





# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Model Öngörülü Kontrol ile DA Motor Konum Kontrolü

 Tuğçe YAREN<sup>a,\*</sup>,  Selçuk KIZIR<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, TÜRKİYE*

\* *Sorumlu yazarın e-posta adresi: tugce.yaren@kocaeli.edu.tr*

DOI: 10.29130/dubited.952453

### ÖZ

Bu çalışmada sabit mıknatıslı fırçalı doğru akım (DA) motor sisteminin konum kontrolü için modern kontrol yöntemlerinden model öngörülü kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiş ve önerilen kontrolcü tasarımı farklı testler ile gerçek zamanlı olarak doğrulanmıştır. Ele alınan sistem modeli, sistem tanımlama yöntemlerinden kara kutu modeli yaklaşımı ile elde edilmiştir. Deneysel veri setleri ile elde edilen sistem modeli üzerinden model öngörülü kontrolcü tasarımı geliştirilmiştir. Geliştirilen tasarımcı modeli, Matlab destekli Waijung blok seti ve STM32F4 uygulama geliştirme kiti kullanılarak gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Farklı referans girişleri ve parametre değişimleri altında kontrolcü performansı test edilmiştir. Sistem çıkışının tüm referans girişleri başarılı bir şekilde takip etmesi ve değişen sistem parametrelerine rağmen başarısını sürdürmesi önerilen kontrolcü tasarımı doğrulanmıştır. Ayrıca klasik kontrol yaklaşımlarından PID denetleyici ile sonuçlar karşılaştırılarak model öngörülü kontrolcü üstünlüğü deneysel sonuçlarla vurgulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** *DA motor, Model öngörülü kontrol, Sistem tanımlama, STM32F4*

## DC Motor Position Control with Model Predictive Control

### ABSTRACT

In this study, model predictive controller design that is one of the modern control methods for the position control of permanent magnet brushed direct current motor system, was carried out and the proposed controller design was verified in real-time with different tests. The system model was obtained by using the black box model approach, one of the system identification methods. The model predictive controller design has been developed based on the system model obtained with the experimental data sets. The controller was implemented in real-time using the Matlab-supported Waijung block set and the STM32F4 development kit. The controller performance has been tested under different reference inputs and parameter variations. The system output has successfully followed all reference inputs and maintained its success despite changing system parameters, confirming the proposed controller design. In addition, the results were compared with the PID controller, which is one of the classical control approaches. Model predictive controller advantages over PID controller are demonstrated by experimental results.

**Keywords:** *DC motor, Model predictive control, System identification, STM32F4*

# I. GİRİŞ

Mekatronik sistemlerin kontrolünde kullanılan yöntemler, model tabanlı ve model tabanlı olmayan kontrol yöntemleri olmak üzere iki temel grupta düşünülebilir [1]. Temel ayırım, ele alınan kontrol yapısının sistemin matematiksel modelini içerip içermediğidir. Kontrol yöntemlerinin birbirlerine göre üstünlükleri olması ile birlikte, tasarımcının ihtiyaçlarına ve uygulama çeşidine bağlı olarak tercih edilecek kontrol yöntemi farklılık gösterebilir.

Model öngörülü kontrol (MPC – Model Predictive Control), son yıllarda akademik ve endüstriyel araştırmalar için popüler bir konu haline gelen ve kontrol uygulamalarında sıkça rastlanmaya başlayan model tabanlı modern kontrol yöntemlerindedir. Klasik kontrol yöntemlerine göre farklı bir tasarım süreci mevcuttur. Tasarımcı, denetleyici algoritmasını tasarlarken; tasarım kriterlerine, sistem dinamiklerine ve işleyişine hakim olmalıdır.

MPC çok değişkenli bir kontrol stratejisi olup, klasik kontrol yaklaşımlarından farklı olarak, sistem çıkışının gelecekteki değerleri tasarımcı tarafından öngörülebilmektedir [2]. Ayrıca tasarlanan kontrolcü, süreci önceden belirlenmiş sistem limitleri içinde tutmaya çalışır. Her bir örnekleme zamanında kısıtlı bir optimizasyon problemi çözülerek, gelecekteki kontrol dizisi elde edilir [3]. MPC temelde, her adımda optimal bir kontrol probleminin çözüldüğü bir işleyişe sahiptir.

MPC, 1980'lerden beri kimya fabrikaları ve petrol rafinerileri gibi proses endüstrilerinde kullanılan ve kendini kanıtlamış gelişmiş bir proses kontrol yöntemidir. Bu açıdan akademik araştırmalardan önce MPC, ilk olarak endüstride uygulanmıştır. Seksenlerin ortalarına doğru MPC'ye duyulan akademik ilgi artmaya başlamış ve akademik araştırmalar sonucu MPC özelliklerinin anlaşılmasıyla birlikte, pratik ve teorik uygulamalar için çok güçlü ve önemli bir kontrol tekniği olduğu sonucuna varılmıştır [4,5]. Günümüzde, artan bir hızla, çeşitli alanlarda uygulanmaktadır.

Chai ve arkadaşları, endüstri boyutlarında bir sabit mıknatıslı senkron motorun hız kontrolü için model öngörülü kontrol algoritması geliştirmişler ve geliştirdikleri algoritmayı deneysel olarak test etmişlerdir. Denetleyici, çevrimiçi optimizasyon problemini kısıtları da göz önünde bulundurarak kuadratik programlama prosedürüne göre çözmektedir [6]. Bone ve arkadaşları, ayrık değerli (discrete-valued) model öngörülü denetleyici ile hibrit pnömatik-elektrikli aktüatörlerin konum kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Aktüatör tasarımını ve kontrolünü doğrulamak için tek eklemlili bir robot kol prototipi oluşturmuşlar, bu prototip ile denetleyici performansını doğrulamışlardır [7]. Espinoza, model öngörülü kontrol ile gerçek zamanlı, düşük maliyetli bir akış kontrolü gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada, endüstriyel bir süreçte çalışabilecek düşük maliyetli bir kontrol sisteminin uygulanabilirliği ön plana çıkmaktadır. Kontrolcü performansı analiz edilmiş ve bozucu etki varlığında dahi başarılı performans gözlenmiştir [8]. Bawdaka ve Kaya, DA motor sürücüsü için model öngörülü denetleyici tasarlamışlar ve tasarladıkları denetleyiciyi klasik PI-P denetleyici ile karşılaştırmışlar ve benzetim sonuçlarını sunmuşlardır [3].

Xia ve arkadaşları, fırçasız DA motorunda (BLDC) tork dalgalanmasını azaltmak için yeni bir model öngörülü kontrol yöntemi önermişlerdir [9]. Önerilen yaklaşım komütasyon içermeyen faz akımının tahmin modeline dayanan PWM-MPC algoritmasıdır. PWM-MPC yöntemi, devre topolojisini değiştirmeden akım dalgalanmasını ve tork dalgalanmasını verimli bir şekilde bastırabilmiş; benzetim ve deneysel sonuçlar önerilen algoritmanın verimliliğini doğrulamıştır. Yang ve arkadaşları, DA-DA *buck* dönüştürücü ile çalıştırılan sabit mıknatıslı DA motorların hız regülasyon problemini, bir çıkış geri beslemeli MPC algoritması kullanarak ele almışlardır [10]. Giriş kısıtı olarak doluluk oranı optimizasyon sürecine dahil edilmiş ve kararlı bir hız regülasyonu elde edilmiştir. Abbasi ve Husain, çift asenkron motor sürücüsü için önerdikleri MPC kontrolörü, farklı çalışma koşulları altında doğrudan tork kontrolü (*direct torque control*) ile karşılaştırmışlardır [11]. İki asenkron motorun paralel çalışması için geliştirilmiş bir sonlu kontrol seti tahmini tork kontrolü (FCS-PTC) yöntemi önerilmiştir. Kontrolörün optimizasyon maliyet fonksiyonunun, dengesiz şartlara yol açmadan aynı anda birden fazla amacı karşılayabildiği gösterilmiştir. Doğrudan tork kontrol yöntemi ile karşılaştırıldığında, MPC, daha

düşük tork ve akı dalgalanması, %5 daha düşük akım toplam harmonik bozulması ve parametre değişiminde ihmal edilebilir etki göstermiştir.

