



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Kendinden ayarlamalı denetleyici ile DA motor hız kontrolü

## *Speed control of DC motor with self-tuning controller*

*Yazar(lar) (Author(s)): Alperen EMİROĞLU<sup>1</sup>, Tuğçe YAREN<sup>2</sup>, Selçuk KİZİR<sup>3</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-1096-2572*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-9937-3111*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-0582-5904*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Emiroğlu A., Yaren T. ve Kizir S., "Kendinden ayarlamalı denetleyici ile DA motor hız kontrolü", *Politeknik Dergisi*, 25(2): 757-765, (2022).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.840519

# Kendinden Ayarlamalı Denetleyici ile DA Motor Hız Kontrolü

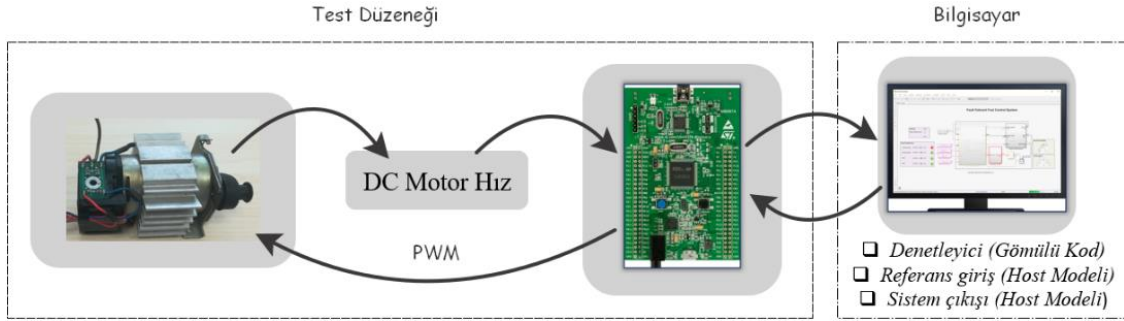
## Speed Control of DC Motor with Self-Tuning Controller

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Kendinden Ayarlamalı Denetleyici / Self-Tuning Regulator
- ❖ Hızlı Kontrol Prototipleme / Rapid Control Prototyping
- ❖ Özyinelemeli En Küçük Kareler Yöntemi / Recursive Least Squares Method
- ❖ Kutup Atama / Pole Placement

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

DA motorun hız kontrolü, bilinmeyen sistem parametreleri varlığında, kendinden ayarlamalı denetleyici tasarımı ile Matlab/Simulink ortamında hızlı kontrol prototipleme tekniğine uygun olarak gerçek zamanda gerçekleştirilmiştir.



**Şekil.** Hızlı kontrol prototipleme yapısı ile motor hız kontrolü / **Figure.** The motor speed control with the structure of rapid control prototyping

### Amaç (Aim)

Bu çalışmada DA motor hız kontrolü kendinden ayarlamalı denetleyici ile gerçekleştirilmiştir. / In this study, the speed control of the DC motor was performed using self-tuning regulator.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

DA motor eşdeğer devresinden sistem transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Sistem parametrelerinin tahmin algoritması için özyinelemeli en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Kutup yerleştirme kontrolcü tasarımında gürültüsüz ARX modeli ile temsil edilen sistem ele alınmıştır. / The system transfer function is obtained from the DC motor equivalent circuit. The recursive least squares method is used for the estimation algorithm of system parameters. In the design of the pole placement controller, the system represented by the noiseless ARX model is considered.

### Özgünlük (Originality)

Tasarlanan denetleyici bir DA motor test düzeneğinde deneysel olarak test edilmiş performans analizi yapılmıştır. / The designed controller has been tested on a DC motor test setup and its performance analysis has been performed.

### Bulgular (Findings)

Tek, rastgele ve tekrarlı olmak üzere farklı karakteristiğe sahip referans girişler karşısında denetleyici başarılı performans sergilemiştir. / The controller performed successfully against reference inputs with different characteristics, including single, random and repetitive.

### Sonuç (Conclusion)

Yapılan tüm deneyler incelendiğinde DA motorun referans hız değerine göre hız kontrolünün arzu edilen şekilde gerçekleştirildiği gözlenmiştir. Gerçekleştirilen uygulamada kullanılan test düzeneği ve yöntemler hem güvenilir çalışma hem de ekonomik çözüm sunmuştur. / When all the experiments were analyzed, it was observed that the speed control was performed as desired according to the reference speed value of the DC motor. The test setup and methods used in the application provided both reliable operation and economical solutions.

### 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.

# Kendinden Ayarlamalı Denetleyici ile DA Motor Hız Kontrolü

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Alperen EMİROĞLU, Tuğçe YAREN\*, Selçuk KIZIR**

Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 14.12.2020 ; Kabul/Accepted : 17.02.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 23.02.2021)

## ÖZ

Bu çalışmada, sabit mıknatıslı bir Doğru Akım (DA) motorunun hız kontrolü, bilinmeyen sistem parametreleri varlığında, kendinden ayarlamalı denetleyici tasarımı ile gerçek zamanda gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan denetleyici Matlab/Simulink ortamında hızlı kontrol prototipleme tekniğine uygun olarak hazırlanmış ve Waijung blok seti ve düşük maliyetli STM32F4 uygulama geliştirme kiti kullanılarak geliştirilmiştir. Parametre kestirimi ve denetleyici tasarımı için özyinelemeli en küçük kareler yöntemi ve kutup atama yöntemi uygulanmıştır. Kontrolcü performansının test edilmesi için farklı karakteristiğe sahip referans girişler sisteme uygulanmış ve test düzeneği üzerinde elde edilen deneysel sonuçlar gözlenmiştir. Sistem çıkışının tüm referans girişleri başarılı bir şekilde takip etmesi ile tasarlanan kontrolcünün performansı net bir şekilde ortaya çıkarılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** DA motor, gerçek zamanlı kontrol, kendinden ayarlamalı denetleyici, STM32F4, waijung blok set.

# Speed Control of DC Motor with Self-Tuning Controller

## ABSTRACT

In this study, the speed control of a permanent magnet brushed Direct Current (DC) motor was performed in real-time using a self-tuning controller design with the unknown system parameters. The designed controller was prepared in Matlab/Simulink environment in accordance with the rapid control prototyping technique and was developed using the Waijung block set and low-cost STM32F4 development kit. The recursive least squares method and pole assignment method were applied for parameter estimation and controller design. In order to test the controller performance, reference inputs with different characteristics were applied to the system and the experimental results obtained on the test setup were observed. The performance of the designed controller is clearly understood by the system output following all reference inputs successfully.

