

PID ve Bulanık Mantık Tabanlı DC Motorun Gerçek Zamanlı Konum Kontrolü

Kaplan KAPLAN¹, Melih KUNCAN^{2*}, Halit POLAT¹, Burak TEPE¹, Hüseyin Metin ERTUNÇ¹

ÖZET: Son yıllarda güç elektroniği ve mikro elektronik teknolojisinin hızlı gelişimi ile birlikte fırçasız DC motor kullanım alanı oldukça genişlemiştir. Fırçasız DC motor küçük hacim, hafiflik, yüksek verimlilik, enerji tasarrufu, kolay hız ayarı, basit yapı, güvenilir çalışma ve kolay bakım gibi birçok avantaja sahiptir. Günümüzde endüstriyel kontrol proseslerinde fırçasız DC motor yaygın olarak kullanıldığından dolayı DC motor kontrolü önemli bir problem haline gelmiştir. Bu amaçla bu çalışmada, DC motorun pozisyon kontrolü için PID ve Bulanık Mantık kontrolörleri kullanılmıştır. DC Motorun dokümanından gerekli parametreler alınarak DC Motorun dinamik denklemleri ve transfer fonksiyonu çıkarılmıştır. Transfer fonksiyonu üzerinde simülasyon çalışmaları yapılarak PID ve Bulanık Mantık katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan katsayılar ile gerekli blok diyagramları Matlab Simulink ortamında Waijung bloklarıyla oluşturulup Code-Generation aracı ile STM32F4 mikrodenetleyici kitine gömülmüştür. PID ve Bulanık Mantık kontrolör yapıları Mikrodenetleyici içerisine gömülerek DC Motorun pozisyon kontrolü üzerine başarılı deneyler gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bulanık Mantık, PID, DC Motor, Pozisyon Kontrol, STM32F4,

Real Time Position Control of PID and Fuzzy Logic Based DC Motor

ABSTRACT: In recent years, with the rapid development of power electronics and micro-electronics technology, the use of brushless DC motors has expanded considerably. Brushless DC motor has many advantages such as small volume, light weight, high efficiency, energy saving, easy speed adjustment, simple structure, reliable operation and easy maintenance. Today, DC motor control has become an important problem since brushless DC motor is widely used in industrial control processes. For this aim, PID and Fuzzy Logic controllers are used for position control of DC motor in this study. DC Motor's dynamic equations and transfer function are obtained by taking necessary parameters from the document of DC Motor. PID and Fuzzy Logic coefficients were calculated by making simulation studies on transfer function. Calculated coefficients and required block diagrams were created with Waijung blocks in Matlab Simulink environment and embedded in STM32F4 microcontroller kit with Code-Generation tool. PID and Fuzzy Logic controller structures are embedded in microcontroller and successful experiments on DC motor position control have been performed.

Keywords: Fuzzy Logic, PID, DC Motor, Position Control, STM32F4,

¹ Kaplan KAPLAN (Orcid ID: 0000-0001-8036-1145), Halit POLAT (Orcid ID: 0000-0002-4627-6892), Burak TEPE (Orcid ID: 0000-0002-4639-6499), Hüseyin Metin ERTUNÇ (Orcid ID: 0000-0003-1874-3104), Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 41380, İzmit/Kocaeli

² Melih KUNCAN (Orcid ID: 0000-0002-9749-0418), Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 56100, Merkez/SİİRT

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Melih KUNCAN, e-mail: melihkuncan@siirt.edu.tr

Geliş tarihi / Received: 18-09-2019
Kabul tarihi / Accepted: 14-12-2019

GİRİŞ

Elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren ve doğru akım (DC) ile çalışan elektrik makinalarına doğru akım (DC) motor denmektedir. Endüstriyel, robotik, proses otomasyonu ve bilgisayar çevresel birimleri uygulamalarında en çok tercih edilen motor tipi DC motorlardır. DC motorlar AC motorlara göre daha ucuz, verimli, küçük ve etkilidir. Boyut, şekil ve güç bakımından çok çeşitli olmaları da DC motorların sık kullanılmalarının bir diğer sebebidir. DC motorun yüksek verimliliği, kontrolünün basit ve momentin sürekli olması bu tip motorları ön plana çıkarmaktadır. Bu nedenle, DC motorların hız ve pozisyon kontrolü üzerine yapılan çalışmalar önemlidir (Ahmed ve Rajoriya, 2017).

PID (oransal-integral-türev) kontrolör yapısı endüstriyel, robotik, proses otomasyonu ve benzeri sistemlerde en çok kullanılan kontrolör yapısıdır. PID kontrolör yapısının basit, kararlı ve sağlam olması avantajları arasında yer almaktadır. Dezavantajları ise; matematiksel modele ihtiyaç duyması ve doğrusal olmayan sistemlerde yetersiz kalmasıdır. Dinamik sistemler çoğunlukla PID yöntemi ile kontrol edilmektedir. PID kontrolör yapısı matematiksel modele ihtiyaç duyması, doğrusal olmayan sistemlerde yetersiz kalması vb. dezavantajlarından dolayı, alternatif olarak Bulanık Mantık tabanlı kontrol sistemleri gibi kontrolör yöntemleri tercih edilmeye başlanmıştır (Paz, 2001; Yedamale, 2003; Ibrahim, 2004; Coskun ve Terzioğlu, 2009; Oguntoyinbo, 2009; Malhotra ve ark., 2011; Anonim, 2019).

Bulanık mantık, insan ve makinenin etkileşimi sonucu ortaya çıkan mantıksal operatörleri kullanan ve matematiksel fonksiyonlara dönüştüren bir tekniktir. Bu yaklaşım sayesinde insan deneyimleri ve verileri kullanılmaya müsait bir şekilde makinelere aktarılmaktadır. Bulanık mantık, matematik, yapay zekâ, mekatronik, fen bilimleri ve robot teknolojileri vb. geniş bir alanda kullanılmaktadır. Bulanık mantık temel olarak Aristo (klasik) mantığa dayalı olmayıp, bulanık kümeleri ifade eden matematiksel fonksiyonlardan yararlanmaktadır. Klasik (Aristo) mantığı, 0-1, evet-hayır gibi net sonuçlar ile ifade edilir fakat klasik mantık birçok sorunun cevabını tam olarak verememektedir. Çünkü gündelik hayatımız kesin sonuçlardan ibaret değildir. Bulanık mantık kesin sonuçlar ile ifade edilmez ara değerlere sahiptir. Örneğin; normal, az-çok, kısa-uzun, biraz ve 0-1 yerine 0.6 gibi ara değerler bulanık mantık yönteminde kullanılmaktadır. Bulanık mantık teorisi matematiksel model olmadan, doğrusal veya doğrusal olmayan sistemleri kontrol etmede kolay uygulanabilir bir yöntem olmakta ve insan düşünme sistemini model olarak sunmaktadır. Bu gibi avantajlarına rağmen, kuralları ve üyelik fonksiyonlarının tanımlanma zorluğu, kararlılık, gözetlenebilirlik ve denetlenebilirlik analizlerinin yapılamaması en büyük dezavantajları arasında yer almaktadır. Bulanık mantık, gelecekte uygulama sahaları daha çok genişleyecek ve birçok sektörde kullanılmaya başlanacaktır (Çıra ve Gümüş, 2011; Köse ve ark. 2013; Doğan ve ark., 2015; Karakoç ve ark., 2015; Anonim, 2019; Kızır ve ark., 2019). Son yıllarda DC motor hız veya pozisyon kontrolü birçok araştırmacı tarafından çalışılmış ve bulanık mantık ve PID kontrolcülerini ile başarılı çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Sathishkumar ve ark., 2017; El-Samahy ve ark., 2018; Goswami ve ark., 2018; Parikh ve ark. 2018; Somwanshia ve ark., 2019).

Bu çalışmada, DC motor pozisyon kontrolünde STM32F4 Discovery kartı ile LMD18200 motor sürücü kullanılmaktadır. Sistemimiz Li-Po pil ile beslenmektedir. Matlab Simulink ortamında Waijung blok setleri ile oluşturulan kapalı çevrim algoritması mikro denetleyiciye gömülmektedir. Motor enkoderinden okunan pozisyon verileri haberleşme ile Matlab ortamına aktarılmaktadır. Matlab ortamına aktarılan verilerin bu ortamda grafiksel olarak gösterilmesi sağlanmaktadır.

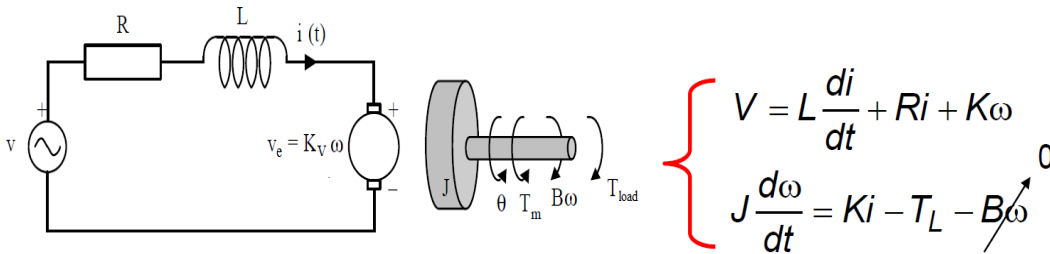
Bu çalışmada aşağıdaki bölümler anlatılacaktır:

2. bölümde DC motor dinamik modeli ve transfer fonksiyonu,
3. bölümde DC motor PID ve Bulanık Mantık ile pozisyon kontrol simülasyonu,
4. bölümde test düzeneği,
5. bölümde PID ile DC motorun gerçek zamanda pozisyon kontrolü,
6. bölümde Bulanık Mantık ile DC motorun gerçek zamanda pozisyon kontrolü,
7. bölümde ise sonuç kısmı yer almaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

DC Motor Dinamik Modeli Ve Transfer Fonksiyonu

DC motorun dinamik denklemleri Eşitlik 1. de görülmektedir. Zaman uzayındaki dinamik denklemleri, frekans uzayına (Eşitlik 2. de görülmektedir) dönüştürülmektedir.

