



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Sürücülü Kendi Kendini Dengeleyen Bir Robotun Bulanık Mantıklı PID Kontrolü

 Ömür Can ÖZGÜNEY^a  Nuray KORKMAZ CAN^{a,*}  Hüseyin YILDIZ^b

^a Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa, İstanbul, TÜRKİYE

^b Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Teknik Bilimler MYO, İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa, İstanbul, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: nkorkmaz@iuc.edu.tr
DOI: 10.29130/dubited.854786

ÖZ

Endüstri ve tıp alanında, kendi kendini dengeleyen robotlar hakkında tüm dünyada yapılan çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Bu tip robotların kullanım alanının genişlemesiyle birlikte karşılaşılan en büyük sorunun, robotların kontrol mekanizmaları olduğu anlaşılmaktadır. Yapıları gereği kontrol edilmesi zor olan bu robotlar için literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar incelendiğinde klasik kontrol metotlarının, bu tip robotları kontrol etmekte yetersiz kaldığı görülmektedir. Fakat klasik kontrolcüler kullanılarak geliştirilen yeni nesil karma kontrol metotlarının robotlara uygulanmasıyla birlikte robotların istenilen hareketleri daha hızlı ve kararlı bir şekilde gerçekleştirdiği gözlemlenmektedir. Bu nedenle, klasik kontrol metotlarından PID kontrolcü parametrelerinin, bulanık mantıklı kontrol metodu ile belirlenerek oluşturulan karma bir kontrol metodu bu çalışmada önerilmekte ve kendi kendini dengeleyen robota uygulanmaktadır. Ayrıca yapılan çalışmalar incelendiğinde, sadece kendi kendini dengeleyen robotların analizinin gerçekleştirildiği görülmektedir. Yapılan bu çalışmada sürücü de sisteme dahil edilerek analiz edilmiştir. İlk olarak iki tekerlekli kendi kendini dengeleyen robot modellenmiş ve bu sistem için sadece PID (oransal, integral ve türevsel) kontrolcü ve Bulanık Mantık-PID (Fuzzy Logic-PID) kontrolcü tasarlanmıştır. Bulanık Mantık-PID kontrolcünün değişken kazanım katsayılarına sahip olması klasik kontrolcülerden daha hızlı tepki vermesini sağlamaktadır. PID ve Bulanık Mantık-PID kontrolcüler ile elde edilen benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda Bulanık Mantık-PID kontrolcünün, kontrolcü kazanımlarını kendi kendine ayarlayabildiği ve istenilen hız ve pozisyona ulaşmakta başarılı bir performansa sahip olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kendi kendini dengeleyen robot, Bulanık mantıklı kontrol, PID kontrol

Fuzzy Logic-PID Control of a Segway Robot with Its Rider

ABSTRACT

The research on self-balancing robot has expanded in recent years at industrial and medical etc. areas around the world. The main problem of modelling these robots is the complexity of the control mechanisms. There are many studies in the literature for these robots which are difficult to control due to their structure. It is clear that classical control methods are insufficient to control such robots when the previous studies are investigated. However, the classical controllers combined with new generation control methods such as fuzzy logic are efficient to perform the desired movements of robots in a faster and more stable manner. Therefore, the conventional control methods, PID controller parameters are determined by fuzzy logic control and a new hybrid

controller is proposed then applied to self-balancing robot. In addition, when the previous studies are examined, it is seen that only self-balancing robots are analyzed. In this study, the driver was also included in the system and analyzed. This study is presented the modeling of two-wheeled self-balancing robot and the design of PID (proportional, integral and derivative) and Fuzzy-PID control for the system. These variable gains make the Fuzzy-PID controller stable with rapid response time than the conventional control methods. The simulation results with PID and Fuzzy-PID controller are compared. It is figured out that Fuzzy-PID controller has self-tuning capacities and satisfactory performance to achieve desired velocity and position.

Keywords: Segway robot, Fuzzy logic control, PID control

I. GİRİŞ

Çağımızın en önemli buluşlarından biri olan robotlar, üretim [1], sağlık [2-3], teknoloji [4], eğitim [5] vb. birçok alanda kullanılmaktadır. Kullanım alanının genişlemesiyle birlikte, robotlardan daha verimli bir şekilde fayda sağlanması için robotların modellenmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Belirli görevler için üretilmiş olan klasik robotlar, üretim süreçlerine uygun olarak verilen görevleri hızlı ve hassas olarak yerine getirebilmektedir. Ancak birden fazla görevin verilmesi halinde görev süreleri uzamakta, işlem hassasiyeti düşmektedir. Buna karşılık kendi kendini dengeleyen robotlar klasik robot yapılarına göre daha esnek hareket sağlayabilmekte ve değişen ortam şartlarına daha hızlı uyum sağlayabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda kendi kendini dengeleyen robotların üretimine başlanmış ve yakın zamanda bu robotların, klasik robotların yerini almaları hedeflenmektedir.

