

Helmholtz Bobinlerinin Elektromanyetik Alan Simülasyonu ve Optimizasyonu

Ferdi AVCI^{*1}, Emin AĞRALI¹, Orhan YAMAN², Mehmet ÇAVAŞ³

^{*1} Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, MUŞ

² Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Adli Bilişim Mühendisliği, ELAZIĞ

³ Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektronik Sistemleri, ELAZIĞ

(Alınış / Received: 07.03.2025, Kabul / Accepted: 20.08.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2025)

Anahtar Kelimeler

Elektromanyetik Alan,
Alternatif Akım,
Helmholtz Bobini,
Optimizasyon.

Öz: Elektromanyetik (EMF) girişim testleri, biyomedikal deneyler, fizik deneyleri gibi birçok alanda helmholtz bobinleri kullanılmaktadır. Kullanım sebebi ise düzgün elektromanyetik alan üretmeleridir. Bu çalışmanın amacı ve yapılmasındaki sebep, AC akımda EMF üretiminde istenilen değerde sapmalar olmaktadır. Bunu minimum seviyeye çekmektir. Bu çalışmada alternatif akımda, 0-20 mT aralığında çalışan, EMF üretici için helmholtz bobininin EMF hesaplamasında kullanılan formüller Matlab&Simulink programında modellenmiştir. Helmholtz bobininin yarıçapı ise 15 cm olarak tercih edilmiştir. Her bobinin sarım sayısı 16 sipir olarak kabul edilmiştir. Girişe verilen EMF değeri PID(Oransal-İntegral-Türevsel) kontrolör ile kontrolü sağlanmıştır. PID parametrelerini belirlemek için ISSA (Geliştirilmiş Salp Swam Algoritması), PID Tuner ve KKO (Karıncı Kolonisi Optimizasyonu) optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Optimizasyon yöntemlerinde kriter olarak ITAE (zaman ağırlıklı mutlak hatanın integrali) kullanılmıştır. Katsayılar belirlendikten sonra hata değişimleri grafiksel ve sayısal değerler olarak verilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, kesinlik oranının belirlendiği maksimum mutlak hata açısından 14.33941 değeri ile en fazla PID Tuner algoritmasında görülmektedir. Bu değerler ISSA için 2.83468 ve KKO için 3.11548 'dir. Minimum mutlak hata açısından bakıldığında ISSA 0.00525, KKO 0.02910 ve PID Tuner 0.00957 değerlerini vermektedir. Bu da teorik olarak doğru sonuçlara en yakın ulaşabilme sırası olarak ISSA, PID Tuner ve KKO olduğu görülmektedir. Ortalama mutlak hata açısından ise ISSA ve KKO algoritmaları birbirine çok yakın sonuçlar vermiştir. Ancak PID Tuner'ın ortalama mutlak hatası 8.33857 değeri ile oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Standart sapma değeri ise sonuçların ne kadar değişken olduğunu belirlemek için standart sapma değerlerine bakıldığında 0.82063 ve 0.91168 değerleri ile ISSA ve KKO algoritmalarının standart sapmaları, 4.20332 değerine sahip PID Tuner'a göre oldukça düşük olduğu görülmektedir. Genel olarak, ISSA ve KKO algoritmaları daha tutarlı ve düşük hata değerleri ile daha iyi bir performans sergilemektedir. PID Tuner ise, ISSA ve KKO algoritmalarına göre daha yüksek hata değerleri ile düşük bir performans göstermektedir. Ancak çalışmanın uygulaması yapılarak verilen ifadelerin gerçek değerleri ile birlikte incelenmesi gerekmektedir. Helmholtz bobinleri kullanılan EMF üreteçlerin kontrolünde KKO ve ISSA algoritmasının kullanılması, üreticinin hassasiyetini arttıracak düşünülmektedir. Aynı zamanda enerji tüketiminin azalacağı kanısına varılmıştır. Farklı sistemlerin PID kontrolörünün katsayıları belirlenirken, ISSA ve KKO kullanılarak sistemde oluşan hataların minimize edilebileceği ve sistemin daha verimli çalışabileceği düşünülmektedir.

Electromagnetic Field Simulation and Optimization of Helmholtz Coils

Keywords

Electromagnetic Field,
Alternating Current,

Abstract: Helmholtz coils are used in many fields, including electromagnetic (EMF) testing experiments, biomedical experiments, and physics experiments. They are

Helmholtz Coil, Optimization.

used by those who produce non-uniform products. The purpose and reason for this study is to minimize deviations from the desired EMF value in AC current generation. The formulas used in programming the Helmholtz coil for this effective alternating current, operating between 0 and 20 mT, were modeled in Matlab and Simulink. The radius of the Helmholtz coil was chosen to be 15 cm. The number of turns in each coil is assumed to be 16. The input EMF value is controlled by a PID (Proportional-Integral-Derivative) controller. The ISSA (Improved Salp Swarm Algorithm), PID Tuner, and KKO (Ant Colony Optimization) optimization algorithms were used to determine the PID parameters. ITAE (Time-Weighted Absolute Error Integral) was used as a criterion in the optimization methods. After determining the coefficients, error changes are presented graphically and numerically. When we look at the results obtained, the PID Tuner algorithm has the highest maximum absolute error, with a value of 14.33941, which determines the accuracy rate. These values are 2.83468 for ISSA and 3.11548 for ACO. In terms of minimum absolute error, ISSA gives values of 0.00525, ACO 0.02910, and PID Tuner 0.00957. This shows that ISSA, PID Tuner, and ACO are theoretically the closest to achieving accurate results. In terms of mean absolute error, the ISSA and ACO algorithms yielded very similar results. However, the mean absolute error of the PID Tuner is quite high, with a value of 8.33857. When the standard deviation values are examined to determine how variable the results are, it is seen that the standard deviations of the ISSA and ACO algorithms with the values of 0.82063 and 0.91168 are quite low compared to the PID Tuner with the value of 4.20332. Generally, the ISSA and KKO algorithms exhibit better performance with more consistency and lower error values. The PID Tuner, on the other hand, exhibits lower performance with higher error values than the ISSA and KKO algorithms. However, the study should be applied to examine the given expressions with their actual values. It is believed that using the KKO and ISSA algorithms in controlling EMF generators using Helmholtz coils will increase the sensitivity of the generator. It is also believed that energy consumption will be reduced. When determining the PID controller coefficients of different systems, it is believed that using ISSA and KKO can minimize system errors and increase system efficiency.

