



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



DA motor kontrolünde veri güdümlü ve model tabanlı yöntemlerin ani yük değişimlerine karşı tepkilerinin analizi

Analysis of the sudden load change responses of the data-driven control and model-based control methods for dc motor control

Yazar(lar) (Author(s)): Güray SONUGÜR¹

ORCID¹: 0000-0003-1521-7010

To cite to this article: Sonugür G., “DA motor kontrolünde veri güdümlü ve model tabanlı yöntemlerin ani yük değişimlerine karşı tepkilerinin analizi”, *Journal of Polytechnic*, 27(5): 1721-1732, (2024).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Sonugür G., “DA motor kontrolünde veri güdümlü ve model tabanlı yöntemlerin ani yük değişimlerine karşı tepkilerinin analizi”, *Politeknik Dergisi*, 27(5): 1721-1732, (2024).

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

DOI: [10.2339/politeknik.1326256](https://doi.org/10.2339/politeknik.1326256)

DA Motor Kontrolünde Veri GÜdümlü ve Model Tabanlı Yöntemlerin Ani Yük Değişimlerine Karşı Tepkilerinin Analizi

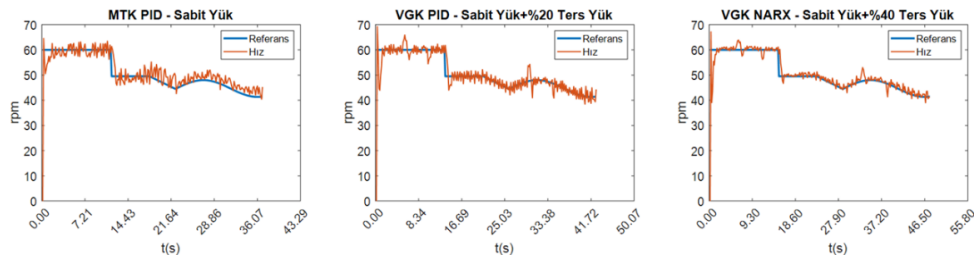
Analysis of the Sudden Load Change Responses of the Data-Driven Control and Model-Based Control Methods for DC Motor Control

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ DA motor kontrolünde ani yük değişimi şeklindeki bozucu etkilere karşı oluşturulan yanıtlar basamak ve sinüs tipi referanslarda incelenmiştir. / For step and sinusoidal type references, responses of DC motors to sudden load change disturbances were analyzed.
- ❖ DA motor kontrolünde ve ani yük değişimlerinde PID yöntemi özelinde Model tabanlı ve Veri güdümlü metodolojilerin performansları karşılaştırılmıştır. / The performances of Model-based and Data-driven methodologies were compared for the PID method in a DC motor kontrol.
- ❖ Ani yük değişimleri için bir platform üretilmiş ve tüm deneyler gerçek zamanlı olarak gerçek motorlarla yapılmıştır. / A platform was built for sudden load changes and all experiments were performed in real time with real motors.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

DA motor hız kontrolünde model tabanlı, veri güdümlü ve veri güdümlü + zaman serili olmak üzere üç farklı yaklaşımın performansları incelenmiştir. / In order to control the speed of DA motors, the effectiveness of three different approaches -model-based, data-driven, and data-driven + time-series- has been examined.



Şekil. MTK-PID, VGK PID ve VGK-NARX denetleyicilerinin ani yük değişimi tepkileri / **Figure.** Responses of MTK-PID, VGK-PID and VGK-NARX controllers to sudden load changes

Amaç (Aim)

DA motorların hız kontrolünde ani yük değişimi tepkilerinin model tabanlı ve veri güdümlü kontrol metodolojileri ile incelenmesi. / Analysis of sudden load change responses in speed control of DA motors using model-based and data-driven control methodologies.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Veri güdümlü kontrol, Model tabanlı kontrol, Yapay Sinir Ağları ve NARX. / Data Driven Control, Model-based Control, Artificial Neural Networks and NARX.

Özgünlük (Originality)

DA motor kontrolünde ani yük değişimi bozucu etkilerine karşı tepkilerin basamak ve sinüs tipi referanslarda incelenmesi. / Analysis of responses to sudden load change disturbances in DC motor control with step and sinusoidal references.

Bulgular (Findings)

Bulgular, grafik ve çizelgeler ile sunulmuştur. / Findings were presented with graphs and tables.

Sonuç (Conclusion)

En başarılı sonuçlar Veri güdümlü kontrol yaklaşımında NARX yönteminde alınmıştır. / The most accurate results were obtained with the NARX method in the data-driven control approach.

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.

DA Motor Kontrolünde Veri GÜdümlü ve Model Tabanlı Yöntemlerin Ani Yük Değişimlerine Karşı Tepkilerinin Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Güray SONUGÜR^{1*}

¹Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 12.07.2023 ; Kabul/Accepted : 09.09.2023 ; Erken Görünüm/Early View : 03.10.2023)

ÖZ

Doğru Akım (DA) motor hız denetleyicilerinde bozucu etkilere karşı direnç gösterme ve her türlü dış etki karşısında referans noktasını en az hata ile takip etmek kritik öneme sahiptir. DA motorlarda en sık karşılaşılan bozucu etki ani yük değişiklikleridir. Bu nedenle denetleyicilerin ani yük değişimlerine karşı hızlı ve etkili bir yanıt oluşturulması ve referans değerden en az sapmayı gerçekleştirmesi gerekir. Bu çalışmada DA motorlarda meydana gelebilecek ani yük değişimlerine karşı model tabanlı ve veri güdümlü yöntemlerin tepkileri analiz edilmiştir. Veri güdümlü kontrol (VGK), denetleyiciyi tasarlamak ve optimize etmek amacıyla toplanan giriş-çıkış verilerini kullanan öğrenme tabanlı bir kontrol yöntemidir. Model tabanlı kontrol (MTK) yönteminde ise, kontrol edilecek sistemin matematiksel modeli hesaplanır. Çalışma kapsamında model tabanlı yöntem olarak Oransal-İntegral-Türev (PID), veri güdümlü yöntemler olarak yapay sinir ağları (YSA) ve kontrol süreçlerinde zaman serilerini de dikkate alan dışal girdili otoregresif sinir ağları (NARX) denetleyiciler incelenmiştir. Böylece DA motor hız kontrolünde model tabanlı, veri güdümlü ve veri güdümlü + zaman serili olmak üzere üç farklı yaklaşımın performansları incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda simülasyon değil gerçek motorlar kullanılmış ve deneyler 100 rpm (DAM1) ve 300 rpm (DAM2) hızına sahip kalıcı mıknatıslı DA motorlar kullanılarak gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, toplam normalize hata, yükselme zamanı ve maksimum yüzde aşma performans ölçütleri kullanılarak sunulmuş ve yöntemlerin başarılı ve başarısız yönleri tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: DA motor kontrolü, Veri güdümlü kontrol, Model tabanlı kontrol, NARX, YSA.

Analysis of the Sudden Load Change Responses of the Data-Driven Control and Model-Based Control Methods for DC Motor Speed Control

ABSTRACT

In Direct Current (DC) motor speed controllers, resisting disturbances and tracking the set point with minimum error against any external factors is critical. The most common type of DC motor disturbance is sudden load changes. As a result, controllers must build a quick and effective response to sudden load changes while deviating as little as possible from the reference values. The responses of model-based and data-driven control approaches to sudden load changes in DC motors are studied in this paper. Data-driven control (DDC) is a learning-based control system that designs and optimizes the controller based on collected input-output data. A mathematical model of the system is calculated in model-based control (MBC). Within the scope of the study, the Proportional-Integral-Derivative (PID) method is analyzed both model-based and data-driven. In addition, artificial neural networks (ANN) and nonlinear autoregressive with exogenous input (NARX) controllers are also investigated as data-driven methods. Thus, the performances of three different approaches for DC motor speed control: model-based, data-driven, and data-driven + time series were investigated. In the experimental studies, real motors were used, not simulations, and the experiments were carried out in real-time using permanent magnet DC motors with 100 rpm (DAM1) and 300 rpm (DAM2) speeds. The results were presented using total normalized error, rise time, and maximum percentage overshoot metrics, and the methods' performance was discussed.

Keywords: DC motor control, Data Driven Control, Model-based Control, NARX, ANN.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Doğru Akım (DA) motorlar, doğru akım formundaki elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren elektrik motoru türüdür. Kendi içinde fırçalı ve fırçasız olarak iki ana kategoriye ayrılır. Fırçalı DA motorlar, manyetik akıyı oluşturan alan manyetiklerinin tipine göre Kalıcı Mıknatıslı (KM) ve Elektromıknatıslı (EM) olarak iki kategoriye daha ayrılırlar. Tüm fırçalı DA motorlar sınıfı

alan sargıları ile rotor sargılarının birbirine bağlantı şekline göre serbest uyartımlı, seri, şönt (paralel) ve bileşik olmak üzere bir takım alt sınıflara ayrılmıştır. Her sınıf DA motorun kendine has özellikleri bulunmaktadır. Bu çalışmada şönt bağlı KMDA motorların hız kontrolü incelenecektir.