**Keywords:** DC motor, real time control, self-tuning controller, STM32F4, waijung block set.

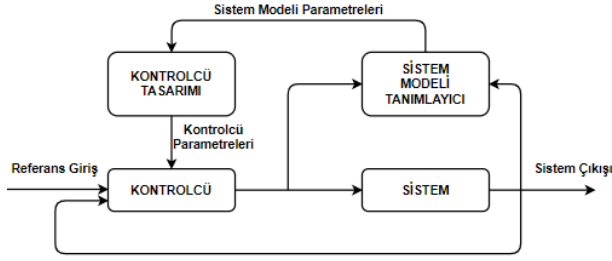
## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geleneksel geri beslemeli kontrol yöntemlerinin uygulanması için sistem davranışı ve sistem özellikleri hakkında bilgi sahibi olunması gerekmektedir. Ayrıca belirlenen sabit kontrol katsayıları; sistemin dinamik yapısının değişmesi, çevresel durumlar ve bozucu etkiler gibi koşullar için uygun olmalıdır. Çoğu zaman tüm koşullar için sistem özelliklerini belirlemek mümkün olmayabilir ve bu gibi durumlarda tasarlanan kontrolör yetersiz performans gösterir. Bu nedenlerden dolayı uyarlanabilir kontrol uygulama alanı önemli bir hale gelmiştir [1]. Uyarlama yaklaşımının amacı, rastgele bozulmalara maruz kalan bilinmeyen parametrelere sahip sistemlerin kontrolör tasarımına yönelik bir çözüm bulmaktır [2]. Kendinden ayarlamalı denetleyici (Self Tuning Regulator) bu alanda geliştirilmiş birkaç yaklaşımdan birisidir ve uygulamalarda büyük bir başarı göstermiştir.

Kendinden ayarlamalı denetleyici ilk olarak 1958 yılında Kalman tarafından geliştirilmiştir [3]. Yüksek hızlı bilgisayarların bulunmaması ve yetersiz altyapıya sahip teorik bilgi nedeniyle, bu yaklaşımın ekonomik olarak uygulanabilir hale gelmesi 70'li yıllarda mikroşemcilerin ortaya çıkması ile mümkün olmuştur [4]. Kendinden ayarlamalı denetleyicilerin temel düşüncesi, gerçek bir sistemin ölçülen giriş ve çıkış davranışlarına göre kontrolör kapalı döngü sisteminin istenen özelliklerini elde etmek için kontrol parametrelerinin otomatik olarak ayarlanabilmesidir. Kendinden ayarlamalı denetleyici şeması, temel tasarım ve tahmin yöntemleri seçimi konularında oldukça esneklerdir [5]

Kendinden ayarlamalı denetleyici yapısında, sistem parametrelerinin çevrimiçi olarak belirlenebilmesi ve sistem çalışma koşullarının değişimine göre ayarlanabilir olması sebebiyle, sistem tanımlama büyük önem taşımaktadır. Sistem parametrelerinin belirlenebilmesi için özyinelemeli parametre tahmincisi kullanılmaktadır [6]. Kendinden ayarlamalı denetleyicinin genel yapısı Şekil 1'de görülmektedir.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : tugce.yaren@kocaeli.edu.tr



Şekil 1. Kendinden ayarlamalı denetleyici genel yapısı (Self-tuning controller general structure)

Arıcı ve Arslan [5], sabit mıknatıslı DA motorun hız kontrol problemini gürültü ve bilinmeyen parametrelerin varlığında, kendinden ayarlamalı denetleyici yapısını kullanarak çözümlenmişlerdir. Simülasyon ortamında yapılan testlerde kontrolörün performansını görebilmek adına farklı referans girişler uygulanmış olup, özyinelemeli en küçük kareler yaklaşımının sistem parametrelerini doğru bir şekilde hesapladığı ve kutup yerleştirme kontrolörünün gürültü varlığında hızı düzenlediği sonucuna varmışlardır. Yurdakul [1], kutup atamalı kendinden ayarlamalı PID denetleyici tasarımı ve sabit mıknatıslı DA motorun hız kontrol uygulamasını incelemiştir. Hem simülasyon ortamında hem de deneysel olarak sonuçlar incelenmiş olup, kontrolör yönteminin hızlı bir yanıt verdiğini ve iyi bir kararlılık sağladığını, Ziegler-Nichols ve Cohen-Coon gibi geleneksel PID kontrolcülerinden daha iyi sonuç verdiğini gözlemlemiştir.

Bu çalışmada, sabit mıknatıslı bir doğru akım motorun hız kontrolü, bilinmeyen sistem parametreleri varlığında, kendinden ayarlamalı denetleyici ile Matlab destekli Waijung blok seti ve STM32F4 uygulama geliştirme kiti kullanılarak gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Parametre kestirimi için özyinelemeli en küçük kareler yöntemine ait algoritma kodu yazılmış ve çevrim-içi elde edilen sistem modeline göre denetleyici kazançları kutup atama yöntemine göre hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen uygulamada kullanılan test düzeneği ve yöntemler hem güvenilir çalışma hem de ekonomik çözüm sunması açısından öne çıkmaktadır. Ayrıca hızlı ve kolay bir şekilde uygulama geliştirilebileceği ve geliştirilen uygulamanın kontrol eğitiminde kolaylıkla kullanılabilirliği vurgulanmaktadır.

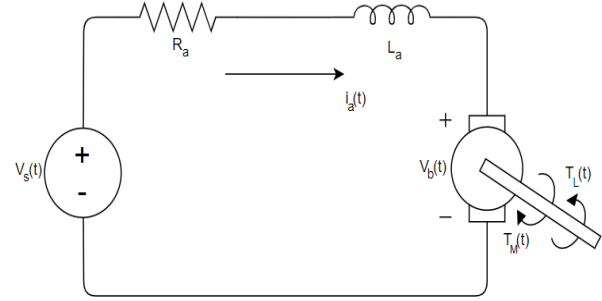
Tasarlanmış kontrol algoritmalarının etkinliğinin doğrulanması için gerçek zamanlı testlerin önemi aşikârdır. Fakat genellikle kontrolör tasarımcıları gerçek zamanlı uygulamalarda problem yaşamaktadır. Akademik düzeyde ele alınan kontrol teorisi uygulamalarında ise, çoğunlukla sistemin dinamik modelinin elde edilmesi ile birlikte bu modeller, bilgisayar ortamında uygulanıp, geliştirilmektedir. Ancak incelenen uygulamaların pratiğe dökülmesi teorinin uygulanabilirliği ve geçerliliği açısından önem taşımaktadır. Bu çalışma sayesinde hem teori hem de uygulama birlikte ele alınarak gerçek zamanlı bir test düzeneği üzerinde birçok deney başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Kendinden ayarlamalı denetleyici stratejisinin endüstriyel sistemlerde üstlenebileceği aktif rol gösterilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmanın farklı sistemlere uyarlanması ile endüstri uygulamaları başta olmak üzere birçok farklı uygulama alanında kullanılabilirliği öngörülmektedir. Ayrıca temel bir kontrol algoritmasının (kutup yerleştirme) pratikte kolayca uygulanması ile ayarlamalı kontrol yapısının anlaşılabilirliği artırılmıştır.

## 2. SİSTEM MODELİ (SYSTEM MODEL)

DA motorun matematiksel modeli elde edilirken; motorun elektriksel ve mekanik yapısından yararlanır. Şekil 2'de DA motorun eşdeğer devresi görülmektedir [7].

DA motorun elektriksel denklemi, Kirchoff'un gerilim yasasına göre Denklem 1'de tanımlanmıştır.