Johnson vd. [6] çalışmalarında, nesne taşıyan, kendi kendini dengeleyen iki tekerlekli robot tasarlamış ve bu robotu geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri robotla, nesne taşıyan bir robotun düşmeden hareket edebilmesini amaçlamışlardır. Modeli oluşturmak için ters sarkaç sisteminin çalışma prensibini dikkate almışlardır. İstenilen hareketi gerçekleştiremeyen modelin, düzgün bir şekilde çalışması için PID ve LQR (doğrusal kvadratik kontrol) benzeri kontrol yöntemlerini modele uygulamışlardır. Benzetim sonuçlarını incelediklerinde, LQR kontrolcünün en iyi sonucu verdiğini gözlemlemişlerdir. Efe vd. [7]'nin yayınlamış oldukları çalışmalarında, model olarak iki tekerlekli kendi kendini dengeleyen robot kullanmışlardır. Lagrange metoduyla hareket denklemlerini elde edip, köklerini inceleyerek sistemi kararlı hale getirmişlerdir. Kararlılığı sağlanan sistemi mikro denetleyicilerle kontrol etmişlerdir. Tomasic vd. [8]'nin 2012 yılında yapmış oldukları çalışmada uzaktan kumandalı, kendi kendini dengeleyen bir robot tasarlamış, üretimini gerçekleştirmiş ve kontrol etmişlerdir. Projelerindeki yazılımla birlikte, robot hareketini cep telefonu kullanarak kolay bir şekilde gerçekleştirebilmişlerdir. Birkaç farklı kontrol metodu uygulamışlar ve sonuçları karşılaştırdıklarında LQR kontrolcünün en iyi sonucu verdiğini gözlemlemişlerdir. Yapılan başka bir çalışmada da kendi kendini dengeleyen robota, aynı anda hız kontrolü ve dengeleme kontrolü gerçekleştirebilmek için kayan kipli kontrol yöntemi uygulanmıştır. Sistem Lyapunov fonksiyonu kullanılarak asimptotik kararlı hale getirilmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen kontrolcünün, parametre değişikliklerine ve dış bozuculara karşı hızlı ve üstün hız izleme ve kendi kendini dengeleme performansına sahip olduğunu göstermektedir [9]. An ve Li [10] çalışmalarında, Lagrange metodu kullanarak hareket denklemlerini elde ettikleri kendi kendini dengeleyen robota PID ve LQR kontrolcülerini uygulamışlardır. Simülasyon sonuçlarını incelediklerinde LQR kontrol yönteminin daha iyi sonuçlar verdiğini görmüşler ve sonraki çalışmalarında bu kontrol yöntemini kullanmaya karar vermişlerdir. Şen vd. [11]'nin hazırladıkları çalışmada iki tekerlekli kendi kendini dengeleyen robot için yapay sinir ağı ve bulanık mantık tabanlı bir yaklaşım geliştirmişlerdir. LQR kontrol verilerini iyileştirerek, yapay sinir ağı ve bulanık mantık tabanlı kontrolcü tasarlamışlardır. LQR kontrolcüyü ve yeni geliştirdikleri kontrol yöntemini karşılaştırmışlar ve sonuçta geliştirdikleri kontrol metodunun daha iyi sonuç verdiğini görmüşlerdir. Wu ve Zhang, [12], 2011 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada, kendi kendini dengeleyen robotun hızını kararlı hale getirmek için, kutup yerleştirme ve bulanık mantıklı kontrol yöntemlerini tasarlamışlardır. Tasarımın gerçekliğini ve uygulanabilirliğini test etmek için prototip üretim gerçekleştirmişlerdir. Test sonuçları her iki kontrolcünün de etkin ve verimli bir şekilde çalıştığını göstermiştir. Huang vd. [13]'nin çalışmalarında, dış bozucular ve belirsizlikleri barındıran iki tekerlekli ters sarkaç modeline tip-2 bulanık mantıklı kontrol sistemini uygulamışlardır. Çalışmanın

amacı, ters sarkacın denge durumunda istenilen hareketi yapmasıdır. Önerilen kontrol yaklaşımını, tip-1 bulanık mantıklı kontrol yöntemiyle karşılaştırmışlardır. Simülasyonlar, özellikle dış bozucu etkisi altındaki modelin, tip-2 yaklaşımıyla daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ali ve Kadhim [14], H₂ kayan kipli kontrolcüyü ters sarkaç sistemine uygulamışlardır. Ters sarkacın dik durumda ve istenilen hareketi yapması için H₂ kontrol metodunu, kayan kipli kontrolcüyle birleştirmişlerdir. Geliştirdikleri kontrolcünün dış etkenlerden etkilenmediğini yaptıkları simülasyonlarla ispatlamışlardır. Kovacs vd. [15] ise iki tekerlekli kendi kendini dengeleyen robotun üzerine bir ters sarkaç yerleştirilmiş küçük boyutta deney sistemi kullanarak analizler yapmışlardır. Modelin kontrolünde geleneksel PID kontrolcü kullanılmıştır ve ters sarkacı sıfır derecede tutmaya çalışmışlardır. Yapılan denemeler sonucunda kontrolcü parametrelerinin ve örnekleme süresinin doğru seçimi ile sistemin dik konumunun stabilize edilebileceği gösterilmiştir.

Prabhakar vd.[16], hem simülasyon hem de gerçek zamanlı olarak doğrusal olmayan segway (kendi kendini dengeleyen robot) sisteminin modellenmesini, kontrolünü ve gerçekçi uygulamasını araştırmışlardır. Aracın kontrolünde PID, Genetik Algoritma tabanlı PID ve Model tahminli kontrolcü kullanmışlardır. Model tabanlı kontrolcünün, sistemi kontrol etmekte diğer iki kontrolcüye göre daha başarılı olduğu sonucuna varmışlardır. Bahsi geçen yayınlarda iki tekerlekli kendi kendine dengelenen robot modellerinde insan etkileşimini dikkate almamışlardır. Ciezkoski [17] kendi kendine dengelenen robot modeline sürücüyü de ekleyerek modellemiş ve deneyini yapmıştır. Aracın motor kontrolünde geri beslemeli bir kontrolcü kullanmıştır. Bu geri beslemeli kontrolcü ölçülen durum değişkenlerinin lineer bir fonksiyonu olacak şekilde seçilmiştir. Çalışmasında farklı kontrolcülerin performansını incelememiştir. Raheem vd.[18] çalışmalarında iki tekerlekli dengeleme robotunun konum kontrolünü ve stabilizasyon sorununu ele almışlardır. Robotun konum ve açılarını kullanarak matematiksel modeli elde etmişlerdir. Bulanık Mantıklı Kontrol yöntemini de robotu dengelemek için tasarlamışlardır. Bulanık Mantıklı Kontrolcü ile elde edilen sonuçları, geleneksel PID kontrol ile karşılaştırarak, önerilen kontrolcünün etkinliğini göstermeye çalışmışlardır. Simülasyonlar, Bulanık Mantıklı kontrol yönteminin özellikle robotun stabilizasyonu açısından daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Mai vd. [19] iki tekerlekli dengeleme robotunun hareketini ve dengelenmesini, bulanık mantıklı- PID kontrolcü kullanarak düzenlemeye çalışmışlardır. Robotun dengelenmesi için bulanık mantıklı kontrol yöntemi geliştirilirken, PID kontrol robotun hareketini kontrol etmektedir. Geliştirilen hibrit kontrolcü, STM32F4 Keşif Kiti kullanılarak çalıştırılmıştır. Sonuçlar önerilen kontrol yönteminin başarılı olduğunu göstermektedir. Iwendi vd.[20] gelişmiş mobil ters sarkaç robotuna, 32 bit mikro denetleyiciye dayalı PD ve PI tipi gürbüz kontrolcüler uygulayarak, yeni bir tasarım robotu elde etmişlerdir. Robot, navigasyon işlemi sırasında Kalman filtre algoritmasına dayalı olarak iki tekerlek ve bir PD-PI denetleyicisi ile dengesini korumaktadır. Yapılan simülasyonlar, önerilen kontrol yönteminin dış etkenler dahilinde iyi sonuç verdiğini göstermektedir.