Dönel hız kontrolü amacıyla genel olarak rotor sargılarının uçlarına uygulanan gerilim ve statordaki

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : gsonugur@aku.edu.tr

kutup sargılarının akısı kontrol edilir. En basit hız kontrol yöntemi rotor geriliminin bir reosta ya da potansiyometre ile ayarlanmasıdır. Ancak bu şekilde hem hassas kontrolden bahsedilemez hem de bu bileşenlerdeki gerilim düşümü nedeniyle güç kaybı yüksek olur. Günümüzde DA motor kontrolünde başlıca iki tip kontrol mekanizmasından bahsedilebilir. Bunlar model tabanlı kontrol ve veri güdümlü kontroldür. Model tabanlı hız kontrolünün arkasındaki temel fikir, motorun hızının farklı kontrol girişlerine nasıl tepki vereceğini hesaplamak için motorun matematiksel modelini kullanmaktır. Motorun matematiksel modeli, genel olarak motorun torku, hızı, akımı ve gerilimi arasındaki ilişkiyi tanımlayan elektriksel denklemler ile atalet, sürtünme ve direnç gibi fiziksel özelliklerini hesaba katan parametreler de içerebilir. Motor modeli türetildikten sonra, bir kontrolör tasarlamak için kullanılabilir. Kontrolör tipik olarak bir geri besleme kontrolörü şeklini alır, yani motorun hızının istenen referans hızı izlemesine neden olacak bir kontrol girişini hesaplamak için motorun mevcut hızını kullanır. Veri güdümlü kontrol, bir kontrolör tasarlamak için gerçek sistemden alınan verileri kullanan bir kontrol tipidir. Toplanan hız, gerilim, akım ve tork gibi veriler sensörler vasıtasıyla elde edilir ve motorun çalışma karakteri hakkında bilgiler içerir. Bu yöntem, kontrolör tasarlamak için sistemin matematiksel bir modelini kullanan model tabanlı yöntemin tersidir. Veri güdümlü kontrol genellikle modelin mevcut olmadığı durumlarda veya sistemin sürekli değiştiği, dolayısıyla modelin sık sık güncellenmesi gereken durumlarda kullanılır [1]. Ayrıca, veri güdümlü kontrol öğrenme yeteneği olan bir yöntemle dönüştürülebilir. Toplanan veriler motor hızının farklı kontrol girdilerine nasıl tepki vereceğini tahmin edebilen bir yapay zekâ modelini eğitmek için kullanılabilir. Ancak DA motorlar zamana bağlı bir kısım iç dinamiklere sahiptirler. Örneğin rotor sargılarında endüklenen gerilim sargıdan geçen akımın zamana göre türeviyle ilişkilidir. Bu durumda motor karakteri zamana bağlı olarak değişebilir. Bu durumda motor kontrolü için kurulacak öğrenme modelinde zaman serilerinin de dikkate alınması fayda sağlayabilir.

DA motor kontrolünde PID, YSA ve NARX yöntemleri literatürde oldukça fazla tekil veya karşılaştırmalı olarak çalışılmıştır [2–4]. Ancak çalışmaların çoğunda standart yükler ve önceden belirlenmiş sabit referans değerleri kullanılmış ve denetleyici performansları incelenmiştir. Büyük çoğunlukla da farklı yük değerleri oluşturmanın kolay olduğu simülasyon ortamları tercih edilmiştir [2–5]. Kontrol mekanizmasında kullanılacak veriler de yine simülasyon ortamlarında modellenmiş motorlardan elde edilmiştir. Bu çalışmada, gerçek ortamda bir deney seti oluşturulmuş, kullanılan tüm veriler gerçek motorlardan toplanmış ve tüm deneysel sonuçlar gerçek zamanlı olarak alınmıştır. Ayrıca, doğrusal olmayan modelleme için zaman serileri bazlı NARX ağı hata, hatanın değişimi ve voltaj değişimi gibi standart dışı girdilerle güçlendirilmiştir. Ani yük giriş ve çıkışları ayrı bir yük motoru kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde

değerleri ayarlanabilen yükler üretilmiştir. Ani yük değişimleri basamak ve sinüs eğrisi referanslar üzerinde gerçekleştirilerek yanıtların değişimi incelenmiştir.

DA motor hız kontrolünde geleneksel yöntemlerden olan PI [6, 7] ve PID [8] yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu denetleyiciler, uygulama kolaylıkları, sağlamlıkları ve kolay ayarlanabilmeleri nedeniyle çoğunlukla tercih edilmektedirler. PID Denetleyici: "oransal-integral-türev" anlamına gelir. Bu, PI kontrolörünün oransal ve integral bileşenlerinin yanı sıra bir türev bileşenini de içeren daha gelişmiş bir kontrol stratejisidir. Ancak günümüz koşullarına uygun olarak bu yöntemler de zekileştirilmektedir. PID kontrol performansının artırılması için bulanık mantık [9], genetik algoritmalar [10, 11], ve parçacık sürü optimizasyonu [12] gibi yöntemler kullanılarak ayarlanabilir kontrol algoritmaları geliştirilmiştir. Ayrıca, tamamen zeki ve öğrenme tabanlı kontrol algoritmaları da geliştirilmektedir. Bunlara örnek olarak YSA [13], bulanık denetleyiciler [14], ayarlanabilir sinirsel bulanık mantık çıkarsama sistemi (Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems-ANFIS) [15] ve model öngörülü kontrol (Model Predictive Control-MPC) [16] verilebilir. Ancak, endüstride minimum hesapsal maliyetle en iyi performansı almak gerektiğinden kimi zaman sadece PID kullanımı yeterli olmaktadır. NARX [17] ağları, DC motorların doğrusal olmayan, karmaşık ve zamanla değişen davranışlarını tanımlayabilen ve gerçek zamanlı kontrol gereksinimlerini karşılayabilen esnek bir modelleme aracıdır. DC motorların tanımlanması ve akabinde hız kontrolü amacıyla literatürde sıklıkla kullanılmıştır. [18], bir nesnenin tanımlanması ve modelinin elde edilmesi için NARX sinir ağını kullanan bir DC motorun veri güdümlü kontrol sistemini önermiştir. [19], bir DC motorun NARX ve türevi yaklaşımlar ile sistem tanımlamasını gerçekleştirmek için parçacık sürüsü optimizasyonunun (PSO) kullanımını araştırmıştır. [20], bir DC motorun eksen konumunu kontrol etmek için ayarlanabilir bir bulanık kayan kipli kontrol yöntemi önermiş ve bu yöntem ile diğer yöntemleri karşılaştırmıştır.

Tüm DA motor hız denetleyicilerinde bozucu etkilere (disturbance) karşı direnç gösterme önemli bir konudur. Hızlı ve etkili bir yanıt oluşturulması gerekir. DA motorlarda bozucu etkiler genel olarak ani yük değişimleri olarak meydana gelir. Bu nedenle, bu çalışmada DA motorlarda kullanılacak olan PID, YSA ve NARX denetleyicilerin ani yük değişimlerine karşı verdikleri yanıtlar incelenmiştir. Literatürdeki çoğu çalışma incelendiğinde DA motorların Eşitlik 25'de verilen denklemin ve benzerlerinin Matlab/Simulink'te matematiksel olarak kurulmasıyla ifade edildiği görülmektedir [21–24]. Bu şekilde yapılan çalışmalarda yüksek performanslar elde edildiği gözlenmektedir. Ancak bu tip modelleme, ideal bir kontrol ortamı sunmakta, gerçek zamanlı motor dinamikleri ve zamana bağlı parametreleri göz ardı etmektedir. Bu durumda çalışmalardan elde edilen sonuçların gerçek zamanlı

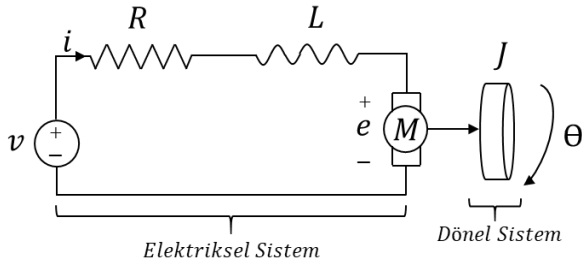
sistemlerde kullanılmasında sorunlar ortaya çıkabilmektedir.

