

## Otonom Bir Mobil Robotun Kayan Kipli Kontrol Yöntemi İle Yörünge Ve Hız Kontrolü Ve PID Kontrol İle Kıyaslanması

Necati KURLUCAN\*1, Mahit GÜNEŞ1,

<sup>1</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş,

(Alınış / Received: 24.05.2018, Kabul / Accepted: 03.07.2018)

### Anahtar Kelimeler

Kayan kip kontrol algoritması (SMC), PID kontrol algoritması, Otonom Mobil Robot

**Özet:** Bu çalışmada otonom bir mobil robotun matematiksel modeli çıkarılmış ve bulunan parametreler kullanılarak MATLAB yardımıyla PID (Proportional Integral Derivative) ve Kayan Kipli Kontrol (Sliding Mode Control (SMC)) sistemleri ile hız ve yörünge kontrolü simülasyonu yapılmıştır. Ayrıca günümüzde yaygın olarak kullanılan PID kontrol algoritması ile Kayan Kipli Kontrol algoritmaları hakkında bilgiler verilmiştir. PID katsayıları Ziegler-Nichols yöntemi ile bulunmuştur. Deneysel olarak ölçülen giriş-çıkış değerleri hesaplanarak transfer fonksiyonu bulunmuştur. Bulunan değerler Kayan Kipli kontrol algoritmalarında kullanılmıştır. PID ile Kayan Kipli kontrol aynı sistem üzerinde simülasyonda gösterilmiştir. Çıkan simülasyon sonuçlarına göre PID ve SMC kontrolör sistemleri karşılaştırılarak, hangi kontrol algoritmasının otonom mobil robotumuz için daha uygun olduğu görülmüştür.

## Velocity and Trajectory Control of Autonomous Mobil Robot with Using Sliding Mod Controller and Comparison with PID Controller

### Keywords

Sliding Mode Control, PID Control Algorithm, Outonomous Mobil Robot

**Abstract:** In this study, a mathematical model of an autonomous mobile robot was derived and velocity and trajectory control simulation was performed with the help of MATLAB using PID (Proportional Integral Derivative) and Sliding Mode Control (SMC) systems. In addition, informed about PID control algorithm which is widely used today and Sliding Mode Control algorithms. The PID coefficients were found by the Ziegler-Nichols method. Experimentally measured input-output values are calculated and transfer function is found. The values are used in Sliding Mode control algorithms. PID Control with Sliding Mode is simulated on the same system. By comparing the PID and SMC controller systems according to the simulation results, it is seen which control algorithm is more suitable for our autonomous mobile robot.

### 1. Giriş

Kontrol sistemlerinin amacı, prosesle ilgili kontrol değişkenlerinin değişen çalışma koşullarında istenen değişim formunun takip edilmesini gerçekleştirmektir.

1915 ile 1940 yılları arasında bulunan PID kontrol tipi; Bristol, Fisher, Foxboro, Honeywell, Leeds ve Northrup, Mason-Neilan ve Taylor gibi kuruluşlar tarafından geliştirilmeye başlanmıştır. PID

kontrolörünün integral bileşeninin, üstlendiği ve otomatik resetleme olarak da belirtilen sürekli durum hatasının sıfırlanması görevi, oransal kontrolörler de ki manuel resetleme gereksinimi üstlenmiştir. Türev özellikli bir kontrolör ilk olarak Taylor Company'den Ralph Clarride tarafından gösterildi [1].

1930'dan günümüze teknolojik gelişmelere paralel olarak, PID kontrolörleri de ilginç bir gelişim sürecine girmiştir. Pnömatik kontrolörler, güç dengesi prensibinin sistematik kullanımıyla hızlı bir gelişim

sürecine girmiştir. 1950'lerde operasyonel yükselteçlerin ortaya çıkmasıyla yerleri elektronik sistemlere bırakıldı.

