



İki tekerlekli denge robotunun PID ile kontrolü Control of two wheel balance robot with PID

Güçhan Taşlıalan^{1,*} , Orhan Erdal Akay² 

^{1,2} Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 46050, Kahramanmaraş, Türkiye

Öz

Yüksek hareket kabiliyetine sahip ergonomik tasarımı taşıtlara olan ihtiyaç son yıllarda giderek artmaktadır. Buna bağlı olarak, iki tekerlekli denge robotları, güncel yaşamımızdaki yerini, ticari olarak almıştır. Bu robotlar için denge temel problemdir. Buna bağlı olarak, araştırmacılar 40 yılı aşkın süredir ters sarkaç yaklaşımı altında, denge problemi ile ilgili çeşitli çalışmalar yapmıştır. Ters sarkaç probleminde, hareket denklemleri doğrusal olmayan karmaşık denklemlerdir. Bu denklemlerin elde edilmesinde farklı dinamik yaklaşımlardan faydalanılmıştır. Çalışmada; iki serbestlik derecesine sahip olan, iki tekerlekli denge robotunun kinematik analizi gerçekleştirilmiş ve doğrusal olmayan dinamik denklemleri lagrange yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen denklemler Matlab-Simulink ara yüzüne aktarılmış ve yalnızca açı dengesini kontrol eden bir PID kontrolörün bulunduğu bir blok diyagramının benzetim modeli yapılmıştır. Bir sonraki aşamada, denklemler yine Matlab-Simulink ara yüzüne aktarılmış ve açı kontrolü ile hız kontrolü sağlayan iki ayrı PID kontrolörün bulunduğu bir blok diyagramının benzetim modeli yapılmıştır. Benzetim modelleri incelendiğinde kontrol sistemlerinin çalıştığı görülmüştür. Açı geri beslemesine sahip kontrol sisteminde dengenin, açı/hız geri beslemeli kontrol sistemine göre 330 s daha kısa sürede sağladığı görülmüştür. Ayrıca, kararlı bir kontrol için PID kontrolörlerin kazanç katsayılarının en uygun değerlerde belirlenmesi gerektiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: İki tekerlekli denge robotu, Ters sarkaç, Lagrange yöntemi, Matlab, Robot

1 Giriş

Günümüz dünyasında, her geçen gün daha az enerji harcayan, daha az hacim kaplayan ve kullanımı kolay olan yeni taşıt tasarımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun sonuçlarından biri olarak, 21. yüzyıl başlangıcından itibaren iki tekerlekli denge robotu literatürdeki yerini almıştır. İki tekerlekli denge robotu tüm dünyanın ilgisini çekmiştir ve günümüzde ticari bir boyut kazanmıştır. Bu nedenle büyük alışveriş merkezleri, otoparklar ve hastaneler gibi dar alanlarda yüksek hareket kabiliyeti gerektiren birçok yerde kullanılmaktadır. İki tekerlekli denge robotu, literatürde birçok çalışmanın konusu olmuş ve denge problemi, ters sarkaç yaklaşımı ile çözümlenmiştir. Ters sarkaç probleminde hareket denklemleri doğrusal olmayan

Abstract

The need for ergonomically designed vehicles with high mobility has been increasing in recent years, that's why two-wheeled balance robots have taken their place commercially in our current life. Balance is the main problem for a two-wheeled balance robot, so researchers have carried out various studies on the balance problem under the title of inverted pendulum for more than 40 years. In the inverted pendulum problem, the equations of motion are complex nonlinear equations. Different dynamical approaches have been used to obtain these equations. In the study the kinematic analysis of the two-wheeled balance robot, which has two degrees of variance, was carried out and the nonlinear dynamical equations were obtained using the Lagrange method. The obtained equations were transferred to the Matlab-Simulink interface and a block diagram was simulated with a PID controller that only controls the angle balance. In the next step, the equations were transferred to the Matlab-Simulink interface and a block diagram was simulated with two separate PID controllers providing angle control and speed control. When the simulations were examined, it was seen that the control systems worked successfully. It has been observed that the balance in the control system with angle feedback is provided in less than 330 seconds compared to the control system with angle/velocity feedback. In addition, it has been seen that the gain coefficients of PID controllers should be determined at the most appropriate values for a stable control.

Keywords: Two wheel balance robot, Inverted pendulum, Lagrangian method, Matlab, Robot

karmaşık denklemlerdir. Bu denklemlerin elde edilmesinde Newton hareket kanunu, lagrange enerji yöntemi veya benzer dinamik yaklaşımlardan faydalanılmıştır. Ters sarkaç problemi çözümündeki elde edilen kazanımlar, araştırmacıların yeni çalışmalara yönelmesini sağlamıştır. İki tekerlekli denge robotunun çalışma prensibi, ters sarkaç problemi ile benzerdir. Bu nedenle ters sarkaç problemi, iki tekerlekli denge robotu için bir alt model olarak kabul edilmiştir.

Tsai ve Hu [1] çalışmalarında, lagrange yöntemiyle ters sarkaç problemi temelinde iki tekerlekli denge robotunun dinamik denklemlerini oluşturdular ve bu denklemleri kullanarak auto-balancing two-wheeled cart (ABTWC) isimli kontrol yaklaşımını benimsediler.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: guchantaslialan@gmail.com (G. Taşlıalan)
Geliş / Received: 12.12.2021 Kabul / Accepted: 15.03.2022 Yayımlanma / Published: 15.04.2022
doi: 10.28948/ngumuh.1026781

Su vd. [2] çalışmalarında, iki tekerlekli bir robot için akıllı yazılım mimarisi geliştirdiler. Buna göre; parametrik değişkenlik, doğrusal olmayan sürtünme, dış yükte bozulma gibi öngörülemeyen belirsizlikler için bulanık sinir ağına sahip bir denetleyici tasarladılar. Ayrıca, geleneksel PD kontrolöre sahip bir denetleyici de tasarladılar ve denetleyicilerin benzetim modelleri çalıştırılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırdılar.

Vermeiren vd. [3] çalışmalarında, iki tekerlekli bir prototipin modellenmesi ve kontrolüne ilişkin sonuçları sunulmuştur. Segway gibi B2 isimli araç da, esasen tekerlekleri ortak bir eksen paylaşıyor ve kendi kendini dengeleyen bir makinedir. Bununla birlikte, kontrol amaçları farklıdır; çünkü iki aracın kullanım amacı farklıdır. Segway ters sarkaç gibi davranır (örneğin: sürücü öne doğru eğildiğinde, Segway yolunun düşmesini önlemek için öne doğru hızlanır), oysa B2'nin görevi yolun ve yolcuların etkisini gözetmeden yolcuları taşımaktır. Ayrıca, B2 alternatif bir karayolu taşıtı olarak tasarlanmıştır ve kaldırımlarda kullanımı uygun değildir. Amacı, şehir merkezindeki araçların neden olduğu sorunları (kirlilik, gürültü, alan kullanımı) azaltmaktır.

Ghani vd. [4] çalışmalarında, iki tekerlekli robot için çizgi izleyici algoritmasının geliştirilmesine odaklanılmıştır. Eğim açısı problemini çözmek için ortamdaki değişiklikler iki kızıl ötesi mesafe sensörü aracılığıyla belirlenmiş ve ortam değişikliklerini izlemek üzere denge kartındaki işlemci yongasından alınan verilere tepki vermesi amacıyla beyin kartı denetleyicisi "ATMEGA32" seçilmiştir.

Jung ve Lee [5] çalışmalarında, MIPS adı verilen robotun dengeleme ve navigasyon kontrolünü incelemişlerdir. MIPS, iki tekerlekli mobil bir robottur ve ters sarkaç problemi temelinde incelenmiştir. Dinamik denklemlerin kullanıldığı kontrol sisteminde; bir adet PD ve iki adet PID kontrolör kullanılmıştır.

Almeshal vd. [6] çalışmalarında, iki tekerlekli taşıtların yeni bir tasarımı ve buna bağlı bir stabilizasyon yaklaşımı sunulmuştur. Önerilen tasarım, aracın çalışma alanını genişletmesini sağlayan daha fazla serbestlik derecesi bakımından araca daha fazla esneklik sağlamıştır. Doğrusal aktüatör tarafından sunulan ek çeviri serbestlik derecesi (DOF), gerektiğinde farklı yükseklik seviyelerine ulaşmak için ekli bir yüke yardımcı olur. Sistemin modeli, hareket halindeki bir tabandaki çift ters sarkaç senaryosunu, eklenen DOF ile taklit eder. Sistemin dinamik denklemlerini elde etmek için lagrange yöntemi kullanılmıştır. Coulomb sürtünme modeline dayanan mafsallar, sistemin doğrusal olmayan özelliklerini koruyacak şekilde göz önünde bulundurulmuştur. Sistemin dengelenmesi için bir PD-PID sağlam kontrol yaklaşımı türetilmiştir. Eklemlere bağlı sönümleme sisteminin kararlılığı üzerindeki etkisinin araştırılması yapılmıştır. Modeli ve kontrol yaklaşımını doğrulayan benzetim modeli sonuçları sunulmuş ve tartışılmıştır.