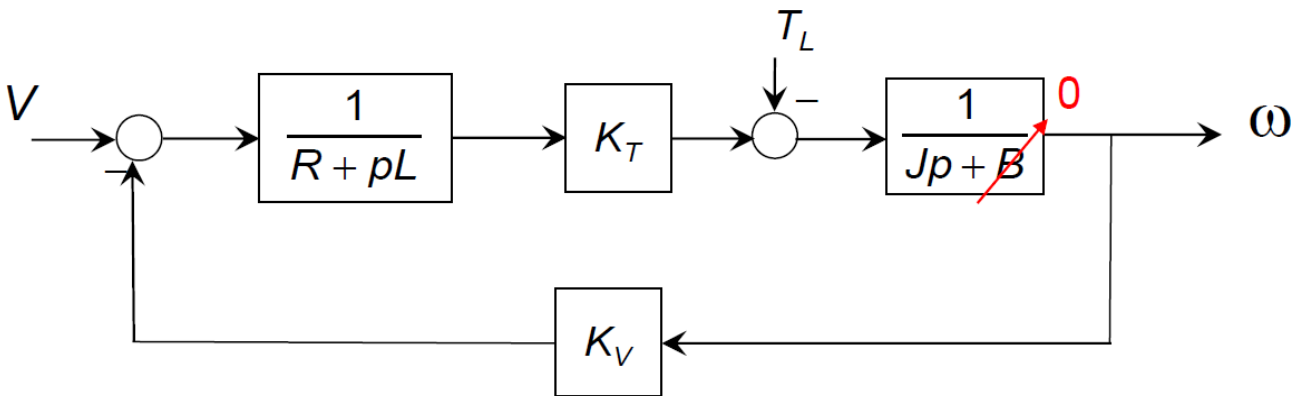


Şekil 1. DC Motor Elektrik Devresi

$$V = LpI + RI + K\omega \quad (1)$$

$$Jp\omega = KI - T_L \quad (2)$$

Eşitlik 2. nin blok diyagramları ile gösterimi Şekil 2'deki gibidir.



Şekil 2. Transfer Fonksiyonu Blok Diyagramı

DC Motorumuzun Parametrik Transfer Fonksiyonu Eşitlik 3. de verilmiştir.

$$\frac{\omega}{V} = \frac{K_T}{JLp^2 + RJp + K_T K_V} \quad (3)$$

DC Motorun parametre değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. DC Motor Parametreleri

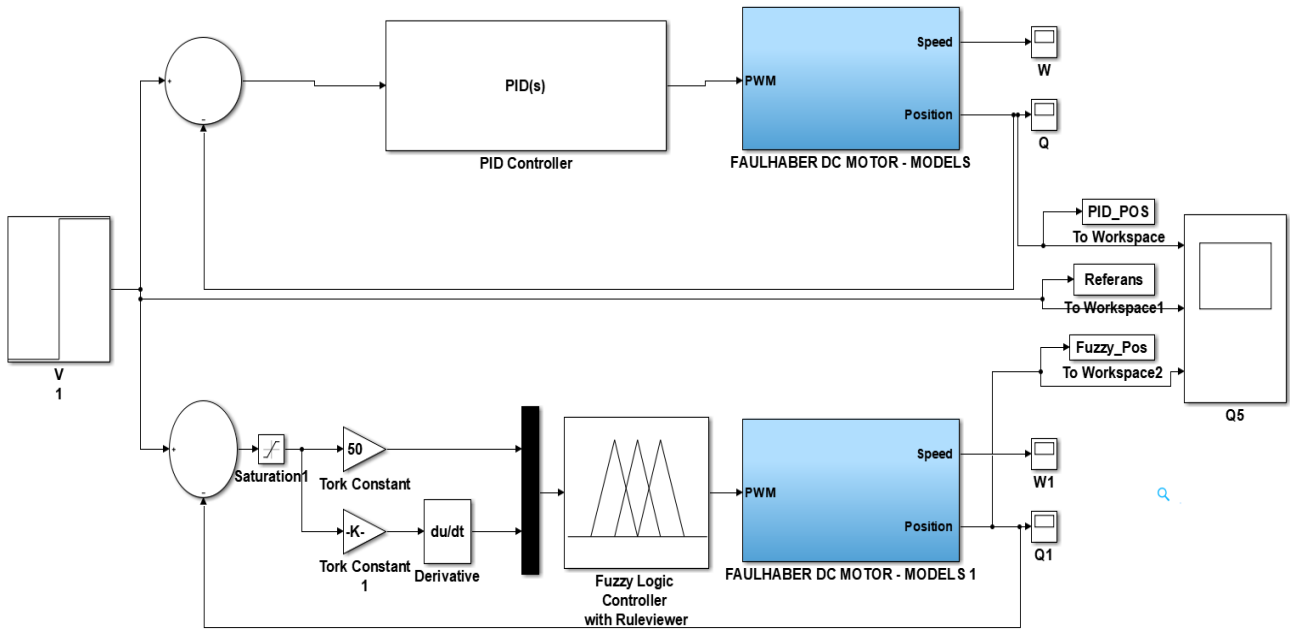
Sembol	Tanım	Değer
J	Rotor Atalet Momenti	5.7e-7
B	Viskoz Sönümlleme	0
K (Kv = KT)	Elektriksel ve Tork Sabiti	13.4e-3
R	Rotor Direnci	1.9
L	Rotor Endüktansı	65e-6

DC motor transfer fonksiyonu Eşitlik 4. te verilmiştir.

$$\frac{\omega}{V} = \frac{13.4 \times 10^{-3}}{3.7 \times 10^{-11} p^2 + 1.083 \times 10^{-6} p + 1.796 \times 10^{-4}} \quad (4)$$

DC Motor PID ve Bulanık Mantık ile Pozisyon Kontrol Simülasyonu

Matlab Simulink ortamında DC motor transfer fonksiyonu bloklar ile eklenmiştir. PID ve Bulanık mantık yöntemleriyle DC motorumuzun simülasyon ortamında pozisyon kontrolü sağlanmaktadır.



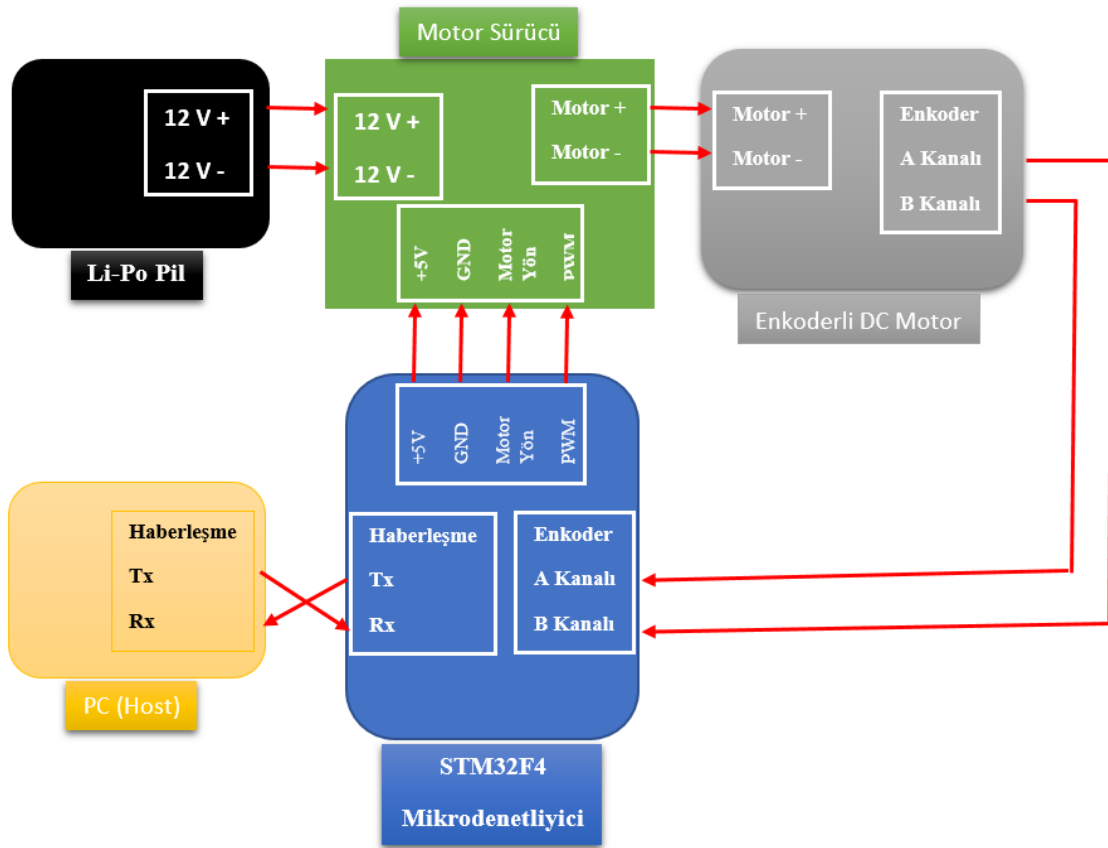
Şekil 3. Matlab Simulink ortamında DC motor simülasyonu