Yıllar içinde, analog bilgisayarlar geliştirilip kullanıldığında, PID kontrolörleri analog hale getirilmiştir. 1970'lerde mikroişlemcilerin ortaya çıkmasıyla, tek döngülü kontrol cihazları kullanmak mümkün hale geldi. Ayrıca PID kontrol cihazının ana elemanı olduğu sistemlerde süreç kontrolünün geliştirilmesine de yol açtı. Daha sonra dijital bir bilgisayar, birçok PID kontrolörünün görevlerinin üstlenmesinde kullanıldı. Mikroişlemcilerin hesaplama gücü arttıkça; Tek döngülü bir kontrolörde ayarlama, algılama, tetikleme gibi işlemleri gerçekleştirmek mümkün oldu. Ayrıca motor ve piston sistemlerinde de çok sayıda PID kontrolü bulunmaktadır.

Kayan Kipli kontrol (SMC), uygun şartlar sağlandığında, sistem belirsizliklerine, parametre değişikliklerine ve bozulmalarına rağmen istenen dinamik davranışı sağlayabilen son kez sağlam bir kontrol tekniğidir. 1950'lerin başında ilk kez Emelyanov tarafından ortaya çıkarılan teknik, gelişen hızlı anahtarlama teknolojisi ve 1977 yılında ilk kez Vadim Utkin 'in yayınlanan makalesi ile gerçek anlamda gündeme gelmiştir [2]. Uygulama alanı giderek artan bir ivme ile genişledi. Kayan kipli kontrol Vadim Utkin tarafından şu şekilde açıklanmıştır: Kayan kipli kontrol, sürekli kontrol fonksiyonları tarafından oluşturulan uygun anahtarlama mantığıyla desteklenen bir dizi alt sistemden oluşur. Kontrol tekniğinin sistemin durum uzayında belirli bir yüzeyde üzerinde süreksizliğe maruz kaldığı kabul edilir [3, 4].

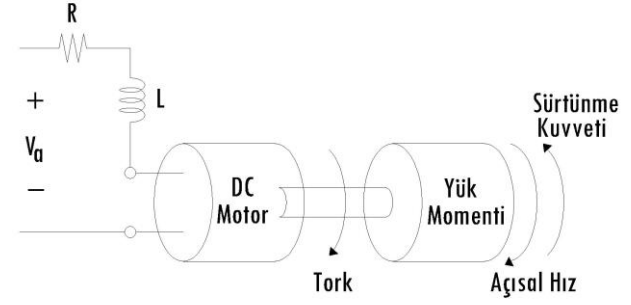
Gerçek dinamik sistemlerde, modelleme hataları, istenmeyen sıcaklık, basınç veya gerilim değişiklikleri, titreşim ve bozucu girdiler gibi çeşitli çevresel faktörlerden dolayı belirsizlikleri önlemek imkânsızdır. Endüstride kullanılan geleneksel doğrusal kontrolörler (PID kontrolü gibi) genellikle parametre değişikliklerine, modellenmemiş dinamikler ve bozucu girişler için tatmin edici sonuçlar üretememektir. Bu nedenle, sistem müdahalelerindeki bozulma ve belirsizliklerin etkisinin ortadan kalktığı, kayan kipli kontrol tekniği tercih edilir [5].

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada amaç, otonom bir mobil robotun modeli üzerinde MATLAB kullanılarak yörünge kontrolü PID kontrol ve SMC kontrolleri ile yapılmış ve iki kontrol sistemi karşılaştırmaktır.

### 2.1. Sistemin Tasarımı

#### 2.1.1 DC Motor Modeli



Şekil 1. DC Motor Modeli

Tablo 1. Motor Parametreleri

Parametre	Değer
Ra=Armatür direnci ( $\Omega$ )	2.06 $\Omega$
La=Armatür endüktansı (H)	0.28 H
Jm = Rotor eylemsizliği (kgm <sup>2</sup> )	0.00115 kgm <sup>2</sup>
Bm= Vizkoz sürtünme katsayısı (Nms/rad)	0.13 Nms/rad
Kt = Tork sabiti (Nm/A)	0.0240 Nm/A
Kb= Zıt EMK sabiti (Vs/rad)	0.0238 Vs/rad

