

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KATSAYI DİYAGRAM METODUNUN HAREKET KONTROL SİSTEMLERİNE  
UYGULANMASI**

**ADEM AVCU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
MAKİNE TEORİSİ VE KONTROL PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. SEMİH SEZER**

**İSTANBUL, 2018**

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KATSAYI DİYAGRAM METODUNUN HAREKET KONTROL SİSTEMLERİNE**  
**UYGULANMASI**

Adem AVCU tarafından hazırlanan tez çalışması 02.05.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Doç. Dr. Semih SEZER  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Eş Danışman**

Dr. Öğr. Üyesi Kadir ERKAN  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Semih SEZER  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Dr. Öğr. Üyesi Meral BAYRAKTAR  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Doç. Dr. İlker Murat KOÇ  
İstanbul Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

## ÖNSÖZ

---

Bu tezin hazırlanması sırasında derin bilgi ve donanımlarıyla yardımcı olan Doç. Dr. Semih SEZER ve Dr. Öğr. Üyesi Kadir ERKAN hocalarıma; manevi destekleriyle bana moral veren aileme teşekkür ederim.

Mayıs, 2018

Adem AVCU

## İÇİNDEKİLER

---

|                                                                  | Sayfa     |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| SİMGE LİSTESİ .....                                              | vi        |
| KISALTMA LİSTESİ .....                                           | vii       |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                               | viii      |
| ÇİZELGE LİSTESİ .....                                            | x         |
| ÖZET.....                                                        | xi        |
| ABSTRACT .....                                                   | xii       |
| <b>BÖLÜM 1</b>                                                   |           |
| <b>GİRİŞ.....</b>                                                | <b>1</b>  |
| 1.1    Literatür Özeti .....                                     | 1         |
| 1.2    Tezin Amacı .....                                         | 3         |
| 1.3    Hipotez .....                                             | 6         |
| <b>BÖLÜM 2</b>                                                   |           |
| <b>KONTROL YÖNTEMLERİ VE KATSAYI DİYAGRAM METODU .....</b>       | <b>7</b>  |
| 2.1    Klasik Kontrol Yöntemi.....                               | 8         |
| 2.2    Modern Kontrol Yöntemi.....                               | 8         |
| 2.3    Polinom Yaklaşımı Yöntemi .....                           | 8         |
| 2.3.1    Katsayı Diyagram Metodunun Yapısı.....                  | 8         |
| 2.3.2    Standart Manabe Yapısı.....                             | 10        |
| <b>BÖLÜM 3</b>                                                   |           |
| <b>DC MOTOR PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK BULUNMASI .....</b> | <b>11</b> |
| 3.1 $K_b$ ve R Değerlerinin Bulunması .....                      | 12        |
| 3.2 $K_t$ Değerinin Bulunması .....                              | 13        |
| 3.3    Sürtünme Sabitinin Bulunması .....                        | 16        |
| 3.4    Atalet Momentinin Bulunması.....                          | 18        |

|                                                                                                         |                                                                        |    |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----|-----------|
| 3.5                                                                                                     | Yay Sabitinin Bulunması .....                                          | 20 |           |
| <b>BÖLÜM 4</b>                                                                                          |                                                                        |    |           |
| <b>DC MOTOR MODELLEME VE KONTROL ÇALIŞMALARI .....</b>                                                  |                                                                        |    | <b>22</b> |
| 4.1                                                                                                     | DC Motorun Hız PID VE IPD Katsayılarının Bulunması .....               | 24 |           |
| 4.1.1                                                                                                   | DC Motorun Açısal Hız PID Katsayılarının Bulunması .....               | 24 |           |
| 4.1.2                                                                                                   | DC Motorun Açısal Hız IPD Katsayılarının Bulunması .....               | 26 |           |
| 4.1.3                                                                                                   | DC Motorun Açısal Konum IPD Katsayılarının Bulunması .....             | 27 |           |
| <b>BÖLÜM 5</b>                                                                                          |                                                                        |    |           |
| <b>ESNEK KAYIŞLI DC MOTOR SİSTEMİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE IPD İLE KONTROL ÇALIŞMALARI .....</b> |                                                                        |    | <b>36</b> |
| 5.1                                                                                                     | Deney Sistemi .....                                                    | 36 |           |
| 5.2                                                                                                     | Matematiksel Denklemlerin Elde Edilmesi .....                          | 39 |           |
| 5.3                                                                                                     | Sistemde IPD Hız Kontrolü .....                                        | 41 |           |
| 5.4                                                                                                     | Sistemde IPD Konum Kontrolü.....                                       | 47 |           |
| <b>BÖLÜM 6</b>                                                                                          |                                                                        |    |           |
| <b>ESNEK KAYIŞLI DC MOTOR SİSTEMİNİN DURUM UZAY GERİ BESLEMELİ KONTROLÜ ....</b>                        |                                                                        |    | <b>53</b> |
| 6.1                                                                                                     | Sistemin Durum Uzay İntegral Geri Besleme ile Hız Kontrolü .....       | 53 |           |
| 6.2                                                                                                     | Sistemin Durum Uzay İntegral Gözlemci Geri Besleme ile Hız Kontrolü .. | 57 |           |
| <b>BÖLÜM 7</b>                                                                                          |                                                                        |    |           |
| <b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>                                                                          |                                                                        |    | <b>61</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                                                   |                                                                        |    | <b>65</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                                                    |                                                                        |    | <b>68</b> |

## SİMGE LİSTESİ

---

|            |                          |
|------------|--------------------------|
| $B_L$      | Yük sürtünme katsayısı   |
| $B_m$      | Motor sürtünme katsayısı |
| $E$        | Zıt EMK gerilimi         |
| $i$        | Akım                     |
| $J_L$      | Yük ataleti              |
| $J_m$      | Motor ataleti            |
| $K_b$      | Zıt EMK sabiti           |
| $K_S$      | Yay katsayısı            |
| $K_t$      | Tork sabiti              |
| $L$        | Endüktans                |
| $R$        | Direnç                   |
| $T_2$      | Yay torku                |
| $T_L$      | Yük torku                |
| $T_m$      | Motor torku              |
| $V$        | Giriş gerilimi           |
| $W_L$      | Yük açısal hızı          |
| $W_m$      | Motor açısal hızı        |
| $\theta_s$ | Yay açısal yer değişimi  |

## KISALTMA LİSTESİ

---

|      |                                      |
|------|--------------------------------------|
| 3B   | Üç boyutlu çizim                     |
| BDK  | Baskı Devre Kartı                    |
| CDM  | Coefficient Diagram Method           |
| DC   | Direct Current                       |
| EMK  | Elektromotor kuvvet                  |
| IPD  | Integral Oransal Türev Kontrol       |
| KDM  | Katsayı Diyagram Metodu              |
| LQR  | Linear quadratic regulator           |
| PID  | Oransal İntegral Türev Kontrol       |
| SSI  | Durum Uzay İntegral Kontrol          |
| SSIO | Durum Uzay İntegral Gözlemci Kontrol |

## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1. 1 Tez konu içerik bilgilendirmesi .....                        | 5  |
| Şekil 2. 1 Kontrol edilecek geri beslemeli sistemin blok gösterimi..... | 9  |
| Şekil 3. 1 DC motor parametre belirleme deney düzeneği.....             | 12 |
| Şekil 3. 2 100W DC motor $K_b$ ve R parametre grafiği.....              | 13 |
| Şekil 3. 3 140W DC motor $K_b$ ve R parametre grafiği.....              | 13 |
| Şekil 3. 4 100W DC motor $K_t$ parametre grafiği .....                  | 14 |
| Şekil 3. 5 140W DC motor $K_t$ parametre grafiği .....                  | 14 |
| Şekil 3. 6 100W DC motor $K_t$ parametre grafiği .....                  | 15 |
| Şekil 3. 7 140W DC motor $K_t$ parametre grafiği .....                  | 15 |
| Şekil 3. 8 100W DC motor sürtünme sabiti grafiği.....                   | 17 |
| Şekil 3. 9 140W DC motor sürtünme sabiti grafiği.....                   | 17 |
| Şekil 3. 10 Küçük kasnağın 3B çizimi .....                              | 19 |
| Şekil 3. 11 Büyük kasnağın 3B çizimi .....                              | 20 |
| Şekil 4. 1 DC motor fiziksel gösterimi .....                            | 22 |
| Şekil 4. 2 PID kontrol yapısı .....                                     | 25 |
| Şekil 4. 3 IPD kontrol yapısı.....                                      | 26 |
| Şekil 4. 4 Açısal hız transfer fonksiyon bode diyagramı .....           | 29 |
| Şekil 4. 5 Açısal hız transfer fonksiyon IPD bode diyagramı .....       | 30 |
| Şekil 4. 6 Açısal hız transfer fonksiyon kutup haritası.....            | 30 |
| Şekil 4. 7 Açısal hız transfer fonksiyon IPD kutup haritası .....       | 31 |
| Şekil 4. 8 Konum transfer fonksiyon bode diyagramı .....                | 31 |
| Şekil 4. 9 Konum transfer fonksiyon IPD bode diyagramı .....            | 32 |
| Şekil 4. 10 Konum transfer fonksiyon kutup haritası.....                | 32 |
| Şekil 4. 11 Konum transfer fonksiyon IPD kutup haritası .....           | 33 |
| Şekil 4. 12 100W DC motor açısal hız simülasyon grafiği .....           | 33 |
| Şekil 4. 13 100W DC motor açısal hız deney grafiği.....                 | 34 |
| Şekil 4. 14 100W DC motor açısal konum simülasyon grafiği.....          | 34 |
| Şekil 4. 15 100W DC motor açısal konum deney grafiği .....              | 35 |
| Şekil 5. 1 Esnek kayışlı DC motor sisteminin fiziksel gösterimi.....    | 37 |
| Şekil 5. 2 Esnek kayışlı DC motor sisteminin 3B gösterimi.....          | 37 |
| Şekil 5. 3 Deney sisteminin ön görünümü .....                           | 38 |
| Şekil 5. 4 Deney sisteminin arka görünümü .....                         | 38 |
| Şekil 5. 5 Voltaj bölücü ve baskı devre kartı .....                     | 39 |
| Şekil 5. 6 Deney sisteminin açısal hız bode diyagramı .....             | 43 |



|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5. 7 Deney sisteminin açısal hız IPD bode diyagramı .....                     | 44 |
| Şekil 5. 8 Deney sisteminin açısal hız kutup haritası.....                          | 44 |
| Şekil 5. 9 Deney sisteminin açısal hız IPD kutup haritası .....                     | 45 |
| Şekil 5. 10 Deney sisteminin yük açısal hız simülasyon grafiği .....                | 45 |
| Şekil 5. 11 Deney sisteminin yük açısal hız deney grafiği .....                     | 46 |
| Şekil 5. 12 Deney sisteminin motor açısal hız simülasyon grafiği.....               | 46 |
| Şekil 5. 13 Deney sisteminin motor açısal hız deney grafiği .....                   | 47 |
| Şekil 5. 14 Deney sisteminin açısal konum bode diyagramı .....                      | 50 |
| Şekil 5. 15 Deney sisteminin açısal konum IPD bode diyagramı.....                   | 50 |
| Şekil 5. 16 Deney sisteminin açısal konum kutup haritası.....                       | 51 |
| Şekil 5. 17 Deney sisteminin açısal konum IPD kutup haritası .....                  | 51 |
| Şekil 5. 18 Deney sistem 100W DC motor açısal konum simülasyon grafiği .....        | 52 |
| Şekil 5. 19 Deney sistem 100W DC motor açısal konum deney grafiği .....             | 52 |
| Şekil 6. 1 Sistemin durum uzay blok gösterimi .....                                 | 54 |
| Şekil 6. 2 Durum uzayı integral kontrolü simulink modeli .....                      | 56 |
| Şekil 6. 3 Deney sisteminin açısal hız simülasyon grafiği .....                     | 56 |
| Şekil 6. 4 Deney sisteminin açısal hız deney grafiği .....                          | 57 |
| Şekil 6. 5 Bozucu gözlemci durum geri beslemesi integral kontrolü blok şeması ..... | 58 |
| Şekil 6. 6 Sistem modeli .....                                                      | 59 |
| Şekil 6. 7 Bozucu gözlemci alt sistemi.....                                         | 59 |
| Şekil 6. 8 Deney sistemin gözlemci açısal hız simülasyon grafiği.....               | 60 |
| Şekil 6. 9 Deney sistemin gözlemci açısal hız deney grafiği .....                   | 60 |
| Şekil 7. 1 Kontrolcülerin akım karşılaştırma grafiği.....                           | 62 |
| Şekil 7. 2 Kontrolcülerin tork karşılaştırma grafiği.....                           | 62 |
| Şekil 7. 3 Kontrolcülerin volt karşılaştırma grafiği .....                          | 63 |
| Şekil 7. 4 Kontrolcülerin hız karşılaştırma grafiği.....                            | 63 |

## ÇİZELGE LİSTESİ

---

|                                                                        | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 2. 1 Standart manabe formu .....                               | 10    |
| Çizelge 3. 1 Kaskat atalet momentinin belirlenmesi .....               | 19    |
| Çizelge 3. 2 Yay sabitinin belirlenmesi.....                           | 20    |
| Çizelge 3. 3 DC motorların parametreleri .....                         | 21    |
| Çizelge 4. 1 100W DC motor değerleri .....                             | 28    |
| Çizelge 4. 2 DC motorun PID hız ve konum kontrol katsayıları .....     | 29    |
| Çizelge 5. 1 Sistem motor ve yük parametre değerleri .....             | 42    |
| Çizelge 5. 2 Deney sisteminin açısal hız kontrolcü katsayıları .....   | 43    |
| Çizelge 5. 3 Deney sisteminin parametre değerleri .....                | 49    |
| Çizelge 5. 4 Deney sisteminin açısal konum kontrolcü katsayıları ..... | 49    |

**KATSAYI DİYAGRAM METODUNUN HAREKET KONTROL SİSTEMLERİNE  
UYGULANMASI**

Adem AVCU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Semih SEZER

Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Kadir ERKAN

Bu tez çalışmasında, polinom yaklaşımı yönteminden olan Katsayı Diyagram Metodu (KDM) ile hareket kontrol sistemlerine uygulanması için kontrolcü tasarımları yapılmıştır. Hareket kontrolünde kullanılan DC motorların parametreleri deneyler ve 3B çizimlerle belirlenmiştir. Hız ve konum kontrol uygulamalarının yapılacağı esnek kayışlı DC motor sistemi oluşturulmuş, kontrol katsayılarının belirlenmesinde kullanılacak olan transfer fonksiyonu ve durum uzay denklemleri çıkarılmıştır. KDM'nin DC motor hız ve konum kontrolünde PID ve IPD kontrolcülerinin karşılaştırmalı sonuçları verilmiştir. Esnek kayışlı DC motor sisteminin IPD, SSI ve SSIO kontrolcüleri tasarlanarak, kontrol çalışmalarının simülasyon ve deneysel sonuçları paylaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Katsayı Diyagram Metodu, Aktif kontrol, Sistem modelleme, DC motor, IPD kontrol

**APPLICATION OF COEFFICIENT DIAGRAM METHOD TO MOTION  
CONTROL SYSTEMS**

Adem AVCU

Department of Mechanical Engineering  
MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Semih SEZER

Co-Adviser: Assist. Prof. Dr. Kadir ERKAN

In this study, controller are designed for motion control with Coefficient Diagram Method (KDM) which is polynomial approach method. The parameters of the DC motors are determined with experimental studies and 3D drawings. A flexible belt DC motor system is established for speed and position control applications, it's transfer function and state space equations are derived from mathematical model. The results of (Coefficient Diagram Method) CDM PID and IPD controllers in the DC motor speed and position control are compared. The IPD, SSI and SSIO controllers for the flexible belt DC motor system are designed and simulation and experimental results of controllers are shared.

**Keywords:** Coefficient Diagram Method, Active control, System modelling, DC motor, IPD control

#### 1.1 Literatür Özeti

İnsanoğlu eski çağlardan günümüze kadar gelen süreç içerisinde kullanmış olduğu makineleri kontrol etmek için çeşitli çalışmalar yapmıştır. Basit sistemlerle başlayan bu denetleme ve kontrol etme ihtiyacı günümüzde sistemlerin karmaşık bir hal almasıyla daha da önemli hale gelmiştir. Sanayi Devriminin başlamasıyla ilk olarak Hollandalı C. Drebeelin (1572-1633) sıcaklık düzenleyicisi, Fransız D. Papin'in (1647-1712) buhar kazanları için bulduğu basınç düzenleyicisi ile açık çevrim kontrol sistemlerinden kapalı çevrim kontrol sistemlerine giriş yapılmıştır. Endüstriyel olarak geri beslemeli sistem ise James Watt'ın 1769'da geliştirdiği toplu hız düzenleme mekanizmasıdır. Teknik olarak yapılan uygulamalardan sonra kuramsal çalışmalara yönelik çalışmalar 19.yüzyılda James Clerk Maxwell'in regülatörün diferansiyel denklem modeli ile başlamıştır. Bu çalışma Minorsky, Nquist gibi bilim adamları tarafından referans alınarak denetim kuramı oluşturulmuştur. Bu çalışmalar günümüze kadar geliştirilerek kontrol metotlarının temeli atılmıştır. [1-2]

Geri beslemeli kontrol tasarımlarının kontrolü için klasik kontrol metotları 1940'lı yıllarda frekans-cevap metodu ile başlayan ve günümüze kadar gelen süreç içerisinde 1950'li yıllarda kök-yer metodu ve Bode diyagramı geliştirilmiştir. Modern kontrol teknikleri 1960'lı yıllarda durum-uzay gösteriminin geliştirilmesiyle ayrı bir yaklaşımın temelleri atılmıştır. 1960'li yılların ortalarında optimal kontrol olarak kutup-yerleştirme ve LQR geliştirildi. 2000'li yıllara doğru dayanıklı kontrol metotları ile daha sağlıklı kontrol mümkün hale gelmeye başlamıştır. 1980'li yıllarda ise lineer cebrik yaklaşım

metotları geliştirilmiştir. Bu metotlardan olan Katsayı Diyagram Metodu (KDM) ise 1991 yılında Prof. Dr. Shunji Manabe tarafından geliştirilmeye başlanmıştır. Manabe'nin 1998 yılında yayınlamış olduğu makalede KDM'nin kriterleri ve tasarım aşaması detaylı bir şekilde anlatılmıştır. [3-4] Manabe bu çalışmanın yanında KDM ile iki ataletli rezonant sistemlerin kontrolü için çalışmalar yapmıştır. [5] Ülkemizde ise bu konuda 2002 yılında Prof. Dr. Serdar Hamamcı doktora tezi yayınlamıştır. Yayınlamış olduğu tezde Katsayı Diyagram Metodu'nun ortaya çıkışı, diğer kontrol metotları ve KDM'nin sahip olduğu üstünlükleri, tasarım aşamaları, çok girişli ve çok çıkışlı sistemlere nasıl uygulanabileceği ve KDMCAD adını vermiş oldukları bir program geliştirerek bilgisayar ortamında kontrol için çözüm üretmiştir. Dijital kontrolcü tasarımında D-CDM çalışması yapılarak KDM'nin sanayiye yönelik uygulamaları yapılmıştır. [4] Üretim endüstrisinde, robot kol kontrolünde KDM ve geri adımlama yönteminin harmanlanmasıyla robot kol hareket kontrolü yapılabilir. Farklı bir uygulama olarak bilye-kiriş düzeneği modelinde KDM'nin Ziegler Nichols metoduna göre daha başarılı olduğu gösterilmiştir. [5-8]

İki atalet momentli rezonant sistemler için yapılan çalışmalarda sistemin tork, titreşim, hız ve konum değerlerini istenen seviyede tutmaya yönelik kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Tork kontrolünde Katsayı Diyagram Metodunun Manabe tarafından yayınlandığı zamanlarda PID-P kontrolcü kullanarak gerçekleştirilmiştir.[9]

Mekanik rezonantlı sistemlerde en çok karşılaşılan bir diğer problem ise titreşimin sıfırlanmasıdır ya da titreşimin istenen değer aralıklarında tutulmasıdır. İki ataletli rezonant sistemlerde motor ve yük arasındaki elastik shaft ya da aynı özelliği gösteren bir materyalden dolayı hız farkı burulma titreşimlerine sebep olur. [10-13]

Sistemin doğru bir şekilde modellenmesi ve sistemdeki atalet momentine ve sürtünmeye sahip nesnelerin sürtünme değerinin doğru olarak bulunması ve iki ayrı atalet momentinin arasında enerji aktarmak için kullanılan materyalin esnekliğine ait parametrelerin sağlıklı bir biçimde belirlenmesi mekanik rezonansın düşürülmesini sağlar ve sistemin başarılı bir şekilde kontrolündeki başarıyı artırır. [14] İki atalet momentli bir sistem için KDM kullanılarak PID kontrolcü için gereken parametreler

belirlenmiştir. PID, PID-P ve IPD kontrolcü tasarlanıp karşılaştırmalı sonuçları gösterilmiştir. [15-16]

1997 yılında, iki atalet momentine sahip rezonant bir sistemde parametrelerin belirlenmesi amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Çoğu sistemde yaygın olarak kullanılan DC motorların parametrelerinin belirlenmesi ve değerlerinin gerçeğe yakın olarak elde edilebilmesi ve değerlerin iyileştirilmesi kontrol edilmek istenen sistemin sağlıklı bir şekilde kontrolünü mümkün kılar. [17-21]

DC motor PID kontrol katsayılarının belirlenmesi, belirlenen  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  değerlerinin Matlab ortamında yapılan simülasyon sonuçları ve sisteme etkisinin nasıl olduğu incelenmiştir. [9-22-23]

Kontrol edilmek istenen sistemler için transfer fonksiyon ile kontrolcü tasarlanabilir ayrıca durum uzay denklemleri ile kontrolcü tasarımı yapılabilir. Durum uzay değişkenleri ile kontrol edilmek istenen sistemin, sahip olduğu değişkenlerden istenen bir değişken üzerinden alınabilmesi, sistemin bozucu girişlere dayanıklı olması ve veri alımı zor olan ya da pahalı olduğu durumlarda gözlemci tasarlanarak daha verimli bir şekilde sistem kontrolü yapılabilir. [24-27]

## **1.2 Tezin Amacı**

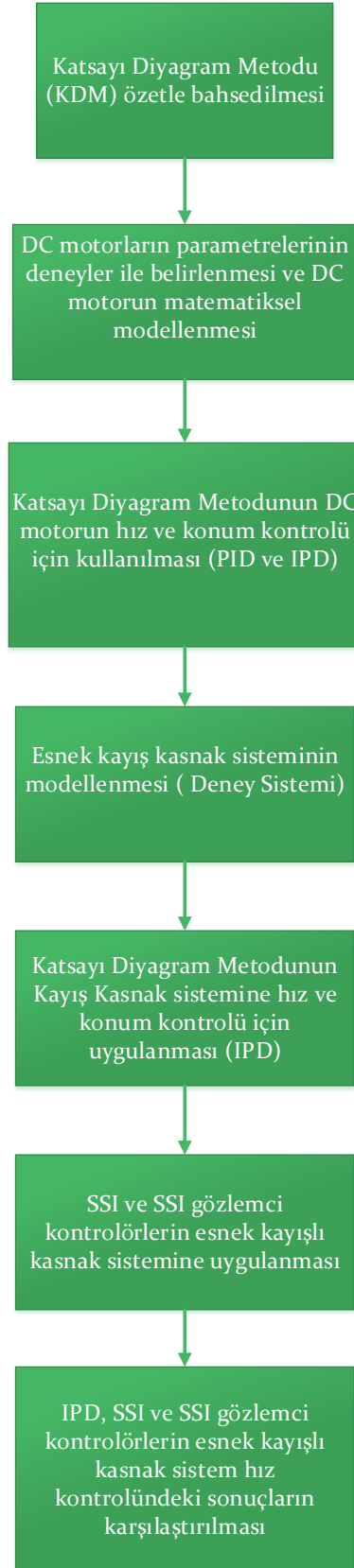
Kontrol günümüzde sanayilerin her alanında iç içe ayrılmaz bir bütün olarak sistemleri tamamlamaktadır. Hayatımızın her aşamasında kullanılan cihazların ve makinelerin yaygınlaşmasıyla, cihazların ve makinelerin kontrol edilme ihtiyacı artmaya devam etmektedir. Havacılık ve uzay sanayisinde, fabrikaların üretim kısımlarında, akıllı ev sistemlerinde, belli amaçlar için üretilmiş robotlarda ya da günlük kullandığımız araçlarda kontrol uygulamaları geliştirilmeye devam etmektedir.

