

Mekanum Platform için Motor Kalibrasyonu

Calibration of Motors for a Mecanum Platform

Buğra B. SARIOĞLU ve Tolga ÖZASLAN

Makina Mühendisliği Bölümü

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Ankara, Türkiye

bubesarioglu@gmail.com, tozaslan@aybu.edu.tr

Özetçe —Mekanum tekerlekli mobil platformlar, dar alanlarda yüksek manevra kabiliyeti sunarak endüstriyel otomasyonun yanı sıra robotik eğitim ve araştırma amaçları için de yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, fazla tahrikli (over-actuated) yapıları nedeniyle motor senkronizasyonu kritik bir gereksinimdir. Bu çalışmada, kendi tasarım ve üretimimiz olan dört tekerlekli bir mekanum platformunun geliştirilmesi sürecinde önemli bir adım olarak, platformda kullanılan fırçalı DC motorların etkin çalışmasını sağlayan bir kontrol yöntemi sunulmaktadır. Bu platformda her biri kolay temin edilebilen fırçalı DC motorlardan seçilmiş dört motor bulunmaktadır ve bu motorların bireysel karakteristikleri farklılık gösterebilmektedir. Çalışmada her motorun bireysel kalibrasyonu yapılarak ölü bölgeleri (dead region) belirlenmiş ve PWM-RPM eşlemesi oluşturulmuştur. Encoder verileri ile hız kestirimi yapılmış ve iç içe geçmiş (cascaded) bir kontrol yapısı uygulanmıştır. Ayrıca, önerilen yöntem, pil gerilimi azaldıkça kontrolcü kazançlarını otomatik ölçekleyerek gürbüz bir performans sergilemektedir. Geliştirilen kontrolcüler, gerçek sistem üzerinde yapılan deneylerle doğrulanmıştır.

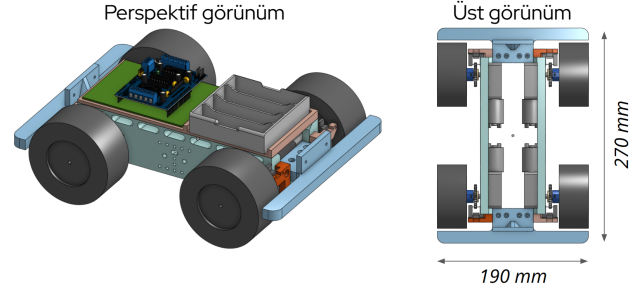
Anahtar Kelimeler—Mekanum tekerlek, PID kontrol, DC motor kalibrasyonu, iç içe geçmiş kontrol, ölü bölge telafisi.

Abstract—Mecanum mobile platforms offer high maneuverability in confined spaces, making them widely used in industrial automation as well as educational and research applications. However, their over-actuated nature necessitates precise motor synchronization to prevent slippage and ensure accurate motion execution. In this study, as a significant step in the development of our custom-designed and manufactured four-wheeled mecanum platform, we present a control method to effectively control the brushed DC motors used in the system. The platform incorporates four easily accessible brushed DC motors, each exhibiting unique characteristics (heterogeneous motor structure). Each motor undergoes individual calibration to determine its dead regions, and a PWM-RPM mapping is established. Encoder data is processed to estimate wheel speed, and a cascaded control architecture is implemented. Additionally, the proposed approach ensures robust performance by dynamically adjusting control gains as battery voltage decreases. The developed controllers have been validated through experiments on the real system.

Keywords—Mecanum wheel, PID control, DC motor calibration, cascaded control, dead zone compensation.