Literatür incelendiğinde, daha önceden yapılan çalışmaların çoğunda, kendi kendini dengeleyen robotun modellenmesinde sürücü etkisinin göz ardı edildiği görülmektedir. Yaptığımız çalışmada ise modelleme kısmında sürücünün varlığı dikkate alınmıştır. Ayrıca PID ve Bulanık Mantıklı kontrol yöntemi diğer çalışmalarda ayrı ayrı kullanılmış ama gerçekleştirdiğimiz bu çalışmada, PID katsayıları Bulanık Mantıklı Kontrol yöntemiyle belirlenerek, sistem adaptif (uyarlamalı) hale getirilmiştir.

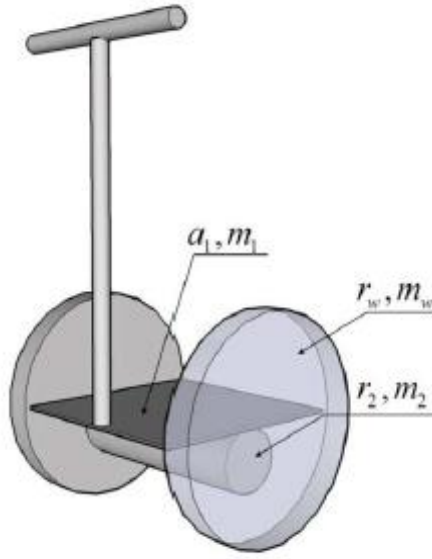
Bu çalışmanın amacı, kendi kendini dengeleyen robot ile sürücü etkileşiminin analiz edilmesidir. Günlük hayatta, kendi kendini dengeleyen robotlar insanların ulaşımını sağlamakta olup sürücü ile modellenmesi daha gerçekçi bir model elde edilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada amaç sürücünün yer ile yaptığı açının en hızlı şekilde azaltılmasıdır. Bunu durumun sağlanması için geleneksel PID kontrolcü ve Bulanık mantıklı kontrolcü ile kontrolcü katsayıları değiştirilen Bulanık Mantık-PID kontrolcülerini kullanılmıştır. Bu iki modelin performansları kıyaslanmıştır.

Bu çalışmanın ilk kısmında daha önce yapılan çalışmalara ve bu çalışmanın amacına yer verilmiştir. II. bölümde ise sürücülü kendi kendini dengeleyen robotun hareket denklemlerine değinilmiştir. Çalışmanın amacı olan PID kontrol ve Bulanık Mantıklı Kontrol yöntemleri III. Bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır. IV. Bölümde ise yapılan simülasyon sonuçlarına yer verilmiş ve sonuçlar tartışılmıştır. Son bölüm ise sonuçlar bölümüdür.

II. SÜRÜCÜLÜ KENDİ KENDİNİ DENGELİYEN ROBOTUN MODELLENMESİ

Bu bölümde genel olarak sürücülü kendi kendini dengeleyen robotun hareket denklemlerinin elde edilmesinden bahsedilmiştir. Şekil 1’de robotun fiziksel modeli gösterilmiş, Şekil 2 ve Şekil 3’te sürücünün sisteme eklenmesiyle elde edilen fiziksel görünümüne yer verilmiştir. Bu bölümde sistem parametreleri tanımlanmış, literatürden yararlanılan çalışmalara değinilmiştir. Modelin kinetik, potansiyel enerji tanımlamaları yapılmış, Lagrange denklemi kullanılarak elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

Sistem üç ana birleşenden oluşmaktadır; gövde, motorlar ve sürücü. Şekil 1’de modelin gövde kısmı görülmektedir. Gövde, platform ve tekerleklerden oluşmaktadır.



Şekil 1. Robot gövdesinin fiziksel modeli [17].

Gövdenin kütlesi m_1 ve m_2 'nin toplamına eşittir. Gövdenin atalet momenti denklem 1'deki gibi tanımlanmaktadır. (m_1 , modelin tabanındaki kare rijit parça, m_2 ise platformun geriye kalan parçalarının toplam kütlesi olarak ifade edilmektedir. a_1 ise platformun yan uzunluğunu ifade etmektedir.) [17]

$$J_p = \frac{1}{2} m_2 r_2^2 + m_2 r_2^2 + \frac{1}{12} m_1 a_1^2 \quad (1)$$

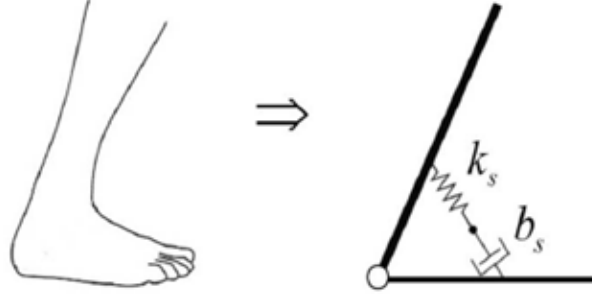
$$u = IR + nk_e \dot{\theta} \quad (2)$$

$$M_m = k_m \frac{(u + k_e (\dot{\alpha} - n\dot{\theta}))}{R} - k_w \dot{\theta} \quad (3)$$

Burada u ; motor voltajı, $\dot{\theta}$; motor dönüş hızı, I ; motor akımı, k_e ; geri EMF sabiti, k_w ; motor sürtünme katsayısı, n ; dişli oranı, R ; bobin direnci, J_p ; kendi kendini dengeleyen robotun toplam atalet momentini, $\dot{\alpha}$: platformun dönme hızını göstermektedir.

Bu modeldeki sürüş sistemi, iki DC motora sahip olup, motor parametre değerleri [21]'deki değerlere göre alınmıştır. Motor endüktansı ihmal edilmiş ve motorların yeterince küçük olduğu varsayımı yapılmıştır. Motorun toplam torku Denklem 3'teki gibi yazılabilir. [17]

Bu çalışmayı diğer çalışmalardan ayıran özelliklerinden biri, kendi kendini dengeleyen robotun sürücü ile birlikte modellenmesidir. Bu modelde sürücü, robotu öne ve arkaya doğru eğilerek hareket ettirdiği için platforma sabitlenmiş bir çubuk ile sistem modellenmiştir. Sürücülü segway tarzı robotlar incelendiğinde ilk dikkat çeken ayrıntı, sürücülerin ayak bileklerini bükmesidir. Bu çalışmada bu özellik dikkate alınmaktadır. (Winter vd. [22]), (Loram vd. [23]) yaptıkları çalışmada ayak bileği eklemine Şekil 2'deki gibi tanımlamışlardır.

