

# MATLAB/Simulink ile DC Motorun Dinamik Modellemesi ve Kontrolü: P, PI, PD ve PID Kontrolcülerinin Karşılaştırmalı Analizi

## Dynamic Modeling and Control of DC Motor with MATLAB/Simulink: Comparative Analysis of P, PI, PD and PID Controllers

Doğan NALÇACI  
Elektrik Elektronik  
Mühendisliği Bölümü  
E-posta:dogan1232@gmail.com

### ÖZET

Bu proje, MATLAB Simulink kullanılarak DC Motor modellemesine odaklanmaktadır. Modelleme aşamasında DC motor parametreleri karakterize edilmiştir. Bir diğer DC motor modellemesinde farklı parametreler kullanılarak DC motorun davranışı simüle edilmiştir. Simüle edilen DC motorun hız kontrol stratejileri uygulanmış ve istenen performansa ulaşmak için tasarım kriterleri belirlenmiştir. Oransal (P), Oransal-İntegral (PI), Oransal-Türev (PD) ve Oransal-İntegral-Türev (PID) denetleyicileri tasarlanmış ve değerlendirilmiştir. Sistemin çıktıları, zaman alanında tepki, Bode diyagramları kullanarak frekans alanı analizi ve kutup-sıfır analizi kullanılarak incelenerek, tasarlanan denetleyicilerin performansı değerlendirilmiştir. DeneySEL sonuçlar, DC motorların istenen hız kontrolünü elde etmek için uygulanan kontrol stratejilerinin etkinliğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** DC motor, MATLAB Simulink, modelleme, hız kontrolü, P denetleyici, PI denetleyici, PD denetleyici, PID denetleyici, zaman alanı tepkisi, frekans alanı analizi, Bode diyagramları, kutup-sıfır analizi.

### Abstract

This project focuses on the modeling of DC motors using MATLAB Simulink. In the modeling phase, the DC motor parameters are characterized. Another DC motor model is simulated using different parameters to replicate its behavior. Speed control strategies are applied to the simulated DC motor, and design criteria are established to achieve the desired performance. Proportional (P), Proportional-Integral (PI), Proportional-Derivative (PD), and Proportional-Integral-Derivative (PID) controllers are designed and evaluated. The system's outputs are analyzed through time-domain response, frequency-domain analysis using Bode plots, and pole-zero analysis to assess the performance of the designed controllers. The experimental results demonstrate the effectiveness of the implemented control strategies in achieving the desired speed control for the DC motors.

**Keywords—** DC motor, MATLAB Simulink, modeling, speed control, P controller, PI controller, PD controller, PID controller, time-domain response, frequency-domain analysis, Bode plots, pole-zero analysis.

### Giriş

DC motor modellemesi ve tasarımı, elektrik makineleri alanında önemli bir araştırma ve mühendislik disiplini. DC motorlar, doğru akım kullanarak mekanik enerjiyi elektrik enerjisine veya tam tersine dönüştüren elektromekanik cihazlardır. Bu motorlar, çeşitli endüstriyel ve tüketici uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. DC motorların etkin bir şekilde modellemesi, Bu modelin hedefi: Sistem davranışlarının öngörülebilmesi, sistem davranışının istenilen yönde kontrol edilmesi ve yönlendirilebilmesidir.[1] Tasarım sürecinin başarısı kritik öneme sahiptir. Modelleme işlemi, motorun fiziksel özelliklerini ve davranışını matematiksel ifadelerle temsil etmek anlamına gelir. Bu, motorun performansını analiz etmek, kontrol sistemlerini tasarlamak ve optimize etmek için önemli bir temel sağlar.

Modelleme işlemi, motorun fiziksel özelliklerini ve davranışını matematiksel ifadelerle temsil etmek anlamına gelir. Bu, motorun performansını analiz etmek, kontrol sistemlerini tasarlamak ve optimize etmek için önemli bir temel sağlar.[2] Sistem tanılamada izlenen sıralama genellikle şu şekildedir: DeneySEL planlama. Model yapısının seçimi. Parametre kestirimi. Kurulan modelin geçerliliğinin test edilmesi.[1]

DC motor modelleri genellikle iki ana bileşen üzerinde odaklanır: stator ve rotor. Stator, sabit manyetik alanı oluşturan bir bobinden oluşur ve rotor, dönerek mekanik hareketi sağlayan manyetik bir alana sahip mıknatıslardan veya sarımlardan oluşur. Modelleme süreci, motorun elektriksel ve mekanik özelliklerini açıklayan denklemleri türetmeyi içerir.

DC motorlar için kullanılan yaygın bir model, transfer fonksiyonu modelidir. Bu model, motorun giriş voltajına ve çıkış hızına olan ilişkisini ifade eder. Transfer fonksiyonu, motorun karakteristik özelliklerini analiz etmek ve kontrol tasarımı yapmak için kullanılan bir araçtır. Modelin doğruluğu, parametre tahminleri ve deneySEL verilerin modelle eşleştirilmesi yoluyla sağlanır. DC motor tasarımı, belirli bir uygulama için en uygun motorun tasarlanması sürecini içerir. Tasarım süreci, motorun güç gereksinimlerini, hız aralığını, verimliliği ve diğer performans kriterlerini karşılayacak şekilde optimize etmeyi amaçlar. Bu, manyetik devre tasarımı, sarım tasarımı, rotor yapılandırması ve soğutma sistemleri gibi faktörleri içerir.

DC motor hız kontrolü, P, PI, PD ve PID denetleyicileri gibi çeşitli denetleyici tipleriyle gerçekleştirilebilir. Bu denetleyiciler, motorun hızını istenen değerde tutmak veya belirli bir hız profiline göre kontrol etmek için kullanılır.

DC motor hız kontrolü, motorun giriş voltajını veya akımını düzenleyerek gerçekleştirilir. Bu kontrol, denetleyici tarafından sağlanan sinyal ile motor hızını istenen hız seviyesine getirmek veya korumak için geri bildirim olarak yapılır. Bu geri bildirim, genellikle motorun hızını ölçen bir hız sensörü veya tahmin eden bir hız tahmin algoritması kullanılarak elde edilir.