*İlgili Yazar, email: f.avci@alparslan.edu.tr

1. Giriş

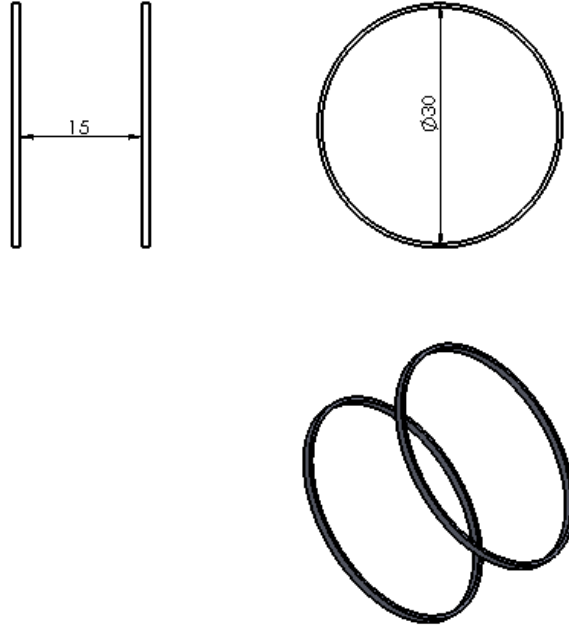
Modern endüstri tesislerinde elektromanyetik girişim testleri, biyomedikal deneyler, fizik deneyleri gibi birçok alanda helmholtz bobinleri kullanılmaktadır. Kullanım sebebi ise düzgün elektromanyetik alan (EMF) üretmeleridir [1].

Elektrik ve manyetik alanlardan oluşan EMF incelendiğinde, elektrik ve manyetik alan birbirlerine dik olup, sinüzoidal dalga şeklinde hareket etmektedirler.

Elektrik yüklerinin varlığı ile oluşan elektrik alanının ölçü birimi Volt/metre 'dir. Çalıştırılmazsa da prize takılı olan bir cihaz elektrik alanı oluşturmaktadır. Yalıtkan maddeler ile engellenebilen elektrik alanı, kaynaktan uzaklaştıkça şiddeti azalır. Elektrik yüklerinin iletkende yer değiştirmesi ile oluşan akım ile doğru orantılı olarak manyetik alan oluşmaktadır. Manyetik alanın ya da manyetik akının birimi Tesla (T) 'dır (1 T =10.000 Gauss). Manyetik alan ise yalıtkan malzeme kullanılarak elektrik alan gibi engellenememektedir [2].

Helmholtz bobininin kullanım amacı, düzgün homojen bir manyetik alan elde etmektir [3]. Helmholtz bobininin yapısına bakıldığında, genel olarak iki adet R yarıçaplı nüvesiz (çekirdeksiz) bobinin seri bağlanması ile elde edilmektedir. Helmholtz bobininin konumu öneme sahip olup birbirine paralel ve aralarında yarıçap değeri kadar mesafe olmalıdır. Bu şekilde oluşturulan sistemler Helmholtz bobini olarak isimlendirilmektedir [4].

Bu sistemler dikey veya yatay şekilde konumlandırılabilir. Biot-Savart yasasında, R yarıçaplı dairesel bir telden I akım geçince, x mesafe uzaklıkta bir manyetik alan oluşur. Helmholtz bobininin şematik gösterimi için ölçülendirilmiş olarak teknik çizimi Şekil 1’de gösterilmektedir.



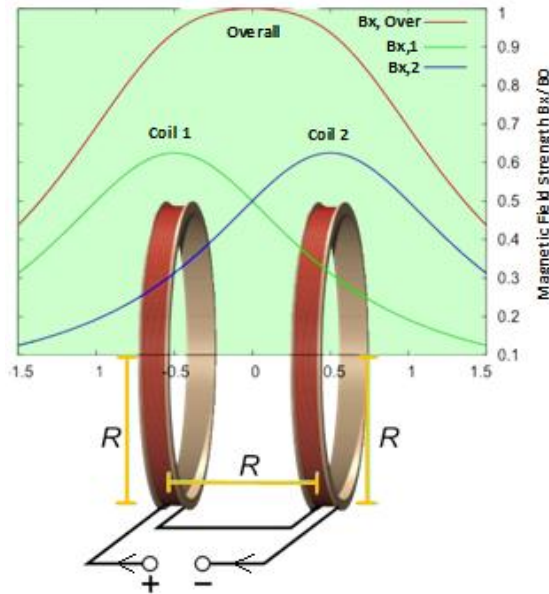
Şekil 1. Helmholtz bobininin teknik çizimi ve iki bobinin yerleşim mesafesi

Şekil 1 ‘de görüldüğü üzere helmholtz bobinlerinin orta noktasındaki düzgün EMF büyüklüğü (B); birinci ve ikinci bobinin orta noktadaki EMF’lerinin toplamı olur. Orta noktasındaki EMF büyüklüğü denklem 1 ya da denklem 2 ile hesaplanabilmektedir [5].

$$B(X_0) = \frac{8}{5\sqrt{5}} \cdot \left(\frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot I \cdot N}{R} \right) \quad (1)$$

$$B(X_0) = 0.8991 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{I \cdot N}{R} \right) \quad (2)$$

Şekil 2 ‘de helmholtz bobininin grafiksel değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2. Helmholtz bobini [6]

Şekil 2’ de verilen değişken ifadeleri aşağıda verilmiştir.

Bx,Over : Orta noktada oluşan EMF
 Bx,1 : 1. Bobinde oluşan EMF
 Bx,2 : 2. Bobinde oluşan EMF

Literatürde, PID kontrol sistemleri ve bu sistemlerin optimizasyonu üzerine yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Robot kol uygulamalarında, kütlelerin hareketlerinin sağlanmasında gereksiz enerji tüketiminden kaçınılması ve bu hareketler sırasında salınımların azaltılması amacıyla daha verimli sonuçlar elde etmek için optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Bu tür yöntemler, harcanan enerjiden tasarruf da sağlamaktadır [7]. Gerçek zamanlı uygulamalarda ise iç döngüde yerçekimi dengeleme işlevine sahip PID kontrolörleri, dış döngüde empedans kontrol algoritmalarıyla birlikte kullanılmakta ve yerçekimi dengeleme kontrolünün PID katsayıları, Matlab programındaki System Identification eklentisi ile belirlenmektedir [8].