Bu çalışmada; tamamen gerçek motorlar kullanılarak gerçek zamanlı deneyler gerçekleştirilmiş, gerçek zamanlı bozucu etkiler uygulanmış ve motorların anlık tepkileri ölçülmüştür. Bozucu etkiler için kullanılan yük motorları vasıtasıyla tamamen ölçülebilir yükler sisteme uygulanabilmektedir. Ayrıca, bozucu etkiler hem basamak referanslara hem de sinüs referanslara uygulanmış ve böylece hız durağanken ve değişiyorken motor tepkileri ölçülebilmektedir. Bu şekilde yanıtlardaki zaman bileşeninin de dikkate alınması sağlanmıştır. Çalışmada, dört temel yöntemin analiz sonuçları ile araştırmacıların çalışmalarına yön verecek katkı sunulduğu düşünülmektedir. Bu dört temel yöntem; tamamen veriden bağımsız matematiksel modele dayalı PID kontrol (MTK-PID), veri güdümlü PID kontrol (VGK-PID), veri güdümlü YSA kontrol (VGK-YSA) ve zaman serisi-tabanlı veri güdümlü NARX (VGK-NARX) kontrolüdür.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

2.1. DA Motor Matematiksel Modeli (Mathematical Model of the DC Motor)

Doğru Akım motorlarının modellenmesi konusu elektriksel sistemler ve dönel sistemler ile birlikte ele alınmalıdır. Çünkü DA Motorları bu sistemlerin bileşiminden oluşmaktadır. Ayrıca motorların kendi dinamiklerinden kaynaklanan Elektriksel tork ve zıt elektromotor kuvvet gibi parametreleri bulunmaktadır. Tüm bileşenleri ile bir DA motorunun rotor (armatür) devresi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Serbest uyarımlı DA motoru eşdeğer devresi (Seperately excited DC motor equivalent circuit)

DA motorlarının kendi dinamiklerinden kaynaklanan bazı büyüklükleri vardır. Bunlardan birincisi Elektriksel momenttir. DA motorunda bir elektriksel moment oluşabilmesi için sargılardan bir i akımı geçmelidir. Bu akımın oluşması için $v(t)$ gerilim kaynağı ile sisteme bir elektriksel gerilim uygulanmalıdır. Bu durumda elektriksel moment:

$$T_e = K_m \Phi(t) i(t) \quad (1)$$

Yukarıdaki eşitlikte; T_e : Elektriksel moment (tork), K_m : Motorların iç yapısı ile ilgili bir sabit sayı, $\Phi(t)$: DA motor kutup manyetik akısı, $i(t)$: Rotor (armatür) elektrik akımıdır.

Serbest uyarımlı DA motorlarında Φ kutup manyetik akısı sabittir. Bu nedenle elektriksel moment eşitliği sadeleştirilerek tekrar yazılabilir.

$$K_t = K_m \Phi \quad (2)$$

$$T_e(t) = K_t i(t) \quad (3)$$

Bir diğer büyüklük zıt elektromotor kuvvettir. Şekil 1'de "e" olarak gösterilmiştir.

$$e(t) = K_{emk} \Phi \omega(t) \quad (4)$$

Φ kutup manyetik akısı sabit olduğu için eşitliği sadeleştirilebiliriz.

$$K_e = K_{emk} \Phi \quad (5)$$

$$e(t) = K_e \omega(t) \rightarrow e(t) = K_e \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (6)$$

Eşitlik 5'de; K_e : DA motorlarının iç yapısı ile ilgili bir sabit sayı, $\omega(t)$: Rotor açısal hızı, $\theta(t)$: Açısal yer değiştirmedir.

$$v(t) = i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad (7)$$

$$v(t) = i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} + K_e \omega(t) \quad (8)$$

Yük momenti ihmal edildiğinde, dönel sistemin modellenmesinde elektriksel olarak üretilen moment T_e , eylemsizlik momenti T_j ve açısal sürtünme momenti T_B dikkate alınmalıdır. Bu durumda;

$$T_e = T_j + T_B \quad (9)$$

$$K_t i(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B \omega(t) \quad (10)$$

Transfer Fonksiyonları:

Giriş olarak devreye uygulanan $v(t)$ gerilimini, çıkış olarak da rotorun dönüş hızını $\omega(t)$ alırsak; öncelikle Laplace dönüşümlerini gerçekleştirmemiz gerekir. Elektriksel kısım:

$$v(t) = i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad (11)$$

$$v(s) - e(s) = i(s)R + L[s i(s) - i(0)] \quad (12)$$

$$v(s) - e(s) = i(s)[R + Ls] \quad (13)$$

$$T_e(s) = K_t i(s) \quad (14)$$

$$e(s) = K_e \omega(s) \quad (15)$$

Mekanik Kısım ele alındığında:

$$K_t i(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B \omega(t) \quad (16)$$

$$K_t i(s) = J[s\omega(s) - \omega(0)] + B \omega(s) \quad (17)$$

$$T_e(s) = \omega(s)[Js + B] \quad (18)$$

$$i(s) = \frac{\omega(s)[Js + B]}{K_t} \quad (19)$$

Eşitlik 13 kullanıldığında;

$$i(s) = \frac{v(s) - e(s)}{R + Ls} \quad (20)$$

$$i(s) = \frac{v(s) - K_e \omega(s)}{R + Ls} \quad (21)$$

Bu durumda;

$$\frac{v(s) - K_e \omega(s)}{R + Ls} = \frac{\omega(s)[Js + B]}{K_t} \quad (22)$$

$$K_t v(s) - K_t K_e \omega(s) = \omega(s) \cdot [Js + B][R + Ls] \quad (23)$$

$$v(s) = \frac{\omega(s) \cdot [Js + B][R + Ls] + K_t K_e \omega(s)}{K_t} \quad (24)$$

$$\frac{\omega(s)}{v(s)} = \frac{K_t}{[Js + B][R + Ls] + K_t K_e} \quad (25)$$

olarak hesaplanabilir.

2.2. DA Motor Tanımlama (DC Motor Identification)

Model tabanlı yöntemlerde bir motoru kontrol edebilmek için öncelikle o motorun çıkış ve girişi arasındaki ilişkinin matematiksel olarak ifade edilmesi gereklidir. Literatürde pek çok çalışmada bu ifade DA motorun modeli olarak adlandırılmaktadır. Bu ifade zaman alanında ya da s-alanında (frekans) olabilir. Eşitlik 25'de

s-alanında oluşturulan ve transfer fonksiyonu olarak adlandırılan basit bir çıkış-giriş ifadesi örneği sunulmuştur. Bu transfer fonksiyonundaki katsayıların her biri DA motorların iç dinamikleri ve yapıları ile ilgili parametrelerdir ve hesaplanmaları oldukça zordur. Örneğin, motorun dış ve iç çevre uzunlukları, kalıcı mıknatısların çevre uzunlukları, şekilleri, kalınlıkları, rotor sargıları ile aralarındaki boşluk mesafesi, rotor uzunluğu, rotor nüvesinin şekli, metal alaşımı, rotordaki yarık sayısı, yarıkların şekilleri vb. pek çok parametrenin hesaplamalarda dikkate alınması gereklidir. Çalışmada kullanılan DA motorların kataloglarında bulunmayan bir kısım parametrelerin hesaplanabilmesi için motorlar üzerinden ölçümler alınmış ve Ansoft Maxwell yazılımı kullanılarak parametreleri hesap edilmiştir. Ancak bu parametreler hesap edildikten sonra motorların transfer fonksiyonları oluşturulabilir. DAM1 ve DAM2 için bulunan parametreler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. DAM1 ve DAM2'nin parametreleri ve hesaplanan transfer fonksiyonları

	J ($kg.m^2$)	B ($\frac{N.m.s}{rad}$)	L (H)	R (Ω)	K_t ($N.\frac{m}{A}$)	K_e ($V.\frac{s}{rad}$)	Transfer Fonksiyonu
DAM1	0.0003	0.0022	1.4	0.2	0.01	0.01	$G_1(s) = \frac{23.81}{s^2 + 3.47s + 0.71}$
DAM2	0.0002	0.0022	1.1	0.15	0.025	0.025	$G_2(s) = \frac{113.63}{s^2 + 11.13s + 4.34}$

2.3. Model Tabanlı PID Kontrol (Model-based PID Control)

PID yöntemi, kontrol edilen sinyal ile istenen referans değeri arasındaki hatayı hesaplar ve ardından hatanın P, I ve D bileşenlerine dayalı bir düzeltme uygular [25]. Yöntemin içeriğindeki türev bileşeni, sistemdeki değişikliklere daha hızlı yanıt verilmesine yardımcı olur ve kontrol döngüsünün kararlılığını artırır [26]. Her ne kadar bu yöntemin doğrusal bir yöntem olması ve dolayısıyla yüksek frekanslı ve güçlü bozucu etkilere sahip sistemlere uygulanamayacağı doğrultusunda görüşler olsa da [27] PID yaklaşımının göz ardı edilemeyecek bazı avantajları vardır. Kolay uygulama, esnek parametre ayarı, kolay tasarım ve tatmin edici performans [28]. Bir PID denetleyicide Oransal etki, kalıcı durum hatasını azaltırken, integral etki bu hatayı sıfıra doğru yaklaştırır. Türevsel etkinin ise kalıcı durum hatası üzerinde bir etkisi olmayıp kalıcı duruma geçiş süresini azaltmaktadır.