P (Oransal) denetleyici, hata ile doğru orantılı bir kontrol sinyali üretir. Hata, motorun istenen hızı ile gerçek hızı arasındaki farktır. P denetleyici, hata arttıkça kontrol sinyalini artırır, ancak zamanla kararlılığı sağlamak için diğer denetleyici tiplerine göre daha zayıf olabilir. P denetleyici, genellikle basit kontrol uygulamalarında tercih edilir.

PI (Oransal-İntegral) denetleyici, hem hatayı hem de hatanın integralini kullanarak kontrol sinyalini üretir. Hatayı doğru orantılı olarak işlerken, integral terimi motorun istenen hızına yönelik kalıcı bir düzeltme sağlar. Bu, motorun istenen hıza daha hızlı ulaşmasını ve istikrarlı bir şekilde tutulmasını sağlar. PI denetleyici, genellikle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

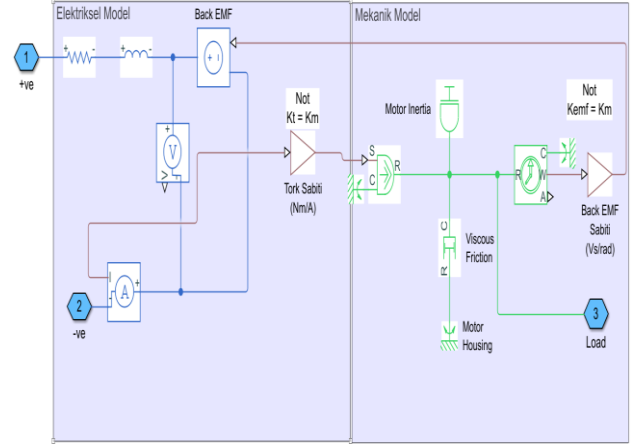
PD (Oransal-Türevsel) denetleyici, hata ile hata türeviden oluşan bir kontrol sinyali üretir. Türev terimi, hızlı değişen hatalara karşı hassas bir tepki sağlar. PD denetleyici, aşırı yanıtları azaltır ve hızlı düzeltmeler yaparak istenen hıza daha hızlı ulaşmayı sağlar. PD denetleyici, genellikle hız kontrolünde daha iyi performans elde etmek için kullanılır.

PID (Oransal-İntegral-Türevsel) denetleyici, P, I ve D terimlerinin kombinasyonunu kullanarak kontrol sinyalini üretir. Bu denetleyici, hatanın doğrusal, integral ve türeviden yararlanarak hassas bir kontrol sağlar. PID denetleyici, geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılır ve çeşitli parametre ayarlama yöntemleri ile optimize edilebilir.

## 2.1 DC Motorun Modellenmesi ve Tasarımı

DC motorlar, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren cihazlardır. Genellikle iki temel bileşenden oluşurlar: elektriksel bileşenler ve mekanik bileşenler. Elektriksel bileşenler, motorun elektriksel davranışını tanımlayan bobinler, dirençler ve indüktörler gibi elemanları içerirken, mekanik bileşenler, mil ve rotor gibi mekanik parçaları kapsar. DC motorun matematiksel modelini belirlemek için motorun devre şeması ve denklemleri kullanılır. Şekil 1’ de MATLAB Simulink ortamında tasarlanan DC motor gösterilmiştir. Şekil 1 ‘in tasarlanma aşamaları şu şekildedir: Elektriksel bileşenleri modellemek için Simulink kütüphanesinden uygun blokları kullanılmıştır. Dirençler, indüktörler ve kaynaklar gibi elemanlar için Simulink kütüphanesinde yer alan blokları kullanarak motorun elektriksel davranışını simüle edilmiştir. Mekanik bileşenleri modellemek için Simulink kütüphanesinden uygun blokları kullanılmıştır. Mil ve rotor gibi mekanik bileşenleri simüle etmek için Simulink kütüphanesinde mekanik sistem bloklarını kullanılmıştır. Elektrik ve mekanik bileşenleri birleştirerek tam bir DC motor modeli oluşturulmuştur. Elektrik ve mekanik bileşenler arasındaki etkileşimleri modellemek için uygun bağlantıları

Modelin giriş ve çıkışlarını tanımlanmıştır. Giriş ve çıkışlar uygun şekilde modele eklenmiştir. Modelin başlangıç koşullarını ve parametreleri atanmıştır. Motorun başlangıç durumu ve parametreleri, motorun fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişmiştir. Bu değerleri Simulink modeline uygun şekilde ayarlanmıştır. Bu adımları takip ederek, Simulink kullanarak DC motorun matematiksel modelini oluşturulmuş ve motorun elektriksel ve mekanik davranışını simüle edilmiştir.[2]



Şekil 1. DC Motorun Simulink Ortamında Modellenmesi

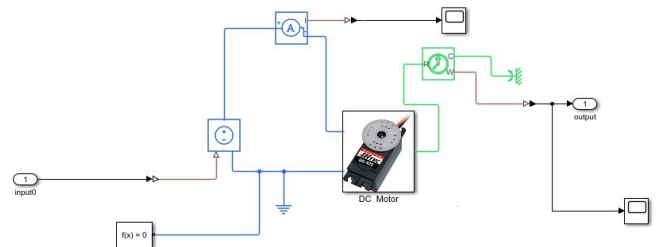
Tasarlanan DC motorun elektriksel model ve mekanik model parametreleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 1. Elektriksel Model Parametreleri