Adeel vd. [7] çalışmalarında, önceden belirlenmiş pozisyon etrafında pozisyonunu dengeleme yeteneğine sahip özerk bir çift tekerlekli kendini dengeleme robotu geliştirilmiştir. Başlangıçta sistem doğrusal değildir ve kararsızdır. Sistemin fiziksel yapısını PID kontrolörü

kullanarak yeniden tasarladıktan ve matematiksel modellemeyi kullanarak dinamik davranışını analiz ettikten sonra sistemin kararlı hale geldiği görülmüştür. Kendi kendini dengeleyen robotun konumu PID denetleyicisi tarafından kontrol edilmiştir. PROTEOUS, MATLAB ve VM programları kullanılarak robotun benzetim modelleri çalıştırılmıştır ve sonuçları incelenmiştir.

Son ve Anh [8] çalışmalarında, doğrusal olmayan belirsiz bir model ile iki tekerlekli elektrikli scooter için uyarlanabilir bir geri tepme kontrol yasasını incelemişlerdir. Adaptif geri tepme kontrolü, Lyapunov istikrarını sağlayan geri bildirim kontrolü ile entegre edilmiştir. Kontrol edilen fonksiyonu bulmak ve belirsiz parametreleri tahmin etmek için özyinelemeli yapıyı kullanarak; uyarlamalı bir geri adım atma yöntemi, eScooter'ın kendi kendini dengeleyen kontrol ünitesini verimli bir şekilde kontrol eden bir geri besleme kontrol yasasını oluşturmuşlardır. Ek olarak, eScooter'ın modülleri arasında iletişim kurmak için yüksek güvenilirliğe sahip bir kontrolör alanı ağı (CAN bus) uygulamışlardır.

Hirata ve Murakami [9] çalışmalarında, iki tekerlekli denge robotu alt yapısına sahip iki tekerlekli bir sandalye sistemini incelemişlerdir. Kontrolör olarak ise Lyapunov kontrol yaklaşımını benimseyerek benzetim modeli ve deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır.

Çelik [10] çalışmasında, iki tekerlekli denge robotunun dinamik modelinin belirlenmesi hususunda lagrange enerji metodundan yararlanmıştır. Elde ettiği nonlineer modelleri Matlab/Simulink ortamında blok diyagramlarına aktarmıştır. Oluşturulan modeller için Matlab/Simulink ortamında PID ve model öngörülü kontrol (MPC) kontrolcülerini tasarlayarak benzetim modelleri karşılaştırmıştır.

Kara [11] çalışmasında, iki tekerlekli robot üzerine tek bir kol yerleştirilmiştir. Kol sayesinde robota gerçek zamanda harici ve dâhili bozucu etken uygulanırken, Katsayı Diyagram Metodu (KDM) denetimcisi ile sistemin açısal dengesi ve doğrusal yer değiştirme kontrolü sağlanmıştır.

Dai vd. [12] çalışmalarında, sürtünme telafisine sahip iki tekerlekli bir ters sarkaç (TWIP) robotunun tasarım ve uygulama yöntemini tanıtmışlardır. Tahrik mekanizmasındaki sürtünme, robotun kendi kendini dengelemesinin kritik bir faktörüdür ve performansını etkiler. Sürtünme parametreleri, tahrik mekanizmasının dinamik modeline göre tanımlanmıştır. Tüm robot sisteminin dinamikleri lagrange metodu ile elde edilmiş ve robot tahrik mekanizması sürtünmesi hesaba katılmıştır. TWIP robotu doğrusal olmayan bir sistem olarak bağlanmış olmasına rağmen, kendini dengeleme ve yalpalama hareketi için kayan mod kontrol cihazları bağımsız olarak tasarlanmıştır.

Velazquez vd. [13] çalışmalarında, kendi kendini dengeleyen bir aracın dengeleme, hız ve hareket kontrolünü incelemişlerdir. Hem dengeleme kontrolü hem de açısal hız kontrolü için kademeli bir kontrol cihazı uygulamışlardır. Bu kontrolör, sistemin önerilen matematiksel modelini kullanarak benzetim modelleri test edilmiştir. Kontrol donanımı, önerilen kontrol cihazlarını uygulamak için tasarlanmış ve entegre edilmiştir.

Junoh [14] çalışmasında; iki tekerlekli bir denge modeli üzerine PID kontrol uygulanmıştır. Dengenin sağlanmasından sonra PID kazanç katsayıları ile oynayarak daha stabil bir

denge elde etmeye çalışmıştır. Sonuç olarak, farklı kazanç katsayıları ile farklı denge eğrileri elde edildiğini görmüş ve stabil bir denge için optimum kazanç katsayılarını belirlemiştir.

İlgen vd. [15] çalışmalarında, çok tekerlekli bir benzetim modelinin geliştirilmesi ve tek tekerlekli bir ters sarkacın dengelenmesinin kontrolü amaçlanmıştır. Sistemin sanal bir prototipi Adams yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Model, Matlab ve Adams yazılımında birlikte simüle edilmiştir. Adams modelinde iki giriş (bozulma ve kontrol) ve iki çıkış (sarkaç açısı ve tekerlek konumu) bulunmuştur. PID kontrolör, sarkaç açısının dengeleme kontrolü ile benzetim modeli için tasarlanmış ve uygulanmıştır.

Hirose vd. [16] çalışmalarında, bagaj taşıyabilen ve insanı takip edebilen iki tekerlekli ters sarkaç kontrolüne sahip kişisel bir robotu incelediler ve insanı takip eden bir robot için yeni bir kontrol yaklaşımı önerdiler. Önerilen yaklaşım, kişisel bir robotun ihtiyaç duyacağı çeşitli üst ve alt seviye kısıtlamalarının dikkate alınmasını kolaylaştıran bir model öngörücü kontrol kullanılmıştır.

Jeong vd. [17] çalışmalarında, ters sarkaç problemi tekniğini kullanan kişisel mobil robotları incelemişlerdir. Yapılan benzetim modellerinde fren durumunda gövdenin tepki davranışı incelenerek elde edilen veriler not edilmiş ve bu veriler ışığında geri tepme davranışındaki tepme kuvvetinin diferansiyel değerini kullanan olası bir acil fren destek kontrolü önerilmiştir.

Yavuz vd. [18] çalışmalarında, iki tekerlekli kendini dengeleyen robotun tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Tasarımı gerçekleştirilen robot üzerinde kontrolcü uygulamasında geri besleme verilerini elde edebilmek için ivmeölçer ve gyro sensörü kullanmışlardır. Sensörlerden elde edilen veriler ile robotun açısal pozisyonu kontrol edilmeye çalışılmıştır. Tasarım üzerine üç farklı kontrol algoritması (PI kontrol, PD kontrol ve PID kontrol) uygulanmıştır.

Park ve Cho [19] çalışmalarında, kontrol momenti jiroskop modülüne dayanan iki tekerlekli kendini dengeleyen bir mobil robotu tanıtmışlardır. Dengesini korumak için, iki tekerlekli robotun tekerlek hareketlerini kullanması gerekir. Beklenmedik bir rahatsızlık robotu etkilediğinde, robot tekerleklerin hareketleri ve gövdenin eğilmesiyle dengesini korur. Rahatsızlık robotun tepki yeteneğini aşarsa, robot dengesini kaybeder. Bu sorunları çözmek için, hareketi en aza indirirken dengeyi iyileştirmek için kontrol momenti jiroskop modülü ile bir robot tasarlanmıştır. Robota bir rahatsızlık uygulandığında, rahatsızlığın bir gözlemci tarafından tahmin edildiği öngörülür ve kontrol momenti jiroskop denetleyicisi rahatsızlığı telafi eder. Kontrol momenti jiroskop modülünü kullanarak robot, tekerleklerinin sadece küçük hareketleriyle dengeyi koruyabilmektedir.

Jeong ve Hayashi [20] çalışmalarında, ters sarkaç problemi temelinde iki tekerlekli bir robotu incelemişlerdir ve sağlam yük pozisyonu yaklaşımı ile yatay duruş pozisyonunda tutma sağlayan paralel dört çubuk mekanizmasını benimseyen bir ters sarkaç modeli önermişlerdir. Bu platformun temel yapısı, iki ön ve arka ters sarkaçları ve dört çubuklu paralel bir bağlantı mekanizması

görevi görecektir şekilde serbest dönüşlü bağlantıları olan iki üst ve alt çubuktan oluşur. Paralel mekanizmanın özelliklerine dayanarak, platform çeşitli bozucu etkenler altında dengeleme hareketi sırasında üst çubuğun yatay duruşunu koruyabilir. Mobil platformun hareket denklemleri, üst çubuktaki yükleme koşulundaki bir değişikliğin, dengeleme benzetim modelleri ile onaylandığı gibi dengeleme özelliklerini etkilemediğini göstermiştir.