PID kontrolörlerin avantajlarından yararlanmak için kontrolör parametrelerinin doğru seçilmesi çok önemlidir [29]. Bu tip denetleyicilerde ayar noktası (referans - $r(t)$) ve gerçek sonuç $y(t)$ arasındaki hatanın ($e(t)$) sıfıra yakınsaması için oransal (K_p), integral (K_i) ve türev (K_d) katsayıları en iyilenmeye çalışılır. Katsayı hesabında öne çıkan birkaç yöntem vardır. Ziegler-Nichols [30] yöntemi, PID katsayılarını hesaplamak için kullanılan grafiksel bir yöntemdir. Endüstriyel uygulamaların yaklaşık %95'inde Ziegler-Nichols yöntemiyle ayarlanan PID kontrolörleri kullanılmaktadır [1, 31]. Cohen-Coon

yöntemi [32], PID kontrolörlerini ayarlamak için kullanılan daha karmaşık bir yöntemdir. Yöntem, PID kontrolörünün parametrelerini hesaplamak için bir dizi diferansiyel denklemin çözülmesini içerir. Cohen-Coon yöntemi Ziegler-Nichols yönteminden daha doğru sonuçlar üretebilmektedir, ancak kullanımı daha karmaşıktır. Bu çalışmada PID katsayıları için Matlab kontrol sistemleri araç kutusu kullanılmış ve hesaplanan katsayılar Çizelge 2'de verilmiştir. MTK-PID denetleyicilerde denetleyici çıkışları ($u(t)$) Eşitlik 26'da verildiği şekilde hesaplanmalıdır.

$$u_{PID}(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (26)$$

Çizelge 2. MTK-PID yöntemi için hesaplanan PID katsayıları (PID coefficients calculated for MTK-PID method)

DA Motor Tipi	K_p	K_i	K_d
DAM1	746.3	1033.1	13.48
DAM2	286.14	1999.3	3.89

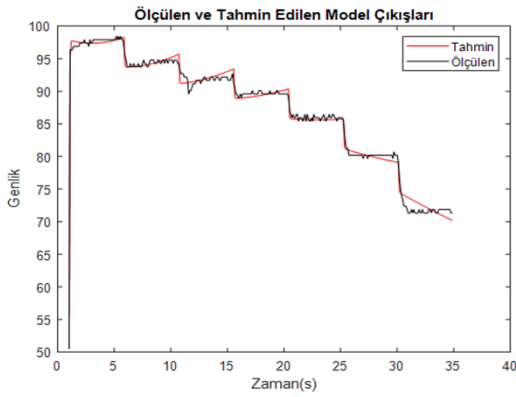
2.4. Veri Güdümlü PID Kontrol (Data-Driven PID Control)

Bu çalışmada kullanılan DAM1 ve DAM2'yi modellemek amacıyla Matlab R2019 System Identification (SI) ve Single Input-Single Output (SISO) araç kutuları kullanılmıştır. Modelleme için DA motorlara darbe genişlik modülasyonu görev oranları (PWM- duty cycle) şeklinde giriş gerilimleri uygulanmış ve motorların buna karşı çıkışta ürettikleri dönüş hızları

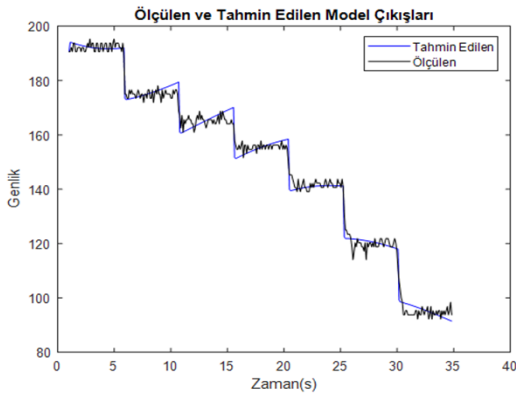
48 CPR enkoderler vasıtasıyla ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Bu şekilde oluşturulan veriseti kullanılarak SI araç kutusu yardımı ile en yüksek eşleşme oranının elde edildiği 3 kutup ve iki sıfırlı transfer fonksiyonları elde edilmiştir. Bu transfer fonksiyonları geri beslemeli ve seri kompanzasyonlu denetim mimarisi içinde DA motorunu (plant) temsil etmektedir ve Eşitlik 27-28'de sunulmuştur. Her iki motor için elde edilen model çıkış grafikleri ise Şekil 2'de sunulmuştur.

$$G_1(s) = \frac{1370s^2 + 258.5s + 16.62}{s^3 + 30s^2 + 1.52s + 0.09} \quad (27)$$

$$G_2(s) = \frac{6934s^2 + 296.3s + 158.3}{s^3 + 36.1s^2 + 2.06s + 0.75} \quad (28)$$



(a)

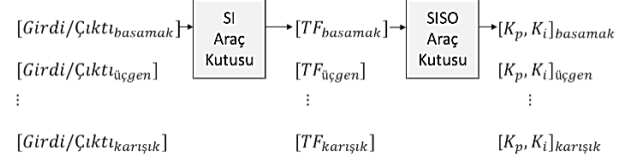


(b)

Şekil 2. Veri güdümlü olarak tasarlanan motor modellerinin giriş-çıkış örtüşme grafikleri (a) DAM1, (b) DAM2 (Input-output overlap plots of data-driven motor models (a) DAM1, (b) DAM2)

Giriş-çıkış yapısına en uygun eşleşen transfer fonksiyonları elde edildikten sonra SISO araç kutusu kullanılarak en hızlı yanıt süresine sahip ve en gürbüz kontrolü gerçekleştirebilecek PID katsayıları ($[K_p, K_i, K_d]$) hesaplanmıştır. SISO araç kutusunun "pidtune" ara yüzü Ziegler-Nichols yöntemi, Cohen-Coon yöntemi ve diğer birkaç yöntem dahil üzere bir dizi farklı ayarlama yöntemi sağlamaktadır [33]. Matlab SISO araç kutusu ise farklı PID katsayılarının

sistem yanıtı üzerindeki etkilerini görselleştirmek için bir dizi araç sunar. Bu araçlar, kullanıcının istenen sistem performansını üreten PID katsayılarını seçmesine yardımcı olmak amacıyla kullanılabilir. Bu çalışmada PID katsayılarının elde edilmesi için gerçekleştirilen işlem adımları Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Matlab R2019 araç kutuları ile PID katsayısı hesaplama süreci (PID coefficient calculation process with Matlab R2019 toolboxes)

Burada, [*Giriş/Çıkış*], model veri setine göre DA motordan elde edilen [*görev oranı – dönüş hızı*] verilerini, [*TF*], SI araç kutusu tarafından elde edilen transfer fonksiyonlarını ve [K_p, K_i, K_d] değerleri ise SISO araç kutusu kullanılarak elde edilen PID katsayılarını temsil etmektedir. Hesaplanan katsayılar Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. VGK-PID yöntemi için hesaplanan PID katsayıları (PID coefficients calculated for the VGK-PID method)

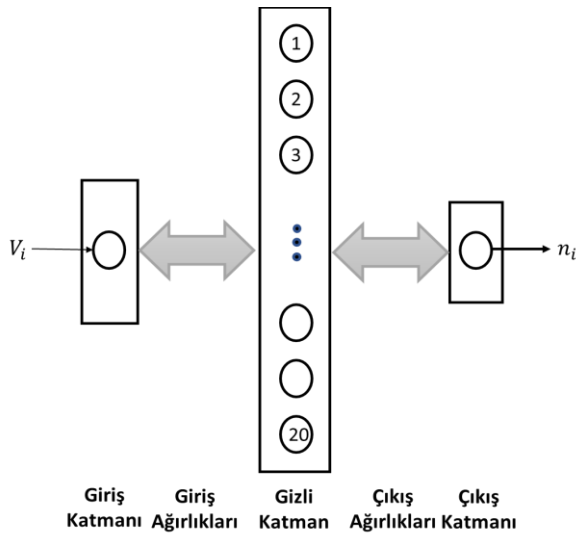
DA Motor Tipi	K_p	K_i	K_d
DAM1	0.00064	0.00073	0.00013
DAM2	0.038	0.3319	0.00012

2.5. Veri Güdümlü YSA Kontrol (Data-Driven ANN Control)

Veri güdümlü YSA kontrolü, DA motorlardan toplanan giriş-çıkış verilerini analiz etmek ve aralarındaki ilişkiyi öğrenerek çıkışları tahmin üzere yapay sinir ağlarının kullanılmasını içermektedir. Bu ağlar, motorlardan elde edilen geçmiş veriler kullanılarak eğitilir. Böylece çeşitli motor parametreleri ile bunlara karşılık gelen kontrol girdileri arasındaki karmaşık ilişkileri öğrenerek eşleştirebilirler.

Veri güdümlü YSA kontrolü, motor kontrolünde daha iyi uyarlanabilirlik ve esneklik sağlar. YSA, büyük miktarda veri kullanarak farklı çalışma koşullarını öğrenebilir ve bunlara uyum sağlayabilir, bu da daha iyi performans ve verimlilikle sonuçlanır [34]. YSA kontrolünün arkasındaki temel prensip, bir dizi giriş-çıkış çifti kullanarak sinir ağını eğitmektir. Bu çiftler, giriş olarak istenen motor hızından ve çıkış olarak ilgili kontrol sinyalinin oluşur. Sinir ağı, giriş ve çıkış verileri arasındaki ilişkiyi haritalamayı öğrenir ve daha sonra bu bilgiyi belirli bir hız referansı için uygun kontrol sinyalini üretmek için kullanır. Öğrenme süreci sürekli tekrarlandığı için denetleyici motor yükündeki ve diğer dış faktörlerdeki değişikliklere kolayca uyum sağlayabilir. Ayrıca, veri güdümlü YSA kontrolü, motor sistemindeki karmaşık doğrusal olmayan dinamikleri ve belirsizlikleri giriş-çıkış ilişkisine dayanarak öğrenebilir. Geleneksel kontrol yöntemleri genellikle bu doğrusal

olmayan özellikleri doğru bir şekilde modellemekte ve kontrol etmekte zorlanır ve bu da performans sorunlarına yol açabilir. Buna karşın, YSA tabanlı kontrol bu karmaşık ilişkileri etkili bir şekilde yakalayıp modelleyerek daha doğru ve sağlam kontrol sağlar. Sonuç olarak, Bu yöntem, yapay sinir ağlarının ve makine öğrenimi algoritmalarının gücünden yararlanarak gerçek zamanlı motor davranışına uyum sağlayabilir ve kontrol stratejilerini buna göre optimize edebilir [22]. DA motorlarda veri güdümlü YSA kontrolünü uygulamak için iki adımlı bir süreç izlenmiştir. İlk olarak, motor girişleri ve ilgili çıkışlardan oluşan büyük bir veri kümesi toplandı. Bu veri kümesi çok çeşitli çalışma koşullarını ve sistem varyasyonlarını kapsmalıdır. Veri kümesi daha sonra denetimli öğrenme tekniği kullanılarak YSA modelini eğitmek için kullanılmıştır. Eğitilen sinir ağı Şekil 4'de görüldüğü üzere denetleme sürecinde kullanılmıştır.