Esnek kayışlı DC motor sistemi bir esnek kayış, iki adet kasnak, kasnakların bağlı olduğu iki adet DC motor ve hız ve konum ölçümlerinin alınması ve kontrolcünün geri besleme girişi için DC motorlara 2 adet enkoder ile iki ayrı atalet momentine sahip bir sistem olan deney düzeneği oluşturulmuştur. Deney düzeneğindeki DC motorların, kasnak ve esnek kayış katsayı parametrelerinin belirlenmesi için ayrı ayrı deneyler yapılmıştır. Öncelikle DC motorun hız ve konum kontrolü için gereken  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  değerleri

sonrasında ise esnek kayıslı DC motor sisteminin hız ve konum kontrolü için gereken  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  değerlerinin Katsayı Diyagram Metodu ile bulunmasıyla deney düzeneğinin hız ve konum kontrolü uygulamalı olarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Bu çalışma ile Katsayı Diyagram Metodu(KDM)'nin kontrol parametreleri  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  olan değerlerin belirlenmesi aşamalı olarak anlatılmış ve örneklerle daha anlaşılır hale gelmesi sağlanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda ise KDM'nin kontrol için nasıl kolaylıklar getirdiği ve sahip olduğu üstünlükler yadsınamaz bir şekilde görülmüş olacaktır. Tez çalışmasında takip edilen sıraya göre içerik bilgilendirmesi Şekil 1.1'de verilmiştir.





Şekil 1. 1 Tez konu içerik bilgilendirmesi

### 1.3 Hipotez

Esnek kayıslı DC motor sistemi tasarlanacak ve sistemde kullanılacak DC motorların parametreleri deneyler ile ayrı ayrı belirlenecektir. Kontrol çalışmalarında başarılı sonuçlar veren ve kolay kontrolör tasarlama olanağı sağlayan Katsayı Diyagram Metodu (KDM)'nin DC motorun hız ve konum kontrolünde PID ve IPD kontrolcü tasarımları yapılarak Matlab simulink programında simülasyonları ve uygulamalı olarak deney sonuçları karşılaştırılacaktır. DC motorun hız ve konum kontrolü başarılı olarak yapıldığında esnek kayıslı DC motor sisteminin hız ve konum kontrolü için Katsayı Diyagram Metodu ile kontrol parametrelerini oluşturan  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  değerleri belirlenerek hız ve konum kontrolünde vermiş olduğu sonuçlar gösterilecektir. Durum uzay denklemleri ile Katsayı Diyagram Metodu ile SSI ve SSI gözlemci kontrolcü tasarlanarak IPD, SSI ve SSI gözlemci kontrolcülerin deney sisteminin hız kontrolündeki performansları karşılaştırılacaktır.

### KONTROL YÖNTEMLERİ VE KATSAYI DİYAGRAM METODU

İnsanlar var olduğundan beri etrafındaki nesnelere ihtiyaçları doğrultusunda kullanarak hayatlarını kolaylaştırmak istemişlerdir. Kullanmış oldukları sistemleri kontrol etmeye başlamasıyla, kontrol çalışmaları insanların hayat standartlarını daha üst noktalara taşımıştır. Buna örnek olarak (MÖ 430) Taretumlu Achytas'ın tasarladığı otomatik güvercin ya da İskenderiyeli Heron'un yapmış olduğu su saati gibi sistemler verilebilir.

Fabrikalaşmanın başladığı sanayi devriminde ise üretimin kolaylaşması kadar hızlı üretimin kesin doğrulukla kontrolü önem kazanmaya başlamıştır, böylelikle açık döngü sistem kontrolü kapalı döngü geri beslemeli sistem kontrolüne dönüşmeye başlamıştır. James Watt'ın 1769 yılında tasarladığı toplu hız düzenleyicisi mekanik olarak buhar akışının kontrolüyle sistemin sabit hızda çalışmasını mümkün kılmıştır. [1]

Kontrol edilmek istenen sistemler ve kontrolün sürekliliğinin sağlanması doğrultusunda çeşitli kontrol yöntemleri geliştirilmiştir. Genel anlamda kontrol yöntemleri 3 grup olarak sınıflandırılabilir. Bunlar Klasik Kontrol, Modern Kontrol ve Polinom Yaklaşımıdır.[2-4]

## **2.1 Klasik Kontrol Yöntemi**

Frekans-cevap (bode) esasına dayalı olan bu yöntem sinüs dalga kullanarak sistem çıkışındaki genlik ve faz değerleri ile kontrolcü tasarımı sağlamaktadır. Bu yöntem basit olan ve referans girişinin tek olduğu ya da tek giriş-tek çıkışlı sistemlerde daha çok rağbet görmektedir. Transfer fonksiyonu ile parametre belirlenmeye çalışılır ve deneme yanılma ile kontrolcü tasarlanır.

## **2.2 Modern Kontrol Yöntemi**

Zaman domeni esası üzerine kurulu olan modern kontrol yöntemi ise çok giriş-çok çıkışa sahip ve farklı birçok referans girişinin olması durumunda sistemin kontrolünü mümkün kılmaktadır. Denklemler durum-uzay formatında gösterilmektedir. Bu yaklaşım ile deneme yanılma yapılmadan belirlenen kriterler ile kontrol edilmek istenen sistem için kontrol sağlanabilmektedir.

## **2.3 Polinom Yaklaşımı Yöntemi**

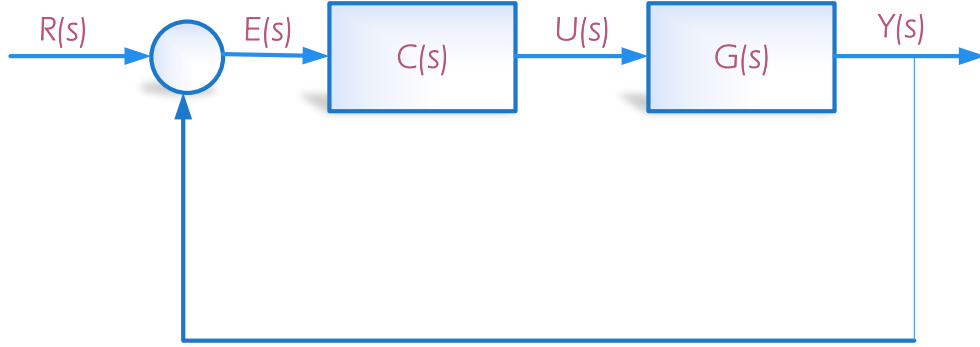
Polinom yaklaşımı ya da diğer adıyla lineer cebrik yaklaşım, klasik ve modern kontrol yöntemlerinin avantajlı kısımlarını birleştirerek daha sağlam bir kontrolcü tasarlanmasını esas alıp gürbüz bir kontrolü sağlar. Polinom yaklaşımında temel olarak istenen performans doğrultusunda polinom şeklinde bir kontrolün tasarlanmasıdır. Ayrıca klasik ve modern kontrol yöntemlerine göre tasarlanmasının daha kolay olması, kontrolör derecelerinin diğer yöntemlerden düşük olması polinom yaklaşımını ön plana çıkarmaktadır. Bu özellikleri ile her alanda rahatlıkla kullanılabilir. Katsayı Diyagram Metodu (KDM) da bir polinom Yaklaşımı olup sahip olduğu avantajlar nedeniyle hız ve konum kontrol çalışmalarında kullanılacaktır.[4]

### **2.3.1 Katsayı Diyagram Metodunun Yapısı**

Katsayı Diyagram Metodu (KDM), polinom yaklaşımının kullanılarak kontrolcü tasarlanması esasına dayanmaktadır. S. Manabe tarafından geliştirilip 1991 yılında kullanıma sunulmuştur. KDM kontrol yöntemleri içerisinde aşısız cevaba sahip

olması, kolay bir şekilde tasarlanabilmesi ve kontrol için beklenenleri diğer yöntemlere göre daha iyi verebilmesi sayesinde oldukça iyi durumdadır. [3-4]

Katsayı Diyagram Metodunun aşağıdaki şematik gösterimde referans girişi  $R(s)$ , hatayı  $E(s)$ , sistem cevabı  $U(s)$ , sistem çıkışı  $Y(s)$  ve kontrolör transfer fonksiyonunu  $C(s)$ , kontrol edilecek sistemin transfer fonksiyonu ise  $G(s)$  ile ifade edilmiş olup kapalı çevrim yapısı Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Kontrol edilecek geri beslemeli sistemin blok gösterimi

Sistemin transfer fonksiyonu:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s).G(s)}{1+C(s).G(s)} \quad (2.1)$$

Sistemin transfer fonksiyonu diğer gösterimi:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{b_m s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_0}{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_0} \quad (2.2)$$

Sistemin karakter polinomunun gösterilmesi:

$$P(s) = 1 + C(s).G(s) = \sum_{i=0}^n a_i s_i \quad (2.3)$$

Sistemin karakter polinomunun açık şekilde gösterimi:

$$P(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_n s + a_0 \quad (2.4)$$

Eşdeğer zaman sabiti:

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (2.5)$$

Performans parametreleri (indis):

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{(a_{i+1})(a_{i-1})} \quad (2.6)$$

Kararlılık sınırı:

$$\gamma^* = \frac{1}{\gamma_{i+1}} + \frac{1}{\gamma_{i-1}} \quad (2.7)$$

Lipatov- Sokolov kriterine göre kararlılık:

$$\gamma_i > 1.12375\gamma_i^* \quad (2.8)$$

### 2.3.2 Standart Manabe Yapısı

Standart Manabe Formunun katsayıları Çizelge 2.1’de verilmiştir. Denklem (2.6)’da verilmiş olan performans parametreleri (indis) Çizelge 2.1’de belirtilen katsayıların karakter polinoma uygulanmasıyla elde edilen denklemlerin çözülmesi ile kontrol katsayıları bulunabilmektedir.

Kontrol yapılarında genellikle Routh-Hurtwiz kriterleri kullanılmaktadır. KDM ise Lipatov-Sokolov kriterlerini kullanmaktadır. Lipatov-Sokolov kriteri derecesi büyük karakteristik polinomlarda bile doğrusallığı sağlaması ile Routh kriterlerinden daha üstündür. Bu sebeple KDM kararlılığı için Lipatov-Sokolov kriterleri kullanılmıştır.[4]

Çizelge 2. 1 Standart manabe formu

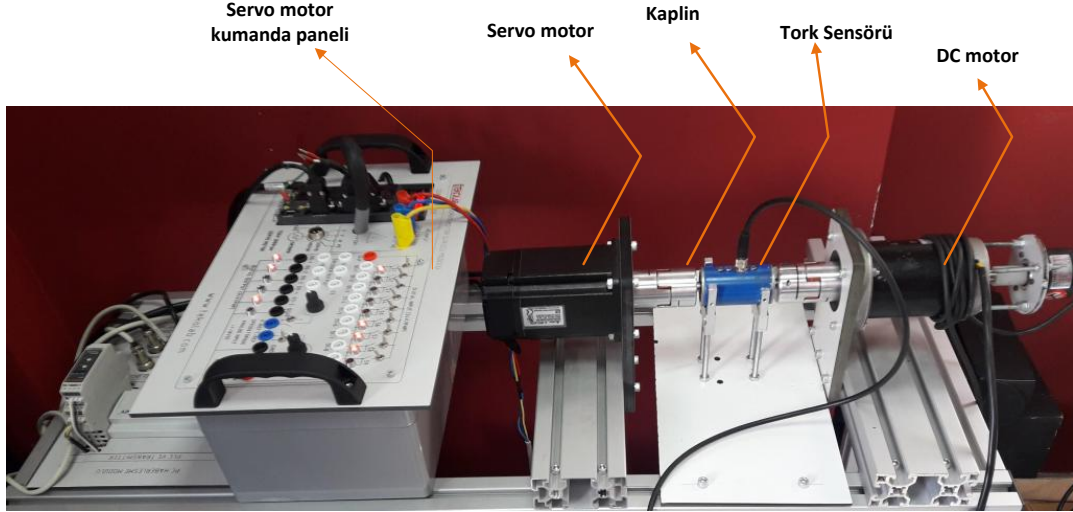
| FORM   | n | $\gamma_i$ | $\gamma_{i+1}$ | $\gamma_{i+2}$ | $\gamma_{i+3}$ | $\gamma_{i+4}$ |
|--------|---|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| MANABE | 4 | 2.5        | 2              | 2              |                |                |
|        | 5 | 2.5        | 2              | 2              | 2              |                |
|        | 6 | 2.5        | 2              | 2              | 2              | 2              |

### DC MOTOR PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK BULUNMASI

Kontrol edilmek istenen sistemin giriş ve çıkış değerlerinin bilinmesi kontrol edilecek olan sistemin doğru ve istenen sonuçları vermesi için temeldir. Sistem değişkenlerinin değerlerinin belirlenmesi için esnek kayışlı DC motor sisteminde bulunan motorun parametreleri, deneysel ve 3B modelleme ile belirleme çalışmaları yapılmıştır.

DC motorun parametreleri belirlenecek değişkenler sırasıyla Zıt emk sabiti ( $K_b$ ), Direnç ( $R$ ), Tork sabiti ( $K_t$ ), Sürtünme ( $B$ ) ve Atalet Momenti ( $J$ )'dir. Bu parametrelere ek olarak esnek kayışlı DC motor sisteminde güç aktarımında kullanılan esnek kayışın yay sabiti ( $K_s$ ) deneysel olarak belirlenmiştir.

DC motor parametrelerini belirlemek için Şekil 3.1'de verilen deney düzeneği kurulmuştur. Bu düzende servo motor, servo motor kumanda paneli, tork sensörü, kaplin ve DC motor bulunmaktadır. Frenleme amacıyla servo motor ve servo motorun frenleme miktarını ayarlamak için kumanda paneli, tork ölçümü amacıyla tork sensörü, tork sensörü ve DC motor arası bağlantıyı sağlamak amacıyla kaplinler, karakteristik değerleri belirlenecek DC motor ve güç kaynağı ile oluşturulmuştur. DC motorun hız değeri servo motor kumanda panelinden okunmuştur. Ayrıca takometre ile ölçülen hızın doğru olup olmadığı kontrol edilmiştir. Tork sensöründen alınan veriler analog olarak Matlab-Simulink üzerinden veri olarak değerleri alınmıştır.



Şekil 3. 1 DC motor parametre belirleme deney düzeneği

### 3.1 $K_b$ ve R Değerlerinin Bulunması

Zıt EMK sabiti ( $K_b$ ) ve direnç (R) değerlerinin belirlenmesi için Şekil 3.1’de kurulan deney düzeneği ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. DC motora sıfır volt değerinden başlanarak kademeli olarak arttırılmış ve DC motora verilen volt multimetre ile okunmuştur. Her volt değerinde DC motorun güç kaynağından çektiği akım multimetre ile okunmuş ve servo motor kumanda panelinden DC motorun devir sayısı ölçülmüştür. Ayrıca enkoderden devir sayısının doğru okunup okunmadığı takometre ile teyit edilmiştir. [18] Denklem (3.1)’de volt (V) ile devir sayısı ( $\omega$ ) olarak ifade edilmiştir. Denklem (3.1)’de her tarafın akıma bölünmesi ile Denklem (3.2) elde edilir.

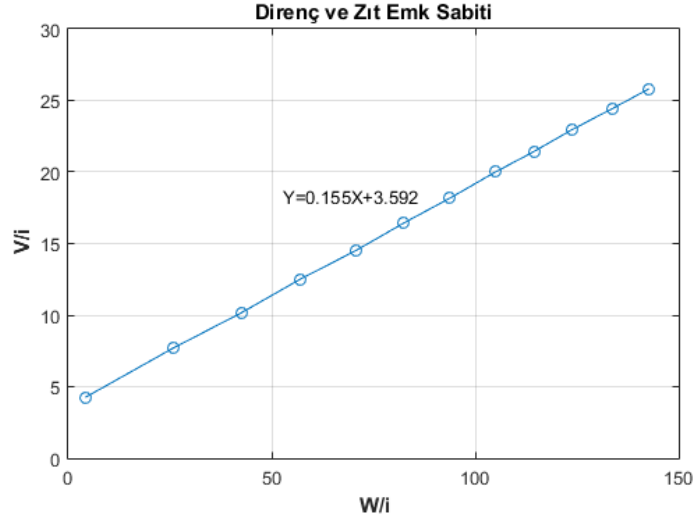
$$V = i * R + K_b * \omega \quad (3.1)$$

$$\frac{V}{i} = R + K_b * \frac{\omega}{i} \quad (3.2)$$

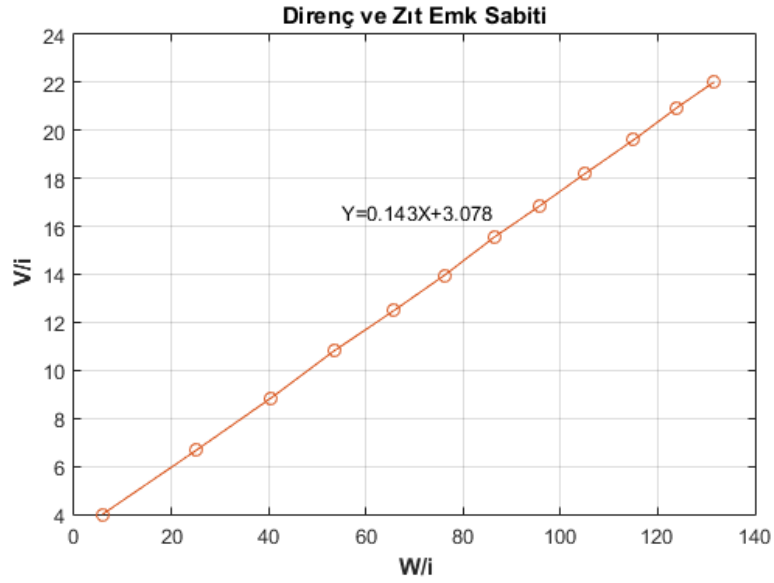
Denklem (3.2)’de volt (V), devir sayısı ( $\omega$ ) ve akım (i) değerleri ile lineer bir grafik elde edilir. Denklem (3.2)’de volt (V), devir sayısı ( $\omega$ ) ve akım (i) değerleri yerine yazıldığında  $K_b$  ve R değerleri elde edilmiş olur. Şekil 3.2’de 100W DC motor için elde edilen grafik verilmiştir.

Şekil 3.2’de belirtildiği gibi  $y=0,155x+3,592$  grafiğin eğiminden  $k_b=0,155$  ve  $R=3,592$  değerleri belirlenmiştir. Şekil 3.3’te 140W DC motor için verilen grafikte belirtildiği gibi  $y=0,143x+3,078$  ile  $k_b=0,143$  ve  $R=3,078$  değerleri belirlenmiş olur.





Şekil 3. 2 100W DC motor  $K_b$  ve R parametre grafiği



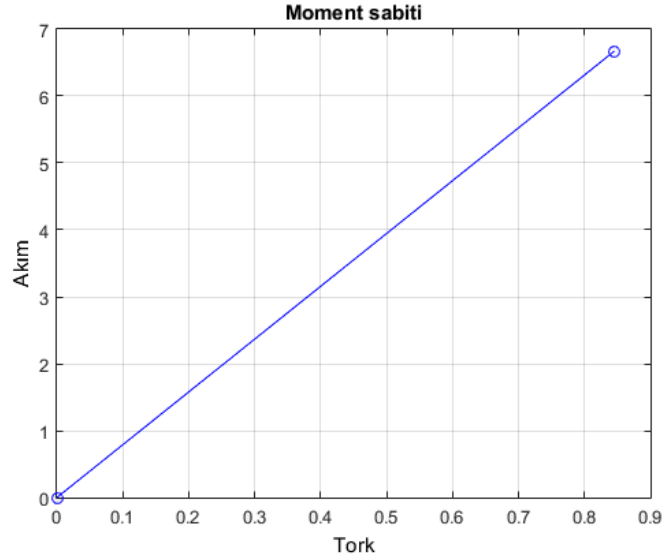
Şekil 3. 3 140W DC motor  $K_b$  ve R parametre grafiği

### 3.2 $K_t$ Değerinin Bulunması

Tork sabitinin ( $K_t$ ) bulunması için denklem (3.3) ve Şekil 3.1'de verilen deney düzeneği kullanılmıştır. Denklem (3.3)'te tork ve akım doğru orantılı olarak artmaktadır. Tork (T) ve akımın (i) oranı ile tork sabiti ( $K_t$ ) sabiti bulunur. Tork sabitinin bulunması temelinde aynı mantık doğrultusunda iki farklı yöntemle bulunmuştur. [18]

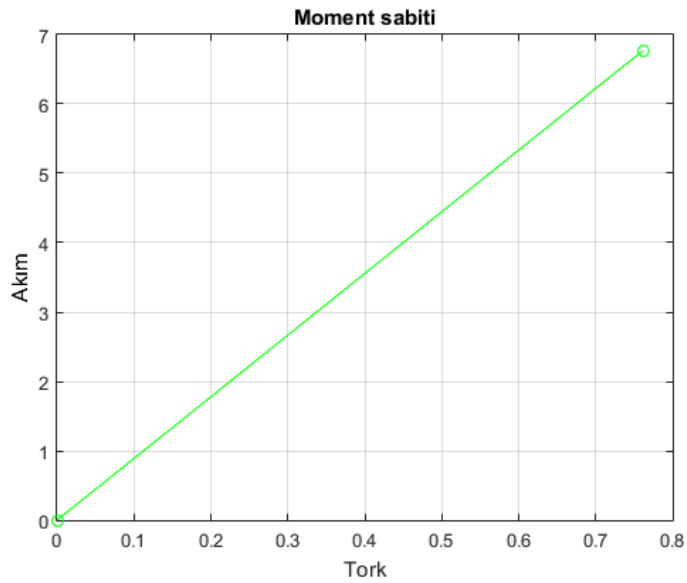
$$T = K_t * i \quad (3.3)$$

İlk yöntemde stall tork ve stall akım denilen durma torku ve durma sırasında motor tarafından çekilen akım değerleri ölçülür. Bu değerlere bağlı grafiğin çizdirilmesi ve denklem (3.3) ile 100W DC motorun tork sabiti  $K_t = 0,127$  bulunur. Şekil 3.4'te 100W DC motorun  $K_t$  grafiği verilmiştir.



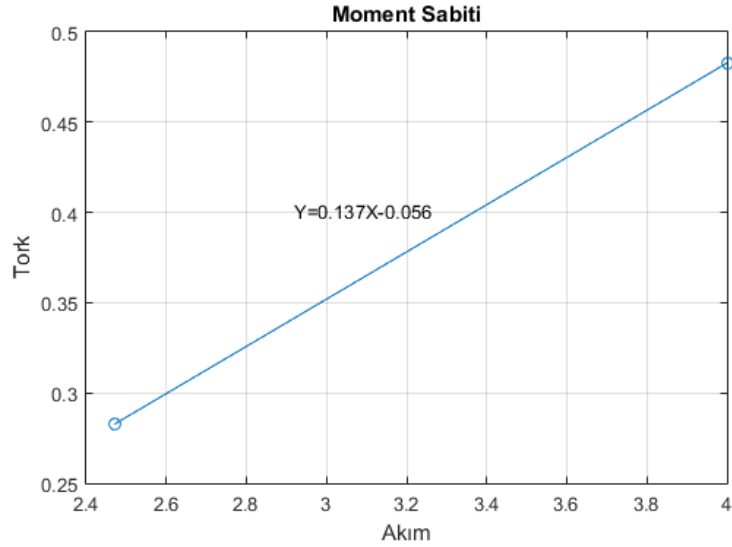
Şekil 3. 4 100W DC motor  $K_t$  parametre grafiği

Durma momenti (tork) ve durma sırasında motor tarafından çekilen akım değerlerine bağlı grafiğin çizdirilmesi ve denklem (3.3) ile 140W DC motorun tork sabiti  $K_t = 0,112$  bulunur. Şekil 3.5'te 140W DC motorun  $K_t$  grafiği verilmiştir.



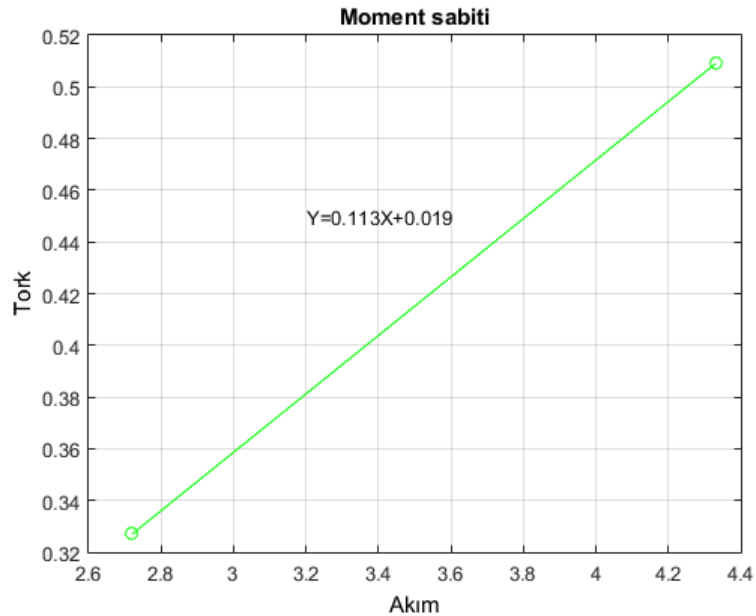
Şekil 3. 5 140W DC motor  $K_t$  parametre grafiği

İkinci yöntemde ise parametresi belirlenecek motor nominal değerinde çalıştırılır sonra yük momenti kademe kademe arttırılıp uygulanarak akım ve mil momenti ölçülür. Bu değerler ile grafik çizilerek oran elde edilir. [18] Şekil 3.6'da 100W DC motorun  $K_t$  değerine ait grafik verilmiş olup ve  $K_t = 0,137$  olarak elde edilmiştir.