Gandarilla vd. [21] çalışmalarında, iki serbestlik dereceli kendini dengeleyen bir robotu sürmek için ara bağlantı ve sönümlendirme ataması pasivitesine dayalı kontrol (IDA-PBC) tekniğini incelemişlerdir. Kontrol sistemi tasarımı, kararlılık analizi ve çekim alanının tahmini ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Değişkenlerin uygun bir şekilde değiştirilmesi ve eşleşen denklemlerin uygun bir şekilde ele alınması, kontrol yasalarının tasarlanması ve sırasıyla asimptotik stabilize analizinin yapılması için anahtar olmuştur. Arzu edilen potansiyel enerji için farklı önerilerin kapalı devre halindeki kendi kendini dengeleyen robotun davranışını nasıl şekillendirdiğini vurgulamak için kontrol ünitesinin tasarımında iki skalar fonksiyon kullanılmıştır. Teorik öneriyi onaylamak ve önerilen kontrol yasasının düzenleme görevindeki performansını ve dış rahatsızlıklara karşı pratik sağlamlığı göstermek için deneysel sonuçlar sunulmuştur.

Taşhan ve Akay [22] çalışmalarında, iki tekerlekli denge robotunun dengesinin sağlanabilmesi için herhangi bir dinamik denklem modeli kullanılmamış, bunun yerine doğrudan açı geri beslemeli bir PD kontrolör tasarlanmış ve blok diyagramı oluşturulmuştur. PD kontrolör, Working Model2D (WM2D) ara yüzünde test edilmiştir. İki tekerlekli denge robotu, 2 serbestlik derecesine sahip dinamik bir yapıdadır ve teorik çalışmalar uygulamaya aktarıldığında ivme ölçer, açı ölçer vb. sensör ekipmanlarından faydalanılır. Araştırmacılar benzer argümanlar ile farklı disiplinlerde de çalışabilmektedir. Fakat, araştırmaların nihai amacı insan hayatını kolaylaştırmaktır.

Kacar vd. [23] çalışmalarında, kendi kendini dengeleyebilen bir bisiklet için bir tasarım çalışması yapılmıştır. Ayrıca düşmesi durumunda denge konumuna getirmek için destek ve kaldırma sistemleri eklenmiştir. Sonlu eleman benzetim modeli yapılarak, bisiklet çerçevesinin dinamikleri ve yapısal tepkileri elde edilmiştir. Netice olarak, kendi kendini dengeleme özelliğine sahip otonom bir bisiklet tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kendinden dengeleme, tek eksenli bir gimbal içeren kontrol torku jiroskopu ile gerçekleştirilmiştir. Tasarımın performansı değişen yükleme, sürüş hızı ve sürüş torku açısından değerlendirilmiştir.

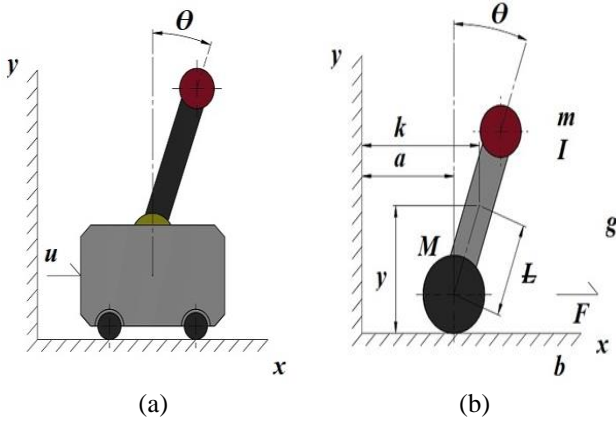
Sunulan çalışmada, iki serbestlik derecesine sahip olan, iki tekerlekli bir denge robotunun kinematik analizi gerçekleştirilmiş ve doğrusal olmayan dinamik denklemleri elde edilmiştir. Kinematik analiz, klasik bir dinamik problemi olan ters sarkaç problemi yaklaşımı ile lagrange metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Lagrange metodu ile elde edilen dinamik denklemler Matlab-Simulink ara yüzüne aktarılmış ve iki tekerlekli denge robotunun sadece açı dengesini kontrol eden bir PID (Proportional, Integral, Derivative) kontrolör tasarlanarak benzetim modeli yapılmıştır. Bir sonraki adımda dinamik denklemler yine

Matlab-Simulink ara yüzüne aktarılmış ve açı kontrolü ile hız kontrolü sağlayan iki ayrı PID kontrolörün tek bir blok diyagramına entegre edildiği yeni bir benzetim modeli yapılmıştır. Benzetim modeliler çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Kinematik model

Ters sarkaç probleminin serbest cisim diyagramı en genel haliyle Şekil 1(a)'da verilmiştir. Şekil 1(b)'de ise iki tekerlekli denge robotuna ait serbest cisim diyagramı verilmiştir. Serbest cisim diyagramları incelendiğinde her iki modelin de dinamik yapısının benzer olduğu görülür. Dinamik denklemlerin elde edilmesinde çeşitli yöntemler kullanılır. Bu çalışmada, dinamik denklemlerin elde edilmesi için lagrange yöntemi kullanılmıştır. Lagrange yöntemi ile elde edilen dinamik denklemler Matlab-Simulink ara yüzüne aktarılmış ve açı kontrolü ile hız kontrolü sağlayan iki ayrı blok diyagramı tasarlanarak benzetim modelleri test edilmiştir. İki tekerlekli denge robotu, gövde ve tekerlek olmak üzere iki parçaya ayrılmıştır. Bu sayede, ayrı ayrı matematiksel tanımlamalar yapılabilmiş ve sonrasında bağıntılar birleştirilmiştir. İlk parça gövdenin olduğu kısım ve ikinci parça da tekerleğin olduğu kısım.



Şekil 1. (a) Ters sarkaç serbest cisim diyagramı, (b) İki tekerlekli denge robotu ters sarkaç serbest cisim diyagramı

Tablo 1'de iki tekerlekli denge robotunun kinematik ve dinamik analizi için gereken parametreler verilmiştir. Bu parametrelerin sayısal değerleri ileride çalışılması planlanan deneysel sisteme göre belirlenmiştir.

Lagrange yönteminde, kinetik ve potansiyel enerjiler kullanılmaktadır. Toplam kinetik enerji, ötelemeden kaynaklanan kinetik enerjiler ile dönmeden kaynaklanan kinetik enerjilerin toplamıdır. Denklem (1)'de en genel haliyle toplam kinetik enerji ifadesi verilmiştir. Buna göre tekerleğin ve gövdenin kinetik enerjileri ayrı ayrı belirlenmiştir. Gövdenin; düşey eksen ve yatay eksen hareketi bulunduğu için, hem ötelemeden kaynaklı kinetik enerjisi hem de dönmeden kaynaklı kinetik enerjisi bulunur. Tekerleğin ise düşey eksen hareketi bulunmadığı için yalnızca yatay eksen ötelemeden kaynaklı kinetik enerjisi bulunur.

Tablo 1. İki tekerlekli denge robotu parametreleri

Parametre	Açıklama	Değer	Birim
k	Sabit eksen takımına göre gövdenin yatayda yaptığı yer değiştirme	-	-
y	Sabit eksen takımına göre gövdenin düşeyde yaptığı yer değiştirme	-	-
θ	Gövdenin y eksenine göre yaptığı açı	-	-
a	Arabanın kütle merkezi ile sabit eksen takımının y eksenine göre uzaklığı	-	-
F	Arabaya x doğrultusunda etkiyen harici kuvvet	-	-
M	Tekerlek kütlesi	3	kg
m	Gövde kütlesi	15	kg
g	Yer çekimi ivmesi	9.81	m/s ²
L	Gövde kütle merkezi ile çubuk bağlantı noktası arasındaki uzaklık	0.0125	m
I	Gövdenin atalet momenti	0.000078 5398	m ⁴
b	Tekerlek ile yer arasındaki sürtünme katsayısı	0.90	-

Bu varsayımlar ışığında robotun toplam kinetik enerji bağıntısı Denklem (2)'deki gibi elde edilmiştir.

$$T = \frac{1}{2} m_i v_i^2 + \frac{1}{2} I_i \omega_i^2 \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{2} M \dot{k}^2 + \frac{1}{2} m \left[\dot{k}^2 + 2\dot{k}\dot{\theta} \cos \theta + L^2 \dot{\theta}^2 \right] + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \quad (2)$$

Lagrange yönteminde bulunan kinetik-potansiyel (L) yazılabilmesi için robotun toplam potansiyel enerjisinin de belirlenmesi gerekir. Denklem (3)'de en genel haliyle toplam potansiyel enerji ifadesi verilmiştir. Buna göre tekerleğin ve gövdenin potansiyel enerjileri ayrı ayrı belirlenmiştir. Tekerleğin düşey eksen hareketi bulunmadığı varsayıldığından potansiyel enerjisi sıfırdır. Toplam potansiyel enerji gövdenin ve tekerleğin potansiyel enerjilerinin toplamıdır. Buna göre, tekerleğin potansiyel enerjisi sıfır olduğu için iki tekerlekli denge robotunun toplam potansiyel enerjisi gövdenin potansiyel enerjisine eşittir. Gövdenin potansiyel enerjisi, denge konumunun potansiyel enerjisinin sıfır olması varsayımı ile yazılır. Denklem (4), iki tekerlekli denge robotunun en genel potansiyel enerji bağıntısıdır.

$$V = m_i g_i h_i \quad (3)$$

$$V = m g (1 - \cos \theta) \quad (4)$$

Lagrange yöntemindeki kinetik-potansiyel (L) ifadesi, robotun kinetik ve potansiyel enerjilerinin farkıyla elde edilir. Denklem (5)'de kinetik-potansiyel bağıntısı verilmiştir.