Test Düzeneği

Bulanık mantık ve PID kontrolör blokları Waijung blokları ile Matlab ortamında oluşturulmuş, daha sonra Code-Generation aracı ile test düzeneği üzerinde bulunan STM32F4 kitine her iki kontrolör bloğu da gömülmüştür. Test düzeneği üzerinde bulunan malzemeler;

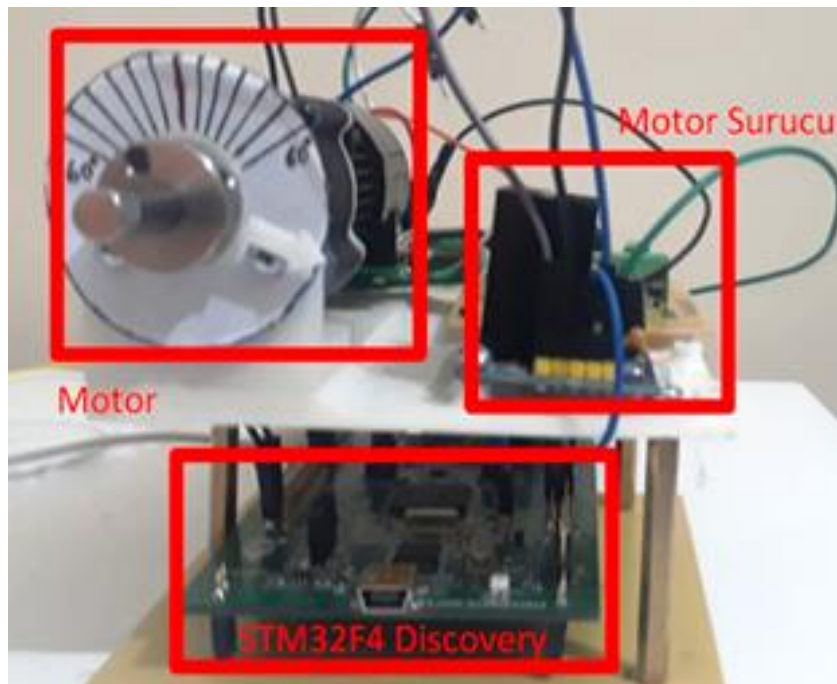
1. STM32F4 Mikro denetleyici
2. LMD18200 Motor Sürücü
3. FAULHABER Motor 2342L012CR
4. Li-Po Pil

Test düzeneği blok şeması Şekil 4'te görülmektedir.

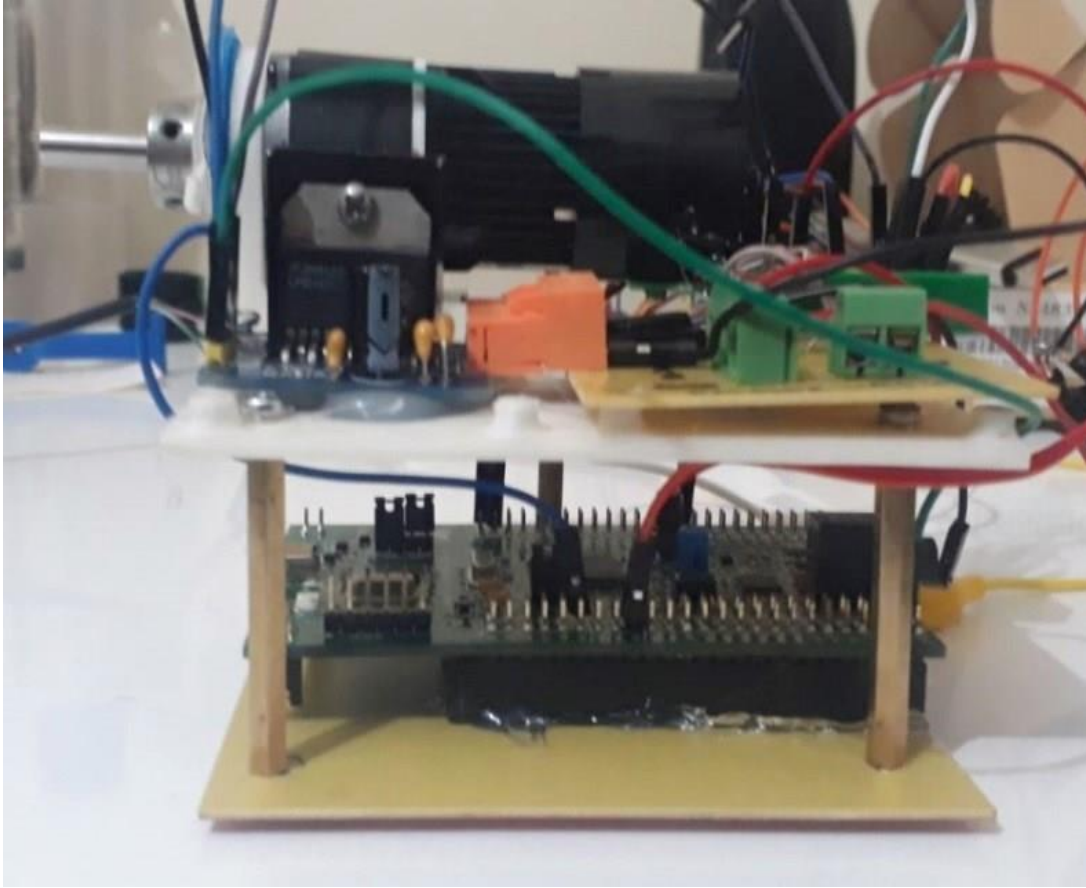


Şekil 4. Çalışma Blok Şeması

Motor test düzeneği Şekil 5 ve Şekil 6’da görülmektedir.



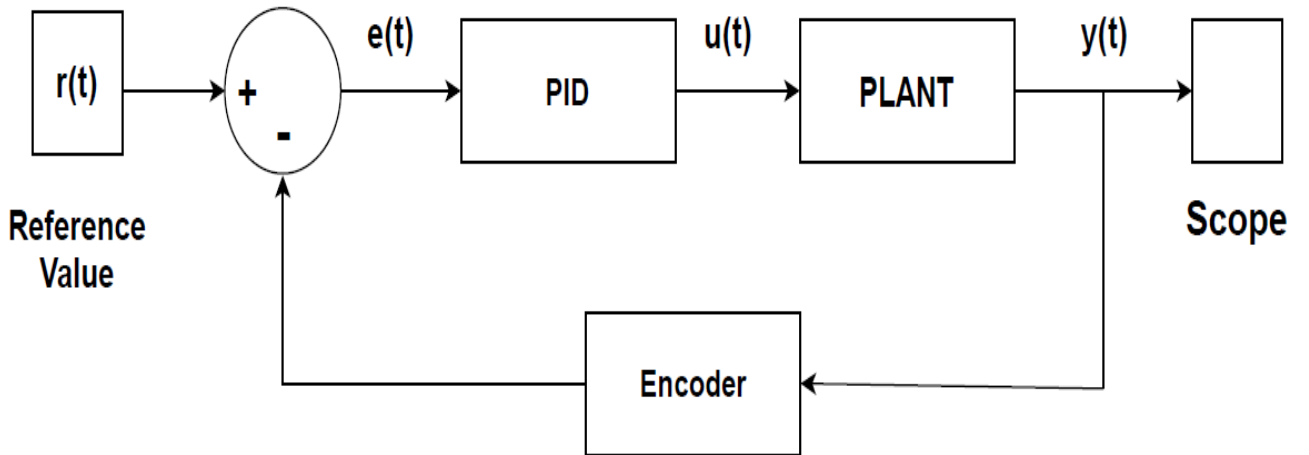
Şekil 5. Motor Test Düzeneği Ön Taraftan Görünüşü



Şekil 6. Motor Test Düzenegi Yan Görünüşü

PID ile DC Motorun Gerçek Zamanda Pozisyon Kontrolü

PID (oransal-integral-türev) kontrolör yapısı basit, kararlı ve sağlam bir yapıya sahip olduğundan dolayı endüstriyel, robotik, proses otomasyonu ve benzeri sistemlerde en çok kullanılan kontrolör yapısıdır. PID kontrol yöntemi blok diyagramı Şekil 7'deki gibi oluşturulmuştur (Paz, 2001).



Şekil 7. PID Kontrol Yöntemi Blok Diyagramı

Şekil 7'deki $u(t)$ ifadesi kontrol sinyalini, $y(t)$ ifadesi çıkış sinyalini, $r(t)$ ifadesi referans sinyalini ve $e(t)$ ifadesi ise hata sinyalini temsil etmektedir. $u(t)$ çıkış sinyali Eşitlik 5. Ve Eşitlik 6. kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (5)$$

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (6)$$

İstenilen referans sinyalini çıkış sinyalinin takip edebilmesi için Eşitlik 4. deki K_p , K_i ve K_d parametrelerinin sistem için en optimum şekilde ayarlanması gerekmektedir. K_p oransal parametresi $e(t)$ hata sinyali ile çarpılmasıyla, K_i integral parametresi hata sinyallerinin toplanıp $e(t)$ hata sinyali ile çarpılmasıyla, K_d türev parametre ise hata sinyalinin değişiminin $e(t)$ hata sinyali ile çarpılmasıyla ve son olarak hepsinin toplanması ile $u(t)$ PID kontrolör çıkış değeri elde edilmektedir. Bu 3 farklı PID parametresi sistemdeki çalışma performansına olan etkisi farklılık göstermektedir. Bu yüzden sistemin en iyi şekilde kontrol etmek için Çizelge 2'deki özellikler dikkat alınarak PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir.

