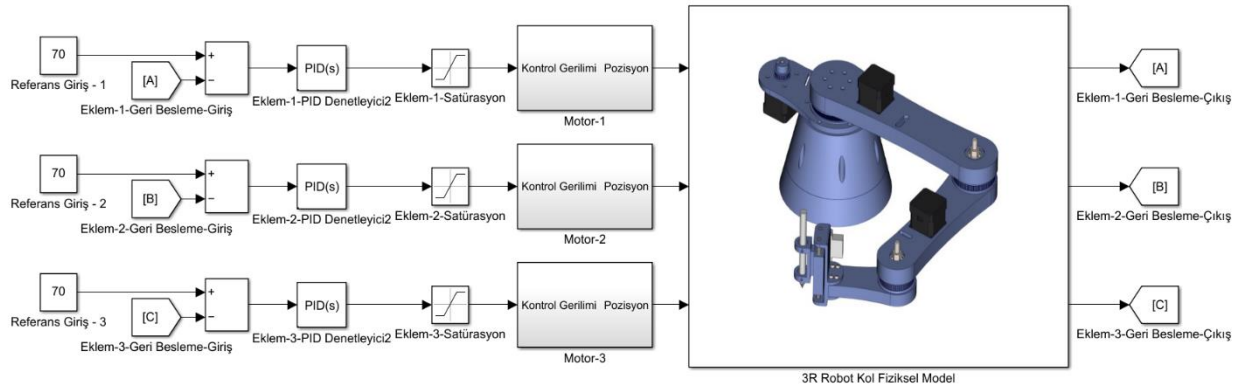
$$J_{amaç} = (t_r + t_s + 10M_p + \theta_{maks} + 10e_{ss})_{\theta_1} + (t_r + t_s + 10M_p + \theta_{maks} + 10e_{ss})_{\theta_2} + (t_r + t_s + 10M_p + \theta_{maks} + 10e_{ss})_{\theta_3} \quad (21)$$

AA arama aralığı, üç PID katsayı araması için aynı şekilde belirlenmiştir. K_p arama aralığı en küçük 2, en büyük 10; K_i arama aralığı, en küçük 0, en büyük 0.01; K_d arama aralığı, en küçük 0, en büyük 0.5 aralığı olacak şekilde belirlenmiştir.

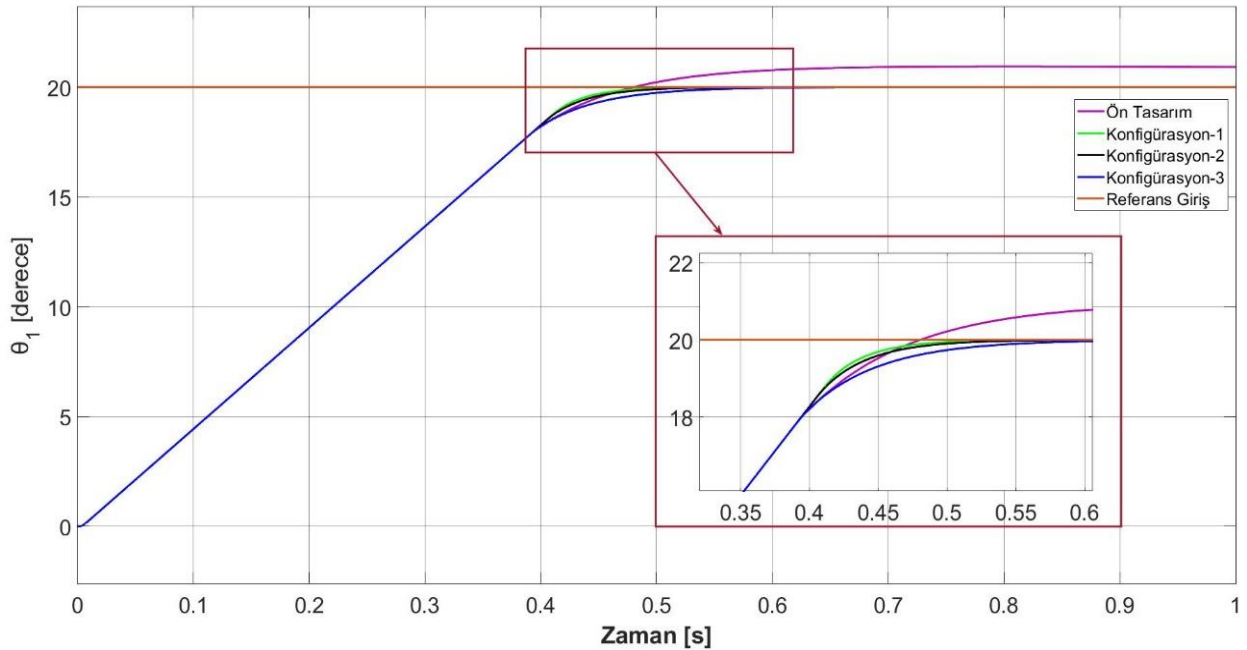
5. SİMÜLASYON SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