Gerekli düzenlemeler yapıldığında iki tekerlekli denge robotunun kinetik potansiyel ifadesi olan **Denklem (6)** elde edilir.

$$L = T - V \quad (5)$$

$$L = \ll \left[\frac{1}{2} M \dot{k}^2 \right] + \frac{1}{2} m [\dot{k}^2 + 2\dot{k}\dot{\theta} \cos \theta + I \dot{\theta}^2] + \left[\frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \right] \gg -[mg_1(1 - \cos \theta)] \quad (6)$$

Lagrange denkleminin en genel hali **Denklem (7)**'de verilmiştir. İki tekerlekli denge robotu iki serbestlik derecesine sahiptir. Bu nedenle, iki ayrı genelleştirilmiş koordinat takımına (k ve θ) göre çözümlenerek iki ayrı hareket denklemi elde edilir. Gerekli ara işlemler yapıldıktan sonra elde edilen hareket denklemlerinin en genel hali **Denklem (8)** ve **Denklem (9)**'da verilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\delta L}{\delta q_i} \right) = Q_i \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{k}} \right) = (M + m)\ddot{k} + m_1 \cos \theta \ddot{\theta} - m_1 \sin \theta \dot{\theta}^2 \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}} \right) = (m_1^2 + I)\ddot{\theta} + m\dot{k} \cos \theta - m\dot{k}\dot{\theta} \sin \theta \quad (9)$$

2.2 Dinamik model

Denklem (8) k genelleştirmesine göre düzenlenirse, **Denklem (10)** elde edilir. Bu denklem içerisindeki "u" ifadesi, korunumlu olmayan dış kuvvetleri temsil etmektedir. Gerekli düzenlemeler yapıldığında iki tekerlekli denge robotunun 1. hareket denklemini olan **Denklem (11)** elde edilir. **Denklem (8)** θ genelleştirmesine göre düzenlenirse, **Denklem (12)** elde edilir. Gövdeye dışarıdan bir kuvvet etki etmediği için bu denklem sifıra eşittir. Aynı şekilde gerekli düzenlemeler yapıldığında iki tekerlekli denge robotunun 2. hareket denklemini olan **Denklem (13)** elde edilir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{k}} \right) - \left(\frac{\delta L}{\delta k} \right) = u \quad (10)$$

$$\ddot{k} = \frac{F - b\dot{k} - m_1 \cos \theta \ddot{\theta} + m_1 \sin \theta \dot{\theta}^2}{(M + m)} \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}} \right) - \left(\frac{\delta L}{\delta \theta} \right) = 0 \quad (12)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{mg_1 \sin \theta + 2m\dot{k}\dot{\theta} \sin \theta - m\dot{k} \cos \theta}{(m_1^2 + I)} \quad (13)$$

2.3 Kontrol

İki tekerlekli denge robotu için iki farklı kontrol sistemi tasarlanmıştır. Bu yüzden iki ayrı blok diyagramı oluşturulmuştur. Birinci blok diyagramında; dinamik denklemler kullanılarak, Matlab/Simulink programında açı geri beslemesine sahip bir PID kontrolcü tasarlanmıştır. İkinci blok diyagramında ise; yine Matlab/Simulink programında dinamik denklemler kullanılarak, açı ve hız geri beslemesine sahip iki ayrı PID kontrolcü tasarlanmış ve tek bir blok diyagramına entegre edilmiştir. Elde edilen dinamik denklemler doğrusal olmayan (nonlinear) denklemlerdir. Bu dinamik denklemler literatürdeki çalışmaların genelinden farklı olarak doğrusallaştırılmadan kullanılmıştır. Matlab/Simulink programı doğrusal olmayan denklemleri çözümlenebildiği için; elde edilen denklemler, doğrusallaştırma (lineerleştirme) uygulanmadan kullanılmıştır. İki tekerlekli denge robotu modelinde; bir açıölçer sensör, tekerleklere tahrik veren motorlar ile kontrolcü sensör, robot gövdesinin düşey eksen ile yaptığı açı bilgisini sürekli olarak kontrolcüye bildirir. Kontrolcü ise sensörden gelen açı bilgilerini işleyerek tahrik motorlarına, mevcut konuma göre dengenin sağlanabilmesi ve robotun istenilen referanslara yönelebilmesi için gereken motor torku değeri ile motor dönüş yön bilgisini sürekli olarak bildirir. Bu sayede robot, istenilen referansa dengeli bir şekilde ilerler.

2.3.1 PID kontrol

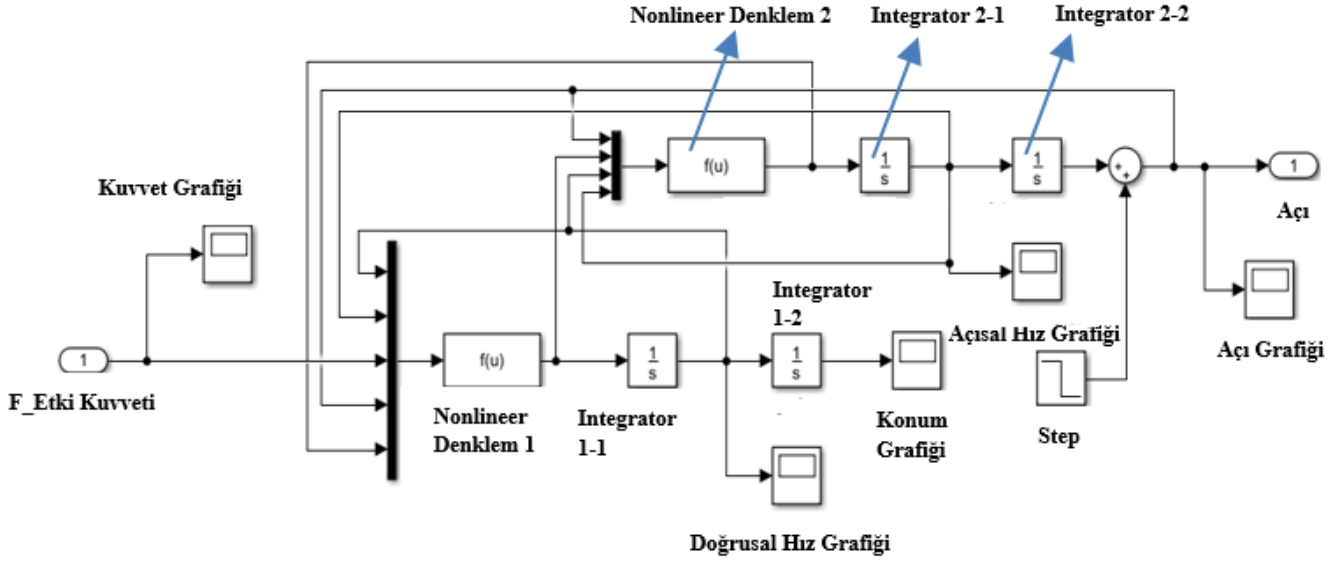
PID, oransal-integral-türevsel kontrol döngüsü yöntemidir ve yaygın olarak kullanılan bir geri besleme denetleyicisidir. PID denetleyici sürekli olarak, referans değer ile mevcut değer arasındaki farkı temsil eden hata değerini hesaplar. Bunun sonucunda denetleyici kontrol girdisini ayarlayarak hatayı ortadan kaldırmaya çalışır. **Denklem (14)** ve **Denklem (15)**'de sırasıyla PID kontrolörün genel denklemini ve e(t) hata fonksiyonu verilmiştir. Burada; k_p oransal kazanç katsayısı, k_i integral kazanç katsayısı, k_d türevsel kazanç katsayısı ve e(t) hata fonksiyonudur. Kazanç katsayıları, deneme yanılma yoluyla veya çeşitli programlar kullanılarak en uygun değerlerde belirlenir.

$$PID(s) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (14)$$

$$(t) = \text{referans değer} - \text{gerçekleşen değer} \quad (15)$$

2.3.2 Açı geri beslemeli kontrol

Bu kontrol sisteminde, iki tekerlekli denge robotunun yalnızca gövde açısı kontrol edilmiştir. İki tekerlekli denge robotu, iki serbestlik derecesine sahip olduğundan hareketinin matematiksel olarak çözümlenebilmesi için iki ayrı hareket denklemine ihtiyaç duyulur. Bu nedenle, **Denklem (11)**'i ve **Denklem (13)**'ü temsil eden, nonlinear **Denklem 1 ve 2**, **Şekil 2**'de görülen blok diyagramı içine gömülmüştür. Burada, etki kuvveti (F) girdisi ve bir açı çıktısı bulunur. PID kontrolör, referans açı ile mevcut açı arasındaki farkı kullanarak, Matlab/Simulink içerisinde bulunan PID Tuning aracı ile en uygun kazanç katsayılarını üretir