Motor üzerine düşen gerilim ve açısal hız arasındaki bağıntı denklem (1)'de ve (2)'de verilmiştir.

$$V_a = R_a * I_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} + E_b \quad (1)$$

Va = Armatür gerilimi (V)

Ia = Armatür akımı (A)

$$E_b = K_b \cdot \omega \quad (2)$$

$$E_b = \text{Zıt EMK (V)} \quad K_b = \text{Zıt EMK sabiti (Vs/rad)}$$

Motorun akımı ve açısal hız arasındaki denklemler (3)'te ve (4)'te verilmiştir [6].

$$T_m = K_t \cdot I_a \quad (3)$$

$$T_m = \text{Motor torku (Nm)} \quad K_t = \text{Tork sabiti (Nm/A)}$$

$$T_m = J_m \frac{d\omega}{dt} + B_m \cdot \omega + T_{yük} \quad (4)$$

$$K_t I_a = J_m \frac{d\omega}{dt} + B_m \cdot \omega + T_{yük} \quad (5)$$

Motorun açısının türevi ile motor milinin açısal hızının denklem (6)'da birbirine eşit olduğu görülmektedir.

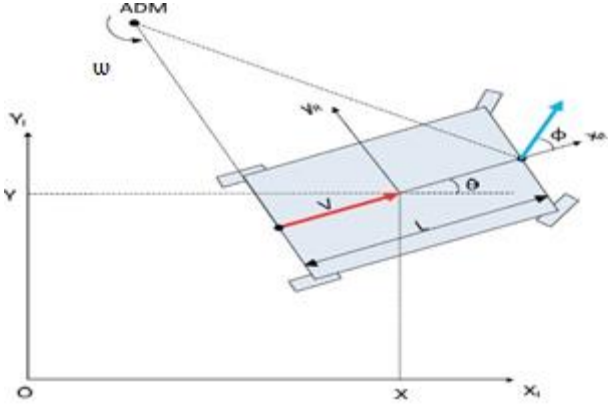
$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (6)$$

## 2.1.2 Aracın Modellenmesi

Mobil robotun X eksenine ile yaptığı açı  $\theta$  olarak belirlenmiştir. Robotun X ve Y ekseninde aldığı yol denklem (7)'de ve denklem (8)'de verilmiştir.

$$\dot{X} = V \cdot \cos(\theta) \quad (7)$$

$$\dot{Y} = V \cdot \sin(\theta) \quad (8)$$



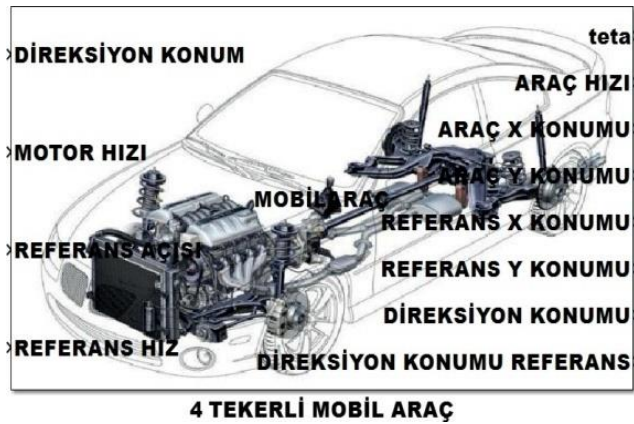
Şekil 2. Mobil Robotun Modeli

Mobil robotun hızı, tahrik motorunun açısal hızı ve robotun teker yarıçapı ile olan bağlantısı denklem (9)'da ve denklem (10)'da verilmiştir [13],[14].

$$V = \omega \cdot r \quad (9)$$

$$\theta = \frac{V}{L} \cdot \tan(\varphi) \quad (10)$$

Bu bağlantılar doğrultusunda Mobil Robot MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve modele ait giriş ve çıkışlar Şekil 3'te blok halinde gösterilmiştir.