Simülasyon sırasında incelenecek olan hareket senaryosu, tüm eklemleri ayrı ayrı olarak 0° pozisyonundan başlayarak 20° eklem açısına ulaştırmaktır. Sistemdeki motorlar, ± 12 volt gerilim seviyesinde çalışabilmektedir. Dolayısıyla PID kontrolcü sinyali ± 12 volt gerilim seviyesi arasında kalacak şekilde satürasyona tabi tutulmuştur. Sistemin Matlab/Simulink modeli Şekil 8’de gösterilmiştir.

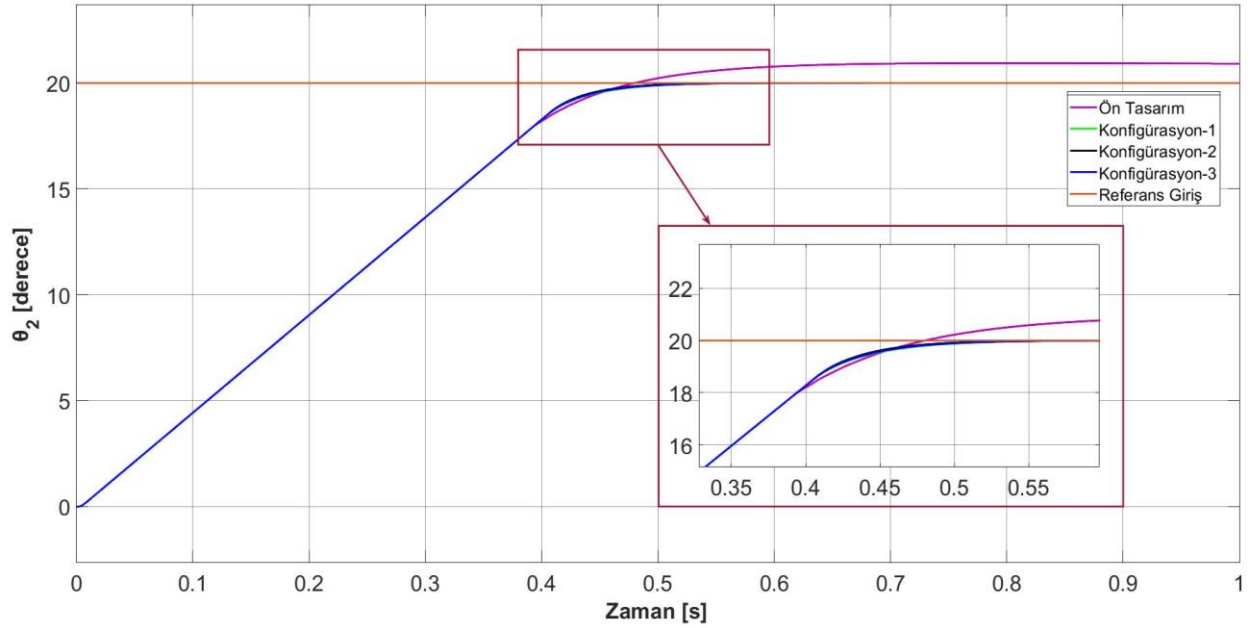
Yapılan simülasyon sonucunda her bir eklem ve tüm konfigürasyonlarda elde edilen pozisyon-zaman grafikleri Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11’de verilmiştir.