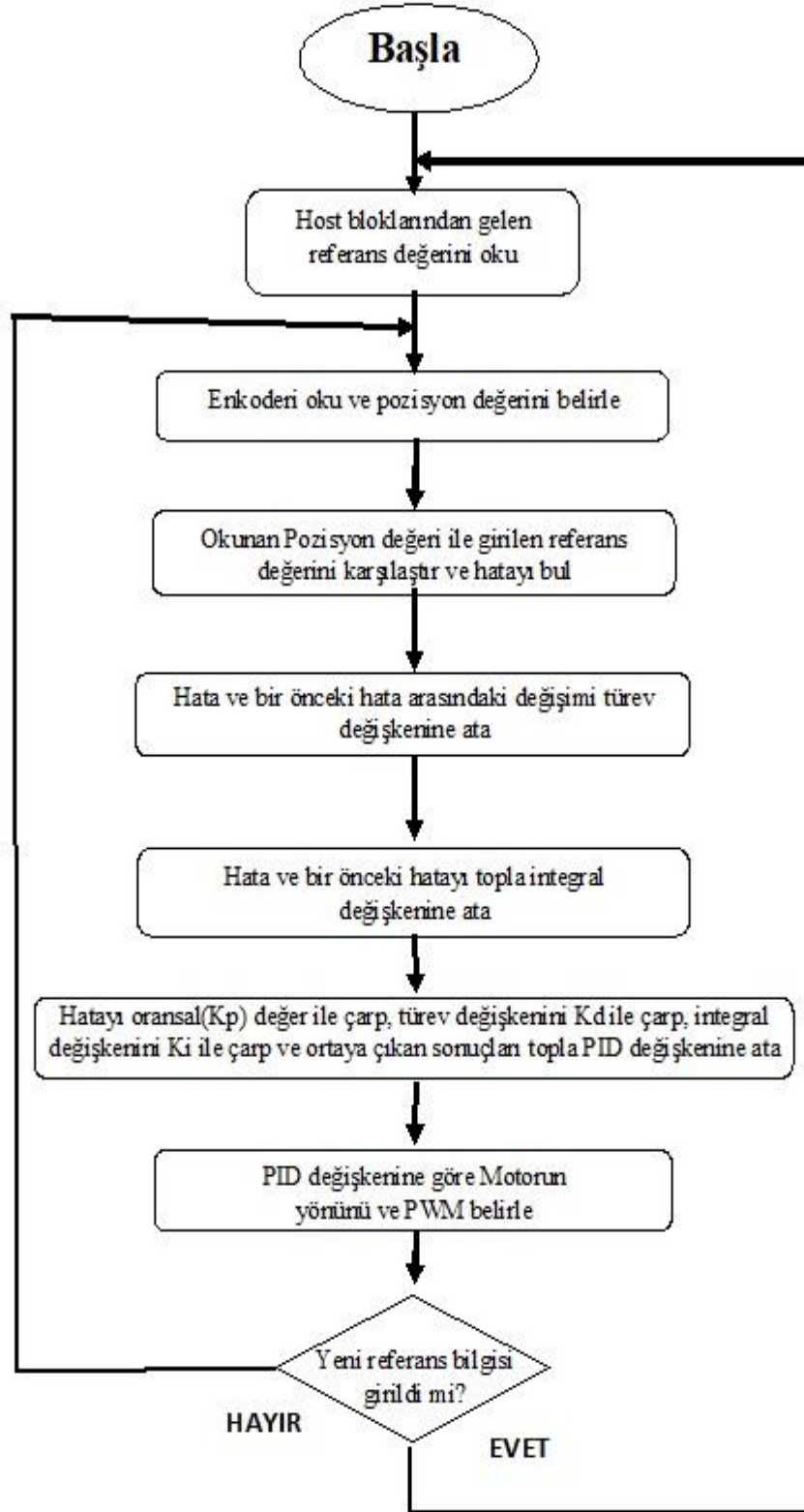
Çizelge 2. PID Parametrelerinin Özellikleri

	Yükselme Zamanı	Aşım	Oturma Zamanı	Kalıcı Durum Hatası
K_p	Azaltır	Artırır	Az Değişim	Azaltır
K_d	Azaltır	Artırır	Artırır	Az Değişim
K_i	Az Değişim	Azaltır	Azaltır	Yok eder

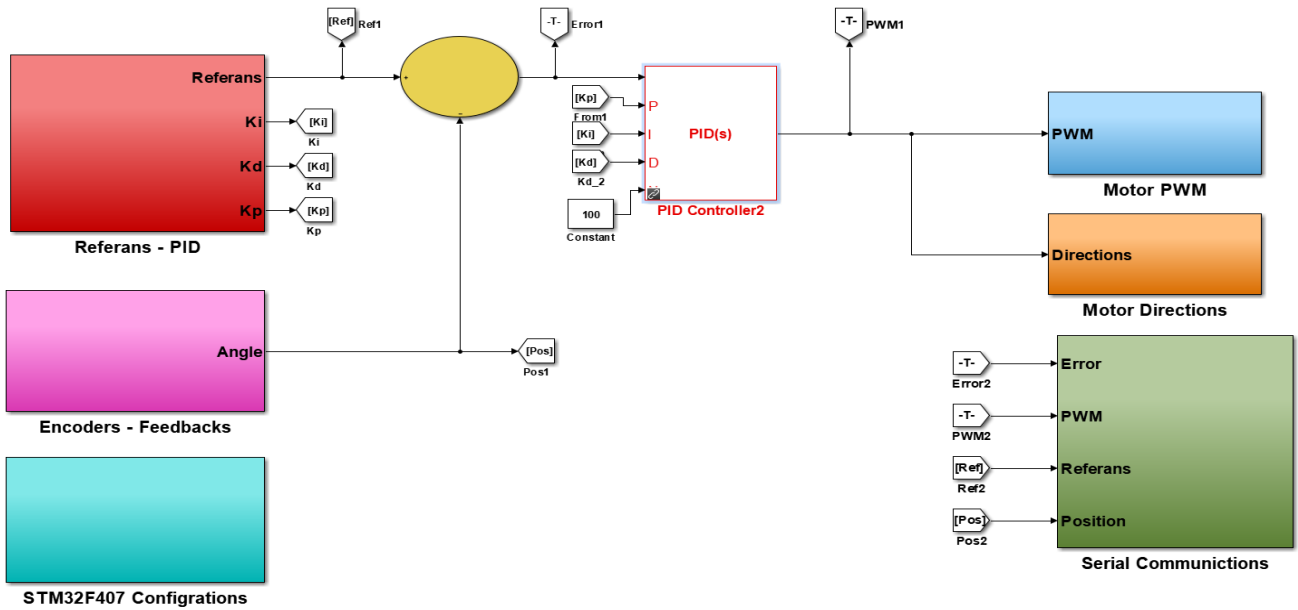
Bu çalışmada, 2. ve 3. bölümlerde DC motorun transfer fonksiyonu çıkartılıp daha sonra simülasyonu yapılmıştır. Matlab Simulink ortamında simülasyonu yapılan transfer fonksiyonun PID kontrol bloğu ile PID parametreleri (K_p , K_i ve K_d) hesaplanmıştır. PID parametreleri olan K_p , K_i ve K_d sırasıyla 1.93, 100 ve 0 olarak belirlenmiştir. Bu parametreler ile sistem çıkışının referans sinyalini bire bir yakaladığı gözlemlenmiştir. Şekil 8'de mikro denetleyici içerisine gömülmüş PID kodlarının genel akış diyagramı verilmiştir.

Şekil 8'de verilen akış diyagramında ise verilen referans sinyaline göre motor pozisyonu bilgisi enkoderden alınarak referans sinyaline olan benzerliği kontrol edilmiştir ve hata payına göre belli motora uygulanması muhtemel PWM sinyali yeniden belirlenmiştir. Tekrardan referans sinyali girildiği zamanda PID kontrolörünün hata, hatanın toplamı ve hatanın değişimini temsil eden değişkenler yeniden belirlenerek motora uygulanacak PWM sinyali de belirlenmiştir.

Gerçek zamanlı kontrol için Matlab Simulink ve Waijung blok setlerinden yararlanılmıştır. Host ekranında verdiğimiz referans değer ile enkoder bloğundan gelen pozisyon bilgisinden çıkartılarak hata değeri elde edilmektedir. Daha sonra hata değerine göre PID kontrol işleminden geçtikten sonra motorun yönü ve doluluk oranı ayarlanmaktadır. Şekil 9'da Matlab Simulink PID ve Waijung blok setleri gösterilmektedir.



