



KÜÇÜK ÖLÇEKLİ, TEK EKLEMLİ MANYETİK SARKAÇ MEKANİZMASININ BİLGİSAYAR DESTEKLİ BENZETİMİ VE PID KONTROLÜ

Hüseyin YILDIZ*

İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Mikro robot,
PID kontrol,
Manyetik kontrol,
Manyetik alan,
Optimizasyon.*

Öz

Sağlık ve biyomedikal cihaz teknolojileri günümüzün en önemli konuları arasında yer almaktadır. Son yıllarda teknolojiye yaşanan gelişmeler ile birlikte, mikro ve makro ölçekli robotik sistemlerinin ilaç dozajlama, hücre ve DNA dizilimi oluşturma, görüntüleme ve bölgesel müdahale sistemi olarak geliştirilmesi üzerine çalışmalar ön plana çıkmıştır. Çalışmada küçük ölçekli sistemlerde nesne taşıma, konum manipülasyonu vb. işlemlerde kullanılmak üzere doğrudan manyetik alan ile kontrol edilebilen tek serbestlik dereceli bir robot kol mekanizması (sarkaç) önerilmiştir. Sistemi yöneten elektrik ve mekanik denklem sistemi çıkartılmış, PID (Proportional Integral Derivative) kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Manyetik kuvvetlerin doğrusal olmayan davranışı nedeni ile Ziegler-Nichols metotları ile kontrolcü parametrelerinin belirlenemediği görülmüştür. PID kontrolcü parametreleri iteratif metotlar kullanılarak optimize edilerek elde edilmiştir. İterasyon algoritması 7 iterasyon sonucunda $-0,1788^\circ$ aşma, $0,1634$ s yerleşme ve $0,0298^\circ$ mutlak hata ortalaması ile en iyi sonuçlara ulaşmıştır. Ulaşılan PID parametreleri ise $k_p=5,353$, $k_d=0,2157$ ve $k_i=21,5987$ 'dir. Farklı dalga formlarında (basamak, üçgen ve sinüzoidal) kontrolcü davranışı incelenmiştir. Sistemde oluşan hatalar, kontrolcü gerilim çıkışı ve devrede oluşan akımlar görselleştirilerek detaylandırılmıştır. Çalışmada, 20A akım ile önerilen sarkaç modelinde pozisyon kontrolünün yapılabileceği gösterilmiştir.

COMPUTER AIDED SIMULATION AND PID CONTROL OF A SMALL SCALE SINGLE DOF MAGNETIC PENDULUM MECHANISM

Keywords

*Micro robot,
PID control,
Magnetic control,
Magnetic field,
Optimization.*

Abstract

Health and biomedical device technologies are among the most important issues of today. With the developments in technology in recent years, studies on the development of micro and macro-scale robotic systems such as drug dosing, cell and DNA sequencing, imaging and regional intervention systems have become more important. In this study, a single-degree-of-freedom robotic arm mechanism (pendulum) that can be directly controlled by a magnetic field is proposed to be used in small-scale systems for object handling, position manipulation, etc. The electrical and mechanical equations governing the system are obtained and a PID (Proportional Integral Derivative) controller is designed. It is found that the controller parameters cannot be determined by Ziegler-Nichols methods due to the chaotic behavior of the magnetic forces. PID controller parameters were obtained by optimization using iterative methods. The best results were obtained after 7 iterations with $-0,1788^\circ$ overshoot, $0,1634$ s settling time and $0,0298^\circ$ mean square error. The PID parameters obtained are $k_p=5,353$, $k_d=0,2157$ and $k_i=21,5987$. The controller behavior for different reference inputs (step, triangular and sinusoidal) was investigated. Errors in the system, controller voltage output and currents in the circuit are visualized and presented. It is observed that position control can be performed in the proposed pendulum model with 20A current.

Alıntı / Cite

Yıldız, H., (2024). Küçük Ölçekli, Tek Eklemlili Manyetik Sarkaç Mekanizmasının Bilgisayar Destekli Benzetimi ve PID Kontrolü, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(1), 75-87.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

H. Yıldız, 0000-0002-0575-3904

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	21.06.2023
Revizyon Tarihi / Revision Date	22.10.2023
Kabul Tarihi / Accepted Date	26.01.2024
Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: huseyin.yildiz@iuc.edu.tr, +90-212-866-3700

COMPUTER AIDED SIMULATION AND PID CONTROL OF A SMALL SCALE SINGLE DOF MAGNETIC PENDULUM MECHANISM

Huseyin YILDIZ†

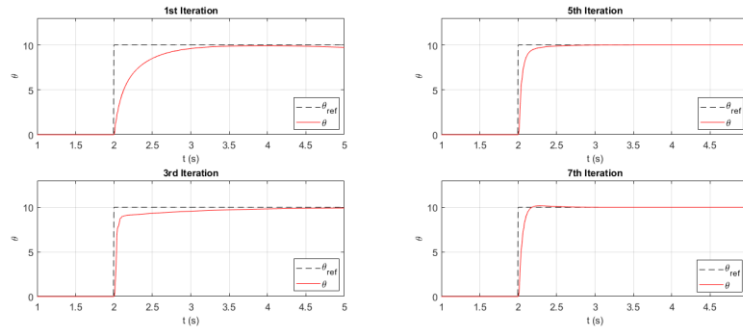
Istanbul University – Cerrahpasa, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Istanbul, Türkiye

Highlights (At least 3 and maximum 4 sentences)

- In this study, a single-degree-of-freedom robotic arm mechanism (pendulum) that can be directly controlled by a magnetic field is proposed to be used in small-scale systems for object handling, position manipulation, etc.
- PID controller parameters were obtained by optimization using iterative methods.
- The controller behavior for different reference inputs (step, triangular and sinusoidal) was investigated.
- It is shown that position control can be performed in the proposed pendulum model with 20A current.

Graphical Abstract

In this paper, electrical and mechanical equations of motion are obtained and real-time angle control is performed with a PID controller for a small size 1DOF robot arm. Figure A shows the control capability of the system at different iteration steps. The algorithm obtained the optimal parameters at the 7th iteration.



Şekil. A/ Figure. A Farklı iterasyon değerlerinde açılma değişimi (Angular response at different iteration values)

Purpose and Scope

This study aims to design a 1DOF robotic arm mechanism with direct magnetic field control for use in small-scale robotic systems.

Design/methodology/approach

A magnetic pendulum of length 37 mm is considered. The magnetic moment of the pendulum is assumed to be concentrated at the middle of the pendulum. Infinitely long filamentary wires were placed on both sides of the pendulum. Electrical and mechanical equations of motion were obtained. PID (Proportional Integral Derivative) controller is designed and control parameters are optimized by iterative shooting method. Simulations were performed in Matlab Simulink program.

Findings

The study showed that a small-scale robotic arm mechanism can be controlled using only two parallel wires. At the 7th iteration, the PID control coefficients $k_p=5,353$, $k_d=0,2157$ and $k_i=21,5987$ were obtained, giving the error value of $-0,1788^\circ$ overshoot, $0,1634s$ settling time and $0,02979^\circ$ MAE (Mean Absolute Error). It was observed that the PID controller gave good results for low frequency motions. However, due to the nonlinear nature of the system, more complex control algorithms are required.

Research limitations/implications (if applicable)

This study considered only 1DOF mechanism. Researchers can extend the results obtained in the paper with two or more arm mechanisms.

Practical implications (if applicable)

Usually, control parameters are determined by the Ziegler-Nichols method. However, this may not be possible in nonlinear systems as in this study. In these cases, the coefficients can be determined by optimization methods.

Originality

Robot arm mechanisms are usually designed for large-scale applications. There are few studies on small-scale arm mechanism designs.

† Corresponding author: huseyin.yildiz@iuc.edu.tr, +90-212-866-3700

1. Giriş (Introduction)

Son yıllarda biyoteknoloji alanında yaşanan teknolojik yenilikler küçük boyutlu işlevsel robotlar üzerine çalışmalara ilginin artmasını sağladı. Bu kapsamda, mikro ölçekli ilaç taşıma sistemleri, çeşitli görevleri yerine getirebilecek manipülatörler ve mikro ölçekli motor yapıları en çok çalışılan konular arasındadır. Çalışmalar mikro ölçekli robot sistemlerinin geleneksel motor mekanizmalarından farklı olarak doğrudan manyetik alan, ultrasonik veya lazer ışıkları ile kontrol edilebilir tasarımlar olduklarını göstermektedir (Magdanz vd, 2020; Yang, ve Wang, 2013).