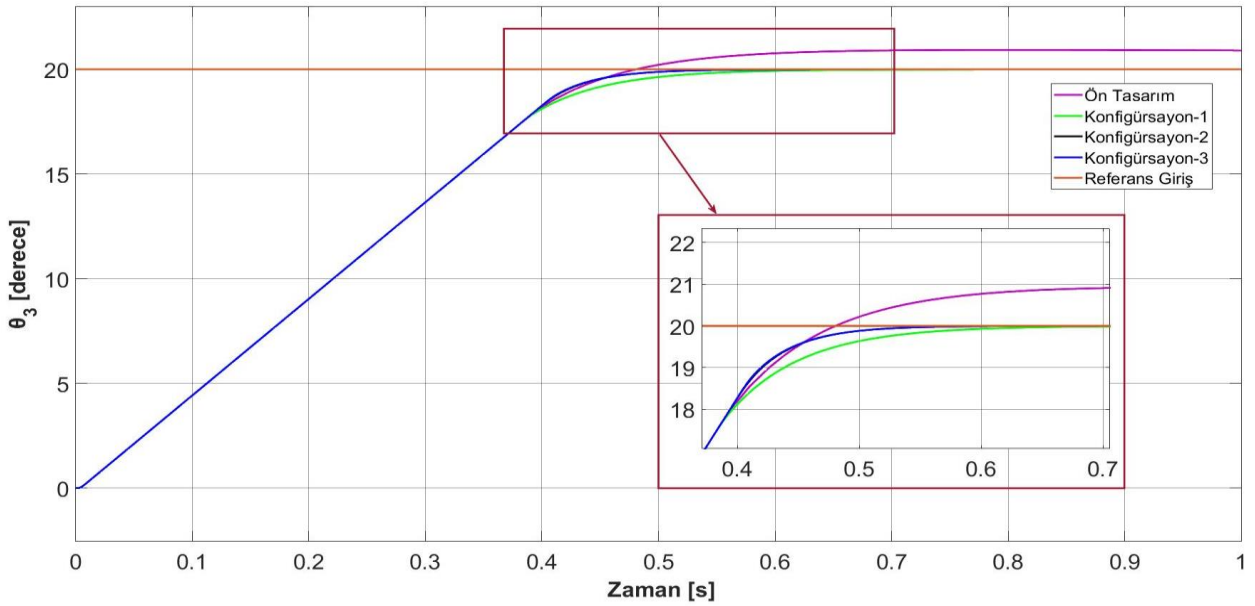
Şekil 8. Sistemin MATLAB/Simulink modeli (MATLAB/Simulink model of the system)



Şekil 9. Birinci eklem zama bağlı açı değışimi (Time dependent angle change of the first joint)



Şekil 10. İkinci eklemin zamana bağlı açısı değişimi (Time dependent angle change of the second joint)



Şekil 11. Üçüncü eklemin zamana bağlı açısı değişimi (Time dependent angle change of the third joint)

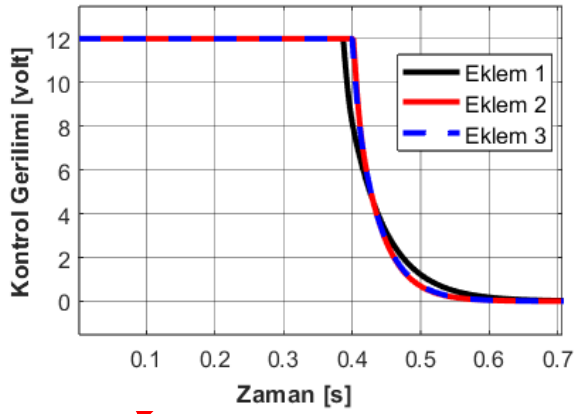
Yapılan optimizasyon sonrası tespit edilen PID kazanç parametreleri ve bu parametreler kullanılarak kontrol edilen sistemin geçici durum cevapları Çizelge 3'te verilmiştir.

Amaç fonksiyonu belirlenirken de açıklandığı gibi, kalıcı durum hatası ve en büyük aşma miktarları en küçük olması sistem kontrolü için önemlidir. Dolayısıyla bu iki cevabı en küçük yapan konfigürasyon sonucu tespit edilen PID katsayıları sistem kontrolünde kullanılmıştır. Optimizasyon sonucunda, tüm eklemler için Konfigürasyon 3 PID kazanç parametreleri sistem kontrolü için uygun görülmüştür.

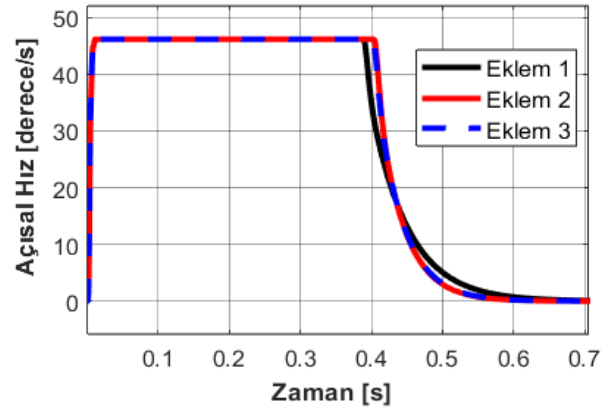
Konfigürasyon 3'te tespit edilen PID parametreleriyle yapılan 20°'lik hareket sonucunda eklemlerin, kontrol gerilimi, açısal hızı, açısal ivmesi, akım ve torku, Şekil 12, 13, 14, 15 ve 16'da grafikler halinde sırasıyla verilmiştir.