Elektriksel Model	DEĞER
Direnç	1 Ohm
İndüktör	1e-6 H
Tork Sabiti	1.3e-2 Nm/A

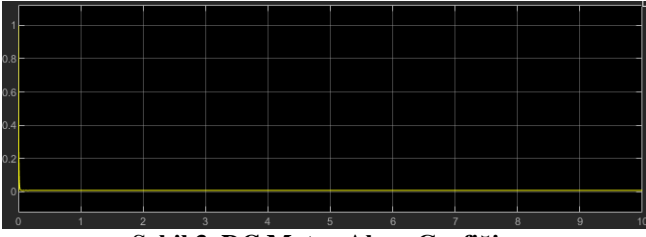
Tablo 2. Mekanik Model Parametreleri

Mekanik Model	DEĞER
Atalet Momenti	1e-6 kg*m^2
Sürtünme Katsayısı	1.5e-6 N*m/(rad/s)
EMK	1.3e-2 Vs/rad



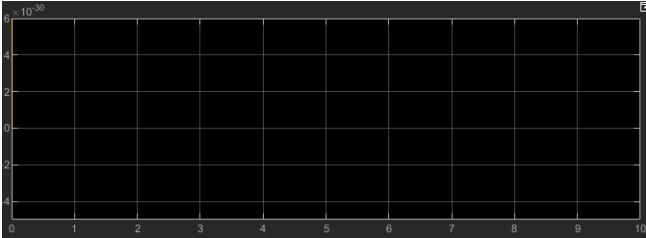
Şekil 2. Tasarlanan DC Motor Ölçümleri

Yukarıdaki şekil 2’de tasarlanan DC motorun akım sensörü ve ideal dönme hareketi sensörü ile çıktı grafikleri alınmıştır. Bu grafikler ise aşağıdaki gibidir.



**Şekil 3. DC Motor Akım Grafiği**

Şekil 3'teki Grafiği analiz ettiğimizde, x eksenini zamanı temsil ederken y eksenini DC motorun akım değerini göstermektedir. Grafik üzerinden zamanın ilerlemesiyle birlikte akımın nasıl değiştiği gözlenebilir. Başlangıçta, zaman sıfır olduğunda akım da sıfır olarak görülmektedir. Bu durum, motorun başlangıçta hareketsiz olduğunu veya uygulanan bir akım olmadığını gösterir. Zaman ilerledikçe, akımın hızla arttığı bir artış bölgesi gözlenmektedir. Bu, motorun hareket etmeye başladığını ve uygulanan akımın motoru beslemeye başladığını ifade eder. Akım, belirli bir değere kadar hızla yükselir ve ardından daha istikrarlı bir seviyeye ulaşır. Grafiğin devamında, düz bir çizgi şeklinde seyreden bir sabit bölge bulunmaktadır. Bu, motorun çalışma hızına ulaştığını ve istikrarlı bir şekilde akım tükettiğini temsil eder. Motorun yüküne ve çalışma koşullarına bağlı olarak, akım seviyesi bu sabit noktada değişebilir. Son olarak, zamanın ilerlemesiyle birlikte akımın hızla azaldığı bir azalma bölgesi görülmektedir. Bu, motorun durmaya veya yavaşlamaya başladığını ve akım tüketiminin azaldığını gösterir. Bu şekilde, DC motor akım grafiğini analiz ederek, motorun başlangıçta hareketsiz olduğunu, ardından hızla hızlandığını, belirli bir hızda istikrarlı bir şekilde çalıştığını ve sonunda durmaya doğru yavaşladığını genel olarak anlayabiliriz.



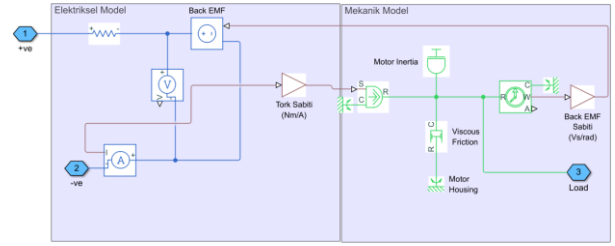
**Şekil 4. DC Motorun Dönme Hızı**

Şekil 4'te grafiği analiz ettiğimizde, x eksenini zamana karşılık gelirken y eksenini DC motorun ideal dönme sensörü tarafından ölçülen dönme hızını (angular velocity) temsil etmektedir. Başlangıçta zamanın sıfır olduğu noktada dönme hızı da sıfır olarak görülmektedir. Bu, motorun başlangıçta hareketsiz olduğunu ve dönme sensörünün herhangi bir hareket algılamadığını gösterir. Zaman ilerledikçe, dönme hızının artış gösterdiği bir artış bölgesi gözlenmektedir. Bu, motorun hızlanmaya başladığını ve dönme sensörü tarafından algılanan dönme hızının arttığını gösterir. Dönme hızı, belirli bir süre içinde belirli bir açıyı geçen zaman birimine bağlı olarak ölçülür. Grafikte daha sonra bir sabit bölge bulunmaktadır. Bu sabit bölge, motorun maksimum hızına ulaştığını ve dönme sensörü tarafından ölçülen dönme hızının istikrarlı bir seviyede kaldığını gösterir. Bu, motorun istenen hızda dönme hareketini sürdürdüğünü ifade eder. Grafiğin

sonunda, zamanın ilerlemesiyle birlikte dönme hızının yavaşladığı bir azalma bölgesi görülmektedir. Bu, motorun yavaşlamaya başladığını ve dönme sensörü tarafından algılanan dönme hızının azaldığını gösterir. Bu şekilde, DC motorun ideal dönme sensörü tarafından ölçülen dönme hızını analiz ederek, motorun başlangıçta hareketsiz olduğunu, ardından hızlandığını, belirli bir hızda istikrarlı bir şekilde döndüğünü ve sonunda yavaşladığını genel olarak anlayabiliriz.

## 2.2 İndüktör İhmal Edilmiş DC Motor Modellemesi

Şekil 5'te DC motor modelleme aşamaları gerçekleştirilmiş ve indüktör ihmal edilmiştir.