Yüksek mertebeli sistemlerin kontrolün yapılırken, Oransal-İntegral-Türev-İvme (Proportional-Integral-Derivative-Acceleration-PIDA) kontrolör katsayılarının tespiti için PSO (Parçacık Sürü Optimizasyonu) algoritması kullanılarak belirlenen değerlerin, Gradyan Arama ve Genetik Algoritma (GA) optimizasyon teknikleri ile karşılaştırıldığı çalışmalar da mevcuttur [9].

Ribeiro G.D. vd., Helmholtz bobini için parametrik belirsizliklere dayanıklı, bozucu etkileri bastırabilen ve referans manyetik alan büyüklüğünü etkin şekilde izleyen kararlı bir kapalı çevrim kontrol sistemi tasarlamışlar. Kontrol yöntemi olarak, özdeğer yerleştirme ve Doğrusal Matris Eşitsizlikleri (LMI) kullanılarak anahtarlama yüzeyi belirlenen Kayan Modlu Değişken Yapı Kontrolü (VSC-SM) tercih edilmişler. Tasarımın performansı MATLAB/SIMULINK ortamında yapılan simülasyonlarla değerlendirmiş ve yöntemin yüksek doğruluk ve kararlılık sağladığı göstermişler. [10].

Lapuh R. vd. ise, Helmholtz ve Maxwell bobinleri için Biot-Savart yasasının analitik çözümüyle manyetik alan dağılımı hesaplamış, bobin boyutları ve konumlarını optimize ederek homojen alan bölgesinde %20'den fazla artış sağlanmışlar. Çok turlu bobinlerin etkisinin, kesit boyutları küçük olduğunda ihmal edilebilir olduğu göstermiş, hesaplama sonuçlarını, deneysel verilerle doğrulanmışlar [11].

Sağlık alanında da elektromanyetik alanın etkilerinin incelendiği çalışma bulunmaktadır. Yapılan bir tez çalışmasında, 120 adet erkek Wistar albino türü sıçanı, 12 gruba ayırmıştır. Diyabet gruplarında üzerindeki etkisini incelemiştir. Pulsu manyetik alan (PMA) gruplarındaki sıçanlar, 50 Hz frekans, 1 mT şiddet ve yatay olarak puls manyetik alana 1 sa/gün periyodunda 1 ay boyunca maruz bırakmıştır. Antioksidan gruplarındaki sıçanlara ise ayrı iki antioksidanı 1 ay boyunca aynı saatte enjekte etmiştir. Deney sonunda sıçanların dekapite edilerek kalplerinden kan almış ve aort dokularını çıkarmıştır. Antioksidan enzim seviyelerinin ve ısı şok protein seviyelerini ELISA yöntemi ile belirlemiştir. Kasılma kuvvetleri (mg) ile gevşeme parametrelerini gözlemlemiş ve bu parametreleri kaydetmiştir. Elde ettiği sonuçlara göre, diyabetik aortalı sıçanlar, kontrol grubu sıçanlara göre daha kısa gevşeme süresi, daha fazla kasılma kuvvetleri olduğu ancak manyetik alan ve antioksidan etkisinin uygulanan aortların kasılma kuvveti ve gevşeme süresi yönünden tam tersi bir durum gözlemiştir. İnvaziv olmayan PMA ve antioksidan uygulamasının, diyabetik olan bireylerde kalp rahatsızlıkları riskinin artmasını engellemeye yönelik yardımcı olabileceğini düşündürmüştür [12].

Nazlım A., kanser hipertermi tedavisinin etkinliğini artırmak amacıyla kitosan oligosakkaritlerinin modifikasyonu ile kitosan oligomer-sülfonat-stearik asit üçlü kombinasyonu ve manyetik kitosan oligomer-sülfonat-stearik asit üçlü kombinasyonunu geliştirmiştir. Araştırma sonuçları, bu kombinasyonların biyouyumlu olduğunu ve serbest sisplatin ile sisplatin kompleksli nanopartiküllerin kanser hücrelerinde çoğalmayı engellediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, manyetik kitosan oligosakkarit nanopartiküllerinin manyetik özellikleri sayesinde, bölgeye özgü hedefleme yaparak alternatif bir manyetik alan ile tutulmaları, tedavinin seçiciliğini artırmaktadır. Bu özellik, manyetik kitosan oligosakkarit nanopartiküllerinin kanser tedavisinde termoterapi için iyi bir aday olabileceğini göstermektedir [13].

Diğer bir çalışmada, yapısında farklı oranlarda indirgenmiş grafen oksit (rGO) içeren manyetik alan duyarlı poli(NIPAAm-ko-VSA)-rGO/Fe₃O₄ interpenetre ağ (IPN) hidrojel kompozitleri (ferrojeller) sentezlenmiştir. Bu ferrojeller üzerine, doksorubisin (DOX) ilacı, çözeltide emdirme yöntemiyle yüklenmiş ve söz konusu sistemlerin, 1.37, 1.64 ve 1.91 militesla (mT) şiddetindeki manyetik alanlar altında zamanla ilaç salım ve ısınma davranışları değerlendirilmiştir. Yapılan ilaç salım deneyleri, manyetik alan ve sıcaklık değişimlerine duyarlı ferrojellerin ilaç salım özelliklerinin, içerikteki rGO oranıyla doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur [14].

Bahrami A. vd., sıcaklık dalgalanmalarını önlemek için dahili su soğutmalı, tam otomatik bir 1D Helmholtz bobin düzeneği tasarlamışlar. Sistem, hücrelerin yönelimini otomatik olarak değiştirerek farklı yönlerden manyetik alana maruz kalmalarını sağlamışlar. İnkübatörde yapılan ön testler, zayıf manyetik alanların mikrotübül ve aktin dinamiklerini etkilediğine dair önceki bulguları doğrulamışlar [15].