Şekil 2. DA motor eşdeğer devresi (DC motor equivalent circuit)

$$R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + v_b(t) = v_s(t) \quad (1)$$

Denklem 1'de kullanılan  $R_a$  (Ohm),  $L_a$  (Henry),  $i_a$  (Amper),  $v_b$  (Volt) ve  $v_s$  (Volt) sırasıyla armatür direnci, armatür endüktansı, armatür akımı, zıt elektromotor gerilimi ve uygulanan giriş gerilimi olarak ifade edilir. Zıt elektromotor gerilimi, motordaki rotorun açılma hızı,  $w$ (rad/sn), ile orantılı olarak Denklem 2'de ifade edilmiştir.

$$v_b(t) = k_e w(t) \quad (2)$$

$$T_m(t) = k_t i_a(t) \quad (3)$$

$$T_m(t) = J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + b \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (4)$$

$k_e$ (V/(rad/sn)), zıt elektromotor sabiti olarak ifade edilir. Motor torkunun  $T_m$ (N) armatür akımı ile doğru orantılı olduğunu söyleyebiliriz.

Denklem 4'de kullanılan  $J$ (kgm<sup>2</sup>),  $b$ (Nms) sırasıyla rotor atalet momenti ve viskoz sönümlenme olarak ifade edilebilir.

Yukarıda ele alınan denklemler zaman (t) uzayında ifade edilmiştir. Bu denklemlerin Laplace dönüşümleri alınarak s uzayındaki formlarına geçiş yapılır ve gerilim, zıt elektromotor kuvveti, moment denklemlerinden sistem transfer fonksiyonları elde edilir.

DA motor hız kontrolü yapılabilmesi için sistem girişi motora uygulanan gerilim (Volt), sistem çıkışı motorun hızı (rad/sn) olacak şekilde bir transfer fonksiyonu oluşturulmuştur.  $k_t$  ve  $k_e$  ifadeleri birbirlerine eşit olduklarından dolayı, bunların yerine  $k$  parametresi kullanılacaktır [8]. Elde edilen transfer fonksiyonu:

$$\frac{w(s)}{V(s)} = \frac{k}{(Js + b)(L_a s + R_a) + K^2} \quad (5)$$

$k_t$  (Nm/A), motor tork sabiti olarak ifade edilir. Mekaniksel yapıyı ele aldığımız zaman ise motor torku denklemi akımdan bağımsız şekilde ifade edilebilir.

Çizelge 1’de hız kontrolünü gerçekleştirdiğimiz DA motorun parametreleri görülmektedir. Çizelgede görülen DA motor parametre değerleri motor kataloğundan elde edilmiştir.

**Çizelge 1.** DA motor parametre değerleri (DC motor parameter values)

Parametre	Değeri	Birimi
Armatür direnci ( $R_a$ )	5	(ohm)
Armatür endüktansı ( $L_a$ )	2.9e-3	(H)
Rotor atalet momenti (J)	32e-7	(kgm <sup>2</sup> )
Viskoz sönümlenme (b)	0	(Nms)
Motor tork sabiti ( $k_t$ )	33.8e-3	(Nm/A)
Zıt elektromotor sabiti ( $k_e$ )	33.8e-3	(V/rad/sn)

### 3. KONTROL (CONTROL)

#### 3.1. Kendinden Ayarlamalı Denetleyici (Self-Tuning Control)

Parametre tahmin teorisinden, parametre belirlenmesi sürecinde bir dereceye kadar belirsizlik hatası olabileceği sonucu çıkarılabilir. Bu belirsizlik yalnızca tanımlanan adımların sayısına ve kontrollü sürecin matematiksel modeli için yapı seçimine bağlı olmayıp, aynı zamanda kontrolör çıktısının davranışına, örnekleme periyoduna ve kontrolörler için seçilen filtrelere de bağlıdır [9].

Kendinden ayarlamalı denetleyici, sistem parametrelerinin özyinelemeli olarak geçmiş girdi ve çıktıları kullanılarak tahmin edildiği ayrı bir modele ihtiyaç duyar. Özyinelemeli en küçük kareler tahmini, sistem parametrelerinin tahmini için yaygın olarak kullanılmaktadır [10]. Yaygın olarak kullanılmasının sebebi en küçük kareler tanımlama yönteminin, tahminlerdeki hataların karelerini içeren bir ölçüt işlevini en aza indirmeye dayanmasıdır.

Özyinelemeli en küçük kareler yönteminde kullanılan regresör vektörü ve çıktı vektörü [11] sırasıyla Denklem 6 ve 7’de görülmektedir.

$\varphi(t)$  vektörü, regresör vektörü olarak adlandırılır ve gerçek girdi/çıkı değişkenleri ve gürültü/bozulma değerlerinin ölçümlerinden oluşur. Denklem 8 ise

regresyon modeli olarak adlandırılmaktadır ve  $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$  vektörü, modelin bilinmeyen parametrelerinden oluşmaktadır.

$$\varphi(t) = \begin{bmatrix} \varphi(t-1) \\ \varphi^T(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$Y(t) = \begin{bmatrix} Y(t-1) \\ y^T(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$y(t) = \varphi_1(t)\theta_1 + \varphi_2(t)\theta_2 + \dots + \varphi_n(t)\theta_n = \varphi(t)^T \theta \quad (8)$$

Regresör vektöründe, ölçülen giriş ve çıkış değerlerine ek olarak bozulan sinyalin geçmiş değerleri de gereklidir. Bu durumda sistem parametrelerinin tahmin algoritması aşağıdaki denklemlerle ifade edilir.

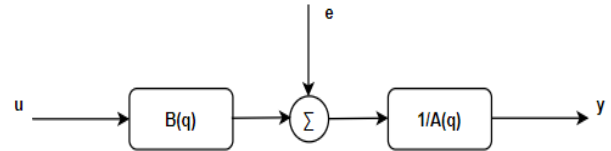
$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + K(t)[y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1)] \quad (9)$$

$$K(t) = P(t)\varphi(t) = P(t-1)\varphi(t)(I + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t))^{-1} \quad (10)$$

$$P(t) = (P(t-1))^{-1} + \varphi(t)\varphi^T(t))^{-1} \\ = \{P(t-1) - P(t-1)\varphi(t)(I + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t))^{-1}\varphi^T(t)P(t-1)\} \\ = (I - K(t)\varphi^T(t))P(t-1) \quad (11)$$

Denklem 9’da ifade edilen  $\hat{\theta}(t)$ , tahmin algoritmasının uygulanması sonucu edilen parametre vektörüdür. Denklem 10 ve 11’de ifade edilen  $P(t)$  ise kovaryans matrisidir. Özyinelemeli en küçük kareler algoritması, en küçük kareler algoritmasının tam matematiksel eş değeridir. Algoritma bir kez başlatıldığında, matrisleri tersine çevirmeye gerek yoktur. Matrisler her zaman aynı boyutta kalacaktır [11].