**Şekil 5. İndüktör İhmal Edilmiş DC Motor Tasarımı**

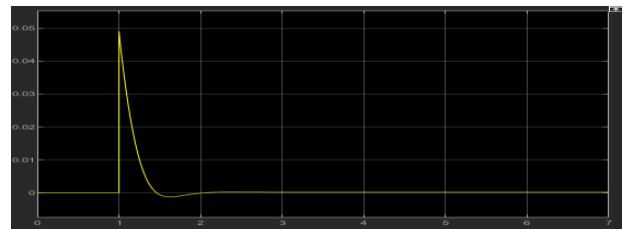
Tasarlanan DC motorun indüktör ihmal edilmiş elektriksel model ve mekanik model parametreleri aşağıda verilmiştir.

**Tablo 3. İndüktör İhmal Edilmiş Elektriksel Model Parametreleri**

Elektriksel Model	DEĞER
Direnç	31.825 Ohm
Tork Sabiti	0.5024Nm/A

**Tablo 4. İndüktör İhmal Edilmiş Mekanik Model Parametreleri**

Mekanik Model	DEĞER
Atalet Momenti	0.003449 kg*m <sup>2</sup>
Sürtünme Katsayısı	0.0001 N*m/(rad/s)
EMK	0.6739 Vs/rad



**Şekil 6. İndüktör İhmal Edilmiş DC Motor Akım Grafiği**

Şekil 6'da, x eksenini zamanı ve y eksenini DC motorun akım değerini göstermektedir. Başlangıç noktasında zamanın sıfır olduğu yerde, motorun akım değeri de sıfır olarak görülmektedir. Bu, motorun başlangıçta hareketsiz olduğunu veya uygulanan bir akımın olmadığını gösterir. Zaman ilerledikçe, akımın artış gösterdiği bir artış bölgesi gözlemlenir. Bu, motorun hareket etmeye başladığı ve uygulanan akımın motoru beslemeye

başladığı anlamına gelir. Akım, belirli bir değere kadar hızla yükselir ve ardından daha istikrarlı bir seviyeye ulaşır. Grafikte daha sonra düz bir çizgi şeklinde seyreden bir sabit bölge bulunur. Bu, motorun belirli bir hızda istikrarlı bir şekilde çalıştığını ve akım tüketiminin sabit kaldığını gösterir. İndüktörün ihmal edildiği bu durumda, akım dalgalanmaları minimum düzeydedir. Grafikte son olarak, zamanın ilerlemesiyle birlikte akımın azaldığı bir azalma bölgesi görülür. Bu, motorun durmaya doğru yavaşladığı veya yükün etkisiyle akımın azaldığı anlamına gelir.



**Şekil 7. İndüktör İhmal Edilmiş DC Motor Hız Grafiği**

Şekil 7'de, x eksenı zamanı ve y eksenı ise motorun dönme hareketinin bir göstergesini temsil etmektedir. Başlangıç noktasında zamanın sıfır olduğu yerde, dönme hareketi de sıfır olarak görülmektedir. Bu, motorun başlangıçta hareketsiz olduğunu veya dönme hareketinin ölçülmediğini gösterir. Zaman ilerledikçe, dönme hareketinin artış gösterdiği bir artış bölgesi gözlemlenir. Bu, motorun hızlanmaya başladığını ve zamanla dönme hareketinin hızının arttığını gösterir. Grafikte daha sonra bir sabit bölge bulunur. Bu sabit bölge, motorun maksimum dönme hızına ulaştığını ve dönme hareketinin istikrarlı bir seviyede kaldığını gösterir. Bu, motorun istenen hızda dönme hareketini sürdürdüğünü ifade eder. Grafikte son olarak, zamanın ilerlemesiyle birlikte dönme hareketinin yavaşladığı bir azalma bölgesi görülür. Bu, motorun yavaşlamaya başladığını ve zamanla dönme hareketinin hızının azaldığını gösterir.

## 2.3 Kontrolcü Tasarımı

### 2.3.1 P Kontrolcü Tasarımı

**K<sub>p</sub>: 1.3894**

**K<sub>i</sub>: 0**

**K<sub>d</sub>: 0**

**T<sub>f</sub>: 0**

**Şekil 8. P Kontrolcü Parametreleri**

Şekil 9'de indüktörü ihmal edilmiş DC motorun P kontrolcü tasarımı görülmektedir. Bu tasarımın aşamaları şu şekildedir. Simulink kütüphanesinden P kontrolcü bloğu tasarlanan modele eklenmiştir. Bu blok, hedef değer ve geri besleme sinyali arasındaki farkı kullanarak çıkış sinyalini üretmiştir. P kontrolcü parametreleri Şekil 8 'de olduğu gibi ayarlanmıştır. P kontrolcünün kazancını (gain) ve diğer kontrol parametrelerini, motorun performans gereksinimlerine ve tasarım kriterlerine göre belirlenmiştir.[3] Kazanç ayarı, hedef değer ile geri besleme arasındaki farkın çıkışa nasıl yansıtılacağını kontrol eder. DC motor çıkışını P kontrolcüye geri besleme

olarak bağlanmıştır. (ŞEKİL 16) Geri besleme sinyali, kontrolcünün çıkışını etkileyerek motorun çalışma parametrelerini kontrol eder. Hedef değeri, P kontrolcünün girişine bağlanmıştır.

**Şekil 9. P Kontrolcü**

### 2.3.2 PI Kontrolcü Tasarımı

**K<sub>p</sub>: 0.7091**

**K<sub>i</sub>: 6.6257**

**K<sub>d</sub>: 0**

**T<sub>f</sub>: 0**

**Şekil 10. PI Kontrolcü Parametreleri**

Şekil 11'de simulink kütüphanesinden PI kontrolcü bloğu tasarlanan modele eklenmiştir. Bu blok, hedef değer ve geri besleme sinyali arasındaki farkı kullanarak çıkış sinyalini üretmiştir.[4] PI kontrolcü parametreleri, Şekil 10'da olduğu gibi motorun performans gereksinimleri ve tasarım kriterlerine göre ayarlanmıştır. Kazanç (gain) ayarı, hedef değer ile geri besleme arasındaki farkın çıkışa nasıl yansıtılacağını kontrol eder. Ayrıca PI kontrolcüde entegrasyon özelliği de bulunur, bu da sistem stabilitesini sağlar ve statik hatayı ortadan kaldırır. DC motor çıkışı PI kontrolcüye geri besleme olarak bağlanmıştır. (ŞEKİL 16) Geri besleme sinyali, kontrolcünün çıkışını etkileyerek motorun çalışma parametrelerini kontrol eder. Hedef değeri, PI kontrolcünün girişine bağlanmıştır.