Şekil 4. Matlab R2019 araç kutuları ile PID katsayısı hesaplama süreci (PID coefficient calculation process with Matlab R2019 toolboxes)

Burada; V_i ; görev oranı formunda giriş voltajı, n_i ; rpm cinsinden motor dönüş hızıdır. Tasarlanan ağ, her biri 20 nörondan oluşan iki gizli katmanın yanı sıra giriş ve çıkış katmanlarından oluşmaktadır. Tasarımda kullanılacak en uygun parametreleri belirlemek için bir kısım deneme yanılma süreçleri gerçekleştirilmiştir. Modellerin performansı, ağın görev oranı ve dönüş hızı arasındaki ilişkiyi doğru bir şekilde öğrenebildiğinden emin olmak için izlenmiştir. Bir DA motorunda görev oranı ve dönüş arasındaki ilişkiyi öğrenmek zor bir süreçtir çünkü DA motorları zamanla değişen iç dinamiklere sahiptir. Bu nedenle, tek bir gizli katman tasarımı yerine iki gizli katman tasarımı seçilmiştir. Gizli katman sayısının artırılması hesaplama maliyetinin artmasına ve ezberlemeye (aşırı öğrenme) yol açabilir. Gerçekleştirilen deneme/yanılma süreçleri sonucunda her gizli katmanda 20 nöron kullanıldığında [görev oranı-dönüş hızı] ilişkisindeki zamana bağlı örüntülerin daha yüksek doğrulukla ortaya çıkarıldığı gözlemlenmiştir. Eğitilen model için 12360 adet [görev oranı – dönüş hızı]

veri çiftinden oluşan setin 11360' eğitim ve doğrulama süreçleri için, 1000'i ise bağımsız test için kullanılmıştır. Başka bir deyişle, 1000 veri eğitim sürecine dahil edilmemiştir. Bu sayede eğitilen ağ daha önce hiç görmediği verilerle test edilebilmiştir. Deneyle sonuçları, sinir ağının görev oranı ve dönüş hızı arasındaki ilişkiyi yüksek doğrulukla öğrenebildiğini göstermiştir. Test verilerindeki ortalama karesel hata (MSE) performansı, eğitim verilerindeki MSE performansından önemli ölçüde düşüktür ve bu da ağın eğitim verilerine aşırı uyum sağlamadığını göstermiştir.

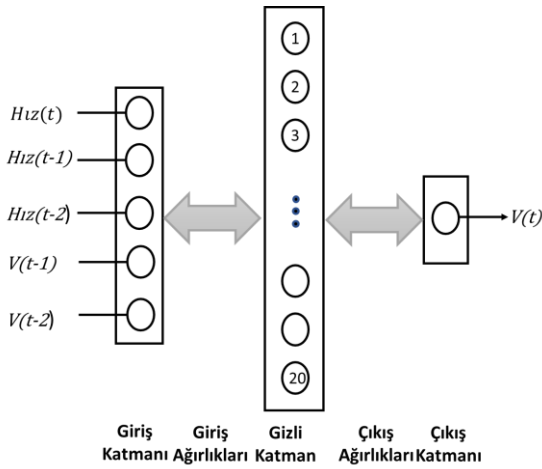
2.6. Veri Güdümlü NARX Kontrol (Data-Driven NARX Control)

NARX (Nonlinear Autoregressive with eXogenous inputs) ağları, zaman serileri ve dinamik sistemlerin modellenmesi için kullanılan bir çeşit yapay sinir ağıdır. Zamanla değişen dinamiklere ve değişkenlere sahip sistemlerin modellenmesinde başarılı sonuçlar vermektedir. DA motorlar zamanla değişen bir kısım dinamiklere sahiptirler. Örneğin, Eşitlik 6'da motor tarafından üretilen elektromotor kuvvetin açılma yer değiştirmenin zamana göre türeviyle ilişkili olduğu görülmektedir. Ya da Eşitlik 11'de motor bobini uçlarında oluşan gerilim bobinlerden geçen akımın zamana göre türeviyle ilişkili olduğu ifade edilmiştir. Bu nedenle NARX sinir ağları ile modelleme doğru akım motor kontrolü için sıklıkla kullanılmaktadır [35–37]. Ayrıca, güneş ışınımının tahmini [38] ve uçuşa elverişlilik tahmini [39] gibi tahmin uygulamalarında da kullanılmıştır.

NARX ağları, doğru akım motorunun hızı, akımı ve diğer dinamik değişkenleri gibi giriş ve çıkış değişkenlerini kullanarak motor davranışını tahmin etmek için eğitilebilir. Bu ağlar, genellikle motor hızı ve akımını ölçen sensörlerden gelen geri besleme bilgilerini kullanarak motoru gerçek zamanlı olarak kontrol etmek için kullanılır. Ancak, doğru akım motorunun kontrolü için NARX ağları kullanmadan önce, sistemin tanımlanması ve gereksinimlerin tam olarak belirlenmesi gerekir. Ayrıca, ağın eğitilmesi için yeterli miktarda veri toplanması ve verilerin doğru bir şekilde önceden düzenlenmesi gerekir. Bu çalışmada, dışsal girdi ($Hız$) ve çıkış (V) değişkenlerinde 2 birimlik gecikme uygulanmıştır. Zaman serisi örüntülerinin daha iyi öğrenilmesi amacıyla gecikme miktarı 5 ve 10 birim kullanıldığında, eğitim süresinin hesapsal maliyet nedeniyle oldukça yükseldiği ancak doğruluk değerinin 2 birimlik gecikmeyle hemen hemen aynı kaldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle gecikme miktarı 2 birim olarak sabitlenmiştir. Ayrıca, giriş ve çıkış verilerinde DAM1 ve DAM2'den toplanan değerlerin ardışık farkları alınarak yeni bir veri seti oluşturulmuş ve bu değerlerdeki gerçek ve geciktirilmiş veriler ile ters modelleme kullanılarak NARX ağının eğitimi gerçekleştirilmiştir. Böylece voltaj ve hız değerlerindeki zamana bağlı değişimlere karşı denetleyicinin hassasiyeti artırılmıştır.

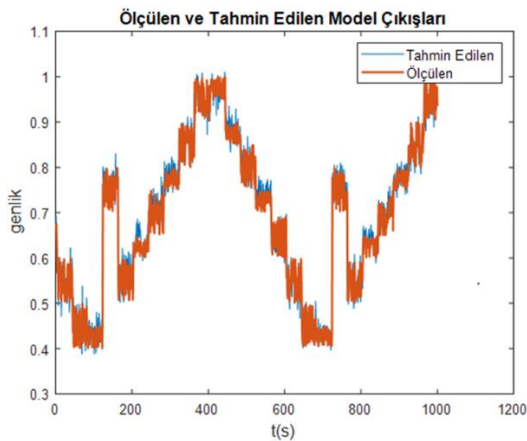
Denetleyici sistemde toplam 20 nörondan oluşan tek gizli katmana sahip ileri beslemeli ve geri yayınlı bir sinir ağı mimarisi kullanılmıştır.

Yapay sinir ağı tasarımı, problem bağlamına, veri setinin özelliklerine ve performans hedeflerine bağlı olarak değişebilmektedir. Tasarım sürecinde, en uygun parametrelerin belirlenmesi için deneysel süreçler gerçekleştirilmiş ve modellerin performansı takip edilmiştir. Doğruluğu arttırmak amacıyla gizli katman sayısının artırıldığında giriş sayısının fazla olması nedeniyle hesapsal maliyetin yükseldiği ve bunun sonucu olarak işlem sürelerinin yükseldiği gözlenmiştir. Bu nedenle gizli katman sayısı bir adet olarak ayarlanmıştır. Toplanan verileri eğitmek ve tahminler gerçekleştirmek üzere kullanılan ağ mimarisi Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5. Veri güdümlü NARX mimarisi (Data-driven NARX architecture)

Eğitim neticesinde elde edilen doğrusal olmayan model ile ölçüm sonuçların bir bölümü Şekil 6’da grafiksel olarak sunulmuştur.