Manyetik mikro robotlar biyomedikal alanda, non-invasif olarak hastalıkları görüntüleme, teşhis etme, ilaç verme, müdahale ile doku onarım ve tedavi metotlarının gelişmesinde büyük katkılar sağlamıştır (Magdanz vd, 2020; Yang, ve Wang, 2013). Bu robotlar tipik olarak manyetik alanlar tarafından kontrol edilir ve belirli yönlerde hareket edecek ve çok çeşitli işlevleri yerine getirecek şekilde tasarlanırlar (Jia vd., 2023). 2013 yılında Yang ve ekibi tarafından yayınlanan çalışmada, kanserli dokularda cerrahi operasyonların hasta kayıplarındaki durumu göze alınarak, meme kanserinde düşük girişimsel etkiye sahip nano teknoloji ilaç taşıyıcı robotik çalışmalar derlenmiştir. Çalışmada gelecekte ortaya konabilecek farklı yapılarıdaki nano teknolojik ilaç taşıyıcı robotik sistemler derlenmiştir (Yang, ve Wang, 2013). 2020 yılında Koleoso ve ekibi tarafından mikro/nano boyutlu manyetik robotların yer aldığı yayınlar derlenmiştir. Bu alandaki çalışmaların yıllara göre dağılımı, üretim metotları, malzeme yapıları, hareket kabiliyetleri, uygulama alanları bakımında farklılıkları gibi birçok farklı konu raporlanmıştır (Koleoso vd., 2020). Ceylan ve arkadaşları ise 2017 yılında biyomühendislik uygulamaları için bağlantısız mobil mikro robot çalışmalarına ait derleme yayınlamışlardır. Bu alandaki mikro robotların tasarımı, üretimi ve test edilmesindeki ön saflardaki gelişmeleri raporlamıştır. Çalışmada mobil mikro robotların harekete geçirilmesi, yapısal hareketlilikleri, algılama konuları, işlevsel yetenekleri ve en yeni stratejiler tartışılmıştır. Mikro robotların potansiyel avantajları ve dezavantajları değerlendirilmiş ve mikro ortamlarda biyobozunurluk, immünojeniklik, hareketlilik, algılama ve olası tıbbi müdahaleleri göz önünde bulundurarak gelecek çalışmalara yön vermek üzere öneriler sunulmuştur (Ceylan vd., 2017). Geleneksel cerrahi uygulamalarında hasta kayıpları ve komplikasyonları dikkate alındığında, ilaçları doğrudan kanser hücrelerine iletmek için manyetik mikro robotların kullanımı girişimsel yöntemlere göre avantajlar sağlamaktadır. Magdanz ve ekibi tarafından 2020 yılında mikro robotlar üzerine gerçekleştirilen çalışmada, doğrudan kanser hücreleri hedef alacak şekilde programlama yapılmış, sağlıklı hücrelere zarar vermeden yüksek dozda ilaç kanser hücrelerine yönlendirilmiştir. Böylelikle hasta açısından daha az yan etki ve başarılı tedaviler yapılabileceği gösterilmiştir (Magdanz vd., 2020). Manyetik kontrolcü ile gerçekleştirilen tasarımlarının dışında ultrasonik ve kızıl ötesi sinyaller kullanılarak mikro robot tasarımları gerçekleştirilebilmektedir. Ultrasonik manipülatör kullanılarak 1-2 milimetre boyutlarında mikro motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kızıl ötesi sinyallerin manipüle edilmesiyle 1-2 milimetre boyutlarda hareket kabiliyetine sahip mikro robotlar tasarlanabilmektedir (Lu vd.,2015; Mashimo ve Oba, 2022). İlaç taşıma sistemlerinin yanı sıra, optik cımbızlar ve mikro manipülatörler, manyetik mikro robot uygulamaları ile paralellik göstermektedir. Optik cımbızlar ve mikro manipülatörler hücresel boyutta düzenleme, yönlendirme ve kontrol gerektiği durumlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Mikroskobik düzeyde hücre araştırmalarında, hücrelerin düzenlenmesinde, yapay döllene, sperm ayrıştırma ve tüp bebek tedavilerinde kullanılabilirler. Zheng ve ekibi tarafından 2022 yayınlanan çalışmada optik cımbızlar ile etiketlenmiş tümör hücrelerinin analizi ve sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Mevcut yöntemlere göre daha basit ve başarılı bir şekilde tümör hücrelerini ayrıştırabilen sonuçlar ortaya konmuştur (Zheng vd.,2017; Yang vd., 2023). M. Abbas ve ekibi tarafından 2023 yılında gerçekleştirilen çalışmada insan iç kulağı hastalıklarında invazif uygulamalarının zorluğu nedeniyle manyetik nano partiküllerin koklea içinde istenilen konuma yönlendirilmesi için dört paralel yüzlü manyetik yapılar ile yönelim düzlemlerinde nano partiküllerin hareketini sağlanmıştır (Abbas vd., 2023).

Elektromanyetik teorinin her geçen gün gelişmesi, mikro robot kullanımlarına farklı bir bakış sunmaktadır. Bir taraftan mikro elektromekanik (MEMs) sistemlere kapı aralarken diğer taraftan da manyetik algılayıcılar ve uygulamaların geliştirilmesinde önem arz etmektedir (Özbey vd., 2014). Manyetik sarkaç sistemleri de bunlardan biridir. Manyetik sarkaç kontrol edilebilirliği göz önüne alındığında doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Diğer taraftan titreşim ve hareket değişimleri için hassas bir algılayıcı olarak kullanılabilir. Ayrıca basit bir elektrik makinası olarak (jiroskop) modellenmiştir (He vd., 2022). Manyetik sarkaç, doğrusal olmayan ve histerisiz etkisine sahip tepkiler ortaya koyması nedeniyle analitik olarak modellenmesi ve deneysel olarak çalışmalar yapılması açısından da zorlayıcı bir konudur. Yapılan çalışmaların, uzay, havacılık, navigasyon ve robotik alanlarında önemli katkılar sunması beklenmektedir (Nana vd., 2017). Bazı çalışmalarda mikro manyetik sarkaç modeli, farklı ve bağımsız bir ivme ölçüm yöntemi olarak çalışmıştır (Lu vd., 2015). Genel olarak, manyetik mikro robotların potansiyel uygulamaları çok geniş ve çeşitlidir. Araştırmacılar bu küçük makineleri programlamak ve kontrol etmek için yeni yollar geliştirmeye devam ettikçe, kullanım olasılıkları da artmaya devam edecek. Çeşitli görevleri yerine getirmek için tasarlanmış sayısız robot kol mekanizması vardır. Robot kol mekanizmaları genellikle büyük ölçekli ve hantal tasarımlara sahiptir (Vo-Duy ve Ta,2023). Her eksen için ayrı motor ve özel algılayıcı sistemler kullanılır. Bu sayede hassas, kontrol edilebilir ve hızlı tepki verebilirler. Ancak, kavramsal olarak mikro ölçekli bir robot kol mekanizması düşünüldüğünde motor ve algılayıcıların eklemlerde yer alması uygulanabilir değildir.

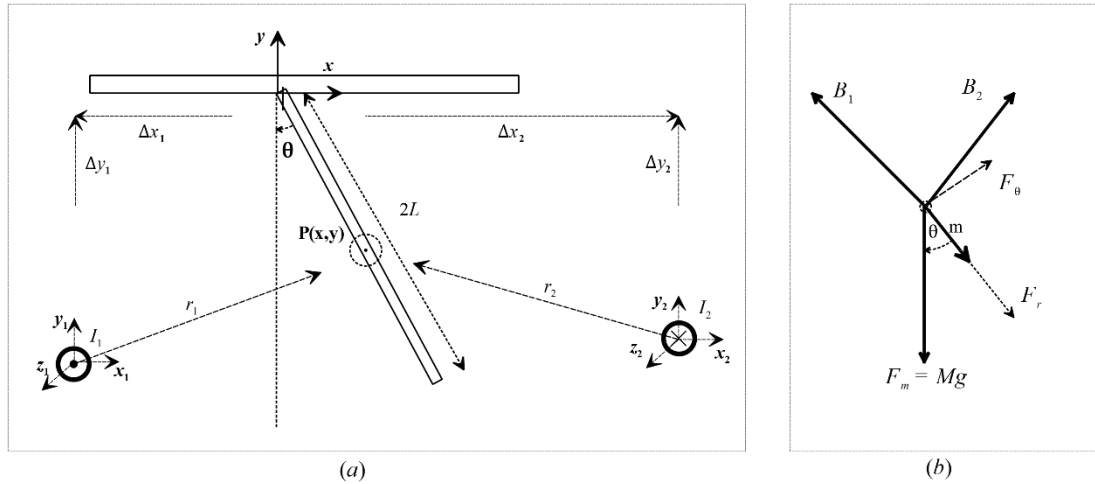
Robot kol hareketleri için manyetik alan veya ultrasonik titreşim ile doğrudan tahrik edilebilir tasarımlar zorunlu hale gelmektedir. Küçük boyutları ve dar çalışma alanları nedeni ile manyetik alanın oluşturduğu tork (τ) non-linear davranış gösterir. Basit, tek eksenli bir robot kol mekanizması (sarkaç) tasarlansa dahi, robot kolunun manyetik alan ile doğrudan kontrolü oldukça karmaşık ve doğrusal olmayan bir davranış gösterir.