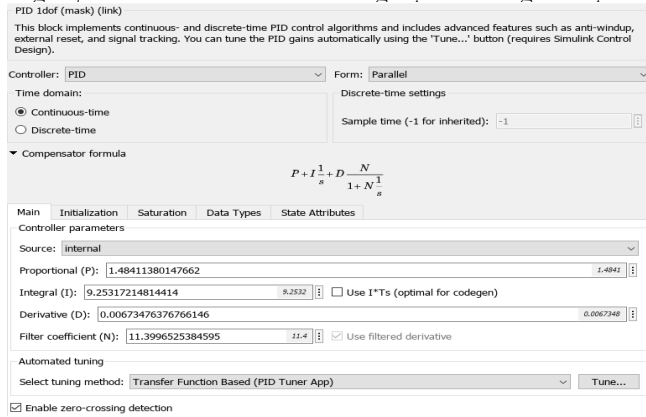
**Şekil 11. PI Kontrolcü**

### 2.3.3 PD Kontrolcü

$K_p$ : 48.2358  
 $K_i$ : 0  
 $K_d$ : 0  
 $T_f$ : 0

Şekil 12. PD Kontrolcü Parametreleri

Şekil 13'te simulink kütüphanesinden PD kontrolcü bloğu tasarlanan modele eklenmiştir. Bu blok, hedef değer ve geri besleme sinyali arasındaki farkı kullanarak çıkış sinyalini üretmiştir. PD kontrolcü parametreleri şekil 12'de olduğu gibi belirlenmiş, motorun performans gereksinimleri ve tasarım kriterlerine göre ayarlanmıştır. Kazanç (gain) ayarı, hedef değer ile geri besleme arasındaki farkın çıkışa nasıl yansıtılacağını kontrol eder. Ayrıca PD kontrolcünde türev (derivative) özelliği de bulunur, bu da hata değişiminin çıkışa etkisini kontrol eder. PD kontrolcüsü, hedef değere hızlı bir tepki süresi sağlar ve aşırı salınımı azaltabilir.[5] DC motor çıkışı PD kontrolcüye geri besleme olarak bağlanmıştır. (Şekil 16) Geri besleme sinyali, kontrolcünün çıkışını etkileyerek motorun çalışma parametrelerini kontrol eder. Hedef değeri, PD kontrolcünün girişine bağlanmıştır.



Şekil 13. PD Kontrolcü Tasarımı

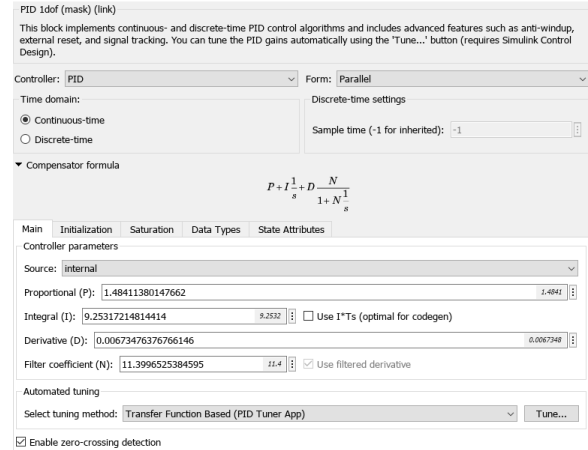
### 2.3.4 PID Kontrolcü

$K_p$ : 0.9099  
 $K_i$ : 5.6623  
 $K_d$ : -0.0106  
 $T_f$ : 0.0849

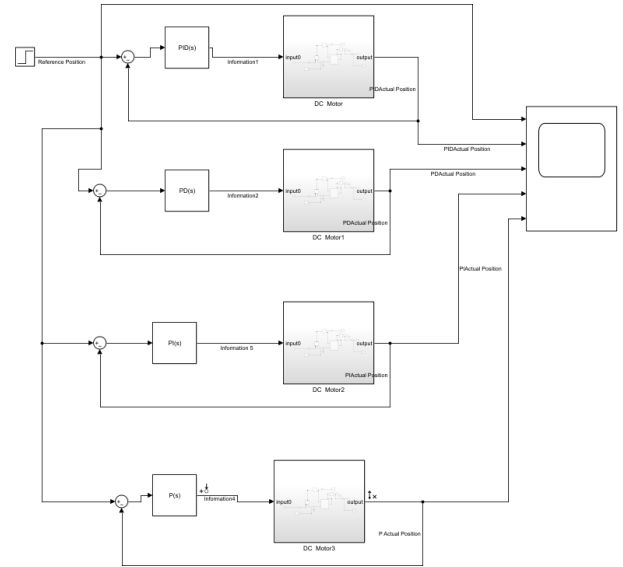
Şekil 14. PID Kontrolcü Parametreleri

Şekil 15'te simulink kütüphanesinden PID kontrolcü bloğu tasarlanan modele eklenmiştir. Bu blok, hedef değer ve geri besleme sinyali arasındaki farkı kullanarak çıkış sinyalini üretmiştir. PID kontrolcü parametreleri şekil 14'te, motorun performans gereksinimleri ve tasarım kriterlerine göre ayarlanmıştır. Kazanç (gain) ayarı, hedef değer ile geri besleme arasındaki farkın çıkışa nasıl yansıtılacağını kontrol eder. Ayrıca PID kontrolcünde entegrasyon (integral) ve türev (derivative) özellikleri de bulunur. Entegrasyon, hatanın zaman integralini hesaplayarak statik hatayı ortadan kaldırırken, türev hata değişiminin çıkışa etkisini kontrol eder. PID kontrolcüsü, hedef değere hızlı bir tepki süresi sağlar, aşırı salınımı

azaltır ve statik hatayı düzeltir. DC motor çıkışı PID kontrolcüye geri besleme olarak bağlanmıştır. (Şekil 16) Geri besleme sinyali, kontrolcünün çıkışını etkileyerek motorun çalışma parametrelerini kontrol eder. Hedef değeri, PID kontrolcünün girişine bağlanmıştır.