I. GİRİŞ

Mobil robotlar, endüstriyel otomasyon, lojistik ve araştırma gibi birçok alanda kullanılmaktadır [1], [2]. Bu alandaki en yüksek hareket kabiliyetine sahip sistemlerden biri me-

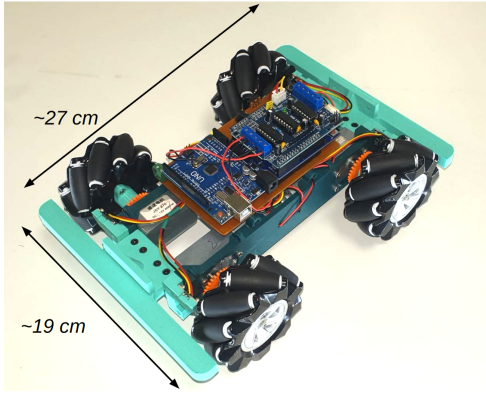


Şekil 1: Edinmesi kolay bileşenlerle uyumlu olacak şekilde tasarlanmış özgün mekanum tekerlekli platform CAD modeli. Model 3B FDM yazıcılarda üretilmek üzere optimize edilmiştir.

kanum tekerlekli mobil platformlardır. Mekanum tekerlekler, üzerlerinde belirli bir açıyla konumlandırılmış pasif silindirik rulolardan oluşan özel tekerleklerdir. Bu tekerler sayesinde platform yönelim değiştirmesine gerek olmadan her yöne hareket edebilmektedir. Bu özelliği sayesinde, dar alanlarda yüksek manevra kabiliyeti gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedirler.

Mekanum tekerlekli sistemler özellikle lojistik, depolama sistemleri ve otonom forklift uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [3]. Ayrıca, robotik araştırma ve eğitim platformları olarak da sıklıkla tercih edilmektedir [4]. Ancak, dört tekerlekli mekanum platformlar over-actuated (aşırı eyleyiciye sahip) sistemlerdir; yani üç serbestlik derecesine sahip olmalarına rağmen dört bağımsız motor ile sürülmeleri gerekmektedir. Bu durum, motorların birbirleriyle tam senkronize çalışmasını zorunlu kılar; aksi takdirde, tekerlerde istenmeyen kaymalar ve yönelimde sapmalar meydana gelebilir [5]. Bu da otonom bir mekanum platformun istenen yörüngede seyrüseferine engel olur. Her ne kadar böyle bir hata üst seviye kontrolcüler ve rota belirleme algoritmaları ile tolere edilebilse de, motorların hedeflenen komutları zaman hassasiyeti ile gerçekleştirmesi toplam performansı iyi yönde etkileyecektir.

Bu çalışmada, kolay temin edilebilen nispeten düşük fiyatlı fırçalı DC motorlar kullanılan dört tekerlekli bir mekanum platform geliştirilmiş ve bu sistemin motor kalibrasyonu ve kontrolü ele alınmıştır (Şekil 1-2). Her motora bir enkoder disk monte edilmiş ve tek optik sensör ile shaft hızı kestirilebilmektedir. Bu tarz sistemlerde genellikle faz kaymalı artımlı enkoder (quadrature encoder) kullanılsa da, laboratuvar ortamında ucuz ekipman ile 3 boyutlu yazıcıdan kolaylıkla üretilen bir platform hedeflediğimiz için tek fazlı bir enkoder kullanılmıştır.



Şekil 2: Kolay temin edilebilen bileşenlerle ve FDM tipi üç boyutlu yazıcıda üretilmiş mekanum tekerlekli mobil platform.

Ayrıca motorların mutlak anlamda aynı olmaması aynı girişi gerilimi her motorda farklı RPM değerleri üretebilmektedir. Ayrıca motor durağan halden hareketli hale geçerken motor rulmanları, dişli kutusu gibi sürtünme kaynakları dolayısıyla doğrusal olmayan bir karakteristik göstermektedir. Bu çalışmada, bu farklılıkların tesirini her bir motor için bireysel bir kalibrasyon ve modelleme süreci gerçekleştirilmiş ve motor karakteristiklerini nötrleyen bir karakterizasyon yöntemi uygulanmıştır.