Cios A. vd, 50 Hz frekansında 4.5 mT şiddetinde ELF-EMF'ye maruz kalan clear cell renal carcinoma (ccRCC) hücrelerinde, ADAM28 gen ekspresyonunun artışı ve VEGFC gen ekspresyonunun azalması gibi genetik değişiklikler gözlemlemişler [16].

- **Matlab&Simulink**

Matlab Simulink; sistemleri modelleme ve simülasyonunu gerçekleştirmek için kullanılan görsel bir yazılım ortamıdır. Aynı zamanda, Simulink 'de dış ortama veri aktarma ve bilgisayar ortamına veri alma özelliklerinde bulunmaktadır. Kod yazmak yerine simgelerin kullanımı ve bağlantılarının yapılması ile modelleme işlemi yapılan Simulink 'de, kitaplık tarayıcısı kullanılarak farklı bloklara erişim sağlanabilmektedir [17].

- **PID Tuner**

Performans ve sağlamlık arasında iyi bir dengeye ulaşmak için kullanılan PID Tuner MathWorks® algoritması, PID kontrolörün PID katsayılarını belirlemek amacı ile kullanılan bir arabirimdir. Bu arabirim ile sistemin yanıt süresi, bant genişliği veya geçici yanıtı değiştirilince, yeni PID katsayıları tekrardan hesaplanmaktadır [18]. PID Tuner algoritmasının genle çalışmasının işlem adımları aşağıda verilmiştir.

1. Kontrol edilecek model belirlenir.
2. Sisteme genellikle giriş sinyali verilir.
3. Sistemden gelen çıkış cevabı kaydedilir.
4. Ölçülen verilere dayanarak sistemin matematiksel modeli çıkarılır.
5. Model kullanılarak P, I, D katsayıları otomatik veya yarı otomatik şekilde belirlenir.
6. Elde edilen PID parametreleri simülasyon ortamında test edilir.
7. Parametreler gerçek sistemde uygulanır ve performans gözlemlenir.

- **ISSA Algoritması**

Fıçı biçimli Salpidae ailesinden bir deniz organizması olan Salps, salp zinciri denilen bir sürü oluşturarak derin denizlerde yiyecek aramaktadırlar. Salps zinciri, ön kısımda bulunan lider ve onu takip eden salplardan oluşmaktadır. Besin ararken rehberlik eden lideri diğer salplar takip eder. SSA (Salp Swam Algorithm) algoritması, bu sürülerin davranışlarını matematiksel modeli yapılarak meydana getirilmiştir [19].

SSA algoritmasının tanıtılmasından sonra birçok araştırmacı verimi arttırmayı hedefleyerek birçok çalışma yapmıştır. Bunlardan biri olan Tudose ve diğerlerinin önerdiği ISSA (Improved Salp Swam Algorithm) algoritması, SSA algoritmasında kötü olan salpları eleyen ve yerlerine yeni salplar ekleyen algoritmayı oluşturmuşlardır [20]. ISSA algoritmasının genle çalışmasının işlem adımları aşağıda verilmiştir.

8. Başlangıç: Popülasyon rastgele değerlerle başlatılır.
9. Lider: Şu ana kadarki en iyi çözüm seçilir.
10. Lider Güncellemesi: ISSA'nın geliştirilmiş formülüyle yeni konumlar hesaplanır.
11. Takipçiler: Lideri takip ederek konumlarını günceller.
12. Simülasyon: Her birey için EMF değeri hesaplanır ve hedefle karşılaştırılır.
13. En iyi çözüm güncellenir.
14. Döngü, belirli iterasyon sayısı kadar tekrar eder.

- **KKO Algoritması**

Feromen salgılarından kaynaklı olarak karıncalar her zaman kısa yolu seçtiklerinin tespit etmiştir. Karıncaların salgıladığı kimyasal bir salgı olan feromen, diğer karıncalara iletişimi sağlar. Kendine özgü seyahat eden karıncalar, arkalarında feromen bırakırlar. Ancak seyahat eden bir karınca bir feromen ile karşılaşırsa onu takip etmeye yönelir. Karşılaştığı feromeni takip ettiğinde ise atış olan ve güçlenen kendi feromeni bir sonraki karıncanın onu takip etme eğilimini artırır. Besin kaynağına daha kısa yoldan gidip evine daha çabuk dönmesi için yolun belirlenmesinde, o yoldan giden karınca sayısı belirlemektedir [21].

KKO algoritmasının genle çalışmasının işlem adımları aşağıda verilmiştir.

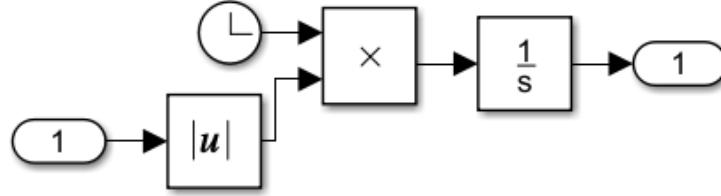
1. Problemi ve çözüm uzayını modellenir.
2. Başlangıçta tüm yol kenarlarına eşit feromon seviyesi atanır.
3. Her iterasyonda tüm karıncalar için:
 - Karıncalar mevcut feromon ve sezgisel bilgiye göre çözüm yollarını oluşturulur.
 - Oluşturulan her çözüm değerlendirilir.
4. Feromon buharlaşması uygulanır.
5. En iyi çözümlerin geçtiği yollara feromon takviyesi yapılır.
6. En iyi çözümü güncellenerek ve saklanır.

7. Durdurma kriteri sağlanana kadar adımlar tekrarlanır.
8. En iyi bulunan çözümü çıktı olarak verilir.

- **ITAE Performans İndeksi**

Kontrol tasarımında yaygın olarak kullanılan performans indekslerinden biri olan ITAE, zamanla çarpılan mutlak hatanın mutlak değerinin integralidir [22].

ITAE performans indeksi için hazırlanan model Şekil 3 'te verilmiştir.