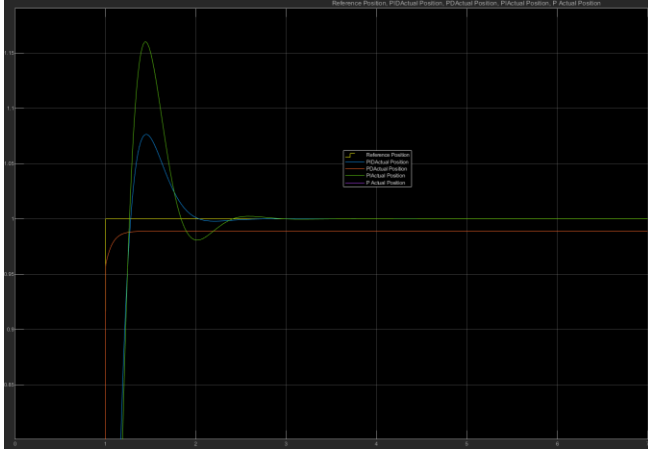


Şekil 15. PID Kontrolcü Tasarımı



Şekil 16. Kontrolcüler ve DC Motor Bağlantıları

### 2.3.5 Kontrolcülerin Gerçek Zamanlı Grafiğine Göre Karşılaştırılmalı Analizi



Şekil 17. Kontrolcülerin Gerçek Zaman Grafiği

Şekil 17’de kontrolcülerin gerçek zamanlı grafiği bulunmakta. Bu kontrolcülerini bu grafiğe göre karşılaştırılmalı analizini şu şekilde yapabiliriz:

**P Kontrolcüsü:** P kontrolcüsü, hedef değer ile gerçek konum arasındaki farkı kullanarak çıkış sinyalini üretmiştir. Grafikte, P kontrolcüsü ile elde edilen "gerçek zaman" grafiği, hedef değere yavaşça yaklaşırken bir süre sonra istikrarlı bir konumda kalmıştır. Ancak, P kontrolcüsü statik hataya neden olabilir ve hedef konuma tam olarak ulaşmada biraz yavaş olabilir.[6]

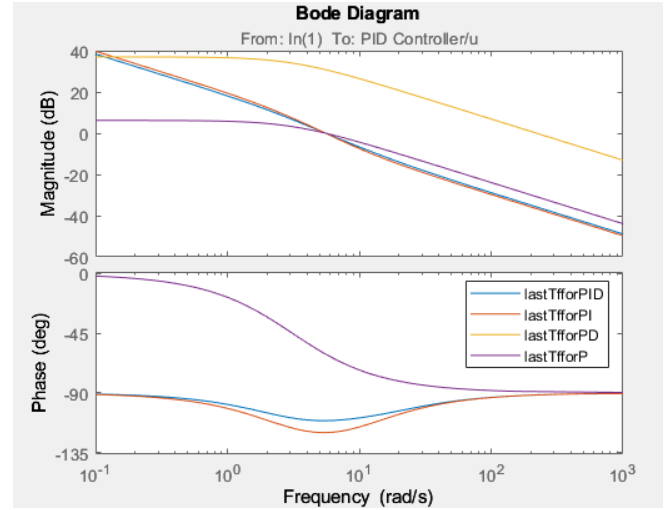
**PI Kontrolcüsü:** PI kontrolcüsü, P kontrolcüsünün yanı sıra entegrasyon özelliğini de içermiştir. Entegrasyon, statik hatayı ortadan kaldırmayı hedefler. Grafikte, PI kontrolcüsü ile elde edilen "gerçek zaman" grafiği, hedef konuma daha hızlı bir şekilde yaklaşmıştır ve daha düşük bir statik hataya sahip olabilir. Entegrasyon özelliği sayesinde sistem istikrarlı bir şekilde hedef konumda kalmıştır.

**PD Kontrolcüsü:** PD kontrolcüsü, hedef değer ile gerçek konum arasındaki farkı ve hızın değişimini kullanmıştır. Grafikte, PD kontrolcüsü ile elde edilen "gerçek zaman" grafiği, hedef konuma hızlı bir şekilde yaklaşırken aşırı salınımı minimize edilmiştir. PD kontrolcüsü, hızlı tepki süresi ve düşük aşırı salınım sağlayabilir.

**PID Kontrolcüsü:** PID kontrolcüsü, P, I ve D kontrolcülerinin kombinasyonunu kullanır. PID kontrolcüsü, hedef konuma hızlı bir şekilde yaklaşmayı, aşırı salınımı kontrol etmeyi ve statik hatayı düzeltmeyi hedefler. Grafikte, PID kontrolcüsü ile elde edilen "gerçek zaman" grafiği, hedef konuma hızlı bir şekilde yaklaşırken aşırı salınımı minimize etmiştir. Ayrıca, PID kontrolcüsü sayesinde statik hatanın da düzeltilmesi mümkün olabilir.

### 3 Kontrolcü Çıktı Değerleri Analizi

#### 3.1 Bode Diyagram Analizi



Şekil 18. Kontrolcülerin Bode Diyagramı

Şekil 18.’de P, PI, PD ve PID kontrolcülerini ile DC motor için Bode diyagramları görülmektedir.

**P Kontrolcüsü Bode Diyagramı:** P kontrolcüsü için Bode diyagramında, genellikle düşük frekanslarda kazancın yükseldiği ve yüksek frekanslarda düşük kazançla sahip bir eğri görülmüştür. P kontrolcüsü, sistemin belirli bir frekansda kazancını artırmıştır, ancak faz dengesi veya faz-margini sağlamamak için başka bir eleman gerekmektedir. Bu nedenle, düşük frekanslarda iyi performans gösterebilirken, yüksek frekanslarda istenmeyen salınımlara ve kararlılık sorunlarına yol açabilir.