Bu çalışmada, küçük ölçekli robot yapılarında kullanılmak üzere manyetik alanla çalışan tek eksenli bir robot kol mekanizmasının (sarkaç) geri beslemeli PID (Proportional Integral Derivative) kontrolü teorik olarak ele alınmıştır. Kavramsal tasarımı, matematik modeli ve bilgisayar destekli benzetimi yapılmıştır. İteratif metotlar ile PID katsayıları optimize edilmiş, farklı yol girişlerinde sistemin yapısı ve PID kontrolcü performansı incelenmiştir. İlk bölümde, literatür taraması ve genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümünde, problemin geometrik tanımlanması yapılmış olup, mekanik denklemler ve manyetik alan denklemleri sunulmuştur. Üçüncü bölümde, optimizasyon sonuçları ve benzetim sonuçları raporlanarak yorumlanmıştır. Dördüncü ve son bölümde, sonuçlar tartışılarak gelecekte yapılacak çalışmalar için tavsiyeler verilmiştir.

Çalışmamız, küçük ölçekli robot kol mekanizmalarının manyetik kontrolüne yönelik temel yapıları açıklamakta olup, elektromanyetik yapı, mekanik model ve kontrol sisteminin bir arada incelenmesi nedeni ile, henüz yeni çalışılmaya başlanan bu alanda, araştırmacılara derin ve geniş bir bilgi sunmaktadır. Bu nedenle çalışmamız, yeni araştırmalar ile genişletilerek gelecekte mini ve mikro ölçekli robot kol sistemlerinin tasarımı ve kontrolü alanlarında yol gösterici niteliktedir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Şekil 1a manyetik sarkaç sisteminin düzlemsel görünümünü vermektedir. $2L$ uzunluğunda sarkaç, x - y düzleminde dönme serbestliğine sahip olup y eksenine göre yaptığı açı θ 'dir. Sarkaç, manyettiktir. Sarkacın manyetik özelliği kütle merkezinde toplandığı kabul edilir ve manyetik dipol momenti \mathbf{m} ile temsil edilmektedir. Sarkacı kontrolü, $x_1y_1z_1$ ve $x_2y_2z_2$ noktalarına yerleştirilmiş olan sonsuz uzunlukta, çizgisel bobinler ile sağlanmaktadır. Bobinlerden I_1 ve I_2 akımları geçmektedir. M kütleli çubuk, koordinat merkezinden ($x=0, y=0$) dönme serbestliğine sahiptir. Çubuğun y eksenine göre yaptığı açı θ 'dir. Çubuğun, $(0,0)$ noktasına göre atalet momenti J dir.



Şekil 1. Problemin tanımı (a) Serbest cisim diyagramı (b) (Description of the problem (a) Free body diagram (b))

2.1. Manyetik etkilerin hesabı (Calculation of magnetic effects)

$$dB = \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \right) I_i \frac{dl \times \mathbf{r}}{r^2}$$

Cisme etki eden manyetik alanlar Biot Savart yasasından faydalanarak hesaplanır. Biot Savart yasası Eşitlik 1 ile verilmiştir.

$$d\mathbf{B}_i = \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \right) I_i \frac{dl \times \mathbf{r}_i}{r_i^2} \quad (1)$$

Burada, $d\mathbf{B}_i$; birim manyetik alan, dl ; birim uzunluk; \mathbf{r}_i ; çubuk merkezinden bobin merkezlerinde bulunan yerel koordinat eksenlerine göre konum vektörü (Eşitlik 2), μ_0 ($4\pi \times 10^{-7}$); boşluğun manyetik geçirgenlik katsayısı, I_i ; bobinlerden geçen akımları ifade etmektedir ($i=1,2$). $P(x, y)$ noktasında bulunan tek sargılı sonsuz uzunlukta ki telin oluşturduğu manyetik alan \mathbf{B}_i tel çevresi boyunda aynı büyüklüğe sahip olup, yalnızca \mathbf{e}_i bileşenine sahiptir (Eşitlik 3).

$$\mathbf{B}_i = \left(\frac{I_i \mu_0}{2\pi r_i} \right) \mathbf{e}_r \quad (2)$$

$$\mathbf{r}_i = (x - x_i)\mathbf{i} + (y - y_i)\mathbf{j} \quad (3)$$

$$\alpha_i = \frac{y - y_i}{x - x_i} \quad (4)$$

B_r^i ; manyetik alanın radyal doğrultuda ki bileşeni, α_i ; bobinin konum vektörünün x eksenine ile yaptığı açı, \mathbf{i} ve \mathbf{j} Kartezyen koordinatların birim vektörleri olmak üzere \mathbf{B}_i Kartezyen koordinatlarda Eşitlik 5 ile verilmiştir.

$$\mathbf{B}_i = B_r^i \sin(\alpha_i)\mathbf{i} + B_r^i \cos(\alpha_i)\mathbf{j} \quad (5)$$

Şekil 1b, cisme etki eden manyetik alanları ve kuvvetleri göstermektedir. Manyetik dipol momenti \mathbf{m}_i , silindirik ve Kartezyen koordinatlarda Eşitlik 6 ile verilmiştir.

$$\mathbf{m}_i = m_i \mathbf{e}_r = m_i \sin(\theta)\mathbf{i} - m_i \cos(\theta)\mathbf{j} \quad (6)$$

Bu durumda, $\boldsymbol{\tau}_i$; i. bobinin oluşturduğu döndürme momenti olmak üzere Eşitlik 7 ile hesaplanır.

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{m}_i \times \mathbf{B}_i \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\tau}_i = m_i (\sin(\theta)\mathbf{i} - \cos(\theta)\mathbf{j}) \times B_r^i (\sin(\alpha_i)\mathbf{i} + \cos(\alpha_i)\mathbf{j})$$

$$\boldsymbol{\tau}_i = m_i B_r^i (\sin(\theta)\cos(\alpha_i) + \sin(\alpha_i)\cos(\theta))\mathbf{k}$$

Gerekli matematiksel işlemler yapılır, yarım açı formüllerinden (Eşitlik 8) faydalanılır ise $\boldsymbol{\tau}_i$ en basit hali ile Eşitlik 9 kullanılarak hesaplanır.

$$\sin(A)\cos(B) = \frac{1}{2}(\sin(A+B) + \sin(A-B)) \quad (8)$$

$$\cos(A)\sin(B) = \frac{1}{2}(\sin(A+B) - \sin(A-B))$$

$$\boldsymbol{\tau}_i = \frac{m_i I_i \mu_0}{2\pi r_i} (\sin(\theta + \alpha_i))\mathbf{k} \quad (9)$$

2.2. Hareket denklemi (Equations of motion)

Cisme etki eden $\boldsymbol{\tau}_B$; cisme etki eden manyetik alanların oluşturduğu toplam moment, $\boldsymbol{\tau}_m$; mekanik kuvvetlerin oluşturduğu moment ve b yatak sürtünme katsayısı olmak üzere moment korunumu Eşitlik 10 ile verilmiştir.

$$\boldsymbol{\tau}_B + \boldsymbol{\tau}_m - b\dot{\theta} = J\ddot{\theta} \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\tau}_B = \boldsymbol{\tau}_1 + \boldsymbol{\tau}_2$$

$$\boldsymbol{\tau}_m = Mg \sin(\theta)$$

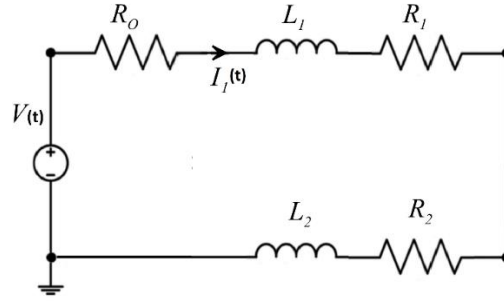
Eşitlik 10 düzenlenir ise manyetik sarkacın hareketini yöneten kısmi diferansiyel denklem elde edilir (Eşitlik 11). Eşitlik 11 ve Eşitlik 12 denklemlerinin birlikte çözümü sarkacın zamana bağlı davranışını vermektedir.