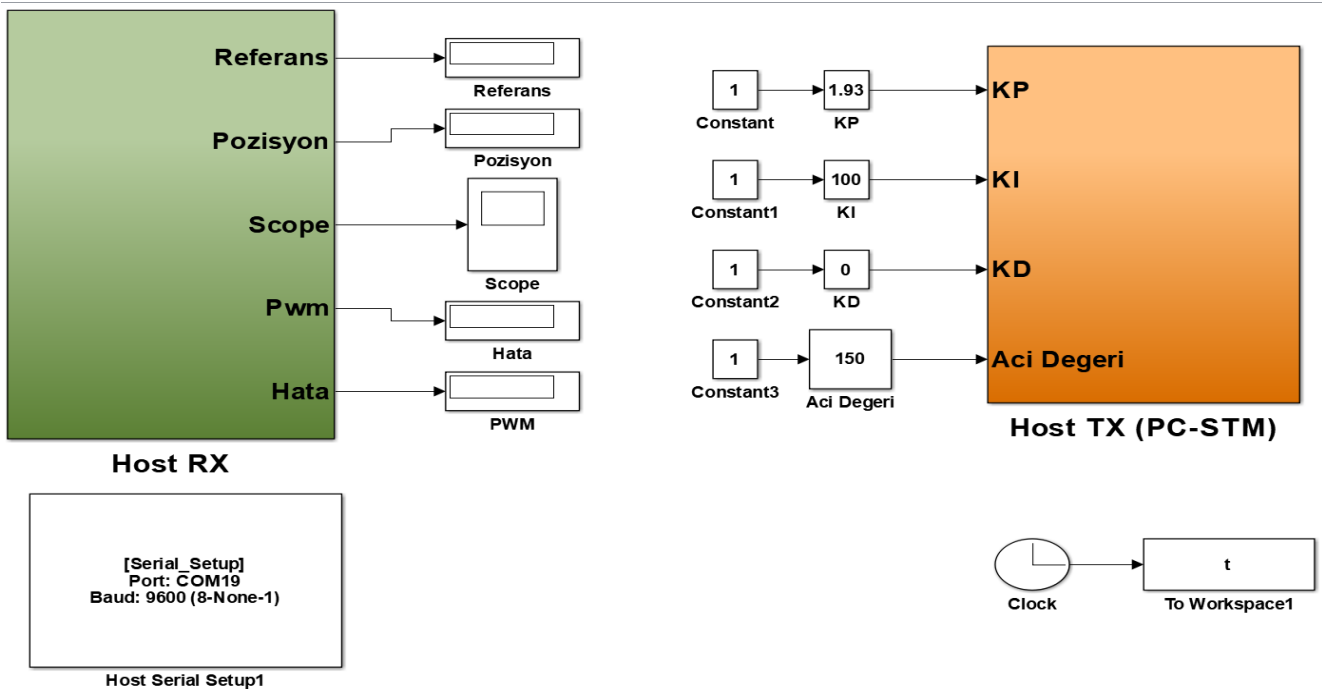
Şekil 8. Akış Diyagramı



Şekil 9. Matlab Simulink PID ve Waijung Blok Setleri

Host blokları ile motorun anlık grafiklerini referans değeri ve PID katsayıları ayarlanabilmektedir. Şekil 10'da Matlab Simulink PID Kontrolör ve Waijung Host Blok Setleri gösterilmektedir. Bu çalışmada, PID parametreleri olan K_p , K_i ve K_d şu yöntem ile bulunmuştur:

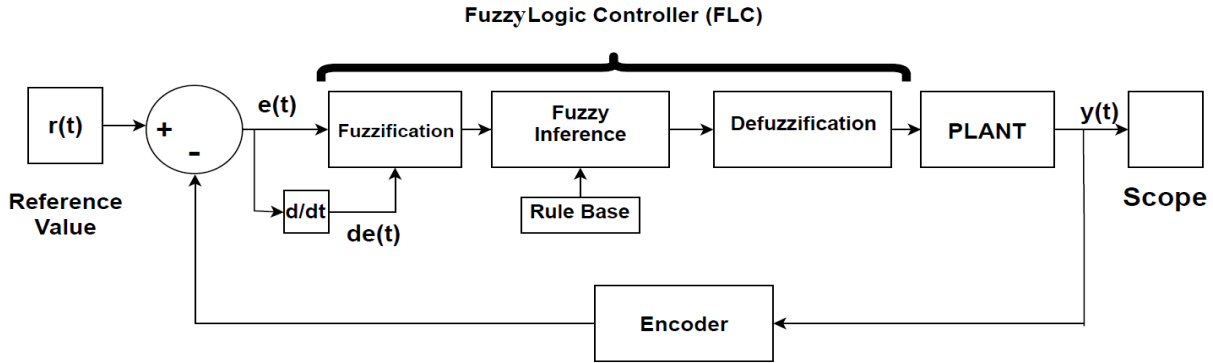
DC motor dokümanından gerekli parametreler alınarak motorun transfer fonksiyonu oluşturulmuştur ve daha sonra Matlab Simulink ortamında PID bloğu kullanılarak kontrol edilmiştir. Burada PID katsayılarını PID tuning ile bulunmuştur ve bu katsayılar gerçek zamanda oluşturulan sistemde başarılı bir şekilde çalıştığı görülmüştür. Yani sistemin transfer fonksiyonu gerçek sistemimizi %90 oranında temsil ettiği tespit edilmiştir. Bulunan katsayılar K_p , K_i ve K_d sırası ile 1.93, 100, 0'dır.



Şekil 10. Matlab Simulink PID Kontrolör ve Waijung Host Blok Setleri

Bulanık Mantık ile DC Motorun Gerçek Zamanda Pozisyon Kontrolü

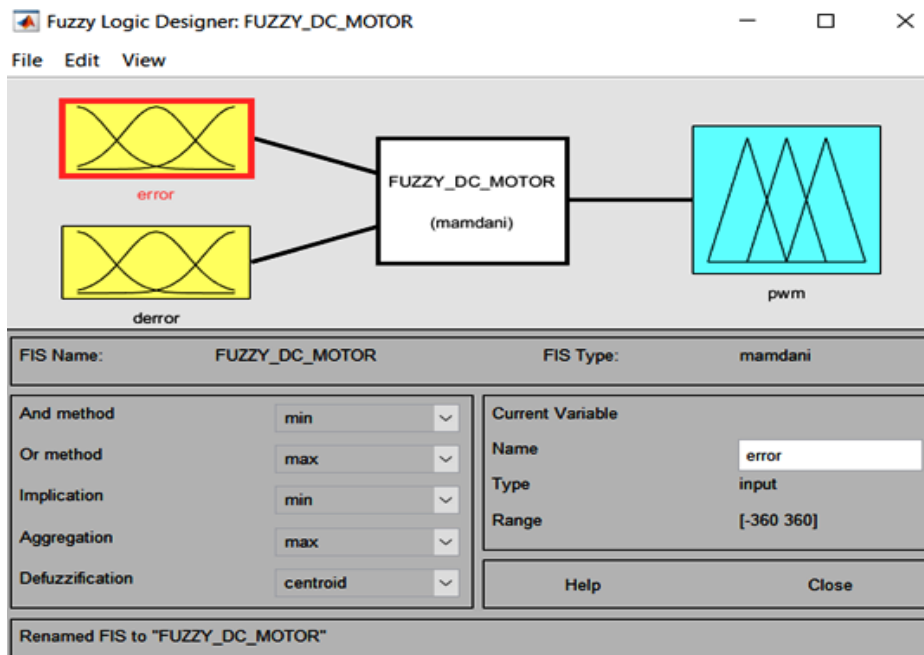
Bulanık mantık, insan ve makine etkileşimi sonucu ortaya çıkan, mantık operatörleri kullanan ve bunları basit matematiksel ifadeler ile gerçekleştiren bir kontrol yöntemidir. Bulanık mantık teorisi Aristo (klasik) mantığa dayalı olmayıp, bulanık kümeleri ifade eden matematiksel ifadelerden yararlanmaktadır (Ergün, 2019). Şekil 11'de Bulanık Mantık Kontrolör Blok Diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 11. Bulanık Mantık Kontrolör Blok Diyagramı

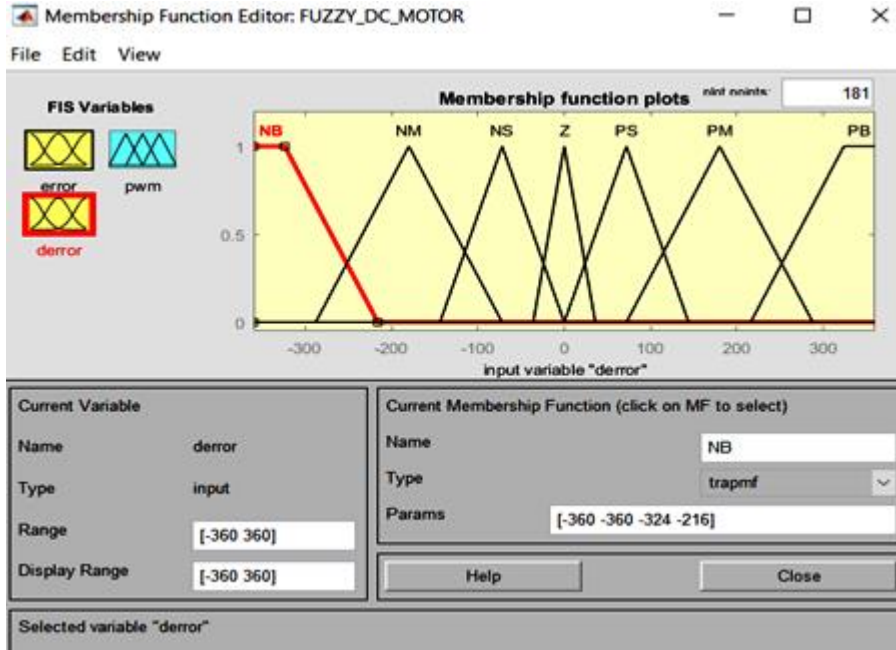
Hata ($e(t)$) ve hatanın değişimi ($de(t)$) bulanık mantık ile kontrol gerçekleştirebilmek için giriş olarak kullanılır. Referans değeri ile enkoderden okunan pozisyon bilgisinin farkı hatayı ($e(t)$) hesaplar. Hatanın bir önceki değeri ile farkı hatanın değişimini ($de(t)$) hesaplamaktadır. Hesaplanan hata ve hatanın değişimi bulandırma işleminden geçirilmektedir. Bulandırma işleminin ardından kural tablosu işleminden geçirilmektedir. Son olarak kural tablosu işleminden sonra durulama işlemi gerçekleştirilmektedir. Durulama işlemi sonucu motora uygulanacak sinyaller (Motor yön ve PWM) elde edilmektedir.