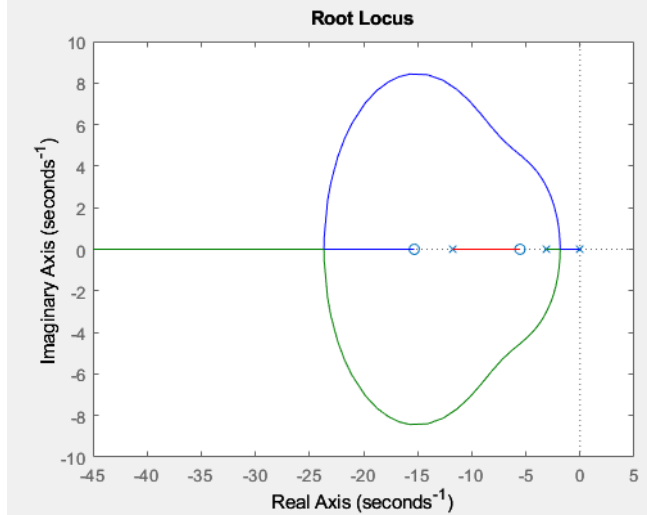
**PI Kontrolcüsü Bode Diyagramı:** PI kontrolcüsü için Bode diyagramında, düşük frekanslarda kazancın yükseldiği ve yüksek frekanslarda düşük kazançla sahip bir eğri görülür. Entegrasyon özelliği sayesinde, düşük frekanslarda kazanç artışı sağlanırken, faz-margini artırılarak sistem kararlılığı da sağlanabilir. PI kontrolcüsü, statik hatayı ortadan kaldırır ve düşük frekanslarda istenilen performansı sağlayabilir.

**PD Kontrolcüsü Bode Diyagramı:** PD kontrolcüsü için Bode diyagramında, düşük frekanslarda kazancın yükseldiği ve yüksek frekanslarda düşük kazançla sahip bir eğri görülür. Türev özelliği sayesinde, düşük frekanslarda kazanç artışı sağlanırken, faz-margini artırılarak sistem kararlılığı da sağlanabilir. PD kontrolcüsü, hızlı tepki süresi sağlar ve düşük frekanslarda aşırı salınımı azaltabilir.[7]

**PID Kontrolcüsü Bode Diyagramı:** PID kontrolcüsü için Bode diyagramında, düşük frekanslarda kazancın yükseldiği ve yüksek frekanslarda düşük kazançla sahip bir eğri görülür. PID kontrolcüsü, P, I ve D elemanlarının kombinasyonu olduğu için geniş bir frekans aralığında iyi performans gösterebilir. PID kontrolcüsü, hedefe hızlı bir şekilde yaklaşabilir, aşırı salınımı azaltabilir ve statik hatayı ortadan kaldırabilir.

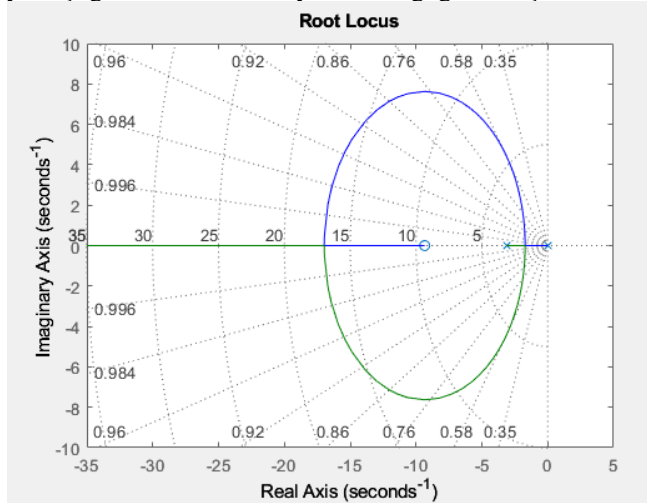


### 3.2 Root Locus Grafik Karşılaştırması



Şekil 19. PI Kontrolcü Yer-Kök Eğri Grafiği

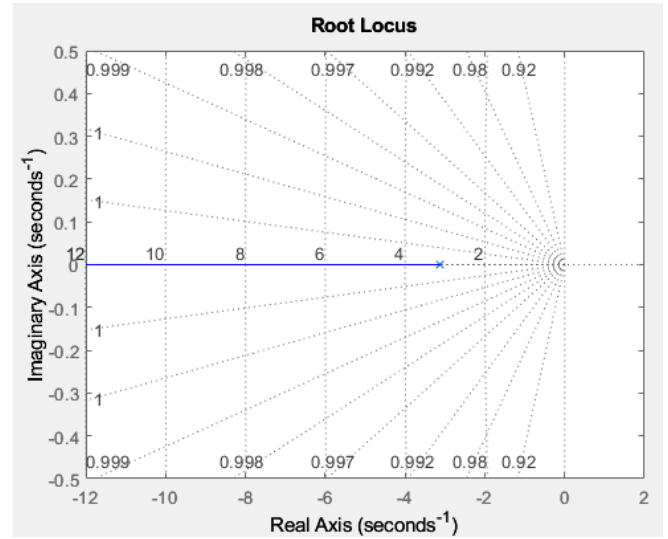
Şekil 19'da yer-kök eğrisi grafiği incelendiğinde, kutupların sıfırlara doğru hareket ettiği görülmüştür. Bu durum, PI kontrolcüsünün istenen bir hedefe doğru yakınsama sağladığını göstermiştir. Kutupların sıfırlara yaklaşması, hata sinyalinin integralinin alınmasıyla elde edilen entegrasyon özelliği sayesinde gerçekleşmiştir. Entegrasyon özelliği, sistemdeki statik hatayı ortadan kaldırarak istenen çıkışa ulaşmayı sağlamıştır. Grafikte, kazanç değeri arttıkça kutupların hedefe daha hızlı yaklaştığı ve daha hızlı bir yanıt verdiği görülmüştür.