Şekil 3. 6 100W DC motor  $K_t$  parametre grafiği

Şekil 3.7'de 140W DC motorun  $K_t$  değerine ait grafik verilmiş olup ve  $K_t = 0,113$  olarak elde edilmiştir.



Şekil 3. 7 140W DC motor  $K_t$  parametre grafiği

### 3.3 Sürtünme Sabitinin Bulunması

Sürtünme sabitinin belirlenmesi için Şekil 3.1’de verilen deney düzeneği kullanılmıştır. Sürtünme momentinin değeri iki farklı metotla bulunmuştur. Metotlardan ilkinde DC motor nominal gerilim değerinde çalıştırılır ve boşta çalışırken güç kaynağından çektiği akım multimetre ile okunur. Sürtünme momenti ( $M_r$ ), tork katsayısı ( $K_t$ ) ve DC motorun boşta çalışırken güç kaynağından çekmiş olduğu akım ( $I_o$ ) değerleri denklem (3.4)’te yerine yazılmasıyla  $M_r$  bulunur. Bulunan  $M_r$  ve nominal devir sayısı ( $\omega$ ) denklem (3.5)’te kullanılmasıyla sürtünme sabiti (B) elde edilir. [19-20]

$$M_r = K_t * I_o \quad (3.4)$$

$$M_r = B * \omega \quad (3.5)$$

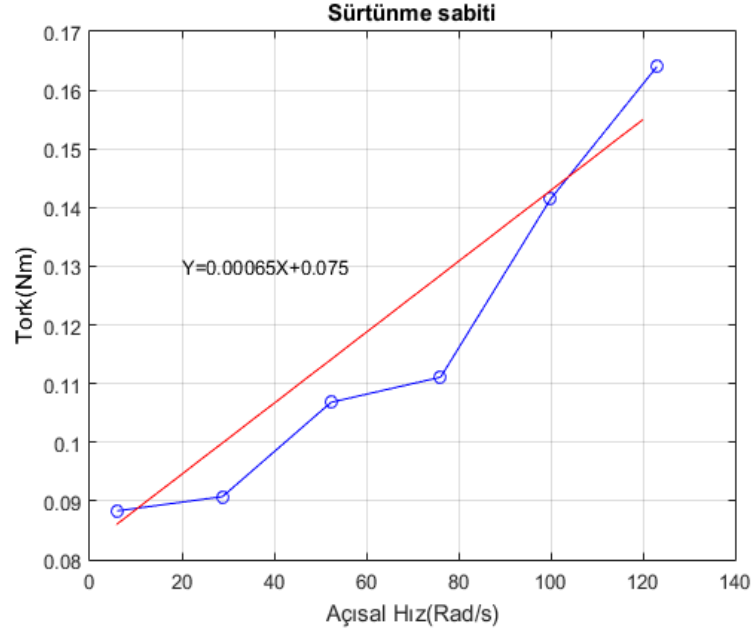
100W DC motorun boşta çektiği akım 0,93 Amper olarak multimetre ile ölçülmüştür. Denklem (3.4) ve denklem (3.5) kullanılmasıyla  $B= 0,00086$  bulunur. 140W DC motorun boşta çektiği akım 1,08 Amper ölçülmüştür. Denklem (3.4) ve denklem (3.5)’in kullanılmasıyla  $B= 0,00095$  bulunur.

İkinci metot ise ölçüm yapılacak DC motor sabit hız ile çalıştırılır. Sabit hız değerinde çalışırken hız değişimi olmadığından denklem (3.6)’dan denklem (3.7)’ye dönüşmüş olur. [18]

$$T(t) = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \dot{\theta} + T_l \quad (3.6)$$

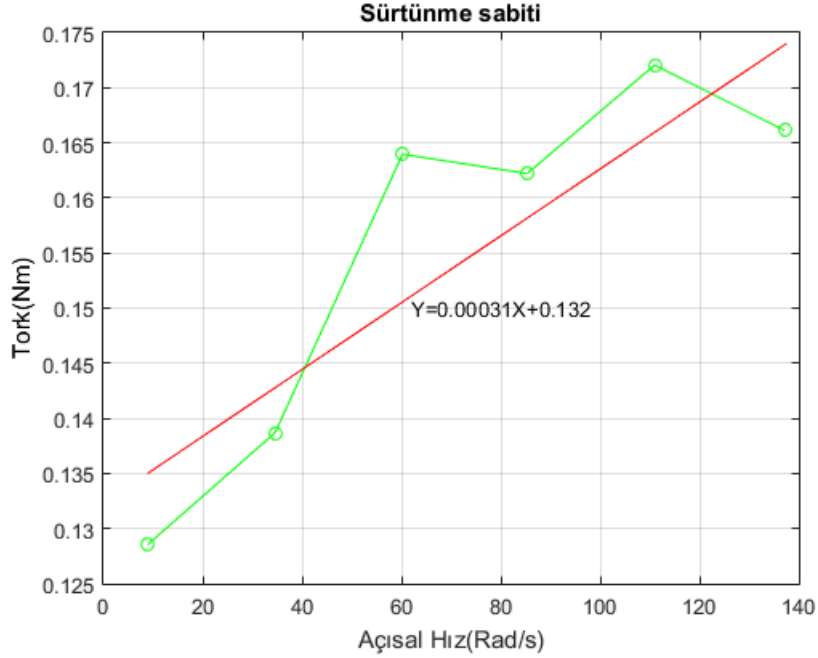
$$T(t) = B \cdot \omega + T_l \quad (3.7)$$

Denklem (3.7)’de belirlenen bir yük momentinde motorun mil torku (T), yük momenti ( $T_l$ ) açısal hız değerine ( $\omega$ ) bağlı grafik çizimiyle 100W DC motor için Şekil 3.8’deki grafik elde edilir. 100W DC motorun sürtünme sabiti değeri  $B= 0,00065$  olarak elde edilir.



Şekil 3. 8 100W DC motor sürtünme sabiti grafiği

Belirlenen bir yük momentinde motorun mil momenti (T) ve açısal hız değerine ( $\omega$ ) bağlı grafik çizimiyle 140W DC motor için Şekil 3.9'daki grafik elde edilir. 140W DC motorun sürtünme sabiti değeri  $B=0,00031$  olarak elde edilmiştir.



Şekil 3. 9 140W DC motor sürtünme sabiti grafiği

### 3.4 Atalet Momentinin Bulunması

Atalet momentinin bulunması için Şekil 3.1'de verilen deney düzeneği kullanılmıştır. Atalet momentinin bulunması için iki ayrı yöntem kullanılabilir. Yöntemlerin ilkinde DC motorun atalet momenti bulunurken denklem (3.8) tork ve ivmenin elde edilmesi için sırasıyla denklem (3.9) ve denklem (3.10) kullanılmıştır. [18]

$$J = \frac{T}{a} \quad (3.8)$$

$$T = K_t * i_{max} \quad (3.9)$$

$$a = \frac{\omega}{t} \quad (3.10)$$

Denklem (3.8) atalet momentinin (J) elde edilmesi için aşamalı olarak denklem (3.9)'daki ivmelenme torkunun (T) bulunması için motorun ilk çalışma anında çekilen çekilen maksimum akımın ( $i_{max}$ ) bilinmesi gereklidir ve bu değer akım sensörü veya multimetre ile ölçülür. Denklem (3.10)'da ivmelenme ise açısal hız ( $\omega$ ) ve zaman oranının alınması ile bulunur. Denklem (3.8)'de 100W ve 140W DC motorların atalet momenti değerleri sırası ile 0,00005 ve 0,000055 Nm/Rad/s<sup>2</sup> olarak bulunmuştur.

İkinci yöntem ile atalet momenti bilinen ( $J_{bilinen}$ ) bir kasnak ya da motor vasıtasıyla atalet moment değeri bilinmeyen ( $J_{bilinmeyen}$ ) kasnağın ya da DC motorun atalet momenti değeri bulunur. Bu yöntem ile ataleti bilinen DC motorun durma süresi ve atalet değeri bulunmak istenen kasnak denklem (3.11)'de zaman oranı kullanılmasıyla atalet moment oranı elde edilir. Yapılan deney ile kasnaklar takılmadan 140W DC motor nominal volt (V) verilerek nominal hız değerine ( $\omega$ ) ulaştığında durdurulmuş ve durma zamanı ( $t_{bilinen}$ ) olarak elde edilmiştir. 140W DC motora küçük kasnak takılmış ve durma süresi alınmış ve bu süre denklem (3.11)'de ( $t_{top}$ ) olarak yazılarak atalet momenti bilinmeyen küçük kasnağın atalet moment değeri elde edilmiştir. [21]

$$J_{bilinmeyen} = J_{bilinen} * \left( \frac{t_{top} - t_{bilinen}}{t_{bilinen}} \right) \quad (3.11)$$

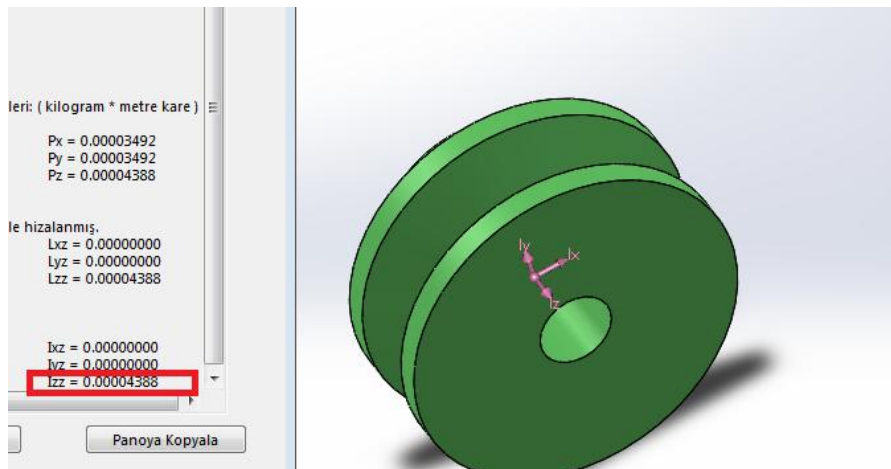
140W DC motorun atalet moment değeri 0,000055 Nm/Rad/s<sup>2</sup> olarak bilinmektedir. 140W DC motorun kasnaklı ve kasnaksız durma süreleri ölçülüp küçük kasnağın atalet değeri elde edilmiştir. Çizelge 3.1'de 140W DC motorun kasnaksız durma süresi ve DC

motora küçük kasnak takıldığında durma süresi verilmiş ve denklem (3.11)'in kullanılmasıyla küçük kasnağın elde edilen atalet momenti değeri verilmiştir. Küçük kasnağın atalet moment değeri Çizelge 3.1'de 0,00003 olduğu görülmüştür. Şekil 3.10'da verilen kasnağın üç boyutlu çizimindeki atalet momenti değeri 0,000044 olduğu görülmüştür.

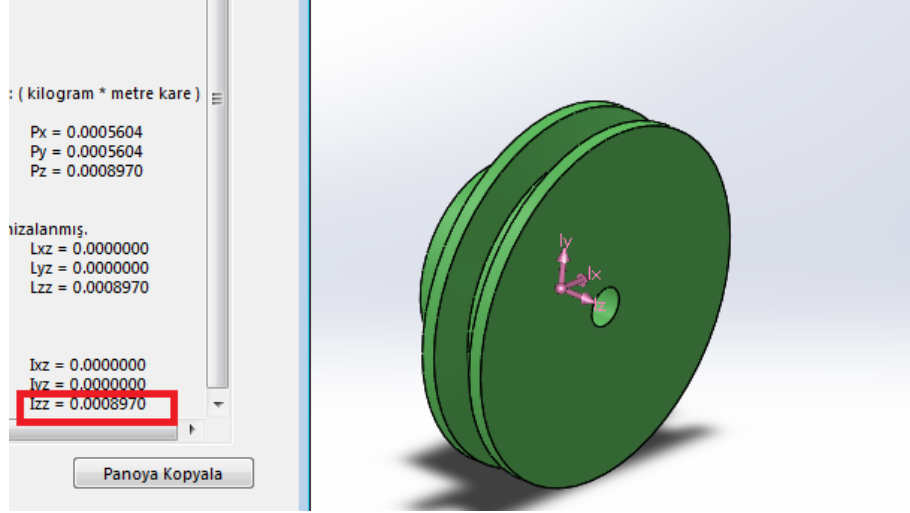
Çizelge 3. 1 Kasnak atalet momentinin belirlenmesi

|               | DURMA SÜRELERİ (s) | ATALET DEĞERLERİ (Nm/Rad/s <sup>2</sup> ) |
|---------------|--------------------|-------------------------------------------|
| 140W DC MOTOR | 0,587              | 0,000055                                  |
| KÜÇÜK KASNAK  | 0,903              | 0,00003                                   |

Deneyel olarak bulunan parametre sonuçları, deneyde kullanılacak olan 100W ve 140W DC motorların ve kasnakların atalet moment değerleri ayrı ayrı deneysel çalışmalarla bulunmuştur. Kasnakların atalet moment değerleri küçük kasnak için Şekil 3.10'daki 0,00004 ve büyük kasnak için Şekil 3.11'deki 0,00089 esas alınmıştır. DC motor ve esnek kayışlı DC motor sisteminin hız ve konum kontrolünde, 100W DC motor ve büyük kasnak beraber, 140W DC motor ise küçük kasnak ile beraber kullanılmıştır. Bu değerler yuvarlatılmış değerleri ile yazılmış olup, atalet momenti değerleri DC motor ve üzerindeki kasnak için toplam değeri ile Çizelge 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3. 10 Küçük kasnağın 3B çizimi



Şekil 3. 11 Büyük kasnağın 3B çizimi

### 3.5 Yay Sabitinin Bulunması

Esnek kayışlı DC motor sisteminde iki DC motordan biri motor olarak, diğeri yük olarak kullanılmıştır. Esnek kayışlı DC motor sistemi Şekil 5.2’de verilmiştir. Motordan yüke güç aktarımında esnek kayış kullanılmıştır. Yay sabitinin bulunması için denklem (3.12)’de moment (M) ve esnek kayış yer değişimi ( $\theta$ ) oranı ile yay sabiti ( $K_s$ ) elde edilmiştir. Çizelge 3.2’de verilen moment ve konum denklem (3.12)’de kullanıldığında yay sabiti değeri ( $K_s$ )=1,09 olarak bulunur.

$$M = K_s * \theta \quad (3.12)$$

Çizelge 3. 2 Yay sabitinin belirlenmesi

|                       | MOMENT DEĞERİ (M) | KONUM DEĞERİ ( $\theta$ ) |
|-----------------------|-------------------|---------------------------|
| ORTALAMA ÖLÇÜM DEĞERİ | 0,702             | 0,644                     |

Yay sabiti ( $K_s$ )’nin bulunması için Şekil 5.2’deki deney sisteminde küçük kasnak sabit tutulup, tork sabiti ( $K_t$ )’si bilinen DC motorun akım sensöründen okunan akım değeri ile moment (tork) ve açısal konum değeri ise DC motor miline bağlanan enkoder ile elde edilmiştir.

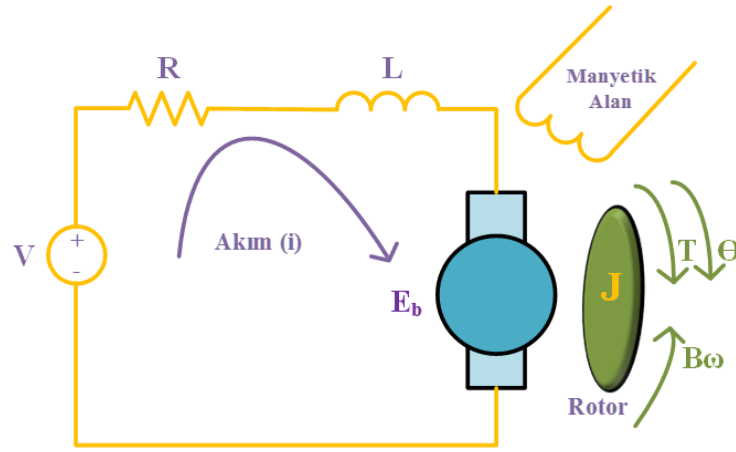


Çizelge 3. 3 DC motorların parametreleri

| 100W<br>MOTOR   | BULUNAN<br>DEĞER | BİRİMİ            | 140W<br>MOTOR   | BULUNAN<br>DEĞER | BİRİMİ            |
|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| $K_b$           | 0,155            | V.s/Rad           | $K_b$           | 0,143            | V.s/Rad           |
| $K_t$           | 0,137            | N.m/A             | $K_t$           | 0,113            | N.m/A             |
| B               | 0,00095          | N.m.s/rad         | B               | 0,00086          | N.m.s/rad         |
| R               | 3,592            | Ohm( $\Omega$ )   | R               | 3,078            | Ohm( $\Omega$ )   |
| L               | 0,1              | Henry (H)         | L               | 0,01             | Henry (H)         |
| $J_{motor100W}$ | 0,001            | Kg.m <sup>2</sup> | $J_{motor140W}$ | 0,0001           | Kg.m <sup>2</sup> |
| $K_s$           | 1,09             | Nm/rad            |                 |                  |                   |

Not: Endüktans (L) değerleri ölçüm yapılmadan kabul değerleri kullanılmıştır.

## DC MOTOR MODELLEME VE KONTROL ÇALIŞMALARI



Şekil 4. 1 DC motor fiziksel gösterimi

DC motorun modellenmesi için kullanılan fiziksel gösterimi Şekil 4.1'de verilmiştir. Denklem (4.1) ve denklem (4.15) arasındaki denklemlerde değişkenler zıt EMK sabiti ( $K_b$ ), direnç ( $R$ ), tork sabiti ( $K_t$ ), sürtünme sabiti ( $B$ ), atalet momenti ( $J$ ), açısal hız ( $\omega$ ), açısal konum ( $\theta$ ), tork ( $T$ ), zıt EMK voltajı ( $E_b$ ), akım ( $i$ ), volt ( $V$ ), ve endüktans ( $L$ ) olarak ifade edilmiştir.

Kirchoff Voltaj Kuralından (KVK):

$$V = i * R + L * \frac{di}{dt} + E_b \quad (4.1)$$

Elektromotor voltaj denklemi:

$$E_b = K_b * \frac{d\theta}{dt} = K_b * \omega \quad (4.2)$$

Tork akım katsayı denklemi:

$$T = K_t * i \quad (4.3)$$

Tork denklemi:

$$T = J * \frac{d^2\theta}{dt^2} + B * \frac{d\theta}{dt} = J * \dot{\omega} + B * \omega \quad (4.4)$$

Denklemler giriş voltaj çıkış açısal hız olmak üzere Laplace dönüşümleriyle yazıldığında,

$$V(s) = i(s) * (L * s + R) + E_b(s) \quad (4.5)$$

$$E_b = K_b * \omega(s) \quad (4.6)$$

$$T = K_t * i(s) \quad (4.7)$$

$$T = (J * s + B) * \omega(s) \quad (4.8)$$

Denklem (4.7)'nin denklem (4.8) ile eşitlenmesiyle,

$$T = K_t * i(s) = (J * s + B) * \omega(s) \quad (4.9)$$

Akımın denklemden çekilmesiyle,

$$i(s) = \frac{(J*s+B)*\omega(s)}{K_t} \quad (4.10)$$

Denklem (4.5)'de denklem (4.10)'un yazılmasıyla,

$$V(s) = \frac{(J*s+B)*\omega(s)}{K_t} * (L * s + R) + E_b(s) \quad (4.11)$$

Denklem (4.11)'de istenen ifadeler olan volt (V) ve açısal hız ( $\omega$ ) denklemden çekilmesiyle, DC motorun açısal hıza bağlı transfer fonksiyonu denklem (4.12) ve açısal konuma bağlı transfer fonksiyonu denklem (4.13) olarak elde edilir.

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{(L*s+R)*(J*s+B)+K_t*K_b} \quad (4.12)$$

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{s*((L*s+R)*(J*s+B)+K_t*K_b)} \quad (4.13)$$

DC motorun diferansiyel denklemlerine bağlı olarak durum uzay denklemleri açısal hız ve konum sırasıyla (4.15) ve (4.16)'de verilmiştir.

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (4.14)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & \frac{Kt}{J} \\ -\frac{Kb}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/L \end{bmatrix} V \quad Y = [1 \ 0] \begin{bmatrix} \omega \\ i \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

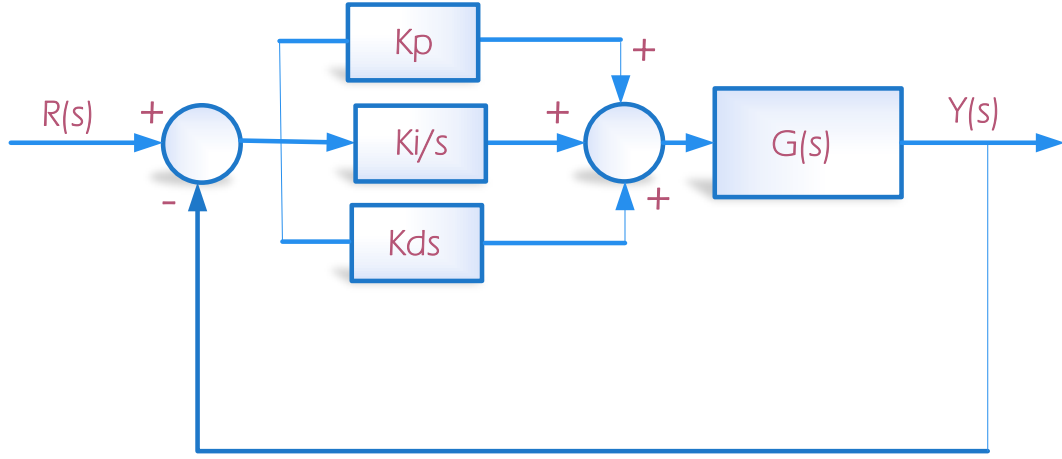
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{J} & \frac{Kt}{J} \\ 0 & -\frac{Kb}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/L \end{bmatrix} V \quad Y = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ i \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

#### 4.1 DC Motorun Hız PID VE IPD Katsayılarının Bulunması

Yaygın bir kontrolcü olarak kullanılan PID ile DC motorun kontrolü için gereken  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  katsayıları öncelikle manabe formu uygulanarak bulunur. Bulunan katsayılar Matlab simulink programı ile Şekil 5.2'de verilen deney düzeneğindeki 100W DC motor simülasyonunda ve DC motorun gerçek zamanlı açısal hız kontrol çalışmalarında kullanılmıştır.

##### 4.1.1 DC Motorun Açısal Hız PID Katsayılarının Bulunması

Şekil 4.2'de PID kontrol tasarımında kullanılan kapalı çevrim yapı gösterilmiştir. Referans giriş  $R(s)$ , kontrol edilecek sistem  $G(s)$ , sistem çıkışı  $Y(s)$ , oransal kontrol katsayısı ( $K_p$ ), integral kontrol katsayısı ( $K_i$ ) ve türev kontrol katsayısı ( $K_d$ ) ile belirtilmiştir.



Şekil 4.2 PID kontrol yapısı

PID kontrol yapısında  $G(s)$  yerine DC motorun açısal hız transfer fonksiyonunun yazılması ile PID kontrol düzeni oluşur. Denklem (4.12)'nin PID katsayıları çarpımı ile DC motorun kapalı çevrim transfer fonksiyonu denklem (4.17) ve karakter polinomu denklem (4.18) olarak elde edilir.

$$TF = \frac{K_t * (K_d * s^2 + K_p * s + K_i)}{(K_i * K_t + B * R * s + K_b * K_t * s + K_p * K_t * s + B * L * s^2 + J * L * s^3 + K_d * K_t * s^2 + J * R * s^2)} \quad (4.17)$$

$$KP = J * L * s^3 + (B * L + K_d * K_t + J * R) * s^2 + (B * R + K_b * K_t + K_p * K_t) * s + K_i * K_t \quad (4.18)$$

Manabe formunun kullanılacağı eşdeğer zaman sabiti ( $\tau$ ) ve indisler ( $\gamma_1, \gamma_2$ ) sırasıyla denklem (4.19), denklem (4.20), denklem (4.21)'de verilmiştir.

$$\tau = \frac{(B * R + K_b * K_t + K_p * K_t)}{K_i * K_t} ; \quad \tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (4.19)$$

$$\gamma_1 = \frac{(B * R + K_b * K_t + K_p * K_t)^2}{K_i * K_t} ; \quad \gamma_1 = \frac{a_1^2}{a_2 * a_0} \quad (4.20)$$

$$\gamma_2 = \frac{(B * L + K_d * K_t + J * R)^2}{(J * L) * (B * R + K_b * K_t + K_p * K_t)} ; \quad \gamma_2 = \frac{a_2^2}{a_3 * a_1} \quad (4.21)$$

Denklem (4.19), denklem (4.20) ve denklem (4.21)'in  $\tau, \gamma_1, \gamma_2$  ortak çözümü ile elde edilen  $K_p, K_i$  ve  $K_d$  denklemleri sırasıyla denklem (4.22), denklem (4.23) ve denklem (4.24)'de verilmiştir.