DA motorlar avantajlarından dolayı günümüz endüstriyel kontrolün neredeyse tüm alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle robotik uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Dolayısıyla hem akademi hem endüstride DA motorun sık kullanımı ile DA motor kontrolü önemli bir problem haline gelmiştir [12].

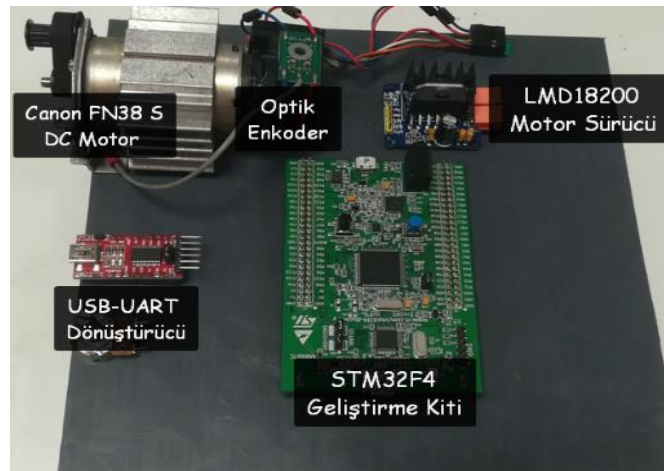
Bu çalışmada DA motor konum kontrolü için kontrol teorisinde önemli bir yere sahip modern kontrol yöntemlerinden biri olan model öngörülü kontrol üzerinde durulmuştur. Model tabanlı kontrol yöntemi için sistem modeli, sistem tanımlama yöntemlerinden kara kutu modeli yaklaşımı ile elde edilmiştir. DA motor konum kontrolünü gerçekleştirmek üzere model öngörülü kontrol modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model, Matlab destekli Waijung blok seti ve STM32F4 uygulama geliştirme kiti kullanılarak gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı, model tabanlı modern kontrol yöntemlerinden model öngörülü kontrolün gelişmiş endüstriyel sistemlerde nasıl çalıştığını ve bu denetleyicilerin üstlenebileceği aktif rolü göstermektir. Ayrıca modern kontrol yöntemlerinin kullanımı ile hızlı ve kolay bir şekilde uygulama geliştirilebileceği ve geliştirilen uygulamaların kontrol eğitiminde kolaylıkla kullanılabilmesi de gösterilmektedir. Gelişmiş bir kontrol algoritmasının pratikte kolayca uygulanması ile tahmin öngörülü kontrol yapısının anlaşılabilirliği artırılmıştır. Kontrol teorisinin önemli ve güncel konularından biri olan MPC teori ve deneysel uygulamasının birleştirilmesi gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışma i) sistem tanımlama yaklaşımlarından kara kutu model yaklaşımını ele alarak sistem dinamiğini yüksek oranda yansıtan sistem modeli ile tasarım, ii) tasarlanan kontrol algoritmasının pratiğe dökülmesi ile teorisinin uygulanabilirliği ve geçerliliğinin ispatı, iii) düşük maliyetli ve kolaylıkla kullanılacak STM32F4 geliştirme kiti ve Waijung blok seti ile hızlı ve kolay bir şekilde uygulama geliştirilebileceği ve geliştirilen uygulamaların kontrol eğitiminde kolaylıkla kullanılabilmesini gösterme açısından ön plana çıkmaktadır.

## **II. MODELLEME VE KONTROL**

### **A. DENEY DÜZENEĞİ**

Deneysel çalışmalar, Şekil 1’de görülen deney düzeneği üzerinde gerçek zamanlı olarak test edilmiştir. Deney seti üzerinde 168 PPR dahili enkodere sahip olan Canon FN38 S DA motor, LMD18200 motor sürücüsü, USB-UART dönüştürücü, STM32F4 geliştirme kartı bulunmaktadır.

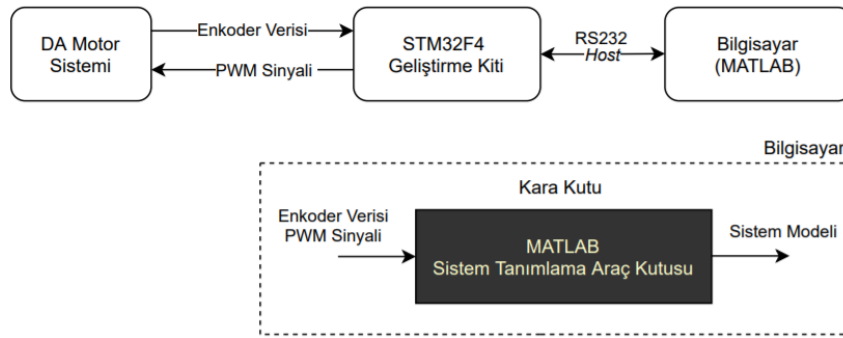


*Şekil 1. Deney düzeneği*

STM32F4 geliştirme kartı Simulink üzerinden Waijung blok seti ile kullanılmıştır. Waijung blok seti, ARM mimarisine sahip kontrol kartının mimarisi hakkında detaylı bilgi sahibi olmadan Matlab Simulink üzerinden kullanılmasını mümkün kılmaktadır [13]. STM32F4 geliştirme kitinin yüksek performans, gerçek zamanda uygulanabilirlik, uygulamada kolaylık ve düşük maliyet gibi temel özellikleri tercih edilme sebeplerindedir [12].