Şekil 20. PD Kontrolcü Yer-Kök Eğrisi Grafiği

Şekil 20 incelendiğinde, kutupların sağa doğru hareket ettiğini ve sıfırlara doğru yaklaştığını görülmüştür. PD kontrolcüsü, hem oransal hem de türevlik elemanlarını içermiştir. Kazanç (gain) değeri arttıkça, köklerin hedefe daha hızlı yaklaştığı ve yanıt süresinin azaldığı görülmüştür. Türev özelliği, sistemdeki hızlı tepkiyi sağlar ve aşırı salınımı azaltmıştır. Bu nedenle, PD kontrolcüsü hızlı bir cevap süresi ve düşük aşırı salınım sağlamıştır. Şekile bakarak, PD kontrolcüsünün sistemi istikrarlı bir şekilde kontrol ettiği ve hedef değere yakınsadığı yorumlanmıştır. Kutupların sıfırlara doğru

hareket etmesi, türev özelliğinden kaynaklanmıştır ve sistemin stabilitesini artırmıştır.[8]



Şekil 21. PID Kontrolcü Yer-Kök Eğrisi Grafiği

davranışını optimize etmiştir. PID kontrolcüsünün varlığı, sistemde istenen hedef değere hızlı bir şekilde yaklaşma yeteneği sağlamıştır. Ayrıca, integral bileşenin varlığı sayesinde statik hatayı düzeltmiş ve sistemdeki istikrarı artırmıştır.

Şekil 21'de PID kontrolcüsünün oransal bileşeni, hatanın çıkışa doğrudan etkisini kontrol etmiştir. Integral bileşen, sistemdeki kümülatif hatayı düzeltmiş ve statik hatayı ortadan kaldırmıştır. Türevlik bileşen ise hızlı tepki süresi ve aşırı salınımı azaltarak dinamik performansı iyileştirmiştir. Grafiğe baktığımızda, PID kontrolcüsünün köklerin istenen hedef değere doğru hareket ettiği ve sistem stabilitesini sağladığı görülmüştür. Kutuplar, sıfırlara doğru hareket ederken, PID kontrolcüsü oransal, integral ve türevlik bileşenlerinin etkisiyle sistem davranışını optimize etmiştir. PID kontrolcüsünün varlığı, sistemde istenen hedef değere hızlı bir şekilde yaklaşma yeteneği sağlamıştır. Ayrıca, integral bileşenin varlığı sayesinde statik hatayı düzeltmiş ve sistemdeki istikrarı artırmıştır.

### 4. Sonuç

Bu çalışmada, MATLAB Simulink kullanılarak DC motor modellemesi gerçekleştirildi ve farklı kontrolcülerin performansı incelendi. İlk olarak, DC motor modeli oluşturuldu ve çıktılar elde edildi. Daha sonra, P, PI, PD ve PID kontrolcülerini farklı parametrelerle DC motor modeline eklendi ve hız kontrolü yapıldı. Her kontrolcü için çıktılar kaydedildi. Ayrıca, her kontrolcü için Bode diyagramları ve Yer-Kök Eğri grafikleri oluşturuldu. Bode diyagramları, frekans tepkisini gösterirken, Yer-Kök Eğri grafikleri ise kontrolcü parametrelerinin etkisini analiz etmek için kullanıldı. Sonuç olarak, elde edilen sonuçlar incelendiğinde, P kontrolcüsünün belirli bir kazançla istenen hıza yakınsadığı ancak aşırı salınım olduğu görüldü. PI kontrolcüsü ise statik hatayı düzelterek daha iyi bir performans sergiledi. PD kontrolcüsü, hızlı bir tepki süresi sağlarken aşırı salınımı azalttı. PID

kontrolcüsü ise hız kontrolünde en iyisini sağlayarak istenen hıza hızlı bir şekilde ulaştı. Bode diyagramlarına göre, PID kontrolcüsünün daha geniş bir bant genişliği ve daha düşük faz gecikmesi olduğu görüldü. Yer-Kök Eğri grafikleri incelendiğinde, PID kontrolcünün daha stabil olduğu ve istenen hıza daha hızlı yakınsadığı gözlemlendi. Bu sonuçlar, DC motor kontrolünde PID kontrolcünün en iyi performansı sağladığını ve istenen hızı en hızlı ve stabil şekilde elde ettiğini göstermektedir. PID kontrolcüsü, hem oransal, integral hem de türevlik bileşenlerini içerdiği için sistemi optimize ederek istenen performansı elde etmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Hasan E. Barış D. Sezai T. "Computer Based DC Motor Parameter Identification Simulation and Parameter Estimation" 2009
- [2] Tan Kiong Howe, May 2003, Thesis, B.E (Hons), 'Evaluation of the transient response of a DC motor using MATLAB/SIMULINK', University of Queensland.
- [3] MathWorks, 2001, Introduction to MATLAB, the MathWorks, Inc..
- [4] The Math Works, Learning Simulink, The Math Works, Inc., Natic, USA, 2006, ISBN 0-9755787-7-4.
- [5] Z. Valter, "Electrical Mashines and Drives in Matlab", Faculty of Electrical Engineering, Osijek, Croatia, unpublished.
- [6] M. Jadric, B. Francic, Dynamic of Electric Machines. Graphis, Zagreb, Croatia, 1995, pp. 158-165, ISBN 953-96399-2-1.
- [7] E. Can and H. H. Sayan, "THE PERFORMANCE OF THE DC MOTOR BY THE PID CONTROLLING PWM DC-DC BOOST CONVERTER," Tech. J., vol. 6168, pp. 182–187, 2017.
- [8] A. Khanna and T. Gaur, "Model Predictive Control Of Dc Motor Model In Matlab," Int. J. Sci. Eng. Res., vol. 8, no. 4, pp. 82–85, 2017.