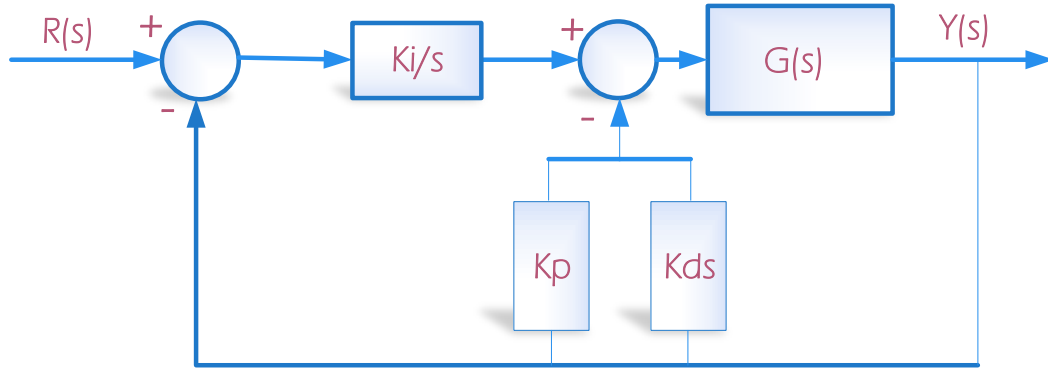
$$K_p = (J * L * \gamma_1^2 * \gamma_2^2 - K_b * K_t * \tau^2) / (K_t * \tau^2) \quad (4.22)$$

$$K_i = (J * L * \gamma_1^2 * \gamma_2) / (K_t * \tau^3) \quad (4.23)$$

$$K_d = (J * L * \gamma_1 * \gamma_2 - J * R * \tau) / (K_t * \tau) \quad (4.24)$$

#### 4.1.2 DC Motorun Açısız Hız IPD Katsayılarının Bulunması

PID kontrolörler günümüzde kontrol uygulamalarında çok sık olarak kullanılmaktadır. PID Kontrolör yapılarında yapılan değişiklikler ile farklı kontrolcü (kontrolör) tasarımları yapılmıştır. Bu yapılardan birisi olan IPD kontrolör kapalı çevrim blok şeması Şekil 4.3'te verilmiştir. Referans giriş  $R(s)$ , kontrol edilecek sistem  $G(s)$ , sistem çıkışı  $Y(s)$ , oransal kontrol katsayısı ( $K_p$ ), integral kontrol katsayısı ( $K_i$ ) ve türev kontrol katsayısı ( $K_d$ ) ile belirtilmiştir.



Şekil 4. 3 IPD kontrol yapısı

IPD kontrol yapısında  $G(s)$  yerine DC motorun açısız hız transfer fonksiyonunun yazılması ile IPD kontrol düzeni oluşur. Denklem (4.12)'nin IPD katsayıları çarpımı ile DC motorun kapalı çevrim transfer fonksiyonu denklem (4.25) ve karakter polinomu denklem (4.26) olarak elde edilir.

$$TF = \frac{K_t * K_i}{(K_i * K_t + B * R * s + K_b * K_t * s + K_p * K_t * s + B * L * s^2 + J * L * s^3 + K_d * K_t * s^2 + J * R * s^2)} \quad (4.25)$$

$$KP = J * L * s^3 + (B * L + K_d * K_t + J * R) * s^2 + (B * R + K_b * K_t + K_p * K_t) * s + K_i * K_t \quad (4.26)$$

Elde edilen karakter PID ve IPD karakter polinomlarının aynı olduğu denklem (4.18) ve denklem (4.26)'da görülmektedir. Bu sebeple elde edilecek olan PID katsayıları IPD ile aynı olmaktadır.

#### 4.1.3 DC Motorun Açısal Konum IPD Katsayılarının Bulunması

PID kontrolör karakter polinomu katsayıların aynı olması nedeniyle PID ya da IPD kapalı çevrim kontrolör katsayılarının belirlenmesinde PID kontrolör için tasarım yapılmıştır. Bulunan PID kontrolör katsayıları IPD kontrolöre de uygulanarak DC motorun açısal konum kontrolü gerçekleştirilmiştir. DC motorun açısal konum transfer fonksiyonu denklem (4.13)'ün ve Şekil 4.2'de verilen PID kontrolör yapısının kullanılmasıyla kapalı çevrim transfer fonksiyonu denklem (4.27) ve karakter polinomu denklem (4.28) elde edilir.

$$TF = \frac{K_t(K_d*s^2 + K_p*s + K_i)}{(K_i*K_t + B*R*s^2 + K_b*K_t*s + K_b*K_t*s^2 + K_p*K_t*s + B*L*s^3 + J*L*s^4 + K_d*K_t*s^2 + J*R*s^3)} \quad (4.27)$$

$$KP = J * L * s^4 + (B * L + J * R) * s^3 + (B * R + K_b * K_t + K_d * K_t) * s^2 + (K_p * K_t) * s + K_i * K_t \quad (4.28)$$

Manabe formunun kullanılacağı eşdeğer zaman sabiti ( $\tau$ ) ve indisler ( $\gamma_1, \gamma_2$ ) sırasıyla denklem (4.29), denklem (4.30), denklem (4.31)'te verilmiştir.

$$\tau = \frac{(K_p * K_t)}{K_i * K_t} ; \quad \tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (4.29)$$

$$\gamma_1 = \frac{(K_p * K_t)^2}{(B * R + K_b * K_t + K_d * K_t) * (K_i * K_t)} ; \quad \gamma_1 = \frac{a_1^2}{a_2 * a_0} \quad (4.30)$$

$$\gamma_2 = \frac{(B * R + K_b * K_t + K_d * K_t)^2}{(B * L + J * R) * (K_p * K_t)} ; \quad \gamma_2 = \frac{a_2^2}{a_3 * a_1} \quad (4.31)$$

Denklem (4.29), denklem (4.30) ve denklem (4.31)'un  $\tau, \gamma_1, \gamma_2$  ortak çözümü ile elde edilen  $K_p, K_i$  ve  $K_d$  denklemleri sırasıyla denklem (4.32), denklem (4.33) ve denklem (4.34)'de verilmiştir.

$$K_p = (B * L * \gamma_1^2 * \gamma_2 + J * R * \gamma_1^2 * \gamma_2) / (K_t * \tau^2) \quad (4.32)$$

$$K_i = (B * L * \gamma_1^2 * \gamma_2 + J * R * \gamma_1^2 * \gamma_2) / (K_t * \tau^3) \quad (4.33)$$

$$K_d = (B * L * \gamma_1^2 * \gamma_2 + J * R * \gamma_1^2 * \gamma_2 - B * R * \tau * \gamma_2 - K_b * K_t * \tau * \gamma_2) / (K_t * \tau * \gamma_1) \quad (4.34)$$

Çizelge 4. 1 100W DC motor değerleri

| 100W MOTOR  | DEĞER   |
|-------------|---------|
| $K_b$       | 0,155   |
| $K_t$       | 0,137   |
| B           | 0,00095 |
| R           | 3,592   |
| L           | 0,1     |
| $J_{motor}$ | 0,001   |

Çizelge 4.1'deki 100W DC motorun parametre değerleri PID  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  katsayıları denklem (4.22), denklem (4.23) ve denklem (4.24)'te yazıldığında, DC motorun açışal hız IPD ve PID katsayıları  $\tau = 0,15$ ,  $\gamma_1 = 2,6$ ,  $\gamma_1 = 2$  alınması sonucunda  $K_p=0,284$ ;  $K_i = 2,92$ ;  $K_d = -0,0009$  elde edilir.

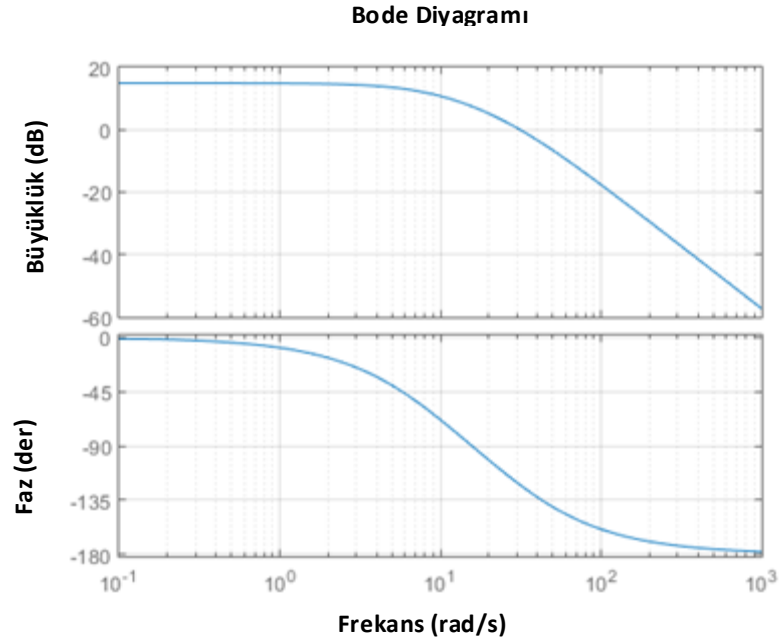
Konum PID  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  katsayıları denklem (4.32), denklem (4.33) ve denklem (4.34)'te yazıldığında  $\tau = 0,3$ ,  $\gamma_1 = 2,5$ ,  $\gamma_1 = 2$  alınması ile  $K_p = 3,74$ ;  $K_i = 12,46$ ;  $K_d = 0,27$  elde edilir. Katsayı Diyagram Metodu (KDM) ile hesaplanan PID kontrolcü katsayıları, Matlab simulink programında gerçekleştirilen 100W DC motor simülasyon ve deneysel kontrol çalışma sonuçları Çizelge 4.2'te verilmiştir.



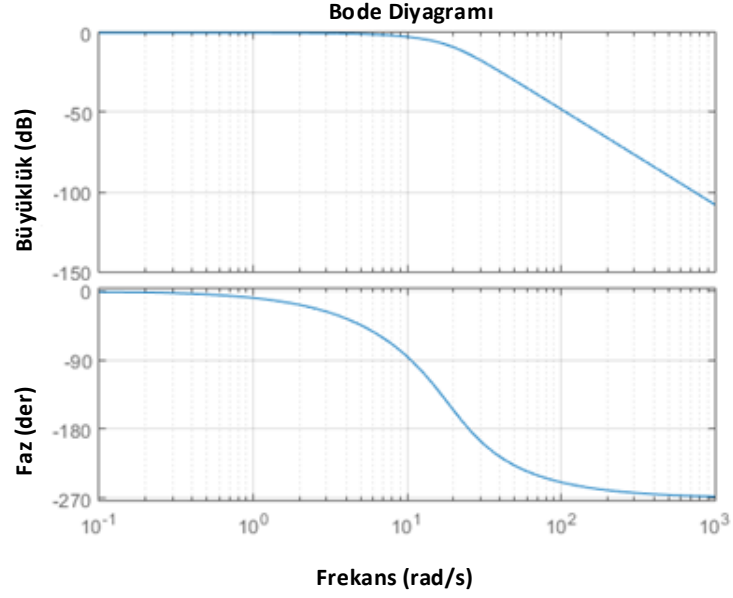
Çizelge 4. 2 DC motorun PID hız ve konum kontrol katsayıları

| HIZ            | $K_p$ | $K_i$ | $K_d$   |
|----------------|-------|-------|---------|
| HESAPLANAN     | 0,284 | 2,92  | -0,0009 |
| SİMÜLASYON     | 0,284 | 2,92  | -0,0009 |
| GERÇEK ZAMANLI | 0,35  | 2     | -0,0009 |
| KONUM          | $K_p$ | $K_i$ | $K_d$   |
| HESAPLANAN     | 3,74  | 12,46 | 0,27    |
| SİMÜLASYON     | 3,74  | 12,46 | 0,27    |
| GERÇEK ZAMANLI | 3,70  | 9,60  | 0,40    |

100W DC motorun açısız hız transfer fonksiyon bode diyagramı Şekil 4.4'te ve açısız hız IPD transfer fonksiyon bode diyagramı Şekil 4.5'te verilmiştir.

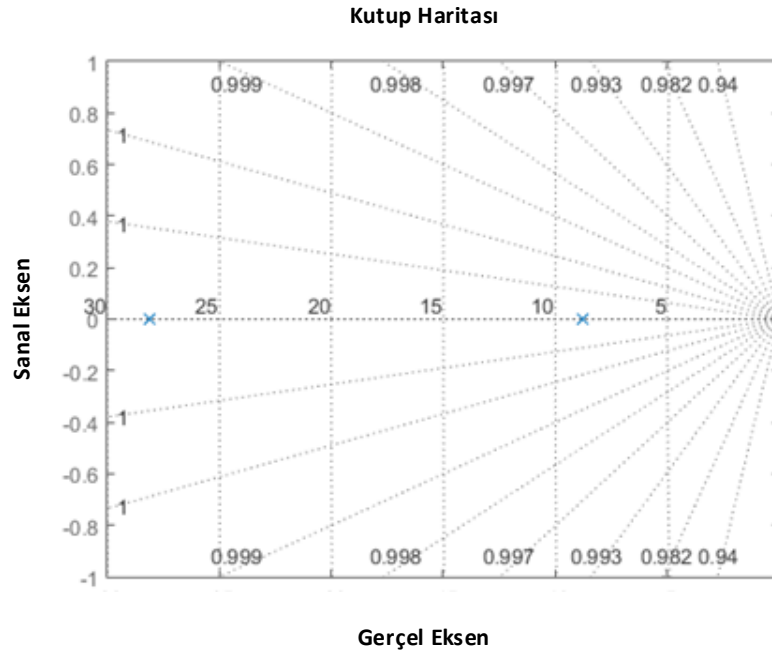


Şekil 4. 4 Açısız hız transfer fonksiyon bode diyagramı

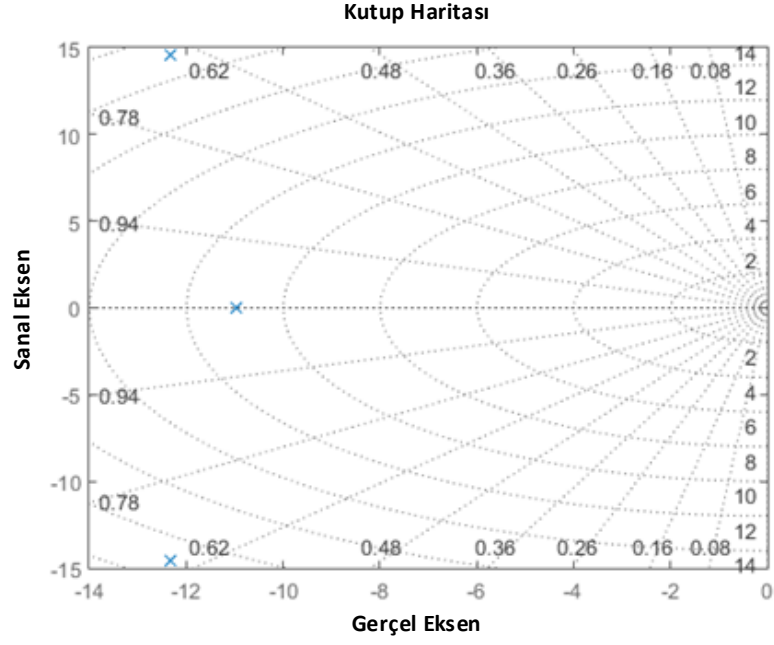


Şekil 4. 5 Açısal hız transfer fonksiyon IPD bode diyagramı

100W DC motorun açısal hız transfer fonksiyon kutup haritası Şekil 4.6'da ve açısal hız IPD transfer fonksiyon kutup haritası Şekil 4.7'de verilmiştir.

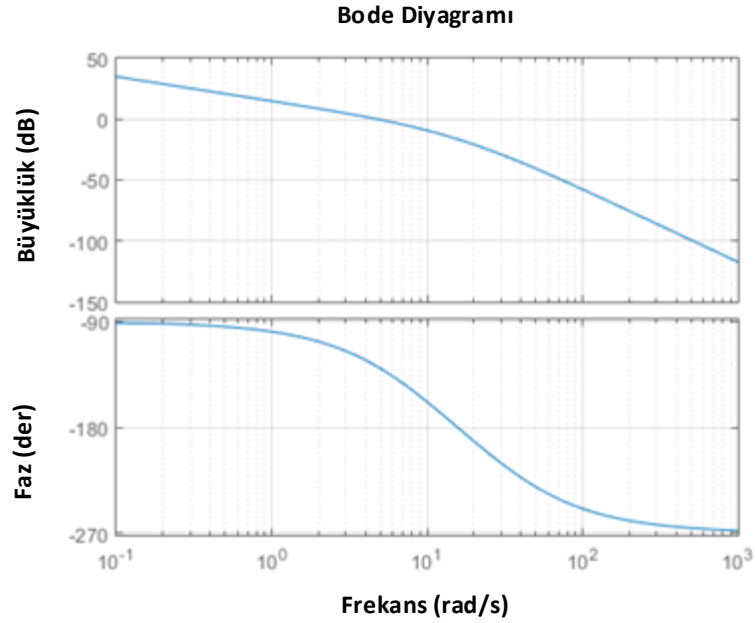


Şekil 4. 6 Açısal hız transfer fonksiyon kutup haritası

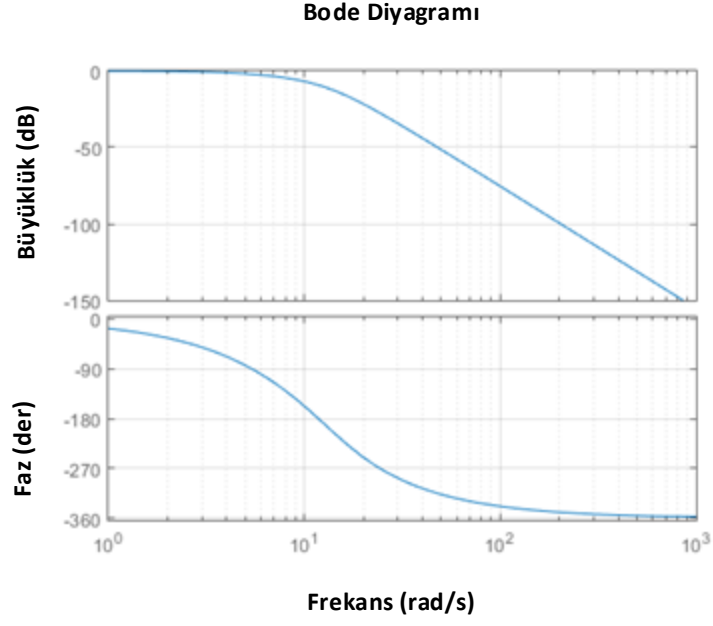


Şekil 4. 7 Açısal hız transfer fonksiyon IPD kutup haritası

100W DC motorun açısal konum transfer fonksiyon bode diyagramı Şekil 4.8'de ve açısal konum IPD transfer fonksiyon bode diyagramı Şekil 4.9'da verilmiştir.

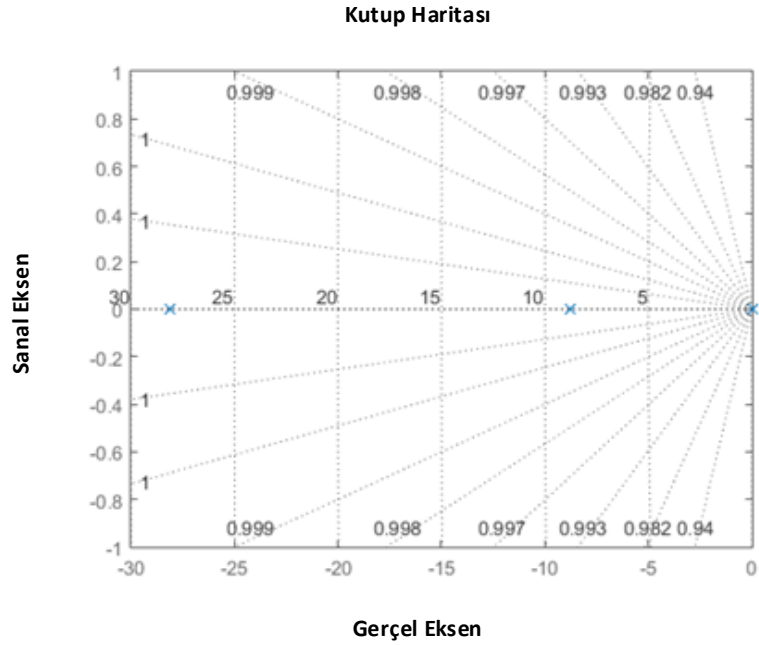


Şekil 4. 8 Konum transfer fonksiyon bode diyagramı

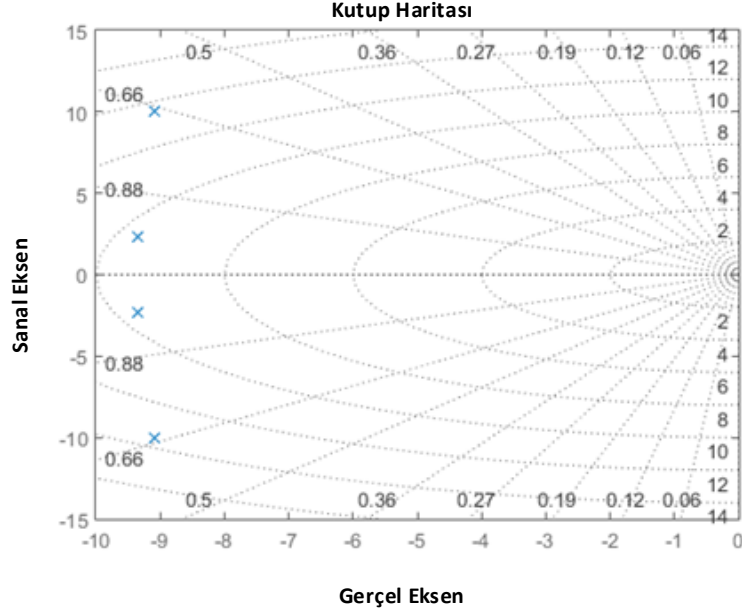


Şekil 4. 9 Konum transfer fonksiyon IPD bode diyagramı

100W DC motorun açısal konum transfer fonksiyon kutup haritası Şekil 4.10'da ve açısal konum IPD transfer fonksiyon kutup haritası Şekil 4.11'de verilmiştir.

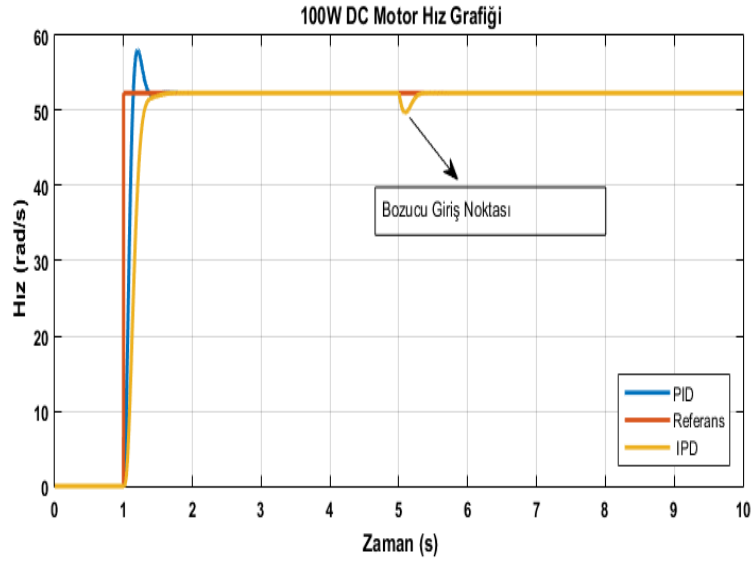


Şekil 4. 10 Konum transfer fonksiyon kutup haritası



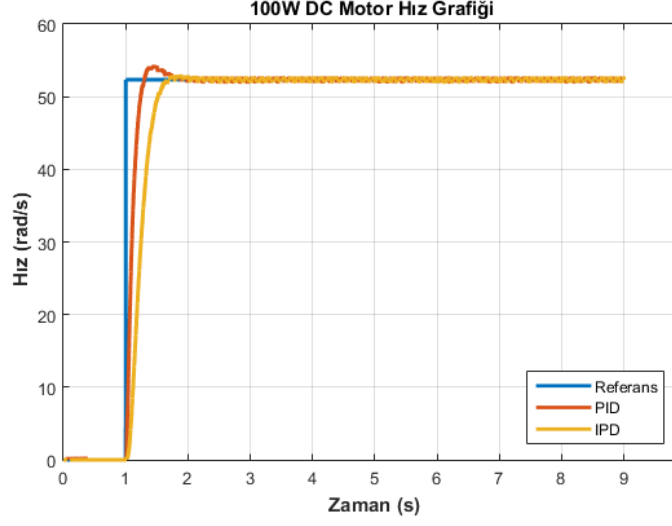
Şekil 4. 11 Konum transfer fonksiyon IPD kutup haritası

100W DC motorun açısai hız kontrolünde PID ve IPD kontrolör simülasyon grafiği Şekil 4.12'te verilmiştir. Simülasyonda 5. Saniyede gürültü uygulandığında tekrar referans değerine oturduğu görülmüştür.