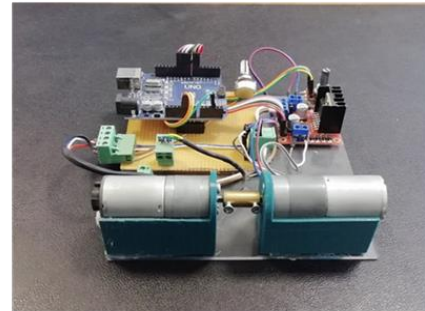
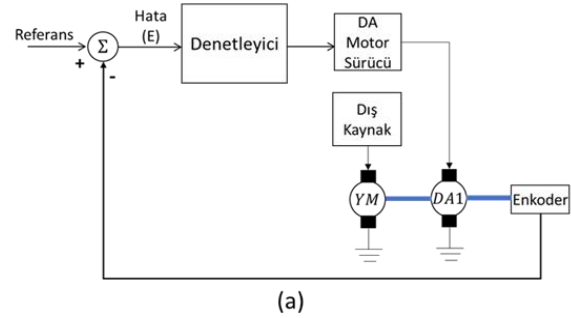
Şekil 6. Tasarlanan NARX modeli giriş-çıkış örtüşme grafiği (Input-output overlap graph of the designed NARX model)

Bu şekilde görev oranı ($V(t)$) ve dönüş hızı ($Hız(t)$) arasındaki zamana bağlı örüntülerin daha yüksek doğrulukla ortaya çıkarılmasını hedeflenmektedir. 20’den daha az nöron sayılarıyla yapılan denemelerde,

test verilerindeki MSE performansının yeterli olmadığı gözlenmiştir. Sinir ağı modelinin eğitim ve tahmin süreçlerinde Matlab R2019 manuel kodlama teknikleri kullanılmıştır. VGK-NARX tanımlamasında DAM1 ve DAM2 yaklaşık 6’şar saat çalıştırılarak 25000 adet giriş-çıkış verisi toplanmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

DAM1 ve DAM2 kullanılarak gerçek zamanlı olarak toplam 72 deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde motorlar sabit yük, %20 saptırıcı yük ve %40 saptırıcı yük ile çalıştırılmış ve denetleyicilerin yanıtları ölçülmüştür. Her bir deney üç defa tekrarlanmış ve sonuçların ortalamaları alınmıştır. Deneylerde DAM1 ve DAM2’nin milleri 12 V-500 rpm’lik bir yük motoru (YM) ile akuple edilmiştir. YM %20 ve %40 görev oranına sahip PWM sinyalleri ile ters yönde çalıştırılarak bozucu etki oluşturulmuş ve yükün ayarlı bir şekilde değiştirilebilmesi sağlanmıştır. Kurulan deneysel donanımın şematik gösterimi Şekil 7’de verilmiştir.

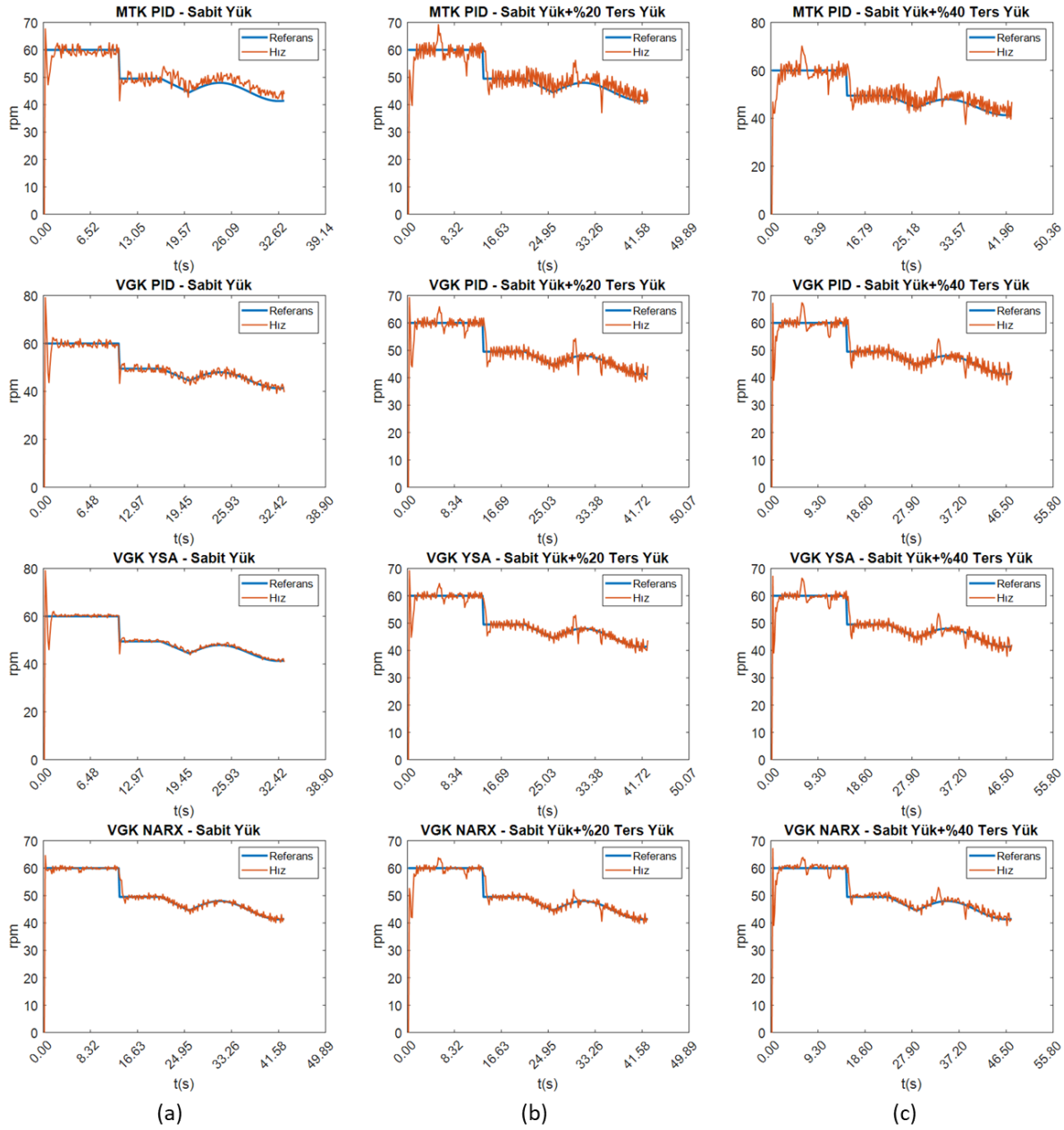


Şekil 7. Kurulan deney setinin (a) şematik gösterimi, (b) gerçek görünümü ((a) Schematic representation, (b) actual appearance of the experimental set)

Denetleyicilerin ayar noktası (referans) olarak basamak, rampa ve sinüs eğrilerinden oluşan bir bileşke sinyal kullanılmıştır. DAM1 ve DAM2 için sinyal tipleri aynı ancak uç değerleri motor devir hızlarına göre değiştirilmiştir. Ölçme işlemlerinde; toplam hata (E_{top}), yükselme zamanı (t_r) ve en yüksek yüzde aşma (M_p) performans ölçütleri kullanılmıştır. Denetleyicilerin ani yük değişimlerine karşı tepkilerini ölçmek amacıyla iki tip yük değişimi gerçekleştirilmiştir. İlk ani değişim

referans sinyalin basamak sinyali kısmında uygulanmış, ikinci ani değişim ise sinüs eğrisinde uygulanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, MTK-PID, VGK-PID, VGK-YSA ve VGK-NARX denetleyicilerin DAM1 ve

DAM2'de sabit yük, %20 ters yük ve %40 ters yük kullanılarak gerçekleştirdiği performansların grafiksel sunumu Şekil 8-9'da verilmiştir.



Şekil 8. DAM1 için sırasıyla MTK-PID, VGK-PID, VGK-YSA ve VGK-NARX denetleyicilerinin (a) sabit yük, (b) sabit yük + %20 ters yük değişimi, (c) sabit yük + %40 ters yük değişimi tepkileri ((a) Constant load, (b) constant load + 20% reverse load change, (c) constant load + 40% reverse load change responses of MTK-PID, VGK-PID, VGK-YSA and VGK-NARX controllers for DAM1, respectively)

Grafiklerdeki b ve c sütunlarında pozitif/negatif tepe noktaları şeklinde bozucu etkilerin devreye giriş ve çıkış noktaları açıkça gözlenebilmektedir. Denetleyicilerin %20 ve %40'lık ani yük değişimlerine olan yanıtlarını ölçmek için, iki yeni performans ölçütü hesaplanmıştır. İlk performans ölçütü yanıt süresidir. Ani değişimden sonra denetleyicinin ne kadar süre içerisinde referansa geri döndüğünü gösterir. İkincisi ise aşma miktarıdır. Ani yük değişiminde referanstan sapmayı yüzde oran olarak

göstermektedir. Şekillerden anlaşılacağı üzere, DAM1 ve DAM2 için her dört denetleyicide de referans sinyal takibi başarılıdır. Ancak, saptırıcı yük oranı yükseldikçe gürültü miktarının arttığı gözlenmiştir. Herhangi bir filtrelemenin yapılmaması ve motorlar ile YM'nun eksenlenmesindeki sorunlar da oluşan gürültüde etkili olmuştur. Yapılan deneylerde tüm performans ölçütleri uygulanan yazılım üzerinden gerçek zamanlı olarak ölçülmüştür.