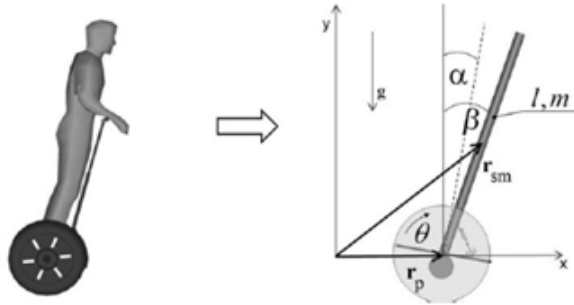


Şekil 2. Ayak bileği fiziksel modeli [24].

Şekil 2'de de görüldüğü gibi ayak bileği, birbirine eklemle bağlanan iki rijit çubuk ve çubuklar arasında bulunan yay ve sönüm elemanından oluşmaktadır. Sürücünün ayaklarının platformdan ayrılmadığı varsayılarak, ayak bileği tarafından üretilen toplam moment denklem 4'te verilmiştir [17].

$$M_s = T_u - k_s \phi - b_s \dot{\phi} \quad (4)$$

Denklem 4'te ifade edilen T_u ; ayak bileği momenti, k_s ; yay sabiti, b_s ; sönüm elemanı sabiti ve Φ ; ise eklem sapma açısını ifade eder. Sürücü, motorlar ve gövdeye sahip olan sistemin fiziksel modeli Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Sistemin fiziksel modeli [24].

Gövdenin konumu vektörel olarak Denklem 4 ile tanımlanır [17];

$$r_p = (\theta r_w, 0) \quad (5)$$

Burada θ tekerleklerin dönme açısını ifade etmektedir. Sürücünün kütle merkezinin konumu ise [17];

$$r_{sm} = r_p + \frac{1}{2}l(\sin(\beta), \cos(\beta)) = (\theta r_w + \frac{1}{2}l(\sin(\beta), \frac{1}{2}l(\cos(\beta))) \quad (6)$$

olarak ifade edilir.

B; y eksenine göre eğim açısını ifade etmektedir. Sürücünün kinetik enerjisi denklem 7'de tanımlanmıştır [17].

$$T_1 = \frac{1}{2} m \dot{r}_{sm}^2 + \frac{1}{2} \frac{1}{12} m l^2 \dot{\beta}^2 = \frac{1}{6} \dot{\beta}^2 l^2 m \cos(\beta) r_w + \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 m r_w^2 \quad (7)$$

Platformun kinetik enerjisi;

$$T_2 = \frac{1}{2} J_p \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 m_p r_w^2 \quad (8)$$

Motorun ve tekerleklerin kinetik enerjisi;

$$T_3 = \dot{\theta}^2 n^2 J_s + \frac{3}{2} \dot{\theta}^2 m_w r_w^2 \quad (9)$$

Sistemin toplam potansiyel enerjisi;

$$V = \frac{1}{2} g l m \cos(\beta) - g r_2 m_2 \cos(\alpha) + \frac{1}{2} k_s (\beta - \alpha)^2 \quad (10)$$

olarak tanımlanmaktadır. Potansiyel ve kinetik enerjileri tanımlanan sistemin Lagrange denklemleri kullanılarak dinamik denklemleri elde edilmiştir [17]. Hareket denklemlerinin elde edilmesinde Lagrange metodu kullanılmıştır. Lagrange metodu α , β ve θ bağımsız değişkenleri için uygulanarak sistemin dinamik davranışını yöneten ifadeler elde edilmiştir (Denklem 11). Bilgisayar hesapları α , β ve θ açılarının ikinci türevleri ile sistemin fiziksel parametreleri arasındaki bağıntıyı veren Denklem 11 kullanılarak yapılmıştır.

$$\ddot{\alpha} = -\frac{1}{J_p} \left\{ \begin{aligned} & \dot{\alpha} b_s - \dot{\beta} b_s + c_1 (\dot{\theta}_{SET} - \dot{\theta}) + g m_2 r_2 \sin(\alpha) + \alpha k_s - \beta k_s \\ & + (2\dot{\theta}(k_m(k_3 - nk_e) - Rk_w) - 2k_m(\dot{\alpha}(k_2 - k_e) + \alpha k_1)) / R \end{aligned} \right\}$$

$$\ddot{\theta} = \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{2} R r_w \left(12 \cos(\beta) ((\dot{\beta} - \dot{\alpha}) b_s + C_1 (\dot{\theta} - \dot{\theta}_{SET}) + (\beta - \alpha) k_s) - 3 g l m \sin(2\beta) + 4 \dot{\beta}^2 l^2 m \sin(\beta) \right) \\ & - 8 l k_m (\dot{\alpha}(k_2 - k_e) + \alpha k_1) + 8 \dot{\theta} l (k_m(k_3 - nk_e) - Rk_w) \end{aligned} \right\}$$

$$/ 1 \left\{ R \left(8 n^2 J_m + r_w^2 (-3 m \cos^2(\beta) + 4 m_p + 12 m_w + 4 m) \right) \right\}$$

$$\ddot{\beta} = \frac{3}{2 l^2} \left\{ \begin{aligned} & \frac{\cos(\beta) r_w 16 l (k_m (\dot{\alpha}(k_2 - k_e) + \alpha k_1) + \dot{\theta} (k_m (nk_e - k_3) + Rk_w))}{16 n^2 R J_m + R r_w^2 (-3 m \cos(2\beta) + 8 m_p + 24 m_w + 5 m)} + \\ & \frac{\cos(\beta) r_w R r_w 12 \cos(\beta) ((\dot{\alpha} - \dot{\beta}) b_s + c_1 (\dot{\theta}_{set} - \dot{\theta}) + (\alpha - \beta) k_s)}{16 n^2 R J_m + R r_w^2 (-3 m \cos(2\beta) + 8 m_p + 24 m_w + 5 m)} + \\ & \frac{\cos(\beta) r_w R r_w (3 g l m \sin(2\beta) - 4 \dot{\beta}^2 l^2 m \sin(\beta))}{16 n^2 R J_m + R r_w^2 (-3 m \cos(2\beta) + 8 m_p + 24 m_w + 5 m)} + \\ & \frac{2(\dot{\alpha} - \dot{\beta}) b_s + 2 c_1 (\dot{\theta}_{set} - \dot{\theta}) + g l m \sin(\beta) + 2(\alpha - \beta) k_s}{m} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

III. KENDİ KENDİNİ DENGELİYEN ROBOTUN KONTROLÜ

A. PID KONTROL

PID kontrol, geleneksel kontrol yöntemlerinden biri olup, günümüzde kullanılan kontrol metotlarının temelini oluşturmaktadır. PID kontrol aslında bir geri bildirim mekanizmasıdır. Arzu edilen durum ile var olan durum arasında bir hata değeri hesaplanır ve bu hata değerini minimize etmek PID kontrolcünün temel amacıdır. Teorik olarak hata değerinin düşürülmesi kontrol yapısının içinde mevcut olarak bulunan oransal, türevsel ve integral denetçileri ile sağlanır.