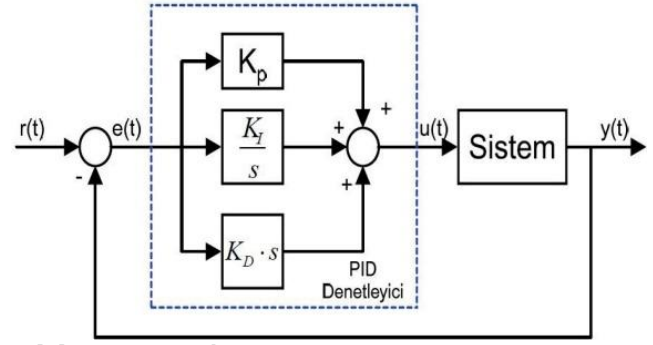


Şekil 3. Mobil Robotun MATLAB/Simulink Modeli

## 2.2. Metotlar

### 2.2.1 PID Kontrol Algoritması

PID günümüzde çok kullanılan bir kontrol yöntemidir. Endüstrideki uygulamaların %75'inde uygulanmıştır. Çok geniş bir uygulama alanının olmasına rağmen PID uygulamaları için standart bir tanımlama yoktur [7]. PID denetleyiciler yapısı çok basit olması, ayarlanacak değişken sayısının az olması ve fiziksel gerçekleşmenin kolay yapılması sayesinde çok tercih edilir [8].



Şekil 4. PID Kontrol Şeması

PID'in matematiksel denklemleri, denklem (11)'de ve denklem (12)'de gösterilmiştir. Burada  $r(t)$  giriş (referans) sinyali,  $u(t)$  kontrol sinyali,  $e(t)$  hata sinyali ve  $y(t)$  sistemin çıkışıdır.  $K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$  katsayıları ise sırası ile oransal, türevsel, integral katsayılarıdır.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{e(t)}{dt} \quad (11)$$

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (12)$$

#### 2.2.1.1 Ziegler-Nichols Yöntemi

John Ziegler ve Nathaniel Nichols'un 1942 yılında bulunduğu PID parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Ziegler-Nichols (ZN) metodunda basamak yanıtı yöntemi ve frekans cevabı yöntemi olarak iki ayrı şekilde PID parametreleri bulunabilir. Bu çalışmada frekans cevabı yöntemi kullanılmıştır. Frekans cevabı yönteminde parametreler şu şekilde bulunur.

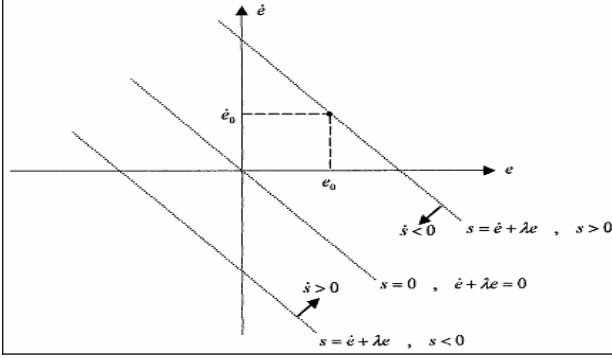
- 1) Kontrolör integral ve türev bileşenleri etkisiz kılınarak otomatik kontrol çevrime bağlanır.
- 2) Kontrolörün  $K_c$  kazanç kararlılık limiti aşıncaya kadar artırılır (sistem öz salınım girer). Salınım periyodu  $T_c$  ölçülür.
- 3) Salınım periyodu  $T_c$  ve sistemin salınım başladığı andaki P kontrolörünün kazancı  $K_c$  kullanılarak Tablo1'de görüldüğü gibi kontrolör parametreleri elde edilir.  $T_c$ : Kritik periyod,  $K_c$ : Kritik kazanç olarak anılır [9].

ZN metodu ile bulunan PID katsayıları tablo 2 de verilmiştir.