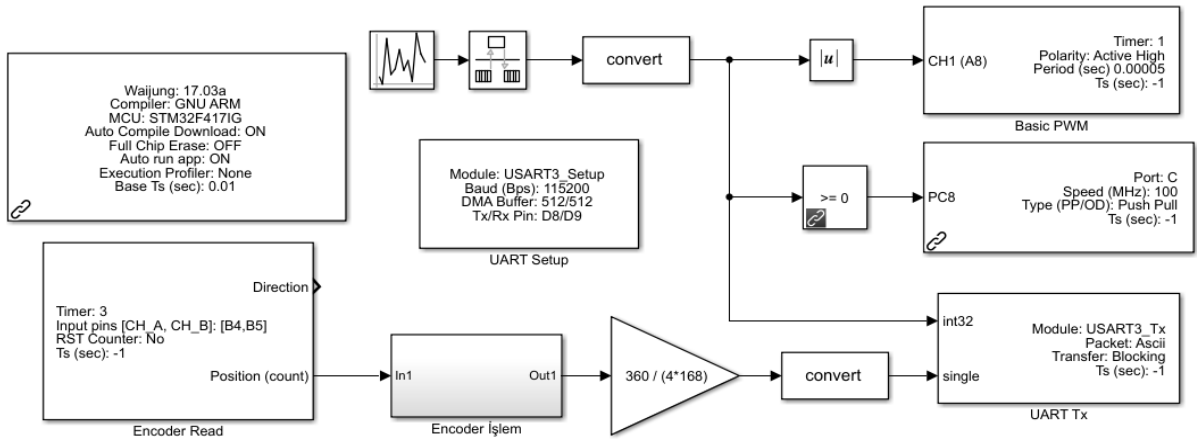
## B. SİSTEM TANIMLAMA – KARA KUTU MODEL YAKLAŞIMI

Herhangi bir sistemi tanımlamak için sisteme ait matematiksel modeli üç farklı yöntem ile elde etmek mümkündür. Bu yöntemler: beyaz kutu, gri kutu ve kara kutu modelidir [13]. Beyaz kutu modelinde fiziksel yasalar ve ideal bileşenlerden yararlanılarak matematiksel model elde edilebilir. Gri kutu modeli incelenen model hakkında ön bilginin mevcut olduğu durumlarda kullanılan yaklaşımdır. Bu yaklaşımda sistemin matematiksel modeli çıkarılırken hem fiziksel hem de deneysel verilerden yararlanır. Kara kutu modelinde ise sistem hakkında hiçbir bilgi mevcut değildir, sadece deneysel veriler kullanılır.



Şekil 2. Sistem blok diyagramı

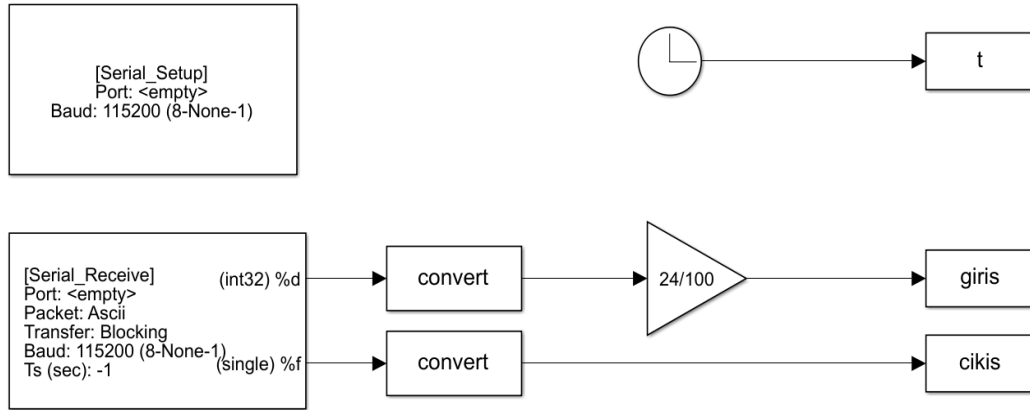
Bu çalışmada, Matlab/System Identification Toolbox (SIT) kullanılarak kara kutu yaklaşımı ile sistemin transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Sistemin işleyişi Şekil 2’de verilen blok diyagramında görülmektedir. Deney düzeneği, gerçek zamanlı sistem tanımlaması yapacak şekilde ayarlanmıştır. DA motor, +24 voltluk bir DA güç kaynağı ile çalıştırılır.



Şekil 3. Kara kutu – test modeli

Sistem tanımlamadaki ilk adım, DA motordan veri toplamaktır. Dolayısıyla motor pozisyon ölçümü yapacak, Şekil 3’de görülen Simulink uygulama modeli, derlenerek kite yüklenmiştir. Bu uygulama modelinde STM32F4 kiti, üretilen PWM sinyalini DA motora gönderir; motorun konum bilgisini yakalar ve bunları ana bilgisayara gönderir (Şekil 2). Motor ve ana bilgisayar (host) arasında haberleşme

ise RS232 seri iletişim aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Gönderilen motor verileri Şekil 4’de görülen host modeli aracılığıyla bilgisayara kaydedilebilir.

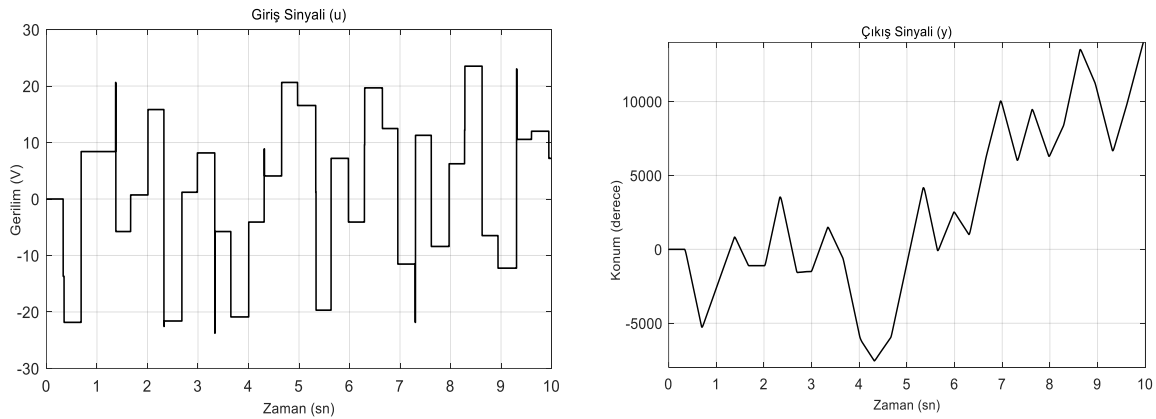


Şekil 4. Kara kutu – host modeli

Bu çalışmada, motordan konum verisi toplamak için sisteme rastgele giriş sinyalleri uygulanmış ve giriş-çıkış sinyalleri, Şekil 3’de görülen “giris” – “cikis” değişkenlerine aktarılarak, bilgisayara kaydedilmiştir. Tasarımcının, yüksek doğruluklu bir sistem tanımlama yapabilmesi için elinde en az 2 veri setinin (giriş-çıkış) olması gerekmektedir. Bir veri seti ile model elde edilirken, diğer veri seti ile elde edilen modelin doğruluğunun test edilmesi gerekmektedir.

Sistemden gerçek zamanlı olarak elde edilen veri seti (giriş-çıkış) Şekil 5’de görülmektedir. Bu veriler SIT aracılığıyla analiz edilerek, DA motor konum transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Elde edilen transfer fonksiyonu Eş. 1’de verilmiştir.

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{6.806 * 10^4}{s^2 + 120.6s + 1.084 * 10^{-4}} \quad (1)$$



Şekil 5. Gerçek zamanlı veri seti (sistem giriş – çıkış)

Kara kutu yönteminin yanı sıra fiziksel yasalar ve ideal bileşenlerden yararlanılarak sistem tanımlaması gerçekleştirilebilir (beyaz kutu). DA motorunun elektriksel ve mekaniksel yapısı ele alındığında sistem transfer fonksiyonu Eş. 2’de görüldüğü şekilde elde edilir.

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{s((Js + b)(Ls + R) + K^2)} \quad (2)$$

Tablo 1’de motor kataloğundan elde edilen DA motor parametre değerleri verilmiştir. Eş. 2’de motor parametre değerleri yerine yazılarak deney setinde kullanılan motorun konum transfer fonksiyonu elde edilmiştir (Eş. 3).