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{J} \left(\frac{m_1 I_1 \mu_0}{2\pi r_1} \sin(\theta + \alpha_1) + \frac{m_2 I_2 \mu_0}{2\pi r_2} (\sin(\theta + \alpha_2)) + Mg \sin(\theta) - b\dot{\theta} \right) \quad (11)$$

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} \quad (12)$$

2.3. Elektrik Devre Modeli (Electrical Circuit Model)

Ohm kanunu, Kirchhoff akım ve gerilim kanunları ve devre teoremleri elektrik devre analizlerinde kullanılan temel teoremlerdir. Ohm kanunu, bir devrede akan akımları belirlemek için Kirchhoff'un gerilim kanununun uygulamanın sistematik bir yöntemidir. Bu yöntemde, bir kapalı devre çevresinde, yükselen gerilimlerin düşen gerilimlere eşitliğinin yazılması ile ifade edilir. Metot devrede bulunan tüm kapalı çevrelere uygulanarak karmaşık devrelerin çözümlenmesini sağlar. Şekil 2'de $V(t)$ gerilim kaynağı (kontrol gerilimi), I_1 bobin döngü akımı, R_0 akım sınırlayıcı direnç, R_i ve L_i sarım eşdeğer direnci ve endüktansını ($i=1,2$) ifade etmektedir. 1 ve 2 numaralı bobinler seri olarak bağlanarak (ters kutuplanacak şekilde) manyetik etkiyi arttırması hedeflenmiştir.



Şekil 2. Elektrik devresi (Electrical circuit)

Devrede bulunan I_1 akımını çözümlmek için Kirchoff gerilim kanunu uygulanır. Şekil 2 ile verilen elektrik devresini temsil eden adi diferansiyel denklem Eşitlik 13 ile verilmiştir. Akımın zamana bağlı değişimini bulmak üzere Eşitlik 14'ün çözümü yapılması yeterli olacaktır. Birinci ve ikinci bobinler ters kutuplandığından oluşan akımları zıt olacaktır(Eşitlik 15).

$$-V(t) + (R_0 + R_1 + R_2)I_1(t) + (L_1 + L_2)\frac{dI_1(t)}{dt} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{dI_1(t)}{dt} = \frac{1}{(L_1 + L_2)}(V(t) - (R_0 + R_1 + R_2)I_1(t)) \quad (14)$$

$$I_2(t) = -I_1(t) \quad (15)$$

2.4. Kontrolcü tasarımı (Controller design)

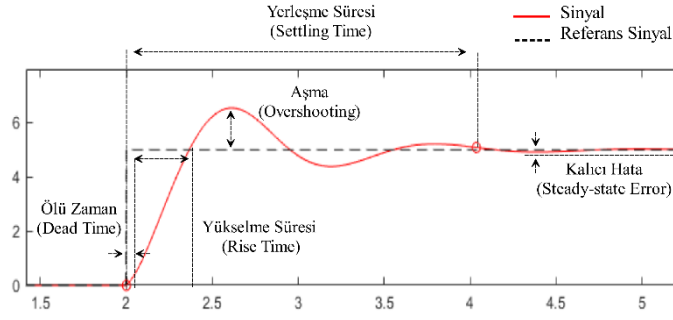
Mekanik sistemlerin kontrol yapıları için farklı türde kontrolcü tasarımları mevcuttur. PID kontrolcü, kullanım kolaylığı ve basit yapısı nedeni ile en yaygın ve olarak tercih edilen kontrol algoritmasıdır. Referans açı değeri θ_r ve sistemin mevcut açı değeri θ kullanılarak hata (e) Eşitlik 16 ile hesaplanır. Hata, hatanın türevi ve zamana bağlı olarak hatanın integrali farklı oranlarda hesaplara dahil edilerek kontrolcü çıkış gerilimi V hesaplanır (Eşitlik 17) (Yıldız vd., 2020; Yılmaz vd.,2012; Silva vd.,2023).

$$e = \theta_r - \theta \quad (16)$$

$$V = k_p e + k_d \frac{de}{dt} + k_i \int e dt \quad (17)$$

Burada, k_p ;oransal, k_i ;integral ve k_d ;türev kontrol katsayısı olarak tanımlanır ve kontrol sinyalinin karakteristiğini belirler. Kontrol katsayılarının belirlenmesinde genellikle Ziegler-Nichols metotları kullanılır. Ancak bazı durumlarda sistemin karakteristiği gereği katsayıları sistematik olarak tespit etmek mümkün olmayabilir. Bu durumda sezgisel olarak veya bir optimizasyon algoritması tarafından PID katsayıları tespit edilir. Bu çalışmada, PID parametreleri Shooting metodu kullanılarak optimize edilmiştir.

Şekil 3. Klasik bir PID kontrolcü çıkış sinyalinin basamak referans sinyaline karşı verdiği tepkiyi göstermektedir. Şekilde görüleceği üzere kontrolcü performansını veren beş temel parametre bulunur. Ölü zaman; sistemin ani değişimine tepki vermesi esnasında yaşanan gecikme. Yükselme Süresi; sistemin kararlı duruma çıkması için geçen süre. Aşma; gerçek sinyalin referans sinyalini aşma miktarı. Kalıcı hata; sistem kararlı hale geçtiğinde Referans sinyal ile gerçek sinyal arasında kalan fark. Yerleşme süresi; kontrol sinyalinin başlaması ile sistemin kararlı hale gelmesi arasında geçen süredir. Ziegler-Nichols metodunda olduğu gibi sadece oransal kontrolcü kullanıldığında bu parametrelerin tümü etkin olarak gözlenebilir. Ancak PID kontrolcü tüm bileşenleri ile sisteme uygulandığında Ölü zaman ve kalıcı hata genellikle ihmal edilecek kadar küçük olur. Ancak yükselme süresi, yerleşme süresi ve aşma önemli parametreler olarak kalmaya devam eder. Ayrıca Ortalama Kare Hata (Mean Squared Error (MSE)) ve Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error (MAE)) optimizasyon süreçlerinde genel hata parametresi olarak kullanılmaktadır (Yıldız vd.,2020).



Şekil 3. PID kontrolcü çıkış grafiği (PID controller output graph)

2.5. Shooting Yöntemi (Shooting Method)

Shooting metodu çeşitli matematik problemlerinde optimizasyon algoritması olarak kullanılır (Morrison vd.,1962; Osborne, 1969). Öncelikle optimize edilmek istenen parametreler için başlangıç değerleri tahmin edilir, probleme özgün kısıtlayıcı koşullar (integral, determinant veya denklem sistemi) hesaplanarak bilinen değerler ile kıyaslanır. Kıyaslama sonucunda elde edilen hata değerleri kullanılarak kısıtlayıcı koşulları sağlayan başlangıç değerleri tahmin edilmeye çalışılır. Bu işlemler tekrarlamalı (iteratif) olarak kısıtlayıcı koşullar istenilen hassasiyette sağlatılıncaya kadar devam edilir. Shooting metodunun daha ayrıntılı bir tartışması için referanslar (Al-Mdallal vd., 2010; Ha, 2001; Fang vd., 2023) farklı uygulama alanları için kapsamlı açıklama sunar.

x_m^r ; optimize edilmek istenen parametreler, $f_m^p(x_m^1, x_m^2, \dots, x_m^n)$ optimizasyon için gerekli kontrol fonksiyonları ($r=1,2,\dots,n$) olmak üzere, m ; iterasyon sayısı($1,2,\dots,\infty$), x_0^i ; tahmini başlangıç değer ve f_0^i ; bilinen amaç fonksiyonudur. Δx_m^r ; parametre artış oranı olmak üzere f_m^p fonksiyonunun x_m^r değişkenine göre kısmi türevlerinden ($\frac{\partial f_m^p}{\partial x_m^r}$) oluşan D matrisi Eşitlik 18 ile hesaplanır.

$$\frac{\partial f_m^p}{\partial x_m^r} = \frac{f_m^p(x_m^1, x_m^2, \dots, x_m^n) - f_m^p(x_m^1, x_m^2, \dots, x_m^n + \Delta x_m^r, \dots, x_m^n)}{\Delta x_m^r} \quad (18)$$

$$D = \frac{\partial f_m^p}{\partial x_m^r} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_m^1}{\partial x_m^1} & \frac{\partial f_m^1}{\partial x_m^2} & \frac{\partial f_m^1}{\partial x_m^3} \\ \frac{\partial f_m^2}{\partial x_m^1} & \frac{\partial f_m^2}{\partial x_m^2} & \frac{\partial f_m^2}{\partial x_m^3} \\ \frac{\partial f_m^3}{\partial x_m^1} & \frac{\partial f_m^3}{\partial x_m^2} & \frac{\partial f_m^3}{\partial x_m^3} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Amaç fonksiyonu ile fonksiyonun iterasyon değeri arasında ki fark df_m^p olmak üzere (Eşitlik 21-22) ile verilen lineer denklem sisteminin çözümü (Eşitlik 22) δX_m vektörünü verir. δX_m ; optimizasyon parametrelerinde yapılması gereken değişiklikler olarak tanımlanmaktadır.