Çizelge 3. AA optimizasyonu sonrası sistemin geçici durum cevapları (Transient response of the system after AA optimization)

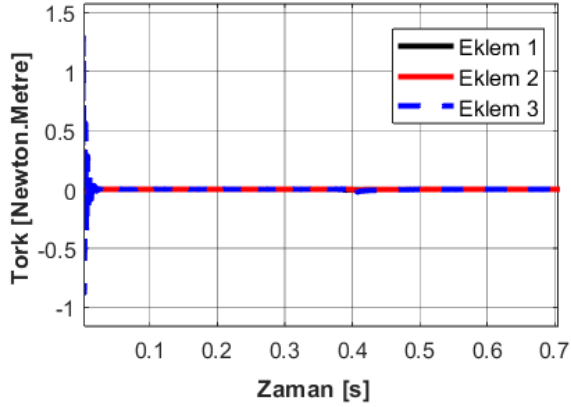
	Geçici Durum Değişkeni	Deneme-Yanılma	AA Parametre Konfigürasyonları		
			1	2	3
Eklem 1	K_p	35,0000	9,6037	8,0030	8,1004
	K_i	4,0000	0,0010	0,0004	0,0002
	K_d	2,0000	0,0360	0,0355	0,1496
	t_r [s]	0,3701	0,3467	0,3467	0,3469
	t_s [s]	0,5336	0,4426	0,4506	0,4785
	M_p [°]	0,9329	0,0005	0,0002	0,0001
	t_p [s]	0,8041	1,0065	1,0534	1,3697
	e_{ss} [°]	0,9072	0,0005	0,0002	0,0001
Eklem 2	K_p	35,0000	9,6481	9,3935	9,9767
	K_i	4,0000	0,0002	0,0005	0,0002
	K_d	2,0000	0,0974	0,0632	0,0972
	t_r [s]	0,3701	0,3467	0,3467	0,3467
	t_s [s]	0,5336	0,4541	0,4487	0,4523
	M_p [°]	0,9320	0,0001	0,0002	0,0001
	t_p [s]	0,8040	1,0432	1,0327	1,0577
	e_{ss} [°]	0,9065	0,0001	0,0002	0,0001
Eklem 3	K_p	35,0000	9,5294	6,5570	9,0832
	K_i	5,0000	0,0012	0,0003	0,0001
	K_d	2,0000	0,2816	0,0089	0,0802
	t_r [s]	0,3745	0,3488	0,3467	0,3467
	t_s [s]	0,9315	0,4943	0,4545	0,4539
	M_p [°]	0,9315	0,0006	0,0002	0,0001
	t_p [s]	0,5336	1,5541	1,0563	1,0694
	e_{ss} [°]	0,9080	0,0006	0,0002	0,0000



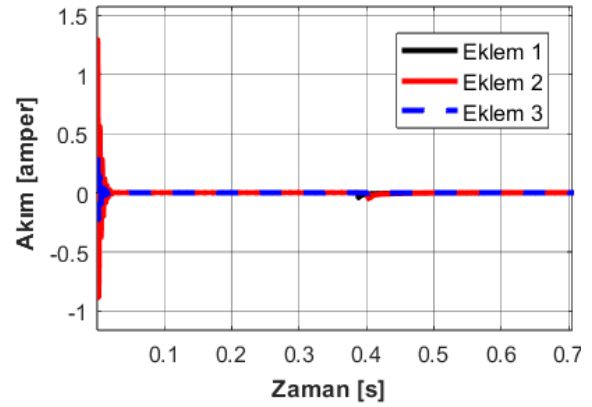
Şekil 12. Kontrol gerilimi - zaman grafiği (Control voltage vs. time graph)



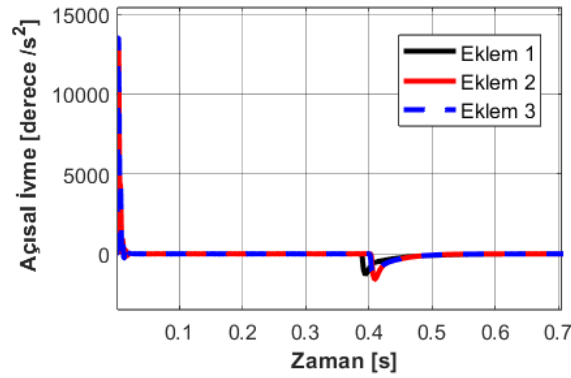
Şekil 13. Açısal hız – zaman grafiği (Angular velocity vs. time graph)



Şekil 14. Tork – zaman grafiği (Current-time graph)