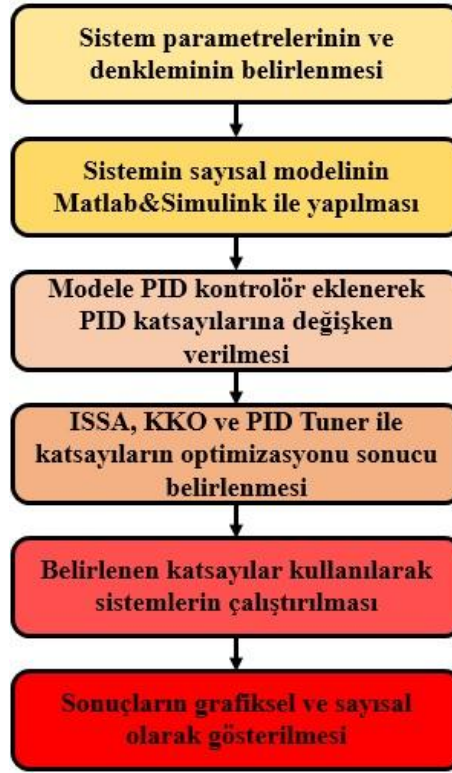


Şekil 3. ITAE Performans indeksinin Simulink Modeli

Alternatif akım ile çalışan Helmholtz bobinleri kullanılarak elektromanyetik alan (EMF) üretiminde, istenilen manyetik alan düzeyinde meydana gelen sapmalar ve kararsızlıklar, sistem performansını olumsuz etkileyen temel sorunlar arasında yer almaktadır. Teorik hesaplamalar ile deneysel veriler arasındaki uyumsuzluk, özellikle düşük manyetik alan aralıklarında doğruluk gerektiren uygulamalarda önemli bir sınırlayıcı unsur oluşturmaktadır. Ayrıca, klasik PID kontrol yöntemlerinin bu tür sistemlerde yeterli düzeyde hassasiyet sağlayamaması, kontrol performansının artırılmasına yönelik daha etkin çözümler geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu kapsamda, elektromanyetik alan üretiminin daha kararlı ve kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmesi amacıyla Helmholtz bobinine ait model Matlab&Simulink ortamında oluşturulmuş; kontrol sisteminin parametreleri için gelişmiş optimizasyon algoritmaları kullanılarak, PID parametrelerinin otomatik ve etkin biçimde belirlenmesi hedeflenmiştir. Çalışma sonucunda, elektromanyetik alan üreten sistemlerde hata oranlarının azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması ve farklı mühendislik alanlarında uygulanabilir, güvenilir bir kontrol altyapısının sağlanması amaçlanmaktadır. Yapılan bu çalışma ilerideki çalışmalar için referans niteliğinde olabilecektir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada Helmholtz bobinlerinin optimizasyonu, üç farklı algoritma kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen sistemin blok şeması Şekil 4'te gösterilmiştir. Önerilen yöntem altı temel adımdan oluşmaktadır. Öncelikle sistem parametreleri ve kullanılacak denklem belirlenmiştir. Sistemin sayısal modeli MATLAB Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Helmholtz bobinlerinde oluşan EMF değerinin hesaplanması için kullanılan denklemde türevsel bir ifade olmadığından ISSA, KKO ve PID Tuner optimizasyon algoritmalarının kullanımı tercih edilmiştir. Geliştirilen modele PID kontrol eklenerek algorithma elde edilen katsayılar verilmiştir. Optimizasyon algoritmaları ile elde edilen katsayılar PID bloklarında kullanılmıştır. Önerilen model üç farklı optimizasyon algoritması için aynı anda çalıştırılmıştır. 10 milisaniye örnekleme ile toplamda 10 saniye boyunca simülasyon modeli çalıştırılarak sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen değerlerden istatistiksel parametre değerleri hesaplanmıştır. Aynı zamanda elde edilen değerlerin grafikleri oluşturulmuştur.



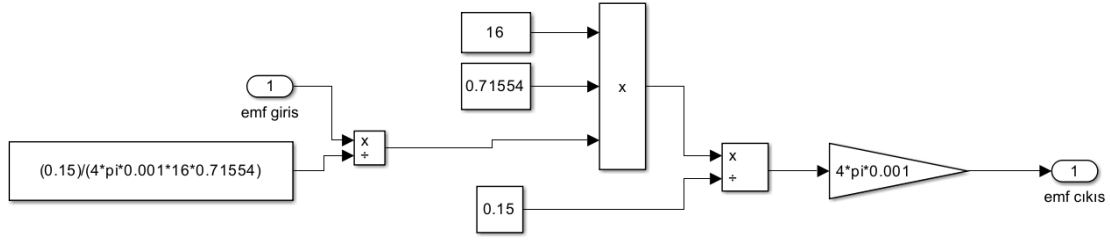
Şekil 4. Önerilen sistemin blok şeması

Matlab&Simulink simülasyon modeli hazırlanırken, kullanılacak simülasyon modelinin elemanları ve görevleri Tablo 1. 'de kısaca verilmiştir.

Tablo 1. Simülasyon modelinde kullanılan elemanlar ve görevleri

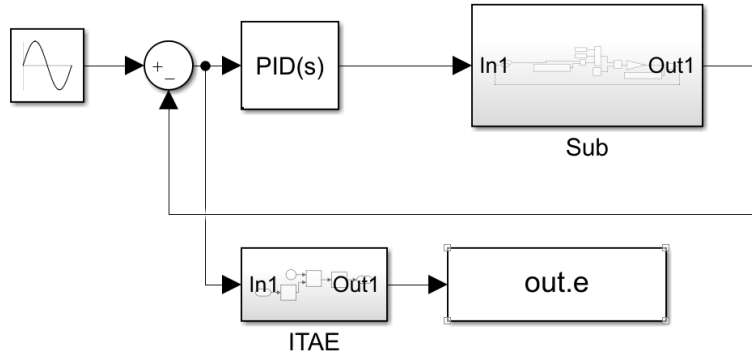
Matlab&Simulink Sembolleri	Anlamı
	Sinüs dalga üretmek için kullanılan SinWave bloğu
	Referans değeri ile geri besleme değeri farkını almak için kullanılan Sum bloğu
	PID Controller bloğu
	KKO için oluşturulmuş Subsystem bloğu
	Değerlerin grafiksel gösterimi için Scope bloğu
	Girilen değerlerin farkını almak için kullanılan Subtract bloğu
	Değerleri kaydetmek için kullanılan To Workspace bloğu
	Girilen değerleri çarpmak için kullanılan Product bloğu
	Subsystem bloğuna değer girişi için kullanılan In bloğu
	Subsystem bloğundan değer çıkışı için kullanılan Out bloğu
	Bir değeri diğer bir değere bölmek için kullanılan Divide bloğu
	Girilen değeri verilen katsayı ile çarpmak için kullanılan Gain bloğu
	Zamana göre işlem yapmak için kullanılan Clock bloğu
	Girilen değer mutlak değerini bulmak için kullanılan Abs bloğu
	Girilen değer integralini alan integratör bloğu