Şekil 9. DAM2 için sırasıyla MTK-PID, VGK PID, VGK-YSA ve VGK-NARX denetleyicilerinin (a) sabit yük, (b) sabit yük + %20 ters yük değişimi, (c) sabit yük + %40 ters yük değişimi tepkileri ((a) Constant load, (b) constant load + 20% reverse load change, (c) constant load + 40% reverse load change responses of MTK-PID, VGK PID, VGK-YSA and VGK-NARX controllers for DAM1, respectively)

Sabit yük ile yapılan deneme çalışmalarından birine ait video: <https://youtu.be/OrVTpGrQoD4> adresinde sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde tüm performans ölçütlerinde en iyi sonuçların VGK-YSA ve VGK-NARX yönteminde gerçekleştiği gözlenmiştir. MTK-PID yönteminde ise başarılı sonuçlar alınamamıştır. Ani yük değişimleri, özellikle t_r ölçütünde sabit yük, %20 ve %40 ters yüklerde belirgin bir fark oluşmamıştır. Ayrıca VGK-NARX'de başlangıç aşmalarının çok düşük olduğu gözlenmiştir. Yük değişimleri motorların hızlarını arttıracak şekilde uygulanmıştır. Denetleyicilerden beklenti, artan hızın

tekrar referans hıza döndürülmesidir. Yük değişimleri referans olarak verilen hız değerlerinin iki ayrı bölgesinde motorlara uygulanmıştır. İlk uygulama anı referans değerlerin basamak sinyali şeklinde olduğu ilk 25s içinde, ikinci uygulama anı ise referans sinyalin sinüs eğrisi olduğu 50-70s aralığındadır. DAM1 ve DAM2 için elde edilen performans sonuçları Çizelge 4'de verilmiştir. Motorlara uygulanan %20 ve %40'luk ani yük değişimlerine karşı denetleyicilerin ürettikleri yanıtlar Çizelge 5'de verilmiştir. Ani yük değişimlerinin motorlara iki etkisi oluşmaktadır

Çizelge 4. DAM1 ve DAM2 için denetleyici ve yük tipine göre performans sonuçları (Performance results by controller and load type for DAM1 and DAM2)

Motor Tipi	YÜK	Performans	MTK-PID	VGK-PID	VGK-YSA	VGK-NARX
DAM1	Sabit yük	E_{top}	12,55	6,86	4,13	3,73
		M_p (%)	12,85	31,94	30,14	7,75
		t_r (s)	1,83	1,82	1,6	1,65
	%20 Ters Yük	E_{top}	13,7	8,94	6,93	6,13
		M_p (%)	6,94	15,45	15,1	2,1
		t_r (s)	1,63	2,05	1,9	1,58
	%40 Ters Yük	E_{top}	14,88	9,05	7,80	6,45
		M_p (%)	6,27	11,95	10,9	11,9
		t_r (s)	1,66	1,95	1,9	1,95
DAM2	Sabit yük	E_{top}	10,71	6,1	4,9	4,22
		M_p (%)	7,65	7,65	7,7	4,4
		t_r (s)	1,55	1,25	1,15	1,1
	%20 Ters Yük	E_{top}	11,37	7,1	5,7	4,75
		M_p (%)	5,9	5,9	9,4	9,35
		t_r (s)	1,75	1,45	1,45	1,46
	%40 Ters Yük	E_{top}	12,85	8,6	6,65	6,1
		M_p (%)	5,5	7,95	9,38	9,9
		t_r (s)	1,75	1,45	1,55	1,55

İlk etki, YM devreye girdiği anda hızın aniden yükselmesi, ikinci etki ise YM devreden çıktığı anda hızın ani olarak düşmesidir. Şekil 4-5’de verilen grafiklerde bu etkiler açıkça görülebilmektedir.

Çizelge 5. DAM1 ve DAM2’nin ani yük değişimi tepkileri (Sudden load change responses of DAM1 and DAM2)

Motor	Yük Tipi	Performans	MTK-PID	VGK-PID	VGK-YSA	VGK-NARX
DAM1	%20 Ters yük	Yanıt Süresi (s)	2,1	1,9	1,8	1,8
		Aşma (%)	15,5	10,5	7,5	5,5
	%40 Ters yük	Yanıt Süresi (s)	2,4	2	1,8	1,9
		Aşma (%)	15,5	13,5	8,5	5,5
DAM2	%20 Ters yük	Yanıt Süresi (s)	2,2	2	2	2,1
		Aşma (%)	21,5	21,5	18	7,5
	%40 Ters yük	Yanıt Süresi (s)	2,6	2,1	2,2	2,7
		Aşma (%)	33,5	32,5	24,5	20,5

Çizelgeler incelendiğinde ani yük değişimlerine yanıt süresi olarak en hızlı yanıtı VGK-YSA ve VGK-NARX yöntemlerinin oluşturduğu gözlenmiştir. Aşma değerlerinde tespit edilen en yüksek aşma oranı çizelgeye aktarılmıştır. Aşma yüzdesi olarak VGK-NARX en iyi performansı göstermiş ve aşma yüzdeleri düşük değerlerde tutabilmiştir. VGK-NARX ‘de aşma yüzdeleri düşük olmasında hızlı yanıt süresinin etkili olduğu değerlendirilmiştir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada DA motor hız kontrolünde üç yöntemin ani yük değişimlerine karşı dirençleri incelenmiştir.

Kullanılan yöntemlerden MTK- PID yöntemi doğrusal, diğerleri ise doğrusal olmayan kontrol yöntemleridir. Deneysel çalışmalarda kullanılan DAM1 ve DAM2 motorlarının söz konusu yöntemler ile modelleri çıkarılmıştır. Doğrusal yöntem için motorların katalog bilgileri ve ölçmeye dayalı elde edilen bilgilerinden bir matematiksel model çıkarılmış, doğrusal olmayan yöntemlerde ise SI ve SISO araç kutusu ile birlikte YSA ve NARX modelleri için yapay sinir ağları kodlama teknikleri kullanılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalarda denetleyicilerin hem denetleme süreçlerindeki performansları hem de ani yük değişimlerine karşı tepkisel davranışları analiz edilmiş ve

standart ölçütler kullanılarak kayıt altına alınmıştır. Sonuç olarak; VGK-NARX yöntemiyle denetlenen DA motorların diğer yöntemlere göre hem performans hem de bozucu etkilere karşı tepki anlamında daha başarılı olduğu değerlendirilmiştir. MTK-PID’de transfer fonksiyonu hesabında bazı iç dinamiklerin dikkate alınmaması, dikkate alınan parametrelerde de ölçüm hataları vb. sebepler nedeniyle en doğru transfer fonksiyonu hesaplanamamıştır. Simülasyon programlarında ihmal edilen özellikler hesaba katılmadığı için daha yüksek performanslar alınabilmektedir ancak gerçek zamanlı çalışmalarda bu durum performans bozulmalarına yol açmaktadır. Bu nedenle MTK_PID’de tüm iç dinamiklerin tespit edilemediği değerlendirilmektedir. Veri güdümlü kontrol yöntemleri motorlardan alınan verilere göre tasarlandıkları için model tabanlılara göre daha iyi sonuçlar üretmiştir. VGK-PID performansı MTK-PID’den daha başarılıdır ancak bu yöntem de VGK-YSA’nın adaptasyon ve genelleme yeteneği ile başa çıkamamıştır. VGK-YSA’da görev oranları ile dönüş hızları arasında oluşturulan haritalama sayesinde doğru kontrol sinyalleri üretilebilmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır. Ancak en başarılı sonuçlar zaman serisi tabanlı bir YSA olan VGK-NARX denetleyicide alınmıştır. Bunun sebebi DA motorların giriş-çıkış veri çiftlerinde gizlidir. Giriş-çıkış verileri analiz edildiğinde aşağıdaki örneğe benzer örüntülerle karşılaşmıştır. Örneğin 0.5 görev oranından bir önceki görev oranı 0.9 ise yani giriş azalma seyrinde ise 0.5 değeri farklı bir dönüş hızı oluşturmakta, bir önceki görev oranı 0.1 ise yani giriş yükselme seyrinde ise farklı bir dönüş hızı oluşturmakta, girişler sabit seyrinde ise farklı bir dönüş oranı oluşturmaktadır. Yani çıkışlar için eski giriş değerlerinin de dikkate alınması gerekliliği bulunmaktadır. Buna en uygun yöntem VGK-NARX olduğu için en başarılı performans ve yük değişimi tepki sonuçların VGK-NARX’de alındığı değerlendirilmektedir.

Ancak, kullanılan yöntemlerin hesapsal ve zamansal maliyetleri incelendiğinde VGK-NARX yönteminin diğer yöntemlere göre oldukça yüksek maliyetli olduğu belirlenmiştir. VGK-PID yönteminde DA motorların modellenmesi amacıyla yaklaşık 500 adet, VGK-YSA’da 12360 adet voltaj ve hız verisi yeterli olmuşken sağlıklı bir NARX modellemesi için bu verilerden 25000 adet kullanılmıştır. Özellikle veri ön işleme adımları için uzun süreli veri toplama ve kodlamaya ihtiyaç duyulmaktadır. Gelecek dönemlerde aynı platformda bu yöntemin diğer yapay zekâ temelli yöntemlerle performans ve bozucu etki dirençlerinin karşılaştırması yapılacaktır.