Şekil 12'de bulanık mantık ara yüzü görülmektedir. Referans değerden ve geri beslemenin farkından oluşan hata ve hatanın değişiminden oluşan iki giriş mevcuttur. Çıkışta, motorun doluluk oranının ayarlanması için PWM kümeleri bulunmaktadır. Durulandırma yöntemi olarak Centroid yöntemi kullanılmaktadır.

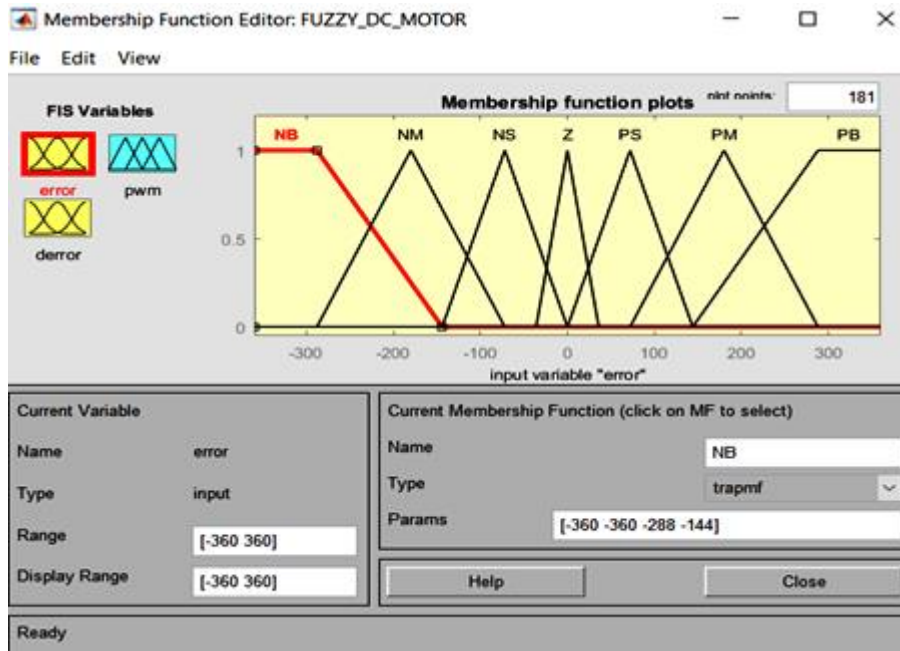


Şekil 12. Matlab – Bulanık Mantık Ara yüzü

Çalışma kapsamında, DC motorun pozisyon kontrolünde bulunan hata ve hatanın değişim miktarları değerleri ile oluşturulan bulanık üyelik fonksiyonları Şekil 13 ve Şekil 14'teki gibi belirlenmiştir.



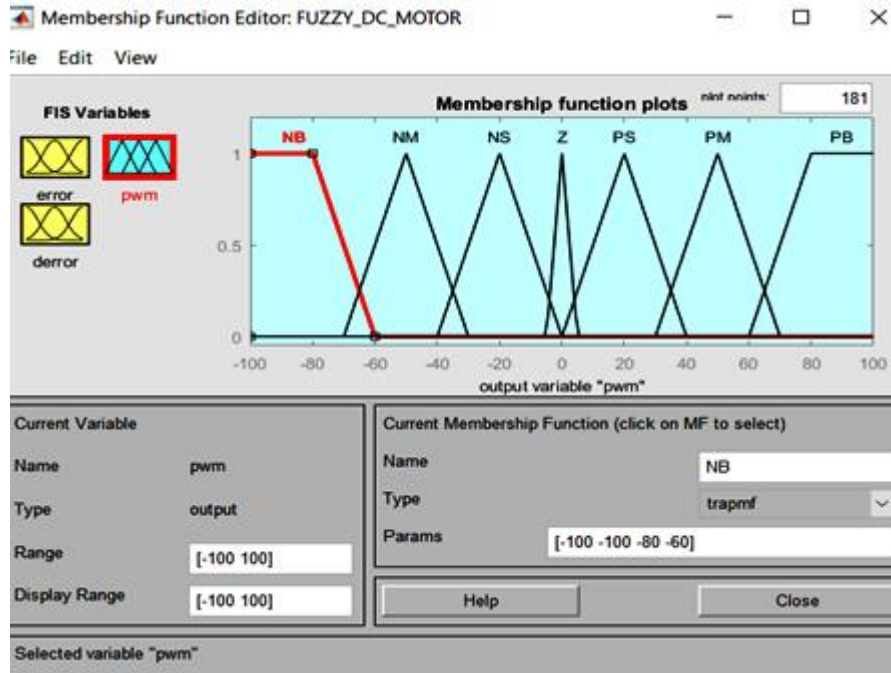
Şekil 13. Matlab – Hatanın Değişimi Üyelik Fonksiyonları



Şekil 14. Matlab – Hatanın Üyelik Fonksiyonları

Şekil 13 ve 14'de görüldüğü üzere üçgen ve yamuk fonksiyonları tercih edilmiştir. Motor tam bir turu olan 0 ile 360 dereceler arasında çalışması istenmektedir. Bundan dolayı hata ve hata değişimi üyelik fonksiyonlarındaki sınır değerleri -360° ve 360° olarak belirlenmiştir. Bulanık üyelik fonksiyonları olarak NB (Negatif Büyük), NM (Negatif Normal), NS (Negatif Küçük), Z (Sıfır), PS (Pozitif Küçük), PM (Pozitif Normal), PB (Pozitif Büyük) sembolik değerleri kullanılmıştır (Köse ve ark., 2013).

Çıkış olarak istenilen PWM sinyalinin üyelik fonksiyonu Şekil 15’deki gibi belirlenmiştir. PWM sinyalinin doluluk oranı 0-100 arasında değiştiği için çıkış PWM sinyalinin sınır doluluk oranı -100 ve 100 olarak üyelik fonksiyonlarında belirlenmiştir.



Şekil 15. Matlab – Çıkış (PWM) Üyelik Fonksiyonları

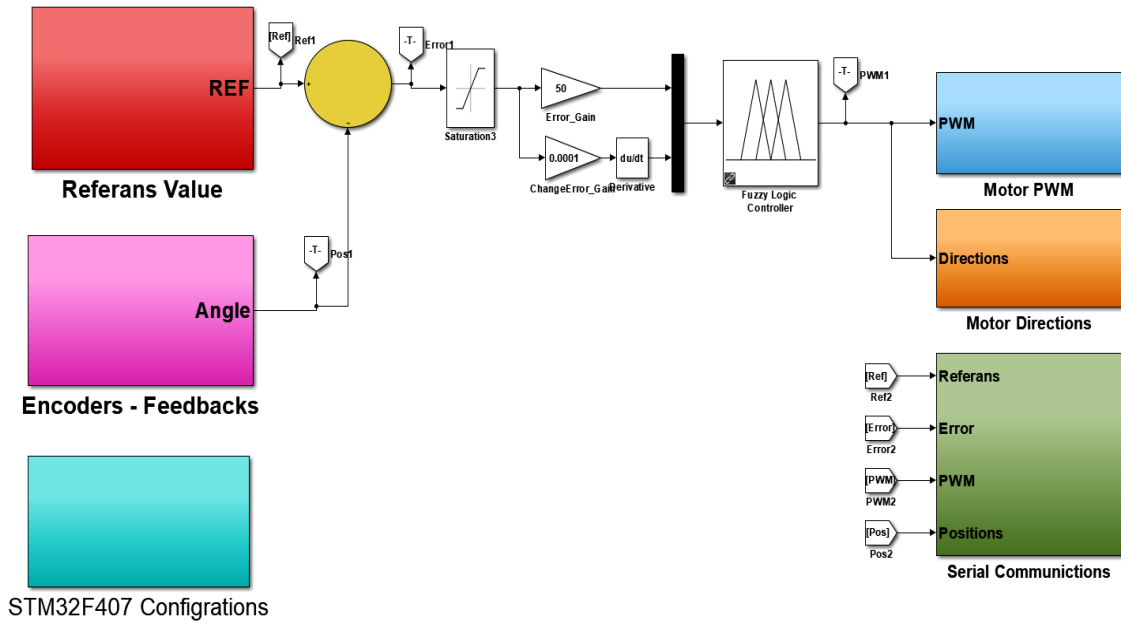
Çizelge 3’teki kural tablosu bulandırılan hata ve hatanın değişim değerlerini üyelik fonksiyonlarını içermektedir. Şekil 15’ ise PWM üyelik fonksiyonlarından uygun çıkışı elde edilmesini sağlayan gerekli üyelik fonksiyonlarını göstermektedir. Kural tablosunda “*e*” parametresi hatayı, “*de*” parametresi ise hatanın değişimini temsil etmektedir. Hesaplama maliyetini en aza indirmek için çıkış en fazla (max-min) yöntemi kullanılarak belirlenmiş, durulama işlemi için ise Centroid yöntemi tercih edilmiştir (Kızır ve ark., 2019).