Önerilen kontrol stratejisi iki temel bileşenden oluşmaktadır: (1) İç döngü (inner loop): Her motorun hız kontrolünü sağlamak amacıyla oransal-integral (PI) kontrolcü kullanılmıştır. (2) Dış döngü (outer loop): Pozisyon takibi gerçekleştiren bir kontrol algoritması geliştirilmiştir. Böylece, gelecekteki otonom navigasyon ve engel sakınma algoritmalarına entegre edilebilir bir yapı oluşturulmuştur. Bu çalışmada üç katkı sunulmaktadır: (1) Motorların doğrusal olmayan davranışlarını hesaba katabilmek için, dead-zone (ölü bölge) belirleme ve PWM-RPM eşleme yöntemleri kullanılmıştır. (2) Ayrıca, batarya gerilimi değişimlerine karşı dayanıklı bir kontrolcü geliştirilerek sistemin uzun süreli çalışmalarda stabilitesinin korunması sağlanmıştır. (3) Geliştirilen kontrolcüler, gerçek sistem üzerinde yapılan deneylerle doğrulanmıştır. Motor karakteristikleri belirtilen kontrolcü yapısına entegre edilmiş ve farklı motorların özdeş davranışlar göstermesi mümkün kılınmıştır.

II. LİTERATÜR ÖZETİ

Mekanum tekerlekli platformlar, ilk defa 1970’lerde Bengt Ilon tarafından geliştirilmiş olup, o tarihten itibaren rağbet edilen bir araştırma alanı haline gelmiştir [5]. Mekanum tekerleklerin geometrik yapısına ilişkin detaylı analizlerde farklı rulo açıları ile alternatif tasarımların geliştirilmiştir [6].

Literatürde mekanum tekerlekli robotlar için en yaygın kullanılan kontrol yöntemlerinden biri PID kontrolüdür [2], [7], [8]. Ancak, mekanum platformların fazla tahrikli (over-actuated) yapısı ve kayma (slippage) gibi durumlar nedeniyle klasik PID kontrolü tek başına yeterli olamayabilmektedir. Bu nedenle, bulanık mantık tabanlı ve adaptif PID gibi kontrol yöntemleri önerilmiştir. Nguyen ve arkadaşları, zamanla değişen PID katsayıları kullanarak dört mekanum tekerlekli robotun karmaşık yörünge takibi problemini ele almış ve bu yaklaşımın doğruluğunu göstermiştir [8]. Ancak, bu çalışma-

larda motor karakteristikleri arasındaki farklılıkları modellerine katmamış ve tüm motorların aynı tepkiyi vereceği varsayılmıştır.

Kontrol parametrelerinin bir filtreleme problemi olarak ele alan Hernandez [9] çalışmada, genişletilmiş Kalman filtresi (EKF) kullanılarak bir PID kontrolcüsü ayarlanmış ve bu yöntemin sistemin daha hızlı yakınsamasını sağladığı gösterilmiştir. Çalışmada yüksek maliyetli ve hassas bir platform olan KUKA YouBot kullanılmıştır. Bu robotların senkronizasyon problemi yok denecek kadar azdır. Biz ise yaygın kullanımını artırmak amacıyla kolay erişilebilen bileşenlerle çalışmaktayız.

Dört tekerlekli mekanum robotun DC motor performansı farklı yük koşulları altında inceleyen [2] çalışmada yük değişimlerine uyum sağlayabilen bir PID kontrolcüsü kullanılmıştır. Benzer bir çalışmada olan [10], tekerlek kaymasını algılayabilen ve buna uyum sağlayan bir PID kontrolcüsü önermektedir. Çalışmamız da enkoder tabanlı geri besleme kontrolü içermekle birlikte, motor kalibrasyonu ve senkronizasyon üzerine daha fazla odaklanmaktadır. Ayrıca bizim çalışmamıza benzer olarak motor performans değişimlerine karşı adaptif birer yaklaşım sunmaktadır.

[11], dört tekerlekli mekanum tekerlekli bir robotun tasarımını gerçekleştirmiş ve simülasyonlarda titreşim analizleri yaparak şase malzemesi olarak PTFE kullanmayı tercih etmiştir. Ayrıca, tekerlekleri senkronize edebilen bir PID kontrolcüsü tasarlamışlardır. Çalışmamız, benzer bir yaklaşımı benimsemekle birlikte, motor senkronizasyonundaki doğrusal olmayan etkileri de ele alarak daha kapsamlı bir kontrol stratejisi sunmaktadır.