**Tablo 1. Motor parametreleri**

Parametre	Değeri	Birimi
Rotor Direnci ( $R$ )	5	(ohm)
Rotor Endüktansı ( $L$ )	2.9e-3	(H)
Rotor Atalet Momenti ( $J$ )	32e-7	(kgm <sup>2</sup> )
Viskoz Sönümlenme ( $b$ )	0	(Nm.s)
Motor Tork Sabiti ( $K_t$ )	33.8e-3	(Nm/A)
Zıt Emk Sabiti ( $K_e$ )	33.8e-3	(V/rad/sn)

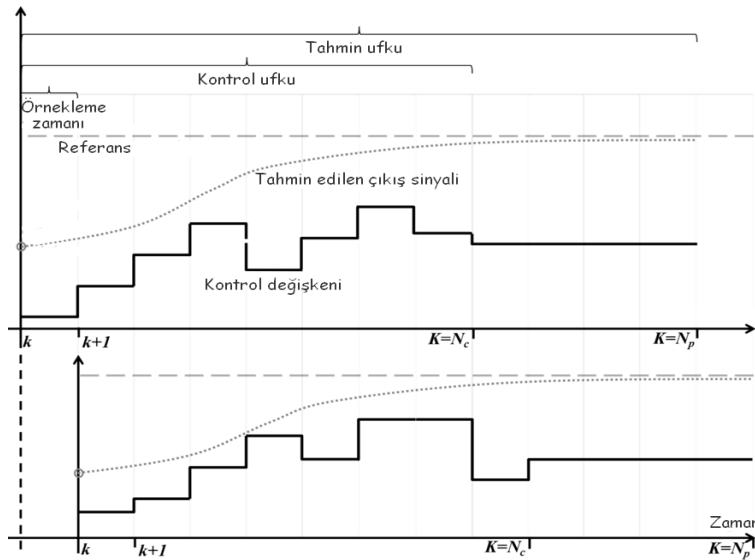
$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{0.0338}{9.28e - 09s^3 + 1.6e - 05s^2 + 0.001142s} \quad (3)$$

Eş. 3 elde edilirken sadece fiziksel yasalarından yararlanılmıştır. Yapılacak motor kontrol uygulamalarının performansı, elde edilen modelin gerçek zamanlı sisteme ne kadar yaklaşık olduğuna bağlıdır [10]. Kara kutu yönteminde, farklı tasarım kriterlerine bağlı olarak birden fazla modelin elde edilmesi mümkündür. Bu çalışmada 2 kutup – 0 sifıra sahip bir transfer fonksiyonu elde edilerek gerçek sisteme olabildiğinde yakın bir matematiksel model elde edilmiştir.

### C. MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL

Dinamik bir optimizasyon problemi olarak formüle edilen optimal kontrol problemi, bir kez çözülen bir optimizasyon problemidir [14]. Dezavantajı, bozucu etki meydana gelir veya referans sinyalde herhangi bir değişiklik meydana gelirse, kontrolör bunların etkisine göre güncellenemez. Dolayısıyla gerekli performansı sağlayamayabilir. Gerçek zamanlı uygulamalarda, bozucu etkiler her zaman sistemde mevcuttur ve sistemi herhangi bir zamanda etkileyebilirler.

Optimum kontrol girişini bir sonraki örnekleme zamanına kadar uygulayıp, ardından optimum çözümü her örnekleme zamanında yeniden hesaplayıp sisteme uygulama, bahsedilen dezavantaj durumunu ortadan kaldıracaktır. Bu yapı ise kayan ufuk stratejisi (sliding horizon strategy) ile elde edilmektedir [3].



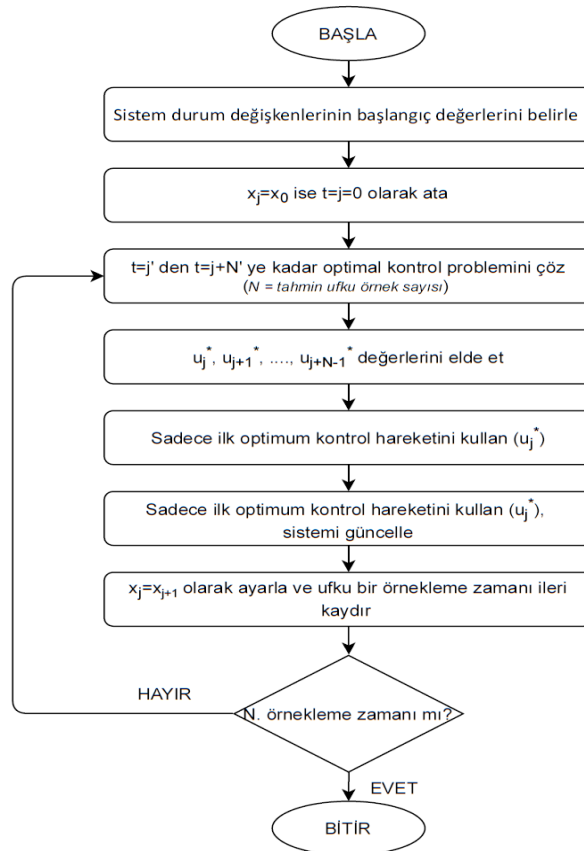
**Şekil 6. Kayan ufuk stratejisi [15]**

Kayan ufuk stratejisine (Şekil 6) sahip optimal kontrolör, MPC yapısını oluşturmaktadır. Kayan ufuk stratejisiyle, her örnekleme zamanında yeni bir optimal kontrol problemi çözülür. Örneğin, verilen herhangi bir zamanda  $t = 0$ , optimal kontrol problemi  $N$  sayıda optimal kontrol eylemi elde etmek için çözülür ( $u_0^*, u_1^*, \dots, u_{N-1}^*$ ). Ancak elde edilen tüm  $N$  sayıdaki kontrol eylemini tüm ufka ( $N$  adet örnekleme zamanı) uygulamak yerine, yalnızca ilk kontrol eylemi ( $u_0^*$ ) uygulanır ve ufuk, bir örnekleme zamanı kaydırılır.

Bir örnekleme zamanı kaydırıldıktan sonra ( $t = 1$ ), sisteme bozucu etki girişi olduğunu varsayalım. Sistemin dinamik davranışı değişecektir. Bu durumda  $t = 1$ 'de tamamen yeni bir optimal kontrol problemi üretilir. Yeni oluşturulan kontrol problemi, sistemde oluşan bu değişiklikleri içerecektir. Yeni optimal kontrol problemi ile kontrolör, güncellenmiş optimal kontrol problemini çözerek yeni bir optimum kontrol girişi seti hesaplayacaktır ( $u_1^*, u_2^*, \dots, u_N^*$ ). Bir kez daha, bir örnekleme zamanı ileri kaydırmak için sisteme yalnızca ilk kontrol girişi ( $u_1^*$ ) uygulanır. Bu süreç her örnekleme zamanında tekrarlanır.

Sistemde herhangi bir değişiklik meydana gelmesi bu “en yeni / güncellenmiş” durumları değiştirdiyse, yeni bir optimal kontrol problemi formüle edilirken bu etki hesaba katılır ve kontrolör, bunu işlemek için yeni bir optimum kontrol hareketi seti oluşturur. Bu, optimal kontrolöre geri bildirim sağlar.

Herhangi bir zamanda bir optimal kontrol problemi oluşturulurken ve çözülürken, örneğin  $t = j$  olsun, gelecekteki referans değerleri ( $r_{j+1}, r_{j+2}, \dots, r_{j+N}$ ) ve gelecekteki bilinen bozucu değerleri de ( $w_j, w_{j+1}, \dots, w_{j+N-1}$ ) probleme dahildir. Kontrolör, bu değişkenlerin gelecekte ne olacağına dair önceden bilgiye sahip olduğundan bu durum, optimal denetleyiciye ileri besleme özelliği sağlar. Böylece sistemde değişiklik meydana geldiğinde, sistem çıkışı etkilenmeden önce kontrolör uygun şekilde tepki verebilir.