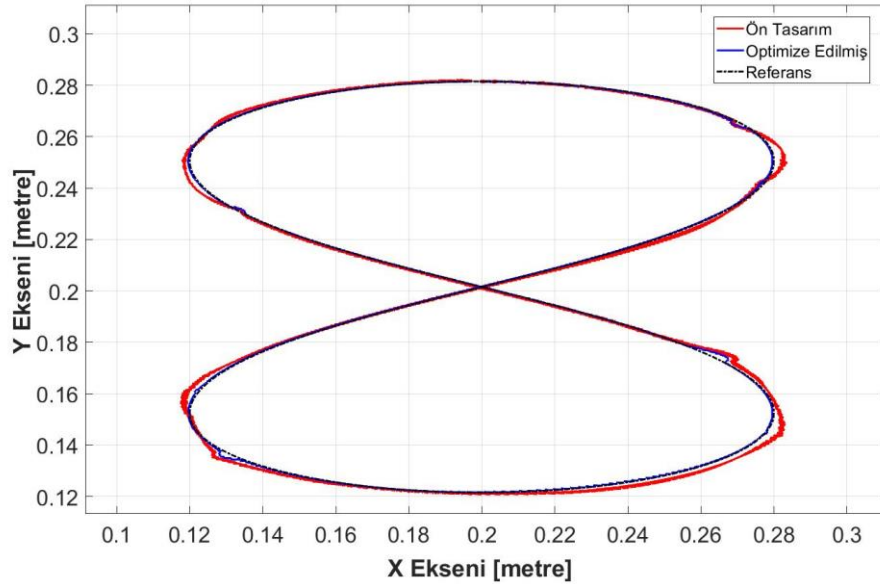


Şekil 15. Akım-zaman grafiği (Current-time graph)



Şekil 16. Açısal ivme – zaman grafiği (Angular acceleration-time graph)

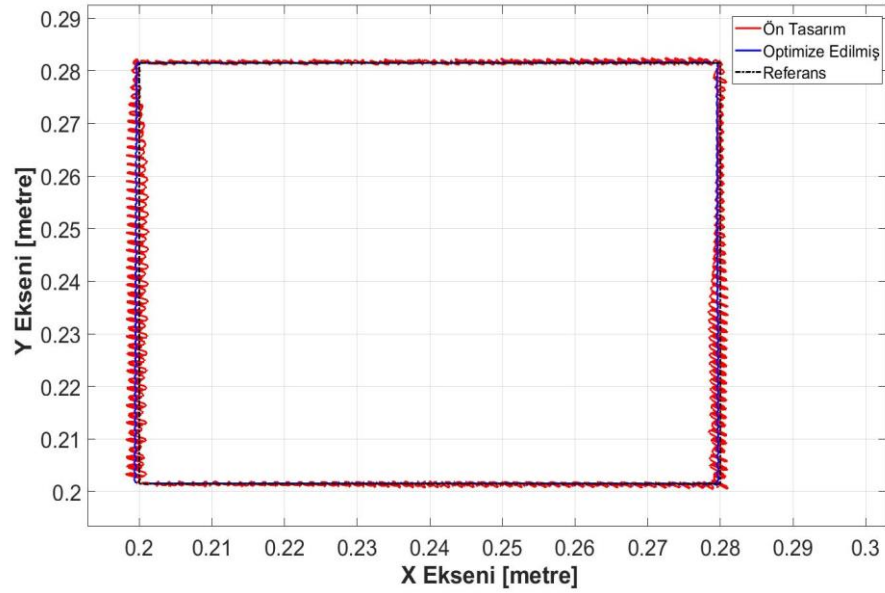
Konfigürasyon 3 optimizasyon parametreleri doğrultusunda elde edilen PID katsayıları ile sisteme 2 farklı çizim yaptırılmıştır. Bu çizimlerden birisi “8 (sekiz)” rakamının çizimi iken diğeri kare şeklidir. Her iki geometri için, aynı grafik üzerinde, referans, ön tasarım ve optimize edilmiş parametreler kullanılarak elde edilen çizimler görülmektedir. 8 (sekiz) çizimi Şekil 17’de, kare çizimi ise Şekil 18’de verilmiştir. Ayrıca, Çizelge 4’te 8 (sekiz) çiziminin, referans ile ön tasarım ve referans ile optimize edilmiş çizimleri arasındaki dikey ve yatay yöndeki hata değerleri, 11 farklı hata kriterine göre tespit edilmiştir. Çizelge 5’te ise kare çiziminin hata değerleri verilmiştir [25].



Şekil 17. 8 (sekiz) çizimi (8 (eight) drawing)

Çizelge 4. 8 (sekiz) çizimini farklı hata kriterlerine göre hata değerleri (Error values according to different error criteria in drawing 8 (eight))

Hata Kriteri	Referans - Ön Tasarım			Referans - Optimize Edilmiş		
	X Eksen	Y Eksen	X-Y Düzlemi	X Eksen	Y Eksen	X-Y Düzlemi
MAE	1,625084	0,392250	1,671753	0,570165	0,119538	0,582561
MSE	4,282768	0,319206	4,294647	0,712844	0,036874	0,713797
RMSE	2,069485	0,564983	2,145221	0,844301	0,192026	0,865863
MARE	0,008883	0,002232	0,009159	0,003004	0,000631	0,003070
MSRE	0,000136	0,000014	0,000137	0,000019	0,000001	0,000019
RMSRE	0,011646	0,003697	0,012219	0,004342	0,001052	0,004468
MAPE	0,888275	0,223175	0,915882	0,300382	0,063101	0,306938
MSPE	1,356258	0,136668	1,363127	0,188565	0,011068	0,188890
RMSPE	1,164585	0,369687	1,221854	0,434241	0,105204	0,446803
R ²	0,999606	0,999939	0,99977	0,999911	0,999992	0,99995
MPE	5,001037	1,986322	5,381064	3,242794	0,871167	3,357774