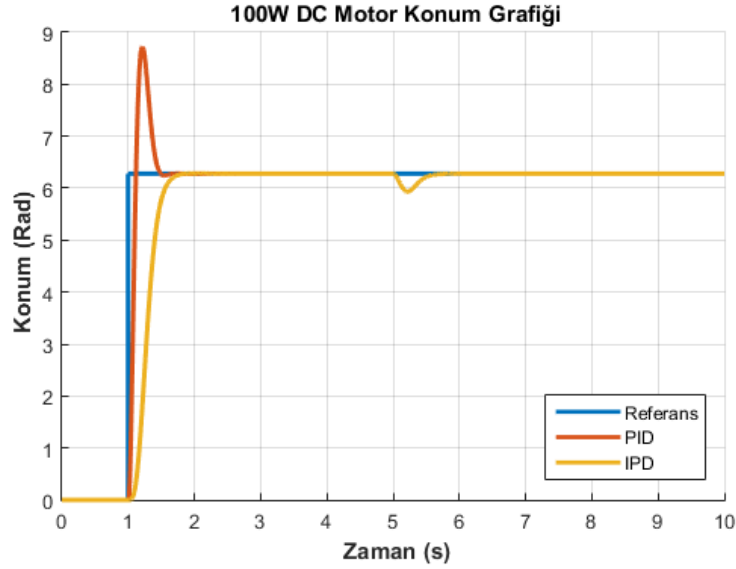
Şekil 4. 12 100W DC motor açısai hız simülasyon grafiği

100W DC motorun açısai hız kontrolünde PID ve IPD kontrolör deney grafiği Şekil 4.13'te verilmiştir. IPD kontrolörün PID kontrolöre göre performansının daha iyi olduğu görölmektedir.



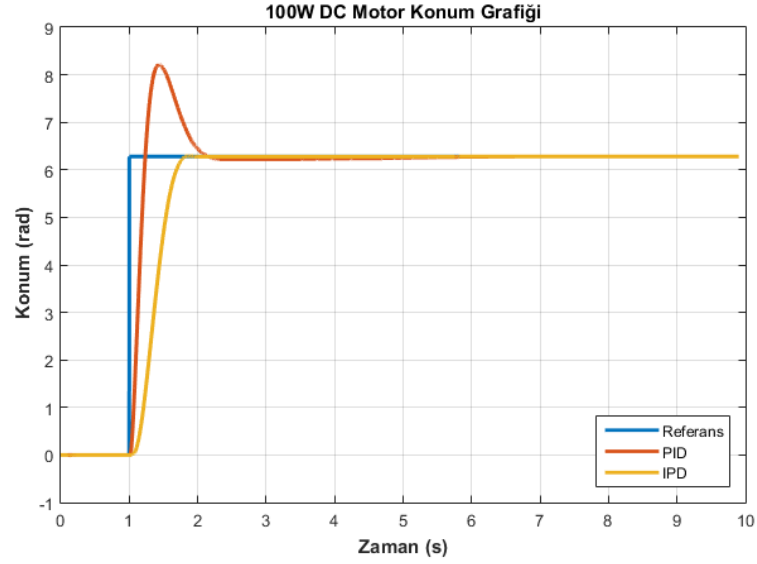
Şekil 4. 13 100W DC motor açısai hız deney grafiği

100W DC motorun açısai konum kontrolünde PID ve IPD kontrolör simölasyon grafiği Şekil 4.14'te verilmiştir. Simölasyonda 5. Saniyede güröltü uygulandığında tekrar referans değerine oturduğu görölmüştür.



Şekil 4. 14 100W DC motor açısai konum simölasyon grafiği

100W DC motorun açısal konum kontrolünde PID ve IPD kontrolör deney grafiği Şekil 4.15’de verilmiştir. IPD kontrolörün PID kontrolöre göre performansının daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 15 100W DC motor açısal konum deney grafiği

---

### ESNEK KAYIŞLI DC MOTOR SİSTEMİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE IPD İLE KONTROL ÇALIŞMALARI

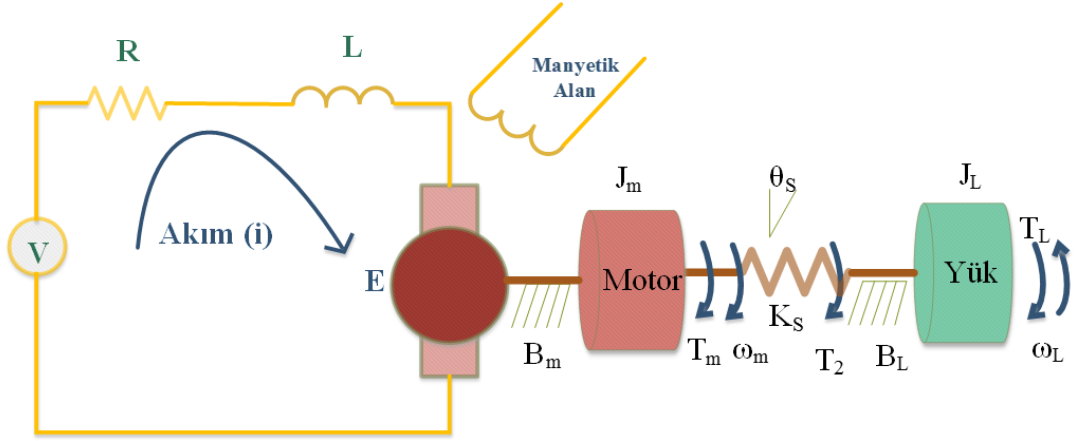
#### 5.1 Deney Sistemi

Fiziksel sistemleri dinamik olarak ifade eden denklemlere matematiksel model denir. Sistemin kontrolü için kullanılacak temel esasları bu denklemler oluşturur. Denklemlerde kullanılan değişkenler ile istenen özelliklerin kontrolü sağlanır. Esnek kayışlı DC motor sistemi fiziksel olarak DC motor, esnek kayış ve kasnak mekanizmalarının birleşiminden oluşur. Deney sisteminin açısal konum/volt ve açısal hız/volt transfer fonksiyonları kullanılarak açısal hız ve konum kontrolü hedeflenmiştir.

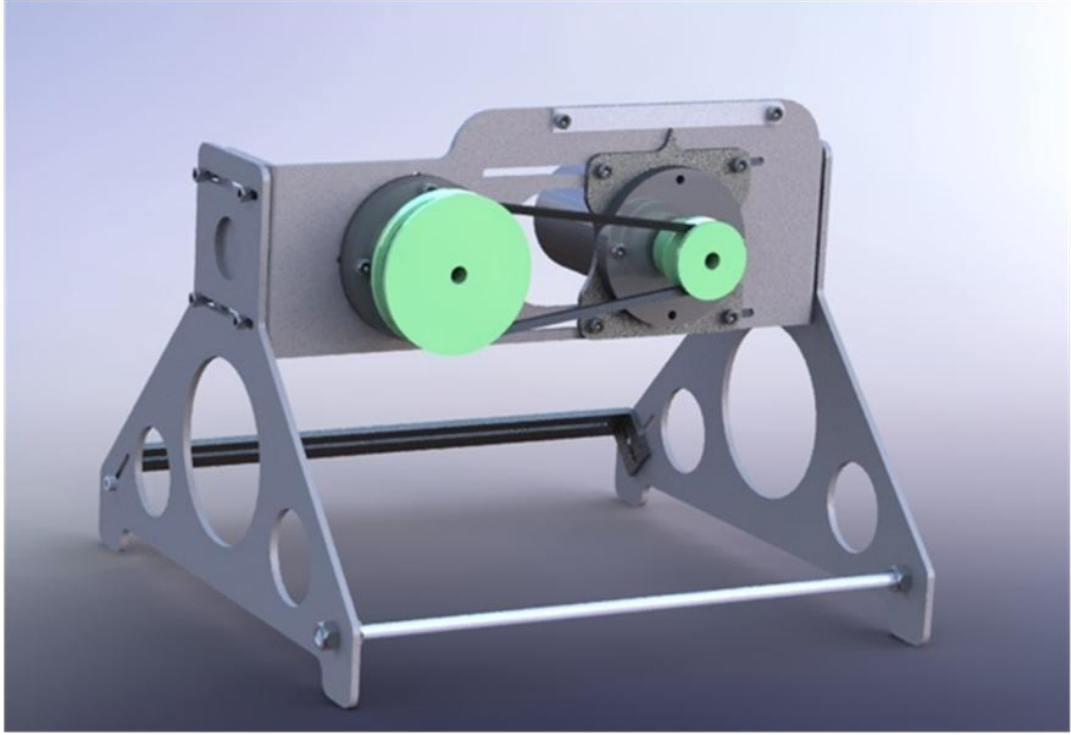
Esnek kayışlı DC motor sisteminde kullanılan 100W DC motor ve büyük kasnak atalet momenti ( $J_L$ ), 140W DC motor ve küçük kasnak atalet momenti ( $J_m$ ), direnç ( $R$ ), tork katsayısı ( $K_t$ ), zıt EMK katsayısı ( $K_b$ ), motor sürtünme katsayısı ( $B_m$ ), yük sürtünme katsayısı ( $B_L$ ), motor torku ( $T_m$ ), yük torku ( $T_L$ ), esnek kayış torku ( $T_2$ ), esnek kayışın yay sabiti ( $K_s$ ), motor açısal hızı ( $\omega_m$ ), yük açısal hızı ( $\omega_L$ ), yay yer değişimi ( $\theta_s$ ), endüktans ( $L$ ), volt ( $V$ ), akım ( $i$ ) olarak Şekil 5.1'de belirtilmiştir. Deneyler yapılarak elde edilen DC motor ve esnek kayış parametreleri Bölüm 3'te Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Esnek kayışlı DC motor sistemi sıfırdan başlanarak aşamalı olarak Şekil 5.2'deki tasarım yapılarak deney sistemi temel olarak oluşturulmuştur. Bu düzenekte biri 100W diğeri 140W iki DC motor ve çapları oranı 2,48 olan iki kasnak ve aktarma elemanı olarak esnek kayış kullanımıyla robot kol düzeneğine yakın bir benzetim yapılmıştır.





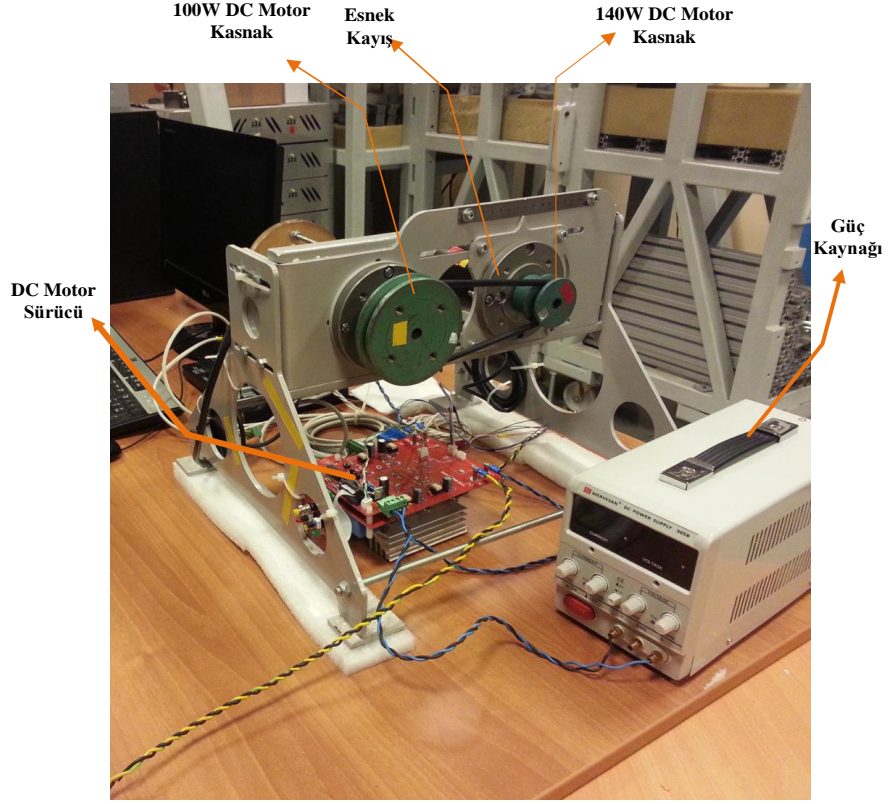
Şekil 5. 1 Esnek kayışlı DC motor sisteminin fiziksel gösterimi



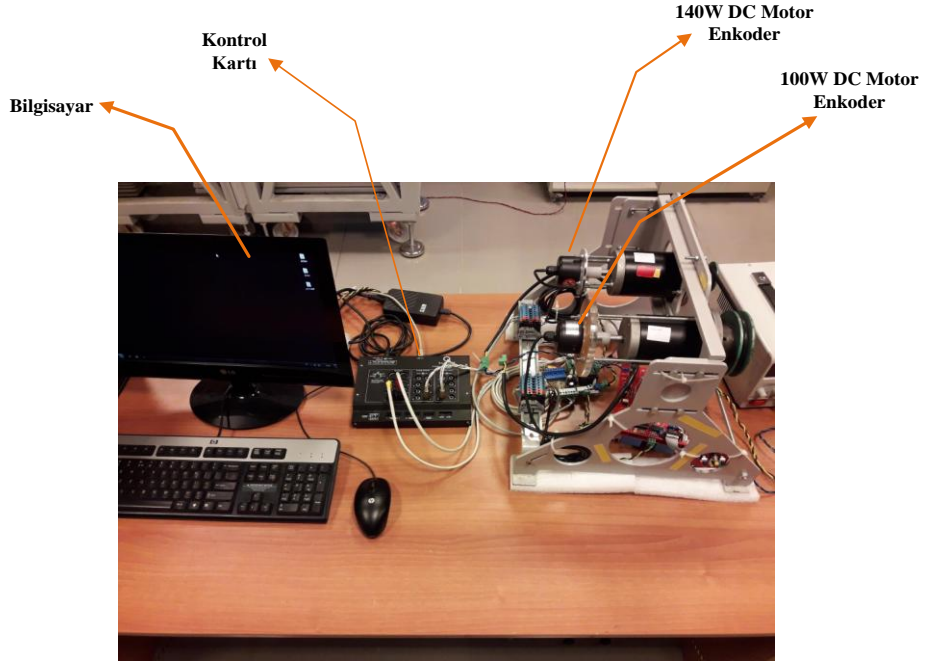
Şekil 5. 2 Esnek kayışlı DC motor sisteminin 3B gösterimi

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 verilmiş esnek kayışlı DC motor sisteminde 100W ve 140W iki kasnaklı DC motor, bir esnek kayış, bir derece hassasiyete sahip artımlı iki enkoder, 5V analog çıkışlı kontrol kartı, H-köprü DC motor sürücü devresi, bir bilgisayardan oluşmaktadır. Sistemde 140W kasnaklı DC motor, 100W kasnaklı DC motor ise yük olarak kullanılmıştır. Motordan yüke kinetik enerji aktarımı esnek kayış kullanılarak sağlanmıştır. Sistemdeki 140W DC motorun kontrolü için H-Köprü motor sürücü

devresi kullanılmıştır. Kontrol kartının vereceği analog çıkış kalibre edilerek deney sisteminde kullanılan aralığa uygun olarak ayarlanmıştır.

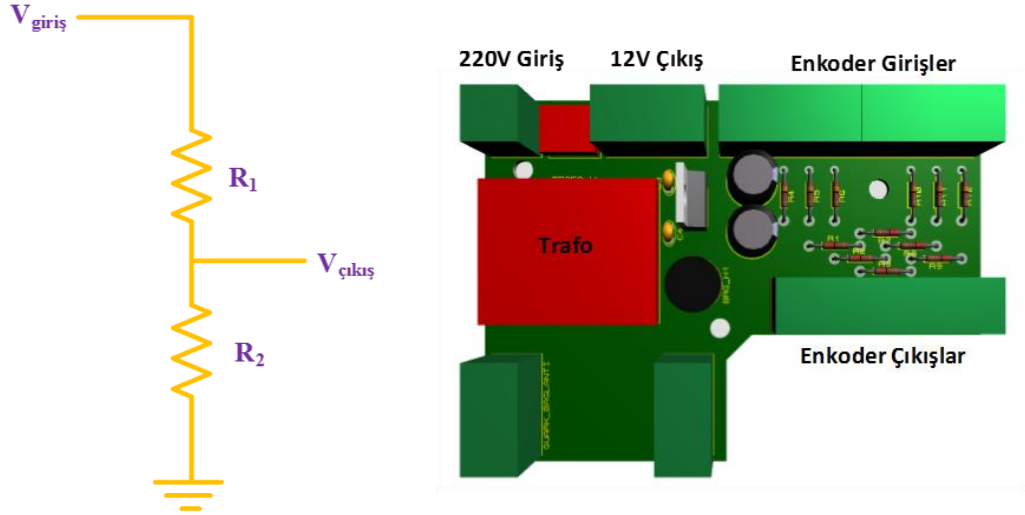


Şekil 5. 3 Deney sisteminin ön görünümü



Şekil 5. 4 Deney sisteminin arka görünümü

Sistemdeki enkoderlerin 12V gerilim ve kontrol kartının 5V gerilim aralığında çalışması nedeniyle Şekil 5.5'te verilen voltaj bölücü baskı devre kartı (BDK) ile enkoderlerin A-B-Z çıkışları 5V kontrol kartıyla uyumlu hale getirilmiştir. Ayrıca enkoderlerin besleme gerilimi, 220V trafo ile 12V gerilime dönüştürülerek sağlanmıştır.



Şekil 5. 5 Voltaj bölücü ve baskı devre kartı

## 5.2 Matematiksel Denklemlerin Elde Edilmesi

DC motor transfer fonksiyonu:

$$\frac{\theta_m(s)}{v(s)} = \frac{k_t}{s((j_m s + B_m)(Ls + R) + k_t k_b)} \quad (5.1)$$

iki kasa için tork denklemleri yazıldığında ,

$$T = k_s \theta_m - k_s * \theta_L \quad (5.2)$$

ikinci kasa için tork denklemleri yazıldığında,

$$T = J_L * \frac{d^2 \theta_L}{dt^2} + B_L * \frac{d \theta_L}{dt} \quad (5.3)$$

Denklemler (5.2) ve (5.3) birbirine eşitlendiğinde,

$$k_s \theta_m - k_s * \theta_L = J_L \frac{d^2 \theta_L}{dt^2} + B_L \frac{d \theta_L}{dt} \quad (5.4)$$

$$k_s \theta_m = J_L \frac{d^2 \theta_L}{dt^2} + B_L \frac{d \theta_L}{dt} + k_s * \theta_L \quad (5.5)$$

$$k_s \theta_m(s) = J_L \theta_L(s)s^2 + B_L \theta_L(s)s + k_s * \theta_L(s) \quad (5.6)$$

Denklem (5.6)'dan birinci kasağın konum denklemi:

$$\theta_m(s) = \frac{J_L \theta_L(s)s^2 + B_L \theta_L(s)s + k_s \theta_L(s)}{k_s} \quad (5.7)$$

Denklem (5.7)'de  $\theta_m(s)$  yerine denklem (5.1)'de yazılırsa,

$$\frac{\theta_L(s)(J_L s^2 + B_L s + k_s)}{v(s)k_s} = \frac{k_t}{s((j_m s + B_m)(Ls + R) + k_t k_b)} \quad (5.8)$$

Sistemin konum ve volt olarak transfer fonksiyonu:

$$\frac{\theta_L(s)}{v(s)} = \frac{k_t k_s}{s((j_m s + B_m)(Ls + R) + k_t k_b)(J_L s^2 + B_L s + k_s)} \quad (5.9)$$

Sistemin açılma hız ve volt olarak transfer fonksiyonu:

$$\frac{\omega_L(s)}{v(s)} = \frac{k_t k_s}{((j_m s + B_m)(Ls + R) + k_t k_b)(J_L s^2 + B_L s + k_s)} \quad (5.10)$$

Ayrıca deney sistemin hız olarak durum uzay denklemi 5.11'deki gibidir.

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_M ; \frac{d\theta_L}{dt} = \omega_L ;$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i \\ \omega_m \\ \theta_s \\ \omega_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_b}{L} & 0 & 0 \\ \frac{K_t}{J_m} & -\frac{B_m}{J_m} & -\frac{K_s}{J_m} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & \frac{K_s}{J_L} & -\frac{B_L}{J_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \omega_m \\ \theta_s \\ \omega_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/J_L \end{bmatrix} T_L$$

$$Y = [0 \ 0 \ 0 \ 1] \begin{bmatrix} i \\ \omega_m \\ \theta_s \\ \omega_L \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Deney sistemin konum olarak durum uzay denklemi 5.12'deki gibidir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i \\ \theta_m \\ \omega_m \\ \theta_s \\ \theta_L \\ \omega_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{K_b}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_t}{J_m} & 0 & -\frac{B_m}{J_m} & -\frac{K_s}{J_m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_s}{J_L} & 0 & -\frac{B_L}{J_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \theta_m \\ \omega_m \\ \theta_s \\ \theta_L \\ \omega_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/J_L \end{bmatrix} T_L$$

$$Y = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} i \\ \theta_m \\ \omega_m \\ \theta_s \\ \theta_L \\ \omega_L \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

### 5.3 Sistemde IPD Hız Kontrolü

IPD kontrolör ile PID'nin 100W DC motorun hız ve konum kontrolünde vermiş olduğu yanıtlarda IPD'nin daha iyi bir performansla sahip olması ve aşırı kontrolü sağlaması nedeniyle deney sisteminin açısal hız ve açısal konum kontrolü için kullanılmıştır. Katsayı Diyagram Metodunun deney sisteminin açısal hız ve konum kontrolünde Matlab simulink ortamında simülasyonları hem uygulamalı deney çalışmaları yapılmıştır. Denklem (5.13)'ün IPD katsayıları çarpımı ile DC motorun kapalı çevrim transfer fonksiyonu denklem (5.14) ve karakter polinomu denklem (5.15) olarak elde edilir.

$$\frac{\omega_L(s)}{v(s)} = \frac{k_t * k_s}{(J_m s + B_m) * (Ls + R) + k_t * k_b} * (J_L s^2 + B_2 s + k_s) \quad (5.13)$$

$$TF = \frac{K_i K_s K_t}{K_i K_s K_t + J_m J_L L s^5 + K_b K_s K_t s + J_m J_L R s^4 + J_m L K_s s^3 + J_m R K_s s^2 + J_L K_b K_t s^3 + K_d K_s K_t s^2 + K_p K_s K_t s} \quad (5.14)$$

$$KP = J_m J_L L s^5 + J_m J_L R s^4 + (J_m L K_s + J_L K_b K_t) s^3 + (J_m R K_s + K_d K_s K_t) s^2 + (K_p K_s K_t + K_b K_s K_t) s + K_i K_s K_t \quad (5.15)$$

Manabe formunun kullanılacağı eşdeğer zaman sabiti ( $\tau$ ) ve indisler ( $\gamma_1, \gamma_2$ ) sırasıyla denklem (5.16), denklem (5.17), denklem (5.18)'de verilmiştir.

$$\tau = \frac{(K_p K_s K_t + K_b K_s K_t)}{K_i K_s K_t}; \quad \tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (5.16)$$

$$\gamma_1 = \frac{(K_p K_s K_t + K_b K_s K_t)^2}{(J_m R K_s + K_d K_s K_t) * (K_i K_s K_t)}; \quad \gamma_1 = \frac{a_1^2}{a_2 * a_0} \quad (5.17)$$

$$\gamma_2 = \frac{(J_m R K_s + K_d K_s K_t)^2}{(J_m L K_s + J_L K_b K_t) * (K_p K_s K_t + K_b K_s K_t)}; \quad \gamma_2 = \frac{a_2^2}{a_3 * a_1} \quad (5.18)$$

Denklem (5.16), denklem (5.17) ve denklem (5.18)'in  $\tau, \gamma_1, \gamma_2$  ortak çözümü ile elde edilen  $K_p, K_i$  ve  $K_d$  denklemleri sırasıyla denklem (5.19), denklem (5.20) ve denklem (5.21)'de verilmiştir.

$$K_i = (J_m * L * \gamma_1^2 * \gamma_2 * K_s + J_L * \gamma_1^2 * \gamma_2 * K_b * K_t) / (\tau^3 * K_s * K_t) \quad (5.19)$$

$$K_p = (J_m * L * \gamma_1^2 * \gamma_2 * K_s - \tau^2 * K_b * K_s * K_t + J_L * \gamma_1^2 * \gamma_2 * K_b * K_t) / (\tau^2 * K_s * K_t) \quad (5.20)$$

$$K_d = (J_m * L * \gamma_1^2 * \gamma_2 * K_s - J_m * R * \gamma_1 * \gamma_2 * K_s + J_L * \gamma_1^2 * \gamma_2 * K_b * K_t) / (\tau * \gamma_1 * K_s * K_t) \quad (5.21)$$

Çizelge 5.1'deki DC motor ve esnek kayış parametre değerleri IPD  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  katsayıları denklem (5.19), denklem (5.20) ve denklem (5.21)'de yazıldığında, deney sisteminin açısal hız IPD katsayıları  $\tau = 0,1$  ;  $\gamma_1 = 2,4$  ;  $\gamma_2 = 2$  yazılmasıyla  $K_i = 2,53$  ;  $K_p = 0,11$  ;  $K_d = 0,008$  olarak bulunur. Çizelge 5.2'de deney sisteminin açısal hız kontrolünde simülasyon ve deneysel çalışmalarında kullanılmış olan  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  katsayıları verilmiştir.