Yapılan çalışmada, AC akımda çalışan, 0 ile 20 mT arasında farklı EMF değerleri için hesaplama yapabilen Matlab&Simulink modeli hazırlanmıştır. Bu simülasyon için bobinin yarıçap değeri 15 cm, sarım sayısı ise 16 sipir olarak kabul edilmiştir. Hazırlanan model Şekil 5 'te verilmiştir.



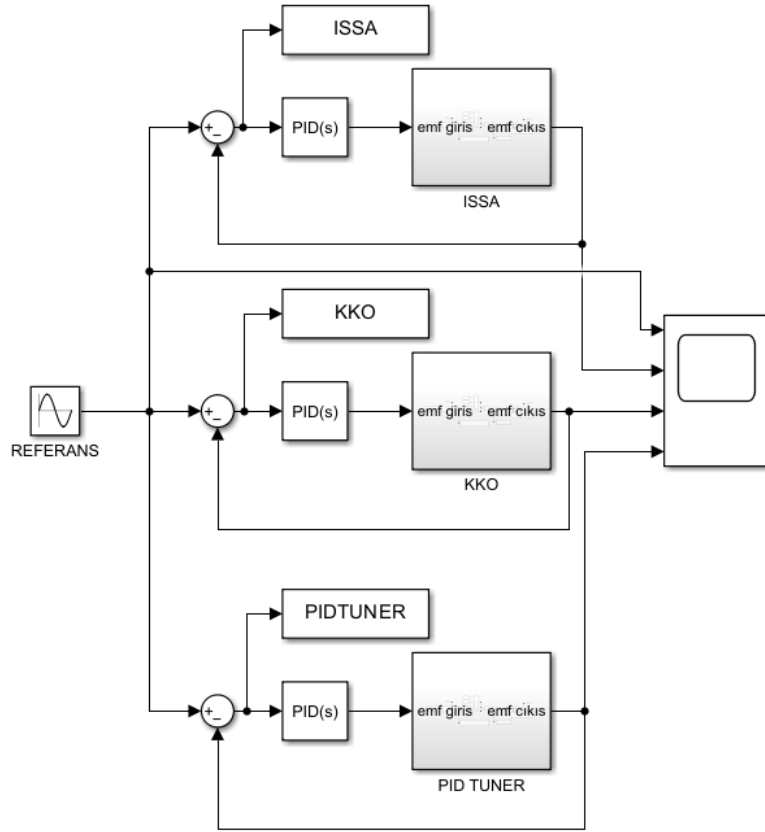
Şekil 5. EMF Simulink modeli

Matlab&Simulink modeli hazırlandıktan sonra optimizasyon için PID kontrolör bloğu modele eklenmiştir. PID kontrolörün parametreleri ise ITAE kriteri kullanılarak farklı algoritmalar (ISSA, KKO ve PID Tuner algoritmaları) ile optimize edilmiştir. Optimize için hazırlanan model Şekil 6 'da verilmiştir.



Şekil 6. Optimizasyon modeli

PID Tuner, ISSA ve KKO algoritmaları ile optimum katsayılar belirlenerek üç model bir araya getirilmiştir. Katsayılar modellere girilerek model çalıştırılmıştır. Çıktılar scope ile grafiksel olarak incelenmiştir. Aynı zamanda referans olarak alınan giriş değeri ile her modelin çıkış değeri arasındaki fark alınmıştır. Elde edilen fark (hata değeri) kriter olarak kullanılan ITAE modelinden geçirilerek sayısal değer olarak incelenmiştir. Kıyaslama yapmak için hazırlanan model Şekil 7 'de verilmiştir.



Şekil 7. Algoritmaları kıyaslama modeli

3. Bulgular

Yapılan çalışmada EMF modelinde uygulanan ISSA, PID Tuner ve KKO optimizasyon algoritması ile elde edilen katsayılar birbirinden farklı çıktığı gözlenmiştir. ISSA, KKO ve PID Tuner optimizasyon algoritmalarının kullanımı sonucu PID parametreleri için tespit edilen değerler Tablo 2 'de verilmiştir.

Tablo 2. Optimizasyon sonuçlarında elde edilen parametre değerleri

	ISSA Kontrolör Kazanç Katsayıları	KKO Kontrolör Kazanç Katsayıları	PID Tuner Kontrolör Kazanç Katsayıları
Kp	4.99999982	5.0000000000000027	0
Ki	5	4.3478260869565215	1.08706369442309
Kd	0	0.57971014492753625	0

Bu katsayılar kullanılarak simülasyon süresince oluşan toplam hata değerleri ITAE performans kriterine göre farklı değerlerde olduğu gözlenmiştir. Optimizasyon sonucu elde edilen ITAE kriterine göre simülasyon boyunca her bir optimizasyon için oluşan istatistiksel hata değerleri Tablo 3 'de verilmiştir.