$$\delta X_m = \begin{bmatrix} x_{m+1}^1 - x_m^1 \\ x_{m+1}^2 - x_m^2 \\ x_{m+1}^3 - x_m^3 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$df_m^p = F^p(x^1, x^2, \dots, x^n) - f_m^p(x_m^1, x_m^2, \dots, x_m^n) \quad (21)$$

$$\Gamma = df_m^p = \begin{bmatrix} df_m^1 \\ df_m^2 \\ df_m^3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$[D][\delta X] = [\Gamma] \quad (23)$$

x_{m+1}^r yeni iterasyon değeri olmak üzere Eşitlik 24 ile hesaplanır. Birden çok parametrelili sistemlerde parametrelerde ki değişiklikler sonucu beklenmedik şekilde etkileyebilir. Bu nedenle yeni iterasyon değeri hesaplanırken bir yaklaşım katsayısı dahil edilir. Eşitlik 24'te s yaklaşım katsayısı olarak bilinir ve 0-1 arasında bir değer alır.

$$[X_{m+1}] = [X_m] + s[\delta X_m] \quad (24)$$

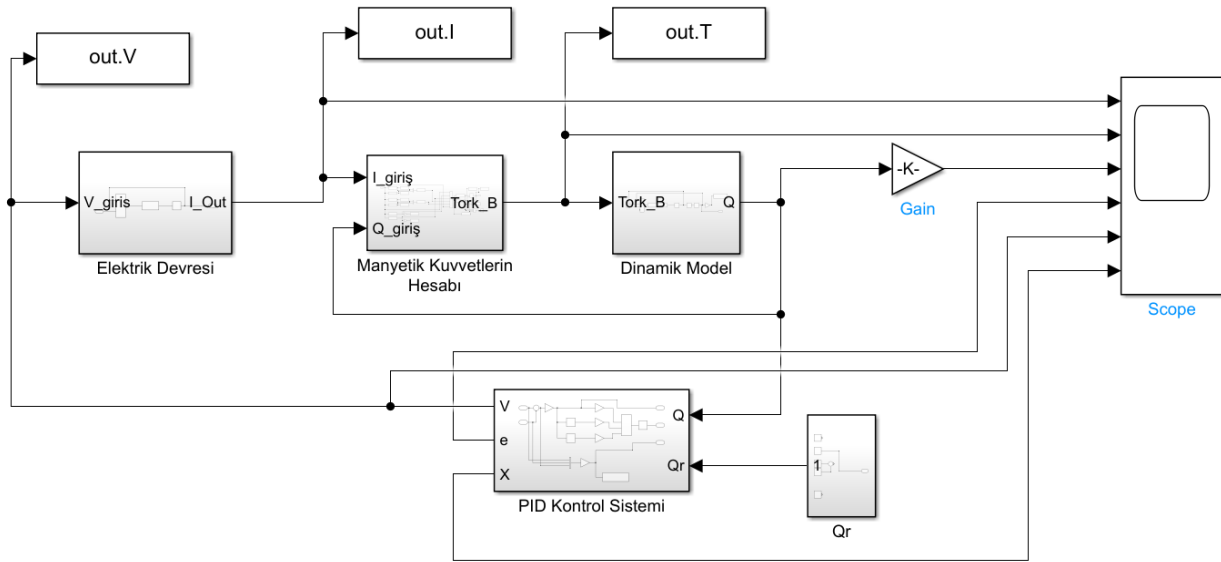
$$x_{m+1}^r = x_m^r + s\delta x_m^r$$

Çalışmada k_p , k_d ve k_i parametrelerini optimize etmek üzere aşma, yerleşme süresi ve ortalama mutlak hata (MAE) kısıtlayıcı fonksiyonlar olarak seçilmiştir. y_n ve \bar{y}_n sırası ile gerçek ve referans veriler olmak üzere 3060 örnek veri (T) kullanılarak MAE Eşitlik 25 ile hesaplanmaktadır.

$$MAE = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^T |y_n - \bar{y}_n| \quad (25)$$

3. Benzetim çalışmaları ve sonuçlar (Simulations and results)

Şekil 4'te benzetim programının matlab simulink ara yüzü görünümü verilmiştir. Program dört bileşenden oluşan bir yapıdan oluşmaktadır. Elektrik Devresi; bobinlerin elektrik devre benzetimini çözümüyle giriş geriliminden anlık olarak çıkış akımını hesaplamaktadır. Manyetik kuvvetlerin hesabı, üretilen akıma bağlı olarak her iki telin manyetik sarkaç ile etkileşimini hesaplayarak üretilen manyetik tork değerini hesaplamaktadır. Dinamik model, zamana ve oluşan manyetik torka bağlı olarak sarkacın konumunu ve açısını hesaplamaktadır. Dinamik modelden elde edilen açılal değer referans açısı ile birlikte PID kontrol sistemini besler. Burada önceden tanımlanan katsayılar dikkate alınarak gerilim çıkışı hesaplanır ve tekrar elektrik devresi bloğuna giriş olarak verilir.



Şekil 4. Matlab simulink blok gösterimi (Matlab simulink block representation)

Benzetim çalışmalarında kullanılan fiziksel büyüklükler ve değerleri Tablo 1 ile verilmiştir. Benzetimler 20s boyunca 0.0033s sabit adımla gerçekleştirilmiş olup, integrasyon işlemleri için matlab kütüphanelerinde yer alan 4. derece Runge-Kutta metodu kullanılmıştır.

Tablo 1. Fiziksel büyüklükler (Physical parameters)

Sembol	Değer	Birim	Açıklama
L	0,0185	m	Manyetik çubuk uzunluğunun yarısı
m	0,15	Am ²	Manyetik dipol momentini
V _{max}	12	V	Uygulanabilir en yüksek gerilim
L ₁ = L ₂	1,0e-03	H	Bobin tellerinin öz indüktansı
R	0,5	Ω	Sistemin toplam direnci
Dx ₁	-5 e-03	m	1. bobinin x koordinatı
Dx ₂	5 e-03	m	2. bobinin x koordinatı
b	5 e-06	N.m.s/rad	Sürtünme kuvveti
μ ₀	4π e-07	H/m	Boşluğun manyetik geçirgenliği

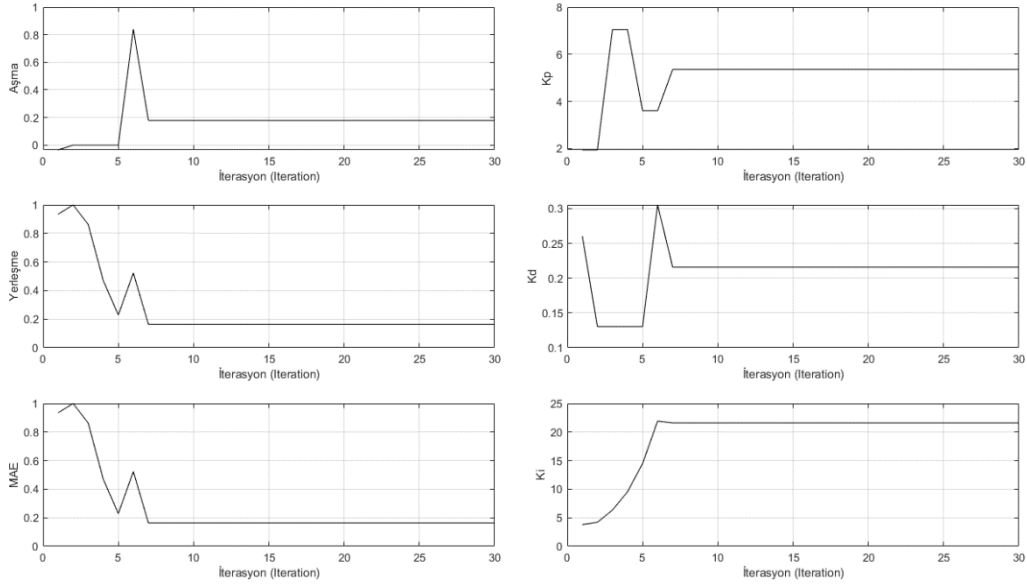
3.1. PID katsayılarının optimizasyonu (Optimization of PID coefficients)

Optimizasyon için ikinci saniyede sisteme $Q_{max} = 10^\circ$ olacak şekilde basamak girişi uygulanmıştır. Başlangıçta $k_p=0,48$, $k_d= 0,0105$, $d_i=3,787$ olarak seçilmiştir. İterasyon yaklaşma oranı $s=0,5$ olarak alınmıştır. İlk 10 iterasyon için sayısal değerler Tablo 2 ile verilmiştir. En fazla 30 iterasyon için çalıştırılan optimizasyon algoritması ile elde edilen sonuçlar Şekil 5'te gösterilmiştir. İterasyon algoritması yedinci iterasyondan sonra en düşük hata değerlerine ulaşmıştır. En iyi sonuçlara ulaşıldığında aşma, yerleşme ve MAE hataları sırası ile $-0,1788^\circ$,

0,1634s ve 0,02979° olarak elde edilmiştir. Ulaşılan PID parametreleri ise $k_p=5,353$, $k_d=0,2157$ ve $k_i=21,5987$ 'dir (Tablo 1).