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (12)$$

PID denetleyicinin transfer fonksiyonu denklem 12'de gösterilmiştir. $u(t)$; kontrol değişkeni, e ; hata terimi, K ; oransal kazanç, T_i ; oransal zaman sabiti, T_d ; türev zaman sabiti ifadelerini içermektedir. Bu sabit katsayılarının bulunmasında birkaç farklı yöntem vardır. Bu çalışmada Ziegler-Nichols metodu kullanılarak denetleyici katsayıları hesaplanmıştır.

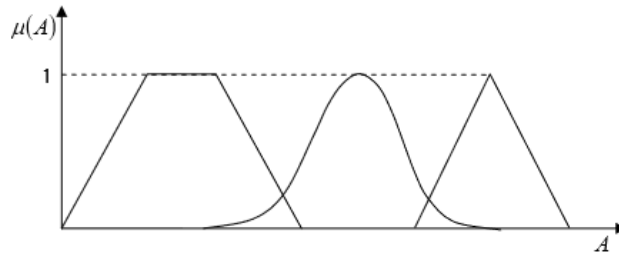
Tablo 1. Ziegler-Nichols kontrol parametreleri.

Kontrolcü	K	T_i	T_d
P	$0,5 K_c$	-	-
PI	$0,4 K_c$	$0,8 T_c$	-
PID	$0,6 K_c$	$0,5 T_c$	$0,12 T_c$

Tablo 1'de Ziegler-Nichols metoduna göre kazanç parametrelerini hesaplama yöntemi verilmiştir. K_c katsayısı sistemin salınım hareketi yapmaya başladığı değerdir. T_c katsayısı ise salınım anında ölçülen periyottur.

B. BULANIK MANTIKLI KONTROL

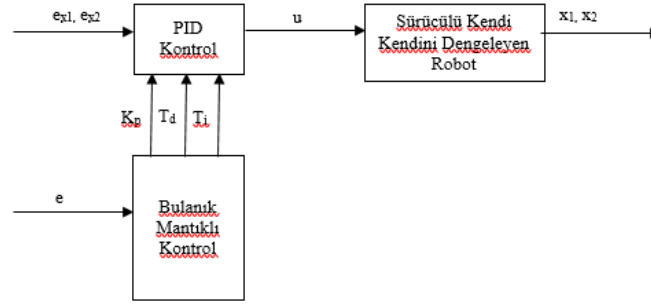
Zadeh, 1965 yılında bulanık küme teorisi adı altında bir çalışma sunmuştur [25]. Bu çalışmada klasik kontrol yöntemlerinden farklı olarak, kontrol yöntemlerinde mutlak sonuçlar dışında ara sonuçların da olması gerektiğini savunmuştur. Bu doğrultuda bulanık mantık teorisi ortaya atılmış ve daha sonra diğer araştırmacılar sayesinde bu teori geliştirilmiştir. Bulanık mantık sayesinde ara değerler üyelik fonksiyonları ile ifade edilir. Üyelik fonksiyonları üçgen, çan ve trapez gibi geometrik şekillerle ifade edilebilir (Şekil 4).



Şekil 4. Üyelik fonksiyonlarının çeşitli şekilleri [26].

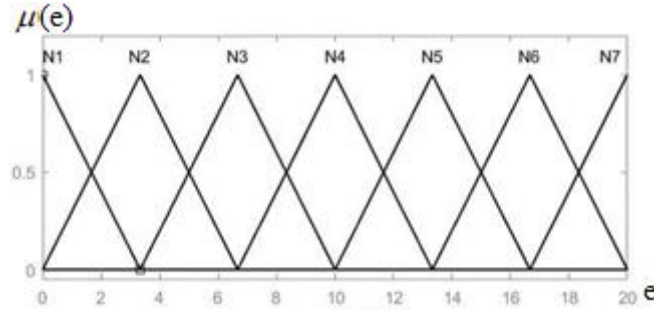
Bulanık mantıklı kontrol üç aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; bulanıklaştırma, sonuç çıkarma ve durulaştırma. İlk aşamada kullanılan değişkenler için sisteme giriş üyelik fonksiyonları tanımlanır. Diğer aşamada oluşturulan kural tablosuyla birlikte giriş üyelik fonksiyonlarına karşılık gelen çıkış üyelik fonksiyonlarına karar verilir. Son aşamada ise çıkış üyelik fonksiyonu bulanık değerlerden kesin değerlere dönüştürülür.

Bu çalışmada iki farklı kontrol kuralının avantajlarından yararlanarak yeni bir kontrol yöntemi tasarlanmıştır. PID kontrol gibi geleneksel ve hemen hemen her türlü sisteme uygulanabilen bir kontrolcüyle, bulanık mantıklı kontrolcü birlikte kullanılmıştır. PID kontrolün katsayıları bulanık mantıklı kontrol yöntemiyle bulunarak, geleneksel PID kontrol ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5'te bulanık mantıklı kontrolcüye ait blok diyagramı gösterilmiştir. PID kontrol kuralı için sistem hatası dikkate alınarak kontrolcü tasarlanmıştır. Bulanık mantıklı kontrolcü de ise giriş parametresi sistem hatası olarak belirlenmiş, çıkış parametreleri de PID kontrolde kullanılan kontrol parametreleri (K_p , T_d ve T_i) olarak belirlenmiştir. Böylece kontrol katsayıları adaptif hale getirilerek, sistemin daha az hata ile çalışması hedeflenmiştir.



Şekil 5. Bulanık mantıklı kontrolcünün blok diyagramı.

Kontrolcünün amacı insan ayağı ile hareket eden robotun dengede kalmasını sağlamaktır. Bu doğrultuda ilk aşamada bulanık mantıklı kontrol için giriş fonksiyonlarının belirlenmesi gerekir. Bu çalışmada, giriş fonksiyonu olarak sistem hatası seçilmiş ve üyelik fonksiyonları Şekil 6'da gösterilmiştir.