Çizelge 3. Bulanık Mantık Kural Tablosu

e/de	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z
NM	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS
NS	NB	NM	NM	NS	Z	PS	PM
Z	NB	NS	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB
PM	NS	Z	PS	PM	PB	PB	PB
PB	Z	PS	PM	PM	PB	PB	PB

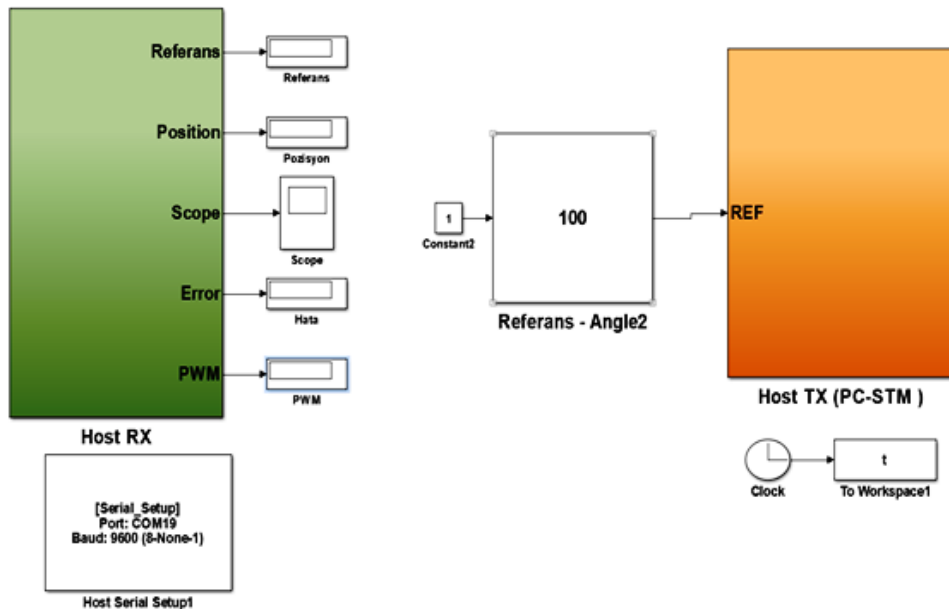
Şekil 16’da bulanık mantık kontrol ve Waijung blok diyagramları görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi hata ve hatanın değişimi giriş değerleri olarak kullanılmıştır. Encoder sensöründen alınan güncel pozisyon bilgisi ve referans pozisyon bilgisi karşılaştırılarak hata değeri elde edilir, hatanın

değişimi ise hata ile hatanın bir önceki değeri arasındaki fark alınarak elde edilir. Daha sonra bu girişler üyelik fonksiyonları ile bulandırma işlemine tabi tutulur. Kural tablosu ile çıkarım gerçekleştirilir ve en sonunda durulama işlemiyle nihai kontrol sinyali elde edilir.



Şekil 16. Matlab Simulink Bulanık Mantık ve Waijung Blok Setleri

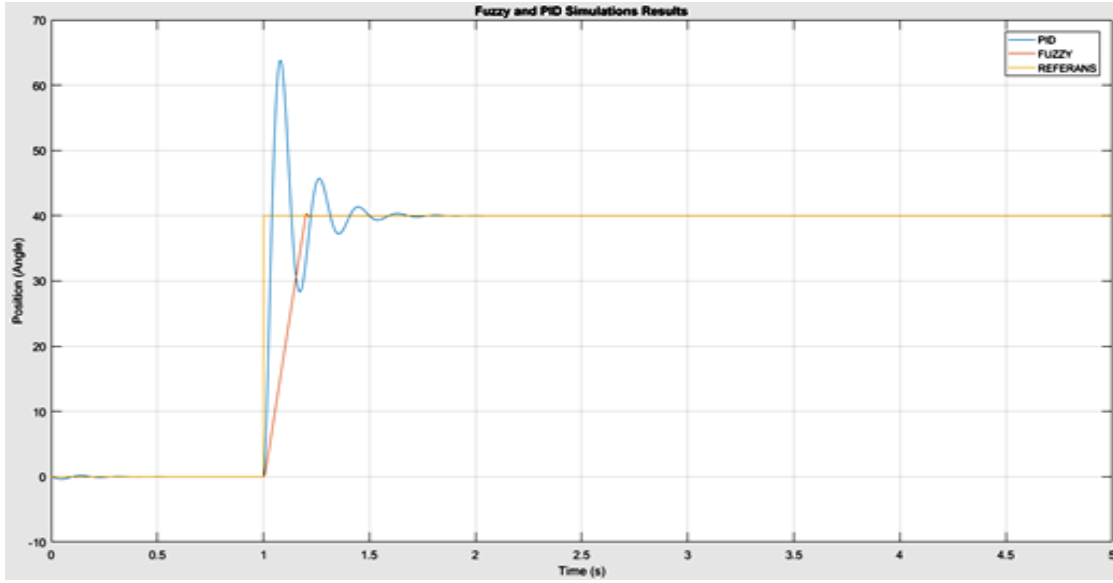
Host Blokları ile motorun anlık grafiklerini görülmekte ve referans değeri ayarlanmaktadır.



Şekil 17. Matlab Simulink Bulanık Mantık ve Waijung Host Blok Setleri

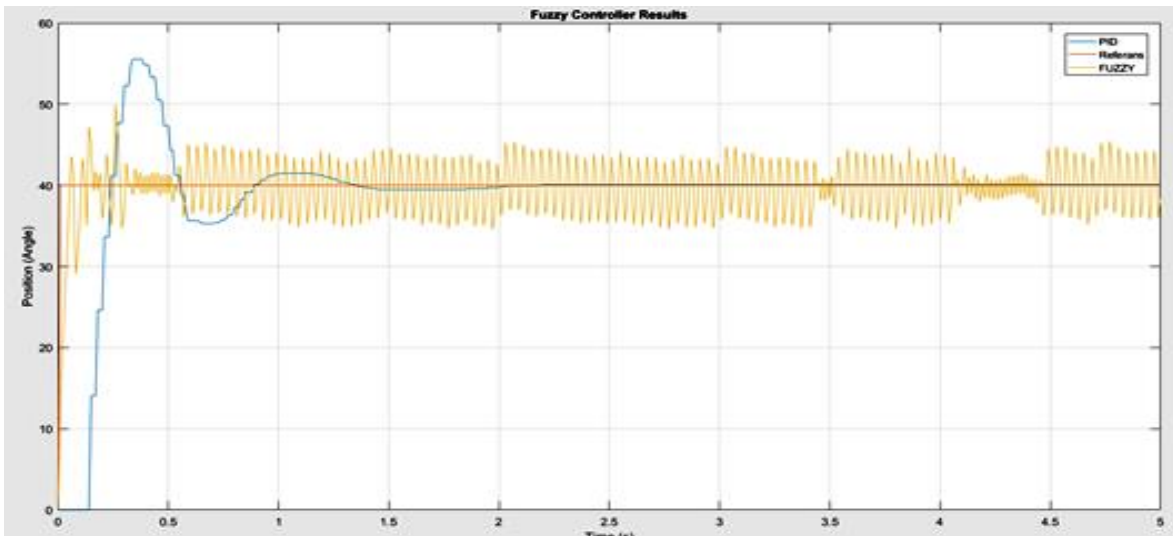
BULGULAR VE TARTIŞMA

3. bölümde simülasyonu yapılan transfer fonksiyonu ile aynı referans sinyalleri kullanarak PID ve bulanık mantık kontrolörleri karşılaştırılmıştır. Örnek olarak giriş pozisyonu referans değeri olarak motorun 40° gitmesi istenmiştir. Verilen 40° giriş sinyaline kontrolörlerin cevabı Şekil 18’de verilmiştir.



Şekil 18. PID ve Bulanık Mantık Simülasyon Sonucu

5. ve 6. bölümlerde gerçek zamanlı olarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Giriş değeri olarak motorun 40° gitmesi istenmiştir. Verilen 40° giriş sinyaline kontrolörlerin cevabı Şekil 19'da verilmiştir.



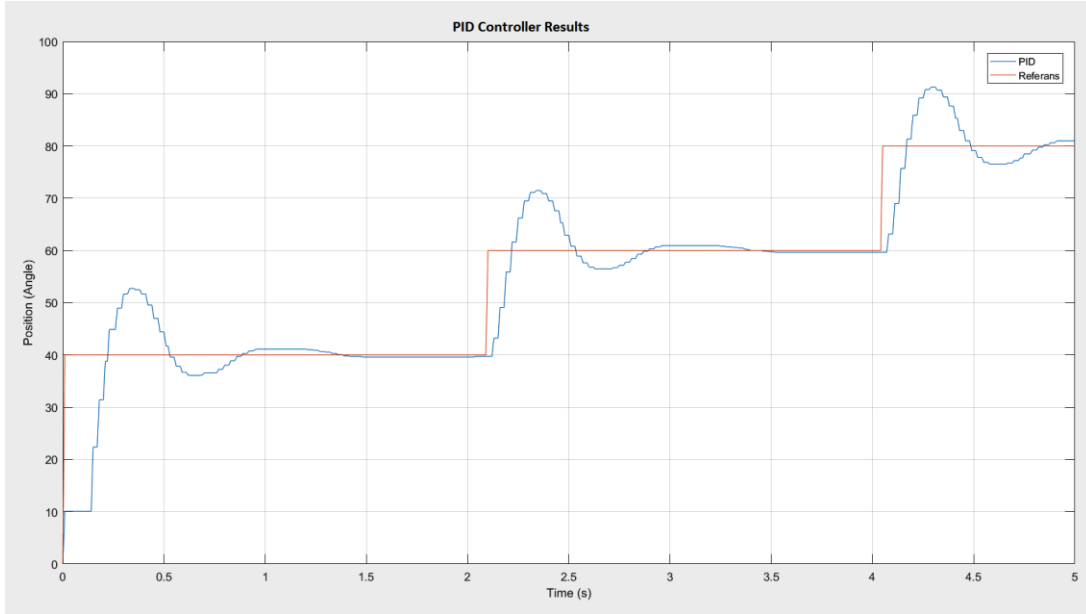
Şekil 19. PID ve Bulanık Mantık Gerçek Zamanlı Test Sonucu

Kontrolcülerin performans kriterleri açısından karşılaştırılması Çizelge 4'te sunulmuştur. Grafikten ve tablodan görüldüğü üzere PID kontrolörde fazla aşım bulanık mantık kontrolöre göre daha büyük olduğu görülmektedir. Bulanık kontrolörün yükselme zamanının ise daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca PID kontrolörün daha kısa sürede referans sinyale ulaşarak daha az bir oturma süresine sahip olduğu görülmektedir. PID kontrol integral etkisi ile kalıcı durum hatasını bu referans değeri için daha aza indirdiği görülmektedir.