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)

Güray SONUGÜR: Çalışmanın tüm süreçlerini gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Carlet, P.G., Favato, A., Bolognani, S., Dorfler, F., “Data-driven predictive current control for synchronous motor drives,” *ECCE 2020 - IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 5148–5154, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, (2020).
- [2] Özlük, F., Sayan, H., Üniversitesi, G., et al., “Matlab GUI ile DA Motor için PID Denetleyicili Arayüz Tasarımı,” *Journal of Advanced Technology Sciences*, 3(3): 10–18, (2013).
- [3] Manjunatha, H.K.R., Immanuel, J., Parvathi, C.S., Bhaskar, P., Sudheer, L.S., “Implementation of PID controller in MATLAB for real time DC motor speed control system”, *Sensors and Transducers* 126(3): 110–118, (2011).
- [4] Ekinci, S., Hekimoglu, B., Demiroren, A., Eker, E., “Speed Control of DC Motor Using Improved Sine Cosine Algorithm Based PID Controller,” *3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, ISMSIT 2019 - Proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, 1-7, (2019).
- [5] Gökçe, B., Koca, Y.B., Aslan, Y., “Doğru Akım Motorunun PID ile Hız Kontrolü ve Zorlamalı Yükler Altında Performans Analizi,” *European Journal of Science and Technology*, 21: 549–554, (2021).
- [6] Zhang, S., Gu, W., Hu, Y., Du, J., Chen, H., “Angular speed control of brushed DC motor using nonlinear method: Design and experiment,” *Chinese Control Conference - CCC*, 1045–1050, (2016).
- [7] Çavdar, B., Sahin, E., Nuroglu, F., "Doğru Akım Motoru Hız Kontrolü için SAA Tabanlı Kesir Dereceli PI-PD Eklemeli Denetleyici Tasarımı", *Politeknik Dergisi*, 1-1, (2023).
- [8] Maarif, A., Setiawan, N.R., “Control of DC Motor Using Integral State Feedback and Comparison with PID: Simulation and Arduino Implementation,” *Journal of Robotics and Control (JRC)* 2(5): 456–461, (2021).
- [9] Kumar Bansal, U., Narvey, R., “Speed Control of DC Motor Using Fuzzy PID Controller”, *Advance in Electronic and Electric Engineering*, 1209–1220 (2013).
- [10] Thomas, N., Poongodi, P., “Position Control of DC Motor Using Genetic Algorithm Based PID Controller”, *Proceedings of the World Congress on Engineering 2009 Vol II, WCE*, London, 1–5, (2009).
- [11] Yüksek, G., Naci METE, A., Alkaya, A., “PID parametrelerinin LQR ve GA tabanlı optimizasyonu: sıvı seviye kontrol uygulaması,” *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1111–1119, (2020).
- [12] Rahayu, E.S., Ma’arif, A., Cakan, A., “Particle Swarm Optimization (PSO) Tuning of PID Control on DC Motor”, *International Journal of Robotics and Control Systems*, 2(2): 435–447, (2022).

- [13] Weerasooriya, S., El-Sharkawi, M.A., "Identification and Control of a DC Motor Using Backpropagation Neural Networks", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 6(4): 663–669, (1991).
- [14] Bulut, M., "Bulanık Ters Model Kullanılarak Doğru Akım Motor Sürücüsü için Referans Model Temelli Uyarlanabilir Bulanık Denetleyici", *Politeknik Dergisi*, 26(2): 593-602, (2023).
- [15] Chaudhary, H., Khatoun, S., Singh, R., "ANFIS based speed control of DC motor", *2nd IEEE International Conference on Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their Impact on Humanity, CIPECH*, Ghaziabad, India, 63–67, (2017).
- [16] Alkurawy, L.E.J., Khamas, N., "Model predictive control for DC motors", *1st International Scientific Conference of Engineering Sciences - 3rd Scientific Conference of Engineering Science, ISCES*, Diyala, Iraq, 56–61, (2018).
- [17] Emiroğlu, A., Yaren, T., Kizir, S., "Kendinden Ayarlanabilir Denetleyici ile DA Motor Hız Kontrolü", *Politeknik Dergisi*, 25(2): 757-765, (2022).
- [18] Naung, Y., Schagin, A., Oo, H.L., Ye, K.Z., Khaing, Z.M., "Implementation of data driven control system of DC motor by using system identification process", *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus*, St. Petersburg, Russia, 1801–1804, (2018).
- [19] Supeni, E., Yassin, I.M., Ahmad, A., Abdul Rahman, F.Y., "NARMAX identification of DC motor model using repulsive particle swarm optimization", *Proceedings of 2009 5th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications- CSPA*, Kuala Lumpur, Malaysia, 1–7, (2009).
- [20] Moradi, M., Abhari, S., Dehghan, F., "DC motor control with comparative method for controller validation", *3rd International Conference on Advanced Computer Control, ICACC*, 465–469 (2011).
- [21] Chandramouleeswaran, G., Prabhu, M., Rajalakshmi, M., et al., "ANN based PID controlled brushless DC drive system", *Int. J. on Electrical and Power Engineering*, 3(1): 45–49, (2012).
- [22] Hamoodi, S.A., Sheet, I.I., Mohammed, R.A., "A Comparison between PID controller and ANN controller for speed control of DC Motor", *2nd International Conference on Electrical, Communication, Computer, Power and Control Engineering- ICECCPCE*, Mosul, Iraq, 221–224, (2019).
- [23] Doğruer, T., "DC Motorun Hız Kontrolü İçin Kesir Dereceli PİD Kontrolör Tasarımı Ve Dayanıklılık Analizi", *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19: 15–28, (2023).
- [24] Al Nisa, S., Mathew, L., Chatterji, S., "Comparative Analysis of Speed Control of DC Motor Using AI Technique," *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 3(3): 1137–1146, (2013).
- [25] Sonugür, G., "A Review of quadrotor UAV: Control and SLAM methodologies ranging from conventional to innovative approaches", *Robotics and Autonomous Systems*, 161, 104342, (2023).
- [26] Harshitha, S., Shamanth, S., Chari, A.K., "A Review of Various Controller Techniques Designed for the Operational Control of DC and Servo Motors", *Journal of Physics: Conference Series*, 2273(1): 012001, (2022).
- [27] Junaid, A. Bin, Konoiko, A., Zweiri, Y., Sahinkaya, M.N., Seneviratne, L., "Autonomous wireless self-charging for multi-rotor unmanned aerial vehicles", *Energies*, 10(6): 1–14, (2017).
- [28] Castillo-Zamora, J.J., Camarillo-Gomez, K.A., Perez-Soto, G.I., Rodriguez-Resendiz, J., "Comparison of PD, PID and sliding-mode position controllers for v-tail quadcopter stability", *IEEE Access*, 6: 38086–38096, (2018).
- [29] Vural, A.M., Bayindir, K.C., "Optimization of parameter set for STATCOM control system", *2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Smart Solutions for a Changing World*, New Orleans, LA, USA, 1-6, (2010).
- [30] J Ziegler, J.G., Nichols, N.B., "Optimum Settings for Automatic Controllers", *Journal of Fluids Engineering*, 64(8): 759–765, (1942).
- [31] Hou, Z.S., Wang, Z., "From model-based control to data-driven control: Survey, classification and perspective", *Information Sciences*, 235: 3–35, (2013).
- [32] Cohen, C., Coon, C.G., "Theoretical considerations of optimal control", *Journal of the Franklin Institute*, 255(4): 261–297, (1953).
- [33] Mohamed, T.L.T., Mohamed, R.H.A., Mohamed, Z., "Development of auto tuning PID controller using Graphical User Interface (GUI)" *2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Applications-ICCEA*, 1: 491–495, (2010).
- [34] El-Khouly, F.M., Sharaf, A.M., Abdel-Ghaffar, A.S., Mohammed, A.A., "Adaptive neural network speed controller for permanent magnet DC motor drives", *Proceedings of the Annual Southeastern Symposium on System Theory*, 416–420, (1994).
- [35] Ismeal, G.A., Kyslan, K., Fedák, V., "DC motor identification based on Recurrent Neural Networks", *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics, Mechatronika*, Brno, Czech Republic, 701–705, (2014).
- [36] Munagala, V.K., Jatoth, R.K., "A novel approach for controlling DC motor speed using NARXnet based FOPID controller", *Evolving Systems*, (2022).
- [37] Chertovskikh, P.A., Sereдкин, A. V., Gobyzov, O.A., Styuf, A.S., Pashkevich, M.G., Tokarev, M.P., "An adaptive PID controller with an online auto-tuning by a pretrained neural network", *Journal of Physics: Conference Series*, 1359, 012090, (2019).
- [38] Arı, A., Aktaş, M., Yönetken, A., Doğan, R., "Güneş Işınım Tahmininde NARX Modelinin Uygulanması", *International Journal of Engineering Technology and Applied Science*, 4(1): 1–6, (2021).
- [39] Tatlı, A., Kahvecioğlu, S., "NARX Neural Networks Based Time Series Prediction for Amount of Airworthiness Time", *National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO)*, Bursa, Turkey, 8–12, (2016).