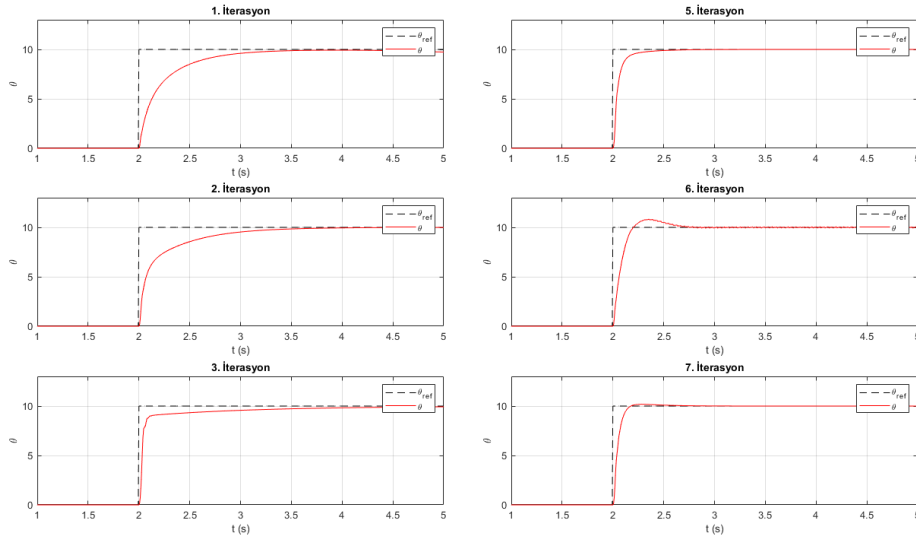
Tablo 2. Parametre ve hata tablosu (Parameters and error table)

İterasyon	k_p	k_d	k_i	Aşma (°)	Yerleşme Süresi (s)	MAE (°)
1	1,9373	0,2605	3,7923	-0,0348	0,9346	0,1789
2	1,9373	0,1304	4,2031	0,0000	1,0000	0,1145
3	7,0467	0,1304	6,3353	0,0000	0,8627	0,0763
4	7,0467	0,1304	9,5330	0,0000	0,4706	0,0511
5	3,6020	0,1304	14,4720	0,0000	0,2288	0,0340
6	3,6020	0,3054	21,9091	0,8402	0,5229	0,0776
7	5,3531	0,2158	21,5987	0,1787	0,1634	0,0298
8	5,3531	0,2158	21,5987	0,1787	0,1634	0,0298
9	5,3531	0,2158	21,5987	0,1787	0,1634	0,0298
10	5,3531	0,2158	21,5987	0,1787	0,1634	0,0298



Şekil 5. PID parametrelerinin iterasyon ile değişimi (Variation of PID parameters with iteration)

Şekil 6 ile farklı iterasyon değerleri için zamana bağlı olarak sarkacın açılma değişimi verilmiştir. İlk iterasyon için yerleşme süresi 2s iken, üçüncü iterasyonda hızla 0.5s'nin altına inmektedir. İterasyon değerleri arttıkça sistem aşma değerini de azaltmakta, aynı zamanda ortalama kare hata değeri de en düşük seviyede olacak şekilde onuncu iterasyonda kararlı hale gelmektedir.



Şekil 6. Farklı iterasyon değerlerinde açılma değişimi (Angular response at different iteration values)

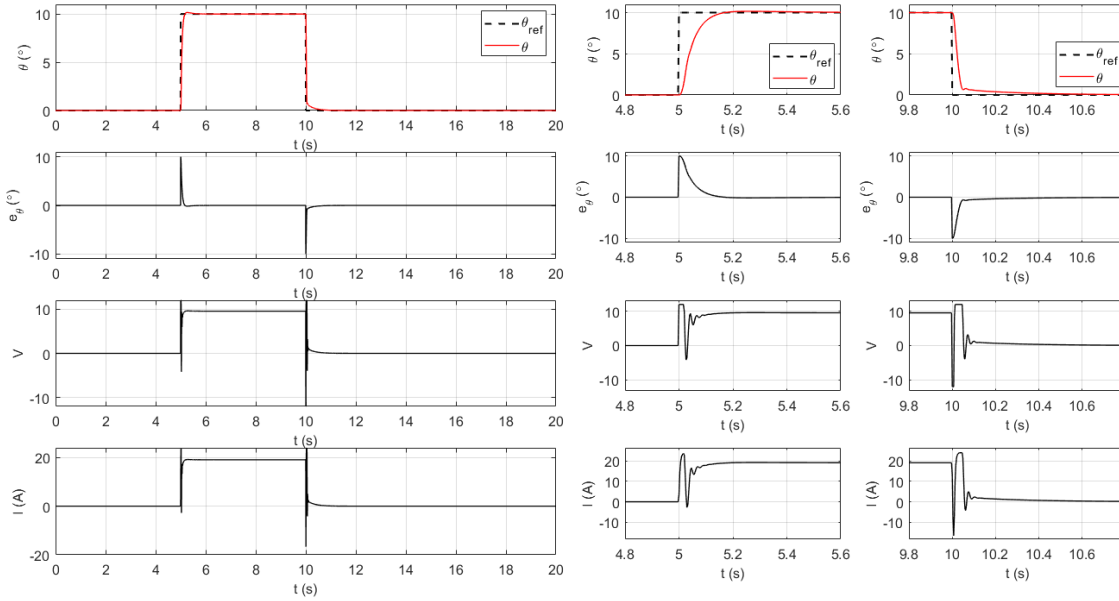
3.2. Yol takibi sonuçları (Path tracking results)

Optimizasyon sonucu elde edilen PID katsayıları kullanılarak sistemin farklı referans sinyali şekillerine verdiği tepkiler incelenmiştir. Öncelikle tek ve çift basamak sinyali uygulanarak sistemin ani hata değişimlerinde davranışı, üçgen ve sinüs formunda sinyaller ile sürekli değişen sinyallere tepkisi gözlemlenmiştir. Tablo 3, sinyal formları ve hata analizi sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 3. Farklı referans formlarında hata analizi (Error analysis on different reference forms)

	Basamak formu		Üçgen formu			Sinüs formu		
	Tek	Çift	p=20s	p=4s	p=2s	p=20s	p=4s	p=2s
MAE (°)	0,0506	0,0570	0,0848	0,4030	0,7063	0,0842	0,4166	0,7623
MSE(°)	0,2582	0,1268	0,0098	0,2162	0,6399	0,0139	0,2883	0,8213
e_{max} (°)	10,0000	5,0000	0,1628	0,7252	1,2002	0,2521	1,0065	1,5273

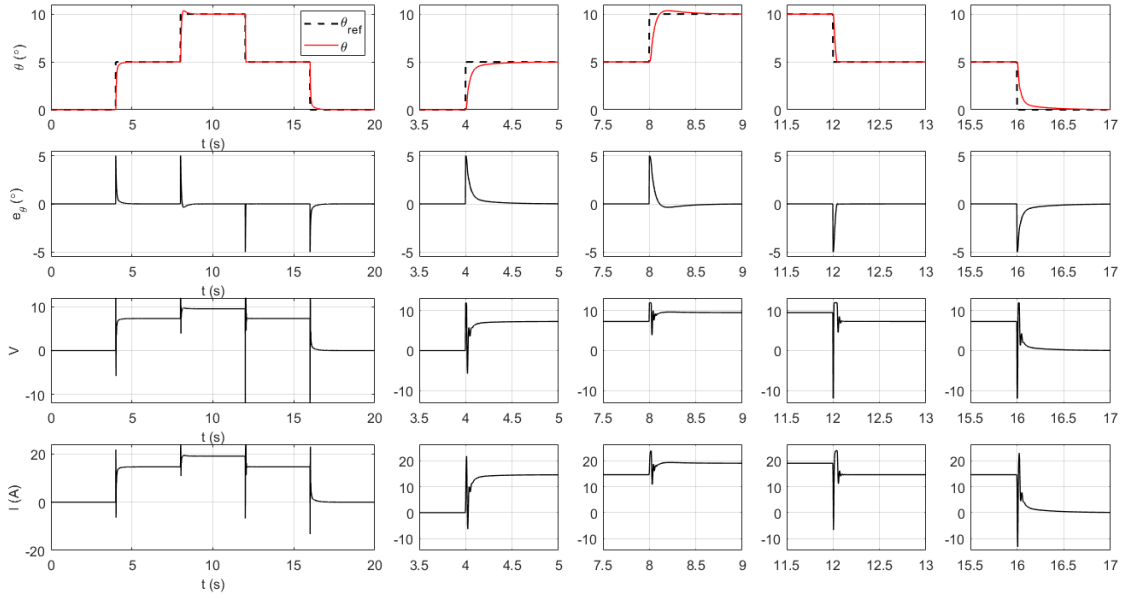
Şekil 7, 5s ile 10 s aralığında $Q_{ref} = 10^\circ$ basamak sinyalinde sistemin çalışmasını göstermektedir. Sinyal girişinde sistemin kararlı hale geçmesi 0.2s sürmektedir. Sistemin ortalama mutlak hata (MAE) değeri $0,0506^\circ$ 'dır. Hata ani değiştiğinden ilk sinyal girişinde en yüksek hata oluşmaktadır. Hatanın bir başka ölçütü de ortalama kare hata (MSE) ise $0,258^\circ$ olarak hesaplanmıştır. İlk hata girişlerinde sistem en yüksek gerilim (12V) sinyal üretmekte, kısa süre içinde gerilim 10V olarak kalıcı hale gelmekte. Sinyal çıkışında ise ani değişimden dolayı -12V sinyal üretilmekte, sistem dengeye geldiğinde sinyal çıkışı kapatılmaktadır.