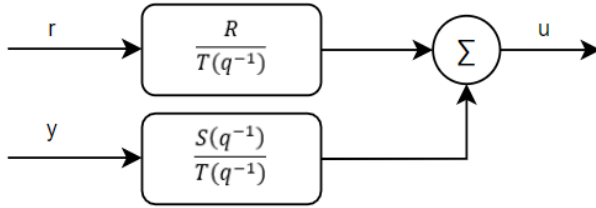
Şekil 3’te gösterilen ARX (Autoregressive-Exogenous) modeli uyarın sinyalini içeren en basit modeldir. ARX modelinin kestirimi, polinom kestirim yöntemlerinin en verimli olanıdır çünkü analitik formda doğru regresyon denklemleri çözmenin sonucudur [12]. ARX, özellikle otomatik ayarlamalı kontrolde kontrollü sistemlerin modellenmesi için sıklıkla kullanılır. ARX modellemenin popülerliği, temel olarak en küçük kareler yönteminin parametrelerinin tahmin etmede makul olmasındandır [13].



**Şekil 1.** ARX model yapısı [12] (ARX model structure)

Kutup yerleştirme kontrolünü (Pole Placement Control - PPC) tasarlamak için gürültüsüz ARX modeli ile temsil edilen sistem ele alınmıştır [11].

$$y(t) = q^{-d} \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(t) \quad (12)$$

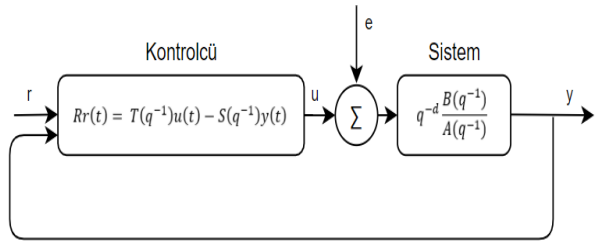


Şekil 4. Kontrolcü model yapısı [5] (Controller model structure)

Genel olarak, bir kontrol sisteminin tasarlanmasındaki amaç, proses çıktısını mümkün olduğunca referans değerine yakın tutmak olmaktadır. Kapalı döngü sisteminin kararlılığı, referans değişikliklerine yanıt hızı ve gürültülere karşı düşük hassasiyeti, kontrolcü sistemi tasarımının başlıca kısıtlarıdır. Kapalı döngü sistem kutuplarının yerleri seçilerek belirtilen ihtiyaçlara ulaşmak için kutup yerleştirme kontrol yasaı kullanılır. Şekil 4’te gösterilen kutup yerleştirme kontrolü matematiksel olarak Denklem 13’de görülen şekilde tanımlanır.

$$Rr(t) = T(q^{-1})u(t) - S(q^{-1})y(t) \quad (13)$$

Denklem 13 genel doğrusal kontrolör olarak tanımlanır ve  $T(q^{-1})$  ve  $S(q^{-1})$  kontrol polinomlarıdır [11]. Şekil 5’te kutup yerleştirme kontrolünün genel yapısı verilmiştir.



Şekil 5. Kutup yerleştirme kontrolcü yapısı [11] (Pole-placement controller structure)

$$T(q^{-1}) = 1 + t_1(q^{-1}) + t_2(q^{-2}) + \dots + t_{nt}(q^{-nt}), \quad (14)$$

$$S(q^{-1}) = s_0 + s_1(q^{-1}) + s_2(q^{-2}) + \dots + s_{ns}(q^{-ns}), s_0 \neq 1 \quad (15)$$

Kontrol polinomlarında belirtilen  $ns$  ve  $nt$  değerleri sırasıyla  $ns = n - 1$  ve  $nt = m$  ifadelerine eşittir. Kontrol polinomlarının bulunabilmesi için sistemin kutup ve sıfır katsayılarının bilinmesi gerekmektedir. Denklem 12 ve 13 kullanılarak kapalı döngü transfer fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$Rr(t) + S(q^{-1})y(t) = T(q^{-1})\frac{A(q^{-1})}{B(q^{-1})} \frac{1}{q^{-d}} y(t) \quad (16)$$

$$Rr(t) = T(q^{-1})\frac{A(q^{-1})}{B(q^{-1})} \frac{1}{q^{-d}} - S(q^{-1})y(t) \quad (17)$$

$$\frac{y(t)}{r(t)} = q^{-1} \frac{B(q^{-1})R}{T(q^{-1})A(q^{-1}) - q^{-d}S(q^{-1})B(q^{-1})} \quad (18)$$

Denklem 18’de kapalı döngü sistemin transfer fonksiyonu ifade edilmiştir. Amaç, kapalı döngü transfer fonksiyonun karakteristik denklemini önceden tanımlanmış bir tasarım polinomuna  $\aleph(q^{-1})$  dönüştürerek kapalı döngü kutuplarını belirtilen yere taşımaktır.

$$T(q^{-1})A(q^{-1}) - q^{-d}S(q^{-1})B(q^{-1}) = \aleph(q^{-1}) \quad (19)$$

İstenen geçici tepki, Denklem 20’de ifade edilen diyofantus denklemleri kullanılarak tasarlanmıştır.

Kapalı döngü sisteminde kutupların atanması kararlı durum kazancını etkileyecektir. Son değer teoremi kullanılarak kapalı döngü kararlı durum kazancı hesaplanır. Kararlı durum kazancı kısaca KDK olarak ifade edilecektir. Buradaki amaç,  $M$  değerini kararlı durum kazancı 1’e eşit olacak şekilde tasarlamak olup, kararlı durum kazancı bu ifadede dengeleyicidir.

Kapalı döngü dengeleyicisindeki  $\aleph(1)$  terimi sıfırlayıp iptal eder ve model uyumsuzluğunu ortadan kaldırır.

$$\aleph(q^{-1}) = 1 + \gamma_1(q^{-1}) + \gamma_2(q^{-2}) + \dots + \gamma_{ny}(q^{-ny}) \quad (20)$$

$$KDK = \left[ \frac{B(q^{-1})R}{\aleph(q^{-1})} (q^{-d}) \right]_{q^{-1}=1} = \frac{B(1)R}{\aleph(1)} \quad (21)$$

$$R = \frac{\aleph(1)}{B(1)} \quad (22)$$

### 3.2. Denetleyici Tasarımı (Controller Design)

Denetleyici tasarımı konusunda sistem bilgisi önemlidir, bu sebepten dolayı burada kontrol edilmek istenen sistemin genel transfer fonksiyonu Denklem 5 ile ifade edilmiştir. Genel model denklemleri aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_nq^{-n} \quad (23)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + b_mq^{-m} \quad (24)$$

$$H(q^{-1}) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} = \frac{b_0 + b_1q^{-1} + b_mq^{-m}}{1 + a_1q^{-1} + a_nq^{-n}}, \quad (25)$$

Buradan elde edilen parametre vektörü şu şekilde olacaktır.

$$\theta = [a_1 \dots a_n \ b_0 \ b_1 \dots b_m] \quad (26)$$

DA motorun ayrık zamanlı transfer fonksiyonu yaklaşımı için Denklem 25 kullanılmıştır. DA motor sisteminin kutup ve sıfırları  $n = 2, m = 1$  değerlerini alacaktır.