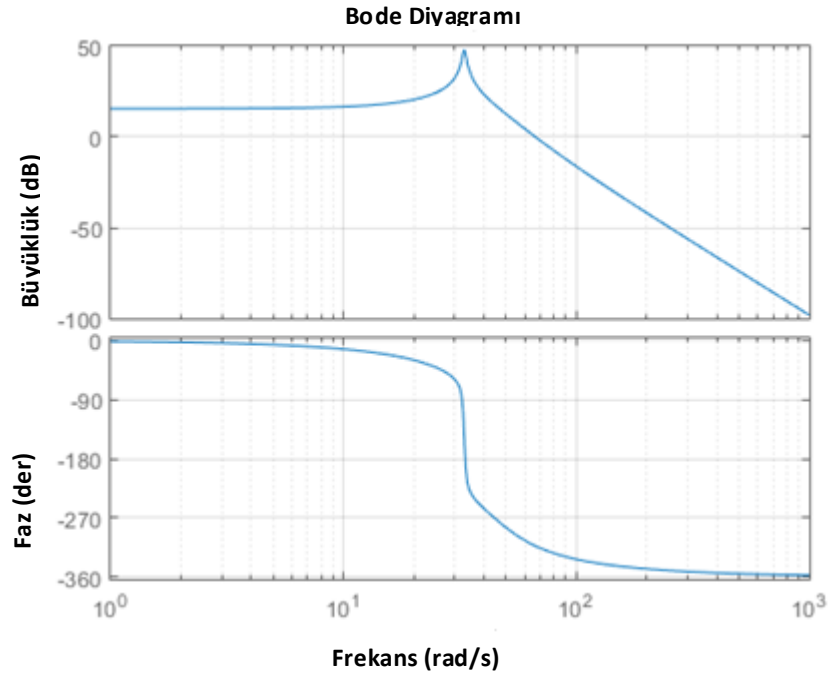
Çizelge 5. 1 Sistem motor ve yük parametre değerleri

| 140W MOTOR | DEĞER   | 100W MOTOR | DEĞER   |
|------------|---------|------------|---------|
| $K_b$      | 0,143   | B          | 0,00095 |
| $K_t$      | 0,113   | R          | 3,592   |
| B          | 0,00086 | $J_L$      | 0,01    |
| R          | 3,078   | $K_s$      | 1,09    |
| L          | 0,1     |            |         |
| $J_M$      | 0,0001  |            |         |

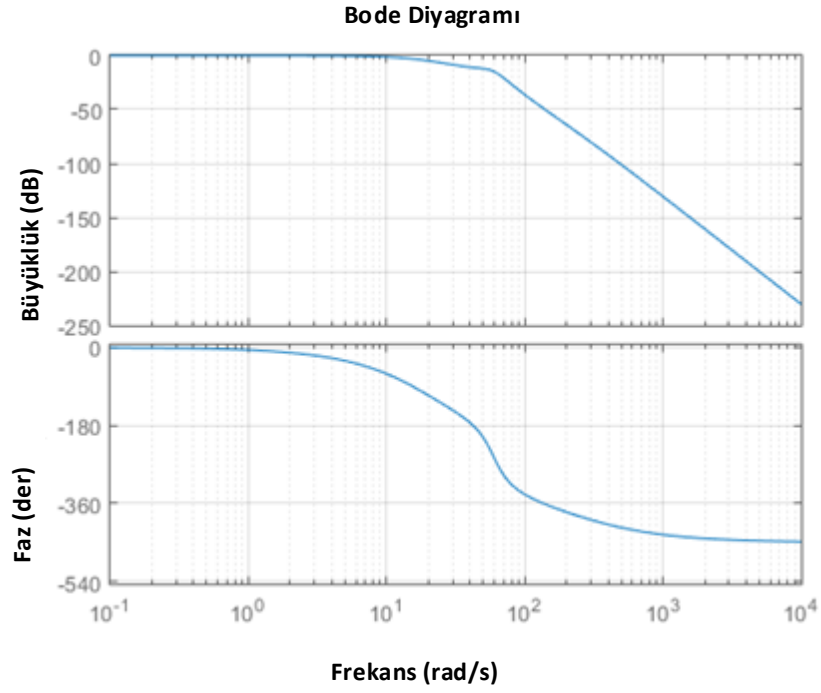
Çizelge 5. 2 Deney sisteminin açısai hız kontrolcü katsayıları

| HIZ        | $K_p$ | $K_i$ | $K_d$ |
|------------|-------|-------|-------|
| HESAPLANAN | 0,11  | 2,53  | 0,008 |
| SİMÜLASYON | 0,198 | 1,375 | 0,008 |
| DENEY      | 0,2   | 2,45  | 0,008 |

Deney sisteminin açısai hız transfer fonksiyon bode diyagramı Şekil 5.6'da ve açısai hız IPD transfer fonksiyon bode diyagramı Şekil 5.7'de verilmiştir.

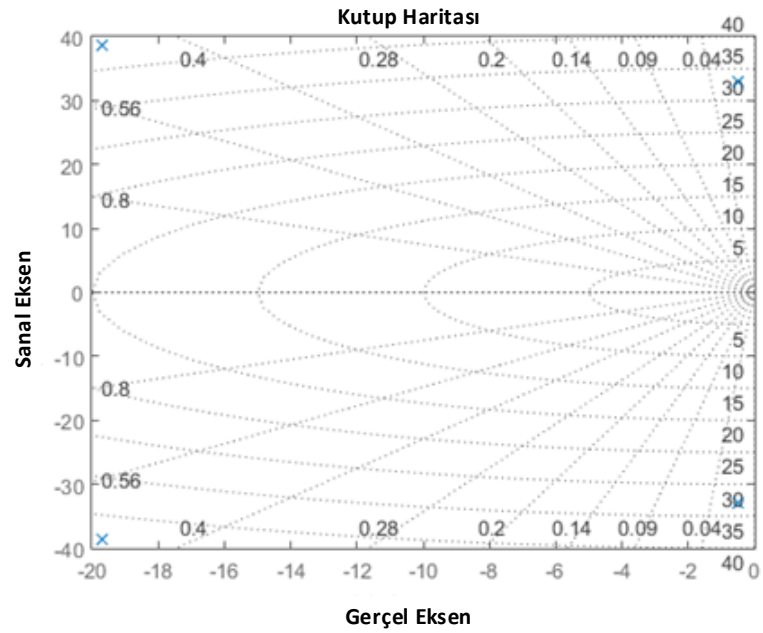


Şekil 5. 6 Deney sisteminin açısai hız bode diyagramı



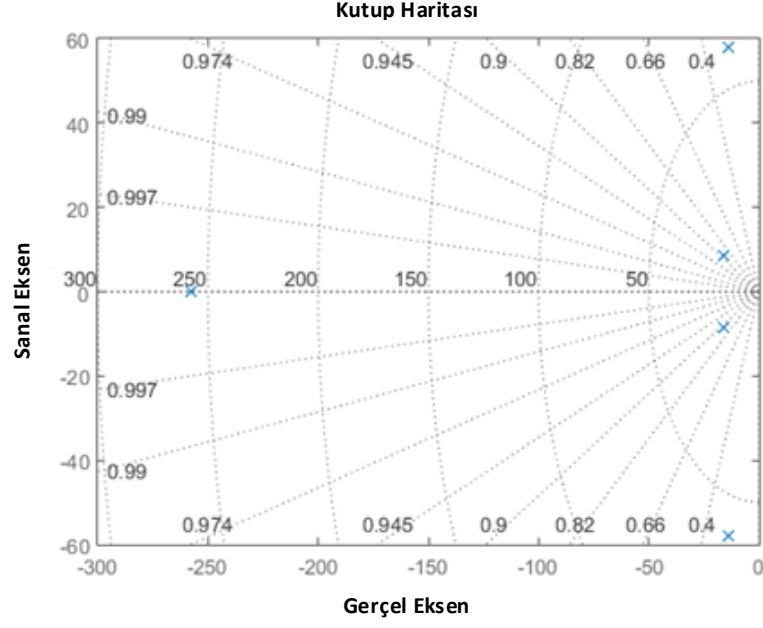
Şekil 5. 7 Deney sisteminin açısal hız IPD bode diyagramı

Deney sisteminin açısal hız transfer fonksiyon kutup haritası Şekil 5.8'de ve açısal hız IPD transfer fonksiyon kutup haritası Şekil 5.9'da verilmiştir.



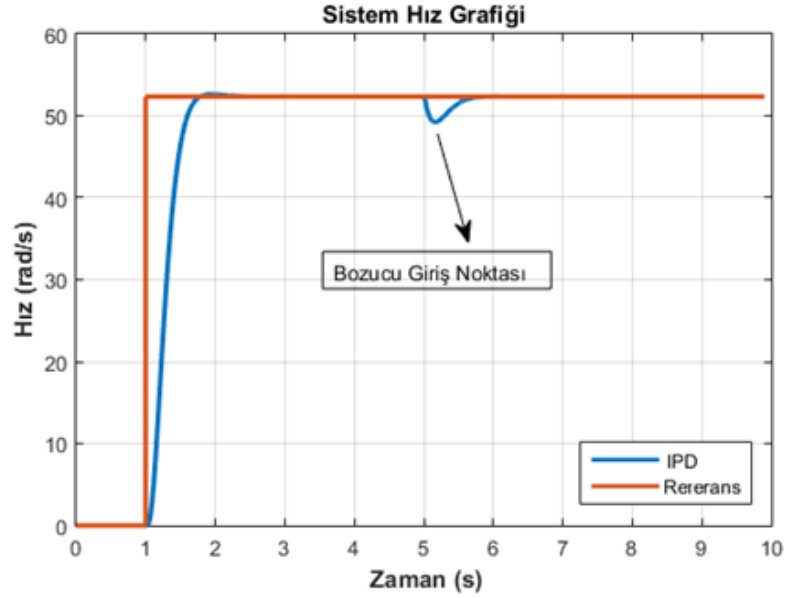
Şekil 5. 8 Deney sisteminin açısal hız kutup haritası





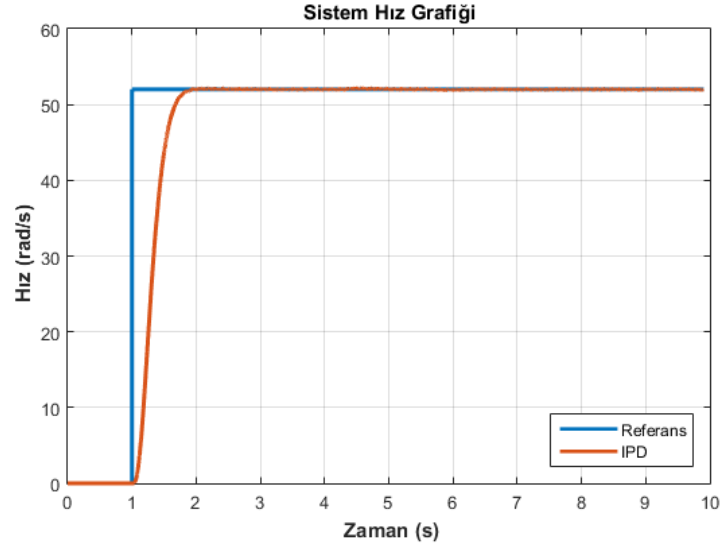
Şekil 5. 9 Deney sisteminin açısal hız IPD kutup haritası

Deney sisteminin açısal hız kontrolünde IPD kontrolör yük simülasyonu grafiği Şekil 5.10'da verilmiştir. Simülasyonda 5. Saniyede gürültü uygulandığında tekrar referans değerine oturduğu görülmüştür.



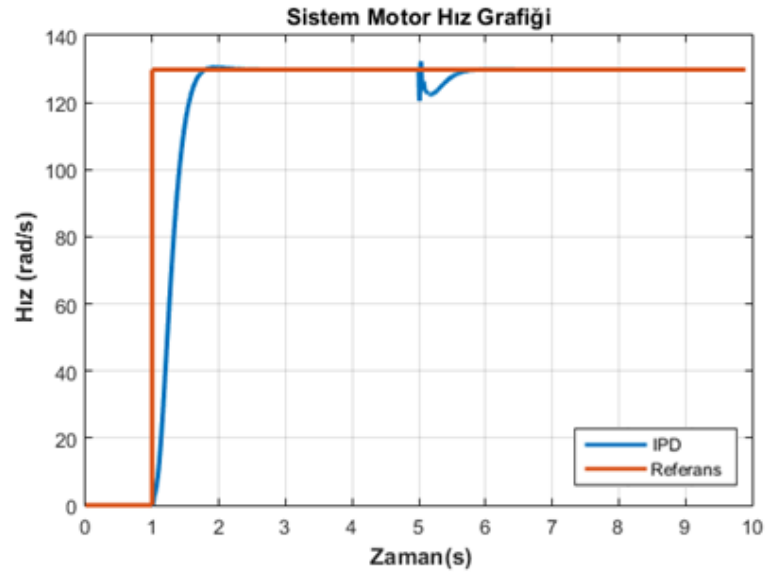
Şekil 5. 10 Deney sisteminin yük açısal hız simülasyonu grafiği

Deney sisteminin açılal hız kontrolünde IPD kontrolör yük deney grafiği Şekil 5.11'de verilmiştir.



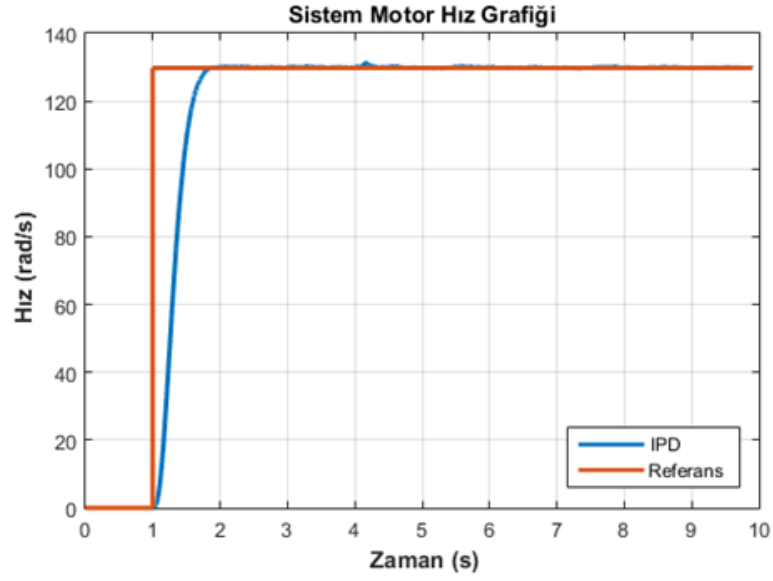
Şekil 5. 11 Deney sisteminin yük açılal hız deney grafiği

Deney sisteminin açılal hız kontrolünde IPD kontrolör motor simülasyon grafiği Şekil 5.12'de verilmiştir. Simülasyonda 5. Saniyede gürültü uygulandığında tekrar referans değerine oturduğu görülmüştür.



Şekil 5. 12 Deney sisteminin motor açılal hız simülasyon grafiği

Deney sisteminin açılmal hız kontrolünde IPD kontrolör motor deney grafiği Şekil 5.13'de verilmiştir.



Şekil 5. 13 Deney sisteminin motor açılmal hız deney grafiği

#### 5.4 Sistemde IPD Konum Kontrolü

Açılmal konum kontrolü, Şekil 5.3'te verilen deney düzeneğinde bulunan iki DC motorun atalet momentleri, kinetik enerji denklemi (5.22) ile tek atalet momentine indirgenmiştir. Kasnakların hız oranı kasnakların çaplarıyla ters orantılıdır. Denklem (5.22)'de hız oranı 2,48'in yazılmasıyla denklem (5.23) elde edilmiştir. Çizelge 3.4'te DC motorların atalet moment değerleri denklem (5.24)'te yazıldığında, deney düzeneğinin indirgenmiş atalet momenti değeri bulunmuştur. Deney düzeneğinin sürtünme sabiti ise Bölüm 3 Çizelge 3.3'teki DC motorların sürtünme sabiti toplamı olarak denklem (5.26)'da verilmiştir.

$$0,5 * J_{eş} * \omega_{eş}^2 = 0,5 * J_m * \omega_m^2 + 0,5 * J_L * \omega_L^2 \quad (5.22)$$

$$0,5 * J_{eş} * \omega_{eş}^2 = 0,5 * J_m * \omega_m^2 + 0,5 * J_L * (2,48\omega_m)^2 \quad (5.23)$$

$$J_{eş} = J_m + J_L * (2,48\omega_m)^2 \quad (5.24)$$

$$J_{eş} = 0,001 + 0,0001 * (2,48)^2 = 0,001615 \quad (5.25)$$

$$B_{eş} = B_m + B_L = 0,00095 + 0,00086 = 0,00181 \quad (5.26)$$

Not: Sistem DC motor gibi düşünüldüğü için  $K_s$  ihmal edilmiştir.

Denklem (5.27)'in IPD katsayıları çarpımı ile DC motorun kapalı çevrim transfer fonksiyonu denklem (5.28) ve karakter polinomu denklem (5.29) olarak elde edilir.

$$\frac{w_2(s)}{v(s)} = \frac{k_m * k_s}{((j_1 s + B_1) * (L s + R) + k_m * k_b) * (J_2 s^2 + B_2 s + k_s)} \quad (5.27)$$

$$TF = \frac{K_t * K_i}{(K_i * K_t + B * R * s^2 + K_b * K_t * s + K_b * K_t * s^2 + K_p * K_t * s + B * L * s^3 + J * L * s^4 + K_d * K_t * s^2 + J * R * s^3)} \quad (5.28)$$

$$KP = J * L * s^4 + (B * L + J * R) * s^3 + (B * R + K_b * K_t + K_d * K_t) * s^2 + (K_p * K_t) * s + K_i * K_t \quad (5.29)$$

Manabe formunun kullanılacağı eşdeğer zaman sabiti ( $\tau$ ) ve indisler ( $\gamma_1, \gamma_2$ ) sırasıyla denklem (5.30), denklem (5.31), denklem (5.32)'de verilmiştir.

$$\tau = \frac{(K_p * K_t)}{K_i * K_t}; \quad \tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (5.30)$$

$$\gamma_1 = \frac{(K_p * K_t)^2}{(B * R + K_b * K_t + K_d * K_t) * (K_i * K_t)}; \quad \gamma_1 = \frac{a_1^2}{a_2 * a_0} \quad (5.31)$$

$$\gamma_2 = \frac{(B * R + K_b * K_t + K_d * K_t)^2}{(B * L + J * R) * (K_p * K_t)}; \quad \gamma_2 = \frac{a_2^2}{a_3 * a_1} \quad (5.32)$$

Denklem (5.30), denklem (5.31) ve denklem (5.32)'in  $\tau, \gamma_1, \gamma_2$  ortak çözümü ile elde edilen  $K_p, K_i$  ve  $K_d$  denklemleri sırasıyla denklem (5.33), denklem (5.34) ve denklem (5.35)'de verilmiştir.

$$K_p = (B * L * \gamma_1^2 * \gamma_2 + J * R * \gamma_1^2 * \gamma_2) / (K_t * \tau^2) \quad (5.33)$$

$$K_i = (B * L * \gamma_1^2 * \gamma_2 + J * R * \gamma_1^2 * \gamma_2) / (K_t * \tau^3) \quad (5.34)$$

$$K_d = (B * L * \gamma_1^2 * \gamma_2 + J * R * \gamma_1^2 * \gamma_2 - B * R * \tau * \gamma_2 - K_b * K_t * \tau * \gamma_2) / (K_t * \tau * \gamma_1) \quad (5.35)$$

Çizelge 5.3'deki DC motor parametre değerleri IPD  $K_p, K_i$  ve  $K_d$  katsayıları denklem (5.33), denklem (5.34) ve denklem (5.35)'de yazıldığında, deney sisteminin açılmal hız IPD katsayıları  $\tau = 0.3, \gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2$  yazılmasıyla  $K_i = 13.96; K_p = 4.19; K_d = 0.3$  olarak bulunur. Çizelge 5.4'de deney sisteminin açılmal hız kontrolünde simülasyon ve deneysel çalışmalarında kullanılmış olan  $K_p, K_i$  ve  $K_d$  katsayıları verilmiştir.

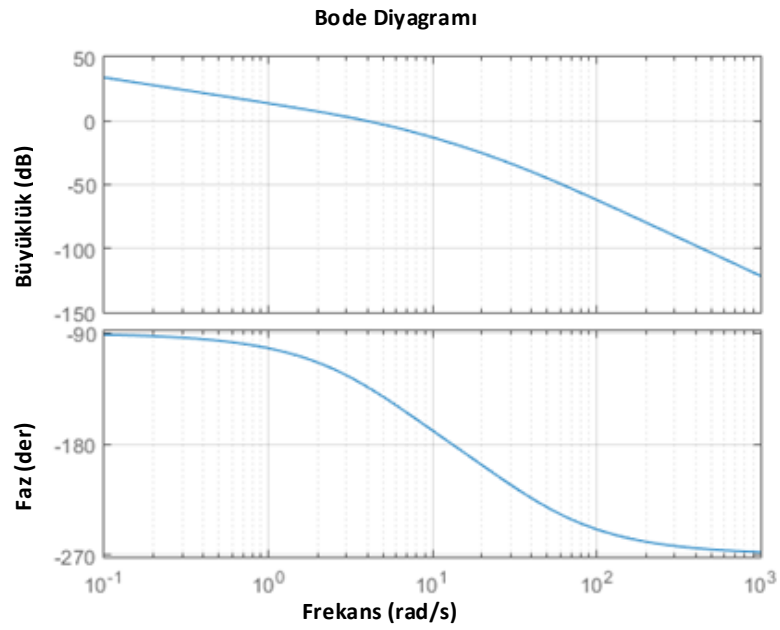
Çizelge 5. 3 Deney sisteminin parametre değerleri

| SİSTEM DEĞİŞKENLER | DEĞER    |
|--------------------|----------|
| $K_b$              | 0,155    |
| $K_t$              | 0,137    |
| B                  | 0,00181  |
| R                  | 3,592    |
| L                  | 0,1      |
| $J_{eş}$           | 0,001615 |

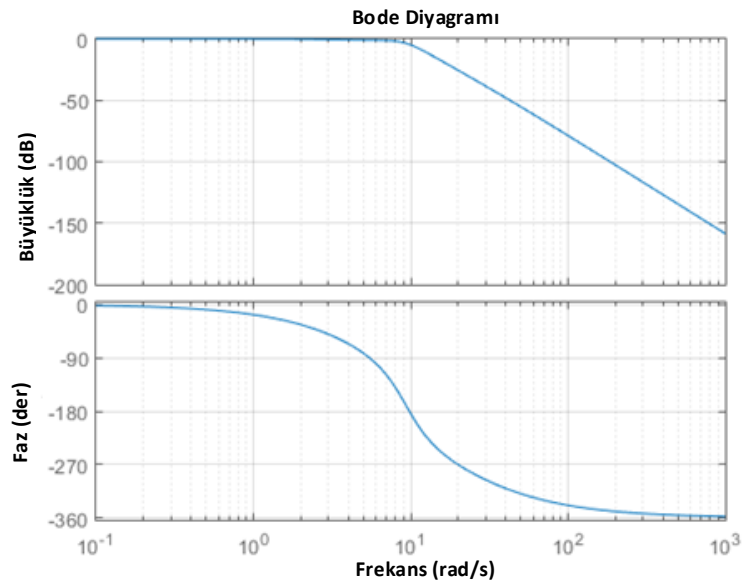
Çizelge 5. 4 Deney sisteminin açısız konum kontrolcü katsayıları

| KONUM          | $K_p$ | $K_i$ | $K_d$ |
|----------------|-------|-------|-------|
| HESAPLANAN     | 4,19  | 14    | 0,3   |
| SİMÜLASYON     | 4,19  | 14    | 0,3   |
| GERÇEK ZAMANLI | 5     | 11,75 | 0,5   |

Deney sisteminin açısız konum transfer fonksiyon bode diyagramı Şekil 5.14'de ve açısız konum IPD transfer fonksiyon bode diyagramı Şekil 5.15'de verilmiştir.