Şekil 7. MPC akış diyagramı

Sistemin gelecekte nasıl davrandığını tahmin etmek için tahmin ufkundaki her örnekleme zamanındaki sistem durum değişkenlerinin başlangıç (veya mevcut) değeri bilinmelidir. MPC' nin temel işleyiş algoritması özet şeklinde Şekil 7'de verilmiştir.

### III. BULGULAR

MPC tasarım parametreleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Örnekleme zamanı
- Tahmin ufku (prediction horizon)
- Kontrol ufku (control horizon)
- Kısıtlar (constraints)
- Ağırlıklar (weights)

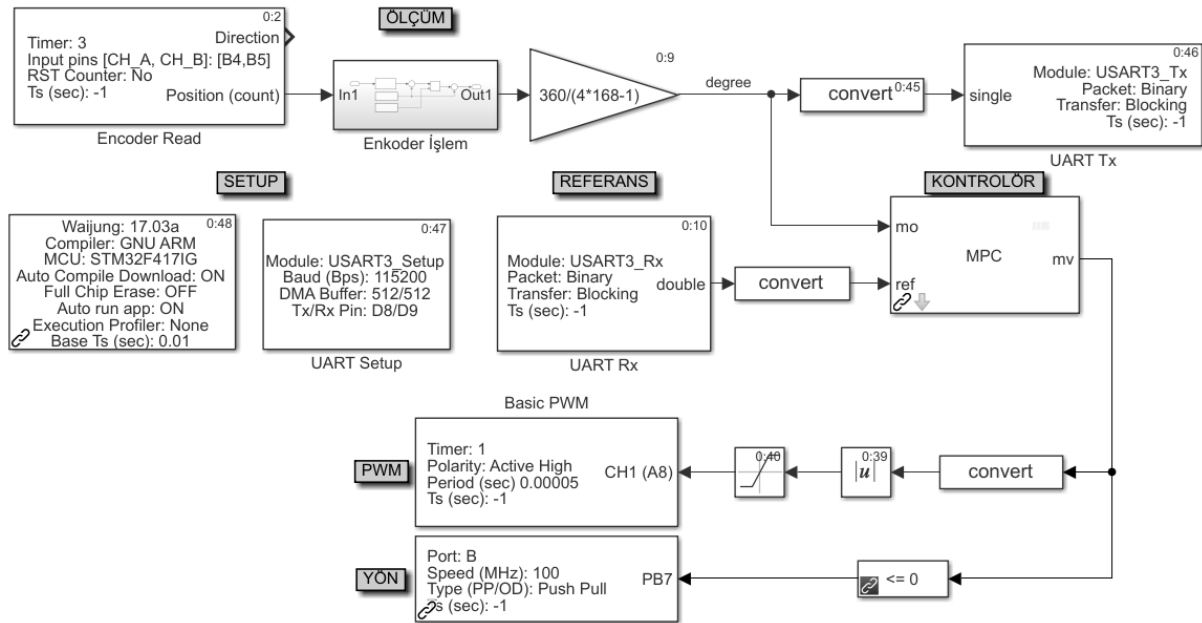
Tasarım sürecinde bu parametrelerin uygun şekilde seçimi kontrolör performansının ve MPC algoritmasının hesapsal karmaşıklığının üzerinde önemli etkiye sahiptir.

MPC denetleyiciye ait standart quadratik maliyet fonksiyon denklemi, Eş. 4'de verilmiştir.

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} \|y(k+i|k) - r(k+i|k)\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} \|\Delta u(k+i|k)\|_R^2 \quad (4)$$

$N_p$ , tahmin ufkunu;  $N_c$ , kontrol ufkunu temsil etmektedir. Ayrıca;  $y$ ,  $r$  ve  $u$  sırasıyla, öngörülen çıkışı, referans girişi ve gelecekteki kontrol hareketleri dizisini ifade etmektedir.

Denetleyici tasarımında, Matlab MPC araç kutusundan faydalanılmıştır. Araç kutusu MPC yöntemi ile denetleyici tasarlayabilmek ve simüle edebilmek için tasarımcılara; fonksiyon, Simulink blokları ve bir arayüz sunmaktadır. Arayüzde denetleyici için tüm tasarım parametreleri ve sistem modeli belirlenebilmektedir. Ayrıca, kapalı çevrim simülasyonları çalıştırılarak, denetleyici performansı değerlendirilebilmektedir.



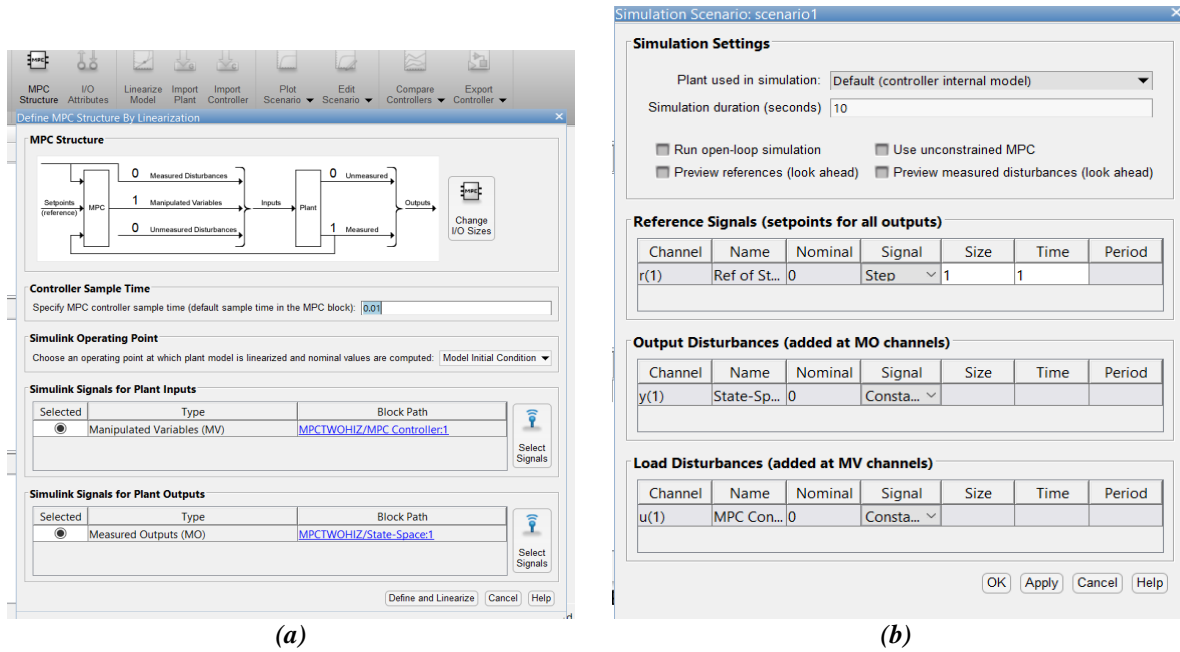
Şekil 8. MPC Simulink modeli



DA motorun MPC denetleyici ile konum kontrolünün gerçekleştirilmesi için geliştirilen Simulink modeli Şekil 8’de görülmektedir. Şekilde görülen MPC bloğu, araç kutusunun sağladığı denetleyici bloğudur. Bu blok ile tasarım için öncelikle sistem modelinin tanımlanması gerekmektedir. Eşt. 1 ile verilen sistem transfer fonksiyonu ile bu adım gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise MPC’ye ait giriş-çıkışların ve parametrelerin tanımlanması gerekmektedir.