$$(q^2 + a_1q + a_2)y(t) = (qb_2)u(t) \quad (27)$$

Sistem açık döngü kutupları başlangıç anında bilinmemektedir. Sistemin kapalı döngü cevabı sönüm oranına bağlıdır. Sönüm oranının 1’e eşit olduğu durumda kapalı döngü sistem kritik sönümlenmiş bir yanıt elde edilecektir. Buradaki amaç çakışık kapalı döngü kutuplarının 0.5 olarak tanımlanacağı kritik sönümlenmiş bir yanıt elde etmektir.

$$\aleph(q) = q^2 - q + 0.25 \quad (28)$$

Kullanılan diyofantus denklemi için  $nt = 1$  ve  $ns = 1$  olacaktır. Denklem 19 kullanılarak bulunan diyofantus denklemi yerine konulduğunda, bilinmeyen kontrolör parametreleri ters matris yöntemi kullanılarak doğrudan hesaplanabilir.

$$(1 + t_1q)(q^2 + a_1q + a_2) - q(s_0q^2 + s_1q)(b_0q^2 + b_1q) = (q^2 + \gamma_1q + \gamma_2) \quad (29)$$

$$t_1 - b_0s_0 = \gamma_1 - a_1 \quad (30)$$

$$a_1t_1 - b_1s_0 = \gamma_2 - a_2 \quad (31)$$

$$a_2t_1 - b_1s_1 = 0 \quad (32)$$

Açık döngü kutuplarının yer değiştirmesiyle oluşan kararlı durum hatasını telafî etmek için dengeleyici eklenir.

$$R = \frac{\aleph(1)}{B(1)} = \frac{(1+\gamma_1+\gamma_2)}{(b_0+b_1)} \quad (33)$$

Denklem 12’de ifade edilen kutup yerleştirme kontrolü tasarımı fark denklemi formunda aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$u(t+1) = -t_1u(t) + s_0y(t+1) + s_1y(t) + Rr(t+1) \quad (34)$$

### 3.3. Uygulama Modeli (Simulink Model)

Deney düzeneğinde kullanılacak olan DA motor olarak Canon firmasına ait FN38-S motoru seçilmiştir. Çizelge 1’de seçtiğimiz motora ait parametreler yer almaktadır.

Gerçek sistemin, ayrık zamanlı transfer fonksiyonun yaklaşık modeli aşağıdaki denklemle ifade edilmiştir.

$$H(q) = \frac{14.9q + 0.6649}{q^2 - 0.4742q + 3.525 * 10^{-8}} \quad (35)$$

$$[q^2 - 0.4742q + 3.525 * 10^{-8}]y(t) = [14.9q^2 + 0.6649q]u(t) \quad (36)$$

Sistemin ayrık zamanlı açık döngü kutupları  $z_1=0.4742$  ve  $z_2=6.8574e-08$ ’dir. Amacımız, hızlı bir şekilde sönümlenmiş yanıt elde etmektir. Bundan dolayı döngü kutuplarımızın, 0.5 olmasını hedefliyoruz.

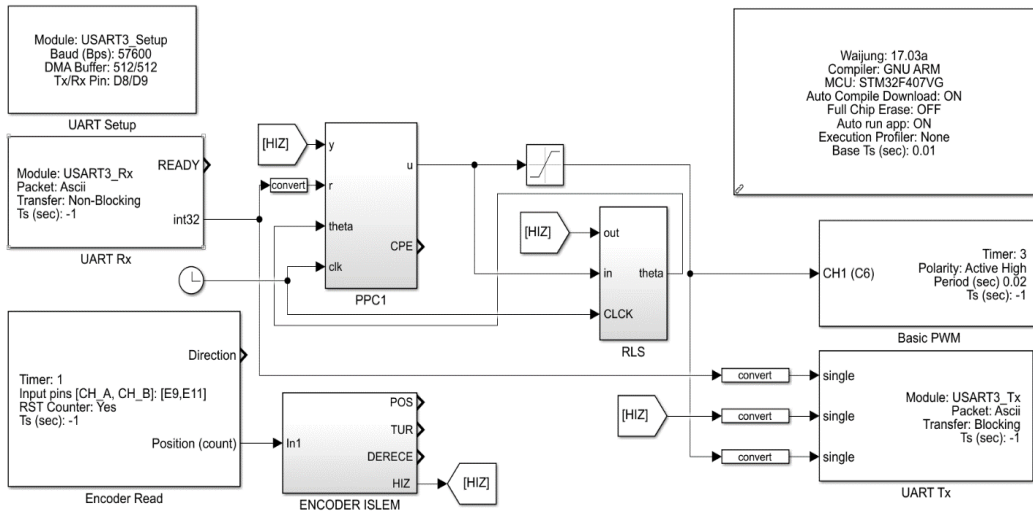
$$\aleph(q) = q^2 - q + 0.25 \quad (37)$$

Waijung blok seti [14] kullanılarak geliştirdiğimiz ve STM32F4 kitine yüklenen Simulink modeli Şekil 6’da görülmektedir. Waijung blok setinde enkoder verilerinin okunması için Enkoder Read bloğu kullanılarak DA motorun hız bilgisi okunmuştur. PWM periyodu 0.02 saniye olarak ayarlanması sebebiyle PWM sinyalinin frekansı 50 Hz değerindedir. Belirtilen PWM sinyalini modelde görülen “Basic PWM” bloğu üretmektedir. Seri port aracılığıyla sisteme gönderilen referans girişi Uart Rx bloğu ile elde edilebilmektedir

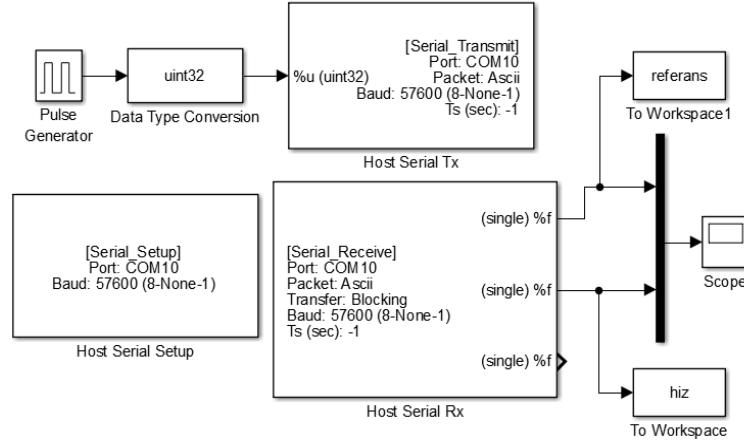
Seri port aracılığıyla sistemden alınan veya sisteme gönderilen verilerin takibinin yapılabilmesi için sunucu bilgisayarda koşacak bir model gerekmektedir. Bu amaçla hazırlanan ve Simulink üzerinden haberleşme yapmayı sağlayan model Şekil 7’de görülmektedir. Şekildeki model sisteme uygulanan referans sinyalini değiştirebilmek ve sistem yanıtını elde ederek görüntüleyebilmek için oluşturulmuştur.

Host Serial Setup bloğu içerisindeki blok parametre ayarlarından seri haberleşme için gerekli veri ayarlamaları yapılmıştır (Blok parametreleri: port = COM 10, Baud rate = 57600, veri uzunluğu = 8 bit, eşlik biti = kullanılmıyor, stop biti = 1). Host Serial Tx bloğu bilgisayardan test düzeneğine veri gönderme işlemi yapmaktadır (modele uygulanacak referans sinyali gönderme işlemi). Referans sinyal ve DA motora ait hız değerleri (sistem çıkışı) ise Host Serial Rx bloğu ile alınıp, çizdirilmektedir.