Şekil 18. Kare Çizimi (Square Drawing)

Çizelge 5. Kare çiziminin farklı hata kriterlerine göre hata değerleri (Error values of square drawing according to different error criteria))

Hata Kriteri	Referans - Ön Tasarım			Referans - Optimize Edilmiş		
	X Eksen	Y Eksen	X-Y Düzlemi	X Eksen	Y Eksen	X-Y Düzlemi
MAE	0,675041	0,312312	0,743787	0,584895	0,284862	0,650576
MSE	0,755732	0,186997	0,778523	0,545575	0,224111	0,589812
RMSE	0,869329	0,432432	0,970943	0,738631	0,473404	0,877318
MARE	0,002885	0,001315	0,003171	0,002453	0,001201	0,002731
MSRE	0,000014	0,000003	0,000014	0,000010	0,000004	0,000011
RMSRE	0,003724	0,001836	0,004152	0,003094	0,002002	0,003685
MAPE	0,288541	0,131522	0,317102	0,245303	0,120098	0,273125
MSPE	0,138706	0,033720	0,142746	0,095726	0,040093	0,103783
RMSPE	0,372432	0,183630	0,415242	0,309396	0,200232	0,368536
R ²	0,999714	0,999916	0,99982	0,999829	0,999897	0,99986
MPE	1,234460	0,960277	1,563977	1,059126	0,904074	1,392515

Çizelge 4 incelendiğinde, 8 (sekiz) çizimi ön tasarım değerleri ile yapılan çizimin referans çizime göre, ortalama mutlak hatası (Mean Absolute Error) (MAE) X-Y düzleminde 1,6717 olarak tespit edilmiştir. Ortalama kare hatası (Mean Squared Error) (MSE) dikkate alınır X-Y düzleminde 4,2956'dır. Optimizasyon çalışması yapıldıktan sonra MAE, X-Y düzleminde 0,5825; MSE ise X-Y düzleminde 0,7137 seviyesine düşürülmüştür. Bununla beraber, en büyük yüzde hata (Maximum Percent Error) (MPE) ön tasarım parametreleri kullanıldığında, X-Y düzleminde %5,3810 seviyesindedir. Optimizasyon çalışması sonucunda MPE, X-Y düzleminde %3,3577 seviyesine düşürülmüştür. Sonuç olarak, yüzde isabet oranı, X-Y düzleminde %2,0233 artırılmıştır.

Çizelge 5'te ise, 8 (sekiz) çiziminde yapıldığı gibi hata incelemesi kare çizimi için tekrarlanmıştır. Ön tasarım parametreleriyle yapılan çizim referans çizime göre MAE değeri X-Y düzleminde, 0,7437 olarak hesaplanmıştır. MSE değeri ise X-Y düzleminde 0,7785'dir. Yapılan çalışma sonucunda, MAE değeri X-Y düzleminde 0,6505 seviyesine, MSE ise, X-Y düzleminde 0,5898 seviyesine düşürülmüştür. Ayrıca ön tasarımda, X-Y düzleminde %1,5639 MPE meydana gelmiştir. Optimal kontrolcü ile bu hata X-Y düzleminde %1,3925 seviyesine düşürülmüştür. Kare çizimi sonucunda X-Y düzleminde %0,1711 isabet artışı görülmüştür.

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, bir üç serbestlik dereceli bir çizim robotunun yörünge kontrolü PID kontrolcü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Robot kolun matematik, kinematik, fiziksel modeli ve tahrik elemanı olan DC motorun dinamik modelleri hazırlanmış ve tüm sistem Matlab/Simulink ortamında simüle edilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları, her eklem için zamana bağlı açısal değişimleri grafikler, geçici durum cevapları ise tablolar halinde sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar ışığında, farklı AA parametreleriyle yapılan optimizasyonlardan benzer sonuçlar elde edilmiş ve sistem başarılı bir şekilde kontrol edilmiştir. Ayrıca, optimize edilmiş parametreler kontrolcüye entegre edilmiş, 8 (sekiz) rakamı ve kare çizimleri yaptırılmıştır. Yapılan çizimler arasındaki hata karşılaştırması 11 farklı hata kriteri göz önünde bulundurularak elde edilen hata değerleri esas alınarak yapılmıştır. Optimizasyon öncesi ön tasarım parametreleri ile yapılan 8 (sekiz) ve kare çizimleri sonucunda MPE, X-Y düzleminde sırasıyla %5,3810 ve %1,5639 seviyesindedir. Sonrasında ise MPE, yine X-Y düzleminde sırasıyla, %3,3577 ve %1,3925 seviyelerine indirilmiştir. Sonuç olarak, sekiz çizimi için yüzde isabet oranı, X-Y düzleminde %2,0233; kare çizimi için X-Y düzleminde %0,1711 arttığı görülmüştür. Bu çalışmanın devamında simülasyon ortamında elde edilen optimize edilmiş PID kazançlarının, gerçek bir sistem üzerinde deneysel doğrulaması yapılabileceği ön görülmektedir.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