Şekil 9-a’da görülen “MPC Structure” kısmında sistem modeli giriş-çıkış boyutu ayarlanmış ve örnekleme zamanı belirlenmiştir. MPC denetleyici tasarımında lineer sistem modeline gereksinim duyulduğundan MPC Araç Kutusunda, “*define and linearize*” seçeneği mevcuttur.

Şekil 9-b’de ise kapalı çevrim simülasyonu için örnek senaryo ayarlarının yapıldığı pencere görülmektedir. Sisteme istenen giriş sinyali verilerek, tasarlanan denetleyicinin performansı arayüz üzerinde incelenebilmektedir. Öncesinde tüm tasarım parametreleri belirlenmelidir. Kritik olan tasarım parametrelerinden biri kısıtlardır. Sistem, 24 voltluk bir DA güç kaynağı ile çalıştırıldığı için giriş kısıtı bu fiziksel limite göre düzenlenmiştir. Ayrıca konum kontrolü, çıkış kısıtı ile  $\pm 360^\circ$  ‘de sınırlandırılmıştır (Şekil 10).



Şekil 9. (a) MPC sistem modelinin araç kutusunda belirlenmesi ve (b) Simülasyon senaryo ayarı

Örnekleme zamanı, 0.01; tahmin ufku uzunluğu, 10; kontrol ufku uzunluğu, 2 olarak belirlenmiştir. (Ara yüzde, bu parametrelerin değişiminin denetleyici performansına etkisi, oldukça kolay bir şekilde tasarımcının analizine sunulmaktadır.)

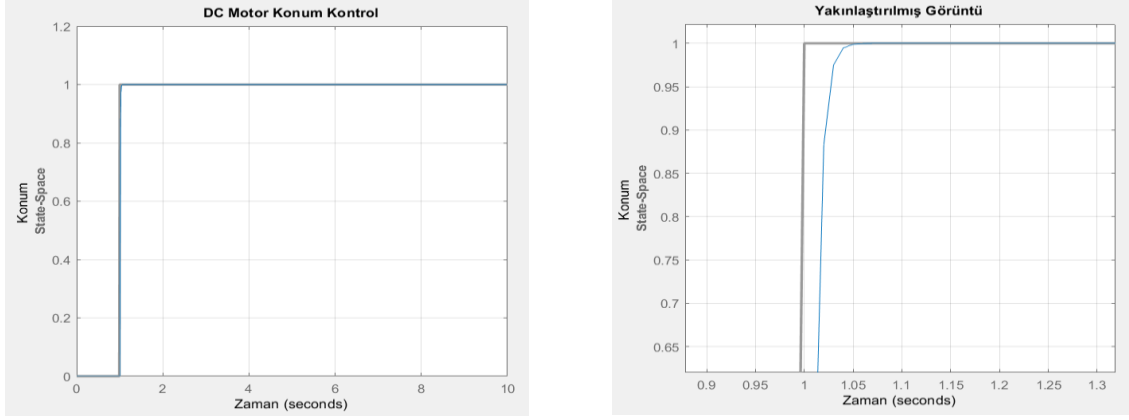
Input Constraints					
Channel	Type	Min	Max	RateMin	RateMax
u(1)	MV	-24	24	-Inf	Inf

+ Constraint Softening Settings

Output Constraints			
Channel	Type	Min	Max
y(1)	MO	-360	360

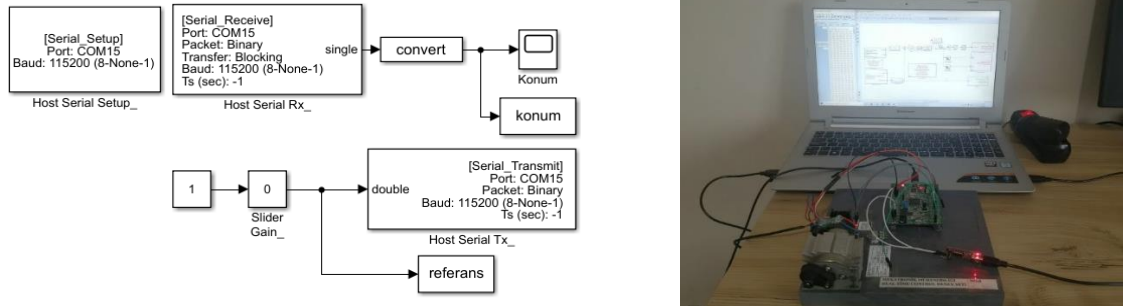
Şekil 10. Sistem giriş-çıkış kısıtları

Öncelikle denetleyici tasarım sonucu araç kutusunda simülasyon ile incelenmiştir. Birim basamak giriş sinyali ayarlandığında, araç kutusu kendi içerisinde oluşturduğu senaryo yapısını çalıştırmış ve Şekil 11’de görülen çıkış elde edilmiştir. Şekilde verilen grafikten görüleceği üzere denetleyici, başarılı bir performans sergilemiştir. Farklı giriş sinyalleri ile denetleyici performansı gözlenebilir.



Şekil 11. MPC araç kutusu simülasyon sonucu

Seri port aracılığıyla sistemden alınan veya sisteme gönderilen verilerin takibinin yapılabilmesi için sunucu bilgisayarda koşacak model Şekil 12’de görülmektedir. Slider Gain parametre ayarında blok çalışma aralığı  $\pm 360$  olarak belirlenmiştir. Böylece referans sinyali belirlenen çalışma aralığında olacak şekilde Host Serial Tx aracılığı ile kite gönderilmiştir. Motor konum bilgisi ise kiten Host Serial Rx aracılığı ile alınmıştır.



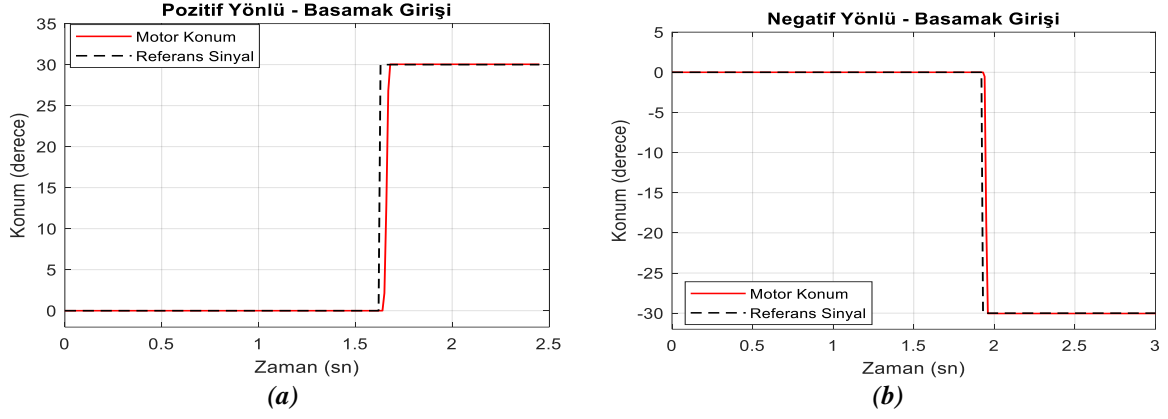
Şekil 12. Host modeli & Test ortamı

Bu çalışmada sabit mıknatıslı fırçalı bir Doğru Akım motorunun konum kontrolü, MPC yöntemi kullanılarak gerçek zamanlı gerçekleştirilmiştir. Kontrolcünün performansının gözlenebilmesi için Şekil 12’de verilen model aracılığıyla gerçek zamanlı olarak test düzeneğine referans giriş sinyali uygulanmış ve sistem yanıtı (DA Motor konum bilgisi) aynı model üzerinden incelenerek veri toplama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Kontrolcü performansının test edilebilmesi için sisteme öncelikle her iki yönde basamak girişi uygulanmıştır. Şekil 13’de sisteme uygulanan  $30^\circ$  basamak girişleri görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, motor milinin  $\pm 30^\circ$  konuma başarı ile vardığı gözlenmiştir.