Çizelge 4. Bulanık Mantık ve PID Grafik Değerlerinin Karşılaştırılması

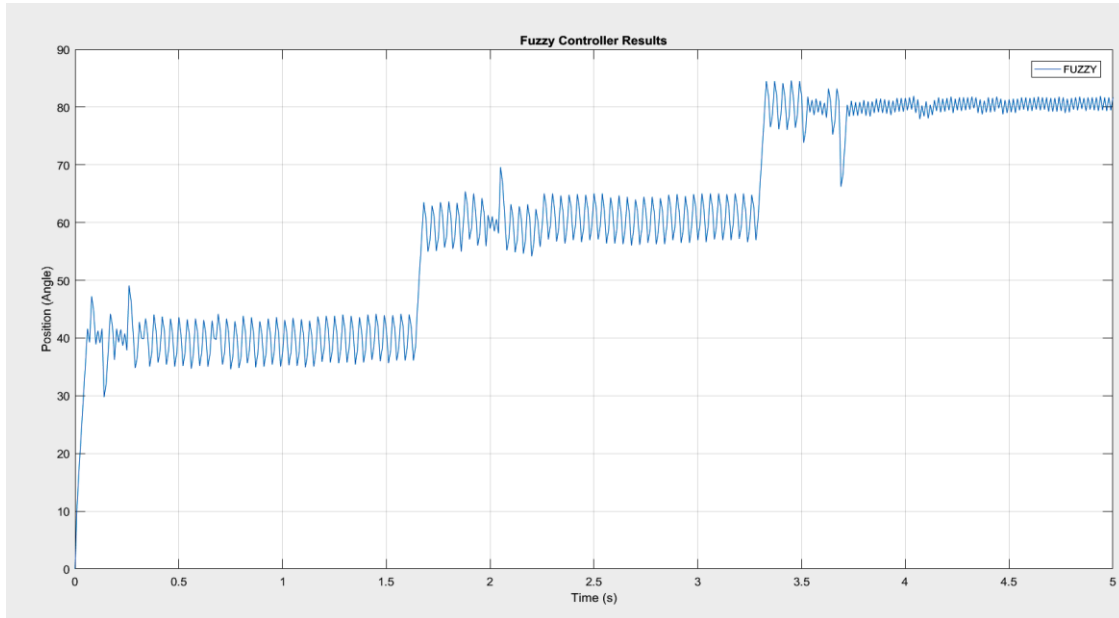
	Bulanık M. Kontrol	PID Kontrol
Aşırı Aşım	% 10.1	% 30.3
Yükselme Zamanı	0.01s	0.2s
Oturma Zamanı	-	1.6s
Kalıcı Durum Hatası	-	0.1

Diğer bir deneyde değişen referans sinyallerine karşı kontrolcülerin performansları test edilmiştir. Referans sinyal olarak sırasıyla 40° , 60° ve 80° uygulanmıştır. Değişken referans sinyaline PID kontrolörün verdiği cevap Şekil 20’de gösterilmiştir.



Şekil 20. Referans sinyalinin değişimi ve sistemin PID cevabı

Şekil 21’de ise referans sinyallerin değişimine bulanık kontrol sisteminin cevabı gösterilmiştir.



Şekil 21. Değişen referans sinyali ve Bulanık mantık sistem cevabı

SONUÇ

Gelişen teknolojik yenilikler ve yeni çalışmalar neticesinde DC motor kullanım alanı hızlı bir şekilde artış göstermiştir. Fırçasız DC motorun avantajlarından dolayı günümüz endüstriyel kontrolün neredeyse tüm alanlarında yaygın olarak kullanım alanı bulmaktadır. Yapılan literatür çalışmaları

sonucunda hem akademik hem de endüstriyel olarak bir çok alanda, fırçasız DC motorun yoğun kullanımı ile DC motor kontrolü önemli bir problem haline gelmiştir.

Bu çalışmada, DC motorun pozisyon kontrolü için PID ve Bulanık Mantık yaklaşımları kullanılmıştır. DC motorun karakteristik özellikleri kullanılarak gerekli parametreler belirlenmiş ve daha sonra DC motorun dinamik denklemleri belirlenerek transfer fonksiyonu çıkarılmıştır. Elde edilen transfer fonksiyonu üzerinde simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda PID ve Bulanık Mantık kontrolcü katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan katsayılar ile gerekli blok diyagramları Matlab Simulink ortamında Waijung bloklarıyla oluşturulmuş ve Code-Generation aracı ile STM32F4 mikro denetleyici kitine gömülmüştür. Mikro denetleyici içerisine gömülmüş PID ve Bulanık Mantık kontrolör yapıları ile gerçek zamanlı olarak DC motorun pozisyon kontrolü üzerinde farklı deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sayesinde DC motorun referans pozisyonuna göre pozisyon kontrolünün başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği gözlenmiştir. Bu çalışma sayesinde hem akademik hem de uygulama olarak gerçek zamanlı bir deney düzeneği üzerinde birçok test işlemi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışma farklı motor tiplerine uyarlanarak endüstri uygulamaları başta olmak üzere birçok farklı alanda kullanılacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Ahmed H, Rajoriya A, 2017. A hybrid of sliding mode control and fuzzy logic control using a fuzzy supervisory switched system for DC motor speed control. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25(3):1993-2004.
- Anonim, 2014. STM32F4 Discovery ve LMD18200 ile DC Motor Hız Kontrolü, <http://www.mcu-turkey.com/stm32f4-discovery-ve-lmd18200-ile-dc-motor-hiz-kontrolu/> (Erişim Tarihi: 09.09.2019).
- Anonim, 2019. Kadriye Ergün Ders Notları, http://kergun.baun.edu.tr/20172018Guz/YZ_Sunumlar/Bulanik_Mantik_Busra_Mavis.pdf, (Erişim Tarihi: 09.09.2019).
- Çıra F, Gümüş B, 2011. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Klasik Denetleyici (PI) ve Bulanık Mantık Denetleyici Kullanılarak Hız Kontrolünün Yapılması Ve Birbiriyle Karşılaştırılması. *Engineering Sciences*, 6(1): 170-181.
- Coşkun İ, Terzioğlu H, 2009. Gerçek Zamanda Değişken Parametrelili PID Hız Kontrolü, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük.
- Çubukçu A, Öztürk S, Kuncan M, 2014. DC Motor Hız Kontrolünün Görüntü İşleme ve OPC Kullanarak S7-1200'de Gerçeklenmesi, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK'2014), 11-13 Eylül 2014, Kocaeli.
- Doğan H, Kaplan K, Kuncan M, Ertunç, HM, 2015. PID and Fuzzy Logic Approach to Vehicle Suspension System Control, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK'2015), 10-12 Eylül 2015, Denizli.
- El-Samahy AA, Shamseldin MA, 2018. Brushless DC motor tracking control using self-tuning fuzzy PID control and model reference adaptive control. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(3): 341-352.
- Goswami R, Joshi D, 2018. Performance review of fuzzy logic based controllers employed in brushless DC motor. *Procedia computer science*, 132: 623-631.
- Ibrahim A, 2004. *Fuzzy logic for embedded systems applications*. Newnes publication, Burlington, USA.

- Karakoç H, Erin K, Çağırın R, Subaşı A, Kuncan M, Kaplan K, Ertunç HM, 2015. The Performance Comparison of PD Controller and Fuzzy Logic Controller for the Aircraft Height Control (TOK'2015), 10-12 Eylül 2015, Denizli.
- Kizir S, Yaren T, Kelekci E, 2019. Gerçek Zamanlı Kontrol, Seckin Yayınları Ders Kitabı, Kocaeli, Türkiye
- Köse F, Kaplan K, Ertunç HM, 2013. PID ve Bulanık Mantık ile DC Motorun Gerçek Zamanda STM32F407 Tabanlı Hız Kontrolü, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK'2013), 26-28 Eylül 2013, Malatya.
- Oguntoyinbo O, 2009. PID control of brushless DC motor and robot trajectory planning simulation with MATLAB/SIMULINK.
- Parihk P, Sheth S, Vasani R, Gohil JK, 2018. Implementing Fuzzy Logic Controller and PID Controller to a DC Encoder Motor—"A case of an Automated Guided Vehicle". *Procedia Manufacturing*, 20: 219-226.
- Paz RA, 2001. The design of the PID controller. Klipsch school of Electrical and Computer engineering.
- Sathishkumar H, Parthasarathy SS, 2017. A novel fuzzy logic controller for vector controlled induction motor drive. *Energy Procedia*, 138: 686-691.
- Shakya R, Rajanwal K, Patel S, Dinkar S, 2014. Design and simulation of PD, PID and fuzzy logic controller for industrial application. *International Journal of Information and Computation Technology*, 4(4): 363-368.
- Somwanshia D, Bundeleb M, Kumarc G, Parashard G, 2019. Comparison of Fuzzy-PID and PID Controller for Speed Control of DC Motor using LabVIEW. *Procedia Computer Science*, 152: 252-260.
- Yedamale P, 2003. Brushless DC (BLDC) motor fundamentals. Microchip Technology Inc, 20, 3-15.