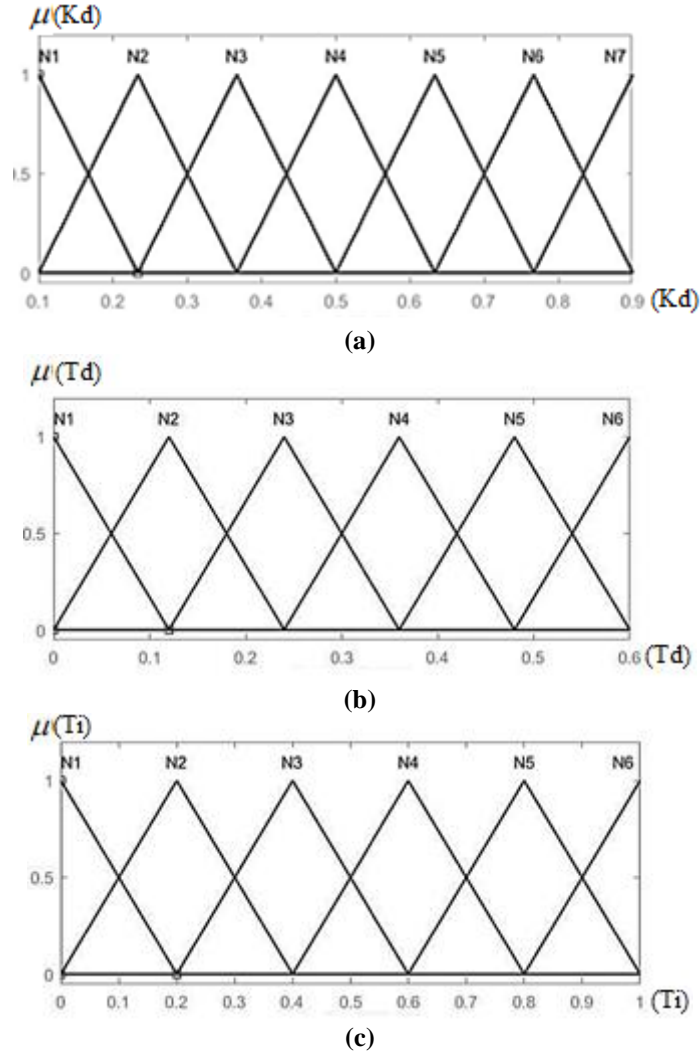
Şekil 6. Sistemin giriş üyelik fonksiyonu.

Kontrol kural tablosu, deneme yanılma yöntemiyle hazırlanmış olup Tablo 2'de gösterilmiştir. Kural tablosu literatürde var olan çalışmalardan referans alınabilir. Ancak Segway sistemlerinde literatürde Bulanık Mantıklı-PID çalışması olmadığı için kural tablosu deneme yanılma metodu ile belirlenmiştir. Örnek olarak; Eğer hata N1 ise K_p N4, T_d N3 ve T_i N4 değerlerini almaktadır. Hata N2 ise K_p N3, T_d N2 ve T_i N5 değerlerini almaktadır.

Tablo 2. Kontrol kural tablosu.

e_1	K_p	T_d	T_i
N1	N4	N3	N4
N2	N3	N2	N5
N3	N7	N1	N3
N4	N5	N2	N3
N5	N6	N3	N4
N6	N3	N3	N4
N7	N2	N2	N2

Çıkış üyelik fonksiyonu olarak PID seçilmiş (K_p , T_d , T_i) ve üyelik fonksiyonları Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Sistemin çıkış üyelik fonksiyonları (a) K_p katsayısı, (b) T_d katsayısı, (c) T_i katsayısı.

IV. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tüm simülasyonlar için aynı üyelik fonksiyonları ve kural tablosu kullanılmıştır. Simülasyonda kullanılan parametre değerleri Tablo 3 ile verilmiştir.

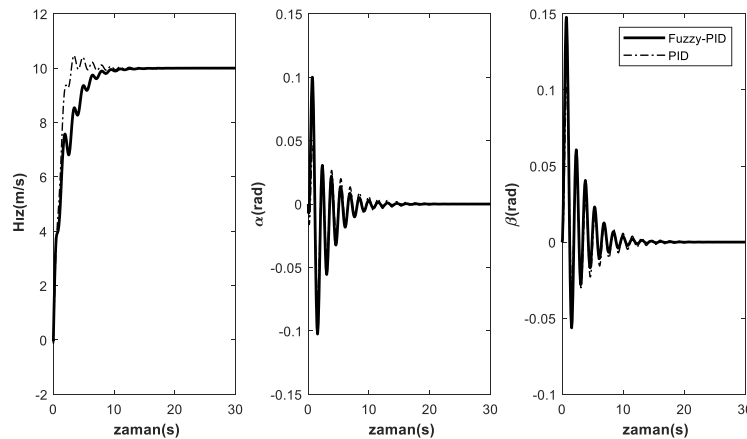
Tablo 3. Simülasyonda kullanılan model ve kontrolcü parametreleri [17].

		Parametre	Değeri	Birimi
Model Parametreleri		Platformun kütlesi (m_p)	26.7	Kg
		Platformun atalet momenti (J_p)	0.712	kgm^2
		Tekerleğin kütlesi (m_w)	5.18	Kg
		Tekerleğin atalet momenti (J_w)	0.096	kgm^2
		Sürücünün kütlesi (m_u)	80	Kg
		Sürücünün atalet momenti (J_u)	13.1	kgm^2

	Tekerlek yarıçapı (r_w)	0.215	M
	Sürücünün ağırlık merkezi (l_u)	0.98	M
	Ayak bileği yay katsayısı (k_s)	850	Nm/rad
	Ayak bileği sönüm katsayısı (b_s)	350	Nms/rad
	Motor momenti katsayısı (k_m)	0.53	Nm/A
	Motor SEM katsayısı (k_e)	0.53	Vs/rad
	Motor viskozitesi katsayısı (k_w)	0.018	Nms/rad
	Motor bobin direnci (R)	0.21	Ω
	Motor dişli oranı (n)	7.27	
	PID Katsayıları	K_p	0.6
T_i		1	
T_d		0.25	

Simülasyonlar yapılırken ana gövdenin hareketini temsil eden β ve sürücünün üzerinde durduğu platformun açısını temsil eden α açılarının değişimi sürücünün dengesini direkt etkileyen faktörlerden olduğu için bu iki açının kontrolü sürücünün araç üzerinde dengesini koruması için çok önemlidir. Kontrolcülerin başarısını sınamak için kendi kendini dengelen robotlar için yüksek hızlara denk gelen $V=20$ m/s, $V=15$ m/s ve $V=10$ m/s olmak üzere üç hızda simülasyonlar yapılmıştır.