θ_1 = Eklem-1 açısal konum (derece)
 θ_2 = Eklem-2 açısal konum (derece)
 θ_3 = Eklem-3 açısal konum (derece)
 l_1 = Uzu-1 uzunluğu (m)
 l_2 = Uzu-2 uzunluğu (m)
 l_3 = Uzu-3 uzunluğu (m)
 m_1 = Uzu-1 kütlesi (kg)
 m_2 = Uzu-2 kütlesi (kg)
 m_3 = Uzu-3 kütlesi (kg)
 G_1, l_{g_1} = Uzu-1 ağırlık merkezi ve konumu
 G_2, l_{g_2} = Uzu-2 ağırlık merkezi ve konumu
 G_3, l_{g_3} = Uzu-3 ağırlık merkezi ve konumu
 I_1 = Uzu-1 ağırlık merkezine göre atalet momenti
 I_2 = Uzu-2 ağırlık merkezine göre atalet momenti
 I_3 = Uzu-3 ağırlık merkezine göre atalet momenti
 $\dot{\theta}$ = Açısal Hız (derece/s)
 t_r = Yükselme Zamanı (s)
 t_s = Yerleşme Zamanı (s)
 M_p = Maksimum Aşma (derece)
 t_p = Tepe Zamanı (s)
 e_{ss} = Kalıcı Hata (derece)

KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

MAE = Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error)
MSE = Ortalama Kare Hatası (Mean Squared Error)
RMSE = Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Squared Error)
MARE = Ortalama Mutlak Bağıl Hatası (Mean Absolute Relative Error)
MSRE = Kök Ortalama Kare Bağıl Hatası (Root Mean Squared Relative Error)
MAPE = Ortalama Mutlak Yüzde Hata (Mean Absolute Percentage Error) [%]
MSPE = Ortalama Kare Yüzde Hatası (Mean Squared Percentage Error) [%]
RMSPE = Kök Ortalama Kare Yüzde Hatası (Root Mean Squared Percentage Error) [%]
 R^2 = Korelasyon Katsayısı (Correlation Coefficient)
MPE = En büyük Yüzde Hata (Maximum Percent Error) [%]

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma MPG Makine İmalat Sanayi ve Tic. A.Ş. tarafından desteklenmiştir. MPG Makine İmalat Sanayi ve Tic. A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Muhammet Ali ÇINAR: Çalışmadaki teorik modelini kurgulamış, elde edilen sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir./ Constructed the theoretical model in the study, analyzed the results and carried out the writing process of the article.