Tablo 2. PID parametreleri

Parametreler	Kp	Kd	Ki
Hareket Motoru	4,8	23,5	1580
Yön Motoru	0,54	4,8	0,056

## 2.2.2 Kayan Kipli Kontrol (SMC)



Şekil 5. Kayma Yüzeyi

Tek girişli, ikinci derece, lineer belirsiz bir yapı için denklem (13)'te verilmiştir [9].

$$\ddot{Y}_m(t) = -(A_n \pm \Delta A)\dot{y}_m(t) - (B_n \pm \Delta B)y_m(t) - (C_n \pm \Delta C)u(t) + d(t) \quad (13)$$

Burada  $y_m(t)$  çıkış, ( $y_m(t) \in R$ )  $u(t)$  kontrol girişi, ( $u(t) \in R$ )  $A_n$ ,  $B_n$  ve  $C_n$  nominal tesis parametreleridir,  $d(t)$  belirsiz dış bozulmaları gösterir,  $t$  ise bağımsız zaman değişkeni ve  $R$  ise reel sayıları kümesini gösterir [10].

İzlenme hatası  $e(t)$ , ( $e(t) \in R$ ) istenen değer ile ölçülen değer arasındaki fark denklem (14)'de verilmiştir.

$$e(t) = y_r(t) - y_m(t) \quad (14)$$

Buradan hatanın 1. türevi ve 2. türevleri denklem (15)'te ve denklem(16)'da gösterilmiştir.

$$\dot{e}(t) = \dot{y}_r(t) - \dot{y}_m(t) \quad (15)$$

$$\ddot{e}(t) = \ddot{y}_r(t) - \ddot{y}_m(t) \quad (16)$$

Geleneksel SMC sistemlerinde, kayma yüzeyi  $s(t)$ , izleme hatası,  $e(t)$  ve izleme hatasının türevlerine bağlıdır. Denklem (17)'de, denklem (18)'de ve Denklem (19)'da gösterilmiştir [11].

$$s(t) = \left( \lambda + \frac{d}{dt} \right)^{n-1} e(t) \quad (17)$$

$$s(t) = \dot{e}(t) + \lambda e(t) \quad (18)$$

$$\dot{s}(t) = \ddot{e}(t) + \lambda \dot{e}(t) \quad (19)$$

$$\ddot{e}(t) = \dot{s}(t) - \lambda \dot{e}(t) \quad (20)$$

Hatanın ikinci türevi denklem (21)'deki ve denklem (22)'deki sistem parametrelerine göre yazılırsa denklem (24) elde edilir.

$$\ddot{y}_m(t) = -A_n y_m(t) - B_n \dot{y}_m(t) - C_n u(t) + D(t, u(t)) \quad (21)$$

$$\dot{y}_m(t) = \dot{y}_r(t) - \dot{e}(t) \quad (22)$$

$$\ddot{e}(t) = \ddot{y}_r(t) + A_n \dot{y}_m(t) + B_n y_m(t) - C_n U(t) + D(t, u(t)) \quad (23)$$

$$\dot{s}(t) = \lambda \dot{e}(t) + \dot{y}_r(t) + A_n \dot{y}_m(t) + B_n y_m(t) - C_n U(t) - D(t, u(t)) \quad (24)$$

Kontrol girişi denklem (25)'teki gibidir [12].

### 2.2.2.1. SMC Denetleyici Tasarımı

$U_{eq}(t)$  ve  $U_{sw}(t)$  eşdeğer kontrol ve anahtarlama kontrolleridir.