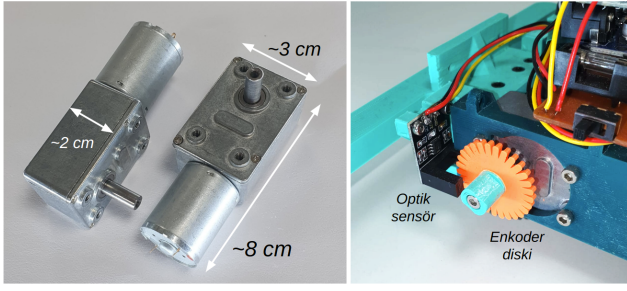
Başka bir PID tasarım çalışmasında [7], PID kontrolcü tasarlanmış ancak tüm doğrulama çalışmalarını yalnızca MATLAB Simulink ortamında gerçekleştirmiştir. Gerçek sistem üzerinde test yapılmamıştır. Çalışmamız ise fiziksel bir platformda deneylerle doğrulanmıştır.

III. YÖNTEM

Mekanum tekerlekli mobil platformlar, sahip oldukları dört bağımsız tekerlek sayesinde üç serbestlik derecesine (3-DoF) sahip olup, bu özellikleriyle *aşırı aktüatörlü* (over-actuated) sistemler kategorisine girmektedir. Bu tür sistemlerde, tekerleklerin senkronize çalışması büyük önem taşımaktadır; aksi halde, kayma (slippage) meydana gelerek istenilen hareket doğruluğu ve verimlilik kaybolabilir.

Bu çalışmada, bir mekanum tekerlekli mobil platformun motor kontrolüne odaklanılmaktadır. Kullanılan motorların giriş gerilimi 6 ila 12V arasında olup, çıkış devri 100 ile 250 RPM arasında değişen motorlar tercih edilmiştir. Aynı model motorlar kullanılsa dahi, üretim toleransları nedeniyle elektriksel ve mekanik parametrelerinde küçük farklılıklar gözlemlenebilmektedir. Bu nedenle, çalışmamızda heterojen motor yapılarını destekleyen bir kontrol yöntemi geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Platformda kullanılan lityum-iyon (Li-Ion) piller, sistemin 30 ila 60 dakika boyunca kesintisiz çalışmasını sağlayacak şekilde şekilmiştir. Ancak, uzun süreli çalışmalarda batarya gerilimi zamanla düşecek ve bu durum motor hızlarının da düşmesine yol açacaktır. Bu nedenle, geliştirilecek kontrol modeli, batarya voltajındaki düşüşlerden kaynaklanan doğruluk kayıplarını telafi edecek şekilde tasarlanacaktır.



Şekil 3: (solda) Kolay temin edilebilen 100-250 RPM aralığında, 6-12V ile çalışan DC motorlar . (sağda) FDM yazıcı ile üretilmiş 12.4° çözünürlüklü enkoder.

Bunun yanı sıra, durgun halden harekete geçme durumunda, motorların statik sürtünmeyi aşması gerekmektedir. Motorların düşük hızlardaki tepkisi statik sürtünme dolayısıyla doğrusal olmayan bir davranış sergilemekte olup, bu durum literatürde *ölü bölge* (dead region) olarak adlandırılmaktadır. Hareketin başlatılması için belirli bir minimum gerilim uygulanmadığında motor tekerleği hareket etmeye başlamamakta, ancak bu eşğin aşılması durumunda ani bir ivmelenme meydana gelmektedir.

DC Motor Modeli: Seçilen motorun (Şekil 3) ideal bir matematiksel modeli aşağıda sunulmaktadır:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{b}{J} & \frac{K}{J} \\ -\frac{K}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} V \quad (1)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} \quad (2)$$

Burada $\dot{\theta}$ motor çıkış milinin açısal hızı (rad/s), K geri elektromotor kuvveti sabiti, V uygulanan giriş voltajı, R motorun iç direnci, i motor akımı, b viskoz sürtünme katsayısıdır.

Bu modelde *ölü bölge* etkisi doğrudan gözlemlenmemekte, ayrıca dişli kutusundan kaynaklanan sürtünme ve kayıplar tam olarak hesaba katılmamaktadır. Ancak, düşük voltajlarda *statik sürtünme* nedeniyle belirli bir eşğin altında motorun harekete geçmeyeceği tecrübenin bilinmektedir. Motorun ürettiği tork ise $T = Ki$ formülü ile belirlenmektedir. Bu bağıntıya göre $V > 0$ olduğu durumda torkun pozitif olması ve şaftın harekete geçmesi beklenir. Ancak gerçek düzeneklerde bu böyle olmamaktadır.