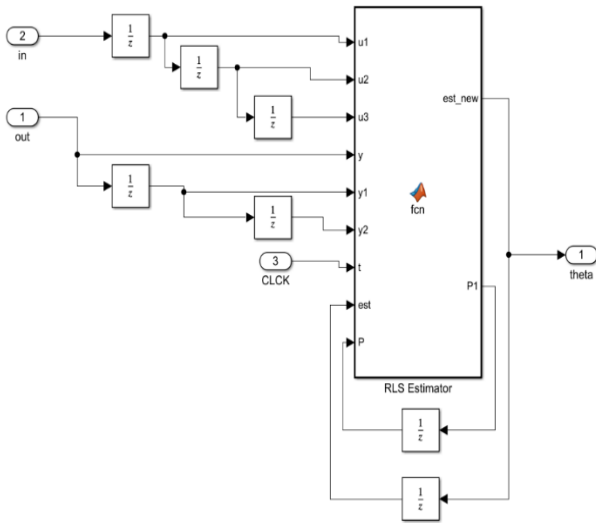
Özyinelemeli en küçük kareler yöntemi (RLS) algoritması ve kutup yerleştirme kontrolörü gömülü kod blokları kullanılarak kodlanmıştır. Sistem parametreleri güncellenir (Denklem 9-11) ve daha sonra DA motorun istenen hız ayarını takip etmesi için kontrol sinyali üretmek üzere kontrol sistemi algoritmasında (Denklem 34) güncellenmiş parametreler kullanılır. RLS parametre tahmincisinin blok yapısı Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 6. Denetleyici Simulink modeli (Controller Simulink model)

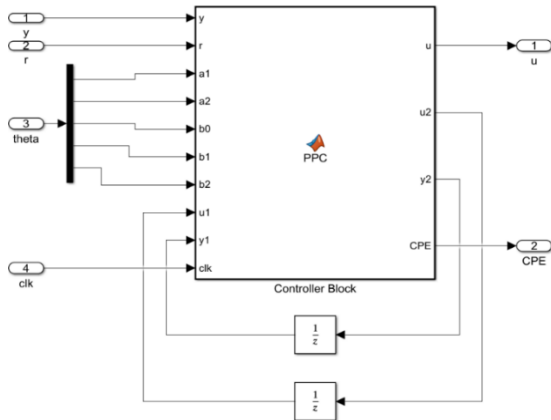


Şekil 7. Bilgisayar üzerinden referans girişi ve veri toplama modeli (Reference input and data collection model via computer)



Şekil 8. RLS parametre tahmincisinin blok yapısı (Block structure of the RLS parameter estimator)

Kutup yerleşim kontrolcüsü, çevrimiçi parametre tahmin sistemi algoritmasını kontrol etmek için kullanılır. Kutup yerleşim kontrolcüsünün blok yapısı Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Kutup yerleşim kontrolcüsünün blok yapısı (Block structure of the pole placement controller)

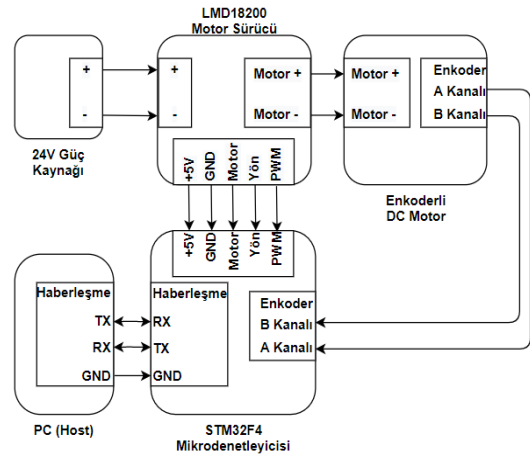
#### 4. GERÇEK ZAMANLI UYGULAMA (REAL TIME APPLICATION)

##### 4.1. DENEY DÜZENİĞİ (Experimental Setup)

Kendinden ayarlamalı denetleyici modeli, Waijung blokları ile Matlab ortamında oluşturulmuş olup Code-Generation aracı kullanılarak test düzeneği üzerinde bulunan STM32F4 kitine gömülmüştür. STM32F4 geliştirme kitinin yüksek performans, gerçek zamanda uygulanabilirlik, uygulamada kolaylık ve düşük maliyet gibi temel özellikleri tercih edilme sebeplerindedir [15]. Kitin içerisinde yer alan ARM işlemci, Waijung blok setleri ile Simulink üzerinden programlanabilmektedir. Test düzeneği ve blok şeması Şekil 10 ve 11'de görülmektedir.

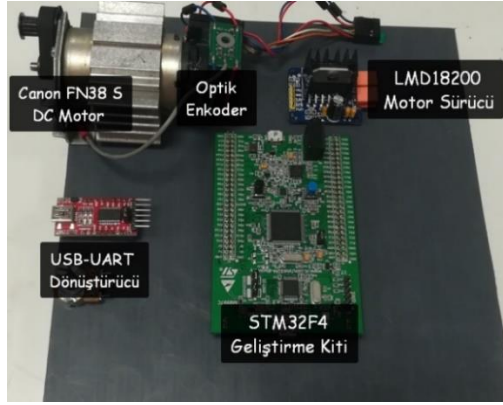
Kullanılan test düzeneği üzerinde bulunan malzemeler;

1. STM32F4 Mikro denetleyici
2. LMD18200 Motor Sürücü
3. Canon FN38 Motor & optik enkoder
4. USB-UART Dönüştürücü
5. 24 V Güç Kaynağı



Şekil 10. Test düzeneğinin blok şeması (Block diagram of the test setup)





Şekil 11. Test düzeneği (The test setup)

#### 4.2. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Bu çalışmada sabit mıknatıslı bir Doğru Akım (DA) motorunun hız kontrolü, kendinden ayarlamalı denetleyici yöntemi kullanılarak gerçek zamanlı gerçekleştirilmiştir. Kontrolcünün performansının gözlenebilmesi için farklı referans girişlerine verdiği yanıtlar incelenmiştir.

Şekil 7’de verilen model aracılığıyla gerçek zamanlı olarak test düzeneğine referans giriş sinyali uygulanmış ve sistem yanıtı (DA Motor hız bilgisi) aynı model üzerinden incelenerek veri toplama işlemi gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak sisteme referans giriş sinyali olarak 10 rad/sn’lik basamak fonksiyonu verilmiştir. Bu durumda sistem çıkış sinyalinin (motor hızı) referans sinyali takip etmesi beklenmektedir. Şekil 12’de verilen grafikte referans sinyali ile birlikte sistem çıkışı da görülmektedir.

Grafikten görüleceği üzere sisteme enerji verildikten 0.52 sn. sonra referans sinyal uygulanmış ve sistem çıkışı referans sinyali takip ederek 10 rad/sn bandına oturmuştur.