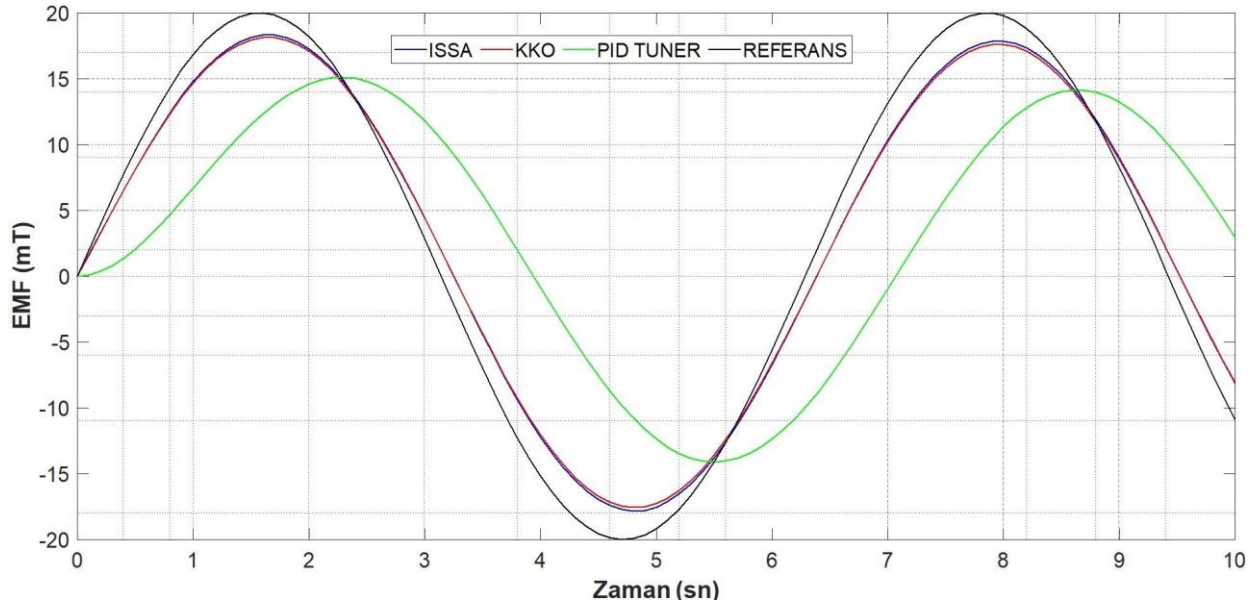
Tablo 3. Simülasyon sonucunda elde edilen istatistiksel mutlak hata parametreleri

İstatistiksel Parametreler	Kullanılan Optimizasyon Algoritması		
	ISSA	KKO	PID Tuner
Maksimum Hata	2.83468	3.11548	14.33941
Minimum Hata	0.00525	0.02910	0.00957
Ortalama Hata	1.62091	1.75503	8.33857
Standart Sapma	0.82063	0.91168	4.20332

4. Tartışma ve Sonuç

Tablo 3 'de verilen ISSA, KKO ve PID Tuner algoritmalarının parametreleri incelendiğinde, maksimum mutlak hata açısından 14.33941 değeri ile en fazla PID Tuner algoritmasında görülmektedir. Bu da diğer algoritmalarla kıyasla daha az kesinlik sağladığını gösteriyor. Minimum mutlak hata açısından bakıldığında ISSA 0.00525, KKO 0.02910

ve PID Tuner 0.00957 değerlerini vermektedir. Bu da teorik olarak doğru sonuçlara en yakın ulaşabilme sırası olarak ISSA, PID Tuner ve KKO olduğu görülmektedir. Ortalama mutlak hata açısından ise ISSA ve KKO algoritmaları birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Ancak PID Tuner'ın ortalama mutlak hatası 8.33857 değeri ile oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Standart sapma değeri ise sonuçların ne kadar değişken olduğunu göstermektedir. Daha düşük standart sapma, daha tutarlı sonuçlar anlamına gelmektedir. 0.82063 ve 0.91168 değerleri ile ISSA ve KKO algoritmalarının standart sapmaları, 4.20332 değerine sahip PID Tuner'a göre çok daha düşük olduğu görülmektedir. Genel olarak, ISSA ve KKO algoritmaları daha tutarlı ve düşük hata değerleri ile daha iyi bir performans sergilemektedir. PID Tuner ise, ISSA ve KKO algoritmalarına göre daha yüksek hata değerleri ile daha düşük bir performans sergilemektedir. Yapılan çalışmada tasarlanan EMF modeli ISSA, PID Tuner ve KKO optimizasyon algoritması ile katsayıları belirlenen PID kontrolör, sistem modeline uygulanarak EMF değerindeki hata üzerinde analiz yapılmıştır. Bu analizler, alternatif akımda kullanılacağı için sinüs dalga bloğu ile sinüzoidal giriş verilerek incelenmiştir. Kontrolörün parametreleri üç algoritma ile optimize edilerek PID parametreleri belirlenmiştir. Modele katsayılar girildikten sonra model 10 milisaniye örneklemeli olarak toplamda 10 saniye boyunca çalıştırılmıştır. Çıkış değerleri kayıt altına alınarak değerlerin grafiği oluşturulmuştur. Oluşturulan grafik Şekil 8 'de verilmiştir.



Şekil 8. Kıyaslama sonucu elde edilen grafik

Elde edilen veriler ve grafiklerde görüldüğü gibi performans sırasına bakıldığında ISSA, KKO algoritmaları birbirine yakın ve en iyi performansı sergilerken, PID Tuner ise ISSA ve KKO algoritmalarına göre düşük performansa sahip olduğu görülmektedir. Helmholtz bobinleri kullanılan elektromanyetik üreteçlerin kontrolünde KKO ve ISSA algoritmasının kullanılması, üreticinin hassasiyetini arttıracak düşünülmemektedir. Aynı zamanda enerji tüketiminin azalacağı kanısına varılmıştır. AC akımda çalışan EMF üreticinin kontrolü için daha önce PID Tuner, KKO ve ISSA algoritmaları kullanılarak sistem performanslarının karşılaştırıldığı literatürde tespit edilmemiştir. Bu çalışma ile EMF üreticisi için ISSA ve KKO algoritmaları farklı sistemlerin PID kontrolörünün katsayıları belirlenirken, ISSA ve KKO kullanılarak sistemde oluşan hataların minimize edilebileceği ve sistemin daha verimli çalışabileceği düşünülmektedir. Ancak çalışılacak sistemlerin sayısal modellerinde türevsel ifadeler sahip olmamalıdır. Geniş uzaya sahip ve karmaşık sistemler için PID kontrol katsayılarının hesaplaması uzun zaman alabileceği göz önüne alınmalıdır.