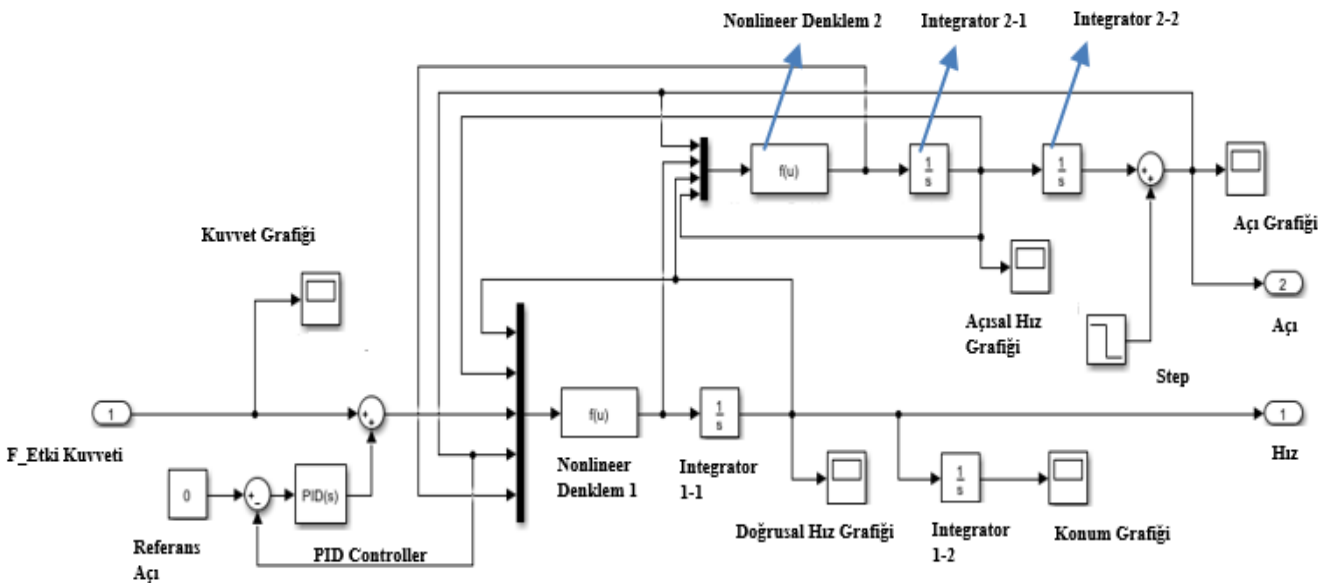
Şekil 2. Açılı geri beslemeli blok diyagramı

Benzetim modeli çalıştırıldığında iki tekerlekli denge robotunun açısal dengesini koruyabildiği görülmüştür.

2.3.3 Açılı ve hız geri beslemeli kontrol

Bu kontrol sisteminde, iki tekerlekli denge robotunun gövde açısı ve hızı kontrol edilmiştir ve yalnızca açı geri beslemesine sahip kontrol sistemi modeline benzerdir. Açılı ve hız geri beslemesine sahip kontrol sisteminde, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, PID kontrolörler 2 katmanda seri olarak blok diyagramı içerisine yerleştirilmiştir. İç katmanda bulunan PID kontrolör açı sapmasını kontrol etmektedir. Dış katmanda bulunan PID kontrolör ise gövdenin yön ve hız sapmasını kontrol etmektedir. Burada amaç, hem açı dengesinin sağlanması hem de yön ve hız kontrolünün yapılmasıdır. Şekil 3'de bu

kontrol sisteminde ait blok diyagramı verilmiştir. İki tekerlekli denge robotu, iki serbestlik derecesine sahip olduğundan hareketinin matematiksel olarak çözümlenebilmesi için iki ayrı hareket denklemine ihtiyaç duyulur. Bu nedenle, Denklem (11)'i ve Denklem (13)'ü temsil eden, nonlinear Denklem 1 ve 2, Şekil 3'de görülen blok diyagramı içine yine gömülmüştür. Burada, etki kuvveti (F) girdisi, bir açı çıktısı ve bir hız çıktısı bulunur. PID kontrolör, hem referans açı ile mevcut açı arasındaki farkı kullanarak, hem de referans hız ile mevcut hız arasındaki farkı kullanarak Matlab/Simulink içerisinde bulunan PID Tuning aracı ile en uygun kazanç katsayılarını üretir. Benzetim modeli çalıştırıldığında iki tekerlekli denge robotunun açısal dengesini koruyabildiği, referans hızda ve referans yönde ilerleyebildiği görülmüştür.



Şekil 3. Açılı ve hız geri beslemeli blok diyagramı

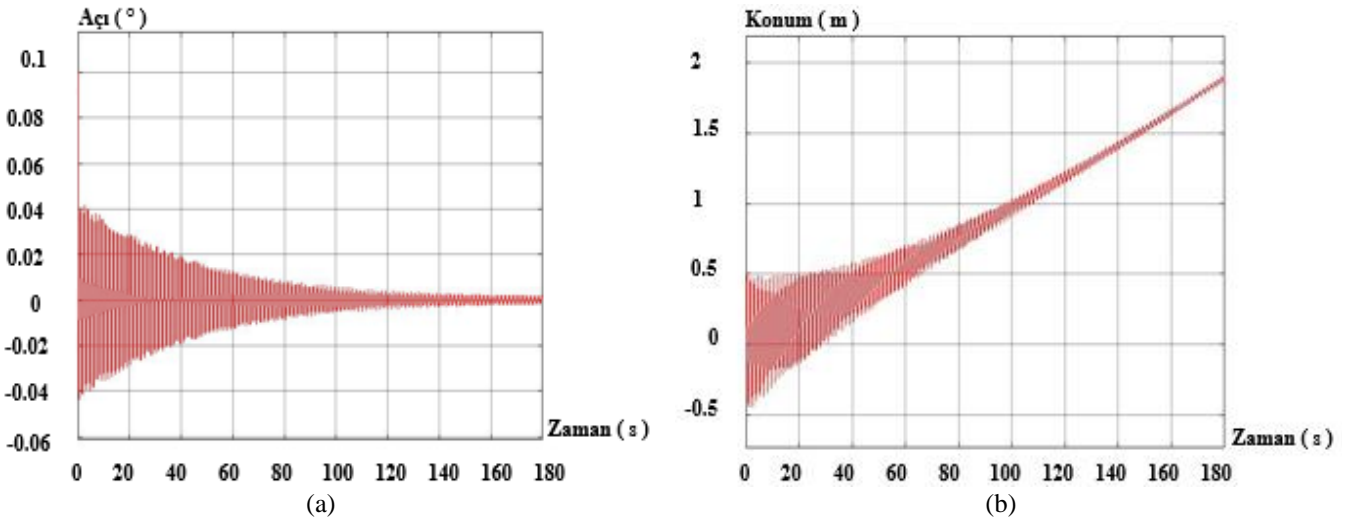
3 Bulgular

3.1 Açık geri beslemeli kontrol benzetim modeli

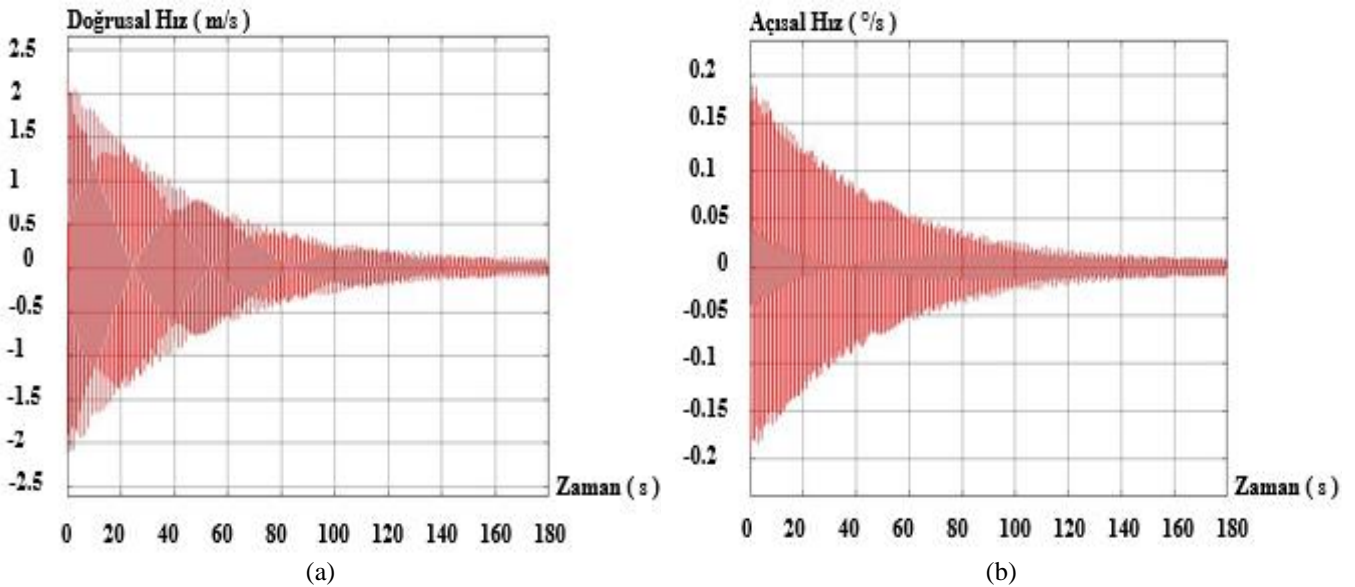
Benzetim modeli çalıştırıldığında, iki tekerlekli denge robotunun dengesini sağlayabildiği görülmüştür. Şekil 4(a)'da benzetim modeli sırasındaki açısal değişimi gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde; hareket başladıktan 120 s sonra 0.01° 'den daha az salınımlarla dengenin sağlanabildiği ve maksimum sapmanın $0,1^\circ$ olduğu görülür. Şekil 4(b)'de gövdenin konum değişimini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde; hareket başladıktan sonraki ilk 20 s'de mevcut konumu koruma eğilimi olduğu görülür. Bu süre zarfında gövde, ileri geri 0.5 m mesafede salınım hareketi yapmıştır. 20. s'den sonra gövde, daha küçük mesafelerde salınım hareketi yapmasına karşın kontrolsüz olarak ileri yönde yol almıştır. Şekil 5(a)'da gövdenin doğrusal hız değişimini gösteren grafik verilmiştir.