Bu durumu modellemek amacıyla motorun ölü bölge davranışı ve dişli kutusundaki kayıpların da modele dahil edilmesi gerekmektedir. Statik sürtünme ve mekanik verimlilik katsayıları modele eklenerek aşağıdaki model edilmiştir:

$$T_c = \eta (Ki - T_s) \quad (3)$$

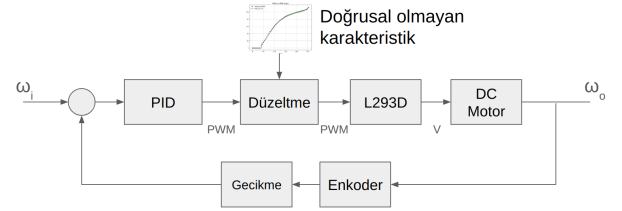
Burada T_c dişli kutusundan çıkan tork, η dişli kutusu verimliliği, T_s dişli kutusu içindeki kayıplardır.

Teker Hız Ölçümü: Bu çalışmada, motor hızlarının hassas bir şekilde ölçülmesi amacıyla bir enkoder tasarlanmış ve üretilmiştir (Şekil 3). Enkoder, 3B FDM yazıcı kullanılarak üretilmiş olup, 29 dişli bir yapıya sahiptir. Tek bir optik sensör kullanılarak enkoder diskinin yükselen ve düşen kenarları takip edilmiştir. İki optik sensör kullanılarak quadrature ölçüm yapılması mümkün olmakla birlikte, 3B yazıcı ile üretilen parçaların toleransları ve montaj hassasiyetindeki sınırlamalar nedeniyle

iki sensörün aksel hizalamasını tam olarak sağlamak güçtür. Bu sebeple, tek sensörlü kenar tespiti yöntemi tercih edilmiştir.

Tespit edilen her bir kenar, dairesel bir tampon (circular buffer) bellekte saklanmaktadır. Kontrolcü olarak kullanılan Arduino Uno'nun düşük bellek kapasitesi nedeniyle belleğin uzunluğu 30 ile 40 arasında belirlenmiştir. Tampon bellekte her yükselen ve düşen kenarın zaman damgası mikrosaniye cinsinden kaydedilmekte, kayan pencere yöntemi ile hız kestirimi yapılmaktadır.

Tasarlanan enkoder sistemi, tekerleklerin yüksek hızlarda dönmesi durumunda başarılı ölçümler sağlamaktadır. Ancak, motorun yavaş hareket etmesi veya durağan hale geçmesi durumunda, sistemin önceki ölçümleri unutarak sıfır hız durumuna geçmesi gerekmektedir. Aksi halde, eski ölçümlerin tampon bellekte tutulması nedeniyle platform durağan haldeyken bile sıfırdan farklı bir hız ölçümü yapılabilir. Bu sorunu önlemek için her bir hız kestirimi arasında geçen sürenin ortalaması alınmakta ve eğer yeni bir kenar algılanmazsa sistem bu sürenin belirli bir çarpanı kadar beklemektedir. Bekleme süresi sona erdiğinde, tampon bellek içeriği eski verilerden başlanarak silinmekte ve tüm veriler temizlendiğinde hız değeri sıfır olarak atanmaktadır.



Şekil 4: Ölü bölge ve doğrusal olmayan davranışın telafi edildiği kontrolcü devresi.

Kontrol Stratejisi: Önerilen sistemde tipik bir kontrolcü uygulanmaktadır (Şekil 4). Ancak, doğrusal olmayan karakteristiği telafi eden ek bir gömülü yazılım entegre edilmiştir. PID kontrolcü, motorun lineer bir sistem gibi davranacağını varsayarak komut üretmektedir. Bununla birlikte, doğrusal olmayan karakteristiklerin etkisi, Sonuçlar bölümünde sunulan grafiklere benzer yapılar kullanılarak modellenmiş ve bu etkiler yazılım ile telafi edilmiştir.