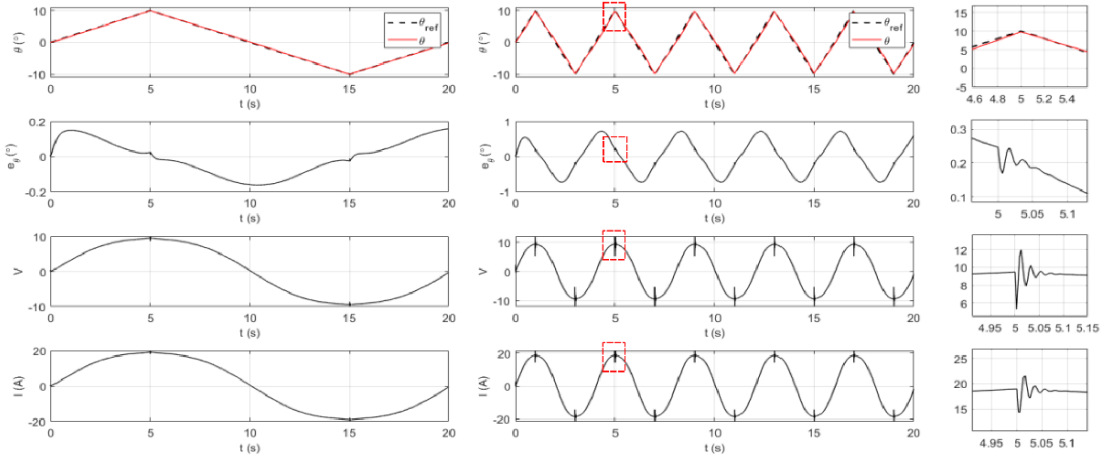
Şekil 7. Tek basamaklı sinyal sonuçları (Single-step reference signal results)

Şekil 8, 4s aralıklar ile değişen iki kademeli basamak sinyali sonuçlarını vermektedir. Kademenin artması ile referans genliği düştüğünden kontrolcünün hata değerlerinin de düştüğü gözlemlenmiştir. MAE değeri $0,0570^\circ$ iken MSE değeri $0,1268^\circ$ 'dir. Referansın aniden değiştiği köşe bölgelerinde sistemin daimi rejime ulaşmak için geçmesi gereken süre artmıştır.

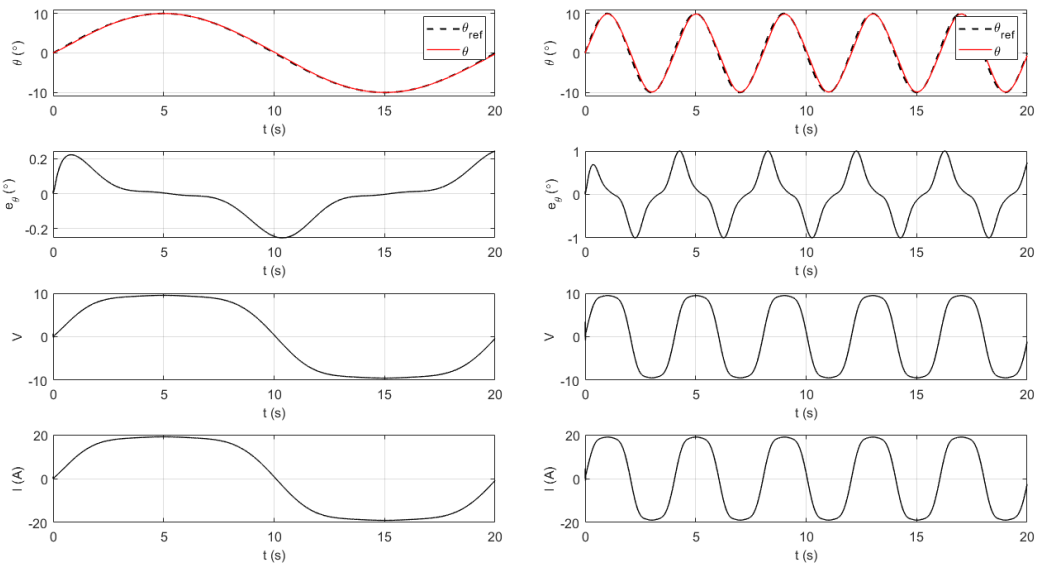
Şekil 9 ve Şekil 10, periyodu 20s ve 4s olan iki farklı referans sinyal sonuçlarını göstermektedir. Sistemin her iki periyotta oluşturulan sinyaller içinde kontrolü oldukça iyidir. En yüksek hatalar üçgen form için sırası ile $0,1628^\circ$ ve $0,4030^\circ$, sinüzoidal form için ise $0,0842^\circ$ ve $0,4166^\circ$ 'dir. En yüksek hatalar $Q_{ref} = 0^\circ$ dolaylarındadır. Bu durumun en temel nedeni buralarda kontrolcü gerilimlerinin 0 olması ve sistemin hatayı sıfırlaması nedeni ile kendini kapatmasıdır. Bir diğer sebep ise 0 noktasının bobinlere en uzak nokta olmasıdır. Bu bölgede oluşan manyetik alanlar diğer bölgelere oranla daha küçüktür. Bunun yanında periyot küçüldükçe sistemin hatası artmakta, kontrol kabiliyeti azalmaktadır. Her iki grafik incelendiğinde üçgen formda sinyallerin, sinüzoidal sinyale göre daha iyi takip edildiği görülmektedir. Sinüzoidal dalga formunda oluşan en yüksek hata, üçgen formunda dalgaya göre ortalama %28.2 oranında daha büyüktür (Tablo 3).



Şekil 8. Çift basamaklı referans sinyal sonuçları (Double-step reference signal results)



Şekil 9. Üçgen dalga formunda referans sinyal sonuçları (Reference signal results in triangular waveform)



Şekil 10. Sinüs dalga formunda referans sinyal sonuçları (Reference signal results in sine waveform)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Sağlık ve biyomedikal cihaz teknolojileri günümüzün en önemli konuları arasında yer almaktadır. Son yıllarda teknolojiye yaşanan gelişmeler ile birlikte, mikro ve makro ölçekli robotik sistemlerin ilaç dozajlama, hücre ve DNA dizilimi oluşturma, görüntüleme ve bölgesel müdahale sistemi olarak geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Çalışmada makro ölçekte manipülatör olarak kullanılması planlanan tek kollu bir robot kol (sarkaç) modeli önerilmiştir. Robot kolun kontrolünün, sonsuz uzunlukta bobin telleri kullanılarak yapılabileceği gösterilmiştir. Sistemin elektriksel modeli, mekanik modeli ve kontrol yapısı detaylı olarak açıklanmıştır. Her ne kadar basit bir yapıya sahip olsa da doğrudan manyetik kuvvet ile kontrol edilecek olması, küçük kuvvetler ile hareket sağlanıyor olması nedeni ile non-lineer bir model olduğu açıktır (Eşitlik 10-12). Elektrik modelin (Eşitlik 13-15) de non-lineer olduğu göz önünde bulundurulur ise matematik yapısı oldukça karmaşıktır. Elektrik ve manyetik sistemi yöneten denklem sistemleri MatLab simulink ara yüzü kullanılarak modellenmiştir. Manipülatör kontrol yapısı aç referansı dikkate alınarak PID kontrolcü tasarımı yapılmıştır. PID parametrelerinin belirlenmesi için Ziegler-Nichols metotları uygulanmıştır. Ancak sistemin doğrusal olmayan yapısı nedeni ile yalnızca oransal kontrolcü uygulandığında sistem çok hızlı kararsız hale geçtiğinden uygun kontrolcü parametrelerine ulaşamamıştır. Uygun kontrolcü parametrelerinin tespiti için, 10° basamak referans girdisi uygulanan sistem, iteratif optimizasyon tekniklerinden shooting metodu kullanılarak analiz edilmiştir. İterasyon algoritması 7. iterasyondan sonra en düşük hata değerlerine ulaşmıştır. En iyi sonuçlara ulaşıldığında aşma, yerleşme ve MAE hataları sırası ile $-0,1788^\circ$, $0,1634s$ ve $0,02979^\circ$ olarak elde edilmiştir. Ulaşılan PID parametreleri ise $k_p=5,353$, $k_i=0,2157$ ve $k_d=21,5987$ 'dir (Tablo 1). Elde edilen kontrol parametreleri kullanılarak kontrolcünün farklı referans sinyali altında (basamak, üçgen ve sinüzoidal) davranışı incelenmiştir. Sistemde oluşan hata değerleri, kontrolcü gerilim çıkışı ve devre akımı davranışları Şekil 7-10 ile verilmiştir. Sistemin basamak sinyal girişine tepkisinin hızlı ve kararlı olduğu görülmüştür. Ani yüklemelerde hızla hatayı düşürerek istikrarlı hale gelmektedir. Üçgen ve sinüzoidal formda sinyaller sürekli yük oluşturmaktadır. Oluşturulan kontrol algoritmasının yüksek periyotlarda kontrolcü performansının iyi olduğunu, ancak frekans yükseldikçe hata oranında kayda değer büyümeler olduğunu göstermiştir (Tablo 3).