Grafik incelendiğinde; meydana gelen salınım hareketinin, konum değişim grafiğindeki veriler ile uyduğu görülür. Hareket boyunca yapılan salınım hareketlerinin neden olduğu ileri geri yönelme durumu, bu grafikteki pozitif ve negatif ifadeler ile teyit edilmiştir. Gövde, 160. s'den sonra 0.01 m/s 'den daha az salınımlar yaparak yol almıştır. Şekil 5(b)'de gövdenin açısal hız değişimini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde; elde edilen verilerin diğer grafikler ile uyduğu görülür. İlk hareket başladığında maksimum $0.2^\circ/\text{s}$ limitinde olan açısal hız salınımlarının giderek azaldığı ve 140. s'den sonra $0.01^\circ/\text{s}$ limitine düştüğü görülür. Yani gövde dengesini sağlarken çok az titreşime maruz kalmıştır.

Bu kontrol sisteminde gövde dengesini sağlayabilmiştir, fakat; bir yön ve hız kontrolüne sahip olmadığından kontrolsüz bir şekilde yol almıştır.



Şekil 4. Açık geri beslemeli kontrol benzetim modeli grafikleri; (a) açı değişimi, (b) konum değişimi

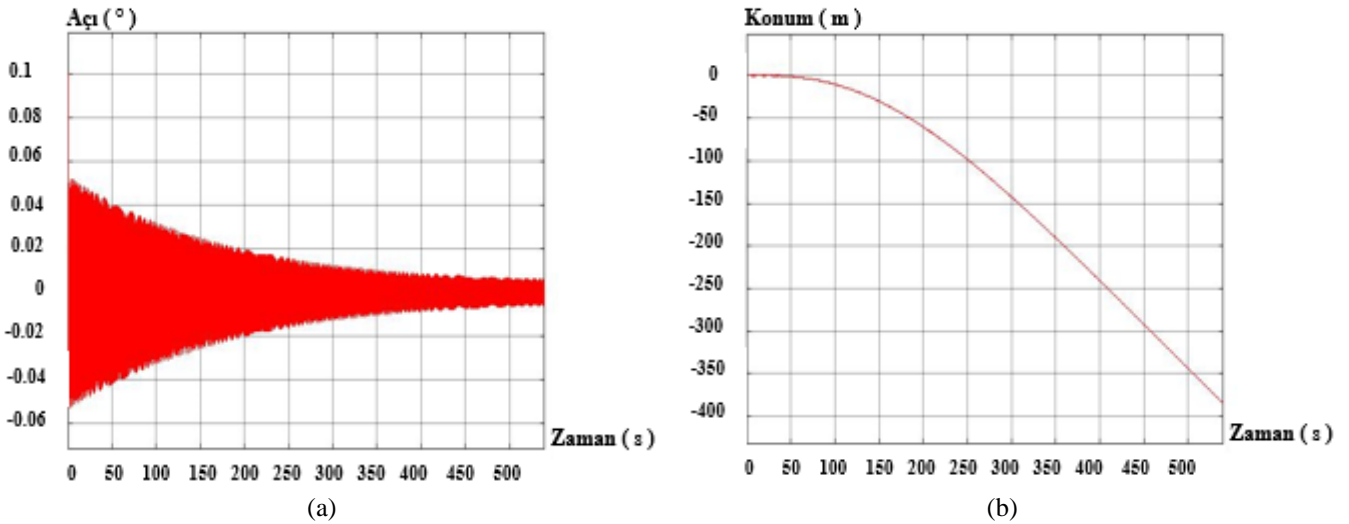


Şekil 5. Açık geri beslemeli kontrol benzetim modeli grafikleri; (a) doğrusal hız değişimi, (b) açısal hız değişimi

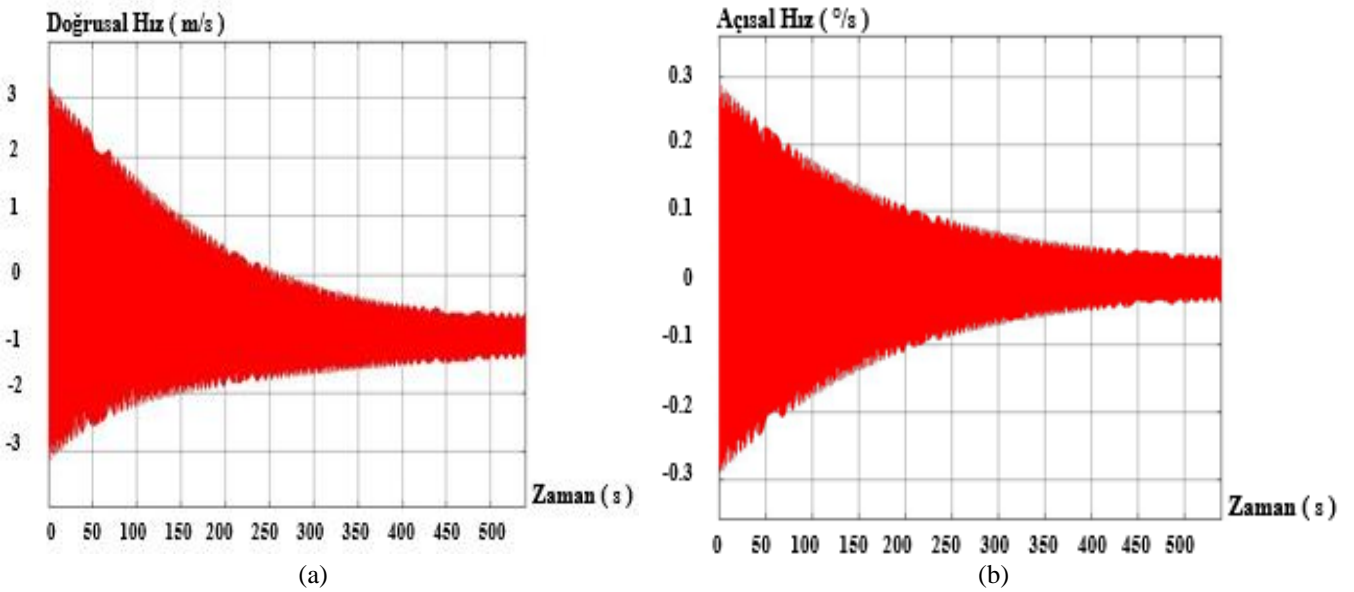
3.2 Açılı ve hız geri beslemeli kontrol benzetim modeli

Bu benzetim modelinde gövde için referans verilen hız negatif yönde 1 m/s'dir. Benzetim modeli çalıştırıldığında, iki tekerlekli denge robotunun hem dengesini sağlayabildiği hem de referans verilen yön ve hızda ilerleyebildiği görülmüştür. Şekil 6(a)'da benzetim modeli sırasındaki açısal değişimi gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde; hareket başladıktan 450 s sonra 0,01°'den daha az salınımlarla dengenin sağlanabildiği ve maksimum sapmanın 0.1° olduğu görülür. Şekil 6(b)'de gövdenin konum değişimini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde; hareketin başlangıcından itibaren gövdenin referansa uygun olarak negatif yönde yol aldığı görülür. Şekil 7(a)'da gövdenin doğrusal hız değişimini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde; meydana gelen salınımlar hareketinin, konum değişim grafiğindeki veriler ile

uyuştuğu görülür. Gövdenin harekete başladığı andan itibaren referans verilen negatif yönde, referans verilen 1 m/s hızına ulaşmak için salınımlar hareketi yaptığı görülür. En büyük sapma değeri hareketin ilk anlarında meydana gelmiştir ve 3 m/s limitindedir. Gövde hızı 500 s'den sonra referans verilen -1 m/s değerini yakalamıştır ve yaklaşık olarak 0.2 m/s 'lik salınımlar ile salınımlar hareketi yaparak hareketine devam etmiştir. Şekil 7(b)'de gövdenin açısal hız değişimini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde; elde edilen verilerin diğer grafikler ile uyuştuğu görülür. İlk hareket başladığında maksimum 0.3°/s limitinde olan açısal hız salınımlarının giderek azaldığı ve 500 s'den sonra 0.01°/s limitine düştüğü görülür. Yani gövde dengesini sağlarken çok az titreşime maruz kalmıştır. Bu kontrol sisteminde gövde dengesini sağlamış, referans verilen yön ve hızda kontrollü olarak yol almıştır.