Ayrıca, enkoderlerden gelen veri belirli bir gecikmeyle ulaşmaktadır. Bu durum, enkoderin belirli aralıklarla ölçüm alarak hızı kestirmesi nedeniyle oluşan doğal bir gecikmeden kaynaklanmaktadır. Ancak, bu gecikme milisaniye mertebesinde olduğu için herhangi bir telafi mekanizması uygulanmamıştır.

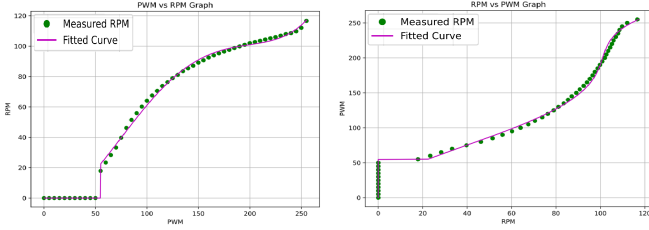
Heterojen Motor Yapısına Uyumlu Kontrolcü: Motorlar mutlak anlamda özdeş olmadığı için aynı PWM sinyallerinin uygulanması halinde motorların birebir aynı açısal hıza ulaşmamasına neden olmaktadır. Bu problemi gidermek için, her bir motorun dinamik karakteristiklerini modele entegre eden bir kontrol stratejisi geliştirilmiştir. Motorlara ilişkin kalibrasyon verileri kullanılarak PWM-RPM eşlemesi çıkarılmış ve bireysel motor davranışları dikkate alınarak her motor için optimize edilmiş kontrol sinyalleri üretilmiştir.

Düşük Voltaj Telafisi: Geliştirilen kontrolcü, batarya geriliminin zamanla azalmasına karşı dayanıklı olacak şekilde

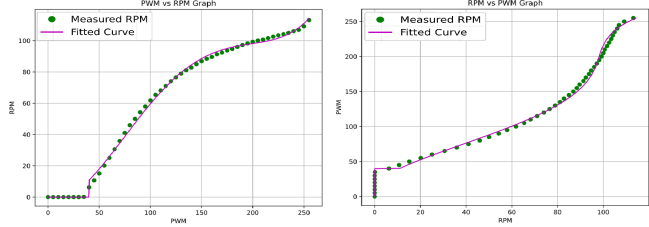
tasarlanmıştır. Kalibrasyon işlemi belirli bir nominal voltaj değeri esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar kısmında sunulan grafikler nominal voltaj (12V) ile hazırlandığı ve PWM oranı ile giriş-çıkış voltajı arasında doğrusal bir bağıntı olduğu için daha düşük besleme voltajında grafikler bir sabit ile ölçeklenerek istenen doğru sonuç elde edilebilir.

IV. DENEYSEL SONUÇLAR

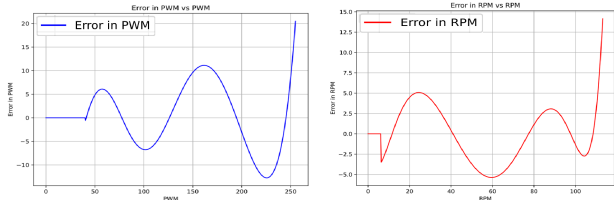
Şekil 5, motor dururken harekete geçtiğinde PWM-RPM grafiklerini göstermektedir. Benzer şekilde, Şekil 6, motor hareket halindeyken durgun hale geçtiğinde oluşan PWM-RPM grafiklerini sunmaktadır. Her iki grafikte de ölü bölgeler açıkça gözlemlenmektedir. Ancak, ölü bölge genişlikleri arasında belirli farklılıklar mevcuttur. Bu nedenle, telafi mekanizmasında motorun durgun veya hareketli olma durumuna bağlı olarak uygun kalibrasyonu kullanacağız. Ayrıca, PWM ve RPM arasındaki doğrusal olmayan karakteristik belirgin şekilde görülmektedir. Bu verilere bir eğri bindirdik ve ters fonksiyonunu alarak telafi sürecini gerçekleştireceğiz. Ancak, bu ters fonksiyonun doğruluğunu değerlendirmek için hata grafikleri oluşturduk. Bu hata grafikleri, Şekil 7 ve 8 içerisinde sunulmaktadır.