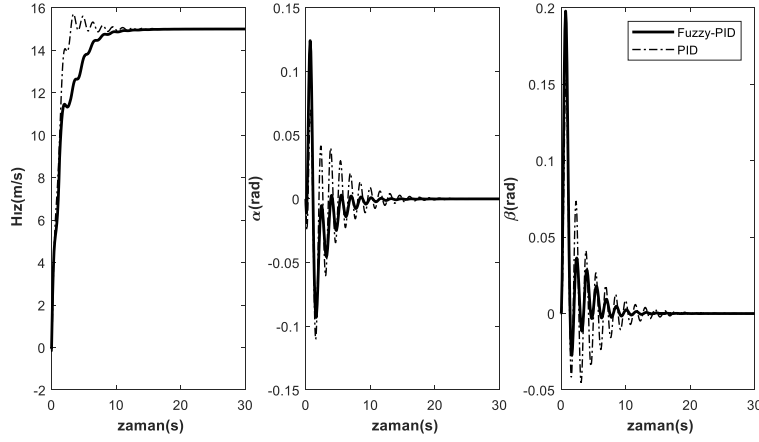
Şekil 7, 8 ve 9'da görüldüğü gibi Fuzzy-PID simülasyonlarında başlangıçta α ve β değerleri için yüksek açı değerleri almıştır. Sonrasında kayda değer bir azalma gözlenmektedir. Özellikle $V=20$ m/s ve $V=15$ m/s değerleri için yapılan simülasyonlarda gözle görülür iyileşmeler mevcuttur. Fuzzy-PID kontrolcünün performansı hız arttıkça artmıştır. PID kontrolcü kullanıldığında sürücünün maksimum gövde eğilmesi hızın 20m/s olduğu durumda 0.247 rad (14.15°) olmaktadır. Buna karşılık Fuzzy- PID kontrolcü kullanılarak bu açı 0.22 rad (12.6°) olmuştur. Bu durumda maksimum sürücü gövdesinin eğimi 1.547° azalmıştır. Fuzzy- PID kontrolcü kullanılarak sürücünün gövdenin salınımı 12. saniyede dengeye ulaşırken PID kontrolcüde 20. saniye civarında dengeye ulaşmıştır (Şekil 9). Hızın 15m/s olduğu durum için ise PID kontrolcü kullanıldığında sürücünün gövdesi 0.2 rad (11.46°) maksimum değişim göstermiştir. Fuzzy-PID kontrolcü ile sürücünün gövdesinin açısal değişimini 0.15 rad (8.59°) indirilmiştir (Şekil 9). 10 m/s hızda ise iki kontrolcünü de kullanılması sonucu önemli ölçüde değiştirmemiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Sistemin 10 m/s hızdaki zaman cevapları.

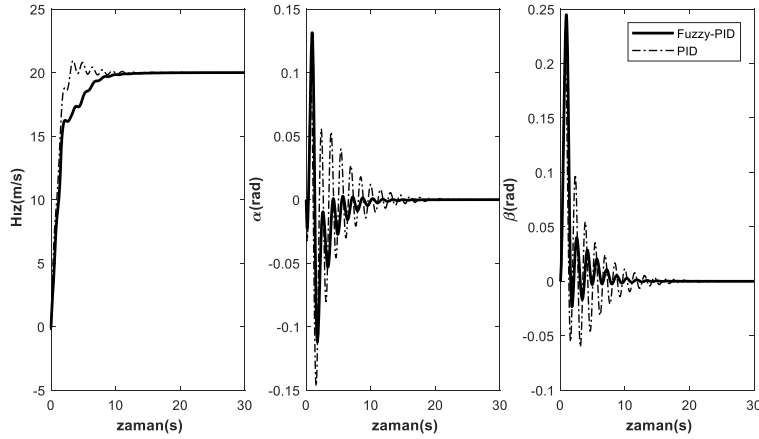
Şekil 9'de görüldüğü gibi sistem hedeflenen hıza daha kısa sürede ulaşmış olup α değeri PID kontrolcü ile yapılan simülasyonda 2 ile 10 saniye arasında 0,04148- 0,008 rad civarında değişirken aynı zaman diliminde Fuzzy-PID ile yapılan simülasyonlarda α açısı -0,005-0,0004 rad arasında

değişmektedir. Fuzzy-PID kontrolcü ile yapılan simülasyonlarda görülmektedir ki PID kontrolcüyeye göre daha hızlı ve kararlı bir şekilde istenilen hıza ulaşmıştır.



Şekil 9. Sistemin 15 m/s hızdaki zaman cevapları.

Şekil 10'da görüldüğü gibi sistem hedeflenen hıza daha kısa sürede ulaşmış olup α ve β değerleri Fuzzy-PID kontrolcü kullanarak hareket aralığı daha az değişip daha konforlu bir yolculuk sunmaktadır.



Şekil 10. Sistemin 20 m/s hızdaki zaman cevapları.

V. SONUÇ

Bu çalışmada, kendi kendini dengeleyen robot yapısı sürücü etkileşimi ile birlikte modellenmiş, geleneksel kontrol metotlarından PID ve Bulanık mantık (Fuzzy logic) kontrol metodu bir arada kullanılarak uyarlamalı (adaptif) bir kontrol algoritması oluşturularak kontrolcü performansı incelenmiştir. Aracın 10 m/s, 15m/s ve 20m/s olmak üzere 3 farklı hareket hızı için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. 10m/s hız için yapılan simülasyon sonuçlarında PID ve Fuzzy-PID kontrolcülerinin sürücü gövde eğimi hareketleri birbirine çok yakındır. 15m/s ve 20m/s hızlarda kontrolcü performansları kıyaslandığında Fuzzy-PID kontrol algoritmasının geleneksel PID kontrol metodu sonuçlarına göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir (Şekil 9-10). Fuzzy-PID kontrolcü kullanılarak yapılan hesaplamalarda gövdenin maksimum eğimi sırasıyla 8.59^0 ve 1.547^0 azalmıştır. Gövde eğiminin azalması sürücüye daha konforlu ve düşme riskini azaltan bir yolculuk sağlamaktadır.

Yapılan simülasyonlar, PID kontrolcü yapısı kullanılarak geliştirilen yeni nesil kontrol algoritmaları sayesinde daha hızlı cevap veren ve daha kararlı kontrol sistemleri oluşturulabildiğini göstermiştir.