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t) \quad (25)$$

#### 2.2.2.1.1 Eşdeğer Kontrol

$\dot{S}(t)=0$  olduğunda Eşdeğer kontrol denklemi denklem 26 ve denklem 27, denklem 24 yardımı ile elde edilir.

$$U_{eq}(t) = \frac{1}{C_n} (\lambda \dot{e}(t) - \ddot{y}_r(t) + A_n \dot{y}_m(t) + B_n y_m(t)) \quad (26)$$

$$U^*_{eq}(t) = U_{eq}(t) + \frac{1}{C_n} D(t, u(t)) \quad (27)$$

#### 2.2.2.2 Anahtarlama Kontrolü

Anahtarlama giriş değeri  $U_{sw}(t)$ , denklem (28)'deki gibi gösterilir [3].

$$U_{sw}(t) = \frac{K_{sc}}{C_n} \text{sgn}(s(t)) \quad (28)$$

$K_{sc}$  Pozitif sabiti  $K_{sc} \in R^+$  ve  $K_{sc} > D_{max}$  belirsizlikleri domine etmek için ve  $\text{sgn}(\cdot)$  ise sinyal fonksiyonudur.

$$\text{sign}(s) = \begin{cases} 1 & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ -1 & s < 0 \end{cases} \quad (29)$$

#### 2.2.2.3 Süreç reaksiyon eğrisi yöntemi

Matematik model bir sistemin fiziksel davranışlarına göre çıkarılır. Bu nedenle Mobil robotun davranışı MATLAB/Simulink kullanılarak ölçülmüş ve denklem (30)'da ve denklem (31)'de gösterilen Process Reaction Curve Method kullanılarak sistemin  $A_n$ ,  $B_n$  ve  $C_n$  parametreleri bulunmuştur [11].

$$G(s) = \frac{K e^{-T_d s}}{T_s s + 1} \cong \frac{K}{(1 + T_d s)(1 + T_s s)} \quad (30)$$

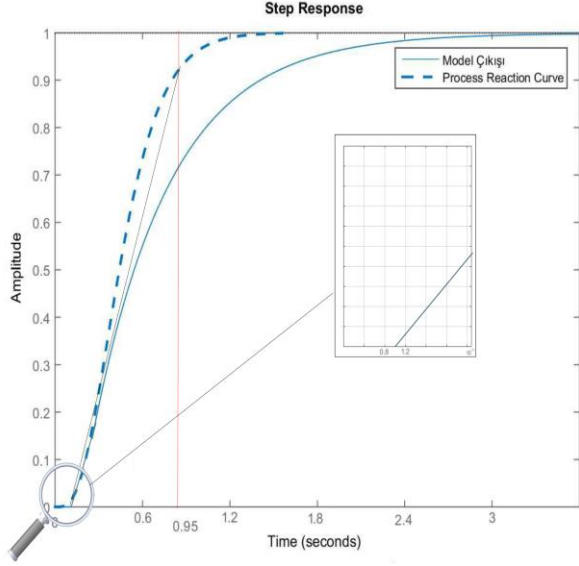
K kararlı durum katsayısı, Td zaman gecikmesi ve T zaman sabitidir.

$$\frac{K}{T_d T s^2 + (T_d + T)s + 1} = \frac{C_n}{s^2 + A_n s + B_n} \quad (31)$$

Buradan

$$A_n = \frac{T_d + T}{T_d T} \quad B_n = \frac{1}{T_d T} \quad C_n = \frac{K}{T_d T} \quad (32)$$

Değerleri elde edilir.



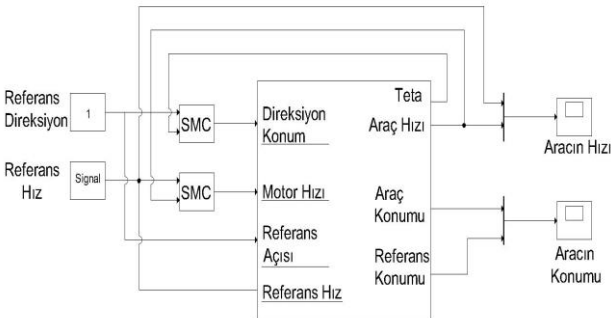
Şekil 6. ölçülen çıkış ve model çıkışı

Process Reaction Curve Method kullanılarak K=0,95, Td= 0,00108 s ve T=0,948 s bulunmuştur. Buradan denklem 31 kullanılarak nominal parametreler hesaplanmıştır. An=129 Bn= 1041 ve Cn=989. Bu parametreler kullanılarak mobil robotun transfer fonksiyonu elde edilmiştir