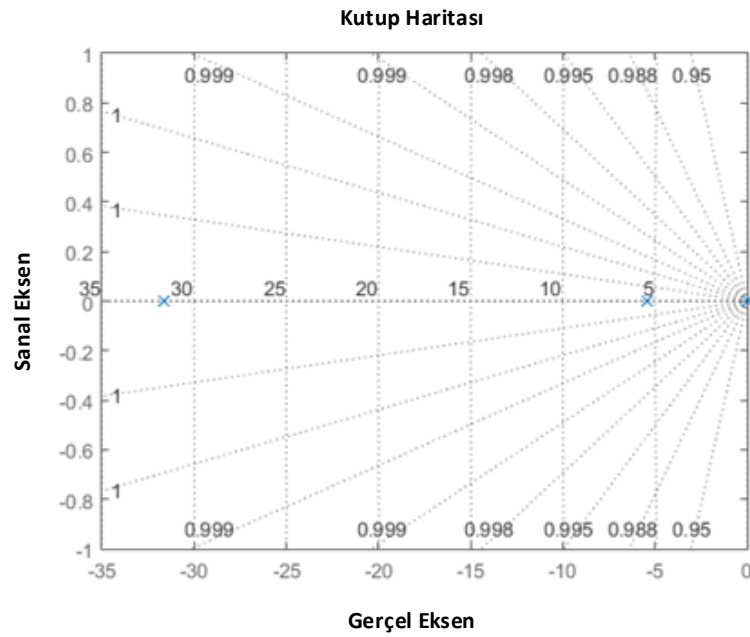


Şekil 5. 14 Deney sisteminin açısız konum bode diyagramı

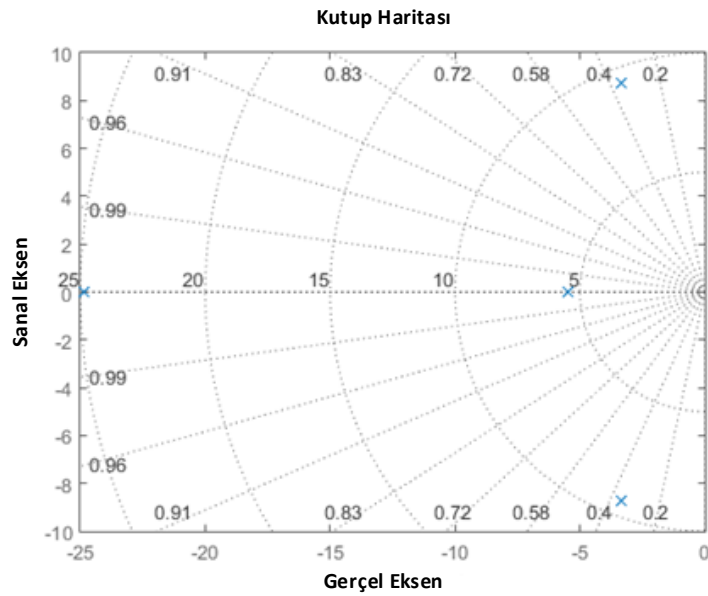


Şekil 5. 15 Deney sisteminin açısız konum IPD bode diyagramı

Deney sisteminin açılal hız transfer fonksiyon kutup haritası Şekil 5.16'da ve açılal hız IPD transfer fonksiyon kutup haritası Şekil 5.17'de verilmiştir.

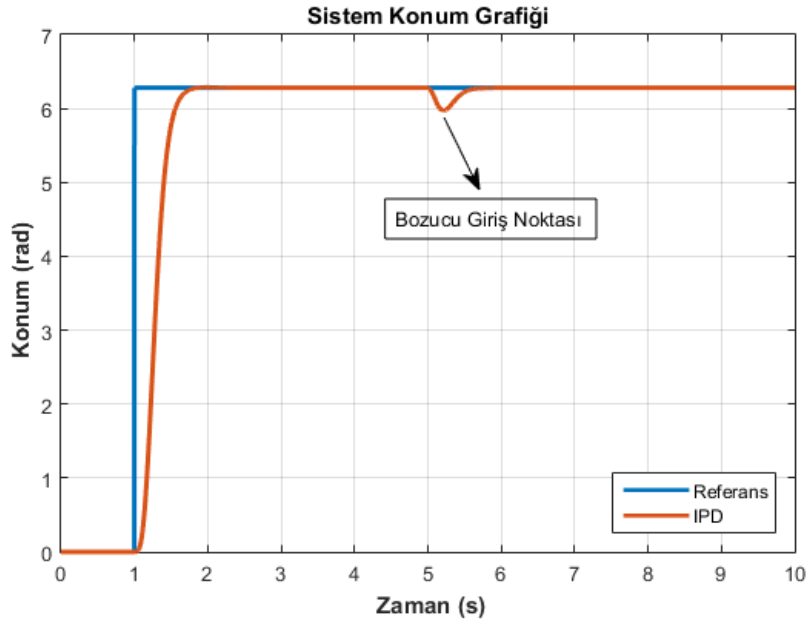


Şekil 5. 16 Deney sisteminin açılal konum kutup haritası



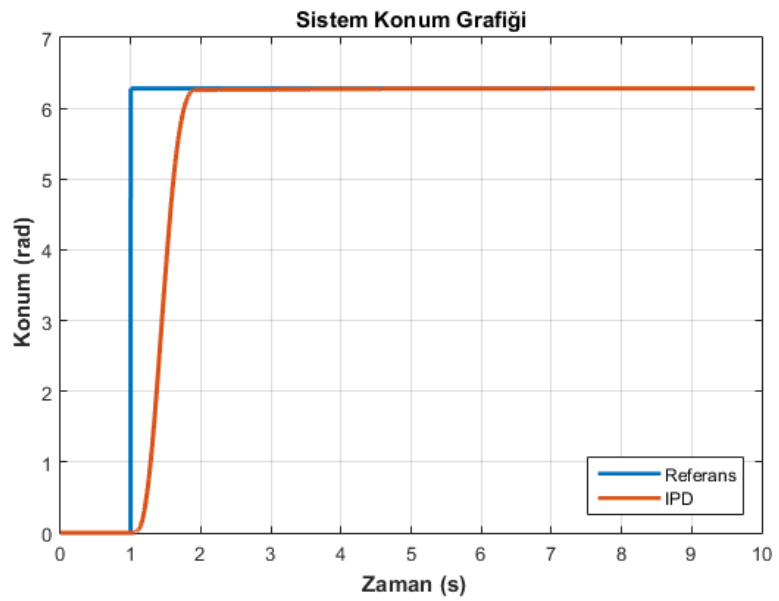
Şekil 5. 17 Deney sisteminin açılal konum IPD kutup haritası

Deney sisteminin açısai konum kontrolünde IPD kontrolör simülasyon grafiği Şekil 5.18'de verilmiştir. Simülasyonda 5. Saniyede gürültü uygulandığında tekrar referans değerine oturduğu görülmüştür.



Şekil 5. 18 Deney sistem 100W DC motor açısai konum simülasyon grafiği

Deney sisteminin açısai konum kontrolünde IPD kontrolör deney grafiği Şekil 5.19'da verilmiştir.



Şekil 5. 19 Deney sistem 100W DC motor açısai konum deney grafiği



---

### ESNEK KAYIŞLI DC MOTOR SİSTEMİNİN DURUM UZAY GERİ BESLEMELİ KONTROLÜ

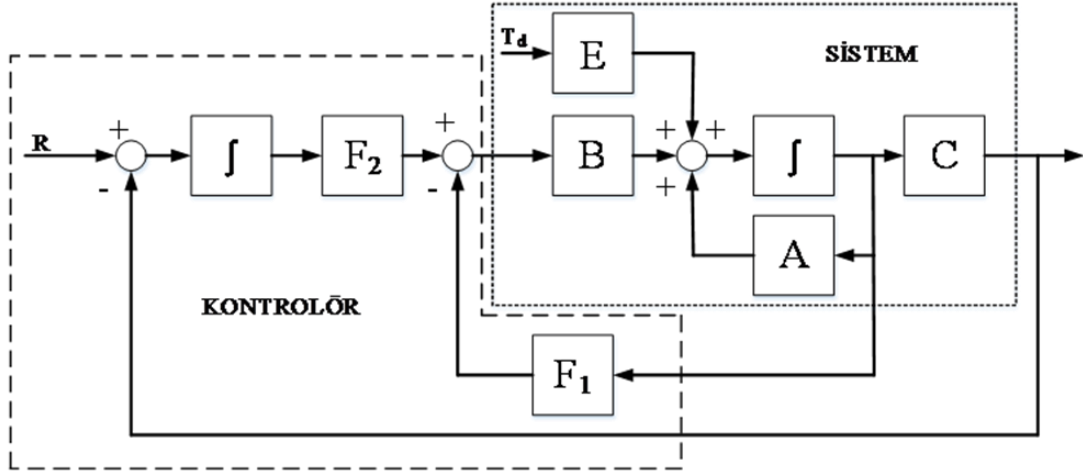
#### 6.1 Sistemin Durum Uzay İntegral Geri Besleme ile Hız Kontrolü

Sistemlerin kontrolü için diferansiyel denklemler ve transfer fonksiyonlar ile kontrolcü tasarlanabileceği gibi n'nci dereceden bir sistemi oluşturan n tane durum değişkeni ve n tane durum denklemi ile kontrolcü tasarımı yapılabilir ve sistemin durum değişkenleri üzerinden istenen çıkış alınır. Kontrol edilecek sistemler durum uzayında A,B,C,D matrisleri ile gösterilir. Sistemlerin kontrol edilebilirliği  $A_{n \times n}$ ,  $B_{n \times 1}$  matris çifti denklem (6.1) ile belirlenir.

$$[B \ AB \ A^2B \ \dots \ \dots \ A^{n-1}B] \quad (6.1)$$

Denklem (6.1)'deki matrisi rankı n değerine eşit ise sistem kontrol edilebilir demektir.

Sistemin blok diyagramları ile oluşturulmuş gösterimi Şekil 6.1'de verilmiştir. R referans olmak üzere, A, B, C sistemin durum uzay matrislerini, E sisteme uygulanan gürültü matrisi,  $F_1$  ve  $F_2$  ise kontrol katsayılarını ve Td ise sisteme uygulanan bozucu torku ifade etmektedir.



Şekil 6. 1 Sistemin durum uzay blok gösterimi

Sistemin durum ifadeleri denklem (6.2)'de verilmiştir. Sistemin hata denklemi (6.3) olarak ifade edilir.

$$\dot{X} = Ax + Bu \quad Y = Cx \quad u = \Delta e_w = -F_1x + F_2x\zeta \quad \zeta = r - y = r - Cx \quad (6.2)$$

$$e = \hat{A}e + \hat{B}u_e \quad u_e = -\hat{K}e \quad (6.3)$$

Sistemin kontrol edilebilirlik analizinden sonra Şekil 6.1'te belirtilen  $F_1$  ve  $F_2$  katsayıların belirlenmesi yapılmıştır. Kontrol katsayılarının belirlenmesinde Manabe formu kullanılarak hesaplanmıştır. Sistemin kontrol katsayıları Kessler kanonik formu gibi diğer formların kullanılmasıyla da bulunabilir. Sistemin derecesine göre ve kutup atama ile referans polinom oluşturularak zaman sabiti ile kutup ataması yapılır. [24]

Sistemin A matrisi denklem (5.11)'de 4x4 olarak verilmiştir. Sisteme gürültü verildiğinde sistemin kalıcı durum hatasına düşmemesi için integral katsayısı eklenmiştir. Sistemin kontrol katsayıları bulunurken 5x5 matris formuna dönüştürülür. Deney sisteminin SSI matrisleri denklem (6.4)'te verilmiştir. Geri besleme kazanç matrisi ( $\hat{K}$ ) denklem (6.5)'te verilmiştir.

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \quad \hat{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{Kb}{L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{Kt}{Jm} & -\frac{Bm}{Jm} & -\frac{Ks}{Jm} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Ks}{Jl} & -\frac{Bl}{Jl} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \quad \hat{B} = \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

$$\hat{K} = [F_1 \quad -F_2] \quad (6.5)$$

$\hat{K}$  kazanç matrisi olup kutup atama metodu ile hesaplanır. Genişletilmiş sistem kontrol edilebilirliği sağlamalıdır. Matlab programı ile kutup atamaları yapılabilmektedir. Genişletilmiş sistemin referans polinomu denklem (6.6)'da verilmiştir. Referans polinomunun katsayıları denklem (6.7) kullanılarak hesaplanır.

$$P_r(s) = a_5s^5 + a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0 \quad (6.6)$$

$$\frac{a_1^2}{a_2a_0} = \gamma_1 \quad \frac{a_2^2}{a_3a_1} = \gamma_2 \quad \frac{a_3^2}{a_4a_2} = \gamma_3 \quad \frac{a_4^2}{a_5a_3} = \gamma_4 \quad \frac{a_1}{a_0} = \tau \quad (6.7)$$

Manabe formunda kararlılık indeksleri  $\gamma_1 = 2.5$   $\gamma_2 = 2$   $\gamma_3 = 2$   $\gamma_4 = 2$  olarak kullanılır. Referans polinomunun sifira eşitlenmesi ile 5 kök bulunur. Bulunan bu kökler geri beslemeli denetleyicinin köklerini oluşturur. Zaman sabiti  $\tau = 0.06$  alınması ile referans polinomunun katsayıları denklem (6.8)'in kullanılmasıyla bulunur.

$$P_r(s) = \frac{a_5s^5}{a_0} + \frac{a_4s^4}{a_0} + \frac{a_3s^3}{a_0} + \frac{a_2s^2}{a_0} + \frac{a_1s}{a_0} + \frac{a_0}{a_0} \quad (6.8)$$

$$b_0 = 1 \quad b_1 = \tau = \frac{a_1}{a_0} = 0.06$$

$$\frac{b_1^2}{b_2b_0} = \frac{\tau^2}{b_2} = \gamma_1 \quad b_2 = \frac{\tau^2}{\gamma_1} = 0.0014$$

$$\frac{b_2^2}{b_3b_1} = \gamma_2 \quad b_3 = \frac{b_2^2}{b_1\gamma_2} = 1.728 * 10^{-5}$$

$$\frac{b_3^2}{b_4b_2} = \gamma_3 \quad b_4 = \frac{b_3^2}{b_2\gamma_3} = 1.037 * 10^{-7}$$

$$\frac{b_4^2}{b_5b_3} = \gamma_4 \quad b_5 = \frac{b_4^2}{b_3\gamma_4} = 3.11 * 10^{-10}$$

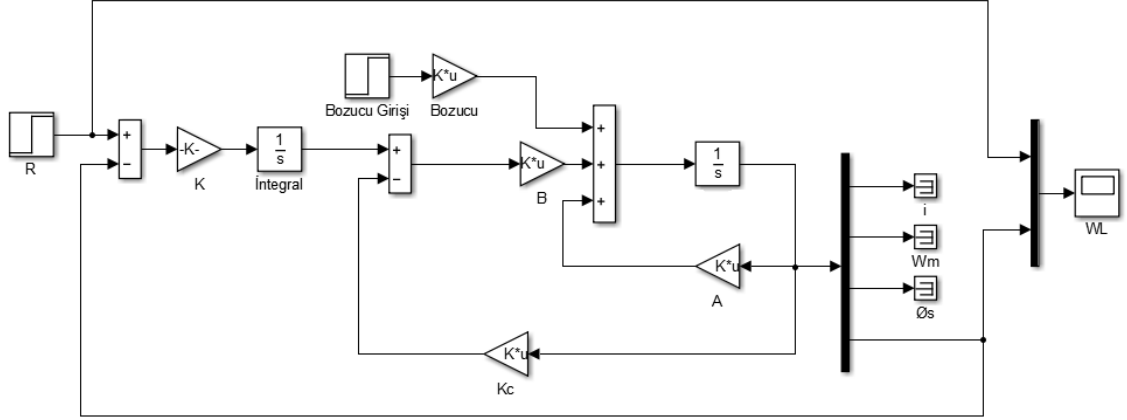
Polinom katsayıları bulunduktan sonra denklem (6.8)'in sifira eşitlenip çözülmesi ile 5.dereceden bir sistemin kökleri ( $P_5(s)$ ) kutupları ( $P_{1-2}=-92.61+-106.6i$ ,  $P_{3-4}=-50.35+-29.4i$ ,  $P_5=-47.4$ ) bulunur. Kutup atama yöntemi ile geri besleme kazancı (Kc) ve başlangıç (integral) kazancı (K) bulunur. Şekil 6.2'de deney sisteminin Matlab simulink

modeli verilmiştir. Matlab programında acker komutunun kullanılması ile yapılarak geri besleme ve integral kazancı denklem (6.9) ile bulunmuş olur.

$$\hat{K} = acker(\hat{A}, \hat{B}, [p1 \ p2 \ p3 \ p4 \ p5]) \quad (6.9)$$

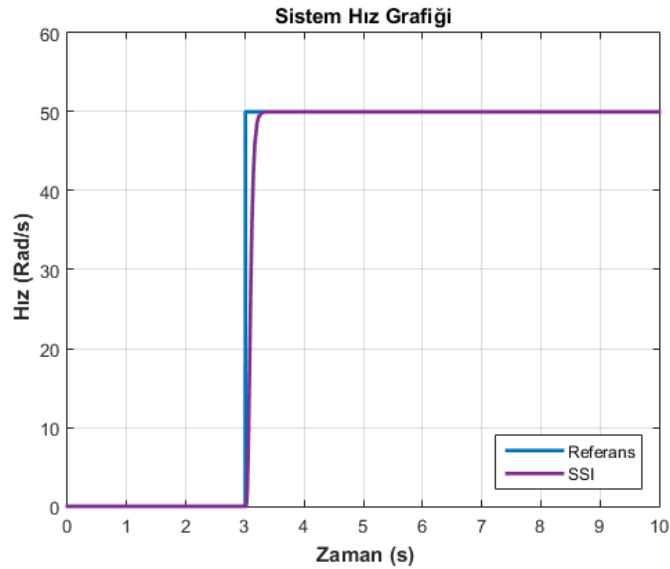
$$\hat{K} = [F_1 \quad -F_2] = [0.15 \ 0.21 \ 6.08 \ 1.15 \ -26]$$

$$F_1 = [0.15 \ 0.21 \ 6.08 \ 1.15] \quad F_2 = [-26]$$

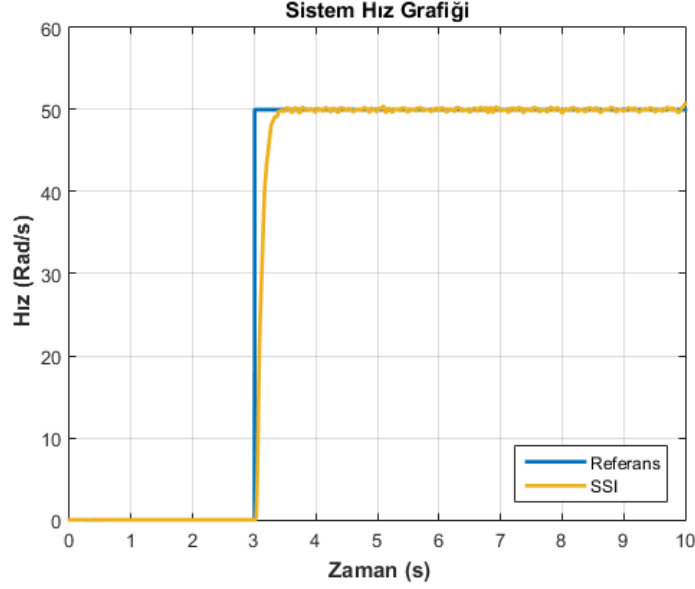


Şekil 6. 2 Durum uzayı integral kontrolü simulink modeli

Deney sisteminin açısız hız kontrolünde SSI kontrolör simülasyon grafiği Şekil 6.3'te verilmiştir. Deney sisteminin açısız hız kontrolünde SSI kontrolör deney grafiği Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6. 3 Deney sisteminin açısız hız simülasyon grafiği



Şekil 6. 4 Deney sisteminin açısal hız deney grafiği

## 6.2 Sistemin Durum Uzay İntegral Gözlemci Geri Besleme ile Hız Kontrolü

Durum uzay integral kontrolünde tüm durum değişkenlerinden veri alındığı düşünülüp hesaplamalar yapılır. Tüm durum değişkenlerinin ölçülemediği ya da ölçme cihazlarının maliyetinin fazla olduğu durumlarda gözlemci tasarlanarak çözüme gidilir. Böylelikle ölçümün sağlıklı olmayacağı elverişsiz ortamlarda, insanların hayatları için tehlikeli alanlarda veya mevsim şartlarının değişmesinden dolayı ölçümlerin değişken olduğu durumlarda daha stabil bir biçimde gözlemci üzerinden ölçüm değerleri okunabilir.

Sistemlerin kontrolü için gözlemci tasarımında durum uzay denklemlerini oluşturan A,B,C,D matrislerinden, sistemin gözlenebilirliği  $A_{n \times n}$ ,  $C_{n \times 1}$  matris çifti denklem (6.10) ile belirlenir. Denklem (6.10)'nun rank sayısı n değerine eşit ise gözlenebilirdir.

$$\begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \dots \\ \dots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

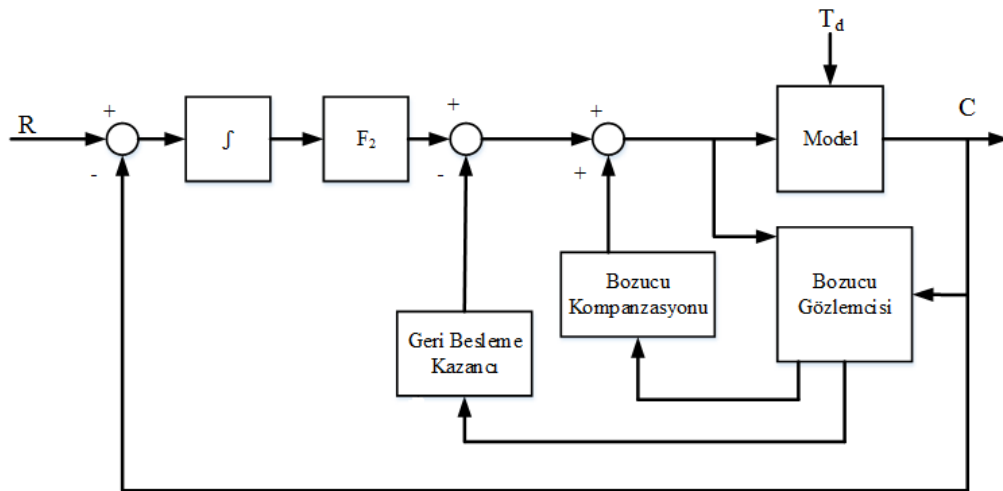
Sistemin kontrolünde integral kullanımı sistem kontrolünde kalıcı durum hatalarının oluşmasını engeller. Sisteme dışarıdan bir gürültü verildiğinde sistemin gürültüden dolayı kalıcı durum hatasına girmemesi için gürültü sisteme durum değişkeni olarak

eklenir. Böylelikle sisteme dışarıdan verilen gürültüler, sistemin kontrolünde kalıcı durum hataları oluşumu önlenmiş olur.