Şekil 6. Açılı ve hız geri beslemeli kontrol benzetim modeli grafikleri; (a) açı değişimi, (b) konum değişimi

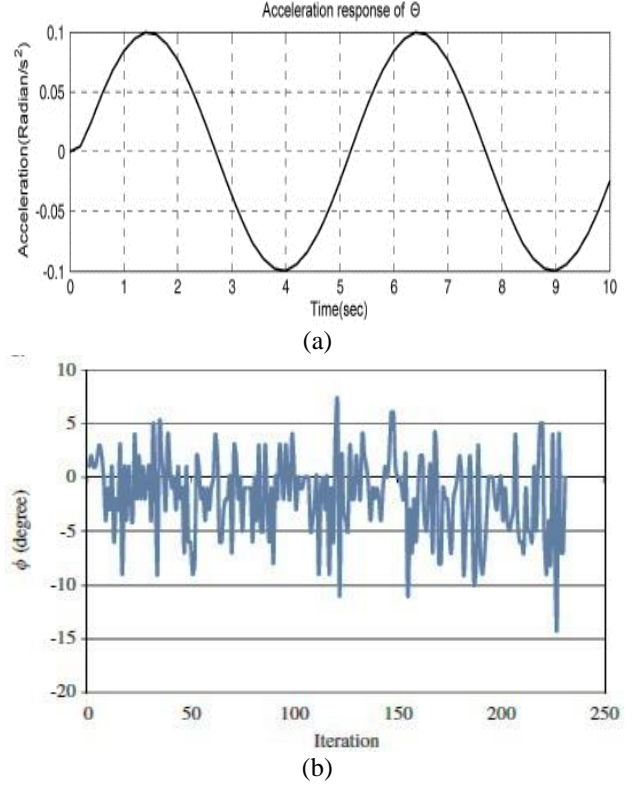


Şekil 7. Açılı ve Hız geri beslemeli kontrol benzetim modeli grafikleri; (a) doğrusal hız değişimi, (b) açısal hız değişimi

4 Sonuçlar ve tartışma

Literatür incelendiğinde, farklı dinamik yaklaşımlar ile beraber sunulan çalışmaya benzer yaklaşımlar da görülür. Dinamik denklemlerin elde edilmesinde Lagrange metodunun seçilmesinin nedeni en genel ve en sık kullanılan metod olmasıdır. İki tekerlekli denge robotu için ters sarkaç problemi temel alınmıştır. Yeni yaklaşımlar ile denge problemine yeni çözümler getirmek yerine, literatürde kullanılan yaklaşımlar kullanılmıştır. Çalışmada, İki tekerlekli denge robotu modeli ters sarkaç problemi temelinde çözümlenmiştir. Lagrange yöntemi kullanılarak hareket denklemleri elde edilmiştir. İki tekerlekli denge robotu 2 serbestlik derecesine sahip olduğu için 2 ayrı hareket denklemi elde edilmiştir. Hareket denklemleri kullanılarak Matlab/Simulink programında; açı geri beslemeli ve açı/hız geri beslemeli 2 ayrı kontrol sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan kontrol sistemlerinin benzetim modelleri çalıştırılmış ve elde edilen grafikler birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Buna göre; açı geri beslemesine sahip kontrol sisteminde, gövdenin dengesi sağlanmıştır. İkinci adımda aynı hareket denklemleri kullanılarak daha karmaşık yapıdaki açı/hız geri beslemesine sahip kontrol sistemi benzetim modeli çalıştırılmıştır. İkinci adımda iki farklı hedef vardır. Bunlar, dengenin sağlanması ve bu esnada iki tekerlekli denge robotunun referans verilen hızda referans verilen yönde kararlı bir şekilde ilerleyebilmesidir. İkinci adımda da kontrol sağlanmıştır. Açı geri beslemesine sahip kontrol sisteminde denge 330 s daha kısa sürede gerçekleşmiştir. Bu durumun, blok diyagramının daha sade yapıda olmasından dolayı etki tepki sürelerinin daha kısa sürede gerçekleşmesi nedeniyle meydana geldiği öngörülmüştür. Açı/hız geri beslemeli kontrol sistemi daha geç denge sağlanmasına karşın referans verilen yön ve hızda hareketini gerçekleştirmiştir. Dolayısıyla, sistemin uygulamada çalışabileceğini göstermiştir. Kontrol sistemleri içerisindeki blok diyagramlarında gömülü bulunan PID kontrolörlerin, kazanç katsayılarının tüm parametreleri doğrudan etkilediği görülmüştür. Çalışmada bu kazanç katsayıları Matlab/Simulink içerisinde bulunan PID Tuning aracı ile elde edilmiştir. Bu program aracı optimum kazanç katsayılarını en uygun değerlerde üretir. Aynı hareket denklemleri ve aynı kontrol diyagramı kullanılsa bile farklı bir programda yazılarak elde edilecek olan kazanç kat sayıları farklı olacağından, elde edilen veriler de farklı olacaktır. Şekil 8(a)'da Tsai ve Hu'nun tasarladıkları sisteme ait açısal ivme bilgisini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde, açısal ivme salınımindan ara hesaplamalar yapılarak açısal değişim salınımları elde edilir. Buna göre, bu sistemin 6.5° 'nin üzerinde bir açısal salınım hareketi yaptığı görülmüştür. Sunulan çalışmada, yapılan benzetim modeli grafikleri incelendiğinde açı salınımlarının 0.1° 'yi aşmadığı görülür. Şekil 8(b)'de Su vd. yaptıkları çalışmalarında geleneksel PD kontrolöre sahip benzetim modelinin açı değişim bilgisini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde, sistemin 5° 'nin üzerinde bir açısal salınım hareketi yaptığı görülür. Sunulan çalışmada, yapılan

benzetim modeli grafikleri incelendiğinde açı salınımlarının 0.1° 'yi aşmadığı görülür.

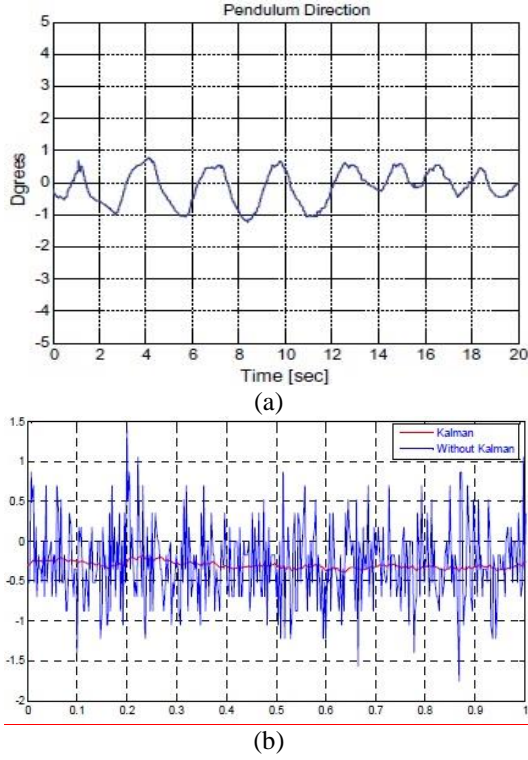


Şekil 8. (a) Tsai ve Hu çalışmalarında elde ettikleri açısal ivme grafiği, (b) Su vd. çalışmalarında PD kontrolörden elde ettikleri açı değişim grafiği

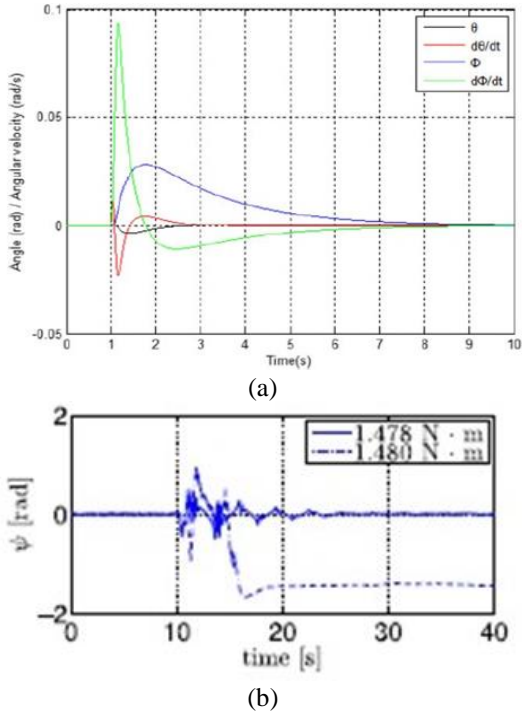
Şekil 9(a)'da Jung ve Lee'nin yaptıkları çalışmalarında sistemin açı değişim bilgisini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde, sistemin maksimum açısal sapmasının 0.5° olduğu ve 18. saniyeden sonra 0.2° limitinde bir açısal salınım hareketi yaptığı görülmüştür. Sunulan çalışmada, yapılan benzetim modeli grafikleri incelendiğinde açı salınımlarının 0.1° 'yi aşmadığı görülür. Şekil 9(b)'de Son ve Anh'nın yaptıkları çalışmalarında sistemin açı değişim bilgisini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde, sistemin ortalama 0.9° açısal salınım hareketi yaptığı görülür. Sunulan çalışmada, yapılan benzetim modeli grafikleri incelendiğinde açı salınımlarının 0.1° 'yi aşmadığı görülür.