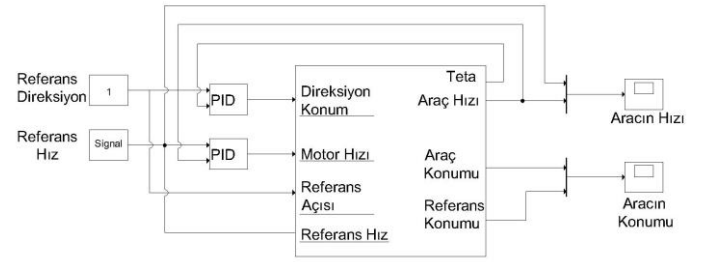
$$G_s = \frac{989}{s^2 + 129s + 1041}$$

### 3. Bulgular

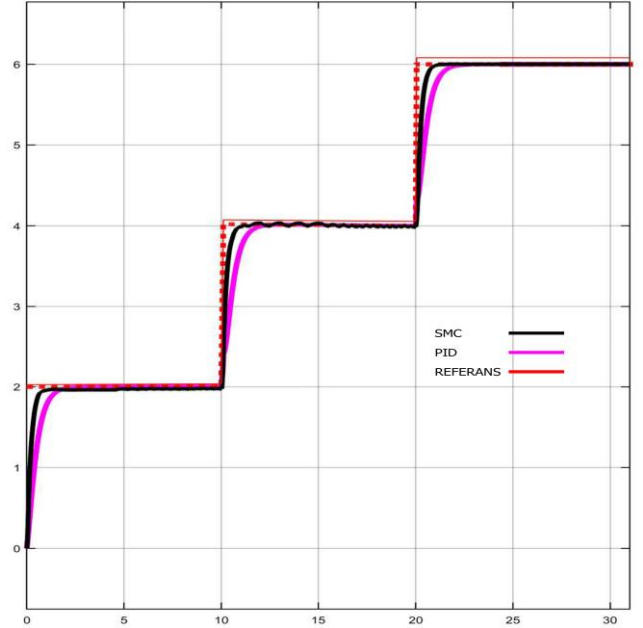
Direksiyon, hareket motor modeli ile mobil robot modeli birleştirilerek SMC ve PID kontrol blok diyagramları Şekil 7 ve Şekil 8' de gösterilmiştir.