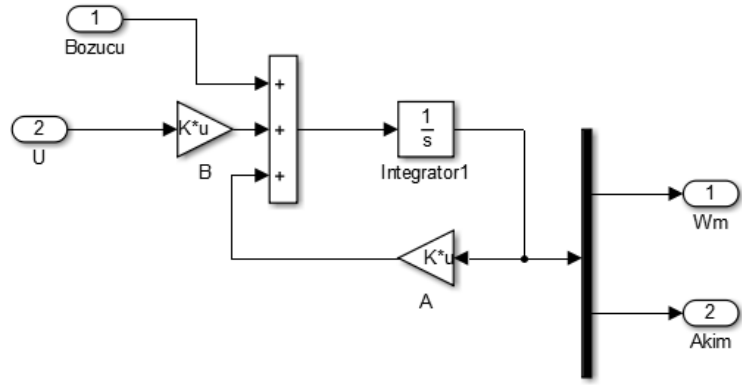
Sisteme bozucu gözlemci tasarlanırken sistem durum değişkenleri Şekil 6.5'te verildiği gibi sistem modeli ve sistemin bozucu (gürültü) gözlemcisi ayrı bir blok olarak eklenir. Sistem modelinde basitleştirmeye gidilerek DC motor gibi modelleme yapılmıştır. Denklem sistemin modeli Şekil 6.6'te ve sistemin bozucu gözlemci alt sistemi Şekil 6.7'de verilmiştir. Denklem (6.11)'da verildiği gibi sisteme uygulanacak olan bozucu tork ( $T_d$ ) matris denkleminde eklenmiş olur.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega \\ i \\ T_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J_m} & \frac{K_t}{J_m} & -\frac{1}{J_m} \\ -\frac{K_b}{L} & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W \\ i \\ T_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \hat{Y} = [C \quad 0] \hat{x} = [1 \quad 0 \quad 0] \hat{x} \quad (6.11)$$

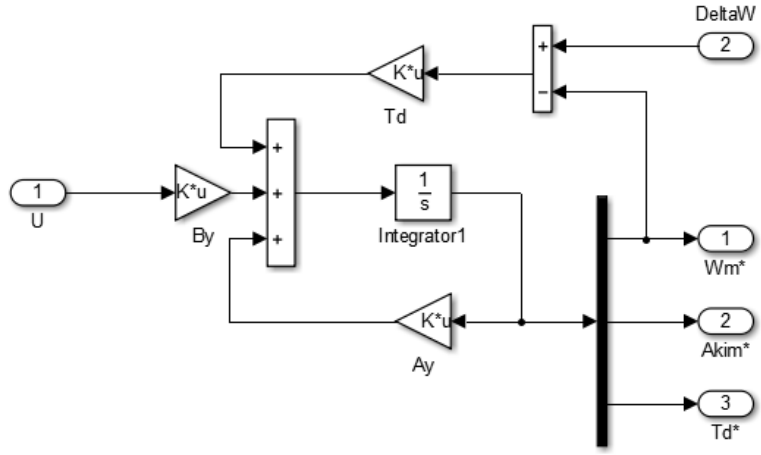
Gözlemci tasarımında kök atamaları, sistem köklerinin 2 ile 10 kat arası seçilir. Böyle bir kök atamasının yapılması gözlemcinin sistemden daha hızlı olmasını sağlamaktır. Bu sayede gözlemci istenen ölçüm çıkışlarını sağlayıp kontrol mümkün hale gelmiş olur.



Şekil 6. 5 Bozucu gözlemci durum geri beslemesi integral kontrolü blok şeması

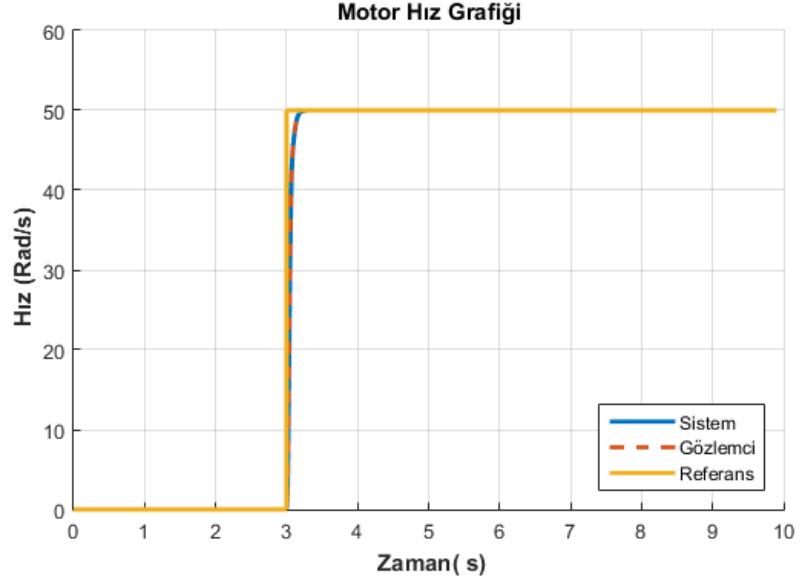


Şekil 6. 6 Sistem modeli

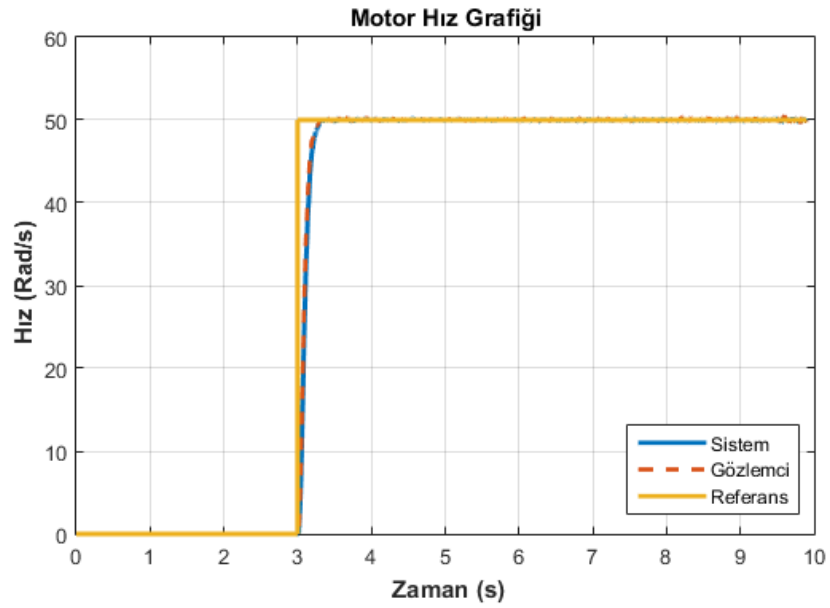


Şekil 6. 7 Bozucu gözlemci alt sistemi

Deney sistem modeli tasarlandıktan sonra gözlemciden alınan veriler simülasyon ve gerçek zamanlı deney sonuçları sırasıyla Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’da verilmiştir. Deney sistem hız çıkışı ve gözlemci hız çıkışlarının aynı olduğu görülmüştür.



Şekil 6. 8 Deney sistemin gözlemci açısal hız simülasyon grafiği

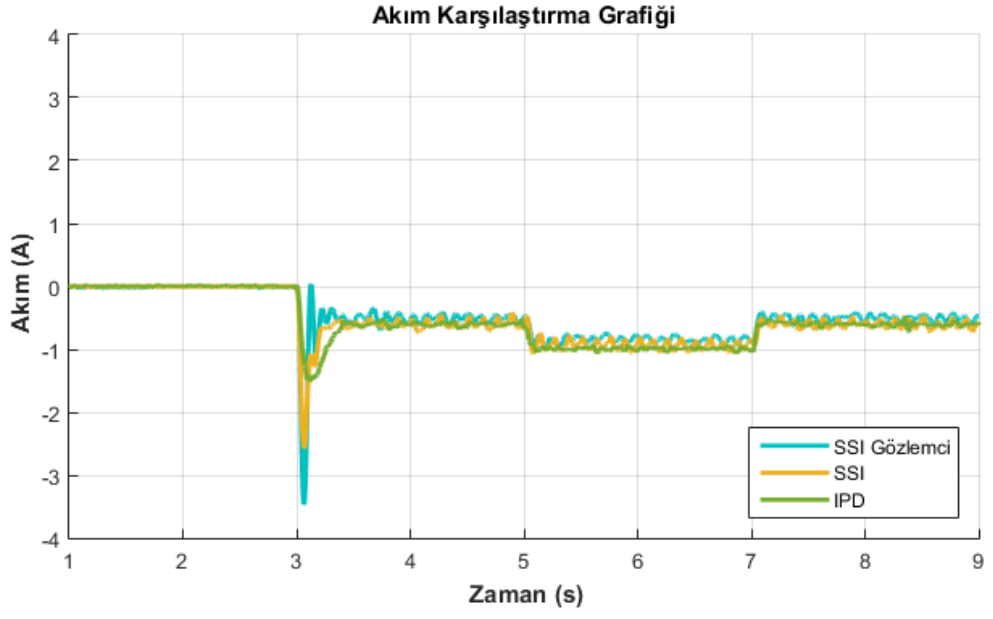


Şekil 6. 9 Deney sistemin gözlemci açısal hız deney grafiği

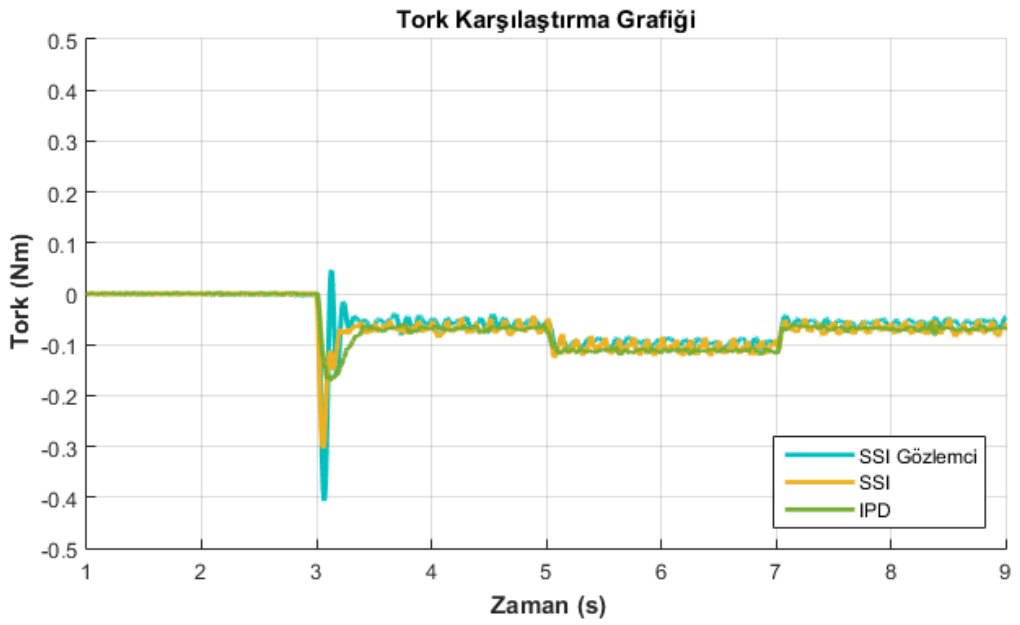


### SONUÇ VE ÖNERİLER

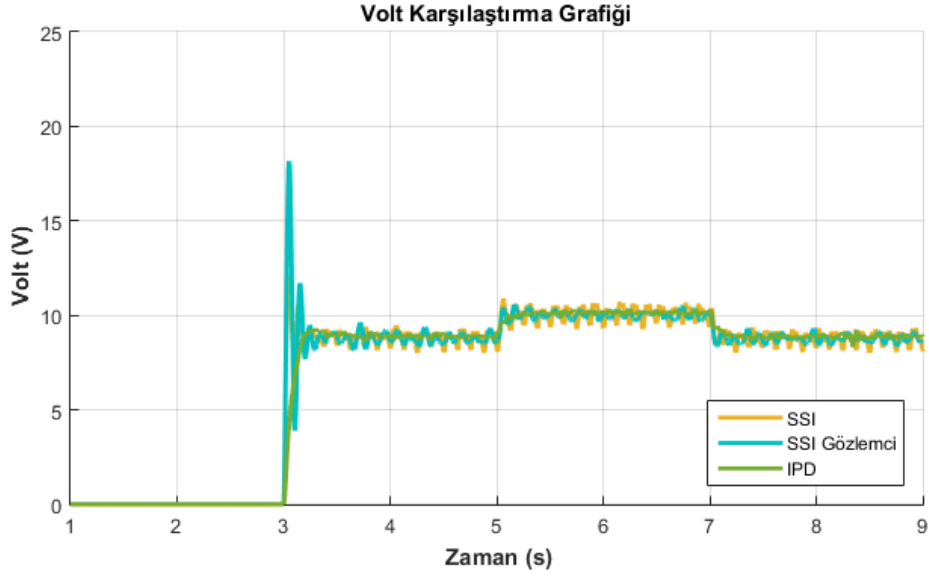
Deney sistem açışal hız kontrolü için ayrı ayrı IPD kontrolcü, durum uzay integral kontrolcüsü (SSI) ve bozucu gözlemci durum geri beslemesi integral kontrolcüsü (SSIO) tasarlanmıştır. Deney sisteminde yük olarak kullanılan motorun enkoderinden alınan hız bilgisi ve motorun akım, voltaj ve tork bilgisi alınmıştır. Bozucu gözlemcisinden tahmin edilen akım ve ölçülen akım aynı değerde olduğu için tahmin edilen akım değeri kullanılmıştır. Akım değerinin ve tork katsayısının bilinmesi ile DC motorun tork ölçümü gerçekleştirilmesiyle günümüzde pahalı olan tork sensörü kullanımına gerek kalmadan tork ölçümünü sağlamıştır. IPD, SSI ve SSIO kontrolcülerinde kullanılan akım sensöründen alınan verilerlerden elde edilen akım grafiği Şekil 7.1’de, deney sisteminde motordan alınan akım ve DC motorun tork katsayısı ile okunan torklar Şekil 7.2’de, deney sisteminde motordan çekilen voltaj Şekil 7.3’de ve deney sisteminde yük olarak kullanılan DC motorun açışal hız değerleri Şekil 7.4’te görölmektedir.



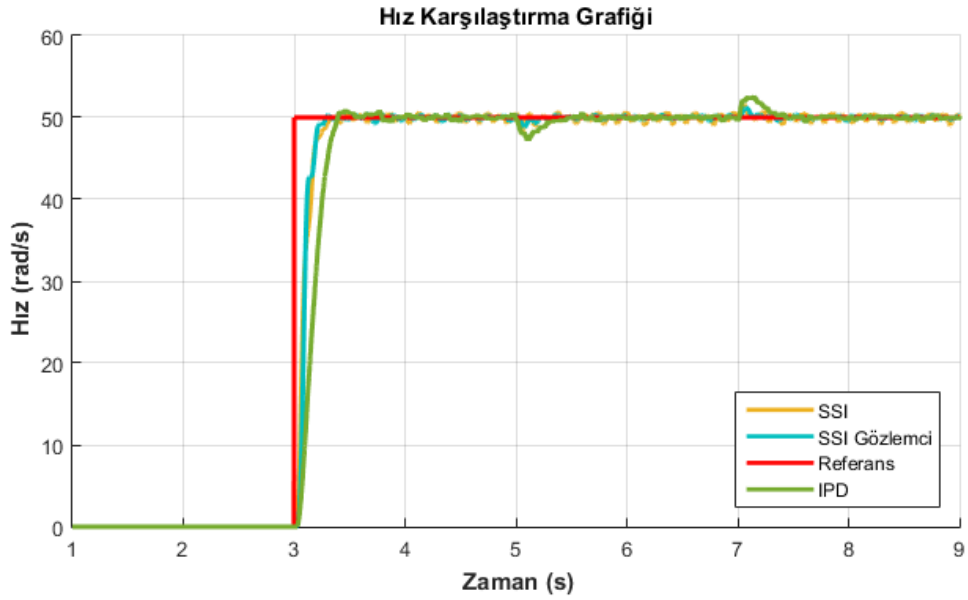
Şekil 7. 1 Kontrolcülerin akım karşılaştırma grafiği



Şekil 7. 2 Kontrolcülerin tork karşılaştırma grafiği



Şekil 7. 3 Kontrolcülerin volt karşılaştırma grafiği



Şekil 7. 4 Kontrolcülerin hız karşılaştırma grafiği

Bu tez çalışmasında, esnek kayışlı deney düzeneği öncelikle tasarımı yapılmış sonra imalat ve montajı yapılarak deney düzeneği hazır hale getirilmiştir. Sistem üzerinde mevcut olan 100W ve 140W DC motorların karakteristik değerleri ayrı ayrı yapılan deney ve ölçümlerle belirlenmiştir. Bu karakteristik değerlerin belirlenmesiyle sistemin matematiksel modellemeleri yapılarak sistemin hareket kontrolünde tasarlanacak olan kontrolcülerin hesaplanmaları yapılmıştır. Hareket kontrol uygulamalarında deney düzeneğine Katsayı Diyagram Metodu ve Manabe Formu kullanarak önce sadece DC

motora PID ve IPD kontrolcüleri tasarlanarak simülasyon ve gerçek zamanlı kontrolcü sonuçları paylaşılmıştır. IPD kontrolcünün performansının PID'den daha iyi olması nedeniyle deney sisteminde IPD kontrolcü tasarımları hız ve konum kontrolleri için yapılmış ve uygulamalı olarak deneyleri başarıyla yapılmıştır.

Sistem hız kontrolünde transfer fonksiyonu yaklaşımı ile kontrolcü tasarlanabileceği gibi durum uzay denklemleri ile de kontrolcü tasarlanabilir. Deney düzeneğinin hız kontrolünde durum uzay integral kontrolcüsü tasarlanarak simülasyon ve deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

Deney düzeneğinde kullanmış olduğumuz 140W DC motorun tork ölümlerini Durum Uzay İntegral Gözlemci Geri Besleme ile Hız Kontrolcüsü tasarlayarak motor enkoderinden ve gözlemciden alınan hız ölüm değerleri karşılaştırılmış ve gözlemcinin başarılı olduğu grlmştr. Pahalı olan tork sensörlerine alternatif olarak kullanılabilen gözlemci üzerinden alınan akım bilgisi ve tork katsayısı bilinen bir motorun tork ölümleri alınmış ve IPD, SSI ve SSIO lmleri ile karşılaştırılmıştır.

## KAYNAKLAR

---

- [1] Yüksel, İ., (2016). Otomatik kontrol sistem dinamiği ve denetim sistemleri, 10. Baskı, Dora Basım-Yayın Dağıtım Ltd. Şti., Bursa.
- [2] Özkan, B., (2009). "Mekatronik Sistemlerde Uygulanan Belli Başlı Kontrol Yöntemleri", Tübvav Bilim Dergisi, 2 (3): 302-316.
- [3] Manabe, S., (1994). "Coefficient Diagram Method", IFAC Automatic Control in Aerospace, 12-16 September 1994, California.
- [4] Hamamcı, S.E., (2002). "Zaman Gecikmeli Kararsız Sistemler için Katsayı Diyagram Metodu ile Kontrolör Tasarımı", Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6 (3): 135-142.
- [5] Manabe, S., (1998). "Controller Design of Two-Mass Resonant System by Coefficient Diagram Method", IEEJ Transactions on Industry Applications, 118 (1):58-66.
- [6] Hamamcı, S.E., (2004). "İntegratörlü sistemler için Katsayı Diyagram Metodu ile kontrolör tasarımı" , İTÜ Dergisi, 3 (6): 3-12.
- [7] Öcal, Ö., Bir, A. ve Tibken, B., (2009). "Digital Design of Coefficient Diagram Method" , American Control Conference Hyatt Regency Riverfront, 10-12 June 2009, Missouri.
- [8] Haouari, F., Nourdine, B., Boucherit, M. ve Tadjine, M., (2015). "A Coefficient Diagram Method controller with backstepping methodology for robotic manipulator" , Journal of Electrical Engineering, 66 (5):270-276.
- [9] Wu, Y., Fujikawa, K. ve Kobayashi, H., (1998). "A Torque Control Method of Two-Mass Resonant System with PID-P Controller", Advanced Motion Control, 29 June-1 July 1998, Coimbra.
- [10] Sugiura, K. ve Hori, Y., (1996). "Vibration Supression in 2 and 3 Mass System Based on the Feedback of Imperfect Derivative of the Estimated Torsional", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 43 (1): 56-64.

- [11] Szabat, K. ve Orłowska, T., (2007). "Vibration Suppression in a Two-Mass Drive System Using PI Speed Controller and Additional Feedbacks—Comparative Study", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54 (2): 1193-1206.
- [12] Meetei, V., Shimray, B. ve Malemnganbi, R., (2015). "Vibration Suppression of a 2-Mass Drive System with Multiple Feedbacks", *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5 (11): 168-175.
- [13] Li, Q., Xu, Q. ve Wu, R., (2016). "Low-frequency Vibration Suppression Control in a Two-mass System by Using a Torque Feed-forward and Disturbance Torque Observer", *Journal of Power Electronics*, 16 (1): 249-258.
- [14] Dhaouadi, R., Kubo, K. ve Tobise, M., (1993). "Two-Degree-of-Freedom Robust Speed Controller for High-Performance Rolling Mill Drives", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 29 (5): 919-926.
- [15] Shahgholian, G., (2013). "Modeling and Simulation of a Two-Mass Resonant System with Speed Controller", *International Journal of Information and Electronics Engineering*, 3 (5): 448-452
- [16] Singh, A.P., Narayan, U. ve Verma, A., (2013). "Speed Control of DC Motor using Pid Controller Based on Matlab.", *Innovative Systems Design and Engineering*, 4 (6): 22-28.
- [17] Iwasaki, M., Hiroe, T. ve Matsui, N., (1998). "Measurement of mechanical parameter two-mass resonant system using disturbance observer", *Electrical Engineering in Japan*, 118 (2): 19-29.
- [18] Erdal, H. ve Doğan, B., (2012). "DC Motor Parametrelerinin Deney Tabanlı Belirlenmesi ve Parametre Belirleme Sonuçlarının İyileştirilmesi.", *Gazi Üniv. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27 (3): 589-598.
- [19] Maxon motor ag., maxon DC motor and maxon EC motor key information, [www.maxonmotor.com/medias/sys\\_master/root/8815460712478/DC-EC-Key-Information-14-EN-42-50.pdf?attachment=true](http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/root/8815460712478/DC-EC-Key-Information-14-EN-42-50.pdf?attachment=true), 10 Ağustos 2017.
- [20] Massachusetts Institute of Technology, Understanding D.C. Motor Characteristics, <http://lancet.mit.edu/motors/motors3.html>, 9 Ağustos 2017.
- [21] Kutay, G., (2011), Sürtünmeli Kavramalar, [http://www.guven-kutay.ch/ozet-konular/14\\_04\\_Sürtünmeli\\_Kavramalar.pdf](http://www.guven-kutay.ch/ozet-konular/14_04_Sürtünmeli_Kavramalar.pdf), 15 Ağustos 2017.
- [22] Özlük, M.F. ve Sayan, H.H., (2013). "Matlab GUI ile DA Motor İçin PID Denetleyicili Arayüz Tasarımı.", *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2 (3): 10-18.
- [23] Meenakshipriya, B. ve Kalpana, K., (2014). "Modelling and Control of Ball and Beam System using Coefficient Diagram Method (CDM) based PID controller.", *Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems*, 13-15 March 2014, Kanpur.
- [24] Ertuğrul, H.F., (2014). 4 Kutuplu 3 Serbestlik Dereceli Karma Elektromıknatısın Modellenmesi ve Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [25] Erkan, K., Yalçın, B.C. ve Garip, M., (2017). "Three-axis gap clearance I-PD controller design based on coefficient diagram method for 4-pole hybrid electromagnet", *Automatika*, 58 (2): 147-167.
- [26] Comnac, V., Coman, C. ve Boldișor, A.A., (2009). "Sensorless State-Space Control of Elastic Two-Inertia Drive System Using a Minimum State Order Observer", *Scientific Bulletin of the Petru Maior University of Tirgu Mures*, 6 (23): 52-59.
- [27] Ogata, K., (2010). *Modern Control Engineering*, Fifth Edition, Pearson Education Inc., New Jersey.

## ÖZGEÇMİŞ

---

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Adem AVCU  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 12.02.1987/ Pozantı  
**Yabancı Dili** : İngilizce  
**E-posta** : ademavcu01@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU

| Derece    | Alan                | Okul/Üniversite              | Mezuniyet Yılı |
|-----------|---------------------|------------------------------|----------------|
| Y. Lisans | Makine Mühendisliği | Yıldız Teknik Üniversitesi   | 2018           |
| Lisans    | Makine Mühendisliği | Gaziantep Üniversitesi       | 2013           |
| Lise      | Sayısal             | Ali ve Rukiye Özgören Lisesi | 2004           |

### İŞ TECRÜBESİ

| Yıl       | Firma/Kurum                  | Görevi           |
|-----------|------------------------------|------------------|
| 2015-2017 | Bogaziçi Beton San. Tic. Aş. | Makine Mühendisi |



## **YAYINLARI**

### **Makale**

1. Avcu, A., Bozkurt, A.F., Erkan, K., Sezer, S. ve Kurt, İ., (2018). "Comparison of IPD and Fuzzy Logic Velocity Control In Two Degree of Freedom DC Motor System", International Journal of Engineering Science and Application (IJESA), 2 (1): 1-7.