Şekil 10(a)'da Park ve Cho'nun yaptıkları çalışmalarında sistemin açı değişim ve diğer parametrelerinin bilgisini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde, sistemin denge salınımlarına ulaştıktan sonra ortalama 0.01° 'de daha az açısal salınım hareketi yaptığı görülür. Sunulan çalışmada, yapılan benzetim modeli grafikleri incelendiğinde açı salınımlarının daha fazla olduğu görülür. Şekil 10(b)'de Gandarilla vd. yaptıkları çalışmalarında sistemin açı değişim bilgisini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde, sistemin çok düşük limitlerde salınım yaptığı ve rahatsız edici bir etki olmasına rağmen denge salınımları ortalama 10 s'de ulaştığı görülür. Sunulan çalışmada, yapılan benzetim

modeli grafikleri incelendiğinde açı salınımının daha fazla olduğu ve daha uzun sürede denge salınımına ulaştığı görülür.



Şekil 9. (a) Jung ve Lee çalışmalarında elde ettikleri açı değişim grafiği, (b) Son ve Anh çalışmalarında elde ettikleri açı değişim grafiği



Şekil 10. (a) Tsai ve Hu çalışmalarında elde ettikleri açısal ivme grafiği, (b) Su vd. çalışmalarında PD kontrolörden elde ettikleri açı değişim grafiği

Çalışmada, literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak üzerinde hassasiyet ile durulması gereken en önemli hususlardan birisinin PID kontrolör olduğu tespit edilmiştir. Çünkü PID kontrolör, yapısındaki kazanç katsayıları sayesinde hataları telafi edebilir. Bu sayede, gövde dengesini sağlamada hiçbir hareket denklemi olmaksızın tasarlanan kontrol sistemleri dahi yalnızca PID kontrolör ile belirli toleranslarda çalışabilir. Yapılan bazı yayınlar da bunun örnekleri vardır. Bu durum, araştırmacının kinematik ve dinamik analizlerde daha dikkatli olmasının önemini vurgular. Çünkü araştırmacının elde ettiği dinamik denklemler hatalı olsa dahi PID kontrolör sayesinde kontrol sistemi belirli toleranslarda çalışacaktır. İki tekerlekli denge robotu ve daha yalın sistemlerde bu hata tolerans sınırları içerisinde kalabilir; fakat bu alt yapı ile oluşturulan daha karmaşık sistemlerde tolerans sınırlarını aşarak sistemin kontrolsüz olmasına neden olabilir. Bu nedenle hareket denklemleri her aşamada kontrol edilmeli ve doğruluğundan emin olunmalıdır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 15

Kaynaklar

- [1] M. C. Tsai and J. S. Hu, Pilot control of an auto-balancing two wheeled cart. *Advanced Robotics*, 21 (7), 817-827, 2007. <https://doi.org/10.1163/156855307780429785>.
- [2] K. H. Su, Chen, Y. Y. Chen and S. F. Su, Design of neural-fuzzy-based controller for two autonomously driven wheeled robot. *Neurocomputing*, 73, 2478-2488, 2010. <https://doi:10.1016/j.neucom.2010.05.005>.
- [3] L. Vermeiren, A. Dequidt, T. M. Guerra, H. R. Tirmant and M. Parent, Modelling control and experimental verification on a two-wheeled vehicle with free inclination: an urban transportation system. *Control Engineering Practice*, 19, 744-756, 2011. <https://doi:10.1016/j.conengprac.2011.04.002>.
- [4] N. M. A. Ghani, F. Naim and T. P. Yon, Two wheels balancing robot with line following capability. *Engineering and Technology International Journal of Mechatronics Engineering*, 5 (7), 1401-1405, 2011. <https://waset.org/Publication/6566>.
- [5] S. Jung and H. Lee, Balancing and navigation control of a mobile inverted pendulum robot using sensor fusion of low cost sensors. *Mechatronics*, 22, 95-105, 2012. <https://doi:10.1016/j.mechatronics.2011.11.011>.
- [6] A. M. Almeshal, K. M. Goher and M. O. Tokhi, Dynamic modelling and stabilization of a new configuration of two-wheeled machines. *Robotics and Autonomous Systems*, 61, 443-472, 2013. <https://doi:10.1016/j.robot.2013.01.006>.
- [7] U. Adeel, K. S. Alimgeer, O. Inam, A. Hameed, M. Qureshi and M. Ashraf, Autonomous dual wheel self balancing robot based on microcontroller. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 3 (1), 843-848, 2013. <https://www.textroad.com>.

- [8] N. N. Son and H. P. H. Anh, Adaptive backstepping self-balancing control of a two-wheel electric scooter. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 11 (10), 165-176, 2014. [https:// doi:10.5772/59100](https://doi.org/10.5772/59100).
- [9] K. Hirata and T. Murakami, Stability of disturbance observer based controllers for two-wheel wheelchair systems. *Advanced Robotics*, 28 (7), 467-477, 2014. [https:// doi: 10.1080/01691864.2014.888372](https://doi.org/10.1080/01691864.2014.888372).
- [10] U. Çelik, Kendini dengeleyebilen iki tekerlekli aracın tasarımı ve kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2014.
- [11] S. E. Kara, Control of two wheel self stabilizing mobile robot with a simple arm. A Master's Thesis, Mechatronic Engineering Atılım University, Ankara, Türkiye, 2014.
- [12] F. Dai, X. Gao, S. Jiang, W. Guo and Y. Liu, A two-wheeled inverted pendulum robot with friction compensation. *Mechatronics*, 30, 116-125, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.06.011>.
- [13] M. Velazquez, D. Cruz, S. Garcia and M. Bandala, Velocity and motion control of a self-balancing vehicle based on a cascade control strategy. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 13 (3), 106-117, 2016. [https:// doi: 10.5772/63933](https://doi.org/10.5772/63933).
- [14] S. A. B. Junoh, Two-wheeled balancing robot controller designed using PID. Bachelor Thesis, Faculty of Electrical and Elektronik Engineering University Tun Hussein Onn Malaysia, Johor, Malaysia, 2015.
- [15] S. İlgen, E. Oflaz, E. Gülbahçe and A. Çakan, Modelling and control of a single-wheel inverted pendulum by using adams and matlab. *International Journal of Applied Mathematics*, 4, 326-328, 2016. <http://ijamec.atsscience.org>.
- [16] N. Hirose, R. Tajima, N. Koyama, K. Sukigara and M. Tanaka, Following control approach based on model predictive control for wheeled inverted pendulum robot. *Advanced Robotics*, 30 (6), 374-385, 2016. <https://www.tandfonline.com/loi/tadr20>.
- [17] S. Jeong, K. Kouzai and S. Noguchi, Influence of a rider's rapid weight-shifting motion on the braking of a self-balancing personal mobility vehicle. *Advanced Robotics*, 30 (7), 449-458, 2016. <https://www.tandfonline.com/loi/tadr20>.
- [18] O. İ. Yavuz, A. Çetin ve Ö. Eyecioğlu, İki tekerlekli kendini dengeleyen robot. EEB 2016 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, sayfa 264-269, Tokat, Türkiye, 11-13 Mayıs 2016.
- [19] J. H. Park and B. K. Cho, Development of a self-balancing robot with a control moment gyroscope. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 15 (2), 1-11, 2018. [https:// doi:10.1177/1729881418770865](https://doi.org/10.1177/1729881418770865).
- [20] S. Jeong and T. Hayashi, Development of a wheeled inverted pendulum mobile platform with a four-bar parallel mechanism. *Advanced Robotics*, 32 (4), 191-201, 2018. <https://www.tandfonline.com/loi/tadr20>.
- [21] I. Gandarilla, V. Santibanez and J. Sandoval, Control of a self-balancing robot with two degrees of freedom via IDA-PBC. *ISA Transactions*, 88, 102-112, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.12.014>.
- [22] G. Taşhıalan and O. E. Akay, Controlling a two-wheeled balance robot with PD. ISADET2019 International Symposium On Advanced Engineering Technologies, pp. 678, Kahramanmaraş, Türkiye, 02-04 Mayıs 2019.
- [23] İ. Kacar, M. A. Eroğlu and M. K. Yalçın, Design and development of an autonomous bicycle. *Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 10 (1), 364-372, 2021. <https://doi.org/10.28948/n.gumuh.628580>.