Şekil 7. Kayan Kipli Kontrol (SMC) Simülasyon Gösterimi

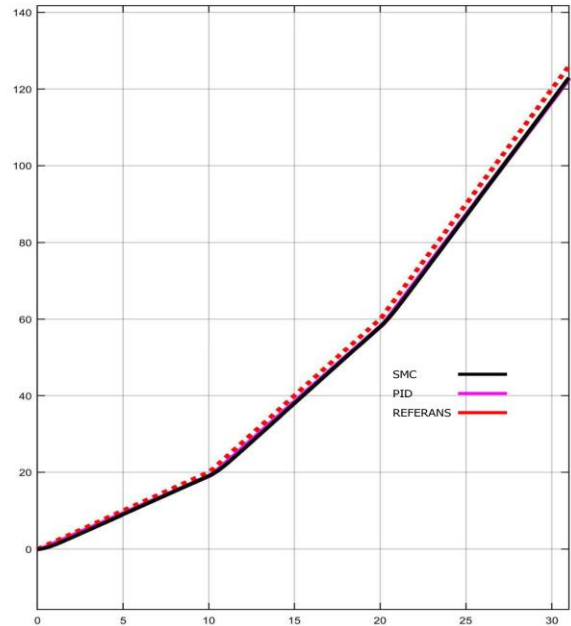


Şekil 8. PID Kontrol Simülasyon Gösterimi



Time offset: 0

Şekil 9. Aracın hızının zamana göre değişimi



Time offset: 0

Şekil 10. Aracın konumunun zamana göre değişimi

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Kayan Kipli kontrolöre ilişkin hız eğrileri incelendiğinde; minimum aşım, minimum erişme süresine, minimum durulma sürecine ve sıfır kalıcı hata değerlerine çok iyi cevap vermiştir. PID kontrol de yükselme ve durulma sürelerinin SMC kontrole göre daha uzun olduğu gözlemlenmektedir. Konum Grafiği incelendiğinde ise SMC ve PID değerleri benzer sonuçlar vermiştir. Performans sonuçlarına göre böyle bir sistemde SMC kontrolör kullanımının daha uygun olduğu görülmektedir.

#### Teşekkür

Yüksek lisans öğrenimim boyunca bütün bilgi ve birikimini üzerimden eksik etmeyen başta Prof. Dr. Mahit GÜNEŞ hocama, Osman Doğmuş hocama ve diğer hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

#### Kaynakça

- [1] Aström, K.J. ve Hagglund, T., "Advanced PID Control", ISA-Instrumentation, Systems, and Automation Society, USA, 2006.
- [2] Utkin V.I., "Variable Structure Systems with Sliding Modes", IEEE Transactions on Automatic Control, Cilt AC-22, No 2, 212-222, 1977.
- [3] Utkin VI. Sliding modes in optimization and control problems. New York:Springer-Verlag; 1992.
- [4] Utkin, V.I., "Sliding Mode Control in Mechanical Systems", IEEE Industrial Electronics, Control and Instrumentation, IECON '94, Bologna, İtalya, 1429-1431, 5-9 Eylül 1994.
- [5] Nguyen, D., Sliding-Mode Control: Advanced Design Techniques, Doktora Tezi, University of Technology, Sydney, 1998.
- [6] Gani A., Özçalık H.R., Açıköz H., Keçeciöglü Ö.F., Sürekli Mıknatıslı Doğru Akım Motorunun Hız Denetiminde PI-Bulanık Mantık Tipi Denetim Yönteminin Başarımının İncelenmesi, ISITES 2014
- [7] Ateş M. Güneş, M. Parçacık Sürü Optimizasyonu tabanlı kalman filtresi ve PID denetleyici ile Mobil Robotun Optimum Yörünge Kontrolü, Uluslararası Hakemli Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi UHMFD S:67, 2017
- [8] Berber, O. Ateş M, Alhasan H. A., Güneş M., Parçacık Sürü Optimizasyonu ve PID ile Mobil Robotun Optimum Yörünge Kontrolü, KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19(3), 2016
- [9] J.G. Zigeler, N.B. Nichols, "Optimization Setting for Automatic Controller", Trans. ASME, Vol. 64, pp. 756- 769, 1942.
- [10] Lin FJ, Wai RJ, Kuo RH, Liu DC. A comparative study of sliding mode and model reference adaptive observers for induction motor drive. Electr Power Syst Res 1998; 44:163\_74.
- [11] Seborg DE, Edgar TF, Mellichamp DA. Process dynamics and control. New York: Wiley; 1989.
- [12] Chu WH, Tung PC. Development of an automatic arc welding system using a sliding mode control. Int J Machine Tools Manuf 2005; 45:933\_9.
- [13] Özçalık H.R., Gani A., Açıköz H., Keçeciöglü Ö.F., Kılıç E., Farklı Kural Tabanları Kullanarak PI-Bulanık Mantık Denetleyici ile Doğru Akım Motorunun Hız Denetim Performansının İncelenmesi, APJES 2014
- [14] Özçalık H.R., Gani A., Açıköz H., Kılıç E., Keçeciöglü Ö.F. Farklı Bulanık Üyelik Fonksiyonları Kullanarak Doğrusal Olmayan Yük Etkisindeki Doğru Akım Servo Motorun Hız Denetimi , APJES 2014N. Kawasaki, "Parametric study of thermal and chemical nonequilibrium nozzle flow," M.S. thesis, Dept. Electron. Eng., Osaka Univ., Osaka, Japan, 1993.