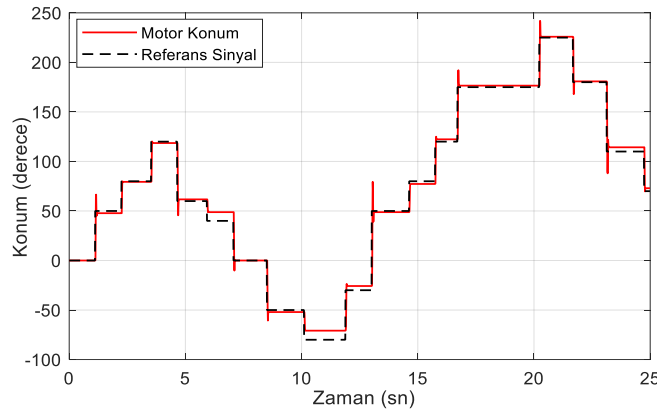
Tablo 2. MPC performans kriterleri (pozitif basamak giriş)

Parametre	Değeri
Yerleşme Zamanı ( $t_s$ )	0.06 (sn)
Aşım ( $os$ )	$0^\circ$
Kalıcı Durum Hatası ( $e_{ss}$ )	$0.04^\circ$



Şekil 13. (a) MPC pozitif basamak giriş – çıkış sinyali (b) MPC negatif basamak giriş – çıkış sinyali

Denetleyici performans analizi için ikinci olarak sisteme rastgele genlikli basamak referans sinyali uygulanmıştır. 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. Sistemin çıkış yanıtı kontrol hedefleri doğrultusunda kontrolör parametrelerinin güncelleştirilmesi ile iyileştirilebilir.



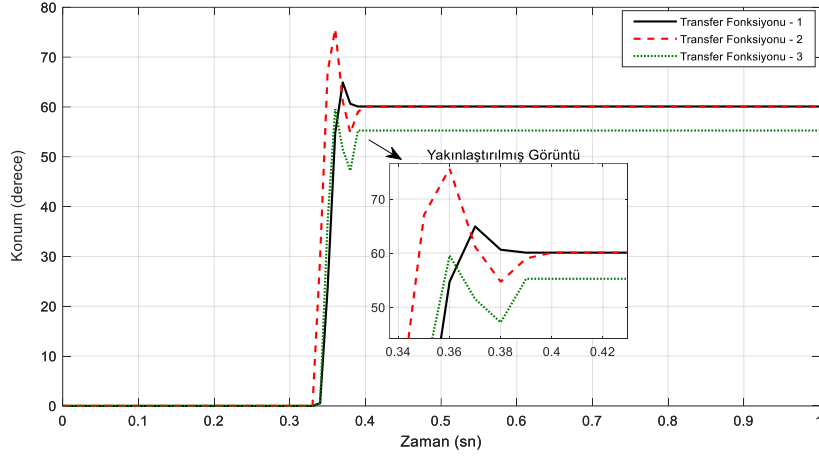
Şekil 14. MPC denetleyici sonucu

Kontrolcü gürbüzlüğü (*robustness*), sistem parametrelerinde herhangi bir değişim meydana geldiğinde, kontrolcünün oluşabilecek istenmeyen etkileri geçersiz kılacak şekilde kontrol performansını sürdürmesi ile belirlenmektedir [8]. Bu çalışmada model parametre değişimlerinin önerilen kontrolcünün başarımını üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Şekil 15’de sistem tanımlama sonucu elde edilen gerçek sistem modeli (Eş. 1) ve bu modelde parametre değiştirilerek elde edilen iki farklı model üzerinden kontrolcü performansı karşılaştırılmıştır. Eş. 5’de ele alınan sistem modelleri görülmektedir.

Kara kutu yaklaşımı ile gerçek sisteme olabildiğinde yakın sistem modeli elde edilmişti (Eş. 1). Elde edilen transfer fonksiyonu paydasında  $s$ ’li terimin katsayısı 120.6 iken bu parametre, 90 ve 60 olarak değiştirilerek 2 farklı sistem modeli daha elde edilmiştir ( $tf2$  ve  $tf3$ ). Bu parametre değişimi sonucu elde edilen transfer fonksiyonları ile modelin doğruluğu azaltılmıştır. Kontrolcünün bu değişime rağmen istenen cevabı sağlayabildiği gözlenmiştir.

$$tf1 = \frac{6.806 * 10^4}{s^2 + 120.6s + 1.084 * 10^{-4}} \quad tf2 = \frac{6.806 * 10^4}{s^2 + 90s + 1.084 * 10^{-4}} \quad tf3 = \frac{6.806 * 10^4}{s^2 + 60s + 1.084 * 10^{-4}} \quad (5)$$

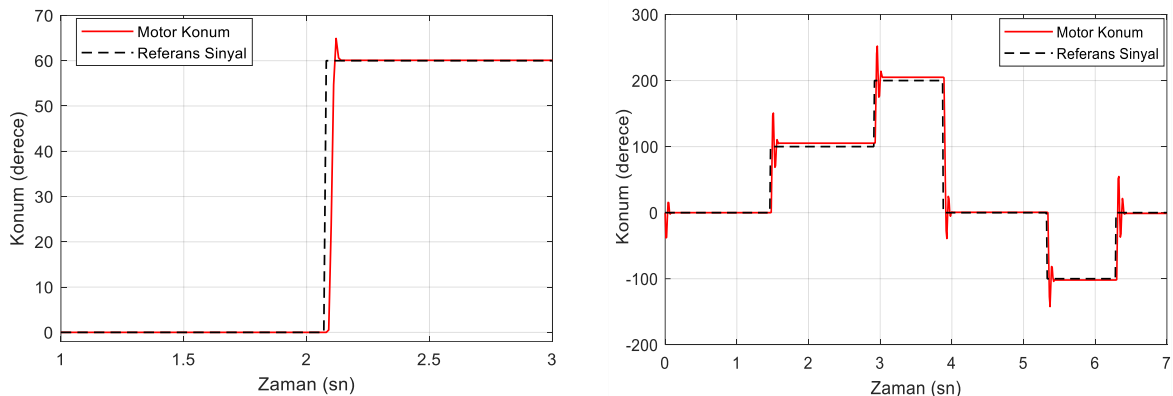


Şekil 15. Parametre değişimi - MPC denetleyici sonucu

Şekil 15’de verilen grafikten görüldüğü üzere sisteme referans olarak  $60^\circ$  basamak girişi uygulanmıştır. Kontrolcü, gerçek sistem modelinde (Transfer Fonksiyonu – 1) düşük bir aşım ile referans noktasına başarıyla varmıştır. Parametre değişimi yapılan ilk sistem modelinde (Transfer Fonksiyonu – 2) aşım oranı artmasına rağmen kalıcı durum hatası meydana gelmemiştir. Parametre değişimi yapılan diğer sistem modelinde (Transfer Fonksiyonu – 3) ise  $5^\circ$  kalıcı durum hatası meydana gelmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere sistemde parametre değişimi meydana gelse dahi sistem çıkışı referans girişi takip etmeyi başarmaktadır.