Kaynakça

- [1] Y. KARMAZI and M. EMRE, "Elektromanyetik Alanların Kemik Dokusu Üzerine Etkisi," *Arşiv Kaynak Tarama Derg.*, vol. 32, no. 4, pp. 215–226, Dec. 2023, doi: 10.17827/aktd.1343480.
- [2] K. Atakır, G. Özevci, and B. Ceyhan, "Elektromanyetik Radyasyon ve İnsan Sağlığına Etkileri," *Environ. Toxicol. Ecol.*, vol. 2, no. 1, pp. 9–21, 2022.
- [3] H. Kayhan, B. Erdebili, S. Gönen, M. A. Eşmekaya, E. Ertekin, and A. G. Canseven, "EFFECTS OF EXTREMELY LOW-FREQUENCY MAGNETIC FIELD ON HEALTHY FIBROBLASTS AND BREAST CANCER CELLS," *İstanbul Tıp Fakültesi Derg.*, vol. 83, no. 4, pp. 384–389, Oct. 2020, doi: 10.26650/IUITFD.2020.0041.

- [4] B. Tastekin *et al.*, "The Effects of Antioxidants and Pulsed Magnetic Fields on Slow and Fast Skeletal Muscle Atrophy Induced by Streptozotocin: A Preclinical Study," *J. Diabetes Res.*, vol. 2023, no. 1, pp. 1–33, Nov. 2023, doi: 10.1155/2023/6657869.
- [5] B. Kivanç, "Yüksek frekanslı Helmholtz bobin uygulamalar için donanım düzeneği tasarımı," Ankara Üniversitesi, 2022.
- [6] T. Trevino, T. Rector, K. Lutz, N. Vasquez, and H. Cadiou, "Design and Build of Electromagnetic Helmholtz Coils Prototypes," 2022.
- [7] M. Aydos, S. Profile, and A. D. Nalbant, "PID Tabanlı Robot Kolu Kontrolü: Ziegler-Nichols ve Tyreus-Luyben Metotlarının ODE45 Deneysel Çözümleme ile Karşılaştırılması," 2015, Accessed: Dec. 21, 2022. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/321361822>
- [8] A. Beyhan, "Üç serbestlik dereceli robotik kolun kartezyen uzayda empedans kontrolü," BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021. Accessed: Dec. 21, 2022. [Online]. Available: <http://acikerisim.btu.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12885/1724>
- [9] K. Donuk, N. Özbey, M. Inan, C. Yeroğlu, and D. Hanbay, "PIDA Denetçi Parametrelerinin PSO Algoritması ile Belirlenmesi," *2018 Int. Conf. Artif. Intell. Data Process. IDAP 2018*, 2019.
- [10] G. D. Ribeiro, G. Soares, H. A. Fazzolari, A. Del, and S. Lordelo, "Design of robust controllers for magnetic field magnitude in Helmholtz coil," pp. 29–44, 2025.
- [11] R. Lapuh, Ç. Aslan, K. Štibernik, and M. Hudlička, "Uniform magnetic field coils construction optimization," in *2024 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*, IEEE, Sep. 2024, pp. 214–219. doi: 10.1109/EMCEurope59828.2024.10722607.
- [12] F. Çoban, "ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ YÜKSEK LİSANS TEZİ."
- [13] B. Akkaya, R. Akkaya, and A. Nazlim, "Magnetic chitosan oligomer-sulfonate-stearic acid triple combination as cisplatin carrier for site-specific targeted on MCF-7 cancer cells: Preparation, characterization and in vitro experiments," *Chem. Biol. Drug Des.*, vol. 102, no. 4, pp. 692–706, Oct. 2023, doi: 10.1111/cbdd.14278.
- [14] T. Danışmanı, Ö. Üyesi, C. Boztepe, T. Vanli, B. Mühendisliği, and A. Dalı, "MANYETİK ALANA DUYARLI HİDROJELLERİN SENTEZLENMESİ VE İLAÇ SALIM DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ."
- [15] A. Bahrami, L. Y. Tanaka, R. C. Massucatto, F. R. M. Laurindo, and C. D. Aiello, "Automated 1D Helmholtz coil design for cell biology: Weak magnetic fields alter cytoskeleton dynamics," pp. 1–16, Jun. 2024, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2406.19555>
- [16] A. Cios *et al.*, "Extremely low-frequency electromagnetic field (ELF-EMF) induced alterations in gene expression and cytokine secretion in clear cell renal carcinoma cells," *Med. Pr.*, vol. 75, no. 2, pp. 133–141, May 2024, doi: 10.13075/mp.5893.01476.
- [17] H. İMAMOĞLU and S. M. BAĞDATLI, "MÜHENDİSLİK PROBLEMLERİNİN MATLAB SIMULINK PROGRAMI DESTEĞİYLE MATEMATİKSEL MODELLENMESİ," *Soma Mesl. Yüksekokulu Tek. Bilim. Derg.*, vol. 1, no. 33, pp. 1–15, Jul. 2022, doi: 10.47118/somatbd.1112039.
- [18] Z. Algor, T. V. E. Sens, L. E. Bldc, M. Poz, and S. Kontrol, "T.c. necmettin erbakan üniversitesi fen bilimleri enstitüsü," 2022.
- [19] P. Chen, M. Liu, and S. Zhou, "Discrete Salp Swarm Algorithm for symmetric traveling salesman problem," *Math. Biosci. Eng.*, vol. 20, no. 5, pp. 8856–8874, 2023, doi: 10.3934/mbe.2023389.
- [20] S. Mirjalili, A. H. Gandomi, S. Z. Mirjalili, S. Saremi, H. Faris, and S. M. Mirjalili, "Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 114, pp. 163–191, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.advengsoft.2017.07.002.
- [21] T. Yurdusever and Y. Danayiyen, "Karıncı Kolonisi Optimizasyon Algoritması ile Bir AVR Sistemi için Optimum PID Denetleyici Tasarımı," *1st Int. Conf. Front. Acad. Res.*, no. February, pp. 108–113, 2023, [Online]. Available: <https://www.icfarconf.com/>
- [22] S. Yıldız, B. Yildirim, and M. T. Özdemir, "Enhancing load frequency control and cybersecurity in renewable energy microgrids: A fuel cell-based solution with non-integer control under cyber-attack," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 75, no. February, pp. 438–449, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.02.145.