Bu çalışmada sistem üzerinde bozucu etki oluşumları incelenmemiştir. Bundan sonra yapılacak olan çalışmalarda kullanıcı nedeni ile veya sürüş esnasında oluşabilecek dış etkenler sisteme dâhil edilip sistemin çalışması tekrar incelenebilir.

VI. KAYNAKLAR

- [1] M. L. Nicora, R. Ambrosetti, G. J. Wiens ve I. Fassi, "Human–Robot Collaboration in Smart Manufacturing: Robot Reactive Behavior Intelligence," *J. Manuf. Sci. Eng.* vol. 143, no. 3, pp. 31009-31018, 2021.
- [2] T. T. Lewis, H. Kim, A. Darcy-Mahoney, M. Waldron, W. H. Lee ve C. H. Park, "Robotic uses in pediatric care: A comprehensive review," *J. Pediatr. Nurs.* vol. 58, pp.65-75, 2021
- [3] D. Giansanti, "The Social Robot in Rehabilitation and Assistance: What Is the Future?," *Healthcare*, vol. 9, no. 3, pp. 244, 2021.
- [4] H. Go, M. Kang, ve S. C. Suh, "Machine learning of robots in tourism and hos-pitality: Interactive technology acceptance model (iTAM)–cutting edge.," *Tourism Review.* vol.75, no.4, pp. 625-636, 2020.
- [5] D. Özdemir ve S. Karaman, "Investigating interactions between students with mild mental retardation and humanoid robot in terms of feedback types," *Egitim ve Bilim*, vol. 42, no.191, pp. 109-138, 2017.
- [6] A. M. Johnson, ve A. Nasar, "Design and development of a two wheeled self balancing robot for an application of object carrying," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 6, no. 7, pp. 580-585, 2017.
- [7] A. Efe, O. Şencan, M. H. Cılasun, ve H. Temeltaş, "Ters sarkaç kendini dengeleyen robot," *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK2016)*, Eskişehir, Türkiye, 2016, pp. 796-801.
- [8] T. Tomasic, A. Demetlika, ve M. Crnekovic, "Self-balancing mobile robot tilter," *Transactions of FAMENA Academic Journal*, vol. 36, pp. 23-32, 2012.
- [9] H. Ping, W. Hai, L. Linfeng, K. Huifang, Y. Ming, J. Canghau, ve M. Zhihong, "A novel hierarchical sliding mode control strategy for a two-wheeled self-balancing vehicle," *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*, Dalian, China, 2017, pp. 3731-3736.
- [10] W. An, ve Y. Li , "Simulation and control of a two-wheeled self-balancing robot," *2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Shenzhen, China, 2013, pp. 456-461.
- [11] M. A. Şen, M. Kalyoncu, ve M. Tinkır, "İki tekerlekli kendi kendini dengeleyebilen bir araç için yapay sinir ağı ve bulanık mantık kontrol tabanlı kontrolcü tasarımı," *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK2014)*, Kocaeli, Türkiye, 2014, pp. 682-687.

- [12] J. Wu ve W. Zhang, "Design of fuzzy logic controller for two-wheeled self-balancing robot," *Proceedings of 2011 6th International Forum on Strategic Technology*, Harbin, China, 2011, pp. 1266-1270.
- [13] J. Huang, M. Ri, D. Wu, ve S. Ri, "Interval type-2 fuzzy logic modelling and control of a mobile two-wheeled inverted pendulum," *IEEE Transaction of Fuzzy Systems*, vol. 26, no. 4, pp. 2030-2038, 2018.
- [14] H. I. Ali ve M. J. Kadhim, "Sliding mode controller design for mobile inverted pendulum system," *Iraq Journal of Computers, Communications, Control of System Engineering (IJCCE)*, vol. 18, no. 2, pp. 17-29, 2018.
- [15] B. A. Kovacs, G. Stepan, Z. Wang ve T. Insperger, "Electro-mechanical model of a two-wheeled vehicle balancing a passive human subject," *2019 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, Ilmenau, Germany, 2019, pp.678-683.
- [16] G. Prabhakar S. Selvaperumal, P. N. Pugazhenthii, K. Umamaheswari ve P. Elamurugan "Online optimization based model predictive control on two wheel Segway system," *Materials Today: Proceedings*, vol. 18, pp. 3846-3853, 2020
- [17] M. Ciezkowski, "Modelling the interaction between two wheeled self balancing vehicle and its rider," *Int. J. of Applied Mechanics and Engineering*, vol. 18, no. 2, pp. 341-351, 2013.
- [18] F. A. Raheem, B. F. Midhat ve H. S. Mohammed "PID and fuzzy logic controller design for balancing robot stabilization," *Iraqi Journal of Computers, Communications, Control & Systems Engineering (IJCCCE)*, vol.18, no. 1, pp.1-10, 2017.
- [19] T. A. Mai, D. T. Son, D N. Anisimov ve E. Fedorova, "Fuzzy-pid controller for two wheels balancing robot based on stm32 microcontroller," *In: 2019 International Conference on Engineering Technologies and Computer Science (EnT). IEEE*, Moscow, Russia, 2019, pp. 20-24.
- [20] C. Iwendi, M. A. Algarni, J. H. Anajemba, A. S. Alkaheef, Z. Zhang ve A. K. Bashir, "Robust navigational control of a two-wheeled self-balancing robot in a sensed environment," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 82337-82348, 2019.
- [21] M. A. Meggiolaro (2009, 29 Ağustos), *Riobotz compat robot tutorial*. [Online]. Erişim: <https://www.riobotz.com/riobotz-combot-tutorial>.
- [22] D. A. Winter, A. E. Patla, F. Prince, M. Ishac, ve K. Gielo-Perczak, "Stiffness Control of Balance In Quiet Standing," *Journal of Neurophysiology*, vol. 80, pp. 1211-1221, 1998.
- [23] I. D. Loram, S. M. Kelly, ve M. Lakie, "Human balancing of an inverted pendulum: is sway size controlled by ankle impedance," *Journal of Physiology*, vol. 532, no. 3, pp. 879-891, 2001.
- [24] M. Ciezkowski, "Method for determination of interaction between a two-wheeled self-balancing vehicle and its rider," *Mechanika*, vol. 22, no. 5, pp. 416-424, 2016.
- [25] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, no 3, pp. 338-353, 1965.
- [26] Y. Hacıoğlu, "Bir robotun bulanık mantıklı kayan kipli kontrolü," Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2004.