Klasik kontrol yaklaşımlarından farklı bir tasarım ve uygulama süreci olan MPC denetleyicisinin sisteme uygulanması başarı ile gerçekleştirilmiştir. MPC tasarım sürecinin farkının net bir şekilde ortaya konması açısından klasik kontrol yöntemlerinden PID kontrol tasarım ve uygulama süreci de bu çalışma kapsamında ele alınmıştır.

DA motorların kontrolünde basit yapıları sebebiyle; oran, integral ve türevden oluşan PID kontrolör veya kombinasyonları olan PI, PD kontrolörler tercih edilebilir. PID parametrelerinin ayarlanması amacıyla farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler başarılı sonuçlar vermekle birlikte; istenen sistem çıkışını elde edebilmek için gerekli olan optimal PID parametre değerlerini bulmak, zaman alıcı ve zahmetlidir. Ayrıca bu değerlerin farklı koşullarda tekrar optimizasyonunun yapılması gerekmektedir [16], [17].



Şekil 16. PID denetleyici sonucu

Bu çalışmada PID parametreleri, kapalı çevrim Ziegler-Nichols [13] yöntemi kullanılarak  $K_p = 0,9$  ;  $K_i = 0,45$  ;  $K_d = 0,45$  şeklinde elde edilmiş ve DA motor sistemine uygulanmıştır. MPC testlerinde olduğu gibi sabit ve rastgele genlikli referans girişler uygulanmış ve sonuçlar Şekil 16’da verilmiştir.

PID denetleyici bu iki deneyde başarılı şekilde referans girişi takip etmiştir. Fakat MPC’de gerçekleştirildiği gibi transfer fonksiyonu - parametre değişimi testi gerçekleştirildiğinde ise referans takibi gerçekleştirilememiştir. Böyle bir senaryoda, yapılan değişikliğe göre PID parametrelerinin güncellenmesi gerekmektedir. Bu aşamada MPC denetleyicisinin PID denetleyicisine göre önemli bir üstünlüğü ortaya çıkmaktadır.

Ayrıca Tablo 3’de sabit genlikli referans giriş uygulanması sonucu elde edilen sistem yanıtının detayları görülmektedir. Performans parametreleri açısından da iki denetleyiciyi karşılaştırmak mümkündür (Tablo 2 & Tablo 3).

**Tablo 3.** PID performans kriterleri (sabit genlikli giriş)

Parametre	Değeri
Yerleşme Zamanı ( $t_s$ )	0.08 (sn)
Aşım ( $os$ )	4,92 °
Kalıcı Durum Hatası ( $e_{ss}$ )	0,09 °

## **IV. SONUC**

Bu çalışmada DA motorun pozisyon kontrolü, model tabanlı modern kontrol yöntemlerinden model öngörülü kontrol ile gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. DA motor konum kontrolünü gerçekleştirmek üzere model öngörülü kontrol modeli Matlab destekli Waijung blok seti yardımıyla geliştirilmiştir. Geliştirilen kontrolcü modelinin gerçek zamanlı uygulanması için ise STM32F4 kiti kullanılmıştır.

Kontrolcü performansının gözlenebilmesi için sisteme, farklı referans konum girişleri uygulanmış ve sistem çıkışının davranışı incelenmiştir. Referans giriş uygulandığında sistem çıkışı, referans girişi başarıyla takip etmektedir. Ayrıca model parametre değişimlerinin önerilen kontrolcünün başarımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sistem parametre değişimlerine rağmen motor konum kontrolü başarı ile gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışma ile model öngörülü kontrol yönteminin temel endüstriyel sistemlerde nasıl uygulanabileceği ve bu denetleyicilerin üstlenebileceği aktif rol gösterilmiştir. Ayrıca modern kontrol yöntemlerinin kullanımı ile hızlı ve kolay bir şekilde uygulama geliştirilebileceği ve geliştirilen uygulamaların kontrol eğitiminde kolaylıkla kullanılabilmesi de vurgulanmıştır.

## **V. KAYNAKLAR**

- [1] B. Özkan, “Mekatronik sistemlerde uygulanan belli başlı kontrol yöntemleri,” *TÜBAV Bilim Dergisi*, c. 2, s. 3, ss. 302–316, 2009.
- [2] E. F. Camacho, and C. Bordons, *Model Predictive Control*, London, UK: Springer London, 2007.
- [3] İ. Kaya, ve A. Bawdaka, “DC motor sürücüsü için model öngörülü denetleyici tasarımı,” *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, c. 10, s. 3, ss. 899–910, 2019.
- [4] M. Nikolaou, “Model predictive controllers: A critical synthesis of theory and industrial needs,” *Advances in Chemical Engineering*, vol. 26, pp. 131–204, 2001.
- [5] B. Kouvaritakis, and M. Cannon, *Model Predictive Control*, Denmark: Springer Cham, 2016.
- [6] S. Chai, L. Wang, and E. Rogers, “Model predictive control of a permanent magnet synchronous

- motor with experimental validation,” *Control Eng. Pract.*, vol. 21, no. 11, pp. 1584–1593, 2013.
- [7] G. M. Bone, M. Xue, and J. Flett, “Position control of hybrid pneumatic–electric actuators using discrete-valued model-predictive control,” *Mechatronics*, vol. 25, pp. 1–10, 2015.
- [8] J. Espinoza, “Real-time implementation of model predictive control in a low-cost embedded device,” *J. Syst. Cybern. Informatics*, vol. 16, no. 2, pp. 72–77, 2018.
- [9] K. Xia, Y. Ye, J. Ni, Y. Wang, and P. Xu, “Model predictive control method of torque ripple reduction for BLDC motor,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 56, no. 1, 2020.
- [10] J. Yang, H. Wu, L. Hu, and S. Li, “Robust predictive speed regulation of converter-driven DC motors via a discrete-time reduced-order GPIO,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 10, pp. 7893–7903, 2019.
- [11] M. A. Abbasi, and A. R. Husain, “Model predictive control of a dual induction motor drive fed by a single voltage source inverter,” *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 26, no. 3, 2018.
- [12] T. Yaren, V. Süel, Y. Yeniaydın, B. Sakacı, ve S. Kizir, “STM32F4 kiti ile Simulink tabanlı kontrol eğitimi uygulamaları geliştirme,” *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, 2014, ss. 868–873.
- [13] S. Kizir, T. Yaren, ve E. Kelekçi, *Matlab Simulink Destekli Gerçek Zamanlı Kontrol: Teori ve Mühendislik Uygulamaları*, Ankara, Türkiye: Seçkin Yayıncılık, 2019.
- [14] N. Can, “Optimal kontrol ve optimizasyon,” Yüksek Lisans tezi, Matematik, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, Türkiye, 2008.
- [15] G. Serale, M. Fiorentini, A. Capozzoli, D. Bernardini, and A. Bemporad, “Model predictive control (MPC) for enhancing building and HVAC system energy efficiency: problem formulation, applications and opportunities,” *Energies*, vol. 11, no. 3, p. 631, 2018.
- [16] İ. Yüksel, *Otomatik Kontrol Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri*, Ankara, Türkiye: Nobel Akademik Yayıncılık, 2016.
- [17] B. C. Kuo, *Otomatik Kontrol Sistemleri*, İstanbul, Türkiye: Literatür Yayıncılık, 2016.