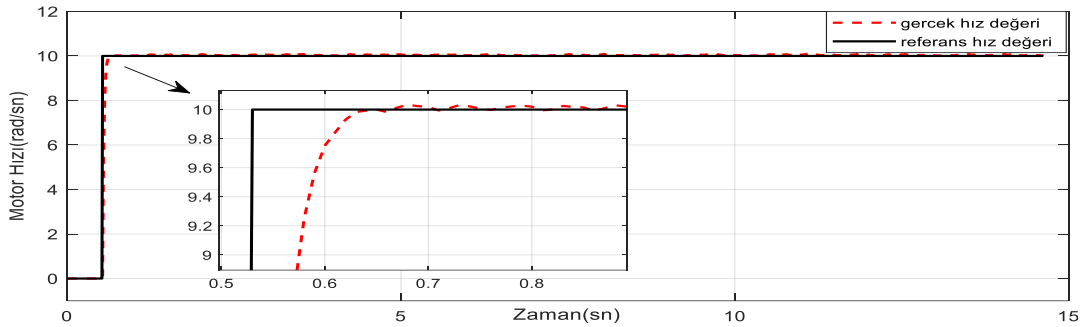
Basamak fonksiyonu girişine karşılık elde edilen RLS parametre tahmincisinin çıktısı Şekil 13’de verilmiştir. Grafikte görülen parametreler, güncellenen sistem parametreleri olarak kontrol algoritmasında kullanılmaktadır.

İkinci olarak ise kontrolcünün performansının daha iyi test edilebilmesi için sisteme rastgele değerlerden oluşan referans sinyali uygulanmıştır. Matlab Simulink kütüphanesinde bulunan Uniform Random Number bloğu kullanılarak Şekil 14’de görülen referans sinyal elde edilmiştir.

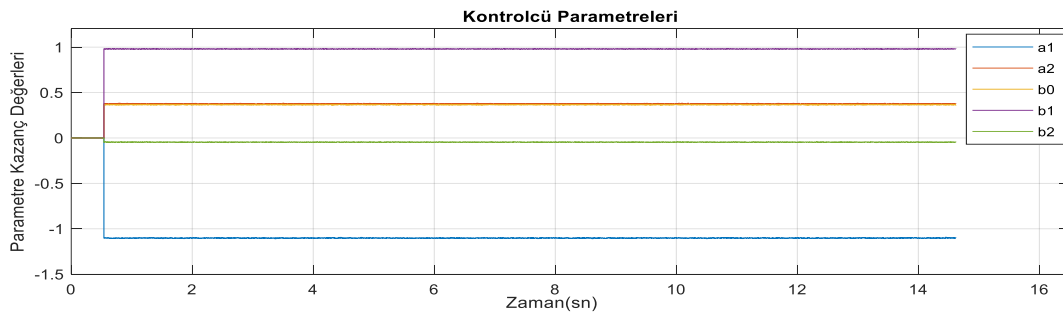
Şekil 14’de verilen grafikte referans sinyal ile birlikte sistem çıkışı da görülmektedir. Görüldüğü üzere sistem çıkışı rastgele üretilen referans sinyalini başarı ile takip etmektedir.

Şekil 15’de ise rastgele referans sinyaline karşılık elde edilen RLS parametre tahmincisinin çıktısı görülmektedir. Kontrol sürecindeki parametre değişiminin net görülebilmesi için her bir parametre tahmin grafiği ayrı şekilde verilmiştir.

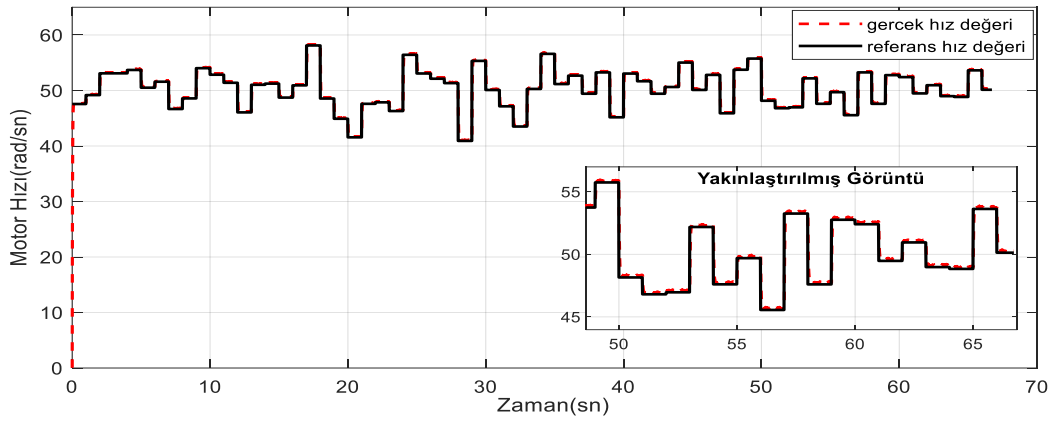
Son olarak sisteme tekrar eden dizi sinyal, referans olarak verilmiştir. Şekil 16’da referans ve sistem yanıtı görülmektedir. Grafikte görülen referans sinyal Matlab Simulink kütüphanesinde bulunan Repeating Sequence bloğu kullanılarak elde edilmiştir. Sistem yanıtından da anlaşılacağı üzere kontrolcü diğer iki referans girişinde olduğu gibi tekrarlı dizi girişinde de başarılı bir performans sergilemiştir.



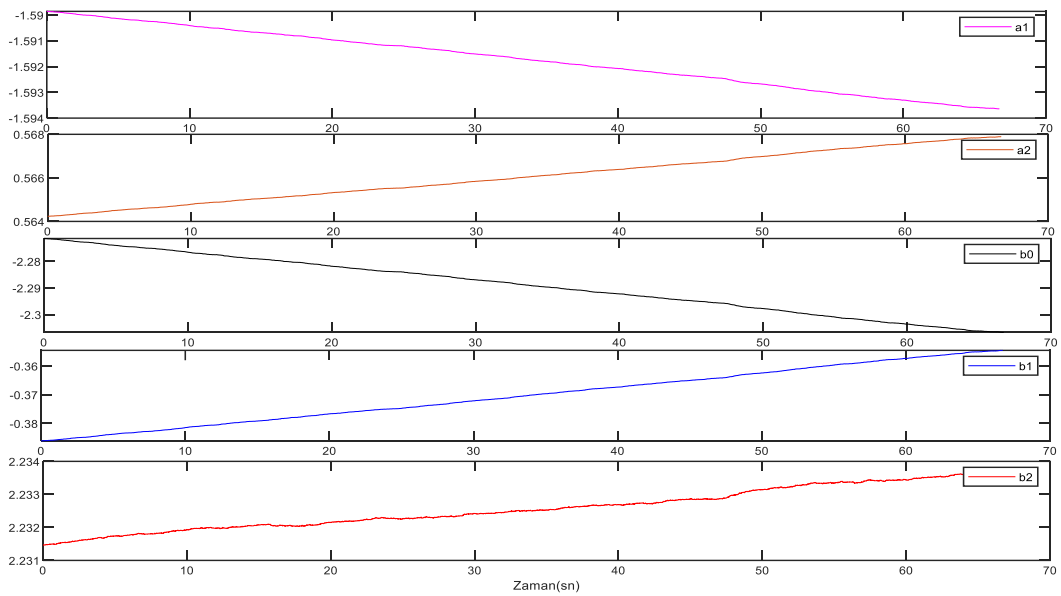
Şekil 12. Sistemin basamak giriş yanıtı (Step input response of the system)