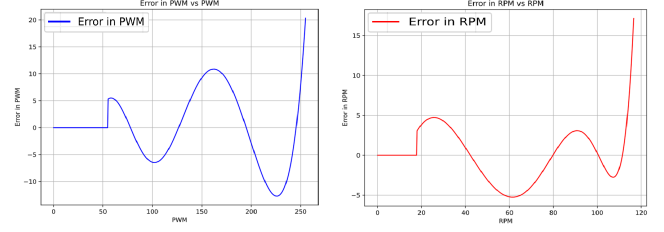
Şekil 5: Durağandan harekete geçen motor için PWM - RPM Karakteristiği.



Şekil 6: Hareketliden durağana geçen motor için PWM - RPM Karakteristiği.



Şekil 7: Azalan hız için bindirilen fonksiyonları ileri ve ters şekilde uygulanması sonucunda hasıl olan hata.



Şekil 8: Artan hız için bindirilen fonksiyonları ileri ve ters şekilde uygulanması sonucunda hasıl olan hata.

V. SONUÇ

Bu çalışmada, ucuz ve kolay temin edilebilen iki farklı motorun PWM-RPM karakteristikleri ile ölü bölgeleri çıkarılmış; bu doğrusal olmayan yapı, kontrolcüde telafi amacıyla kullanılmak üzere modellenmiştir.

Her bir ilişkiye uygun bir fonksiyon eğrisi uydurulmuş ve bu fonksiyonların ileri ve ters yönde uygulanması durumunda ortaya çıkan uyumsuzluklar analiz edilmiştir. Bu sayede, elde edilen fonksiyonların hangi bölgelerde daha isabetli sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Programı kapsamında, #2025-2735 numaralı proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] L. Xie, C. Scheifele, W. Xu, and K. A. Stol, "Heavy-duty omni-directional mecanum-wheeled robot for autonomous navigation: System development and simulation realization," in *2015 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*. IEEE, 2015.
- [2] M. Alfıyan and R. D. Puriyanto, "Mecanum 4 omni wheel directional robot design system using pid method," *Journal of Fuzzy Systems and Control*, 2023.
- [3] J. Qian, B. Zi, D. Wang, Y. Ma, and D. Zhang, "The design and development of an omni-directional mobile robot oriented to an intelligent manufacturing system," *Sensors*, 2017.
- [4] C. He, D. Wu, K. Chen, F. Liu, and N. Fan, "Analysis of the mecanum wheel arrangement of an omnidirectional vehicle," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2019.
- [5] L.-C. Lin and H.-Y. Shih, "Modeling and adaptive control of an omni-mecanum-wheeled robot," *Intelligent Control and Automation*, 2013.
- [6] A. Gfrerrer, "Geometry and kinematics of the mecanum wheel," *Computer Aided Geometric Design*, 2008.
- [7] T.-L. Le, N. G. Khang, and V. D. Thien, "A study on the kalman filter based pid controller for mecanum-wheeled mobile robot," *Journal of Physics: Conference Series*, 2025.
- [8] N. H. Thai, T. T. K. Ly, and L. Q. Dzong, "Trajectory tracking control for mecanum wheel mobile robot by time-varying parameter pid controller," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 2022.
- [9] J. Hernandez-Barragan, J. D. Rios, A. Y. Alanis, C. Lopez-Franco, J. Gomez-Avila, and N. Arana-Daniel, "Adaptive single neuron anti-windup pid controller based on the extended kalman filter algorithm," *Electronics (Switzerland)*, 2020.
- [10] E. Malayjerdi, H. Kalani, and M. Malayjerdi, "Self-tuning fuzzy pid control of a four-mecanum wheel omni-directional mobile platform," in *Electrical Engineering (ICEE), Iranian Conference on*. IEEE, 2018.
- [11] S. Shahin, R. Sadeghian, P. Sedigh, and M. T. Masouleh, "Simulation, control and construction of a four mecanum-wheeled robot," in *2017 IEEE 4th International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI)*. IEEE, 2017.