Mete KALYONCU: Çalışmanın danışmanlığını yürütmüştür./ Supervised the study

Muhammed Arif ŞEN: Çalışmadaki teorik modelini kurgulamış, elde edilen sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir./ Constructed the theoretical model in the study, analyzed the results and carried out the writing process of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. / There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ghaleb, N. M. & Aly, A. A., "Modeling and Control of 2-DOF Robot Arm", *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, 6(10): 24-31, (2018).
- [2] Şen, M. A., Bilgiç, H. H. & Kalyoncu, M., "Çift Ters Sarkaç Sisteminin Denge Ve Konum Kontrolü İçin Arı Algoritması İle LQR Kontrolcü Parametrelerinin Tayini", *Mühendis ve Makina*, 57(679): 53-62, (2016).
- [3] Rahman, S. A., Aldeen, Z., "Design a Fuzzy Logic Controller for Controlling Position of D.C. Motor", *International Journal of Computer Engineering In Search Trends*, 4(7): 285-289, (2017).
- [4] Kocakulak T., Solmaz H., Şahin F., "Control and Optimization of Pre-Transmission Parallel Hybrid Vehicle with Fuzzy Logic Method and Comparison with Conventional Rule Based Control Strategy", *Politeknik Dergisi*, *(*) : *, (*). (Erken Görünüm)
- [5] Mas'udi, M. I., Afakh, M. L., Ardilla, F., Wibowo, I. K., & Marta, B. S., "Implementation of PID Control in Active Ball Handling System of Middle Size Robot Soccer", *2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, Bali, Indonesia, 242-247, (2018).
- [6] Onen, U., Çakan, A., & Ilhan, I., "Performance Comparison of Optimization Algorithms in LQR Controller Design for a Nonlinear System", *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 27: 1938-1953, (2019).
- [7] Tosun, M.F., Gençkal, A.A. & Şenol, R., "Modern Kontrol Yöntemleri ile Bulanık Mantık Temelli Oda Sıcaklık Kontrolü", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(3): 992-999, (2019).
- [8] Korkmaz, M., Aydoğdu Ö., & Doğan, H., "Design and Performance Comparison of Variable Parameter Nonlinear PID Controller and Genetic Algorithm Based PID Controller," *2012 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications*, Trabzon, Türkiye, 1-5, (2012).
- [9] Bakırcıoğlu, V., Şen, M. A. & Kalyoncu, M., "Dört Ayaklı Robotun Bir Bacığı İçin PID Kontrolcü Tasarımı ve Arı Algoritması Kullanarak Optimizasyonu", *Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 1-5, (2015).
- [10] Raza, Y., Ahmed, S. F., Ali, A., Joyo M. K., & Kadir, K. A., "Optimization of PID Using PSO for Upper Limb Rehabilitation Robot," *2018 IEEE 5th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS)*, Bangkok, Thailand 1-4, (2018).
- [11] Bilgiç, H.H., Şen, M.A., & Yaptı, A., "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*, 46: 7323-7336, (2021).
- [12] Özsağlam, M. Y., & Çunkaş, M., "Optimizasyon Problemlerinin Çözümü için Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması", *Politeknik Dergisi*, 11(4): 299-305, (2008).
- [13] Yenipinar B., Yılmaz C., Sönmez Y. ve Işık M. F., "Asenkron Motorlarda Rotor Oluğunun Farklı Optimizasyon Yöntemleri ile Optimizasyonunun Gerçekleştirilmesi ve Performansa Etkilerinin İncelenmesi", *Politeknik Dergisi*, 21(1): 1-6, (2018).
- [14] Yüksek G., Mete A. N. ve Alkaya A., "PID Parametrelerinin LQR ve GA Tabanlı Optimizasyonu: Sıvı Seviye Kontrol Uygulaması", *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1111-1119, (2020).
- [15] Aysal F.E., Çelik İ., Cengiz E. ve Oğuz Y., "A Comparison of Multi-Layer Perceptron and Inverse Kinematic for RRR Robotic Arm", *Journal Of Polytechnic*, *(*) : *, (*). (Early View)
- [16] Kucuk, S. & Bingul, Z., "Robot Kinematiği", 18, *Umıtepe Yayınları*, 141, Kocaeli, Türkiye, (2006).
- [17] Şen, M. A., Bakırcıoğlu, V. & Kalyoncu, "M. Modelling and PID Control of Scara Robot", *International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'17)*, Konya, Türkiye, 1-4, (2017).
- [18] <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?aux=Home>, "DC Motor Position: Simulink Modeling", (2022).
- [19] Ang, K., Chong, G. & Li, Y. "PID Control System Analysis, Design, and Technology" *Control Systems Technology, IEEE Transactions*, 13(4): 559 – 576, (2005).
- [20] Naing, W. W., Thanlyin, M., Aung, K. Z., & Thike, A. "Position Control of 3-DOF Articulated Robot Arm using PID Controller" *International Journal of Science and Engineering Applications*, 7(9), 254-260, (2018).

- [21] Pham, D.T., Koç, E., Ghanbarzadeh, A., Otri, S., Rahim, S., Zaidi, M., "The Bees Algorithm A Novel Tool for Complex Optimisation Problems", **2nd International Virtual Conference on Intelligent Production Machines and Systems**, Cardiff, UK, 454-461, (2006).
- [22] Pham, D. T., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S., Zaidi, M., "The Bees Algorithm. Technical Note", **Manufacturing Engineering Centre**, Cardiff University, UK, 1-57, (2005).
- [23] Pham D. T. & Kalyoncu M., "Optimisation of a Fuzzy Logic Controller for a Flexible Single-Link Robot Arm Using the Bees Algorithm," **2009 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics**, Cardiff, UK, 475-480, (2009).
- [24] Pham, D., Koç, E., Kalyoncu, M. & Tinkir, M. "Hierarchical PID Controller Design for a Flexible Link Robot Manipulator Using the Bees Algorithm", **Proceedings of 6th International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems**, Sakarya, Türkiye, 757-765, (2008).
- [25] Guzel, M.H., Unal, R.E., Onder, A. "The Fuzzy Logic-Based Modeling of a Micro-Scale Sloped Solar Chimney Power Plant", **Journal of Mechanical Science and Technology**, 35(3), 1301–1308, (2021).

ERKEN GÖRÜNÜM