Sonuç olarak çalışma, küçük ölçekli bir robot kol mekanizmasının yalnızca paralel iki tel kullanılarak kontrol edilebileceğini göstermiştir. Bu durum robot kol mekanizmalarının mikro ölçekli kullanılabileceklerinin bir göstergesi olarak kabul edilebilir. Her ne kadar düşük frekanslı uygulamalarda PID kontrolcünün iyi sonuç verdiği görülse de kaotik yapısı nedeni ile, frekans yükseldiğinde bulanık mantık kontrolü (fuzzy logic control) ve kayan kipli kontrol (sliding mode control) metotlarının uygulanması daha iyi sonuçlar verebilir. Çalışma, yeni araştırmalar ile genişletilerek gelecekte mini ve mikro ölçekli robot kol sistemlerinin tasarımı ve kontrolü konusunda yol gösterici niteliktedir. Farklı kontrol metotlarının uygulanmasının yanında, çok kollu robot kol mekanizması olarak tasarımlar da geliştirilerek daha kararlı ve fiziksel kullanıma uygun yapılar elde edilmesi mümkün olabilir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmanın hazırlanması ve hesaplamalarının yapılmasında desteklerini esirgemeyen ve yanımda olan sayın Prof. Dr. Erol Uzal ve değerli çalışma arkadaşım Dr. Serdar Yılmaz'a teşekkürlerimi sunarım.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.
No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Alba, E., Dorronsoro, B., 2005. The Exploration/Exploitation Tradeoff in Dynamic Cellular Genetic Algorithms. IEEE, Transactions on Evolutionary Computation, 9, 26-142. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2005.843751>
- Altinel, İ.K., Öncan, T., 2005. A New Enhancement of the Clarke and Wright Savings Heuristic for the Capacitated Vehicle Routing Problem. Journal of the Operational Research Society, 56 (8), 954-961. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601916>
- Goldberg, D., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Reading, Boston, MA: Addison-Wesley Professional.
- Jaszkiewicz, A., Ishibuchi, H., Zhang, Q., 2012. Multiobjective Memetic Algorithms. F. Neri, C. Cotta, P. Moscato (Edt.), Handbook of Memetic Algorithms, içinde (s. 201-217). Berlin: Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

- Zhang, H., Liu, B., 2009. A New Genetic Algorithm for Order-Picking of Irregular Warehouse. *International Conference on Environmental Science and Information Application Technology*, 1, 121-124. <https://doi.org/10.1109/ESIAT.2009.131>
- Abbes, M., Belharet, K., Souissi, M., Mekki, H., & Poisson, G., 2023. Design of a Robotized Magnetic Platform for Targeted Drug Delivery in the Cochlea. *IRBM*, 44(1), 100728. <https://doi.org/10.1016/j.irbm.2022.06.003>
- Al-Mdallal, Q. M., Syam, M. I., & Anwar, M. N., 2010. A collocation-shooting method for solving fractional boundary value problems. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 15(12), 3814-3822. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2010.01.020>
- Zheng, B., Li, C. Y., Huang, S., Zhang, Z. L., Wu, Q. S., Pang, D. W., & Tang, H. W., 2022. Optical tweezers assisted analyzing and sorting of tumor cells tagged with fluorescence nanospheres in a microfluidic chip, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 368, 2022, 132173, ISSN 0925-4005, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.132173>.
- Ceylan, H., Giltinan, J., Kozielski, K., & Sitti, M., 2017. Mobile microrobots for bioengineering applications. *Lab on a Chip*, 17(10), 1705-1724. <https://doi.org/10.1039/C7LC00064B>
- Fang, L., Vandewalle, S., & Meyers, J., 2023. An SQP-based multiple shooting algorithm for large-scale PDE-constrained optimal control problems. *Journal of Computational Physics*, 477, 111927. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2023.111927>
- Ha, S. N., 2001. A nonlinear shooting method for two-point boundary value problems. *Computers & Mathematics with Applications*, 42(10-11), 1411-1420. [https://doi.org/10.1016/S0898-1221\(01\)00250-4](https://doi.org/10.1016/S0898-1221(01)00250-4)
- He, C.-H., Amer, T. S., Tian, D., Abolila, A. F., & Galal, A. A., 2022. Controlling the kinematics of a spring-pendulum system using an energy harvesting device. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 41(3), 1234-1257. <https://doi.org/10.1177/14613484221077474>
- Jia, Y., Zhu, Z., Jing, X., Lin, J., & Lu, M., 2023. Fabrication and performance evaluation of magnetically driven double curved conical ribbon micro-helical robot. *Materials & Design*, 226, 111651. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111651>
- Koleoso, M., Feng, X., Xue, Y., Li, Q., Munshi, T., & Chen, X., 2020. Micro/nanoscale magnetic robots for biomedical applications. *Materials Today Bio*, 8, 100085. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2020.100085>
- Lu, Y., Li, L., Hu, N., Pan, Y., & Ren, C., 2015. Measurement Method of Magnetic Field for the Wire Suspended Micro-Pendulum Accelerometer. *Sensors*, 15(4), 8527-8539. <https://doi.org/10.3390/s150408527>
- Magdanz, V., Khalil, I. S. M., Simmchen, J., Furtado, G. P., Mohanty, S., Gebauer, J., Xu, H., Klingner, A., Aziz, A., Medina-Sánchez, M., Schmidt, O. G., & Misra, S., 2020. IRONSperm: Sperm-templated soft magnetic microrobots. *Science Advances*, 6(28), eaba5855. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba5855>
- Mashimo, T., & Oba, Y., 2022. Performance improvement of micro-ultrasonic motors using the thickness shear mode piezoelectric elements. *Sensors and Actuators A: Physical*, 335, 113347. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.113347>
- Morrison, D. D., Riley, J. D., & Zancanaro, J. F., 1962. Multiple shooting method for two-point boundary value problems. *Communications of the ACM*, 5(12), 613-614. <https://doi.org/10.1145/355580.369128>
- Nana, B., Yamgoué, S. B., Tchitnga, R., & Wofo, P., 2017. Dynamics of a pendulum driven by a DC motor and magnetically controlled. *Chaos, Solitons & Fractals*, 104, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2017.07.027>
- Osborne, M. R., 1969. On shooting methods for boundary value problems. *Journal of mathematical analysis and applications*, 27(2), 417-433.
- Özbey, A. Uzal, E. Yıldız, H. Mutlu, A., 2014. Control of a Robot Arm Using Magnetic Forces. *Numerical Methods for scientific Computations and Advanced applications*, Bansko, Bulgaria.
- Silva, F., Batista, J., Souza, D., Lima, A., Dos Reis, L., & Barbosa, A., 2023. Control and identification of parameters of a joint of a manipulator based on PID, PID 2-DOF, and least squares. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(6), 327. <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04251-5>.
- Vo-Duy, T., & Ta, M. C., 2023. Fundamental design of electric motor control systems. *Çinde Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering* (ss. 428-453). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821204-2.00054-4>
- Yang, W., Wang, Z., Wang, X., Chen, Y., Ge, Z., & Yu, H., 2023. Bio-inspired propeller robot with controllable pitch driven by magnetic and optical coupling field. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 382, 133509. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133509>
- Yang, Y., Wang, H., 2013, Perspectives of nanotechnology in minimally invasive therapy of breast cancer, *J. Healthc. Eng.*, 4 (1) (2013), pp. 67-86, 10.1260/2040-2295.4.1.67. <https://doi.org/10.1260/2040-2295.4.1.67>
- Yildiz, H., Korkmaz Can, N., Ozguney, O. C., & Yagiz, N., 2020. Sliding mode control of a line following robot. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(11), 561. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02645-3>
- Yilmaz, S., Toker, O., Arslan, N., & Sedef, H., 2012. Optimal in vitro realization of pulsatile coronary artery flow waveforms using closed-loop feedback algorithms with multiple flow control devices. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 20(6), 1006-1030. <https://doi.org/10.3906/elk-1101-1024>