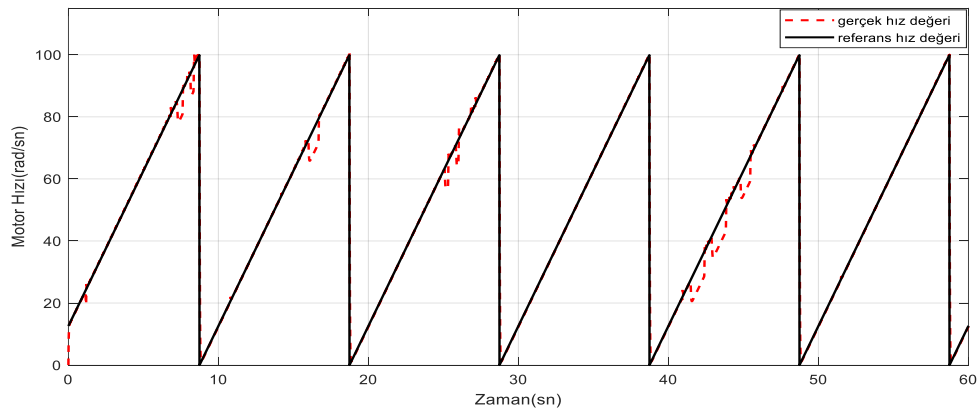
Şekil 13. Basamak girişine karşılık elde edilen RLS parametre tahminci çıktısı (RLS parameter estimator output obtained in response to step input)



Şekil 14. Sistemin rastgele referans girişine yanıtı (System response to random input)



Şekil 15. Rastgele referans girişine karşılık elde edilen RLS parametre tahminci çıktısı (RLS parameter estimator output obtained in response to random input)



Şekil 16. Sistemin tekrarlı dizi referans girişine yanıtı (System response to repeating sequence input)

## 6. SONUÇ (CONCLUSION)

Geleneksel geri beslemeli kontrol yöntemlerinde belirlenen sabit kontrol katsayıları; sistemin dinamik yapısının değişmesi, çevresel durumlar ve bozucu etkiler

gibi durumlarda sistem kontrolünü zorlaştırmaktadır. Ayrıca çoğu zaman tüm bu koşullar için sistem özelliklerini belirlemek mümkün olmayabilir ve bu gibi durumlarda tasarlanan kontrol yöntemi yetersiz

performans gösterir. Bu nedenlerden dolayı sistem kontrolünü zorlaştıran durumların etkili olduğu sistemlerde en uygun kontrol yöntemlerinden biri kendinden ayarlamalı denetleyici yaklaşımıdır.

Bu çalışmada, DA motorunun hız kontrolü kendinden ayarlamalı denetleyici yaklaşımı kullanılarak gerçek zamanda gerçekleştirilmiştir. DA motorun dinamik denklemleri kullanılarak transfer fonksiyonu çıkarılmıştır. Elde edilen transfer fonksiyonu kullanılarak öz yinelemeli en küçük kareler algoritması ve kutup yerleştirme kontrolörü gömülü kod bloklarına aktarılmıştır. Aktarılan algoritma blokları ile gerekli blok diyagramları Simulink ortamında Waijung blokları ile oluşturulmuş ve Code-Generation aracı ile STM32F4 mikro denetleyici kitine gömülmüştür.

Kendinden ayarlamalı denetleyici yaklaşımı ile gerçek zamanlı olarak DA motorun hız kontrolü üzerinde farklı deneyler gerçekleştirilerek kontrolcünün performansı gözlenmiştir. Tek, rastgele ve tekrarlı olmak üzere farklı karakteristiğe sahip referans girişlerin uygulanması ile kontrolcünün performansının gerçekçi bir analizinin yapılması hedeflenmiş ve tüm girişlerin başarılı olarak takip edilmesi ile de kontrolcünün başarılı performansı net bir şekilde ortaya koyulmuştur. Yapılan tüm deneyler incelendiğinde DA motorun referans hız değerine göre hız kontrolünün arzu edilen şekilde gerçekleştirildiği gözlenmiştir.

#### 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)

**Alperen EMİROĞLU:** Deneyler, sonuç analizi.

**Tuğçe YAREN:** Makalenin yazım, düzenleme ve kontrol işlemi.

**Selçuk KİZİR:** Makalenin yazım, düzenleme ve kontrol işlemi.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yurdakul S.S., "Self-Tuning PID Control with Experimental Applications", *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2009).
- [2] Clarke D.W. and Gawthrop P.J., "Self-tuning controller", *Proc. Inst. Electr. Eng.*, 122(9): 929–934, (1975).
- [3] Gianto R., "Review of Self-Tuning Controller and Its Application in Electrical Power System", *Int. J. Sci. Technol. Res.*, 4(11): 137–142, (2015).
- [4] Warwick K., "Self-tuning regulators—a state space approach", *Int. J. Control*, 33(5): 839–858, (1981).
- [5] Arici M. and Arslan A.O., "Self-tuning speed control of permanent magnet DC motor", *9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa, 1113–1116, (2015).
- [6] Vukic Z., "A Tutorial on Adaptive Control: The Self-Tuning Approach", (2000).
- [7] Valášek M., "Design and Commissioning of new control system for industrial robot Puma 200", *Master's Thesis*, Czech Technical University Faculty of Mechanical Engineering, (2018).
- [8] Kizir S., Yaren T. and Keleşçi E., "Matlab Simulink Destekli Gerçek Zamanlı Kontrol: Teori ve Mühendislik Uygulamaları", *Seçkin Yayıncılık*, Ankara, Türkiye, (2019).
- [9] Bobál V., Böhm J., Fessl J. and Macháček J., "Digital Self-tuning Controllers", *Springer-Verlag*, London, (2005).
- [10] Behera S., Jyotiranjan M. and Pati B.B., "Optimal pole placement for a self tuning PID controller", *6th International Conference on Computer Applications In Electrical Engineering-Recent Advances (CERA)*, Roorkee, 456–461, (2017).
- [11] Aström K.J. and Wittenmark B., "Adaptive Control", *Addison-Wesley*, United States, (1994).
- [12] Abdul-Adheem W., "Evolutionary Computation Techniques and ARX Model for System Identification", *17th Scientific Conference of Almamoon University College*, 1–23, (2016).
- [13] Karny M., "Parametrization of multi-output autoregressive-regressive models for self-tuning control", *Kybernetika*, 28(5): 402-412, (1992).
- [14] <https://waijung1.aimagin.com>, "Waijung Blockset", (2020).
- [15] Yaren T., Süel V., Yeniaydın Y., Sakacı B. and Kizir S., "STM32F4 Kiti ile Simulink Tabanlı Kontrol Eğitimi Uygulamaları Geliştirme", *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, Kocaeli, 868-873, (2014).